

論文 長期屋外乾燥させた PRC 梁の曲げひび割れ性状に関する研究

浅本晋吾^{*1}, 篠崎裕生^{*2}, 三上浩^{*3}, 睦好宏史^{*4}

要旨: 本研究は, PRC 梁を約 1 年半屋外で乾燥させたときの時間依存変形挙動, 収縮ひび割れ, および乾燥後の曲げひび割れ性状について検討を行った。収縮ひび割れ進展を含む時間依存変形挙動について, 材料と構造解析を組み合わせたマルチスケール統合解析システムで検討を行った結果, 目視で確認できない微細ひび割れの存在が示唆された。また, 膨張材及びビニロン短繊維を混入した際の収縮ひび割れ抑制, 曲げひび割れ特性について実験的検討を行い, 収縮ひび割れ抑制には膨張材が効果的であり, わずかな短繊維混入は曲げひび割れ性状に対しては影響が小さいが, ひび割れ発生後の曲げ剛性向上には寄与することが分かった。

キーワード: 収縮, 膨張材, ビニロン短繊維, 収縮ひび割れ, 曲げひび割れ幅

1. はじめに

近年, コンクリートの想定外の収縮によって竣工わずか3年で多数の表面ひび割れが生じたPRC橋梁の事例が報告された¹⁾。部材を貫通したひび割れや, プレストレス導入方向に直交するひび割れも観察され, 死荷重により大きなたわみが生じ, 改めて収縮ひび割れ制御のあり方がクローズアップされた。コンクリートの収縮と鉄筋の拘束によってもたらされる収縮ひび割れは終局曲げ耐力には影響を与えないものの, 梁剛性や塩分, 二酸化炭素など有害物質移動抵抗性を低下させ, 鉄筋コンクリート構造物の常時の使用性, 耐久性を低下させる。さらには, せん断スパン内のひび割れはコンクリートの受け持つせん断力 V_c を低下させる恐れもある。収縮ひび割れの抑制, ひび割れ発生後の構造物の使用性について再度検討を行うことが工学的に求められているといえる。

収縮ひび割れ抑制技術としては, 膨張材の使用がひび割れ抑制に効果的であると一般に認識されている。また, ビニロン短繊維の使用は, 繊維の架橋効果によってひび割れが分散, ひび割れ幅の低減が期待される。一方で, これら混和材を使用すると材料コストは増大するため, 経済性を考慮した効果的な組み合わせが実用的に望まれている。収縮ひび割れ抑制に効果的, 実務的な材料設計を眼目に置き, 膨張材, ビニロン短繊維を用いた際の

PRC 梁の曲げひび割れ特性について検討した。さらには, 東京大学で開発中の材料と構造解析を組み合わせたマルチスケール統合解析システム²⁾を用い, 実環境に暴露した際の時間依存変形, ひび割れ進展性に対するモデルの適用性についても検討した。

2. 実験概要

表-1 に本研究で検討したコンクリートの配合, 力学的特性を示す。配合 S は混和材のない標準配合, 配合 SE は膨張材を混和材として用いたもの, 配合 SEV は膨張材とともにビニロン短繊維を体積比 0.4%混入したものである。経済性を考慮し, コンクリート材料費上昇の上限を 1.5 倍としたため, 繊維混入率としては非常に少量となった。わずかな繊維混入でもひび割れ抑制に寄与することを期待したのである。

表-2 に曲げ載荷用の試験体の断面図および導入緊張力を示す。検討した試験体は3種類で, 主鉄筋が D32 の試験体はほぼ RC に近い梁であるため RC, 主鉄筋が D19 の試験体は PRC, 主鉄筋が D13 の試験体は PC と便宜上呼ぶこととする。設計荷重は試験体 PC のひび割れ発生荷重である。いずれの試験体も打設一日後に脱型し, 材齢 3 日まで散水養生を施した後, プレストレスを導入し, 屋根付の日陰屋外環境に暴露した。約 1 年半屋外に暴露

表-1 コンクリートの示方配合 (kg/m³) および力学的特性 (材齢約 500 日)

