

第6章

実構造物におけるひび割れ予測

6.1 はじめに

コンクリートは、セメント、水、細骨材および粗骨材で構成されているため水和反応に伴う自己収縮ひずみや水分の蒸発などによる乾燥収縮ひずみは必ず起こりうるものであり、対策を講じないかぎり、大小の差はあっても収縮ひび割れの発生を避けることは難しい。問題は、発生した収縮ひび割れがその鉄筋コンクリート構造物に求められる性能を達成・保持する上で有害になるかどうかである。このような考え方から日本建築学会「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」においては、収縮ひび割れの制御法として、表-6.1.1 に示すような設計値が示されている^{6.1)}。同指針(案)では、有害なひび割れとは、部材の過度なたわみの原因となったり、内部鉄筋のさびの発生を促したり、鉄筋コンクリート造建築物の耐力あるいは耐久性を低下させたり、漏水現象を引き起こしたりあるいは建築物の美観を著しく損ねたりするひび割れのことと定義されている。これらの有害なひび割れにおいてはひび割れ幅の大小が問題になることが多く、ある程度の大きさまでは幅の大きいものほど有害になるため、表-6.1.1 のように設計値が示されたことは設計者、施工者、生コンクリート製造業者のみならず研究者にとっても重要なことだと思われる。

表-6.1.1 性能項目と評価指標ならびに一般環境下における標準的な設計値^{6.1)}

性能項目	評価指標	標準的な設計値
鉄筋降伏に対する抵抗性	収縮ひび割れ部分の鉄筋応力 ^{*1}	鉄筋の引張応力 \leq 長期許容応力度
剥落抵抗性	乾燥収縮ひずみ	800×10^{-6} 以下
たわみ増大抵抗性	乾燥収縮ひずみ	800×10^{-6} 以下
外壁の漏水抵抗性	収縮ひび割れ幅 または ひび割れ発生確率 ^{*2}	0.1mm 以下 5%以下
劣化抵抗性	収縮ひび割れ幅	屋外:0.2mm 以下 屋内:0.3mm 以下

*1 実際には、代替指標として「ひび割れ幅」で評価し、設計値は0.3mmとする

*2 ひび割れ発生確率とは拘束応力によって引き起こされるコンクリートのひび割れの起こりやすさの程度を表す評価のパラメータ

このように出来るだけ正確にひび割れ幅を予測することができれば、構造設計段階において収縮ひび割れの制御対策を講じることができる。

しかしながら、現段階においては、収縮ひび割れの幅を予測できる手法は確立されておらず、予測に際しては、安全側を見据えた判断が求められる。本章では、提案されている予測式の中で、鉄筋とコンクリートの付着の取り扱いを比較的簡単に単純化した収縮ひび割れ幅の簡易予測法(修正ベースマレー法・橋田式)と鉄筋の付着の取り扱いが複雑な非線形増分解法による小柳法を取り上げ、その予測手法を示すとともに、第5章で提案したひび割れ発生条件を用いて修正ベースマレー法および小柳法を改良し、予測結果を比較検討することとした。

6.2 収縮ひび割れ幅の予測方法の基礎理論

収縮ひび割れ幅の予測においては、収縮ひび割れはコンクリートの局部的な引張破壊によって生じた開口として考えられている^{6.2)}。そのためひび割れ近傍では、コンクリートの収縮と鉄筋の伸長によって、両者の間に付着すべりが生じ、さらに作用力として付着応力が生じる。このため鉄筋量(周長面積)と付着の良否がひび割れ挙動に影響を与え、付着良好の場合はひび割れ間隔が小さくなり、ひび割れ本数が多くなるが、ひび割れ幅が小さくなる。一方、付着不良の場合はひび割れ間隔が大きくなり、ひび割れ本数は少なくなるが、ひび割れ幅が大きくなる。このように特に大きな幅のひび割れについては、充分な量の鉄筋を配置することで付着性能を良好にし、多数の小さな幅のひび割れに分散することができる。

図-6.2.1にひび割れに伴う鉄筋とコンクリートの相互作用を示している^{6.3)}。ここではコンクリートのクリープや収縮ひずみは考慮しておらず、コンクリートと鉄筋が一体となった鉄筋コンクリート部材の単軸引張としている。

ひび割れ間隔 $2l_{cr}$ において、載荷引張応力 σ が一様に作用し、鉄筋とコンクリート両者の相対的変位によってせん断応力が生じているとする。この相対的変位をすべり量 $g(x)$ 、せん断応力を付着応力 τ とする。このとき微小区間 dx での応力伝達量と、鉄筋とコンクリートの応力増分 $d\sigma_s$ 、 $d\sigma_c$ は釣り合い条件から次式になる。

