

鋼材腐食の生じた PC はりの曲げ耐荷性状に関する研究

山梨大学大学院

○神津 和大

山梨大学大学院

正会員 博(工)

斉藤 成彦

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株)

衣笠 泰広

Abstract : This paper presents a basic study on corroded prestressed concrete beams subjected to flexural moment. The post-tensioned prestressed concrete beams were deteriorated by accelerated galvanic corrosion test. Flexural loading tests exhibited flexural strength of the corroded beams was affected by corrosion of metal sheathing and prestressing tendons, respectively. Nonlinear numerical analyses using a rigid body-spring model were performed for evaluating the damage mechanism of corroded prestressed concrete beams. Bond degradation between sheathing and concrete, bond property between prestressing tendon and grouting, local corrosion of tendon, and corrosion cracking should be appropriately modeled in numerical simulations.

Key words : corroded prestressed concrete beam , numerical analysis , flexural failure

1. はじめに

近年、塩害により鋼材腐食の生じたコンクリート構造物に対し、その現有性能を定量的に把握するための健全性評価手法の確立が急務となっている。鉄筋腐食の生じた鉄筋コンクリート（以下、RC）部材に関する研究は精力的に行われており、その耐荷性状は明らかになりつつある¹⁾。しかしながら、プレストレストコンクリート（以下、PC）部材については、使用される鋼材が多様で、シースや定着具といった装置を有することから、その劣化過程が多岐にわたるため、劣化の生じた部材の耐荷機構は複雑となる。既往の研究²⁾により、鋼材腐食の生じた PC 部材の耐荷性能が変化することは確認されているが、腐食した PC 部材に関する研究はまだ少なく、腐食量と部材耐力の関係などの定量的評価には更なる研究が必要である。

そこで本研究では、電食により PC 鋼材を腐食させた PC はり部材の載荷試験を行うとともに、剛体バネモデルに基づく非線形数値解析を実施し、鋼材腐食の生じた PC 部材の曲げ耐荷メカニズムについて基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究に用いた供試体の概要を図-1 に示す。供試体は、上部から 140mm の位置に鋼製シースを配置し、その中に 7 本より PC 鋼線（ $\phi 15.2\text{mm}$ ）1 本を配置したポストテンション方式 PC はりで、部材全長 1800mm、断面 150mm \times 200mm である。また、スターラップを配置するために供試体軸方向に組立のための鉄筋（D6）を 4 本配置し、供試体端部の定着具とともにエポキシ樹脂により絶縁した。スターラップ（D6）は、150mm 間隔で配置し、同様にエポキシ樹脂塗料を施した。コンクリートおよびグラウト内には、電食が進むように 3kg/m^3 の塩を混入させた。使用した材料の諸元は、表-1 の通りである。

2.2 腐食促進試験結果

腐食促進試験の概要を図-2 に、腐食促進試験結果を表-1 に示す。電食は直流電源装置の陽極と PC 鋼材、陰極と銅板を

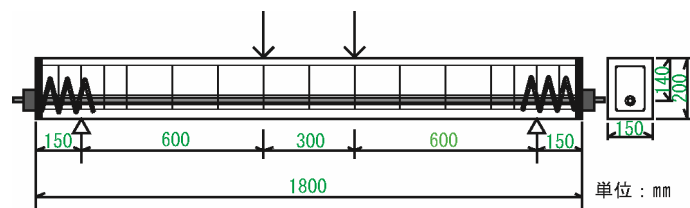


図-1 供試体概要

表-1 材料諸元および腐食促進試験結果

供試体名	電食期間 (day)	PC鋼材平均重量減少率(%)	PC鋼材最大重量減少率(%)	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	グラウト圧縮強度 (N/mm ²)	PC鋼より線	PC鋼より線設計降伏強度 (N/mm ²)	導入プレストレス (kN)
S	0	0	0	52.5	56.7	φ 15.2mm	1600	150
A	55	1.4	2.1	55.6	56.4			
B	16	6.1	10.6	56.3	44.3			

