

論文 異なる設計基準強度クラスにおける高強度コンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究

早野 博幸^{*1}・丸山 一平^{*2}・野口 貴文^{*3}

要旨：構造体補正強度を勘案し、調合設計を行った設計基準強度 40, 60, 80N/mm² クラスの高強度コンクリートに関して、温度履歴を考慮して収縮ならびにひび割れ特性について実験的検討を行った。その結果、総じて 20 養生に比べ温度履歴を受けた場合は収縮ひずみ(自己収縮+乾燥収縮)が減少し、ひび割れは発生しにくくなること、また、収縮ひずみがひび割れ発生材齢に及ぼす影響に関しては、収縮ひずみの減少はひび割れ発生材齢の常用対数に効いてくることを明らかにした。ひび割れ時の応力強度比(ひび割れ強度/割裂引張強度)は 0.48~0.96 と広範な値を示し、設計基準強度の増加に伴い低下する傾向を示した。

キーワード：高強度コンクリート、設計基準強度、温度履歴、自己収縮、乾燥収縮、ひび割れ

1. はじめに

高強度コンクリートは、材齢初期に高温履歴を受けるため、調合設計では構造体コンクリートが要求性能を満たすように、構造体補正強度を勘案した調合強度を算出する方法が採用されている。この場合、使用材料に応じて温度履歴や強度発現性は大きく異なるため、設計基準強度(F_c)が同一の場合でも各々で調合強度が異なり、その結果、W/C も異なった設定となる。また、実環境における収縮においては若材齢時に自己収縮の影響を受け、その後、乾燥に伴う収縮が加味されることとなる。

本研究では、以上のような実際の調合設計や環境条件をできる限り考慮し、 F_c 40, 60, 80N/mm² クラスごとに各種材料を用いた調合設計に基づく高強度コンクリートの収縮ひび割れ特性について実験的検討を行った。検討項目としては、主に F_c レベル、温度履歴の有無、ひび割れ時の応力強度比などが収縮、ひび割れ発生に及ぼす影響を中心とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験の使用材料を表 - 1 に示す。セメントは 4 種類、混和材料は膨張材と収縮低減剤、粗骨材には砂岩碎石、石灰石、人工軽量骨材を F_c に応じて使用した。

2.2 コンクリートの調合強度の算出

各 F_c におけるコンクリートの調合強度を算出するため、表 - 2 の材料の組合せによって F_c クラスごとに C/W と圧縮強度の関係を予め検討した。構造体補正強度に関しては建築学会の高強度コンクリート施工指針(案)・同解説¹⁾、既往の研究²⁾などを参考に調合強度を設定した。調合条件は、単位水量を 160kg/m³、粗骨材絶対容積を 0.34m³/m³、空気量を F_c 60, 80N/mm² は 2%、 F_c 40N/mm² は 3%とした。その結果得られた各 F_c の調合を表 - 3 に示す。なお、混和材料を使用したベース調合は、普通ポルトランドセメントおよび砂岩碎石を使用した。

表 - 1 コンクリートの使用材料

種類	記号	材料名	物性および成分
セメント	NC	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3290cm ² /g
	BBC	高炉セメント B 種	密度 3.04g/cm ³ , 比表面積 3810cm ² /g
	MC	中庸熟ポルトランドセメント	密度 3.21g/cm ³ , 比表面積 3200cm ² /g
	LC	低熟ポルトランドセメント	密度 3.22g/cm ³ , 比表面積 3360cm ² /g
粗骨材	CS	砂岩碎石	表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.60%
	LS	石灰石	表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.71%
	LW	人工軽量骨材	表乾密度 1.65g/cm ³ , 含水率 32%
細骨材	S	陸砂	表乾密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 1.97%
混和材料	SF	シリカフューム	密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 20.0 m ² /g
	EX	膨張材	石灰系早強型, 密度 3.19g/cm ³
	SRA	収縮低減剤	低級アルコールアルキレンオキッド付加物, 密度 1.01g/cm ³
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系, 密度 1.05g/cm ³

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 工博 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究所都市環境学専攻 准教授 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

