

論文 PC はり部材に生じる軸方向ひび割れの再現と耐荷性状の評価

中村 宗一郎*1・斉藤 成彦*2・佐藤 賢之介*3・渡辺 忠朋*4

要旨: 既設プレテンション PC 中空床版桁には、部材軸方向に沿ったひび割れの発生が確認されている。この軸方向のひび割れは、収縮または膨張といったコンクリートの変形が発生要因と推定されているが、その発生メカニズムや耐荷性状への影響については十分に明らかとなっていない。そこで本研究では、屋外暴露が行われた模型 PC はり部材および実際に供用されている PC 中空桁について解析的に検討を行い、部材断面内の膨張または収縮による変形量の差が大きいほど明確な軸方向ひび割れを生じること、軸方向のひび割れが耐荷力に及ぼす影響は小さいことを確認した。

キーワード: プレストレストコンクリートはり部材, ひび割れ, 数値解析, RBSM

1. はじめに

社会基盤施設の老朽化が深刻となる中で、既設構造物の性能を的確に把握する必要性が高まっている。既設構造物の性能評価においては、構造物が現有する性能を把握するだけでなく、変状の発生要因の推定や性能の経時変化の予測も重要である。非線形数値解析技術は、変状の生じた既設構造物の耐荷性能を定量的に評価する手法として期待されており、著者ら¹⁾は鋼材腐食が耐荷性状に与える影響が特に著しいプレストレストコンクリート(以下、PC)構造物に対して、数値解析による定量的評価の有用性を示している。この数値解析技術は、変状の生じた既設構造物の耐荷性状の評価だけでなく、変状の発生要因の推定技術としても有用であると考えられる。

プレテンション PC 中空床版桁では、写真-1 に示すように、ウェブや下フランジ下面の軸方向にひび割れが発生している事例が多く確認されており、耐久性や耐荷力の低下が懸念されている。内部の鋼材の発錆が確認されない場合もあり、この軸方向のひび割れの多くは供用後のコンクリートの変形に伴うものと考えられている。アルカリシリカ反応(以下、ASR)に起因するコンクリートの膨張によるものとする報告²⁾があるものの、その



写真-1 PC 中空桁に生じた軸方向ひび割れ

発生メカニズムや耐荷性状への影響は十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、数値解析を用いて、暴露試験によって軸方向にひび割れを発生させた PC 部材の実験を対象に、軸方向のひび割れの再現性の確認を行ったうえで、実際に供用されている PC 中空桁を対象に、コンクリートの変形に伴うひび割れの発生要因の推定と、ひび割れの生じた桁の耐荷性状の把握を試みた。

2. 解析手法

2.1 構造物のモデル化

解析には、離散型の解析手法である 3 次元剛体バネモデル(RBSM)を用いた。鋼材腐食の生じた RC および PC 部材の耐荷性状を比較的よく再現できることを確認している¹⁾³⁾。コンクリートは剛体要素とし、RBSM ではひび割れが要素境界面に沿って発生するため、Voronoi 分割を利用したランダムな要素分割を行った。鉄筋および PC 鋼材ははり要素、コンクリート剛体要素とはり要素間の付着はリンク要素でモデル化した。解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は文献³⁾を参照されたい。また、PC 鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、破断ひずみに達すると応力を 0 とした。付着リンク要素には、鋼材軸方向のバネに対して付着応力-すべり関係³⁾を適用し、PC 鋼材とグラウトまたはコンクリート間の付着強度については、既往の研究を参考に決定した⁴⁾。

2.2 コンクリートの変形のモデル化

本研究では、収縮や膨張といったコンクリートの変形に対し、コンクリート中の水分分布に基づく拡散現象に基づき収縮ひずみを導入する場合と、ある一定量の収縮・

*1 山梨大学大学院 医工農学総合研究部 (学生会員)

*2 山梨大学大学院 総合研究部教授 博(工) (正会員)

*3 山梨大学大学院 総合研究部助教 博(工) (正会員)

*4 北武コンサルタント(株) 取締役副社長 博(工) (正会員)