$$\phi \tau dx = A_s d\sigma_s = -A_c d\sigma_c \quad (6.2.1)$$

ここに、 A_s 、 A_c ：コンクリートと鉄筋の断面積、 ϕ ：鉄筋の周長

また、鉄筋およびコンクリートのひずみを ϵ_s 、 ϵ_c とすると、任意点 x でのすべり量 $g(x)$ は次式となる。

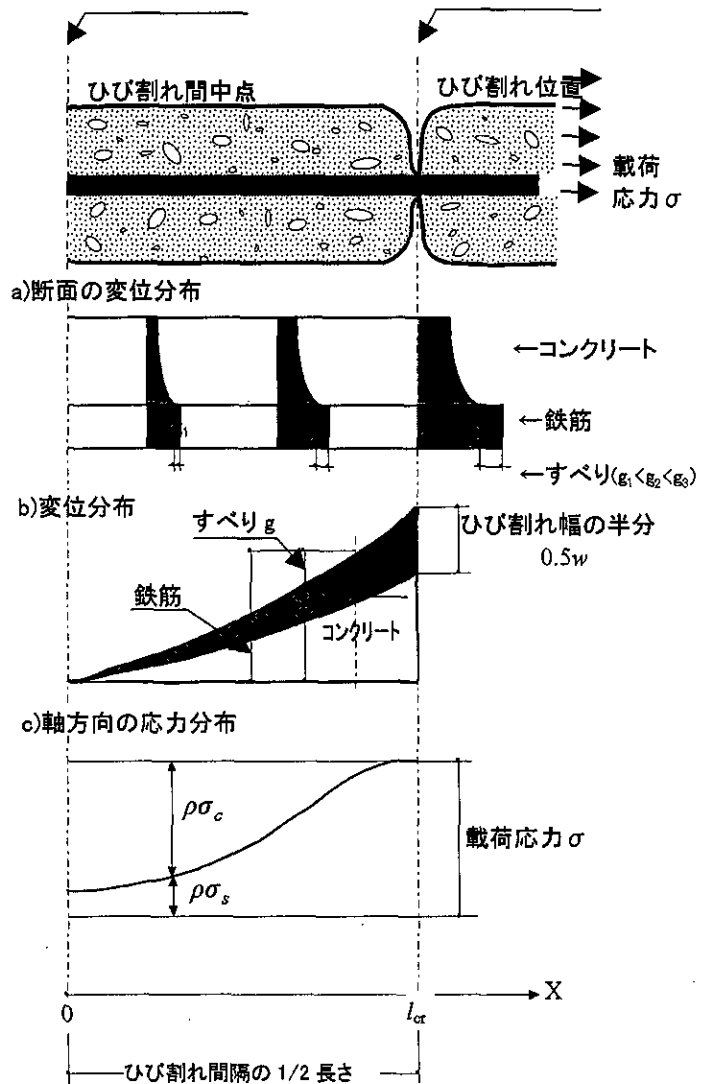


図-6.2.1 部材の応力分布の模式図^{6.3)}

$$g(x) = \int_0^x \varepsilon_s(x) dx - \int_0^x \varepsilon_c(x) dx \quad (6.2.2)$$

これを2回微分し、式(6.2.3)、式(6.2.4)を代入すると式(6.2.5)の付着特性の基本微分方程式が得られる。

$$dx = \frac{A_s d\sigma_s}{\varphi\tau} = -\frac{A_c d\sigma_c}{\varphi\tau} \quad (6.2.3)$$

$$\varepsilon_s(x) = \frac{\sigma_s(x)}{E_s}, \quad \varepsilon_c(x) = \frac{\sigma_c(x)}{E_c} \quad (6.2.4)$$

$$\frac{d^2 g(x)}{dx^2} = \frac{\varphi\tau}{A_s E_s} + \frac{\varphi\tau}{A_c E_c} = \frac{(1+n\rho)}{A_s E_s} \cdot \varphi \cdot \tau \quad ; \tau = \tau(g) \quad ; n = \frac{E_s}{E_c} \quad ; \rho = \frac{A_s}{A_c} \quad (6.2.5)$$

ここで、付着およびすべり関係式 $\tau = \tau(g)$ と、適当な境界条件を与えることで、式(6.2.5)の基本微分方程式が解け、すべり量 $g(x)$ が求められる。しかし、 $\tau = \tau(g)$ には、多種多様な線形・非線形曲線が提案されており、未だ統一的な評価に至っていない。

以上のことより、コンクリートのクリープや収縮ひずみを考慮しない単軸引張の鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅 w は、すべり量より式(6.2.6)で算定できる。

$$w = 2g(x = l_{cr}) \quad (6.2.6)$$

ひび割れ位置に向かって鉄筋とコンクリートに相対的に付着すべり $g(x)$ が累積していくため、ひび割れ幅 w は、この付着すべり状況から考えると鉄筋ひずみ ε_s とコンクリートひずみ ε_c とのひずみ差 $(\varepsilon_s - \varepsilon_c)$ をひび割れ間隔全域にわたって足し合わせたものと解釈することができ、式(6.2.7)となる。

$$w = \int_0^{2l_{cr}} (\varepsilon_s - \varepsilon_c) dx \quad (6.2.7)$$

また、ひび割れ間隔 $2l_{cr}$ は、付着特性や作用応力によって変動する未知数である。ひび割れ間隔 $2l_{cr}$ の中央でコンクリート応力 σ_c がコンクリートの引張強度 f_t に達している時、中央に新しいひび割れが発生し、ひび割れ間隔は l_{cr} となり次の関係式が成り立つ。

$$f_t = \frac{\sum \varphi}{A_c} \int_0^{l_{cr}} t(x) dx \quad (6.2.8)$$

ここに、 $\sum \varphi$ ：鉄筋周長の合計、鉄筋径 d_b が全て同じ時 $\sum \varphi = \frac{4A_s}{d_b}$

ここで、新たなひび割れ間隔 l_{cr} の付着応力の平均値を $\bar{\tau}$ とすると、式(6.2.9)で表される。

$$A_c f_t = l_{cr} \bar{\tau} \frac{4A_s}{d_b} \quad (6.2.9)$$

$$\text{ここに、 } l_{cr} \bar{\tau} = \int_0^{l_{cr}} \tau(x) dx$$

したがって、新たなひび割れ間隔 l_{cr} は式(6.2.10)となる。

$$l_{cr} = \frac{d_b}{4\rho} \cdot \frac{f_t}{\bar{\tau}} \quad (6.2.10)$$

この新たなひび割れ間隔 l_{cr} は、最初のひび割れ発生位置とコンクリート引張応力が f_t に達成する位置との間の距離を表す。付着応力平均値は、鉄筋応力の大きさ、鉄筋の配置、かぶり厚さなどの影響を受ける。さらに引き続いて外力が増加すると最初のひび割れ発生位置の l_{cr} となる位置に第2、第3のひび割れが発生していくことになる。

ひび割れ幅の平均開口量 \bar{w} は除荷後のコンクリートのひずみを無視すると、ひび割れ間の平均鉄筋ひずみ $\bar{\epsilon}_s = \bar{\sigma}_s / \bar{E}_s$ に平均ひび割れ間隔 \bar{l}_{cr} を乗じたものとして求めることができ、式(6.2.11)となる。

$$\bar{w} = \bar{l}_{cr} \cdot \bar{\epsilon}_s = \bar{l}_{cr} \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{E}_s} \quad (6.2.11)$$

