

低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの
耐久性に関する基礎的研究

大分大学大学院工学研究科
博士後期課程
博士論文

2012年3月

秋吉善忠

低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する基礎的研究

Fundamental Research on Durability of Concrete Using Low Quality Recycled Coarse Aggregate

-目次-

第 1 章 序論

1.1 研究の背景および目的	1
1.2 論文の構成	4

第 2 章 再生コンクリートに関する既往の研究

2.1 はじめに	7
2.2 再生骨材に関する動向	7
2.2.1 コンクリート塊の発生量と骨材需要	7
2.2.2 再生骨材に関する JIS 規格と現状の課題	8
2.3 再生コンクリートの特性	12
2.3.1 フレッシュ性状	12
2.3.2 圧縮強度	13
2.3.3 ヤング係数	19
2.3.4 乾燥収縮	21
2.3.5 中性化	27
2.3.6 凍結融解	30
2.4 再生骨材の ASR とフライアッシュの抑制効果	36
2.5 再生コンクリートの品質評価手法に関する研究	40
2.5.1 相対品質法	40
2.5.2 骨材性能評価システム	40
2.6 まとめ	42

第 3 章 CfFA を混入した再生コンクリートの耐久性

3.1 はじめに	49
3.2 実験計画	50
3.3 実験方法	52
3.3.1 使用材料および調合	52
3.3.2 供試体作製方法	60
3.3.3 試験方法	60
3.4 実験結果	67

3.4.1	フレッシュ性状	67
3.4.2	強度性状	71
3.4.3	ヤング係数	80
3.4.4	乾燥収縮	82
3.4.5	中性化	90
3.4.6	凍結融解	94
3.4.7	ASR	98
3.5	まとめ	106
第4章	再生コンクリートの圧縮強度予測手法の提案	111
4.1	はじめに	111
4.2	再生コンクリートの圧縮強度予測式の構築	111
4.2.1	基本理念	111
4.2.2	使用データの概要	112
4.2.3	材齢28日における圧縮強度の予測式	113
4.2.4	強度発現性に関する予測式	117
4.3	提案する予測手法の妥当性	119
4.3.1	使用データの概要	119
4.3.2	材齢28日における圧縮強度予測式の検証	120
4.3.3	強度発現性に関する予測式の検証	123
4.4	まとめ	125
第5章	再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式の提案	127
5.1	はじめに	127
5.2	再生コンクリートの乾燥収縮	128
5.3	予測式の構成	129
5.4	終局乾燥収縮ひずみの予測式の構築	131
5.4.1	終局ひずみの推定	131
5.4.2	終局ひずみと各影響因子の関係	133
5.4.3	収集データの概要	136
5.4.4	重回帰分析	138
5.5	予測式の適合性	141
5.6	まとめ	143
第6章	低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲	147
6.1	はじめに	147
6.2	適用範囲の検討	147
6.2.1	乾燥収縮	149

6.2.2 中性化	153
6.2.3 凍結融解	156
6.3 まとめ	158
第 7 章 結論	161
7.1 本研究のまとめ	161
7.2 今後の課題と展望	165
付録	167
低品質再生粗骨材のコンクリート製品への適用性について	
付-1. 製品工場における試験練り	167
付-2. コンクリート製品の試作	177

第1章

序論

1章 序論

1.1 研究背景および目的

鉄筋コンクリート建築物が建設されてから解体されるまでの年数を推計した調査によると、我が国では、築後40年が経過した付近にピークがあり、現在、昭和30年代の高度経済成長期に建設された多くの建築物が解体時期にさしかかっていることになる。今後、解体工事・改修工事から排出されるコンクリート塊が飛躍的に増大することは避けられない。

この対策としては、昭和49年度に「コンクリート解体物の再利用に関する研究」が建設業界を中心に行われたのをはじめとし、建設省総合技術開発プロジェクト（総プロ）の「産業廃棄物の建設事業への利用技術の開発」（昭和56～60年度）や「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」（平成4～8年度）などが実施されてきた。また、平成13年には建設リサイクル法が施工され、建設業が再資源化を推進すべき指定副産物としてコンクリート解体材が指定されたこともあって、再生コンクリートの利用促進を図ることを目的に、再生骨材のJIS規格化が推進された。その結果、2005年には再生骨材の製造において高度な処理が施され、コンクリート用砕石の品質基準の範疇に入る再生骨材H（高品質）が、翌2006年には簡易コンクリートを用いた再生骨材L（低品質）がJIS化された。さらに、翌2007年には、高度処理までは行わないまでも、モルタルやペーストの付着をある程度認めた中程度の処理を施した再生骨材M（中品質）のJIS規格が制定されるに至っている。表-1.1.1に再生骨材の品質規格・基準^{1.1)}の流れを、表-1.1.2に再生粗骨材のJIS規格値を示す。

表-1.1.1 再生骨材の品質基準・規格の流れ^{1.1)}

年代	再生骨材の品質基準・規格	発行・公表元
1994年	技術調査室通達(平成6年第88号) 「コンクリート副産物の再利用に関する 用途別暫定品質基準(案)」	建設省
1999年	建築構造用再生骨材認定基準 (新建築技術認定)	(財)日本建築センター
2000年	標準情報 TR A 0006 再生骨材を用いたコンクリート	通商産業大臣
2002年	プレキャスト無筋コンクリート用 再生粗骨材の品質規格(案)	(社)日本コンクリート 工学協会北海道支部 リサイクル研究委員会
	再生粗骨材を用いたプレキャスト無筋コンクリート 及びその材料と製造に関する規格(案)	
2005年3月	JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H	(財)日本規格協会
2005年6月	電力施設解体コンクリートを用いた 再生骨材コンクリートの設計施工指針(案)	土木学会
2006年3月	JIS A 5023 再生骨材 L を用いた再生骨材コンクリート	(財)日本規格協会
2007年3月	JIS A 5022 再生骨材 M を用いた再生骨材コンクリート	(財)日本規格協会

表-1.1.2 再生粗骨材の JIS 規格値

種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	すり減り 減量(%)	粒形判定 実積率(%)	微粒分量 (%)	不純物量 (%)
H	2.5 以上	3.0 以下	35 以下	55 以上	1.0 以下	3.0 以下
M	2.3 以上	5.0 以下	—	—	1.5 以下	—
L	—	7.0 以下	—	—	2.0 以下	—

再生骨材の JIS 規格が整備された状況にあるが、再生骨材を用いたコンクリートの施工実績は少ない現状にある。その理由として、高度処理が必要な再生骨材 H は、原コンクリートの 20~30%程度の粗骨材しか製造できず、さらに、骨材に付着したモルタル分やセメントペースト分を除去したのちの微粒分の処理に困窮することになり、結果的に製造コストのアップに繋がるからである。また、ユーザー側が再生骨材の使用を敬遠しているという現状もその一つの理由として挙げられ、再生骨材 M の場合もほぼ同様な問題を抱えていると言える。したがって、コンクリート塊の大半は道路用路盤材や埋め戻し材として再利用されており、限られた範囲でコンクリート用再生骨材が製造されているのが実状である。しかしながら、公共事業が減少傾向にあることを踏まえると、路盤材としての需要増は期待できない。また、首都圏では、今後、コンクリート塊の発生量は急増し、2035 年にはピークに達すると推定されており、現行の路盤材需要が維持されたとしても、600 万トン以上の余剰量となり、このままでは廃棄処分を繰り返すことになる^{1.2)}。さらに、近い将来には良質な天然骨材の資源枯渇は避けられないことが指摘されており、いずれは再生骨材がコンクリート用骨材として一般的に使用されるようになるものと推察される。

以上の背景を踏まえて、低品質な再生骨材 L をコンクリート用骨材として活用する具体的な方法を提案することがコンクリート塊の用途開発に繋がると考えた。その際、簡易コンクリートとして利用するとはいえ、コンクリートの品質の確保は重要な点であり、強度はさることながら、収縮や凍結融解、アルカリシリカ反応（以下、ASR）などの耐久性についても十分に検討しておくことが必要である。特に、再生骨材の製造において、起源となる原コンクリートの素性は不明であることが一般的で、ASR に対する予防的な対策を講じる必要がある。従来、ASR に対しては、フライアッシュのポゾラン反応によってコンクリート中のアルカリ成分を低減させることが効果的であるとされている。フライアッシュは石炭火力発電所から排出される産業副産物であり、粒子が球形の微粉末であることから、流動性の向上や材料分離抵抗性の向上などフレッシュ性状の改善効果が期待できるものである。しかしながら、フライアッシュ中に含まれる未燃カーボンが AE 剤を吸着してしまうことから空気量の変動が大きくフレッシュ性状の管理が難しいことが、その普及を妨げている。本研究室で開発した高品質フライアッシュ（Carbon-free Fly Ash、以下 CfFA）は未燃カーボン量を 1%以下に削減することでその問題を解決している^{1.3)}。

以上より、本研究では、CfFA を混入することを前提にした低品質再生骨材を用いたコンクリート（以下、再生コンクリート）の実用化を目指し、その調合設計法を確立する

ための基礎的な資料を得ることを目的として実験的に検討を行った。実験では、低品質再生粗骨材および CfFA の使用がコンクリートのフレッシュ性状、強度性状、並びに耐久性に及ぼす影響を調べた。耐久性に関しては、中性化抵抗性、乾燥収縮、耐凍害性および ASR について実験を行った。また、圧縮強度に関しては、再生粗骨材の吸水量がコンクリートの圧縮強度に影響を与えているという観点から、実験で得られたデータを用いて、再生コンクリートの圧縮強度の予測手法について検討を行い、実用的で汎用性のある予測手法の提案を目指して検討を行った。さらに、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみに関して、実験データおよび既往の研究データを用いて、日本建築学会式で提案されている乾燥収縮ひずみ予測式の再構築を試みた。最後に、以上の一連の実験、並びに既往の研究から得られた成果を整理し、再生コンクリートの適用範囲を示した。

1.2 論文の構成

本論文は、低品質再生粗骨材を用いた CfFA 混入コンクリートの調合設計法の確立を目指して、再生コンクリートのフレッシュ性状、強度性状ならびに耐久性に関して基礎的な資料を得るために実験的に検討を行ったものであり、以下の7章から構成されている。

第1章「序論」においては、研究の背景および目的ならびに論文の構成について述べる。

第2章「再生コンクリートに関する既往の研究」においては、日本国内外における再生コンクリートに関する技術と実用化の現状について述べるとともに、再生コンクリートの各性状について普通コンクリートの場合と比較して既往の研究をまとめる。次いで、再生骨材使用時に特に懸念される ASR に対するフライアッシュの抑制効果について得られている成果をまとめる。さらに、再生コンクリートの品質管理手法について既往の研究で提案されている方法を整理し、最後に再生骨材使用に関わる現状の課題を明らかにし本研究の位置づけを行う。

第3章「CfFA を混入した再生コンクリートの耐久性」では、CfFA を混入した再生コンクリートの特性を把握し、調合設計法の確立に必要なデータの蓄積を目指して実験を行う。コンクリートの特性として、フレッシュ性状、強度性状および乾燥収縮、中性化抵抗性、耐凍害性、ASR などの耐久性を調べる。実験は2つに大別され、実験Ⅰでは、九州内の佐賀、大分および沖縄の3箇所のレディーミクストコンクリート工場において再生粗骨材および CfFA を用いたコンクリートの試験練りを行い、再生コンクリートの基礎的な性状を調べる。実験Ⅱでは、再生粗骨材の品質として特に吸水率に着目し、その吸水率の違いがコンクリートの各性状に及ぼす影響を把握することを目的として実験を行う。また、再生粗骨材の置換率、CfFA 混入率、再生粗骨材の前処理として水による洗浄の有無の違いによる影響を調べる。

第4章「再生コンクリートの圧縮強度予測手法の提案」では、第3章で得られた結果を基に、再生粗骨材の吸水量がコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼしているという観点から、実用的でかつ汎用性のある再生コンクリートの圧縮強度の予測手法について検討する。予測式の構築では、まず、実験Ⅰで得られた生コンクリート工場における実験データを用いて、普通骨材用いた基準コンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係式に基づいて、再生粗骨材および CfFA の影響を考慮した見かけのセメント水比によって再生コンクリートの圧縮強度の予測が可能であるか検討する。次いで、提案する予測手法の妥当性について、実験Ⅱで得られた数種類の再生粗骨材を用いた再生コンクリートの実験データを用いて検討する。

第5章「再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測」では、第3章で得られた実験データ、および既往の研究から収集した実験データを用いて、日本建築学会式で提案されている乾燥収縮ひずみ予測式の再構築を試みる。予測式の構築では、コンクリートの乾燥収縮ひずみの進行度は終局乾燥収縮ひずみに時間関数を乗じたもので表せるものと仮定し、終局乾燥収縮ひずみに及ぼす再生コンクリートの材料および調合上の影響因子について検討する。次いで、それらの影響因子を説明変数とし、終局乾燥収縮ひずみを目的変数

とした重回帰分析によって予測式を導く。その結果、得られた予測式と、従来の建築学会式を用いて予測した乾燥収縮ひずみの予測精度について比較検討し、提案式の妥当性を検証する。

第6章「低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲」では、一連の実験による結果と既往の研究成果を整理し、低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの留意点と適用範囲を示す。

第7章「結論」では各章で得られた成果をまとめるとともに、今度の課題について述べる。

【参考文献】

- 1.1) 耐寒材料チーム：コンクリート用再生骨材の品質基準・規格について，寒地土木研究所月報，pp.56-62，No.642，2006.11
- 1.2) 立屋敷 久志：JIS A 5201（再生骨材 H）の製造技術，コンクリート工学，pp.62-66，Vol.46，2008
- 1.3) 李相培ほか：改質石炭灰（CfFA）を用いたコンクリートの特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.213-218，2008

第2章

再生コンクリートに関する既往の研究

2章 再生コンクリートに関する既往の研究

2.1 はじめに

本章では、日本国内における再生骨材に関する動向、および再生コンクリートに関する技術と実用化の現状について述べるとともに、再生コンクリートの各性状について普通コンクリートの場合と比較して既往の研究をまとめる。次いで、再生骨材使用時に特に懸念される ASR に対するフライアッシュの抑制効果について得られている成果をまとめる。さらに、再生コンクリートの品質管理手法について既往の研究で提案されている方法を整理し、本研究の位置づけを行う。

2.2 再生骨材に関する動向

本節では、日本国内における再生骨材に関する動向、および再生コンクリートに関する技術と実用化の現状について述べる。

2.2.1 コンクリート塊の発生量と骨材需要

図-2.2.1 にコンクリート廃棄量と骨材需要の推計を示す。高度経済成長期に建設された各種構造物の供用年数が終了し、コンクリート解体量が増加すること、路盤材を大量に使用する新規の大型事業が整備完了し、道路用骨材需要量が減少することから、近い将来コンクリート解体量が道路用骨材需要を上回ることが予想されている^{2.1)}。したがって、現在の再生路盤材としての利用だけではコンクリート塊のリサイクルは行き詰まるため、コンクリート用骨材としての利用を普及させる必要があると考えられる。

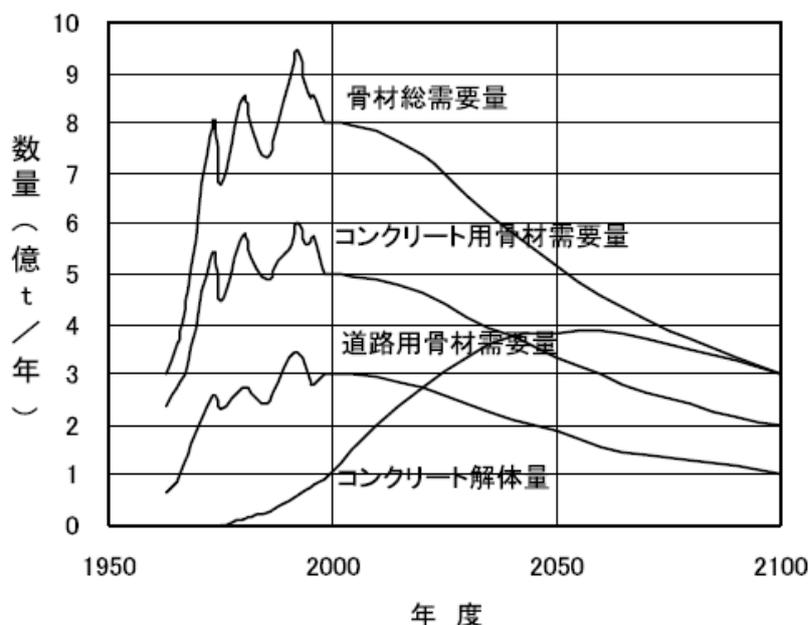


図-2.2.1 コンクリート廃棄量と骨材需要の推計^{2.1)}

2.2.2 再生骨材に関する JIS 規格と現状の課題

本項では、再生骨材の JIS 規格の概要について簡単に述べるとともに、各品質で再生骨材の特徴、課題を整理し、再生骨材コンクリートの実用化に関する現状について述べる。

(1)再生骨材の JIS 規格の概要

表-2.2.1 に再生骨材の種類とその概要について経済産業省からの抜粋されたもの^{2.2)}を示す。現在、JIS において再生骨材は高品質、中品質、低品質の 3 種類に分類され規格されている。高品質である再生骨材 H の規格は、解体建物に対し、破碎、摩砕等の高度な処理を行って骨材としての品質を向上させた一般用途のコンクリートに用いる再生骨材を対象としており、再生骨材 H は一般用途のコンクリートと同様に扱われるものとなっている。

中品質である再生骨材 M の規格は、解体コンクリート塊に対する破碎、摩砕等を比較的簡易な方法で行って製造した再生骨材を利用し、乾燥収縮や凍結融解の影響を受けにくい部材に用いることを想定した再生骨材コンクリートを対象としており、その主な用途は、杭、耐圧版、基礎梁、鋼管充填コンクリートなどとされている。

本研究で対象としている低品質である再生骨材 L の規格は、解体コンクリート塊を破碎して製造した再生骨材を利用し、比較的低強度の用途に用いることを想定した再生骨材コンクリートを対象としたものとなっており、その主な用途は、捨てコン等、高い強度・高い耐久性が要求されない箇所での利用に限定されている。

表-2.2.1 再生骨材の種類^{2.2)}

種類	(高品質)再生骨材H	(中品質)再生骨材M	(低品質)再生骨材L
JIS番号・名称・制定時期	JIS A 5021(コンクリート用再生骨材H) 平成 17 年 3 月 20 制定	JIS A 5022(再生骨材Mを用いたコンクリート) 平成 19 年 3 月 20 日制定	JIS A 5023(再生骨材Lを用いたコンクリート) 平成 18 年 3 月 25 日制定
JISの性格	・解体コンクリート塊に対し、破碎、摩砕等の高度な処理を行って骨材としての品質を向上させた一般用途のコンクリートに用いる再生骨材の規格 ・JIS A5308 に引用されることを目標とした再生骨材規格	・解体コンクリート塊に対する破碎、摩砕等を比較的簡易な方法で行って製造した再生骨材を利用し、乾燥収縮や凍結融解の影響を受けにくい部材に用いることを想定した再生骨材コンクリート規格 ・再生骨材 M の品質は附属書として規定	・解体コンクリート塊を破碎して製造した再生骨材を利用し、比較的低強度の用途に用いることを想定した再生骨材コンクリート規格 ・再生骨材 L の品質は附属書として規定
主な用途	・一般用途のコンクリート	・杭、耐圧版、基礎梁、鋼管充填コンクリートなど	・捨てコン等、高い強度・高い耐久性が要求されない用途

図-2.2.1 に再生骨材の種類ごとの JIS を示す。このように、再生骨材 H はレディーミクストコンクリート工場において製造可能なものとされているが、再生骨材 M および L については、JIS A 5308 からは独立したものとして作成されており、再生骨材 M および L を用いたコンクリートを本体にして、各再生骨材の品質を付属書として規定している。

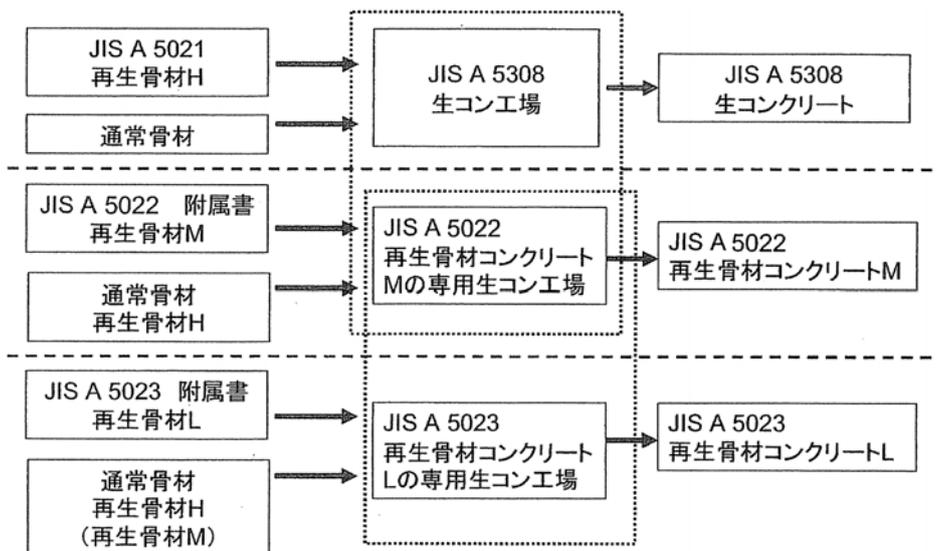


図-2.2.1 再生骨材の種類ごとの JIS^{2.3)}

(2) 高品質再生骨材(H)(JIS A 5021)^{2.4)}

再生骨材と普通骨材の違いは、骨材周辺に古いモルタル分が付着しているかないかという点にある。付着したモルタルの量や品質はコンクリートの品質に悪影響を及ぼすことから、コンクリート塊をジョークラッシャーで一次破碎したものに高度な処理を施して再生骨材の品質を向上させる技術が開発されている。表-2.2.2 に代表的な「高度処理」の概要と特徴を示している^{2.1)}。

表-2.2.2 高度処理の種類^{2.1)}

方法	概要	特徴
加熱擦り揉み方式	コンクリート塊を約 300℃で加熱処理し、付着モルタルを脆弱化させた状態で擦り揉み効果を与えて分離	・付着モルタルの剥離が容易 ・原骨材の破損が小さい
偏心ロータ方式	偏心回転する筒にコンクリート塊を投入し、コンクリート塊同士の擦り揉み効果で付着モルタルと分離	・原骨材の破損を抑制できる
機械式擦り揉み方式	仕切り板を有するドラム内に剛球を充填し、コンクリート塊を投入して仕切り板を回転させることで付着モルタルと分離	・ドラム内に水を注入することで湿式でも製造可能
湿式選別方式	ミル内のクロスヘッド部を回転させコンクリート塊のモルタル分を除去し、ジグで流水による	・一定比重を満たさなければ繰り返し剥離処理できる
スクリー摩擦方式	コンクリート塊を回転するスクリーによって擦り揉み処理し、付着モルタルを分離	・1回では品質が確保されず複数回の処理が必要

高品質再生骨材の製造では、「コスト」、「骨材の回収率」、「品質の確保」の3点が重要となってくる。特に、コストと品質の確保の両立は原則的には困難である。すなわち、高度処理は、骨材の周りに付着するセメント分を摩擦処理などにより除去するシステムであることから、破碎処理だけの路盤材に比べ、エネルギー消費量が多く、処理コストが高くなる。また、骨材収率の低下とそれに伴い発生する微粉末の処理が問題となる。このようなことから、経済産業省^{2.5)}は、コンクリートの循環利用の必要性は理解できても、現実的に

は流通可能な経済性を確保しなければ実用化できないと考え、その方策として、経済産業省はコスト削減の推進と循環利用に充当する費用を明確にすることが必要であるとし、コスト削減方策は、処理能力の拡大や既存設備の有効利用を図るとともに、コスト削減の技術開発を加速させることが重要であるとしている。また、再生骨材を積極的に利用していく意識を定着させることが重要であるとしている。

さらに、再生骨材の利用に対する障壁として、複数の現場を起源とする原コンクリートから製造した再生骨材 H は、原骨材の特定が困難でアルカリシリカ反応性 B 区分が大半であるにも関わらず、現在のレディーミクストコンクリート工場からは B 区分の骨材を使用したコンクリートがほとんど流通していない点が挙げられており、今後は、B 区分の骨材に対して、現実的に運用可能なアルカリシリカ反応抑制策を整備するとともに、B 区分の再生骨材 H を積極的に利用することが不可欠であることを述べている。

上記より、再生骨材 H の利用普及は、その経済性などの問題から発展途上にあり、再生骨材 L または M を用いたコンクリートの利用拡大も並行して推進することが望ましいといえる。また、再生骨材の品質に関わらず、アルカリシリカ反応性に対する対策が必要不可欠であることが分かる。

(3) 中品質再生骨材 (M) (JIS A 5022)^{2,3)}

JIS 規格では、再生骨材 M は次のように説明されている。

再生骨材 M とは、再生骨材 H と L の間の品質の溝を埋めるもので、高品質再生骨材のようにその製造に高度な処理を必要とせず、経済的に製造が可能なものである。再生骨材 H は、普通骨材なみの用途の広さをもつ一方で微粉の増加を招き、その処理に困難な面があるが、再生骨材 M では微粉の増加をある程度抑制できる。また、再生骨材 M を用いたコンクリートは、再生骨材 L を用いたコンクリートよりも品質が高く、用途を制限すれば構造用コンクリートとしての適用可能性をもっている。

再生骨材コンクリート M の場合、強度特性および耐久性等の品質は、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) のコンクリートよりも劣る。しかし、強度低下の影響は配合によって調整可能なため、問題となるのは耐久性の低下であり、その中でも乾燥収縮の増大と、原コンクリートが非 AE コンクリートである場合の耐凍害性の低下が特に懸念されている。また、耐凍害性に関しては、低品質な再生骨材が混入している場合には、それが少量であっても顕著な低下を招く恐れがあることを述べている。したがって、再生骨材 M を用いたコンクリートは乾燥収縮および凍結融解を受けにくい地下構造物などに適用されることが望ましい。なお、凍害危険地域での直接凍害を受ける部位への再生骨材コンクリート M の使用は、現時点では想定されていない。ただし、これらの用途はあくまでも推奨であり、新たな技術開発による用途拡大の可能性を妨げるものではないことを付記している。

以上のような特徴を持った再生骨材 M であるが、その実績は乏しく、再生骨材 M はほとんど製造されていない現状にあることから、その普及のためには、主として不特定の現場から発生するコンクリート塊から製造される再生骨材の品質を管理・保証することが肝要であるとしている。

(4) 低品質再生骨材(L)(JIS A 5023)^{2.6)}

本研究で対象としている再生骨材 L は、主としてコンクリート構造物を解体した際に生じるコンクリート塊をクラッシャーなどで破碎して製造した、高度処理を施していないコンクリート用の骨材であり、再生骨材 H とは明確に区別されている。すなわち、この規格は多くのエネルギー及びコストをかけることなく有効に使える範囲に再生骨材コンクリートの用途を限定することを基本に組み立てられたものとしている。

再生骨材 L の全骨材に占める割合については JIS 本体には規定されておらず、少量でも再生骨材 L をわずかに使用したものは再生骨材コンクリート L と規定される。これは、品質の劣る再生骨材 L をわざわざ JIS A 5308 付属書 1 (規定) に適合する粗骨材に混合して、それらの骨材を用いたコンクリートを限定的な用途に使用する可能性は少ないとの意見などが出されたことによる。配合について、要求品質を満たすコンクリートの配合の決定は、生産者に任されているが、コンクリートの強度および耐久性が大きく低下しないように、水セメント比の最大値は 65% と規定されている。

再生骨材を用いたコンクリートでは、圧縮強度として $20\sim 30\text{N/mm}^2$ 程度を出すことは難しくないが、耐凍害性等の耐久性を普通のコンクリートと同等のレベルまで上げるのは難しいとされている。また、再生骨材 L は不特定多数のコンクリート構造物を解体したコンクリート塊から破碎して造られること、並びに再生粗骨材 L に付着したモルタル分がかなり残ることなどから、アルカリシリカ反応については十分な注意が必要とされている。このアルカリシリカ反応に対する対策方法は、再生骨材コンクリート L と M で若干異なるが、この点に関しては後述する。

再生骨材コンクリート L の塩害に関しては、再生骨材の原骨材の粒子に付着するセメントペーストには、塩化物イオンが含有されている可能性ある。これにはコンクリートの構成材料であるセメント、骨材、混和材料からもたらされるものと、飛来塩分によって外部からもたらされるものが考えられている。硬化したセメントペーストからの塩化物イオンの溶出について検討した結果 ^{2.7~2.9)} によると、常温での溶出条件では全塩化物イオン量の 4 分の 1 程度が溶出するに過ぎない。すなわち、フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度の試験方法では、コンクリート中の塩化物量を過小評価することとなる。このため、海砂を使用した場合などで硬化したセメントペースト中に塩化物が多く含まれているおそれのある再生骨材を使用する場合には、セメントの全塩化物量および再生骨材の全塩化物量の 4 分の 1 が溶出すると仮定し、再生骨材コンクリート L の塩化物含有量を算定することとしている。

以上のように、再生骨材 L に関しては、その利用範囲がかなり限定されている現状にあるが、再生骨材 H は経済性に関する問題が、再生骨材 M はほとんど実績がないという問題があり、コンクリート塊のコンクリート用骨材としての利用は普及していない。コンクリート塊の大半が再生路盤材として利用されているという現状を考慮すると、これらの簡易処理を施した低品質再生骨材のコンクリート用骨材としての利用範囲の拡大を図ることが望ましいと考える。

2.3 再生コンクリートの特性

本節では、再生コンクリートの各性状として、フレッシュ性状、圧縮強度、とりわけ乾燥収縮、中性化、凍結融解などの耐久性について普通コンクリートのものと比較して既往の研究をまとめる。

2.3.1 フレッシュ性状

コンクリートの乾燥収縮や中性化などに対してはコンクリート組織を緻密にすることが有効とされているが、その一つの方法として、コンクリートの単位水量を小さくことが挙げられる。ここでは、再生コンクリートのフレッシュ性状として、普通コンクリートと同等なスランプを得るのに必要な単位水量について調べている既往の研究に関して述べる。

片平は、1981～1997年の間に10箇所の大学、研究機関等で実施された試験結果^{2.10～2.23)}についてデータを収集しており、再生コンクリートの特性について検討を行っている^{2.24)}。その結果、天然砂利が再生粗骨材に置き換わった場合のコンクリートの単位水量の変化を図-2.3.1のように示している。図中の矢印で結ばれた○と●は、骨材の種類以外の配合条件が同じ配合同士であり、天然骨材の結果を○、再生骨材の結果を●で示したものとなっている。したがって、これらの点を結ぶ矢印の勾配は天然骨材が再生骨材に置き換わることによる単位水量の変化を示すものである。これによると、天然砂利が再生粗骨材に置き換わった場合（左図）にはやや単位水量が増加する傾向が認められているが、碎石が再生粗骨材に置き換わった場合（右図）には、ほとんど変化は認められず、再生粗骨材の使用による影響は見られない。天然砂利を再生粗骨材に置き換えた場合に単位水量が増加する理由としては、粒子形状の違い、すなわち天然骨材は丸みを帯びているのに対し、再生粗骨材は原コンクリートを砕いて製造することから粒子形状が角張っていたことが原因として考えられている。したがって、適度な粒度分布の再生骨材を使用した場合のコンクリートの単位水量は碎石を使用した場合と同程度と考えられている。

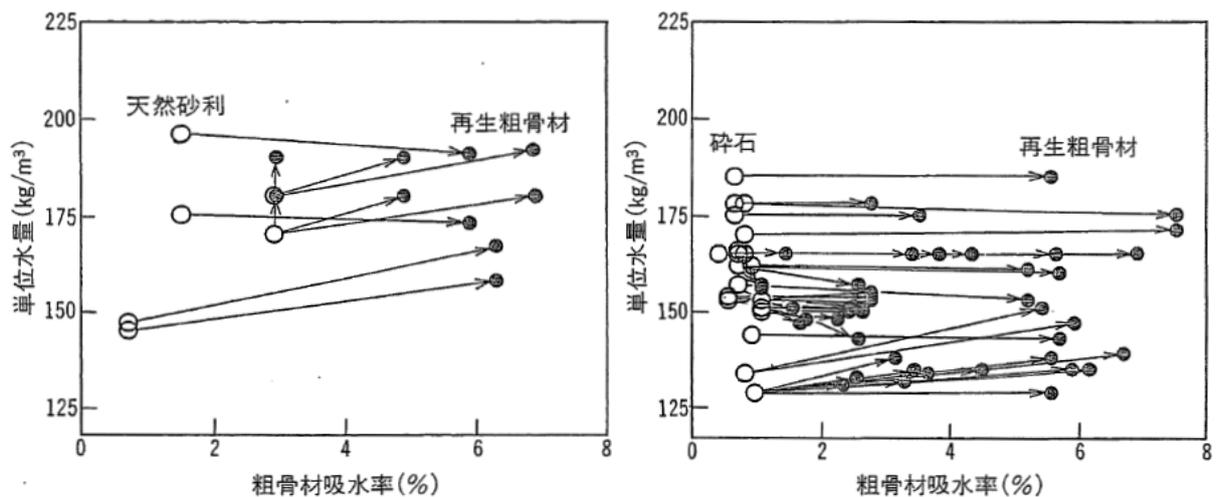


図-2.3.1 普通粗骨材を再生粗骨材に置き換えた場合の単位水量の変化^{2.24)}

(左図:○天然砂利、●再生粗骨材 右図:○碎石、●再生粗骨材)

2.3.2 圧縮強度

再生コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートに比べて小さくなることが一般的である。これは、海外における既往の研究においても明らかにされていることであり、再生骨材を使用することによるコンクリートの強度低下率は 5~32%とばらつきが大きい、平均すると約 2 割程度のようなものである^{2.25~2.34}。図-2.3.2 に材齢 28 日における原コンクリートと再生コンクリートの圧縮強度の関係の一例を示す。

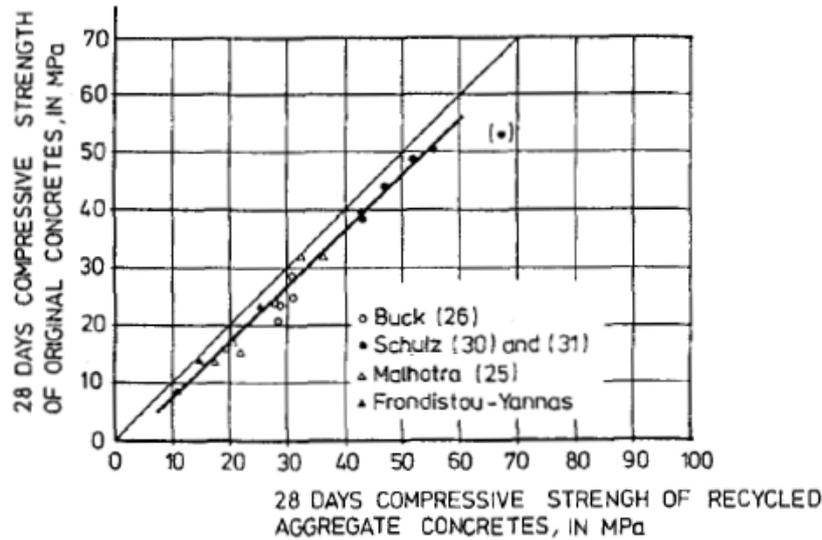


図-2.3.2 原コンクリートと再生コンクリートの圧縮強度の関係^{2.27)}

日本国内において片平の調査結果^{2.24)}では、図-2.3.3 に示すように再生コンクリートの圧縮強度は骨材の平均吸水率の増加に伴って直線的に低下することが報告されている。また、平均吸水率が 1%増加することによる圧縮強度比の減少率はおおむね 4%程度である。低品質再生骨材の吸水率の範囲は 5~7%、平均で 6%であるから、これを用いた場合の平均的な圧縮強度の目安は健全な普通骨材を使用した場合の 80%程度、すなわち、強度低下率は 2 割程度と考えられ、上記の海外における結果とほぼ同程度であることがわかる。

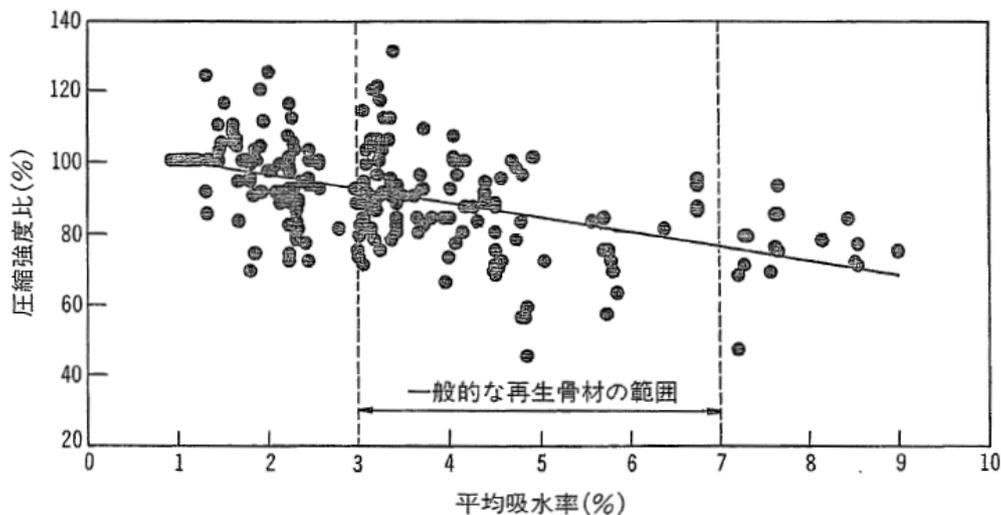


図-2.3.3 平均吸水率と圧縮強度比の関係^{2.24)}

さらに、細骨材のみが普通骨材から再生骨材に置き変わることによる圧縮強度への影響を図-2.3.4のように示している。図の横軸は細骨材の吸水率、縦軸は細・粗骨材とも普通骨材を使用した場合の強度を100としたときの強度比を示している。矢印で結ばれた○と●は配合条件が同じもの同士であり、普通骨材の結果を○、再生骨材の結果を●で示されている。(○の強度比が100%でないデータは粗骨材が再生骨材のものである。)同様に、粗骨材のみが普通骨材から再生骨材に置き換わったときの吸水率と圧縮強度比の関係を図-2.3.5に示している。これらの図によれば、ばらつきはあるものの、全体的には再生骨材の吸水率の増加に伴って圧縮強度は徐々に減少する傾向を示しており、その減少割合は細骨材と粗骨材でほぼ同程度となっている。

なお、図中には前記の傾向とは逆に、再生骨材を使用したことで圧縮強度が増加しているケースも認められている。この原因として、再生骨材は一般の骨材と比して品質の変動が大きいことからの確な表面水管理が困難で、結果的にコンクリート中の水量が変動し、強度に影響を与えることなどが考えられている。

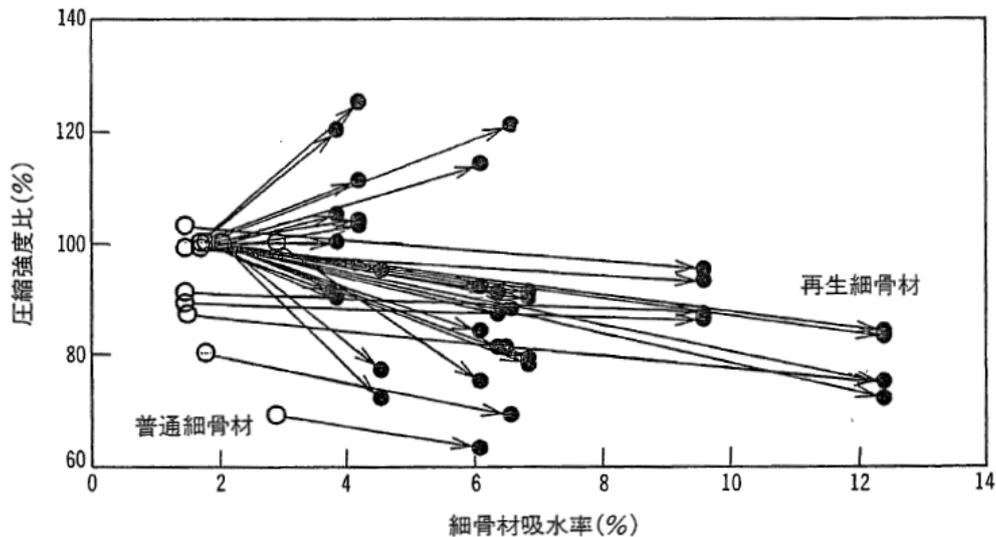


図-2.3.4 細骨材が再生骨材に置き換わることによる圧縮強度比の変化^{2.24)}

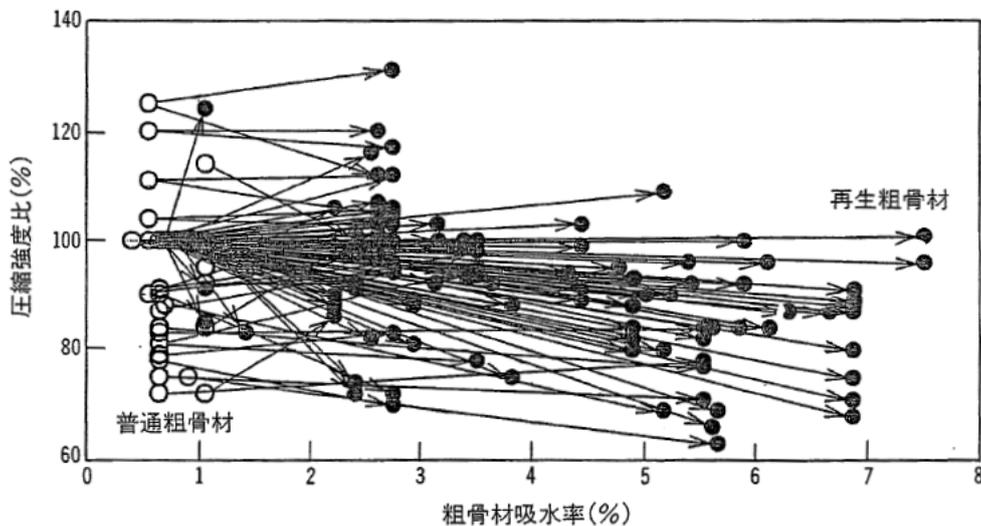


図-2.3.5 粗骨材が再生骨材に置き換わることによる圧縮強度比の変化^{2.24)}

一方、高橋ら^{2.35)}は再生コンクリートの強度およびヤング係数に関して既往の文献結果を重回帰分析し、これらの特性に関する要因を評価している。その文献評価は2000年度までの関連学会の論文等を対象とした238編となっており、分析対象としたデータは、粗骨材は再生骨材、細骨材は普通骨材のものであるもの、使用したセメントは普通ポルトランドセメントのみであるもの、養生方法は標準養生のみであるものとし、その結果得られた200個のデータについて分析を行っている。この報告によれば、圧縮強度とセメント水比の関係は図-2.3.6のように表されている。なお、図は全データをプロットしたものと、各吸水率の範囲で示したものである。これによると、吸水率ごとに若干のばらつきはあるが、セメント水比の増加に伴い、圧縮強度は増加していることが分かる。また、強度範囲が60~100N/mm²では、吸水率が6%以上においてはセメント水比が増加しても強度が変化しない圧縮強度の頭打ちの傾向が確認されている。したがって、通常の強度の範囲内であれば、再生コンクリートの圧縮強度も普通コンクリートと同様にセメント水比に基づいた式によって強度管理が可能であることが考えられる。

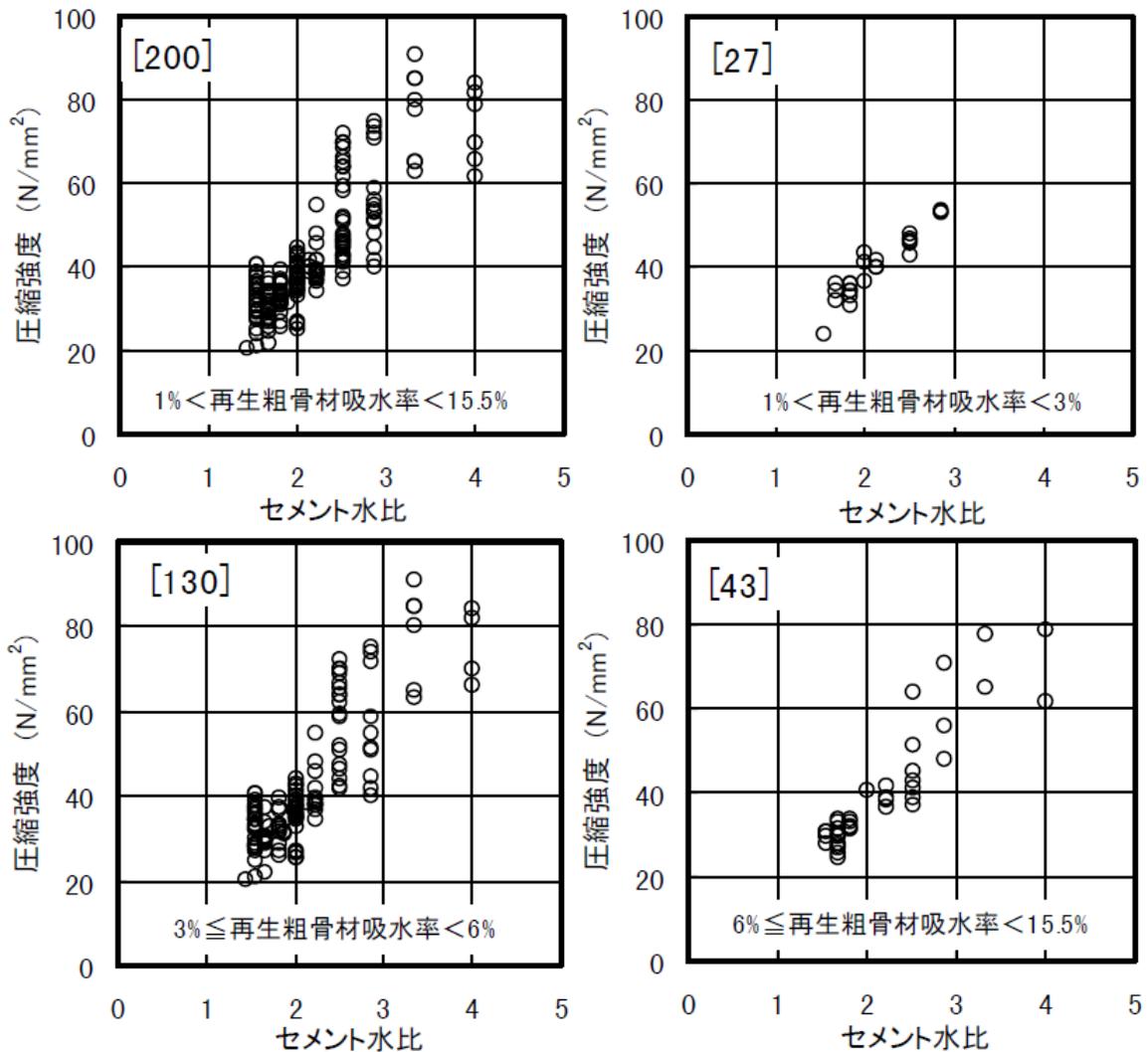


図-2.3.6 圧縮強度とセメント水比の関係^{2.35)}

次に、吸水率との関係については図-2.3.7 に示すように、全体的には明確な傾向は認められないが、セメント水比ごとでは若干の負の相関が認められている。また、細骨材に再生骨材を用いた場合、あるいは、再生粗骨材、再生細骨材に普通骨材を混合した場合についても検討した結果、再生粗骨材の場合と同様な傾向を示したことを述べている。

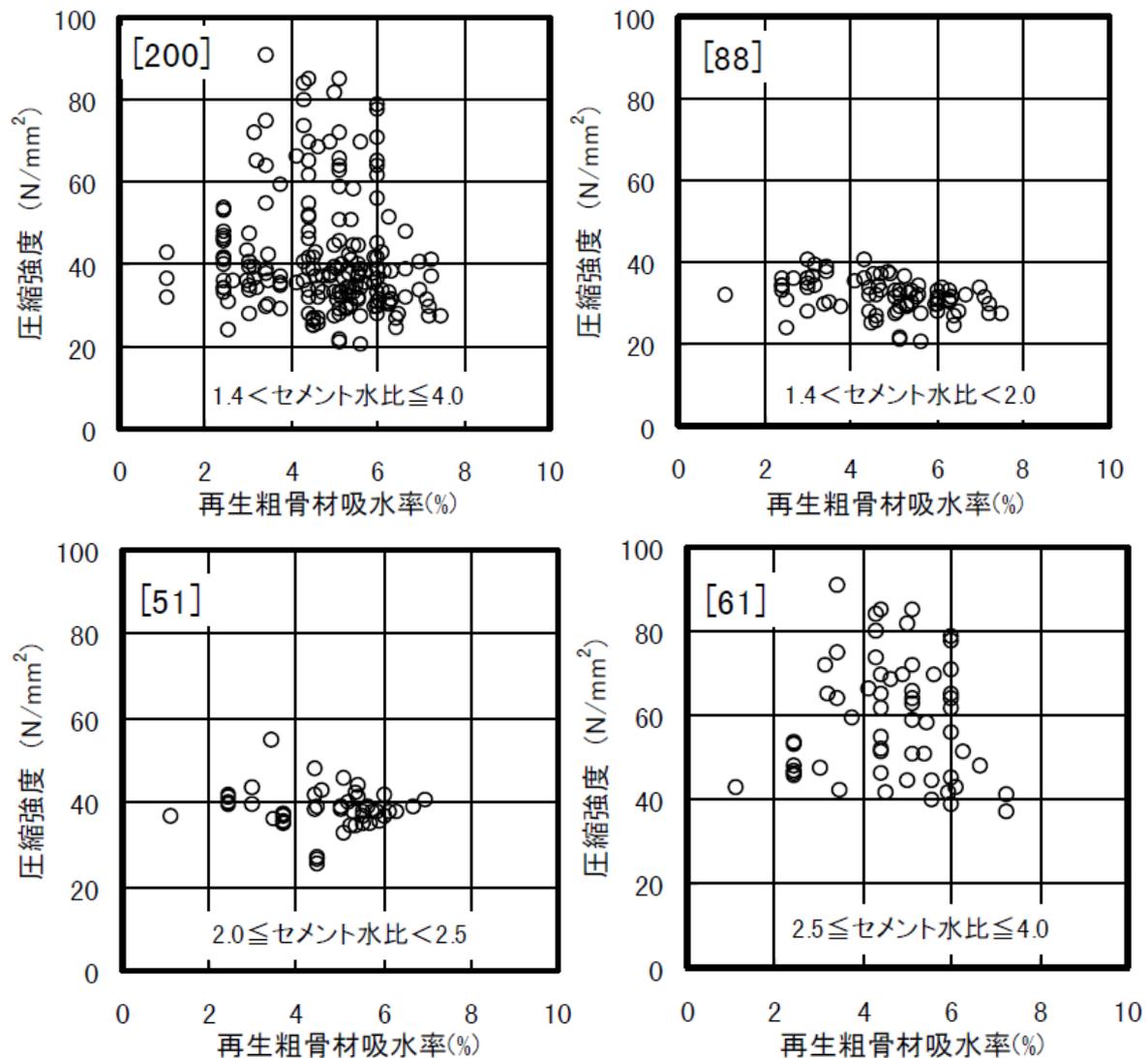


図-2.3.7 圧縮強度と吸水率の関係 ^{2.35)}

このように、再生コンクリートの圧縮強度はセメント水比と骨材の吸水率に影響されることが明らかにされているが、複数の研究データを収集した結果であることから、様々な要因が入り混じった状態での評価となっているため、図に示すようにばらつきが多い。そこで、再生コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす大きな要因として考えられる水セメント比、再生粗骨材の品質、再生粗骨材の置換率に着目して、この点について検討を行っている文献をピックアップして各影響について整理を行う。

水セメント比と再生粗骨材の吸水率の影響について、南波ら^{2.12)}は、コンクリートの水セメント比を40、45、55、65%の4水準とし、粗骨材として碎石、川砂利、吸水率の異なる再生骨材3種類（吸水率3、5、7%）、碎石と再生骨材（吸水率7%）を混合したものを用いてコンクリートの各性状について検討を行っている。その圧縮強度の結果について示したものが図-2.3.8であるが、セメント水比との関係においては、すべての種類のコンクリートはセメント水比と直線関係にあることが分かる。次いで、吸水率との関係においては、吸水率の増加に伴って圧縮強度は低下する傾向にあることが分かる。しかしながら、その減少率はコンクリートの水セメント比によって異なっており、水セメント比が40～45%では減少率は大きく、水セメント比が55～65%では減少率が小さくなっていることが分かる。すなわち、水セメント比が小さいほど再生骨材の吸水率による影響が顕著になることが分かる。強度レベルで判断するならば、おおよそ、40～60N/mm²の範囲内、つまりおおよそ50N/mm²を閾値として、再生コンクリートの圧縮強度は再生粗骨材の使用による影響が顕著になると判断される。この点について、品質の大きく異なる原コンクリートから製造された数種類の再生骨材を用いた菊池らの検討^{2.36)}においても、図-2.3.9に示すように同様の傾向が認められている。なお、図中の相対吸水率とは細骨材も含めた骨材全体の吸水率として表したものである。

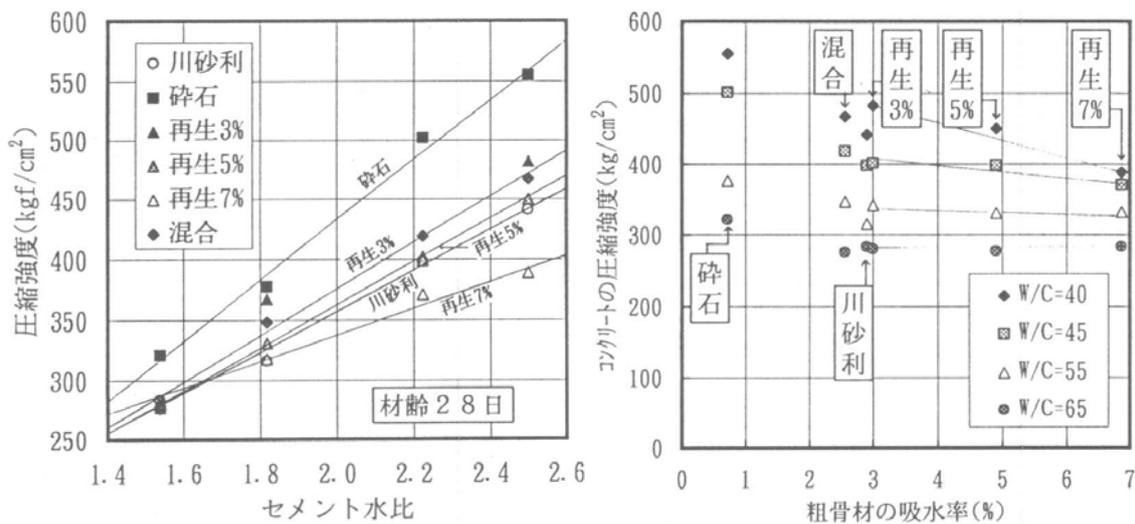


図-2.3.8 圧縮強度と各影響因子の関係^{2.12)}

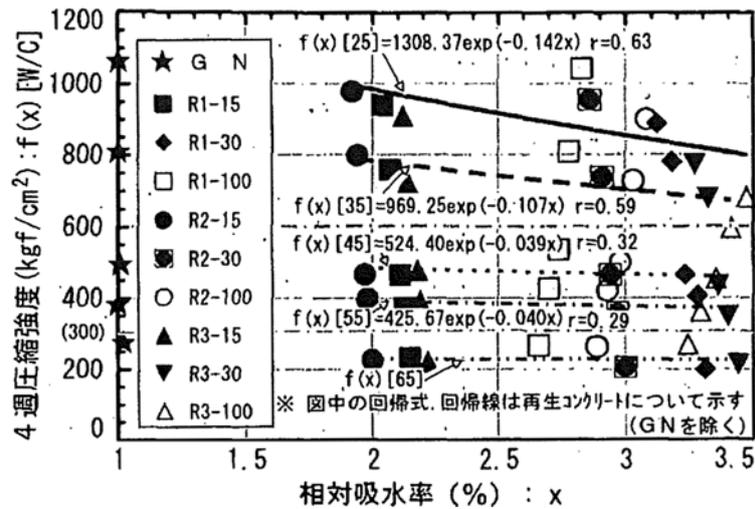


図-2.3.9 相対吸水率と圧縮強度の関係^{2.36)}

再生粗骨材の置換率の影響について、村上ら^{2.37)}はL相当の再生粗骨材（吸水率5.32%）を用いて、コンクリートの水セメント比を45、55、65%の3水準として検討を行った結果、**図-2.3.10**が得られている。これによると、ややばらつきはあるものの、再生コンクリートの圧縮強度は再生粗骨材置換率の増加に伴ってほぼ直線的に低下することが分かる。また、水セメント比が55%と45%では、大差は見られず、同様に圧縮強度50N/mm²程度で頭打ちになる傾向にあることがわかる。

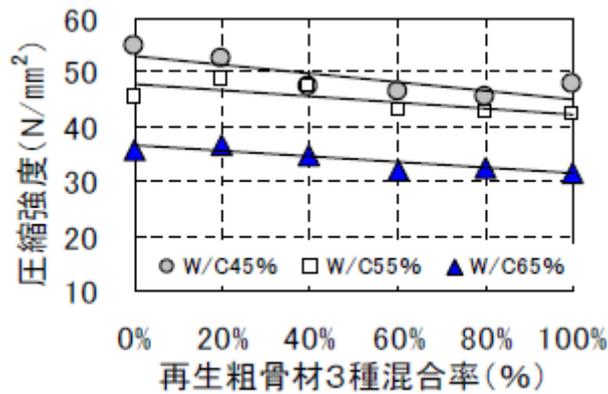


図-2.3.10 再生コンクリートの圧縮強度と再生粗骨材置換率の関係^{2.37)}

2.3.3 ヤング係数

コンクリートのヤング係数は、圧縮強度との関係に基づいた式によって推定されることが多く、一般に、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」による式(2.3.1)によればよいとされている。この関係式は、図-2.3.11に示すように、1978～1992年に日本全国で実施された3000以上の実験データに基づく統計分析によって求められたものである。

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{1/3} \quad (2.3.1)$$

ただし、 E ： コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

γ ： コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

σ_B ： コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

k_1 ： 粗骨材の種類により定まる修正係数

1.2	石灰岩碎石, 焼ボーキサイト
0.95	石英片岩碎石, 安山岩碎石, 玄武岩碎石, 粘板岩碎石, 玉石碎石
1.0	その他の粗骨材

k_2 ： 混和材の種類により定まる修正係数

1.1	フライアッシュ
0.95	シリカフェーム, 高炉スラグ微粉末
1.0	混和材 使用しない

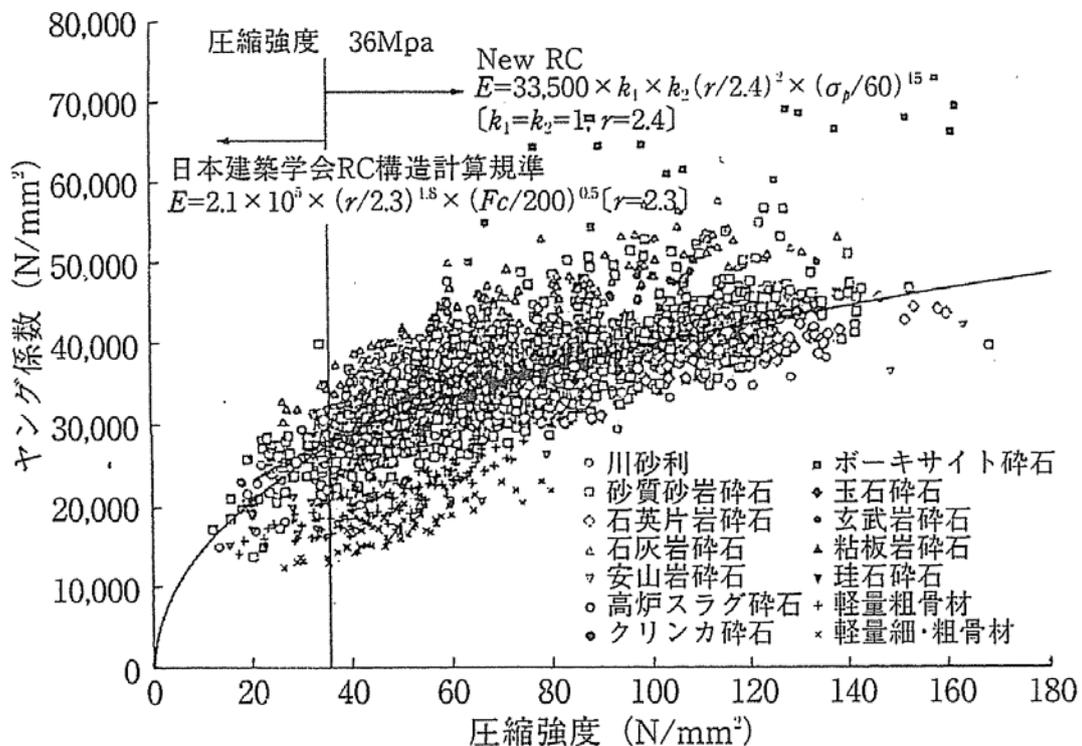


図-2.3.11 ヤング係数と圧縮強度の関係 ^{2.38)}

再生コンクリートのヤング係数は普通コンクリートに比べて同強度で小さくなることが一般的であるが、同様に同式によって推定可能であるとの報告が数多くされている。朴ら^{2.39)}は、1980～2010年において日本建築学会学術講演および論文集とコンクリート工学年次論文集に掲載された再生骨材コンクリートに関するすべての論文を対象とし、1500を超えるデータを収集した結果、再生コンクリートのヤング係数は図-2.3.12に示すように、式(2.3.1)によっておおよそ推定可能であることを明らかにしている。

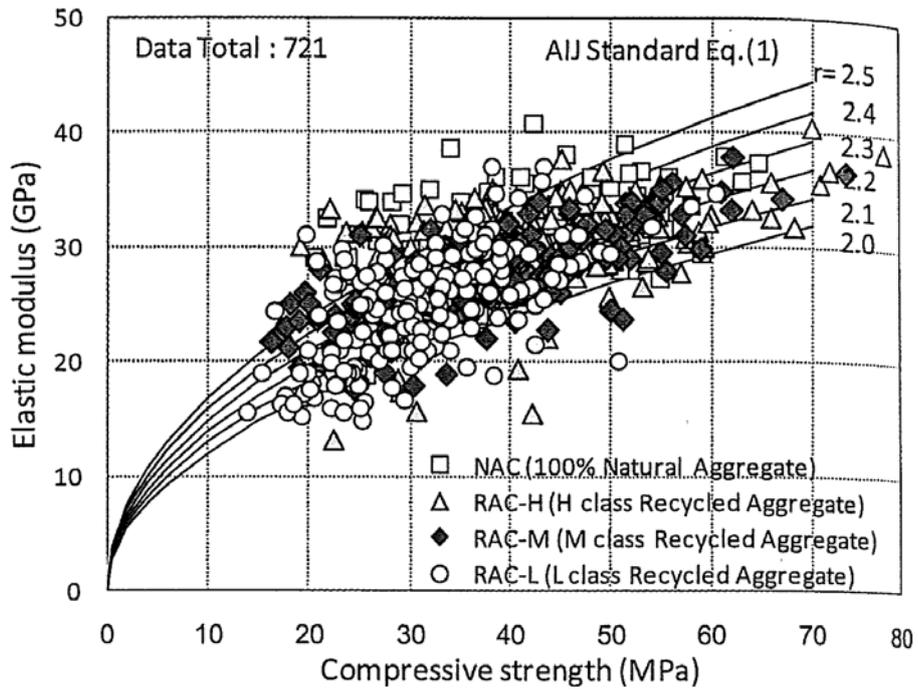


図-2.3.12 再生骨材別の圧縮強度とヤング係数との関係^{2.39)}

2.3.4 乾燥収縮

再生コンクリートの乾燥収縮ひずみが普通コンクリートに比べて大きくなることはこれまでの研究で明らかにされている。

海外において、Hansen と Boegh^{2.40)}は、水セメント比を 40 (H)、70 (M) および 120 (L) %とした原コンクリートから製造した再生粗骨材を用いて、原コンクリートと同様の調合で作製した再生コンクリートの乾燥収縮ひずみについて検討を行っている。なお、試験は、試験体寸法は 10×10×80cm の角柱試験体を用いて、乾燥条件は温度 25℃、湿度 40%として行っている。その結果を示したものが、表-2.3.1 であるが、調合を同一とした基準コンクリートに比べて、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは平均でおおよそ 50%増加している。

通常のコンクリートに対する再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの増加率は、Wesche と Schulz の研究^{2.27)}では 40%、Zagurskij と Zhadanovskij^{2.41)}の研究では 20～30%、Rahavindrarah と Tam の研究^{2.42)}では 14～95%とかなりばらつきの大きいことが分かる。この原因としては、再生骨材の品質やコンクリートの調合などによる影響が考えられるため、以下、再生骨材の品質とコンクリート調合条件（再生粗骨材置換率や水セメント比）の違いが再生コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について、日本国内における既往の研究を整理することとする。

表-2.3.1 原コンクリートと再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの一覧(乾燥期間 13 週)^{2.40)}

Item	Shrinkage after 13 weeks of drying at 40% RH and 25° C of original and recycled aggregate concretes											
	H	H/H	H/M	H/L	M	M/H	M/M	M/L	L	L/H	L/M	L/L
Total shrinkage x 10 ⁴	3.4	5.1	4.9	5.3	3.5	4.9	5.3	5.2	4.5	6.8	5.7	6.8
% increase in shrinkage above controls	0	50	44	56	0	40	51	49	0	51	27	51

前項（2.3.2 項）で示した南波らの研究結果^{2.12)}によると、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の吸水率の関係は図-2.3.13 のようである。これによると、吸水率の増加に伴ってコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向にあり、吸水率 7%では極めて大きくなっていることが分かる。また、水セメント比を 55%から 40%にすることで、乾燥収縮ひずみは 1.0×10^{-4} 程度小さくなっていることから、コンクリートの水セメント比を小さくすることで収縮は低減されることが分かる。しかしながら、再生粗骨材置換率 100%では、いずれの場合においても 8.0×10^{-4} を大きく上回っており、建築用のコンクリートとして一般に望まれている収縮の目標値を満足させることは困難なようである。一方、吸水率 7%の再生粗骨材を碎石と混合（再生粗骨材：碎石が 3：7）したコンクリートの乾燥収縮ひずみは吸水率が 3%程度である川砂利を用いたものとはほぼ同等となっている。

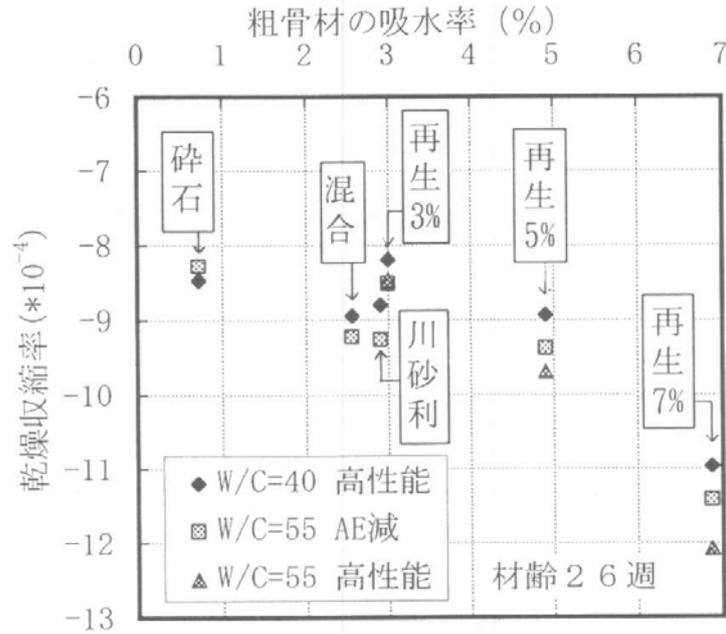


図-2.3.13 乾燥収縮ひずみと粗骨材の吸水率の関係 2.12)

