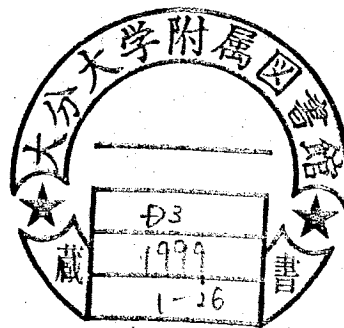


コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れの
予測に関する基礎的研究

大分大学大学院工学研究科
博士後期課程
博士論文



1999年3月

上田賢司

コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れの 予測に関する基礎的研究

Fundamental Study on the Prediction of Cracking Due to Drying Shrinkage Stress of Concrete

—目次—

第1章 序論	1
1.1 研究の目的	1
1.2 既往の研究	5
1.2.1 乾燥収縮ひび割れ試験に関する既往の研究	5
1.2.2 JIS 原案の乾燥収縮ひび割れ試験方法	7
1.3 論文の構成	10
【第1章の参考文献】	11
第2章 乾燥を受けるコンクリート部材の水和度	13
2.1 はじめに	13
2.2 コンクリート部材の水和の進行	14
2.2.1 水和度の定義	14
2.2.2 乾燥を受けない場合の水和速度式	15
2.2.3 乾燥を受ける場合の水和速度式	16
2.3 乾燥を受けないコンクリートの水和度の決定	19
2.3.1 実験計画	19
2.3.2 使用材料および調合	19
2.3.3 結合水量の推定方法	20
2.3.4 試験結果	20
2.3.5 乾燥を受けないコンクリートの水和度	21
2.4 第2章のまとめ	22
【第2章の参考文献】	23

第3章 乾燥を受けるコンクリート部材の水分移動	25
3.1 はじめに	25
3.2 部材内の水分量の分布	26
3.2.1 基礎方程式	26
3.2.2 角柱供試体についての解	29
3.3 角柱試験体における脱水量の測定	33
3.3.1 実験計画	33
3.3.2 コンクリートの調合および養生	33
3.3.3 実験方法	33
3.3.4 実験結果および考察	34
3.4 脱水量分布の解析	35
3.4.1 解析に必要な定数	35
3.4.2 解析結果および考察	48
3.5 第3章のまとめ	49
【第3章の参考文献】	55

第4章 乾燥収縮ひび割れ供試体における 拘束鋼材のひずみ分布	57
4.1 はじめに	57
4.2 乾燥収縮ひび割れ試験装置の概要	58
4.3 拘束鋼材のひずみ分布の計算式	59
4.4 鋼材の静的曲げ試験	62
4.4.1 試験方法	62
4.4.2 試験結果	62
4.5 静的圧縮載荷試験による拘束鋼材のひずみ分布	62
4.5.1 実験計画	62
4.5.2 供試体の作製, 調合および養生	62
4.5.3 実験方法	63
4.5.4 実験結果および考察	63
4.6 乾燥収縮ひび割れ試験による鋼材のひずみ分布	66
4.6.1 実験計画	66
4.6.2 供試体の作製, 調合および養生	66
4.6.3 実験方法	67

4. 6. 4	実験結果および考察	68
4. 6. 5	コンクリート部材に生じる引張応力	73
4. 7	第4章のまとめ	75
	【第4章の参考文献】	76

第5章 乾燥収縮ひび割れ実験および

乾燥を受けるコンクリートの力学特性

5. 1	はじめに	77
5. 2	実験計画	78
5. 3	供試体の調合および養生	78
5. 4	コンクリート用小型埋込みゲージ	80
5. 5	直接引張強度試験方法の検討	82
5. 5. 1	直接引張試験方法	82
5. 5. 2	接着剤方式による直接引張強度試験方法	82
5. 5. 3	チャック方式による直接引張強度試験方法	83
5. 6	各種強度試験	84
5. 6. 1	乾燥を受けるコンクリートの強度, ヤング係数	84
5. 6. 2	試験方法	86
5. 6. 3	乾燥を受けるコンクリートの各種試験結果および考察(シリーズ I)	87
5. 6. 4	各種強度試験結果および考察(シリーズ II ~ IV)	92
5. 7	乾燥収縮ひび割れ実験	96
5. 7. 1	自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみのメカニズム	96
5. 7. 2	実験方法	98
5. 7. 3	実験結果および考察	99
5. 8	第5章のまとめ	111
	【第5章の参考文献】	111