2.3 養生条件

コンクリートの養生条件は、20 封緘 7 日後 20 60%RH および温度履歴養生(封緘)7 日後 20 60%RH とした。温度履歴養生に関しては、はじめに 10×20cm 試験体を発泡スチロールおよび発泡ビーズで保温した簡易断熱養生³⁾を 7 日間行い、試験体の温度履歴を測定した。続いて、蒸気養生槽によって簡易断熱養生中のコンクリート温度を再現し、封緘した試験体をその中に入れて同じく 7 日間養生した。

2.4 収縮試験

(1) 無拘束試験

無拘束試験では、100×100×600mm の形状となるコンクリートの内部中央に埋め込み型ゲージを配置し、中央部のひずみおよび温度を測定した。

(2) 一軸拘束試験

一軸拘束試験は、日本コンクリート工学協会の自己収縮応力試験方法に準拠し、ひび割れが発生するまで応力の測定を行った³⁾。試験体数は各水準で 3 体、測定材齢は 182 日までとしたが、ひび割れが発生しない場合は試験体端部より 50mm 程度突出させた拘束鉄筋を専用治具で掴み、万能試験により両引き引張載荷(速度：鉄筋ひずみ 0.1 μ/sec)を行って、中央区間のコンクリートにひび割れが発生した時の鉄筋ひずみで評価した。温度履歴養生試験体はひずみゲージを接着剤で貼付後、加圧・熱処理により鉄筋と一体化し、事前に温度変化によるひずみの

補正を行うとともに残留ひずみがないことを確認した。

2.5 強度試験

強度試験は、各養生条件にて材齢 7, 28, 91, 182 日およびひび割れ発生時に 10×20cm の試験体で圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの温度履歴

Fc80N/mm²における簡易断熱養生下のコンクリート温度と、これを再現した温度履歴の実測値の一例を図 - 1 に示す。両者で大きな乖離はなく、概ね再現できていることがわかる。低発熱系セメントでは、他のセメントに比べて同じ W/B で比較した場合でも最高温度が低減されるが、今回のように構造体補正強度を勘案した調合設計では調合強度が低く設定されるため、他の調合より

表 - 2 材料の組合せ

記号	セメント	粗骨材	細骨材	混和材料
N	NC	CS	S	—
BB	BBC			—
M	MC			—
L	LC			—
NSF	NC			—
NEX				SF
NSRA				EX
NLS				SRA
NLW				—
				LS
		LW	—	

表 - 3 各 Fc におけるコンクリートの調合

Fc (N/mm ²)	記号	W/B (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)							フレッシュ性状		
					W	SRA	C	SF	EX	S	G	スランプフロー(cm)	空気量(%)	
40	N	43.9	51.1	3.0	160	—	365	—	—	929	898	48.5	3.7	
	BB	43.2	50.6			—	371	—	—	912		46.5	3.5	
	M	47.3	51.8			—	339	—	—	955		51.0	3.5	
	L	45.7	51.5			—	351	—	—	947		47.5	3.3	
	NEX	43.9	51.1			—	335	—	30	929		43.0	3.8	
	NSRA	43.9	51.1		154	6	365	—	—	929		49.0	2.5	
	NLS	43.9	51.1		160	—	365	—	—	929		919	46.0	2.6
60	N	35.2	49.7	2.0	160	—	455	—	—	881	898	63.5	1.8	
	BB	33.0	48.5			—	485	—	—	840		60.5	2.4	
	M	38.3	50.7			—	418	—	—	917		55.0	1.9	
	L	37.2	50.5			—	431	—	—	908		59.5	2.5	
	NEX	35.2	49.7			—	425	—	30	881		56.0	2.0	
	NSRA	35.2	49.7		154	6	455	—	—	881		58.0	1.9	
	NLS	35.2	49.7		160	—	455	—	—	881		919	58.5	2.8
	NLW	35.2	49.7		160	—	455	—	—	881		561	52.5	2.9
80	N	23.3	43.6	2.0	160	—	687	—	—	688	898	60.0	1.6	
	BB	22.2	41.7			—	721	—	—	636		67.5	1.8	
	M	28.4	47.3			—	564	—	—	798		62.0	1.4	
	L	28.2	47.2			—	568	—	—	796		65.0	1.8	
	NSF	27.0	45.5			—	533	60	—	745		59.5	2.0	
	NEX	23.3	43.6			—	657	—	30	688		63.0	1.6	
	NLS	23.3	43.6			—	687	—	—	688		919	67.5	1.5