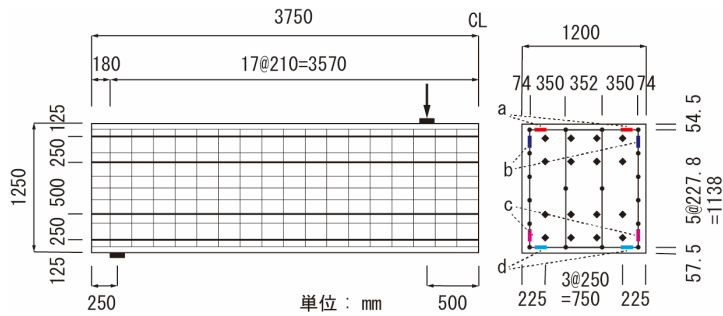


図-1 試験体図

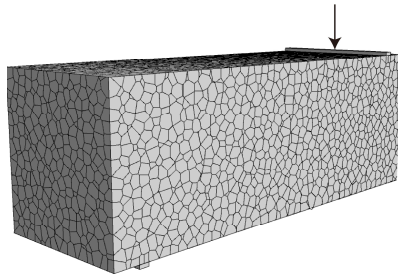


図-2 解析モデル

膨張ひずみを直接導入する場合の2種類のモデル化を行った。

コンクリートの収縮を水分拡散による物質移動問題に基づき導入する場合は、各剛体要素の母点と各境界面とを結ぶ1次元のパイプを設定し、剛体内の物質移動を表現した。時間変化によるコンクリートの相対含水率を求め、相対含水率と乾燥による収縮ひずみは線形であると仮定し、得られた収縮ひずみを剛体要素間における垂直ばねの初期ひずみとして与えることで乾燥収縮をモデル化した⁹⁾。

コンクリートの収縮・膨張ひずみを直接的に導入する場合は、ある一定量の収縮または膨張ひずみを、すべてのコンクリート要素の垂直バネに毎ステップの増分初期ひずみとして与えることでモデル化した。

3. 模型実験の再現解析

3.1 実験概要

井俣ら⁶⁾により屋外暴露試験が行われた模型試験体を対象に解析を行い、コンクリートの変形に伴う軸方向のひび割れの再現性を検証した。実験は、ASRにより劣化するPC部材の基礎的性状を把握する目的から、実構造物を模した大型PCはりを作成し、屋外自然暴露試験による長期計測が行われたものである。試験体は非反応性骨材と反応性骨材を使用した2種類製作され、反応性骨材を使用した試験体では、プレテンションPC中空床版桁に見られるような部材軸方向のひび割れが確認されている。試験体はポストテンション方式の大型PC梁で、試験体の諸元を図-1に示す。暴露試験は2005年2月より開始され、約7.5年間長期計測が行われたが、本研究

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度	60.0 N/mm ²
	弾性係数	3.0×10 ⁴ N/mm ²
PC 鋼棒 φ 32mm	降伏強度	930 N/mm ²
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
軸方向鉄筋 D13	降伏強度	295 N/mm ²
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
緊張力		575kN

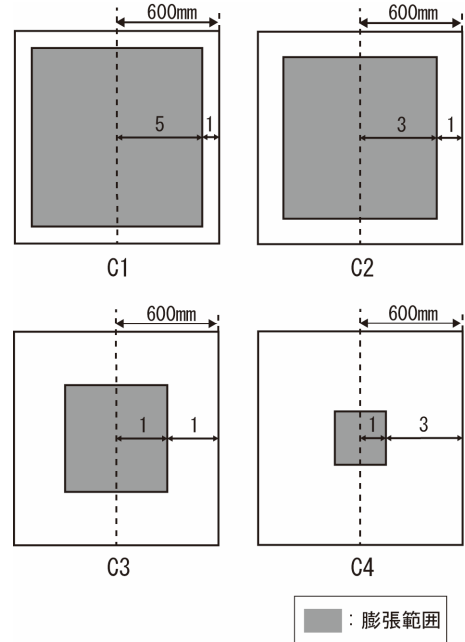


図-3 膨張範囲

では材齢614日までのASR劣化によるひび割れの観測、残存プレストレスやスターラップひずみの計測および破壊までの載荷試験⁷⁾などを参考にした。試験体の設置は、橋軸方向が南北方向、橋軸直角方向が東西方向である。なお、PC鋼材には乾燥収縮およびクリープと想定されるひずみおよび緊張力の減少が、スターラップにはアルカリ骨材反応に伴う膨張によるひずみの増加が確認されている。