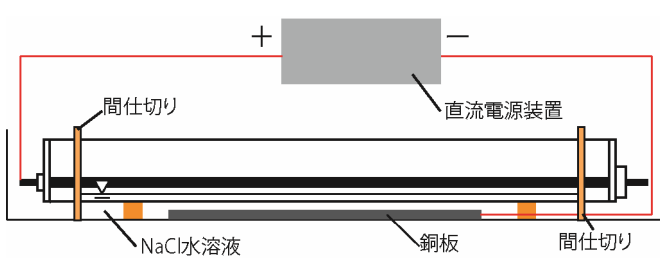


図-2 腐食促進試験概要

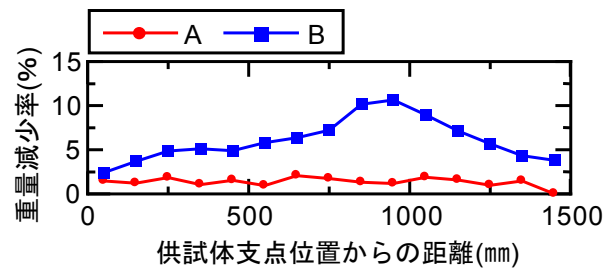


図-3 PC鋼材重量減少率分布

接続し、供試体と銅板を 10%NaCl 水溶液の入った水槽に浸して、通電する方法を用いた。通電電流量は 3A とし、腐食ひび割れからの腐食生成物の流出を極力抑えるため、水位はシーす位置より下になるように調整した。また、通電中、供試体に湿らせた麻袋をかぶせておくことにより、供試体の乾燥防止を図った。供試体 A では、供試体端部の定着具が水につかっていたため、電食が進まずにほぼシーすのみの腐食となった。

一方、供試体 B では、端部に間仕切りを設けたため、短時間で PC 鋼材の腐食が進む結果となった。載荷試験後にはつり出した PC 鋼材より得られた重量減少率分布を図-3 に示す。供試体 A ではシーすに節の欠損や腐食による穴が確認できるほどの激しい腐食が見られたが、鋼材は表面のみの腐食が目立ち、ほぼ健全であった。一方、供試体 B では、供試体 A 同様シーすの激しい腐食に加え、鋼材においてもある程度の腐食が見られた。また、組立筋にもエポキシ樹脂の塗り残しなどから腐食が生じていた。PC 鋼材および組立筋の重量減少率は、はつり出した鋼材を濃度 10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 1 日以上つけたのち、金属ブラシを用いて除錆を行い、その重量を測定することで求めた。

2.3 曲げ載荷試験結果

各供試体の静的載荷試験の結果を表-2 に示す。また、静的載荷試験より得られた荷重-変位関係を図-4 に示す。供試体 S および A はコンクリート上部の圧壊による曲げ破壊を示したが、供試体 B では鋼材の破断音とともに耐力の低下に至り、鋼材の重量減少率が最大となる付近に鋼材破断が集中していた。図より、鋼材が腐食するにつれ、耐力および剛性の低下が生じていることが分かる。腐食させた供試体は、曲げひび割れ発生荷重が健全のもの比べて小さく、曲げひび割れの発生とともに剛性が低下していることが確認できる。供試体 A では、鋼材の腐食が少ないにもかかわらず 2 割ほどの耐力低下が生じた。図-5 に、載荷終了時のひび割れ性状を示す。腐食させた供試体では、組立筋およびシーすの位置に腐食ひび割れが生じている。腐食が進むにつれ、曲げひび割れ間隔が大きくなっており、シーすの腐食に伴いシーすとコンクリート間の付着が劣化していることが確認できる。PC 部材の

