

論文 クリープおよび付着すべりを考慮した RC 構造物の収縮ひび割れの予測

加藤舜也*1・長沼一洋*2・田嶋和樹*3・佐藤裕一*4

要旨：RC 構造物の時間依存挙動評価手法の構築を目的とし、三次元 FEM 解析を用いて若材齢期間におけるクリープおよび付着すべりを考慮した鉄筋コンクリートの収縮ひび割れの予測を試みた。その結果、若材齢クリープの応力緩和によってひび割れ幅が抑制されるが、コンクリートと鉄筋間のすべりにより、ひび割れ幅が増大することを確認した。また、若材齢期間のクリープの僅かな変化によってひび割れ幅が大きく変動する可能性があることを示した。

キーワード：超高強度コンクリート、若材齢期間、材齢依存性、二重べき乗則、三次元 FEM 解析、ひび割れ幅

1.はじめに

近年、コンクリート材料、施工、解析等の技術の進歩に伴い、都市部を中心に高層の鉄筋コンクリート(以下 RC)造建物が建設されるようになってきた。現在では、下層階柱の縮小化の要求に伴い、圧縮強度 100MPa を超えるような超高強度コンクリートを柱に適用した建物も存在している。しかし、コンクリートは高強度であるほど、水セメント比が小さく、打設後に自己収縮ひずみが顕著に現れる。また、コンクリートの収縮が鉄筋や隣接する他部材に拘束されることにより、引張応力が生じ、収縮ひび割れが生じる可能性が近年の研究で報告されている(例えば 1)。現在、時間依存に関する研究は国内外問わず、様々な研究者によって行われ、多くの知見が得られている。例えば、堀川ら 2)は若材齢および長期を対象とした時間依存解析を実施し、時間依存挙動により、RC 柱の耐震性能が低下することを解析的に明らかにしている。しかし、既往の手法は、ひび割れの影響が考慮されていないため、ひび割れを有する RC 柱の耐震性能の定量的な把握には至っていない。また、時間依存挙動による構造物全体の耐震性能評価を行っている事例は極めて少なく、早急に解決すべき問題であることが考えられる。

本研究では、若材齢から長期までを対象とした時間依存解析を実施し、ひび割れを有する RC 構造物の耐震性能評価を行うことを目的としている。そのためには、時間依存挙動評価手法の構築が必要となり、本報ではその第一段階として、若材齢期間における収縮ひび割れの予測を行った。なお、近年の研究報告では、収縮ひび割れの予測において、クリープおよび付着すべりの評価が重要であることが示唆されており 3),4), 本解析においては、これらの影響も考慮した上でモデルの妥当性を確認する。

2. 解析手法

2.1 コンクリートの物性変化

コンクリートの物性は、材齢に伴い変化していくため、材齢依存性を考慮する必要がある。コンクリートの圧縮強度は ACI-209R⁵⁾、弾性係数は CEB-FIP1990⁶⁾の予測式を用いて材齢依存性を与える。なお、引張強度は野口ら 7)の提案式を用いて算出する。図-1 に本解析で仮定した引張応力-ひび割れ幅関係を示す。破壊エネルギー G_f は土木学会コンクリート標準示法書の式 8)を用いて算出した。以下に式を示す。

$$G_f = 10 \cdot d_{max}^{1/3} \cdot f_c^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 d_{max} ：最大骨材寸法[mm]、 f_c ：材齢 28 日圧縮強度[MPa]である。なお、コンクリートの物性変化に伴い、破壊エネルギーの材齢依存性を考慮する必要があるが、

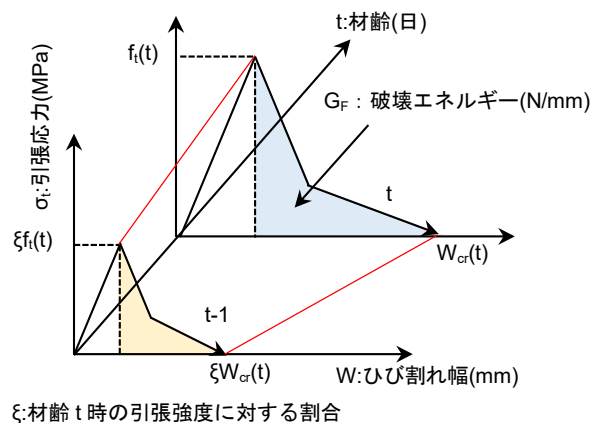


図-1 引張応力-ひび割れ幅関係

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)
 *2 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)
 *3 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)
 *4 京都大学大学院 工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

