

論文 高強度コンクリート部材の時間依存性ひび割れ挙動

安齋慎介*1・廣河和男*2・佐藤良一*3・近藤拓也*4

要旨: 本研究は、高強度コンクリート部材のひび割れ挙動の時間依存性について持続載荷実験から得られた、ひび割れ間隔・ひび割れ幅に基づき検討を行っている。また、載荷前の収縮がひび割れ幅に及ぼす影響について数値解析的に検討するとともに、既往のひび割れ幅予測式の高強度コンクリート部材への適用性について考察した。その結果、高強度コンクリート部材のひび割れ幅は、普通強度コンクリート部材のそれと比べ小さく、また、ひび割れ幅に及ぼす載荷前の収縮の影響は、およそ10~20%であった。

キーワード: 高強度コンクリート部材, ひび割れ幅, ひび割れ間隔, 付着, 収縮

1. はじめに

高強度コンクリートをコンクリート構造物に用いることは、断面の縮小につながり構造物の軽量化のために有効な手段の一つである。このようなことから、近年、高強度コンクリートに関連した研究が盛んに行われ、実構造物にも適用されるようになってきている。また、高強度コンクリートは、普通コンクリートに比べコンクリート自身が高性能であるので、特に耐久性を必要とされる重要構造物に用いられ、ひび割れを許容する場合には、高い精度でのひび割れの制御および予測が必要であるものと思われる。しかし現行の設計におけるひび割れ幅予測式¹⁾は、普通コンクリート部材の実験値をもとにした経験式であるため、正確には高強度コンクリートを用いた構造物を対象としていない。

高強度コンクリートのひび割れ挙動については、その強度のみに着目すれば、付着性状が改善されるので、ひび割れ間隔が狭く、ひび割れ幅も小さくなると指摘されている²⁾。しかし、高強度コンクリートには若材齢において自己収縮が生じることが知られており、普通強度コンクリート部材を対象とした報告ではあるが、ひ

び割れ発生前のコンクリートの収縮は、ひび割れ幅を大きくするともいわれている³⁾。実際、高強度コンクリート部材のひび割れ挙動は、時間依存性ひび割れ挙動も含めて、研究例が少なく明確にされていない部分が多い。

そこで、本研究では、高強度コンクリート構造物を対象としたひび割れ幅予測式の確立に貢献するため、高強度コンクリートの時間依存性ひび割れ挙動を明らかにすることを目的とした。そのために、高強度コンクリート部材の持続載荷実験から得られた、ひび割れ幅およびひび割れ間隔について検討を行った。また、土木学会のひび割れ幅予測式¹⁾ (以下、JSCE 予測式) の高強度コンクリート部材への適用性を考察し、さらに既に提案した解析方法^{4),5)}を用いて、載荷前の収縮がひび割れ幅に及ぼす影響について数値解析的に検討した。

2. 実験概要⁶⁾

2.1 供試体の作製

供試体に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。供試体の形状は、断面が20×25cm、長さが240cmの矩形断面はりである。供試体の断

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)

*3 広島大学教授 工学部第四類(建設系) 工博 (正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)

面を図-1に示す。供試体は、表-2に示すとおりでRCはり2体(HL10, 12), PRCはり4体(HL20,22,30,32)の計6体である。これらは、プレストレス量が3段階で、曲げ耐力がほぼ同等になるようにし、持続荷重モーメントはそのおよそ60%を与えた。また、この他に同断面のクリープおよび収縮計測用のプレーンコンクリート供試体を作製した。供試体の荷重条件は、材齢9日(有効材齢12日)でプレストレスを導入し、材齢16日(有効材齢20日)で持続荷重を載荷した。載荷期間はおおよそ1000日間である。また、材齢10日に、グラウト注入を行った。養生は、プレストレス導入時まで湿潤養生を行い、導入後直ちに乾燥を開始した。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷はスパン210cm, せん断スパン長65cmの2点載荷とし、純曲げ区間80cmを試験対象区間とした。ひび割れ幅は、供試体両側面の引張鉄筋位置(上縁から210mm)で、試験区間を含む110cmの区間において計測した。計測方法は、設定荷重までの静的載荷時は、パイ型変位形(標点距離100mm, 精度約1/2000mm)を用い、持続載荷時はコンタクトゲージ(標点距離20mm, 100mm, 精度1/1000mm)を使用した。コンタクトゲージのゲージプラグは、設定荷重に達した

