

高強度コンクリートを用いたPRCはり部材の時間依存挙動に関する解析的評価

名古屋大学大学院

○玉野 慶吾

正会員 博(工) 中村 光

正会員 博(工) 国枝 稔

正会員 工修 上田 尚史

Abstract : The analytical evaluation of time-dependent behaviors of prestressed reinforced concrete beam using high strength concrete was performed. Creep, shrinkage and change of material characteristics according to hardening were considered in 3-Dimensional finite element analysis as time-dependent behaviors. The time-dependent behaviors of stress and strain in cross section were discussed by comparing with the results of PRC beam using normal strength concrete. Moreover, the effect of autogenous shrinkage and drying shrinkage on crack width was investigated. As a result, for PRC beam using high strength concrete, autogenous shrinkage have relation with crack initiation and crack width, but drying shrinkage is less to be related crack width in long term.

Key words : High strength concrete , Creep , Autogenous shrinkage , FEM

1. はじめに

近年、 $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度コンクリートが橋梁などの土木構造物に適用される例が増えてきている。また、高強度コンクリートを用いた設計基準も整備されつつあることから¹⁾、今後その適用はますます拡大すると考えられる。PC構造物に対しては、高強度コンクリートを適用することで、部材の軽量化、長スパン化、低桁高化および耐久性の向上が可能になり、付加価値の高い構造物や経済的な構造物が実現できることから、その有効活用が期待されている。一方、高強度コンクリートの材料的特徴として、自己収縮が大きいことが挙げられるが、自己収縮により構造物内には普通強度コンクリートに比べ大きな初期応力が発生し、ひび割れの発生や、その後の挙動に影響することも考えられる。特にPRC構造物は、使用限界状態においてひび割れの発生を許容することから、その影響を明確にすることが望まれる。このような現状において、手塚らは、高強度コンクリートを用いたPRC曲げ部材の時間依存挙動を実験的に検討している²⁾。また併せて、断面解析により自己収縮の影響を検討しているが、多様な断面形状や、配筋、さらには境界条件を有する実構造物を考えた場合、解析の自由度が高い有限要素法の利用が有効と考えられる。

そこで本研究では、コンクリートの時間依存変形挙動として、クリープと収縮を考慮するとともに、コンクリートの硬化過程に伴う材料特性の変化を考慮し、さらに離散的なひび割れの発生が考慮可能な3次元有限要素解析³⁾を用いることで、高強度コンクリートを用いたPRCはりの時間依存挙動の解析的評価を行った。その中で、断面内部の応力状態、中立軸の移動に対して評価を行うと共に、高強度コンクリートを用いた場合と普通強度コンクリートを用いた場合の相違についても検討を行った。また、収縮量の絶対値に起因するひび割れ幅として、自己収縮、乾燥収縮の両面から検討を行った。

2. 解析概要³⁾

2.1 解析手法

解析は、8節点アイソパラメトリック要素を用いた非線形3次元有限要素解析プログラムを用いた。コンクリートの材料モデルは、引張軟化領域では、引張破壊エネルギーを考慮し引張軟化曲線に1/4モ

デルを、圧縮領域では、応力が圧縮強度に達するまではSeanzが提案した等価一軸応力-ひずみ関係を用いた。鉄筋およびPC鋼材は離散鉄筋要素によりモデル化し、鉄筋およびPC鋼材とコンクリート要素間はリンク要素を用いて付着挙動を考慮した³⁾。このように離散鉄筋により付着特性をモデル化することで、離散的なひび割れ発生状況やひび割れ幅などを概ね評価可能になる。

2.2 時間依存挙動のモデル化

コンクリートの時間依存挙動としては、クリープ、収縮とコンクリートの硬化過程に伴う材料特性の変化を考慮した。クリープの影響は、主応力方向の応力増分に対し、式(1)に示すようにStep by step法によりクリープひずみを算出し、初期ひずみ問題として考慮した。

$$\epsilon_{creep} = \sum_{i=1}^{m-1} \phi(t, t_0) \Delta \sigma_i / E_{ci} \tag{1}$$