現状では、破壊エネルギーの材齢依存性を考慮した予測式が提案されていないため、本解析では引張強度の変化に合わせて引張軟化域で囲まれる面積を相似形で変化させている。

2.2 付着応力-すべり関係

寺本・丸山は図-2 に示すような一軸の鉄筋拘束試験を実施し、若材齢期間においてコンクリートと鉄筋間における付着応力-すべり関係が材齢に伴い、変化することを明らかにしており、若材齢期間における付着すべりの重要性を指摘している⁹⁾。

図-3 に本解析で仮定した付着応力-すべり関係を示す。ここでは、寺本・丸山の実験結果を用いて、図-2 に示す赤枠線部分のひずみゲージで計測されている鉄筋ひずみから三村ら³⁾の手法に習い、局所付着応力および局所すべり量を算出し、ピーク点と仮定した。なお、図中に示す凡例は打設後の材齢を表し、プロット点はその材齢時の付着応力-すべり関係のピーク点を表している。図-4 にピーク点における付着強度およびすべり量の経時変化を示す。材齢7日以前の若材齢期間では物性変化が著しく、付着強度、すべり量ともに大きく変化していることが分かる。

2.3 クリープ関数

クリープに関する研究は古くから行われており、現在では様々な予測式が提案されている。しかし、提案されている予測式のほとんどは、コンクリート硬化後に対応したものである。また、若材齢期間ではコンクリートの力学的特性の変化が著しく、クリープ関数の変動が大きいため、従来の予測式を用いて評価した場合、過小評価することが考えられる。そこで、クリープ関数には若材齢期間に対応できる Bazant と Osman¹⁰⁾が提案した二重べき乗則を用いて、クリープの評価を行う。クリープ関数 $J(t, \tau)$ は次式で与えられる。

$$J(t, \tau) = 1 + \alpha \tau^{-d} (t - \tau)^p \quad (2)$$

ここで、 t : 材齢[日]、 τ : 荷重材齢[日]、 α 、 d 、 p : パラメータである。図-5 に仮定したクリープ関数を示す。なお、パラメータの設定には十分に注意が必要であり、実用的な値についても提案されていないため、超高強度コンクリートを用いた既往のクリープ試験結果^{11),12),13)}に適合するように各パラメータを決定した。パラメータは $\alpha=0.8$ 、 $d=0.6$ 、 $p=0.3$ と仮定した。

図-6 にクリープひずみの計算方法について示す。クリープひずみは重ね合わせの原理が成り立つと仮定している。例えば、Step 1 でクリープひずみ ε_1 が生じ、次のステップでクリープひずみ ε_2 が生じた場合、前ステップで生じた ε_1 が足されるため、Step 2 で生じた総クリー