このように、再生粗骨材の吸水率が再生コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は大きいことが分かる。再生粗骨材の吸水率に及ぼす影響については、付着モルタル率と付着モルタルの吸水率の違いが考えられる。一般に、付着モルタルの吸水率は原コンクリートの品質に影響を受ける。道正ら^{2.43)}は、原コンクリートの性質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響について検討をすることを目的として、種類の異なる原骨材（硬質砂岩砕石、石灰岩砕石、川砂利）を用い、水セメント比を 35、45、55 および 65% の 4 水準とした原コンクリートから製造された再生粗骨材を用いて実験的に研究を行っている。検討に用いている再生粗骨材の物性一覧を表-2.3.2 に示す。再生粗骨材はオープンセットを 20mm に調整した圧砕型のジョークラッシャーで破碎し 5mm ふりいでふるったものであるが、その吸水率は 3.94~6.02% の範囲内にある。また、原モルタルの水セメント比と骨材の物性の関係は図-2.3.14 に示す通りであるが、これによると、原モルタルの水セメント比増加に伴い再生粗骨材の吸水率は大きくなり、密度は小さくなる傾向にあることが分かる。

表-2.3.2 骨材の物性一覧 2.43)

試験項目	試験方法	N	G A	G B	G C	RGA-35	RGA-45	RGA-55	RGA-65	RGB-35	RGB-45	RGB-55	RGB-65	RGC-35	RGC-45	RGC-55	RGC-65
粗粒率: F. M.	JIS A 1102	2.92	6.88	6.54	6.68	6.73	6.72	6.81	6.90	6.79	6.76	6.74	6.71	6.65	6.77	6.65	6.72
比重	絶乾時	2.58	2.62	2.70	2.57	2.36	2.32	2.31	2.29	2.33	2.31	2.26	2.25	2.34	2.29	2.27	2.23
	表乾時	2.61	2.63	2.71	2.61	2.46	2.42	2.41	2.40	2.43	2.41	2.39	2.38	2.45	2.40	2.39	2.36
吸水率 (%)		1.18	0.60	0.52	1.60	3.97	4.28	4.51	5.11	4.25	4.61	5.74	6.02	4.67	4.84	5.50	5.88
安定性 (%)	JIS A 1122	-	4.6	1.2	12.5	5.2	3.7	18.3	12.4	1.9	3.8	20.9	13.7	9.4	5.3	9.3	19.3
単位容積質量 (kg/ℓ)		1.74	1.53	1.60	1.62	1.30	1.28	1.28	1.30	1.25	1.26	1.26	1.28	1.32	1.28	1.28	1.29
実積率 (%)	JIS A 1104	67.4	58.5	61.3	63.1	55.0	55.3	55.5	56.7	53.6	54.7	55.7	57.0	56.2	55.9	56.4	58.0
洗い損失量 (%)	JIS A 1103	-	0.80	2.54	0.44	0.20	0.07	0.09	0.07	0.13	0.14	0.23	0.15	0.03	0.15	0.11	0.15
安定性 (%)	JIS A 1122	-	4.6	1.2	12.5	5.2	3.7	18.3	12.4	1.9	3.8	20.9	13.7	9.4	5.3	9.3	19.3
骨材 40t 破砕値 (%)		-	12.4	19.8	13.7	19.3	21.8	20.9	22.2	26.9	27.3	27.6	27.6	22.5	22.8	22.7	23.3
強度 10% 破砕力 (t)	B. S. 812	-	34.7	20.5	35.6	17.5	15.5	14.5	15.1	12.1	10.7	10.6	10.3	14.3	13.5	13.7	13.5

これらの再生粗骨材を用い、水セメント比を35、55%とした再生コンクリートの乾燥収縮試験を行った結果、**図-2.3.15**が得られている。これは、原コンクリートと4週圧縮強度と再生コンクリートの主要性質の関係を示したものであるが、図より、各水セメント比で比較すると、原コンクリートの圧縮強度が大きな再生粗骨材ほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向にあることが分かる。次いで、再生粗骨材の安定性、並びに40t破砕値との関係を**図-2.3.16、17**にそれぞれ示す。これによると、再生骨材の安定性や40t破砕値の数値が大きくなるほど乾燥収縮ひずみも大きくなる傾向にあり、両者には比較的良い相関が認められる。さらに、再生粗骨材の吸水率との関係を**図-2.3.18**に示す。南波ら^{2.12)}の報告と同様に、原コンクリートの性質が異なる再生粗骨材を用いた場合であっても、再生粗骨材の吸水率によって統一的に評価が可能であることが分かる。

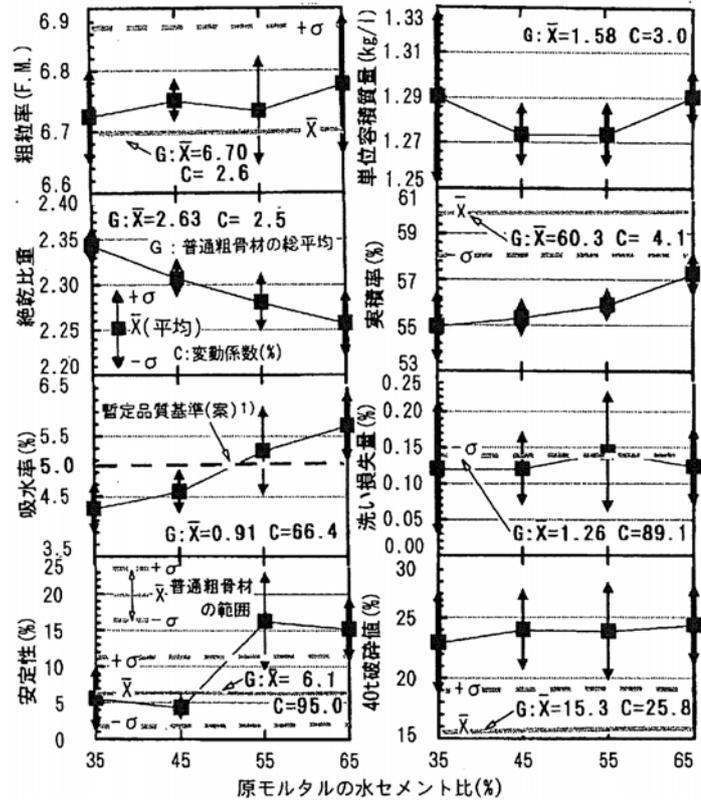


図-2.3.14 原モルタルの水セメント比と骨材物性の関係 ^{2.43)}

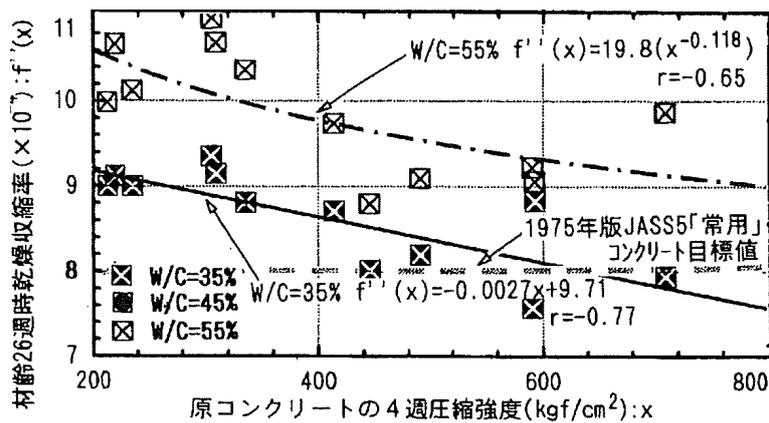


図-2.3.15 原コンクリートの4週圧縮強度と再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの関係 ^{2.43)}

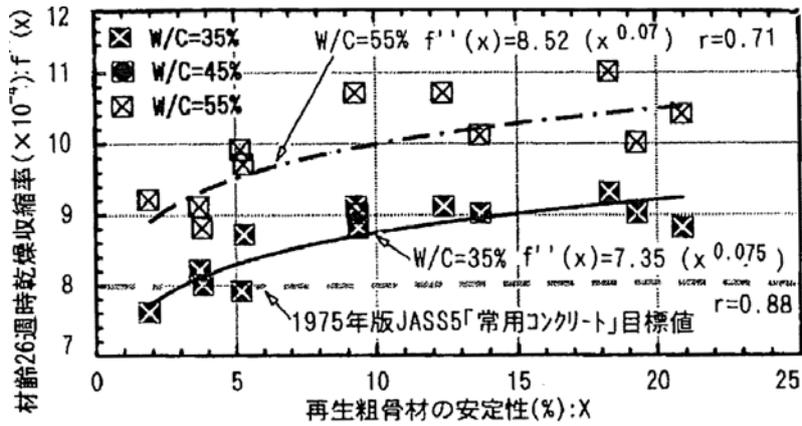


図-2.3.16 再生粗骨材の安定性と再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの関係 ^{2.43)}

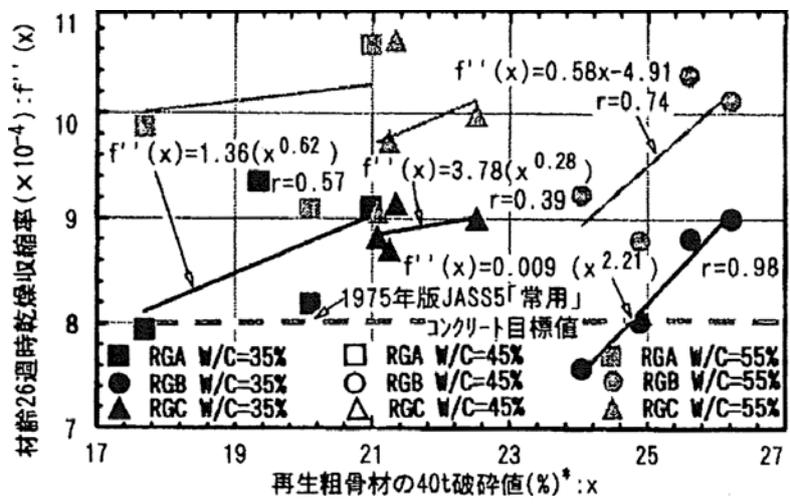


図-2.3.17 再生粗骨材の40t破砕値と再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの関係 ^{2.43)}

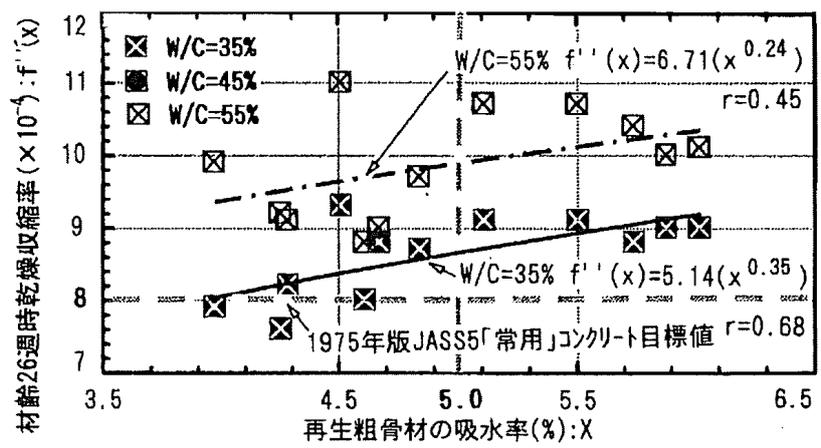


図-2.3.18 再生粗骨材の吸水率と再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの関係 ^{2.43)}

一方、再生骨材の混合使用がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について、井手ら^{2.44)}は、低品質再生粗骨材（吸水率 6.14%）、高品質再生粗骨材（吸水率 1.83%）、砕石（吸水率 1.02%）を用いて検討を行っている。その結果を示したものが、**図-2.3.19**であるが、これによると、高品質再生粗骨材を用いた場合にはコンクリートの乾燥収縮ひずみは低減する傾向にあるが、低品質な再生粗骨材を使用した場合には増加する傾向にあり、置換率 25%においても顕著な増加が認められている。これは、高品質再生粗骨材を使用した場合には置換率増加に伴う単位水量減少と粗骨材絶対容積の増加が、低品質再生粗骨材の場合には骨材の付着モルタルによる骨材粒子のヤング係数低下と付着モルタルの収縮が原因として考えられている。

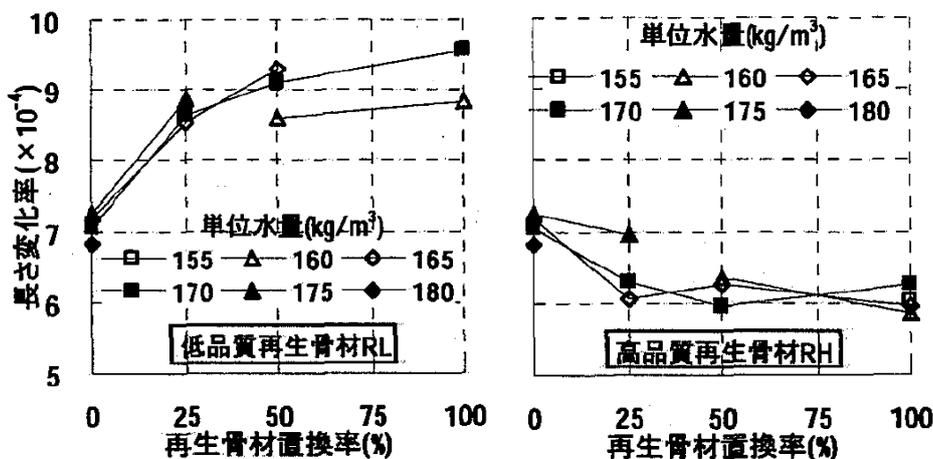


図-2.3.19 長さ変化率と再生骨材置換率の関係^{2.44)}

また、村上ら^{2.37)}は L 相当の再生粗骨材（吸水率 5.32%）を用いて検討を行った結果、**図-2.3.20**が得られている。これによれば、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは、水セメント比によらず、再生粗骨材置換率の増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示すことが分かる。また、水セメント比による影響も若干見られるが、再生粗骨材置換率の違いによる影響の方が大きい。

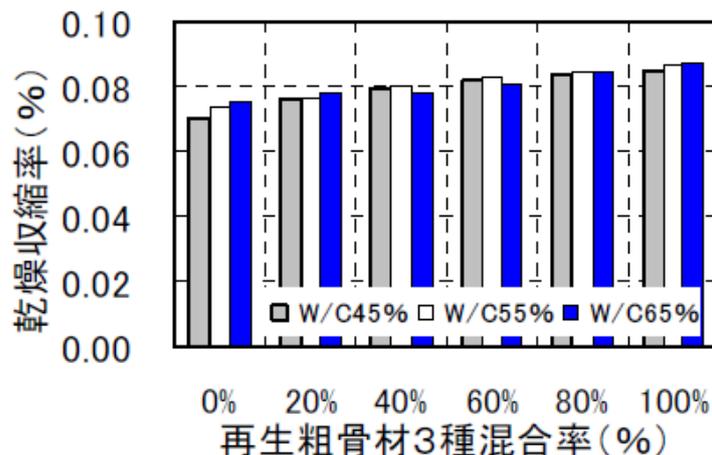


図-2.3.20 乾燥収縮ひずみと再生粗骨材置換率の関係^{2.37)}

以上より、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートに比べて大きくなり、その増加率は再生粗骨材の吸水率、またはその置換率の増加に伴い大きくなる傾向にあることが分かる。また、水セメント比や単位水量を小さくすることで再生コンクリートの乾燥収縮ひずみを低減できる傾向も認められている。したがって、吸水率の大きな低品質再生粗骨材を用いた場合に再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなるが、骨材置換率や水セメント比を小さくすることや、単位水量を減らすことで低減できることが分かる。

2.3.5 中性化

道正らの報告^{2.43)}によれば、表-2.3.2で示した再生粗骨材を用いて再生コンクリートの中性化試験を行った結果、図-2.3.21が得られている。なお、試験は、試験体寸法を10×10×20cmとし、試験体を1週間水中養生後、4週間20℃、RH.60%で気中養生した後、温度30℃、RH.60%、CO²濃度5%の環境において1か月間促進中性化させるという条件で行っている。これによると、水セメント比55%の再生コンクリートの促進中性化深さの総平均(RG)は、普通コンクリートの総平均(G)に比べて若干小さめになっている。また、原骨材の種類別(硬質砂岩碎石、石灰岩碎石、川砂利)の影響はほとんど認められていないが、原モルタル強度の影響は、原モルタルの水セメント比が55%以上の再生コンクリート(RG-55、RG-65)になると、45%以下のものに比べて、促進中性化深さは2mm程度大きくなっている。一方、水セメント比35%の再生コンクリートにおいては、いずれも中性化深さが1mm以下となり、再生粗骨材を用いた場合においても水セメント比の低減による中性化抑制効果が顕著であることがわかる。

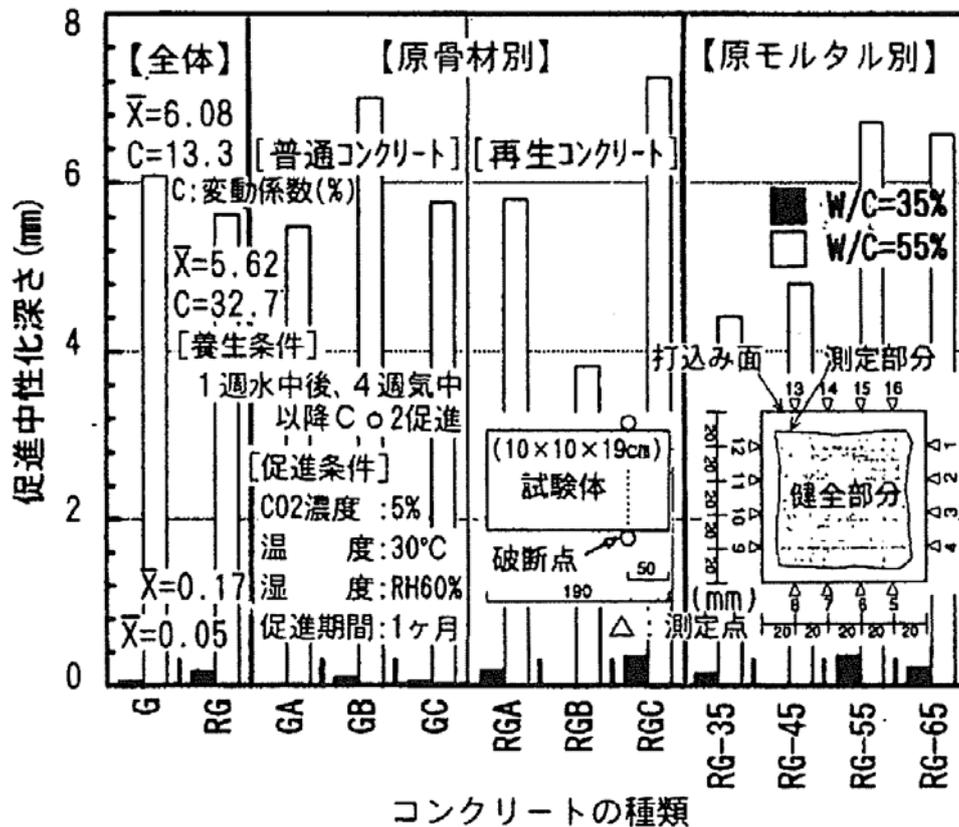


図-2.3.21 各種コンクリートの促進中性化試験結果^{2.43)}

また、村上ら^{2.37)}は、L相当の再生粗骨材（吸水率 5.32%）を用いて、再生コンクリートの中酸化試験を行った結果、**図-2.3.22**が得られている。なお、促進中性化条件は、温度 20°C、RH.60%、CO²濃度 5%である。これによれば、再生粗骨材置換率による影響は認められず、普通コンクリート（置換率 0%）と同等の値を示していることが分かる。また、水セメント比が大きなものほど促進中性化深さも大きくなっており、水セメント比による影響が支配的であることが前述と同様に明らかである。

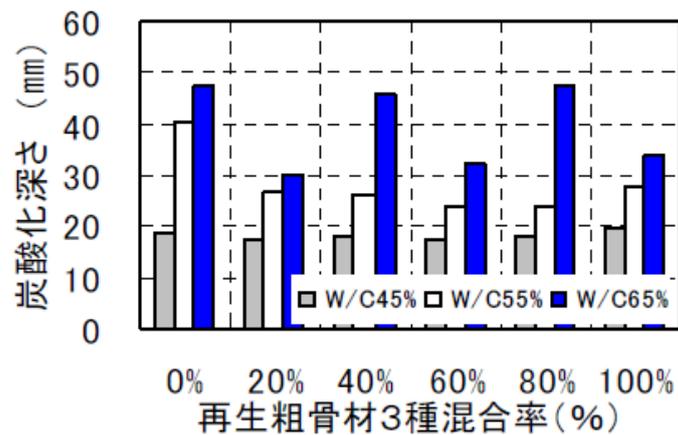


図-2.3.22 炭酸深さと再生粗骨材置換率の関係^{2.37)}

柳ら^{2.45)}もL相当の再生粗骨材2種類（吸水率 5.63%（記号：N）、吸水率 6.50%（記号：S））を用いて、水セメント比が 50~70%の範囲で検討を行っている。その結果を示したものが**図-2.3.23**であるが、中性化深さは水セメント比 70%の場合に置換率 50~100%で 2~3mm 程度大きくなっているが、水セメント比 50%および 60%では置換率 0%のものと同様である。

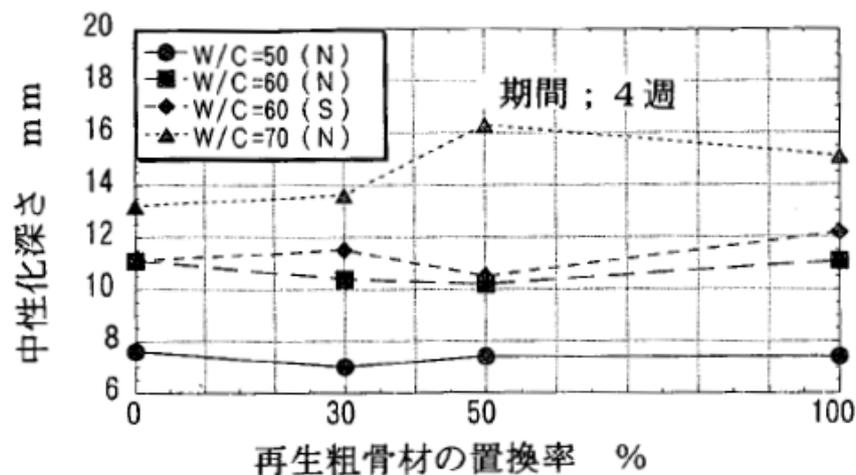


図-2.3.23 再生粗骨材置換率と中性化深さの関係^{2.45)}

一方、山崎ら^{2.46)}も M 相当の再生粗骨材（吸水率 4.32%）と L 相当の再生細骨材（吸水率 7.10%）を用いて検討を行っているが、**図-2.3.24**に示すように、再生骨材置換率増加に伴い中性化速度係数は増加する傾向を示している。また、再生粗骨材に比べ再生細骨材の使用の方が中性化抵抗性は低下することがわかる。

道正ら^{2.47)}は、中性化している原コンクリートから製造された再生粗骨材（吸水率 6.32、4.58%）を混入したコンクリートの性状について検討を行っている。その結果、再生粗骨材を用いたコンクリートは普通コンクリートに比べて中性化深さが同等か 1.5 倍程度であることを実験的に示している。

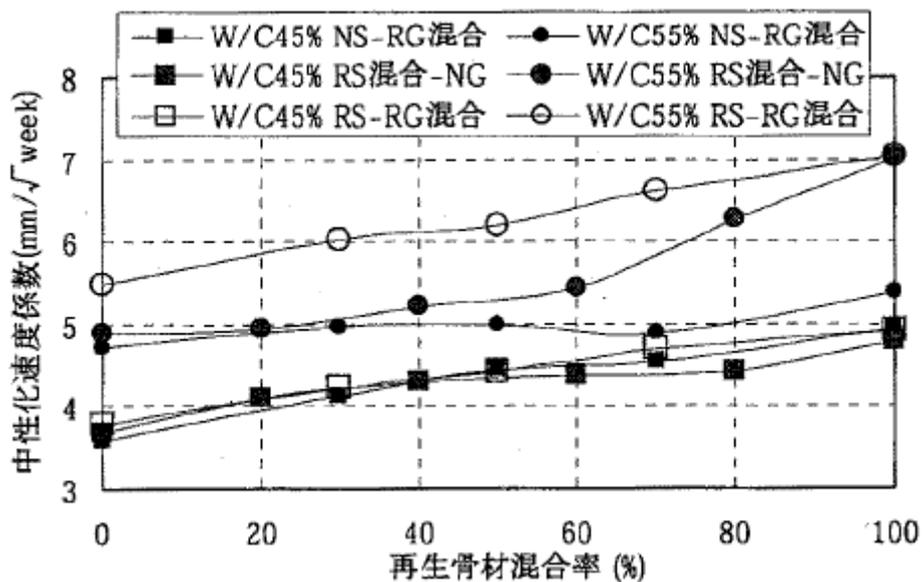


図-2.3.24 中性化速度係数と再生骨材混合率の関係^{2.46)}

以上より、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートと同等であるかやや劣る傾向にあり、使用する再生粗骨材の品質（原コンクリートの水セメント比や中性化の進行具合）によって異なるようである。今後発生する再生骨材の原コンクリートは比較的水セメント比が大きく、中性化も進行しているものも含まれる可能性があることなどを考慮すると、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートに比べやや劣ることが予想される。しかしながら、再生コンクリートの中性化抵抗性は水セメント比による影響が最も大きいことから、適切な水セメント比の上限値を設けることによって十分な中性化抵抗性を有する再生コンクリートとすることが可能であると考えられる。

2.3.6 凍結融解

日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事」^{2.48)}では、寒冷地に建設する建築物の激しい凍結融解作用を受ける部分に使用するコンクリートについて、凍結融解試験で明確な劣化が生じないコンクリートを使用することを原則とし、凍結融解試験 300 サイクルにおける相対動弾性係数 85%以上を標準的な値としている。なお、この相対動弾性係数が 60%でもある程度の耐凍害性があるものと考えられるが、長期間の耐凍害性については明らかになっていないことから、この値を 60%以上とするのは、計画供用期間の級が短期の場合に限定することが望ましいとされている。

コンクリートの凍害対策の基本は AE コンクリートとして適切な空気を連行することである。空気量と耐久性指数の関係を図-2.3.35 に示す。水セメント比によって多少の違いはあるが、空気量 4%程度以下となると耐凍害性に劣ることが分かる。したがって、同仕様書では、一般のコンクリートの空気量に 1.0%加え、目標空気量の標準値を 5.5%（粗骨材最大寸法 20~25mm の場合）としている。なお、一般のコンクリートにおける空気量(4.5%)の規定などは凍結融解作用に対する対策であることから、通常のコンクリートでもある程度の耐凍害性を有しているといえる。

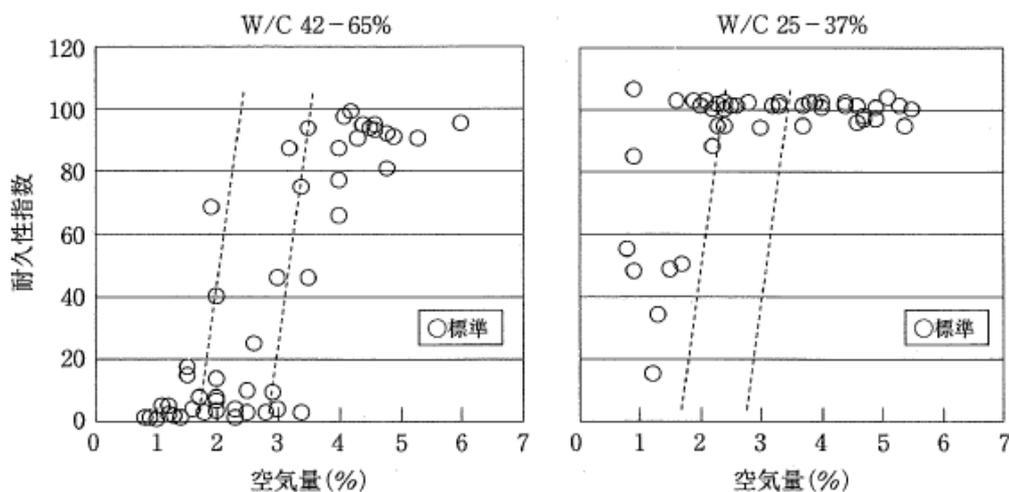


図-2.3.35 空気量と耐久性指数の関係^{2.48)}

また、水セメント比の大きなコンクリートは耐凍害性が劣ることから、コンクリートを高強度化することは凍害防止に有効であり、特に、スケーリングに対する効果が大きいことが知られている。そのようなことから、同仕様書では、コンクリートの標準の耐久設計基準強度として、一般環境における値に 3N/mm^2 を加えた値（短期： 21N/mm^2 、標準： 27N/mm^2 ）を示している。

以上、通常のコンクリートの耐凍害性に関わる影響因子とその対策方法について簡単に述べた。次に、再生コンクリートの耐凍害性について既往の研究を整理する。

片平の調査結果^{2.24)}によれば、**図-2.3.36**に示すように、再生コンクリートの耐久性指数は骨材の平均吸水率が大きいものほど低下する傾向を示している。なお、図中には、細骨材と粗骨材に再生骨材がそれぞれ使用されたものや、全量使用されたものも含まれている。**図-2.3.37**に骨材種類ごと（細骨材、粗骨材）に再生骨材の吸水率と耐久性指数の関係を示す。これによると、骨材種類に関わらず、再生骨材の使用によって耐久性指数は全体的に低下する傾向にあることが分かる。しかしながら、一方では、吸水率が6%程度であっても耐久性指数は85%以上となっているものもあり、低品質な再生粗骨材を用いた場合であっても十分な耐凍害性を有するケースもある。他方では、吸水率6%で20%を下回る場合もあり、ばらつきが大きい。

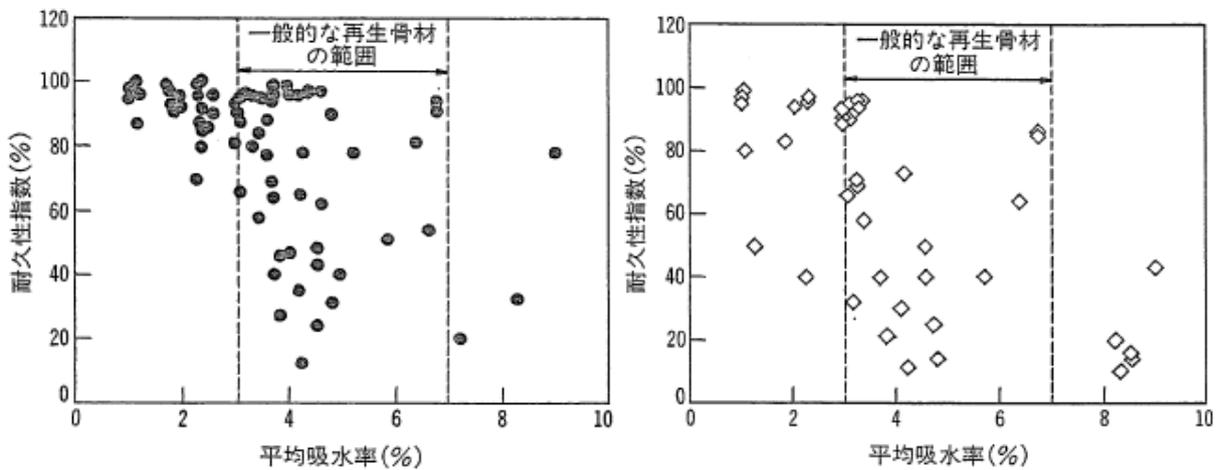


図-2.3.36 平均吸水率と耐久性指数の関係(左:W/C40~55%、右:W/C60~70%)^{2.24)}

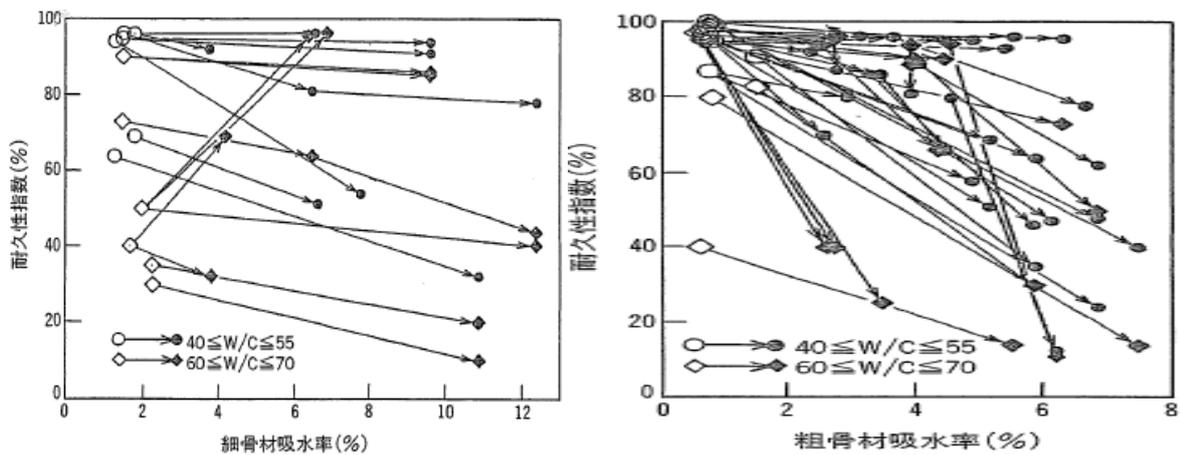


図-2.3.37 平均吸水率と耐久性指数の関係(左:細骨材の影響、右:粗骨材の影響^{2.24)})

前者のケースについて、山崎ら^{2.49)}や柳ら^{2.50)}の報告においても再生粗骨材の置換率、すなわち平均吸水率による影響について、耐久性指数は平均吸水率の増加に伴いほぼ直線的に低下する傾向を示すが、置換率 100%でもほぼ 85%以上となることが実験的に示されている。

後者のケースについて、桂ら^{2.51)}は、吸水率の異なる 6 種類の再生粗骨材を用い、コンクリートの水セメント比を 50%および 60%、再生粗骨材置換率 50、100%として検討を行っているが、**図-2.3.38**に示すように耐久性指数は平均吸水率の増加に伴い低下する傾向があり、平均吸水率が 5%以上では耐久性指数は 60%を大きく下回っている。

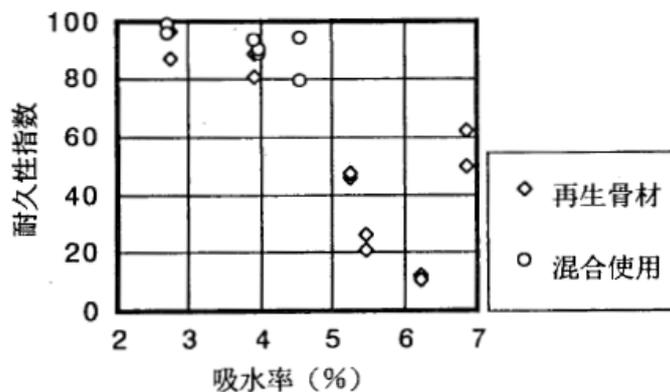


図-2.3.38 粗骨材吸水率と耐久性指数の関係^{2.51)}

このように、同じ平均吸水率であっても耐久性指数には差があり、水セメント比や吸水率とは別の大きな要因が作用していることが考えられる。

この点に関して、長瀧の報告^{2.52)}によれば、再生骨材の品質原コンクリートが AE の場合は高い耐凍害性を確保できるが、Non-AE の場合に耐凍害性は低下することが言われている。同様に、田浦ら^{2.53)}も、**表-2.3.3**に示す原コンクリートが Non-AE および AE の数種類の再生骨材を使用したコンクリートに対して凍結融解試験 (A 法：水中凍結水中融解) を行っている。なお、コンクリートの調合について、水セメント比が 55%で一定とし、単位水量は 158~175kg/m³としている。その結果を示したものが、**図-2.3.39**であるが、原コンクリートが Non-AE の再生骨材を使用したコンクリートはいずれの場合も耐久性指数は著しく低下している。一方、原コンクリートが AE の再生骨材を使用したコンクリートは 85%を上回っており、原コンクリートが AE か Non-AE であるか、すなわち、原コンクリートの空気量の影響が極めて大きいことがわかる。また、**図-2.3.40**に細骨材の粒度ごとに検討しているが、粒度に関わらず、Non-AE のものは耐久性指数が低下している。しかしながら、**図-2.3.39**と比較すると、細骨材よりも粗骨材の方が Non-AE を使用することによる影響が大きいようである。

表-2.3.3 骨材の種類と物性的性質^{2.53)}

骨材の種類	表乾密度 (g/m ³)	絶乾密度 (g/m ³)	吸水率 (%)	備考	
粗骨材	普通①	2.72	-	0.70	-
	普通②	2.70	2.63	2.55	-
	再生①	2.53	2.44	3.69	Non-AE
	再生②	2.39	2.23	7.27	Non-AE
	再生③	2.53	2.44	5.57	Non-AE
	再生④	2.35	2.16	8.55	AE
細骨材	普通①	2.58	-	2.07	-
	普通②	2.60	2.55	2.87	-
	普通③	2.65	0.96	1.76	-
	再生①	2.34	2.12	10.07	Non-AE
	再生②	2.24	1.97	13.68	Non-AE
	再生③	2.34	2.12	11.21	Non-AE
再生④	2.36	2.18	8.25	AE	

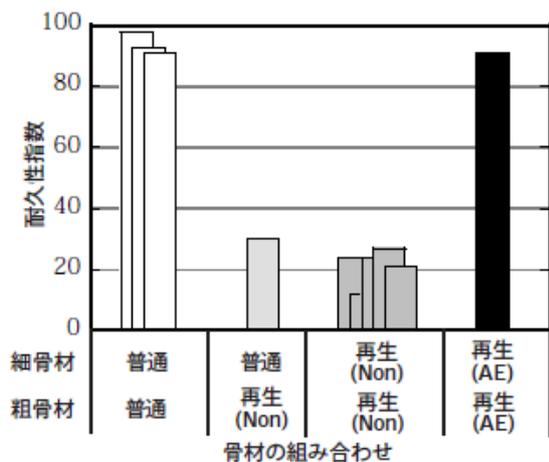


図-2.3.39 凍結融解試験結果 ^{2.53)}

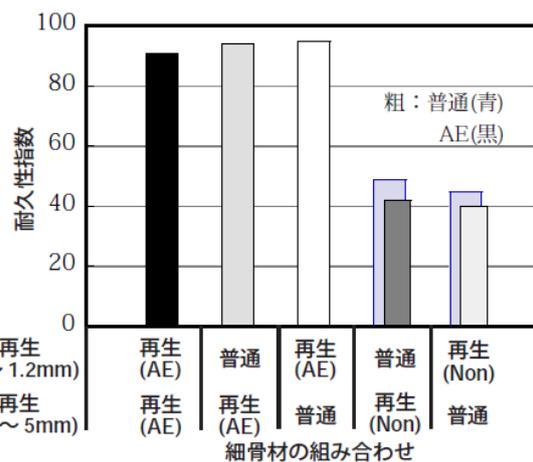


図-2.3.40 細骨材の種類の違い ^{2.53)}

また、コンクリート中の全水量と耐久性指数の関係を図-2.3.41のように示しているが、原コンクリートが Non-AE の再生骨材を使用した場合は、全水量が多くなるにつれて耐久性指数は 60% を大きく下回り、耐凍害性が著しく低下する傾向を示している。

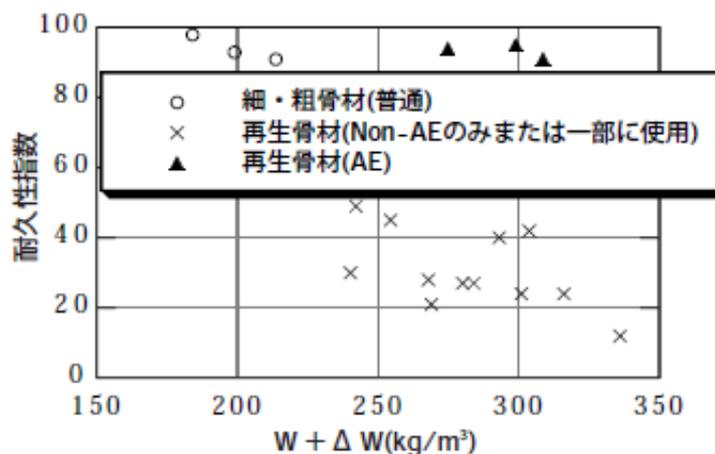


図-2.3.41 全水量と耐久性指数の関係 ^{2.53)}

以上のように、再生骨材の原コンクリートが Non-AE コンクリートである場合には再生コンクリートの耐凍害性は著しく低下することが明らかである。原コンクリートが Non-AE コンクリートである場合においても、再生コンクリートの耐凍害性を確保する方法について、佐藤ら ^{2.54)} は 9 種類の再生粗骨材を用いて、原コンクリートの空気量、再生コンクリートの水セメント比、平均吸水率、養生方法の違い（標準養生および蒸気養生）がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について検討を行っている。

まず、蒸気養生を行った場合の結果について、図-2.3.42 に示すように、原コンクリートが Non-AE であっても平均吸水率を 3% 以下にし、蒸気養生を行うことで高い耐凍害性を有することを示している。なお、図中に示す数値 (%) は使用した再生粗骨材の吸水率であり、F-2、G-2、F-3 および G-3 については普通骨材と混合し平均吸水率を 3% としたものの

である。また、コンクリートの水セメント比は 50% で一定としている。この検討は、蒸気養生を行ったものに対してであるため、標準養生を行ったものにおいても同様であるかは検討する必要がある。

原コンクリートが AE コンクリートである場合の結果については **図-2.3.43** が示されている。なお、コンクリートの水セメント比は 50% である。これによると、養生の種類によって傾向が異なるが、平均吸水率を 4% 程度以下とすることによって耐久性指数は 80% 以上となり高い耐凍害性を有することができると結論付けている。

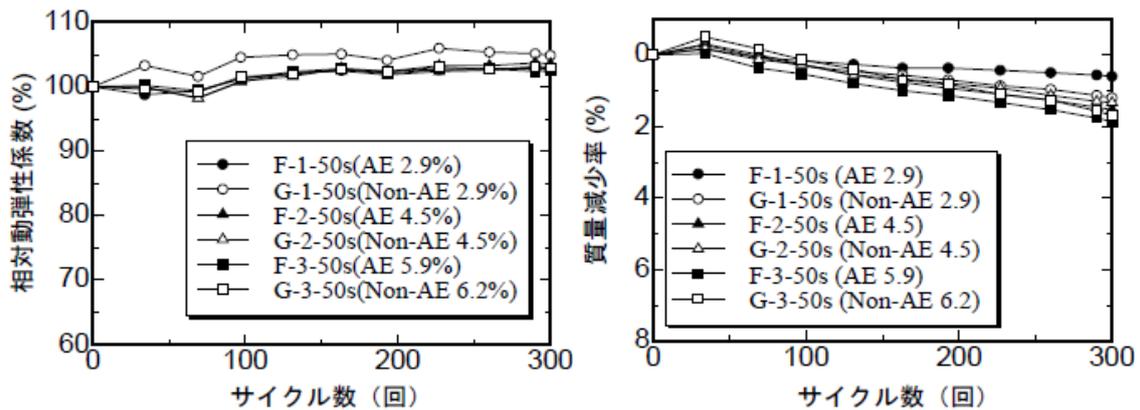


図-2.3.42 原コンクリート中の AE 剤の影響 (蒸気養生)^{2.54)}

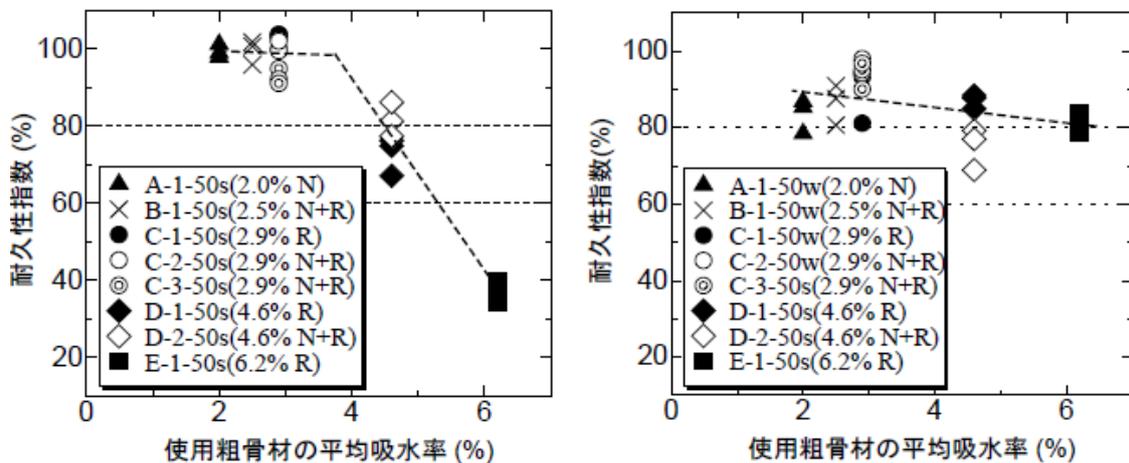


図-2.3.43 平均吸水率と耐久性指数の関係^{2.54)}

(左図:蒸気養生、右図:標準養生)

次いで、水セメント比による影響について、**図-2.3.44** が示されている。なお、使用されている再生粗骨材の原コンクリートは AE コンクリートである。図より、水セメント比の増加に伴い耐久性指数は低下し、質量減少率は増加する傾向にある。これによると、水セメント比が 50% 以下であれば、相対動弾性係数は 80% 以上、質量減少率が 2% 以下となっている。したがって、再生コンクリートの耐凍害性を確保するには、水セメント比を小さくする必要があり、再生粗骨材の原コンクリートが AE コンクリートである場合でも 50%

以下とすることが効果的であるとしている。

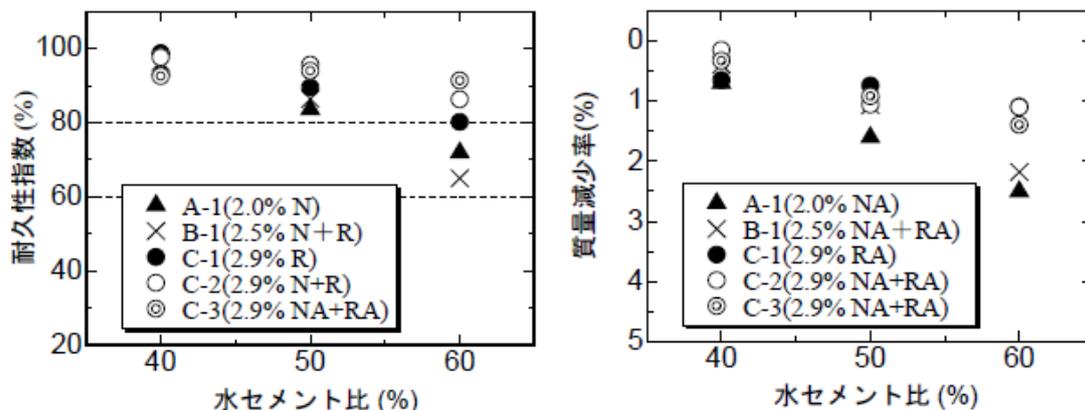


図-2.3.44 水セメント比と耐久性指数の関係^{2.54)}

以上より、再生コンクリートの耐凍害性は普通コンクリートに比べ劣る傾向にあり、特に、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生粗骨材を使用した場合に耐久性指数は著しく低下する。また、耐久性指数は骨材の平均吸水率が大きいほど、また、水セメント比が大きいほど低下する傾向にあり、原コンクリートが AE コンクリートである再生粗骨材を使用する場合には、粗骨材の平均吸水率を 4%程度以下、コンクリートの水セメント比を 50%程度以下にすることによって、耐凍害性に優れた再生コンクリートとすることが可能であると言える。

JIS では、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生粗骨材が含まれる可能性もあることなどを考慮して、低品質、または中品質再生骨材を用いたコンクリートの使用用途を制限している現状にある。しかしながら、低品質再生粗骨材を用いた場合であっても、再生粗骨材の置換率、水セメント比、コンクリート中の空気量を適切に管理することによって、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生粗骨材を使用する場合であっても、耐凍害性を有した再生コンクリートとすることが可能であると考えられる。この点については、データが不足しているため、更にデータを蓄積し検討する必要がある。

2.4 再生骨材の ASR とフライアッシュの抑制効果

再生骨材コンクリート L の規格において、極めてまれな場合ではあるが、仕様発注品においてコンクリート塊に含まれる骨材の種類を特定できた上で、アルカリシリカ反応性による区分を“ A ”とする場合もあるが、ほとんどの場合は区分“ B ”とされる。

再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性については、十分な知見がまだないが、同解説^{2.6)}において、(a) 解体の対象となり得る 30 年前 (1975 年) のコンクリート配合、(b) 原コンクリートの呼び強度は 21 及び 24、その当時 10 年間におけるセメントの最大アルカリ量 (0.95%) 及び平均アルカリ量 (0.74%) を採用したコンクリート塊のアルカリ量、(c) 新コンクリートのセメント量は 320kg/m^3 、(d) 再生骨材コンクリート L に使用される高炉セメント B 種のアルカリ量は 0.5%、等の仮定を置き、再生骨材コンクリート L のアルカリ量を推定すると、セメント中のアルカリ量を 0.95% の場合で $3.28\sim 3.81\text{kg/m}^3$ 、セメント中のアルカリ量を 0.74% の場合で $2.91\sim 3.32\text{kg/m}^3$ となることが示されている。また、上記のセメント中のアルカリ量の場合、小林らによる高炉スラグ微粉末によるアルカリシリカ反応抑制^{2.55)}、または岩月らによる反応性が高いチャート骨材を再生骨材に用いた報告^{2.56)}から、B 種混合セメントを使用すればかなりの場合において完全ではないが、アルカリシリカ反応の抑制対策が図れ、損傷が起こる危険性が少ないと考えられている。

しかし、上記の推定では仮定条件が多いので、実際に現在稼働中の再生骨材プラントからサンプルを抜き取り、再生骨材 L のアルカリ量と測定して検討を行っている。その結果を表-2.4.1 のように示している。

表-2.4.1 再生骨材 L のアルカリ量測定例^{2.6)}

種別	統計量	付着セメントペースト率 (%)	アルカリ量 (%)
再生粗骨材	平均値	22.4	0.07
	標準偏差	9.33	0.01
	変動係数	41.7	15.7
	最大値	47.0	0.09
	最小値	14.0	0.05
再生細骨材	平均値	30.5	0.13
	標準偏差	6.75	0.03
	変動係数	22.2	20.9
	最大値	47.0	0.17
	最小値	22.8	0.10

これによると、再生骨材 L のアルカリ量は、細骨材材の絶乾質量に対して最大で 0.17%、粗骨材の絶乾質量に対して最大で 0.09% となっている。同解説では、目標スランプ 8cm、呼び強度 18 の再生骨材コンクリート L として、単位水量 175kg/m^3 、単位セメント量 292kg/m^3 、単位細骨材量 718kg/m^3 、単位粗骨材量 874kg/m^3 を仮定して、再生骨材コンクリート L 中の最大アルカリ量を求めると、 3.47kg/m^3 となると述べている。

一方、土木学会コンクリート委員会電力施設解体コンクリート利用検討小委員会の報告^{2.57)}によれば、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュによる再生骨材コンクリート L のアル

カリシリカ反応抑制効果の確認試験結果を図-2.4.1のように示している。この実験では、JCI AAR3 “コンクリートのアルカリシリカ反応性試験方法”を用いており、アルカリシリカ反応を促進するために 2.4kg/m^3 のアルカリ量が添加される。なお、図中の横軸のアルカリ量には上記の促進分を差し引いた値で表示してある。原コンクリート中の骨材は JIS A 1804 の迅速法において 0.9%膨張しており、極めてまれな高いアルカリシリカ反応性をもっている。また、原コンクリート中のアルカリ量も 6.0kg/m^3 と我が国において報告された最大値が用いられている。図は、高炉スラグ微粉末を用いた結果のみについて示されたものであるが、これによれば、高炉スラグ微粉末量の置換率が50%ではアルカリ量が 4.2kg/m^3 程度でも有害な膨張量の判定基準 0.1%に達していない。また、置換率 40%でもアルカリ量が 3.5kg/m^3 程度を越えなければ膨張量は 0.1%に達していない。そこで、再生骨材 L の製造において明らかにアルカリシリカ反応などの骨材に起因する変状が生じている原コンクリートは排除されること、塩化物を多量に含む原コンクリートは排除されること、1986年以降のアルカリシリカ反応抑制対策を講じた構造物には損傷事例が報告されていない^{2.58)}ことなどを考慮して、高炉セメント B 種またはフライアッシュセメント B 種を用いるか、または高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混和材として用いることによって、アルカリシリカ反応の危険性を大幅に低減できると判断している。なお、混和材として用いる場合の割合について、粉体量（ポルトランドセメントと各混和材の総和）に対して、高炉スラグ微粉末の場合に 40%以上、フライアッシュの場合に 15%以上としている。

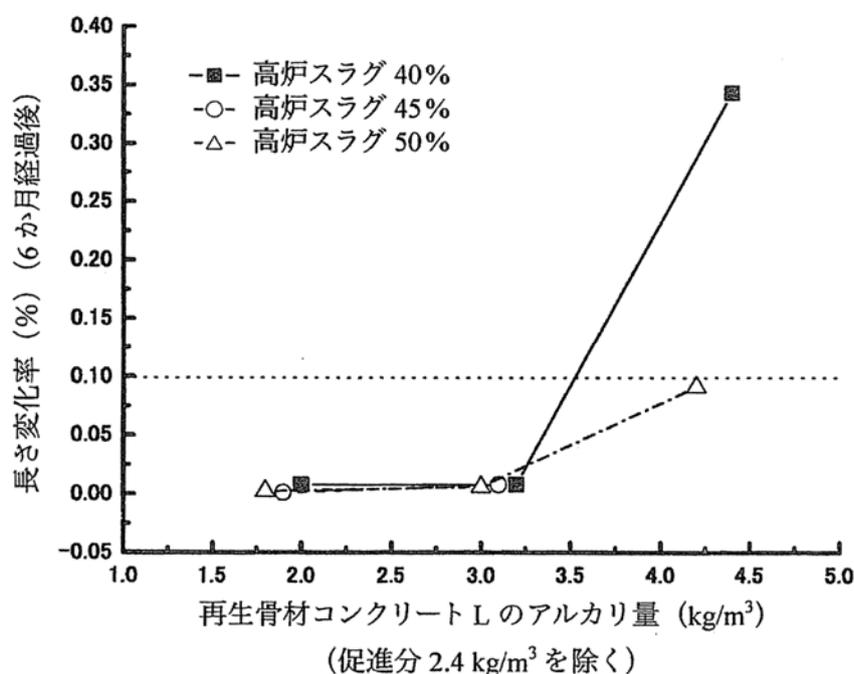


図-2.4.1 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応抑制効果^{2.57)}

以上、再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性と対策方法に関して、再生骨材コンクリート L の規格・解説においてまとめられている事柄について述べた。以下、再生骨材コンクリート L の規格制定後に行われている最新の研究成果について整理を行う。

黒田 ^{2.59)}は比較的穏やかな反応性を有する骨材を使用したコンクリートから、加熱すりもみ法によって、一定の品質を有する再生骨材（吸水率 1.10~3.98%）を製造し、再生骨材コンクリートを練り混ぜ、その諸性状について調査している。その結果、練混ぜ時にアルカリを添加して行った湿気槽養生法では、添加アルカリ量が $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.4\text{kg/m}^3$ までの範囲では、実用上問題となるような ASR による劣化は生じなかったことを実験的に示している。また、外部からアルカリが供給される飽和 NaCl 溶液浸漬法では、ASR が生じている原コンクリートから製造した再生骨材を用いたコンクリートで ASR の進行が顕著となったことを示している（図-2.4.2）。

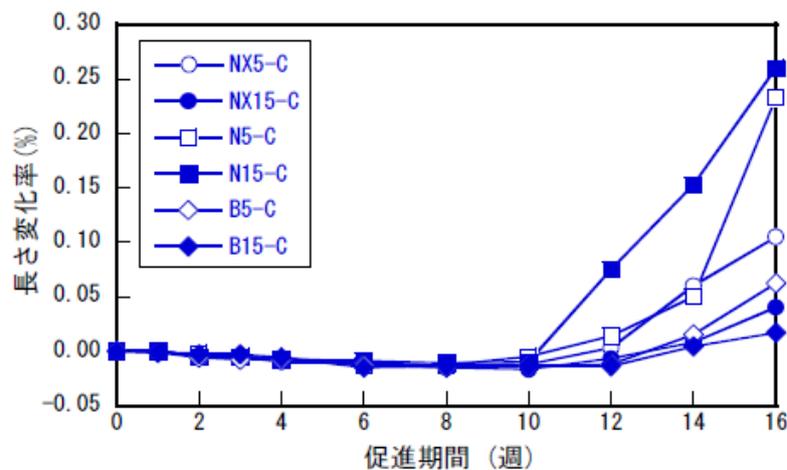


図-2.4.2 飽和 NaCl 溶液浸漬法による測定結果 ^{2.59)}
(再生粗骨材コンクリート)

次いで、黒田 ^{2.60)}は ASR 特性の異なる原骨材を使用し、アルカリ量の異なるモルタルやコンクリートを練り混ぜ、促進養生を行った後、再生骨材を製造し、新たに添加するアルカリ量を変えて、モルタルバーおよびコンクリートバーによる促進試験を実施している。その結果、(a) 含有アルカリ量が少ない再生粗骨材を用いたコンクリートの場合、再生後にもたらされるアルカリ量が原骨材の ASR を引き起こす量を超えなければ膨張は進行しなかったこと、(b) 含有アルカリ量が極めて多く、ASR による劣化が進行中の原コンクリートから再生粗骨材を製造したケースでは、比較的少量のアルカリの添加でも膨張が認められたが、アルカリを添加しなかったケースでは、膨張は抑制されたことを明らかにしている。したがって、再生骨材に含まれているアルカリ量が再生コンクリートの ASR に影響するが、普通コンクリートと同様にコンクリート中の総アルカリ量を減らすことは有効な対策であると考えられる。

一方、再生骨材コンクリートの ASR に対する混和材の影響について、清水ら ^{2.61)}や佐藤ら ^{2.62)}は ASR 劣化構造物より製造した再生骨材とその原骨材を使用して、混合セメントの使用による ASR 抑制効果を屋内促進養生試験と屋外暴露試験により検証した結果、再生骨材コンクリートの ASR 抑制対策としては JIS A5308 に準拠した、混合セメントの置換率では不十分であり、それらの置換率をさらに高める必要があることを明らかにしている。

その実験結果の一例を図-2.4.3に示すが、これによると、フライアッシュの置換率が15%では膨張率0.1%を超えており、ASRが抑制されていないことが分かるが、置換率25%では膨張率はほぼ0.0%に推移しており、ASRが十分に抑制されている。つまり、ASR抑制効果が期待できるフライアッシュの最小置換率は15~25%の間に存在するものと考えられる。

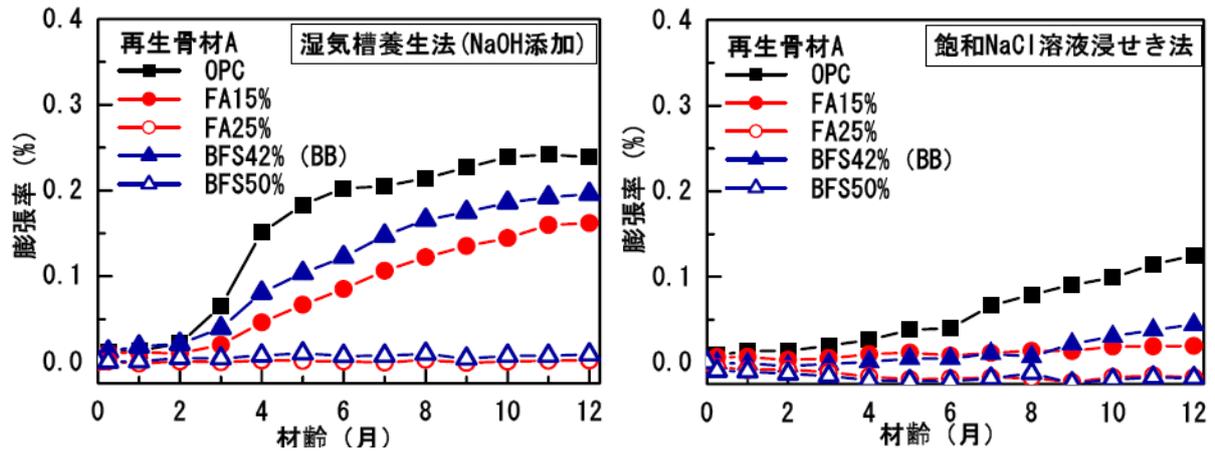


図-2.4.3 再生骨材コンクリートの混合セメントによるASR抑制効果^{2.62)}

2.5 再生コンクリートの品質評価手法に関する研究

本節では、再生コンクリートの品質評価手法に関して、既往の研究で提案されている代表的な手法についてまとめることとする。

2.5.1 相対品質法

菊池・道正ら^{2.36)}は、再生コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、乾燥収縮ひずみは、再生粗骨材の品質および置換率の影響を受けることを実験的に明らかにし、再生コンクリートの品質管理手法として相対品質値法を提案している。この相対品質値は、骨材の相対的な品質を、使用する骨材の物性値とその絶対容積の和を、使用した全骨材の絶対容積の和で除して求めたものである。骨材の物性値として吸水率あるいは400kN破砕値をパラメータとしたときに、再生コンクリートの諸性質と相対品質値がほぼ比例関係にあることが確認されており

2.63)、江口ら^{2.64)}も図-2.5.1に示すように、再生コンクリートの諸品質と相対品質値（ここでは、相対吸水率）の間に明確な相関性が認められることを明らかにしている。

このように、相対品質値法は非常に有効な手法であると考えられるが、圧縮強度について、基準となるコンクリートの使用材料が全く異なる場合には、同式を用いることができず、新たに式を導き出すために、多くの試験練りを行う必要が生じる。全国規模での再生骨材コンクリートの普及を考慮した場合には、多大な時間と労力を要するため、汎用性に欠けると判断される。

2.5.2 骨材性能評価システム

村上ら^{2.37)}は、再生骨材の性能を評価する試験を確立するために、再生骨材の応力と骨材沈下量から求める骨材強さ係数という試験値を検討しており、その骨材強さを用いて、再生コンクリートの圧縮強度、動弾性係数、乾燥収縮率などの特性を推定する手法を提案している。この骨材強さ係数について、骨材試験により計測した応力とその時の沈下量から応力-沈下量曲線を描き、試験最大荷重400kN時の最大沈下量の1/2の点と原点を結

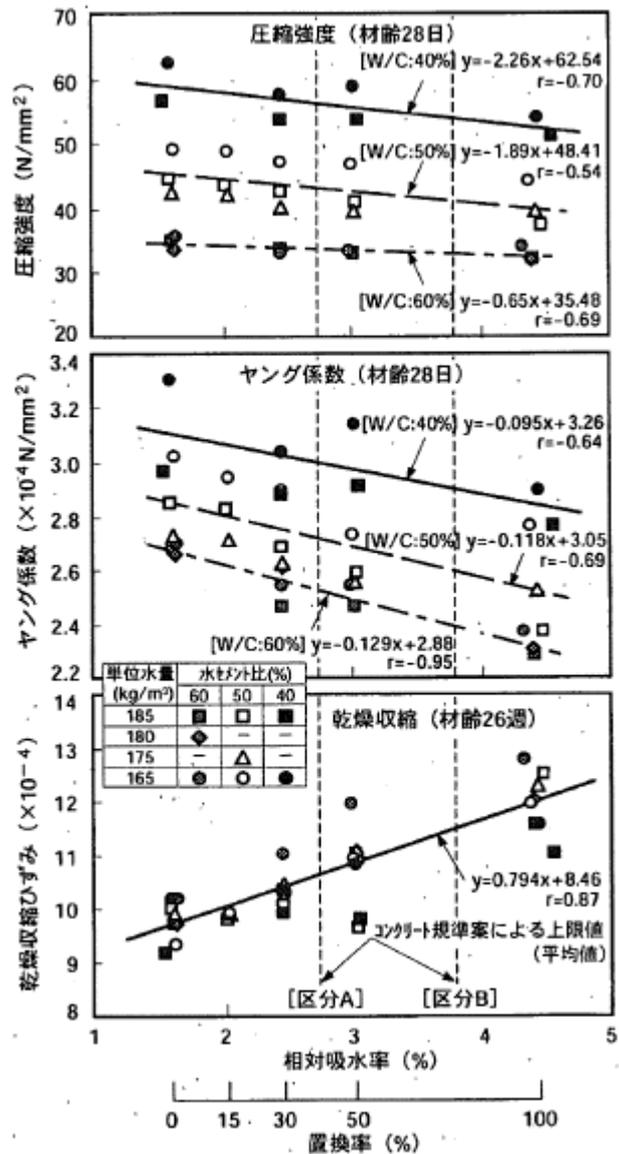


図-2.5.1 再生コンクリートの諸品質と相対吸水率の関係^{2.63)}

ぶ割線を引き、この割線と 400kN の応力軸に平行な線との交点、この時の応力を骨材強さ係数としている（図-2.5.2 を参照）。したがって、骨材強さ係数の算出には骨材破砕試験の実施と、試験時の応力や沈下量の計測データが必要であることから、汎用性に欠けることが懸念される。

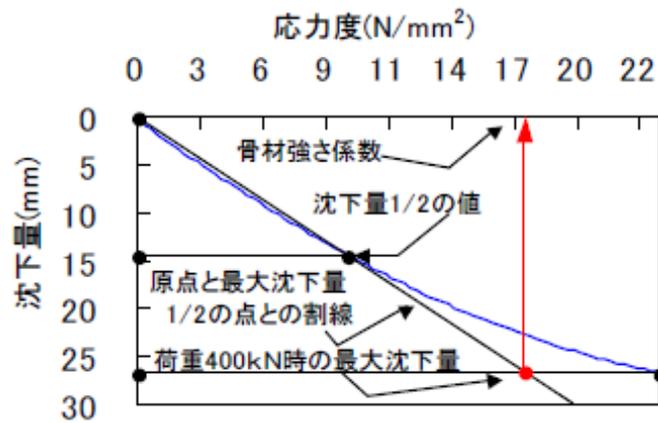


図-2.5.2 骨材強さ係数の求め方^{2.37)}

以上、再生コンクリートの品質評価手法について、既往の研究において提案されている代表的な手法を挙げたが、汎用性のある予測手法は提案されておらず、研究の余地があることがわかった。

2.6 まとめ

本章では、日本国内における再生コンクリートに関する技術と実用化の現状について述べるとともに、再生コンクリートの各性状について普通コンクリートの場合と比較して既往の研究をまとめた。次いで、再生骨材使用時に特に懸念されるアルカリシリカ反応に対するフライアッシュの抑制効果について得られている成果を整理した。さらに、再生コンクリートの品質評価手法について既往の研究で提案されている方法を把握した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 再生コンクリートに関する技術と実用化の現状については、再生骨材の品質ごとに、その特性と問題点についてまとめ、再生骨材 L を用いた再生コンクリートの普及を促進することが望ましいことを、社会的背景に基づいて示した。また、再生骨材の品質に関わらず、アルカリシリカ反応に対する予防的な対策が極めて重要であるが、その技術は発展途上にあり、そのことが再生コンクリートの利用普及の妨げになっていることを示した。
- 2) 再生コンクリートの圧縮強度は、再生骨材の吸水率増加に伴い、または再生粗骨材の置換率増加に伴ってほぼ直線的に低下する傾向にある。再生粗骨材置換率 100%の場合に、吸水率 1%あたりの低下率は 4%であり、吸水率 6%の場合には強度は 8 割程度になる。また、再生コンクリートの圧縮強度は、通常の強度の範囲内（平均値では 50N/mm^2 程度以下）では普通コンクリートと同様にセメント水比と直線関係にあり、普通コンクリート同様にセメント水に基づいた式によって管理可能であると判断されるが、再生粗骨材の原コンクリートの強度によって頭打ちとなる強度は変動することが予想されるため、この点については検討する必要がある。
- 3) 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートに比べて大きくなり、その増加率は再生粗骨材の吸水率、またはその置換率の増加に伴い大きくなる傾向にある。また、水セメント比や単位水量を小さくすることで再生コンクリートの乾燥収縮ひずみを低減できる。
- 4) 再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートと同等であるかやや劣る傾向にあり、使用する再生粗骨材の品質（原コンクリートの水セメント比や中性化の進行具合）によって異なるようである。しかし、再生コンクリートの中性化抵抗性は水セメント比による影響が最も大きいことから、適切な水セメント比の上限値を設けることによって十分な中性化抵抗性を有する再生コンクリートとすることが可能である。
- 5) 再生コンクリートの耐凍害性は普通コンクリートに比べ劣る傾向にあり、特に、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生粗骨材を使用した場合に耐久性指数は著しく低下する。また、耐久性指数は骨材の平均吸水率が大きいほど、また、水セメント比が大きいほど低下する傾向にあり、原コンクリートが AE コンクリートである再生粗骨材を使用する場合には、粗骨材の平均吸水率を 4%程度以下、コンクリートの水セメント比を 50%程度以下にすることによって、耐凍害性に優れた再生コンクリートとすることが可能である。

