

# RCはり部材に対する曲げひび割れ進展挙動の 解析的評価

玉野 慶吾<sup>1</sup>・中村 光<sup>2</sup>・上田 尚史<sup>3</sup>・国枝 稔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (現, 鹿島建設株式会社 技術研究所)  
(〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: tamano@kajima.com

<sup>2</sup>正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-0806 名古屋市千種区不老町)

E-mail: hikaru@nagoya-u.jp

<sup>3</sup>正会員 名古屋大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-0806 名古屋市千種区不老町)

E-mail: n.ueda@nagoya-u.jp

<sup>4</sup>正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-0806 名古屋市千種区不老町)

E-mail: kunieda@nagoya-u.jp

RCはり部材に対する曲げひび割れ進展挙動について、クリープ、収縮、コンクリートの硬化過程に伴う材料特性の変化と、鉄筋の付着性状を考慮した3次元有限要素解析を用いて解析的に評価を行った。鉄筋の付着性状を考慮することにより、荷重増加によるRCはり、PRCはりのひび割れ性状およびひび割れ幅について評価できることが示された。また、時間依存挙動を考慮することにより、持続荷重による全体挙動およびひび割れ進展挙動を、強度による材料特性の違いに依らず、妥当に評価できることが示された。さらに、本解析手法を用いて、乾燥収縮量や自己収縮量、乾燥領域、クリープがひび割れ進展挙動に及ぼす影響を検討した。

**Key Words :** crack width, creep, shrinkage, FEM, bond

## 1. はじめに

コンクリートは外力の影響および体積収縮や体積膨張が何らかによって拘束された場合にひび割れが発生する<sup>1)</sup>。さらに、実構造物においてはひとつの要因だけによりひび割れが発生することは少なく、複数の要因が複雑に絡み合って発生していると考えられる。そして、発生したひび割れは、クリープや収縮に代表される時間依存挙動の影響を受けて進展することが知られている。コンクリートに発生する過大なひび割れは、美観や外観を損なうばかりでなく、漏水の原因や有害物質の浸入経路となり、耐久性上有害となるものもある。そのため、耐久性が高くより健全な構造物を実現するためには、ひび割れ発生から、構造物の使用期間に渡るひび割れ幅の経時変化を予測し、その制御を適切に行う事が要求される。

長期的なひび割れ幅や長期変形挙動に対して検討が行われている例として、李らは、付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮が持続荷重下におけるひび割れ幅の増加に及ぼす影響を検討し、長期曲げひび割れ幅算定式

を導いている<sup>2)</sup>。しかしながら、変形挙動の評価にまで至っていない。手塚らはPRCはりに対して、持続荷重の履歴、テンションスティフニング、クリープおよび収縮を統一的に取扱い、変形と断面応力の評価を解析的に試みている<sup>3)4)</sup>。しかしながら、ひび割れ性状の評価にまで至っていない。前川らはコンクリート構造の打設から供用終了まで長期にわたる特性の推移を時刻歴で追跡する3次元-材料応答連成解析システムにより、セメント硬化体中の微細空隙中の水分挙動が巨視的な構造応答に及ぼす影響を考慮することを可能にしている<sup>5)</sup>。しかしながら、直接的なひび割れ幅の評価までは検討していない。また、長期的なひび割れ幅は設計に取り入れられ、例えば、土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>では、曲げひび割れ幅算定式に対して、コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひずみ増加量を $150 \times 10^{-6}$ として考慮している。また、ひび割れが発生した増分は、ひび割れ間のコンクリートの収縮を考慮して、収縮量を増加する手法が検討されている<sup>7)</sup>。CEB-FIPのMODEL CODE90<sup>8)</sup>では長期的曲げひび割れの算定において鉄筋のコンクリー

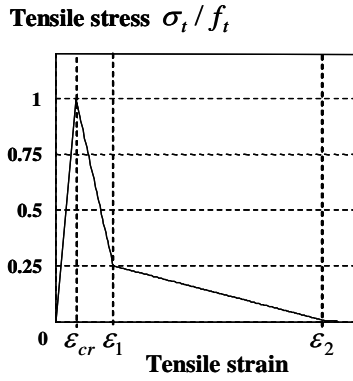


図-1 コンクリートの引張モデル

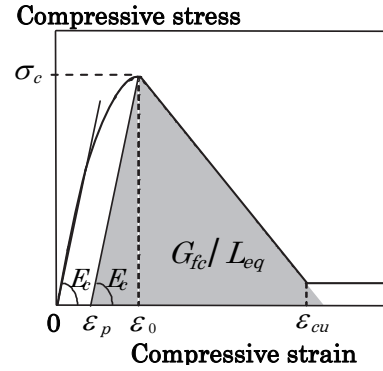


図-2 コンクリートの圧縮モデル

トに対する拘束作用を無視し、ひび割れ間のコンクリートの乾燥収縮として、自由収縮ひずみをそのまま取り入れている。このように、現在、長期的なひび割れ進展の評価に関して様々な検討は行われているが、統一的にRC構造物の長期時間依存挙動を定量的に把握するまでには至っていない。ひび割れ発生およびひび割れ進展挙動を含む長期時間依存挙動を定量的に評価する手法が開発されれば、適切なひび割れ制御を行う事が可能になると考えられる。特に構造物の多様性を考えた場合、複雑な境界条件および鉄筋の配置などを解析上でより現実的に考慮することが可能な3次元解析手法が将来的には有用と考えられる。

著者らは、ひび割れ進展挙動を評価する手法として分散ひび割れモデルによる離散的なひび割れ発生が評価可能な3次元有限要素解析<sup>9, 10)</sup>を用い、長期時間依存挙動として収縮、クリープ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できる解析手法の開発を行い、PRC部材の曲げひび割れの時間依存挙動の評価について検討している。本研究では、従来の研究<sup>11, 12)</sup>を整理し、RCからPRC、短期荷重から長期荷重、普通強度コンクリートから高強度コンクリートなどの多様な要因に対し、はり部材を対象として、本解析手法の有用性を検討するとともに、ひび割れ進展挙動の評価を行った。具体的には従来の内容に加えて、4章、5章において圧縮鉄筋、導入プレストレス量に対して新たに検討を行った。さらに、6章においては収縮がひび割れ進展挙動に及ぼす影響に対して解析的検討を行った。従来の部材全体に一律な収縮ひずみを仮定し収縮ひずみの絶対量の相違が及ぼす影響や、局所的な収縮が及ぼす影響の検討に加えて、はり部材の表面の乾燥状態がひび割れ進展に与える影響について検討を行った。

## 2. 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<sup>13)</sup>を用いた。ここでは、コンクリートの材料モデルならびに、ひび割れ進展挙動を評価する上で重要な挙動である、補強材の付着性状およびコンクリートの長期時間依存挙動の解析におけるモデル化について記述する。

### (1) コンクリートの材料モデル<sup>13)</sup>

引張を受けるコンクリートの一軸の応力-ひずみ関係の概要を図-1に示す。プレーンコンクリート部の応力-ひずみ関係には、引張破壊エネルギーを考慮し引張軟化曲線に1/4モデルを用いた。

圧縮を受けるコンクリートの一軸の応力-ひずみ関係の概要を図-2に示す。図に示すように、コンクリートの圧縮モデルには、応力が圧縮強度に達するまでは、Seanzが提案した一軸の応力-ひずみ関係を仮定し、ひずみ軟化領域には、引張、圧縮ともに破壊エネルギー  $G_F$  を考慮する事により、解のメッシュ寸法依存性が軽減されるモデルとなっている。

### (2) 付着モデル

コンクリートと補強材との付着挙動は、鉄筋コンクリート構造物の全体挙動に大きく影響を及ぼすことから、解析においては付着挙動を適切に考慮する必要性が認識されている。本研究ではコンクリートと補強材を独立にモデル化し、それぞれの要素間に付着特性を仮定したリンク要素を設けることで付着挙動を考慮するモデルを用いた。

仮定した異形鉄筋の付着特性を式(1)に示す。また、付着応力-すべり関係を図-3に示す。このモデルは、付着強度までは、菅ら<sup>14)</sup>がRC部材解析への適用のために提案した、島ら<sup>15)</sup>のマッシュなコンクリートに対するモデルに対して、付着強度の曲率を変化させたものである。また、付着強度以降は、付着応力軟化域を有するものである。

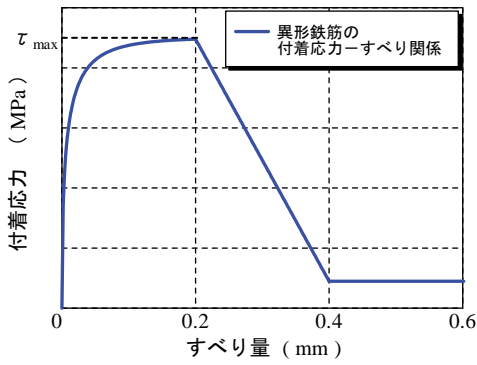


図-3 付着応力-すべり関係

$$\tau = \begin{cases} \alpha \times 0.9 \times (f'_c)^{2/3} (1 - \exp(-40(s/D)^{0.5})) & 0 \leq s < 0.2 \\ \tau_{\max} - (\tau_{\max} - 0.1\tau_{\max})(s - 0.2)/(0.4 - 0.2) & 0.2 \leq s < 0.4 \\ 0.1\tau_{\max} & 0.4 \leq s \end{cases}$$

ただし、 $\tau_{\max} = \alpha \times 0.9 \times (f'_c)^{2/3} (1 - \exp(-40(0.2/D)^{0.5}))$

(1)

ここで、 $\tau$  は付着応力、 $f'_c$  はコンクリートの圧縮強度 (MPa)、 $s$  はすべり量 (mm)、 $D$  は補強材の直径 (mm) を表す。また、式中の  $\alpha$  は付着強度を決定するパラメータである。 $\alpha$  は式(2)に示す飯塚<sup>6)</sup>が鉄筋かぶり厚を考慮し求めた付着強度と一致するように決定した。

$$\tau_{\max} = 0.56\sqrt{f'_c}(C/D) \quad (C/D > 2.0 \text{ となる場合は } C/D = 2.0)$$

