

論文 高強度コンクリートの水和熱ひび割れの検討

小柳光生^{*1}・中根 淳^{*2}・渕田安浩^{*3}

要旨：高強度コンクリートはセメント量が多いため、水和熱が高くなりひび割れ発生の恐れがある。また高強度のために、そのひび割れが分散せずに有害なひび割れを生じることが懸念される。ここでは、高強度コンクリートが水和熱でひび割れを生じる現象を試験室で再現し、鉄筋比、コンクリート強度の違いなどによるひび割れへの影響を調べた。またひび割れ解析法と比較検討し、適用性を確認した。

キーワード：高強度コンクリート、水和熱、ひび割れ幅

1. はじめに

設計基準強度600kgf/cm²程度の高強度コンクリートは、使用セメント量が多く水和熱が高くなることや高強度のため、ひび割れが分散せず集中し、有害なひび割れが発生し易い恐れがある。そこで、高強度コンクリートに関するひび割れ挙動の把握とその制御を目的として、試験室で水和熱ひび割れ状況を再現できる装置を考案し、拘束ひび割れ実験を行った。なお既に、マスコンクリートの『水和熱収縮ひび割れ解析プログラム』を開発し、鉄筋比あるいは誘発目地の設置からひび割れ幅を制御する方法を提案^[1]しており、この考え方を高強度コンクリートにも適用するため、比較検討し、その場合の適切な解析定数の提案も試みた。

2. 実験概要

2.1 基本的な考え方

コンクリート打込み初期に、水和熱の温度履歴に近似した熱外力を与え、外的拘束によるひび割れを発生させる。この時、鉄筋比を要因にしたひび割れ幅の比較検討を行った。また比較用に、普通コンクリート（通常強度のコンクリート）についての試験も行った。なお、実験条件は、安全側にひび割れを評価するように、実際に想定される以上の温度履歴と拘束度を与えた。

2.2 コンクリートの調合

使用するコンクリートは、高強度コンクリートおよび普通コンクリートでその調合を表-1に示す。高強度コンクリートの設計基準強度は600kgf/cm²を計画した。

表-1 コンクリート調合表

(単位：kg/m³)

名 称	W/C (%)	単位水量	セメント量	細骨材	粗骨材	高性能減水剤	A.E. 減水剤
高 強 度 コンクリート	29.0	165	569	705	951	9.10	—
普 通 コンクリート	62.0	170	274	877	969	—	3.56

2.3 試験体形状

試験体形状と拘束方法を図-1に示す。試験体の断面は20cm×20cm、内法寸法は250cmである。

*1 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 主任研究員 工博 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 室長 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 研究員 (正会員)

拘束方法は鉄骨(H-200×200)を両側から挟み込み、全体をコンクリート部で覆うようにして一体化を図った。拘束度は、鉄骨のヤング係数比を10とすると0.76に相当する。試験体の補強筋は断面中央に配置しその径は、D16, D25の2種類とした。これはそれぞれ鉄筋比でほぼ0.5, 1.0%である。試験体の要因は、上述した鉄筋比2種類の他、一部、調合を変えて普通強度($F_c=240$ 程度)としたものや急冷したもの計4体とした。試験体の一覧を表-2に示す。

2.4 加熱と計測

加熱方法は、ドラム缶内で加熱した温水(材齢1日で最高95°C、その後徐冷の履歴)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マスコンクリートの温度履歴を模擬するように通管させる。その後、外気温に近くなった材齢4~5日で脱型する。なお放熱と水分蒸発を防ぐため、脱型するまで試験体($\ell=2.5m$)を導水管およびシールした断熱材で完全に覆った(図-2参照)。脱型後、ひび割れ発生状況を観察する。

計測項目は、ひび割れの他コンクリート拘束フレームの温度履歴(熱電対)、拘束フレーム歪挙動(W.S.G)とする。テストピースは試験体と同一の養生とするため、軽量型枠缶に打込んだ後、密封してドラム缶の温水中に静置した。