3.2 解析概要

解析モデルを図-2に示す。材料特性としてコンクリートは実測値、鋼材は規格値に基づいた表-1の値を用い、計算労力を低減するため、片側半スパンのみをモデル化した。材齢による強度変化は考慮せず、解析開始0日から水分移動解析による乾燥収縮とクリープを考慮し、実験では約100日以降で膨張の傾向を示しているため、解析でも経過日数100日から膨張ひずみを導入した。膨張ひずみはアルカリ骨材反応による膨張を模擬したもので、乾燥する表面から100mmを除いた内側の部分(図-3:C1)の全方向の垂直バネに対して、時間経過とともに線形的に増加するように2000μまで導入した。

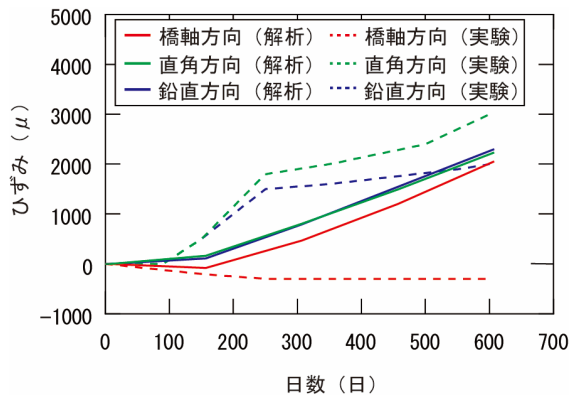


図-4 コンクリート内部ひずみ

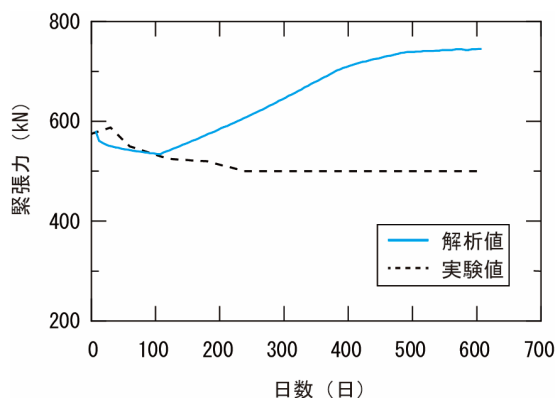


図-5 PC 鋼材緊張力

3.3 解析結果

(1) コンクリート内部ひずみ

支間中央付近の断面中心位置におけるコンクリート内部ひずみの推移を図-4 に示す。直角方向および鉛直方向の最終的なひずみ量は概ね一致しているのに対し、途中経過は解析値が実験値を下回る結果となった。実験では屋外暴露試験であるため、夏季にあたる期間で急激に反応が進行したのに対し、解析では線形的に膨張ひずみを導入しているためである。橋軸方向については、実験では約 250 日まで乾燥による収縮およびクリープと想定される減少が見受けられ、250 日以降は一定のひずみを維持しているのに対し、解析では 100 日以降で他方向と同様に時間経過とともにひずみが増加している。この違いは、プレストレスによる圧縮力が作用している橋軸方向では膨張が抑制される⁹⁾のに対し、解析では全方向に膨張ひずみを導入しているためである。

(2) PC 鋼材の緊張力

支間中央付近における PC 鋼材の緊張力の推移を図-5 に示す。収縮やクリープにより、膨張ひずみ導入前の 100 日目まではどちらも緊張力が低下する傾向にあるが、その後は前述の理由により、解析での緊張力は増加する結果となった。