(2)

ここで、 $C$  はかぶり厚 (mm) である。

### (3) 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、収縮および硬化過程にともなう材料特性の変化を考慮した。

#### a) クリープモデル

クリープの影響は主応力方向の応力増分に対し、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。Step by step法の概念図を図-4に示す。なお、クリープひずみの算定式は式(3)のように記述される一般的なものを用いた。

$$\varepsilon_{\text{creep}} = \sum_{i=1}^{m-1} \varphi(t_m, t_i) \Delta \sigma_i \quad (m \geq 2)$$

(3)

ここで、 $t_i$  および  $t_m$  は時間ステップ、 $\varepsilon_{\text{creep}}$  はある時間ステップ  $t_m$  における全クリープひずみ、 $\varphi(t_m, t_i)$  はクリープ関数であり、時間ステップ  $t_i$  に単

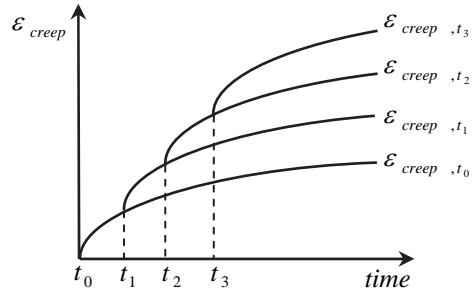


図-4 Step by Step法の概念図

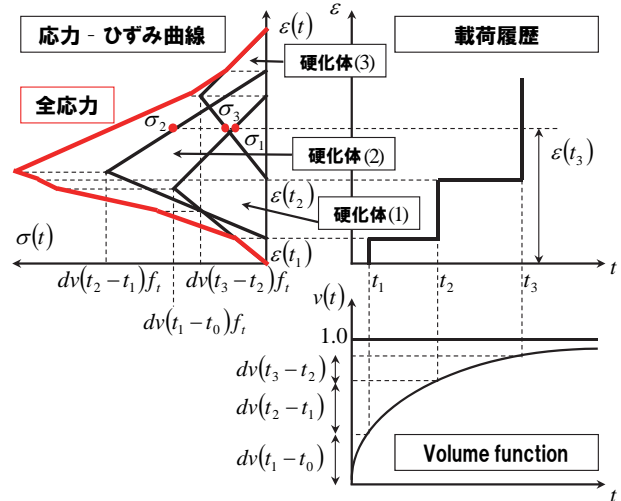


図-5 Solidification conceptの概念図

位応力が作用した場合の経過時間 ( $t_m - t_i$ ) におけるクリープひずみとして定義される。また、 $\Delta \sigma_i$  は時間ステップ  $t_i$  から時間ステップ  $t_{i-1}$  間での応力増分である。なお本解析手法では、圧縮クリープと引張クリープは等しいと仮定し、付着クリープは考慮していない。また、クリープ関数は土木学会コンクリート標準示方書の予測式<sup>9)</sup>およびCEB-FIP MODEL CODE 90の予測式<sup>8)</sup>を実験値より回帰した修正式から求めた。実験により異なる予測式を用いたのは、既往の研究<sup>3, 4)</sup>を参考に、予測式を導出したためである。

#### b) 収縮モデル

収縮の影響に関しては実験により計測されている収縮量から近似曲線によりモデル化し、各時間に対しての部材断面の平均収縮ひずみを算出し初期ひずみ問題とした。また、収縮モデルは土木学会コンクリート標準示方書の予測式<sup>9)</sup>を実験値より回帰した修正式から求めた。なお、自己収縮ひずみに関しては実験値の近似曲線を用いて算出した。

#### c) 硬化過程に伴う材料特性の変化に対するモデル

材料特性の時間的変化は、コンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング係数、鉄筋との付着強度に対して考慮した。また、若材齢コンクリートの硬化過程および材齢

に伴うひび割れ後の変化は、国枝ら<sup>17)</sup>が提案する **Solidification concept**に基づき考慮した。これは、コンクリートのマクロな挙動が、時間の経過に伴って生じる硬化体の挙動を重ね合わせることでコンクリート全体の挙動を表現できるとしている。つまり、セメントの水和の反応の程度を表す関数である **Volume function**によって経時的に硬化体が発現し、材齢毎に生成される硬化体に与えられるひずみ増分は同一であるという運動学的な制約条件を課すことにより、各ステップにおける応力の重ね合わせを可能にし、全体の応力-ひずみ関係のモデル化を容易にしている。なお、**Volume function**から各種物性の発現（圧縮強度、弾性係数や曲げ強度など）だけでなく、ひび割れ発生後の応力-ひずみ曲線までも定義している。**Solidification concept**の概念図を図-5に示す。図-5に示される時間での全応力  $\sigma_g(t_3)$  は、 $t_0$  から  $t_1$ 、 $t_1$  から  $t_2$ 、 $t_2$  から  $t_3$  の間に生成された硬化体の応力をそれぞれ、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  とすると、式(4)のように計算される。なお、図-5の応力-ひずみ関係は、初期ひずみがなく無限大の時間の場合は図-1、2に対応する。

$$\begin{aligned} \sigma_g(t_3) &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ &= dv(t_1 - t_0)\sigma(\varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_0)) \\ &\quad + dv(t_2 - t_1)\sigma(\varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_1)) \\ &\quad + dv(t_3 - t_2)\sigma(\varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_2)) \end{aligned} \quad (4)$$

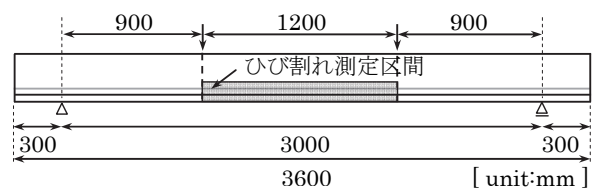
### 3. 短期的なひび割れ進展挙動の評価

ここでは、荷重により発生する曲げひび割れに対して、ひび割れ幅、ひび割れ間隔およびひび割れ性状に着目して、RCはり部材のひび割れ進展挙動に対する本解析手法の有用性を検討した。

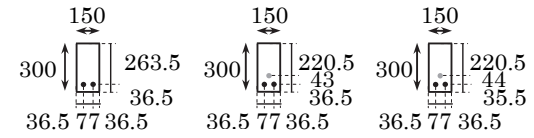
#### (1) 実験供試体概要

倉岡ら<sup>18)</sup>、高木ら<sup>19)</sup>により行われたRCはりおよびPRCはりの単調荷重実験（A-1、A-3、A-5）を対象として解析的評価を行った。実験は、プレストレス導入の有無と引張鉄筋径の違いをパラメータとしたものであり、A-1はRCはり、A-3、A-5はPRCはりであり、その概要を図-6に示す。供試体はすべて断面が150×300mm、長さが3600mmのはりである。また、供試体諸元および材料特性を表-1に、鉄筋およびPC鋼材の機械的性質を表-2に示す。なお、せん断破壊が生じないように、せん断スパン内にスターラップ（D10鉄筋）が100mmピッチで配置されており、PC鋼材には、PC丸鋼種1号SBPR1080/1230が用いられている。

実験では、十分なひび割れ本数を得るために等曲げ区



(a) 供試体側面図



(b) A-1断面図 (c) A-3断面図 (d) A-5断面図

図-6 供試体概要

表-1 供試体諸元および材料特性

供試体 No.	主鉄筋	PC鋼材	引張縁におけるプレストレス導入量 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
A-1	D13			36.6	2.53*	30.0*
A-3	D13	φ13	4.35	42.1	2.78*	31.5*
A-5	D19	φ13	4.35	45.4	2.93*	32.0*

\*圧縮強度からの推定値

表-2 鉄筋およびPC鋼材の機械的性質

	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D13	380.1	201.2
D19	400.8	204.8
φ13	1258	201

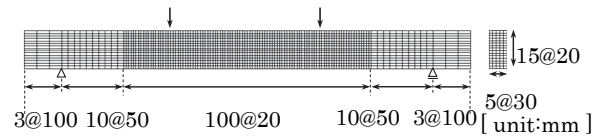


図-7 解析モデル

間を1200mmとしている。PRCはりは、荷重2日前にプレストレスが導入され、特殊セメント系無収縮注入材によるグラウト注入が行われている。なお、プレストレス導入量は、全ての供試体に対して引張縁応力が4.35N/mm<sup>2</sup>と等しくなるように導入されている。荷重は油圧ジャッキによる単調荷重が行われ、ひび割れ幅は、鉄筋位置と底面より10mmの位置に貼り付けたコンタクトチップ（100mm間隔）により、コンタクトゲージ（精度1/1000mm）を用いて等曲げ区間のひび割れ幅が測定されている。また同位置でマイクロスコブ（精度1/100mm）を用いたひび割れ幅の測定も行われている。ひび割れ間隔は、ひび割れ幅と同様に、鉄筋位置と底面より10mmの位置で測定されている。



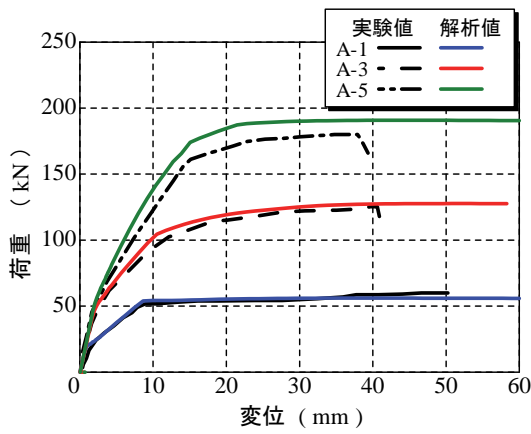


図-8 荷重-変位関係

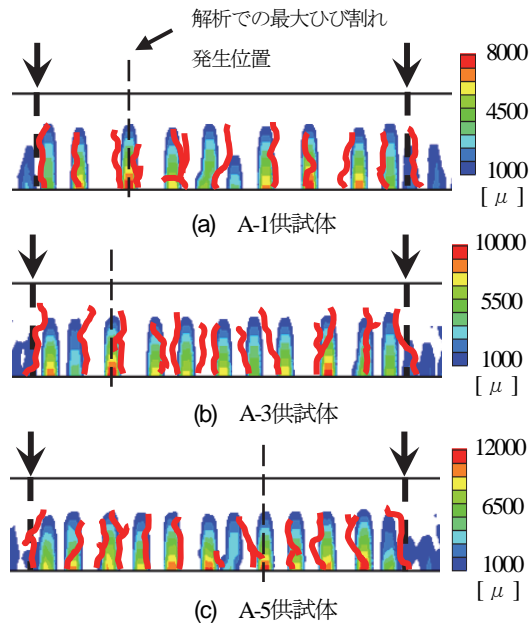


図-9 実験のひび割れ性状と解析のひずみ分布

(2) 解析概要

本解析で用いた解析モデルを図-7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をした。要素寸法は部材軸方向、高さ方向ともに20mmとし、奥行き方向は30mmとした。また、プレストレスは鉄筋要素に所定の初期ひずみを考慮する事により導入した。なお、プレストレス導入から載荷までが2日間と短期間であるため、時間依存挙動(クリープ、収縮および硬化過程に伴う材料特性の変化)は考慮していない。