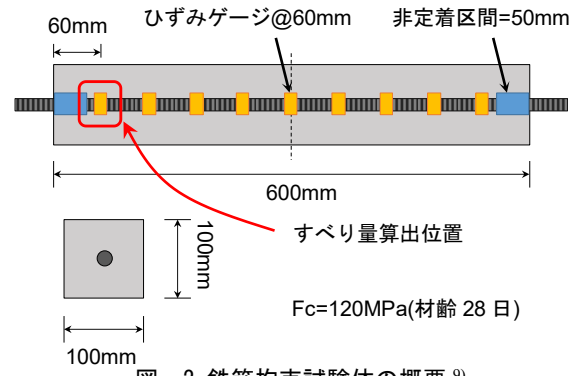


図-2 鉄筋拘束試験体の概要⁹⁾

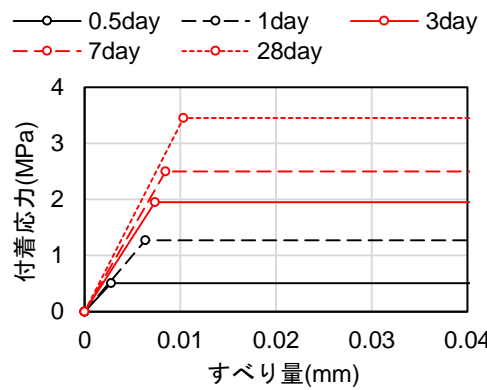


図-3 付着応力-すべり関係

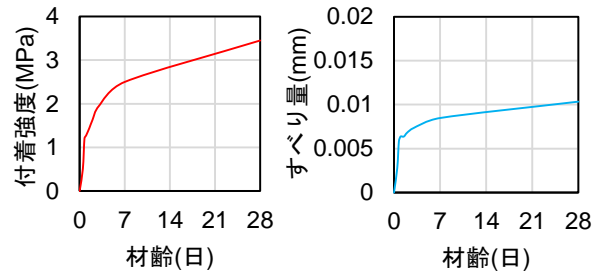


図-4 ピーク点の付着強度およびすべり量の経時変化

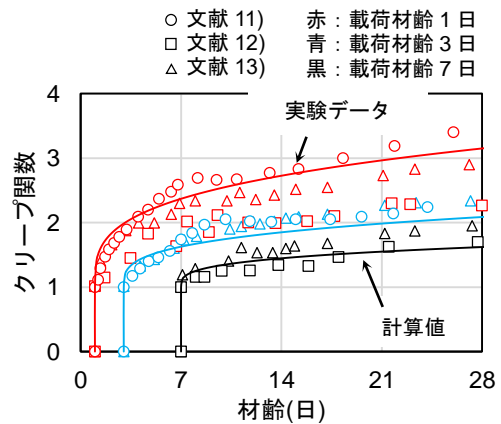


図-5 クリープ関数

プひずみは、 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ となるように、過去のクリープひずみを逐次足し合わせて評価する。なお、弾性ひずみは増分量を足し合わせる。

2.4 ひび割れ幅の計算

ひび割れモデルは、分散ひび割れ型とし、ひび割れ幅 W_{cr} は以下の式により算出する。

$$W_{cr} = S_{cr} \cdot \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 S_{cr} : ひび割れ間隔[mm], ε : ひび割れが生じた要素の主引張方向の平均ひずみである。ひび割れ間隔は Sato らの提案手法¹⁴⁾を用いて算出する。

3 門型 RC フレームのひび割れ予測

3.1 試験体および解析概要

ここでは、自己収縮研究委員会¹⁵⁾により行われた実大の門型 RC フレームの自己収縮試験を対象とした三次元 FEM 解析を実施し、若材齢期間に生じる収縮ひび割れの幅、発生位置の予測を行う。図-7 に試験体および解析モデルの概要について示す。コンクリート強度は材齢 28 日で圧縮強度 136MPa である。

本解析では、対称性を考慮し、試験体の 1/4 をモデル化した。コンクリートは六面体要素、鉄筋はトラス要素でモデル化し、また、コンクリートと鉄筋の界面に接合要素を設け、付着すべりを考慮している。境界条件は、スタブ底面の X および Z 方向の並進を固定した。自由ひずみ(温度ひずみ+自己収縮ひずみ)は、実験結果より得られている値を用いた。なお、実験では材齢 5 日目まで自由ひずみの計測が行われており、本解析では、その後のひずみを一定と仮定した。また、自重による影響はほとんどないと考え、考慮していない。本解析では、クリープおよび付着すべりがひび割れに与える影響についても確認するため、表-1 に示す 4 ケースの解析を実施した。