第6章 拘束を受けるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析

6. 1	はじめに	113
6. 2	解析方法	114
6. 2. 1	構成方程式	115
6. 2. 2	仮想仕事の原理の増分形	116

6. 2. 3 有限要素法による定式化	119
6. 2. 4 クリーブ関数	121
6. 3 解析に必要な定数	131
6. 4 解析結果および考察	139
6. 5 第6章のまとめ	159
【第6章の参考文献】	165

第7章 結論	167
--------------	-----

謝辞	169
----------	-----

第1章 序論

1.1 研究の目的

コンクリート構造物のひび割れ防止は、建築技術者にとって最も重要な技術の一つである。コンクリートのひび割れ発生の予測と抑制については古くから取り組まれているが、ひび割れ発生のメカニズム、部材内のひび割れの分布状況、コンクリートの伸び能力、環境条件など種々の問題を抱えたまま解決されずに現在に至っている。ひび割れの発生が建築物の耐力を低下させ、美観を損なうことは、今更改めていうまでもないことであるが、建築業者としてはその補修のために労力を費やし、施主の信頼を失うことにもなりかねない。コンクリートは引張強度および伸び能力が極端に小さく、かつ、自己収縮が起こりやすいためひび割れの発生しやすい材料である。そのためひび割れには表 1.1.1 に示すような種々の原因がある。

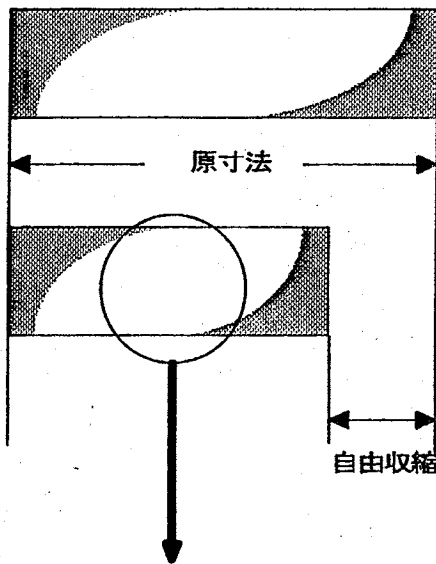
本研究は、これら種々の原因のうち最も代表的なものである乾燥収縮ひび割れを取り上げた。多孔材料であるコンクリートは、通常内部に水分を含んだ状態にあり、乾燥による水分の逸散によって体積変化を起こす。乾燥収縮は、一般にあらゆるコンクリート構造物に起こり得る現象であり、ひび割

表 1.1.1 コンクリートのひび割れ発生の原因分類

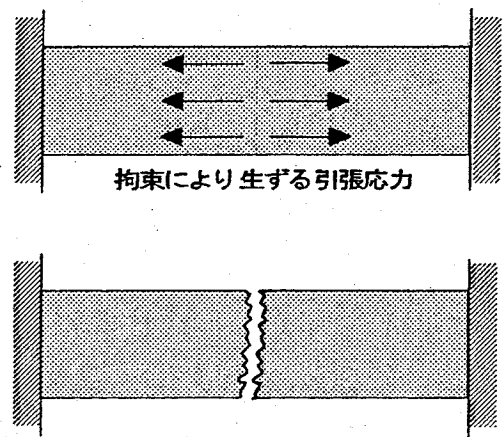
材料・調合による要因	施工による要因	構造上の要因	使用条件・環境における要因
<ul style="list-style-type: none"> ・セメントの異常凝結 ・セメントの水和熱 ・骨材に含まれている泥分 ・コンクリートの沈下・ブリーディング ・コンクリートの乾燥収縮 ・コンクリートの中酸化、塩化物の含有 	<ul style="list-style-type: none"> ・急速な打込み ・初期養生中の急速な乾燥 ・初期凍害 ・不十分な締固め ・型枠のはらみ ・支保工の沈下 ・養生不良 (早期乾燥・湿潤不良) ・型枠の早期除去 ・工事における載荷、振動 ・コールド・ジョイント ・かぶり厚さの不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物の不同沈下 ・断面・鉄筋量の不足 ・隅角部の応力集中 ・エキスパンション 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境温度・湿度の変化 ・部材両面の温度・湿度の差 ・凍結融解 ・火災 ・表面加熱