また、PC鋼材にはPC丸鋼が用いられており、通常の異形鉄筋の付着性状とは異なると考えられる。そこで、PC鋼材には松岡ら<sup>20)</sup>が提案する丸鋼を用いた補強筋の付着性状を適用した。

(3) 全体挙動およびひびわれ性状の評価

図-8に各供試体における荷重-変位関係の実験値およ

表-3 ひび割れ本数およびひび割れ間隔に関する実験値と解析値

供試体 No.	ひび割れ本数		ひび割れ間隔 (mm)			
	実験値	解析値	最大値		平均値	
			実験値	解析値	実験値	解析値
A-1	11	10	179	160	122	122
A-3	12	11	154	140	111	112
A-5	12	12	146	120	108	110

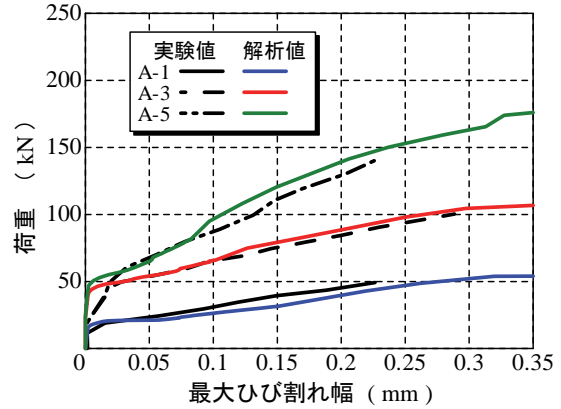


図-10 荷重-最大ひび割れ幅関係

び解析値を示す。RCはり、プレストレスを導入したPRCはりおよび鉄筋径の異なるはりに対して、初期の曲げ剛性、ひび割れ発生荷重ならびに鉄筋降伏後の挙動について、解析値は実験値を精度よく評価できている。このことから、曲げを生じるはりに対して、その全体挙動を妥当に評価できることが分かる。

図-9にひび割れの発生が定常状態となった時の等曲げ区間における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示す。コンター図は解析により得られた部材軸方向のひずみ分布であり、1000μ以上に対して色付けし、ひび割れ発生位置に対応する。また実験で観測されたひび割れを赤線で重ねて表している。なお、解析ではA-1供試体の変位8.3mmの時点、A-3供試体の変位13.6mmの時点、A-5供試体の変位19.5mmの時点であり、ひび割れの発生が定常状態となっていることを確認している。

表-3に実験で計測されたひび割れ間隔の平均値、最大値ならびにひび割れ本数と解析で得られた値を示す。なお、ひび割れは等曲げ区間に発生したひび割れのみ評価の対象としている。表-3から、ひび割れ本数はどの供試体においてもよく一致している。ひび割れ間隔について、解析では最大ひび割れ間隔を若干小さめに評価しているものの、平均ひび割れ間隔はよく一致している。また、A-3、A-5供試体はA-1供試体と比較してひび割れ間隔が小さい。これは、実験では、プレストレスを導入しているPC鋼材が引張鋼材の一種として機能していると考えられると報告されており、その効果が多段鉄筋の役割に

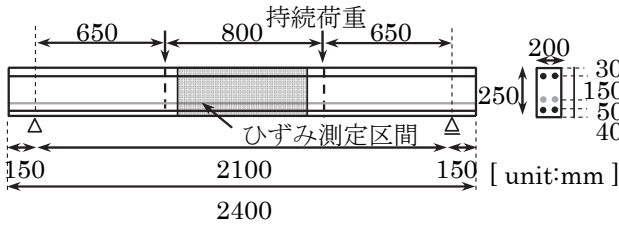


図-11 供試体概要

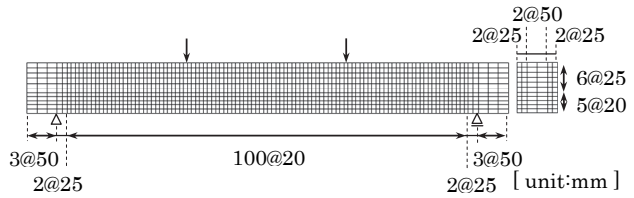


図-12 解析モデル

表-4 供試体の種類

供試体 No:	引張鉄筋			PC鋼棒			圧縮鉄筋			プレストレス シング度 $\lambda$	プレストレス 導入量 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷荷重 (kN)	
	鉄筋径	断面積 $A_s$ (mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)	鉄筋径	断面積 $A_s$ (mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)	鉄筋径	断面積 $A_s$ (mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)			17日	1224日
NL10	D19	573	1.15	/	/	/	/	/	/	0	/	60	68
NL12	D19	573	1.15	/	/	/	D16	397.2	0.79	0	/	60	68
NL20	D16	397.2	0.79	$\phi$ 7.1	80	0.16	/	/	/	0.47	867.7	68	77.2
NL22	Dm16	315.1	0.63	$\phi$ 7.1	80	0.16	D16	397.2	0.79	0.52	863.9	68	77.2
NL30	D13	253.4	0.51	$\phi$ 9.0	128	0.26	/	/	/	0.69	929.4	68.3	77.2
NL32	Dm13	186.1	0.37	$\phi$ 9.0	128	0.26	D16	397.2	0.79	0.75	927.3	68.3	77.2

表-5 コンクリートの材料特性

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17日)	標準養生 (材齢28日)
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	39.9	45.4	44.5
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	/	3.6	3.6
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	30.1	32.7	36.8

表-6 鉄筋の材料特性

呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D19	332	206.6
D16(Dm16)	353	203.6
D13(Dm13)	372	206.5
$\phi$ 9.0	1382	201
$\phi$ 7.1	1460	202

近いものとなっていると考えられる。解析においても、同様の傾向が示されている。なお、A-1供試体に対して要素寸法を20mm, 40mm, 60mmとして別途検討した結果、ひび割れ発生本数はそれぞれ10本, 10本, 9本であった。さらに、43.0kN時点の最大ひび割れ幅は0.22mm, 0.21mm, 0.25mmとなり、ひび割れ間隔の半分程度の要素寸法ならば、ひび割れ進展性状を妥当に評価できることが分かる。

(4) ひび割れ幅の評価

図-10に荷重-最大ひび割れ幅関係の実験値と解析値を示す。なお、解析での最大ひび割れは図-9において破線で示す位置である。ここで、ひび割れ幅は、各有限要素節点間の水平方向の相対変位として表した。これは、本解析のように数cmの要素寸法の場合、ひび割れが発生していない位置の弾性変形を微小と仮定すれば、各節点間の相対変位をひび割れ幅と見なせるためである。いずれの供試体に対しても、荷重の増加によるひび割れ幅の増加の傾向を妥当に評価している。このように、本解析手法のような付着挙動を直接モデル化した有限要素解析を用いれば、曲げを受けるはりに対して、その変形挙動および荷重による曲げひび割れの進展挙動を妥当に評価できることが示された。

4. 普通強度コンクリートを用いたはり部材への適用性

ここでは、普通強度コンクリートを用いたRCはり部材を対象として、長期的なひび割れ進展挙動に対する本解析手法の有用性を検討した。

(1) 実験供試体概要

手塚らにより行われたRCはりおよびPRCはりの実験<sup>3), 21)</sup>を対象として解析的評価を行った(以下、普通強度シリーズ)。供試体はすべて、断面が200×250mm, 長さが2400mmのはりであり、その概要を図-11に示す。

実験パラメータは、圧縮鉄筋の有無やプレストレス導入レベルである。供試体の種類を表-4に示す。また、コンクリートの材料特性および鉄筋の材料特性を表-5, 表-6に示す。プレストレス導入レベルは、鉄筋とPC鋼材の径を組み合わせることで変化した。プレストレスの導入レベルは式(5)に示すプレストレッシング度( $\lambda$ )を用いて示している。

$$\lambda = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_{sy}} \quad (5)$$

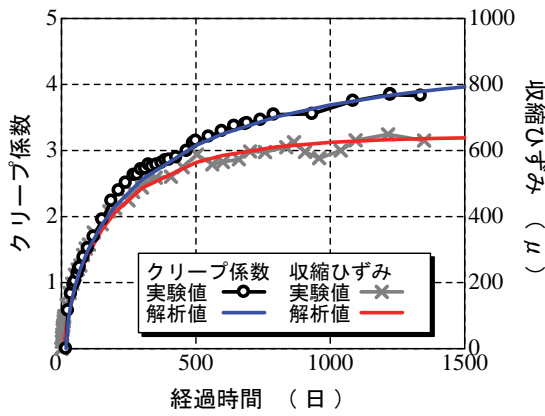


図-13 クリープ係数・収縮ひずみ

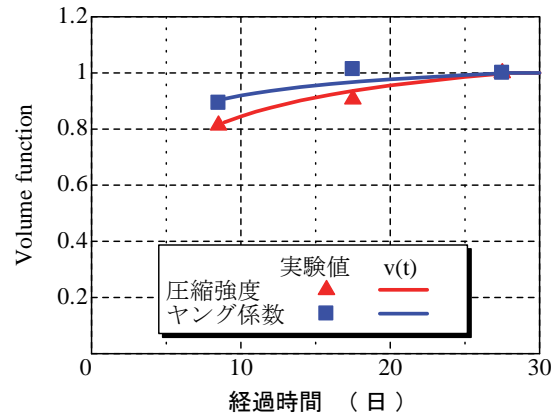
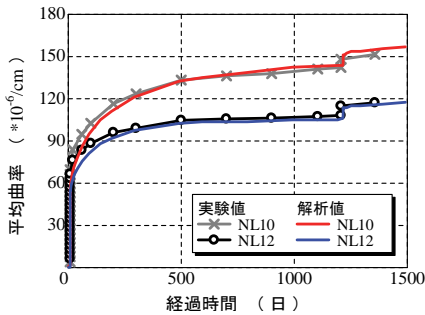
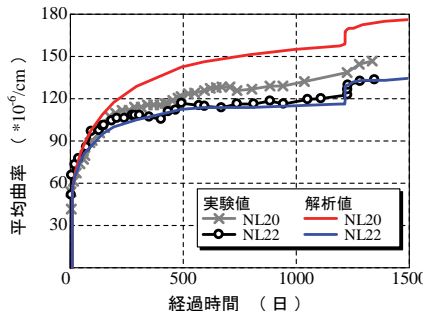