表-1 解析ケース

Case-1	クリープおよび付着すべり無視
Case-2	クリープのみ考慮
Case-3	付着すべりのみ考慮
Case-4	クリープおよび付着すべり考慮

3.2 最大主応力分布

図-8 に材齢 5 日時点での最大主応力分布図を示す。全てのケースにおいて、柱脚および梁端部に応力が集中する傾向が見られた。2 箇所とも、他部材との拘束によって過大な応力が生じていることが考えられる。なお、Case-1 においては、柱頭のかぶり部分や梁下端部全体にも引張強度を超えるような過大な応力が生じていることが確認された。特に、柱頭のような部材端部では丸山らの実験⁷⁾ですべりが生じていたことから、本解析においても同様の傾向が予想されるが、完全付着としているた

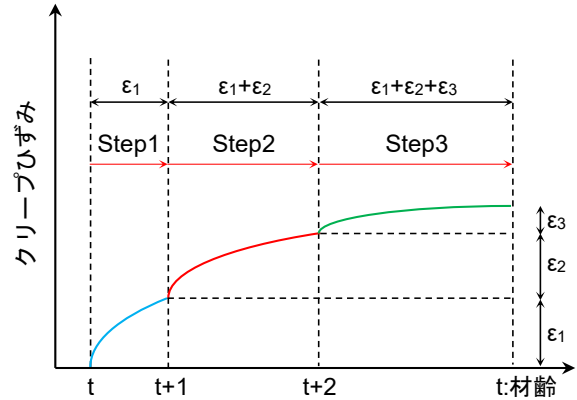
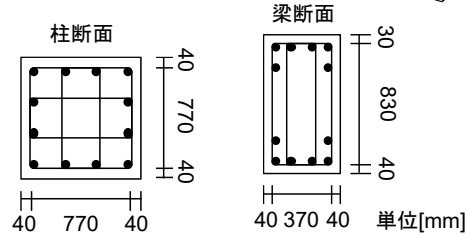
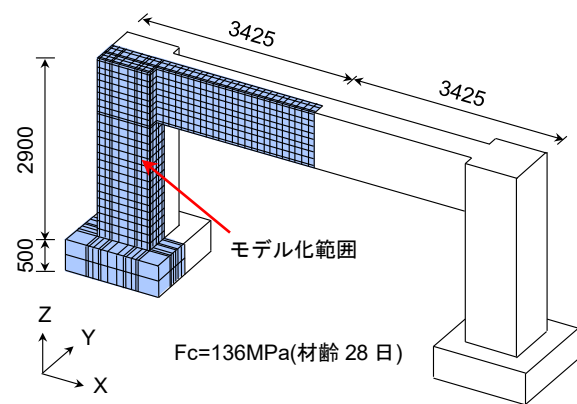


図-6 クリープひずみ重ね合わせ法

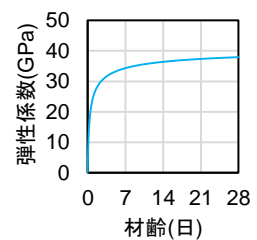
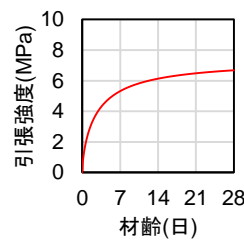


主筋 : 12-D32

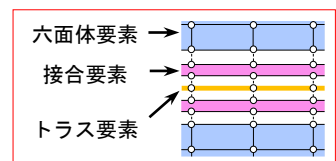
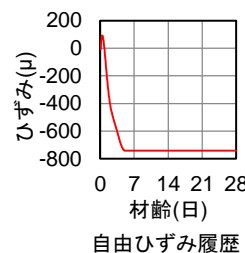
補強筋 : D13@150

主筋 : 4-D29,2-D29

補強筋 : D13@150



引張強度および弾性係数の経時変化



コンクリート-鉄筋間

図-7 試験体および解析モデルの概要

め、コンクリートと鉄筋のズレに対して大きく抵抗しているためと考えられる。一方、Case-2ではCase-1とほぼ同様の応力分布傾向を示しているが、クリープの考慮により、全体的に応力値が低減していることが分かる。Case-3では柱頭の応力が緩和されたが、柱脚、梁端部、梁下端部全体の応力値はCase-1とほぼ同等の結果となった。Case-4では、Case-2と同様にクリープによる応力緩和により、全体的に応力値が大きく低減していることが分かる。