ここで、 ϵ_{creep} はクリープひずみ、 $\phi(t, t_0)$ は有効材齢 t_0 日に載荷した、有効材齢 t 日におけるクリープ係数、 E_{ci} は有効材齢 t 日におけるコンクリートのヤング係数を表す。

また収縮の影響に関しては、実験により計測されている自己収縮と乾燥収縮を考慮した収縮量から曲線近似によりモデル化し、各時間に対しての収縮ひずみを算出し、初期ひずみ問題とした。

材齢に伴う材料特性の変化は、Solidification conceptに基づき考慮した。すなわち、材齢と共に変化する材料特性を、セメントの水和の反応の程度を表す関数であるVolume function ($v(T)$) と関連付けた。任意時間応力 ($\sigma_g(t)$) は式(2)に示すようにVolume functionの増分 ($dv(T)$) とひずみ履歴を考慮し、各時間ステップで生成された硬化体の応力-ひずみ関係 ($\sigma(\epsilon(t)-\epsilon(T))$) の総和として与えられる。ここで、 t はトータルの時間、 T は各ステップでの時間を表す。なお、材料特性の時間的变化は、コンクリートの強度、引張強度、ヤング係数、鉄筋の付着強度に対して考慮した。

$$\sigma_g(t) = \int \sigma(\epsilon(t) - \epsilon(T)) dv(T) \tag{2}$$

3. 高強度コンクリートを用いたPRCはり部材に対する非線形有限要素解析

3.1 解析対象PRCはり

(1) 実験概要

手塚らによって行われたPRCはり (以下、HL32) の実験^{2),4)}を対象として解析的評価を行った。供試体の概要を図-1に示す。供試体は断面が200×250mm、長さが2400mmのはりであり、鉄筋には引張鉄筋にD13、PC鋼材にφ9.0の細径異形鋼棒、圧縮鉄筋にD16がそれぞれ2本ずつ配筋されている。コンクリートの材料特性を表-1に示す。鉄筋およびPC鋼材のヤング係数は201kN/mm²、202kN/mm²である。なお、圧縮強度の影響を直接比較するため、HL32と同一の諸元、荷重履歴で、圧縮強度のみが異なる普通強度コンクリートを用いたPRCはり (以下、NL32)^{4),5)}の実験も行われている。

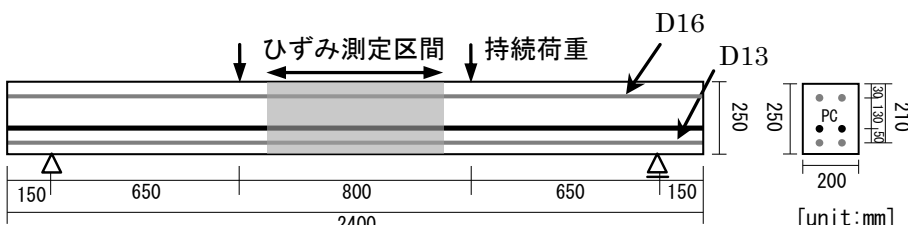


図-1 供試体概要

表-1 材料特性

試験時期	プレストレス導入時 (材齢9日)	持続荷重 載荷時 (材齢16日)	標準養生 (材齢28日)
圧縮強度 (N/mm ²)	95.4	100.0	105.4
引張強度 (N/mm ²)	/		6.43
ヤング係数 (kN/mm ²)	35.2	36.6	38.7

実験では、材齢9日にPC鋼材に110.1kN (860.0N/mm²) のプレストレスが導入され、材齢16日に68.3kNの持続荷重が載荷され、持続載荷期間は約400日である。さらに実験では、スパン中央520mm区間に20mm間隔で引張鉄筋ひずみ分布が計測されている。また、はり供試体とは別に載荷用供試体と同断面の供試体を用いてクリープ係数および収縮ひずみが計測されている。計測には、埋込み型ひずみ計と評点距離100mmとしたコンタクトゲージ (精度1/1000mm) が併用されている。