れの発生、寸法変化、応力状態等の変化をもたらす。図 1.1.1 はひび割れ発生メカニズムを模式的に示したものである。コンクリートは一般に、乾燥に伴い収縮する性質を有している[図 1.1.1(1)]。その量は調合、部材の寸法、乾燥条件等のいろいろな要因に左右される。乾燥収縮ひび割れはコンクリート部材が自由に収縮しようとしたときに、拘束されることによって生じる。この拘束には、外部から受けるものと内部から受けるものがある。前者の例として、コンクリート構造物の基礎とか、あるいは周辺を壁と梁で囲まれた壁、内部の鉄筋等がある。たとえば、壁体と周辺の梁、柱とを切り離して自由収縮させたとしても、両者の断面寸法の違いから収縮ひずみ量に差が生じる。よって一体化を保つためには壁は周辺の柱、梁から引張られることになる。壁のコンクリートは弾性およびクリープ変形するが、その引張応力がコンクリートの引張強度を越えたときにひび割れが発生する[同(2)]。後者は

(1) 自由収縮



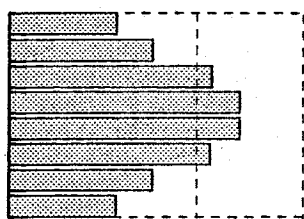
(2) 外部拘束



コンクリート部材に発生した引張応力がコンクリートの引張強度よりも大きくなるとコンクリートにひび割れが発生する

(3) 内部拘束

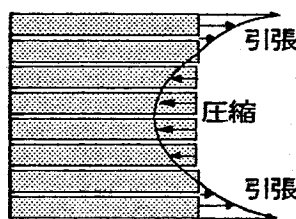
【線非拘束収縮ひずみの分布】



原寸法

自由収縮

【乾燥収縮ひずみの分布】



(4) 実際の場合

【乾燥収縮による応力分布】

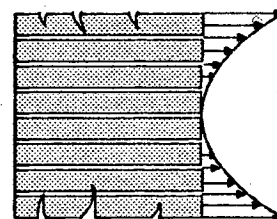


図 1.1.1 乾燥収縮ひび割れ発生メカニズム

コンクリート自体によるもので、乾燥は表面から起こるため、表面と内部とでは乾燥を受ける条件が違うために収縮ひずみ量に差が生じる[同(3)]。(この図はコンクリート部材内部で生じる拘束を示している。図のように棒状の要素に切断したとすると、表面部分は乾燥が急で、内部はそれほど乾燥をしなため、乾燥の程度に応じて収縮する量が異なる。しかしながら、実際には一体となって収縮するため、表面部分は引張力、内部は圧縮力を受けた状態となる。)

乾燥収縮ひび割れの予測をするには、内部拘束と外部拘束の両者による応力分布[同(4)]を正確にとらえることが必要となり、本研究ではこの応力分布をできるだけ正確に計算しようとしている。その手法を図 1.1.2 に示すが、乾燥収縮ひび割れ試験におけるひび割れは、拘束コンクリートは乾燥しながら極めてゆっくりとした時間で引張られる場合の破壊という問題に置き換えられる。乾燥することによって発生する乾燥収縮応力(内部拘束)は、コンクリート部材内の微小要素の固有ひずみ(他から拘束されていない自由な状態という意味で、ここでは、線非拘束収縮ひずみと称した)が応力発生源であり、この分布を求める必要がある。そのためにはまず、部材内の水分量の分布を求める必要がある。応力の発生源が決定させれば、以後は、変形の適合条件を満足するように解析を行う。その際には、拘束コンクリートが負担する力(外部拘束)を拘束鋼材のひずみから求め導入する。さらに、コンクリートのクリープ特性を考慮する。