W/B が大きく設定できるという相乗効果も温度低減に表れていると考えられる。

3.2 無拘束下における収縮ひずみ

無拘束試験による収縮ひずみを図 - 2 に示す。収縮ひずみの起点は、同じ養生とした一軸拘束試験体の応力発生時とし、線膨張係数は 10×10^{-6} / とした。全体的な傾向として、20 養生に比べて温度履歴養生の方が各コンクリート間での収縮ひずみの挙動が異なり、同様に F_c が高くなるほどこの傾向が顕著となっている。これは、 F_c が低い場合は収縮ひずみの大部分が乾燥収縮によるものであるため大きな差異は生じないが、 F_c が高くなると自己収縮の影響が大きくなり、これらが温度履歴を受けた場合は様々な挙動を示すことから、調合間で異なる傾向になったものと考えられる。

F_c の違いによる収縮ひずみの比較結果を図 - 3 に示す。概ね F_c が高くなると収縮ひずみは増大する傾向を示しているが、一部 F_{c40} と 60N/mm^2 で逆転しているものもみられる。N と比較した混和材料による収縮ひずみの低減という観点からは、NEX については F_c が低くなるほど収縮抑制効果は顕著となるが、NSRA については $F_{c80\text{N/mm}^2}$ は未実施であるが、 F_c が高くなる方が収縮抑制効果は大きなものとなる。

温度履歴の有無が収縮に及ぼす影響に関して、材齢 182 日における 20 養生と温度履歴養生の収縮ひずみの関係

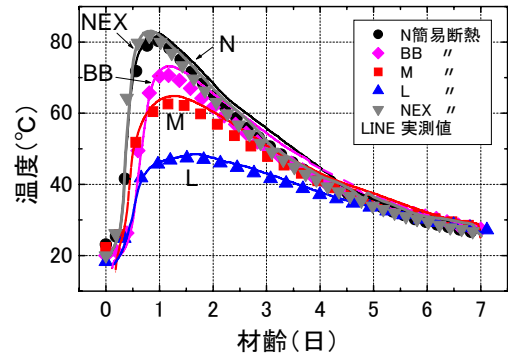


図 - 1 コンクリートの温度履歴の一例

を図 - 4 に示す。 $F_{c60\text{N/mm}^2}$ の BB で同等となった以外は全ての調合で温度履歴を受けることによって収縮ひずみが低減している。その度合いは F_c によって異なり、 $F_{c40\text{N/mm}^2}$ では調合に関わらず 200μ 程度、 $F_{c60\text{N/mm}^2}$ は調合によって差があり $0 \sim 450 \mu$ の範囲、 $F_{c80\text{N/mm}^2}$ は $0 \sim 300 \mu$ の範囲に及んでいる。この原因については、温度履歴を受けると材齢初期における組織の緻密化、自由水の減少により乾燥収縮が小さくなることと、併せて一部のコンクリート(特に $F_{c80\text{N/mm}^2}$)で材齢初期の温度

