

鉄筋コンクリート部材の温度ひび割れ幅算定法

小柳 光生 川口 徹
神代 泰道 渕田 安浩

Calculation Method on Crack Widths due to Thermal Stress of Reinforced Concrete Member

Mitsuo Koyanagi Tohru Kawaguchi
Yasumichi Koushiro Yasuhiro Huchita

Abstract

A calculation method on crack width to mass concrete members was already presented. This paper is proposed about improving method, and this method is practical to predict crack width (considering harden shrinkage strain and thermal shrinkage strain) extending to high strength concrete. The points are 1) examination of effects in crack on concrete strengths, thermal behaviors and steel ratios from test results 2) data arrangement of crack width and numbers from investigation results on structural beams in construction 3) suggestion of useful calculation method on crack width 4) parameter examination with simulation casestudy.

概要

これまで外的拘束を受けるマスコンクリートの梁、壁部材を対象にひび割れ幅計算法を提案¹⁾しているが、本報告では、その計算法を改良し、高強度コンクリートまで含めた実用的なひび割れ予測法(温度収縮の他、硬化収縮考慮)を提案する。内容は、①コンクリート強度、温度履歴や鉄筋比などを要因とした一連のひび割れ実験を行い、各要因がひび割れに及ぼす影響を検討した。②高強度コンクリートを用いた実構造物のひび割れ調査を行い、ひび割れ本数、幅のデータを整理した。③これらのデータをもとに、実用的なひび割れ幅の予測法を提案した。④シミュレーション解析による要因分析を試みた。

1. はじめに

最近、40~60N/mm²の高強度コンクリートの使用が増加してきているが、コンクリート硬化時に大きな水和熱が発生すること、そのために、梁部材や壁部材に、温度ひび割れが生じ易いという問題が懸念されている。またセメント量が多くなれば、初期の自己収縮変形も増えるため、このこともひび割れを発生し易くする恐れがある。

筆者らはコンクリート強度、鉄筋比、温度履歴(セメント種類の影響)を要因として、拘束フレームを用いた鉄筋コンクリート部材の一連の熱ひび割れ実験を行い、ひび割れ幅、本数への影響を調べた。さらに、これまで提案してきたマスコンクリートひび割れ幅計算法¹⁾の定数を一部修正し、高強度コンクリート部材も含めた実用式を提案し、シミュレーション解析による要因分析を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体と拘束方法

試験体形状と拘束方法をFig. 1に示す。コンクリート試験体のひび割れ観察範囲の断面は20cm×20cm、内法寸法は250cmである。拘束方法は鉄骨を両側からはさみ込み、全体をコンクリート試験体で覆うようにして一体化

を図った。拘束度は鉄骨の弾性係数比を10とすると、0.76に相当し、かなり高い拘束を与えた。試験体の補強筋は断面中央に配置した。

試験体のコンクリート部材には、コンクリート打込み初期に、実物部材の水和熱に近似した温度履歴を与え、外的な拘束によるひび割れを発生させることとした。加熱方法は、ドラム缶内で加熱した温水を分岐管、導水管から試験体周囲に全面一様に加熱できるように循環させながら、所定の温度履歴を模擬するように通水させる。その後、外気温に近くなった材齢4~5日で脱型

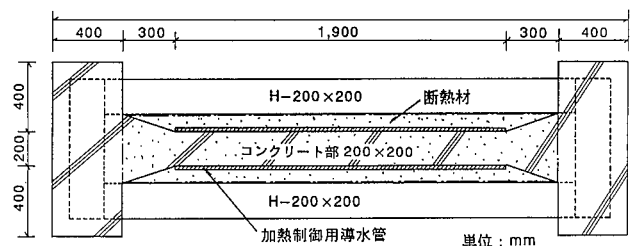


Fig. 1 試験体形状と拘束方法
Specimen Form and Restriction Method

する。なお放熱と乾燥を防ぐため、脱型するまで試験体を導水管およびシールした断熱材で完全に覆った (Photo 1 参照)。材齢 7 日でのひび割れ幅の比較を原則とする。