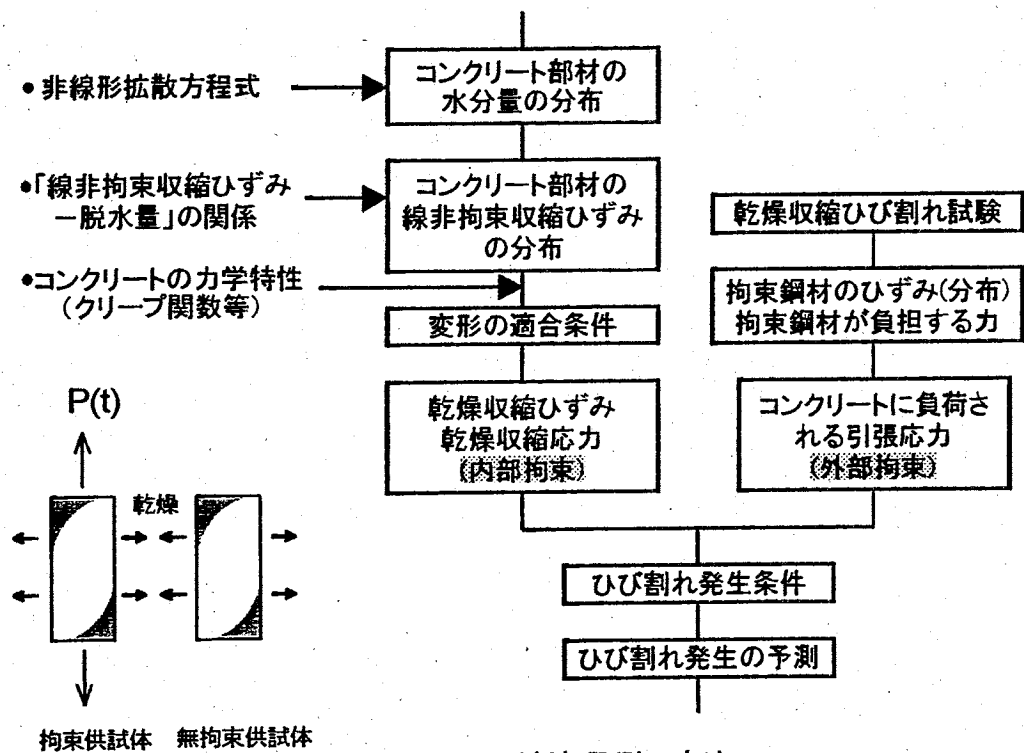


図 1.1.2 ひび割れ予測の方法

建築の分野におけるコンクリート部材は早期材齢より乾燥を受けることが多く、そのため、コンクリート表層部では、水和の阻害、乾燥収縮応力の発生、乾燥収縮ひび割れの発生などによって耐力の低下や劣化を招く。以上のことから本研究の目的を達成するためには以下のような項目を明らかにしなければならない。

- ①水和の阻害:コンクリート部材内では乾燥の程度が異なり、水和の進行の程度も異なる。
- ②強度変化:乾燥を受けることにより収縮応力が発生し、強度の低下を招く。
- ③クリープ:コンクリート部材内の含有水分量がクリープ特性に大きく影響を与える。
- ④乾燥収縮ひずみ:コンクリート部材内の水分逸散量が収縮ひずみに大きく影響を与える。
- ⑤ひび割れの発生条件:破壊条件に対する応力勾配の影響

コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れに関する研究は古くから行われているが、ひび割れの発生を予測することについては成功しているとは言い難い。それはひび割れ発生機構を把握しにくいことによる。その原因は、ひび割れは乾燥に伴う収縮ひずみが拘束されることにより生じるため、収縮ひずみの差から引張応力や引張ひずみについて論じなければならない点にあり、さらにコンクリートが骨材とセメントペーストからなる複合材料であり、かつ多くの空隙を含むことにより脆性的な破壊性状を示すため、破壊時の局所的なひずみや応力がとらえにくい点にある。そのため、実際に乾燥収縮ひび割れ発生時の収縮応力を求めた例は少なく、発生時の自由収縮ひずみや発生日数について検討しているものがほとんどである。

本研究の最終的な目的はひび割れ発生の予測手法を確立することである。本論文は、これを達成するための基礎的な研究としてひび割れ発生実験を行い、乾燥下にあるコンクリートの部材内に発生する乾燥収縮応力を計算することによりひび割れ発生の予測をし、その妥当性をひび割れ発生実験より検証したものである。

1.2 既往の研究

1.2.1 乾燥収縮ひび割れ試験に関する既往の研究

コンクリート部材にひび割れを発生させるには、コンクリートの自由収縮を何らかの方法によって拘束させる必要がある。拘束方法として種々の方法がこれまでに考案されひび割れ試験が行われてきた。これらの方法を大別すると以下のように4方法に分類できる。

(1) リング拘束型

この方法は、リング型のコンクリート供試体の中央に鋼製円板を埋込んで、コンクリートの収縮変形を拘束する方法で、中央の鋼製ディスクが乾燥収縮を拘束することにより、半径方向にひび割れが発生する。

大野[1.1]は、このリング拘束型の試験装置を用いてモルタルおよびコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験を行い、同寸法の供試体の自由収縮ひずみが 4×10^{-4} 付近に達するとひび割れが発生することを示し、 4×10^{-4} をひび割れ発生の限界収縮ひずみとした。その後も柿崎[1.2]および笠井ら[1.3]がこの拘束方法を用いて乾燥収縮ひび割れ試験を行い、セメントの種類等を変え、ひび割れ発生のしにくさを検討している。しかしながらいずれの場合もひび割れ発生材齢およびひび割れ発生時の自由収縮ひずみの大きさによる比較しか行われておらず、拘束供試体のひずみや応力については論じられていない。