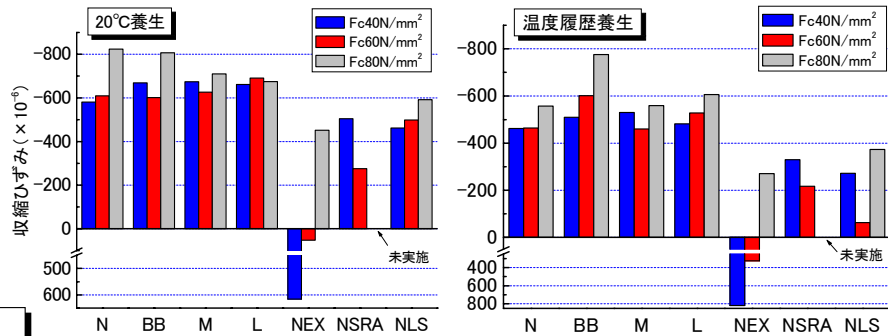


図 - 3 F_c の違いによる材齢 182 日の収縮ひずみの比較

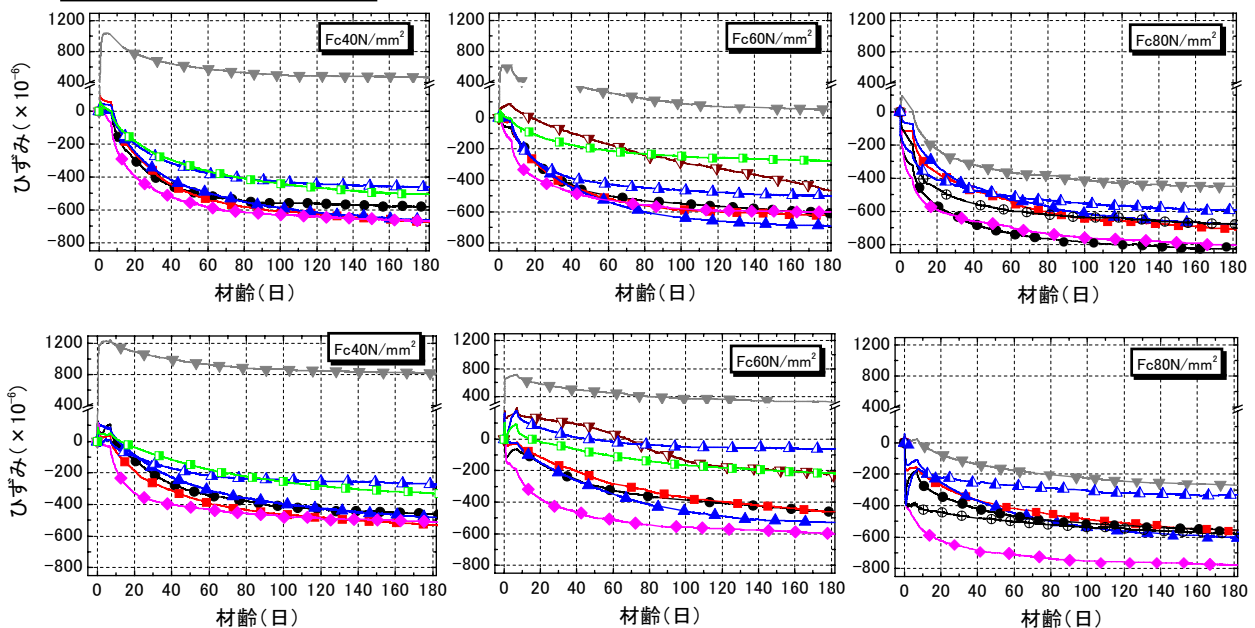
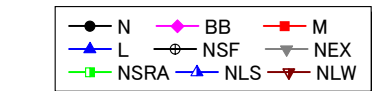


図 - 2 無拘束下における収縮ひずみ (上段: 20 養生, 下段: 温度履歴養生)