- 6) 反応性を有する再生骨材を使用した場合においても、フライアッシュの ASR 抑制効果は十分に期待でき、ASR 抑制効果が期待できるフライアッシュの最小置換率は 15～25%の間に存在するものと考えられる。
- 7) 既往の再生コンクリートの品質評価手法について、実用的で汎用性のある手法は提案されていないのが現状であり、研究の余地があることがわかった。

【第2章参考文献】

- 2.1) 独立行政法人土木研究所：再生骨材の最近の動向について、北海道開発土木研究所月報、No.632、pp.29-33、2006.1
- 2.2) 国土交通省のリサイクルホームページ：
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/jittaichousa/index01.htm>
- 2.3) 日本規格協会：JISハンドブック 生コンクリート、再生骨材Mを用いたコンクリート、JIS A 5022、pp.385-420、2010
- 2.4) 日本規格協会：JISハンドブック 生コンクリート、コンクリート用再生骨材H、pp.164-182、2006
- 2.5) 社団法人日本コンクリート工学協会：平成16年度経済産業省委託、建設廃棄物コンクリート塊の再資源化物に関する標準化調査研究成果報告書、pp.94、2005.3
- 2.6) 日本規格協会：JISハンドブック 生コンクリート、再生骨材Lを用いたコンクリート、pp.183-231、2006
- 2.7) 片脇清士ほか：コンクリート中の塩分の定量及び形態に関する研究、土木研究所資料、第1987号、建設省土木研究所、1983.1
- 2.8) 財団法人国土開発技術開発センター：再生細骨材の塩化物量の試験方法に関する検討、再生コンクリートの利用技術の開発、平成8年度報告書、pp.45-52、1997.3
- 2.9) 社団法人日本コンクリート工学協会：平成16年度経済産業省委託、建設廃棄物コンクリート塊の再資源化物に関する標準化調査研究成果報告書、pp.184-190、2005.3
- 2.10) 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会土木構造物分科会／廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書、(財)国土開発技術研究センター、1983
- 2.11) 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会土木構造物分科会／建設事業への廃棄物利用技術の開発に関する調査報告書、(財)国土開発技術研究センター、1984～1986
- 2.12) 南波篤志、阿部道彦、棚野博之、前田弘美：再生コンクリートの品質改善に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.65-70、1995
- 2.13) 南波篤志、阿部道彦、棚野博之、前田弘美：再生コンクリートの力学特性および乾燥収縮に及ぼす再生粗骨材の品質の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.1047-1052、1996
- 2.14) 後藤彰、堺孝司：再生骨材を用いたコンクリートの耐凍害性と乾燥収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1105-1110、1997
- 2.15) 榎場重正、川村満紀、鳥居和之、竹本邦夫：再生骨材コンクリートの乾燥収縮および耐久性について、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.3、pp.89-92、1981
- 2.16) 鳥居和之、川村満紀、竹本邦夫、榎場重正：再生骨材の舗装コンクリート用骨材としての適応性、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.6、pp.85-88、1984
- 2.17) 川瀬清孝、飛坂基夫、柳啓：再生骨材を混合使用したコンクリートの物性に関する研究、その3 凍結融解試験について、昭和58年度日本大学理工学部学術講演論文

- 集、1983
- 2.18) 笠井芳夫、阿部道彦、柳啓：再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究、セメント技術大会講演要旨、Vol.50、pp.346-347、1996
 - 2.19) 西村新蔵、矢村潔、林昭富：再生粗骨材使用コンクリートの弾塑性的性質及び耐久性、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.6、pp.77-80、1984
 - 2.20) 福田萬大、中丸貢：再生コンクリートの舗装への利用に関する実験、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.6、pp.89-92、1984
 - 2.21) 新井暢、中村成春、梶田佳寛、阿部道彦：再生細骨材コンクリートの強度及び変形性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1081-1086、1997
 - 2.22) 鯉江利夫、吉兼亭、中島佳郎、木村孝之：再生骨材の簡易コンクリートへの適応性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1099-1104、1997
 - 2.23) 長瀧重義、佐伯竜彦、飯田一彦：再生粗骨材を用いたコンクリートの諸特性、第52回セメント技術大会講演要旨、pp.400-401、1998
 - 2.24) 片平博：再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響、セメント・コンクリート、No.654、pp.38-44、2001.8
 - 2.25) Nixon P. J. Recycled concrete as an aggregate for concrete – a review. First state-of-the-art report RILEM TC -37-DRC. Materials and Structures (RILEM), no. 65, September 1978, pp. 371-378.
 - 2.26) BCSJ. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete, Building Contractors Society of Japan. Committee on disposal and reuse of concrete construction waste. summary in Concrete Journal, Japan, vol. 16, no. 7, 1, January 1983, pp. 79-83
 - 2.27) Wesche K., Schulz R. Beton aus aufbereitetem Altbeton, Technologie und Eigenschaften, Beton, vol. 32, nos. 2 and 3, February and march 1982
 - 2.28) Buck A.D. Recycled concrete as a source of aggregate. ACI journal, pp. 212-219, may 1977
 - 2.29) Malhotra V.M. Use of recycled concrete as a new aggregate, proc. of symposium on energy and resource concervation in the cement and concrete industry, CANMET, report no. 76-8, Ottawa, 1978
 - 2.30) Schulz R.R. Wiederverwendung von altem Beton als Zuschlag fur neuen Beton, VII. internationale Baustoff, und Silikattagug (IBAUSIL). Weimar 1979
 - 2.31) Schulz R.R. Das Verformungsverhalten von Betonsplittbeton (Beton aus wiederverwendetem Altbeton). XIII Konferenz der Silikatindustrie und Silikatwissenschaft, Siliconf., Budapest, june 1981
 - 2.32) Frondistou Yannis S. Waste concrete as aggregate for new concrete, ACI journal, august 1977, pp. 373-376, 1977
 - 2.33) Ravindrarajah R.S., Tam T.C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of Concrete Reearch, vol. 37, no. 130, march 1985
 - 2.34) Gerardu J.J.A., Hendriks C.F. Recycling of road pavement materials in the Netherlands,

rijkswaterstaat communications no. 38, the Hague, 1985

- 2.35) 高橋智彦ほか：重回帰分析等を用いた再生コンクリートの強度特性に関する評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1227-1232、2002
- 2.36) 菊池雅史、道正泰弘、安永亮、江原恭二、増田彰：再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp.11-20、1995.8
- 2.37) 村上順一、山崎順二、二村誠二、再生骨材の性能評価と再生コンクリート特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1515-1520、2004
- 2.38) 野口貴文、友澤史文：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係、日本建築学会構造系論文集、No.474、pp.1-10、1995.8
- 2.39) 朴元俊、呉多英、申尚英、野口貴文：再生骨材コンクリートにおける圧縮強度とヤング係数との関係、第65回セメント技術大会講演要旨、pp.94-95、2011
- 2.40) Hansen T.C., Boegh E. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concretes, ACI journal, September-october 1985
- 2.41) Zagurskij V.A., Zhadanovskij B.V. Breaking reinforced concrete and recycling crushed materials, special technical report. research, Institute for Concrete and Reinforced Concrete (GOSSTROY), Moscow, 1985, English translation available from European Demolition Association, Wassenaarseweg 80, 2596 CZ, Den Haag, the Netherlands.
- 2.42) Ravindarajah R.S., Tam T.C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of Concrete Research, vol. 37, no. 130, march 1985
- 2.43) 道正泰弘、菊池雅史、増田彰、小山明男：原コンクリートの性質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、第485号、pp.1-10、1996.7
- 2.44) 井手杏里、渡辺英樹、玉井孝幸、嵩英雄：コンクリートの諸性質に及ぼす再生粗骨材の砕石に対する置換率の影響に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.137-138、2005.9
- 2.45) 柳啓、笠井芳夫、飛坂基夫：再生粗骨材コンクリートの諸性質に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.709-710、1998.8
- 2.46) 山崎順二、立松和彦、二村誠二、村上順一：再生骨材の混合がコンクリートの中性化抵抗性に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.243-244、2003.9
- 2.47) 道正泰弘、菊池雅史ほか：再生コンクリートの建築構造用コンクリートへの適用（その9.原コンクリートの中性化が再生コンクリートの品質に及ぼす影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.153-154、1999.9
- 2.48) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.612-624、2009
- 2.49) 山崎順二、二村誠二、村上順一：再生骨材の性能評価システムに関する研究、その8 再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.999-1000、2002.8
- 2.50) 柳啓、笠井芳夫、飛坂基夫：再生粗骨材コンクリートの諸性質に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.709-710、1998.9

- 2.51) 桂修、吉野利幸、関口岳彦、鎌田英治：再生コンクリートの凍害・初期凍害に関する研究（その3.耐凍害性と骨材の物性）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1129-1130、1995.8
- 2.52) 長瀧重義：ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書、2001
- 2.53) 田浦裕二郎、添田政司、大和竹史、池翰相：再生骨材の品質がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響、土木学会第60回年次学術講演会、pp.775-776、2005.9
- 2.54) 佐藤靖彦、佐々木慎一、奥山英俊、今野克幸：再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1503-1508、2004
- 2.55) 小林茂敏、河野広隆、沼田晋一、近田孝夫：高炉スラグ微粉末のアルカリ骨材反応抑制効果について、土木学会 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用性に関するシンポジウム、pp.155-162、1987.3
- 2.56) 岩月栄治、森野奎二：再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.1229-1334、2003
- 2.57) 土木学会 コンクリート委員会 電力施設解体コンクリート利用検討小委員会：電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー120、pp.166、2005.4
- 2.58) 土木研究所構造物マネジメント技術チーム：既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果－1999年調査結果－、土木研究所資料3845号、2002.3
- 2.59) 黒田泰弘：反応性を有する再生骨材を用いたコンクリートの諸性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.379-384、2008
- 2.60) 黒田泰弘：再生骨材のアルカリシリカ反応性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1765-1770、2009
- 2.61) 清水和博、杉山彰徳、酒井賢太、佐藤良恵：再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.1209-1214、2007
- 2.62) 佐藤良恵、清水和博、杉山彰徳、鳥居和之：再生骨材コンクリートのASR抑制対策の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.1041-1046、2008
- 2.63) 大島豊、道正泰弘、成川匡文、江口清、寺西浩司、菊池雅史：大規模電力建物における再生骨材および再生コンクリートの利用（その10. 再生コンクリートの強度・耐久性と骨材品質の関係）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、pp.741-742、1998.9
- 2.64) 江口清、成川匡文、寺西浩司、中込昭、岸本均：低環境負荷型再生コンクリートの実用化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第570号、pp.15-21、2003.8

第3章

CfFA を混入した再生コンクリートの 耐久性

3章 CfFA を混入した再生コンクリートの耐久性

3.1 はじめに

2章（既往の研究）で述べたように、低品質な再生粗骨材を用いたコンクリートの品質は普通骨材を用いたものと比べて劣り、特に、乾燥収縮や凍結融解などの耐久性は大きく低下する傾向にある。しかし、水セメント比や再生粗骨材の混入率を小さくすることによって、その品質を改善できることが明らかとなっている。一方、ASR や塩害に対しては、再生骨材に含まれる付着モルタルに含まれるアルカリ分や塩分の量も考慮する必要があるため、再生コンクリートの総アルカリ量、または塩分量を規定値以下に収めるためには、単位セメント量は要求性能を満足する範囲内で少なくすることが望ましい。すなわち、これらの影響を定量的に評価し、最適な調合を選定する必要がある。

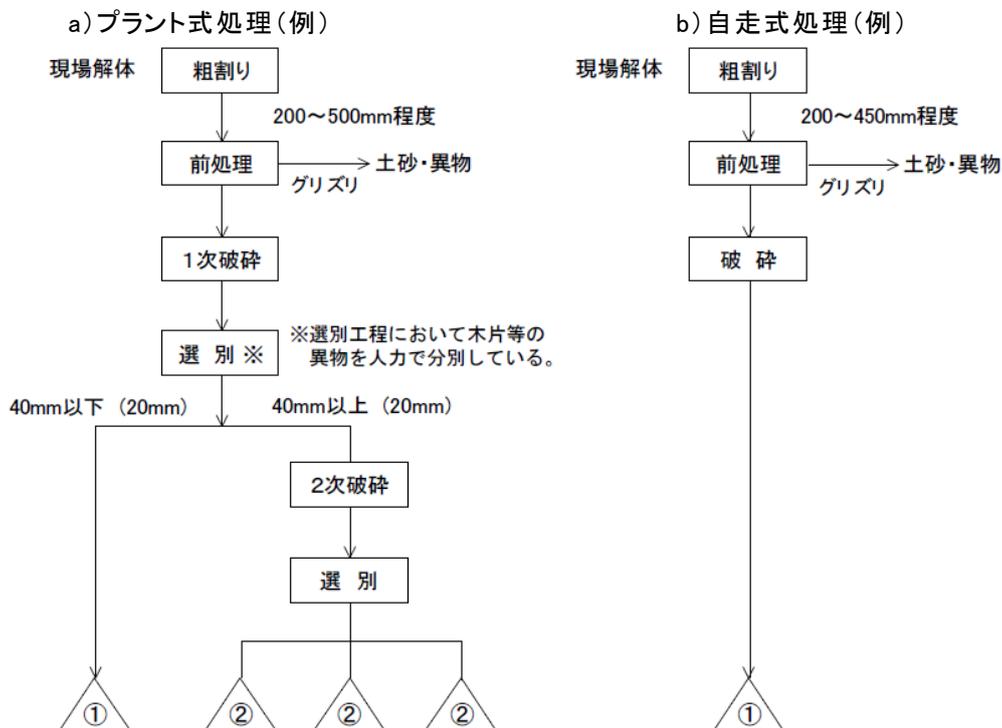
また、混和材の使用によって再生コンクリートの耐久性の向上を図ることも有効な手段として考えられている。フライアッシュもそのような混和材の1つであり、ASR に対して有効であることが知られている。しかし、フライアッシュを混入した再生コンクリートの特性に関しては、いくつかの報告があるものの、とりわけ、その耐久性に関する既往の研究例は少なく、調合設計法の確立に必要とされるデータが不足している現状にある。

以上より、本章では、CfFA を混入した低品質再生骨材コンクリートの材料設計法の確立に必要な基礎資料を得るために、再生骨材の品質およびその置換率、CfFA 混入率が再生コンクリートの強度性状、ならびに中性化抵抗性、乾燥収縮、耐凍害性、ASR などの耐久性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験的に検討を行うこととする。

3.2 実験計画

本研究で対象としている再生骨材Lは、主としてコンクリート構造物を解体した際に生じるコンクリート塊をクラッシャーなどで破碎して製造した、高度処理を施していないコンクリート用の骨材であり、多くのエネルギー及びコストをかけることなく有効に使える範囲に再生骨材コンクリートの用途を限定することを基本に組み立てられたものとされている。本研究では、上記のような簡易処理を施した再生路盤材をそのまま、あるいは粒度調整したものをを用いた再生コンクリートの耐久性について実験的に検討する。

図-3.2.1 にコンクリート塊の破碎処理（例）^{3.1)}を示す。コンクリート塊の破碎にあたって、コンクリート解体現場でコンクリート塊を破碎装置の供給最大寸法（200mm～450mm程度）以下に粗割する。破碎は、コンクリート骨材や路盤材等の適当な粒度分布を必要とする用途では、1次破碎と2次破碎の2段階で行われることが多く、1次破碎はジョークラッシャーなどの粗粉碎用破碎機で粉碎した後、目視選別による木片等の異物を選別し、40mm以下と以上の粒径（用途によっては20mm）に選別する。40mm以上のコンクリート塊は2次破碎（インパクトクラッシャー；衝撃破碎）によって40mm以下の破碎物に加工される。本実験では、生コンクリートとしての利用を考慮しているため、上記の工程で得られた破碎物をさらに25mmおよび5mmのふるいを用いてふるい分け、骨材粒度範囲が25～5mmのものを使用することとした。



- ①クラッシャーの処理の設定等により、100-0mm～20-0mm程度の破碎物となる。
現場解体で異物が混入している場合、破碎物にも異物が混入する。
②振動ふるいの目を調整することにより利用用途にあった粒径の破碎物となる。
(例)・40-0mm または 20-0mm
・40-5mm、5-0mm または 40-10mm、10-0mm
・20-13mm、13-5mm、5-0mm 等

図-3.2.1 コンクリート塊の破碎処理(例)^{3.1)}

以上より、得られた数種類の再生骨材を用いて、再生骨材の品質およびその置換率、水セメント比ならびに CfFA 混入率が再生コンクリートの各性状に与える影響を明らかにすることを目的とした2つの実験を計画した。

その実験概要を表-3.2.1に示す。実験Ⅰでは、九州の佐賀（シリーズ1）、大分（シリーズ2）、沖縄（シリーズ3）の3箇所のレディーミクストコンクリート工場において、同一県内で製造されている再生路盤材を用いて、各工場の基準調合（以下、基準コンクリート）に対し CfFA を混入した再生コンクリートの各性状を把握することとした。

実験Ⅱでは、原コンクリートの起源が不明である数種類の品質の異なる再生粗骨材を用いたシリーズ（シリーズ1）、原コンクリートのコア強度が明確であり砂利を起源とする数種類の再生粗骨材を用いたシリーズ（シリーズ2）、再生粗骨材の置換率による影響を主に検討するシリーズ（シリーズ3）の3シリーズについて実験を行った。

表-3.2.1 実験概要

分類	項目	試験方法	実験Ⅰ			実験Ⅱ		
			1	2	3	1	2	3
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	○	○	○	○	○	○
	スランプフロー	JIS A 1150	○	○	○	-	-	-
	空気量	JIS A 1128	○	○	○	○	○	○
	単位容積質量	JIS A 1116	○	○	○	○	○	○
	温度	JIS A 1156	○	○	○	○	○	○
	塩分含有量	JIS A 5023	-	○	-	-	-	-
強度性状	圧縮強度	JIS A 1108	○	○	○	○	○	○
	静弾性係数	JIS A 1149	-	○	○	○	○	○
耐久性	乾燥収縮	JIS A 1129-2	-	○	○	○	○	○
	中性化	JIS A 1153	-	○	○	△	○	○
	凍結融解	JIA A 1148(A 法)	-	-	-	-	○	-
	ASR	JIS A 1145 JIS A 1146 ZKT-206	-	-	-	-	○	○

△:乾燥収縮試験終了後の供試体を割裂し、中性化深さを測定したもの

○:JIS A 1125 に準拠して促進中性化深さを測定したもの

3.3 実験方法

3.3.1 使用材料および調合

(1) 実験 I

① 使用材料

表-3.3.1 に骨材の物性を、再生骨材の外観を写真-3.3.1 にそれぞれ示す。図-3.3.1 に絶乾密度と吸水率の関係を示す。図より、シリーズ 2 の再生粗骨材は JIS A 5023 の再生骨材 L に相当する低品質な再生骨材であるが、シリーズ 1 および 3 の再生粗骨材はその規格も外れるより低品質なものであった。図-3.3.2 に再生粗骨材の粒度分布を示す。シリーズ 1 および 3 については、標準粒度の範囲に入るように粒度調整を行った。再生粗骨材の前処理について、シリーズ 1 およびシリーズ 2 のものは水による洗浄を行い、シリーズ 3 のものは洗浄を行わずそのまま使用した。そのため、表-3.3.1 に示すように、シリーズ 3 の再生粗骨材の微粒分量が多く、規格値を超えていた。セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を用いた。使用した CfFA の物性を表-3.3.2 に示す。混和剤には通常タイプの AE 減水剤を使用した。一部の調合では高機能タイプの AE 減水剤を使用した。

表-3.3.1 骨材の物性

場所	シリーズ	項目	種類	記号	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率 (%)	微粒分量 (%)
佐賀	1	細骨材	海砂	S1	2.60	2.57	1.22	-	2.30	0.3
			砕砂	S2	2.57	2.50	2.81	54.1	3.15	2.1
		粗骨材	砕石	G	2.80	2.75	1.75	59.8	6.66	0.7
			再生	RG-A	2.38	2.21	7.43	60.4	6.66	0.8
大分	2	細骨材	海砂	S1	2.58	2.54	1.52	63.5	2.95	1.9
			砕砂	S2	2.61	2.58	1.14	61.4	1.77	1.4
		粗骨材	砕石	G	2.64	2.62	0.62	60.7	6.58	0.4
			再生	RG-B	2.40	2.26	6.26	55.4	6.96	0.8
沖縄	3	細骨材	海砂	S1	2.60	2.55	1.95	65.3	2.31	1.7
			砕砂	S2	2.66	2.63	1.23	64.9	2.97	4.6
		粗骨材	砕石	G	2.70	2.69	0.48	61.2	6.48	0.1
			再生	RG-C	2.35	2.19	7.37	60.8	6.56	2.1
JIS A 5023 の規格値			再生粗骨材 L	-	-	-	7.0 以下	-	-	2.0 以下



佐賀 (RG-A)



大分 (RG-B)



沖縄 (RG-C)

写真-3.3.1 再生骨材の外観

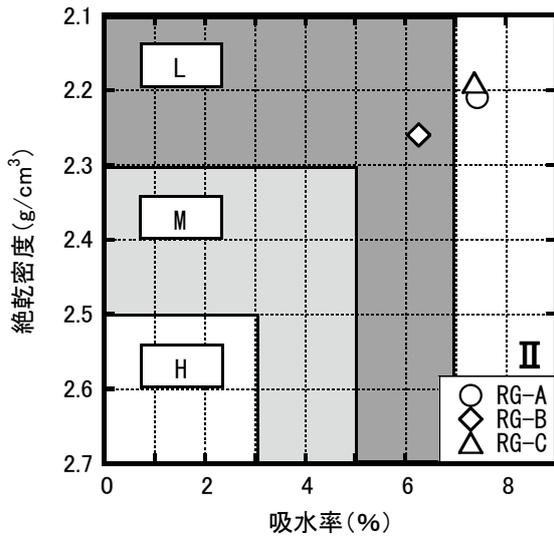


図-3.3.1 絶乾密度と吸水率の関係

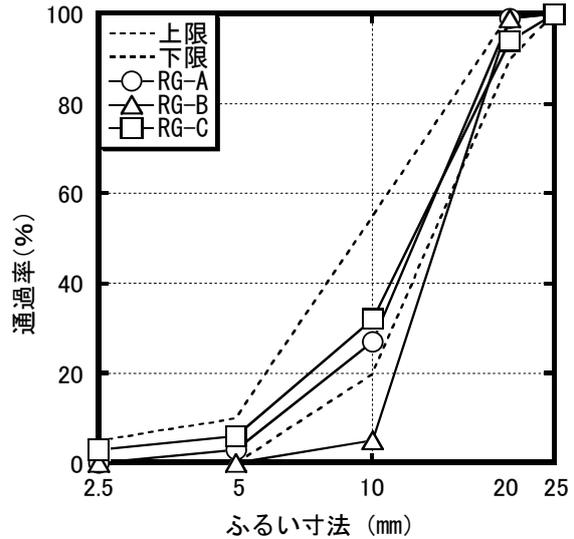


図-3.3.2 再生粗骨材の粒度分布

表-3.3.2 CfFA の物性

二酸化ケイ素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数(%)	
						28日	91日
69.0	0.05	0.36	2.30	3620	96.1	82	109

②調合

調合概要を表-3.3.3 に、調合を表-3.3.4 にそれぞれ示す。W/P は再生粗骨材および CfFA を用いた調合に関しては 3 水準とし、CfFA 混入率は全粉体量に対する質量比で 20% とした。また、再生粗骨材置換率の影響を調べるため、シリーズ 1 およびシリーズ 2 では、置換率 50%、シリーズ 3 では、50、30、20 および 10% について検討を行った。なお、目標スランプは 18±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5% とした。

表-3.3.3 調合概要

シリーズ	再生粗骨材			W/P (%)	CfFA 置換率 (%)	目標スランプ	目標空気量
	製造場所	洗浄	置換率 (%)				
1	佐賀	有	0、50、100	40、45、50	0、20	18±2.5 (cm)	4.5±1.5 (%)
2	大分	有	0、50、100	60、51、44	0、20		
3	沖縄	無	0、10、20、30、50、100	55、50、45	0、20		

表-3.3.4 コンクリートの調合(実験 I)

シリーズ	調合		CfFA/ (C+CfFA) (%)	RG		W/P (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)									
	No.	記号		種類 記号	置換率 (%)				W	C	CfFA	S1	S2	G	RG			
1	1	N-50	0	RG-A	0	50	50.0	44.5	182	364	0	531	226	1025	0			
	2	N-CfFA-50	20			50	62.5	43.8		291	73	516	219					
	3	N-CfFA-45				45	56.3	42.6		324	81	491	209					
	4	N-CfFA-40				40	50.0	41.0		364	91	460	195					
	5	R100-50			0	50	50.0	44.5		364	0	531	226	0	868			
	6	R100-CfFA-50	20		50	62.5	43.8	291		73	516	219						
	7	R100-CfFA-45			45	56.3	42.6	324		81	491	209						
	8	R100-CfFA-40			40	50.0	41.0	364		91	460	195						
	9	R50-CfFA-50			50	62.5	43.8	291		73	516	219	513	434				
	10	R50-CfFA-40	40		50.0	41.0	364	91		460	195							
2	1	N-51	0	RG-B	0	51	51.0	45.8	180	353	0	235	549	954	0			
	2	N-CfFA-51	20			51	63.8	45.0		180	282	71	229			535		
	3	R100-60	0		100	60	60.1	51.0		179	298		270	631	0	805		
	4	R100-51				51	51.0	49.6		180	353		256	596				
	5	R100-44				44	44.0	48.0		182	414		239	558				
	6	R100-CfFA-60	20			60	75.2	50.5		179	238	60	265	618				
	7	R100-CfFA-51				51	63.8	49.0		180	282	71	249	582				
	8	R100-CfFA-44				44	55.0	47.2		182	331	83	232	540				
	9	R50-CfFA-51	50		51	63.8	46.9	180		282	71	239	556	461	419			
3	1	N-60	0	RG-C	0	60	60.0	49.7	180	300	0	527	360	923	0			
	2	N-55				55	55.0	48.6				180	327	510		348	932	
	3	N-50				50	50.0	47.1				182	364	484		330	940	
	4	N-45				45	45.0	45.3				182	404	456		311	953	
	5	N-CfFA-55	20			55	68.9	48.6				175	254	64		509	347	932
	6	N-CfFA-50				50	62.5	47.1				178	285	71		482	329	934
	7	N-CfFA-45				45	56.2	45.3				181	322	80		449	306	940
	8	R100-55	0			100	55	55.0				48.6	183	333		0	505	345
	9	R100-CfFA-55	20		55		68.7	48.6	178	259	65	505	345		804			
	10	R100-CfFA-50			50		62.4	47.1	181	290	72	477	326		808			
	11	R100-CfFA-45			45		56.3	42.0	184	327	82	413	282		860			
	12	R50-CfFA-50			50	62.4	47.1	181	290	72	477	326	464	404				
	13	R30-CfFA-50	30		50	62.5	47.1	180	288	72	479	327	652	243				
	14	R20-CfFA-50	20			62.6	47.1	179	286	72	480	328	745	162				
	15	R10-CfFA-50	10			62.5	47.1	178	285	71	482	329	841	81				

(2) 実験Ⅱ

① 使用材料

使用した再生粗骨材は原コンクリートが不明なもの（記号：RG-D～RG-F）が3種類、永年使用され解体された建物より製造されたものが3種類（記号：RG-G～RG-I）の計6種類である。解体建物の概要は表-3.3.5に示す通りであり、大分県内の3地区において学校校舎として利用されていたRC構造物で、建設時期は昭和37年～41年、経過年数は40年程度であった。コア強度は17.1～27.3N/mm²のものである。骨材の製造方法は、再生路盤材を製造する方法として広く普及している機械破砕方式によるものである。破砕後の処理としてRG-G～RG-Iは25mmのふるいを通したものを5mmのふるいにかけて細骨材部分の除去をしている。RG-Fは同様の方法で20mmと5mmのふるいによりふるい分けられたものであり、RG-DおよびRG-Eの骨材に関しては不明であった。写真-3.3.2に解体建物より採取した再生粗骨材の外観写真を示す。

骨材試験により得られた結果を表-3.3.6に、絶乾密度と吸水率の関係を図-3.3.3に、コア強度と吸水率の関係を図-3.3.4に示す。再生粗骨材の吸水率は4.92～8.23%であり、JIS規格のM材が1種類、L材が2種類、L材にも相当しないものが3種類であった。また、コア強度と吸水率の関係において、コア強度が小さなものほど吸水率は大きくなる傾向を示しており、高橋らによる報告^{3.2)}と同様の傾向が認められた。再生粗骨材の粒度分布は図-3.3.5に示す通りであるが、特徴としてRG-G～RG-Iはおおよそ標準粒度の範囲にあり、RG-DおよびRG-Eはやや粗め、RG-Fは細かめであった。

表-3.3.5 解体建物の概要

項目 \ 種類	RG-G	RG-H	RG-I	
			I期	II期
建築用途	学校			
建築場所	大分県内			
構造/階数	RC/3F	RC/3F	RC/4F	
建設時期	S37～S41	S49	S37	S38
経過年数	40～44年	36年	42年	41年
コア供試体の圧縮強度 (N/mm ²)	21.7	17.1	27.3	18.9
標準偏差(N/mm ²)	7.3	7.1	4.9	4.5



写真-3.3.2 使用した再生粗骨材の外観

表-3.3.6 骨材の物性

シリーズ	種類	記号	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
1	細骨材	S	2.55	2.51	63.6	2.51	-
	粗骨材	G	2.64	0.69	60.8	6.83	-
		RG-D	2.21	6.92	59.0	6.90	0.50
		RG-E	2.37	4.92	57.7	6.81	0.93
		RG-F	2.19	7.96	57.5	6.31	0.75
2, 3	細骨材	S	2.52	3.17	-	2.51	-
	粗骨材	G	2.64	0.69	60.8	6.83	-
		RG-G	2.21	7.46	62.4	6.63	0.53
		RG-H	2.18	8.23	61.6	6.60	0.65
		RG-I	2.28	5.97	59.6	6.73	0.58

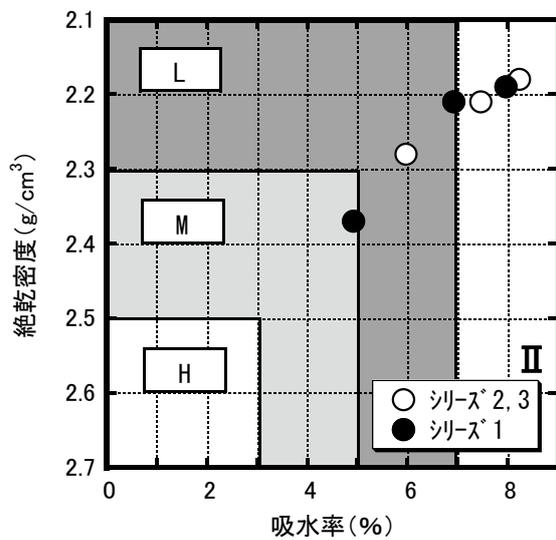


図-3.3.3 絶乾密度と吸水率の関係

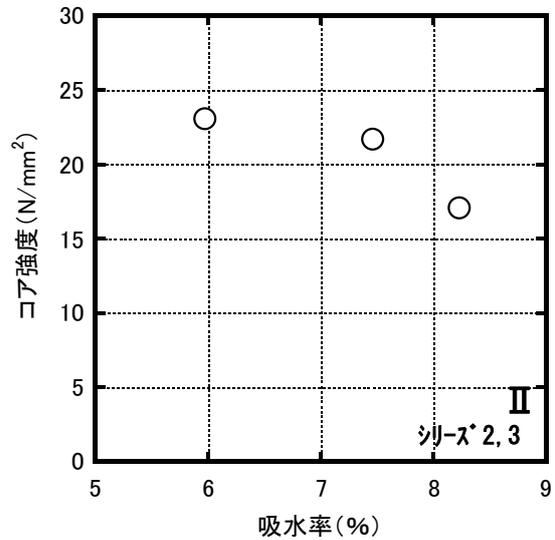


図-3.3.4 コア強度と吸水率の関係

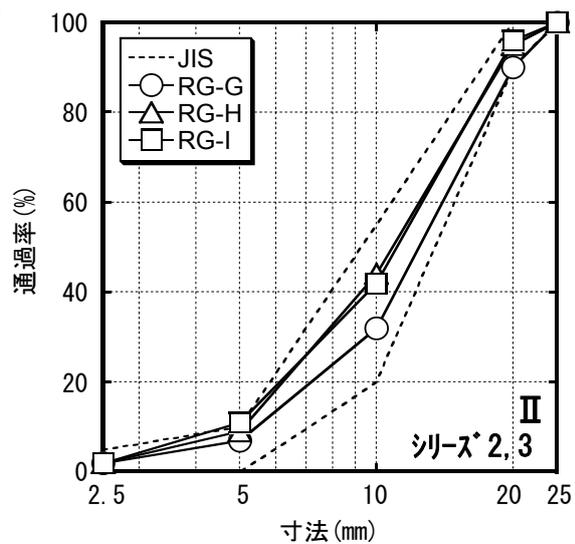
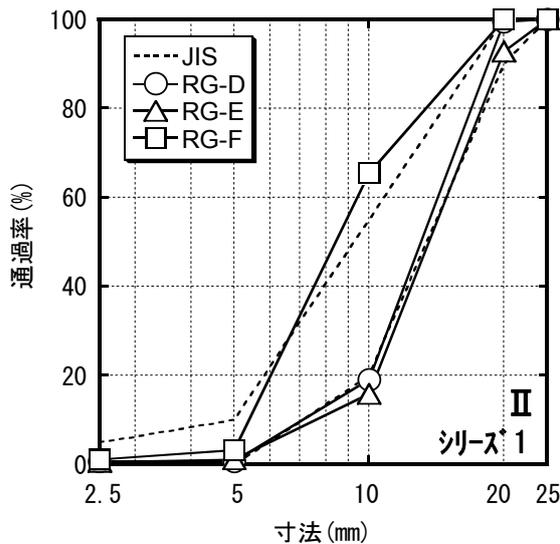


図-3.3.5 再生粗骨材の粒度分布

実験 E および F では、付着モルタルを除去した原骨材の吸水率を把握することを目的として、再生粗骨材中に含まれているモルタル分の除去処理を行った。一般に、モルタル混入率を求める試験方法では希塩酸を使用するが^{3.3)}、本実験では、以下の手順でモルタル混入率を簡易的に測定した。

試料は 105℃の乾燥炉で 24 時間以上乾燥させ、5mm のふるいに留まったものとし、マッフル炉において 450℃で 4 時間加熱する。加熱後、ハンマーおよびニッパを用いて脆弱になったモルタル部分の除去を行い、再び 105℃の乾燥炉において質量が一定となるまで乾燥させる。乾燥後、5mm のふるいに留まったものを処理後の絶乾質量として測定し、処理後の試料を用いて原骨材の絶乾密度および吸水率を JIS 規格の試験方法に準じて測定する。**写真-3.3.3** にモルタル除去後の再生粗骨材の外観を示す。モルタル混入率は**式(3.3.1)**を用い、モルタル除去処理前の絶乾質量に対する質量比として算出した。

$$M = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100 \quad (3.3.1)$$

ここに、 M ：モルタル混入率 (%)

W_1 ：モルタル処理前の絶乾質量 (g)

W_2 ：モルタル処理後の絶乾質量 (g)



写真-3.3.3 モルタル除去後の再生粗骨材の外観

以上の骨材試験結果により得られた付着モルタル率および原骨材の吸水率を**表-3.3.7**に示す。再生粗骨材の吸水率は 5.97～8.23%であり、RG-I は JIS 規格の再生骨材 L に相当したが、RG-G および RG-H は L 材にも相当しない低品質なものであった。**図-3.3.6** にモルタル混入率と吸水率の関係を既往のデータ^{3.4,3.5,3.6)}と合わせて示す。なお、既往のデータのモルタル混入率は、モルタル除去処理前の絶乾質量に対する質量比として示している。砂利を使用した場合の既往のデータを見ると、両者にはばらつきはあるものの相関関係が認められる。ここでは簡易的なモルタル混入率の測定結果ではあるが、既往のデータとほぼ同様な傾向があることが分かる。

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を、混和剤には高機能タイプの AE 減水剤を使用した。**表-3.3.8** に使用した CfFA の物性を示す。CfFA は JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）に規定される II 種に適合するものであった。

表-3.3.7 再生粗骨材の概要

記号	モルタル混入率 (%)	原骨材の種類	原骨材の物性		
			表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
RG	G	砂利	2.56	2.50	2.53
	H	砂利	2.54	2.48	2.77
	I	砂利	2.64	2.60	1.22

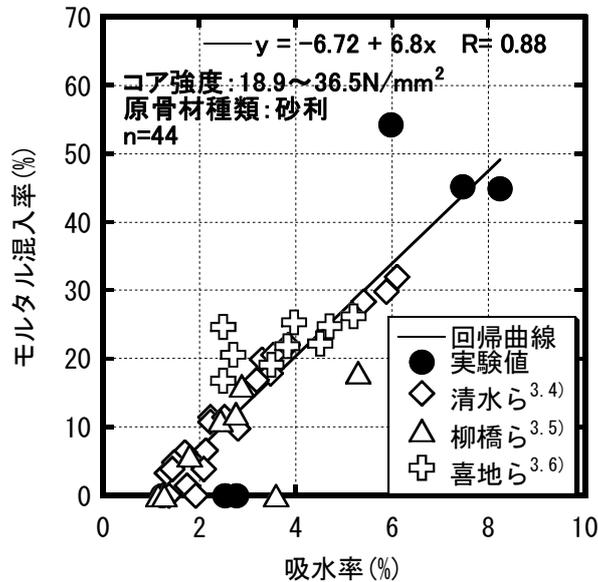


図-3.3.6 モルタル混入率と吸水率の関係

表-3.3.8 CfFA の物性

二酸化ケイ素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
						28 日	91 日
65.9	0.12	0.98	2.31	2796	103.9	89.8	92.8

② 調合

表-3.3.9 に各シリーズの調合を示す。実験Ⅱは 3 つのシリーズから構成されている。シリーズ 1 では、RG-D、E および F を用いて、再生粗骨材の吸水率の違い、水セメント比の影響について検討する。シリーズ 2 では、RG-G、H および I を用いて、再生粗骨材の吸水率および CfFA 混入率の違いによる影響について検討する。シリーズ 3 では、RG-G を用いて、再生粗骨材置換率ならびに微粒分の有無の違いによる影響について検討する。

コンクリートの調合について、シリーズ 1 では、水セメント比を 40、50 よび 60% の 3 水準とした。シリーズ 2 および 3 では、コンクリートの水セメント比を 50%、単位水量を 185kg/m³ で一定とした。シリーズ 2 では、粗骨材のかさ容積を 0.58m³/m³ で一定とし、CfFA は外割混入で全粉体に対する質量比で 20% としたが、RG-I を用いた場合には 10% および 30% についても検討を行った。シリーズ 3 では、粗骨材の絶対容積を 0.353m³/m³ で一定とし、再生粗骨材置換率を 0、5、10、20、30、50、70 および 100% の 8 水準とした。また、

調合 No.10 および No.12 では、水による洗浄を行わなかったもの（記号：RG-G₀、微粒分量 1.21%）を使用して検討を行った。なお、基準コンクリートについては目標スランプが 18±2.5cm、目標空気量が 4.5±1.0%として所要のフレッシュ性状が得られるように混和剤使用量によって調整を行い、再生コンクリートについては混和材使用量を各基準コンクリートと同一とした。

表-3.3.9 コンクリートの調合(実験Ⅱ)

シリーズ	調合		CfFA/ (C+CfFA) (%)	RG 種類	RG 置換率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
	No.	記号						W	C	CfFA	S	G	RG	
1	1	N* ¹	0	—	0	60	47.1	185	308	0	835	938	0	
	2					50	45.5		370		784			
	3					40	43.0		463		707			
	4	RD100		RG-D	100	60	51.5	182	303	867	816			
	5					50	50.0		364	817				
	6					40	47.6		455	742				
	7	RE100		RG-E	60	51.6	188	314	876	0	821			
	8				50	50.1		376	825					
	9				40	47.6		470	747					
	10	RF100		RG-F	60	52.9	185	308	885	787				
	11				50	51.4		370	834					
	12				40	49.0		463	757					
2	1	N* ¹	0	—	0	50	45.4	185	370	0	781	938	0	
	2	N-FA20	20	RG-G	100		41.9			93	677			
	3	RG100	0				46.8			0	757			861
	4	RG100-FA20	20	RG-H	100		43.1			93	652			
	5	RH100	0				47.7			0	769			843
	6	RH100-FA20	20	RG-I	50		44.1			93	665			
	7	RI100	0				48.8			0	799			
	8	RI100-FA20	20				45.4			93	695			837
	9	RI100-FA10	10				47.4			41	753			
	10	RI100-FA30	30				42.6			159	620			
	11	RI50-FA20	20	50	44.1		93			694	460			418
3	1	N* ¹	0	—	0	50	45.4	185	370	0	780	939	0	
	2	N-FA20	20	RG-G	100		41.8			93	676	939	0	
	3	RG05-FA20					5					42.0	892	42
	4	RG10-FA20					10					42.1	845	84
	5	RG20-FA20					20					42.4	751	168
	6	RG30-FA20					30					42.6	657	252
	7	RG50-FA20					50					43.2	469	420
	8	RG70-FA20					70					43.7	282	588
	9	RG100					0					48.1	0	780
	10	RG ₀ 100	20	RG-G ₀	48.1									
	11	RG100-FA20		RG-G	44.6									
	12	RG ₀ 100-FA20	RG-G ₀	44.6										

* 1:各シリーズにおける基準コンクリート

3.3.2 供試体作製方法

実験Ⅰでは、各生コンクリート工場における試験練りは各工場の方法に従って行った。

実験Ⅱでは、混練は容量 100 リットルの強制 2 軸ミキサを用い、砂→砂利→CfFA→セメントの順に投入し空練りを 15 秒間行った後、水および混和剤を投入し 2 分間本練りを行った。供試体の脱型は材齢 1 日で行い、その後 20℃水中において各試験材齢まで養生を行った。

3.3.3 試験方法

各実験の試験項目は表-3.2.1 に示している。コンクリートのフレッシュ性状としてスランプ、空気量、単位容積質量、温度の測定を、硬化性状として圧縮強度、ヤング係数の測定、乾燥収縮、促進中性化、凍結融解試験を各 JIS に準拠して行った。各試験方法の詳細は以下に示す通りである。

(1)塩分含有量

第 2 章で述べたように、硬化したセメントペーストからの塩化物イオンの溶出について検討した結果によると、常温での溶出条件では全塩化物イオン量の 4 分の 1 程度が溶出するに過ぎない。すなわち、フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度の試験方法では、コンクリート中の塩化物量を過小評価することとなる。このため、海砂を使用した場合などで硬化したセメントペースト中に塩化物が多く含まれているおそれのある再生骨材を使用する場合には、セメントの全塩化物量および再生骨材の全塩化物量の 4 分の 1 が溶出すると仮定し、再生骨材コンクリート L の塩化物含有量を次式によって算定することとしている。そこで、本研究では、再生コンクリートのフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度を市販のカンタブによって求め、再生コンクリート中の塩化物量を式 (3.3.3) によって算出することとした。

$$c_0 = 4 \times (c_1 \times w_1 - c_2 \times w_2) / 100 + c_2 \times w_2 / 100 \quad (3.3.2)$$

$$= 4 \times (c_1 \times w_1 - 0.75 \times c_2 \times w_2) / 100 \quad (3.3.3)$$

ここに、 c_0 : 再生骨材コンクリート L の塩分含有量 (kg/m^3)

c_1 : フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度 (%)

w_1 : 配合設計に用いた単位水量 (kg/m^3)

c_2 : セメント中の塩化物イオン濃度 (%)

w_2 : 配合設計に用いた単位セメント量 (kg/m^3)

(2) 圧縮強度およびヤング係数

供試体は $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用い、圧縮強度試験は、容量 2000KN の万能試験機（写真-3.3.4）を使用し、表-3.3.10 に示す各試験材齢において、打設面を研磨したのち測定を行った。また、同時にコンプレッソメータを用いてひずみの測定を行い、ヤング係数を算出した。

表-3.3.10 各実験の圧縮強度試験の試験材齢一覧

実験名	シリーズ	3日	7日	28日	91日	1年
実験Ⅰ	1	-	○	○	○	○
	2	○	○	○	○	○
	3	-	○	○	○	○
実験Ⅱ	1	-	○	○	○	-
	2	-	○	○	○	○
	3	-	○	○	○	○



写真-3.3.4 万能試験機

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129 に準じ、温度 20℃、湿度 60%R.H.の条件下において材齢 7 日より乾燥を開始した。試験は 100×100×400mm の角柱供試体を用い、乾燥開始前に両端面（100×100）にパラフィンを塗布し、その上からガムテープを張り 4 面乾燥とし、ひずみ測定にはコンタクトゲージ（標点間距離 200mm、精度 1/1000mm）を用いた（写真-3.3.5）。また、同様の供試体で、電子天秤（精度 1/1000kg）にて脱水量の測定を行った。



写真-3.3.5 作業風景 乾燥収縮ひずみの測定

(4) 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153 に準じて行った。供試体は 100×100×400mm の角柱供試体とし、20℃水中において材齢 4 週まで養生を行った後、温度 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室で材齢 8 週まで気中養生を行った。養生後、供試体の打ち込み面、底面および端面をアルミニウム箔テープでシールし、試験を開始した。中性化の促進条件は、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2%とした。供試体個々の環境条件が等しくなるように、各供試体は 20mm 以上の間隔をとっておくものとし、供試体は側面が鉛直となるように設置した。図-3.3.8 に中性化深さの測定位置を示す。測定面は、所定の促進期間に達した時点で供試体の長さ方向と直角に供試体を端部から約 60mm の位置で割裂した面とした。割裂方法は、供試体の側面にコンクリートカッタで深さ 2cm 程度の切欠きを設け、容量 250KN の万能試験機を用いて割裂させた。中性化の測定は、その破断面に 1%濃度のフェノールフタレイン溶液を噴霧し測定した。計測箇所は 1 断面につき 6 等分した 5 か所とした。なお、測定は促進試験開始後、促進期間が 1、4、8、13 および 26 週になったときに行った。

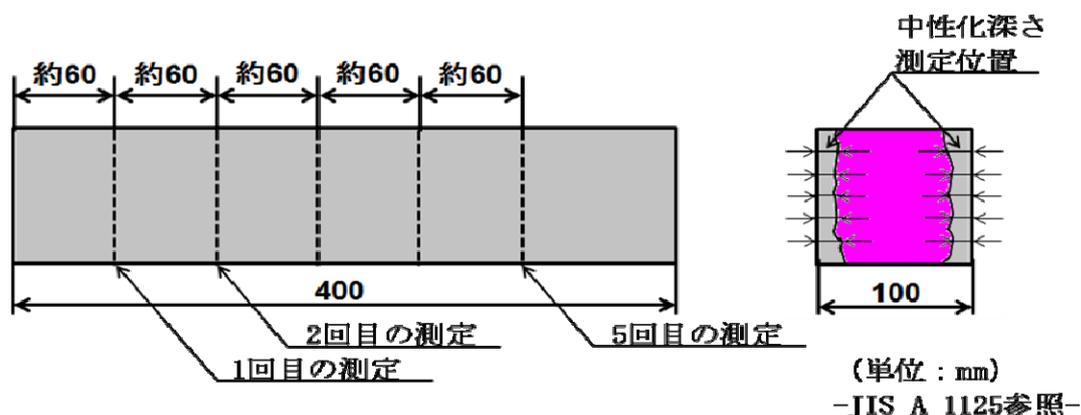


図-3.3.8 中性化深さの測定位置 (単位 mm)^{3.5)}

(5) 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 に準じて行い、試験方法の種類は A 法（水中凍結融解試験方法）とした。JIS A 1148 では、各供試体の JIS A 1127 によるたわみ振動の一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算出することになっているが、本実験では超音波測定器を用いて得られる超音波伝播速度から相対動弾性係数を評価することとした。試験中における測定は、融解行程終了直後に行い、試験槽から取り出した供試体は、ブラシで表面を軽くこすり、水洗い後、表面の水を拭き取って速やかに寸法、質量および超音波伝播速度を測定した。超音波伝播速度の測定は、写真-3.3.6 に示す測定装置を用い、透過に要した時間とモルタルの厚さ（長さ）から伝播速度を求めた。またその際、供試体の両面に気泡をなくし、センサを密着させる目的で、グリースを塗布してからセンサを供試体に押し当てた。正確な値を測定するため、供試体を回転させて反復測定を行い、各供試体につき各辺 4 箇所の平均とし、測定値は供試体 2 体の平均とした。また、各調合 1 体ずつ供試体の外観をデジタルカメラにより撮影した。供試体容器はよくすすぎ、供試体を試験槽に戻す場合には供試

体の上下を入れ替え、試験槽内にあらかじめ定めた方式に従って位置を変えて戻した。試験の終了は 300 サイクルとし、それまでに相対動弾性係数が 60%以下になったものは、そのサイクルで終了とした。なお、測定は 30 サイクルごとに行った。

相対動弾性係数の評価方法としては、超音波伝播速度を用いた動弾性係数の理論式^{3.7)}は、コンクリートの密度やポアソン比をパラメータとしていることから実用が困難であったため、緒方ら^{3.8)}が提案した実験式である式(3.3.4)を用いて動弾性係数を評価し、式(3.3.5)から相対動弾性係数を求めることとした。

$$E_d = 4.0387VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (3.3.4)$$

$$E = E_{dn} / E_{do} \times 100 \quad (\%) \quad (3.3.5)$$

ここに E_d : 過去の試験結果から得られた超音波速度を用いた動弾性係数 (GPa)

VL : 超音波伝播速度 (km/s)

E : 式(1)から求まる動弾性係数を用いて求まる相対動弾性係数

E_{dn} : サイクル数 n の超音波伝播速度から評価した動弾性係数

E_{do} : 凍結融解試験開始前に測定した超音波伝播速度から評価した動弾性係数



写真-3.3.6 超音波測定器

耐久性指数は、次式によって算出し、四捨五入によって整数に丸めた。

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (3.3.6)$$

ここに、DF : 耐久性指数

P : N サイクルのときの相対動弾性係数 (%)

N : 相対動弾性係数が 60%になるサイクル数、又は 300 サイクルのいずれか小さいもの

M : 300 サイクル

(6)ASR

ここでは、再生骨材を使用する場合に特に懸念される ASR に対する CfFA の抑制効果を確認するとともに、抑制効果の期待できる混入率を把握することを目的としている。一般に、CfFA の抑制効果に影響する因子としては、混入率のほかに FA の比表面積や非晶質 SiO₂ 量、CaO 量などが考えられている。本実験では、CfFA の ASR 抑制効果を確認するとともに、これらの因子の中でも特に影響の大きいとされる FA の混入率と比表面積が ASR 抑制効果に与える影響を明らかにすることを目的として、モルタルバー法 (JIS A 1146) および迅速法 (JIS A 1804) による ASR 試験を行う。次いで、モルタルバー法において“無害でない”と判定された低品質再生骨材および安山岩を用いて ZKT-206 のコンクリートバー法による ASR 試験を行い、再生コンクリートの ASR を調べる。

実験に使用した骨材の物性を表-3.3.11 に示す。使用した骨材は、標準骨材として硬質砂岩を 1 種類、ASR が確認されている安山岩を 2 種類、再生粗骨材を 4 種類の計 7 種類である。なお、再生骨材に関しては、試験前に付着モルタルを塩酸で除去したものを使用している。各試験に使用したセメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm³) である。ASR 抑制効果を評価した CfFA の物性を表-3.3.12 に示す。評価に用いた CfFA の種類は 2 種類であり、いずれも JIS A 6201 (コンクリート用フライアッシュ) の II 種灰に相当するものである。

以下、各 ASR 試験方法について説明する。

表-3.3.11 骨材の物性(再掲)

記号	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率 (%)	微粒分量 (%)
G1	2.66	2.64	0.69	60.8	6.83	-
G2	2.54	2.51	1.32	-	7.92	0.8
G3	2.57	2.52	1.94	55.8	6.39	0.9
RG-C	2.35	2.19	7.37	60.8	6.56	2.1
RG-G	2.38	2.21	7.46	62.6	6.64	1.2
RG-H	2.36	2.18	8.23	62.5	6.43	1.2
RG-I	2.42	2.28	5.97	61.0	6.40	1.2

表-3.3.12 CfFA の物性(再掲)

CfFA 種類	二酸化 ケイ素 (%)	湿分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー 値比 (%)	活性度指数 (%)	
							28 日	91 日
CfFA-1	69.0	0.05	0.36	2.30	3620	96.1	82	109
CfFA-2	65.9	0.12	0.98	2.31	3820	103.9	89.8	92.8

①化学法 (JIS A 1145)

表-3.3.11 に示す骨材について、JIS A 1145 に準拠して化学法を行った。反応時間はすべて 24 時間とした。なお、再生骨材は付着モルタルを希塩酸で除去した後、水洗いしたものを破砕して粒度調整したものを使用した。モルタルバー法においても、同様に、付着モルタルを除去したものを使用した。

②モルタルバー法(JIS A 1146)

上記の化学法によって、「無害でない」と判定された骨材に関して、JIS A 1146 に準拠してモルタルバー法試験を行った。NaOH 水溶液の添加量は、セメントの全アルカリ量が Na_2O 換算で 1.2% となるように定めた。なお、CfFA を混入した場合には、粉体量（セメントと CfFA の総和）に対して同様に 1.2% となるように添加した。CfFA の混入率は表-3.3.13 に示すように変化させて、CfFA 混入率が ASR 抑制効果に与える影響を明らかにし、最適な混入率を調べることにした。なお、モルタルバー法試験においては、骨材のペシマムは考慮せずに、反応性骨材を 100% 置換した JIS A 1146 通りの調合に関して検討を行った。

供試体の寸法は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ とし、供試体はモルタル打設後、温度 20°C 、湿度 95% 以上の環境下で初期養生を行った。次いで、翌日脱型を行い、温度 40°C 、湿度 95% 以上で養生し、長さ変化の測定は、脱型直後、材齢 2 週、4 週、8 週、13 週および 26 週に行った。評価方法について、材齢 13 週の時点で膨張率が 0.05% 以上ならば「無害でない」と判定する。また、24 週の時点で膨張率が 0.10% 以上ならば「無害でない」、0.10% 未満ならば「無害」と判定する。

表-3.3.13 モルタルバー法の試験条件の概要

シリーズ	CfFA 種類	CfFA		骨材	
		混入方法	混入率 (%)	種類	置換率 (%)
I	CfFA-1	内割	0, 10, 20, 30	G2, RGC	100
II	CfFA-2	内割	0, 5, 15, 20	G1, G3, RGG, RGH, RGI	100

③コンクリートのアルカリシリカ反応性迅速試験方法(ZKT-206)

使用した骨材は、表-3.3.11 に示す G1、G3、RGG~RGI の計 5 種類である。特に、モルタルバー法において「無害でない」と判定された骨材に関しては、骨材のペシマム置換率を調べ、その置換率において CfFA 混入率を変化させて、CfFA の ASR 抑制効果について検討することとした。

使用したコンクリートの調合は、実験 II と同様の条件で、水セメント比を 50%、単位水量を $185\text{kg}/\text{m}^3$ 、粗骨材の傘容積を $0.58\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。表-3.3.9 に示す調合 No.1、3、5 および 7 と同様である。なお、CfFA の混入方法は外割混入とし、全粉体量に対し質量比で 5、10、15、20 および 30% とした。

コンクリートの練混ぜは容量 70 リットルの傾胴ミキサで行った。練り混ぜ完了直後のコンクリートを、JIS A 1128 に規定する容器に入れ、表面を平滑に仕上げる。詰め終えたコンクリートを練り板上にあけ、粒状水酸化ナトリウムを Na_2O 換算で $9\text{kg}/\text{m}^3$ をふりかけ、ハンドスコップ等で均質となるまで手早く練り混ぜる。

練り混ぜたコンクリートから、JIS A 1132 に従って $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の供試体を 3 個作製し、ただちに打設面を金ごてを用いて表面を仕上げる。成形後、温度 20°C 、湿度 95% 以上の湿空中で 24 時間養生を行った後脱型し、温度 20°C の水中でさらに 24 時間養生する。

水中養生を終えた供試体の表面の水を拭き取り、超音波伝播速度を測定する。測定を終

えた供試体を、予め水温 40℃に設定しておいた圧力容器内に浸漬した後、30±10 分間でゲージ圧 50kPa (111℃) になるように加熱し、さらに 2 時間、同圧力下で煮沸する。煮沸後、水を注ぎ、30±10 分間で水温を 20～40℃とした後、供試体を圧力容器から取り出し、温度 20℃の水中にさらに約 20 分間浸漬する。供試体を水中から取り出し、再び表面の水を拭き取り、超音波伝播速度を測定する。なお、煮沸に用いた圧力容器を**写真-3.3.7**に示す。

測定した超音波伝播速度を、**式(3.3.4)**および**式(3.3.7)**にそれぞれ代入して求めた動弾性係数を用いて、**式(3.3.5)**によって相対動弾性係数を評価した。

$$Ed = \rho V^2(1 + \mu)(1 - 2\mu)(1 - \mu) \quad \text{式(3.3.7)}$$

ここで、 Ed : ヤング係数(dyne/cm²)

ρ : 材料密度(g/cm³)

V : 超音波伝達速度(cm/sec)

μ : 材料のポアソン比

判定方法について、ZKT-206 法においては、相対動弾性係数 $\geq 80.0\%$ の場合、「反応性なし (A)」と評価する。相対動弾性係数 $< 80.0\%$ の場合、添加アルカリ量を 6kg/m³にして再試験する。再試験の結果、相対動弾性係数 $\geq 70.0\%$ の場合、「反応性なし (B)」と評価し、相対動弾性係数 $< 70.0\%$ の場合、「反応性あり」と評価する。ここで、「反応性なし (A)」コンクリートは、水分、塩化物イオンやアルカリが十分に供給され、乾湿繰り返しがあるような過酷な条件下でも劣化しない、アルカリシリカ反応が極めて低いコンクリートである。一方、「反応性なし (B)」コンクリートは、通常的环境下ではアルカリシリカ反応による劣化はないが、過酷な环境下では劣化する恐れのあるコンクリートであるとされている。本実験では、過酷な条件下で CfFA の ASR 抑制効果を調べるため、9kg/m³で相対動弾性係数 $< 80.0\%$ となった場合であっても 6kg/m³で再試験を行わずに、同じアルカリ添加量 (9kg/m³) で CfFA の混入率による影響について検討することとした。



写真-3.3.7 ASR 反応試験装置

3.4 実験結果および考察

3.4.1 フレッシュ性状

(1) 実験 I

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3.4.1 に示す。フレッシュ性状に影響を与える骨材の要因としては、骨材の粒形や粒度分布、微粒分量などが考えられている^{3.7,3.8}。特に骨材の実積率などで評価される粒形は、フレッシュ性状に与える影響が大きく、また原骨材の種類や再生骨材の製造方法などの違いにより様々であることから配慮が必要である。

シリーズ 1 では、単位水量および混和剤添加率をすべて一定としているが、基準コンクリートに対し、再生粗骨材を 100%置換した場合には若干スランプが低下した。しかしながら、CfFA を混入したコンクリートではスランプは若干増加した。このように、調合によってややばらつきはあるものの全体的には再生粗骨材の使用がスランプに及ぼす影響は小さいものと考えられる。また、W/P が 40% の場合では、骨材種類に関わらず、スランプおよび空気量は大幅に低下する結果となった。粉体量が増加したことが原因であると考えられるが、スランプを同程度にするためには、単位水量、混和剤種類、使用量などを変える必要がある。

シリーズ 2 では、予め基準コンクリートに対して再生粗骨材を 100%置換した場合の試験練りを行った結果、スランプが大きく低下した。これは、粒度分布が標準範囲を大きく外れ、再生粗骨材の実積率が小さいことが一因であると考えられるが、再生骨材を使用した場合、基準コンクリートと同程度のスランプを確保するために高機能タイプの AE 減水剤を使用することにした。また、CfFA をセメントの 20%置換した場合には、スランプが増大し、流動性は向上した。なお、コンクリートの塩分含有量については図-3.4.1 に示すように、再生コンクリートの塩分含有量は普通コンクリートに比べて大きくなる傾向にあるが、規格値である 0.3kg/m^3 以下を大きく下回っており、目標値を満足した。

シリーズ 3 では、所要のスランプおよび空気量が得られるように、単位水量、s/a、混和剤使用量を変動させ調合の修正を行った。その結果、再生粗骨材を使用した場合には、単位水量および混和剤使用量を若干増加させることによって同程度のスランプを確保することができた。CfFA を使用した場合には、同等のスランプを得るための単位水量を低減することができた。また、予め粗骨材の洗浄の有無による影響を確認するために試験練りを行ったが、その影響は見られなかった。

以上より、実験 I では、低品質再生粗骨材の品質にはややばらつきがあり、その使用によって、全体的には、スランプは低下する傾向にあるが、CfFA を混入することによって、その低下を補うことが可能であることがわかった。しかしながら、CfFA を用いて低水粉体比でコンクリートを製造する場合、スランプおよび空気量が低下する傾向にあり、調合の修正が必要である。

表-3.4.1 フレッシュコンクリートの試験結果(実験 I)

シリーズ	調合		CfFA/ (C+CfFA) (%)	RG 置換率 (%)	W/B (%)	混和剤 添加率 (B×%)	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (t/m ³)	塩分 含有量 (kg/m ³)	
	No.	記号									
1	1	N-50	0	0	50	1.00*1	19.0	4.6	2.32	-	
	2	N-CfFA-50	20		50		18.5	5.0	2.30	-	
	3	N-CfFA-45			45		18.0	5.0	2.30	-	
	4	N-CfFA-40			40		12.0	2.5	2.36	-	
	5	R100-50		0	50		17.5	5.0	2.15	-	
	6	R100-CfFA-50	20	100	50		19.5	5.3	2.12	-	
	7	R100-CfFA-45			45		19.0	5.0	2.14	-	
	8	R100-CfFA-40			40		14.5	4.5	2.16	-	
	9	R50-CfFA-50			20		50	18.5	5.0	2.21	-
	10	R50-CfFA-40	20	40	12.0		3.5	2.26	-		
2	1	N-51	0	0	51	1.00*1	17.0	4.2	2.29	0.060	
	2	N-CfFA-51	20		51		20.0	4.4	2.26	0.060	
	3	R100-60	0	100	60		18.0	5.5	2.17	0.084	
	4	R100-51			51		0.90*2	20.0	4.5	2.19	0.102
	5	R100-44			44		0.85*2	20.0	5.1	2.20	0.079
	6	R100-CfFA-60			60		1.00*2	21.0	4.6	2.18	0.107
	7	R100-CfFA-51	20	50	51		0.90*2	21.5	4.2	2.18	0.130
	8	R100-CfFA-44			44		0.85*2	21.5	5.2	2.17	0.111
	9	R50-CfFA-51			51		0.70*2	21.0	3.4	2.24	0.090
3	1	N-60	0	0	60	1.00*1	18.5	4.5	2.30	-	
	2	N-55			55		18.0	4.4	2.32	-	
	3	N-50			50		18.5	4.2	2.33	-	
	4	N-45			45		18.0	4.2	2.32	-	
	5	N-CfFA-55	20	100	55		18.5	4.2	2.30	-	
	6	N-CfFA-50			50		19.0	4.5	2.30	-	
	7	N-CfFA-45			45		19.0	4.0	2.31	-	
	8	R100-55	0	100	55		19.0	4.6	2.19	-	
	9	R100-CfFA-55			55		19.0	4.6	2.17	-	
	10	R100-CfFA-50			50		1.25*1	18.5	4.4	2.18	-
	11	R100-CfFA-45			45		18.5	4.2	2.18	-	
	12	R50-CfFA-50	20	50	18.0		4.5	2.23	-		
	13	R30-CfFA-50		30	50		1.00*1	17.5	4.4	2.26	-
	14	R20-CfFA-50		20	18.5		4.2	2.28	-		
	15	R10-CfFA-50		10	18.0		4.0	2.30	-		

*1 AE 減水剤 *2 高機能タイプの AE 減水剤

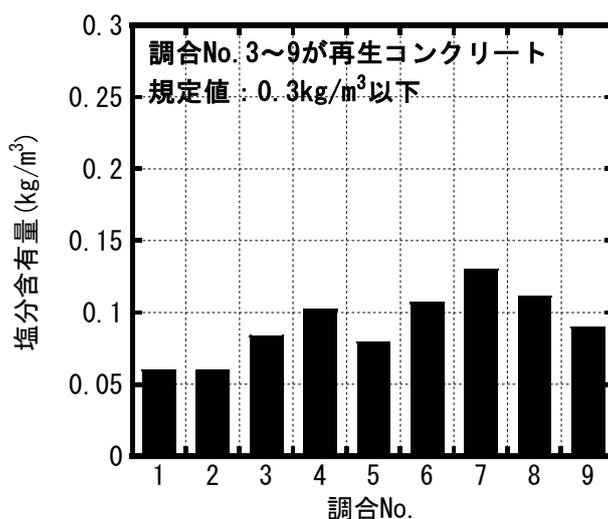


図-3.4.1 塩分含有量の試験結果

(2)実験Ⅱ

表-3.4.2に実験Ⅱにおけるフレッシュコンクリートの試験結果を示す。シリーズ1では、吸水率が最も大きく粗粒率の最も小さいRG-Fを用いた場合ではスランプは小さくなり流動性は低下したが、その他の骨材に関しては、普通骨材の場合とほぼ同等のスランプ値を示した。

シリーズ2および3では、洗浄無の場合を除き低品質再生粗骨材の使用が流動性に与える影響は見られず、同一の混和剤添加率で同等のスランプを得ることができた。しかしながら、洗浄無の場合ではスランプは低下する傾向にあり、CfFAを用いた調合では粉体量が増えたためにさらにスランプが低下し目標値を下回る結果となった。また、CfFA混入率の増加に伴い混和剤添加量も増加する傾向を示しており、微粒分量または粉体量が多い場合には混和材添加量により調整が必要である。

以上より、再生粗骨材の吸水率が大きく粗粒率が小さい場合や微粒分量を多く含む場合にコンクリートのスランプが小さくなる傾向にあるため調合修正が必要である。しかしながら、粒度分布が標準粒度範囲内にあり、微粒分量を洗い流した再生粗骨材を使用した場合にはスランプの低下は見られず、普通コンクリートとほぼ同等の流動性を有することが分かった。

表-3.4.2 フレッシュコンクリートの試験結果(実験Ⅱ)

シリーズ	調合種類		CfFA/ (C+CfFA) (%)	RG 種類	RG 置換率 (%)	W/C (%)	混和剤 添加率 (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (t/m ³)		
	No.	記号										
1	1	N*1	0	—	0	60	0.70	19.5	4.4	2.30		
	2					50		18.5	4.8	2.29		
	3					40		16.5	5.3	2.29		
	4	RD100		RG-D	60	18.5		4.4	2.20			
	5				50	18.5		4.9	2.20			
	6				40	18.0		4.7	2.21			
	7	RE100		RG-E	60	19.5		4.4	2.22			
	8				50	18.0		4.5	2.23			
	9				40	17.5		5.4	2.22			
	10	RF100		RG-F	60	13.5		5.2	2.16			
	11				50	17.5		5.6	2.16			
	12				40	11.5		4.7	2.20			
2	1	N*1	0	—	0	50	0.60	20.0	5.5	2.26		
	2	N-FA20	20				0.56	18.5	4.8	2.26		
	3	RG100	0	RG-G	100		0.60	20.5	5.4	2.16		
	4	RG100-FA20	20				0.56	19.0	4.8	2.16		
	5	RH100	0	RG-H			0.60	19.5	5.0	2.15		
	6	RH100-FA20	20				0.56	19.5	4.9	2.14		
	7	RI100	0	RG-I			0.60	19.5	4.8	2.18		
	8	RI100-FA20	20				0.56	18.0	5.0	2.16		
	9	RI100-FA10	10				0.59	19.5	5.2	2.16		
	10	RI100-FA30	30				0.98	17.5	4.6	2.16		
	11	RI50-FA20	20				0.56	19.5	5.0	2.21		
3	1	N*1	0	—		0	50	0.60	20.5	4.6	2.28	
	2	N-FA20	20					RG-G	50	0.90	18.0	4.5
	3	RG05-FA20		5	18.0	4.2					2.26	
	4	RG10-FA20		10	17.5	4.2					2.26	
	5	RG20-FA20		20	19.0	4.2					2.25	
	6	RG30-FA20		30	19.0	4.5					2.24	
	7	RG50-FA20		50	18.5	4.7					2.21	
	8	RG70-FA20		70	18.0	4.9					2.18	
	9	RG100		0	RG-G ₀	100					0.60	20.0
	10	RG ₀ 100	16.5					4.7	2.17			
	11	RG100-FA20	20					RG-G	19.5	4.6		2.17
	12	RG ₀ 100-FA20						RG-G ₀	14.0	4.6		2.17