2.2 試験要因

試験は4回にわたり実施したが、個々の詳細な実験概要は紙面の都合で省略し、関連する内容について包括的に説明する。試験要因は①鉄筋比 (0.3~0.97%までの4種類)、②温度履歴 (最高温度 60, 90°Cの2種類)、③コンクリート設計強度 (24~80N/mm²までの5種類) に大別される。試験体一覧は、Table 1 に示す合計 9 体である。調査表は省略するが、設計強度 60, 80N/mm²それぞれ水セメント比は 29, 22% (C=569, 750) とした。なお打込み温度はいずれも 20°C前後を計画した。温度履歴挙動は最高温度を変えた 2 種類に大別できるが、個々の試験体で多少異なった。またセメントは普通セメントの他、低熱セメントも使用したが、この低熱セメントの熱特性の考慮は、温度履歴 (最高温度 60°C前後) という形で置換させた。

2.3 実験結果

試験体のコンクリート強度一覧を Table 2 に、中心温度履歴測定結果を Fig. 2, 3 に示す。ひび割れ測定結果を Table 1, Fig. 4 に示す。ひび割れ幅は材齢 7 日の測定値を原則としており、いずれも貫通ひび割れである。次に、ひび割れ幅測定値を鉄筋比、コンクリート強度との関係として整理し、Fig. 5 に示す。この図から鉄筋比が小さくなるに伴い、1 本当たりのひび割れ幅が増大する傾向が分かる。高強度コンクリートほどこの傾向が強い。

なお、ひび割れ幅、本数の他、鉄筋歪み、コンクリート歪みも一部測定した。ここでは自由収縮歪みを調べるために製作した、拘束試験体と同一断面形状、同一温度履歴をさせた無拘束試験体 (No. 2-1, 2-3, 2-4 に対応) の内部鉄筋歪み測定結果を整理して Fig. 6 に示す (ただし無拘束とは言っても厳密には埋込鉄筋による若干の拘束を受ける)。コンクリートの温度上昇に合わせて、収縮歪みが一時的に増加し、その後、回復する現象があるが、これは鉄筋ゲージとコンクリートの線膨脹率の違いの影響と言える (しかし材齢 3 日以降、温度は元に戻るため、この影響は無視できる)。この図から、通常強度コンクリート

Table 1 試験体一覧とひび割れ幅 Specimens and Crack Widths

温度履歴	試験体 No.	鉄筋比 (%)	実験値		解析値		設計用圧縮強度 (N/mm ²)	セメントの種類	
			ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ本数	ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ本数			
高強度 (Max 90°C 程度) 履歴	1-1	高強度 コンクリート	0.5	0.60	1	0.54	1	普通セメント	
	1-2	同上	0.71	0.35 0.30	2 3	0.28	2		
	1-3	同上	0.72	0.30 0.35	3 2	0.28	2		
	1-4	同上	0.97	0.25	4	0.25	3		
	1-5	通常強度 コンクリート	0.5	0.30	2	0.27	2		24
温度 (Max 70°C 程度) 履歴	2-1	高強度 コンクリート	0.72	0.30	1	0.31 ^{*1}	1	60	低熱セメント
	2-2	同上	0.5	0.40 ^{*2}	1	0.32 ^{*2}	1	80	
	2-3	通常強度 コンクリート	0.3	0.30	1	0.21	1	30	普通セメント
	2-4	同上	0.71	0.25	2	0.23	2	35	

*1 材齢 9.5 日 (解析はこの材齢までひび割れ発生しないため)
*2 材齢 4.0 日 (測定データの都合上)