(2) 解析のモデル化

本解析で用いた解析モデルを図-2に示す。等曲げ区間を含む周辺では、ひび割れ分布を詳細に検討するために細かな要素分割とした。

クリープ係数と収縮ひずみは図-3に示すように実験値と一致するように与えた。クリープ係数は、実験値に一致するようにCEB-FIP MODEL CODE1990の予測式を回帰した修正式を用いた²⁾。収縮ひずみは、実験で得られた値から近似曲線を用いて導出した。なお収縮ひずみにおいて、材齢1日以前に見られる大きな収縮量は自己収縮によるもので、材齢1日以降進行していないのは材齢1日で脱型し、その後のプレストレス導入まで湿潤養生を行ったためとされている。本解析では、収縮ひずみが一定となる打設後0.7日からを解析対象期間とし、その時点のひずみを自己収縮として初期ひずみとして与えた。

コンクリートの材料特性の変化を示すVolume functionは、表-1の材齢28日の値で正規化して9日、17日の値を補間するよう、図-4のように与えた。

3.2 ひずみの時間依存挙動の評価

図-5に、等曲げ区間での引張鉄筋ひずみ分布の経時変化の解析値と、ひずみ測定区間での実験値を示す。解析では、ひび割れ発生直前 (59.4kN) において、引張鉄筋には自己収縮の影響により約200 μ の圧縮ひずみが導入されている。

また、荷重直後から50日にかけてクリープの影響によりひずみが全体的に増加している。50日において、ひずみの最大値や最小値、ひずみが増加する間隔や領域などのひずみ分布性状ならびにその経時変化について、解析値は実験値を妥当に評価していることが分かる。このように、本解析のようなクリープ、収縮の影響と付着の影響を適切に考慮した有限要素解析を用いれば、時間依存的にも分布的にも、鉄筋のひずみを妥当に評価できることが示された。

3.3 ひび割れ性状の評価

図-6に、持続荷重終了時 (約400日) の実験で得られたひび割れ性状と解析で得られたひずみ分布を重ねて示す。コンター図は解析で得られた部材軸方向のひずみ分布であり、赤色で表示されている領域がひび割れ発生位置に対応する。また、実験で観察されたひび割れを白線で重ねて表している。底面のひび割れ発生本数は、収縮の影響であると思われるひび割れを除き、実験では6本、解析では4本である。底面での最大ひび割れ間隔は、実験が225mm、解析が240mmであり、平均ひび割れ間隔は、実験が165mm、