3. 実験結果

N0.1, N0.4試験体のコンクリート強度を表-3に示す。温度履歴を与えたため、高強度コンクリートの場合、材齢1日で既に 500kgf/cm^2 以上の圧縮強度を示した。また4日での割裂強度は 39kgf/cm^2 で、これは圧縮強度の1/15程度の値を示した。N0.1試験体のコンクリート内部、拘束材表面、外気温などの温度測定結果を図-3に示す。コンクリート温度はどの位置もほぼ均一で、計画通りの温度履歴が得られた。なお、N0.2, N0.4も同様な温度履歴を与えた。N0.1, N0.4試験体の鉄骨拘束材の歪み挙動をそれぞれ図-4, 5に示す。いずれも均一な歪み挙動を示した。

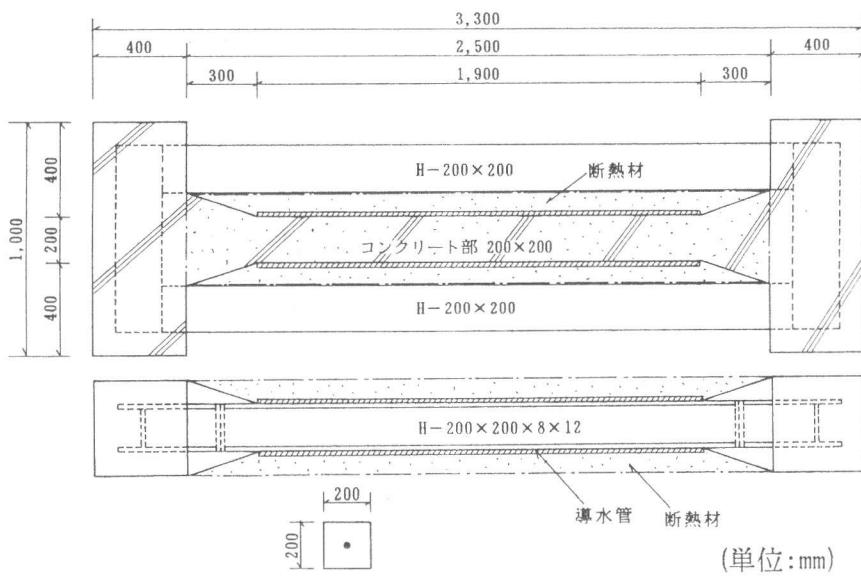


図-1 試験体形状と拘束方法

表-2 試験体の一覧

No.	目標コンクリート強度 (kgf/cm ²)	鉄筋比 (%)	冷却方法
N0.1	600	0.5	徐冷
N0.2		0.97	
N0.3		0.5	急冷
N0.4	240		徐冷

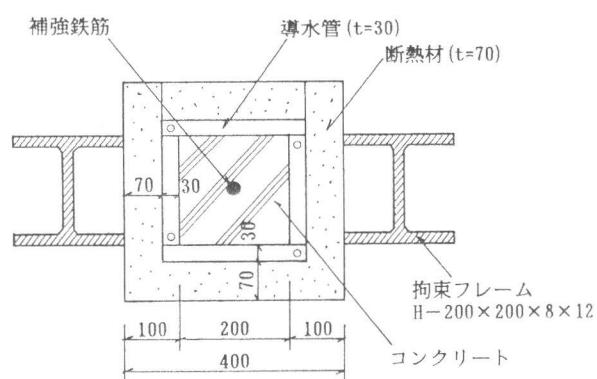


図-2 試験方法断面図

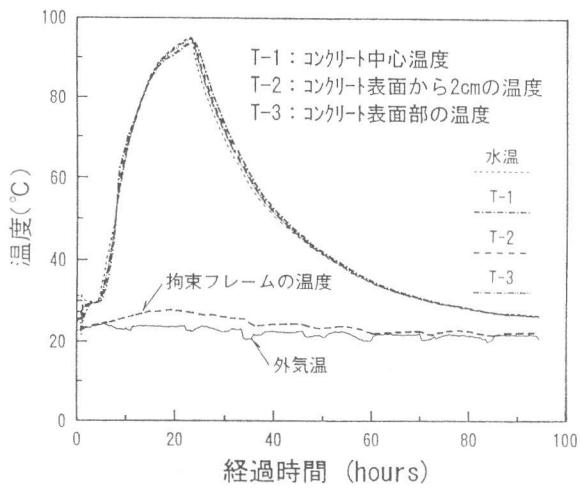


図-3 温度履歴測定結果 (No. 1)