配合	水	セメント	膨張材	短繊維	細骨材	粗骨材	SP	強度 (MPa)	弾性係数(GPa)
S	160	377	-	-	805	974	3.77	圧縮: 61.9, 引張*: 4.06	33.5
SE		357	20	-			3.77	圧縮: 65.0, 引張*: 4.30	32.5
SEV		357	20	5.5			4.52	圧縮: 67.7, 引張*: 4.32	34.2

セメント: 早強セメント(比重: 3.14g/cm³), 細骨材①: 硬質砂岩砕砂(比重 2.67g/cm³, 吸水率: 1.31%), 細骨材②: 川砂(比重 2.62g/cm³, 吸水率: 2.24%), 粗骨材: 硬質砂岩砕石(比重 2.64g/cm³, 吸水率: 0.88%), 短繊維: ビニロン短繊維(比重: 1.3g/cm³, 直径: 0.66mm, 標準長さ: 30mm), SP: 高性能 AE 減水剤, (*)引張強度は引張割裂強度

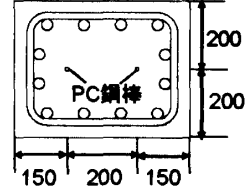
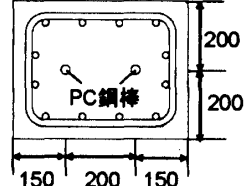
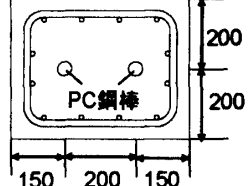
*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 助教 博士 (工学) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)

*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

表-2 試験体の断面図および導入緊張力

試験体名	RC	PRC	PC
主鉄筋	D32 (鉄筋比: 4.77%)	D19 (鉄筋比: 1.72%)	D13 (鉄筋比: 0.76%)
PC 鋼棒直径	11mm	26mm	40mm
導入緊張力	140kN (コンクリートの 応力度: 0.7N/mm ²)	780kN (コンクリートの 応力度: 3.9N/mm ²)	1850kN (コンクリートの 応力度: 9.3N/mm ²)
帯鉄筋	D19 ctc150	D16 ctc150	D16 ctc150
断面図 (単位: mm)			

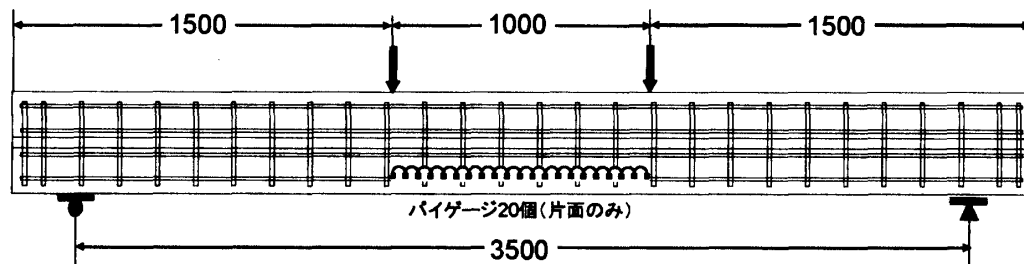


図-1 鉄筋配置図および載荷試験方法 (単位: mm, 帯鉄筋の純かぶりはいずれも 35mm)

した後、曲げ載荷試験を行った。

図-1 に鉄筋配置図および曲げ試験の載荷方法を示す。ひび割れ幅は等曲げモーメント区間で計測し、基長 50mm のパイゲージを隙間なく設置した。パイゲージはいずれの試験体も下面から 57.5mm の位置に設置した。試験体 PC 以外は、主鉄筋中心位置ではないため、試験体種類での比較検討は行えないが、配合の違いによるひび割れ特性については比較可能であると考えられる。なお、パイゲージ端の取り付け部にひび割れが入った場合は、0.001mm の精度で計測可能なデジタルマイクロスコープを用い、計測した。その際、その両隣のパイゲージの値を足し合わせたものとデジタルマイクロスコープで計測した幅が概ね一致したため、パイゲージがひび割れによって外れた場合を除き、両隣のパイゲージの値を足し合わせたものをひび割れ幅とした。