表-1 コンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	SF	S	G	SP
25	45	150	540	60	766	640	12.2

ただし、B=C+SF

表-2 供試体一覧

供試体名称	呼び名 引張鉄筋 (PC鋼棒) - 圧縮鉄筋	引張鉄筋		PC鋼棒		圧縮鉄筋		PC鋼棒 緊張 応力 (N/mm ²)	持続 載荷 モーメント (kN·m)
		断面積 As (mm ²)	鉄筋比 ρ_s (%)	断面積 Ap (mm ²)	鋼材比 ρ_p (%)	断面積 As' (mm ²)	鉄筋比 $\rho_{s'}$ (%)		
HL10	D19-0	573	1.15	----	----	----	----	----	19.5
HL12	D19-D16	573	1.15	----	----	397.2	0.79	----	19.5
HL20	D16(7.1)-0	397.2	0.79	80	0.16	----	----	900	22.1
HL22	Dm16(7.1)-D16	317.5	0.64	80	0.16	397.2	0.79	900	22.1
HL30	D13(9.0)-0	253.4	0.51	128	0.26	----	----	940	22.2
HL32	Dm13(9.0)-D16	184.9	0.37	128	0.26	397.2	0.79	940	22.2

(引張鉄筋 Dmは溝切り加工した鉄筋、鉄筋比および鋼材比は全断面に対する比率を表す。)

後、標点距離100mmで取り付けるとともに、特に静的載荷時に発生したひび割れについてはひび割れを挟んで標点距離が20mmになるように取り付けした。引張鉄筋ひずみは、異形鉄筋の縦リブに深さ3mm, 幅4mmの溝を切削しその溝のスパン中央52cmの区間において2cm間隔でひずみゲージを貼付し計測した。これは、HL22, HL32の2体について行った。

また、高強度コンクリートの特性を明らかにするため、普通強度コンクリートを用いて行った同様の実験⁷⁾の実測値を後述の考察において用いている。配筋等の条件は同様で、対応する供試体を高強度シリーズでは、"HL", 普通強度シリーズでは、"ML"と表記した。

3. 解析方法の概要

本論文では、ひび割れ発生以前の収縮が、ひび割れ幅に及ぼす影響を明らかにするため、著者らが提案した解析方法^{4),5)}を用いて数値解析的に検討を行った。

本解析の特徴は、解析対象とする時系列範囲を打込み直後から任意の長期材齢までとし、時間とともに変化する収縮、クリープ、ヤング係数、付着剛性等を考

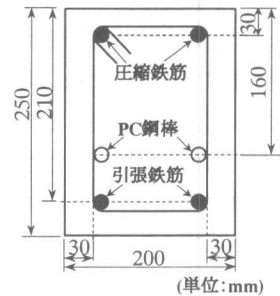


図-1 供試体断面図

慮でき、任意材齢におけるプレストレスの導入、持続荷重の載荷、持続荷重の変動をコンクリートと附着の応力履歴を考慮しながら取り扱える点にある。

コンクリートのクリープは重ね合わせの原理に基づいて考慮しており、コンクリート部材任意断面の圧縮縁から z の位置における着目している時点 $t_{i+1/2}$ での、コンクリートひずみ $\varepsilon_{c,i+1/2}(z)$ および応力 $\sigma_{c,i+1/2}(z)$ は、式(1)、式(2)のようになる。

$$\varepsilon_{c,i+1/2}(z) = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta\sigma_{c,j}(z)}{E_e(t_{i+1/2}, t_j)} + \varepsilon_{fr,i+1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_{c,i+1/2}(z) = E_e(t_{i+1/2}, t_i) \{ \varepsilon_{c,i+1/2}(z) - \varepsilon_{c,sum,i-1/2}(z) - \varepsilon_{fr,i+1/2} \} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{c,j}$ は、 $t_{i+1/2}$ と $t_{i-1/2}$ の間の変動応力で $\Delta\sigma_{c,j}(z) = \sigma_{c,j+1/2}(z) - \sigma_{c,j-1/2}(z)$ と表される。