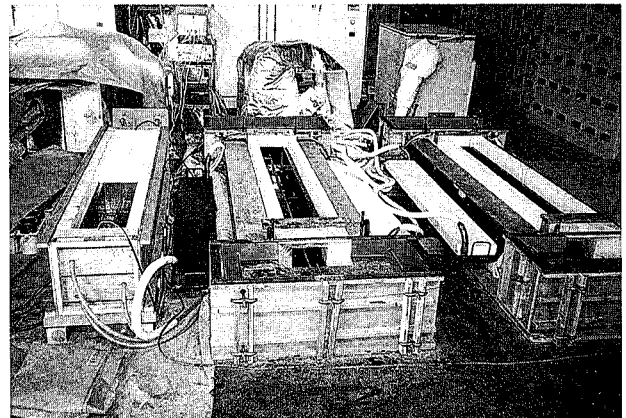


Photo 1 打込み前の試験体 Specimens before Placing

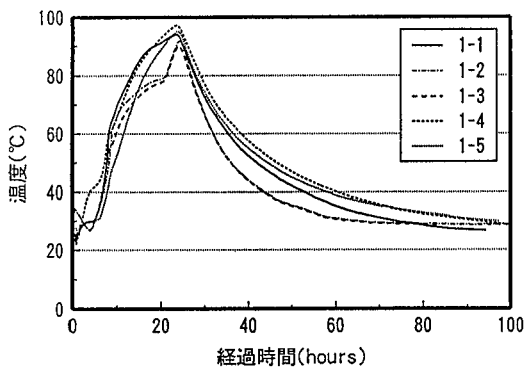


Fig. 2 中心温度履歴 Temperature on Center

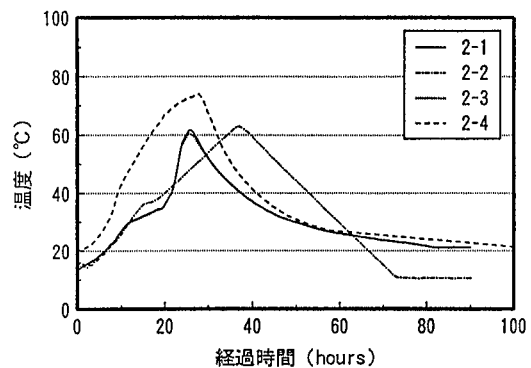


Fig. 3 中心温度履歴 Temperature on Center

(No. 2-3, No. 2-4) は 50×10^{-6} 程度の自己収縮に対し、高強度コンクリート (No. 2-1) は 150×10^{-6} 近い値を示した。また材齢10時間までの動きが少ないが、この時点までまだ硬化していない(ひび割れに影響しない)と思われる。鉄筋歪みの動きがほぼ自己歪み挙動であると考えられる。

3. ひび割れ解析結果との比較

3.1 ひび割れ解析法

ひび割れ解析法の特徴を以下に示す。

1) 自己収縮、クリープおよび弾性係数の経時的な変化を増分法で逐次的に解析する。

2) ひび割れが発生すると、その部分を付着すべり剛性(弾塑性バネ)を取り込んだ構成式に組直し、上述のように、逐次的に解析する。

3.1.1 仮定条件と算定定数

1) 部材のモデル化を Fig. 7 に示す。梁部材、壁部材を対象に、一軸部材にモデル化し、両端で外的拘束(弾性バネ)を受けるものと考えている。断面内は一様温度分布とする。

2) 0.25日ピッチに増分法で解析することとし、外力として、温度変形 ($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定) と硬化収縮変形を考慮する。計算開始(応力-歪み関係の成立)は、打込み後9時間(0.25日:第1ステップと0.50日:第2ステップの温度中間値)を標準とする。

この理由は、水セメント比30%程度の高強度コンクリート(普通セメント・早強セメント)の20°Cにおける凝結時間は混和剤によって多少異なるものの凝結開始で8時間前後、終了は10時間前後、また30°Cにおける凝結開始は6時間前後、終了は7時間前後という報告²⁾があり、計算式を適用できる材齢は凝結してからと判断されるためである。

3) クリープ係数は、以下に示すNevilleの式³⁾を使う。代表的な材齢0.5日, 2日, 4日におけるクリープ係数曲線を Fig. 8 に示す。

$$\Phi(\tau, t) = 3 \times 0.132 e^{n(t-\tau+1) \times 10.3 / (5 + \sqrt{\tau})} \dots (3.1)$$

τ : 載荷材齢(日数), t : コンクリート材齢(日数)

Table 2 コンクリート強度試験結果
Results of Concrete Strength Tests

材齢 No.	現場養生 (N/mm ²)							標水 28日
	1日	2日	3日	4日	7日	28日		
1-1	53.7	—	—	59.4	62.2	64.4	81.9	
1-2	—	—	—	—	—	—	—	
1-3	43.8	49.7	—	—	52.7	55.5	—	
1-4	51.4	—	—	57.7	—	64.2	75.4	
1-5	15.0	—	—	18.4	21.3	26.5	31.6	
2-1	18.8	44.7	—	—	58.0	73.2	87.8	
2-2	—	—	77.3	—	83.2	91.6	95.8	
2-3	—	—	—	—	26.2	34.3	36.2	
2-4	20.9	26.9	—	—	28.3	33.9	44.0	