六車[1.4]は2次元弾性論およびクリープ理論により、リング拘束供試体の内部応力解析を行い、多少の供試体寸法の変化によってひび割れ発生材齢が著しく変化することを示している。

リング拘束型の試験方法は、装置が小型で簡便であるため多数の供試体を試験する(各種の調査や材料を変化させた比較試験)のには適しているが、拘束度合いが不明確で、拘束を受けるコンクリートのひずみや応力の測定ができないため、定量的な乾燥収縮ひび割れ性状を把握するには適しておらず、試験結果を実部材のひび割れ挙動と関連づけることが難しい。また、内曲面は鋼材に接することによってシールされた状態になり、乾燥収縮が不均一であることも短所となる。

(2) 内部拘束型

この方法はコンクリート柱体の内部に長軸に沿って鉄筋または鋼棒を埋設して収縮変形を拘束する方法である。端部において鉄筋または鋼棒をある程度の長さまでねじり切りを行い、拘束し、中間部分ではコンクリートと鉄筋の付着を防ぐことにより、コンクリートに均等な収縮応力が作用するようにした拘束方法である。

Carlson[1.5]は、この拘束方法を用いた最初の実験を行い、中央部のコンクリートおよび鉄筋の長さ

変化から収縮応力や有効弾性係数を算定できることを示した。

長瀧[1.6]は、収縮応力がコンクリートの引張強度の 85～90%に達するまで拘束された収縮ひずみは応力発生の原因となるが、それ以後の収縮ひずみはすべてクリープによる応力緩和作用によって収縮応力とならないことを示した。また拘束された収縮ひずみから応力を算定する場合には有効弾性係数を静弾性係数の 40%程度であるとするのが合理的であることを示した。

その他に狩野ら[1.7]、向井[1.8]、大島ら[1.9]、河野[1.10]、および中西[1.11]らなどが内部拘束鉄筋による乾燥収縮ひび割れ試験を行い、各種材料および調合を用いてコンクリートのひび割れ発生の違いを比較している。

以上のように、この拘束方法を用いた実験結果から乾燥収縮性状に関する知見が数多く得られている。しかしながら、この供試体のコンクリート断面は、内部に鉄筋が埋設されているので、JIS の乾燥収縮供試体と異なった断面となるので両者の自由収縮は異なることが予測される。また、かぶりがある値以上とするため、あまり鋼材断面積を大きくすることができず、拘束程度は大きくできない。

(3) 引張装置型

この方法は、引張試験装置を応用してひずみを拘束する方法で乾燥により収縮した供試体の長さを引張試験装置を用いて一定時間ごとに荷重を加えて乾燥前の長さに戻す。従って、加えた力を収縮応力の総和とみなすことができ、完全拘束を実現できる。

佐治ら[1.12]は、この拘束方法を用いてモルタル実験を行い、収縮応力応力がモルタルの引張強度の近傍で破断が生じることや破断時の自由収縮ひずみは $4\sim 5 \times 10^{-4}$ 程度であることを示した。

飛坂[1.13]は乾燥収縮ひずみを拘束する割合を変えて実験を行い、拘束率(自由収縮ひずみに対する拘束引張ひずみの比= $(\text{自由収縮ひずみ}-\text{拘束収縮ひずみ})/\text{自由収縮ひずみ}$)が小さくなるほどひび割れ発生時の収縮応力は小さくなるがクリープひずみは逆に大きくなることを示した。

この方法は、直接的に供試体に作用する応力を測定できるが、時間間隔をあけてその間のひずみ増分に対して荷重を加えるため、実際の応力と異なることが考えられる。すなわち、実際の乾燥状態では、応力とクリープの増加が微小な時間間隔で同時に行われるのに対し、荷重によりもとの長さに戻されるひずみは、その瞬間において弾性ひずみであるからである。よって時間間隔が長くなるほど、クリープひずみよりも弾性ひずみが過大に評価されることになると考えられる。

(4) 外部拘束型

この方法は、(1)～(3)の拘束方法の短所を補うものであり、実構造物における拘束状態に最も近い拘束状態が得られる方法である。すなわち、固定部を除いてコンクリートと拘束枠は接しておらず、

拘束枠には収縮ひずみに対応した軸力だけが作用する。従ってコンクリートの拘束ひずみやクリープひずみおよび収縮応力等が明確に算定でき、また、ひび割れの観察も容易である。