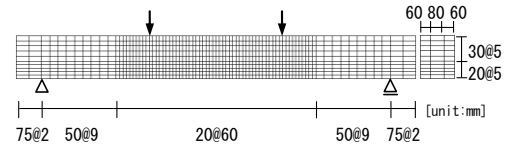


図-2 解析モデル

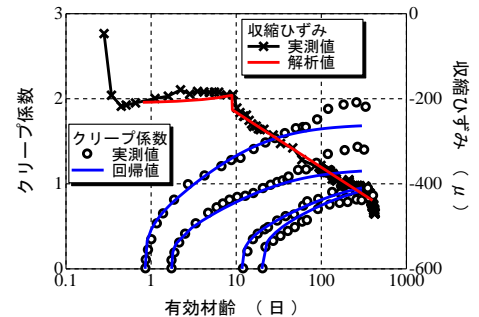


図-3 クリープ係数・収縮ひずみ

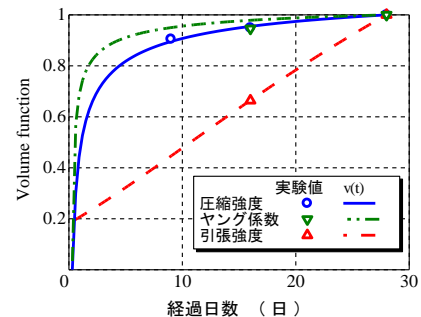


図-4 Volume function

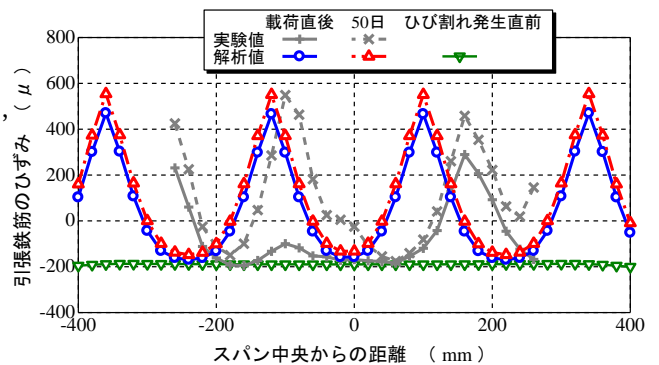


図-5 引張鉄筋ひずみ分布の経時変化

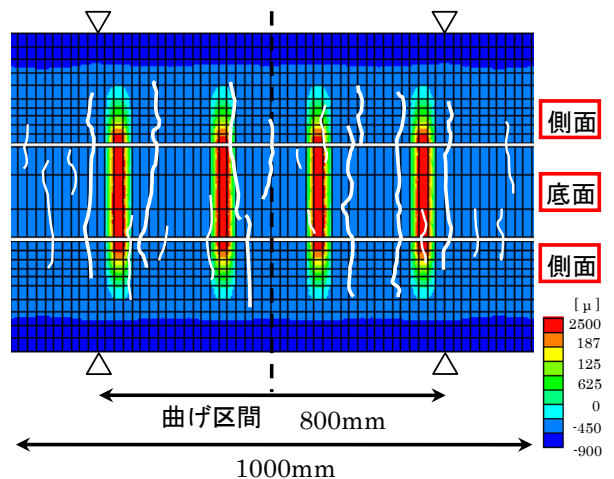


図-6 実験のひび割れ性状と解析のひずみ分布

解析が233mmである。解析ではひび割れ本数が少ないことから平均ひび割れ間隔を若干大きめに評価する結果となったが、ひび割れ発生性状を概ね評価しているものと考えられる。一方、側面でのひび割れ進展長さは、実験と解析でよく一致している。

4. 内部性状に及ぼすコンクリート強度の影響

一般的に、高強度コンクリートは普通強度コンクリートに比べ、クリープ係数、乾燥収縮量が小さい。これらが応力、平均曲率を始めとした内部性状の時間依存挙動に与える影響を、諸元が等しい普通強度コンクリートを用いたNL32の結果と比較しながら検討を行う。

図-7に、解析より得られた引張鉄筋応力と上縁からの中立軸位置の経時変化に対するHL32（高強度コンクリート）とNL32（普通強度コンクリート）の結果を示す。引張鉄筋応力は早期に急激に増加した後、HL32では減少しながら、NL32では増加しながら収束傾向を示す。HL32の方がより急激に増加することについて、高強度の場合は、クリープ係数の立ち上がり大きいことが影響していると考えられる。一方、中立軸位置は徐々に低下する挙動を示した。中立軸位置は持続荷重中変化し続けることから、乾燥収縮量が大きく影響していると考えられる。そのため、収縮量の変化量が小さい高強度の方が変化が小さい結果となっている。

図-8に、解析より得られたPC鋼材応力と平均曲率の経時変化に対するHL32とNL32の結果を示す。平均曲率の経時変化は、普通強度では400日まで緩やかに増加していくのに対して、高強度では持続荷重導入直後に急激に増加し、その後の増加傾向は小さいものとなっていることから、平均曲率へは、普通強度ではクリープと乾燥収縮の影響が合わさり、高強度コンクリートではクリープの影響が支配的と考えられる。PC鋼材応力は一旦上昇傾向を示すが、その後は徐々に低下している。PC鋼材応力の経時変化はHL32とNL32とも同様の傾向を示していることから、PC鋼材応力には、クリープより乾燥収縮の方がより影響が大きいことが予測される。図-9に、解析より得られた圧縮鉄筋応力と上縁から6.3mmの位置におけるコンクリート応力の経時変化に対するHL32とNL32の結果を示す。圧縮鉄筋、コンクリート応力はともに徐々に変化し、その経時変化は中立軸位置や平均曲率の経時変化の双方の傾向と似たようなものとなった。

本解析結果から、断面内では複雑な応力再配分が経時的に行われると同時に、コンクリートの圧縮強度の相違による挙動の違いが確認された。よって、長期の時間依存挙動については使用する材料の特性を考慮した上で、より詳細なメカニズムの検討が今後必要になると考えられる。