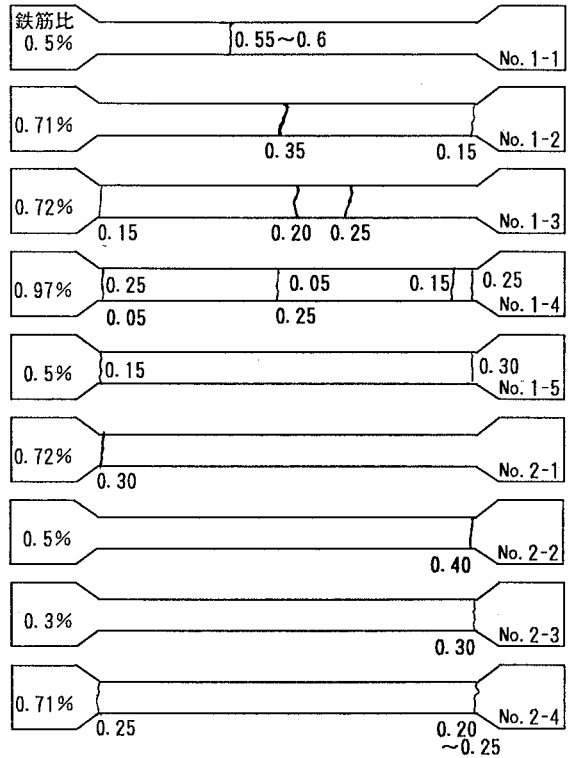


Fig. 4 ひび割れ測定結果
Results of Crack Measurement

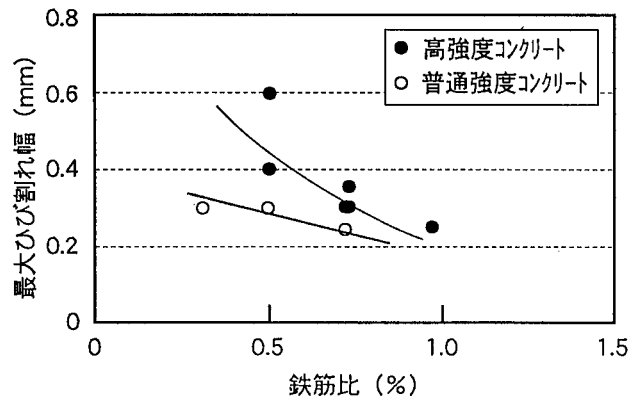


Fig. 5 ひび割れ幅と鉄筋比の関係
Relation of Crack Width and Steel Ratio

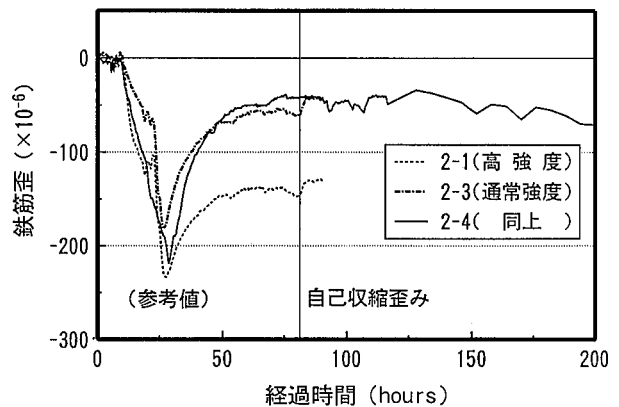


Fig. 6 硬化収縮歪みの動き
Movement of Harden Shrinkage Strains

4) コンクリート弾性係数は、以下に示す式を使う。

$$E_c = 14000 \sqrt{F_c} / (0.75 + 7/t) \quad \dots\dots (3.2)$$

F_c : 4週圧縮強度 (kgf/cm²), t : コンクリート材齢 (日数)

5) ひび割れ要素は、付着バネ (弾塑性剛性) という考えを用いて、Fig. 9のようなひび割れ幅 : w と鉄筋応力 : σ_s の関係式で表わす。

$$W = 2\sigma_s / (257 - 35\sigma_s) \quad \dots\dots (3.3)$$

σ_s : 鉄筋引張応力度 (tonf/cm²)