式(6.2.11)は、平均ひび割れ幅を概略的に求めるための基本式であり、付着特性を考慮した平均ひび割れ間隔および平均鉄筋応力の具体的な算定方法により各種の予測手法が提案されている。

コンクリートのクリープや収縮ひずみが作用した場合には、式(6.2.11)にクリープや収縮ひずみによるひび割れ幅増加分を $\Delta\bar{w} = \bar{l}_{cr} \cdot \epsilon'_{cs}$ としてひび割れ幅に影響する項を加えて、式(6.2.12)となる。

$$\bar{w} = \bar{l}_{cr} \left(\frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{E}_s} + \epsilon'_{cs} \right) \quad (6.2.12)$$

ここに、 ϵ'_{cs} ：コンクリートのクリープおよび収縮ひずみによる
ひび割れ幅の増加を考慮するための数値

式(6.2.12)は、日本建築学会の「プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説」や土木学会の「コンクリート標準示方書「構造性能照査編」」における曲げひび割れ幅の予測手法として使用されている。

6.3 修正ベースマレー法によるひび割れ幅の予測手法

6.3.1 ベースマレー法による予測式

Base, G.D.と Murray, M.H.は両端が完全固定した一次元拘束モデルについて乾燥収縮によるひび割れ幅の予測式(以下、ベースマレー法)を式(6.3.1)に示すように提案した^{6.4)}。式(6.3.1)は、弾性差分解析を利用して導かれた予測式で、実際のひび割れ調査結果によって得られたひび割れ本数に整合するように、クリープによる乾燥収縮ひずみの低減を仮定し、 $b=3$ としたものである。なお、付着損失域の長さ l の比例定数については $a=0.08$ が提案されている。

$$w = 2l \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \frac{\varepsilon_{sh}(t, t_0)}{b} \right) \quad (6.3.1)$$

ここに、 l ：ひび割れ近傍の付着損失域の長さ(mm)

$$l = a \frac{d_b}{\rho}$$

σ_s ：鉄筋応力(N/mm²)

$$\sigma_s = E_s \left(\frac{\varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b} + \varepsilon_t \right) \cdot \left(\frac{L - 2m_s l}{Ln\rho + 2m_s l} \right)$$

m_s ：ひび割れ本数

$$m_s = 1 + \frac{Ln\rho}{2l} \left(\frac{\varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b\varepsilon_t} \right)$$

d_b ：鉄筋径(mm)

ρ ：鉄筋比 $= A_s/A_c$

A_s , A_c ：鉄筋およびコンクリートの総断面積(mm²)

L ：部材長さ(mm)

n ：ヤング係数比 $= E_s/E_c = 16$

E_s , E_c ：鉄筋およびコンクリートのヤング係数(N/mm²)

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

ε_t ：引張限界ひずみ($\times 10^{-6}$)

a ：比例定数($a = 0.08$)

b ：クリープを考慮した低減係数($b = 3$)

6.3.2 修正ベースマレー法による予測式

橋田^{6.5)}は壁部材は平面的に広く、縦横に配筋がなされていることから、弱点箇所を起点にひび割れが発生しても、壁全周が瞬時にひび割れることはないことを指摘し、ひび割れ幅は式(6.3.1)より算出される値よりも抑制されると考えた。そこで、付着損失域の長さにおける比例定数 a 、およびクリープを考慮した低減係数 b について、実際のひび割れ調査結果に整合するよう修正を行うとともに、拘束率などを取り組み予測式の汎用性や推定精度を高めた。

橋田式(以下, 修正ベースマレー法)は, 実際のひび割れ調査結果で得られた複数ひび割れの最大値の平均値と整合されているため以下のような状況を想定している。

- 1) 計算されたひび割れ幅は, 実部材中の複数ひび割れの各最大幅の平均値を示す。
- 2) 外壁一般部に適用可能。ただし, かぶり 40mm 程度, 開口部・端部斜めひび割れがある外壁は除く。
- 3) 異形鉄筋は D10~D16
- 4) 部材長は一般的な壁長以内
- 5) 鉄筋比は 0.3~0.8 程度

さらに本研究では, これまでの研究成果が反映されるように以下のような仮定を設け, 修正を行った。これらの仮定を新たに設けることによって, コンクリート構造物の構造設計段階で得られる情報を用いてひび割れ幅の予測が可能になり, また, 使用するコンクリートの調合や材料特性が取り込まれているため, 予測結果に伴いコンクリートの調合修正が行いやすいなどの特徴がある。

- 1) 乾燥収縮ひずみの経時変化には, 日本建築学会式^{6.1)}に示される式(6.3.2)を用いて算出する。

$$\varepsilon(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4(V/S)^{-0.18}} \quad (6.3.2)$$

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

ここに, W: 単位水量(kg/m³)

C: 単位セメント量(kg/m³)

G: 単位粗骨材量(kg/m³)

h: 相対湿度(%)(40% ≤ h ≤ 100%)

V: 体積(mm³)

S: 外気に接する表面積(mm²)

V/S: 体積表面積(mm)(V/S ≤ 300mm)

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: 骨材の種類の影響, セメントの種類の影響, 混和材の種類による影響を表す修正係数で, 下表による

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

2)ヤング係数の経時変化については、複合則理論式による予測式^{6.6)}である式(6.3.3)を適用する。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1-V_a) \cdot E_p + (1+V_a) \cdot E_a}{(1+V_a) \cdot E_p + (1-V_a) \cdot E_a} \quad (6.3.3)$$

ここに、 $E_p = k_{int} \cdot e^{\lambda t} \cdot \frac{0.67 \cdot t}{x(4.75x^{1.55} + t)}$

$$\lambda = \frac{\lambda_{\infty} \cdot t}{1.5 + t}$$

$$E_a = s/a \cdot E_s + (1-s/a) \cdot E_g$$

E_c, E_p, E_a : コンクリート, セメントペーストおよび骨材のヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

E_s, E_g : 細骨材および粗骨材のヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

V_a : 骨材容積比(m^3/m^3), x : 水セメント比, t : 材齢(日),

k : 混和材混入率(%), μ : 吸水率(%)