5. 収縮量が及ぼす影響の評価

近年大きな収縮量を示すコンクリートを使用した場合の挙動が問題となっている。そこで、本章で

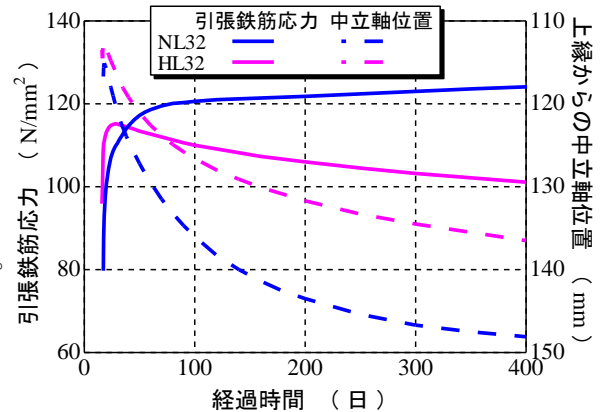


図-7 引張鉄筋応力・中立軸位置の経時変化

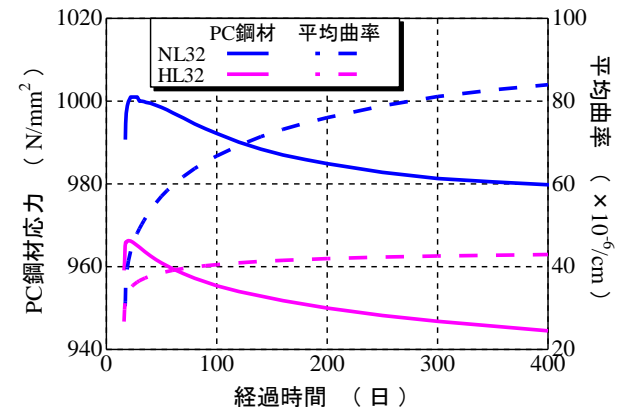


図-8 PC鋼材応力・平均曲率の経時変化

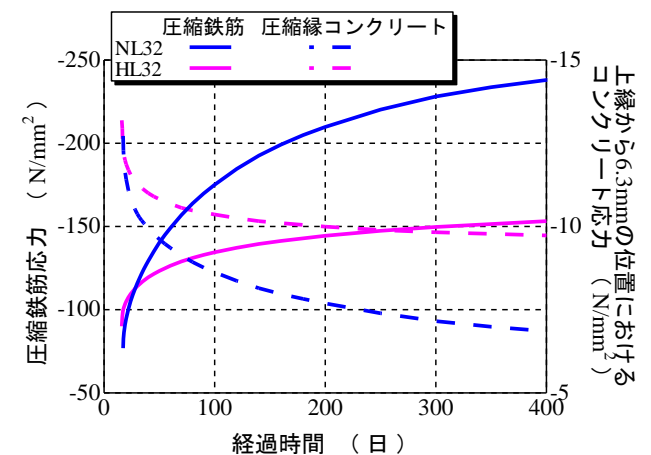


図-9 圧縮鉄筋応力・コンクリート応力の経時変化

は、収縮量のうち自己収縮量と乾燥収縮量を個別に分け、それぞれの収縮量の相違がひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。自己収縮に対しては、本解析対象の自己収縮量 190μ （乾燥収縮量は 200μ とする）を基準として 0μ 、 95μ 、 285μ 、 380μ の5ケースに対して検討を行った。乾燥収縮に対しては、本解析対象の乾燥収縮量に相当する 200μ （収縮量： 400μ ）を基準として、 400μ （収縮量： 600μ ）、 600μ （収縮量： 800μ ）の3ケースに対して検討を行った。また乾燥収縮に対しては、比較としてNL32において収縮量を検討した結果³⁾も併せて記す。

5.1 自己収縮が及ぼす影響

自己収縮がひび割れ幅に及ぼす影響について、式(3)に示す土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾のひび割れ幅算定式と比較しながら、持続荷重導入により生じる短期ひび割れ幅と、その後の長期荷重の影響による長期ひび割れ幅を検討する。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd} \right] \tag{3}$$