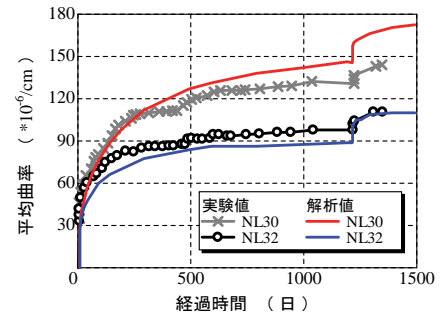
図-14 Volume function



(a) NL10, NL12 供試体



(b) NL20, NL22 供試体



(c) NL30, NL32 供試体

図-15 平均曲率の経時変化

ここで、 $A_p$ 、 $A_s$  はそれぞれPC鋼材および引張鉄筋の断面積、 $f_{py}$ 、 $f_{sy}$  はそれぞれPC鋼材および鉄筋の降伏強度を表す。

実験では、材齢9日でPC鋼棒にプレストレスが導入され、材齢17日で持続荷重が載荷された。さらに材齢1224日で持続荷重を増加させ、持続載荷期間は約1360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の分布が測定されている。また、はり供試体とは別に載荷用供試体と同断面で長さ500mmの供試体を用いて、収縮ひずみおよびクリープ係数が計測されている。計測には、埋込み型ひずみ計と標点距離100mmとしたコンタクトゲージ(精度1/1000mm)が併用されている。クリープ供試体の導入応力は、PC棒鋼の初期応力度を引張強度の5割以下のリラクセーションがない状態にセットされている。

## (2) 解析概要

本解析で用いた解析モデルを図-12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をした。要素寸法は部材軸方向、高さ方向ともに20mmとした。

また、クリープ係数、収縮ひずみは、図-13に示すように実験値と適合するように与えた。なお、収縮ひずみ

は計測された平均値を用いている。収縮量に関しては、部材全要素に対して一様に自由収縮ひずみを与えるものとした。収縮量の分布の影響は6章で検討を行う。コンクリートの材料特性の変化を示すVolume functionは、図-14に示すように表-5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に与えた。また、引張強度はヤング係数のVolume functionと同様の関数を適用した。なお、本解析ではプレストレス導入時の9日からを解析対象とした。これは、収縮ひずみの結果が得られた時点初期値としたこと、さらに計算労力を低減するためである。

## (3) 変形挙動ならびにひずみの時間依存挙動の評価

図-15に平均曲率の経時変化の実験値と解析値を示す。なお、プレストレス導入直前の状態を0としている。

まず、圧縮鉄筋の影響について、実験では圧縮鉄筋がある場合(NL12, NL22, NL32)、平均曲率の増加量は抑制されている。これは、圧縮鉄筋の効果によりクリープが抑制されているためと考えられる。解析でも同様の傾向がみられ、その値も概ね等しい結果となった。

次に、プレストレスの導入レベルについて、まず図-15(a)から、RCはりに対して精度よく評価できている。また、実験ではプレストレスの導入レベルが大きくなる

と平均曲率の増加が抑制されているが、解析でも同様の傾向が示されている。さらに、材齢1224日で持続荷重を増加させた後の挙動も実験値を再現していることが分かる。

以上のことから、圧縮鉄筋の有無、プレストレスの導入レベルに依らず、本解析手法を用いれば、はり部材の持続荷重下における変形挙動を概ね評価可能であるという事が示された。

(4) ひび割れ進展挙動の評価

図-16に、NL32での持続荷重終了後(1400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

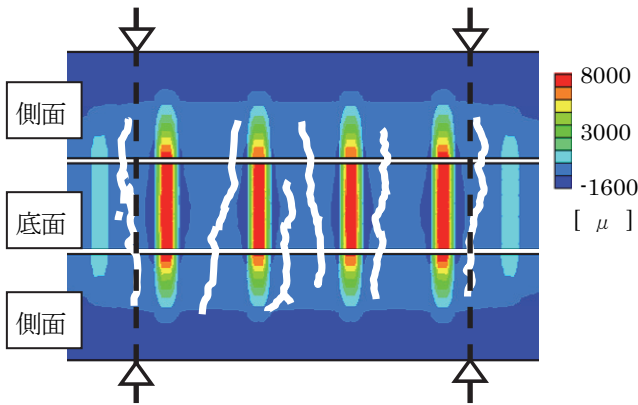


図-16 実験のひび割れ性状と解析のひずみ分布 (NL32)

重ねて示す。コンター図は解析より得られた部材軸方向の底面および両側面を表すひずみ分布であり、コンター図の赤色で示されている領域がひび割れ発生位置に対応する。また実験で得られたひび割れを白線で重ねて表している。

まず、底面位置でのひび割れ発生本数は、実験が6本、解析が6本となり一致している。底面での最大ひび割れ間隔は、実験が226mm、解析が220mmであり、平均ひび割れ間隔は、実験が181mm、解析が196mmとなり、概ね評価することができる。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。このように、ひび割れ性状に対して評価できることが示された。

図-17に、等曲げ区間における引張鉄筋位置での平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅の普通強度シリーズにおける実験値と解析値を示す。実験では、プレストレスの導入レベルが大きくなると、ひび割れ幅が抑制される。持続荷重導入直後の短期ひび割れ幅から、長期ひび割れ幅まで、圧縮鉄筋の有無、プレストレスの導入レベルに対して、概ね妥当に評価できている。また、材齢1224日で持続荷重を増加させた後の挙動も実験値を再現していることが分かる。このことから、全体的な挙動を表す平均曲率に加えて、局所的な情報であるひび割れ幅に対する時間依存挙動まで妥当に評価できることが示された。

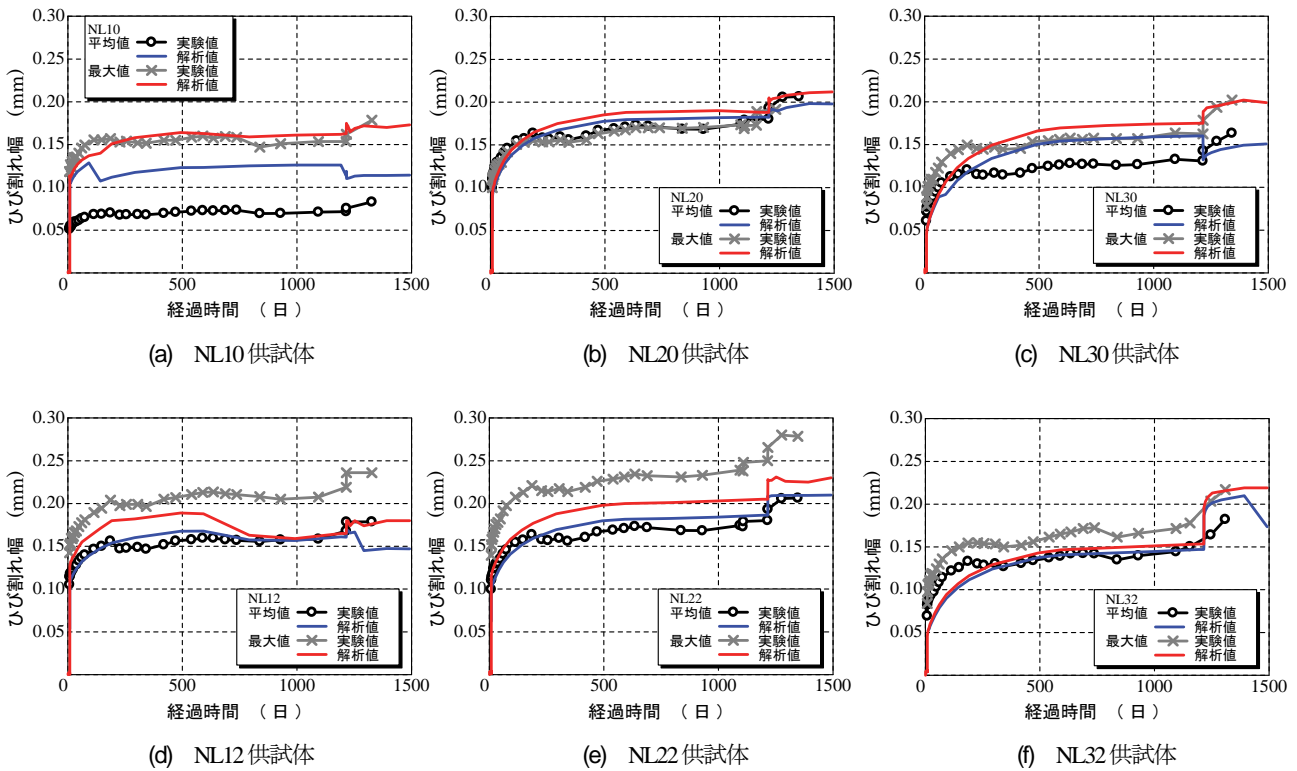


図-17 ひび割れ幅の経時変化(引張鉄筋位置)