6) ひび割れ発生条件は Table 3 に示す。設計基準強度に応じて使い分けしている。ひび割れ発生時の引張強度を全体に低く設定しているが、初期材齢のひび割れを対象にしていることや持続応力作用下であること、またこのような設定が、測定結果との対応性が良くなることなどから決めた。

7) 任意の材齢における拘束度は、その時の (部材断面積 × 弾性係数) と (拘束材断面積 × 弾性係数) の対比で表わすことができる。なお部材コンクリート弾性係数は式 (3.2) のように材齢の関数である。実構造物の場合の拘束は、隣接したスラブ、柱や下階躯体であるが、その拘束度は、下式の拘束比 : R として 0.5 を標準とする。

$$R = A_r \times n / (A_r \times n + A_c) \quad \dots\dots (3.4)$$

$$n = E_r / E_{c,28}$$

A_r : 拘束材断面積 A_c : 部材断面積

E_r : 拘束材弾性係数 $E_{c,28}$: 部材弾性係数 (材齢 4 週)

8) スパン分割要素は 25cm (=Lcr) とする。ひび割れが発生すると、その要素は付着バネに置換される。

9) スパン長は柱間スパンを採るが、前述の Fig. 7 のようなモデル化 (両端からだけ拘束を受けるという設定) が実構造物とやや異なるため、長い場合でも 6m 以下とする。

10) 自己収縮歪みは考慮する。この自己収縮歪み挙動については、まだ十分定量的に整理されていないことも考慮して、当面、調査に関わりなく、Fig. 10 の値を使用する。この図は、実験データを参考に決めたもので、Fig. 6 の結果とも大きくはずれるものではない。