骨材の種類 混和材の種類	普通骨材				軽量骨材*
	無混入	高炉スラグ	フライアッシュ	シリカフェーム	無混入
k_{int}	$k = \frac{\kappa_1 \cdot t}{3.8 + t} + 0.52$ $\kappa_1 = 0.18 \cdot x^{-0.6}$	$k = \frac{0.31 \cdot t}{33 + t} + 0.73$	$k = \frac{0.36 \cdot t}{33 + t} + 0.66$	$k = \frac{0.31 \cdot t}{33 + t} + 0.73$	$k = \frac{0.22 \cdot t}{3.8 + t} + 0.28$
λ_{∞}	—	0.013	0.009	0.015	—
E_s	$E_s = \frac{5.89}{\mu^{0.22}}$				
E_g	$E_g = \frac{5.89}{\mu^{0.22}}$				1.45

*適応できる軽量骨材は人工軽量骨材のみ

3)ひび割れが発生する引張限界ひずみは、第5章で提案した式(5.3.12)を使用する。

以上のような仮定のもと修正ベースマレー法によるひび割れ幅の予測式は、付着損失域の長さ l の比例定数については $a = 0.08$, クリープによる乾燥収縮ひずみの低減 $b = 3$ とし, 拘束率については, 拘束率 λ に応じてひび割れ本数が変化するように $\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0)$ とした。拘束率が 0.5(50%)であれば乾燥収縮ひずみが 1/2 の場合と同等のひび割れ状況になる。部材中の複数ひび割れの各最大値の平均値として式(6.3.4)で表される。

$$w = 2l \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0)}{b} \right) \quad (6.3.4)$$

ここに、 l : ひび割れ近傍の付着損失域の長さ(mm)

$$l = a \frac{d_b}{\rho}$$

σ_s : 鉄筋応力(N/mm^2)

$$\sigma_s = E_s \left(\frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b} + \varepsilon_t \right) \cdot \left(\frac{L - 2m_s l}{Ln\rho + 2m_s l} \right)$$

m_s : ひび割れ本数

$$m_s = 1 + \frac{Ln\rho}{2l} \left(\frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b \varepsilon_t} \right)$$

d_b : 鉄筋径(mm)

ρ : 鉄筋比 = A_s/A_c

A_s , A_c : 鉄筋およびコンクリートの総断面積(mm²)

L : 部材長さ(mm)

n : ヤング係数比 = $E_s/E_c(t)$

E_s , $E_c(t)$: 鉄筋および材齢 t 日のコンクリートのヤング係数(N/mm²)

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

ε_t : 引張限界ひずみ($\times 10^{-6}$)

a : 比例定数($a = 0.05$)

b : クリープを考慮した低減係数($b = 2$)

λ : 拘束率

6.4 小柳法によるひび割れ幅の予測手法

収縮ひび割れ幅に関する予測式の多くは、ひび割れ間隔をあらかじめ計算から求めておいてからひび割れ幅を予測する手法がとられている。しかしながら、このような方法では、経時的なひび割れ進展が明確にはなりにくく、ひび割れ間隔に及ぼす要因である鉄筋比、収縮変形量、拘束率、スパン長さ、開口部、誘発目地間隔などを充分に取り込むことが困難である。そこで、小柳ら^{6,7)}は、コンクリートと鉄筋の付着特性を非線形モデル化し、収縮によって発生するひび割れ幅の動きを経時的に追跡するための予測式である小柳法を提案している。小柳法は、付着の取り扱いを非線形増分法にし、ひび割れ後の鉄筋とコンクリートの付着すべりを考慮し、材齢の経過とともに、複数のひび割れの発生状況を追跡できるようにしたものである。

図-6.4.1 に小柳法における解析フローチャートを示す。小柳法の特徴としては以下のようなことが挙げられる。

- 1) 乾燥収縮やクリープおよびヤング係数の経時的な変化を増分法によって逐次的に考慮した解析であること。
- 2) ひび割れ発生毎に、付着すべり剛性を考慮した構成式に組みなおし、経時的に追跡できる。
- 3) 付着すべり剛性の設定を非線形体としている。
- 4) スパン長さを分解して取り扱うため、開口部や誘発目地などの変断面をもつ場合にも適用できる。

以下に、小柳法による予測手法について述べる。

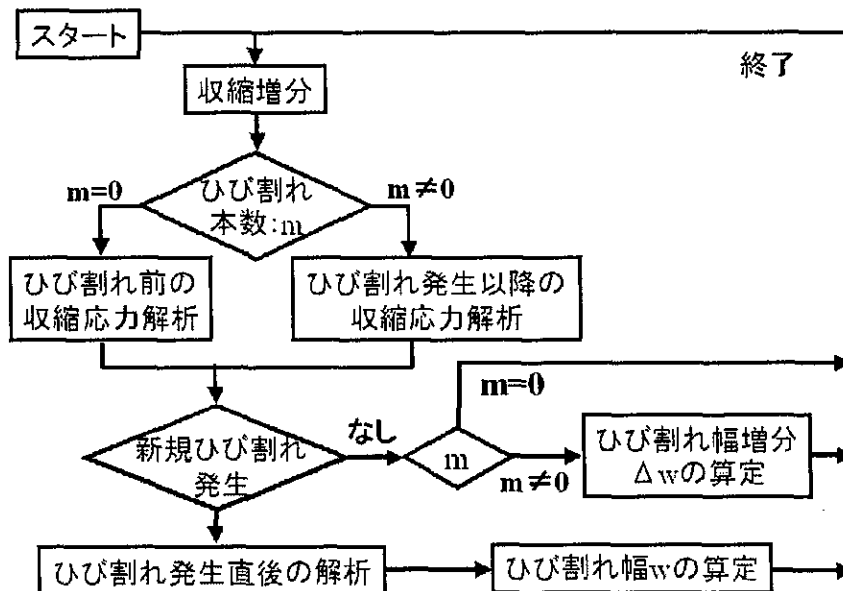


図-6.4.1 小柳法のフローチャート^{6,7)}

6.4.1 仮定条件

小柳法におけるひび割れ幅の予測において以下のことを仮定し予測式が導きだされている。

- 1)断面内の応力やひずみは、平面保持が成り立つ
- 2)クリープ性状は圧縮、引張ともに同じである。
- 3)ひび割れ部の剛性は、鉄筋応力との関数式で表される弾塑性付着バネとする。
- 4)拘束は、部材両端から受けることとし、拘束材の剛性は弾性体とする。