5. 高強度コンクリートを用いたはり部材への適用性

ここでは、材料特性がひび割れ進展挙動に与える影響を検討を行った。4章の普通強度コンクリートを用いたはり部材と同一諸元、荷重履歴で、圧縮強度のみが異なる高強度コンクリートを用いたはり部材を対象として評価を行った。

(1) 実験供試体概要

手塚らによって行われたRCはりおよびPRCはりの実験を対象として解析的評価を行った<sup>4), 21)</sup> (以下、高強度シリーズ)。普通強度シリーズと同一の諸元であり、供試体の概要は図-11に示すものと同様である。プレストレスの導入レベルおよび圧縮鉄筋比をパラメータとした、供試体の種類を表-7に示す。コンクリートの材料特性および鉄筋の材料特性を表-8、表-9に示す。

実験では、材齢9日にPC鋼材にプレストレスが導入され、材齢16日に持続荷重が載荷され、持続荷重期間は約

400日である。計測位置、方法ならびに項目は普通強度シリーズの場合と同様である。

(2) 解析概要

解析モデルは図-12に示すものと同様である。

クリープ係数と収縮ひずみは図-18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 CODE90<sup>8)</sup>の予測式を回帰した修正式を用いた<sup>22)</sup>。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あり、材齢1日以降に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。Volume functionは、表-8の材齢28日の値で正規化して9日、16日の値を補間するよう、図-19のように与えた。なお、引張強度に関しては、持続荷重載荷時17日と標準

表-7 供試体の種類

供試体No:	引張鉄筋			PC鋼棒			圧縮鉄筋			プレストレスシング度 $\lambda$	プレストレス導入量 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷荷重(kN) 16日
	鉄筋径	断面積 As(mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)	鉄筋径	断面積 As(mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)	鉄筋径	断面積 As(mm <sup>2</sup> )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)			
HL10	D19	573	1.15	/	/	/	/	/	/	0	/	60
HL12	D19	573	1.15	/	/	/	D16	397.2	0.79	0	/	60
HL20	D16	397.2	0.79	$\phi$ 7.1	80	0.16	/	/	/	0.47	890.4	68
HL22	Dm16	317.5	0.64	$\phi$ 7.1	80	0.16	D16	397.2	0.79	0.52	896.3	68
HL30	D13	253.4	0.51	$\phi$ 9.0	128	0.26	/	/	/	0.69	832.4	68.3
HL32	Dm13	184.9	0.37	$\phi$ 9.0	128	0.26	D16	397.2	0.79	0.75	860.0	68.3

表-8 コンクリートの材料特性

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 <sup>2</sup> )	95.4	100.0	105.4
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	/	4.27	6.43
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	35.2	36.6	38.7

表-9 鉄筋の材料特性

呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D19	332	206.6
D16(Dm16)	353	203.6
D13(Dm13)	372	206.5
$\phi$ 9.0	1343	200
$\phi$ 7.1	1435	201

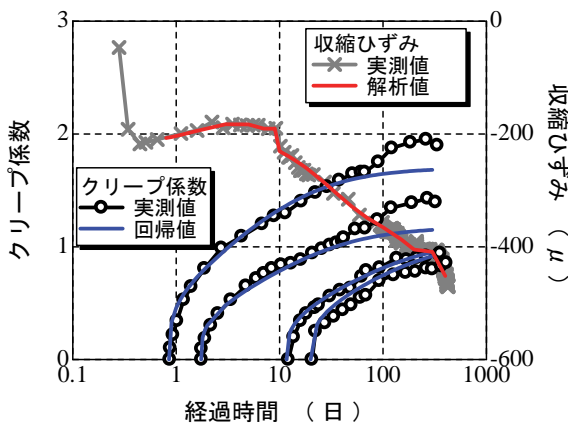


図-18 クリープ係数・収縮ひずみ

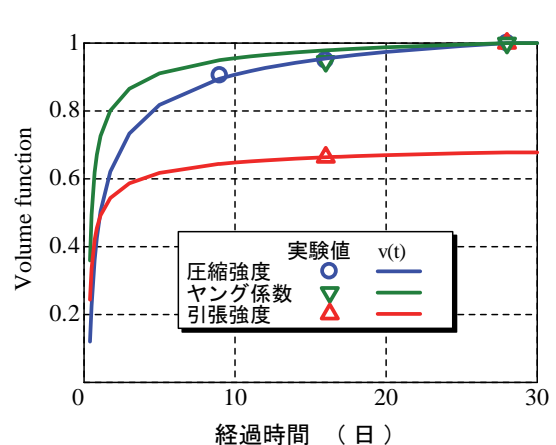


図-19 Volume function

養生28日に大きな違いが見られたため、17日を基準として正規化し、ヤング係数のVolume functionと同様の関数を適用した。これは、ひび割れ発生時に近い値を採用する方がひび割れ評価の適用性が高いと考えたためである。また、28日を基準として正規化した関数を用いた場合の解析では、ひび割れが発生しない供試体もみられた。

(3) 変形挙動ならびにひずみの時間依存挙動の評価

図-20に、HL20およびHL22の平均曲率の経時変化の実験値と解析値を示す。なお、プレストレス導入直前の状態を0としている。

まず、圧縮鉄筋の影響について、解析結果は普通強度シリーズと同様の傾向を示し、圧縮鉄筋がある場合、平均曲率の増加量は抑制されている。一方、実験はそのような傾向がみられない。これについては今後検討してい

く必要があるが、実験でのばらつきの要因が大きいものと考えられる。なお、普通強度コンクリートの場合と比較して、平均曲率の増加が小さいのは、高強度シリーズ

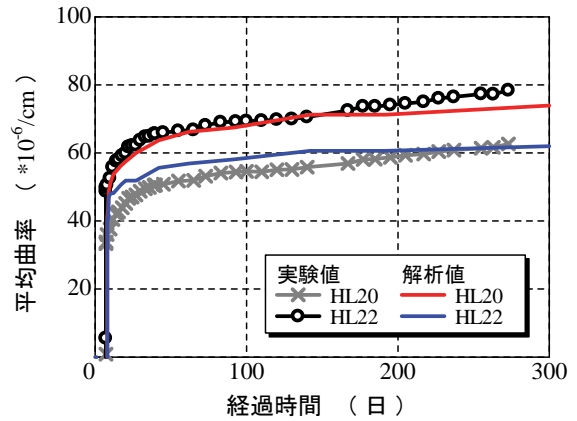


図-20 平均曲率の経時変化 (HL20, HL22)

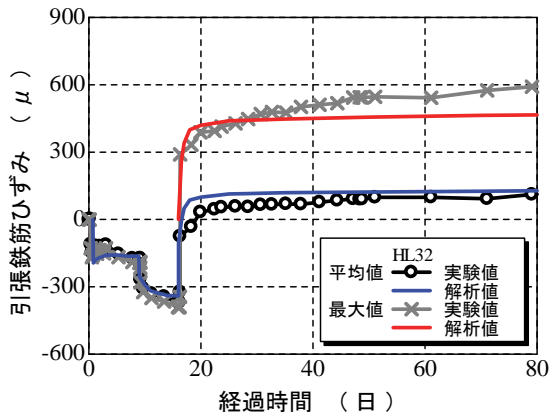


図-21 引張鉄筋ひずみの経時変化 (HL32)

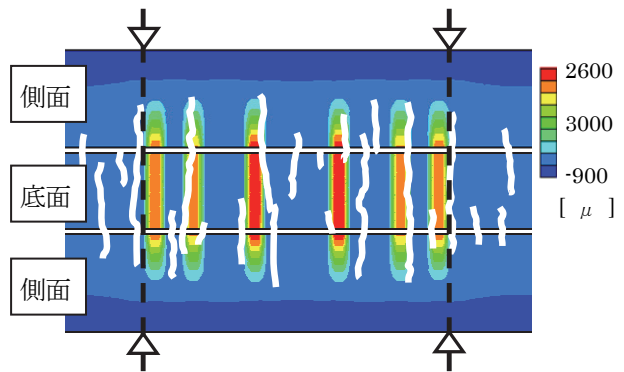
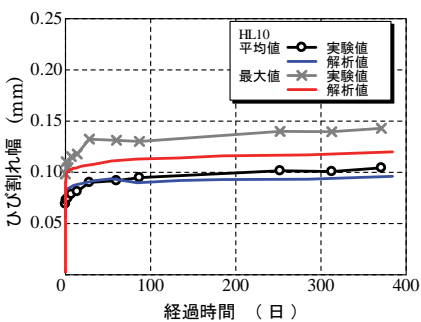
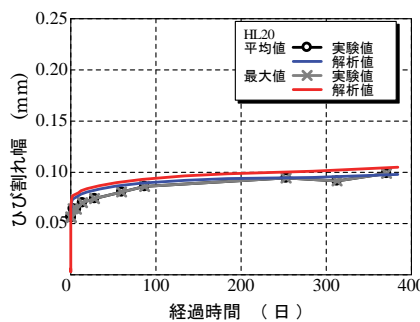


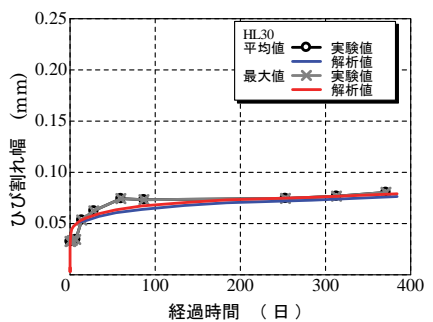
図-22 実験のひび割れ性状と解析のひずみ分布 (HL32)