11) 弾性係数、クリープ係数の計算に使用するコンクリート材齢は、温度を考慮した有効材齢を用いる。

3.1.2 ひび割れ幅算定式 算定式は、ひび割れ発生前、ひび割れ発生直後、ひび割れ発生以降の 3 段階それぞれの釣合式を誘導し、計算しているが、その詳細について

Table 3 ひび割れ強度定数
Coefficient of Crack Strength

設計基準強度 (N/mm ²)	18~24	27~30	33~36	40~
ひび割れ発生時の引張強度 (N/mm ²)	10	12	15	20

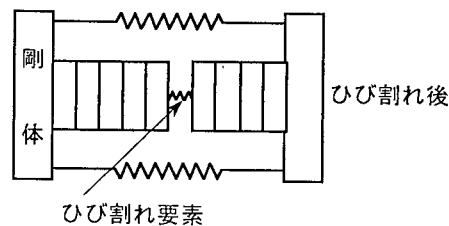


Fig. 7 部材ひび割れモデル
Concrete Crack Model

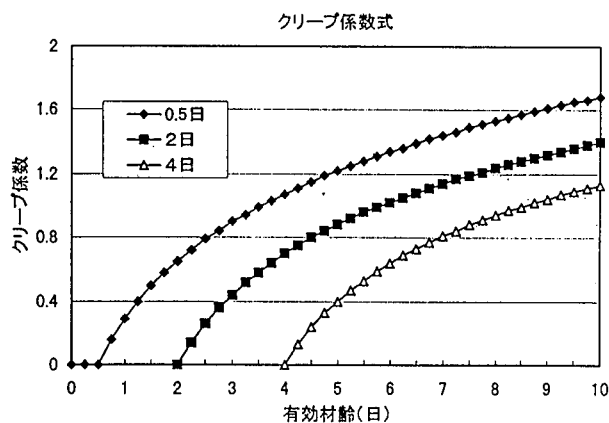


Fig. 8 代表的な材齢でのクリープ係数
Creep Coefficient on Typical Ages

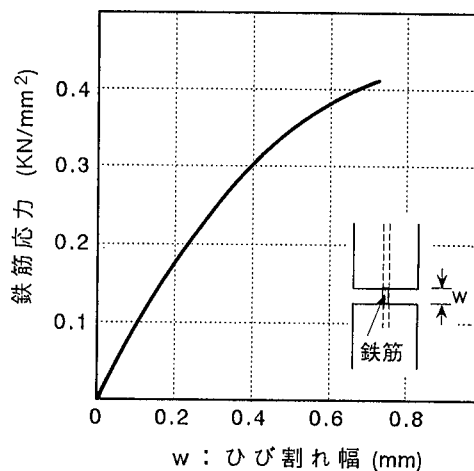


Fig. 9 ひび割れ幅と鉄筋応力の関係
Relation of Crack Width and Steel Stress

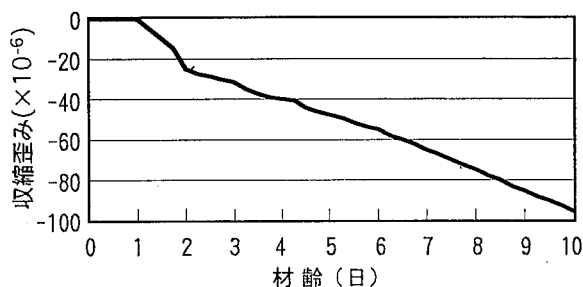


Fig. 10 硬化収縮歪み計算値
Calculation Curve of Harden Shrinkage Strains

は、参考文献1)を参照されたい。

3.2 ひび割れ測定結果と解析結果の比較

3.1節で述べた解析法を使って、2章の拘束ひび割れ試験結果を比較検討し、前述のTable 1, Fig. 11に示す。ひび割れ幅、本数とも良い近似を示した(比較材齢は原則として7日)。なお、計算開始は9時間を原則としたが、低発熱セメントを使用した試験体(No.2-1, No.2-2)の場合、普通セメントよりも凝結が遅れる傾向にあることを考慮し、計算開始を15時間として計算した。

3.3 構造物梁部材のひび割れ調査と解析的検討

高強度コンクリートを使用した実構造物の梁部材のひび割れを調査し、そのデータを用いて、本解析法の適用性を検討した。この建物は、地上26階、地下1階のRC造であり、設計基準強度は1~13階床梁で42N/mm²、13~17階床梁で39N/mm²である。ひび割れ調査は8階~17階床梁について実施した。調査材齢は、8階床梁で5ヵ月、17階床梁で10日程度とかなり相違があるため、多少材齢の違いによるひび割れ幅への影響が見込まれるが、その影響は小さいと判断し、同一に取り扱った。

ひび割れ調査結果をFig. 12に示す。ここでは0.1mm以上のひび割れについて、その平均ひび割れ本数(調査梁1本に対する)と平均ひび割れ幅(全ひび割れ数に対して)を階毎に整理した。上階にいくほどひび割れ幅は少なくなる傾向にあった。また、調査梁総数113本について、それぞれの最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅を比較し、Fig. 13に示すが、その比率は1.17(標準偏差0.15)であった。最大ひび割れ幅は、平均幅の1.5倍を見込んでおけば良いといえよう。

この実構造物について、ひび割れ本数、幅についての解析的検討を行った。まずFEMによる温度解析を行った。解析に使用する鉄筋比の考え方は、①梁底からスラブ下面までの矩形断面積に対する下端筋断面積の比という考えと②梁天端から梁底までの矩形断面積に対する上端、下端断面積和の比という二つの考えがある(Fig. 14参照)ため、これらの平均鉄筋比を解析に用いた。その他の仮定は3.1節に準じる。測定結果と解析結果を比較して前述のFig. 12に示すが、おおまかに良好な対応関係であった。

以上、実験的検討、実構造物での検討結果から、今回、提案する解析法は、実用的なひび割れ幅算定法と考える。

4. 梁部材のひび割れ要因に関する解析的検討

本解析法を使って、実際の構造物の梁部材を想定したひび割れ幅、本数に及ぼす代表的な因子を変化させて、それぞれの因子の影響度合を分析する。なお、解析上の仮定条件は、3.1節の考え方を採用する。

(1) 要因内訳

打込み温度:15℃ 解析スパン:6.0m 梁断面と拘束材断面の比:1.0

断面平均温度曲線での最高温度(打込み温度15℃):60℃, 45℃(それぞれA, Bシリーズ)