3. 試験結果および考察

3.1 暴露中の収縮ひずみおよびひび割れ状況

まず約 1 年半の乾燥暴露中の収縮ひずみ、および収縮ひび割れ発生状況について述べる。梁試験体とともに作製し、同じ場所に暴露した 10×10×40cm 角柱試験体の収縮ひずみを図-2 に示す。なお、既報³⁾で述べたように、材齢 40 日付近で横殴りの雨によって雨水が配合 S、SE の供試体に浸透し、収縮が大きく回復している。配合 S に短繊維を体積比 0.4% 混入した配合 SV の供試体の結果も比較のため示す。この供試体は横殴りの雨の影響を受けていない。配合 SV は繊維混入率が低いため、配合 S も雨の影響がなければこれと同様の傾向を示したと考

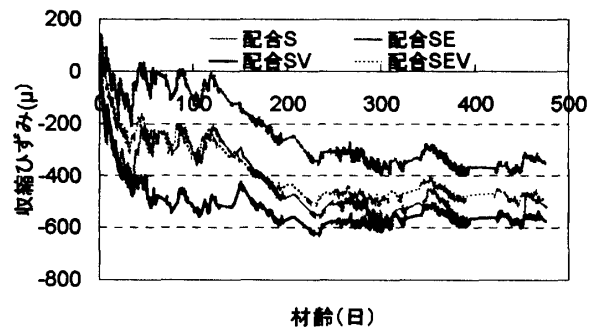


図-2 小型供試体の収縮ひずみの経時変化

えられ、実際乾燥が進むにつれて配合 SV の収縮に漸近している。配合 SE、SEV については膨張材を用いるため若材齢時に膨張し、収縮ひずみは膨張材を混入していない配合 S、SV に比べ、100-200μ小さくなった。配合 SEV については、材齢 40 日以後膨張材を混入していない配合 S と収縮量にさほど違いがないが、これは供試体への雨の浸透の影響だと考えられ、膨張材の効果については配合 S と SE、配合 SV と SEV で比較した。

次に、大型梁試験体の収縮ひび割れ発生状況について述べる(ひび割れ図は図-10 を参照)。試験体 RC では、混和材を混入していない配合 S で多数の収縮ひび割れが観察された。発生した収縮ひび割れの幅をデジタルマイクロスコープで計測したところ、0.01mm から 0.08mm 程度の範囲で幅は分散しており、特に 0.03mm 程度の幅を持つひび割れが顕著に観察された。一方で、配合 SE、SEV の試験体 RC では目視によるひび割れの確認はできなかった。これは材齢初期の膨張作用によってコンクリート