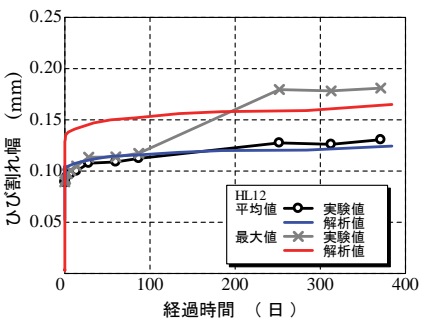
(a) HL10 供試体



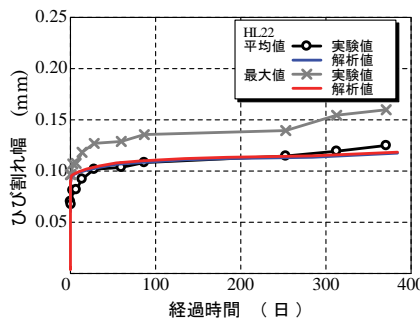
(b) HL20 供試体



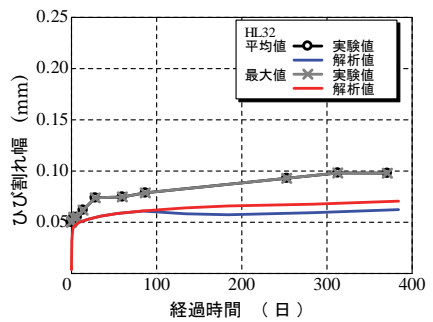
(c) HL30 供試体



(d) HL12 供試体



(e) HL22 供試体



(f) HL32 供試体

図-23 ひび割れ幅の経時変化

では持続荷重導入時のクリープ量が小さいためと考えられる。

図-21に、HL32におけるひずみ測定区間での引張鉄筋ひずみの最大値と平均値の経時変化を示す。引張鉄筋に生じる打設直後の自己収縮の影響による圧縮ひずみ、経過日数9日におけるプレストレス導入によるひずみ値、その後の経時変化を妥当に評価することができている。このことから、コンクリートの硬化過程における材料特性の変化を考慮すれば、打設直後からの経時変化を評価することが可能であると分かる。

#### (4) ひび割れ進展挙動の評価

図-22に、HL32での持続荷重終了後(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。

底面位置で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、実験が6本、解析が6本となり一致している。底面での最大ひび割れ間隔は、実験が219mm、解析が220mmであり、平均ひび割れ間隔は、実験が136mm、解析が148mmとなり、概ね評価することができている。一方、側面でのひび割れ進展長さは、実験

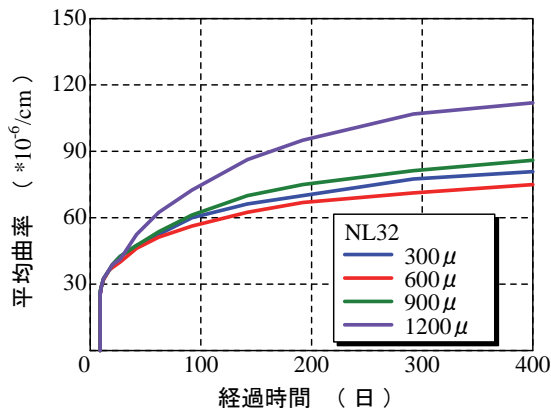
と解析でよく一致している。このように、ひび割れ性状に対して適切に評価できることが示された。

図-23に、等曲げ区間における平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅の高強度シリーズにおける実験値と解析値を示す。

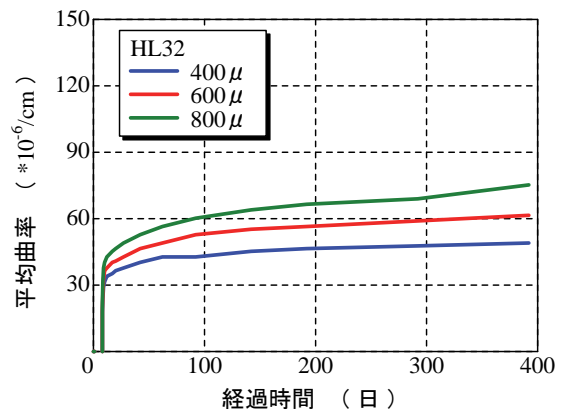
高強度シリーズにおいても普通強度シリーズと同様に、持続荷重導入直後の短期ひび割れ幅から、長期ひび割れ幅まで、圧縮鉄筋の有無、プレストレスの導入レベルに対して、概ね妥当に評価することができている。

#### 6. ひび割れ進展に及ぼす各種影響の評価

本解析手法により、クリープ、収縮などの材料的要因を適切に考慮した、ひび割れ進展挙動を評価できることが示された。したがって、本解析手法を用いる事により、その個々の影響度を仮想的に考慮する事ができる。そこで、本章では、いくつかの材料的要因に対して比較検討をすることにより、ひび割れ進展挙動に対する影響を検討した。

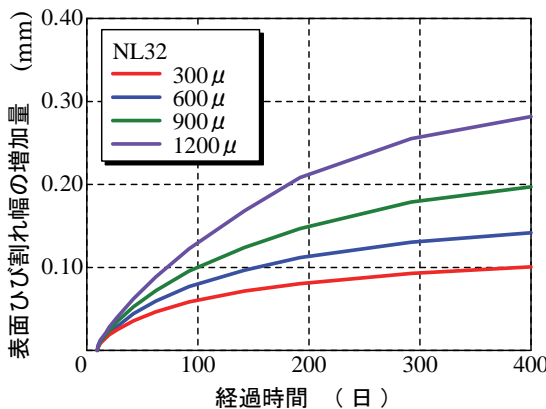


(a) NL32 供試体

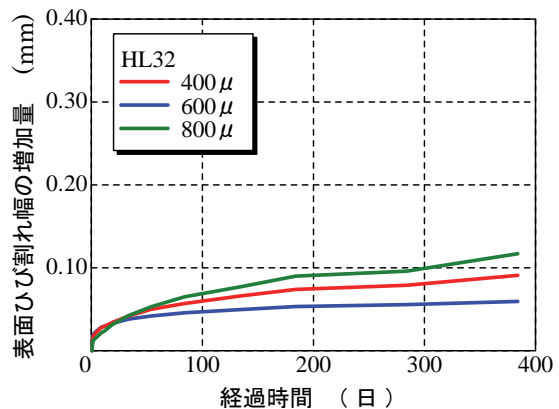


(b) HL32 供試体

図-24 平均曲率の経時変化



(a) NL32 供試体



(b) HL32 供試体

図-25 表面ひび割れ幅の増加量の経時変化

(1) 収縮量の相違が与える影響の評価

近年、大きな収縮を示すコンクリートを使用した場合の挙動が問題になっている。そこで、収縮がひび割れ進展に及ぼす影響について検討を行った。具体的には、収縮量のうち、養生後のプレストレス導入からの乾燥収縮量と養生中に計測された自己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進展に及ぼす影響の検討を行った。

部材は、圧縮鉄筋を有する普通強度コンクリートを用いたNL32と高強度コンクリートを用いたHL32とし、乾燥収縮量は、NL32は基準となる乾燥収縮量600 $\mu$ に対して、0.5倍(300 $\mu$ )、1.5倍(900 $\mu$ )、2.0倍(1200 $\mu$ )の4ケース、HL32では、本解析対象の乾燥収縮量に相当する200 $\mu$ (収縮量:400 $\mu$ )を基準として、400 $\mu$ (収縮量:600 $\mu$ )、600 $\mu$ (収縮量:800 $\mu$ )の3ケースの検討を行った。

高強度コンクリートに考慮する自己収縮量は、本解析対象の自己収縮量190 $\mu$ (乾燥収縮量は200 $\mu$ とする)を基準として0 $\mu$ 、95 $\mu$ 、285 $\mu$ 、380 $\mu$ の5ケースの検討を行った。なお、収縮量は部材全要素で一様と仮定した。

a) 乾燥収縮量

図-24に、各供試体における材齢400日までの平均曲率の経時変化の解析値を示す。持続荷重導入後の増加傾向は、高強度コンクリートでは普通強度コンクリートに比べ、収縮量1200 $\mu$ の場合を除いて、収縮量による影響が大きいものとなった。これは、高強度コンクリートは自己収縮が大きく、乾燥収縮量が小さいため、持続荷重導入時(材齢16日)からの収縮量が小さく、収縮量の相違によって平均曲率が変化しやすいためであると考えられる。

図-25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。収縮量の相違によってひび割れ本数に違いが

生じたため、定量的なひび割れ幅の評価は困難であるが、傾向として以下の事が評価できる。普通強度コンクリート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が大きくなる傾向が示されている。一方、高強度コンクリートは持続荷重導入時のクリープ係数が小さいため、ひび割れ幅の増加量は小さく、ひび割れ幅の増加量に対する収縮量の影響は、平均曲率の変化に比べ小さいものとなった。このことから、本解析手法によれば、クリープの大きい普通強度コンクリートにおいては、収縮量がひび割れ幅の増加に及ぼす影響は大きい。一方、クリープの小さい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、ひび割れ幅に与える影響は小さいものと考えられる。なお、クリープのみの影響については、6章(4)で示す。

b) 自己収縮量

表-10に、ひび割れと自己収縮量の関係を示す。持続荷重導入直後の短期ひび割れ幅(16.5日)は、ひび割れ本数や最大ひび割れ間隔は異なるが、自己収縮量が大きくなるほど大きくなるのがわかる。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、概ね0.05mm前後となった。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は乾燥収縮やクリープの影響が支配的となるため、ほとんど生じないものとなった。

(2) はり部材の表面の乾燥状態が与える影響の評価

各部材内の収縮は断面内で一様と仮定して検討を行ってきた。しかしながら、部材表面と内部では相対湿度が大きく異なることが知られており<sup>23)</sup>、収縮量は部材断面内で一様ではない。そこで、部材表面の乾燥状態がひび割れ幅に与える影響に対して、NL32を対象として検討を行った。

部材表面の乾燥状態に対して、阪田らは、長さの異なる

表-10 ひび割れと自己収縮量の関係 (HL32)

自己収縮量 ( $\mu$ )	ひび割れ本数	最大ひび割れ間隔 (mm)	表面ひび割れ幅 (mm)		
			短期 (A) (16.5日)	長期 (B) (400日)	増加量 (B-A)
0	4	260	0.067	0.115	0.048
95	4	240	0.066	0.123	0.057
190	6	220	0.050	0.110	0.060
285	4	240	0.075	0.128	0.053
380	4	300	0.087	0.142	0.055