3.4.2 圧縮強度

(1) 実験 I

① 再生コンクリートの強度発現性

表-3.4.3 に実験 I の圧縮強度試験結果を、圧縮強度の経時変化を図-3.4.1 に示す。圧縮強度は空気量 4.5%に合わせて補正したものであり、空気量 1%あたりの圧縮強度の変動率を 4%とした。全調合において、圧縮強度は経時に伴い増加するが、CfFA を混入したコンクリートはポズラン活性により材齢 91 日以降の強度増進が大きいことがわかる。また、CfFA をセメントの内割で 20%置換した場合、材齢 28 日おける圧縮強度は無混入のもの 8 割程度であるが、材齢 1 年では同等以上の強度となる。

表-3.4.3 圧縮強度試験結果(実験 I)

シリーズ	調合 No.	CfFA/ (C+CfFA) (%)	RG 置換率 (%)	W/B (%)	圧縮強度 (N/mm ²)					ヤング係数 (× 10 ⁴ N/mm ²)		
					3 日	7 日	28 日	91 日	1 年	28 日	91 日	1 年
1	1	0	0	50	—	26.4	36.1	40.6	44.2	—	—	—
	2	20		50	—	21.7	29.2	39.6	47.1	—	—	—
	3			45	—	23.8	33.5	42.6	48.8	—	—	—
	4			40	—	33.1	44.5	54.3	59.8	—	—	—
	5	0	100	50	—	19.9	24.3	28.5	32.4	—	—	—
	6	20		50	—	14.8	20.7	27.6	34.2	—	—	—
	7			45	—	15.9	22.0	27.3	34.7	—	—	—
	8			40	—	22.6	28.9	35.4	41.3	—	—	—
	9	20		50	—	17.4	24.7	31.4	36.9	—	—	—
	10			40	—	27.5	34.7	43.1	51.2	—	—	—
2	1	0	0	51	20.7	31.4	44.9	46.6	48.9	3.37	—	—
	2	20		51	15.2	26.2	37.4	42.8	52.6	3.17	—	—
	3	0	100	60	13.0	22.9	31.5	34.1	38.2	2.67	—	—
	4			51	17.7	30.6	40.9	42.5	47.8	2.81	—	—
	5			44	23.5	36.9	46.6	49.5	52.0	2.98	—	—
	6	20		60	9.2	16.7	25.9	31.9	38.7	2.43	—	—
	7			51	13.2	22.6	34.1	41.0	47.1	2.72	—	—
	8			44	17.8	29.3	40.7	46.7	49.5	2.75	—	—
	9	50	51	13.4	23.8	34.1	41.6	48.8	2.78	—	—	
3	1	0	0	60	—	—	37.6	41.9	45.0	3.15	3.34	3.40
	2			55	—	—	42.5	48.0	50.7	3.29	3.47	3.62
	3			50	—	—	46.3	51.0	55.2	3.44	3.58	3.61
	4			45	—	—	50.5	55.6	60.7	3.45	3.52	3.60
	5			55	—	24.1	33.9	42.9	52.0	3.03	3.28	3.62
	6	20	100	50	—	28.8	37.6	46.8	57.6	3.19	3.51	3.78
	7			45	—	33.4	43.0	53.7	64.5	3.28	3.44	3.91
	8	0		55	—	28.9	34.4	37.8	39.9	2.32	2.59	2.52
	9	20		55	—	21.9	28.1	35.2	40.3	2.17	2.39	2.65
	10			50	—	25.5	32.3	38.6	44.3	2.22	2.50	2.80
	11		45	—	28.9	36.6	42.7	47.5	2.41	2.54	2.95	
	12		50	50	—	25.2	34.1	41.4	50.0	2.65	2.91	3.24
	13		30		—	25.9	34.7	42.7	51.3	2.67	3.17	3.38
	14	20	—		26.8	34.6	44.3	52.4	2.98	3.23	3.62	
	15	10	—		26.8	34.9	43.9	53.9	3.07	3.28	3.67	

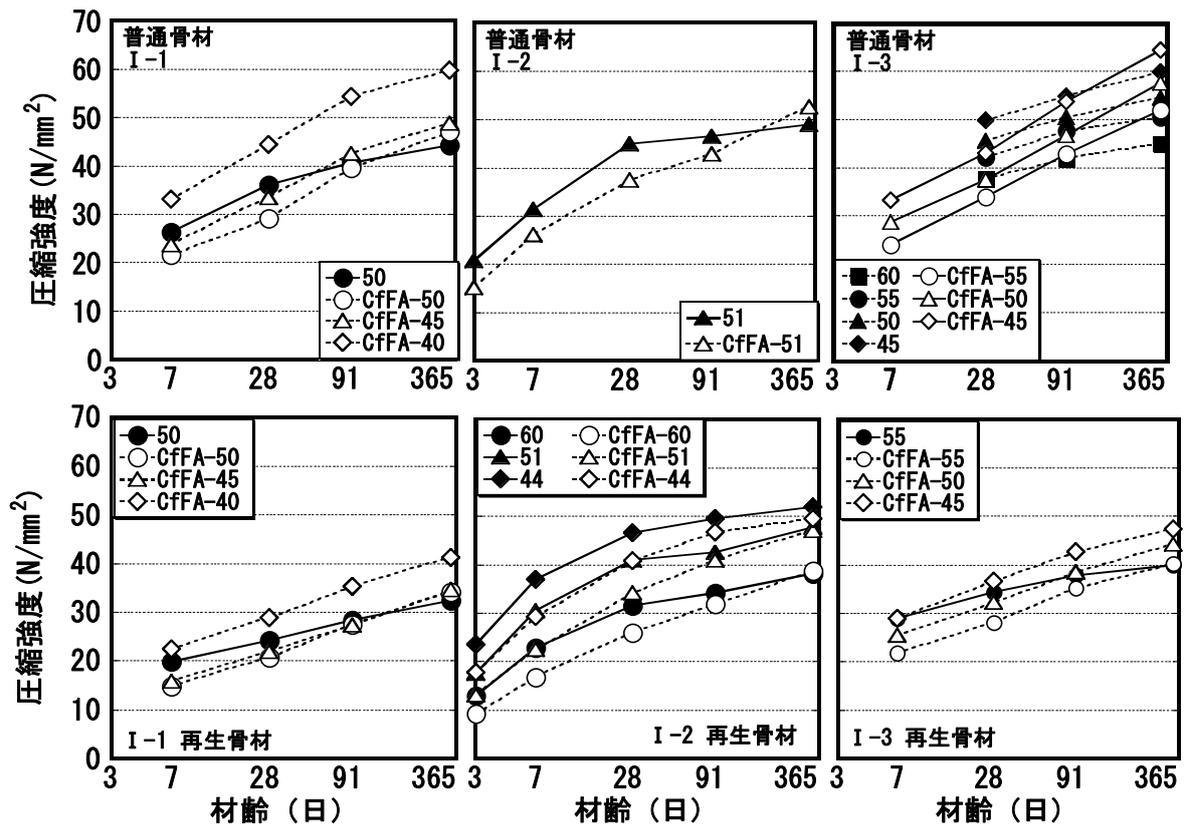


図-3.4.1 圧縮強度の経時変化

図-3.4.2 に材齢 28 日の圧縮強度に対する圧縮強度比を各実験で示す。図より、骨材種類に関わらず、CfFA 混入コンクリートは無混入のものに比べて材齢 28 日以降の強度増進が全体的に大きくなっており、その増加率は平均で無混入のものに比べて 2 倍程度であった。これは、CfFA のポズラン反応によるものと考えられる。また、再生コンクリートの材齢 28 日以降の強度発現性は実験によってややばらつきがあるが、CfFA 混入の有無に関わらずほぼ同等であることが分かった。

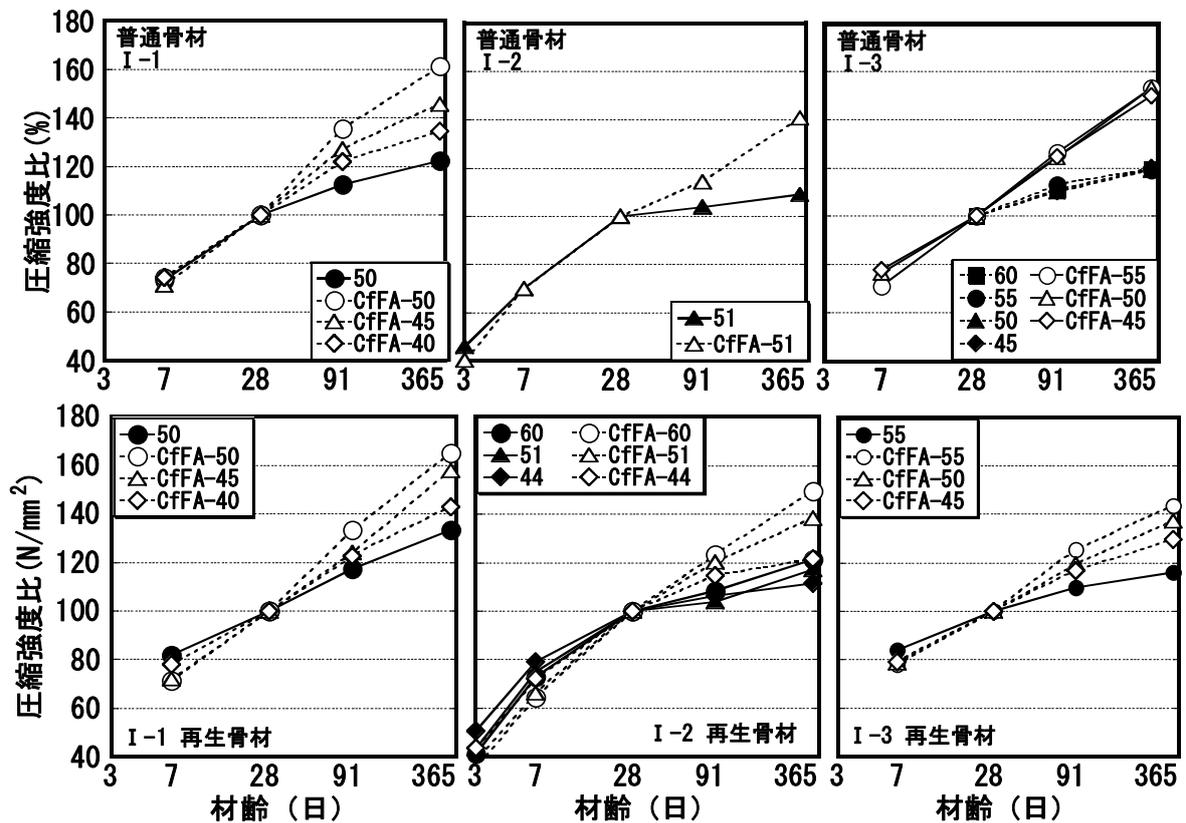


図-3.4.2 圧縮強度比の経時変化

② W/C の影響

図-3.4.3 に材齢 28 日における圧縮強度とセメント水比 (C/W) の関係を示す。シリーズ 3 における直線は、基準コンクリートの結果を回帰したものである。再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、CfFA の有無に関わらず、普通骨材コンクリートに比べ、シリーズ 1 では 3 割程度、シリーズ 2 では 1 割程度、シリーズ 3 では 2 割程度低下した。これは、既往の研究^{3.10)}と同様に、かなりばらつきがあり、全体を平均すると 2 割程度の低下である。

図-3.4.4 に圧縮強度比 (各種類の再生骨材置換率 0%における圧縮強度に対する比) と再生骨材置換率の関係について示す。図より、置換率 100~30%の範囲では、置換率の低下に伴い圧縮強度は増加しているが、30%以下では頭打ちとなった。

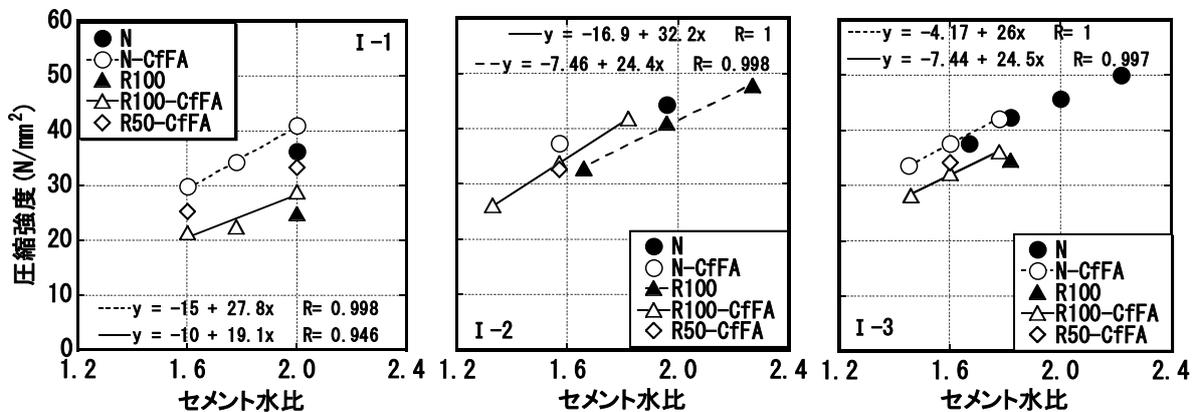


図-3.4.3 圧縮強度とセメント水比の関係

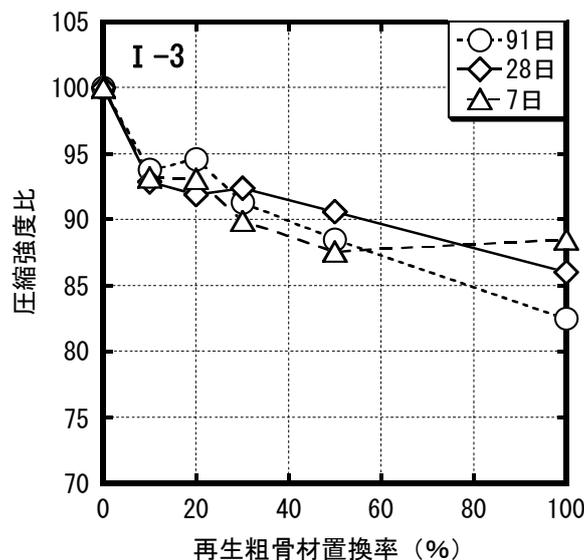


図-3.4.4 圧縮強度比と再生骨材置換率の関係

(2)実験Ⅱ

圧縮強度試験結果を表-3.4.5 および図-3.4.5 に示す。図より、低品質再生コンクリートの圧縮強度は、全体的に基準コンクリートに比べ小さくなっているが、RC50-FA20 と RC100-FA30 はすべての材齢において基準コンクリートより 2~4N/mm² 程度大きな値を示した。

表-3.4.5 圧縮強度試験結果(実験Ⅱ)

シリーズ	No.	CfFA/ (C+CfFA) (%)	RG 種類	RG 置換率 (%)	W/C (%)	圧縮強度(N/mm ²)				ヤング係数(×10 ⁴ N/mm ²)				
						7日	28日	91日	1年	7日	28日	91日	1年	
1	1	0	—	0	60	23.6	33.7	38.0	—	2.62	2.98	3.02	—	
	2				50	30.6	41.5	46.1	—	2.72	3.17	3.16	—	
	3				40	40.8	50.4	56.3	—	2.90	3.24	3.32	—	
	4		RG-D	100	60	22.1	30.2	33.4	—	2.08	2.28	2.38	—	
	5				50	27.9	35.3	38.9	—	2.22	2.37	2.51	—	
	6				40	35.6	41.7	45.3	—	2.40	2.54	2.75	—	
	7				60	21.9	30.4	35.1	—	1.98	2.41	2.55	—	
	8				RG-E	50	32.5	41.9	45.9	—	2.29	2.53	2.64	—
	9					40	38.0	47.8	50.5	—	2.29	2.65	2.71	—
	10		60	22.1		29.9	32.9	—	1.98	2.18	2.31	—		
	11		RG-F	50	27.3	37.3	38.6	—	2.00	2.33	2.44	—		
	12			40	38.6	46.9	48.3	—	2.36	2.55	2.65	—		
2	1	0	—	0	50	27.5	36.3	42.9	38.2	2.54	2.89	3.14	3.34	
	2	20				30.7	40.5	50.3	53.7	2.72	2.93	3.32	3.63	
	3	0	RG-G	100		22.2	30.0	35.4	33.4	1.99	2.25	2.47	2.49	
	4	20				26.6	34.4	41.5	44.0	2.13	2.35	2.58	2.74	
	5	0	RG-H			23.7	31.3	37.3	35.0	1.99	2.24	2.38	2.41	
	6	20				26.1	33.3	40.7	41.7	2.03	2.23	2.46	2.61	
	7	0	RG-I			26.5	33.1	38.4	35.8	2.17	2.35	2.51	2.67	
	8	20				27.9	36.5	43.8	44.2	2.23	2.37	2.66	2.84	
	9	10		26.3		35.6	41.8	39.9	2.22	2.44	2.57	2.76		
	10	30		30.8		34.9	47.0	45.0	2.28	2.52	2.78	2.95		
	11	20		50		30.8	38.9	47.0	46.9	2.41	2.63	2.93	3.24	
3	1	0	—	0	50	33.0	43.4	48.9	49.1	2.79	3.08	3.42	3.49	
	2	20				35.5	45.2	59.0	60.9	2.91	3.15	3.34	3.83	
	3		RG-G	5		33.8	45.6	53.8	56.7	2.79	3.06	3.35	3.89	
	4			10		33.2	43.9	52.0	55.5	2.77	3.05	3.38	3.73	
	5			20		33.4	44.2	48.5	53.2	2.63	2.97	3.24	3.66	
	6			30		32.9	42.1	48.5	54.7	2.63	2.89	3.18	3.52	
	7		50	31.5		41.1	47.1	47.9	2.41	2.69	2.99	3.24		
	8	70	29.0	37.9		44.3	46.0	2.33	2.50	2.81	3.18			
	9	0	100	27.8		34.4	40.8	39.5	2.18	2.40	2.71	2.73		
	10	RG-G ₀		25.9		35.4	37.4	38.9	2.03	2.32	2.50	2.65		
	11	RG-G		30.1		37.4	45.1	47.4	2.16	2.49	2.78	2.99		
	12	20		RG-G ₀		27.0	36.0	42.8	42.1	2.19	2.30	2.58	2.92	

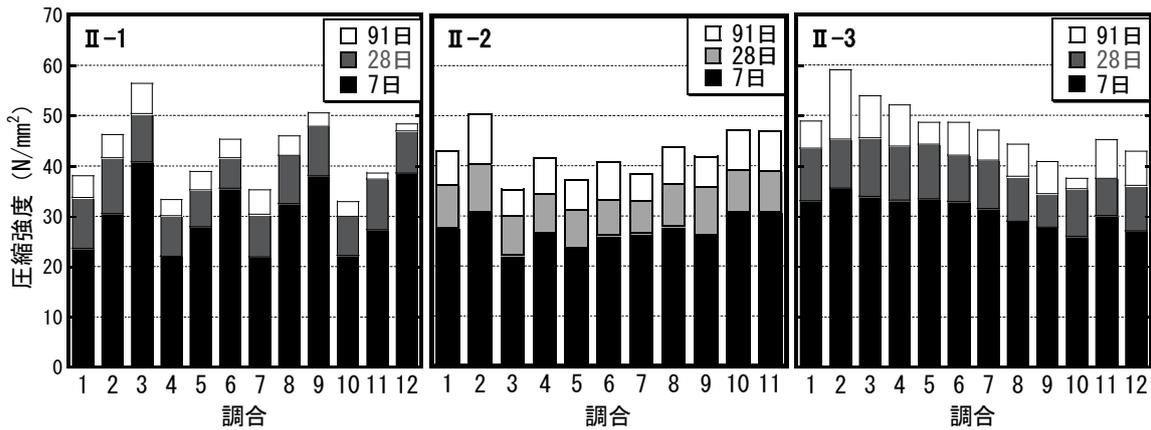


図-3.4.5 圧縮強度試験結果

① 吸水率の影響

図-3.4.6 に吸水率と圧縮強度および圧縮強度比の関係を示す。図に示す吸水率は、コンクリートに使用した粗骨材の吸水率であり、RI50-FA20 は普通粗骨材と低品質再生粗骨材の吸水率の平均値とした。図より、すべての材齢において圧縮強度は吸水率の増加に伴いほぼ直線的に減少する傾向を示した。既往の研究において、吸水率が 6% の場合の平均的な圧縮強度の目安は健全な普通骨材を使用した場合の 80% 程度であり、吸水率が 1% 増加することによる圧縮強度比の減少率はおおむね 4% 程度であると考えられている^{3.10)}が、本実験においては、吸水率 6% では 87~91%、吸水率 7~8% では 81~87% 程度であり、各吸水率における圧縮強度比は既往のデータに比べ約 10% 大きくなる結果となった。

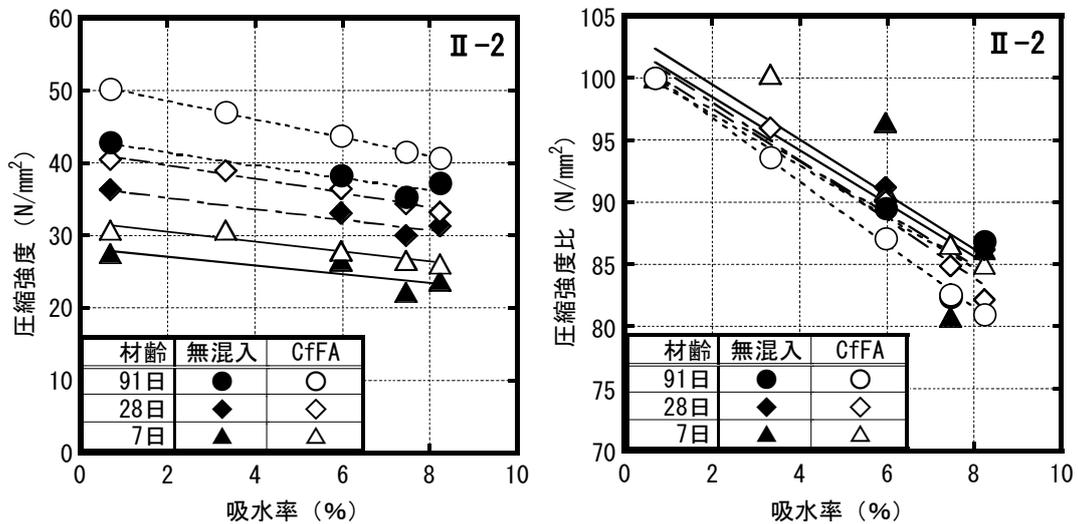


図-3.4.6 吸水率と圧縮強度および圧縮強度比の関係

② 再生粗骨材置換率の影響

図-3.4.7 に再生粗骨材置換率と圧縮強度および圧縮強度比の関係を示す。図より、全体的に再生コンクリートの圧縮強度は再生粗骨材置換率の増加に伴いほぼ直線的に低下する傾向が認められ、置換率 100%では 2 割弱低下した。また、圧縮強度 50N/mm^2 前後では、再生骨材を使用した場合に強度は頭打ちとなる傾向を示しており、強度比でみると、置換率 5%で 1 割、20%で 2 割弱低下している。これは、再生粗骨材の界面における付着強度は、普通骨材の場合に比べ劣るため、骨材やモルタルの破壊よりも先に、その界面において破壊が生じコンクリートが破壊されることが考えられる。すなわち、圧縮強度が 50N/mm^2 を超えるような比較的高強度の範囲では、再生粗骨材が少量でも置換されれば強度が頭打ちになることが考えられるため注意が必要である。また、その影響度は再生粗骨材の原コンクリートの品質にも左右されることが考えられる。

GBRCによる2007年4月～2009年3月の間に受託したコンクリートコアの試験結果^{3.11)}によると、1965～1984年の期間に建築されたコンクリート構造物より採取されたものを大半(96%)としたコンクリートコア強度の平均値(設計基準強度は $13\sim 30\text{N/mm}^2$ の範囲で、Fc18とFc21の両者で全体の79%を占める)は、Fc18の場合に 23.9N/mm^2 、Fc21の場合に 28.1N/mm^2 となっており、本実験で使用した再生粗骨材の原コンクリートコア強度 20N/mm^2 程度よりも大きいことが分かる。

したがって、再生コンクリートの圧縮強度が頭打ちとなる閾値を 50N/mm^2 とすれば、安全側の評価となると判断されるが、同報告では、コア強度の標準偏差は平均で約 8.0N/mm^2 となっていることから、そのばらつきなども考慮する必要がある。特に、低品質再生粗骨材は、不特定多数の箇所を発注源とするため、この点に関しては、さらにデータを蓄積し、適切な閾値を定めることが望ましい。

いずれにせよ、通常のコンクリートの強度範囲では、再生粗骨材置換率の増加に伴い再生コンクリートの圧縮強度はほぼ直線的に低下する傾向を示すことから、再生粗骨材置換率によって、再生コンクリートの強度は管理可能であると考えられる。

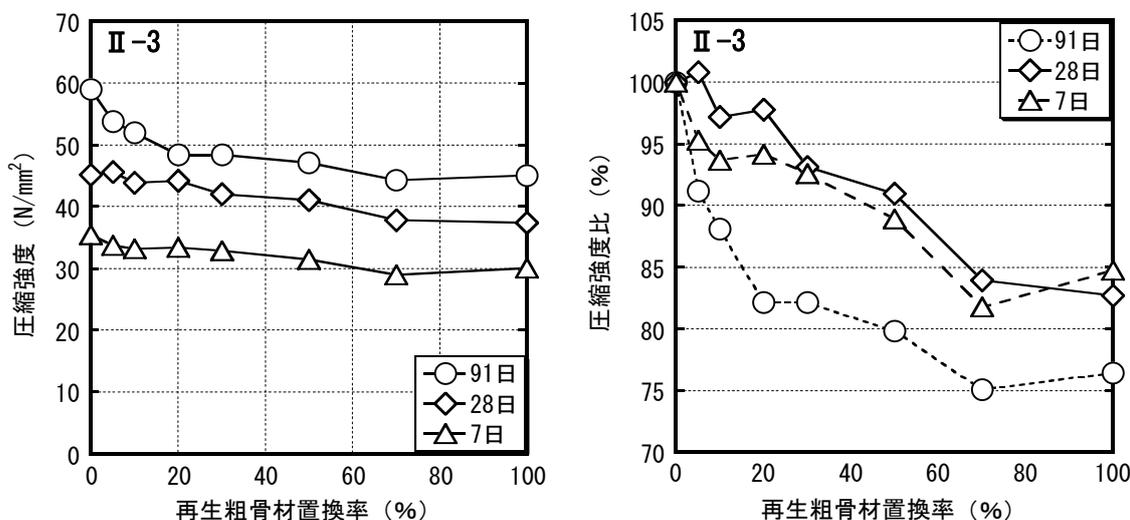


図-3.4.7 再生粗骨材置換率と圧縮強度および圧縮強度比の関係

③ CfFA 混入の影響

図-3.4.8 に RG-I を用いた場合における CfFA 混入率と圧縮強度の関係を示す。図より、CfFA 混入率の増加に伴い圧縮強度はほぼ直線的に増加する傾向を示した。また、その傾向は材齢に伴い顕著になり、材齢 91 日における圧縮強度は無混入に比べ CfFA 混入率 20% の場合に 15%、30% の場合に 22% 大きくなった。

図-3.4.9 はシリーズ 3 の試験結果に関して、CfFA を 20% 混入したコンクリートの圧縮強度を CfFA 無混入のものに対する比で表したものである。図より、すべての材齢において圧縮強度比は 100% を上回っており、CfFA の外割混入によって圧縮強度は増加することが確認された。また、その増加率は材齢 91 日において最も大きくなっており、普通骨材を用いた場合に 2 割程度、再生粗骨材を用いた場合に平均で 1 割程度であった。

以上より、CfFA 混入による圧縮強度寄与があることが明らかとなったが、これは、材齢 28 日までは CfFA による充填効果が、材齢 91 日においては、それに加え CfFA のポズラン反応による強度増進効果が発揮されたものと考えられる。なお、再生粗骨材の微粒分量の影響について、洗浄無の場合コンクリートの圧縮強度は洗浄有に比べ平均で 2N/mm^2 小さな値を示した。

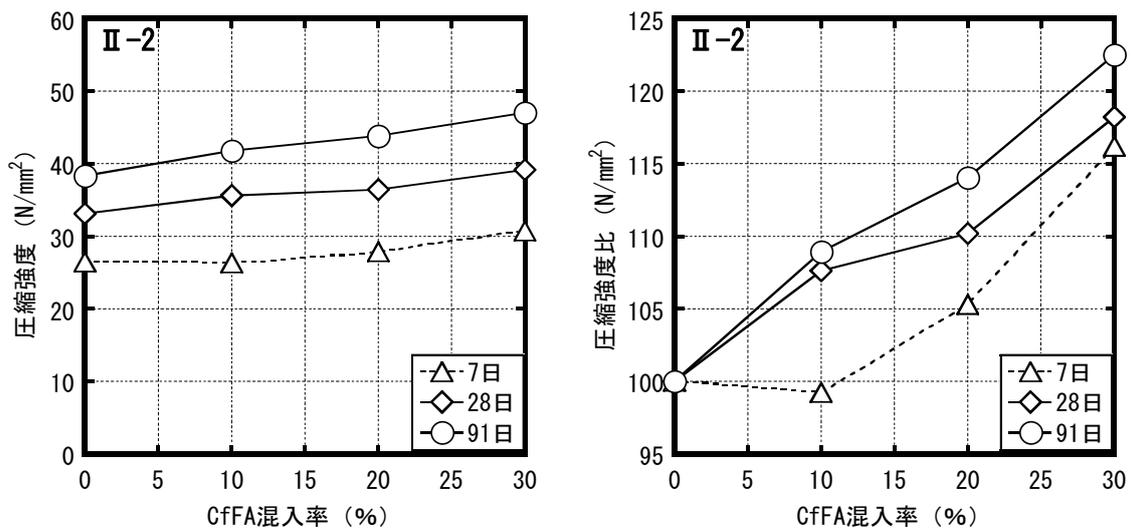


図-3.4.8 CfFA 混入率と圧縮強度および圧縮強度比の関係

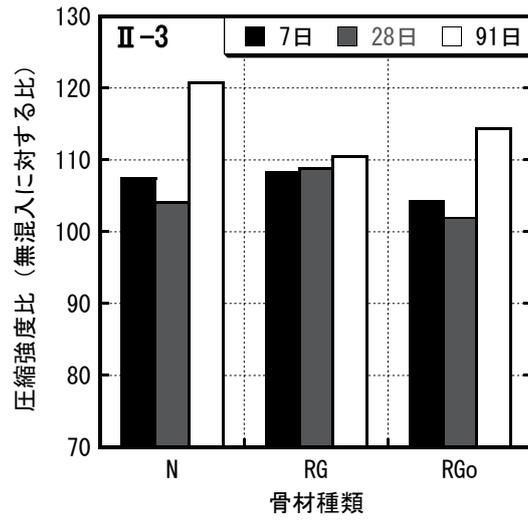


図-3.4.9 圧縮強度比

3.4.3 ヤング係数

ヤング係数の一覧は表-3.4.4 および表-3.4.5 に示している。

図-3.4.10 に吸水率とヤング係数およびヤング係数比の関係を示す。図より、圧縮強度の場合と同様に、ヤング係数は吸水率の増加に伴い直線的に低下したが、圧縮強度の場合に比べその低下率は大きく、吸水率 8%における低下率は 22~26%であった。

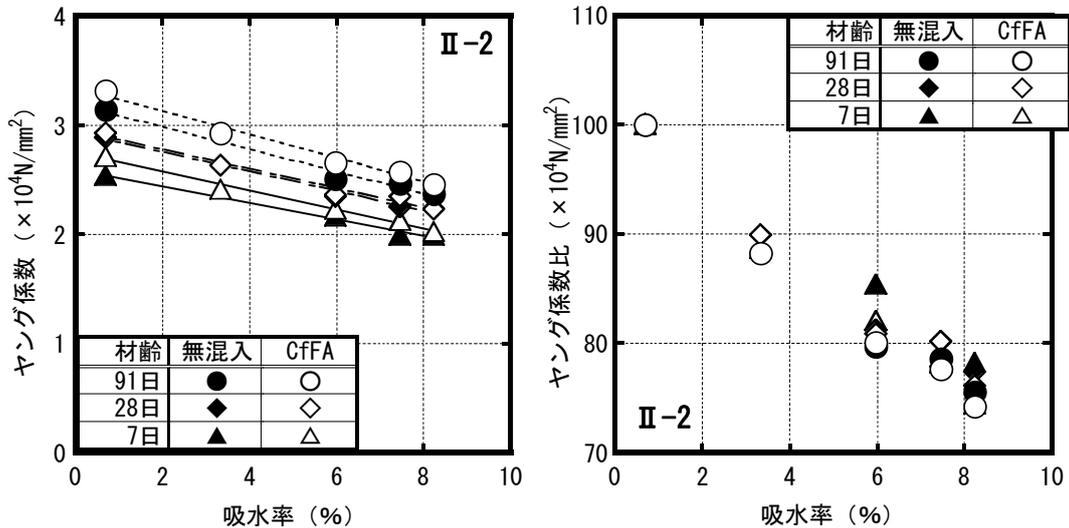


図-3.4.10 吸水率とヤング係数およびヤング係数比の関係

図-3.4.11 に再生粗骨材置換率とヤング係数およびヤング係数比の関係を示す。図より、再生粗骨材置換率の増加に伴ってヤング係数はほぼ直線的に低下する傾向を示しており、置換率 0~30%の範囲内においても圧縮強度の場合に見られたような著しい低下は認められなかった。

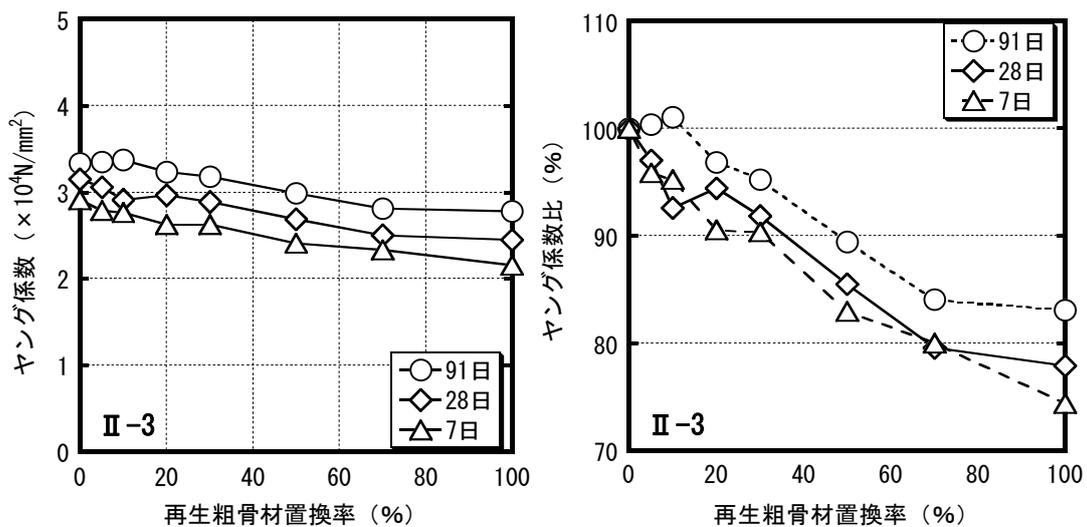


図-3.4.11 RG 置換率とヤング係数比の関係

図-3.4.12にRG-Iを100%置換した用いた場合におけるCfFA混入率とヤング係数の関係を示す。図より、圧縮強度の場合と同様の傾向を示しており、材齢91日におけるヤング係数は無混入に比べ約10%大きくなった。

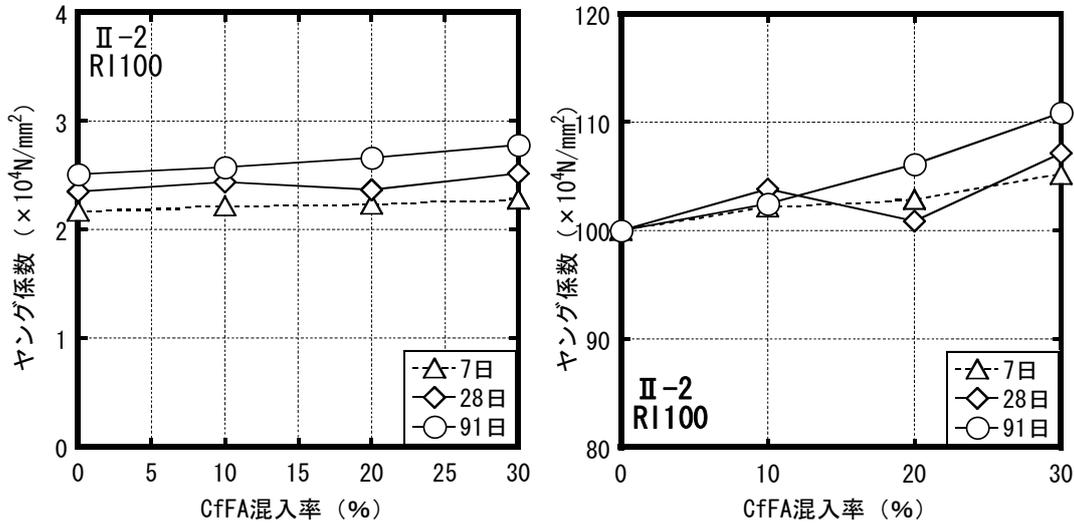


図-3.4.12 CfFA 混入率とヤング係数の関係

図-3.4.13に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。基準コンクリートの単位体積質量は 2.3g/cm^3 前後であったのに対し、低品質再生コンクリートの密度は $2.1\sim 2.2\text{g/cm}^3$ であったため、図中には単位体積質量を考慮した建築学会式^{3.12)}による予測値を実線で示している。図より、骨材種類やCfFA混入の有無に関わらず、圧縮強度が大きいほどヤング係数も大きくなる傾向を示したが、同じ圧縮強度で比較すると、再生粗骨材の置換率が大きくなるほどヤング係数は小さくなる傾向を示した。これは、再生骨材の単位容積質量が普通骨材に比べ小さいことに起因しており、既往の研究と同様の結果^{3.13)}である。

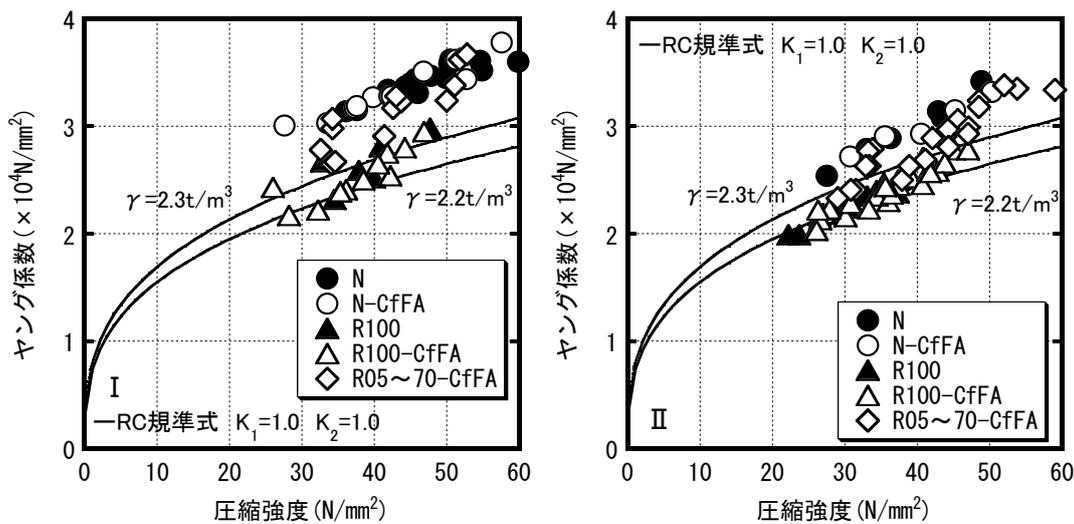


図-3.4.13 圧縮強度とヤング係数の関係

3.4.4 乾燥収縮

(1) 実験 I

図-3.4.14 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。シリーズ 2 では、W/B が 51% の場合、低品質再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは、再生粗骨材置換率の増加に伴い大きくなり、置換率 100% では基準コンクリートに比べて約 2 割大きくなった。再生骨材を用いた場合、CfFA を混入したものは無混入のものに比べ全体的に乾燥収縮ひずみが小さくなり、乾燥期間 26 週では平均で 4% ほど小さくなった。シリーズ 3 においてもシリーズ 2 と同様の傾向が見られ、再生粗骨材置換率 100% では普通骨材コンクリートに対し約 7 割増加した。また、材齢 91 日における圧縮強度がほぼ同等である N-55 と N-CfFA-50、R100-55 と R100-CfFA-50 を比較すると、CfFA を混入したものは無混入のものに比べ 6~8% 乾燥収縮ひずみは小さくなった。脱水量も乾燥収縮ひずみと同様の傾向を示したが、CfFA を混入したコンクリートの脱水量は大きくなった。これは、CfFA の内割混入により単位セメント量が減り、水和の過程における余剰水が多くなるためである。

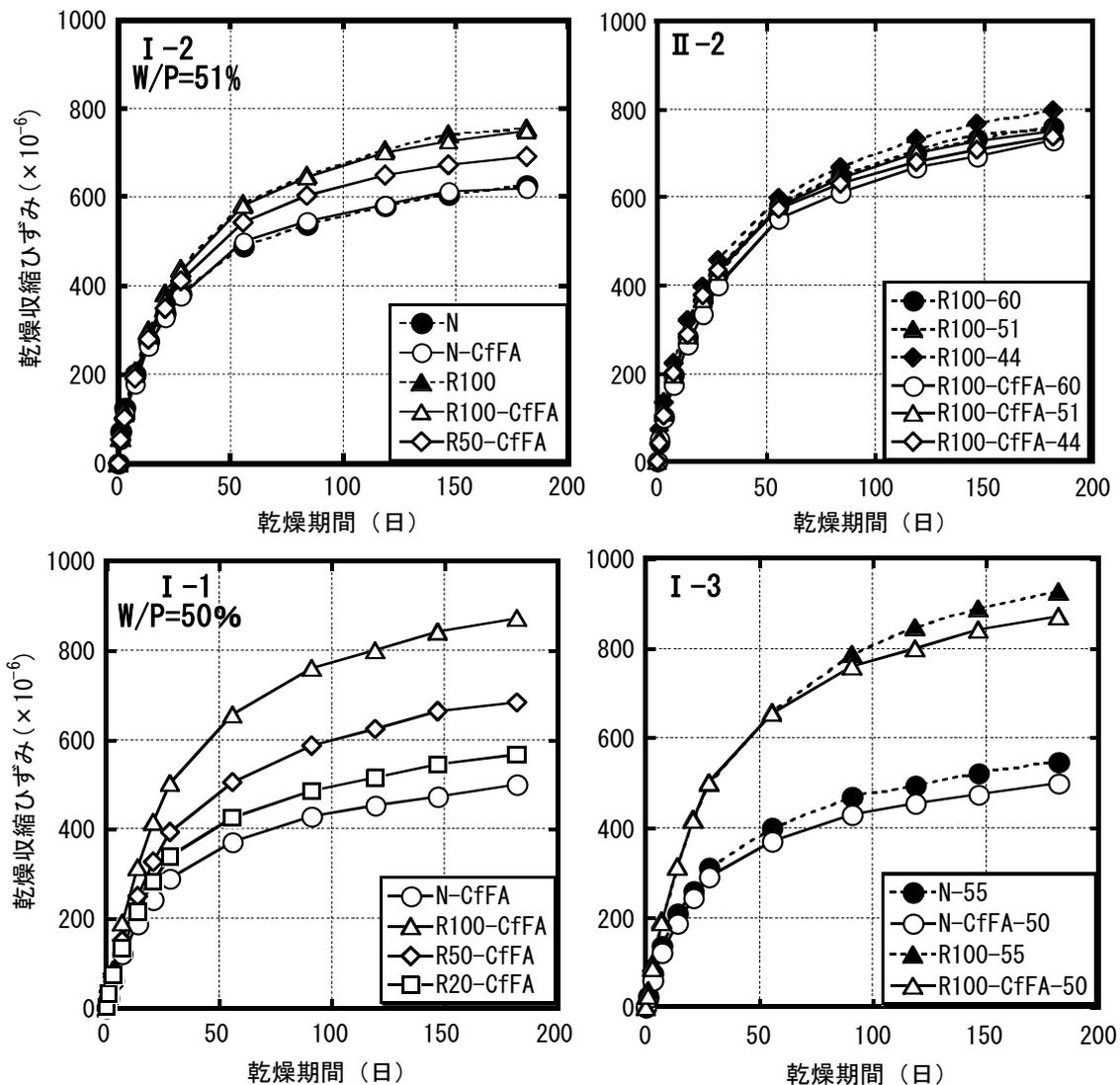


図-3.4.14 乾燥収縮ひずみの経時変化

(2) 実験Ⅱ

図-3.4.15 に乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を示す。図より、乾燥期間との関係において、低品質再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは基準コンクリートと比べると、乾燥期間 28 日までは大きな差は見られないが、それ以降は増加する傾向にあり、乾燥期間 182 日において 1~3 割程度大きな値を示した。

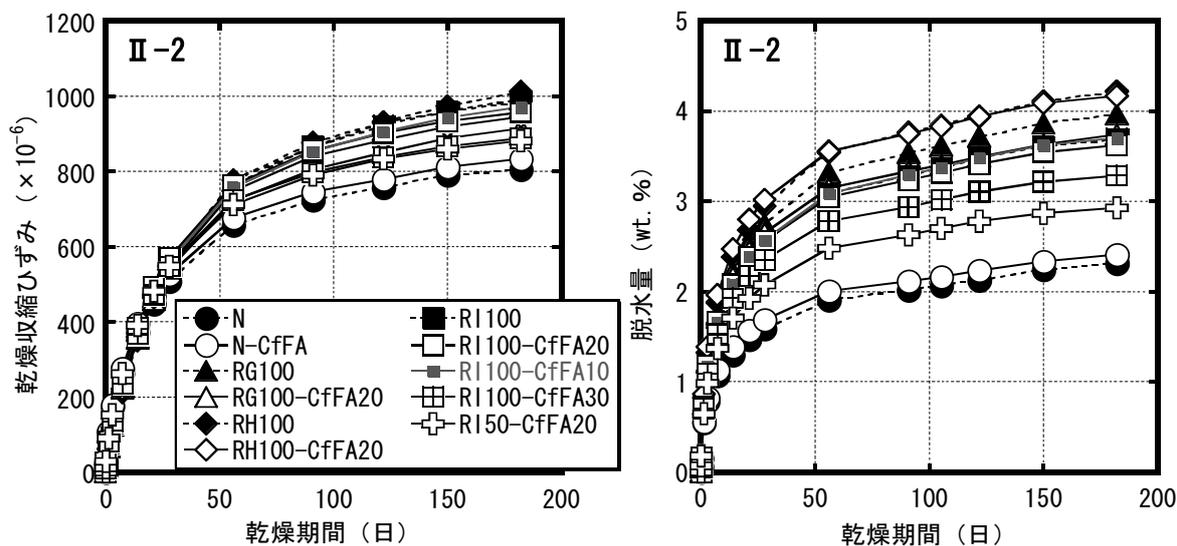


図-3.4.15 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化

① W/C の影響

水セメント比と乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみおよび脱水量の関係を図-3.4.16 に示す。図より、全体的に水セメント比の増加に伴い乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向を示していることがわかる。特に、脱水量についてはその傾向が顕著である。乾燥収縮ひずみの増加率について、水セメント比が 40%から 60%に増加する場合に乾燥収縮ひずみは最大で 10%程度増加している。また、再生コンクリートのその増加率は普通骨材のものと同程度であり大差ない。

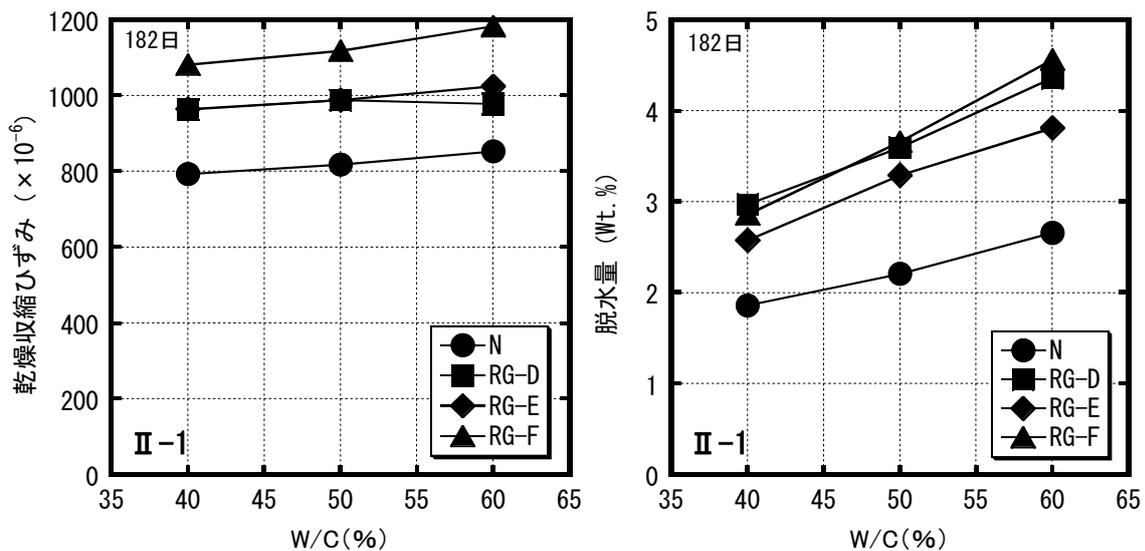


図-3.4.16 乾燥収縮ひずみと W/C の関係

② 吸水率の影響

吸水率と乾燥収縮ひずみの関係を図-3.4.17に示す。図に示す吸水率はコンクリートに使用した粗骨材の吸水率であり、RI50-FA20では普通粗骨材と低品質再生粗骨材の吸水率の平均値とした。これによると、コンクリートの乾燥収縮ひずみは吸水率の増加に伴い乾燥初期においてはやや減少したが、乾燥期間28日以降では増加する傾向を示し、その傾きは乾燥期間が長くなるにつれ大きくなる傾向を示した。また、乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみはRG置換率100%の場合では基準コンクリートに比べ平均で2~5割程度増加しており、再生粗骨材による影響が大きいことが分かる。初期において収縮ひずみが低減した原因としては、軽量骨材コンクリートの収縮特性に見られるのと同様に^{3.14)}、再生コンクリートでは高い吸水率の再生粗骨材中の水がモルタル中に浸透し初期の収縮を低減したためであると考えられる。

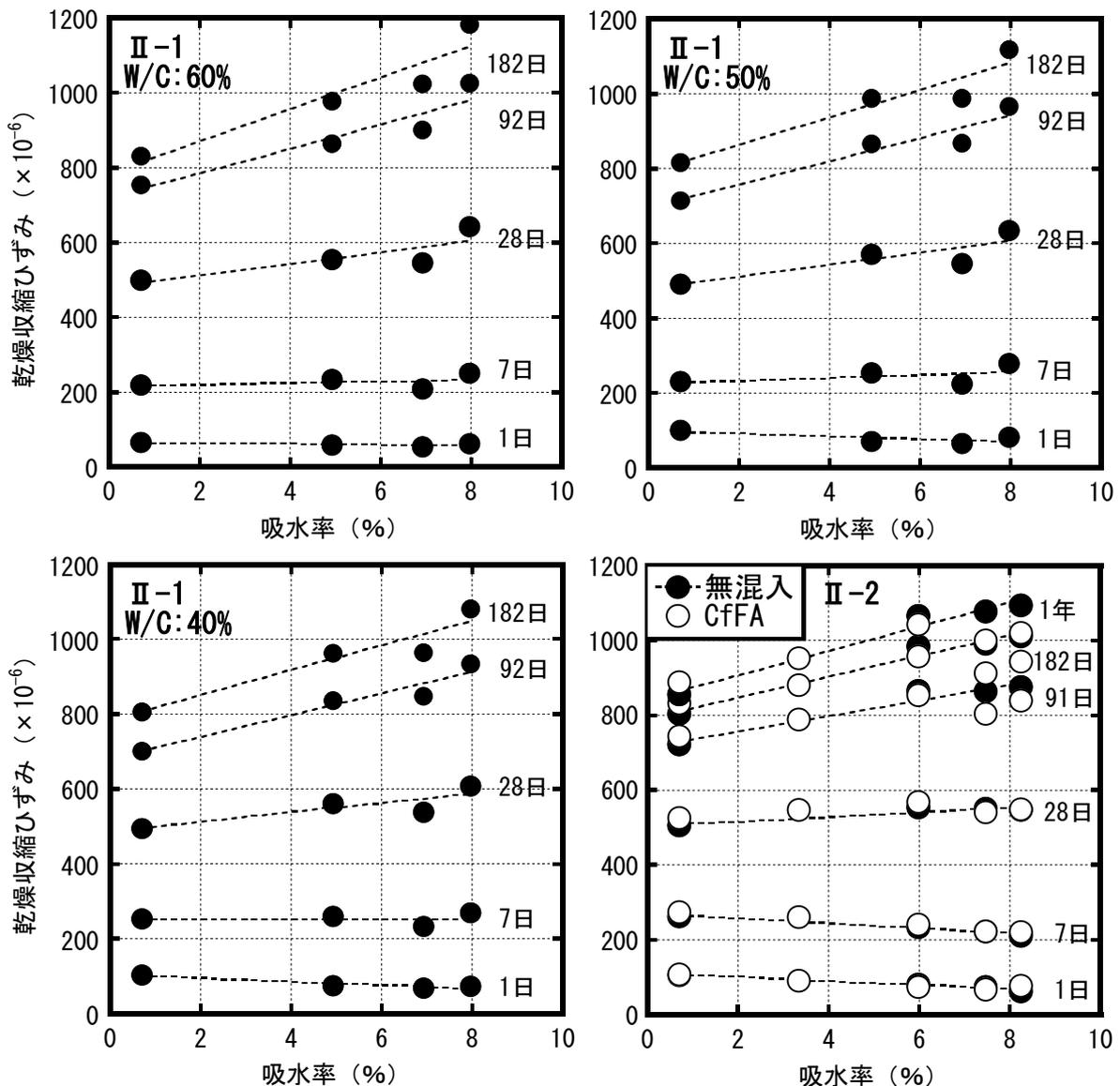


図-3.4.17 吸水率と乾燥収縮ひずみの関係

脱水量と吸水率の関係を図-3.4.18に示す。脱水量についても乾燥収縮ひずみとほぼ同様の傾向を示したが、乾燥初期から吸水率の増加に伴い脱水量は増加する傾向を示した。江口らは、再生粗骨材からは乾燥初期に乾燥収縮に寄与しない自由水が多量に逸散し、その後乾燥収縮に寄与する細孔からの水分が徐々に逸散する^{3.15)}との知見を得ており、本実験においても同様の傾向が認められた。

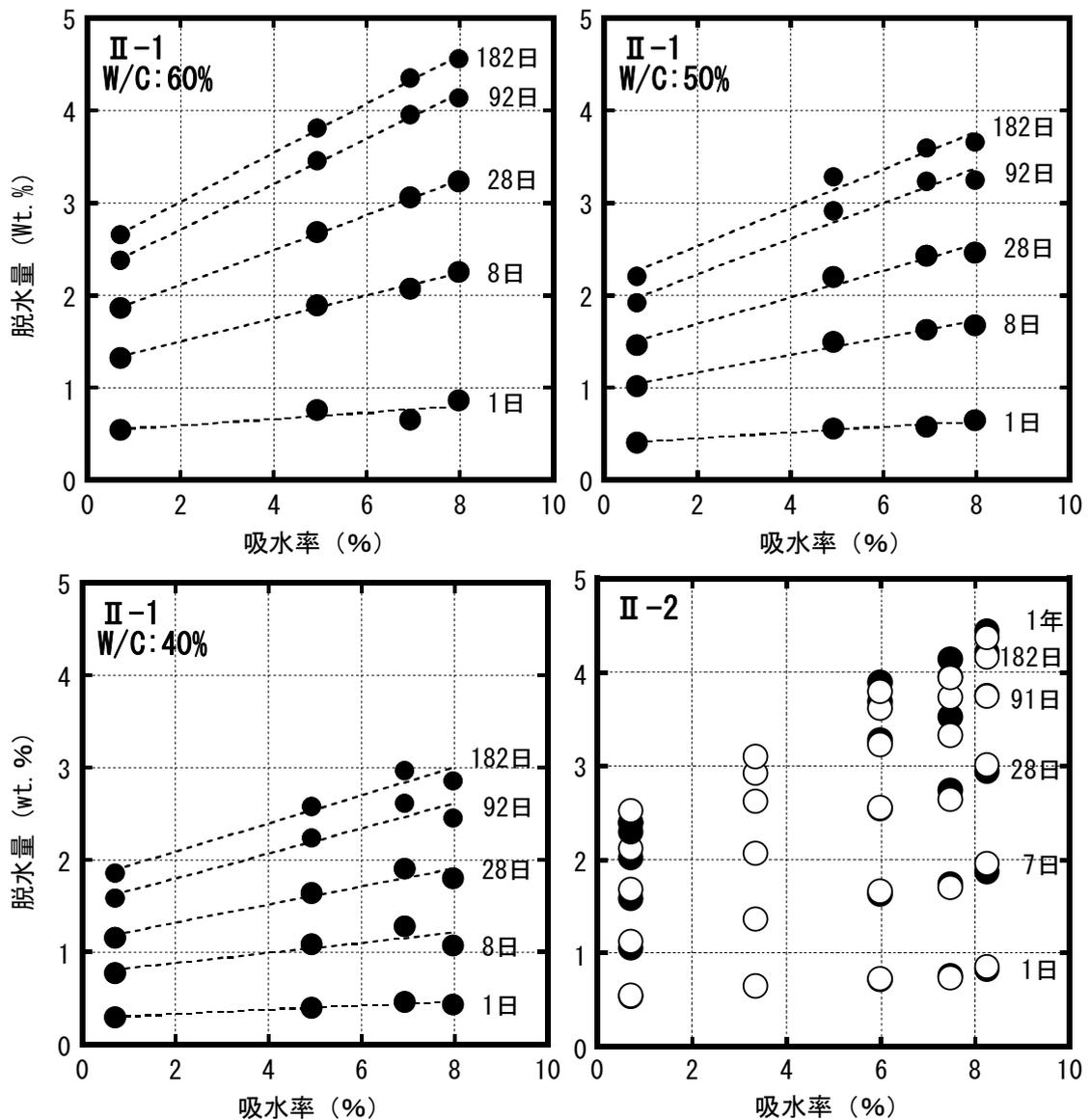


図-3.4.18 吸水率と脱水量の関係

③ 再生粗骨材置換率の影響

図-3.4.19 に再生粗骨材置換率と乾燥収縮ひずみおよび脱水量の関係を各乾燥期間で示している。図より、乾燥収縮ひずみは置換率の増加に伴い乾燥初期ではやや小さくなる傾向を示したが、乾燥期間 28 日以降では、ばらつきはあるものの全体的には増加する傾向を示した。脱水量に関して、再生粗骨材置換率の増加に伴って脱水量はほぼ直線的に増加する傾向を示し、その傾きは乾燥期間が長くなるほど大きくなった。

図-3.4.20 に乾燥期間 91 日における乾燥収縮ひずみを骨材種類ごとに示す。図中の黒塗りは CfFA 無混入のものを、白抜きは CfFA20%混入のものを示している。図より、CfFA を 20%混入したコンクリートの乾燥収縮ひずみは無混入のものに比べ、普通骨材の場合に 90×10^{-6} 程度減少しているが、低品質再生骨材の場合には平均で 50×10^{-6} 程度増加しており、CfFA 混入による影響は明確ではない。

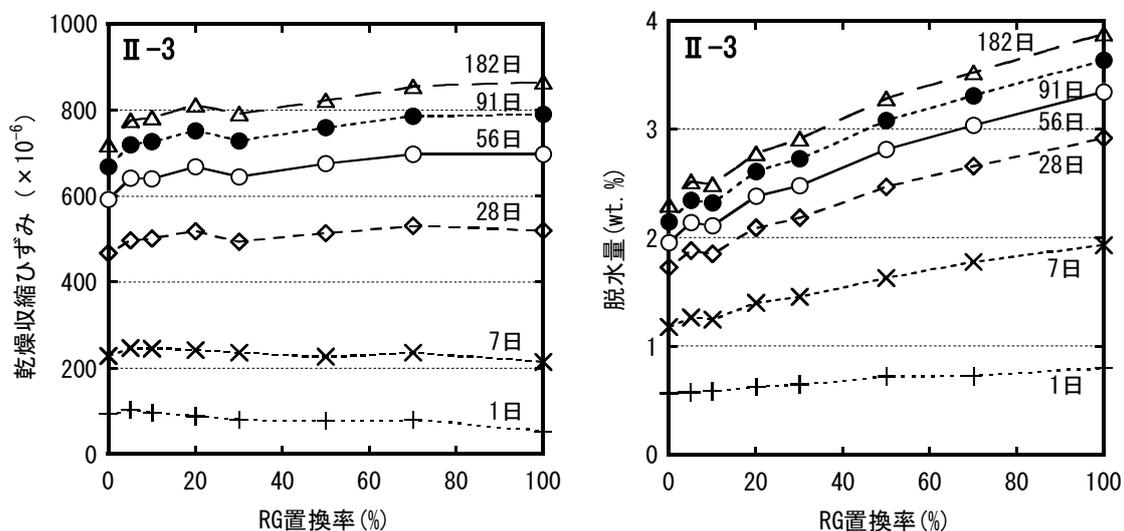


図-3.4.19 乾燥収縮ひずみおよび脱水量と RG 置換率の関係

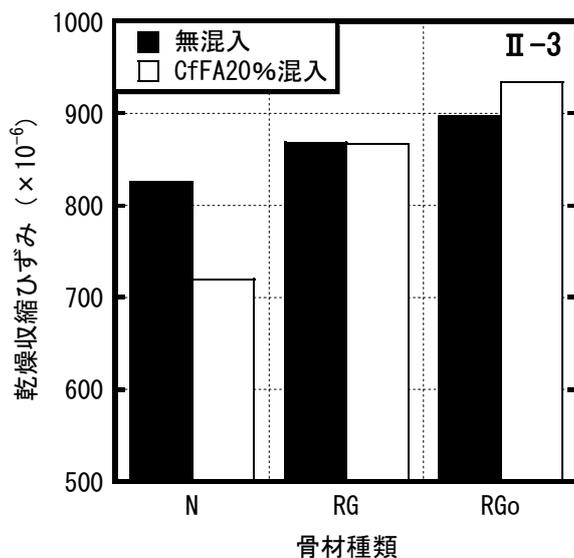


図-3.4.20 乾燥期間 91 日における乾燥収縮ひずみ

④ CfFA 混入率の影響

図-3.4.21 に CfFA 混入率と乾燥収縮ひずみおよび脱水量の関係を示す。図より、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは乾燥期間 7 日までは CfFA 混入率によらず同一の値を示したが、乾燥期間 56 日以降では混入率 30%において小さくなる傾向を示しており、無混入に比べ乾燥期間 56 日では 5%、91 日では 8%、182 日では 10%ほど小さくなった。脱水量についても乾燥収縮ひずみとほぼ同様の傾向が認められており、CfFA の混入によって硬化体の組織が緻密になり、乾燥収縮ひずみが低減されたものと考えられる。

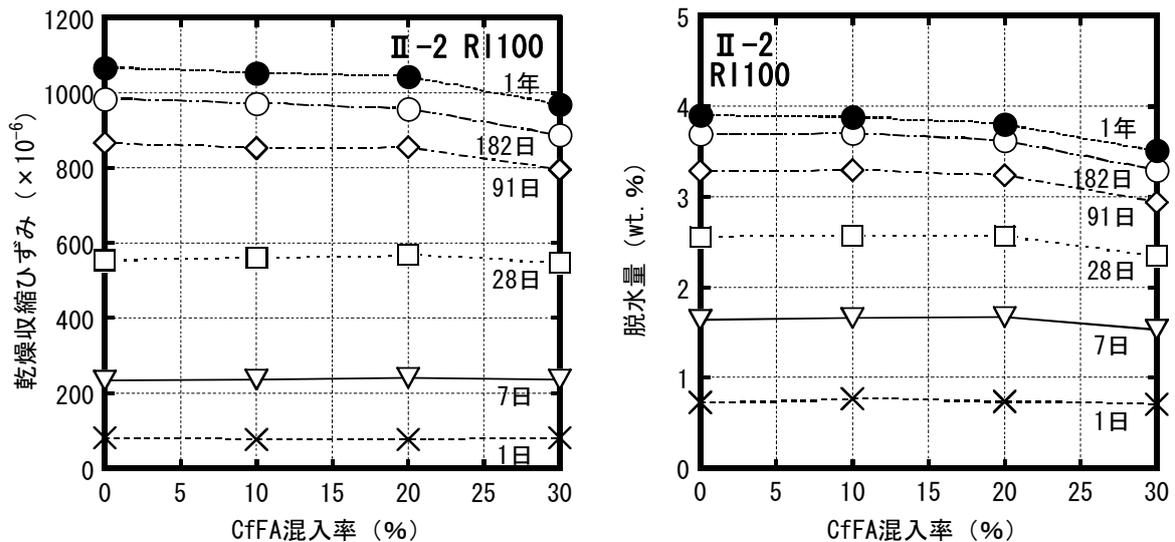


図-3.4.21 CfFA 混入率と乾燥収縮ひずみおよび脱水量の関係

⑤ 微粒分量による影響

図-3.4.22 に乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を示す。図中のマーカーは、黒塗りが CfFA 無混入を、白抜きが CfFA20%混入のコンクリートを示しており、三角が洗浄有の微粒分量を比較的含まない骨材を、ひし形が洗浄無の微粒分量を比較的多く含んでいる骨材を示している。図より、脱水量については、微粒分量による影響は見られず、ほぼ同等の値を示したが、乾燥収縮ひずみは CfFA 混入の有無に関わらず、洗浄無の場合の方が若干大きくなる傾向を示した。この点に関しては、さらにデータを蓄積し検討を行う必要がある。

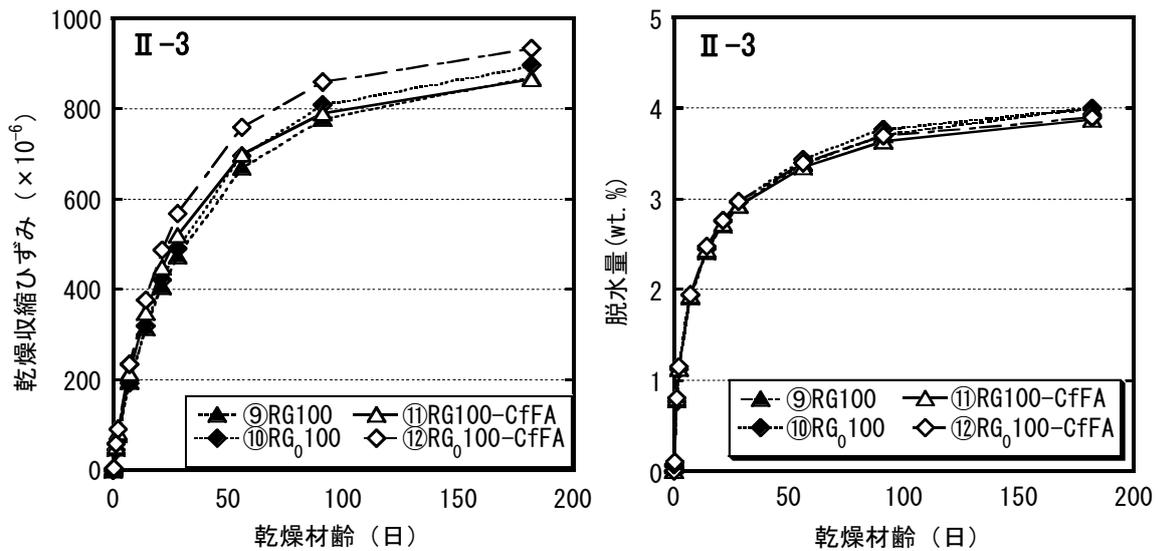


図-3.4.22 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化

4.4.5 中性化

(1) 実験 I

図-3.4.23 に促進中性化深さと水セメント比の関係を示す。図中の破線は促進中性化期間26週における促進中性化深さを、実線は乾燥収縮ひずみ試験用供試体を乾燥期間1年で割裂し測定した中性化深さをそれぞれ直線回帰したものである。なお、乾燥収縮試験が行われた恒温恒湿室のCO₂濃度は0.17%であった。図より、中性化深さは水セメント比とほぼ線形関係にあり、同じ水セメント比で比較すると骨材種類およびCfFAによる影響は見られなかった。既往の研究においても、中性化深さは再生粗骨材の影響をほとんど受けないことが実験的に示されており^{3.16)}、本研究においても同様の傾向が認められた。これは、再生粗骨材の吸水率に起因する水量の増加量は、強度や収縮には影響するものの、二酸化炭素の拡散に影響を与えるモルタル組織の緻密さに及ぼす影響は小さいことを示唆している。