さらに、本研究では修正ベースマレー法と同様に、以下のような仮定を設けた。これらの仮定を新たに設けることによって、コンクリート構造物の構造設計段階で得られる情報を用いてひび割れ幅の予測が可能になり、また、使用するコンクリートの調合や材料特性が取り込まれているため、予測結果に伴いコンクリートの調合修正が行いやすいなどの特徴がある。

- 1)乾燥収縮ひずみは式(6.3.2)に示す日本建築学会式を適用する。
- 2)クリープひずみは乾燥収縮ひずみと同様に日本建築学会で示されている式である式(6.4.1)を適用する。

$$C(t, t_0) = CR \cdot \log_e(t - t_0 + 1) \quad (6.4.1)$$

$$CR = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

ここに $C(t, t_0)$: スペシフィッククリープひずみ ($\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

CR : 回帰分析により定まる係数 ($\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

K_1 : 調合条件による影響に関する係数

K_2 : 载荷開始材齢による影響に関する係数

K_3 : 環境条件による影響に関する係数

K_4 : 供試体寸法による影響に関する係数

t : 材齢(日), t_0 : 载荷開始材齢(日)

- 3)ヤング係数には式(6.3.3)に示す複合則理論式を適用する。
- 4)ひび割れが発生する引張限界ひずみは、第5章で提案した式(5.3.12)を使用する。

6.4.2 予測式の構成

(1) ひび割れ発生前の収縮応力解析

任意時間における自己ひずみ増分 ΔCR は、収縮増分 $\Delta \epsilon_{sh}$ の他にクリープ増分 $\Delta \epsilon_{cr}$ が作用するため、これらの和で表される。なお、ここでは圧縮力および圧縮変形をプラス側としている。

$$\Delta CR = \Delta \epsilon_{sh} + \Delta \epsilon_{cr} \quad (6.4.2)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_{sh}$: 収縮増分、 $\Delta \epsilon_{cr}$: クリープ増分

この自己ひずみ増分が拘束されるとそこに軸力増分 ΔPN が発生する。このときの変形および力の釣合い式は、式(6.4.3)で示される。

$$\Delta \epsilon_0 = \Delta CR + \Delta PN / (E_c + E_s) \quad (6.4.3)$$

$$K_2 \cdot (\Delta \epsilon_0 - \Delta CR) \cdot L + (K_1 + K_3) \cdot \Delta \epsilon_0 \cdot L = 0 \quad (6.4.4)$$

ここに、 $K_1 = A_s \cdot E_s / L$ 、 $K_2 = A_c \cdot E_c / L$ 、 $K_3 = a_s \cdot E_s / L$

ΔPN : 軸力増分、

$\Delta \epsilon_0$: コンクリート位置ひずみ増分

E_s, E_c : 鉄筋およびコンクリートのヤング係数

A_s, A_c : 鉄筋およびコンクリートの断面積

L : スパン長さ

a_s : 内部鉄筋断面積

(2) ひび割れ発生直後の解析

ひび割れが発生すると、その瞬間に拘束軸力は、内部鉄筋で負担されるため、拘束変形が緩み、その結果コンクリート引張応力が減少する。釣り合い条件とひび割れ幅と軸力の関係から、 m 本のひび割れ発生時における釣合い式は、式(6.4.5)で表される。

$$PN' - PN = PN / \{ K_4 / K_2 + K_4 / (K_1 + K_3) + m \} \quad (6.4.5)$$

ここに、 PN : ひび割れ直前の軸力、

PN' : ひび割れ直後の軸力、

K_4 : 鉄筋とコンクリートの付着すべり剛性

m : ひび割れ本数

ここで、 K_4 の付着すべり剛性については、小柳法では増分法で解析が行われているために図-6.4.2 に示すようなひび割れ幅と鉄筋力の関係から得られる曲線の接線モジュラスとして用いられており、新たなひび割れ発生時での鉄筋力

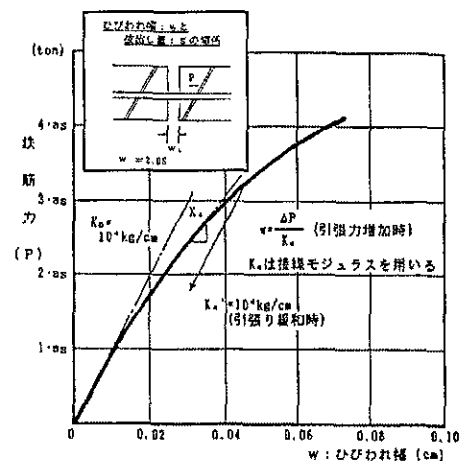


図-6.4.2 ひび割れ幅と鉄筋力の関係 ^{6.7)}

の戻りに対しては、一般に、除荷時に残留すべりが見られることを考慮して式(6.4.6)で表されている。

$$K_4 = a_s \times 10^4 \quad (6.4.6)$$

ここに、 a_s ：鉄筋の断面積

(3)ひび割れ発生以降の解析

ひび割れ近傍は、鉄筋との付着すべり剛性だけで軸力を負担することとしその部分のコンクリート剛性は無視できるものと仮定する。また、その影響範囲の長さをひび割れ1本あたり L_{cr} とする。

最初のひび割れ発生後、式(6.4.4)に示す力の釣り合い条件式は付着すべり剛性が加わるため式(6.4.7)で表される。

$$K_2 \cdot (\Delta\varepsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - L_{cr}) + (K_1 + K_3) \cdot \{\Delta\varepsilon_0 \cdot (L - L_{cr}) + \Delta PN / K_4\} = 0 \quad (6.4.7)$$