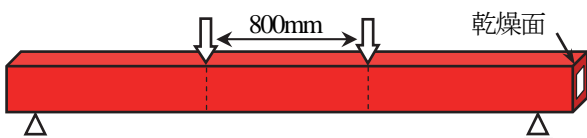


図-26 乾燥面に対する概念図

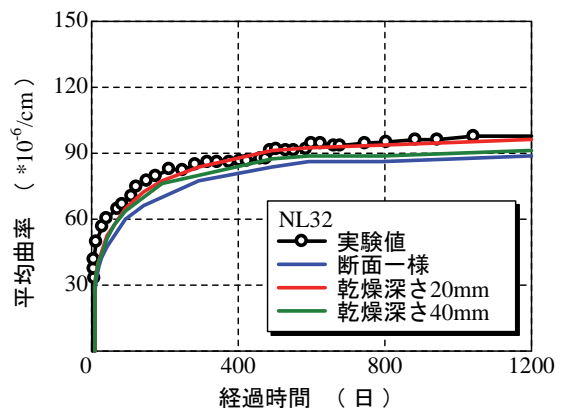


図-27 平均曲率の経時変化 (NL32)



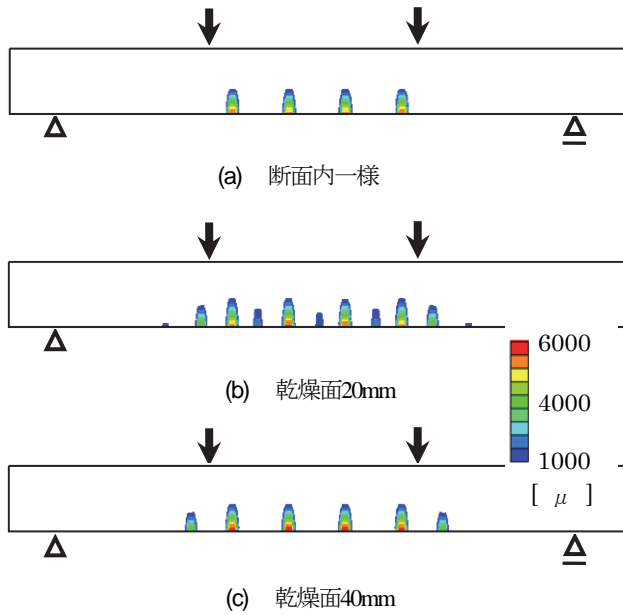


図-28 解析のひずみ分布 (材齢1400日) (NL32)

る供試体の重量変化を用いて含水率の経時変化を求めている<sup>24)</sup>。これによれば、表面から40mm程度までは著しい含水率の低下がみられるとしている。そこで、部材断面200×250mmのうち乾燥が著しく大きい領域を乾燥面と定義し、その深さを20mm、40mmと仮定した(図-26)。乾燥面は内部に比べ収縮ひずみが2.0倍となると仮定し、部材全体の収縮量としては、前述の一般的な収縮量を与えた場合と同様になるように逆解析により収縮量を算出することで、表面乾燥の影響を評価した。乾燥面の深さが20mmの場合は、厚さ方向一様の600μ(材齢1400日)に対し、乾燥面の収縮ひずみは792μ、内部の収縮ひずみは396μであり、乾燥面の深さが40mmの場合は、乾燥面の収縮ひずみは650μ、内部の収縮ひずみは325μである。

図-27に、持続荷重増加直前の材齢1200日における平均曲率の経時変化を示す。部材としての同一の収縮量でも乾燥面を考慮し表面付近の収縮量が大きくなると、平均曲率が大きくなる傾向を示した。

図-28に、解析で得られた各乾燥状態におけるひずみ分布(材齢1200日)を示す。また図-29に、引張鉄筋位置における最大ひび割れ幅の経時変化を示す。図-28から、収縮量が断面内一様から乾燥面20mmとした場合、ひび割れ発生本数が増加した。さらに、乾燥面20mmと乾燥面40mmを比較すると、40mmではひび割れ発生本数が減少するものの、ひび割れ1本あたりの幅が大きくなる結果となった。このことから、乾燥面を考慮すると、表面ひび割れが発生しやすくなり、1本あたりのひび割れ幅は大きくなる傾向がある。

また図-29からも、乾燥面を考慮することにより、引張鉄筋位置の最大ひび割れの値が大きくなっていることが分かる。

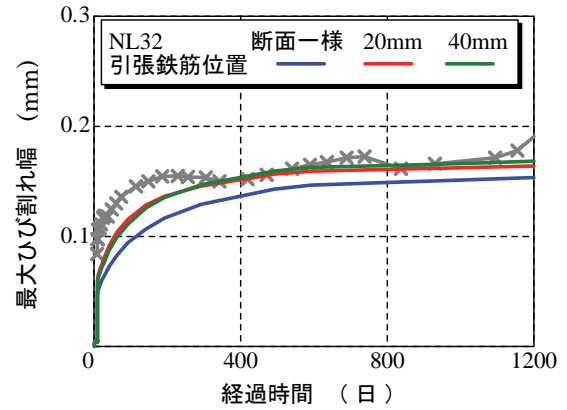


図-29 最大ひび割れ幅の経時変化 (NL32)

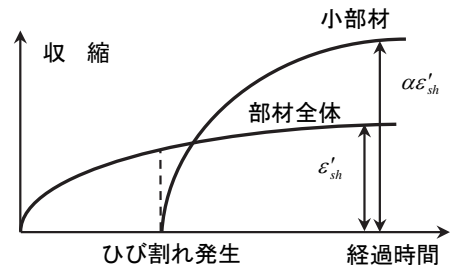


図-30 ひび割れ間コンクリートの収縮量

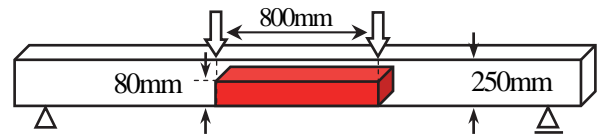


図-31 収縮量の増加領域

このことから、ひび割れ進展挙動を評価する上で、部材の乾燥面からの深さによる乾燥状態を考慮することで、その精度向上が図られることが示された。なお、今回対象とした部材は小型供試体で、乾燥領域の割合が実構造物に比べ比較的大きなものを対象としたことに注意が必要である。そのため、大型構造物に適用する場合の乾燥領域の影響は今後の検討課題である。

### (3) ひび割れ発生領域の収縮量を与える影響の評価

石橋・津吉は、表面ひび割れ幅を評価する場合、ひび割れ発生後のひび割れ間コンクリートを鉄筋や他部分から拘束を受けない自由体と考え、その自由収縮ひずみを考えることで、実橋のひび割れ幅実測結果に算定値を近づけることができるとしている<sup>25)</sup>。

そこで、ひび割れ発生に伴い、部材内の等曲げ区間において、図-30に示すように、ひび割れ発生時間を基準にして、収縮量が増加するようなモデルを仮定し、ひび割れ発生に伴う、ひび割れ間でのコンクリートの自由収縮量の増加がひび割れ進展におよぼす影響を検討した。

図-31に、収縮量が増加する領域を示す。ひび割れが発生する等曲げ区間において、事前検討においてひび割

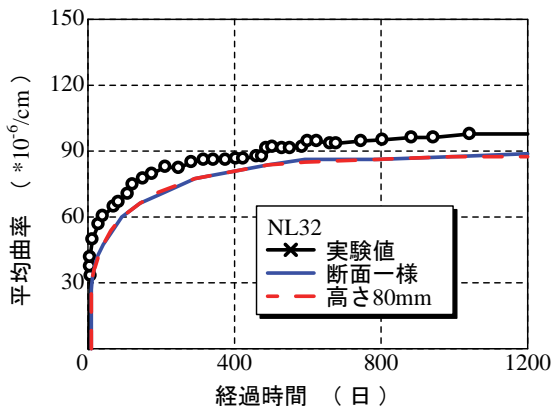


図-32 平均曲率の経時変化 (NL32)

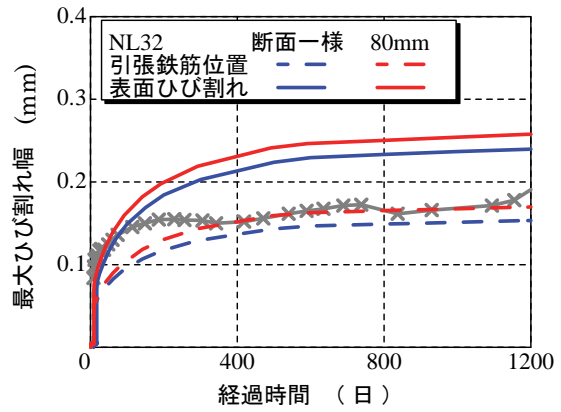
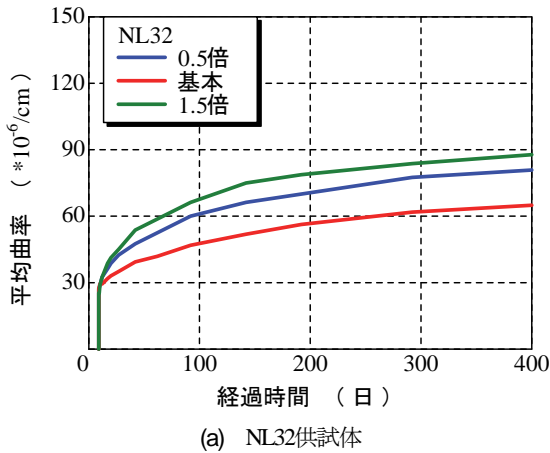
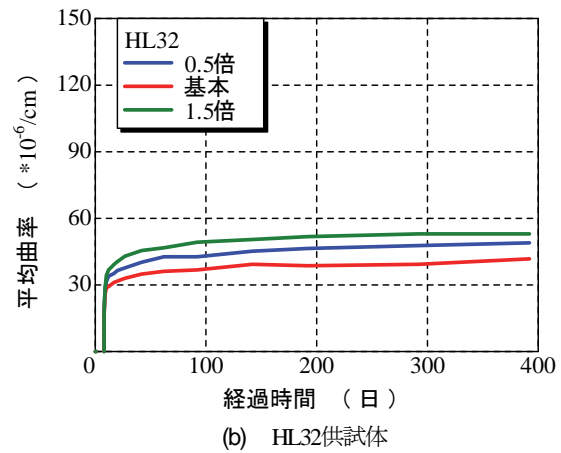