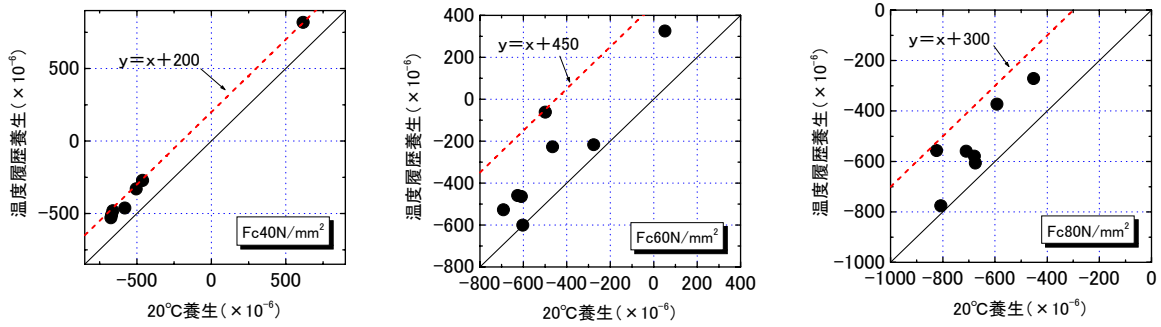


図 - 4 材齢 182 日における 20 養生と温度履歴養生の収縮ひずみの関係

降下時に膨張現象がみられ、これらが寄与しているものと考えられる。

3.3 一軸拘束下における収縮応力

コンクリートの一軸拘束下における収縮応力の変化を図 - 5 に示す。応力の符号は、収縮による引張応力を正として応力値は試験体 3 本の平均とした。試験体にひび割れが発生した場合は、それ以降ひび割れていないものの平均とし、ひび割れ材齢が 3 本の平均となるまで表記した。また、材齢 182 日に拘束鉄筋の両引き载荷を行った時のコンクリートのひび割れ強度も併記した。収縮の影響のみでひび割れが発生しない試験体については、鉄筋の両引き载荷によるコンクリートのひび割れ強度を基に、収縮応力曲線の傾きと引張载荷によるひび割れ発生強度の関係から求まる余力度を材齢に換算するという試行的評価を以下のように行った(図 - 6 参照)。

材齢 7~182 日まで 7 日間隔でコンクリート中の鉄筋ひずみを抽出し、式(1)に基づいて近似式を構築する。これは、一軸拘束下でのコンクリート応力の近似式でもあるが、応力は鉄筋ひずみより

間接的に算出しているため、鉄筋ひずみを直接用いることとする。

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \epsilon_{sh\infty} \left[\frac{(t-t_0)}{a+(t-t_0)} \right]^b + \epsilon_{as} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 (7 日) の材齢 t における鉄筋ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 ϵ_{sh} : 乾燥開始以降における鉄筋ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)、 a および b : 各調合の定数、 ϵ_{as} : 乾燥開始前の自己収縮による鉄筋ひずみ ($\times 10^{-6}$)。