また、 $E_e(t_{i+1/2}, t_i) = \frac{E_{c,j}}{1 + (E_{c,j}/E_{28})\phi_c(t_{i+1/2}, t_j)}$ で

ある。 $E_{c,j}, E_{28}$ は、 t_j および標準養生材齢 28 日におけるコンクリートのヤング係数である。 $\phi_c(t_{i+1/2}, t_j)$ は、 t_j に生じた変動応力に対する $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数である。 $\varepsilon_{fr,i+1/2}$ は、 $t_{i+1/2}$ における自由ひずみである。 $\varepsilon_{c,sum,i-1/2}(z)$ は、断面内 z の位置における、 $t_{i-1/2}$ までの応力履歴によって生じたひずみである。また、本解析法は、鉄筋とコンクリートの附着すべり関係においても重ね合わせの原理が成立するものとして、同様に取り扱っている。

以上の関係から、全断面およびひび割れ断面（引張部コンクリート無視）においては断面内の軸力とモーメントの釣り合い式を解き、ひび割れ間任意断面では、附着すべり関係と関連づけて着目時点のひずみ分布を決定する。

4. 材料特性

載荷時のコンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング係数は、HL コンクリートで 100.0, 4.27, 3.66×10^4 (単位は N/mm^2) であり、ML コンクリートは、45.4, 3.6, 3.27×10^4 (N/mm^2) である。

各コンクリートと異形鉄筋の附着応力-すべ

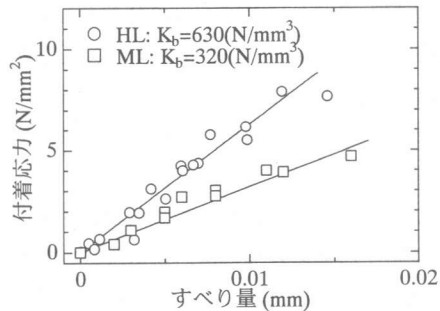


図-2 附着応力-すべり量関係

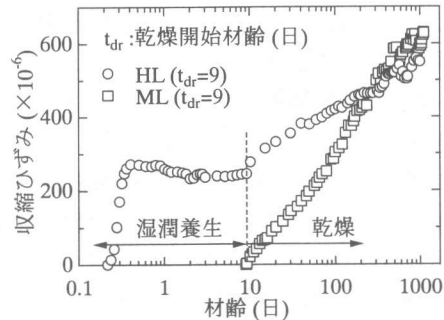


図-3 収縮ひずみの経時変化

り量関係を図-2に示す。これは、ひび割れ近傍を除いた健全部において附着剛性は位置に依存しないとし、またコンクリートのひずみは無視して、得られた鉄筋ひずみ分布から求めた。HL コンクリートの附着剛性 K_b は ML コンクリートの約 2 倍の値を示していることがわかる。

図-3にそれぞれのコンクリートから得られた収縮量の経時変化を示す。HL コンクリートは、若材齢時に自己収縮が卓越していることがわかる。材齢 1000 日時点の収縮量は、HL コンクリートで約 550×10^{-6} 、ML コンクリートで約 600×10^{-6} である。

クリープ係数は、実測値に基づき、CEB-FIP MODEL CODE 1990 の載荷時材齢の影響を考慮した方法に従い定めた。

5. 結果および考察

5.1 鉄筋ひずみ分布

まず、ひび割れ挙動に密接な関係を持つ附着性状を把握するため、一例として、図-4に HL32 および ML32 の静的載荷直後時点 t_0 と載荷日数 1000 日時点 t_{1000} における鉄筋ひずみ分布

を示す⁸⁾。HL32 について t_0 の分布と t_{1000} の分布形状の違いから、-26cm および +10cm 付近の位置に新たにひび割れが生じていることがわかる。このひび割れは、供試体の表面において目視によっても確認できた。