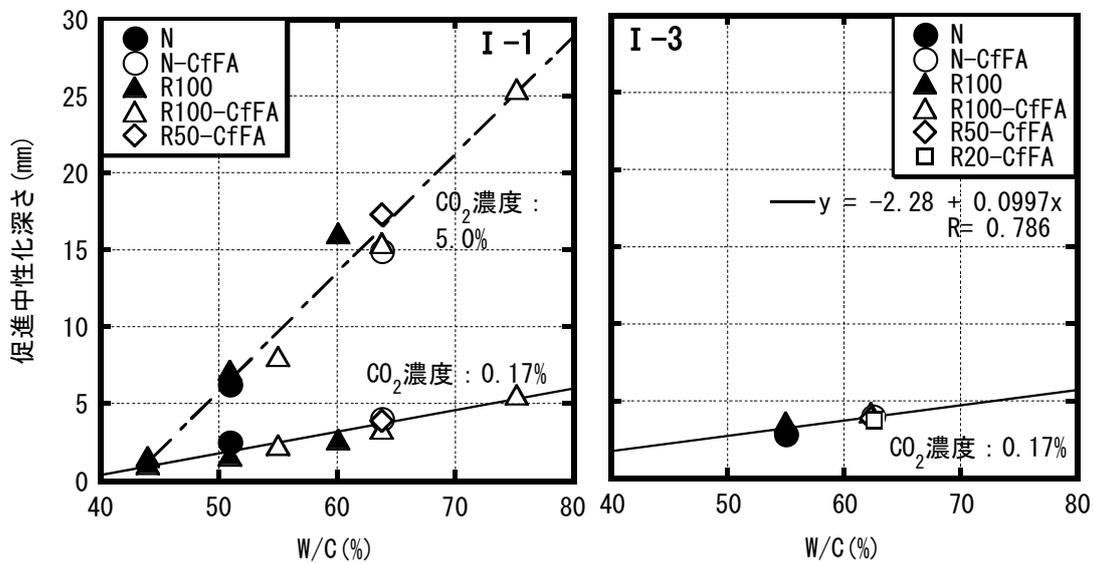


図-3.4.23 促進中性化深さと水セメント比の関係

(2) 実験Ⅱ

写真-3.4.1 に促進期間 13 週におけるコンクリートの中性化状況を、図-3.4.24 に促進中性化深さをそれぞれ示す。図より、CfFA 無混入の場合、低品質再生コンクリートの中性化深さは基準コンクリートに比べ 1.5mm ほど大きくなっているが、CfFA20%混入の場合では同等であり、再生粗骨材の使用による大きな差は見られなかった。これは、前条の結果と同様の傾向である。

図-3.4.25 に CfFA 混入率と促進期間 13 週における促進中性化深さの関係を示す。図より、RG-I を 100%置換した場合、CfFA 無混入に比べ、CfFA20%混入の場合には促進中性化深さは若干小さくなっているが、全体的には CfFA 混入率の違いによる影響はほとんど見られなかった。フライアッシュを外割混入した場合、コンクリートの促進中性化深さは小さくなるのが既往の研究^{3.17)}によって明らかとなっているが、本実験においてはその傾向は明確ではなかった。

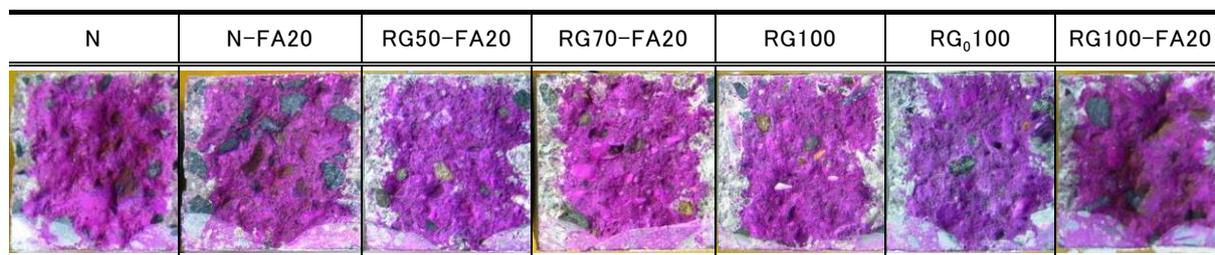


写真-3.4.1 コンクリートの中性化状況(促進期間:13週)

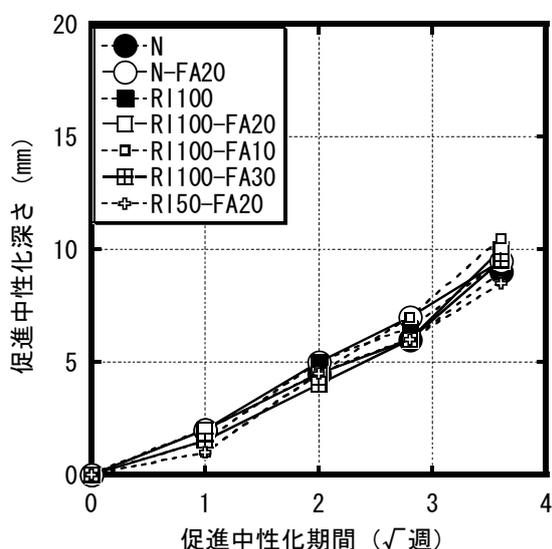


図-3.4.24 促進中性化深さの推移

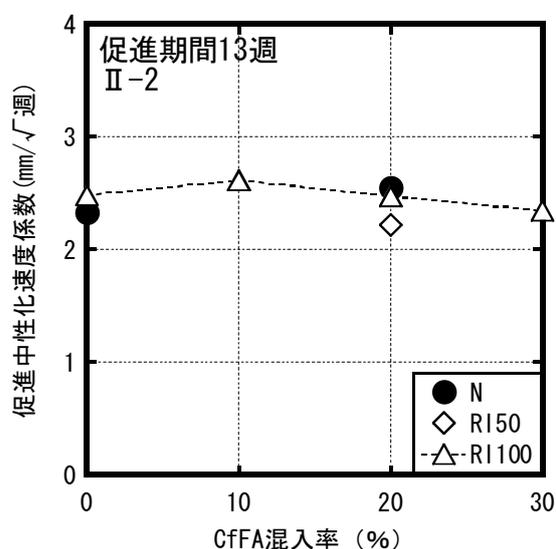


図-3.4.25 中性化速度係数と CfFA 混入率の関係

図-3.4.26 に促進中性化深さの経時変化を示す。図より、促進期間の平方根に対して、中性化深さはほぼ直線的に増加する傾向を示し、調合種類の違いによる差は明確には見られなかった。

図-3.4.27 に中性化速度係数と再生粗骨材置換率の関係を示す。再生粗骨材置換率、微粉の有無の違いによる影響は見られず、促進中性化速度係数はほぼ同等であった。

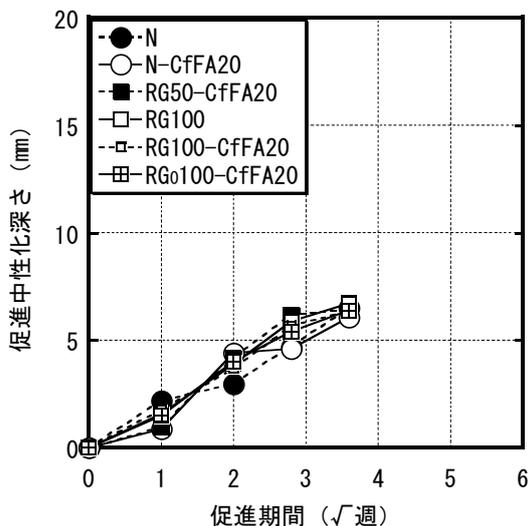


図-3.4.26 促進中性化深さの推移

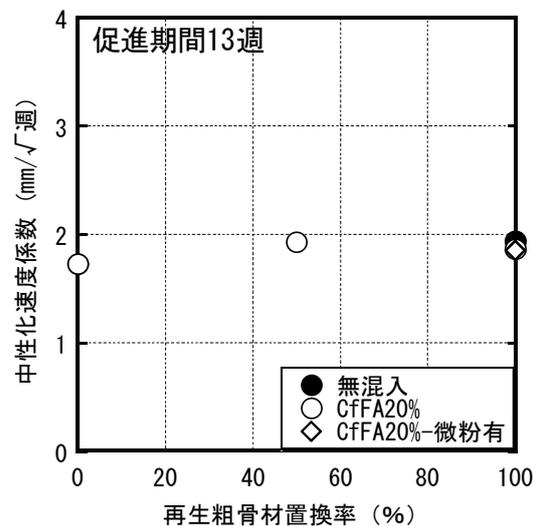


図-3.4.27 促進中性化速度係数とRG置換率の関係

再生コンクリートの中性化抵抗性について、既往の研究では、第2章で述べたように再生粗骨材を用いた再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートと同等する場合とやや劣るとする場合があります。後者の傾向は、コンクリートの水セメント比が比較的大きく(60~70%以上)、再生粗骨材の原コンクリートの水セメント比が大きく、品質が劣る場合に認められるようである。本研究では、コア強度が20N/mm²前後の原コンクリートから採取された3種類の再生骨材を用いた検討を行った結果では、同水セメント比(50%)で比較した場合、骨材種類、CfFAの有無の違いによる影響はほとんどないことが明らかとなった。したがって、再生コンクリートの水セメント比をある程度確保すれば、再生骨材の使用による影響は見られず、低品質再生粗骨材を用いた場合であっても、普通コンクリートと同等の中性化抵抗性を有するコンクリートとすることが可能であると考えられる。

以上の結果について、**図-3.4.28**に再生粗骨材の平均吸水率と中性化速度係数の関係を各水セメント比で示す。なお、左図は促進中性化試験の結果を、右図は乾燥収縮ひずみ試験用供試体を乾燥期間半年および1年で割裂し測定した結果を示したものである。

図より、各水セメント比で粗骨材の平均吸水率によらず中性化速度係数はほぼ一定であり、再生粗骨材による影響は認められないことが分かる。したがって、W/Cが40~60%程度の範囲であれば、低品質再生粗骨材を100%置換で使用した場合であっても、その吸水率に関わらず、普通コンクリートと同等の中性化抵抗性を有することが可能であると判断される。ただし、促進中性化試験結果については、W/C 50%のデータが主であり、W/Cが大きな範囲（55%以上）のデータが少ないため、さらにデータを蓄積し検討する必要がある。

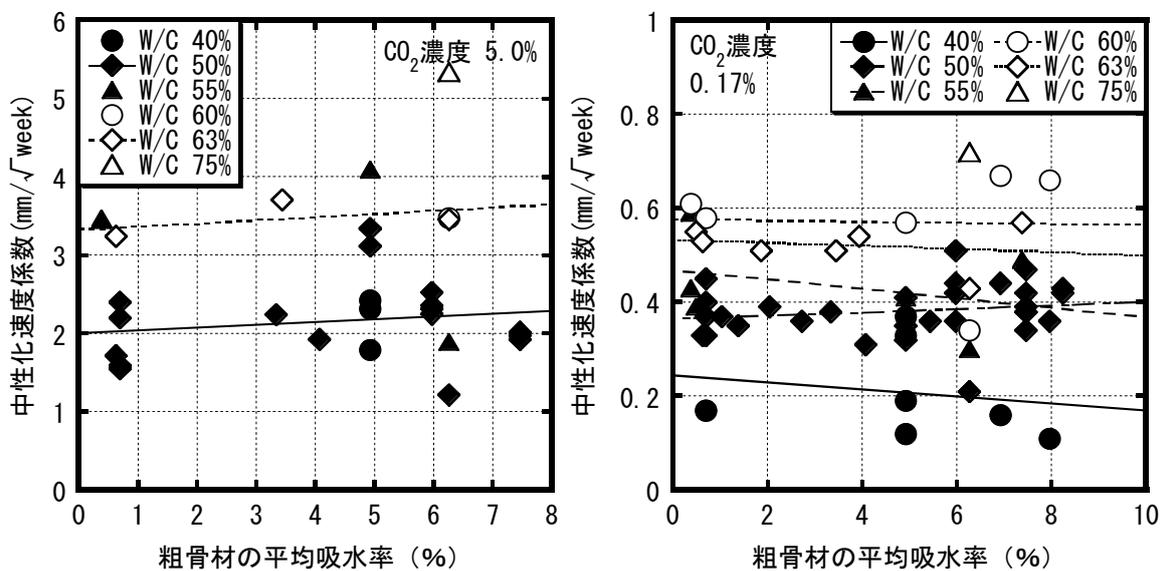


図-3.4.28 粗骨材の吸水量と中性化速度係数の関係

3.4.6 凍結融解

各サイクルにおける供試体の外観を**写真-3.4.2**～**写真 3.4.3**に示す。サイクル数が進むにつれて、供試体方面が薄片状に剥離・剥落しはじめ、表面がぼろぼろと削られる症状（スケーリング）が見られた。特に、その症状は再生粗骨材を用いたものほど比較的早期に見られた。

調査	N	N-FA20	RG100	RG100-FA20	RH100	RH100-FA20	RI100	RI100-FA20	RI100-FA10	RI100-FA30	RI50-FA20
初期											
120											
180											
210											

写真-3.4.2 凍結融解試験における各サイクルの供試体外観(その1)

調合	N	N-FA20	RG100	RG100-FA20	RH100	RH100-FA20	RI100	RI100-FA20	RI100-FA10	RI100-FA30	RI50-FA20
240											
300											

写真-3.4.3 凍結融解試験における各サイクルの供試体外観(その2)

図-3.4.29 に式(3.3.2)、式(3.3.3)から評価した相対動弾性係数と質量減少率の推移をそれぞれ示す。図より、相対動弾性係数は、低品質再生粗骨材を100%使用した場合、サイクル数が300未満において指標である60%を下回った。特に、吸水率が最も高いRG-H（吸水率8.23%）を使用した場合、早期において相対動弾性係数はほぼ直線的に低下し、CfFA無混入の場合60サイクル、CfFA混入の場合90サイクルにおいて60%を下回った。しかしながら、RG-Iを50%置換した場合では、300サイクル終了時においても相対動弾性係数は84%と高い耐凍害性を示した。

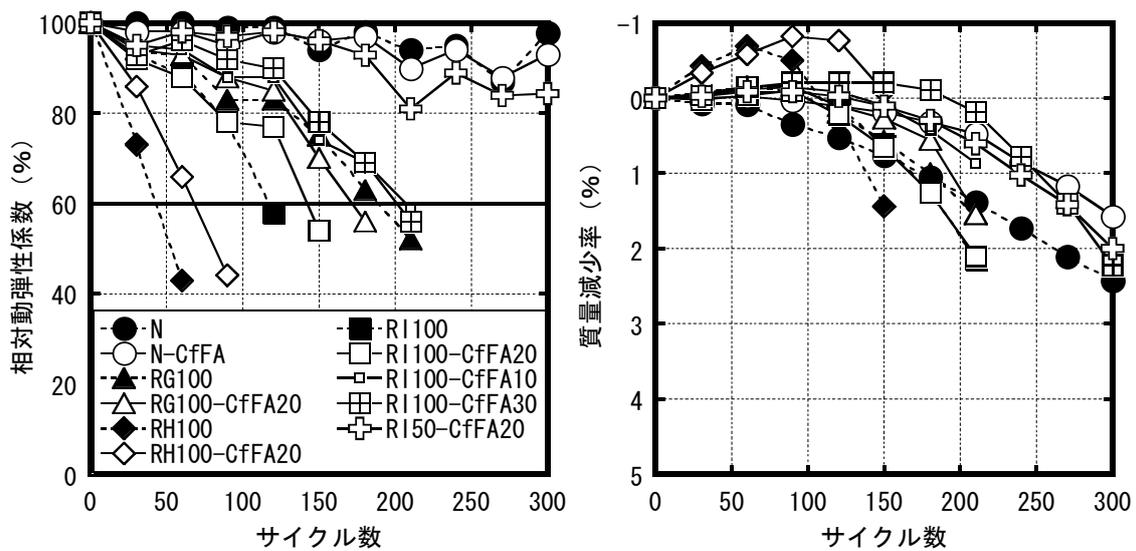


図-3.4.29 相対動弾性係数および質量減少率の推移

図-3.4.30 に粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係を示す。図より、吸水率 6~8%の範囲においてばらつきはあるものの、全体的に、粗骨材の吸水率の増加に伴って耐久性指数も直線的に低下する傾向が認められた。佐藤ら^{3.16)}は吸水率が 6%程度と低品質な再生粗骨材であっても普通粗骨材と混合使用することにより、高い耐凍害性が確保できることを実験的に示しており、本実験においても再生粗骨材を混合使用して、平均吸水率を 3%程度以下とすることによって耐久性指数は 80%を上回っており、同様の結果を示した。

図-3.4.31 に CfFA 混入率と耐久性指数の関係を示す。図-3.4.30 において、CfFA20%混入による影響はほとんど見られなかったが、RG-I を用いた場合では、CfFA の混入により再生コンクリートの耐久性指数は 5~18%高くなっており、CfFA の外割混入によって、耐凍害性は高まる傾向を示した。

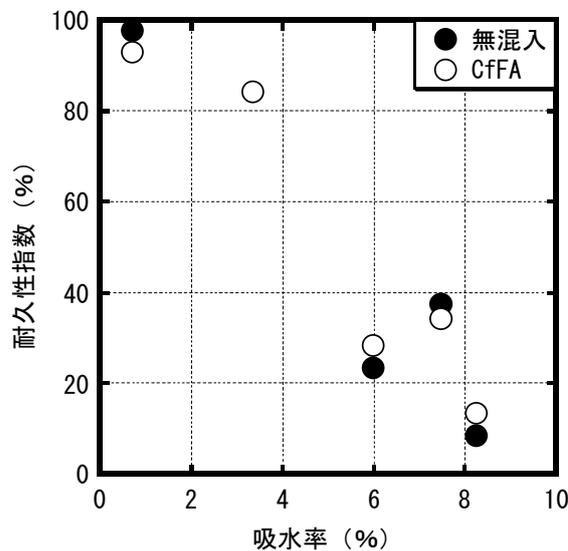


図-3.4.30 吸水率と耐久性指数

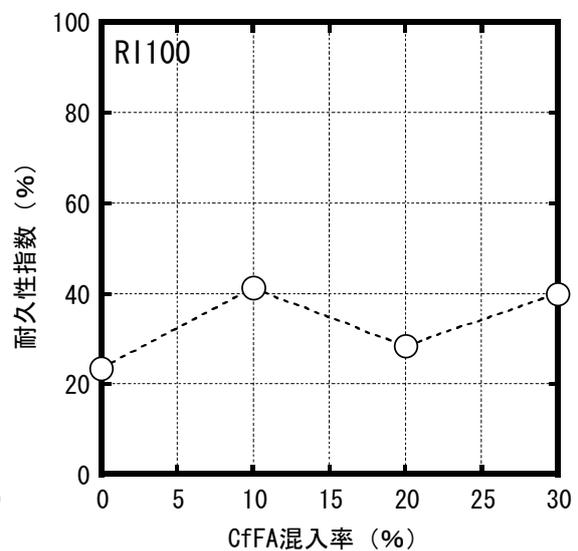


図-3.4.31 CfFA 混入率と耐久性指数の関係

3.4.7 ASR

(1) 化学法

化学法による試験結果を表-3.4.6 および図-3.4.32 に示す。図より、「無害でない」と判定された骨材は、G1、G2、G3、RG-G、RG-H の5種類であった。特に、RG-G および G2 はアルカリ濃度減少量に比べ溶解シリカ量が大幅に大きくなっている。このように、再生骨材の中にも ASR を有する骨材が存在することが明らかとなった。これらの再生骨材は学校建築として使用されていたコンクリート構造物から採取されたものであり、ASR による劣化が生じていたことが外見からは判断されていないものである。つまり、これから製造される再生骨材の中にも ASR を生じる恐れのある骨材が含まれる可能性は充分にあることが考えられる。

表-3.4.6 化学法による試験結果

骨材種類	種類	アルカリ濃度減少量 (Rc) (mmol/L)	溶解シリカ量 (Sc) (mmol/L)	判定結果
標準骨材	G1	45	50	無害でない
安山岩	G2	220	416	無害でない
	G3	140	693	無害でない
再生骨材	RG-C	190	10	無害
	RG-G	151	483	無害でない
	RG-H	205	281	無害でない
	RG-I	100	75	無害

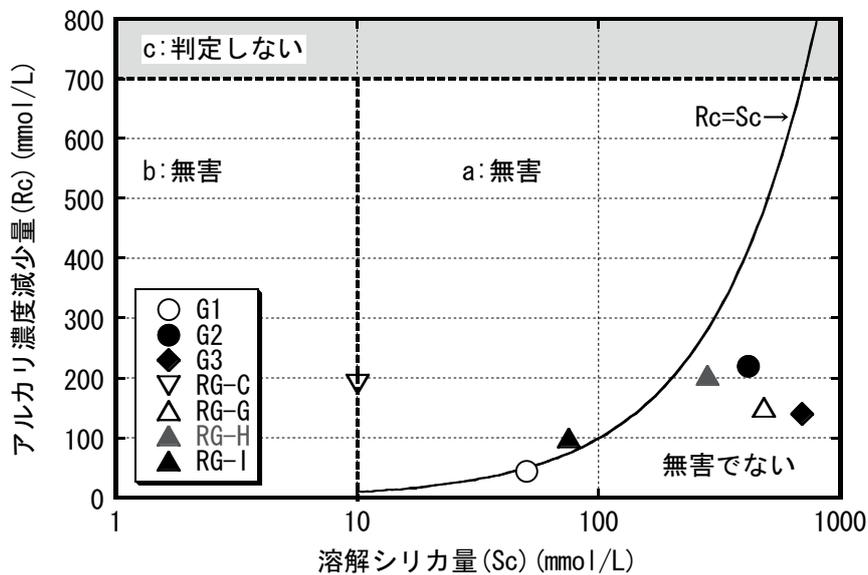


図-3.4.32 化学法の試験結果

(2) モルタルバー法

前条の化学法において「無害でない」と判定された骨材に関して、モルタルバー法による試験を行った。

各試験材齢の供試体の外観一覧を表-3.4.7 に示す。表より、CfFA 無混入の場合に試験材齢 4 週以降でゲルの浸出または表面ひび割れが見られた。特に、RG-G を用いた場合には試験材齢 13 週以降で供試体の反りが見られており、著しい劣化が認められた。また、G3 および RG-G を用いた場合には CfFA5%混入の調合においてもゲルの浸出や表面ひび割れが見られた。CfFA 混入率が 15%以上の調合では外観上の変化は認められなかった。

モルタルバー法の試験結果を表-3.4.8 に、膨張量の推移を図-3.4.33 に示す。試験結果について、3 ヶ月における膨張率が 0.05%を上回る場合、または半年における膨張率が 0.1%を上回る場合に無害でないと判定される。図より、CfFA 無混入の場合に「無害でない」と判定された骨材は、G2、G3、RG-G であり、RG-H については「無害」と判定された。「無害でない」と判定された骨材に関して、CfFA を混入することによって膨張は抑制され、混入率 5%においても「無害」の判定となった。

表-3.4.7 試験体の外観(シリーズⅡ)

種類		0 週	2 週	4 週	8 週	13 週	26 週
G3	無混入	異常なし	異常なし	ゲル浸出	表面ひび割れ	表面ひび割れ	ゲル浸出 表面ひび割れ
	5%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	微細な 表面ひび割れ
	15%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
	20%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
RG-G	無混入	異常なし	異常なし	ゲル浸出 表面ひび割れ	表面ひび割れ ゲル浸出	ゲル浸出 供試体の反り 表面ひび割れ	ゲル浸出 供試体の反り 表面ひび割れ
	5%	異常なし	異常なし	ゲル浸出	表面ひび割れ	表面ひび割れ ゲル浸出	表面ひび割れ ゲル浸出
	15%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
	20%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
RG-H	無混入	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
	5%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
	15%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
	20%	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

表-3.4.8 モルタルバー法の試験結果

シリーズ	骨材種類	CfFA混入率 (%)	膨張量 (%)					判定
			2 週	4 週	8 週	13 週	26 週	
II	G1	0	0.003	0.009	0.012	0.018	0.026	無害
I	G2	0	0.007	0.022	0.175	0.297	0.337	無害でない
		10	0.002	0.008	0.010	0.015	0.024	無害
		20	0.000	0.002	0.001	0.005	0.010	無害
		30	0.001	0.001	-0.001	0.002	0.002	無害
		0	0.010	0.029	0.155	0.168	0.185	無害でない
II	G3	5	0.005	0.014	0.020	0.021	0.027	無害
		15	0.001	0.004	0.006	0.007	0.009	無害
		20	0.000	-0.001	0.001	0.001	0.002	無害
		0	0.014	0.029	0.108	0.180	0.284	無害でない
	RG-G	5	0.011	0.017	0.029	0.038	0.095	無害
		15	0.009	0.005	0.010	0.009	0.012	無害
		20	0.010	0.008	0.010	0.009	0.011	無害
		0	0.009	0.013	0.015	0.021	0.024	無害
	RG-H	5	0.006	0.013	0.013	0.014	0.016	無害
		15	0.007	0.009	0.007	0.008	0.009	無害
		20	0.008	0.009	0.006	0.006	0.006	無害

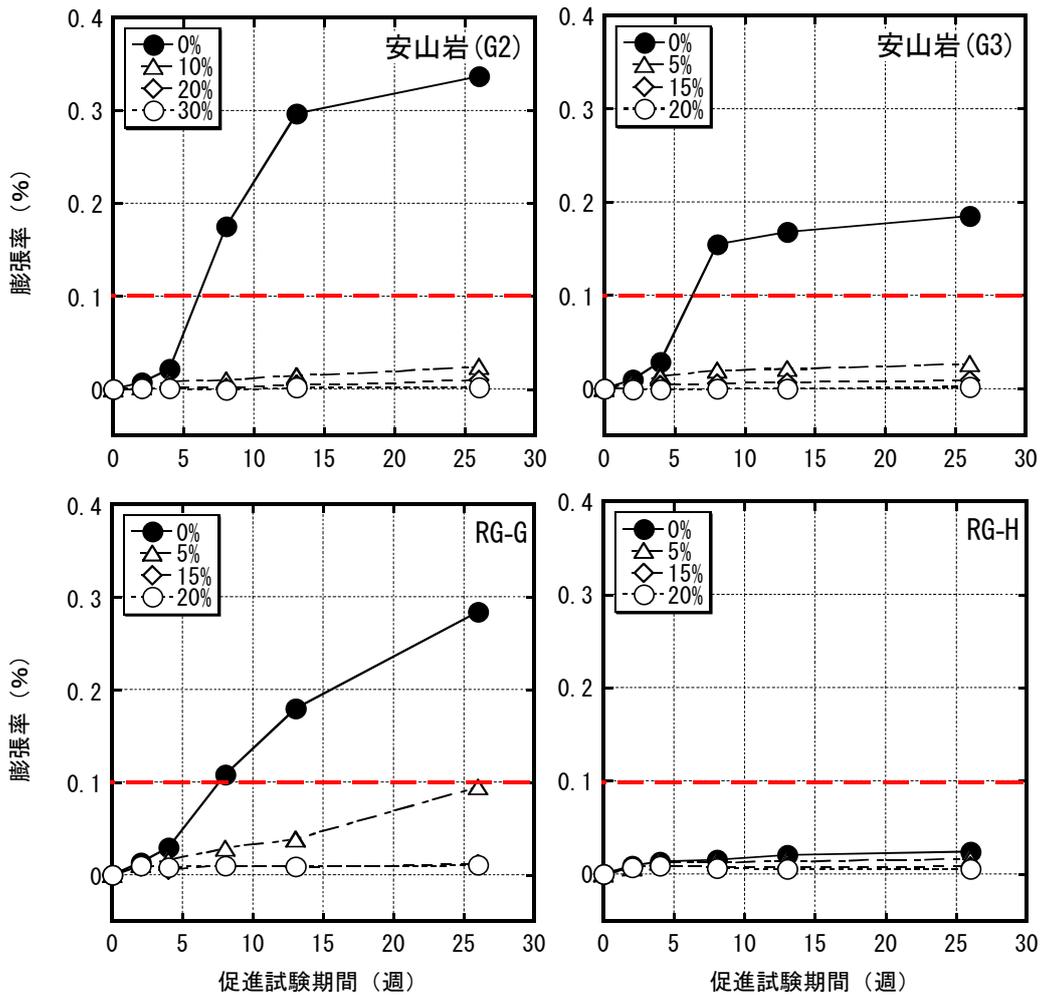


図-3.4.33 膨張率の推移

図-3.4.34 に膨張率と CfFA 混入率の関係を示す。図より、骨材の種類によって CfFA 混入率 0%における膨張率は差があるが、いずれの場合でも、CfFA 混入率の増加に伴って膨張率は小さくなる傾向を示していることがわかる。また、CfFA 混入率が 10%以上であれば、すべての骨材において膨張率は 0.10%以下となっており、十分な ASR 抑制効果が発揮されていることがわかった。

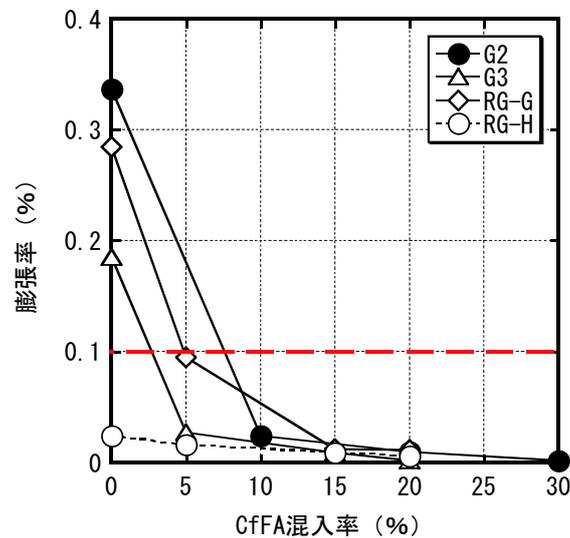


図-3.4.34 膨張率と CfFA 混入率の関係

以上より、モルタルバー法において、反応性を有する安山岩および再生骨材を用いて CfFA の ASR 抑制効果について検討を行った。その結果、いずれの骨材を用いた場合においても CfFA 混入によって ASR を抑制できることがわかった。次いで、コンクリートバー法において CfFA の ASR 抑制効果を調べる。

(3)ZKT-206 法

ZKT-206 法による試験では、まず、安山岩 (G3) のペシマム置換率について検討を行った。なお、混合に用いた骨材は化学法で「無害」と判定された硬質砂岩砕石である。骨材置換率は 0、20、40、60、80 および 100% の 6 水準としたが、その結果、置換率 20% の場合に相対動弾性係数 (Ed1) は 65.9% と最も小さくなった。なお、煮沸前後の供試体外観の一例を写真-3.4.2 に示す。

そこで、安山岩置換率 20% において、CfFA 混入率の違いによる影響について検討を行った結果、図-3.4.35 が得られた。供試体外観の一例を写真-3.4.3 に示す。

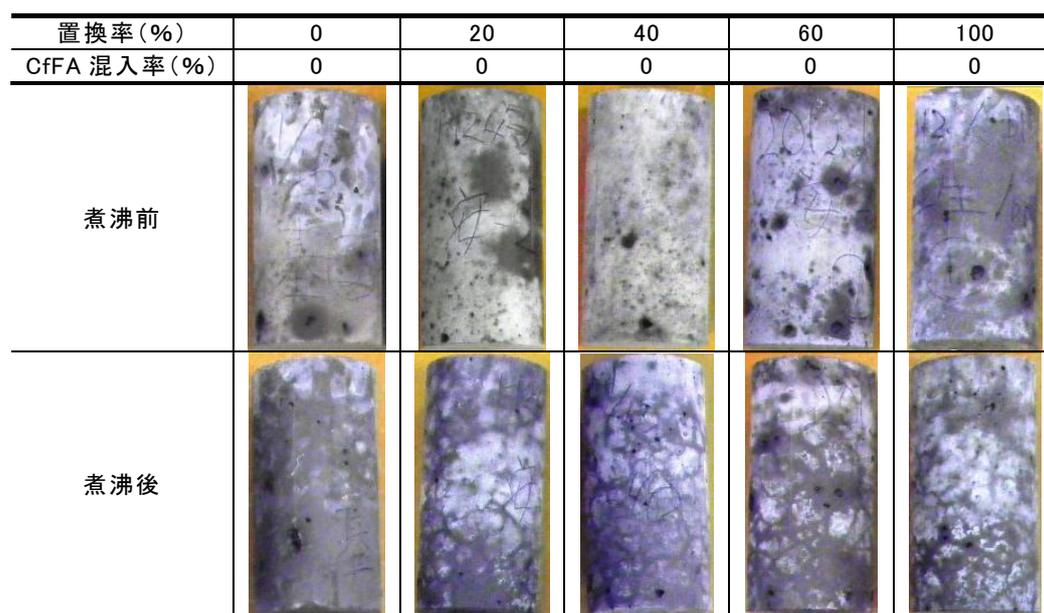


写真-3.4.2 煮沸前後の供試体外観の一例

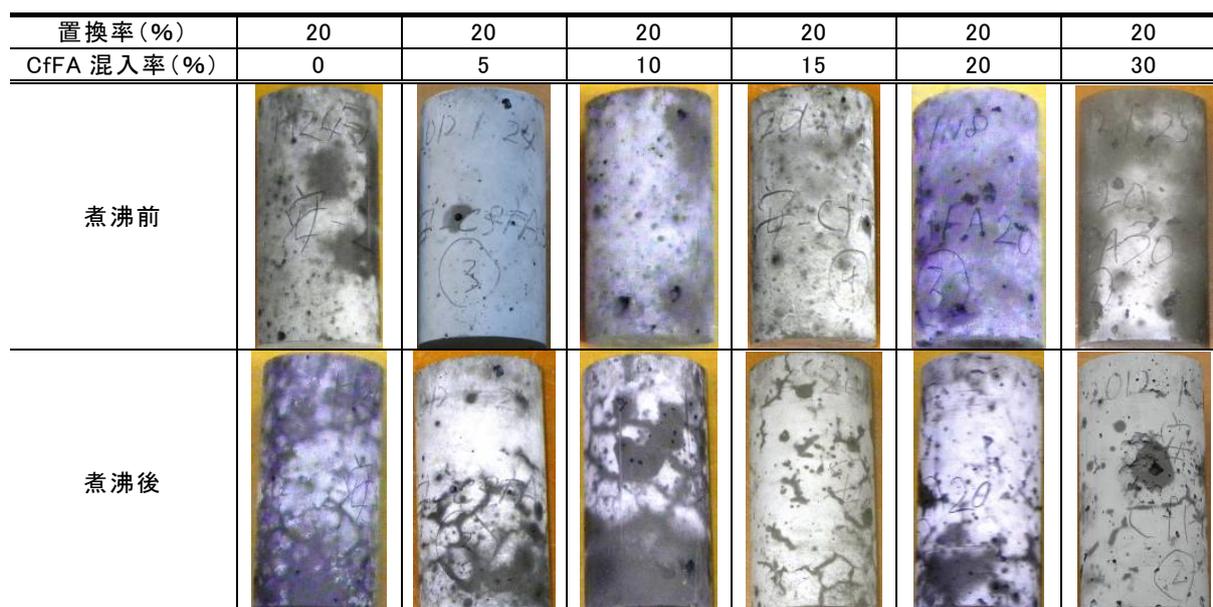


写真-3.4.3 煮沸前後の供試体の外観の一例 (安山岩 20%-CfFA 混入率)

図より、相対動弾性係数は CfFA 混入率の増加に伴い大きくなり、CfFA 混入率 5%で 80%程度、10%で 95%程度となった。また、CfFA 混入率 10~30%では、ほぼ同等の値を示しており、相対動弾性係数は頭打ちとなったが、80%を大きく上回っていることから、CfFA 混入率を 10%以上とすれば、十分な ASR 抑制効果が発揮されるものと考えられる。

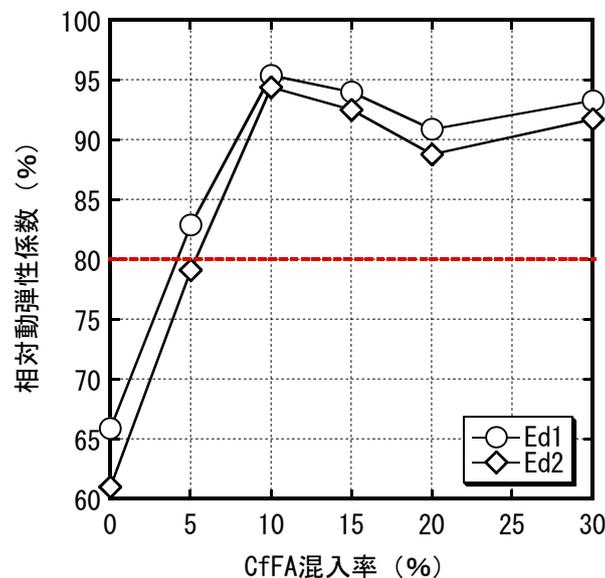


図-3.4.35 相対動弾性係数と CfFA 混入率の関係

次いで、3種類の再生骨材 RG-G~RG-I を用いた再生コンクリートの ASR を調べた。煮沸前後の外観写真を写真-3.4.4 に、煮沸前後の動弾性係数から算出した相対動弾性係数を図-3.4.36 に示す。これによると、同法ではすべての再生骨材において「反応性なし (A)」と判定された。これは、水分、塩化物イオンやアルカリが十分に供給され、乾湿繰り返しがあがるような過酷な条件下でも劣化しない、アルカリシリカ反応が極めて低いコンクリートであると判断される結果である。つまり、化学法およびモルタルバー法において、極めて高い反応性を有すると判断された骨材が含まれる再生骨材を使用した場合でも、コンクリートとして用いる場合には、ASR は問題とならない場合があることがわかった。

ZKT-206 法による試験結果とモルタルバー法による試験結果の相違については、以下のように考えた。モルタルバー法による試験では、まず付着モルタルを除去した後に、骨材を破砕し粒度調整を行った骨材を使用した。このため、新たな未反応部分が出現し新セメントペーストと反応するためモルタルバー法による試験結果は「無害でない」結果となる。一方、コンクリートバー法の場合、骨材の破砕処理は行わず、そのまま使用するためモルタルバーの場合のように新たな未反応部分は出現しないため、反応が緩慢であることが推察される。

しかしながら、付着ペーストによる影響について、付着モルタルに含まれるアルカリ量も再生骨材の ASR に影響を及ぼすことが考えられており、黒田^{3.19)}は、再生骨材の ASR について、図-3.4.37 および図-3.4.38 に示すように整理を行っている。これによれば、付着

モルタルに含まれているアルカリ量が少ない場合において、新たにもたらされるアルカリ量が多い場合には、再生骨材中の反応性骨材と新たに浸出したアルカリが反応し ASR を生じる。また、付着モルタルに含まれるアルカリ量が多い場合にも、再生骨材中の反応性骨材は ASR を生じる。

したがって、再生コンクリートの ASR に影響を及ぼす要因として、内在的な観点では、再生骨材の付着モルタルに含まれるアルカリ量、新たにもたらされるアルカリ量、再生骨材中の反応性骨材の反応率、反応性骨材とアルカリの接触面積などの様々なものが考えられ、これらの影響を総合的に評価する必要がある。また、本実験では、アルカリ添加量が 9kg/m^3 、促進養生温度が 111°C とかなり厳しい条件下において短時間で評価を行う ZKT-206 法によって試験を行ったため、実環境における ASR とは厳密には異なる反応が生じていることも考えられる。これらの点に関しては、今後の検討課題である。

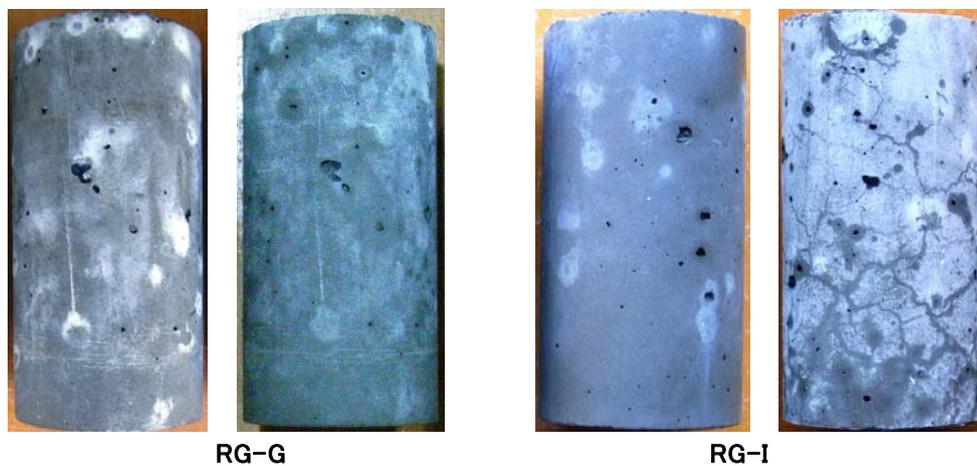


写真-3.4.4 煮沸前後の供試体の外観写真(各種類で左が煮沸前、右が煮沸後)

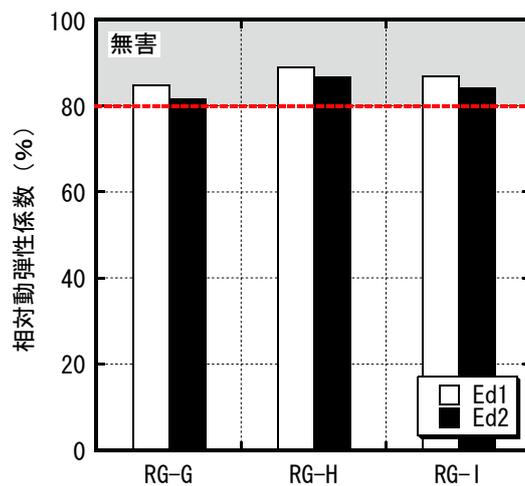


図-3.4.36 ZKT-206 法試験結果(再生骨材)

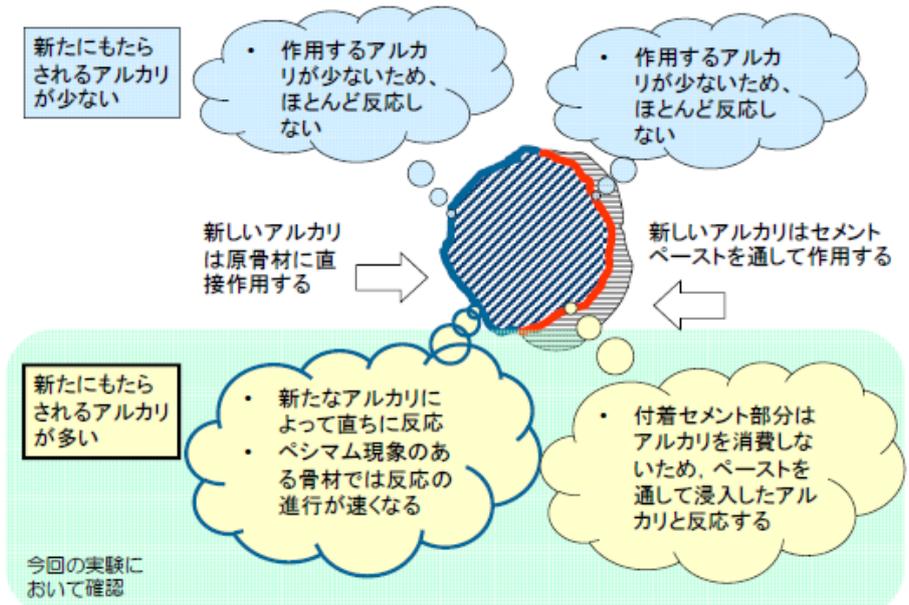


図-3.4.37 再生骨材の含有アルカリ量が少ない場合の ASR 概念 ^{3.19)}

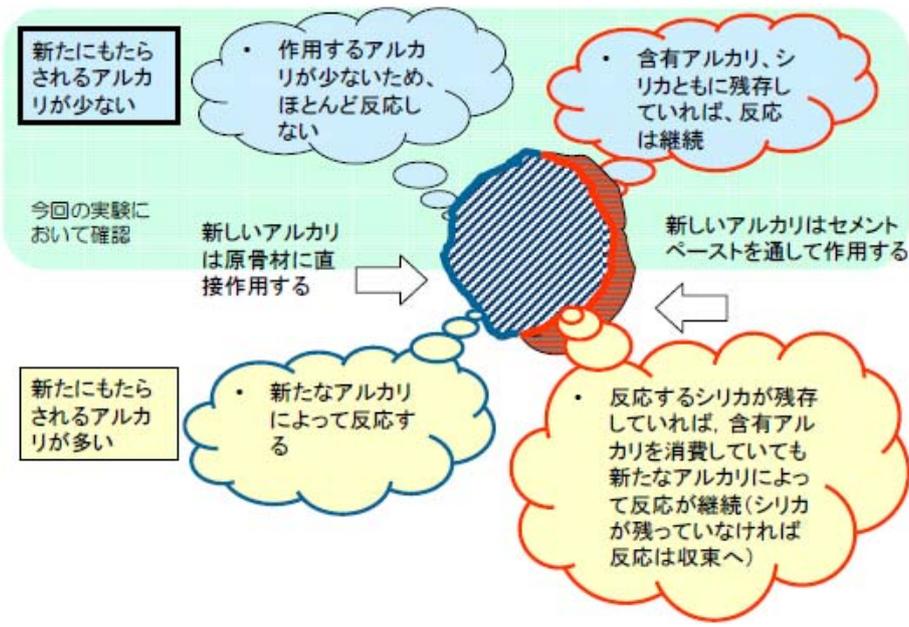


図-3.4.38 再生骨材の含有アルカリ量が多い場合の ASR 概念 ^{3.19)}

3.5 まとめ

本章では、CfFA を混入した低品質再生骨材コンクリートの材料設計法の確立に必要な基礎資料を得るために、再生骨材の品質および置換率、CfFA 混入率の違いが再生コンクリートの強度性状、並びに中性化抵抗性、乾燥収縮、耐凍害性、ASR などの耐久性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験的に検討を行った。その結果、本実験の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- 1) 再生コンクリートの流動性は、洗浄を行った低品質骨材を用いた場合に普通コンクリートと同等であるが、洗浄を行っていない微粒分を多く含む再生粗骨材を使用した場合には低下する傾向にある。また、標準粒度範囲外の粒度分布が細かめの場合にも同様に流動性は低下する傾向にあることがわかった。また、CfFA を内割混入した場合にはコンクリートの流動性は向上する傾向にあるが、外割混入した場合など低水紛体比である場合には流動性は低下するため混和剤の使用などにより調整する必要がある。
- 2) 再生コンクリートの塩分含有量は、再生粗骨材中に含まれる塩分含有量も考慮する必要があるが、その算出結果は普通コンクリートのものに比べて大きくなる傾向にあるが、再生コンクリート中の塩分含有量は吸水率 6%程度の再生粗骨材を用いた場合に最大でも 0.13kg/m^3 であり、規定値の 0.3kg/m^3 を大きく下回っていることから、特に問題はないといえる。
- 3) 低品質再生コンクリートの圧縮強度は再生粗骨材の吸水率およびその置換率の増加に伴いほぼ直線的に低下する傾向を示し、その低下率は置換率 100%の場合に普通骨材コンクリートに比べ平均で 2 割程度である。また、圧縮強度が 50N/mm^2 以上の場合においては、少量置換 (5~20%) でも著しく強度が低下する場合があるため配慮が必要である。一方、CfFA 混入による影響として、CfFA を内割混入した場合では無混入に比べ圧縮強度は低下するが、外割混入した場合には、CfFA 混入率が増加するに従ってほぼ直線的に大きくなり、混入率 30%では無混入に比べ 2 割程度増加する。さらに、CfFA 混入コンクリートは長期強度発現性に優れ、材齢 28 日の圧縮強度に対する増加率は材齢 1 年においては無混入のもの約 2 倍である。
- 4) 低品質再生コンクリートのヤング係数は、普通骨材コンクリートに比べ小さくなるものの、コンクリートの単位体積質量を考慮した建築学会式によっておおよそ評価可能である。
- 5) 低品質再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは再生粗骨材の吸水率および再生粗骨材置換率の増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示し、各基準コンクリートに比べ、2~7 割増加する。しかし、CfFA の混入によって、ひずみは平均で 4~10%程度低減され、CfFA 混入による若干の収縮低減効果が期待できる。
- 6) 再生コンクリートの中性化抵抗性は、同じ水セメント比で比較した場合に再生粗骨材の吸水率および置換率、CfFA 混入の有無の違いに関わらず、普通コンクリートとほぼ同等であり、水セメント比による影響が支配的である。
- 7) 低品質再生コンクリートの耐凍害性は、再生粗骨材の吸水率の増加に伴いほぼ直線的

に低下する傾向にあり、再生粗骨材置換率 100%の場合に著しく低下するが、普通粗骨材と混合使用し、粗骨材の平均吸水率を 3%程度以下にすることによって普通コンクリートとほぼ同等となる。また、CfFA の外割混入によって若干改善される傾向にある。

- 8) 化学法で「無害でない」と判定された安山岩および再生骨材を用いて CfFA の ASR 抑制効果を明らかにするために実験を行った結果、CfFA 混入率の増加に伴って膨張率も抑制されることが分かり、5%ないし 10%以上の混入率であれば十分な ASR 抑制効果が期待されることが分かった。また、コンクリートを用いた ZKT 法による試験結果においては、モルタルバー法において反応性が確認された再生骨材でも「反応性なし」となり、必ずしも ASR を起こさない場合が考えられたため、この点に関しては今後の検討課題である。

【第3章 参考文献】

- 3.1) 建設副産物・再資源の取扱いに関するガイドブック、運輸省第四港湾建設局（現国土交通省九州地方整備局）リサイクルワーキンググループ
- 3.2) 高橋祐一、梶田佳寛、竹内博幸：再生骨材コンクリートの性質に影響を及ぼす要因の検討、日本建築学会構造系論文集、第659号、pp.9-14、2011.1
- 3.3) 嵩英雄ほか：再生骨材の品質に及ぼす付着モルタルの影響に関する実験研究、その3 再生骨材の付着モルタル量と比重・吸水率に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.689-690、1998
- 3.4) 清水俊之ほか：再生粗骨材を用いたコンクリートの性質に関する研究、－原骨材の性質および付着モルタルの影響－、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.13-16、2005
- 3.5) 柳橋邦生ほか：高品質再生粗骨材の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、pp.205-210、1999
- 3.6) 喜地大輔ほか：骨材品質の異なる再生粗骨材を使用したコンクリートの性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.1295-1300、2003
- 3.7) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル、pp.37-41、1983
- 3.8) 緒方英彦ほか：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1563-1568、2002
- 3.9) 上西隆ほか：再生骨材コンクリートの耐久性に関する研究、その1.実験概要 フレッシュコンクリートと圧縮強度の性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1199-1200、2008
- 3.10) 片平博：再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響、セメント・コンクリート、No.654、pp.38-44、Aug.2001
- 3.11) 春畑仁一、中村隆治、大橋正治、永山勝：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計、GBRC、Vol.36、No.1、pp.49-54、2011.1
- 3.12) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.185-187、2009
- 3.13) 朴元俊、呉多英、申尚英、野口貴文：再生骨材コンクリートにおける圧縮強度とヤング係数との関係、第65回セメント技術大会講演要旨、pp.94-95、2011
- 3.14) 笠井哲郎、内田賢吾：原コンクリートの品質が再生骨材コンクリートの諸物性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.241-246、2001
- 3.15) 江口清ほか：再生コンクリートの乾燥収縮と水分逸散の機構に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.573、pp.1-7、Nov.,2003
- 3.16) 松下博通ほか：再生コンクリートの耐久性に関する検討、セメント・コンクリート論文集、No.57、pp.541-546、2003

- 3.17) 古賀善雄ほか：フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、2006
- 3.18) 佐藤靖彦ほか：再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、2001
- 3.19) 黒田泰弘：再生骨材のアルカリシリカ反応性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1765-1770、2009

第4章

再生コンクリートの圧縮強度予測手法の 提案

4章 再生コンクリートの圧縮強度予測式の提案

4.1 はじめに

前章（第3章 CfFA を用いた再生コンクリートの耐久性）では、CfFA および低品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートの特性を把握し、各性状に影響を及ぼす要因について実験的に検討を行った。本章では、再生コンクリートの圧縮強度に関して、実用的でかつ簡易的な予測手法の提案を目指して、前章で得られた実験データを用いて検討を行うこととする。

その手順として、実験Ⅰで得られた生コンクリート工場における実験データを用いて、まず、再生コンクリートの材齢28日における圧縮強度の予測手法について検討を行い、次いで、任意の材齢における圧縮強度の予測手法について既往の予測式を用いて検討を行う。再生コンクリートの材齢28日における圧縮強度の推定では、普通骨材を用いた基準コンクリート（CfFA 無混入）のセメント水比と圧縮強度の関係式を基本式として、再生粗骨材および CfFA の影響をその基本式に組み込んだ予測式の構築を試みる。さらに、上記の結果得られた予測手法の妥当性を調べるために、実験Ⅱで得られた数種類の再生粗骨材を使用した実験データを用いて検討を行う。

4.2 再生コンクリートの圧縮強度予測式構築

4.2.1 基本理念

一般に、普通コンクリートの圧縮強度はセメント水比をファクターとした実験式を用いて管理される。レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）では、使用材料が変更された場合にはその度に実験式を導き出すための試験練りを行う必要がある。普通骨材を使用した場合においては、使用材料の変更は頻繁にはされず比較的安定した供給がなされているのが現状であるが、低品質再生粗骨材を使用する場合には、使用材料の変更が頻繁にあり、かつ、その品質は大きく変わることが容易に予想される。このため、低品質再生粗骨材を用いる場合には、その都度に試験練りを行い強度の実験式を導き出す必要があるため、多大の労力と時間を要するとともに、再生骨材をストックするための場所の確保など別の問題も発生するため、実用が困難である。

再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度管理方法については、2章（再生コンクリートに関する既往の研究）で述べたように、相対品質値法、骨材性能評価システムなどの方法が提案されている。前者は、予め各水セメント比で様々な品質の再生粗骨材を用いて、その相対吸水率と強度の関係について実験式を導き出すという手法であるが、この場合、基準コンクリートとなる普通骨材を用いたコンクリートの使用材料が変更された場合には、改めて試験練りを行い、各水セメント比で相対吸水率と圧縮強度との関係式を導き出す必要がある。また、他の生コン工場においての適用性を考えた場合でも同様にそれぞれの関係式を導き出す必要がある。これには、多大な労力と時間を要するため、全国規模での再生骨材の適用を考えた場合においては実用が極めて困難であると考えられる。後者は、再生粗骨材の品質を、骨材破碎試験を行いその試験結果から得られた骨材強さによって評価し、

その値を用いて圧縮強度を予測するという手法であるが、この場合には、通常の骨材試験に加えて新たに骨材破碎試験を行う必要が生じるとともに、骨材強さを算出するにあたっては骨材の沈下量と荷重を把握しなければならないため、各生コン工場における実験器具が充実していなければならない。このようなことから、前者と同様に現状では実用が困難であると考えられる。

以上より、本研究では、各生コン工場が保有している強度管理式を基盤として、低品質再生粗骨材および CfFA を用いたコンクリートの強度予測手法について検討を行うこととした。また、低品質再生粗骨材の品質の評価方法については、各生コン工場での適用性を重要視し、通常の骨材試験から得られる情報のみで評価可能であるか検討を行うこととした。

4.2.2 使用データの概要

3章における実験 I では、九州内の生コン工場 3 箇所で低品質再生粗骨材および CfFA を用いたコンクリートの特性について検討を行った。本節では、実験 I で得られた圧縮強度の試験データを用いて圧縮強度の予測式の構築を試みる。表-4.2.1 に実験 I で得られた圧縮強度試験結果の一覧を示す。

表-4.2.1 圧縮強度試験結果一覧(実験 I)(再掲)

シリーズ*	調合 No.	CfFA/(C+CfFA) (%)	RG 置換率 (%)	W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						圧縮強度(N/mm ²)							
						W	C	CfFA	S1	S2	G	RG	3日	7日	28日	91日	1年		
1	1	0	0	50.0	44.5	182	364	0	531	226	1025	0	—	26.4	36.1	40.6	44.2		
	2	20		62.5	43.8		291	73	516	219			—	21.7	29.2	39.6	47.1		
	3			56.3	42.6		324	81	491	209			—	23.8	33.5	42.6	48.8		
	4			50.0	41.0		364	91	460	195			—	33.1	44.5	54.3	59.8		
	5	0	100	50.0	44.5		364	0	531	226	0	868	—	19.9	24.3	28.5	32.4		
	6	62.5		43.8	291		73	516	219	—			14.8	20.7	27.6	34.2			
	7	56.3		42.6	324		81	491	209	—			15.9	22.0	27.3	34.7			
	8	50.0		41.0	364		91	460	195	—			22.6	28.9	35.4	41.3			
	9	20		62.5	43.8		291	73	516	219			513	434	—	17.4	24.7	31.4	36.9
	10			50.0	41.0		364	91	460	195					—	27.5	34.7	43.1	51.2
2	1	0	0	51.0	45.8	180	353	0	235	549	954	0	20.7	31.4	44.9	46.6	48.9		
	2	20		63.8	45.0	180	282	71	229	535			15.2	26.2	37.4	42.8	52.6		
	3	0	100	60.1	51.0	179	298	0	270	631	0	805	13.0	22.9	31.5	34.1	38.2		
	4			51.0	49.6	180	353	0	256	596			17.7	30.6	40.9	42.5	47.8		
	5			44.0	48.0	182	414	0	239	558			23.5	36.9	46.6	49.5	52.0		
	6			75.2	50.5	179	238	60	265	618			9.2	16.7	25.9	31.9	38.7		
	7	20	63.8	49.0	180	282	71	249	582	13.2	22.6	34.1	41.0	47.1					
	8		55.0	47.2	182	331	83	232	540	17.8	29.3	40.7	46.7	49.5					
	9		50	63.8	46.9	180	282	71	239	556	461	419	13.4	23.8	34.1	41.6	48.8		
3	1	0	0	60.0	49.7	180	300	0	527	360	923	0	—	—	37.6	41.9	45.0		
	2			55.0	48.6	180	327	0	510	348	932		—	—	42.5	48.0	50.7		
	3			50.0	47.1	182	364	0	484	330	940		—	—	46.3	51.0	55.2		
	4			45.0	45.3	182	404	0	456	311	953		—	—	50.5	55.6	60.7		
	5	20	0	68.9	48.6	175	254	64	509	347	932	—	24.1	33.9	42.9	52.0			
	6			62.5	47.1	178	285	71	482	329	934	—	28.8	37.6	46.8	57.6			
	7			56.2	45.3	181	322	80	449	306	940	—	33.4	43.0	53.7	64.5			
	8	0	100	55.0	48.6	183	333	0	505	345	0	806	—	28.9	34.4	37.8	39.9		
	9	68.7		48.6	178	259	65	505	345	804		—	21.9	28.1	35.2	40.3			
	10	62.4		47.1	181	290	72	477	326	808		—	25.5	32.3	38.6	44.3			
	11	56.3		42.0	184	327	82	413	282	860		—	28.9	36.6	42.7	47.5			
	12	20		50	62.4	47.1	181	290	72	477		326	464	404	—	25.2	34.1	41.4	50.0
	13			30	62.5	47.1	180	288	72	479		327	652	243	—	25.9	34.7	42.7	51.3
	14			20	62.6	47.1	179	286	72	480		328	745	162	—	26.8	34.6	44.3	52.4
	15		10	62.5	47.1	178	285	71	482	329	841	81	—	26.8	34.9	43.9	53.9		

4.2.3 材齢 28 日における圧縮強度の予測式

普通コンクリートの圧縮強度はセメント水比との関係式で表せられる。図-4.2.1 に各種コンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係を示す。図中のマーカは、●が普通粗骨材を、▲が再生粗骨材を、◇が再生粗骨材置換率が 50%のものをそれぞれ示しており、黒塗りのものは CfFA 無混入のものを、白抜きのものが CfFA20%混入のものを示している。図より、各種コンクリートの圧縮強度はそれぞれセメント水比と直線関係にあることが分かる。このことから、再生コンクリートの圧縮強度はセメント水比によって表せることが既往の研究と同様に明らかである。しかしながら、普通コンクリートとは同一の関係式で表せず、いずれのシリーズにおいても再生コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートに比べて小さいことが分かる。

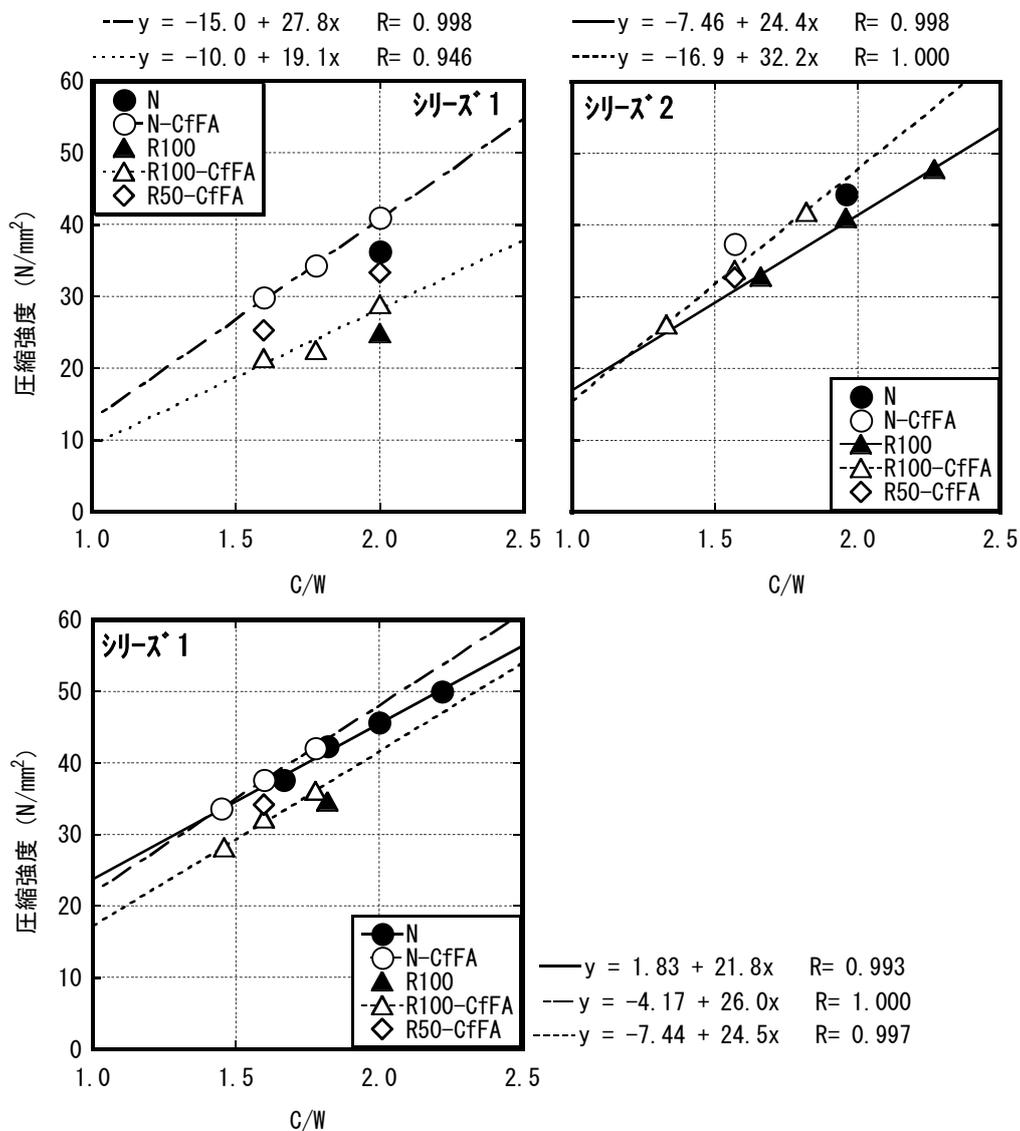


図-4.2.1 C/Wと圧縮強度の関係(実験 I)

再生コンクリートの圧縮強度が再生骨材の吸水率に左右される傾向にあることは、既に第2章で述べたが、ここでは、その再生粗骨材の影響の表し方について既往の研究成果をもとに以下のように考えた。

再生骨材を使用したコンクリートの強度に関して、麓ら^{4.1)}は、吸水率の高い再生細骨材を使用する場合、骨材の吸水量が多く、その影響を無視できないことから、骨材の含有する全吸水量を考慮した単位総水量 (TW) を算出し、セメント総水量比 (C/TW) によって圧縮強度を管理できることを示している。また、佐川ら^{4.2)}は、再生粗骨材および再生細骨材を用いたコンクリートの強度は、セメント総水量比によって統一的に表現が可能であることを示し、再生骨材を使用したコンクリートの強度低下の原因は、骨材中の水分がセメントペースト中に滲出し骨材界面部分の組織がポラスになったためと考えている。実験 I で得られたデータについて、圧縮強度と C/TW の関係を図-4.2.2 に示す。なお、TW は式(4.2.1)から算出した。

$$TW = W + s \cdot w_s \cdot \gamma_{ds} + g \cdot w_g \cdot \gamma_{dg} \quad \text{式(4.2.1)}$$

ここに、TW：総水量 (kg/m³)

W：単位水量 (kg/m³)

s：細骨材の絶対容積 (l/m³)

w_s：細骨材の吸水率 (%)

γ_{ds}：細骨材の絶対乾密度 (g/cm³)

g：粗骨材の絶対容積 (l/m³)

w_g：粗骨材の吸水率 (%)

γ_{dg}：粗骨材の絶対乾密度 (g/cm³)

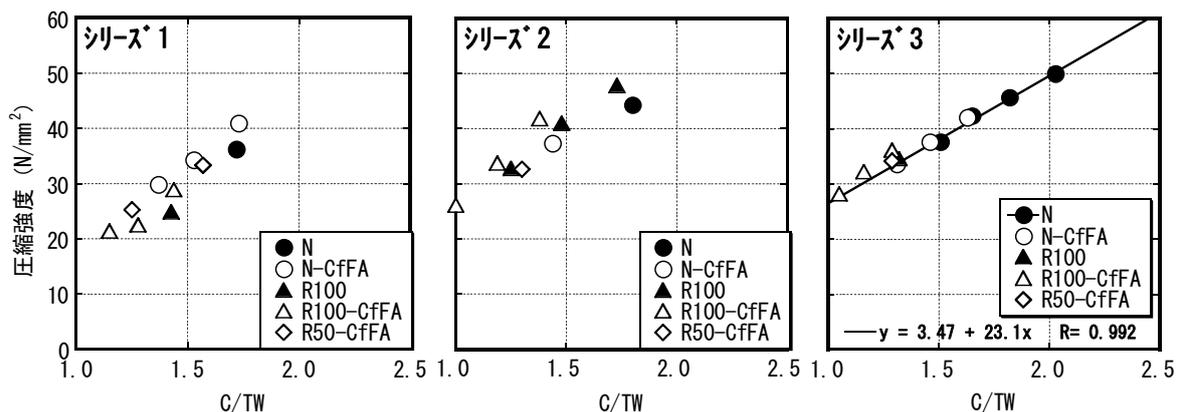


図-4.2.2 C/TW と圧縮強度の関係 (実験 I)