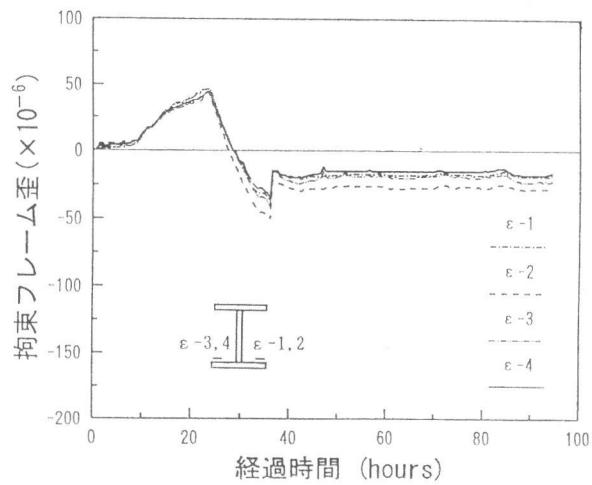


図-4 拘束フレーム歪測定結果 (No. 1)

表-3 コンクリート強度試験結果

養生	材齢	圧縮強度 (kgf/cm²)	静弾性係数 (×10⁶kgf/cm²)	割裂強度 (kgf/cm²)
温度履歴養生	1日	515 551	548	2.93 2.73
	4日	604 607	606	3.47 3.39
	7日	635 632	634	3.42 3.39
	28日	824 845	835	3.64 3.54
標準水	28日	649 657	653	3.44 3.55
			3.50	49

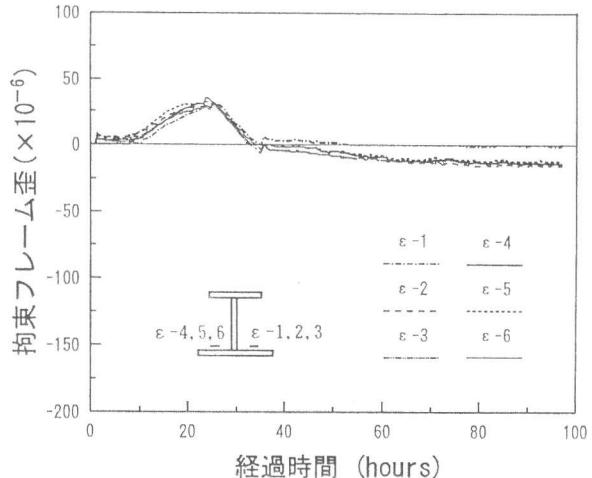
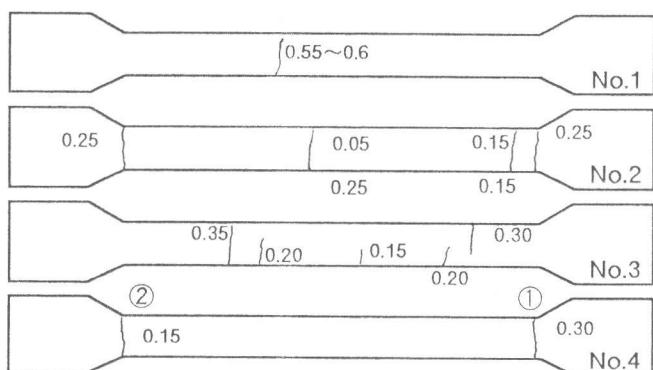


図-5 拘束フレーム歪測定結果 (No. 4)



単位: (mm)

図-6 ひび割れ状況 (側面)

歪み挙動からコンクリート応力を推定すると No.1 フレームの最大の引張歪みは 50×10^{-6} 前後で、この歪みから算出した鉄骨の全作用力をコンクリート断面積で除すると $33 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の圧縮応力に相当する。また初期ひび割れ発生時の拘束材歪みは 40×10^{-6} 前後で、20数 kgf/cm^2 の引張応力に相当する。なおひび割れ後は応力解除のため温度変化に比べて歪みの動きが緩慢となっている。一方 No.4 の場合、初期ひび割れ時歪みは 10×10^{-6} 以下と小さく、引張応力 $7 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 以下に相当する。以上の比較から、ひび割れ発生応力はコンクリート調合でかなり異なることが確認された。材齢 7 日前後のひび割れ状況を図-6 に示す。No.1 の場合、ひび割れ幅幅 $0.55 \sim 0.6 \text{ mm}$ となった。No.2 の場合、材齢 4 日の脱型でひび割れ (幅 0.2 mm) が 2 本発生、その後さらに 2 本発生した。No.3 試験体の場合、材齢 24 時間から 27 時間