(3) スターラップひずみ

図-1 に示す測定位置 (a~d) に対し、支間中央付近におけるスターラップひずみの推移を図-6 に示す。スタ

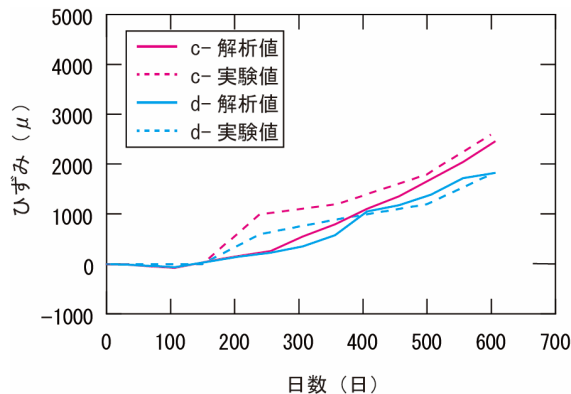
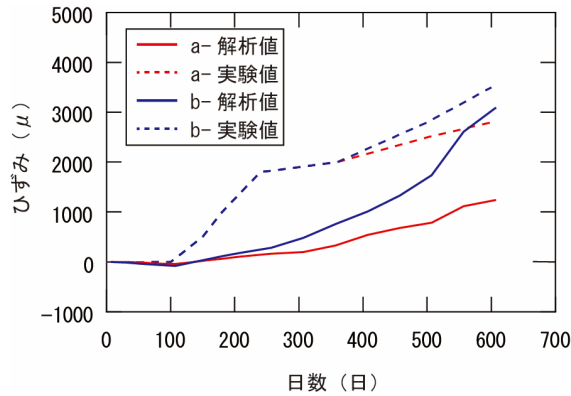


図-6 スターラップひずみ

ーラップひずみは実験と同様に直角、鉛直方向ともに端部から 150mm 付近の 2 か所の平均値とした。c, d に関しては概ね傾向を捉えている一方で、a, b については実験値でひずみの増加が著しい。これは、試験体上面では降雨や日射の影響を直接受けやすいためである。

(4) ひび割れ性状

図-7 に、鉛直方向の内部ひずみが実験のひび割れ観測時と同程度となった時点でのひび割れ図を示す。実験では内部ひずみ 500 μ 発生時にプレストレスが導入されている部材軸方向に沿ったひび割れが確認でき、2000 μ 発生時にはひび割れがさらに増加しているが、解析でも同様のひび割れが確認でき、ひび割れ性状を概ね再現できたと考えられる。

(5) 耐荷性状

軸方向ひび割れが耐荷性状に与える影響を検討するため、曲げ載荷試験の解析を行い、膨張ひずみを導入していない場合 (健全試験体) との比較を行った。載荷材齢は実験が 22 ヶ月、解析が 602 日である。荷重-変位関係を図-8 に示す。実験でも同様に反応性骨材を使用しない試験体 (健全試験体) と、反応性骨材を使用した試験体 (ASR 試験体) に対して載荷試験が実施されているが、最大荷重前に変位計が取り外されている。健全試験体の最大荷重は、実験 (4908kN) と解析 (4622kN) はほぼ対応した。また、実験では ASR 試験体の最大荷重 (4885kN) は、健全とほぼ変わらない結果となった。一方、解析では軸方向に対しても膨張ひずみが導入された