図より、両者には相関が認められ、骨材の吸水量を考慮することで、再生骨材を使用した場合も普通骨材と同じ強度式で表わすことが既往の研究と同様に可能であることが分かった。しかしながら、シリーズ 3 に示す基準コンクリートの回帰式が **図-4.2.1** とは異なっており、従来の C/W を用いた強度式をそのまま適用することができず、新たに式を導き出す必要がある。

本研究では、各工場が保有している基準コンクリート（普通骨材を使用）に対する強度管理式を使用することを前提に、再生骨材と CfFA の影響を組み込んだ再生コンクリートの強度式を構築することを目的にしているため、再生骨材の吸水量と普通骨材のそれとの差（吸水量差、 ΔW ）に着目し、見かけの水量（ $W' = W + \Delta W$ ）を用いることを考えた。ここで、 ΔW は **式 (4.2.2)** により算出される。普通骨材の場合は、 $\Delta W = 0$ である。

$$\Delta W = V_{RG} (Q_{RG} \times \gamma_{RG} - Q_{NG} \times \gamma_{RG}) \quad (4.2.2)$$

ここに、 ΔW ：水量差 (kg/m³)

V_{RG} ：再生粗骨材の絶対容積 (l/m³)

Q_{RG} ：再生粗骨材の吸水率 (%)

γ_{RG} ：再生粗骨材の絶対乾密度 (g/cm³)

Q_{NG} ：普通粗骨材の吸水率 (%)

γ_{RG} ：普通粗骨材の絶対乾密度 (g/cm³)

その W' を用いて表わしたものが **図-4.2.3** であるが、TW の場合と同様に、両者には相関が認められる。また、シリーズ 3 に示す基準コンクリートの回帰式は **図-4.2.2** と同じとなり、従来の強度式を適用できることがわかる。シリーズ 1 およびシリーズ 2 については、基準コンクリートのデータが 1 点しかないことから、以下ではシリーズ 3 のデータを基にコンクリートの強度式を検討することとした。すなわち、以下に示すように、材齢 28 日における基準コンクリートの「C/W と強度」の関係式を基に、再生骨材を使用した場合の影響を ΔW で評価し、CfFA を使用した場合の強度発現性を CfFA の強度寄与率を基に評価することとした。

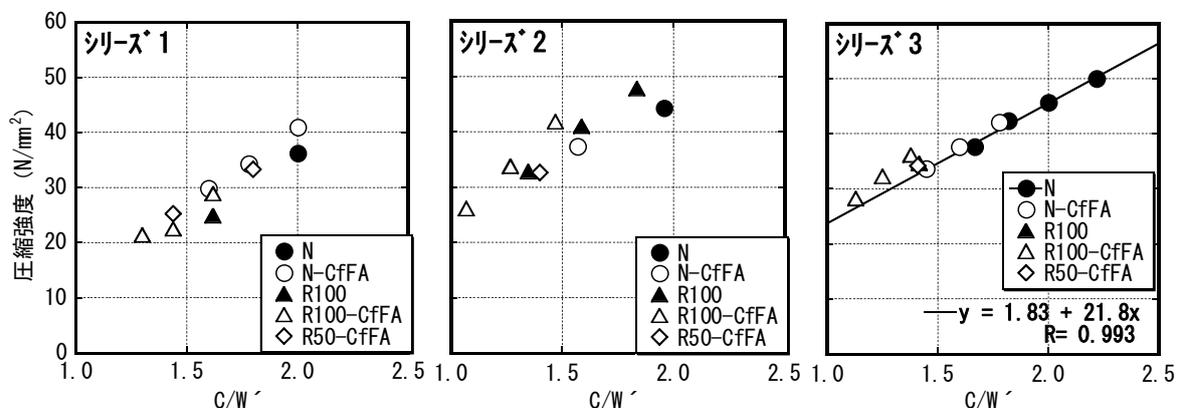


図-4.2.3 C/W' と圧縮強度の関係(実験 I)

$$F_{28} = a(C'/W') + b \quad (4.2.3)$$

$$C' = C + k \cdot CfFA \quad (4.2.4)$$

$$W' = W + \Delta W \quad (4.2.5)$$

ここに、 $CfFA$ ：単位 CfFA 量 (kg/m^3)

k ：強度寄与率

ΔW ：吸水量差 (kg/m^3)

a 、 b ：実験定数 ($a=21.8$ 、 $b=1.83$)

ここで、 W' は見かけの水量、 k 値は CfFA を等価なセメント量に換算したときの有効係数（強度寄与率）であり、 C' は k 値を用いて求めた見かけの単位セメント量である。CfFA を使用していない場合は、再生骨材を使用した場合の結果も含めて、**図-4.2.3** の直線式で示すように、十分に表わすことができていることがわかる。CfFA を使用した場合は、この直線を若干上回る傾向があるが、これは CfFA の充填効果およびポズラン活性の影響であり、 k 値を用いることで基準コンクリートの強度式で管理できる。

材齢 28 日における CfFA の k 値は、基準コンクリートの回帰直線から CfFA を使用していないコンクリートと同一の圧縮強度となるように算出するが、平均で 0.13 であった。そこで、CfFA を混入したコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を、**式(4.2.4)**における k を 0.13 とすることで表すことにした。

以上より、**式(4.2.3)**を用いて算出した圧縮強度の計算値と実測値の関係を**図-4.2.4**に示す。図より、材齢 28 日の圧縮強度は普通コンクリート並びに再生コンクリートに関しても**式(4.2.3)**で精度良く表せることが明らかとなった。

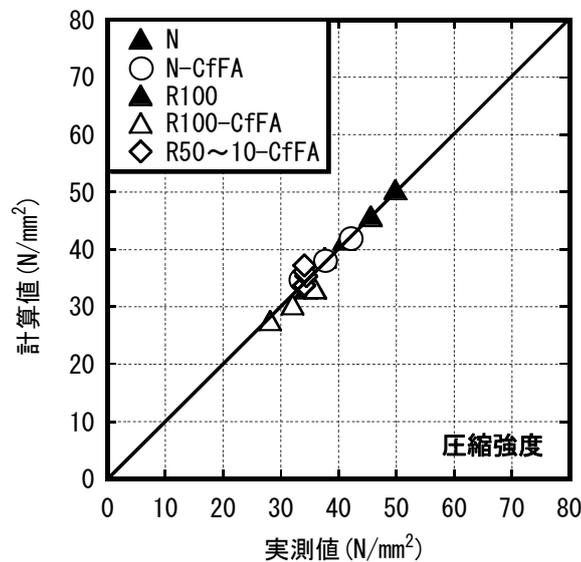


図-4.2.4 材齢 28 日における圧縮強度の計算値と実測値の関係
(実験 I シリーズ 3)

4.2.4 強度発現性に関する予測式

前章では、コンクリートの材齢 28 日以降の強度発現性に対して、再生骨材の使用による影響は認められなかったが、CfFA 混入による影響は骨材種類によらず顕著であることを示した。そこで、強度発現性については、CfFA 混入による影響のみを考慮することとする。

既往の研究において任意の材齢における圧縮強度 $F(t)$ は、式(4.2.6)に示す CEB-FIP1990 モデルコード式を用いて、材齢 28 日圧縮強度から推定可能であるとした。同式中のセメント種類に関わる材料定数 S 値（以下、定数 S ）として、普通ポルトランドセメントの場合 0.31 が示されている^{4.3)}。また、船本^{4.4)}は、フライアッシュを用いた既往の研究を総合的に分析し、この式を用いた場合、フライアッシュセメント B 種および C 種の定数 S はそれぞれ 0.38、0.41 であることを提案している。

$$F(t) = \exp \left\{ S \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \times F_{28} \quad (4.2.6)$$

ここに、 $F(t)$ ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t ：コンクリートの材齢 (日)

S ：セメントの種類に関わる定数

図-4.2.5 に各シリーズの材齢 28 日に対する圧縮強度比の経時変化を示す。なお、使用したデータは 3 工場で得られたものであり、図中に示した線は、式(4.2.6)で回帰したものである。強度比はややばらつきがあるが、式(4.2.6)でおおよそ表せていることが分かる。なお、定数 S は、普通ポルトランドセメントの場合 0.26、CfFA を混入した場合 0.44 であった。

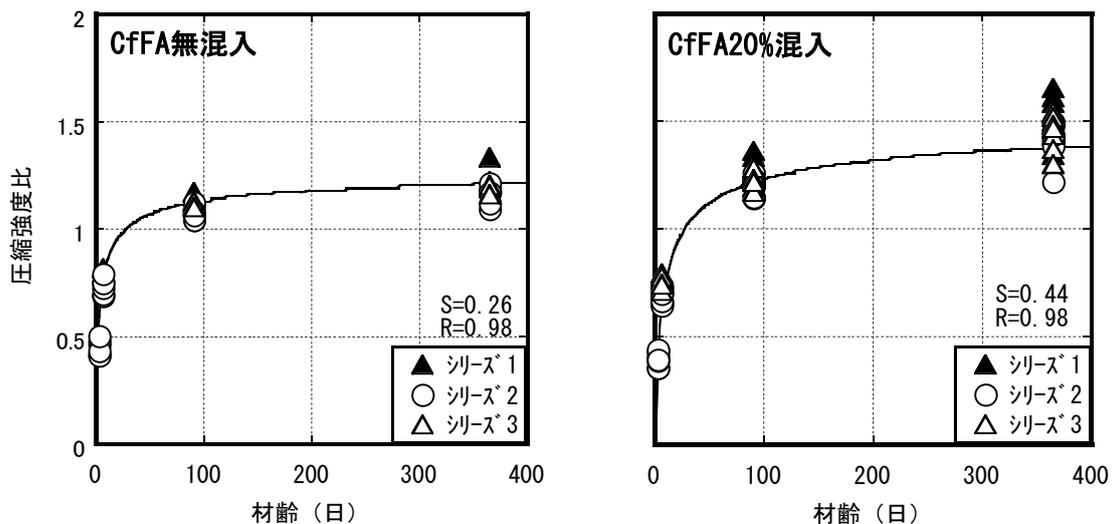


図-4.2.5 圧縮強度比の経時変化(実験 I)

以上のことから、**図-4.2.6** に**式(4.2.3)**および**式(4.2.6)**を用いて算出した計算値と実測値の関係を示す。図より、計算値と実測値には良い相関があり、本検討結果における決定係数は 0.953 と高く、提案する手法によって再生コンクリートの圧縮強度を精度良く推定できることが分かった。

図-4.2.7 に推定値と実測値の残差と材齢の関係を示す。図より、左図の CfFA 無混入の場合にはすべての材齢において精度良く推定できていると言える。ただし、CfFA 混入の場合には材齢 7 日および材齢 1 年において小さく推定する傾向にあることが分かるが、安全側の評価であることから大きな問題は無いと言える。

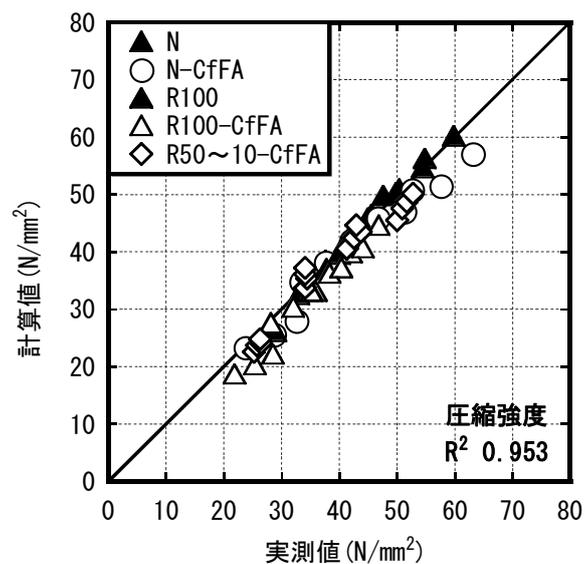


図-4.2.6 計算値と実測値の関係(実験 I シリーズ 3)

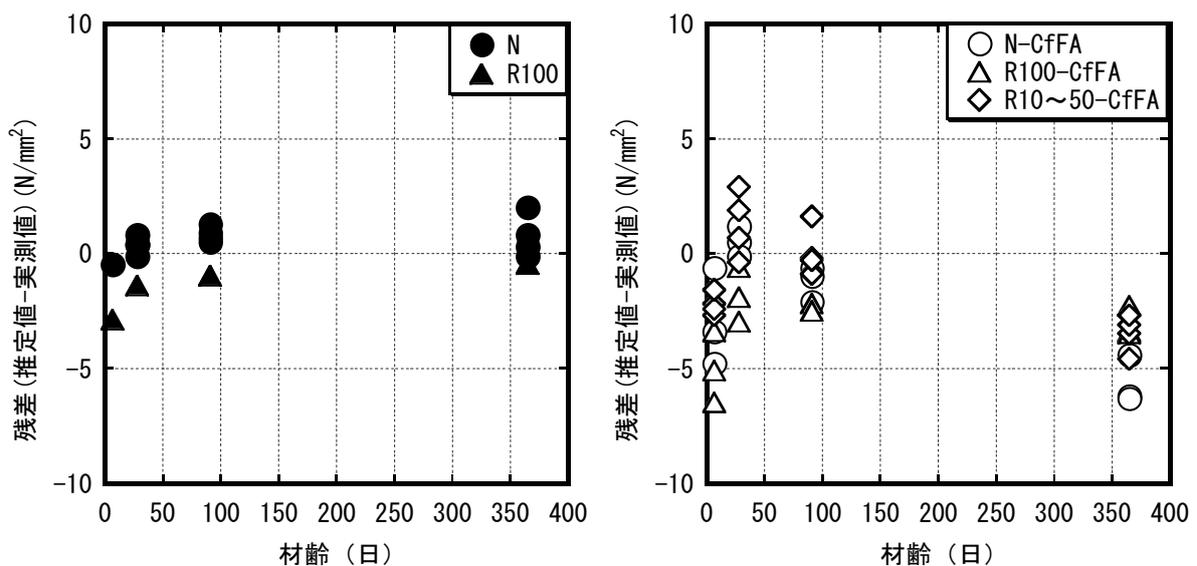


図-4.2.7 残差と材齢の関係(実験 I シリーズ 3)

4.3 提案する予測手法の妥当性

前節では、生コンクリート工場における試験練りの結果から得られたデータを用いて、再生コンクリートの圧縮強度の予測手法について検討を行った結果、低品質再生粗骨材の圧縮強度は再生粗骨材と普通粗骨材の吸水量の差 (ΔW) を考慮した見かけの水量を用いたセメント水比で推定可能であることを示した。しかしながら、予測式の構築に使用したデータは1工場のみでさらに再生粗骨材も1種類であったことから、予測式の妥当性を判断するには不十分である。そこで、本節では、前章(第3章)で数種類の再生粗骨材を用いて行った実験Ⅱで得られた試験データを用いて本手法の妥当性について検討を行う。

4.3.1 使用データの概要

表-4.3.1 に実験Ⅱで得られた圧縮強度試験結果の一覧を示す。再生粗骨材の種類は6種類であり、内3種類は製造場所の異なる再生粗骨材である(原コンクリートの素性は不明)。残る3種類は40年程度学校建物として使用されていたコンクリート構造物から採取された

表-4.3.1 圧縮強度試験結果一覧(実験Ⅱ)(再掲)

シリーズ	調合 No.	CfFA/(C+CfFA) (%)	RG 種類	RG 置換率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位置量(kg/m ³)						圧縮強度(N/mm ²)										
							W	C	CfFA	S	G	RG	7日	28日	91日	1年							
1	1	0	—	0	60	47.1	185	308	835	938	0	0	23.6	33.7	38.0	—							
	2				50	45.5							370	784	30.6	41.5	46.1	—					
	3				40	43.0							463	707	40.8	50.4	56.3	—					
	4		RG-D	100	60	51.5	182	303	867	0	816	0	0	22.1	30.2	33.4	—						
	5				50	50.0								364	817	27.9	35.3	38.9	—				
	6				40	47.6								455	742	35.6	41.7	45.3	—				
	7				60	51.6								314	876	21.9	30.4	35.1	—				
	8				RG-E	188								50	50.1	376	825	0	821	32.5	41.9	45.9	—
	9													40	47.6	470	747	38.0	47.8	50.5	—		
	10		RG-F	185	60	52.9	308	885	787	0	0	22.1	29.9	32.9	—								
	11				50	51.4	370	834				27.3	37.3	38.6	—								
	12				40	49.0	463	757				38.6	46.9	48.3	—								
2	1	0	—	0	50	185	370	0	781	938	0	0	27.5	36.3	42.9	38.2							
	2	20											41.9	93	677	30.7	40.5	50.3	53.7				
	3	0											46.8	0	757	22.2	30.0	35.4	33.4				
	4	20	RG-A	100									43.1	93	652	861	26.6	34.4	41.5	44.0			
	5	0											47.7	0	769		23.7	31.3	37.3	35.0			
	6	20	RG-B	100									44.1	93	665	843	26.1	33.3	40.7	41.7			
	7	0											48.8	0	799		26.5	33.1	38.4	35.8			
	8	20	RG-C	50									45.4	93	695	837	27.9	36.5	43.8	44.2			
	9	10											47.4	41	753		26.3	35.6	41.8	39.9			
	10	30											42.6	159	620		30.8	34.9	47.0	45.0			
	11	20											44.1	93	694		460	418	30.8	38.9	47.0	46.9	
12	0	45.4			0	780	939	0	33.0	43.4	48.9	49.1											
3	1	20	—	0	41.8	185	370	93	676	939	0	0	35.5	45.2	59.0	60.9							
	2				42.0								892	42	33.8	45.6	53.8	56.7					
	3				5								845	84	33.2	43.9	52.0	55.5					
	4				10								751	168	33.4	44.2	48.5	53.2					
	5				20								657	252	32.9	42.1	48.5	54.7					
	6				30								42.6	469	420	31.5	41.1	47.1	47.9				
	7				50								43.2	282	588	29.0	37.9	44.3	46.0				
	8				70								43.7	100	0	780	0	840	27.8	34.4	40.8	39.5	
	9		48.1	25.9	35.4	37.4	38.9																
	10		0	RG-A ₀	44.6	93	676	30.1	37.4	45.1	47.4												
	11		20	RG-A	44.6	27.0	36.0	42.8	42.1														
	12		20	RG-A ₀	44.6																		

ものであり、付着モルタルを除去したところ原骨材の種類は砂利であった。使用データの概要について、コンクリートの水セメント比は 40%~60%、単位水量は 185kg/m³ 前後、CfFA 混入率は 0%~30%のものである。

4.3.2 材齢 28 日における圧縮強度予測式の検証

圧縮強度と各水セメント比の関係を **図-4.3.1** に示す。図中の直線式はシリーズ 1 における基準コンクリートの圧縮強度を直線近似したもの（以下、基準式とする）である。なお、圧縮強度は空気量 4.5%に合わせて補正したものであり、空気量 1%あたりの圧縮強度の変動率を 4%としている。また、**図-4.3.1(1)**は C/W と圧縮強度の関係であるが、再生コンクリートの圧縮強度は基準式が示す値に比べ小さくなっていることが分かる。次に、**図-4.3.1(2)**に C/TW と圧縮強度の関係を示す。前節と同様に再生コンクリートに関しても、C/TW で表せている。シリーズ 1 においては全体的に再生コンクリートの圧縮強度を小さく評価しているが、安全側の評価であることが分かる。そこで、基準コンクリートで使用した普通粗骨材と各再生粗骨材の吸水量の差を **式(4.2.2)**に示す ΔW として評価し、見かけの水量を用いて表したものが **図-4.3.1(3)**である。図より、ややばらつきはあるが、C/W の場合に比べ、基準式が示す値に近づいていることが分かる。特に、シリーズ 2 においては再生粗骨材の種類に関わらず、再生コンクリートの圧縮強度は基準式が示す値とほぼ一致しており、 ΔW を考慮することで基準式と良い相関を示すことが認められた。

k 値は基準コンクリートの回帰直線から CfFA を使用していないコンクリートと同一の圧縮強度となるように算出するが、骨材種類および CfFA 置換率と k 値との関係を調べたところ、ばらつきが大きく明確な傾向が認められなかったため、材齢 28 日における k 値は平均である 0.31 を使用することとした。なお、実験 I では k 値は 0.13 であり、本実験では 2 倍以上大きな値となっている。この原因としては、実験 I で使用した CfFA の材齢 28 日活性度指数が 82%であったのに対し、実験 II のものは 90%であったことが要因の 1 つとして考えられる。ただし、実験条件が異なることから、k 値に及ぼす要因については今後検討が必要であると思われる。

表-4.3.2 各係数の一覧

項目	実験 II		実験 I	
	数値	相関係数	数値	相関係数
a	22	0.997	21.8	0.992
b	-2.63		1.83	
k	0.31	—	0.13	—

表-4.3.2 に示す係数を用いて式(4.2.3)により算出した材齢 28 日における圧縮強度の計算値と実測値の関係を図-4.3.2 に示す。図より、一部の再生粗骨材を用いた場合で小さく推定されているが、提案する手法によって再生コンクリートの圧縮強度を精度良く推定できていると言える。推定値と実測値の残差と粗骨材の平均吸水率の関係を図-4.3.3 に示す。図中の直線は両者の関係を直線近似したものである。残差の平均は -1.98 N/mm^2 であり、残差の標準偏差は 2.5 N/mm^2 であった。実測値に比べ全体的に小さく予測する傾向にあることがわかる。本手法は、再生粗骨材と普通粗骨材の吸水量の全量 (ΔW) が強度に寄与するとの仮定で構成されているが、 ΔW の全量がすべての条件下で同様に強度に寄与するとは限らないことを示唆しているものと思われる。

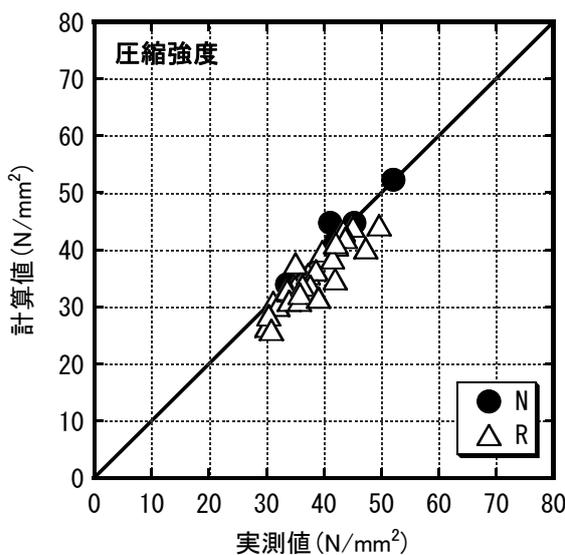


図-4.3.2 予測値と実測値の関係(材齢 28 日)
(実験 II)

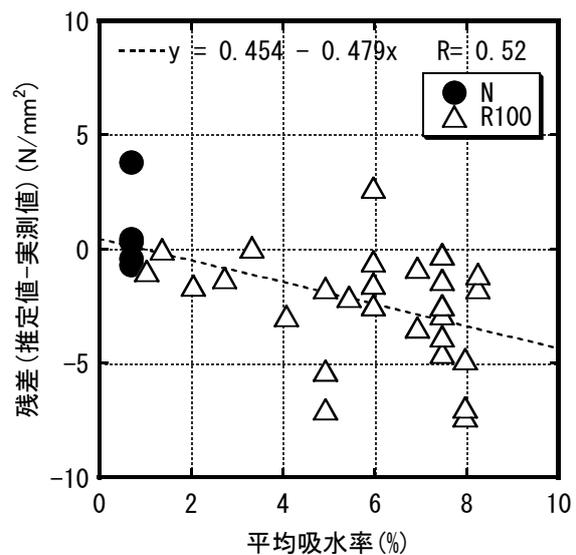


図-4.3.3 残差と平均吸水率の関係
(実験 II)

4.3.3 強度発現性の予測式の検証

圧縮強度比の経時変化を図-4.3.4 に示す。図中に示した線は前節と同様に式(4.2.4)で回帰したものである。強度発現性状は CfFA 混入の場合に材齢 7 日においてやや小さく予測する結果となっているが、式(4.2.4)でおおよそ良い相関が得られており、定数 S は表-4.3.3 に示す通り、CfFA 無混入の場合 0.26、CfFA を混入した場合 0.41 であった。k 値と同様に、定数 S にも実験 I で得られた値と若干の差が見られる。この点については、CfFA の物性および化学組成が再生コンクリートの圧縮強度に与える影響についてさらにデータを蓄積し、定量的な評価が必要である。

表-4.3.3 定数 S および相関係数

項目	実験 II		実験 I		
	数値	相関係数	数値	相関係数	
S	無混入	0.26	0.970	0.26	0.982
	CfFA	0.41	0.977	0.44	0.979

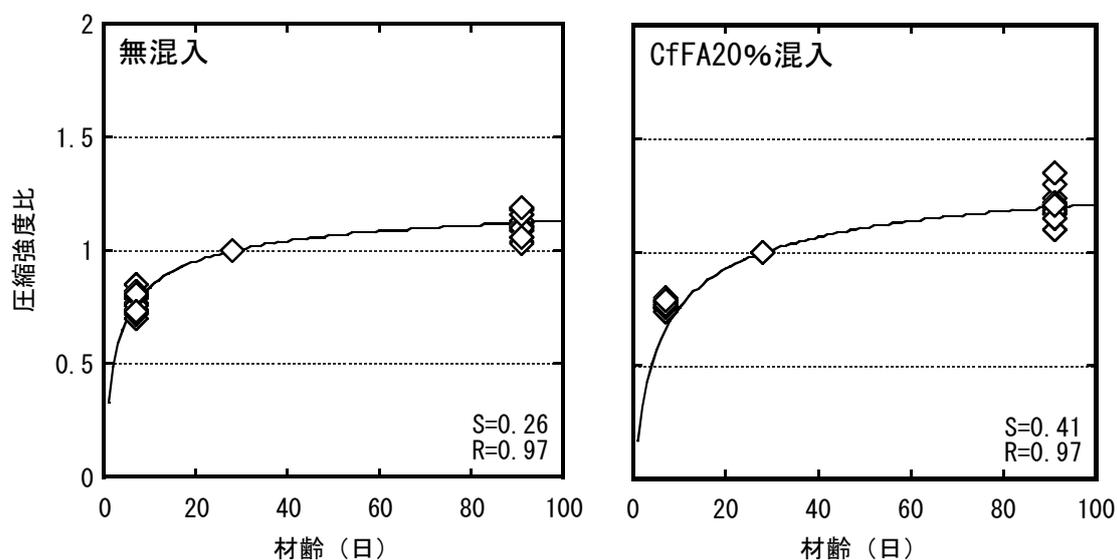


図-4.3.4 圧縮強度比の経時変化(実験 II)

圧縮強度の計算値と実測値の関係を図-4.3.5 に示す。再生コンクリートの圧縮強度予測式から求めた計算値は実測値より全体的に小さく、推定値から実測値を引いた残差の平均値は -2.47N/mm^2 であり、残差の標準偏差は 2.53N/mm^2 であった。特に、強度が小さい範囲、すなわち、材齢7日における圧縮強度に関しては、提案式は前述したように実測値を小さく推定する傾向にある。これは、CfFA を混入した場合、ポズラン反応により長期における強度発現性が高まるため、今回用いた式(4.2.5)では材齢初期において材齢28日に対する強度比は小さくなってしまい、CfFA のマイクロファイラー効果(充填効果)を強度推定式に反映できないためであると考えられる。この点については、さらに検討する必要があると思われるが、全体的には推定値と実測値には良い相関があり決定係数は0.925 と高いこと、安全側の評価となっていることなどを考慮すると、提案式の実用性は充分であると言える。

以上より、砂利を使用した原コンクリートを起源とする再生粗骨材3種類および製造場所が異なる再生粗骨材3種類を用いた場合でも、本手法は適応可能であることを明らかにした。

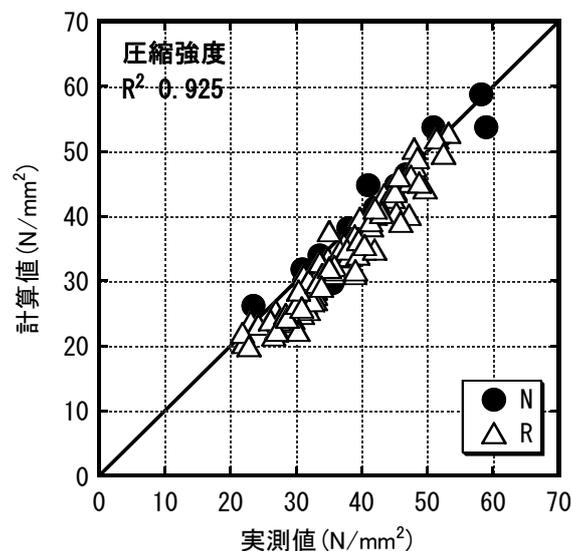


図-4.3.5 圧縮強度の計算値と実測値の関係(実験Ⅱ)

4.4 まとめ

本章では、再生コンクリートの圧縮強度の予測手法について、実用的かつ簡易的な方法の提案を目指して前章で得られた実験データを用いて検討を行った。

その結果、再生粗骨材と普通粗骨材の吸水量の差 (ΔW) を単位水量に加えた W' ($=W + \Delta W$)、ならびにフライアッシュの強度寄与率 (k) を考慮した見かけの単位セメント量 C' ($=C+k \cdot CfFA$) を用いた C'/W' で再生コンクリートの材齢 28 日における圧縮強度の推定が可能であることを明らかにした。また、再生コンクリートの強度発現性について、CEB-FIP1990 モデルコード式を用いることで任意の材齢においても強度を精度良く推定できることを明らかにした。

$$F_{28} = a(C'/W') + b \quad (4.2.3) \text{ (再掲)}$$

$$C' = C + k \cdot CfFA \quad (4.2.4) \text{ (再掲)}$$

$$W' = W + \Delta W \quad (4.2.5) \text{ (再掲)}$$

ここに、 $CfFA$: 単位 CfFA 量 (kg/m^3)

k : 強度寄与率

ΔW : 吸水量差 (kg/m^3)

a 、 b : 実験定数 ($a=21.8$ 、 $b=1.83$)

$$F(t) = \exp \left\{ S \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \times F_{28} \quad (4.2.6) \text{ (再掲)}$$

ここに、 $F(t)$: コンクリートの材齢 t における圧縮強度 (N/mm^2)

t : コンクリートの材齢 (日)

S : セメントの種類に関わる定数

(CfFA 無混入 : 0.26、CfFA20%混入 : 0.41~0.44)

以上のように、本手法によって再生コンクリートの圧縮強度を予測が可能であることがわかったが、一部の再生粗骨材を使用した場合でやや小さく予測してしまう場合があり、 ΔW の全量が強度に寄与しない場合があることが分かった。この点に関しては、骨材の界面の影響などについてさらに検討し、再生コンクリートの圧縮破壊のメカニズムを明らかにした上で、強度に影響を及ぼす ΔW を評価する必要があると思われる。また、CfFA の物性および化学組成が再生コンクリートの強度発現性に及ぼす影響についてもデータをさらに蓄積し、定量的に評価する必要がある。上記については、今後の検討課題としたい。

【第4章 参考文献】

- 4.1) 麓隆行ほか：再生細骨材の物理的性質がコンクリート性状に及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1233-1238、2002
- 4.2) 佐川康貴ほか：再生コンクリートの強度と細孔構造の関係、セメント・コンクリート論文集、No.58、pp.541-547、2004
- 4.3) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON:CEB-FIP Model Code 90、Thomas Telford、1990
- 4.4) 船本憲治：フライアッシュを使用するコンクリートの圧縮強度発現性状に関する考察、日本建築学会九州支部研究報告、No.48、pp.81-84、2009

第5章

再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの 提案

5章 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案

5.1 はじめに

本章は、実用的なコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式を提案することを目的としている。乾燥収縮ひずみの予測を導く式には大きく分けて2通りの方法がある。1つは、多数の実験データに基づいて得られる経験式である。これらの予測式の特徴は、設計段階から得られるデータから比較的簡便に乾燥収縮ひずみを予測できる点にある。しかしながら、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測については、2章で述べたように実用的で、かつ再生骨材の品質を考慮した予測式は提案されていないのが現状である。

もう一方は、コンクリートの乾燥収縮の発生源はセメントペーストであり、骨材はそれを拘束するという観点から、複合則理論に基づいて乾燥収縮ひずみを予測する方法である。この手法は、江口らによって既に検討されているが、乾燥収縮ひずみの予測式の提案までには至っていない。また、前者の手法に比べると式もやや複雑化するため、式の汎用性に欠ける。

そこで、本章では、より実用的な予測式の構築を目指して、鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御・施工指針（案）で提案されているコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式（以下、AIJ式）を基に行うこととした。まず、乾燥収縮ひずみの予測式が終局乾燥収縮ひずみに時間関数を乗じた式になっていることに着目し、再生骨材の品質やコンクリートの調合条件が終局乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について、3章で行った実験データを用いて検討を行う。次いで、これまで日本国内で報告されている再生コンクリートの乾燥収縮ひずみに関する既往の研究データを収集し、これらのデータも合わせて重回帰分析を行うことで、終局乾燥収縮ひずみの予測式を導く。さらに、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの進行度について、既往の式で表すことが可能であるか検討を行い、本提案式の妥当性を調べる。

なお、対象とする再生コンクリートについて、これまで、低品質な再生粗骨材を使用した再生コンクリートについて検討を行ってきたが、式の汎用性を高めるために、再生細骨材も含めたすべての再生骨材を対象として予測式の構築を行うこととした。また、本章における乾燥収縮ひずみとは、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の供試体を用い材齢7日までの標準養生後に基長をとり、その後温度 20°C 、相対湿度60%の室内に保存する条件下で、JIS A 1129の長さ変化試験を行った場合の試験結果を示すものとする。

5.2 再生コンクリートの乾燥収縮

乾燥収縮は、コンクリートあるいはモルタルが乾燥環境下において収縮する現象である。コンクリート中のセメントペーストには、セメントゲル、未水和のセメント粒子、毛細管空隙およびゲル空隙等の空隙が含まれ、乾燥により空隙中から水が徐々に逸散すると、空隙の壁間距離が縮まり乾燥収縮が生じると考えられている。収縮の発生源はセメントペーストであるが、コンクリート中の骨材は、その収縮を物理的に拘束し、その効果は骨材の割合が多くなるほど大きくなる。

このように、骨材はコンクリートの収縮を低減するが、低品質な再生粗骨材を使用する場合には、付着モルタル分が多く粗骨材の量が少なくなるため、骨材による収縮の拘束効果が弱まり乾燥収縮ひずみは普通コンクリートに比べ大きくなる。また、骨材自体も多孔質な材料であるため、乾燥により収縮することが古くから報告されている。通常、骨材の収縮量はセメントペーストよりもはるかに小さいが、骨材中の空隙が多いほど、また骨材のヤング係数が小さいほど、骨材自体の乾燥収縮ひずみは大きくなる。このような観点からすると、再生粗骨材に含まれる原骨材の影響についても考慮されなければならない。一方、再生粗骨材に含まれる付着モルタルは、原コンクリートの調合にもより差異はあるが、粗骨材に比べポーラスであり、吸水率が大きいいため、付着モルタル中に含まれる水量も収縮に寄与することが考えられる。

上記のように、再生コンクリートの乾燥収縮は、通常のコンクリートのメカニズムに加えて、再生粗骨材の使用に伴う様々な影響を考慮しなければならないため、そのメカニズムは非常に複雑となる。すなわち、これらの影響を定量的に評価した上での予測式の構築は極めて困難であるとともに式の複雑化を招く。また、仮に精確な予測式の提案が可能であったとしても、低品質な再生粗骨材を使用する場合には、原コンクリートの素性は不明であることが一般的であるとともに、多種多様な場所からコンクリート塊が回収されるため、そのすべてのサンプルについて上記のような付着モルタル率やその吸水率、原粗骨材の品質などを個別に把握することは、非現実的である。したがって、通常の骨材試験結果から得られる情報のみで再生粗骨材の品質を評価し、それをファクターとして予測式を構築することが望ましいと考える。

5.3 予測式の構成

本研究では、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の構築を AIJ 式に基づいて行うこととする。コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を表す場合、一般に双曲線関数または指数関数が用いられているが、AIJ 式では、式の簡便性および収集した実験データに対する適合性を重視して、式(5.3.1)に示す双曲線関数に基づいて予測式を構築している。また、乾燥期間が早い時期においては供試体寸法が大きくなるほど乾燥収縮は小さくなるが、最終的な乾燥収縮ひずみが供試体寸法の影響を受けるかどうかについては明確な結論が得られていないことから、同式では、終局乾燥収縮ひずみは部材寸法の影響を受けず、式(5.3.2)に示すように、調合、乾燥開始材齢および相対湿度のパラメータの積で表すことができるものと仮定し、部材寸法の影響は乾燥収縮ひずみの進行度によって考慮している。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \left(\frac{(t-t_0)}{\alpha + (t-t_0)} \right)^\beta \quad (5.3.1)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (5.3.2)$$

$$K_1 = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (5.3.3)$$

$$K_2 = t_0^{-0.08} \quad (5.3.4)$$

$$K_3 = 1 - (h/100)^3 \quad (5.3.5)$$

$$\alpha = 0.16 \cdot (V/S)^{1.8} \quad (5.3.6)$$

$$\beta = 1.4 \cdot (V/S)^{-0.18} \quad (5.3.7)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 における材齢 t 日の乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{sh\infty}$: 終局乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

K_1 : コンクリートの調合の影響に関する係数

K_2 : 乾燥開始材齢の影響に関する係数

K_3 : 相対湿度の影響に関する係数

α, β : 乾燥の進行度を表す係数

W : 単位水量 (kg/m^3)

C : 単位セメント量 (kg/m^3)

G : 単位粗骨材量 (kg/m^3)

H : 相対湿度 (%) ($40\% \leq h < 99\%$)

V : 体積 (mm^3)

S : 外気に接する表面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($0\text{mm} \leq V/S \leq 250\text{mm}$)

γ_1 : 骨材の種類によって定まる係数

γ_2 : セメントの種類によって定まる係数

γ_3 : 混和材の種類によって定まる係数

表-5.3.1 修正係数一覧

γ_1	0.7	石灰石碎石
	1.0	天然骨材
	1.2	軽量骨材
	1.4	再生骨材
γ_2	0.9	フライアッシュセメント
		早強セメント
	1.0	普通セメント
		高炉セメント
γ_3	0.7	収縮低減剤
	0.8	シリカフェューム
	0.9	フライアッシュ
	1.0	無混入
		高炉スラグ微粉末

同式では調合の影響については、水セメント比 40%以上で、普通ポルトランドセメント、天然骨材使用および混和材無混入の実験データを対象として、乾燥条件が同一である条件下において調合の影響を表す係数 K_1 を決定している。終局乾燥収縮ひずみに及ぼす調合の影響として、単位水量、単位セメント量、単位粗骨材量を考え、目的変数を終局乾燥収縮ひずみ、説明変数を単位水量 W (kg/m^3)、単位セメント量 C (kg/m^3) および単位粗骨材量 G (kg/m^3) として重回帰分析を行っている。このようにして求めた K_1 を基準状態とみなし、これに対して骨材、セメントおよび混和材の種類に関する項目をそれぞれ修正係数として加えている。

ここで、フライアッシュおよび再生骨材の修正係数は表-5.3.1 に示す通りであるが、フライアッシュの混入量や、再生骨材の種類、品質の違いや量については考慮されておらず、検討の余地がある。本研究では、式(5.3.3)に示すコンクリートの調合に関する係数 K_1 について実験データを用いて検討を行い、その他の影響因子については、普通コンクリートの場合と同様であるとし、建築学会式をそのまま適用することとした。

5.4 再生コンクリートの終局乾燥収縮ひずみの予測式

5.4.1 終局乾燥収縮ひずみの推定

3章で行った乾燥収縮試験について、それぞれの終局乾燥収縮ひずみを乾燥期間 182 日までの実測データを用いて、双曲線関数である式(5.3.1)に基づき、式中の α 、 β 、 $\varepsilon_{sh\infty}$ をパラメータとして最小二乗法によって求めた。乾燥収縮ひずみの実測値とその最終値の推定値の一覧を表-5.4.1~5.4.3 に示す。

表-5.4.1 乾燥収縮試験結果一覧(実験 I)

シリーズ	調査	RG 置換率 (%)	W/C (%)	s/a	単位量(kg/m ³)								乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)				
					W	C	CfFA	細骨材		粗骨材		28日	56日	91日	182日	$\varepsilon_{sh\infty}$	
								S1	S2	G	RG						
2	2	0	51.0	45.1	180	353	0	235	549	954	0	382	490	542	628	728	
	5	0	63.8	44.5	180	282	71	229	535	954	0	378	499	543	620	722	
	7	100	60.1	52.8	179	298	0	270	631	0	805	426	580	653	760	895	
	8	100	51.0	51.4	180	353	0	256	596	0	805	439	584	660	755	897	
	9	100	44.0	49.8	182	414	0	239	558	0	805	457	599	682	796	954	
	10	100	75.2	52.3	179	238	60	265	618	0	805	401	552	624	729	863	
	11	100	63.8	50.8	180	282	71	249	582	0	805	431	580	653	749	886	
	12	100	55.0	49.0	182	331	83	232	540	0	805	435	573	634	736	846	
	13	50	63.8	47.5	180	282	71	239	556	461	419	411	542	606	690	806	
3	1	0	55.0	47.9	180	327	0	510	348	932	0	310	400	469	545	642	
	3	0	62.5	46.5	178	285	71	482	329	934	0	291	372	429	500	573	
	5	100	55.0	51.3	183	333	0	505	345	0	806	500	658	787	925	1108	
	7	100	62.4	49.8	181	290	72	477	326	0	808	502	656	760	871	999	
	9	50	62.4	48.1	181	290	72	477	326	464	404	395	506	588	685	800	
	11	20	62.6	47.1	179	286	72	480	328	745	162	339	426	486	567	652	

表-5.4.2 乾燥収縮試験結果一覧(実験Ⅱ)

シリーズ*	調査	RG 置換率 (%)	W/C (%)	s/a	単位量(kg/m ³)							乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)				
					W	C	CfFA	細骨材		粗骨材		28日	56日	91日	182日	ε _{sh∞}
								S1	S2	G	RG					
1	1	0	60.0	47.1	185	308	0	835	0	938	0	500	888	883	853	1001
	2	0	50.0	45.5	185	370	0	784	0	938	0	492	846	834	818	979
	3	0	40.0	43.0	185	463	0	707	0	938	0	495	836	819	794	957
	4	100	60.0	51.5	182	303	0	867	0	0	816	547	753	899	1025	1257
	5	100	50.0	50.0	182	364	0	817	0	0	816	547	739	865	988	1195
	6	100	40.0	47.6	182	455	0	742	0	0	816	538	724	846	965	1167
	7	100	60.0	51.6	188	314	0	876	0	0	821	556	744	862	979	1162
	8	100	50.0	50.1	188	376	0	825	0	0	821	572	748	864	988	1174
	9	100	40.0	47.6	188	470	0	747	0	0	821	562	725	835	964	1144
	10	100	60.0	52.9	185	308	0	885	0	0	787	644	882	1023	1183	1423
	11	100	50.0	51.4	185	370	0	834	0	0	787	636	839	964	1118	1337
	12	100	40.0	49.0	185	463	0	757	0	0	787	609	802	932	1081	1299
2	1	0	50.0	45.4	185	370	0	781	0	938	0	507	657	724	806	935
	2	0	50.0	41.9	185	370	93	677	0	938	0	527	677	745	833	956
	3	100	50.0	46.8	185	370	0	757	0	0	861	551	774	866	992	1188
	4	100	50.0	43.1	185	370	93	652	0	0	861	542	723	805	914	1058
	5	100	50.0	47.7	185	370	0	769	0	0	843	549	777	876	1012	1198
	6	100	50.0	44.1	185	370	93	665	0	0	843	550	748	841	946	1105
	7	100	50.0	48.8	185	370	0	799	0	0	837	555	765	867	985	1183
	8	100	50.0	45.4	185	370	93	695	0	0	837	570	764	855	959	1110
	9	100	50.0	47.4	185	370	41	753	0	0	837	560	759	853	973	1147
	10	100	50.0	42.6	185	370	159	620	0	0	837	548	725	797	888	1023
	11	50	50.0	44.1	185	370	93	694	0	460	418	549	713	790	882	1016
3	1	0	50.0	45.4	185	370	0	780	0	939	0	488	652	756	825	1004
	2	0	50.0	41.8	185	370	93	676	0	939	0	469	594	669	720	836
	3	5	50.0	42.0	185	370	93	676	0	892	42	497	642	720	777	909
	4	10	50.0	42.1	185	370	93	676	0	845	84	502	641	727	783	921
	5	20	50.0	42.4	185	370	93	676	0	751	168	519	670	753	813	944
	6	30	50.0	42.6	185	370	93	676	0	657	252	494	645	729	792	922
	7	50	50.0	43.2	185	370	93	676	0	469	420	515	677	760	823	959
	8	70	50.0	43.7	185	370	93	676	0	282	588	532	698	786	856	1001
	9	100	50.0	48.1	185	370	0	780	0	0	840	474	670	778	869	1044
	10	100	50.0	48.1	185	370	0	780	0	0	840	492	696	809	897	1068
	11	100	50.0	44.6	185	370	93	676	0	0	840	520	699	791	867	1004
	12	100	50.0	44.6	185	370	93	676	0	0	840	569	760	861	935	1080

表-5.4.3 乾燥収縮試験結果一覧*1

工場	調査	RG 置換率 (%)	W/C (%)	s/a	単位量(kg/m ³)							乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)				
					W	C	CfFA	細骨材		粗骨材		28日	56日	91日	182日	ε _{sh∞}
								S1	S2	G	RG					
A	1	0	43.0	41.2	160	372	0	760	0	1087	0	434	567	639	727	895
	4	0	43.0	37.6	160	372	93	655	0	1087	0	450	563	640	727	872
	5	100	41.0	44.7	160	390	0	789	0	0	975	527	693	807	915	1131
	8	100	41.0	41.1	160	390	98	679	0	0	975	511	672	766	854	1018
	9	50	42.0	39.3	160	381	95	667	0	543	487	465	595	678	766	920
	10	100	41.0	38.1	160	390	167	601	0	0	975	530	662	732	830	953
B	1	0	55.0	46.9	165	300	0	898	0	1016	0	405	533	611	709	857
	2	0	61.9	45.6	165	267	67	851	0	1016	0	378	498	568	658	794
	3	0	55.0	44.5	165	300	75	814	0	1016	0	398	512	586	672	798
	4	100	50.0	50.0	165	330	0	899	0	0	898	472	628	725	833	1007
	5	100	56.3	48.6	165	293	73	848	0	0	898	490	632	720	822	974
	6	100	50.0	47.3	165	330	83	807	0	0	898	480	609	690	786	921
	7	50	52.5	45.9	165	314	79	811	0	508	449	433	548	625	721	850

*1 付録で示しているコンクリート製品工場における試験結果

5.4.2 各影響因子と終局乾燥収縮ひずみの関係

本検討で用いたデータ数は59件であり、調合条件について、水セメント比は41.0～75.2%、単位水量は160～188kg/m³、使用した再生粗骨材の吸水率は4.92～8.23%である。なお、実験Ⅰのシリーズ3の調合No.1、3、9および11は石灰岩砕石を使用していたため除外した。

各影響因子の相関係数を表-5.4.4に、終局乾燥収縮ひずみと各影響因子の関係を図-5.4.1に示す。なお、表中および図中の μ_s 、 μ_g はそれぞれ細骨材および粗骨材の吸水率を表しており、凡例のNは普通骨材を用いたものを、NRは普通細骨材と再生粗骨材を用いたものを表している。図表より、相関係数は μ_g が0.66と最も高くなっており、再生粗骨材の吸水率による影響が大きいことが分かる。次いで、G、 μ_s 、s/a、CfFA、W、Cの順に相関係数が高くなっており、収縮ひずみは単位粗骨材量、単位CfFA量が多いほど小さく、単位水量が多いほど大きくなる傾向にあることが分かる。また、普通細骨材の吸水率が大きくなるにしたがって、収縮ひずみも大きくなる傾向を示しており、粗骨材のみならず細骨材の吸水率も収縮に影響を及ぼしていることが考えられる。このことは既往の研究においても明らかにされている^{5.1)}。一方、単位セメント量および水セメント比の影響については、全体的には通常とは逆の傾向を示している。これは、データ数が少なく調合条件にばらつきがあるためであると考えられる。前章(第3章)では、水セメント比が及ぼす影響について、骨材種類に関わらず、水セメント比が大きくなるほど乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向を示したこと、また、既往の研究においても、それと同様の傾向が得られていることから明らかである^{5.2.5.3)}。この点に関しては、データ数が充分ではないために、既往のデータも含めて再検討する必要があるものと思われる。

以上より、通常とは若干異なる傾向を示した影響因子もあるが、全体的には再生粗骨材の吸水率による影響が最も大きくなっており、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測する上で最も重要な因子であることは明らかである。この吸水率の表し方については、2章(既往の研究)で述べたように研究者により異なっている。そこで、その表し方について既往の研究成果に基づいて検討を行うこととする。

表-5.4.4 各影響因子と相関係数の一覧

W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	μ_s (%)	μ_g (%)
-0.23	0.4	0.38	0.37	-0.39	0.1	-0.57	0.45	0.66

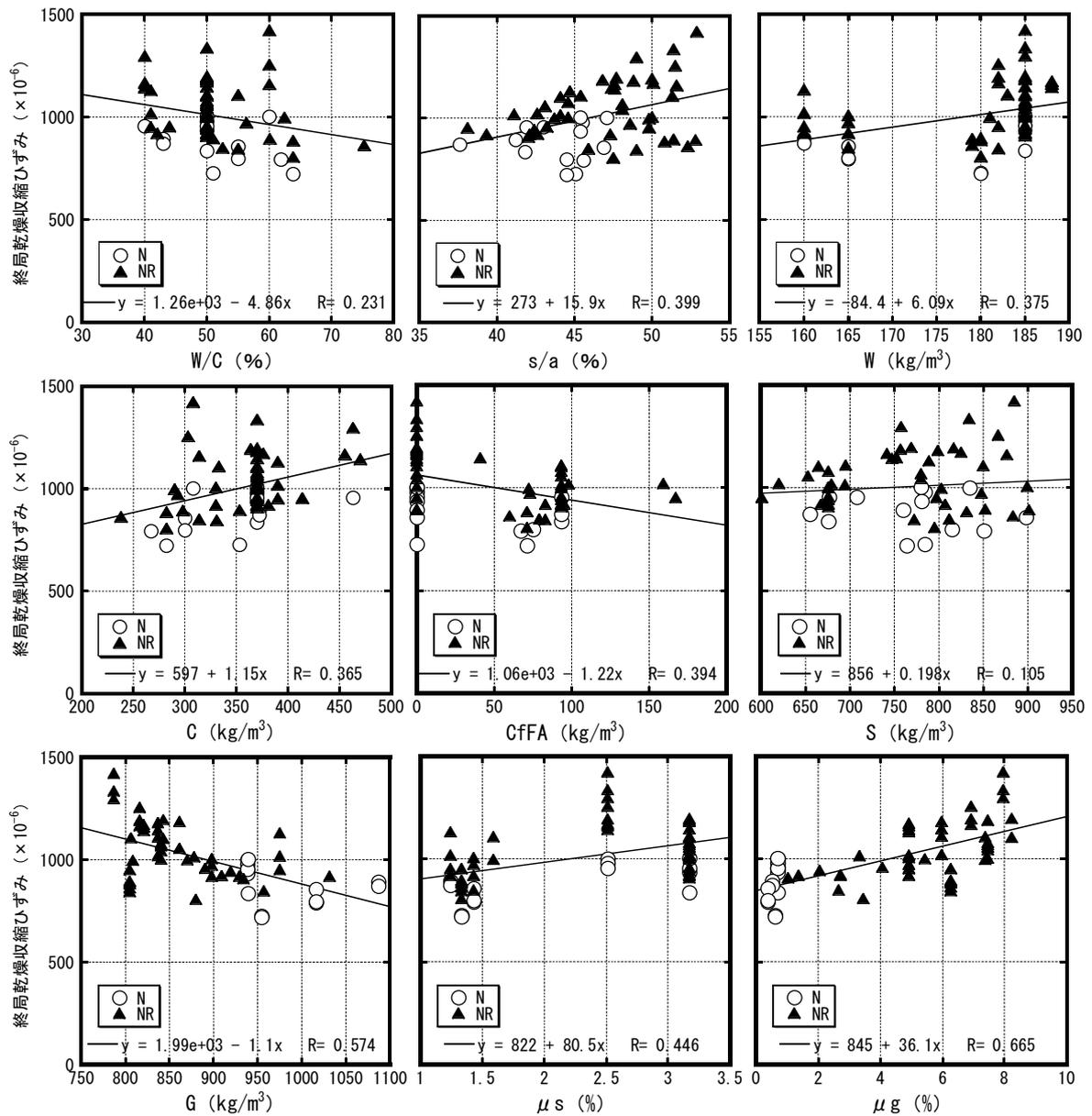


図-5.4.1 終局乾燥収縮ひずみと各因子の関係

笠井ら^{5.4)}は、再生粗骨材および再生細骨材のそれぞれ、またはその両方を用いた再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは、図-5.4.2に示すように、コンクリート中の全水量（記号：TW、コンクリート中の単位水量と骨材の吸水量に相当する水量を加算した値）と良い相関関係にあることを示しており、乾燥収縮ひずみは図中に示す式で表せることを実験的に明らかにしている。そこで、本実験データについて、TWと終局乾燥収縮ひずみの関係を示したものが図-5.4.3であるが、既往の研究と同様に良い相関関係にあることが分かる。

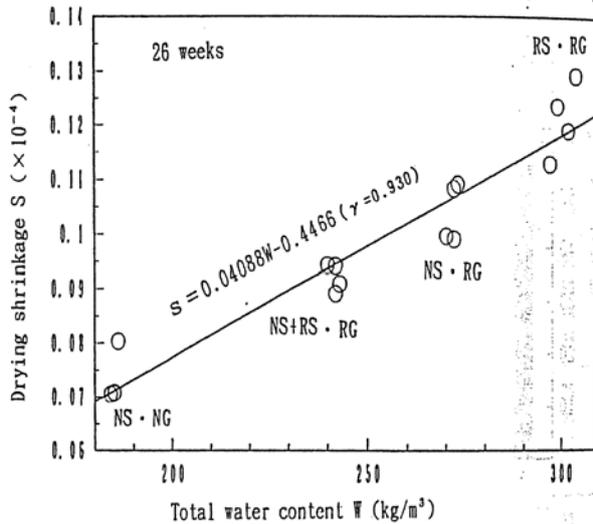


図-5.4.2 TWと乾燥収縮ひずみの関係^{5.4)}

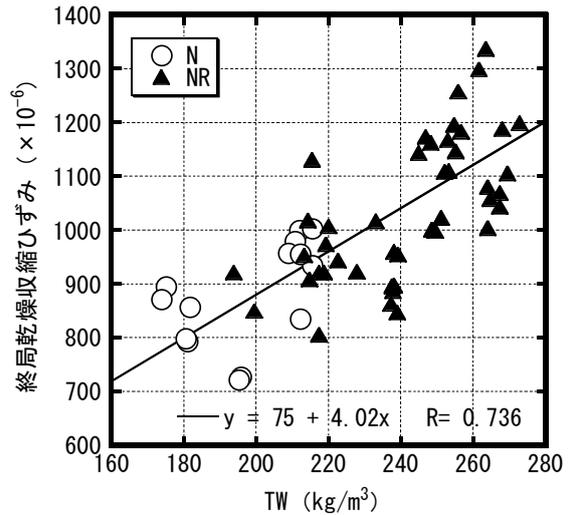


図-5.4.3 TWと終局乾燥収縮ひずみの関係

一方、道正ら^{5.5)}は再生骨材の吸水率の影響を相対吸水率によって表している。これは、細骨材および粗骨材の吸水率に各骨材の容積を乗じた値を骨材全体の容積で除したものである。相対吸水率と終局乾燥収縮ひずみの関係を示したものが図-5.4.4であるが、TWと同様に終局乾燥収縮ひずみと相関関係にあることが分かる。

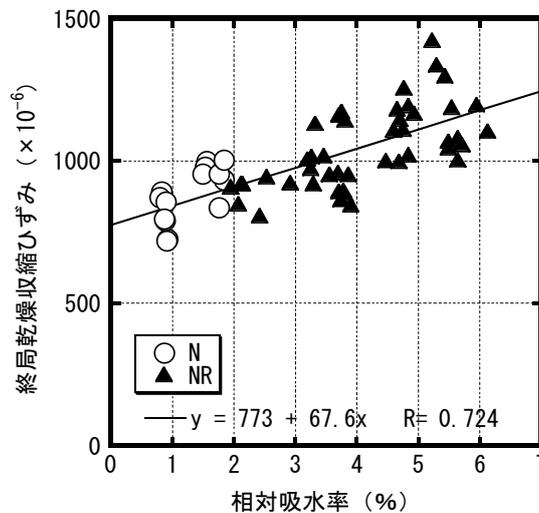


図-5.4.4 相対吸水率と終局乾燥収縮ひずみの関係

このように再生骨材の吸水量による影響の表し方は2、3あるが、それぞれの相関係数に大きな差異はなく、いずれの方法によっても評価が可能であると言える。そこで、提案する式の汎用性を考慮して、各骨材の吸水率をそのままファクターとして用いることとした。

5.4.3 収集データの概要

予測式の構築に用いた実験データは、日本建築学会構造系論文集、コンクリート工学論文報告集、コンクリート工学年次論文集、セメントコンクリート論文集から収集した 642 件（調合条件別）と、本研究で行った実験から得られた 59 件の計 701 件であり、抽出したデータは 2093 件である。なお、乾燥開始材齢は 7 日、セメントは普通ポルトランドセメント、体積表面積比（V/S）は 22~25mm のものを対象とした。なお、粗骨材に石灰岩碎石を用いたものはデータ数が十数件と少量であったため対象外とした。

収集したデータの概要を頻度分布で図-5.4.5 に示す。また、それぞれの終局乾燥収縮ひずみを乾燥期間 182 日までの実測データを用いて、双曲線関数である式(5.3.1)^{5,6)}に基づき、式中の α 、 β 、 $\varepsilon_{sh\infty}$ をパラメータとして最小二乗法によって求めた。なお、測定期間が 1 乾燥期間のみのもものは、 α および β を式(5.4.2)および式(5.4.3)により算出して最終値を求めた。

$$\alpha = 0.16 \cdot (V/S)^{1.8} \quad (5.4.2)$$

$$\beta = 1.4 \cdot (V/S)^{-0.18} \quad (5.4.3)$$

収集したデータの水セメント比は 30~70% の間に、単位水量は 140~210kg/m³ の間に、単位粗骨材量は 700~1200kg/m³ の間に分布していた。また、細骨材の吸水率は 0~18% の間に分布しており、かなり吸水率の高いものが使用されていたケースもあった。粗骨材の吸水率は 0~9% の間に分布しており、高品質再生粗骨材に相当するものが 205 件、中品質再生粗骨材に相当するものが 145 件程度、低品質再生粗骨材に相当するものが 128 件、低品質再生粗骨材にも相当しないより低品質なものが 23 件であった。なお、各実験における基準コンクリートのデータも含めているため、細骨材、粗骨材の双方において 3% 以下のデータ数が多くなっている。終局乾燥収縮ひずみは 500~2000 ($\times 10^{-6}$) の範囲内にあり、1000 ($\times 10^{-6}$) 前後のデータが最も多い。

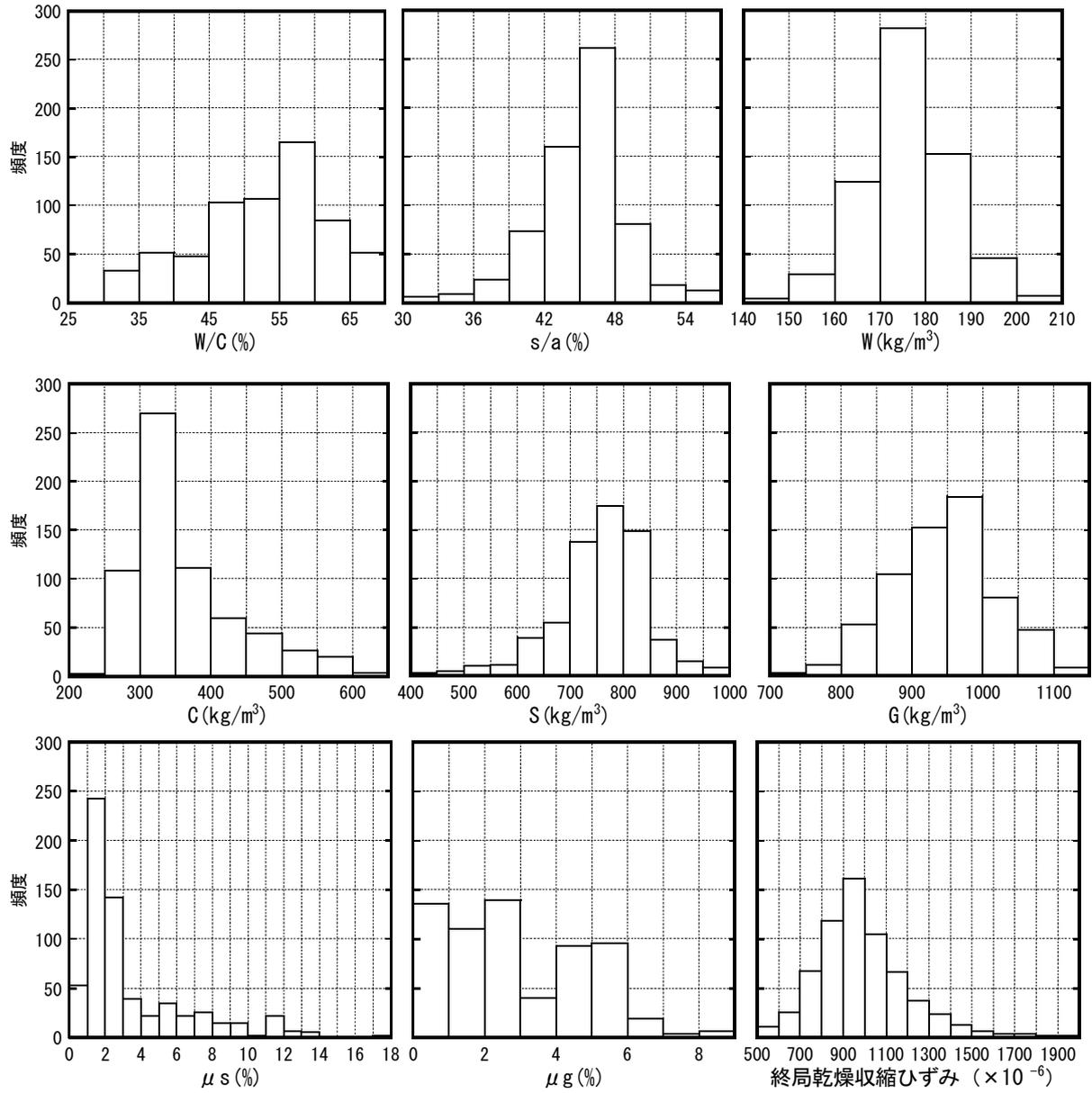


図-5.4.5 予測式構築に使用した実験データの概要

5.4.4 重回帰分析

AIJ 式^{5.6)}では、終局乾燥収縮ひずみ ($\epsilon_{sh\infty}$) に及ぼす調合の影響として、単位水量、単位セメント量、単位粗骨材量を考え、これらの影響因子を考慮して重回帰分析を行い、調合による影響を表す係数を求めている。また、骨材、セメントおよび混和材による影響に関してはそれぞれ修正係数として加えている。本研究においても、同様に重回帰分析により終局乾燥収縮ひずみ ($\epsilon_{sh\infty}$) の予測式の構築を試みることにした。

影響因子の選定に関しては、説明変数相互の相関係数が高いときに、それらの影響因子を両方とも説明変数として入れてしまうと、その影響を2重に評価してしまうこととなり正しく評価することができない。これを多重共線性というが、ここでは、各説明変数の多重共線性の有無を確認する。各影響因子間の相関係数は表-5.4.5 に示す通りであるが、表中に下線を引いている数値は多重共線性の疑いのある因子である。

表-5.4.5 各影響因子の相関係数の一覧

項目	終局乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	μs (%)	μg (%)
W/C	0.24	1								
s/a	0.27	0.53	1							
W	0.20	0.22	0.07	1						
C	-0.22	<u>-0.94</u>	-0.51	0.04	1					
FA	-0.09	-0.05	-0.43	-0.28	-0.05	1				
S	0.01	0.64	<u>0.81</u>	-0.12	-0.67	-0.72	1			
G	-0.38	-0.11	-0.71	-0.33	0.00	0.15	-0.33	1		
μs	0.44	-0.03	0.02	0.05	0.05	0.25	-0.42	-0.14	1	
μg	0.49	0.03	0.24	0.03	-0.02	-0.07	0.07	-0.61	0.11	1

各影響因子と終局乾燥収縮ひずみの関係を図-5.4.6 に、その相関係数の一覧を表-5.4.5 に示す。図中の凡例について、RN は再生細骨材と普通粗骨材を用いたものを、RR は細骨材、粗骨材ともに再生骨材を用いたものを表している。図表より、ばらつきが大きく相関係数も全体的に低くなっているが、 μg および μs は前述と同様に比較的良い相関関係にあることが分かった。次いで、G、s/a、W/C の順に相関係数は大きいが大差は見られない。

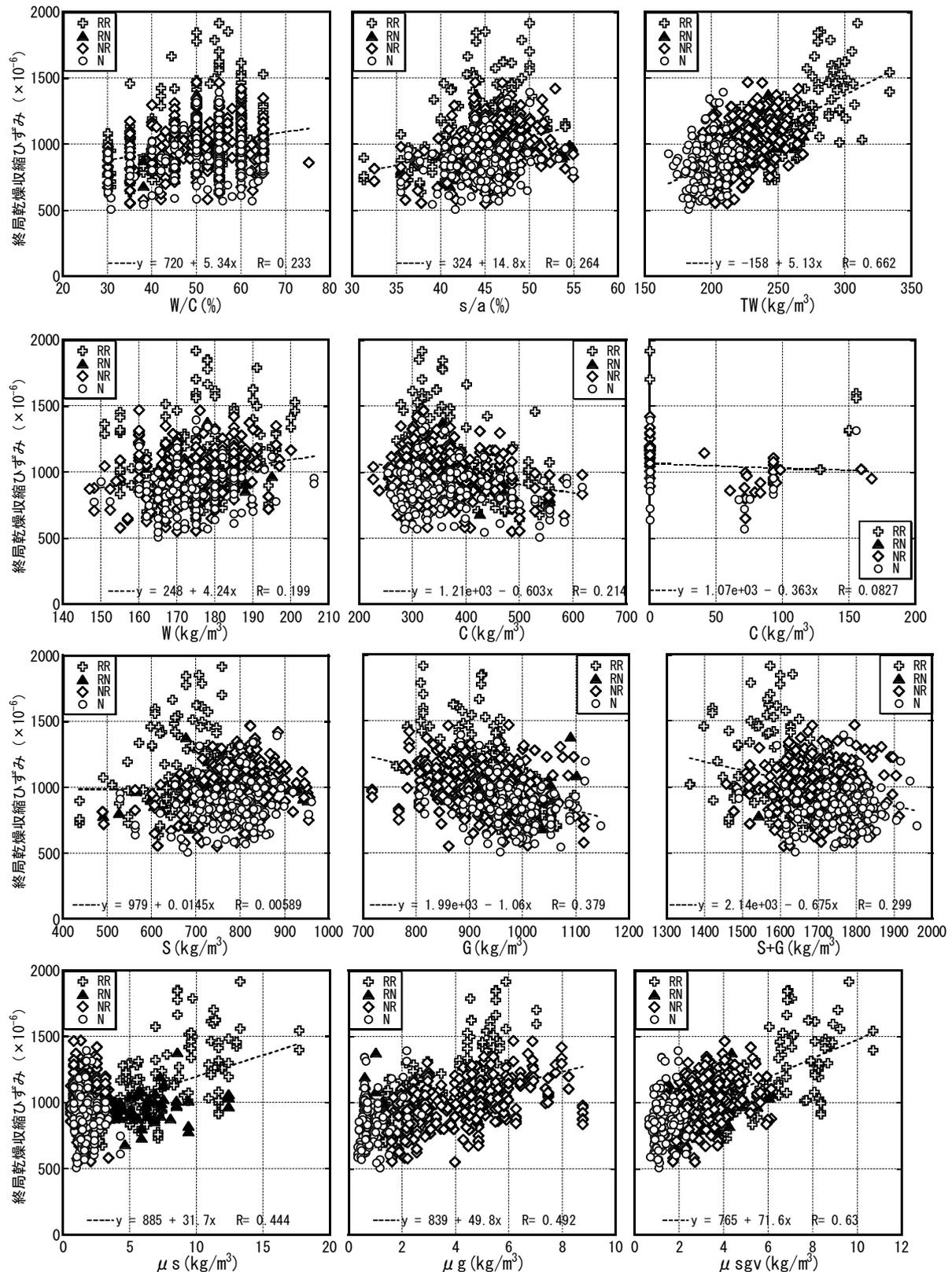


図-5.4.6 各因子影響因子と終局乾燥収縮ひずみの関係

以上より、AIJ式を基に、説明変数を W 、 C 、 FA 、 G 、 μs および μg とし、目的変数を終局乾燥収縮ひずみとして重回帰分析をステップワイズ法により行った。その結果、式(5.4.4)