外部拘束方法を用いて乾燥収縮ひび割れ性状を調べた研究は数多く、種々の拘束方法が試みられている[1.14][1.15][1.16][1.17][1.18]。

狩野ら[1.14]は、乾燥収縮ひび割れ発生を検討するのに適した供試体の条件として、①実構造物に近い断面諸元を有すること、②剛性を高めること、③拘束鋼材とコンクリートの付着による固定が安定であること、④ひび割れ発生部分は、並行して測定する自由収縮ひずみなどの結果と比較できること、⑤ひび割れ発見が容易であること、⑥測定する部分に確実にひび割れが発生することなどを挙げ、これら各条件を満足するようないわゆるアレイ型でボルトの付着力によって拘束鋼材へ固定する供試体を試作している。

牧角ら[1.17]は、ボルトを介してコンクリートから拘束材への力の伝達が行われる方法では、ボルトの長さ、対称性および拘束枠との締付具合などが力の伝達に大きく影響すると考え、拘束材を直接コンクリート中に埋込みさらに格子状の鉄筋を剛結することにより、力の伝達をスムーズに行えるようにした。この方法はほぼ完全な拘束が得られ、拘束材に鉄筋を使用するため拘束率を小さくすることができる。しかしながら、供試体の作製に手間がかかり、繰り返しの使用ができない。

鈴木ら[1.18]は、ボルトによって供試体端部を固定する方法では、ボルトの付着表面積や断面積およびコンクリートとの付着性状がコンクリート供試体の拘束鋼材への固定度に大きく影響してあいまいな固定度になり、そのためひび割れ発生時期等の試験結果もそれらに大きく左右されるばかりでなく、解析による測定結果の検討も充分行うことができないとして、固定部におけるずれに着目して拘束鋼材のコンクリートに接する部分にずれ止め用の鉄筋を溶接するとともにボルトで圧着する方法を考察した。この方法はコンクリート供試体の拘束鋼材への固定度が完全であり、任意の拘束率が設定できる。この後、この方法は JIS 原案として発展し、本研究もこの方法により乾燥収縮ひび割れ実験を行った。

1.2.2 JIS 原案の乾燥収縮ひび割れ試験方法

ひび割れ試験研究会(セメント協会研究所)は、「ひび割れ試験方法」の妥当性や適用性について問題点を項目ごとに整理し検討を行った[1.19][1.20]。その概要を以下に示す。

(1) 拘束板の製作上の問題点

JIS 原案では、拘束板の材料として JIS G 3350(一般構造用軽量形鋼)に規定される軽溝形鋼の「呼び名 1173」を使用することになっているが、形状・寸法に許容範囲があるため、この変動が拘束率に影響を与えることが考えられる。検討した結果、拘束板の断面積の違いによるひび割れ発生日

数を1日程度の変動に納めるためには、鋼材の板厚で0.11mm以内の差にする必要がある。

(2) 側板の形状、構造に関する問題点

JIS 原案に規定した形枠は、ひび割れを発生させる最小断面となる直線部分(10x10cm)を供試体の中心部に作り、端部にかけて断面積が徐々に増加するように設計されている。この円弧が小さすぎると直線部分と曲線部分の境界部にひび割れが集中する。そこで、この影響をできるだけ小さくするように、光弾性試験によりコンクリートの断面変化部の曲線部分を半径約35cm以上の円弧とすることを定め、実験を行った結果、ひび割れはほぼ中央に集中し、形状の妥当性が確認できた。

(3) 装置の組立てに関する問題点

拘束板や底板および端板を固定する際に、拘束板に変形が残留する場合がある。打設前に不要な初期応力を受けると、脱型後コンクリート供試体に不要な初期応力を作用させることになり、試験結果に影響を及ぼす可能性がある。拘束板に不要な応力を加えないで装置を組立てるには、拘束板と底板および端板との連結を極力ゆるくし、また、端板の材質を剛性の小さな材料にするなど不要な応力が生じないようにすることが必要である。これらの対策を講じて組立てた装置にコンクリートを打設し、脱型するまでの期間、拘束板のひずみの経時変化を測定すると、拘束板にはほとんどひずみは生じていない。

(4) ひずみの測定方法に関する問題点

コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験において、ひび割れの発生しやすさを判断することが目的であれば、ひび割れ発生材齢を確認すればよい。しなしながら、ひび割れ発生の予測を行おうとすれば、拘束板のひずみや自由収縮ひずみの測定は不可欠となる。よって精度良くひずみを測定することは重要である。

測定精度および作業性などの比較を行った結果、自由収縮ひずみおよび拘束収縮ひずみに関してはコンタクトゲージを使用すること、拘束板のひずみは、ひび割れ発生日数が正確に確認できることから、ひずみゲージを用いる方法が適していると判断している。