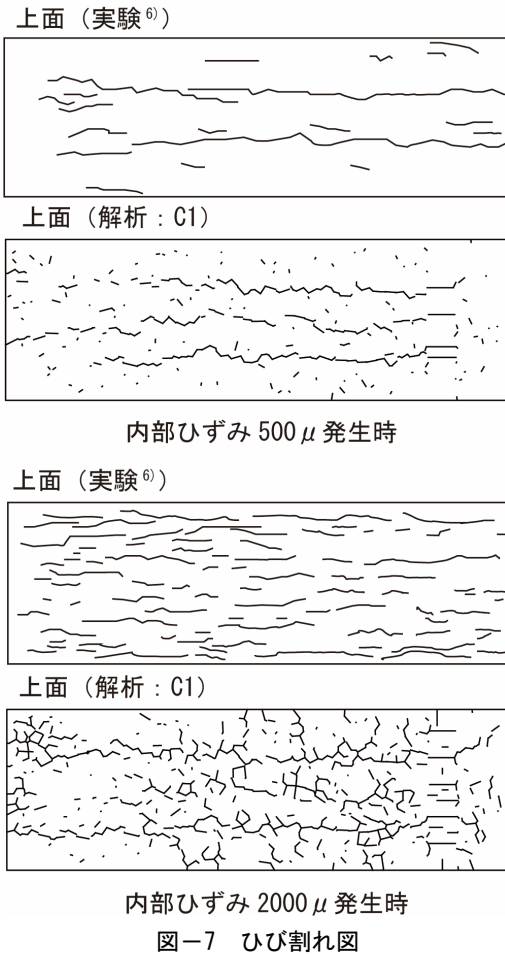


図-7 ひび割れ図

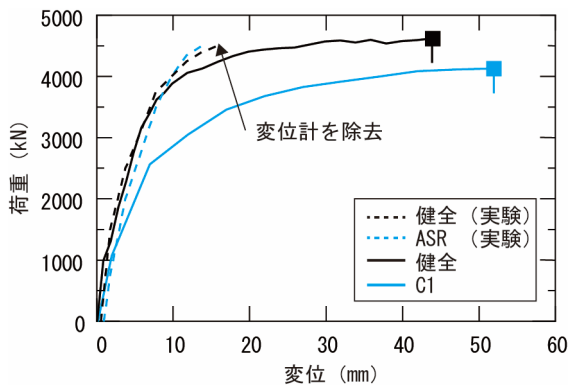


図-8 荷重-変位関係

ことにより、載荷前の時点で PC 鋼材が降伏していたため、ASR 試験体の剛性がかなり小さい結果となっている。しかしながら、健全と同様に上縁コンクリートの圧壊で破壊に至り、ASR 試験体の最大荷重 (4132kN) の低下は比較的小さく、軸方向に発生したひび割れ自体が耐荷性状に与える影響は小さいと考えられる。

4. 膨張範囲の違いがひび割れ性状に与える影響

4.1 解析概要

3章では表面から 100mm より内側の部分 (膨張範囲と非膨張範囲の比が 5:1) に膨張ひずみを導入 (C1) した。本節では、膨張範囲がひび割れ性状に与える影響につい

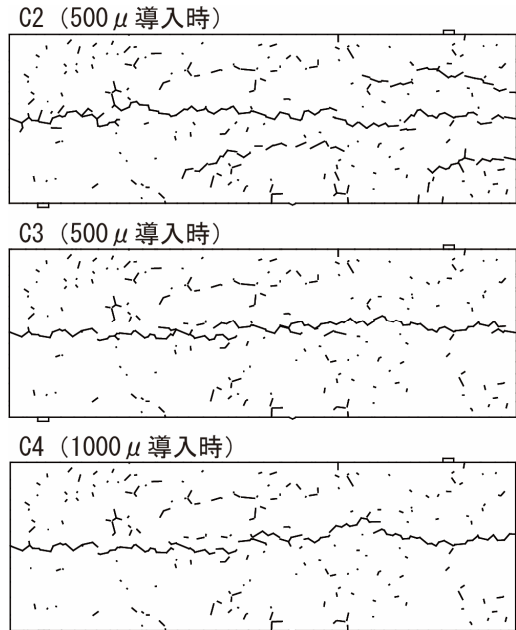


図-9 ひび割れ図 (解析)