ML32 では、 t_{1000} においても鉄筋ひずみ計測区間の供試体の表面には、新たなひび割れは確認できなかった。しかし、鉄筋ひずみ分布は、ひび割れ間においてひずみが大きく増加している箇所が見受けられ、内部ひび割れが生じていることが推察される。

5.2 ひび割れ間隔

図-5, 6 に各供試体の鉄筋位置の平均ひび割れ間隔および最大ひび割れ間隔の経時変化を示す。この最大ひび割れ間隔とは計測で最も長いひび割れ間隔を示す。階段状に示してあるのは、ひび割れ発生材齢を明確にするためである。新たなひび割れの発生は、標点距離 100mm のコンタクトゲージの実測値および目視から判定した。また、ひび割れの発生時点は、一本のひび割れが供試体両側面引張鉄筋位置において確認された時点とした。

HL10, HL12 の 2 体は、持続荷重時において新たなひび割れ発生は認められず、静的荷重時において定常状態に達していたものと思われる。残りの PRC 4 体については、およそ荷重後 100 日まで新たなひび割れの発生が確認され、その後、持続荷重下のひび割れの定常状態に至ったものと思われる。

図-7 に実測の最大ひび割れ間隔 $L_{max, Meas.}$ と JSCE 予測式のひび割れ間隔に相当する部分から求めた最大ひび割れ間隔 $L_{max, JSCE}$ の比を t_0 と t_{1000} において HL, ML の全供試体について示す。

HL シリーズの PRC 供試体では、図-6 にも示すように経時的な最大ひび割れ間隔の変化が見られたので、 t_0 においては、ひび割れ間隔が長く、予測値を大きく上回った結果が得られた。

5.3 ひび割れ幅

図-8, 9 に HL22, HL32 の最大および平均ひび割れ幅の経時変化を示す。図中の解析値は、

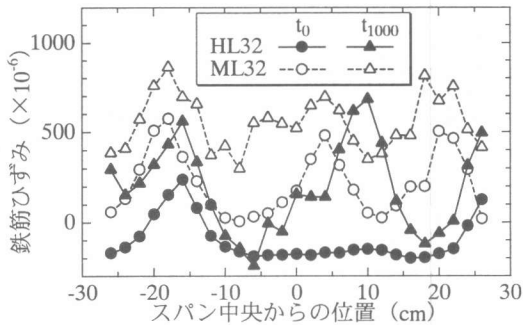


図-4 鉄筋ひずみ分布の経時変化 (HL32, ML32)

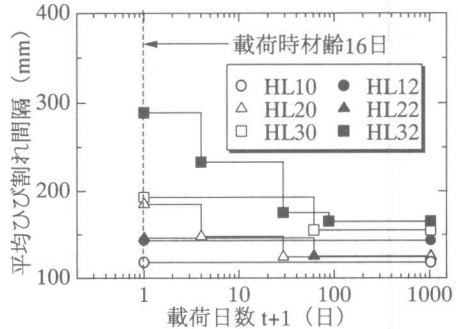


図-5 平均ひび割れ間隔の経時変化

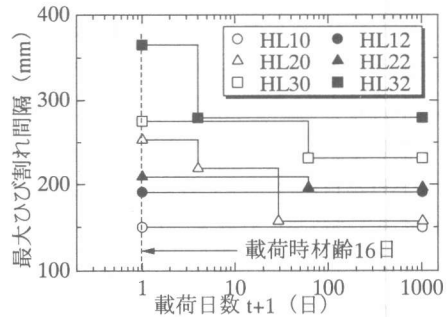


図-6 最大ひび割れ間隔の経時変化

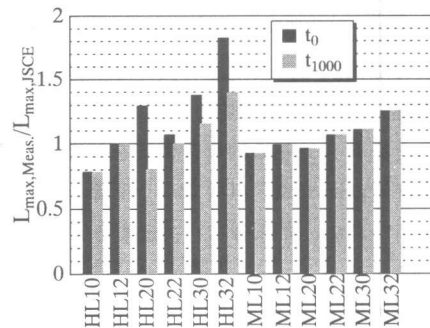


図-7 最大ひび割れ間隔の実測値と予測式の比

荷重前の収縮を考慮したもの ($Wave, Cal. SH$) と、無視したもの ($Wave, Cal. AS=0$) の 2 ケースの結果

を示している。ここで本解析値は、ひび割れ間隔を定常状態 (t_{1000}) の平均ひび割れ間隔の値を与え計算を行っているので、解析値は平均ひび割れ幅を表しており、持続荷重下で新たにひび割れが生じることは考慮していない。