さらに、ひび割れ本数が m 本の場合は式(6.4.4)は式(6.4.8)で表される。

$$K_2 \cdot (\Delta\varepsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + (K_1 + K_3) \cdot \{\Delta\varepsilon_0 \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + \Delta PN / K_4\} = 0 \quad (6.4.8)$$

(4)付着すべり剛性

付着に関する基本微分方程式は式(6.4.9)で表されるが、小柳法においては、付着機構をボンドリンクという考え方から、図-6.4.3に示すような水平剛性のみをもつバネにモデル化されている。そのため間隔1ごとに付着バネを設定しているが、各区間のコンクリートの変形は無視し、 $n \cdot q_s = 0$ としている。

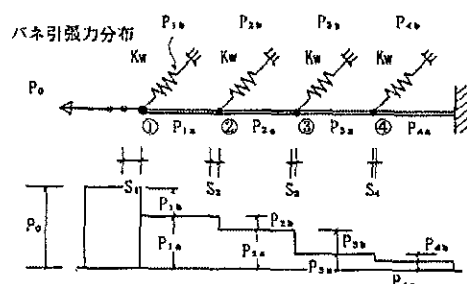


図-6.4.3 付着バネモデル図 6.7)

$$\frac{d^2 S_x(t)}{dx^2} = \frac{1 + n \cdot q_s}{E_s \cdot a_s} \cdot \psi \cdot \tau_x(t) \quad (6.4.9)$$

ここに、 ψ ：鉄筋周長

n ：ヤング係数比

q_s ：鉄筋比

S_x ： x 位置における鉄筋とコンクリートの相対すべり

この付着バネは、鉄筋とその周辺のコンクリートの相対的なずれ変位と力の伝達、変形に関して連続性を有しており、式(6.4.10)に示す連立方程式から求めることが出来る。

このとき、小柳法においては、付着応力と相対すべりの関係については既往の研究によって得られたものを参考とし、図-6.4.4のように基本曲線を設定している。

$$\begin{aligned}
 P_0 &= P_{1,a} + P_{1,b} \\
 P_1 &= P_{2,a} + P_{2,b} \\
 &\dots\dots\dots \\
 P_{f-1} &= P_{f,a} + P_{f,b}
 \end{aligned}
 \tag{6.4.10}$$

ここに、 P_{f-1} : $f-1$ に作用する力

$$P_{f-1,a} : f \text{ 点と } f-1 \text{ 点間の鉄筋に作用する力 } P_{f-1,a} = K_4 \cdot (S_{f-1} - S_f)$$

$$P_{f,b} : f \text{ 点での付着バネに作用する力 } P_{f-1,b} = K_w \cdot S_{f-1}$$

S_f : f 点でのすべり変形量

$$K_w : \text{付着バネ } K_w = \Psi \cdot k \cdot l$$

k : 付着応力 τ と相対すべり S の関係式 $\tau = k \cdot S$ で表される係数

$$K_s : \text{鉄筋剛性 } K_s = E_s \cdot a_s / l$$

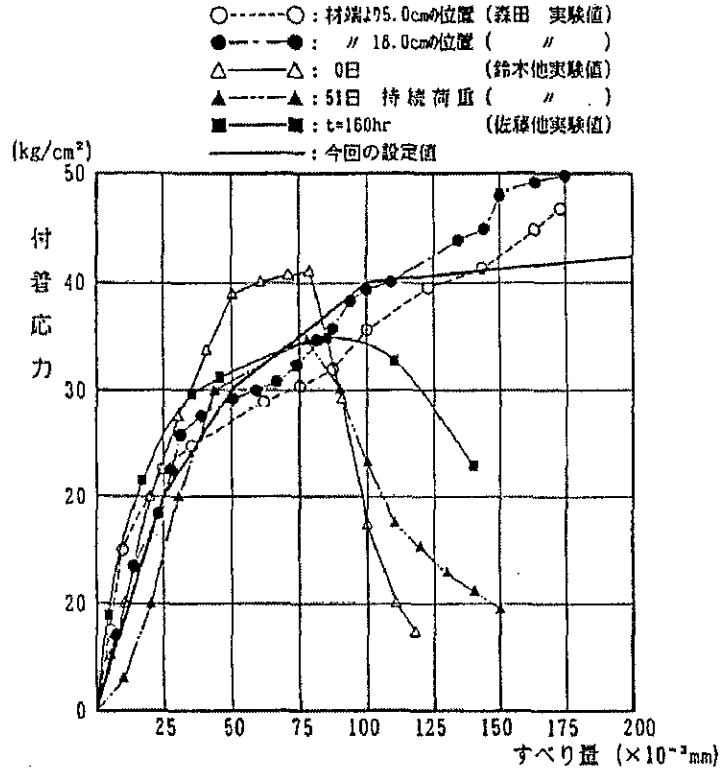


図-6.4.4 付着応力-すべり量の関係

6.5 予測結果の比較

6.5.1 対象とする部材

対象とする外壁部材の概要を図-6.5.1、図-6.5.2に示す。また、使用されているコンクリートの調合を表-6.5.1に示す。この2例については、実部材のひび割れ状況の調査結果が文献^{6.7)}にて報告されている。

調査結果のある300日とほぼ定常状態になると考えられる材齢5年におけるひび割れ状況を予測する。予測のための部材の特性値を表-6.5.2に示す。ここで、外部拘束材による拘束率については図-6.5.3に示すように鈴木・大野ら^{6.8)}が有限要素法増分型クリープ解析によって算出された値を参考にし、事務所では3階外壁を対象としていることから、0.25と仮定し、さらに内部鉄筋による拘束率として0.1を考慮して、コンクリートの拘束率は0.33とした。一方、ショッピングセンターでは1階外壁を対象としていることから、外部拘束材による拘束率を0.5として仮定し、さらに内部鉄筋による拘束率として0.1を考慮して、コンクリートの拘束率は0.55とした。