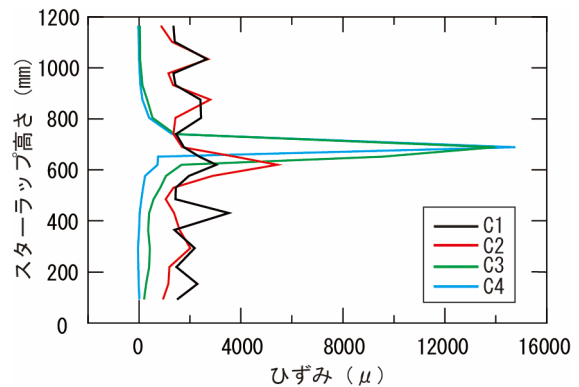


図-10 スターラップ高さ-ひずみ関係

て検討を行うため、図-3 に示すように、膨張範囲と非膨張範囲の比を 3:1 (C2), 1:1 (C3), 1:3 (C4) と変化させて解析を行った。膨張ひずみはいずれも 2000 μ まで導入して検討を行った。

4.2 解析結果

解析より得られた側面のひび割れ図を図-9 に示す。C3, C4 のように膨張範囲が内部に限定される場合には、明確な 1 本の軸方向のひび割れが生じたのに対し、C1 や C2 のように膨張範囲が広い場合には軸方向のひび割れが複数発生する結果となった。これは、2000 μ 導入時のスターラップ高さとの関係 (図-10) に示すように、膨張範囲が内部に限定される場合にはひずみが局所化する傾向にあるのに対し、膨張範囲が広い場合には全体的にひずみが増加するためと考えられる。なお、断面全域と表面付近のみに膨張ひずみを導入した場合には、明確な軸方向のひび割れの発生は確認できなかった。実際の場合でも、乾燥しやすい表面付近より湿度の高い内部で膨張量が大きくなると考えられる。

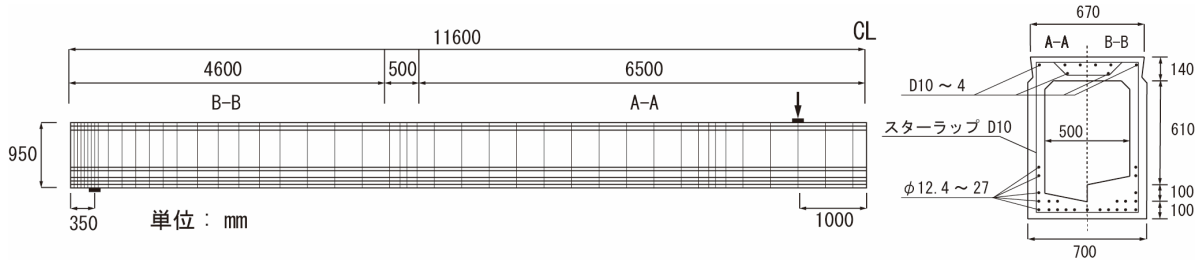


図-11 試験体図

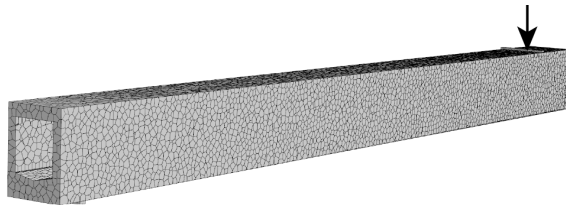


図-12 解析モデル

表-2 材料諸元

コンクリート	圧縮強度	49.0 N/mm ²
	弾性係数	3.9×10 ⁴ N/mm ²
PC 鋼より線 φ 12.4mm	降伏強度	1470 N/mm ²
	破断ひずみ	4.5%
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
軸方向鉄筋 D10	降伏強度	295 N/mm ²
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
有効プレストレス		930 N/mm ²

5. 軸方向ひび割れの生じた PC 中空桁の耐荷性状

3 章および 4 章にて、コンクリート要素間の垂直パネに膨張ひずみを導入することで軸方向ひび割れの再現が可能であることを確認できた。そこで本章では実構造物を対象として、実際に供用され軸方向のひび割れが確認されている PC 中空桁を対象に、コンクリートの変形に伴うひび割れの発生要因の推定と、ひび割れの生じた桁の耐荷性状の把握を試みた。

5.1 解析モデル

解析対象は、図-11 に示す諸元のプレテンション方式 PC 中空桁である。解析モデルを図-12 に示す。計算労力を低減するため、片側半スパンのみをモデル化した。材料特性としてコンクリートは設計値、鋼材は規格値に基づいた表-2 の値を用いた。