表-2 静的荷重試験結果

供試体名	PC鋼材平均重量減少率(%)	最大荷重(kN)	耐力比
S	0	111.8	1.00
A	1.4	92.6	0.83
B	6.1	85.3	0.76

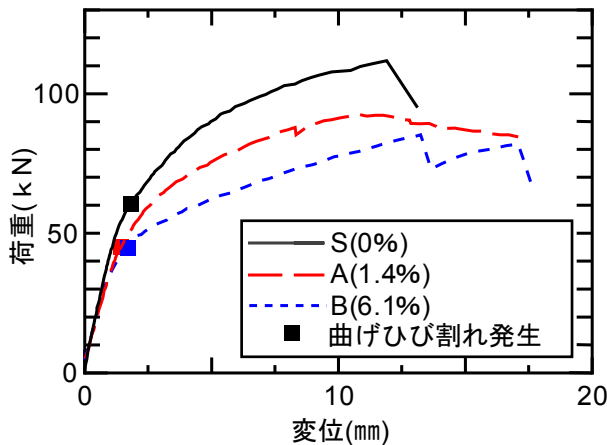


図-4 荷重-変位関係

曲げ耐力算定法において、PC 鋼材の腐食(最大重量減少率 A : 2.1%, B : 10.6%)および組立筋の腐食(最大重量減少率 A : 30%, B : 42%)による断面減少を考慮した耐力低下の影響度を算出すれば表-3 のようになる。プレストレスの減少が生じていないものとするれば、実験値の耐力低下を考慮すると、シースの腐食による付着劣化が耐力低下に及ぼす影響は、12%程度と考えられる。アンボンド鋼材を用いた場合の耐力は、付着のある場合に比べて低下することが知られており³⁾、この結果は妥当なものと考えられる。なお、曲げ耐力の算定には PC 鋼材および組立筋の最大重量減少率を同断面減少率に置き換えることで考慮している。

3. 解析概要

3.1 解析手法

数値解析には、離散型の解析手法である 2 次元剛体バネモデル⁴⁾を用いた。剛体バネモデルは、コンクリートを剛体要素と仮定し、隣接する要素間のバネに材料の非線形特性をモデル化することにより、ひび割れのような材料の不連続現象を比較的容易に表現できることが特徴である(図-6)。鉄筋および PC 鋼材は、はり要素を用いて離散的に扱い、はり要素の節点において付着バネ要素を介してコンクリート剛体要素と接合される。コンクリート、鉄筋、および鉄筋とコンクリート間の付着に関する材料モデルの詳細は、文献⁴⁾を参照されたい。なお、PC 鋼材の応力-ひずみ関係は、本解析対象の最大耐力に与える影響は小さいと考え、鉄筋に用いたものと同様のバイリニア型のモデルとした。実験では、7本より PC 鋼線を 1 本用いているが、解析では、等価な断面積を持つ 1 本のはり要素としてモデル化した。また、解析では、導入プレストレスの 9 割を有効プレストレスとして、予め PC 鋼材

表-3 付着劣化による耐力低下への影響

供試体名	耐力低下率(%)	組立筋の腐食の影響(%)	PC鋼材の腐食の影響(%)	シースの付着劣化の影響(%)
A	17	3.1	1.5	12.4
B	24	4.4	8.1	11.5