(5) 供試体の本数に関する問題点

ひび割れ試験結果を適正に評価するのに必要な供試体については、ひび割れ発生日数の変動範囲の確認を行って検討した結果、供試体は最低3本必要であり、より精度を必要な場合は、5本以上が望ましいとしている。

(6)各種調合要因の影響

コンクリート用骨材の違いが、コンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響を調べるために行った実験の結果では、骨材の種類によりひび割れ発生日数は12~38日と大きくばらついている。また、ひび割れ発生時の自由収縮ひずみは 2.4×10^{-4} ~ 3.9×10^{-4} となっておりコンクリートの種類によって異なった値となっている。しかしながら、拘束板の平均ひずみは 1.0×10^{-4} ~ 1.3×10^{-4} でコンクリートの種類による影響は小さく、拘束板のひずみの大小と自由収縮ひずみまたは引張伸びひずみの大きさとの間には相関が認められない。

水セメント比の違いがコンクリートのひび割れに及ぼす影響を調べるため、水セメント比が 50, 60, 70%の3種類の AE コンクリートについてひび割れ試験を行った結果では、ひび割れ発生日数に対する水セメント比の影響は明確でなく、60%の平均のひび割れ発生日数が15~18日であり、他の水セメント比より2~3日遅くなっている。また、50%と60%では変動係数は20%以上となっており、供試体間のバラツキが大きい。

スランプの違いがコンクリートのひび割れ発生日数に及ぼす影響を調べるため、水セメント比60%、スランプ8, 18, 21cmの3種類のコンクリートについてひび割れ試験を行った結果では、スランプ8, 18, 21cmの平均ひび割れ発生日は14.2, 15.4, 19.6日で平均ひび割れ発生日はスランプが大きくなるほど長くなる傾向にある。

単位水量の違いがコンクリートのひび割れに及ぼす影響を調べるために、水セメント比60%、単位水量が165, 180, 195kg/m³の3種類のコンクリートについてひび割れ試験を行った結果では、自由収縮ひずみは単位水量が大きいものほど大きい傾向があるが、ひび割れ発生日数は単位水量195kg/m³の方が180kg/m³のコンクリートよりも大きい結果となっている。単位水量とひび割れ発生日数との関係は明確に表れていない。

混和材料の違いがコンクリートのひび割れに及ぼす影響を調べるために、水セメント比60%、単位水量180kg/m³としたコンクリートに、膨張材、鋼繊維および収縮低減剤を用いた。その結果、混和材を混入した各コンクリートの自由収縮ひずみは普通コンクリートと比較すると、鋼繊維は大きく、収縮低減剤では半分程度であった。ひび割れ発生日数は、普通コンクリートが55日であるのに対して、鋼繊維混入コンクリートでは43日であり、膨張コンクリートおよび収縮低減剤を用いたコンクリートでは、乾燥収縮材齢100日を経過してもひび割れが発生しなかった。

1.3 論文の構成

本論文はコンクリート部材の乾燥収縮ひび割れに関連して、若材齢から乾燥させた場合のコンクリート部材内に生じる乾燥収縮応力を計算することからひび割れの発生を予測しようとするものであり、以下の7章から構成されている。

第1章「序論」では研究の目的と既往の研究ならびに論文の構成について述べる。

第2章「乾燥を受けるコンクリート部材の水和度」では、本研究において最も基本的であり、かつ、最も重要な事項となる若材齢からの乾燥を受けるセメントの水和反応の考え方について述べる。また、シール養生を継続した試片が十分に水和が進行したとみなせる時点での結合水量で無次元化した値を水和度と定義し、これにより乾燥を受ける場合の水和度の進行も表せることを述べる。また、水セメント比を変化させた場合の結合水量の経時変化を測定し、一定の条件下における水和の進行式を、水セメント比をパラメータとして提案する。

第3章「乾燥を受けるコンクリート部材の水分移動」では、乾燥収縮応力を計算するために必要となるコンクリート部材内の含有水分量の分布を計算する。そのために、まず、コンクリート供試体の平均脱水量を、乾燥開始材齢を若材齢から行った場合について測定した結果を示し、非線形拡散方程式による有限要素法解析を行った結果と比較検討する。