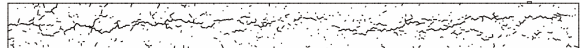
5.2 コンクリートの変形のモデル化

軸方向に発生するひび割れの原因として、ASR による膨張以外に乾燥による収縮が考えられる。ケース A、B は表面付近での乾燥収縮を想定し、ケース A は水分移動解析に基づく乾燥収縮を導入し、ひび割れの再現を試みた。初期のコンクリート内を湿潤状態とし、内空を湿潤状態、コンクリート外部を相対湿度 50% と仮定して、乾燥に伴うコンクリートの含水率の変化に応じて収縮ひずみを与えた。ケース B はコンクリートの表面（せん断補

ケース A (乾燥収縮 273 日目)



ケース B (収縮ひずみ 300μ 導入時)



ケース C (膨張ひずみ 外側 1000μ 導入時)



ケース D (膨張ひずみ 内側 300μ 導入時)

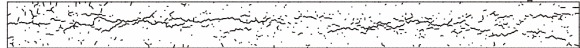


図-13 ウェブ外側表面のひび割れ性状

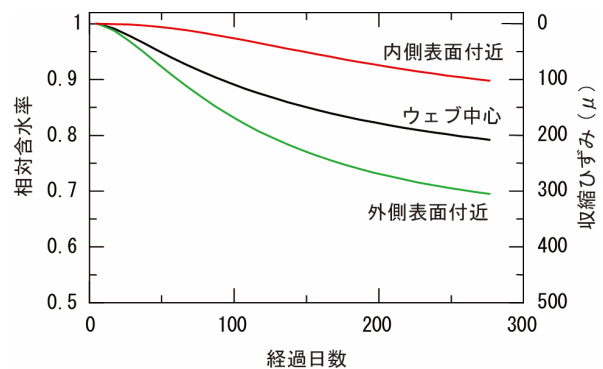


図-14 相対含水率—経過日数関係 (ケース A)

強鉄筋の外側のコンクリート) のみに、ケース A と比較してウェブ内で収縮量の差が大きくなるように一様な収縮ひずみを導入した。ケース C、D はウェブ内で膨張量の差が大きい ASR を想定し、ケース C はコンクリートの表面のみに一様な膨張ひずみを導入したもの、ケース D はコンクリートの内部（せん断補強鉄筋の内側のコンクリート) のみに一様な膨張ひずみを導入したものとし、各ケース 1000μ までひずみを導入し、軸方向のひび割れの再現を試みた。

5.3 ひび割れ性状

各ケースのひずみ導入後のひび割れ性状を図-13 に示す。ケース A では、図-14 に示すようにウェブ外側表面付近で含水率が 70% 近くまで低下しているのに対し、内側表面付近では 90% 程度となっており、含水率の変化に伴う収縮ひずみはウェブ内で分布していることになる。このとき、ウェブ外側表面には 300μ 程度の収縮ひずみが導入されたことになる。図より、ケース A のひび割れ