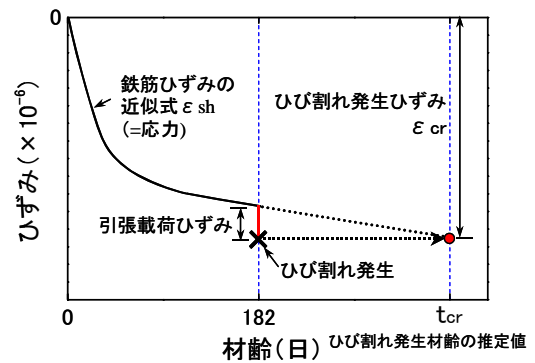


図 - 6 ひび割れ発生材齢の推定に関する概要

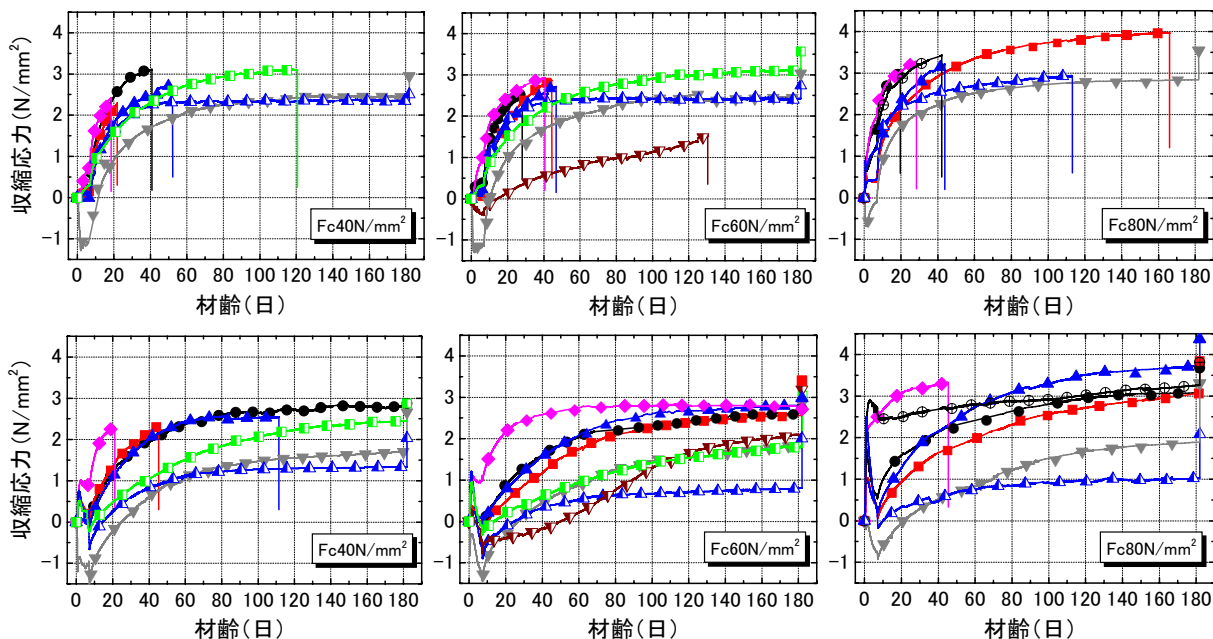


図 - 5 一軸拘束下における収縮応力 (上段 : 20 養生, 下段 : 温度履歴養生)

材齢 182 日の鉄筋ひずみに、両引き載荷試験時のひび割れ発生までの引張載荷ひずみを加算し、この合計をひび割れ発生ひずみ ϵ_{cr} とする。式(1)で求めた近似式より、 $sh(t_{cr}, t_0) = \epsilon_{cr}$ としてひび割れ発生材齢 t_{cr} を算出する。ひび割れ発生ひずみ ϵ_{cr} より応力を算出し、これをひび割れ発生応力 σ_{cr} とする。

近似式に関しては、建築学会の収縮予測式⁴⁾を修正して材齢 7 日までの自己収縮による影響を加算した形とした。対象としている鉄筋ひずみは拘束下におけるクリープの影響を含んだコンクリートの収縮ひずみに相当し、純粋な乾燥収縮ひずみではない。しかし、ひずみの生じる主な駆動力は乾燥収縮であることから、式の a および b の乾燥の進行度を表す各調合の定数を適宜設定することにより、近似することが可能であると考えられる。図-7 に材齢 182 日に鉄筋の両引き載荷試験を実施した試験体の鉄筋ひずみ実測値と推定値の関係の一例を示すが、概ね高い精度で近似できていることがわかる。図中の NLS や NEX は、長期材齢でのひずみの増加が極めて小さく、かつ引張載荷ひずみが大きかったため、ひび割れ発生材齢は ∞ という結果になった。

3.4 各種要因が収縮およびひび割れ特性に及ぼす影響

(1) F_c がひび割れ発生材齢に及ぼす影響

$F_c 40N/mm^2$ を基準としたひび割れ発生材齢の割合を比較した結果を図-8 に示す。傾向は養生条件や調合によって様々であり、20℃養生下では N のように F_c の増大に伴い割合は小さくなるもの、M のように逆の傾向を示す場合もある。温度履歴養生に関しては、全ての F_c でひび割れ発生材齢が ∞ と算出された NEX, NLS を除くと、L 以外では $F_c 60N/mm^2$ が最もひび割れにくいという傾向を示した。ひび割れに関する要因としては、 F_c が高くなるほど乾燥収縮に対しては有利となるが、一方で初期の自己収縮が増大する。これに加えて引張強度発現性も関連してくることから、 F_c のみでひび割れ発生の度合いを単純に説明できるもので