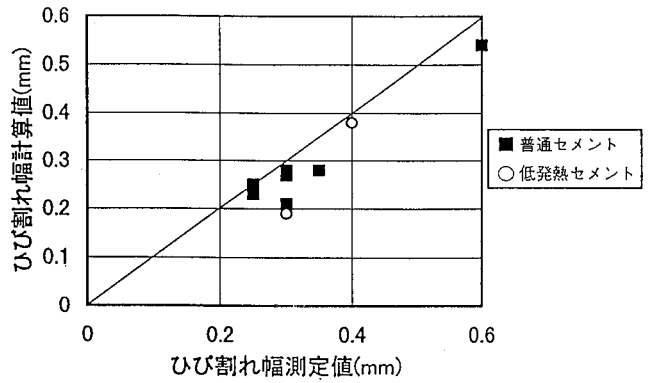


Fig. 11 ひび割れ幅測定値と計算値の比較
Comparison of Cal. and Meas. on Crack Width

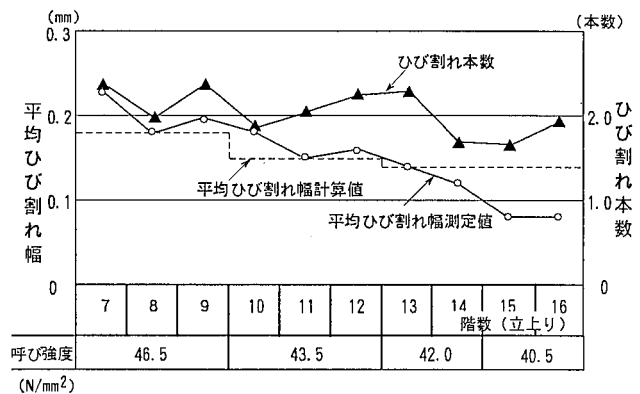


Fig. 12 各階のひび割れ幅と本数
Crack Widths and Amount on Each Floor

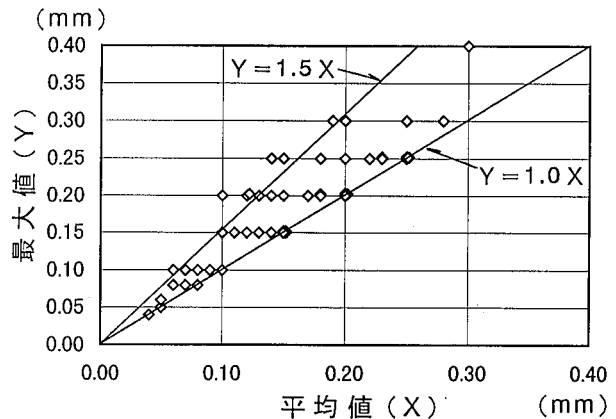


Fig. 13 ひび割れ幅最大値と平均値の関係
Relation of Maximum and Mean on Crack Widths

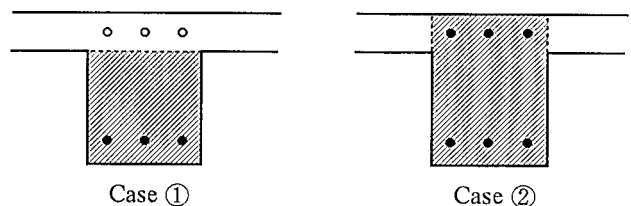


Fig. 14 解析対象の梁断面の考え方
Section Models of Beam for Analysis Object

温度降下勾配: 0.5, 1.0, 1.5°C/hr (それぞれA-1, A-2, A-3 または B-1, B-2, B-3)。

鉄筋比: 0.5, 0.75, 1.0%の3ケース

コンクリート圧縮強度: 30N/mm², 60N/mm²の2ケース

(2) 解析結果

合計36通りについてひび割れ解析を行った。解析結果の一部をFig. 15~17に示すが、全体的な傾向とその考察を以下に述べる。

1) 最高温度が高いAシリーズの方が、ひび割れ幅と本数は増加する。

2) 鉄筋比が高くなるほどひび割れ本数は増えるが、ひび割れ幅は小さくなる。

3) 温度降下は、必ずしも緩慢冷却が効果的でなく、むしろ早めに冷却させる方がひび割れ制御の面で有利という結果であった。これは「せき板は早期に脱型し、若材齢から乾燥収縮を開始させた方が有利である」という指摘³⁾と同じ理屈と考えられる。

4) コンクリート強度が高いと条件によってはひび割れ発生を抑えるが、一旦、ひび割れが発生すると、ひび割れ幅は大きくなる傾向にある。高強度コンクリートで鉄筋比が小さいと、ひび割れ本数が少ない分、有害なひび割れ幅を生じる恐れがある。