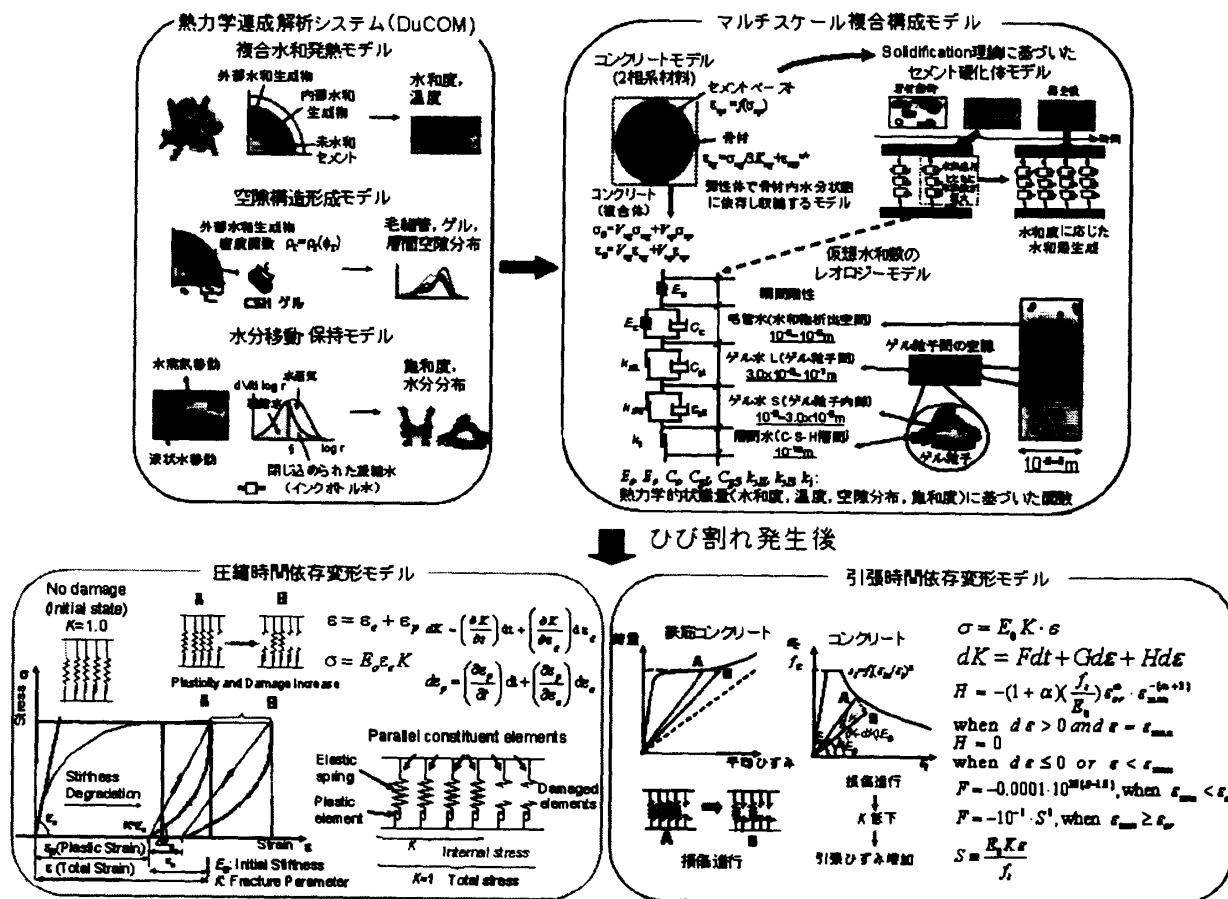


図-3 マルチスケール統合解析システムの概要

に圧縮のケミカルプレストレスが導入され、収縮ひび割れが抑制されたためだと考えられる。また、試験体 PRC, PC については、主鉄筋方向と平行なひび割れが観察された。これはプレストレスによる割裂ひび割れ、もしくは帯鉄筋拘束による収縮ひび割れと推察される。

3.2 マルチスケール統合解析システムを用いた解析的検討

屋根付の実環境に暴露中の試験体の収縮、ひび割れ挙動について、東京大学で開発中のマルチスケール統合解析システム²⁾ (version 5.10) を用いて検討した。ひび割れ発生前のコンクリートの収縮、クリープについては、熱力学連成システム DuCOM⁴⁾ から得られる水和、空隙形成、水分移動・保持といった微視的な材料情報に基づいた予測が可能なマルチスケール複合構成モデル^{2), 3), 6)} で解析する。鉄筋の拘束によるひび割れ発生以後の時間依存変形については、破壊進展速度と塑性ひずみで変形を表現する圧縮時間依存変形モデル⁷⁾、破壊進展速度で変形の進行を表現する引張時間依存変形モデル⁸⁾ を用いて予測するシステムである。概略を図-3 に示す。

膨張材による初期膨張についてはモデル化に至っていないため、配合 S の試験体のみについて今回解析を行った。屋外環境の境界条件は、暴露場所での実測の温度と、試験体近くの百葉箱から得られる湿度をもとに与えた。既報と同様、水和反応が活発である材齢 7 日までは

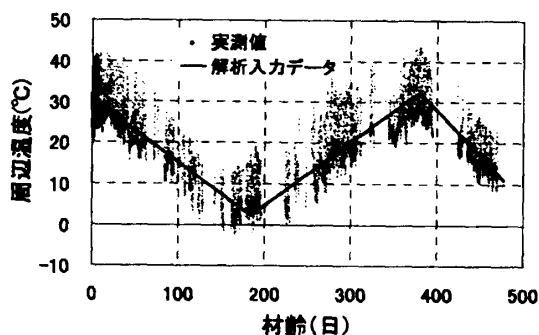


図-4 入力温度履歴

1 日の温度変化を考慮し、材齢 7 日以降は計算負荷を低減するため実測の温度変化を最小二乗法で線形近似した (図-4)。湿度に関しては、湿潤養生中は 99.5% とし、乾燥後は湿度変動が大きいため単純に平均した値を入力した (68.0%)。