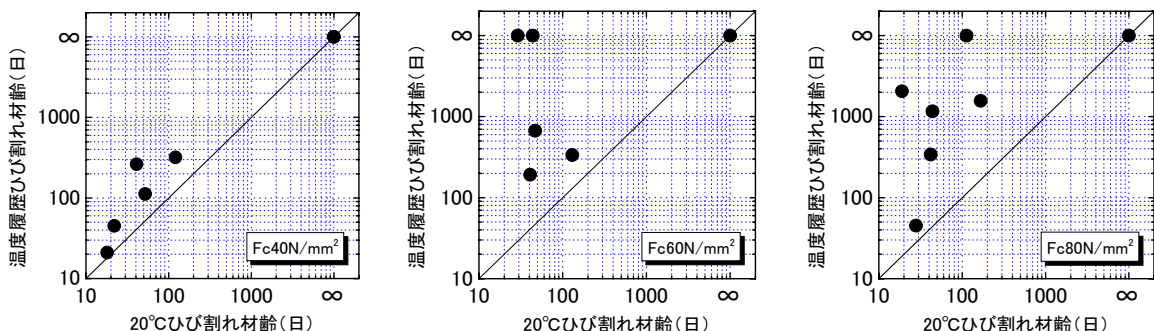


図-9 20℃養生と温度履歴養生におけるひび割れ発生材齢の比較

はないことが実証された。

(2) 養生条件がひび割れ発生材齢に及ぼす影響

20℃ と温度履歴養生におけるひび割れ発生材齢の比較結果を図-9 に示す。ともにひび割れ発生材齢が ∞ となったものを除き、温度履歴を受けることによってひび割れ発生材齢は長くなっていることがわかる。これは、図-4 の材齢 182 日における両養生条件の収縮ひずみを比較した結果を反映するものであり、温度履歴を受けることで 20℃ 養生より収縮ひずみが低減され、結果、ひび割れ発生材齢が長くなるということに繋がっている。

収縮ひび割れの発生機構に関しては様々な考え方があるが、いずれにせよ乾燥収縮ひずみの大小は、従来からひび割れと深い繋がりがあことは周知の通りである。そこで、今回のように乾燥収縮だけでなく自己収縮も含まれた場合や高強度コンクリート特有の温度履歴を受けた収縮ひずみはひび割れにどのように影響を及