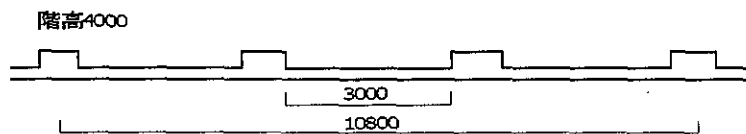


図-6.5.1 事務所3階外壁

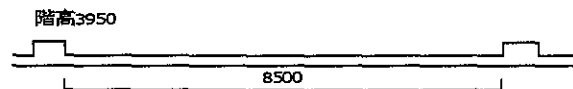


図-6.5.2 ショッピングセンター1階外壁

表-6.5.1 コンクリートの調合

設計基準強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	単位量 kg/m ³			細骨材率 (%)	細骨材 吸水率 (%)	粗骨材 吸水率 (%)
		水	セメント	粗骨材			
24	57	180	316	950	46.9	2.5	1.02

表-6.5.2 部材の特性値

	壁高 (mm)	壁長 (mm)	壁厚 (mm)	鉄筋径 (mm)	鉄筋比 (%)	拘束率
事務所	4000	3000	180	9.5	0.53	0.35
ショッピングセンター	3950	8500	200	11.2	0.49	0.55

a)1層2スパン

高さ中心 0.55

c)1層6スパン

高さ中心 0.63	高さ中心 0.63	高さ中心 0.58
--------------	--------------	--------------

b)1層4スパン

高さ中心 0.60	高さ中心 0.57
--------------	--------------

d)1層8スパン

高さ中心 0.71	高さ中心 0.69	高さ中心 0.65	高さ中心 0.59
--------------	--------------	--------------	--------------

e)2層6スパン

高さ中心 0.42	高さ中心 0.37	高さ中心 0.24
高さ中心 0.56	高さ中心 0.56	高さ中心 0.55

f)3層6スパン

高さ中心 0.27	高さ中心 0.23	高さ中心 0.17
高さ中心 0.38	高さ中心 0.34	高さ中心 0.24
高さ中心 0.55	高さ中心 0.55	高さ中心 0.53

図-6.5.3 スパン数および層数と拘束度^{6.8)}

6.5.2 予測結果

(1)使用したコンクリートの力学特性

上述したように、本研究が提案する修正ベースマレー法(橋田式)および小柳法においては、コンクリートのヤング係数、乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみの経時変化を用いてひび割れ幅を算出している。打設後 10 年間のコンクリートの力学特性の経時変化を図-6.5.4 に示す。乾燥収縮ひずみは表-6.1.1 に示した日本建築学会の性能項目と評価指標ならびに一般環境下における標準的な設計値によれば乾燥期間 180 日で 800×10^{-6} 以下となっており、ここで使用されているコンクリートはこの条件はクリアしている。

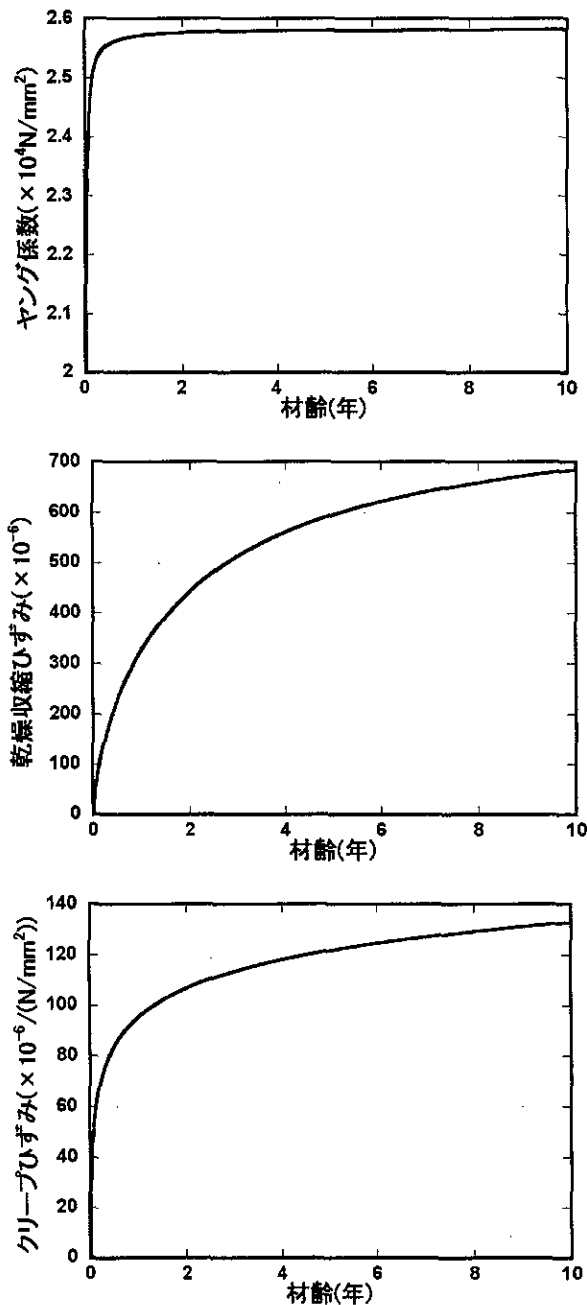


図-6.5.4 コンクリートの力学特性に関する経時変化

表-6.5.3 に文献^{6,7)}による実部材のひび割れ幅調査結果と修正ベースマレー法(橋田式)および小柳法によって算出したひび割れ幅の予測結果を示す。小柳法においてはひび割れ本数が実測データよりも多くなっているがひび割れ幅においてはいずれの予測式もほぼ実測データと同様な結果を示している。

また、図-6.5.5 および図-6.5.6 に修正ベースマレー法(橋田式)および小柳法から算出したひび割れ幅の経時変化を示す。修正ベースマレー法では、いくつかのひび割れが発生してもその影響が考慮されていない。さらに、時間の経過とともにひび割れ幅が小さくなる傾向を示している。これは、算出式のヤング係数比の影響であると思われる。修正ベースマレー法のヤング係数比については今後検討していく予定である。小柳法においては、3本目までのひび割れにおいてその幅の算出結果を示している。これによると、ひび割れが追加して発生するとその影響が既に発生しているひび割れに生じていることが分かる。