既往の研究で報告されているように、コンクリートの収縮は骨材特性の影響を強く受け、骨材の剛性より骨材自体の収縮によって複合体であるコンクリートの収縮が増大する可能性がある^{7), 10), 11)}。既報¹⁰⁾ で示したように、マルチスケール複合モデルは骨材収縮を考慮しない場合、それ自体の収縮が小さいと考えられる石灰岩骨材を用いたコンクリートの収縮挙動は精度よく再現できるものの、近年の硬質砂岩系骨材を用いたコンクリートの収縮予測は下回る。本実験で使用した骨材の収縮量は計

測しておらず、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の小型供試体を用いて、骨材自体の収縮の感度解析を行った。なお、本解析では、内部に鉄筋を有していないため、ひび割れは考慮しておらず、マルチスケール複合構成モデルのみで解析を行っている。図-5 に感度解析の結果を示す。降雨の影響を受けていない配合 SV の試験体と比較すると、骨材が 300μ 程度収縮すると仮定すると、解析は実験の収縮挙動を精度よく再現できる。以上の感度解析の結果、骨材の収縮を 300μ と仮定して解析を行った。別途で行った小型供試体のクリープ試験 ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$, 材齢 3 日で 5 MPa の持続応力) と解析の比較を図-6 に示す。持続応力作用下の変形挙動についても概ね解析は再現できている。

次に、大型試験体について検討を行う。プレストレスは試験体 PRC, PC では、荷重後約 50 日でクリープ・収縮によってそれぞれ 720 kN , 1500 kN 程度まで低下した後安定したため、この値をプレストレスとして材齢 3 日で解析上与えた。試験体 RC については導入プレストレスが小さく、プレストレスロスがほとんど見られなかったため、導入緊張力の 140 kN を与えた。内部鉄筋の拘束による収縮ひび割れを考慮した大型試験体の時間依存変形挙動の解析結果を図-7 に示す。なお、荷重時の弾性ひずみは除いてある。図-7 に示されるように、ひび割れを有する構造体の時間依存変形を精度よく再現できている。試験体 RC については、荷重後約 350 日以後で収縮ひび割れの進展によって実験では大きく変形が減少しており、解析も概ね同じ時期にひび割れ進展によって変形が回復しており、時間依存する収縮ひび割れ挙動も表現できていると考えられる。ひび割れの発生状況について図-8 に示す。各試験体ともに解析上乾燥後すぐに乾燥面近くのガウス点でひび割れが発生し、その後進展した。図-8 に示すように、試験体 RC は、主鉄筋直交方向にひび割れが入り、主鉄筋のコンクリート拘束による収縮ひび割れが観察されたが、試験体 PRC, PC は、表層部に主鉄筋方向と平行なひび割れが発生し進展した。実験では、試験体 RC は乾燥後数日で多数ひび割れが確認できたものの、試験体 PRC, PC では暴露中わずかな割裂ひび割れ以外は目視で確認できなかった。解析では試験体 PRC, PC ともに多数のひび割れが発生しており、実験とそぐわない結果となっているが、実験のひび割れは小さく目視では確認できなかったという可能性もある。実際、配合 S の試験体 PRC, PC の曲げひび割れ発生荷重は、コンクリートの引張強度、プレストレスから算出されるひび割れ発生荷重より若干小さく（後の表-3 を参照）、目視で確認できない収縮ひび割れの影響があると推察される。今後、膨張材のモデル化も含め、目視できないような微細ひび割れの可能性について詳細に検討していきたい。