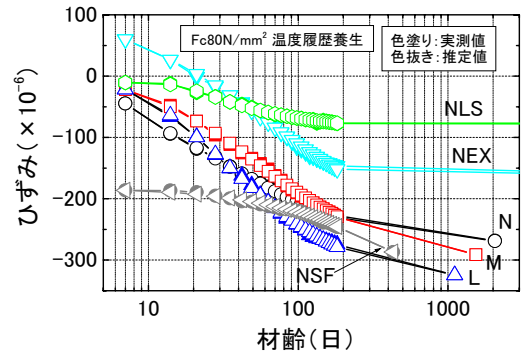


図-7 鉄筋ひずみの実測値と推定値の比較

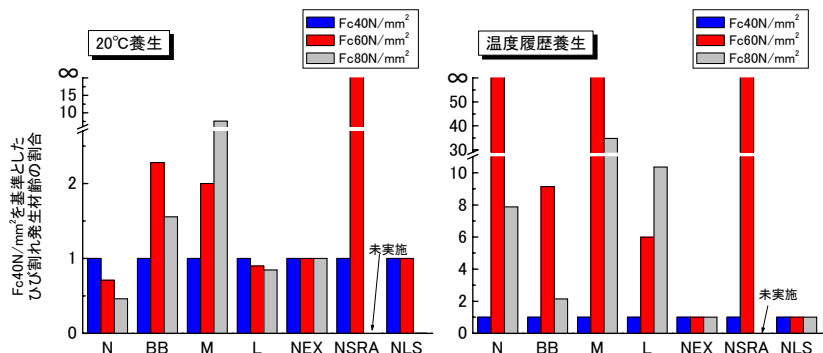


図-8 $F_c 40N/mm^2$ を基準とした場合のひび割れ発生材齢の比較

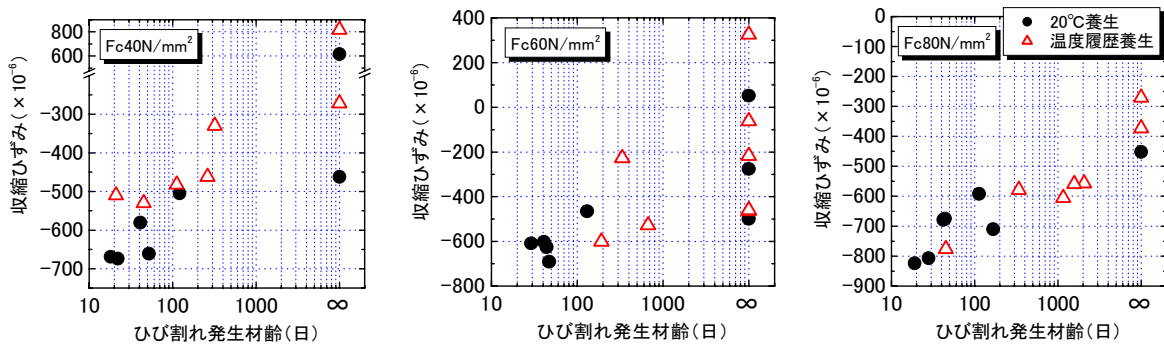


図 - 10 材齢 182 日の収縮ひずみとひび割れ発生材齢の関係

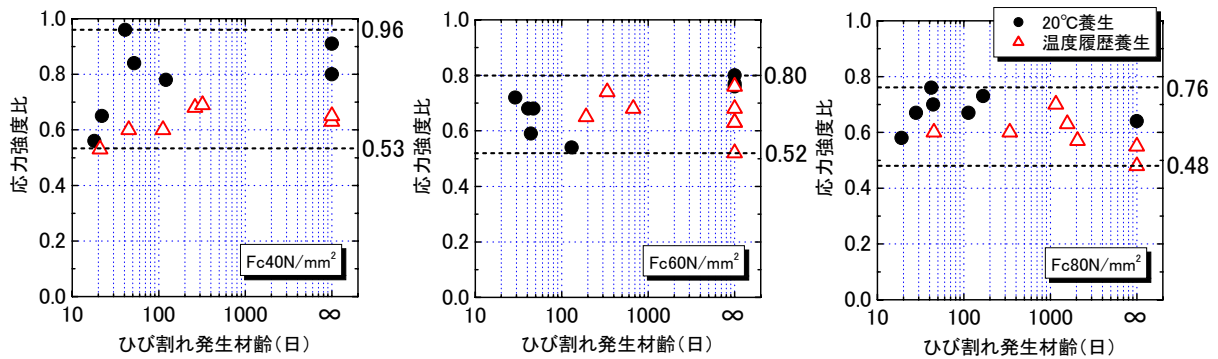


図 - 11 ひび割れ発生時の応力強度比とひび割れ発生材齢の関係

ばすかについて検討を行った。材齢 182 日における収縮ひずみとひび割れ発生材齢の常用対数をとった関係を図 - 10 に示す。Fc40, 80N/mm²では養生条件に関わらず両者は明確な関係を示し、収縮ひずみはひび割れ発生材齢の常用対数に効いてくるという結果を示した。Fc60N/mm²においては多くの調合でひび割れ発生材齢となっているが、概ね同様な傾向を示した。拘束鋼材比や部材寸法が変われば本結果の傾向と異なる可能性もあるが、収縮ひずみがひび割れ発生に及ぼす影響に関しては新たな知見といえる。

(3) 応力強度比がひび割れ発生材齢に及ぼす影響

ひび割れ発生時の応力強度比(ひび割れ強度/割裂引張強度)とひび割れ発生材齢の関係を図 - 11 に示す。応力強度比の範囲は、全体で 0.48 ~ 0.96 と広範な値を示した。養生条件の違いに関しては、全体的にやや 20 養生の方が応力強度比は高く、Fc40N/mm²では広範囲に分布しているが、Fc が高くなるほどその範囲は狭く、かつ応力強度比が低下している。いくつかの既往の研究では(例えば⁵⁾、ひび割れ発生材齢が長くなるほど応力強度比が高くなるのが指摘されているが、本研究では 20 の Fc40N/mm²、すなわち強度性状や養生が既往の研究に近い条件ではそのような傾向が表れているが、その他の条件では同様な傾向は認められない結果となった。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 20 養生に比べ温度履歴を受けることによって収縮ひずみ(自己収縮+乾燥収縮)は減少し、ひび割れは発生しにくくなること、また、収縮ひずみの減少は概ねひび割れ発生材齢の常用対数に効いてくる。
- (2) Fc レベルが収縮・ひび割れ特性に及ぼす影響は調合に応じて様々であり、単純に両者の関係を論ずることはできないが、ひび割れ時の応力強度比は全体で 0.48 ~ 0.96 と広範な値を示し、Fc の増加に伴って低下する傾向を示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, pp.92-102, 2005.1
- 2) (社)新都市ハウジング協会, (株)都市居住評価センター：CFT 造充填コンクリートの材料性能評価ガイドライン, p.11, 2003.4
- 3) 早野博幸ほか：各種セメントを用いた Fc80N/mm² の高強度コンクリートの収縮特性に関する研究：その 1 実験概要および 20 養生での収縮特性, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.65-66, 2006.9
- 4) 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, p.55, 2006.2
- 5) 大野俊夫ほか：コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集, V-49, No.662, pp.29-44, 2000.11