間までの3時間の内に95°Cから一気に30°Cまで水温を下げたため、材齢27時間で上ふたをはずしたところ、上面ひび割れが2本発生していた。材齢4日で周囲の導水管枠を除去して、全面を観察したところ、ひび割れは貫通していなかった。この表面ひび割れ現象は、他の試験体とは異なるが、これは急激な冷却による特異な現象と思われる。N0.4試験体の場合、7日時点で0.30mmと0.15mmの2本のひび割れ幅であった。N0.4はN0.1と同じ鉄筋比、温度挙動条件であるが、コンクリート強度が高くないためにひび割れ本数は増えるが、それぞれのひび割れ幅は小さかった。

4. 硬化収縮歪みの測定

高強度コンクリートのように粉体の多いコンクリートは、硬化収縮歪みも大きい傾向が指摘されている。^[2]そのため硬化収縮歪みの測定を行い、後述のひび割れ解析定数にもこの点を考慮して検討した。調合は、表-1のW/C=29%とした。測定内容は、硬化収縮と乾燥収縮の違いを調べるために、封かん養生と気中養生とした。また、硬化時の温度上昇の収縮性状に及ぼす影響も調べるために、1日間の初期養生として20°C封かんと60°C封かんの2種類を行った。1日間60°C封かんは、今回の実験の温度履歴を考慮して、マチュリティがほぼ合うように模擬したものである。材齢4週までの収縮歪みを図-7に示すが、埋込みゲージとコンクリートの線膨張係数は同じと仮定してゲージの読み値をそのまま図に示した。封かん養生の硬化収縮歪みは材齢11日で20°C、60°Cそれぞれ 120×10^{-6} 、 50×10^{-6} を示し、初期養生60°Cの方が小さい傾向にある。後述する今回のひび割れ解析には、この硬化収縮歪みの影響も考慮したが、拘束試験体の状況から多少乾燥の影響を受けると考え、初期養生60°Cの条件のもので、封かん養生と気中養生の中間値を採用した。

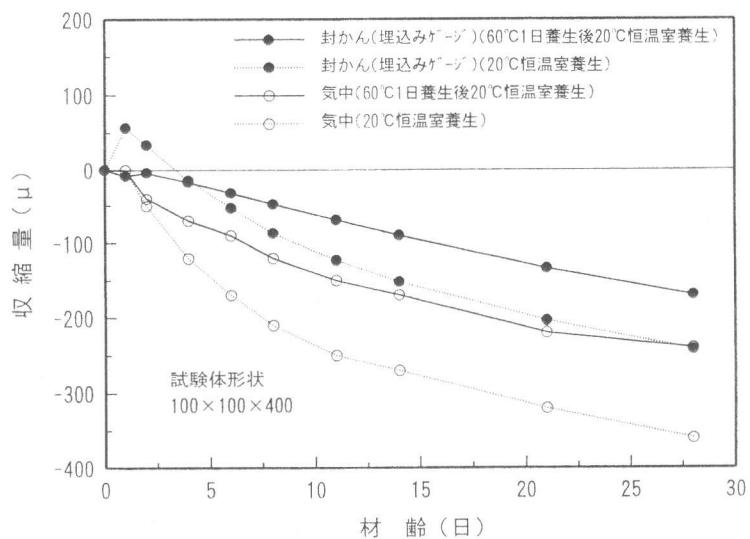


図-7 自由収縮歪み測定結果

5. ひび割れ幅解析による検討

5.1 解析式の考え方

温度ひび割れ幅の解析は、図-8および図-9に示す部材モデルと解析フローチャートに基づいて行った。詳細は参考文献^[1]を参照されたい。ただし主な解析条件と定数は、以下に示す。

- ①ひび割れ発生応力は、高強度コンクリート($F_c=600$ 程度)の場合 20kgf/cm^2 、普通コンクリート($F_c=240$ 程度)の場合これまで同様 10kgf/cm^2 とする。
- ②クリープ係数式、ひび割れ幅関数式、コンクリート弾性係数式はこれまでと同じとするが、弾性係数式は強度の関数式であるため調合毎に異なる数値を使用する。
- ③コンクリート平均温度履歴は、実測による温度分布挙動を使用する。
- ④硬化収縮歪みを考慮する(二調合とも図-7の2つの実線の中間値を採用)。本来、 $F_c=240$ の自己収縮歪みは別途測定する必要があるが、とりあえず $F_c=600$ と同じ実数を用いた。