第4章「乾燥収縮ひび割れ供試体における拘束鋼材のひずみ分布」では、乾燥収縮ひび割れ試験において、拘束鋼材がロードセルの役割を果たし、鋼材のひずみより拘束コンクリートに負荷される引張力を算出できるか検討する。そのために、まず、拘束ひび割れ供試体のコンクリート部分に強制的に圧縮荷重を負荷させ、鋼材のひずみ分布を測定し、その分布形状について検討する。また、鋼材のひずみより拘束コンクリートの引張応力を正確に算出する方法を提案する。

第5章「乾燥収縮ひび割れ実験および乾燥を受けるコンクリートの力学特性」では、JIS 原案で示されている方法に準拠して、乾燥収縮ひび割れ実験を行い、コンクリートに生じるひび割れの発生時期と乾燥開始材齢、調合の関係および拘束鋼材のひずみ分布から算出される拘束コンクリートの平均引張力の関係について考察する。また、コンクリートの圧縮強度、割裂強度、直接引張強度、曲げ強度、中性化速度、圧縮ヤング係数、引張ヤング係数などについて乾燥開始材齢を変化させた実験を行い、乾燥過程における経時変化について述べる。

第6章「拘束を受けるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析」では、5章で行った乾燥収縮ひび割れ実験のデータをもとに、有限要素法プログラムを用いたクリープ応力解析を行い、拘束コンクリートの応力分布を計算する。また、応力分布とひび割れ発生に時期に関して検討を行う。

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る。

【第1章の参考文献】

- [1.1] 大野和男:モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北海道大学工学部研究報告 No. 9, pp. 49-110, 1953
- [1.2] 柿崎正義:人工軽量骨材コンクリートの収縮ひびわれ発生に関する研究(その8 人工軽量モルタルの収縮ひびわれ発生について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 247-248, 1973
- [1.3] 笠井芳夫・横山 清・松井 勇:偏心リング供試体による各種セメントのひび割れ発生試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 63-64, 1980
- [1.4] 六車 熙:モルタル収縮ひびわれ試験におけるリング供試体について, セメント技術年報 17, pp.160-164, 1963
- [1.5] Carlson, R. W.:Attempts of Measure the Cracking Tendency of Concrete, Proc. ACI, Vol.36, pp.553-540, 1968
- [1.6] Nagataki, S :Studies of Shrinkage in Concrete Pavements, 東京工業大学土木工学科研究報告 No.7, pp. 29-58, 1968
- [1.7] 狩野春一・向井 毅:鉄筋で拘束したコンクリートの収縮に関する研究(第2報)鉄筋種類の影響について, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.89-90, 1969
- [1.8] 向井 毅:鉄筋で拘束されたコンクリートの乾燥収縮および亀裂に関する検討, コンクリートジャーナル Vol.8, No.11, pp.1-11, 1970
- [1.9] 大島久次・池永博威:鉄筋により拘束される場合のコンクリートの乾燥収縮, セメントコンクリート No.314, pp.17-23, 1973
- [1.10] 河野俊夫:膨張性セメント混和材単位量がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響, コンクリート構造物のひびわれに関するシンポジウム発表報告集, pp.152-155, 1977
- [1.11] 中西正俊・奈良禱徳:コンクリートの乾燥収縮応力に関する検討, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.95-96, 1979
- [1.12] 佐治泰次・麻生 実:拘束状態にあるモルタルに生ずる乾燥収縮応力度についての実験的研究, 日本建築学会論文報告集, No.101, pp.1-6, 1964
- [1.13] 飛坂基夫:コンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する実験, 建材試験情報1, pp.7-14, 1981
- [1.14] 狩野春一・仕込豊和:コンクリートの収縮拘束キレツ発生試験装置に関する研究, 日本建築学会論文報告集 No.66, pp.89-92, 1960
- [1.15] 藤松 進・久保田昌吾:セメントの種類がコンクリートの収縮・きれつに及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会論文報告集 No. 69, pp. 77-83, 1961

- [1.16] 最上達雄・杉田和直:収縮ひびわれ防止法としてのリング筋の効果, 大成建設技術研究所報 No.10, pp. 29-37, 1976
- [1.17] 牧角龍憲・徳光善治:拘束を受けたコンクリートの乾燥収縮に関する研究, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.161-164, 1980
- [1.18] 鈴木計夫・大野義照・中川隆夫・太田 寛:各種骨材コンクリートの乾燥収縮ひびわれについて—収縮拘束試験による検討—, セメント技術年報 35, pp. 270-273, 1981
- [1.19] ひび割れ研究会:コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その2), セメントコンクリート, No.533, pp. 56-66, 1991. 7
- [1.20] ひび割れ研究会:コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その3), セメントコンクリート, No.534, pp. 57-65, 1991. 8