表-6.5.3 壁1枚あたりのひび割れ予測結果

	材齢	乾燥収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	実験結果		修正ベースマレー法		小柳法	
			最大幅 (平均値) (mm)	ひび割れ 本数 (本)	最大幅 (平均値) (mm)	ひび割れ 本数 (本)	最大幅 (mm)	ひび割れ 本数 (本)
事務所	300日	400	0.2	約1	0.24 (0.16)	0.7	0.26	2
	5年	680	-	-	0.24 (0.16)	1.4	0.27	4
ショッピング センター	500日	500	0.35 (0.2)	3.7	0.35 (0.23)	3.1	0.39	7
	5年	680	-	-	0.33 (0.22)	5.3	0.40	14

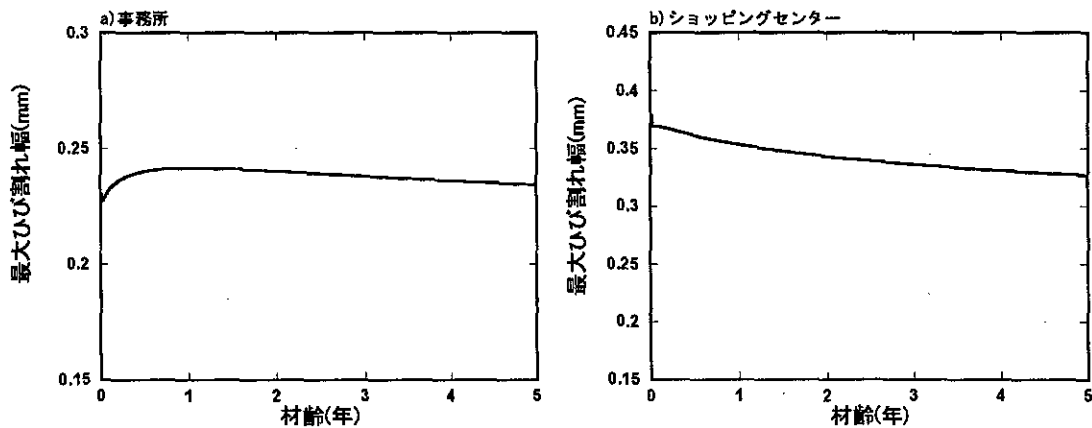


図-6.5.5 修正ベースマレーによるひび割れ幅算定結果

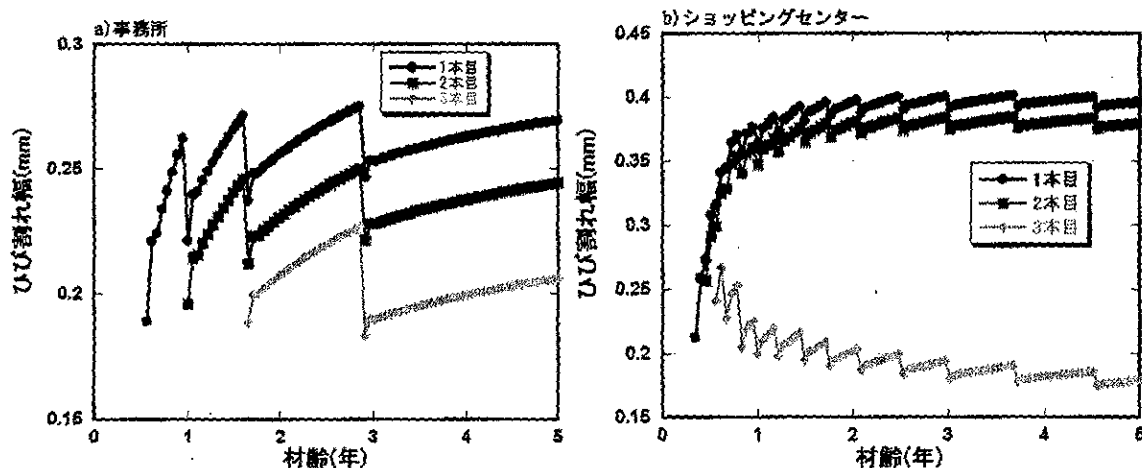


図-6.5.6 小柳法によるひび割れ幅算定結果

6.6 まとめ

本章では、第5章で提案したひび割れ発生条件を用い、鉄筋とコンクリートの付着の取り扱いを比較的簡単に単純化した収縮ひび割れ幅の簡易予測法である修正ペースマレー法・橋田式と鉄筋の付着の取り扱いが複雑な非線形増分解法による小柳法を取り上げ、実構造物のひび割れ調査結果とひび割れ幅の予測結果を比較検討した。その結果、小柳法においてはひび割れ本数が調査結果に比べて多くなっているがひび割れ幅においてはいずれの予測式においても調査結果とほぼ同等の結果が得られることが分かった。

本研究が提案する予測式は、コンクリートの調合などの影響が加味されており、ひび割れ幅を検証する場合、鉄筋の本数のみを増やして対応するのではなく、コンクリートの調合を変更してひび割れ幅を抑制する場合にも充分に対応できるものと思われる。

【参考文献】

- 6.1) 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，日本建築学会，2006.2
- 6.2) 川上洵，榎福浄，高橋巧，清水俊一(訳)：コンクリート構造物の応力と変形－クリープ・乾燥収縮・ひび割れ，技報堂出版，pp.409-412，1995.1
- 6.3) 森田司郎：ひび割れの制御設計－RC 構造の場合－，コンクリート・ジャーナル，vol.11，No.9，pp.56-63，1973.9
- 6.4) G.D. Base and M.H. Murray :A New Look at Shrinkage Cracking, Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia, vol.CE24, No.2, pp.171-176, 1982
- 6.5) 橋田浩：鉄筋コンクリート造外壁の収縮ひび割れ幅と本数の簡易推定式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)A-1，pp.645-646，2005.9
- 6.6) 清原千鶴：複合則理論を用いたコンクリートの変形性能の評価方法に関する研究，東北大学・学位論文，2005
- 6.7) 小柳光生，増田安彦，中根淳：乾燥収縮による外壁のひび割れ幅予測に関する研究，コンクリート工学論文集，vol.2，No.2，pp.59-68，1991.7