図-9にCase-1～Case-4における梁端部、柱脚、柱頭、梁下端部(赤枠線で囲まれた位置)の最大主応力の経時変化を示す。梁端部および梁下端部ではCase-1とCase-3、Case-2とCase-4は、ほぼ同様の応力履歴を示した。梁端部および柱脚では全ケース共に材齢約2日目で引張強度を超えており、ひび割れが生じる可能性が十分に高い箇所であると考えられる。柱頭では付着すべりを考慮しない場合(Case-1, Case-2)、梁下端部ではクリープを考慮しない場合(Case-1, Case-3)に引張強度を上回る傾向が見られる。また、Case-2, Case-4について本解析では材齢5日以降のひずみを一定としており、若材齢期間の大きなクリープにより、リラクゼーション効果も大きくなることが考えられ、応力が急激に低減していく傾向が確認された。

3.3 ひび割れ状況

図-10に材齢28日時における各ケースのひび割れ状況を示す。図-8, 9で示したように全ケースとも、梁端部、柱脚に過大な応力が生じていることから、ひび割れが生じており、奥行方向までひび割れが進展していることが確認された。特に、Case-1では、柱頭のかぶりや梁下端部全体においてもひび割れが生じている。Case-3では、柱頭部分のひび割れは抑制されたが、Case-1よりも梁端部、柱脚にて大きなひび割れが生じていることが確認された。これは、部材端部でコンクリートと鉄筋間のすべりが生じることに伴い、応力伝達機能が低減するため、コンクリートに過大な応力が生じているためと考えられる。なお、Case-2とCase-4ではクリープによりひび割れ幅が大きく低減していることが確認された。

図-11に実験で生じた試験体のひび割れ状況を示す。実験では柱頭部分でひび割れが生じており、これは梁下に設けられた支保工により、柱の軸方向収縮が抑制されたためではないかと考えられる。本解析では支保工を考慮していないため、ひび割れ状況には差は見られるものの、おおよそのひび割れ発生位置および幅を、ある程度の精度で予測できる可能性がある。図-12にCase-1～Case-4のひび割れ幅の経時変化を示す。Case-1では梁端部、柱脚、柱頭ともにひび割れ発生後の進展が著しい。なお、Case-3では、梁端部、柱脚ともにひび割れの発生

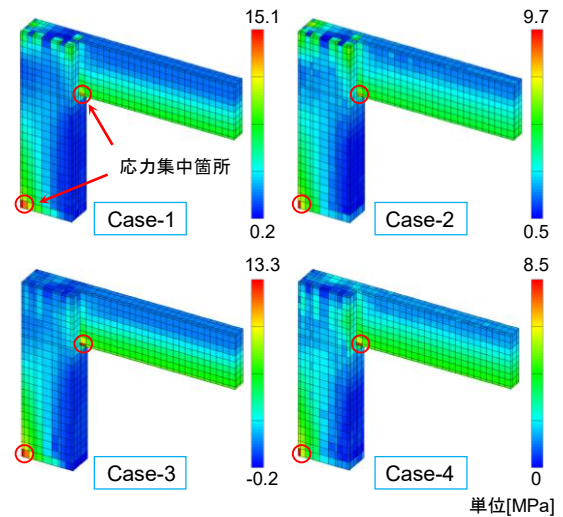


図-8 最大主応力分布(材齢5日)