⑤拘束フレームの温度変化は無視する。また、温度歪みの検討には、鉄筋の拘束を無視した方がよいが自己収縮も考慮するためここでは、周囲の拘束物の他、鉄筋も拘束材として計算した。

5.2 解析結果と実験値との比較

拘束歪み解析結果を実験での拘束フレームの歪み測定結果と比較して、図-10に示すが、全体的な傾向として近似している。また各要因毎に、ひび割れ幅解析を行い、その結果を材齢7日前後の実験と比較・整理して表-4および図-11に示す。この解析結果から以下のことが分かった。

- ・高強度コンクリートは水和熱によって鉄筋比0.5%で0.43mm、鉄筋比0.97%で0.26mmのひび割れを生じるという解析結果（硬化収縮考慮）であり、実験結果と同様に鉄筋比の影響が確認された。

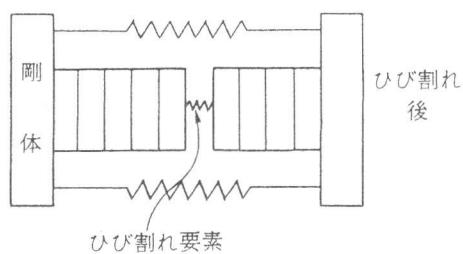


図-8 部材モデル

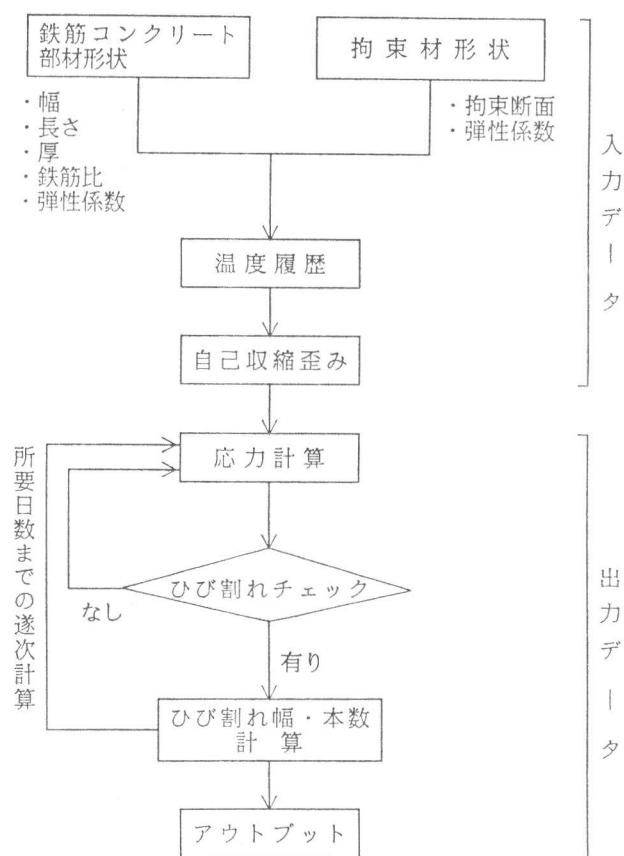


図-9 ひび割れ計算フローチャート

- ・実験値との比較では、ひび割幅解析値の方が若干小さい傾向にある。これは鉄筋位置までの試験体のかぶりが90mm前後と大きいことによって、見かけ上表面ひび割れ幅が大きくなつたことも一因と思われる。
- ・硬化収縮を考慮する方が実験値との対応は良好に思われるが、その歪みの設定についてはまだ検討課題といえる。

表-4 最大ひび割れ幅・本数 実験値と解析値の比較

記号	鉄筋比	実験値			解析値① (硬化収縮考慮)			解析値② (硬化収縮無視)	
		発生日 (日)	本数	最大幅 (mm)	発生日 (日)	本数	最大幅 (mm)	本数	最大値 (mm)
N0.1	0.50%	1.5	1	0.55～ 0.60	2.0	1	0.43	1	0.34
N0.2	0.97%	(2.0)	4	0.25	2.0	2	0.26	2	0.22
N0.3	0.50%	1.0	(6)	0.35	—	—	—	—	—
N0.4	0.50%	1.5	2	0.30	2.0	2	0.21	2	0.15