図-8,9より、解析結果は、実測値とほぼ平行に経時変化していることから本解析方法は、定性的には高強度コンクリート部材のひび割れ挙動を評価しうる方法であることが分かる。しかし、普通コンクリート部材においてはその限りではないことが報告されており⁸⁾、その原因として、図-4の鉄筋ひずみ分布からも分かるように、ひび割れ間引張部コンクリートに微細ひび割れが生じることが挙げられる。その点、高強度コンクリート部材は強度が高いので、引張鉄筋周辺にそのような損傷を受ける量が少ないために本解析のモデルに近い解析対象となり、解析値が実測値にあった傾向を示したものと思われる。

表-3は t_{1000} での平均ひび割れ幅の実測値および本解析値をまとめたもので、②/①の欄から本解析値は実測値をプレストレスの高い方がより過大評価することが分かる。この理由としては、プレストレスが大きい場合、ひび割れ幅が小さく抑えられるので、ひび割れ断面の引張部コンクリートの応力負担が無視し得なくなることが考えられる。また、HL20, HL30に比べて、HL22, HL32が実測値に近い結果を得た理由も同様で、引張鉄筋に溝を切削していることから大きい鉄筋応力が発生し、その結果ひび割れ幅が大きくなり、ひび割れ断面の引張部コンクリートの影響が減少したことが考えられる。

ひび割れ幅に及ぼす荷重前の収縮の影響は、本解析結果によれば表-3の③/②の欄に示すように、 t_{1000} において、約10~20%であることがわかる。

図-10には、ひび割れ断面鉄筋応力増加量 σ_{se} と最大ひび割れ幅 w_{max} の関係を示す。ここで σ_{se} は、本解析結

果から得られた Decompression 状態における鉄筋応力から、引張部コンクリートを無視したひび割れ断面の計算から得られた設定荷重時における鉄筋応力までの増加量である。JSCE 予測式から得られた関係を実線と破線で図中に示す。コンクリートの乾燥収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 $\epsilon'_{csd}=150 \times 10^{-6}$ を考慮したものを"JSCE 長期"、無視したものを"JSCE 短期"と記す。

まず、実測値を比較すると、図中にグループ分けして示すように、同じ鉄筋応力増加量の場合 HL シリーズの方が ML シリーズに比べ短

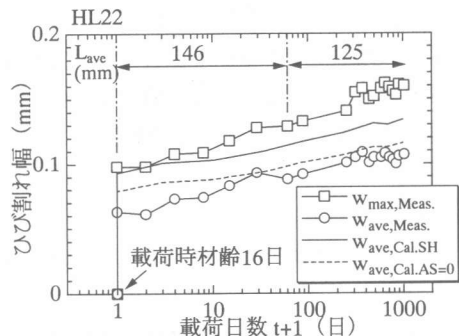


図-8 ひび割れ幅の経時変化 (HL22)

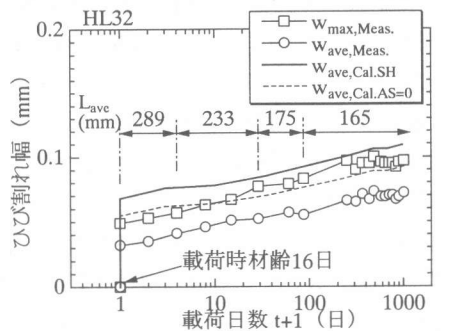


図-9 ひび割れ幅の経時変化 (HL32)