ここで、 w はひび割れ幅、 k_1 、 k_2 および k_3 はひび割れ間隔に影響する係数、 c はかぶり、 c_s は鋼材の中心間隔、 ϕ は鋼材径、 σ_{se} は鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量、 E_s は鋼材のヤング係数、 ϵ'_{csd} はコンクリートの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を表す。

表-2に、自己収縮量が異なると仮定したHL32に対しての鉄筋ひずみ・表面ひび割れ幅の変化を示す。ここで鉄筋ひずみは最大ひび割れ間隔、ひび割れ本数は有限要素解析から得られた値を示す。表面ひび割れ幅は、解析によって直接得られた値と、式(3)から算出した最大ひび割れ間隔184mmと解析で得られた鉄筋ひずみ増加量を用いて算定した値である。ただし、式(3)において、短期ひび割れ幅については ϵ'_{csd} を0とし、長期ひび割れ幅については、土木学会コンクリート標準示方書において、耐久性に対する曲げひび割れ幅の検討に対し、高強度コンクリートの場合は 100μ 程度としてよいと記述されているので、 100μ と仮定した。

鉄筋ひずみについては、鉄筋位置のコンクリート応力が0の時点では、自己収縮が大きくなるほど、圧縮ひずみが大きくなる。また、持続荷重導入直後の鉄筋ひずみ増加量としては、ひび割れ本数や最大ひび割れ間隔は異なるが、自己収縮が大きくなるほど大きくなることわかる。これより自己収縮は荷重載荷直後のひび割れ幅を増加させることがわかる。また、本解析では、最大ひび割れ間隔も自己収縮の影響を受ける結果となっている。この点について、設計では考慮されていない現象であり、解析の適用性も含め、今後検討する必要がある。解析で得られた短期ひび割れ幅は、式(3)から算出された値より小さめに評価する結果となった。これは、解析ではコンクリートが引張応力を受け持つために、小さめに評価していると考えられる。長期ひび割れ幅増加量は、本解析では、自己収縮量が変化しても、ほぼ一定の 0.02mm となった。つまり、自己収縮が過大に生じた場合においても、長期的なひび割れ幅への影響はない結果となった。また式(3)での長期ひび割れ幅の増加量は 0.018mm となり、概ね一致する結果であるので、長期ひび割れ幅も本解析手法を用いれば評価可能であることが示された。

表-2 自己収縮量の差異による鉄筋ひずみ・表面ひび割れ幅の変化

自己収縮量 (μ)	解析結果					ひび割れ幅算定式				
	最大ひび割れ位置における鉄筋ひずみ(μ)			最大 ひび割れ 間隔	ひび割れ 本数	表面ひび割れ幅(mm)			表面ひび割れ幅(mm)	
	鉄筋位置のコンクリート 応力が0の時点(A)	持続荷重 導入直後(B)	増加量 (B-A)			短期(C) (16日)	長期(D) (400日)	増加量 (D-C)	短期 ($\epsilon'_{csd}=0$)	長期 ($\epsilon'_{csd}=100$)
0	-5.6	558.6	564.3	180	5	0.070	0.095	0.025	0.104	0.122
95	-11.9	542.9	554.8	260	4	0.076	0.098	0.022	0.102	0.120
190	-103.3	473.9	577.2	280	4	0.082	0.105	0.023	0.106	0.125
285	-115.6	475.2	590.8	260	3	0.085	0.108	0.023	0.109	0.127
380	-175.1	454.2	629.3	300	4	0.095	0.114	0.019	0.116	0.134