が得られた。

$$\varepsilon_{sh\infty} = 3.84 \cdot W - 0.69 \cdot C - 0.33 \cdot FA + 28.4 \cdot \mu_s + 44.4 \cdot \mu_g + 337 \quad (5.4.4)$$

影響因子として G は影響度が小さくなったために、説明変数から除外した。**式(5.4.4)**を用いて予測した終局乾燥収縮ひずみと、実測値から推定した終局乾燥収縮ひずみの関係を**図-5.4.7**に示す。なお、右図に AIJ 式をそのまま用いて終局乾燥収縮ひずみを推定した結果を、下図に AIJ 式と同様の考え方で導き出した予測式を用いて推定した結果、すなわち、普通骨材を用いたコンクリートに関してまず重回帰分析を行い、得られた式に再生骨材の修正係数 1.4 を乗じることによって推定した結果について示している。これによると、**式(5.4.4)**から算出した予測値は実測値に比べ全体的に大きくなっており、終局乾燥収縮ひずみを過大評価する傾向がある。しかしながら、予測値と計算値のばらつきはほぼ±40%の範囲内に収まっていることから、再生骨材の使用による影響を骨材の吸水率を説明変数として加えることによって、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測がおおよそ可能であると言える。

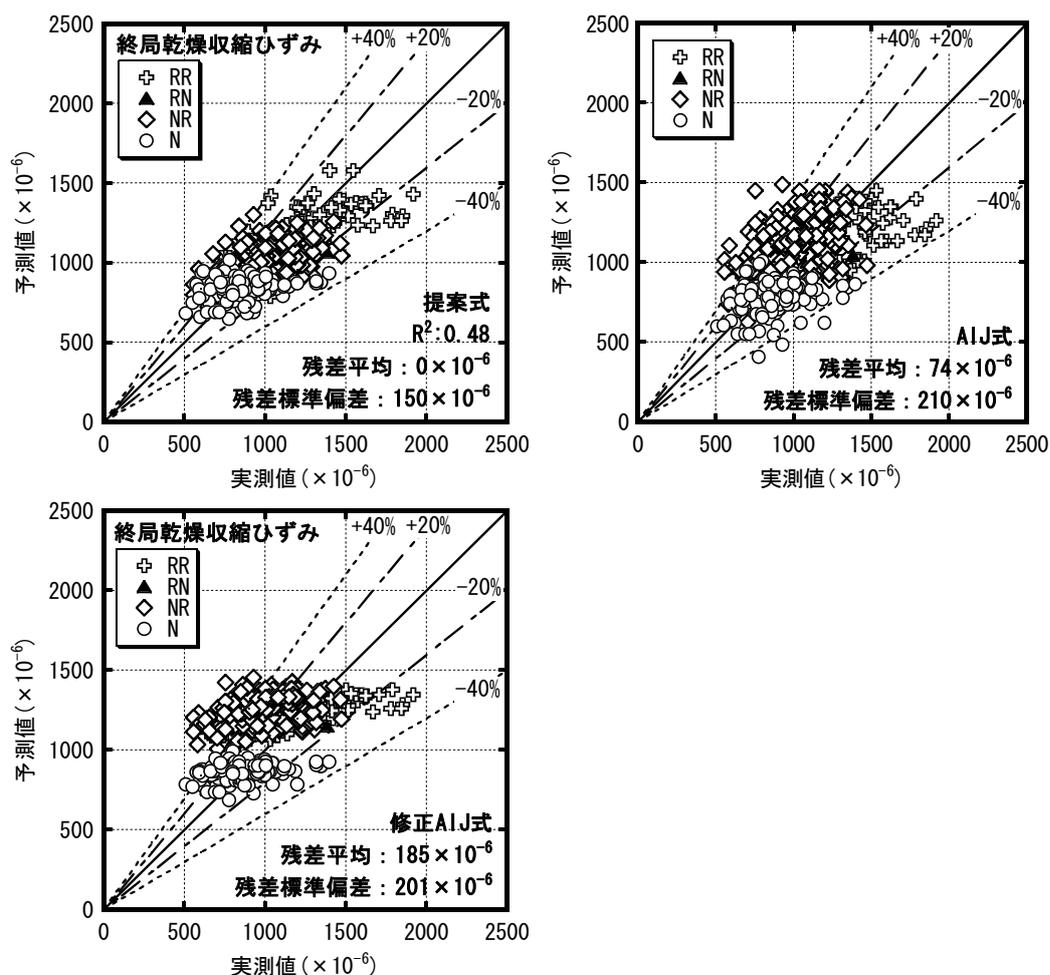


図-5.4.7 終局乾燥収縮ひずみの予測結果

5.5 予測式の適合性

前節では、再生コンクリートの調合が終局乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を検討し、その予測式の構築を試みた。その結果、得られた式(5.3.2)を用い、AIJ式に基づいて予測した乾燥収縮ひずみと実測値の比較を図-5.5.1に示す。なお、図中のNは普通骨材のみを、NRは粗骨材のみ再生骨材を、RNは細骨材のみ再生骨材を、RRは細骨材と粗骨材の両方に再生骨材を用いたコンクリートを示している。図より、すべての骨材種類において、予測値と実測値のばらつきは±40%の範囲内におおよそ収まっており、提案式から得られた予測値は再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測データを比較的精度良く表していると言える。

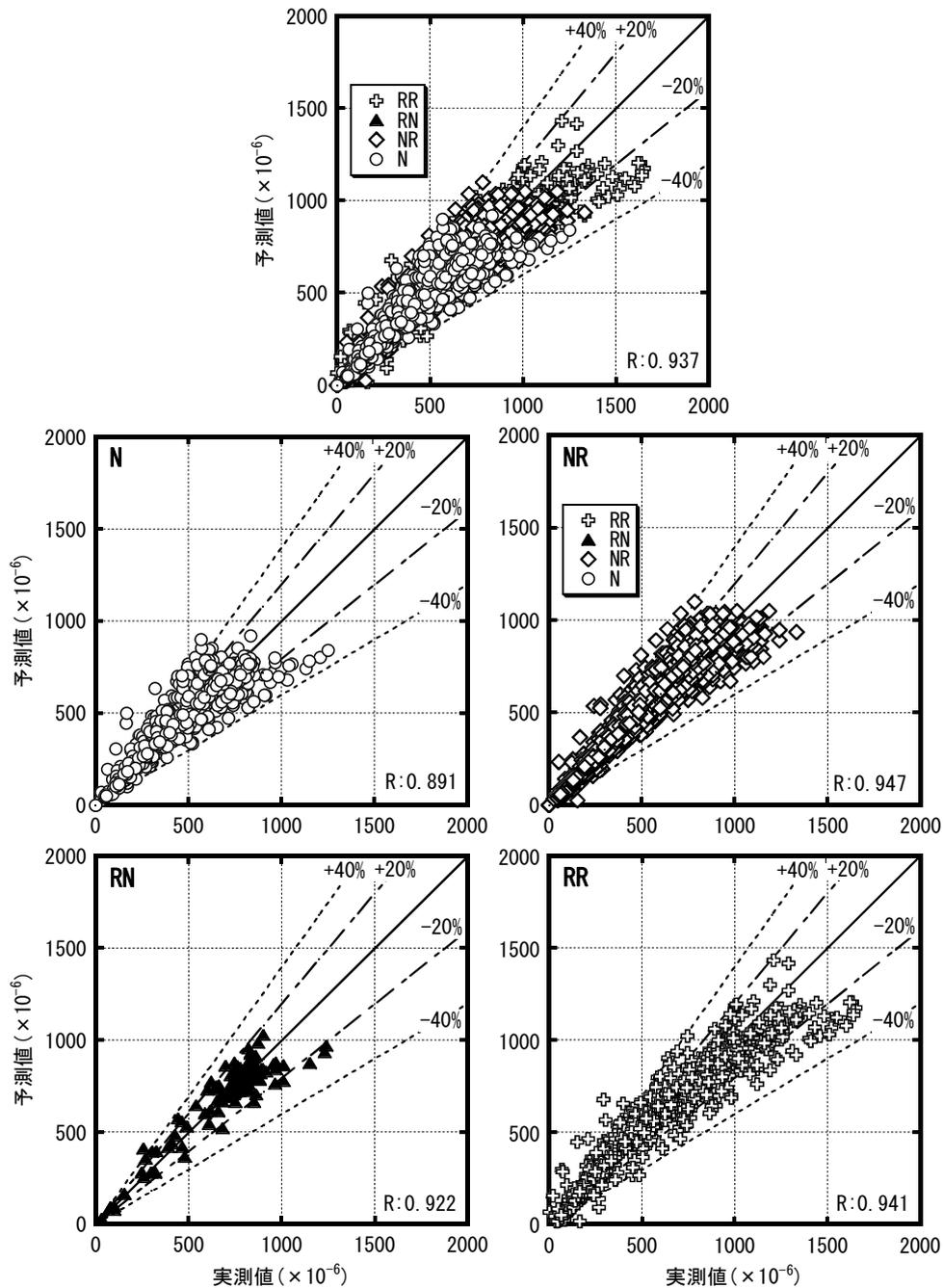


図-5.5.1 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の比較

予測値から実測値を引いた残差と実測値の関係を骨材種類ごとに図-5.5.3 に示す。図中の N は普通骨材のみを、NR は粗骨材のみ再生骨材を、RN は細骨材のみ再生骨材を、RR は細骨材と粗骨材の両方に再生骨材を用いたコンクリートを示している。図より、骨材種類によらず実測値が約 1000×10^{-6} 以上の範囲では過小評価する傾向があるが、全体的にはプロット点が $y=x$ 線上に集中しており、比較的良好に適合している。

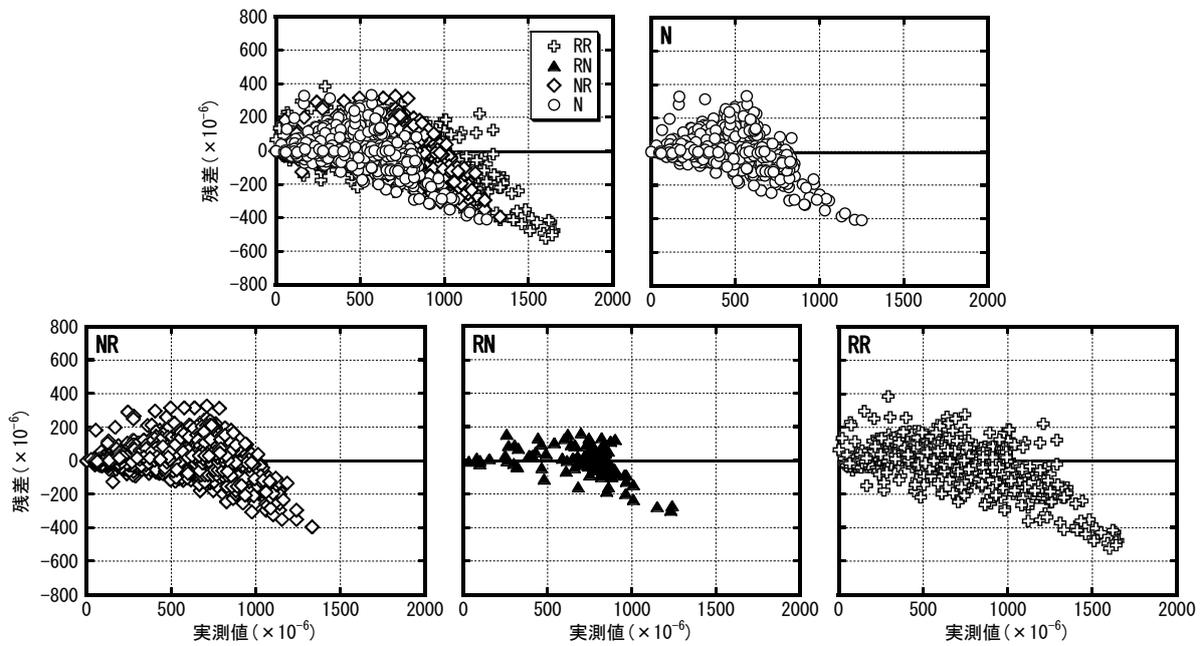


図-5.5.2 残差と実測値の関係

表-5.5.1 に予測値の残差の平均値と標準偏差の算出結果を、残差のヒストグラムを図-5.5.3 に骨材種類ごとに示す。残差の平均値は 0 に近いほど予測結果の精度が良く、残差の標準偏差は小さい値になるほど実測値とのばらつきが小さいことを示す。これによると、全体の残差の平均値は 2.35×10^{-6} であり、骨材種類別に見ても 10×10^{-6} 程度以下となり精度が良いことが分かる。また、残差の標準偏差は約 100×10^{-6} とやや大きいですが、設計段階から得られるデータからの予測結果としては十分な精度を有していると言える。以上の検討結果より、本提案式は、骨材種類別に比較しても十分な精度を有していることが明らかとなり、骨材の吸水率を考慮することによって、普通骨材および再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測が可能であることが分かった。

表-5.5.1 残差の平均値と標準偏差の一覧

項目	全体	N	NR	RN	RR
平均 ($\times 10^{-6}$)	2.35	-4.26	10.5	-3.41	-7.24
標準偏差 ($\times 10^{-6}$)	103	106	91	90	123

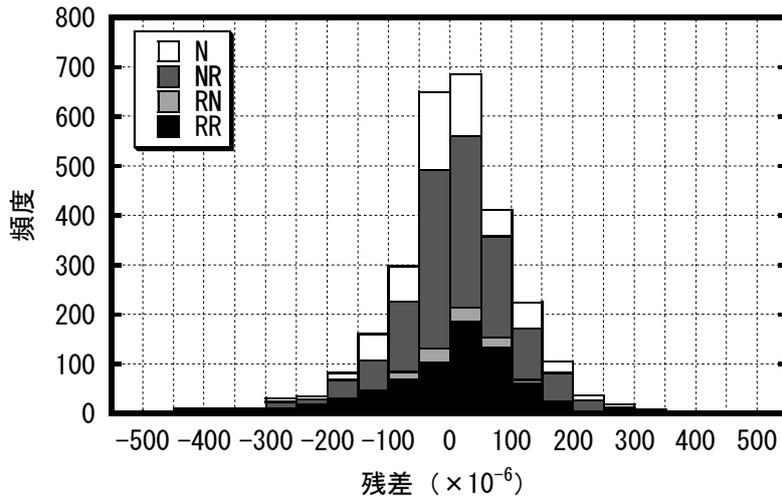


図-5.5.3 残差の頻度分布

5.6 まとめ

本章では、第3章で得られた実験データおよび既往の研究データを用いて、AIJ式で提案されている乾燥収縮ひずみの予測式の再構築を試みた。その結果、再生コンクリートの終局乾燥収縮ひずみに及ぼす調合上の最も大きな影響因子は骨材の吸水率であることを示し、次いで、目的変数をコンクリートの終局ひずみ、説明変数を単位水量、単位セメント量、単位CfFA量、細骨材および粗骨材の吸水率として重回帰分析を行った。その結果得られた式(5.4.4)を用いることによって再生コンクリートの乾燥収縮ひずみをおおよそ予測できることが分かった。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{\alpha + (t - t_0)} \right)^\beta \quad (5.3.1) \text{ (再掲)}$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (5.3.2) \text{ (再掲)}$$

$$K_1 = (3.84 \cdot W - 0.69 \cdot C - 0.33 \cdot FA + 28.4 \cdot \mu S + 44.4 \cdot \mu G + 337) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (5.4.4) \text{ (再掲)}$$

$$K_2 = t_0^{-0.08} \quad (5.3.4) \text{ (再掲)}$$

$$K_3 = 1 - (h/100)^3 \quad (5.3.5) \text{ (再掲)}$$

$$\alpha = 0.16 \cdot (V/S)^{1.8} \quad (5.3.6) \text{ (再掲)}$$

$$\beta = 1.4 \cdot (V/S)^{-0.18} \quad (5.3.7) \text{ (再掲)}$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 における材齢 t 日の乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{sh\infty}$: 終局乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

K_1 : コンクリートの調合の影響に関する係数

K_2 : 乾燥開始材齢の影響に関する係数

- K_3 : 相対湿度の影響に関する係数
 α, β : 乾燥の進行度を表す係数
 W : 単位水量 (kg/m^3)
 C : 単位セメント量 (kg/m^3)
 FA : 単位フライアッシュ量 (kg/m^3)
 μ_s : 細骨材の吸水率 (%)
 μ_g : 粗骨材の吸水率 (%)
 h : 相対湿度 (%) ($40\% \leq h < 99\%$)
 V : 体積 (mm^3)
 S : 外気に接する表面積 (mm^2)
 V/S : 体積表面積比 (mm) ($0\text{mm} \leq V/S \leq 250\text{mm}$)
 γ_1 : 骨材の種類によって定まる係数
 γ_2 : セメントの種類によって定まる係数
 γ_3 : 混和材の種類によって定まる係数

表-5.3.1 修正係数一覧 ^{5.6)}

γ_1	0.7	石灰石碎石
	1.0	天然骨材
	1.2	軽量骨材
γ_2	0.9	早強セメント
	1.0	普通セメント
		高炉セメント
γ_3	0.7	収縮低減剤
	0.8	シリカフェューム
	1.0	無混入
高炉スラグ微粉末		

【第5章 参考文献】

- 5.1) 緒方満成、桐山宏和、大和功一郎、大西利勝：細骨材種類および吸水率がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響、第65回セメント技術大会講演要旨、pp.214-215、2011
- 5.2) 南波篤志、阿部道彦、棚野博之、前田弘美：再生コンクリートの品質改善に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.65-70、1995
- 5.3) 道正泰弘、菊池雅史、増田彰、小山明男：原コンクリートの性質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、第485号、pp.1-10、1996.7
- 5.4) 笠井芳夫、阿部道彦、柳啓：再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.802-807、1996
- 5.5) 道正泰弘、菊池雅史、増田彰、小山明男：原コンクリートの性質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、第485号、pp.1-10、1996.7
- 5.6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説、pp.179-185、2006

第6章

低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの 適用範囲

6章 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲

6.1 はじめに

前章において、低品質粗骨材を用いたコンクリートの耐久性に関して実験的に検討を行い、次いで、再生コンクリートの圧縮強度の予測手法、並びに、乾燥収縮ひずみの予測式を提案した。本章（第6章 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲）では、これまでの結果と既往の研究成果に基づいて、低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲について整理する。

6.2 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲

本節では、再生粗骨材の吸水率、置換率、並びに CfFA 混入率が再生コンクリートの耐久性に及ぼす影響について、各章で得られた成果を整理し、低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲について検討する。なお、検討に用いた実験データの一覧を表-6.2.1～6.2.2 に示す。

表-6.2.1 実験データ一覧(実験 I)

調合	CfFA 置換率 (%)	RG 置換率 (%)	s/a	W/C (%)	単位量(kg/m ³)								G 吸水率 (%)	RG 吸水率 (%)	フレッシュ性状		強度性状		耐久性			
					W	C	CfFA	細骨材		粗骨材		SL (cm)			Air (%)	σ ₂₈	E ₂₈	ε _{sh182}	A ₁	A ₂	I	
								S1	S2	G	RG											
1	0	0	42.5	50.0	182	364	0	531	226	1025	0	1.75	-	19.0	4.6	36.1	-	-	-	-	-	
2	20	0	41.8	62.5	182	291	73	516	219	1025	0	1.75	-	18.5	5.0	29.2	-	-	-	-	-	
3	20	0	40.6	56.3	182	324	81	491	209	1025	0	1.75	-	18.0	5.0	33.5	-	-	-	-	-	
4	20	0	39.0	50.0	182	364	91	460	195	1025	0	1.75	-	12.0	2.5	44.5	-	-	-	-	-	
5	0	100	46.6	50.0	182	364	0	531	226	0	868	1.75	7.43	17.5	5.0	24.3	-	-	-	-	-	
6	20	100	45.8	62.5	182	291	73	516	219	0	868	1.75	7.43	19.5	5.3	20.7	-	-	-	-	-	
7	20	100	44.6	56.3	182	324	81	491	209	0	868	1.75	7.43	19.0	5.0	22.0	-	-	-	-	-	
8	20	100	43.0	50.0	182	364	91	460	195	0	868	1.75	7.43	14.5	4.5	28.9	-	-	-	-	-	
9	20	50	43.7	62.5	182	291	73	516	219	513	434	1.75	7.43	18.5	5.0	24.7	-	-	-	-	-	
10	20	50	40.9	50.0	182	364	91	460	195	513	434	1.75	7.43	12.0	3.5	34.7	-	-	-	-	-	
1	0	0	46.6	60.1	179	298	0	250	584	954	0	0.62	-	17.5	4.2	36.5	3.14	-	-	-	-	
2	0	0	45.1	51.0	180	353	0	235	549	954	0	0.62	-	17.0	4.2	44.9	3.37	628	1.72	0.33	-	
3	0	0	43.3	44.0	182	414	0	219	511	954	0	0.62	-	19.0	4.1	46.8	3.31	-	-	-	-	
4	20	0	46.1	75.2	179	238	60	245	571	954	0	0.62	-	19.0	3.2	29.1	3.01	-	-	-	-	
5	20	0	44.5	63.8	180	282	71	229	535	954	0	0.62	-	20.0	4.4	37.4	3.17	620	3.24	0.53	-	
6	20	0	42.5	55.0	182	331	83	211	493	954	0	0.62	-	19.0	5.2	38.8	3.27	-	-	-	-	
7	0	100	52.8	60.1	179	298	0	270	631	0	805	0.62	6.26	18.0	5.5	31.5	2.67	760	3.48	0.34	-	
8	0	100	51.4	51.0	180	353	0	256	596	0	805	0.62	6.26	20.0	4.5	40.9	2.81	755	1.22	0.21	-	
9	0	100	49.8	44.0	182	414	0	239	558	0	805	0.62	6.26	20.0	5.1	46.6	2.98	796	0.16	0.13	-	
10	20	100	52.3	75.2	179	238	60	265	618	0	805	0.62	6.26	21.0	4.6	25.9	2.43	729	5.34	0.72	-	
11	20	100	50.8	63.8	180	282	71	249	582	0	805	0.62	6.26	21.5	4.2	34.1	2.72	749	3.46	0.43	-	
12	20	100	49.0	55.0	182	331	83	232	540	0	805	0.62	6.26	21.5	5.2	40.7	2.75	736	1.89	0.30	-	
13	20	50	47.5	63.8	180	282	71	239	556	461	419	0.62	6.26	21.0	3.4	34.1	2.78	690	3.71	0.51	-	
1	0	0	47.9	55.0	180	327	0	510	348	932	0	0.48	-	18.5	4.2	41.7	3.00	545	-	0.39	-	
2	20	0	47.9	68.9	175	254	64	509	347	932	0	0.48	-	18.5	4.2	33.9	3.03	-	-	-	-	
3	20	0	46.5	62.5	178	285	71	482	329	934	0	0.48	-	19.0	4.5	37.6	3.19	500	-	0.55	-	
4	20	0	44.5	56.2	181	322	80	449	306	940	0	0.48	-	19.0	4.0	43.0	3.28	-	-	-	-	
5	0	100	51.3	55.0	183	333	0	505	345	0	806	0.48	7.37	19.0	4.6	34.4	2.32	925	-	0.49	-	
6	20	100	51.4	68.7	178	259	65	505	345	0	804	0.48	7.37	19.0	4.6	28.1	2.17	-	-	-	-	
7	20	100	49.8	62.4	181	290	72	477	326	0	808	0.48	7.37	18.5	4.4	32.3	2.22	871	-	0.57	-	
8	20	100	44.7	56.3	184	327	82	413	282	0	860	0.48	7.37	18.5	4.2	36.6	2.41	-	-	-	-	
9	20	50	48.1	62.4	181	290	72	477	326	464	404	0.48	7.37	18.0	4.5	34.1	2.65	685	-	0.54	-	
10	20	30	47.4	62.5	180	288	72	479	327	652	243	0.48	7.37	17.5	4.4	34.7	2.67	-	-	-	-	
11	20	20	47.1	62.6	179	286	72	480	328	745	162	0.48	7.37	18.5	4.2	34.6	2.98	567	-	0.51	-	
12	20	10	46.8	62.5	178	285	71	482	329	841	81	0.48	7.37	18.0	4.0	34.9	3.07	-	-	-	-	

σ₂₈: 材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm²)

E₂₈: 材齢 28 日におけるヤング係数 (× 10⁴N/mm²)

ε_{sh182}: 乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみ (× 10⁻⁶)

A₁: 促進中性化試験 (JIS A 1125) 結果における中性化速度係数 (mm/√ week)

A₂: 室内曝露中性化試験結果における中性化速度係数 (mm/√ week)

I: 耐久性指数 (%)

表-6.2.2 実験データ一覧(実験Ⅱ)

調 合	CfFA 置換率 (%)	RG 置換率 (%)	s/a	W/C (%)	単位量(kg/m ³)								G 吸水率 (%)	RG 吸水率 (%)	フレッシュ性状		強度性状		耐久性			
					W	C	CfFA	細骨材		粗骨材		SL (cm)			Air (%)	σ_{28}	E ₂₈	ϵ_{sh182}	A ₁	A ₂	I	
								S1	S2	G	RG											
1	0	0	47.1	60.0	185	308	0	835	0	938	0	0.69	-	19.5	4.4	33.7	2.98	853	-	0.58	-	
2	0	0	45.5	50.0	185	370	0	784	0	938	0	0.69	-	18.5	4.8	41.5	3.17	818	-	0.37	-	
3	0	0	43.0	40.0	185	463	0	707	0	938	0	0.69	-	16.5	5.3	50.4	3.24	794	-	0.17	-	
4	0	100	51.5	60.0	182	303	0	867	0	0	816	0.69	6.92	18.5	4.4	30.2	2.28	1025	-	0.67	-	
5	0	100	50.0	50.0	182	364	0	817	0	0	816	0.69	6.92	18.5	4.9	35.3	2.37	988	-	0.44	-	
6	0	100	47.6	40.0	182	455	0	742	0	0	816	0.69	6.92	18.0	4.7	41.7	2.54	965	-	0.16	-	
7	0	100	51.6	60.0	188	314	0	876	0	0	821	0.69	4.92	19.5	4.4	30.4	2.41	979	-	0.57	-	
8	0	100	50.1	50.0	188	376	0	825	0	0	821	0.69	4.92	18.0	4.5	41.9	2.53	988	-	0.32	-	
9	0	100	47.6	40.0	188	470	0	747	0	0	821	0.69	4.92	17.5	5.4	47.8	2.65	964	-	0.12	-	
10	0	100	52.9	60.0	185	308	0	885	0	0	787	0.69	7.96	13.5	5.2	29.9	2.18	1183	-	0.66	-	
11	0	100	51.4	50.0	185	370	0	834	0	0	787	0.69	7.96	17.5	5.6	37.3	2.33	1118	-	0.36	-	
12	0	100	49.0	40.0	185	463	0	757	0	0	787	0.69	7.96	11.5	4.7	46.9	2.55	1081	-	0.11	-	
1	0	0	45.4	50.0	185	370	0	781	0	938	0	0.69	-	20.0	5.5	36.3	2.89	806	2.20	0.45	97.8	
2	20	0	41.9	50.0	185	370	93	677	0	938	0	0.69	-	18.5	4.8	40.5	2.93	833	2.40	0.40	93.1	
3	0	100	46.8	50.0	185	370	0	757	0	0	861	0.69	7.46	20.5	5.4	30.0	2.25	992	-	0.47	37.6	
4	20	100	43.1	50.0	185	370	93	652	0	0	861	0.69	7.46	19.0	4.8	34.4	2.35	914	-	0.38	34.4	
5	0	100	47.7	50.0	185	370	0	769	0	0	843	0.69	8.23	19.5	5.0	31.3	2.24	1012	-	0.43	8.6	
6	20	100	44.1	50.0	185	370	93	665	0	0	843	0.69	8.23	19.5	4.9	33.3	2.23	946	-	0.42	13.6	
7	0	100	48.8	50.0	185	370	0	799	0	0	837	0.69	5.97	19.5	4.8	33.1	2.35	985	2.32	0.51	23.4	
8	20	100	45.4	50.0	185	370	93	695	0	0	837	0.69	5.97	18.0	5.0	36.5	2.37	959	2.36	0.44	28.4	
9	10	100	47.4	50.0	185	370	41	753	0	0	837	0.69	5.97	19.5	5.2	35.6	2.44	973	2.53	0.42	41.4	
10	30	100	42.6	50.0	185	370	159	620	0	0	837	0.69	5.97	17.5	4.6	39.2	2.52	888	2.25	0.36	40.0	
11	20	50	44.1	50.0	185	370	93	694	0	460	418	0.69	5.97	19.5	5.0	38.9	2.63	882	2.24	0.38	84.3	
1	0	0	45.4	50.0	185	370	0	780	0	939	0	0.69	-	20.5	4.6	43.4	3.08	825	1.59	0.40	-	
2	20	0	41.8	50.0	185	370	93	676	0	939	0	0.69	-	18.0	4.5	45.2	3.15	720	1.55	0.33	-	
3	20	5	42.0	50.0	185	370	93	676	0	892	42	0.69	7.46	18.0	4.2	45.6	3.06	777	-	0.37	-	
4	20	10	42.1	50.0	185	370	93	676	0	845	84	0.69	7.46	17.5	4.2	43.9	2.91	783	-	0.35	-	
5	20	20	42.4	50.0	185	370	93	676	0	751	168	0.69	7.46	19.0	4.2	44.2	2.97	813	-	0.39	-	
6	20	30	42.6	50.0	185	370	93	676	0	657	252	0.69	7.46	19.0	4.5	42.1	2.89	792	-	0.36	-	
7	20	50	43.2	50.0	185	370	93	676	0	469	420	0.69	7.46	18.5	4.7	41.1	2.69	823	1.93	0.31	-	
8	20	70	43.7	50.0	185	370	93	676	0	282	588	0.69	7.46	18.0	4.9	37.9	2.50	856	-	0.36	-	
9	0	100	48.1	50.0	185	370	0	780	0	0	840	0.69	7.46	20.0	4.2	34.4	2.40	869	2.02	0.39	-	
10	0	100	48.1	50.0	185	370	0	780	0	0	840	0.69	7.46	16.5	4.7	33.3	2.32	897	-	0.42	-	
11	20	100	44.6	50.0	185	370	93	676	0	0	840	0.69	7.46	19.5	4.6	39.4	2.49	867	1.98	0.38	-	
12	20	100	44.6	50.0	185	370	93	676	0	0	840	0.69	7.46	14.0	4.6	36.0	2.30	935	1.93	0.34	-	

σ_{28} : 材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm²)

E₂₈: 材齢 28 日におけるヤング係数 (× 10⁴N/mm²)

ϵ_{sh182} : 乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみ (× 10⁻⁶)

A₁: 促進中性化試験 (JIS A 1125) 結果における中性化速度係数 (mm/√week) (CO₂ 濃度 5.0%)

A₂: 室内曝露中性化試験結果における中性化速度係数 (mm/√week) (CO₂ 濃度 0.17%)

I: 耐久性指数 (%)

6.2.1 乾燥収縮

建築学会「建築工事標準仕様書・同解説」鉄筋コンクリート工事^{6.1)}では、計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートについて主として耐久性を確保するために収縮ひび割れを低減する必要があることから、乾燥期間半年における乾燥収縮ひずみを 8×10^{-4} 以下としている。また、同会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・解説」では、一般的な建築物においては、乾燥収縮ひずみ 800×10^{-6} 以下とすることによって有害なひび割れが発生しないレベルにほぼ制御できるものとしている。

上記より、本項では、再生コンクリートの乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみの目標値を 800×10^{-6} 以下として、その条件を満たす再生コンクリートの調合条件について、前章で提案した再生コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式を用いて検討を行うこととした。

再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの調合上の影響因子として、提案式にはコンクリートの単位水量、単位セメント量、単位 CfFA 量、細骨材の平均吸水率および粗骨材の平均吸水率の 5 つを組み込んでいる。乾燥収縮ひずみの予測値を試算するにはこれらの影響因子の数値を決定する必要がある。以下の検討では、骨材の吸水率に関して、第 5 章で収集した既往データの平均的な数値を使用することとし、普通細骨材の吸水率を 1.8%、普通粗骨材の吸水率を 0.8% とした。

まず、再生粗骨材置換率の違いが乾燥収縮ひずみの予測値にどの程度影響を及ぼすか確認する。仮に、再生粗骨材の吸水率を JIS L 材の平均値である 6.0%、コンクリートの調合条件として単位水量を 175kg/m^3 、CfFA 混入率を 20%（セメントと CfFA の総和に対する質量比）として乾燥収縮ひずみを試算した結果、**図-6.2.1** が得られた。これによると、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは再生粗骨材置換率の上限値を設けることで管理可能であることがわかる。例えば、水セメント比を 55% とした場合に再生粗骨材置換率を 40% 程度以下にすれば、乾燥収縮ひずみは 800×10^{-6} 以下となり目標値を満足する。

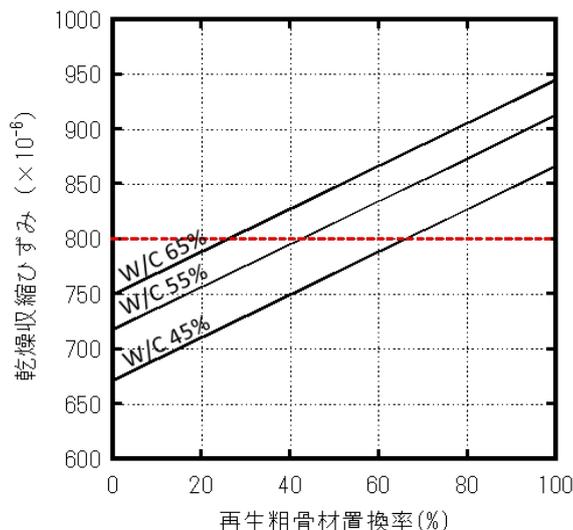


図-6.2.1 再生粗骨材置換率と乾燥収縮ひずみの計算値

次に、乾燥収縮ひずみの予測値が 800×10^{-6} となる場合の調合条件について、水セメント比と再生粗骨材置換率の関係を各単位水量で図-6.2.2 に示す。使用材料の吸水率については前述と同値とした。図より、当然の結果ではあるが、単位水量、または水セメント比が小さいほど目標値 (800×10^{-6}) を満足する最大の再生粗骨材置換率は大きくなる傾向にある。また、単位水量 $165 \sim 185 \text{ kg/m}^3$ 、水セメント比 $40 \sim 65\%$ の範囲で、再生粗骨材置換率は、CfFA 無混入の場合に $4 \sim 75\%$ 、CfFA20%混入の場合に $14 \sim 90\%$ で変動することがわかる。つまり、この調合条件下で、CfFA を 20%混入することによって再生粗骨材置換率を $10 \sim 15\%$ 増加できることがわかる。CfFA 混入による影響についての詳細は後述する。

一般に使用される再生コンクリートの調合を考慮して、仮に、水セメント比を $50 \sim 60\%$ 、単位水量を $175 \sim 185 \text{ kg/m}^3$ とした場合に、目標値を満足する最大の再生粗骨材置換率は、CfFA20%混入の場合に $22 \sim 53\%$ となる。したがって、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみが 800×10^{-6} 以下となる再生粗骨材置換率は最大でも 50% 程度以下であると言える。

以上、再生粗骨材の吸水率を 6.0% として、提案式を用いて検討を行った結果を示した。しかし、本研究で収集した再生粗骨材の吸水率はおおよそ $5 \sim 8\%$ と値にばらつきがあり、最大で 8.23% の骨材もあった。そこで、再生粗骨材吸水率の違いが再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測値に及ぼす影響について調べることにする。

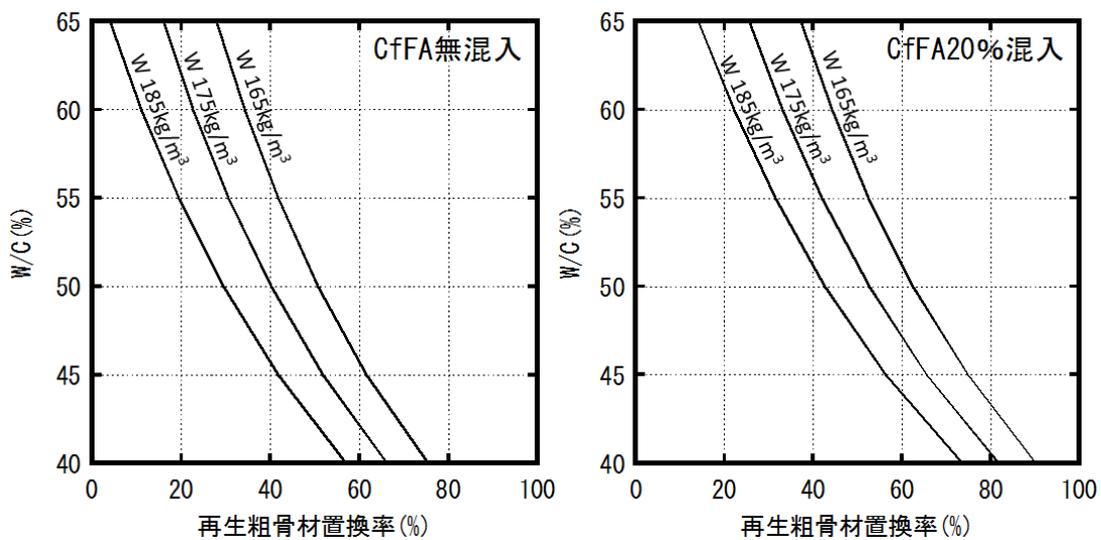


図-6.2.2 乾燥収縮ひずみの目標値 (800×10^{-6}) を満足する調合条件

目標値を満足する水セメント比と再生粗骨材置換率の関係を各吸水率で図-6.2.3 に示す。なお、単位水量は 175kg/m^3 としている。仮に、水セメント比を 50% とすると、再生粗骨材の吸水率が 5% から 9% に変化すると再生粗骨材置換率は CfFA 無混入の場合に 65% から 33%、CfFA20% 混入の場合に 59% から 30% になる。すなわち、吸水率が 5% から 9% になることによって、目標値を満足する最大の再生粗骨材置換率は半分程度に減少してしまう。特に、CfFA 無混入の場合には再生粗骨材吸水率 9% では再生粗骨材置換率を小さく設定しなければならない。

実際に、このような低品質な再生粗骨材を良質な普通粗骨材に少量混合して、それらの骨材を用いたコンクリートを限定的な用途に使用することは望ましくなく、グリーン調達的主旨からも外れるように思われる。一方、水セメント比を小さくすることで、再生粗骨材置換率を大きくすることは可能であるが、その場合にはコンクリート中の総アルカリ量が増加してしまうため、ASR などの問題が懸念される。

そこで、ここでは、再生粗骨材の最小置換率を 30%、再生コンクリートの水セメント比の上限値を 50% とした場合において、要求性能を満足する再生粗骨材の吸水率と置換率の関係を示すこととした。なお、図-6.2.3 には、上記の範囲外を網掛けで示している。これによれば、CfFA 無混入の場合には、水セメント比 50% では吸水率 8% 以上の再生骨材の使用は避けるべきであり、水セメント比 60% では吸水率 5% でも置換率は 30% を下回ってしまうことがわかる。また、CfFA20% 混入の場合には、水セメント比 50% では吸水率 9% でも使用可能であると言えるが、水セメント比 60% において吸水率 7% 以上では置換率は 30% を下回るため、その使用は望ましくない。

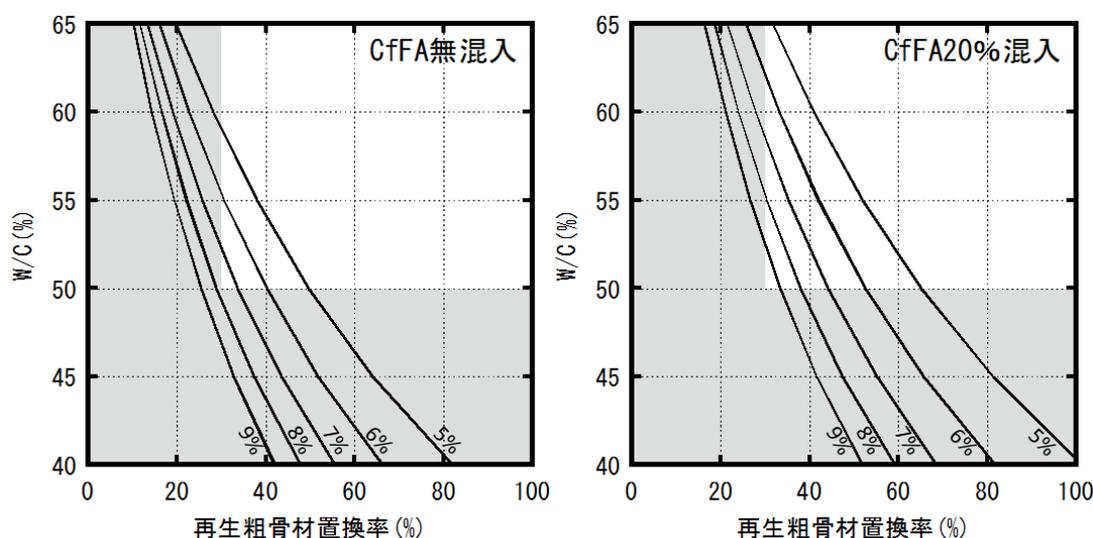


図-6.2.3 再生骨材の吸水率の違いによる影響

CfFA 混入率の違いによる影響について図-6.2.4 に示す。なお、調合条件として、単位水量を 175kg/m^3 、再生粗骨材の吸水率を 6.0% とした。図より、目標値を満足する最大再生粗骨材置換率は水セメント比が 50% の場合に、CfFA 無混入では 40% 程度、CfFA 混入率 20% では 50% 強、CfFA 混入率 30% では 60% 強であることがわかる。ASR 抑制効果が十分に期待される条件を考慮し、CfFA 混入率を $20\sim 30\%$ とすれば、CfFA 無混入の場合に比べ、再生粗骨材置換率を $10\sim 20\%$ 程度大きくすることが可能である。

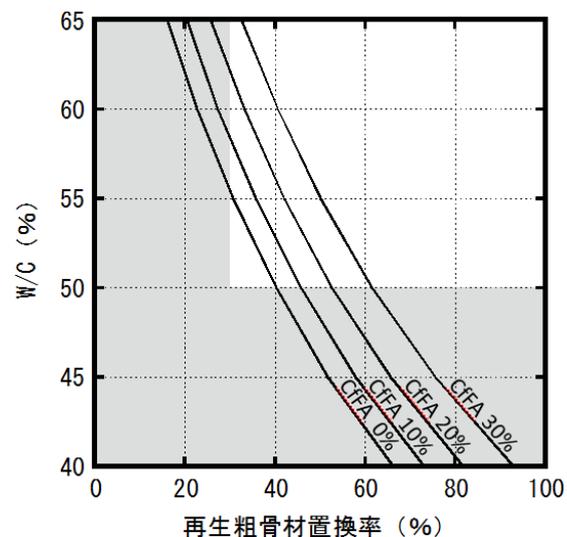


図-6.2.4 CfFA 混入率の違いによる影響

以上、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの目標値を 800×10^{-6} 以下とした場合において、その調合条件について第 5 章で得られた提案式を用いて検討した。調合条件として、最小の再生粗骨材置換率を 30% 、水セメント比を 50% 以上とした場合に、目標値を満足する最大の再生粗骨材置換率は骨材の吸水率や調合条件によって異なるが、おおよそ $30\sim 60\%$ であることを示した。また、CfFA を $20\sim 30\%$ 混入することによって、再生粗骨材置換率を $10\sim 20\%$ 程度大きくすることが可能であることを示した。ただし、以上の検討は、予測値の精度を考慮した安全係数は設定していないため、今後は安全係数を乗じた予測値を用いて、再生コンクリートの適用範囲を示す必要がある。

6.2.2 中性化

低品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートの中性化抵抗性について、既往の研究では、普通コンクリートと同等であるという結果を示しているもの^{例えば 6.2)}と、再生コンクリートの水セメント比が比較的大きく、再生骨材の原コンクリートが中性化されている場合に、またはその水セメント比が大きい場合に、劣るという結果を示しているもの^{6.3.6.4)}が存在した。これらを踏まえ、3章 (CfFA を用いた再生コンクリートの耐久性) において、数種類の低品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートに関して、促進中性化試験を行い、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートとほぼ同等であり、同水セメント比で比較した場合に再生粗骨材の使用、および CfFA 混入による影響はほとんど認められず、水セメント比による影響が支配的であることを実験的に示した。

ここでは、3章で得られた各実験データを整理し、中性化抵抗性を十分に有する再生コンクリートの水セメント比について検討する。

図-6.2.5 は JIS A 1153 (促進条件：温度 20℃、湿度 60%、CO²濃度 5.0%) に準じて行った実験結果について、中性化速度係数と水セメント比の関係を示したものである。図中の実線は、両者の関係を直線近似したものであり、点線は予測値 (実測値) の信頼区間 90% を示したものである。図より、ばらつきはあるものの、中性化速度係数はコンクリート種類によらず水セメント比とほぼ直線関係にあることがわかる。すなわち、骨材種類、または CfFA 混入の有無の違いによる影響は見られず、水セメント比によって評価可能であると言える。

日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)」における高耐久性コンクリートの目標品質のうち、中性化については、促進材齢 26 週において中性化深さが 25mm 以下 (中性化速度係数では 4.9mm/√ week に相当) としている。ここでは、中性化深さのばらつきを考慮して、信頼区間 90% の上限値から、中性化速度係数が 4.9 (mm/√ week) 以下となる水セメント比を調べると、おおよそ 65% 程度以下であることがわかった。

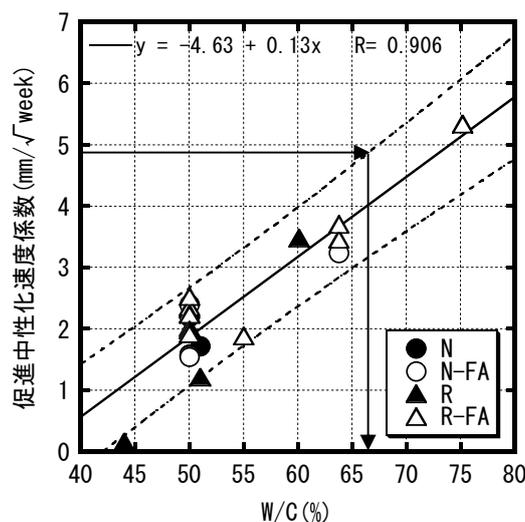


図-6.2.5 中性化速度係数と水セメント比および圧縮強度の関係

上記では、中性化抵抗性を有する再生コンクリートの水セメント比について本実験で得られたデータに基づいて検討した。次に、コンクリートの構造物はコンクリートの圧縮強度に基づいて設計されていることを考慮して、同等の強度を有する再生コンクリートと普通コンクリートの中性化速度係数について比較検討する。

第3章で得られた実験データについて、材齢28日における圧縮強度と促進中性化速度係数の関係を図-6.2.6に、室内曝露試験における中性化速度係数との関係を図-6.2.7に示す。なお、右図は圧縮強度の平方根の逆数で示したものである。これによれば、同等の圧縮強度で比較すると、圧縮強度が30~50N/mm²の範囲では、再生コンクリートの中性化速度係数は普通コンクリートに比べて小さくなるのがわかる。圧縮強度が30N/mm²以下の範囲では、普通コンクリートのデータがないために比較は出来ないが、同強度とした場合には、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートと同等か大きいと言える。

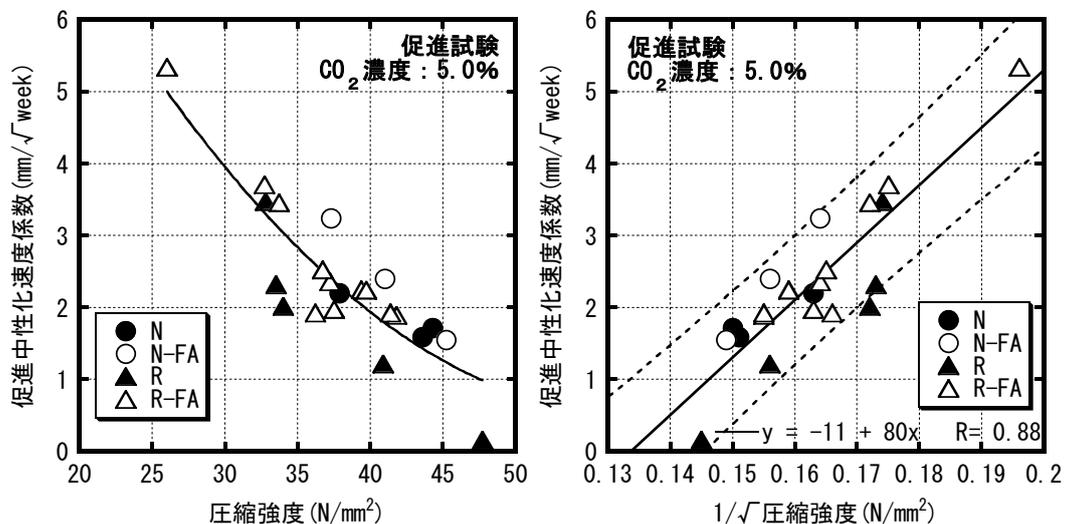


図-6.2.6 各中性化速度係数と圧縮強度の関係

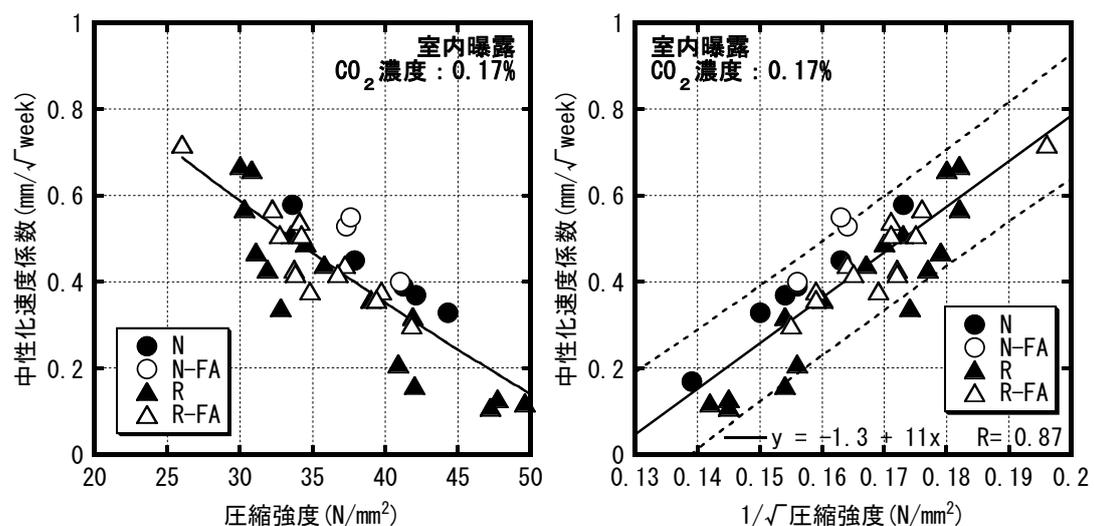


図-6.2.7 各中性化速度係数と圧縮強度の関係

以上、中性化抵抗性を有した再生コンクリートの調合条件について実験データに基づいて検討を行った。その結果、コンクリートの水セメント比を 65%以下とすれば、中性化抵抗性を有することが可能であることを示した。この 65%は、JASS 5 における普通コンクリートの水セメント比の上限値と同様であり、再生コンクリートも同様の範囲で中性化抵抗性を有すると言える。また、同等の圧縮強度で比較した場合、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートに比べて優れることを示した。したがって、再生コンクリートの設計強度を普通コンクリートと同様に最適値を設けることによって、中性化抵抗性については問題ないと言える。ただし、圧縮強度が 30N/mm^2 以下の範囲では、データが不足しているため、比較的強度域における再生コンクリートの中性化抵抗についてデータを蓄積し、検討を行う必要があるものと思われる。

6.2.3 凍結融解

既往の研究において、再生コンクリートの耐凍害性は普通コンクリートに比べ劣る傾向にあり、特に、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生粗骨材を使用した場合に耐久性指数は著しく低下することが^{6.5)}、また、耐久性指数は骨材の平均吸水率が大きいほど、水セメント比が大きいほど低下する傾向にあり、原コンクリートが AE コンクリートである再生粗骨材を使用する場合には、粗骨材の平均吸水率を 4%程度以下、コンクリートの水セメント比を 50%程度以下にすることによって、耐凍害性に優れた再生コンクリートとすることが可能であること^{6.6)}が示されている。

本項では、第 3 章で得られた実験データおよび既往データに基づいて、再生コンクリートの耐凍害性を有する調合条件について、粗骨材の平均吸水率に着目して検討する。

第 3 章で得られた実験データおよび既往の研究データ^{6.7,6.8)}について、耐久性指数と粗骨材の平均吸水率の関係を図-6.2.7 に示す。なお、既往のデータについて、水セメント比はすべて 55%以下 (50~55%) のものである。図より、耐久性指数は平均吸水率の増加に伴い低下する傾向を示す場合と、変化せず普通コンクリートと同等の値を示す場合の 2 つに大別されることが分かる。

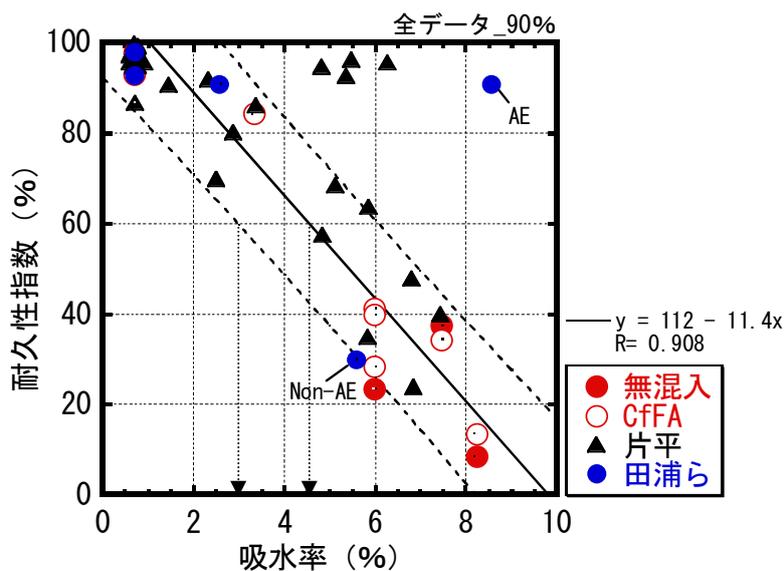


図-6.2.7 平均吸水率と耐久性指数の関係

この点については、田浦らの実験データ^{6.8)}によれば、吸水率が 8%を超えるような低品質な再生粗骨材であっても、原コンクリートが AE コンクリートである場合には、再生コンクリートの耐凍害性は普通コンクリートと同等であるが、Non-AE コンクリートである場合には著しく低下する傾向を示していることがわかる。この傾向は長瀧らの報告^{6.5)}と一致する。片平の報告^{6.7)}では、複数の研究者による実験データを収集したものとなっており、原コンクリートの空気量については不明である。また、本研究で使用した再生粗骨材の原コンクリートの空気量は不明であるが、元となった解体コンクリートは約 40 年前に建造されたものであり、粗骨材に川砂利が使用されていたことなどを考慮すると、原コンクリー

トは Non-AE コンクリートであったことが推察される。

いずれにせよ、原コンクリートが Non-AE コンクリートを使用する場合には、耐久性指数は粗骨材の平均吸水率の増加に伴い著しく低下する傾向にあり、耐久性指数 85%以上とするのは極めて困難である。また、使用する骨材について、原コンクリートが AE コンクリートであるかを判断する手法、すなわち、再生粗骨材自体の耐凍害性を判別する方法が提案されている^{6.11)}が、低品質再生骨材は、特に、不特定多数の場所を発注源とすることが予想されるため、現状では実用は困難であると判断する。したがって、低品質再生骨材を使用する用途として、耐久性指数 85%が求められるような部位には使用しないことを原則とすることが望ましい。

建築学会「建築工事標準仕様書・同解説」鉄筋コンクリート工事では、耐凍害性を有する耐久性指数について、寒冷地に建設する建築物の激しい凍結融解作用を受ける部分に使用するコンクリートについて、耐久性指数 85%以上を標準的な値としている^{6.9)}が、「40～60%の場合は耐久性にやや問題があり、60%以上の場合はおそらく十分な耐久性と言える」^{6.10)}とも考えられている。

そこで、ここでは、激しい凍結融解作用を受ける部分以外での用途を想定し、耐久性指数が 60%以上であれば、ある程度の耐凍害性を有するものと判断し、**図-6.2.7**をもとに同指数が 60%以上となる再生コンクリートの調合条件について検討を行うこととした。

3章で得られた結果から、CfFA 混入によって、耐凍害性は若干改善される傾向にあることが認められたものの、データ数が充分でないこと、また、無混入の場合と大差はなく顕著な改善効果は見られなかったことを考慮して、ここでは CfFA 混入による影響はないものと仮定した。

図中に示す実線は、吸水率の増加に伴い耐久性指数が著しく低下したデータに関して、最小二乗法により直線近似したもの、点線はその計測値の信頼区間 90%の範囲を示したものである。これによれば、平均値で評価した場合には、耐久性指数が 60%以上となる時平均吸水率は 4%程度以下であると判断される。しかし、データのばらつきを考慮して安全側の評価とした場合、すなわち、信頼区間 90%の下限值で評価した場合には平均吸水率は 3%程度以下であると判断される。

したがって、ある程度の耐凍害性を有する（耐久性指数が 60%以上である）再生コンクリートとする場合には、水セメント比を 50%以下とし、平均吸水率を 3%以下にすることが望ましいと考えられる。平均吸水率 3%以下を満たす再生粗骨材置換率は、普通粗骨材の吸水率が 0.8%である場合に、再生粗骨材の吸水率 5%では 52%、6%では 42%、7%では 35%、8%では 31%以下と試算される。つまり、乾燥収縮ひずみにおける検討と同様に最小の再生粗骨材置換率を 30%とした場合、耐凍害性の観点からは、再生粗骨材吸水率が 8%以上のものは使用を避けることが望ましい。

6.3 まとめ

本章（第6章 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲）では、これまでの結果と既往の研究成果に基づいて、低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの目標値を 800×10^{-6} 以下とした場合において、その調合条件について第5章で得られた提案式を用いて検討した。調合条件として、最小の再生粗骨材置換率を30%、水セメント比を50%以上とした場合に、目標値を満足する最大の再生粗骨材置換率は、骨材の吸水率や調合条件によって異なるが、おおよそ30~60%であることを示した。また、CfFAを20~30%混入することによって、再生粗骨材置換率を10~20%程度大きくすることが可能であることを示した。
- 2) 再生コンクリートの水セメント比を65%以下とすれば、中性化抵抗性を有することが可能であることを示した。また、同等の圧縮強度で比較した場合、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートに比べて優れることを示した。ただし、圧縮強度が 30N/mm^2 以下の範囲では、データが不足しているため、さらにデータを蓄積し、検討を行う必要がある。
- 3) 再生コンクリートの耐凍害性は、原コンクリートがAEコンクリートである場合には普通コンクリートと同等であるが、Non-AEコンクリートである再生粗骨材を使用する場合には著しく低下する。したがって、耐久性指数85%以上が要求されるコンクリート部位には使用不可である。しかし、ある程度の耐凍害性を有する（耐久性指数が60%以上である）再生コンクリートとする場合には、水セメント比を50%以下とし、平均吸水率を3%以下にすることが望ましいと考えられる。平均吸水率3%以下を満たす再生粗骨材置換率は、再生粗骨材吸水率6%では40%程度である。

上記をまとめると表-6.3.1 のようになる。しかしながら、耐凍害性に関する検討においては、原コンクリートがNon-AEコンクリートであるデータが不足しているため、さらにデータを蓄積し検討する必要がある。

表-6.3.1 各要求性能を満足する再生コンクリートの調合条件の一例

項目	目標値	再生粗骨材置換率*1	水セメント比	備考
乾燥収縮	800×10^{-6} 以上	30~60%以下	—	調合条件によって異なる
中性化	25mm以下*2	—	65%以下	—
凍結融解	耐久性指数60%以上	40%以下	50%以下	—

*1 再生粗骨材の吸水率を6.0%とした場合

*2 促進中性化試験(JIS A 1125)における促進期間26週における中性化深さ

【第6章 参考文献】

- 6.1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.185-190、2009
- 6.2) 村上順一、山崎順二、二村誠二、再生骨材の性能評価と再生コンクリート特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1515-1520、2004
- 6.3) 道正泰弘、菊池雅史、増田彰、小山明男：原コンクリートの性質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、第485号、pp.1-10、1996.7
- 6.4) 道正泰弘、菊池雅史ほか：再生コンクリートの建築構造用コンクリートへの適用（その9.原コンクリートの中性化が再生コンクリートの品質に及ぼす影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.153-154、1999.9
- 6.5) 長瀧重義：ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書、2001
- 6.6) 佐藤靖彦、佐々木慎一、奥山英俊、今野克幸：再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1503-1508、2004
- 6.7) 片平博：再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響、セメント・コンクリート、No.654、pp.38-44、2001.8
- 6.8) 田浦裕二郎、添田政司、大和竹史、池翰相：再生骨材の品質がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響、土木学会第60回年次学術講演会、pp.775-776、2005.9
- 6.9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.612-624、2009
- 6.10) 後藤幸正、尾坂芳夫監訳：ネビルのコンクリートの特性、技報堂出版、1979
- 6.11) 片平博、渡辺博志：再生骨材の耐凍害性評価手法の研究、コンクリート工学論文集、Vol.21、No.1、pp.25-33、2010.1

第7章

結論

7章 結論

7.1 本研究のまとめ

建物などの解体によって生じるコンクリート塊をコンクリート用骨材（再生骨材）として積極的に利用するために、2005～2007年にかけて、JISにおいて再生骨材は高品質、中品質、低品質に3分類され規格化されたが、高品質な場合には、製造コストの増加や副産物として発生する微粉末の処理に困窮するなどの問題を抱えており、中品質なものも含めコンクリート用骨材としてほとんど製造されていない現状にある。そこで、本研究では、特別な処理や処理に大量のエネルギーを要しない低品質再生骨材の利用を拡大することが重要であると考え、JISで低品質再生骨材として位置づけられているコンクリート用再生骨材の適用範囲を明らかにすることを目的として、実験研究に取り組んだ。

再生骨材は不特定多数のコンクリート構造物のコンクリート塊を破砕して造られるため、アルカリシリカ反応に対しては十分な注意が必要であることが指摘されている。その対策として高品質フライアッシュ（Carbon-free Fly Ash、以下、CfFA）を用いることを前提にした低品質再生骨材コンクリート（以下、再生コンクリート）の材料設計法の確立に必要な基礎資料を得るために、再生骨材の品質および置換率がコンクリートの強度性状や耐久性（中性化抵抗性、乾燥収縮、凍結融解抵抗性）に及ぼす影響、ならびに CfFA 混入による再生コンクリートの品質改善効果について実験的検討を行った。次いで、再生コンクリートの圧縮強度および乾燥収縮ひずみについて、実用的で汎用性のある予測式の構築を試みた。さらに、一連の実験および既往の研究から得られた成果を整理し、再生コンクリートの適用範囲を示した。

以下に、各章で得られた知見を整理し、本研究の結論とする。

第1章「序論」においては、本研究の背景および目的を述べるとともに、本論文の構成を示した。

第2章「再生コンクリートに関する既往の研究」では、日本国内における再生コンクリートに関する技術と実用化の現状についてまとめた。また、再生骨材の品質およびその置換率が再生コンクリートの各性状に及ぼす影響について整理するとともに、再生骨材使用時に特に懸念されるアルカリシリカ反応に対するフライアッシュの抑制効果について得られている成果をまとめた。さらに、再生コンクリートの品質管理手法に関して既往の研究で提案されている方法を整理し、その課題について述べた。

再生コンクリートに関する技術と実用化の現状について、再生骨材の品質ごとに、その特性と問題点についてまとめ、低品質再生骨材のコンクリート用骨材として利用を普及させることが望ましいことを社会的背景に基づいて示した。また、再生骨材の品質に関わらず、アルカリシリカ反応に対する予防的な対策が極めて重要であるが、その技術は発展途上にあり、そのことが再生コンクリートの利用普及の妨げになっていることを示した。

再生コンクリートの各性状について、流動性は砕石を再生粗骨材に置き換える場合には

普通コンクリートと同等であること、圧縮強度は通常の強度の範囲内（50N/mm²以下）では普通コンクリートと同様にセメント水比と直線関係にあること、また、再生骨材の吸水率およびその置換率の増加に伴い、ほぼ直線的に低下する傾向にあり、その低下率は再生粗骨材置換率 100%の場合に吸水率 1%あたり 4%であり、吸水率 6%では 20%程度になるようである。

耐久性について、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートのものと比べて大きくなり、その増加率は再生粗骨材の吸水率、またはその置換率の増加に伴い大きくなる傾向にあること、また、水セメント比や単位水量を小さくすることで低減できることが示されていた。再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートと同等であるかやや劣る傾向にあるが、水セメント比による影響が最も大きいことから、適切な水セメント比の上限値を設けることによって十分な中性化抵抗性を有する再生コンクリートとすることが可能であることがわかった。再生コンクリートの耐凍害性は普通コンクリートに比べ劣る傾向にあり、特に、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生粗骨材を使用した場合に耐久性指数は著しく低下することが示されていた。

再生コンクリートの ASR について、反応性を有する再生骨材を使用した場合でも、フライアッシュの ASR 抑制効果は十分に期待でき、反応性を有する再生骨材を使用した場合においても、フライアッシュの ASR 抑制効果は十分に期待できることがわかった。また、ASR 抑制効果が期待できるフライアッシュの最小置換率は 15～25%の間に存在するものと考えられる。

さらに、再生コンクリートの品質評価手法について、圧縮強度や乾燥収縮についていくつかの予測式が提案されているものの、実用的で汎用性のある予測式は提案されていないのが現状であり、研究の余地があることが分かった。

第 3 章「CfFA を混入した再生コンクリートの耐久性」では、低品質再生粗骨材を用いた CfFA 混入コンクリートの材料設計法の確立に必要な基礎資料を得るために、再生骨材の品質および置換率、CfFA 混入率が再生コンクリートの強度性状、ならびに中性化抵抗性、乾燥収縮、耐凍害性、アルカリシリカ反応性などの耐久性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験的に検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

再生コンクリートの流動性は、洗浄を行った低品質骨材を用いた場合に普通コンクリートと同等であるが、洗浄を行っていない微粒分を多く含む再生粗骨材を使用した場合や標準粒度範囲外で粒度分布が細かめの再生骨材を使用した場合に流動性は低下する傾向にある。また、CfFA を内割混入した場合にはコンクリートの流動性は向上する傾向にあるが、外割混入した場合など低水紛体比で紛体量が多い場合には流動性は低下するため混和剤の使用などにより調整する必要がある。再生コンクリートの塩分含有量は、再生粗骨材中に含まれる塩分含有量も考慮する必要があることから普通コンクリートのものに比べて多くなる傾向にあるが、吸水率 6%程度の再生粗骨材を用いた場合に最大でも 0.13kg/m³であり、規定値の 0.3kg/m³を大きく下回っていることから、特に問題はないといえる。

再生コンクリートの圧縮強度は再生粗骨材の吸水率およびその置換率の増加に伴いほ

ば直線的に低下する傾向を示し、その低下率は置換率 100%の場合（吸水率 6%程度）に普通骨材コンクリートに比べ平均で 2 割程度である。また、圧縮強度が 50N/mm^2 以上の場合においては、少量置換（5~20%）でも著しく強度が低下する場合があるため配慮が必要である。一方、CfFA 混入による影響として、CfFA を内割混入した場合には無混入に比べ圧縮強度は低下するが、外割混入した場合には、CfFA 混入率の増加に伴いほぼ直線的に大きくなり、混入率 30%では無混入に比べ 2 割程度増加する。さらに、標準養生を行った場合に CfFA 混入コンクリートは長期強度発現性に優れ、材齢 1 年における材齢 28 日の圧縮強度に対する増加率は無混入のもの約 2 倍である。再生コンクリートのヤング係数は、既往の研究結果と同様に、普通骨材コンクリートに比べ小さくなるものの、コンクリートの単位体積質量を考慮した建築学会式によっておおよそ評価可能である。