図-33 最大ひび割れ幅の経時変化 (NL32)

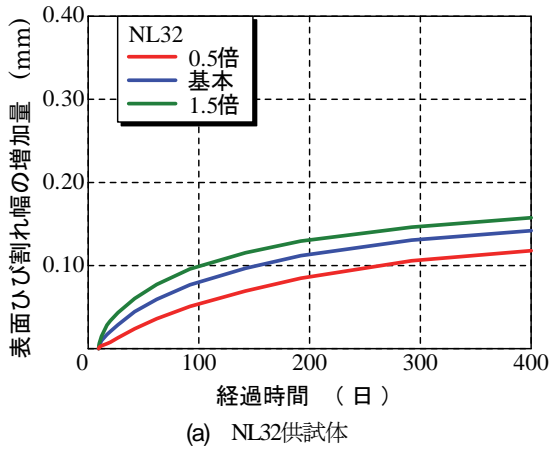


(a) NL32供試体

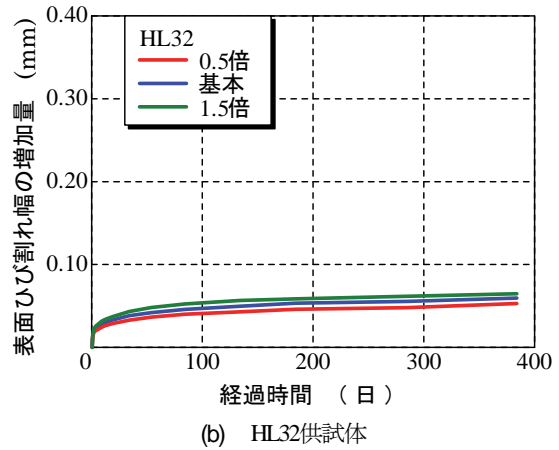


(b) HL32供試体

図-34 平均曲率の経時変化



(a) NL32供試体



(b) HL32供試体

図-35 表面ひび割れ幅の増加量の経時変化

れ進展距離が80mm程度であったことから、部材高さ方向が80mmまで収縮が増加すると仮定して検討を行った。なお収縮量は、図-30において $\alpha = 1.2$ とした。これは、小部材の体積表面積を用いた場合、土木学会コンクリート標準示方書の収縮ひずみ算定式<sup>9)</sup>から約1.05倍となり、本検討では妥当な範囲で大きな値を用いたためである。

図-32に、平均曲率の経時変化を示す。ひび割れ発生領域における収縮量の増加を考慮した場合でも、平均曲率に変化はない。このことから、ひび割れ発生領域にお

ける収縮量は、部材の全体挙動に与える影響は小さいことが分かる。

図-33に、部材表面と引張鉄筋位置における最大ひび割れ幅の経時変化を示す。ひび割れ発生領域における収縮量の増加を考慮した場合、表面ひび割れ幅ならびに引張鉄筋位置のひび割れ幅が大きくなっている。

以上のことから、ひび割れ発生領域の収縮量の増加が、部材の全体挙動に影響を与えず、ひび割れ幅の増加のみに影響を与えることが示された。しかし、ひび割れ発生

後のひび割れ間コンクリートにおいて、収縮量が増加するかは、実験的に十分な検討がされておらず、今後、さらなる検討が必要であると考えられる。

#### (4) クリープの相違が与える影響の評価

クリープがひび割れ進展に影響することは自明であるが、実験ではクリープの影響を独立に評価することが困難である。そこで、解析的にコンクリートのクリープ量のみを変化させ、その全体挙動ならびにひび割れ進展への影響を検討した。普通強度コンクリートはクリープ係数を3.2(材齢1400日)から0.5倍(1.6), 1.5倍(4.8)とした3ケース、高強度コンクリートは持続荷重導入時のクリープ係数を1(材齢400日)から0.5倍(0.5), 1.5倍(1.5)とした3ケースに対して検討を行った。

図-34に、各供試体における材齢400日までの平均曲率の経時変化を示す。クリープ係数が大きくなるに従い、圧縮強度に依らず、平均曲率が大きくなる傾向となった。その増加量は、クリープ係数にほぼ比例しており、曲げを受けるはり部材において、変形挙動にあたるクリープの影響は無視できないと考えられる。

図-35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について示す。クリープ係数が大きくなるに従い、圧縮強度に依らず、ひび割れ幅が大きくなる傾向となった。しかし、HL32はNL32に比べ、増加量は小さいものとなった。これは持続荷重導入時のクリープ係数の基本値が小さいことによる影響が大きいものと考えられる。

このことから、ひび割れ進展挙動を評価する上で、クリープ係数の影響を無視することはできないため、その影響を適切に評価することが重要であると考えられる。

## 7. 結論

本研究において、短期の挙動では、補強筋の付着特性を考慮した有限要素解析を用いて、RCはりおよびPRCはり部材に対してひび割れ進展挙動を評価した。さらに、長期の挙動では、時間依存挙動として収縮、クリープ、コンクリートの硬化過程に伴う材料特性の変化を統一的に扱ったひび割れ進展挙動を評価し、以下の結論が得られた。

- 1) 荷重によるひび割れ進展挙動を、今回対象としたはり部材に対して、ひび割れ発生からひび割れ幅およびひび割れ間隔を含め精度よく評価できることを確認した。
- 2) 長期的な変形挙動および鉄筋ひずみの時間依存挙動を、RCはりおよびPRCはり部材に対して材料特性に依らず、数値解析手法により妥当に評価でき

ることが示された。

- 3) 長期的なひび割れ進展挙動を、ひび割れ幅およびひび割れ分布に対して、実験結果との比較により妥当に評価できることが示された。
- 4) 妥当性が示された解析手法により、ひび割れ進展に及ぼす収縮の影響を検討した結果、乾燥領域が与える影響が実験同様に再現され確認された。その影響を考慮することでひび割れ幅評価の精度向上が図られた。今後、収縮に関する取扱いについて、乾燥面からの収縮の分布を含め、より詳細な検討が必要であると考えられる。
- 5) 収縮とクリープを独立に変更した解析結果に基づけば、ひび割れ進展には収縮、クリープが複雑に影響しており、より詳細な検討が今後必要になると考えられる。しかし、本研究の様に一般的なクリープモデルおよび断面内に対して一様と仮定した収縮モデルを適用した手法を用いることにより、ひび割れ進展を簡便に評価できる可能性が示された。

謝辞：論文執筆にあたり、手塚正道氏には貴重なご意見とデータを快く提供して頂きました。また、佐藤良一先生の研究グループでの成果を活用させて頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2009-，2009。
- 2) 李振宝，大野照義，馬華：鉄筋コンクリート部材の長期曲げひび割れ幅算定法，日本建築学会構造系論文集，第565号，pp.103-110. 2003。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, CRC Press, 2008.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2007。
- 7) 土木学会：コンクリート技術シリーズ「構造物の設計におけるコンクリートの収縮の考慮」，2010。
- 8) CEB-FIP MODEL CODE 1990.
- 9) 玉野慶吾，中村光，上田尚史，国枝稔：乾燥収縮によるRC面部材のひび割れ進展挙動評価に関する解析的検討，コンクリート工年次論文集，Vol.34，No.2，pp.97-102，2012。
- 10) 澤部純浩，上田尚史，中村光，国枝稔：せん断補強筋に定着不良が生じたRCはりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集，Vol.62，No.2，pp.444-461，2006。
- 11) 玉野慶吾，中村光，上田尚史，国枝稔：PRCはり部

- 材のひび割れ幅経時変化の解析的評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.521-526, 2011.
- 12) 玉野慶吾, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 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, 第 20 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論文集, pp.817-822, 2011.
  - 13) 田辺忠顕: 初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム, 技報堂出版, 2004.
  - 14) 菅満宜, 中村光, 檜貝勇, 斎藤成彦: RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.295-300, 2001.
  - 15) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.
  - 16) 飯塚敬一: かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着特性に関する研究, 山梨大学博士論文, 2011.
  - 17) 国枝稔, Srisoros, W., 岸山雄多佳, 中村光, 石川靖晃: 若材齢コンクリートの硬化過程および載荷履歴を考慮したひび割れ構成則に関する研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.127-142, 2007.
  - 18) 倉岡希樹, 睦好宏史, Eakarat Witchukreangkrai, 浦松達也: プレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1663-1668, 2004.
  - 19) 高木真由子, 睦好宏史, Eakarat Witchukreangkrai, 浦松達也: プレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.775-778, 2005.
  - 20) 松岡由高, 中村光, 国枝稔, 河村精一: 有限要素解析による主筋に丸鋼を用いた RC 部材の力学挙動評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.595-600, 2011.
  - 21) 手塚正道: PRC 曲げ部材の時間依存性挙動に関する研究, 広島大学博士論文, 2000.
  - 22) 楊楊, 許明, 佐藤良一, 手塚正道: 高強度コンクリートの収縮及びクリープについて, プレストレストコンクリート技術協会 第 7 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論文集, pp.817-822, 1997.
  - 23) 例えば, Ayano, T. and Wittmann, F. H. : Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement based materials, *Materials and Structures*, Vol.355, pp.134-140, 2002.
  - 24) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 316 号, pp.145-152, 1981.
  - 25) 石橋忠良, 津吉毅: コンクリート桁の表面の曲げひび割れ幅の算定に関する研究, 土木学会論文集, No.484/V-22, pp.33-40, 1994.

(2012. 10. 1 受付)

## ANALYTICAL EVALUATION FOR CRACK PROPAGATION OF RC BEAMS

Keigo TAMANO, Hikaru NAKAMURA, Naoshi UEDA and Minoru KUNIEDA

Analytical evaluation of crack propagation of reinforced concrete beam was performed. Creep, shrinkage, change of material characteristics depending on hardening and bond behavior were considered in 3-Dimensional finite element analysis. Crack initiation and crack width on increasing load were evaluated considering bond behavior. Time dependent propagation under constant load such as curvature and crack width was also evaluated for normal and high strength concrete. Moreover, the effect of dry shrinkage, autogenous shrinkage, creep and area of shrinkage in beam on crack propagation were investigated.