5.2 乾燥収縮が及ぼす影響

乾燥収縮を変化させた場合の平均曲率の経時変化を図-10に示す。持続荷重導入による平均曲率はHL32が約 $27 \times 10^{-6}/\text{cm}$ 、NL32が約 $30 \times 10^{-6}/\text{cm}$ であり、概ね一致している。しかし、収縮量の違いによる増加傾向が異なる。NL32では収縮量に比例して平均曲率が増加しているのに対して、HL32では差がほとんど見られない。図-11に、スパン中央はり下縁での、初期ひび割れ発生後の最大ひび割れ位置でのひび割れ幅増加量の経時変化を示す。NL32では収縮量が大きくなるに従い、経時的なひび割れ幅の増加量は大きくなる傾向が示されている。一方、HL32では収縮量の大小に関わらず、ひび割れ幅の増加量はほぼ一定である。平均曲率や表面ひび割れ幅の経時変化が小さく、乾燥収縮による相違が生じない理由としては、高強度コンクリートはクリープ係数が小さく、永久荷重下の変形が小さいことが影響していると考えられる。本解析手法によれば、高強度コンクリートにおいては、過剰な乾燥収縮が発生した場合にも、長期たわみやひび割れ幅に与える影響は小さいものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、時間依存挙動に加え、高強度コンクリートを用いた場合の補強筋の付着特性を考慮した有限要素法を用いて、直接ひび割れ幅を評価する事により、以下の結論を得た。

- (1) 本論文での解析手法を用いれば、高強度コンクリートを用いたPRCはり部材の鉄筋ひずみ分布やひび割れ性状を概ね妥当に評価できる。
- (2) 高強度コンクリートと普通強度コンクリートの内部性状の違いを検討した結果、強度による材料特性の違いが影響を与えることを確認した。
- (3) 自己収縮量が短期ひび割れ幅に与える影響は無視できず、自己収縮量が大きいほど、ひび割れ幅も大きくなる。一方、長期的なひび割れ幅に対して自己収縮量の影響は小さい。
- (4) 高強度コンクリートにおいては、過剰な乾燥収縮が発生した場合にも、長期たわみやひび割れ幅に与える影響は小さい結果が、対象とした供試体に対しては示された。

参考文献

- 1) 社団法人プレストレストコンクリート技術協会：高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工基準，2008
- 2) 手塚正道，佐藤良一，落合勝，阿部司，伊藤秀敏：高強度コンクリートを用いたPRC曲げ部材の時間依存性変形に関する研究，土木学会論文集，No. 767/V-64，pp. 99-114，2004. 8
- 3) 玉野慶吾，中村光，上田尚史，国枝稔：PRCはり部材の時間挙動に関する解析的評価，第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp. 491-496，2010. 10
- 4) 手塚正道：PRC曲げ部材の時間依存性挙動に関する研究，博士論文，2000. 2
- 5) 手塚正道，佐藤良一，山本浩嗣，鳥取誠一：PRC部材の長期変形・応力に関する研究，土木学会論文集，No. 613/V-42，pp. 43-57，1999. 2
- 6) 土木学会：2007年度版コンクリート標準示方書改訂資料，2007

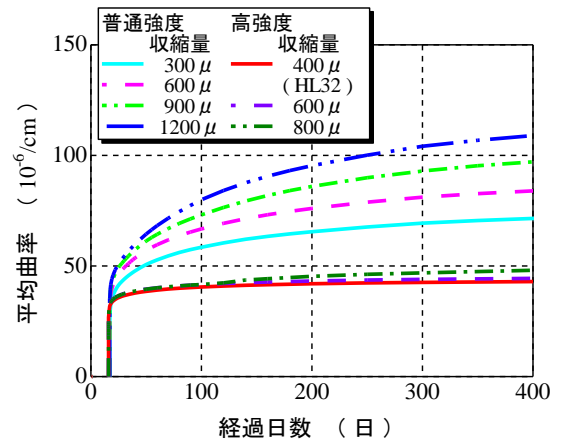


図-10 平均曲率の経時変化

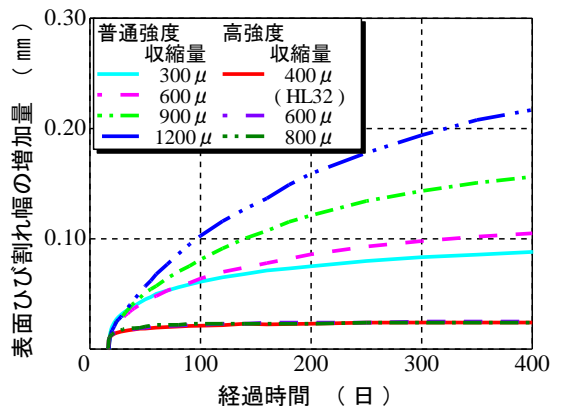


図-11 表面ひび割れ幅の増加量の経時変化