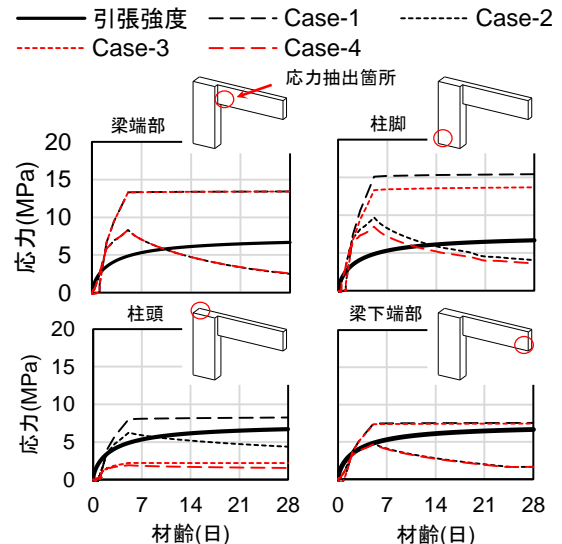


図-9 最大主応力の経時変化

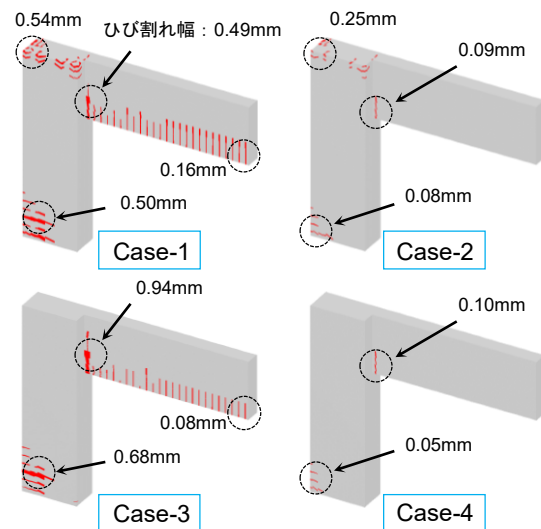


図-10 ひび割れ状況(材齢28日)

と同時にコンクリートと鉄筋間ですべりが生じることにより、Case-1 よりもひび割れの進展が著しい傾向が見られる。Case-2 と Case-4 では、ひび割れ発生後の進展は緩やかであり、また、材齢 5 日以降はリラクゼーション効果により、ひび割れ幅が低減していく傾向が確認された。以上の結果から、若材齢期間におけるクリープは、ひび割れ幅を低減させる効果があるが、外部拘束を強く受ける箇所では、コンクリートと鉄筋間のすべりにより、ひび割れ幅が増大する可能性があることが分かった。

3.4 クリープ関数のパラメータの影響

2.3 節で述べたように、二重べき乗則の各パラメータの実用的な値は示されていない。そこで、2.3 節で仮定したパラメータを基本とし、表-2 に示す 3 通りのパラメータを設定した。

表-2 各ケースのパラメータ

Case-4(基本)	$\alpha=0.8, d=0.6, p=0.3$
Case-4a	$\alpha=0.8, d=0.6, p=0.25$
Case-4b	$\alpha=0.8, d=0.5, p=0.25$
Case-4c	$\alpha=0.8, d=0.5, p=0.2$

α は式全体にかかる係数として大きな変化が予想されるため、全ケース同じ値とした。 d は荷重開始材齢の変化に伴うクリープの変化率、 p は材齢の進行に伴うクリープの変化率を表し、それぞれ 0.05~0.1 の範囲で値を変化させ、僅かなパラメータの変化でひび割れ挙動がどのように変わるか確認する。図-13 に各ケースにおけるクリープ関数を示す。Case-4a では、 p が小さいため基本よりもクリープの上昇が小さくなることが考えられる。また、Case-4b、Case-4c では d を小さくすることで荷重材齢 1 日以降のクリープの低減が小さくなるため、全体のクリープが大きくなることが考えられる。

図-14 に各ケースにおけるひび割れ状況を示す。ここでは、クリープと付着すべり両方考慮した場合のみ解析を実施した。Case-4a では、ひび割れの数が基本パラメータとほぼ同等であるが、梁端部でのひび割れ幅が増大した。なお、Case-4b では柱脚、梁端部共に Case-4a に比べてひび割れ幅が大きく低減していることが分かる。これは、 d の値を小さくすることで各ステップ毎に計算されるクリープひずみが大きくなり、応力緩和の影響も大きくなっているためと考えられる。Case-4c では、基本パラメータよりも柱脚のひび割れ数が少なくなっているが、ひび割れ幅に大きな違いは見られなかった。