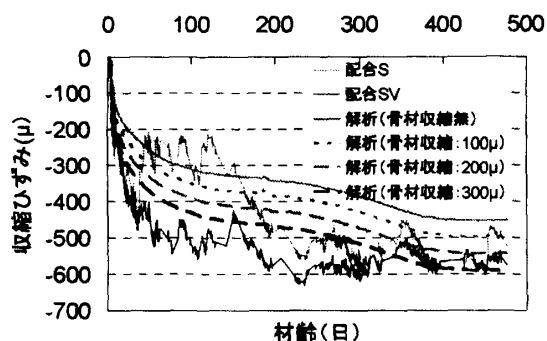


図-5 骨材収縮に関する感度解析

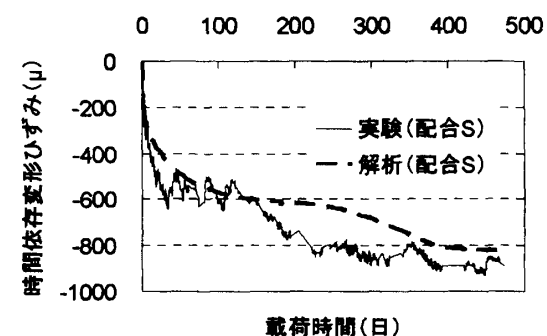


図-6 持続応力作用時の時間依存変形

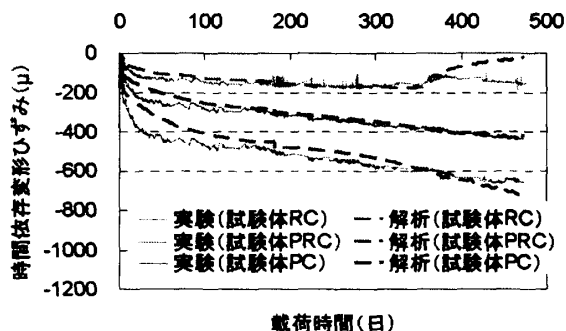


図-7 内部鉄筋拘束による収縮ひび割れを考慮した解析と実験の比較

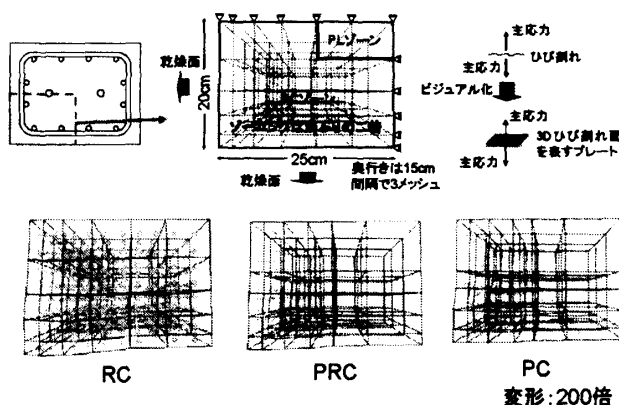


図-8 解析におけるひび割れ進展（材齢：477 日）

3.3 長期屋外乾燥させた PRC 梁の曲げ試験結果

(1) 荷重—たわみ関係

約 1 年半屋外で乾燥させた各試験体梁の 4 点曲げ荷重時の荷重—たわみ関係を図-9 に示す。荷重は主鉄筋が降伏するまで行った。いずれの試験体においても、ひび割れ発生荷重は配合 S が最も小さく、配合 SE・SEV は膨張材の効果によって収縮ひび割れが抑制され、ひび割

れ発生荷重の低減が小さかったと考えられる。試験体 RC では、配合 S と SE でひび割れ発生前のたわみに違いがないが、これは配合 SE の初期不整によってたわみが精度良く計測されなかったためであり、荷重—主鉄筋ひずみでみると、配合 S が最も低い傾きとなっていた。ひび割れ発生後の挙動については、配合 SEV はビニロン短繊維に架橋効果によって曲げ剛性の低下が最も小さくなった。試験体 RC については鉄筋量が多く、コンクリートの剛性の寄与が小さいため、効果が明確ではないが、他の試験体においては短繊維混入の効果がみられる。短繊維は体積比 0.4% とわずかな混入ではあるが、ひび割れ後の梁剛性低下の抑制には効果があると思われる。

(2) 曲げひび割れ性状

図-10 に鉄筋降伏直前の各試験体のひび割れ状況、表-3 に各試験体のひび割れ発生荷重の実験値と理論値、等曲げモーメント区間に発生したひび割れ本数、間隔を示す。図-10 に示されるように、試験体 RC の配合 S では初期の収縮ひび割れによってせん断スパン内にも多数のひび割れが確認されたが、図-9 に示されるように、鉄筋量が多かったため曲げ剛性にはさほど影響が現れなかった。