表-3 載荷日数 1000 日の平均ひび割れ幅

供試体名	実測値	解析値		②/①	③/②
	$W_{ave, Meas.}$ ① (mm)	$W_{ave, Cal. SH}$ ② (mm)	$W_{ave, Cal. AS=0}$ ③ (mm)		
HL10	0.11	0.13	0.12	1.18	0.92
HL12	0.14	0.15	0.13	1.07	0.87
HL20	0.06	0.12	0.11	2.00	0.92
HL22	0.11	0.13	0.12	1.18	0.92
HL30	0.05	0.11	0.09	2.2	0.82
HL32	0.07	0.11	0.09	1.57	0.82

期・長期ともにひび割れ幅は小さく、鉄筋応力増加量によって差があるが、ML シリーズに対する HL シリーズの最大ひび割れ幅の比率はおよそ 40~80% である。JSCE 予測式は短期・長期ともに安全側に予測しており、ML シリーズの t_{1000} においては、比較的良好な精度で予測されている。しかし、HL シリーズでは予測値は、実測値を大きく過大評価している。この原因としては、高強度コンクリートは先にも述べたように付着性状が良く、ひび割れ幅が小さいのに対し、JSCE 予測式はひび割れ断面の鉄筋ひずみを用いることから、付着という概念は盛り込まれていないことが分かる。また、ひび割れ断面の引張部コンクリートの応力負担も考慮されていない。高強度コンクリート部材に適用できるひび割れ幅予測式を確立するためには、このような点を改善するべきであると思われる。

6. まとめ

以上より、本研究の範囲内では以下の結論が得られた。

- 1) 高強度コンクリート部材のひび割れ幅は、普通強度コンクリート部材のそれと比べ、短期・長期ともに小さく、その比率は 40~80% である。
- 2) 著者らにより提案された解析法は、高強度コンクリート部材の時間依存性ひび割れ挙動を定性的に評価しうる。
- 3) 載荷前の収縮がおよそ 250×10^{-6} の場合、ひび割れ幅に及ぼす影響は本解析によれば、約 10~20% である。
- 4) 土木学会のひび割れ幅予測式は、高強度コンクリート部材のひび割れ幅を安全側に予測するものの精度は低く、その原因として、現在の予測式は、高強度コンクリートのよい付着性状およびひび割れ断面引張部コンクリートの応力負担が考慮されていないことが挙げられる。

なお本論文は、第一著者が広島大学研究指導委

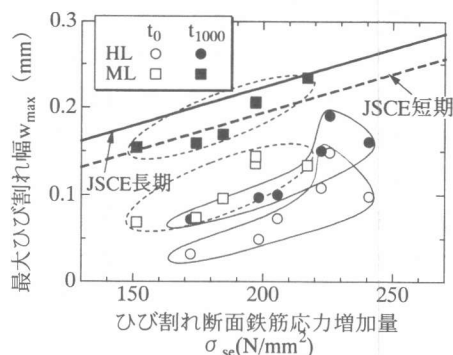


図-10 鉄筋応力増加量と最大ひび割れ幅の関係

託学生の際に取りまとめたものである。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編,pp.90-92,1996
- 2) A.Ghali ほか:コンクリート構造物の応力と変形,技報堂出版,pp337-338,1995
- 3) 角田与史雄:鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅,コンクリートジャーナル,Vol.8,No.9, pp.1-10,1970.9
- 4) 安齋慎介ほか:応力履歴を考慮した高強度PRC部材のクリープ解析について,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21,No.3,pp.187-192,1999
- 5) Sato,R. et al.:Numerical Analysis of Concrete Members Based on the Superposition Principle for Creep of Concrete and Bond, Proceedings of the fib Symposium 1999, Volume 2, pp.417-423, Oct. 1999
- 6) 手塚正道ほか:高強度コンクリート部材の時間依存曲げ変形挙動の検討,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.19,No.2,pp.585-590,1997
- 7) 山本浩嗣ほか:PRC部材の長期変形挙動の検討,コンクリート工学論文報告集,Vol.16,No.2, pp973-978,1994
- 8) Sato, R. et al. :Deformation and Crack Width of Prestressed Reinforced High Strength Concrete Members, 5th International Symposium on Utilization of High Strength/ High Performance Concrete, Proceedings Volume1,pp.598-607,June.1999