図-15 にひび割れ幅の経時変化を示す。Case-4a では梁端部でのひび割れ発生後の挙動が基本パラメータとほぼ同じであるが、材齢 5 日以降でのひび割れ幅の低減率が小さくなっていることが分かる。Case-4b では基本パラ

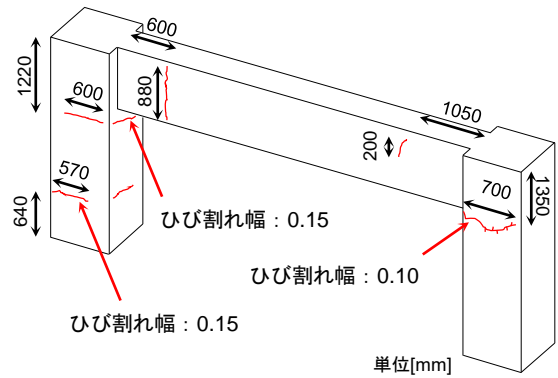


図-11 実験結果(材齢 28 日)

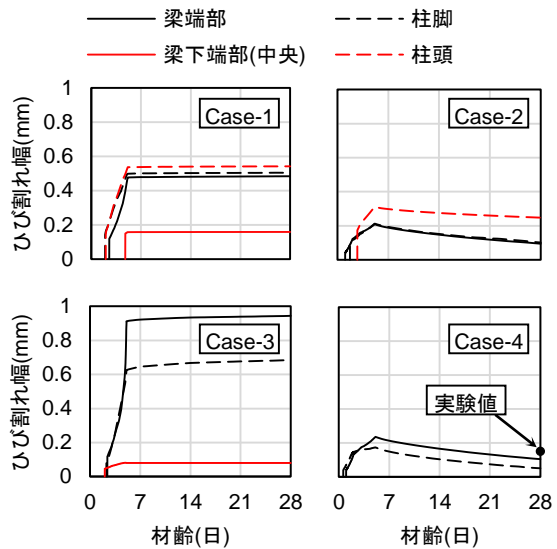


図-12 ひび割れ幅の経時変化

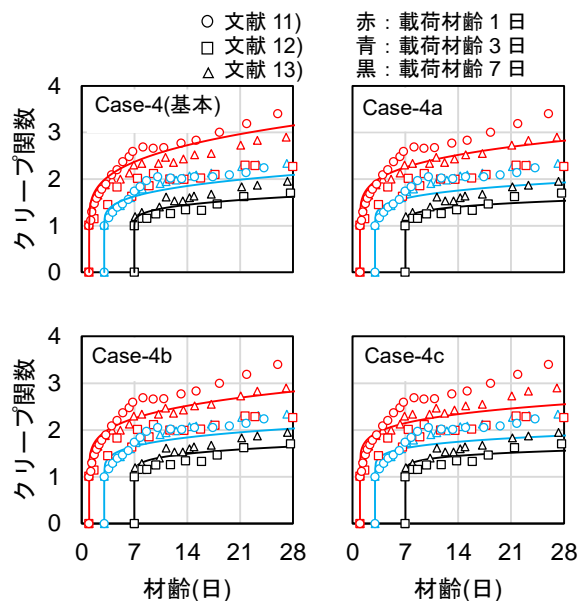


図-13 各ケースのクリープ関数

メータよりもクリープが大きい分、ひび割れの進展が小さくなっている。なお、Case-4c では、材齢 5 日以降のひ

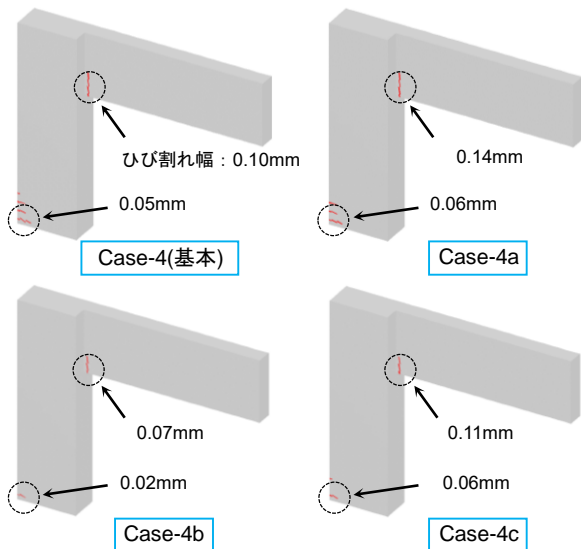


図-14 ひび割れ状況(材齢 28 日)