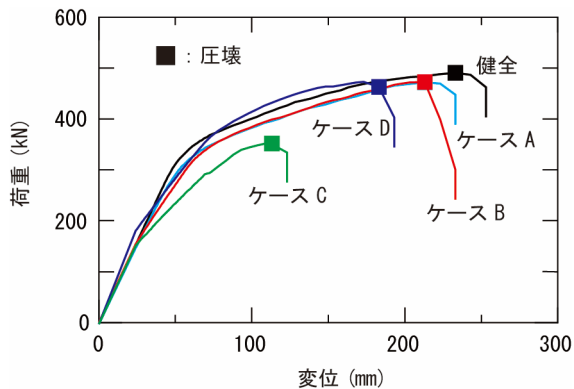


図-15 荷重-変位関係

はウェブ全体に分布する結果となった。一方、桁外側表面付近に強制的に収縮ひずみを導入したケース B では、300 μ 導入時にウェブ外側表面付近において、軸方向に沿ったひび割れの発生が確認された。以上から、表面付近の収縮量が同程度であっても、コンクリート内で収縮量の差が大きい場合に軸方向のひび割れが発生すると考えられる。また、桁の内側表面付近に膨張ひずみを導入したケース D でも、ケース B と同様に300 μ 導入時にウェブ外側表面付近に軸方向のひび割れが発生する結果となった。しかしながら、ケース C では、桁の外側表面付近に膨張ひずみを導入したため内側に凹むような変形を生じ、1000 μ 導入後もウェブ外側表面付近には軸方向のひび割れの発生を確認できなかったが、内側の表面には300 μ 導入時に軸方向のひび割れを確認することができた。これらのことから、プレテンション PC 中空桁で確認されている軸方向のひび割れは、ケース B~D のようにウェブ内で変形量に大きな差がある場合に発生すると考えられる。また、軸方向のひび割れは ASR のみならず、乾燥による収縮でも発生することが確認された。

5.4 耐荷性状

ひび割れが生じた各ケースの桁に対して曲げ載荷を行い、解析より得られた荷重-変位関係を図-15 に示す。ケース A, B および D は、PC 鋼材が降伏した後、上縁コンクリートの圧壊により破壊に至っており、健全な桁と同様の耐荷性状を示した。桁外側に膨張ひずみを導入したケース C は、表面付近のコンクリートに膨張ひずみを導入したために圧壊が早期に生じ、桁のせん断スパン内での圧壊により破壊に至った。

6. まとめ

本研究では、数値解析を用いて、軸方向にひび割れが発生した PC 部材の暴露実験を対象に、軸方向のひび割れの再現性の確認を行ったうえで、実際に供用され軸方向ひび割れの発生が確認されている PC 中空桁を対象に、コンクリートの変形に伴うひび割れの発生要因の推定と、ひび割れの生じた桁の耐荷性状の把握を試みた。得られ

た知見を以下に示す。

- (1) 3次元 RBSM を用いて、屋外暴露試験による ASR 劣化の再現を行った結果、軸方向の膨張特性を除き、軸方向ひび割れの発生や内部の応力状態を概ね再現できていることが確認された。
- (2) 膨張範囲の違いによるひび割れ性状の変化について検討を行った結果、膨張範囲が内部に限定されるほど、ひずみが局所化し明確な軸方向ひび割れが発生することが確認された。
- (3) PC 中空桁に発生している軸方向のひび割れは、コンクリート内部で変形量に大きな差が生じる場合に発生することが確認された。また、鋼材の腐食がない場合は、軸方向のひび割れが耐荷力に与える影響は少ないことが確認された。

参考文献

- 1) 中村宗一郎, 齊藤成彦: PC 鋼材の腐食のモデル化が PC 桁の耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.415-420, 2018
- 2) 玉越隆史, 柴田稔, 木村嘉富, 和田圭仙: アルカリ骨材反応が生じた PC 橋の調査, 診断と対応事例, 土木技術資料 55-7, pp.55-56, 2013
- 3) 齊藤成彦, 高橋良輔, 檜貝勇: 鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.601-611, 2008
- 4) 田所敏弥, 谷村幸裕, 渡辺健, 徳永光宏: グラウトと PC 鋼材の付着特性に着目した鋼材破断後のプレストレスの評価, 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論文集, pp.209-212, 2010
- 5) 小澤泰士, 齊藤成彦, 檜貝勇: 3次元剛体バネモデルによるコンクリートの収縮ひび割れ解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.477-482, 2004
- 6) 井俣俊也, 真鍋英規, 廣井幸夫, 宮川豊章: ASR による劣化を受けた PC 部材の長期性状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1317-1322, 2007
- 7) 廣井幸夫, 大久保孝, 桐川潔, 山本貴士: ASR 劣化した PC 大型試験体の載荷試験報告, 第 22 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.195-198, 2013
- 8) 上園祐太, 幸左賢二, 上原伸郎, 原口政仁: 反応性骨材を使用した大型 PC 桁供試体の劣化性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.706-711, 2013