5) 梁内部の温度上昇(断面平均)が45°Cの場合(Bシリーズ), 鉄筋比1.0%とすれば、ひび割れ幅(平均値)は0.2mm以内に制御できる。ただし、最大ひび割れはその1.5倍とすると、高強度の場合、0.3mm近いひび割れ幅を生じる恐れもある。

6) 高強度コンクリート梁を施工する場合、ひび割れを少なくするためには、最高温度を抑える必要があり、低熱セメントなどの使用が望ましい。ただし、冬期での適用は、凝結遅延という別の問題もあり、十分な検討が必要である。なお、プレキャスト材の使用も外的拘束が少ないためひび割れ防止に有効である。

5. まとめ

高強度コンクリート部材の場合、通常強度の部材に比べてセメント量が増えるため、現場打ちコンクリート梁や壁部材は、マスコンクリートでなくてもひび割れが発生する恐れがある。今回、高強度コンクリートまで含めた外的拘束を受ける水和熱ひび割れ予測手法を確立するため、コンクリート強度や鉄筋比を要因とした熱拘束ひび割れ実験や実構造物の調査を行い、そのデータを用いて解析的検討を試みた。また、実用的な解析法を提案した。

参考文献

1) 小柳光生, 中根淳: マスコンクリートの温度ひび割れ幅計算法の提案, 大林組技術研究所報, No. 43, p. 57~62, (1993)
 2) 一瀬賢一, 中根淳, 久保田昌吾: 若材齢時における高強度コンクリートの性状, コンクリート工学年次論文

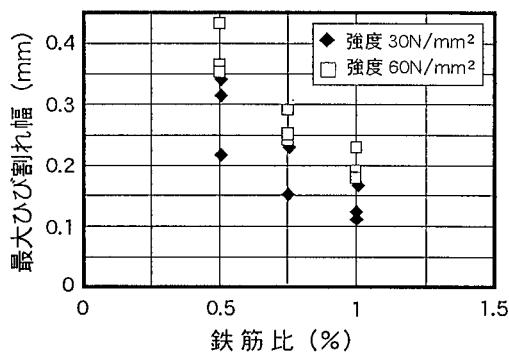


Fig. 15 最大ひび割れ幅と鉄筋比 (Aシリーズ)
Crack Width Maximum and Steel Ratio (A series)

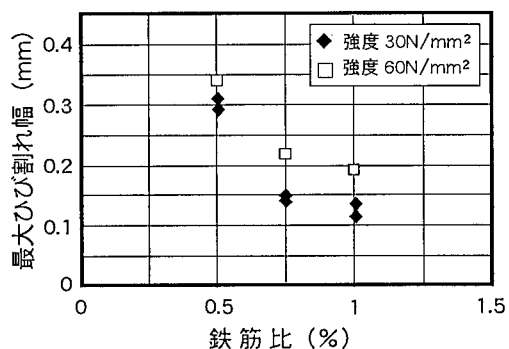


Fig. 16 ひび割れ幅と鉄筋比の関係 (Bシリーズ)
Crack Width Maximum and Steel Ratio (B series)

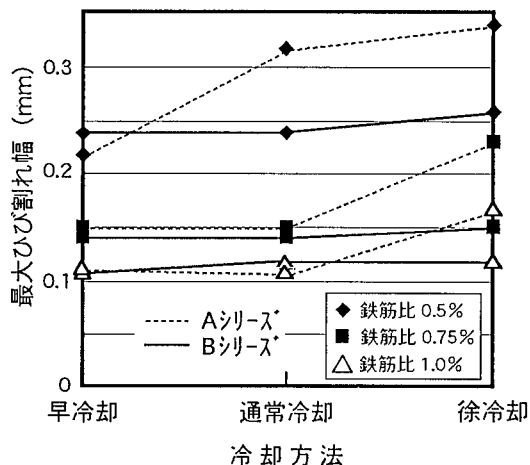


Fig. 17 最大ひび割れ幅と冷却速度
Crack Width Maximum and Cooling velocity

報告集, p. 225 ~ 230, (1991)

3) A. M. Neville: Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed, 1970
 4) 小柳光生, 中根淳, 淵田安浩: 高強度コンクリートの水和熱ひび割れの検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol 18 No. 1, p. 1229 ~ 1304, (1996)
 5) 近藤基樹: 型枠の早期脱型とひび割れ, 施工, No. 109, p. 108 (1975. 8)