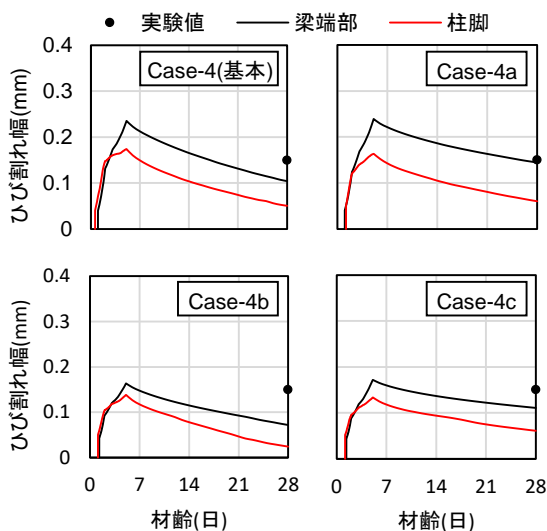


図-15 ひび割れ幅の経時変化

ひび割れ幅の低減が他ケースよりも小さい。以上より、クリープの僅かな変化によって、ひび割れ幅が大きく変動することが予想されるため、若材齢クリープの評価を行う場合、パラメータの設定には十分に注意が必要であると考えられる。

4 まとめ

三次元 FEM 解析を用いて、クリープおよび付着すべりを考慮した若材齢期間に生じる収縮ひび割れの予測を試みた。その結果、クリープによる応力緩和によってひび割れ幅が低減するが、外部拘束を受ける箇所では付着すべりが生じた場合、ひび割れ幅が増大する可能性があることを確認した。また、クリープの僅かな変化によってひび割れ発生後の挙動が大きく変動することが分かった。

謝辞

研究の遂行にあたり、白井申明日本大学名誉教授より

多くの助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 丸山一平,佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見,日本建築学会構造系論文集, 第 617 号, pp.1-7, 2007.7
- 2) 堀川真之: 時間依存性を考慮した高強度鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動に関する解析的研究, 日本大学博士論文, 2016
- 3) 三村陽一ほか: 若材齢コンクリートと異形鉄筋の局部付着特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 E Vol.63, No3, pp.410-423, 2007.7
- 4) 入桂史郎: 若材齢コンクリートのクリープに関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1999
- 5) American Concrete Institute: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92, 1997.
- 6) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990.
- 7) 野口貴文,友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性との関係,日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.11-16, 1995.6
- 8) 土木学会: コンクリート標準示法書 設計編, 2012
- 9) 寺本篤史,丸山一平: 超高強度コンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす収縮量の影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No.1, pp.574-579, 2012
- 10) Bazant,Z.P. and Osman,E.: Double Power Law for Basic Creep of Concrete, Materials and Structures, RILEM, Paris, Vol.9, pp.3-11, 1976.
- 11) 萩原伸治ほか: 高強度コンクリートの若材齢における力学的特性と圧縮および引張クリープ挙動に関する実験的研究,コンクリート工学論文集, 第 11 巻 第 1 号, pp.39-50, 2000.11
- 12) 萩原伸治ほか: 高強度コンクリートの若材齢クリープ挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 552 号, pp.31-36, 2002.2
- 13) 萩原伸治ほか: 高強度コンクリートの若材齢における変動荷重下のクリープ挙動,日本建築学会構造系論文集, 第 574 号, pp.1-8, 2003.12
- 14) Sato,Y. and Vecchio,F.J.: Tension Stiffening and Crack Formation in Reinforced Concrete Members with Fiber-Reinforced Polymer Sheets, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.717-724, June, 2003.
- 15) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp.172-190, 1996.11