図-11 に各試験体のひび割れ幅と荷重の関係を示す。最大ひび割れ幅は各荷重上位 3 つの平均としている。試験体 RC では、収縮ひび割れが多数発生した配合 S で、等曲げモーメント区間に発生した収縮ひび割れが載荷とともに進展し局所化し、数本の大きなひび割れが発生した。配合 SE と SEV で比較すると、いずれの試験体も両者の相違は小さく、短繊維の架橋効果がひび割れ幅には顕著に反映されない結果となった。前述したように 0.4% というわずかな短繊維混入は、ひび割れ発生後の曲げ剛性の低下抑制には効果があるが、ひび割れ制御にはさほど寄与しないことが分かった。暴露中に目視可能な収縮ひび割れが発生しなかった試験体 PRC、PC においては、配合による曲げひび割れ性状の変化は見られな

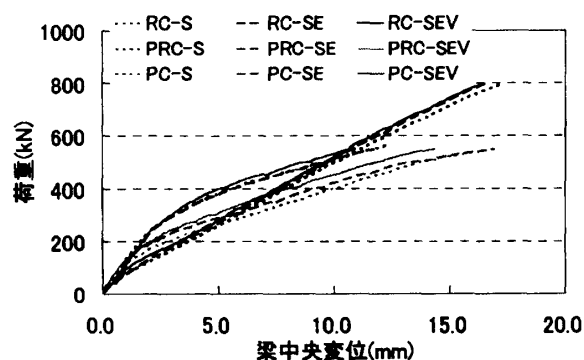


図-9 荷重—たわみ関係

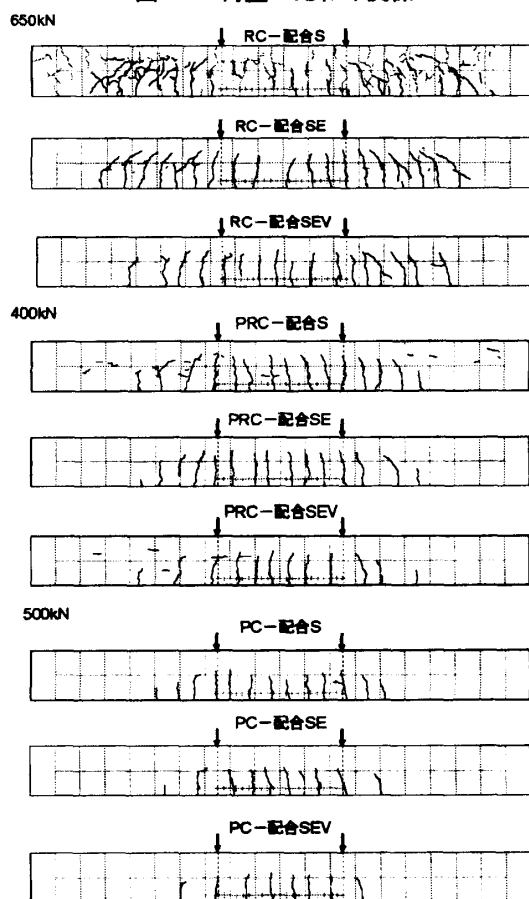


図-10 主鉄筋降伏前のひび割れ状況 (RC の収縮ひび割れ：赤、PRC・PC の割裂ひび割れはスケッチせず)

表-3 ひび割れ発生荷重と等曲げモーメント区間におけるひび割れ本数、ひび割れ間隔

試験体名-配合	ひび割れ発生荷重 (理論値)	ひび割れ発生荷重 (実験値)	ひび割れ観察時の荷重	本数	最大ひび割れ間隔	最小ひび割れ間隔	平均ひび割れ間隔
RC-S	102kN	-	650kN	6 本	263mm	105 mm	162 mm
RC-SE	107kN	59kN		6 本	257 mm	130 mm	176 mm
RC-SEV	107kN	79kN		7 本	207 mm	108 mm	151 mm
PRC-S	163kN	121kN	400kN	7 本	184 mm	109 mm	143 mm
PRC-SE	169kN	145kN		6 本	189 mm	101 mm	146 mm
PRC-SEV	169kN	140kN		6 本	194 mm	124 mm	147 mm
PC-S	247kN	244kN	450kN	6 本	178 mm	121 mm	150 mm
PC-SE	252kN	249kN		6 本	164 mm	123 mm	138 mm
PC-SEV	253kN	260kN		5 本	198 mm	109 mm	171 mm