*1 発生日()内は推定値、本数()内は未貫通ひび割れ、*2 比較材齢はともに7日前後

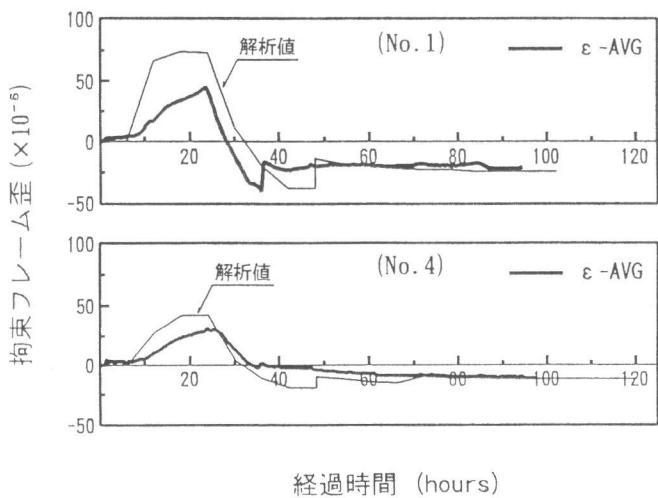


図-10 拘束歪みの実験値と解析値の比較

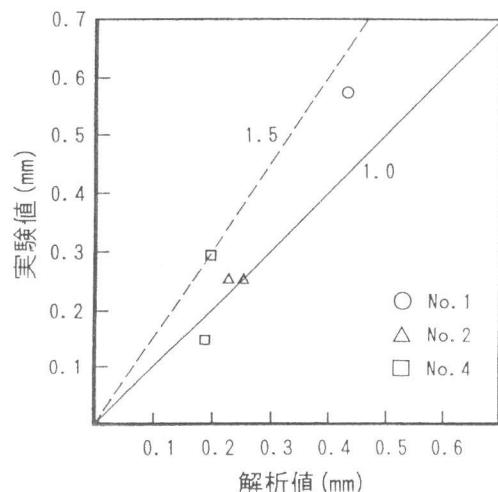


図-11 ひび割れ幅と実験値と
解析値の比較

5.3 試験体のスパンが長い場合のひび割れ試算

この実験では長さ 250cmで試験を行ったが、スパン長さを通常の梁構造物を念頭に 600cmとした場合のひび割れを試算する。高強度のNo.1, No.2と同じ条件（ただし長さは異なる）について行ったが、No.1の場合、ひび割れ幅が0.67mmとかなり大きくなる。つまり通常の梁構造物のようなスパンであればさらに有害なひび割れに発展することを示唆している。ただし、今回の試算の温度履歴は、最高温度90°C程度とかなり過酷な条件下で、しかも拘束条件も極端に大きいため、実構造物がこのようなひび割れ挙動を示すということではない。

6. まとめ

高強度コンクリートの水和熱ひび割れの現象を試験室実験で再現し、鉄筋比の違い、コンクリート強度の違いなどによるひび割れへの影響を調べた。その結果、高強度コンクリートは普通コンクリートに比べてひび割れが分散せずに集中し、ひび割れ幅がかなり大きくなる傾向にあるが、鉄筋比を高くすることで、通常のひび割れ幅に抑えることができることを確認した。特に今回は安全側にひび割れを評価するように、実際に想定される以上の温度履歴と拘束度を与えたが、内り長さ2.5m、鉄筋比0.94%でひび割れ幅0.3mm以下であった。高強度コンクリート部材は設計上、鉄筋比を高くする傾向にあるためひび割れ本数が増えても、有害なひび割れに発展することは少ないと判断される。

また実用化している解析プログラムを使って高強度用への適用を検討し、ひび割れ発生応力の見直しや硬化収縮歪みを考慮した解析を試みた。

参考文献

- 1) 小柳光生、中根 淳：マスコンクリートのひび割れ幅予測の提案、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15, No.1, 1993
- 2) 筋野晃司、田澤栄一、宮澤伸吾、保明淳二：マスコンクリートのひび割れ発生に及ぼす自己収縮の影響、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1, 1995