再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは再生粗骨材の吸水率および置換率の増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示し、各基準コンクリートに比べ、2~7 割増加する。しかし、CfFA の混入によってひずみは平均で 4~10%程度低減され、CfFA 混入による若干の収縮低減効果が期待できる。再生コンクリートの中性化抵抗性は、同水セメント比で比較した場合に再生粗骨材の吸水率および置換率、CfFA 混入の有無に関わらず、普通コンクリートとほぼ同等であり、水セメント比による影響が支配的である。再生コンクリートの耐凍害性は、再生粗骨材の吸水率の増加に伴いほぼ直線的に低下する傾向にあり、再生粗骨材置換率 100%の場合に著しく低下するが、普通粗骨材と混合使用し、粗骨材の平均吸水率を 3%程度以下にすることによって普通コンクリートとほぼ同等となる。また、CfFA の外割混入によって若干改善される傾向にある。

再生コンクリートの ASR に関して、化学法で「無害でない」と判定された安山岩および再生骨材を用いて検討した結果、CfFA 混入率の増加に伴って膨張率も抑制され、混入率 5%ないし 10%以上の混入率であれば十分な ASR 抑制効果が期待されることが分かった。また、コンクリートを用いた ZKT 法による検討結果では、モルタルバー法において反応性が確認された再生骨材でも「反応性なし」となり、必ずしも ASR を起こさない場合が考えられた。

第 4 章「再生コンクリートの圧縮強度予測手法の提案」では、第 3 章で得られた実験データを用いて再生コンクリートの圧縮強度の実用的な予測手法の提案を目指して検討を行った。その結果、基準コンクリートの圧縮強度と C/W の関係式に基づいて、再生粗骨材と普通粗骨材の吸水量の差 (ΔW) を単位水量に加えた W' ($=W+\Delta W$) およびフライアッシュの強度寄与率 (k) を考慮した見かけの単位セメント量 C' ($=C+k \cdot CfFA$) を用いた C'/W' で強度管理が可能であり、任意の材齢においても CEB-FIP1990 モデルコード式を用いることで精度良く推定できることを明らかにした。さらに、品質の異なる 6 種類の低品質再生粗骨材を用いた場合においても、同手法によって推定可能であることを示した。

第 5 章「再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式の提案」では、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみの実用的な予測式を提案することを目的として、第 3 章における実験データ

および既往の研究データを用いて検討を行い、日本建築学会式を基にした乾燥収縮ひずみの予測式の構築を試みた。その結果、再生コンクリートの終局乾燥収縮ひずみに及ぼす調合上の最も大きな影響因子は骨材の吸水率であることが確認できた。次いで、目的変数をコンクリートの終局ひずみ、説明変数を単位水量、単位セメント量、単位フライアッシュ量、細骨材および粗骨材の吸水率として重回帰分析を行った結果、得られた式から算出した予測値は実測値をある程度表すことが可能であることがわかった。得られた式を建築学会式の調合による影響を表す係数に組み込み、乾燥収縮ひずみを予測した結果、骨材種類によらずコンクリートの乾燥収縮ひずみをおおよそ予測可能であることを示した。

第6章「低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲」では、以上の結果と既往の研究成果に基づいて、低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの適用範囲について検討を行った。

乾燥収縮ひずみに関して、その目標値を 800×10^{-6} 以下とした場合において、目標値を満足する再生コンクリートの調合条件について第5章で得られた提案式を用いて検討した。調合条件として、最小の再生粗骨材置換率を30%、水セメント比を50%以上とした場合に、目標値を満足する最大の再生粗骨材置換率は、骨材の吸水率や調合条件によって異なるが、おおよそ30~60%であることを示した。また、CfFAを20~30%混入することによって、再生粗骨材置換率を10~20%程度大きくすることが可能であることを示した。

中性化抵抗性に関して、再生コンクリートの水セメント比を65%以下とすれば、中性化抵抗性を有することが可能であることを示した。また、同等の圧縮強度で比較した場合、再生コンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートに比べて優れることを示した。ただし、圧縮強度が 30N/mm^2 以下の範囲では、データが不足しているため、さらにデータを蓄積し、検討を行う必要がある。

再生コンクリートの耐凍害性は、原コンクリートがAEコンクリートである場合には普通コンクリートと同等であるが、Non-AEコンクリートである再生粗骨材を使用する場合には著しく低下する。したがって、耐久性指数85%以上が要求されるコンクリート部位には使用不可である。しかし、ある程度の耐凍害性を有する（耐久性指数が60%以上である）再生コンクリートとする場合には、水セメント比を50%以下とし、平均吸水率を3%以下にすることが望ましいと考えられる。平均吸水率3%以下を満たす再生粗骨材置換率は、再生粗骨材吸水率6%では約40%以下である。

第7章「結論」では、各章の結論をまとめ、今後の課題について述べている。

7.2 今後の課題と展望

本研究では、CfFA を混入した再生コンクリートの耐久性について実験的に検討を行い、圧縮強度の予測手法、ならびに建築学会式に基づいた乾燥収縮ひずみの予測式の提案を行った。今後の課題について、項目ごとに以下に示す。

再生コンクリートの圧縮強度について、提案した手法に用いた実験データは充分とは言えないため、既往の研究データについても検討する必要がある。また、CfFA の物性や化学組成が再生コンクリートの強度発現性に及ぼす影響について、さらにデータを蓄積し、検討する必要がある。

再生コンクリートの乾燥収縮ひずみについて、提案式による予測値は実測値をおおよそ表すことが明らかにされたが、実測値が大きくなるほど過小評価する傾向にある点が課題として残る。この点については、改善の余地があるため、今後さらにデータを蓄積し、特に、再生粗骨材の使用に伴う見かけの単位水量の増加、並びに正味の粗骨材量の減少によるそれぞれの影響について、総合的な評価をする必要がある。

再生コンクリートの耐凍害性について、原コンクリートが Non-AE コンクリートである再生骨材を用いた場合について、既往研究データも含めデータ数が不足していることから、さらにデータを蓄積し検討する必要がある。また、CfFA 混入による改善効果が若干見られたが、再生粗骨材置換率 100%（吸水率 5~8%）であったために、劣化が著しく吸水率による影響が支配的な結果となった。したがって、耐久性指数 60% 付近となる平均吸水率、すなわち、3~4% の範囲において、CfFA 混入による影響を明らかにしたい。

再生コンクリートの ASR について、モルタルバー法により反応性を有する再生骨材が存在することが確認され、CfFA の使用による ASR 抑制効果も確認されたものの、ZKT-206 法によるコンクリートバーを用いた促進試験では、“無害” の判定となった。この点について、再生骨材に含まれるアルカリ量、新モルタルのアルカリ量、アルカリ分と反応性骨材の接触面積や、反応残存率などの影響も含め、さらに検討を行い、再生コンクリートの ASR と CfFA 抑制効果を定量的に評価する必要がある。

以上、再生粗骨材を用いた再生コンクリートの耐久性に関して、本研究で得られた成果と今後の課題および展望について述べた。再生コンクリートの実用化に向けて引き続き検討を行っていききたい。

付録

低品質再生粗骨材のコンクリート製品への適用性について

付-1 コンクリート製品工場における試験練り

1.1 実験目的

本論文では、低品質再生粗骨材の有効利用として、生コンクリートでの使用を実用化するために検討を行ってきた。しかしながら、低品質な再生粗骨材がそれらの用途に使用されている実例は少なく、生コンクリートとしての利用は普及していない現状にある。そこで、ここでは低品質な再生粗骨材（以下、再生骨材）のコンクリート製品としての利用が可能であるか検討を行うこととした。以下、再生骨材を用いたコンクリートを再生コンクリートと称することとする。

1.2 実験概要

本節では、大分県内の2箇所のコンクリート製品工場において試験練りを行い、再生骨材を用いた CfFA 混入コンクリートの各性状を把握するための実験を行い、製品への適用が可能であるか検討を行う。

1.2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント（密度： 3.16g/cm^3 ）を、混和剤には各工場で使用されている高性能減水剤を使用した。使用した骨材の物性を表-1.1 に示す。再生骨材の品質は JIS の中品質再生骨材に相当するものであった。図-1.1 に再生粗骨材の粒度分布を示す。使用した CfFA の物性を表-1.2 に示す。

表-1.1 骨材の物性

工場	骨材種類		表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率 (%)	微粒分量 (%)
A	細	山砂	2.60	2.57	1.24	—	2.74	0.9
	粗	碎石	2.65	2.64	0.52	60.2	6.57	0.8
B	細	海砂	2.60	2.56	1.43	62.7	1.90	0.5
	粗	碎石	2.72	2.71	0.38	59.3	6.67	0.4
再生粗骨材			2.48	2.37	4.92	57.7	6.81	0.9
JIS L 材			—	—	7.0 以下	—	—	2.0 以下
JIS M 材			—	2.3 以上	5.0 以下	—	—	1.5 以下

表-1.2 CfFA の物性

二酸化ケイ素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	フロー値比 (%)	活性度指数(%)	
						28 日	91 日
65.9	0.12	0.98	2.31	2796	103.9	89.8	92.8

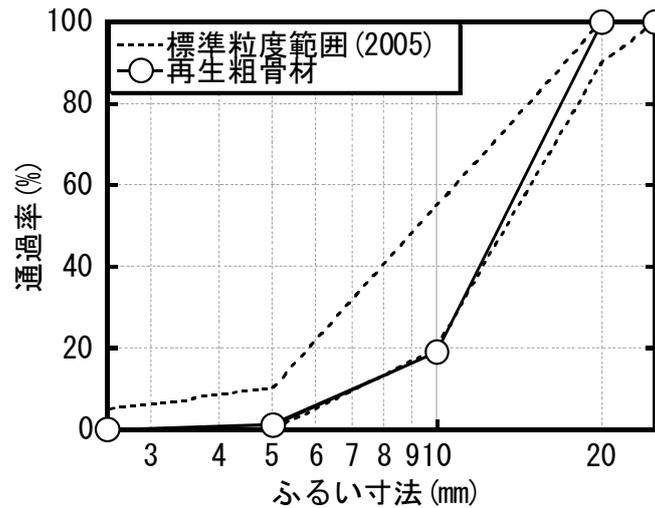


図-1.1 再生粗骨材の粒度分布

1.2.2 調合

表-1.3 に調合概要を、表-1.4 に調合をそれぞれ示す。コンクリートの種類は、表中に示すように A 工場では 6 種類、B 工場では 5 種類である。水セメント比は、CfFA を混入したものについて、A 工場では 3 水準、B 工場では 2 水準とした。また、一般的に再生コンクリートの圧縮強度は低下する傾向にあるため、標準養生を行った供試体の材齢 14 日における圧縮強度がほぼ同程度となる水セメント比を、予備実験により得られた関係式により算出し、表-1.4 のように設定した。再生粗骨材の置換率は 0、50 および 100% の 3 水準とし、CfFA の置換率は、既往の研究によりアルカリシリカ反応の抑制効果が充分であるとされている範囲を考慮し、セメントに対して質量比で 20% としたが、A 工場では 30% についても検討した。

目標スランプおよび目標空気量は表に示すように各工場の目標値に設定した。単位水量は各工場の基準調合の値に統一し、A 工場では、所要のスランプが得られるように高性能減水剤による調整を行い、B 工場では添加率を統一し、混和剤の調整を行わなかった。

表-1.3 調合概要

工場	RG 置換率 (%)	W/P (%)	FA/ (C+FA) (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)
A	0、50、100	3 水準	20、30	15±2.0	2.0±1.5
B	0、50、100	2 水準	20	5±2.0	2.0±1.5

表-1.4 調合およびフレッシュコンクリートの試験結果

工場	調合 No.	種類	RG 置換率 (vol%)	W/C (%)	FA/ (C+FA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
							W	C	CfFA	S	G	RG
A	1	N-43	0	43.0	0	41.6	160	372	0	760	1087	0
	2	N-CfFA20-54		53.8	20	40.9	160	297	74	738	1087	0
	3	N-CfFA20-49		48.4		39.7	160	331	83	701	1087	0
	4	N-CfFA20-43		43.0		38.0	160	372	93	655	1087	0
	5	R100-41	100	41.0	0	43.6	160	390	0	789	0	975
	6	R100-CfFA20-51		51.3	20	42.8	160	312	78	766	0	975
	7	R100-CfFA20-46		46.1		41.6	160	347	87	727	0	975
	8	R100-CfFA20-41		41.0		39.9	160	390	98	679	0	975
	9	R50-CfFA20-42	50	42.0	20	39.0	160	381	95	667	543	487
	10	R100-CfFA30-41	100	41.0	30	37.0	160	390	167	601	0	975
	11	N-43'	0	43.0	0	41.6	160	372	0	760	1087	0
B	1	N-55	0	55.0	0.0	48.3	165	300	0	898	1016	0
	2	N-CfFA20-62		61.9	20	47.0	165	267	67	851	1016	0
	3	N-CfFA20-55		55.0		45.9	165	300	75	814	1016	0
	4	R100-50	100	50.0	0.0	49.1	165	330	0	899	0	898
	5	R100-CfFA20-56		56.3	20	47.6	165	293	73	848	0	898
	6	R100-CfFA20-50		50.0		46.4	165	330	83	807	0	898
	7	R100-CfFA20-53		50.0		46.2	165	314	79	811	508	449

1.2.3 養生方法および試験項目

表-1.5 に養生方法および試験項目を、表-1.6 に圧縮試験用供試体の養生方法と試験材齢を示す。養生方法は、表に示すように3種類である。蒸気養生は各工場で行われている方法に従って行った。また、乾燥収縮試験および促進中性化試験の脱型後の養生方法は各試験方法に従って行った。

表-1.5 養生方法および試験項目

分類	項目	養生	A	B	試験方法
硬化前	スランプ	-	○	○	JIS A 1101
	空気量				JIS A 1128
	単位容積質量				JIS A 1116
	温度				JIS A 1156
硬化後	圧縮強度 ヤング係数	標準	○	○	JIS A 1108
		蒸気	○	○	
	乾燥収縮	標準	○	○	JIS A 1129-2
		蒸気	○	-	
	促進中性化	標準	○	○	JIS A 1153
		蒸気	○	-	-

表-1.6 圧縮試験用供試体の養生方法と試験材齢

工場	養生方法			試験材齢(日)				
	初期	脱型後	記号	1	14	28	91	365
A	蒸気	水中	蒸気-水中	-	○	-	○	○
	蒸気	気中	蒸気-気中	○	○	-	-	-
	標準			-	○	○	○	○
B	蒸気	水中	蒸気-水中	-	○	-	-	-
	蒸気	気中	蒸気-気中	○	○	-	-	-
	標準			-	○	○	-	-

1.3 実験結果および考察

1.3.1 フレッシュ性状

表-1.7 にフレッシュコンクリートの試験結果を、図-1.2 にスランプおよび空気量を示す。CfFA 無混入の場合、再生コンクリートのスランプは普通骨材コンクリートに比べ、2cmほど小さくなったが、CfFA を混入した調合では、コンクリートの流動性は向上し、混和剤使用量は減少する傾向を示した。高粉体水比になるにつれて、フライアッシュによる流動性向上の効果も小さくなる傾向を示した。空気量は全体的にややばらつきがあるものの全調合において目標値を満足した。

表-1.7 コンクリートの試験結果

工場	No.	種類	W/B (%)	W/C (%)	混和剤添加量 (P×%)	フレッシュ性状			
						スランプ (cm)	Air (%)	CT (°C)	単位容積質量 (t/m ³)
A	1	N-43	43.0	43.0	0.75	16.0	1.3	21.0	2.40
	2	N-CfFA20-54	43.0	53.8	0.73	17.0	0.8	21.0	2.39
	3	N-CfFA20-49	38.7	48.4	0.73	14.5	1.1	21.5	2.39
	4	N-CfFA20-43	34.4	43.0	0.65	20.0	1.0	21.5	2.38
	5	R100-41	41.0	41.0	0.65	14.5	1.1	20.0	2.32
	6	R100-CfFA20-51	41.0	51.3	0.60	15.5	1.6	20.5	2.30
	7	R100+CfFA20-46	36.9	46.1	0.55	17.0	1.6	20.0	2.29
	8	R100+CfFA20-41	32.8	41.0	0.58	18.0	1.4	20.5	2.30
	9	R50+CfFA20-42	33.6	42.0	0.55	13.5	1.5	21.0	2.34
	10	R100+CfFA30-41	28.7	41.0	0.68	19.5	1.0	20.8	2.31
	11	N-43'	43.0	43.0	0.75	17.0	1.1	21.0	2.40
B	1	N-55	55.0	55.0	1.20	5.5	1.4	19.0	2.40
	2	N-CfFA20-62	49.5	61.9	1.20	10.0	0.9	19.5	2.40
	3	N-CfFA20-55	44.0	55.0	1.20	9.0	1.1	19.5	2.40
	4	R100-50	50.0	50.0	1.20	3.0	2.5	19.5	2.31
	5	R100-CfFA20-56	45.0	56.3	1.20	6.5	1.5	19.0	2.31
	6	R100-CfFA20-50	40.0	50.0	1.20	6.0	1.6	20.0	2.31
	7	R100-CfFA20-53	42.0	52.5	1.20	6.5	1.1	19.5	2.36

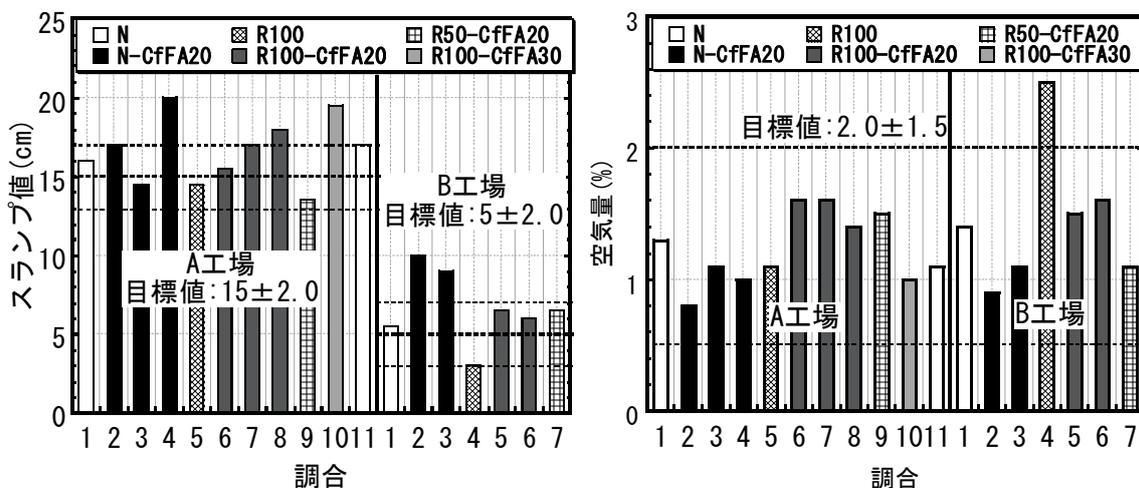


図-1.2 スランプおよび空気量

1.3.2 圧縮強度

図-1.3 に蒸気養生を行ったコンクリートの脱型時における圧縮強度(材齢1日)を示す。脱型時における目標強度は 10N/mm^2 とされているが、A 工場の No.9 の調合を除くすべての調合において目標値を満足した。

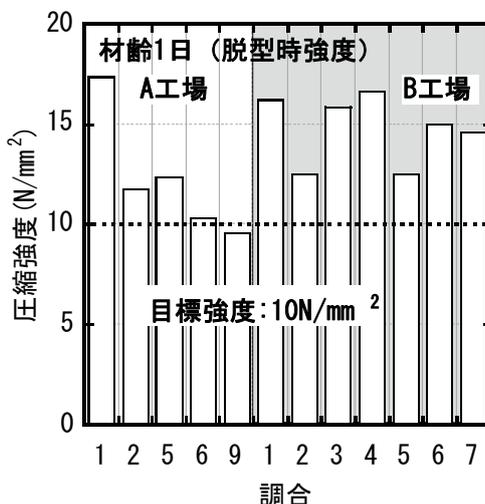


図-1.3 脱型時圧縮強度

図-1.4 に材齢14日における圧縮強度を養生別に表示している。養生方法の違いによる影響として、圧縮強度は、標準養生、蒸気-水中養生、蒸気-気中養生の順に大きな値を示した。目標とする圧縮強度は蒸気-水中養生の供試体に関して、A 工場では、 30N/mm^2 、B 工場では 26.5N/mm^2 であるが、A 工場の No.6 を除くすべての調合において目標値を満足した。CfFA は初期材齢における強度寄与率はほとんど期待できないため、CfFA を内割混入する場合は、最大の水セメント比を設定する必要がある。

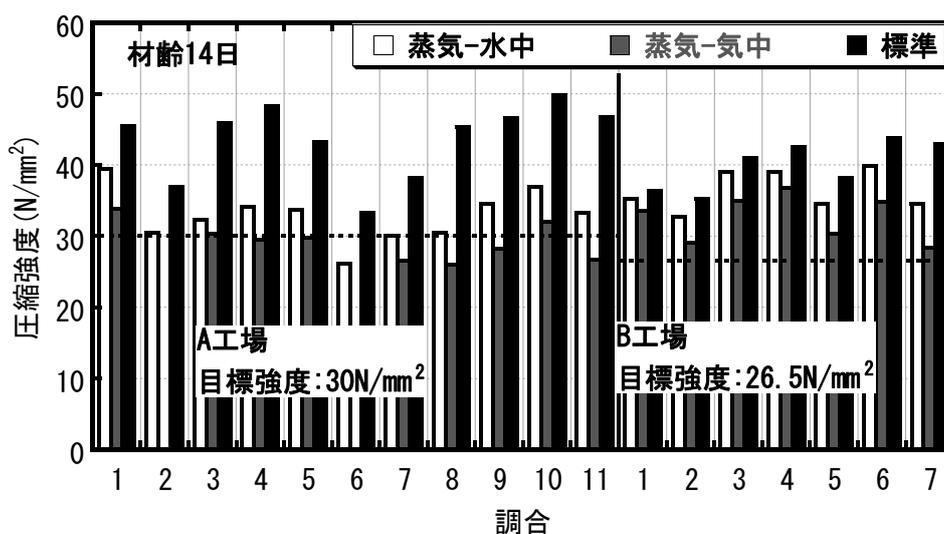


図-1.4 材齢14日における圧縮強度

図-1.5 に圧縮強度とセメント水比の関係を示す。蒸気養生を行った場合においてもセメント水比と圧縮強度は正の相関があることから、セメント水比によって強度管理が可能であり、再生骨材を使用した場合であっても水セメント比を小さくすることで目標値を満足することができることが分かる。

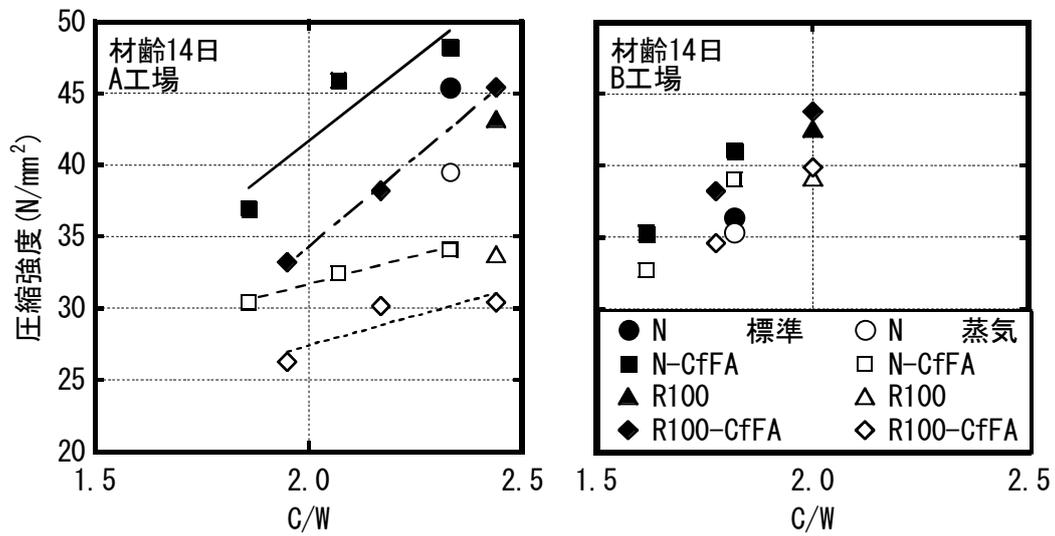


図-1.5 圧縮強度とセメント水比の関係

1.3.3 ヤング係数

図-1.6 に圧縮強度とヤング係数の関係を養生方法と骨材種類ごとに示している。同じ圧縮強度で比較すると、再生コンクリートのヤング係数は普通骨材コンクリートのそれよりも小さな値を示した。これは骨材の密度の差によるものであり、コンクリート密度を考慮すれば RC 規準式をおおよそ満足する。また、CfFA 混入の有無による影響は見られなかったが、養生方法の違いによる影響として、蒸気-気中養生の供試体は全体的に小さな値を示した。

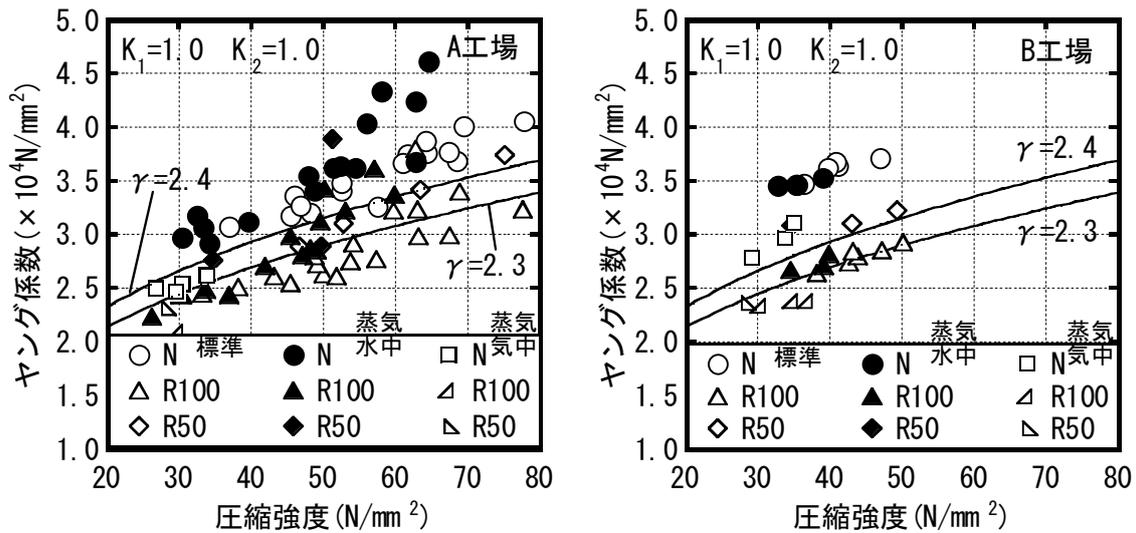
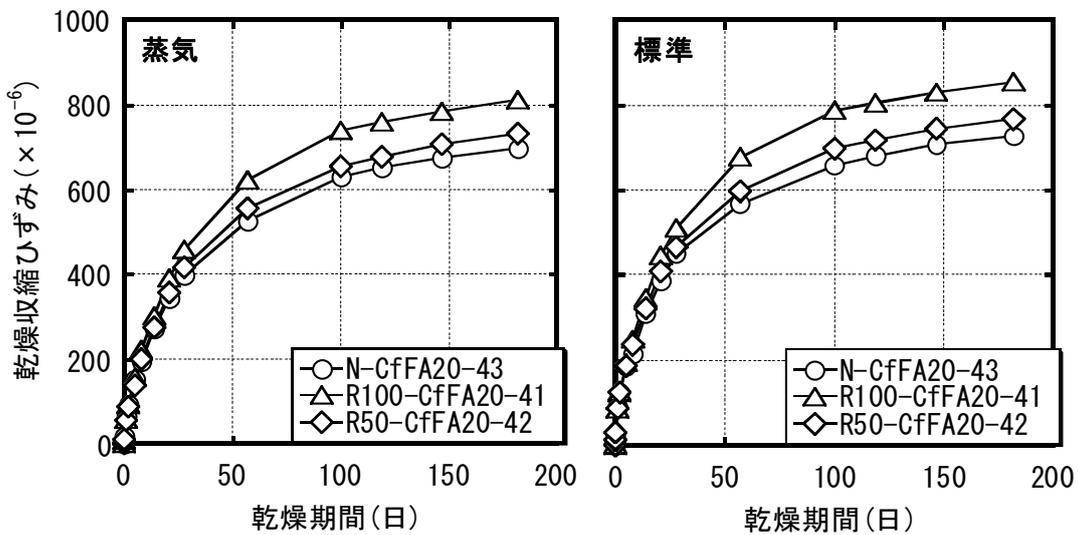


図-1.6 ヤング係数と圧縮強度の関係

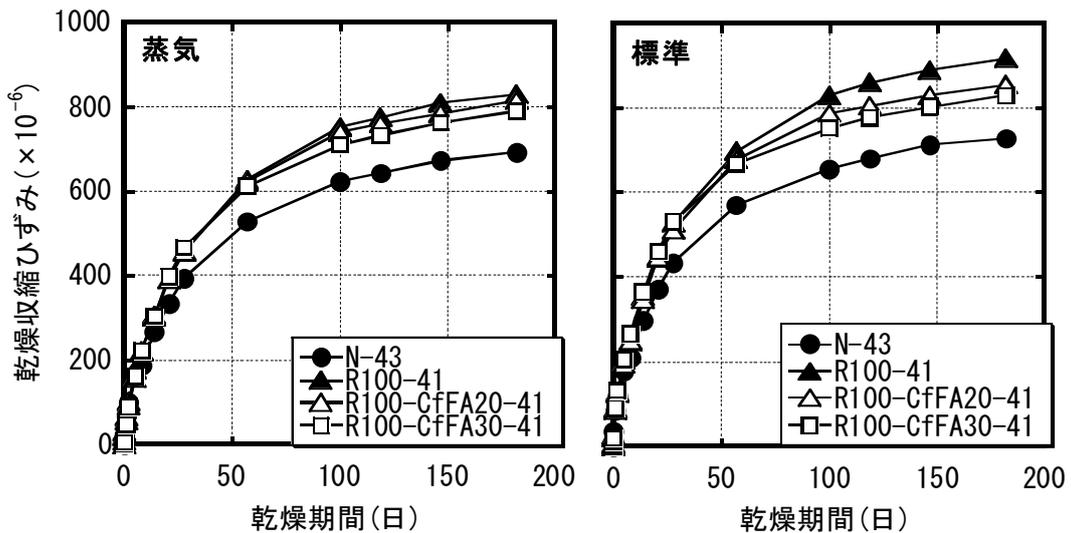
1.3.4 乾燥収縮ひずみ

図-1.7 に A 工場における乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。図-1.7(a)より、再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは再生骨材置換率の増加に伴い大きくなる傾向を示し、置換率100%では普通コンクリートに比べ2~3割大きくなった。

一方、図-1.7(b)に関して、CfFA 混入率が大きくなるにつれ乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向を示し、乾燥期間147日において混入率30%では、標準養生の場合に10%、蒸気養生の場合に6%小さくなった。また、蒸気養生を行ったものは、標準養生のものに比べ乾燥収縮ひずみは9~4%小さくなり、蒸気養生を行うことにより乾燥収縮ひずみは低減されることが確認できた。CfFA を混入し蒸気養生を行ったものでは、再生コンクリートの収縮ひずみは12~14%小さくなった。



(a) 再生骨材置換率の影響



(b) CfFA 置換率の影響

図-1.7 乾燥収縮ひずみの経時変化(A 工場)

1.3.5 促進中性化試験

図-1.8 に促進中性化深さの経時変化を示す。A工場に関して、再生コンクリートの中性化深さは、普通コンクリートに比べ若干大きくなる傾向にあり、促進中性化期間 13 週において 1~3mm ほど大きくなった。また、CfFA を 30%混入したものは、無混入の普通コンクリートとほぼ同等であった。養生方法の違いによる影響はほとんど見られなかった。B工場では、コンクリートの中性化深さは、A工場に比べ全体的に大きな値を示した。これは、コンクリートの調合条件が異なるためであるが、この点に関しては後述する。

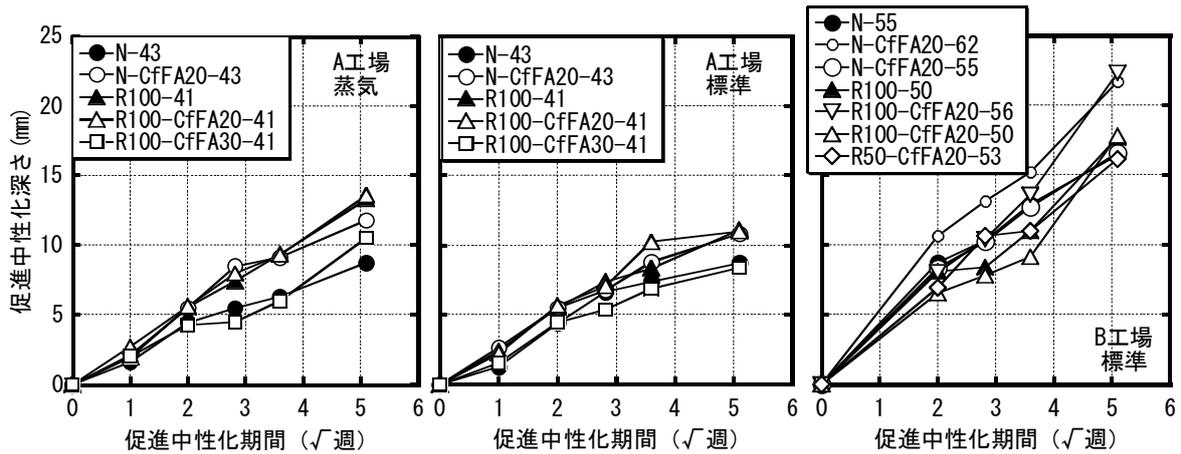


図-1.8 促進試験における中性化深さの経時変化

図-1.9 に中性化速度係数と CfFA 混入率および W/C の関係を示す。右図について図中の直線は両者の関係を直線回帰したものである。中性化速度係数は、中性化深さが時間の平方根に比例関係があるとし、測定期間 13 週までの各材齢の中性化深さをを用い近似して求めた。図より、水セメント比の増加に伴い、中性化速度係数はほぼ直線的に増加する傾向を示した。骨材種類や CfFA 混入による明確な差は見らず水セメント比による影響が支配的であることがわかる。

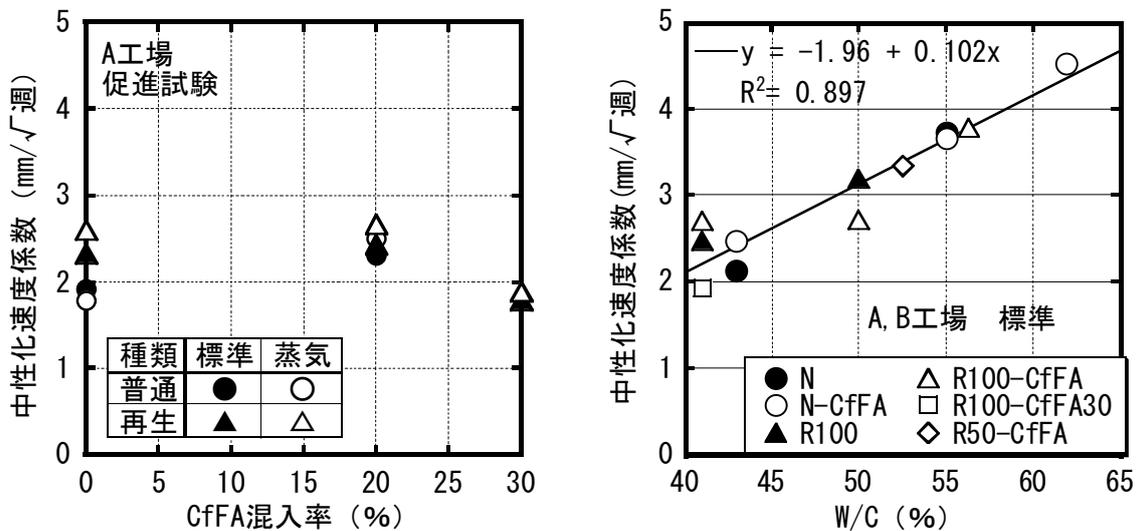


図-1.9 中性化速度係数

1.4 まとめ

付録 1 では、低品質再生粗骨材（以下、再生骨材）のコンクリート製品としての利用が可能であるかを判断するために、コンクリート製品工場において、再生骨材を用いた CfFA 混入コンクリートの基礎的な性状を把握するための実験を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) フレッシュ性状は、普通コンクリートとほぼ同等の性状を得ることができる。
- 2) 圧縮強度に関して、蒸気養生を行った場合においてもセメント水比と圧縮強度は正の相関があることから、セメント水比によって強度管理が可能であり、再生骨材を使用した場合であっても水セメント比を小さくすることで目標値を満足することができる。
- 3) ヤング係数は、蒸気養生を行った後に気中養生を行った場合に、また再生骨材を使用した場合に小さくなる傾向を示すが、コンクリートの単位容積質量を考慮すれば RC 規準式におおよそ対応する。
- 4) 乾燥収縮ひずみは、再生骨材の使用により増加する傾向にあるが、蒸気養生の実施や CfFA の混入により低減することができる。
- 5) 促進中性化深さは、水セメント比による影響が支配的であり、蒸気養生による影響はほとんど見られない。また、再生骨材を使用した場合に若干大きくなる傾向にあるが、CfFA を 30% 混入することで低減できる。

付-2 コンクリート製品の試作

2.1 実験目的

付録 2 では、付録 1 で製品工場において行った実験結果から、要求性能を満足した調査を選定し、実機による混練を行い再生コンクリートの各性状を調べ、その耐久性能を確認するとともに、性能試験を行い再生骨材のコンクリート製品への適用が可能であるか検討を行う。

表-2.1 に本実験において対象とした製品を示す。本実験では、歩車道境界ブロック、U字側溝および地先境界ブロックを試作した。なお、製品の試作として対象とした製品工場は前節における A 工場である。

表-2.1 対象とした製品の概要

種類	型枠数	供試体本数		寸法(mm)			参考重量(kg)	容積(ℓ)	
		各調査	合計	幅	高さ	長さ			
ニュー歩車道境界ブロック	片面	2	1	4	205	250	1990	224	95
	両面	3			230			240	100
U字側溝	300B	2	4	16	400	360	600	80	35
	240	2			330	270	600	55	25
地先境界ブロック	A	1	3	12	120	120	600	21	10

2.2 実験概要

2.2.1 使用材料および調査

使用材料は前節と同様である。表-2.2 に調査を示す。コンクリートは、「基準」、「再生骨材 100%使用」、「CfFA 外割 20%混入+再生骨材 100%使用」、「CfFA 外割 20%混入+再生骨材 50%使用」の 4 種類である。目標スランプは $15\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $2.0\pm 1.5\%$ とした。

表-2.2 調査

No.	種類	RG 置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	FA/(C+FA) (%)	単位量 (kg/m ³)					
						C	CfFA	W	S	G	RG
1	N-43	0	43.0	43.0	0	372	0	160	760	1087	0
2	R100-41	100	41.0	41.0	0	390	0	160	789	0	975
3	R100-CfFA20-41	100	41.0	32.8	20	390	98	160	679	0	975
4	R50-CfFA20-42	50	42.0	33.6	20	381	95	160	667	543	487

2.2.2 供試体の作製および養生方法

コンクリート製品工場において実機によるコンクリートの混練および打設を行った。写真-2.1 にコンクリートの打設風景を示す。コンクリートの混練は、容量 0.8m^3 のパン型ミキサーを用いて行い、混練後、フレッシュ性状を確認しテストピース用の各型枠にコンクリートを打設した。テストピース用のコンクリートは 2 層詰めとし、棒状のバイブレータ

ーを用いて締固めを行った。製品用のコンクリートは、卓上のバイブレーターを用いて締固めを行い、工場における従来通りの方法で打設を行った。打設後、ブリーディングが収まった後、表面をならし、2時間前置きをし、蒸気養生を行った。蒸気養生温度は、 20°C/h で 65°C 前後になるまで温度を上昇させ、最高 65°C で2時間保持した後、自然冷却させ、翌日の材齢1日に脱型を行った。テストピースの脱型後は、ただちに水中養生 ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$) を開始した。なお、後述する圧縮強度試験用の試験体に関しては、比較のため標準養生についても検討を行った。試作した製品の養生方法は、材齢14日まで工場の敷地内で気中養生を行い、その後、大分大学の屋外において曝露を開始した。



写真-2.1 打設風景

2.2.3 試験項目

表-2.3 に試験項目を、表-2.4 に製品の試験項目を示す。コンクリートの強度性状として圧縮強度試験および静弾性係数試験を、耐久性として乾燥収縮試験、促進中性化試験および凍結融解試験を、JIS に準じて行った。

表-2.3 試験項目

分類	項目	養生方法	試験材齢
フレッシュ性状	スランプ	—	—
	空気量		
	単位容積質量		
	温度		
強度性状	圧縮強度	標準	1、14、91 日、長期
	ヤング係数	蒸気	14、91、長期
耐久性	乾燥収縮	蒸気	開始：7 日
	促進中性化	蒸気	開始：56 日
	凍結融解	蒸気	開始：28 日

表-2.4 製品の試験項目

試験項目	試験材齢(日)	供試体
曲げ試験	長期	歩車道ブロック
		U字側溝
外観 ひっかき 動弾性係数	91、182、長期	U字側溝
中性化 コア圧縮強度	91、長期	歩車道ブロック

2.3 実験結果および考察

2.3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果一覧を表-2.5 に示している。再生コンクリートのスランプは目標値を大幅に下回った。再生粗骨材が表乾状態よりも乾燥していたために水を吸収して十分な流動性が得られなかったことが原因として考えられる。再生粗骨材の表乾状態を適切に評価し、ウェッチングするなどして骨材の状態を適切に管理することが必要である。空気量はすべての調合において目標値を満足した。

表-2.5 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	種類	RG 置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	FA/ (C+FA) (%)	混和剤 添加率 (%)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	練上り 温度 (°C)	単位容積 質量 (kg/l)
1	N-43	0	43.0	43.0	0	0.75	17.5	0.9	21.5	2.40
2	R100-41	100	41.0	41.0	0	0.65	7.0	1.4	21.0	2.33
3	R100-CfFA20-41	100	41.0	32.8	20	0.56	1.0	1.5	22.0	2.31
4	R50-CfFA20-42	50	42.0	33.6	20	0.65	3.0	1.0	22.5	2.35

2.3.2 硬化性状

表-2.6 に強度試験の結果一覧を示す。また図-2.1 に材齢ごとの圧縮強度試験結果を示す。材齢 1 日における圧縮強度の目標値は 10N/mm²であるが、全ての調合において満足した。材齢 14 日における圧縮強度の目標値 30N/mm²であるが、全ての調合において満足した。また、養生方法で比較すると、全ての材齢において標準養生は他の養生方法よりも強度が大きい値となっており、蒸気気中養生が最も低い結果となった。これは、標準養生に比べ、気中養生では十分な水和反応が進んでいないためと考えられる。

表-2.6 強度試験結果一覧

調合	養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)				単位容積質量 (kg/l)				ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		
		1日	14日	91日	91日*1	1日	14日	91日	91日*1	14日	91日	91日*1
1	蒸気	16.8	38.0	54.0	-	2.39	2.42	2.45	-	3.19	3.64	-
2	蒸気	20.9	41.8	57.6		2.32	2.37	2.37		2.54	3.09	
3	蒸気	22.9	41.0	61.3		2.29	2.33	2.34		2.43	3.03	
4	蒸気	20.2	36.7	51.8		2.33	2.38	2.37		2.42	3.11	
1	蒸気気中	-	31.5	-	50.4	-	2.36	-	2.42	2.56	-	3.25
2	蒸気気中		38.1		55.4		2.27		2.35	2.32		2.75
3	蒸気気中		40.7		59.1		2.25		2.31	2.23		2.89
4	蒸気気中		33.9		61.5		2.28		2.37	2.17		3.32
1	標準	-	47.2	65.3	-	-	3.72	2.44	-	3.30	3.79	-
2	標準		47.9	62.6			2.37	2.38		2.65	3.23	
3	標準		49.7	68.4			2.34	2.35		2.63	3.10	
4	標準		47.9	69.7			2.37	2.38		2.87	3.43	

*1 コンクリート製品から採取したコア供試体の試験結果

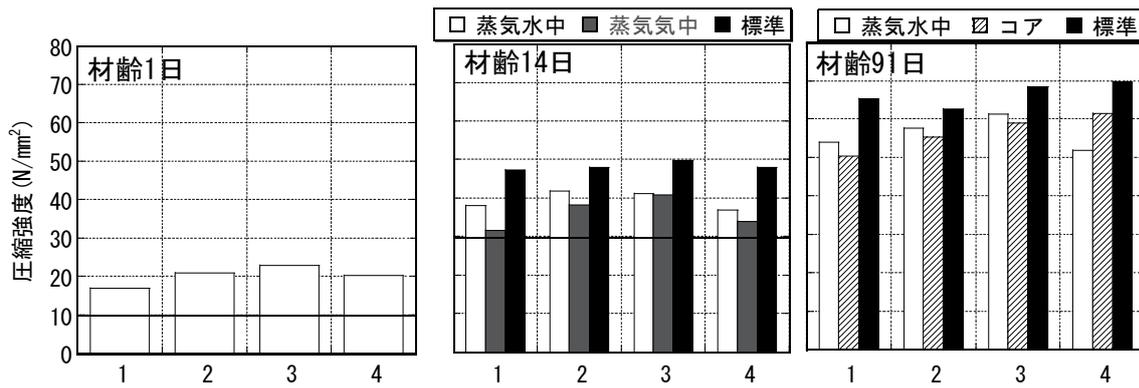


図-2.1 圧縮強度試験結果

図-2.2 に圧縮強度の経時変化を示す。図より、すべての調合においてコンクリートの圧縮強度は材齢とともに増加した。CfFA を混入したものは、無混入のものに比べ 28 日以降の強度増進がやや大きくなる傾向を示した。図-2.3 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中には各種コンクリートの単位容積質量を考慮した建築学会規準式（以下、RC 規準式）を実線で示している。図より、既往の研究と同様に同じ強度で比較すると、再生コンクリートのヤング係数は小さくなる傾向を示したが、コンクリートの単位容積質量を考慮することで、RC 規準式に概ね対応することが確認された。

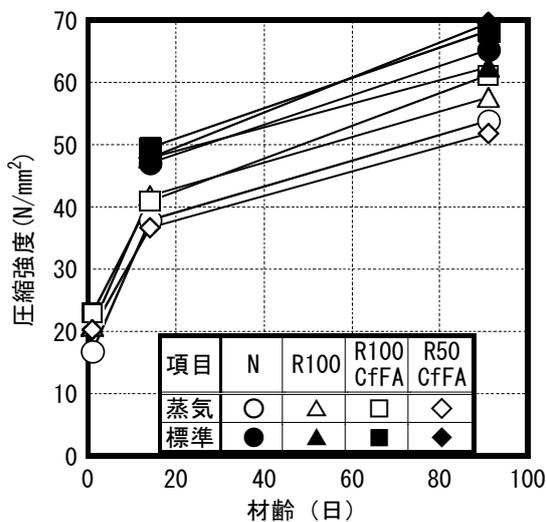


図-2.2 圧縮強度の経時変化

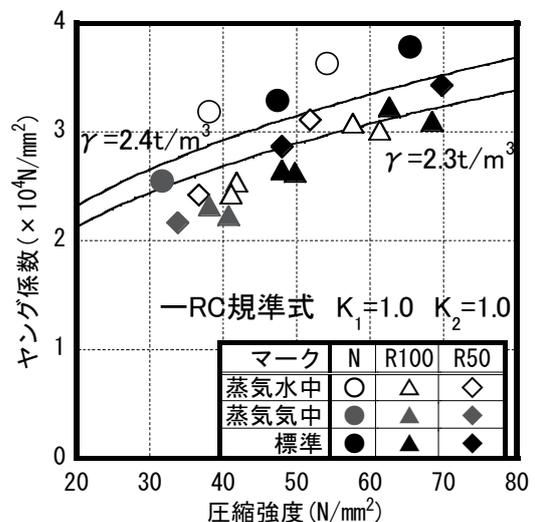


図-2.3 圧縮強度とヤング係数の関係

2.3.3 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を図-2.4に示す。再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは基準コンクリートより 90×10^{-6} 程度大きくなったが、CfFAの混入によって 40×10^{-6} 程度低減され、CfFA混入による収縮低減効果が本実験においても確認された。また、CfFAを混入し再生粗骨材を50%置換率した場合には、基準コンクリートと同等の値を示した。これらのことから、CfFAの使用、並びに再生粗骨材置換率を調整することで乾燥収縮ひずみの小さい良好なコンクリートの作製が可能である。

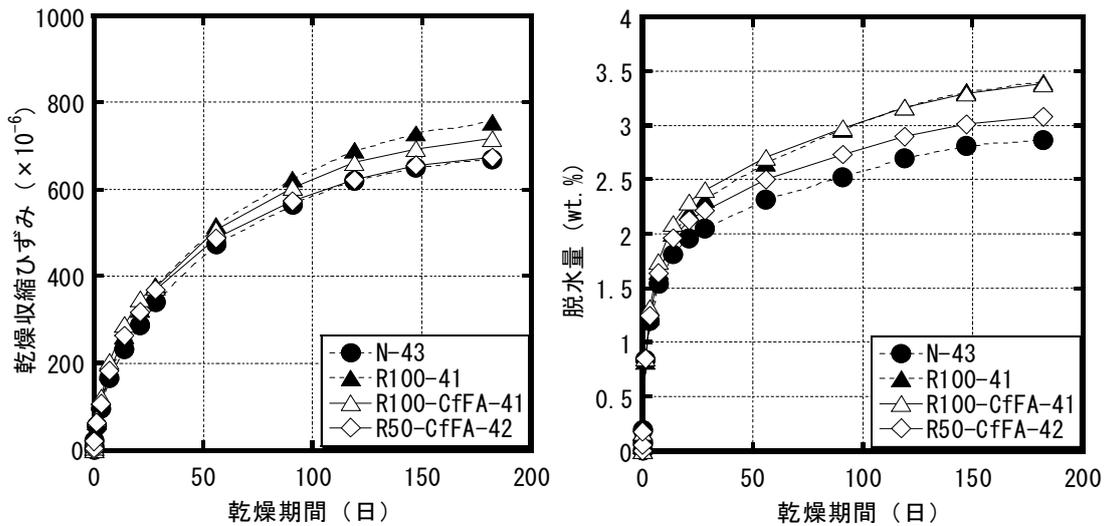


図-2.4 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化

2.3.4 促進中性化

促進中性化試験結果を図-2.5に示す。図より、再生コンクリートの中性化深さは、基準コンクリートよりも小さくなっており、十分な中性化抵抗性を有していることが確認された。

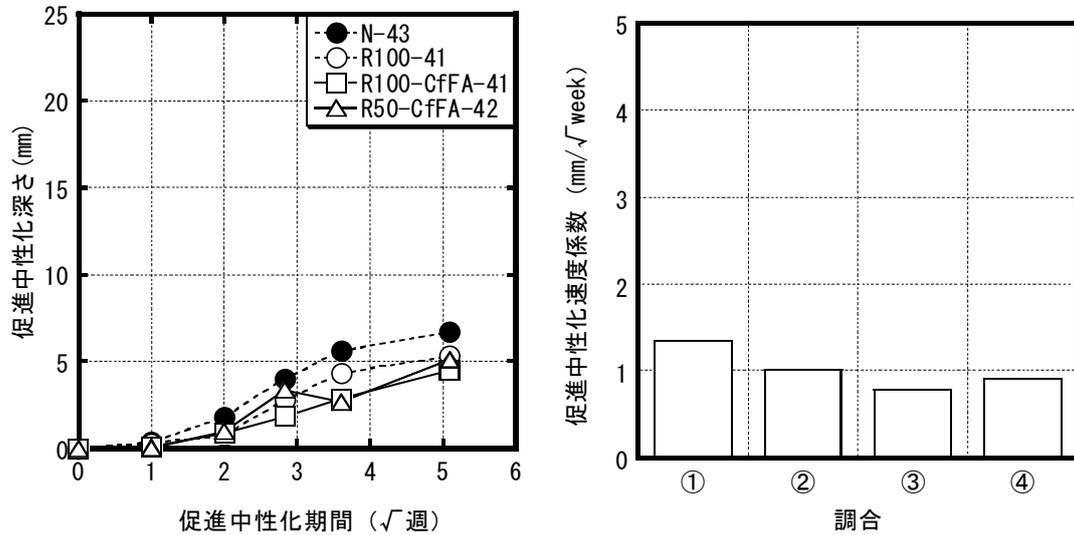


図-2.5 促進中性化試験結果

2.3.5 凍結融解

図-2.6に凍結融解試験結果を示す。図より、今回の実験において、目標空気量が2%前後と小さかったために、十分な耐凍害性はすべての調合において認められなかった。今後は、AE減水剤の使用によって空気量を4~6%の範囲内に調整したコンクリートを用いての検討が必要である。

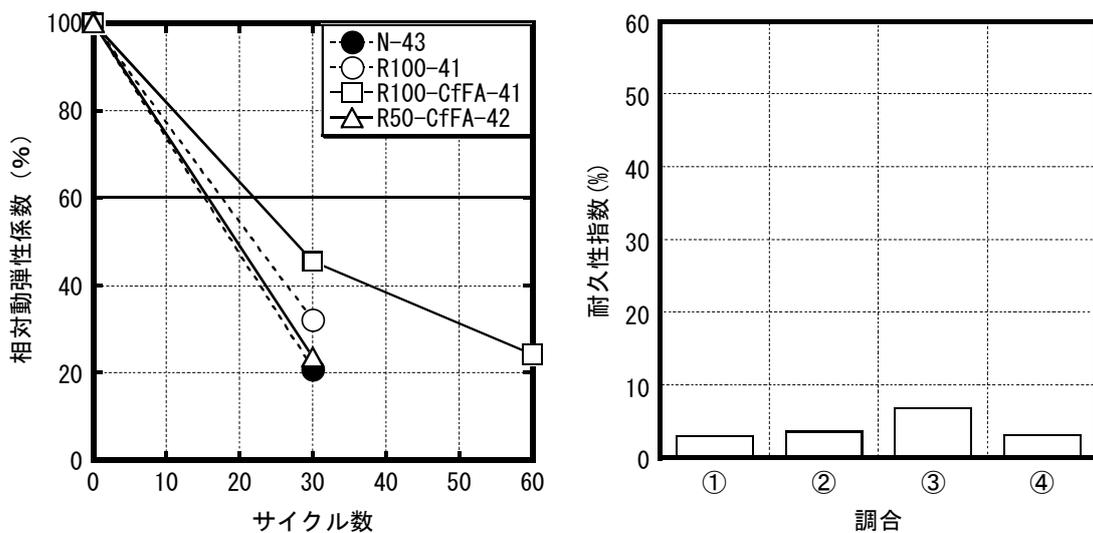


図-2.6 相対動弾性係数関連

2.3.6 製品の性能

① 外観

試作した製品の外観を**写真-2.2**に示す。再生コンクリートの外観は、基準コンクリートと同様であり、外観上の問題は見られなかった。



写真-2.2 試作した製品の外観

② ひっかき試験

表-2.7 および図-2.7 にひっかき試験結果を示す。図より、再生コンクリートの各性能は基準コンクリートとほぼ同等であり、良好であった。

表-2.7 ひっかき試験結果

調合	製品の底面		製品の上面	
	測定値	判定	測定値	判定
①	0.40	表面強度がある	0.10	十分な表面強度がある
②	0.30		0.15	
③	0.40		0.10	
④	0.40		0.15	

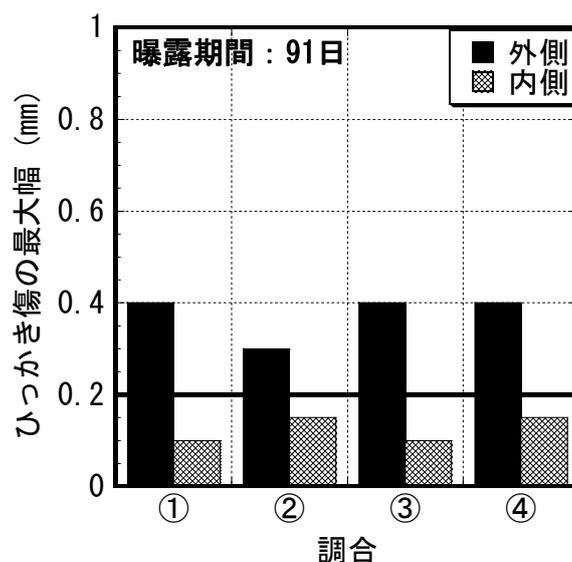


図-2.7 ひっかき試験結果

③ 超音波試験

図-2.8 に超音波試験結果を示す。図より、再生コンクリートの超音波速度は基準コンクリートとほぼ同等であることから、コンクリートは密実であることがわかる。

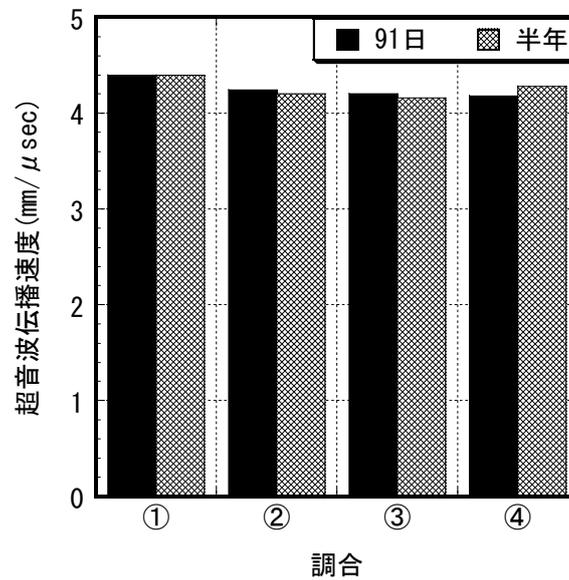


図-2.8 超音波伝播速度

④コア供試体による試験

表-2.8 に 91 日間屋外に曝露した製品（歩車道境界ブロック）から採取したコア供試体の試験結果の一覧を示す。

図-2.9 に圧縮強度の結果を示す。再生骨材を用いたコンクリート製品から採取されたコア供試体の圧縮強度は、基準コンクリートのものと同様以上であり、CfFA を混入した場合、さらに強度が 1 割程度増加する結果を示した。

図-2.10 に中性化深さの測定結果を示す。コア供試体の中性化深さは表に示すようにすべての調合において 1mm 以下となっており、再生コンクリートの中性化抵抗性は現状では良好であるといえる。さらに長期における判定が必要であるが、2.3.4 項で示したように、促進中性化試験の結果と合わせて判断するならば、基準コンクリートと同等の中性化抵抗性を有していることは明らかである。

表-2.8 コア供試体の各試験結果一覧(曝露期間 91 日)

調合 No.	種類	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	強度比 (%)	中性化深さ(mm)	
					平均	MAX
1	N-43	2.42	50.4	100.0	0.2	0.5
2	R100-41	2.35	55.4	109.9	0.2	0.5
3	R100-CfFA20-41	2.31	59.1	117.2	0.6	1.0
4	R50-CfFA20-42	2.37	61.5	122.0	0.3	0.5

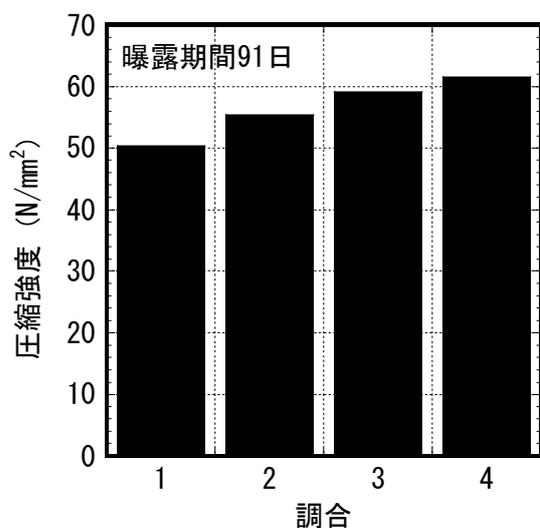


図-2.9 圧縮強度試験結果

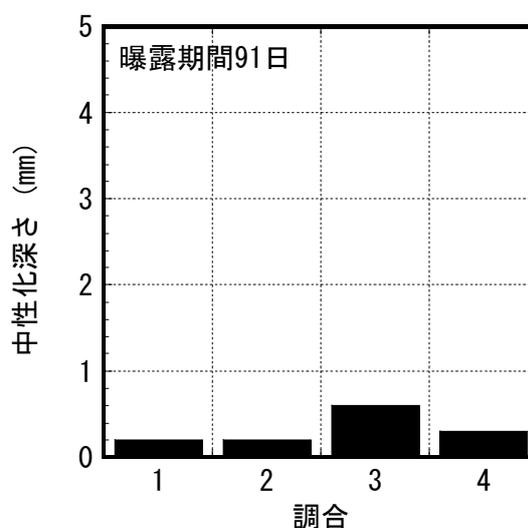


図-2.10 中性化深さの測定結果

⑤ 性能評価試験

表-2.9 および図-2.11 に性能評価試験結果を示す。図より、再生コンクリートの曲げ性能は基準コンクリートと同等以上であり、要求性能を十分に満足することがわかった。

表-2.9 性能評価試験結果一覧*1

項目	歩車道境界ブロック		U字側溝	
	片面	両面	U300B	U240
目標値	21.0	22.0	17.0	16.0
①	37.0	—	22.4	—
②	—	42.0	24.0	—
③	—	42.2	—	22.6
④	41.0	—	—	20.2

*1 単位は kN

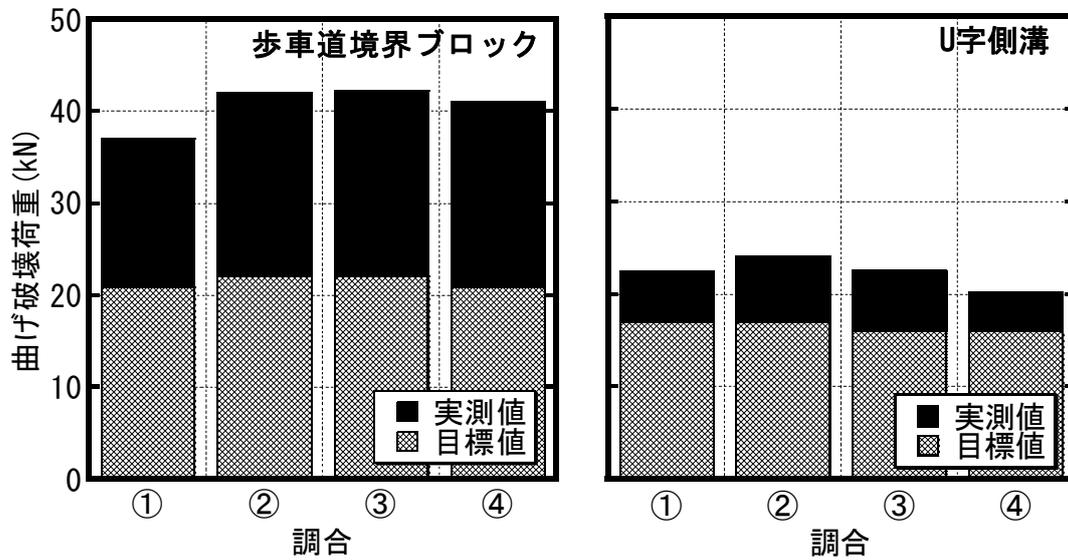


図-2.11 製品の曲げ試験結果

2.4 まとめ

付録 2 では、付録 1 において要求性能を満足した調合について製品を試作し、性能試験を行い、再生骨材のコンクリート製品への適用が可能であるか検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 再生コンクリートの圧縮強度は基準コンクリートと同等であり、目標値を十分に満足する。また、試作した製品から採取したコア供試体の強度は基準コンクリートと同等の値を示し、十分な強度を有している。
- 2) 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは CfFA 混入によって低減され、さらに再生粗骨材置換率を 50% とすることによって基準コンクリートとほぼ同等となり、目標値 800×10^{-6} 以下を満足する。
- 3) 再生コンクリートの中性化抵抗性は基準コンクリートとほぼ同等である。
- 4) 試作した製品の外観は再生骨材および CfFA を用いた場合であっても基準コンクリートと同様であり外観上の問題は認められない。また、表面強度は、ひっかき傷幅がすべて 0.4mm 以下となっていることから十分な性能を有しており、各試験体の超音波伝播速度も基準コンクリートとほぼ同等である。
- 5) 試作した製品の性能評価試験結果より、すべての調合において目標値を満足し、再生骨材および CfFA を用いたコンクリート製品の要求性能は充分である。

以上より、CfFA の混入によって、再生コンクリートの品質は改善され、再生骨材および CfFA を用いたコンクリート製品は実用可能なレベルにあることがわかった。

謝辭

本論文は、著者が大分大学大学院工学研究科博士後期課程に在籍していた平成 20 年 4 月から現在に至る 4 年間の研究成果を取りまとめたものです。

大分大学工学部福祉環境工学科建築コース教授 佐藤嘉昭先生には、終始、懇親なるご指導とご鞭撻を賜り、大変充実した研究生活を送ることができました。厚く御礼を申し上げます。また、非常にご多忙の中、副査をお引き受け頂き、多くの貴重なご指導、ご指摘を下さいました九州大学大学院人間環境学研究院准教授 小山智幸先生、大分大学大学院工学部福祉環境工学科建築コース教授 菊池健児先生ならびに真鍋正規先生に心より御礼申し上げます。

大分大学工学部福祉環境工学科建築コース准教授 大谷俊浩先生には、学部課程からこれまで、多くのご指導とご配慮を賜り、多岐にわたって大変お世話になりました。厚く御礼を申し上げます。(株)ゼロテクノ社長 岡田秀敏氏には、非常にご多忙な中、研究の実際面で必要なお助力を賜りました。また、(株)ゼロテクノ技術調査部長 上田賢司博士には、研究内容や方向性について、懇切丁寧にご指導いただき、数々のご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。浅学で怠惰な私が論文完成まで辿り着けたのも、良き指導者に恵まれたからです。ここに改めて謝意を表すとともに、より一層努力していきたいと思っております。

本研究は、国土交通省の住宅・建築関連先導技術開発助成事業（技術開発課題名「建設廃棄物の削減および再資源化に関する技術開発」、平成 20～22 年度）の支援を受けて実施したものです。また、実験の実施にあたり、再生骨材を快く提供して下さった(株)東部開発、琢磨商事(有)、西日本土木(株)の皆様、試験練りを実施していただいた生コンクリート工業組合、大建コンクリート(株)山香工場、(株)三州コンクリート工業の皆様にご心から感謝申し上げます。また、大分大学工学部福祉環境工学科建築コース技術職員 遠矢義秋氏には試験の実施にあたりご助力を賜りました。英語論文の執筆と発表にあたっては、(株)ゼロテクノ 古田基久子様にご数々の貴重なご指摘、ご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。大分高等専門学校都市システム工学科准教授 一宮一夫先生、永野工業社長 永野敬喜博士には、いつも温かい激励のお言葉を賜りました。心より感謝申し上げます。

本研究を行うことができたのは、大分大学材料施工研究室の先輩、仲間、後輩、在学生の助け、支えがあったからです。再生骨材班の伊藤七恵さん、石橋宏美さん、小野将伸君、森嶋直子さん、谷川和加子さん、同期の大城愛さんには、試行錯誤しつつ実験を進める中で、多くの助けをいただくとともに、多くの大切なことを教えられました。一緒に過ごせてほんとうに良かったです。ありがとうございます。また、先輩である山口福祉文化大学講師 濱永康仁先生、(株)ゼロテクノの山田高慶氏ならびに三島剛氏、李相培博士、将海燕氏は、研究で行き詰まっている私に励ましの言葉をかけてくださり、時に適って必要な助けをくださいました。本当にありがとうございました。

最後に、ここまで温かく見守り、祈り支えて下さったインマヌエル別府キリスト教会の徳田文彦先生、由紀子先生をはじめとする教会員の皆様、両親ならびに兄弟にご心から感謝いたします。良い出会いと機会を下さり、これまで支え、助け、励まし、導いて下さった神様に本当に感謝です。

平成 24 年 3 月 23 日 秋吉善忠