った。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 膨張材、ビニロン短繊維を用いた配合の異なる PRC 梁を約 1 年半屋外暴露させた結果、鉄筋量が多くとも膨張材を混入することで、収縮ひび割れは効果的に防止できることが分かった。
- (2) 収縮ひび割れ進展を含む時間依存変形挙動について、材料と構造解析を組み合わせたマルチスケール統合解析システムで検討を行った結果、目視で確認できないひび割れの存在が示唆された。
- (3) 経済性を考慮しビニロン短繊維を体積率 0.4% だけ混入した場合、曲げひび割れ性状に対する効果は小さいが、ひび割れ発生後の曲げ剛性は若干向上した。
- (4) 目視で確認できるほどの収縮ひび割れが発生しなければ、膨張材の有無で曲げひび割れ性状の違いは小さかった。

謝辞

3 章の検討に用いたマルチスケール統合解析システムは東京大学前川宏一教授、石田哲也准教授のご厚意により使用させて頂きました。ここに、深謝の意を表します。なお、梁実験は埼玉大学大学院生大塚歩氏、埼玉大学卒業生三浦千佳子氏、東京理科大学卒業生小関健二氏に協力頂いたことを記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会垂井高架橋損傷対策特別委員会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書、土木学会、2005
- 2) Maekawa, K. et al.: Multi-scale modeling of concrete performance -Integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003
- 3) 玉置一清ほか：膨張剤およびビニロン短繊維を用いたコンクリートのひび割れ特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.807-812, 2007
- 4) Maekawa, K. et. al : Modeling of Concrete Performance, London, E & FN Spon, 1999
- 5) 朱銀邦ほか：細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.241-260, 2004
- 6) Asamoto, S. et al.: Time-Dependent Constitutive Model of Solidifying Concrete Based on Thermodynamic State of Moisture in Fine Pores, Journal of Advanced Concrete

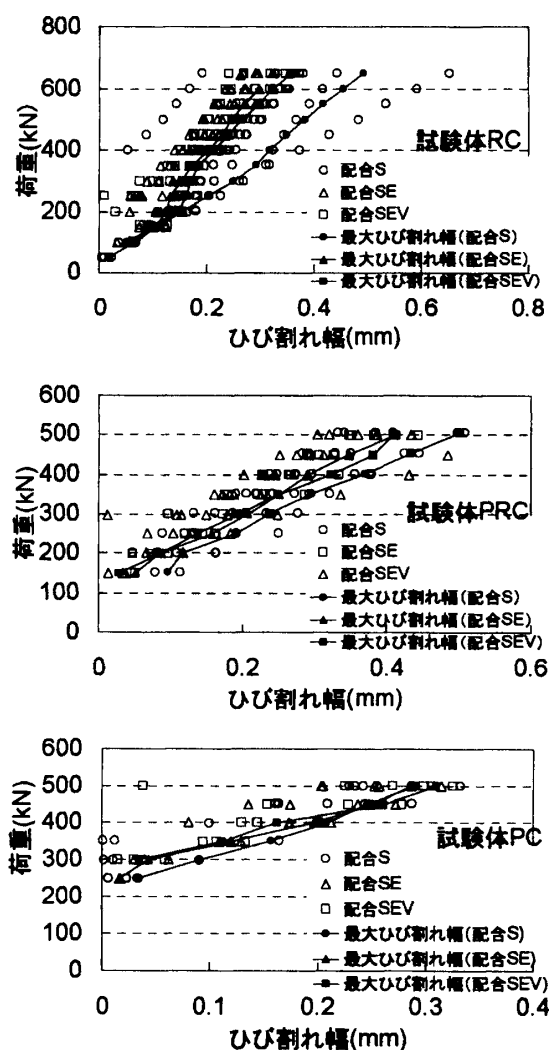


図-11 ひび割れ幅—荷重の関係

Technology, Vol.4, No.2, pp.301-323, 2006

- 7) 浅本晋吾ほか：骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析, 土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 2, pp.327-340, 2007.6
- 8) El-Kashif, K. F. and Maekawa, K. :Time-dependent nonlinearity of compression softening in concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(2), pp.233-248
- 9) 久末賢一ほか：ひび割れを含む RC 部材の平均引張剛性の経時変化と乾燥収縮の影響, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, pp.555-556, 2005
- 10) 浅本晋吾ほか：実環境作用に着目したコンクリートの収縮特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.681-686, 2007
- 11) 今本啓一ほか：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.606, pp.9-14, 2006