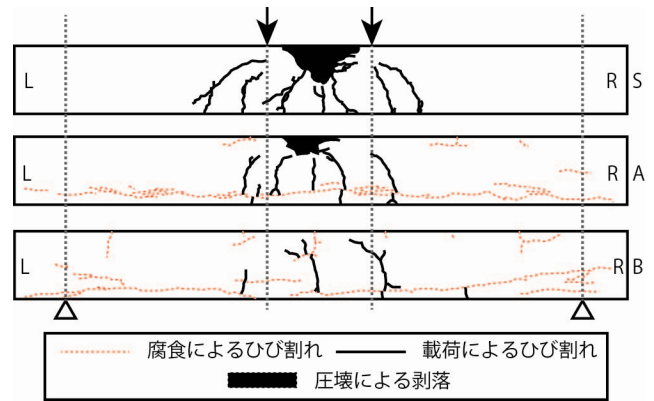


図-5 ひび割れ性状

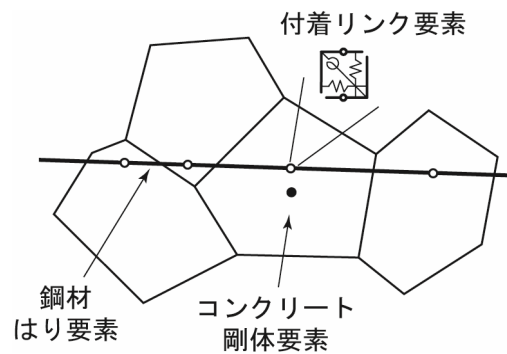


図-6 剛体-バネモデル

表-4 解析結果

	最大荷重 (kN)	耐力比
解析S(健全)	111.9	1.00
解析F(シース腐食考慮)	101.3	0.91
解析A	104.1	0.93
解析B	98.6	0.88

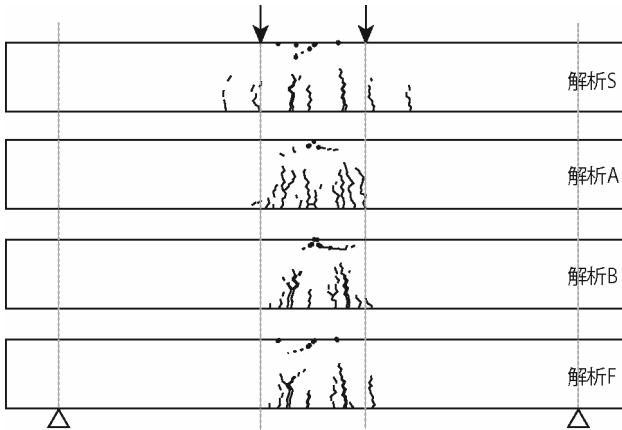


図-9 ひび割れ性状 (解析)

要素に導入した。

3.2 腐食供試体のモデル化

図-7にPCはりの解析モデルを示す。本解析モデルでは、鋼材はり要素とコンクリート要素間の付着要素に異形鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係と同形状の曲線を用いた。ただし、PC鋼材-グラウト間、グラウト-シース間、シース-コンクリート間のうち1つの相互作用しかモデル化できず、残りの作用は完全付着と仮定することになる。PC部材の解析では、この付着応力-すべり関係における付着強度を次のように仮定して解析を行った。健全な供試体の解析では、PC鋼材はり要素とコンクリート要素間の付着要素には、PC鋼より線とグラウト間の付着強度(既往の研究⁵⁾を参考に、鉄筋とコンクリート間の付着強度の8割と仮定)を用い、腐食した供試体については、腐食したシースとコンクリート間の付着強度(腐食鉄筋とコンクリート間の付着特性⁶⁾を参考に、鉄筋とコンクリート間の付着強度の1割と仮定)を用いた。また、鋼材および組立筋の腐食後の断面積に関しては、実験より得られた重量減少率を断面減少率として考慮した。解析は、健全の供試体を解析S、シースとコンクリート間の付着劣化のみを考慮したものを解析F、シースとコンクリート間の付着劣化、PC鋼材および組立筋の腐食を考慮したものをそれぞれ解析A、解析Bとした。解析Aは、実験Aで得られた重量減少率分布を、解析Bは、実験Bで得られた重量減少率分布をPC鋼材の断面積に反映させたものである。なお、解析では、組立筋に沿うように発生した腐食ひび割れを直接的には再現しておらず、組立筋の付着強度を重量減少率に従って低下させる⁹⁾ことで、その影響を間接的に考慮している。

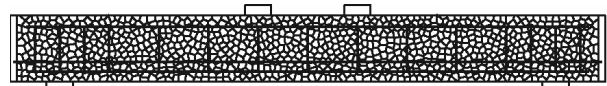


図-7 解析モデル

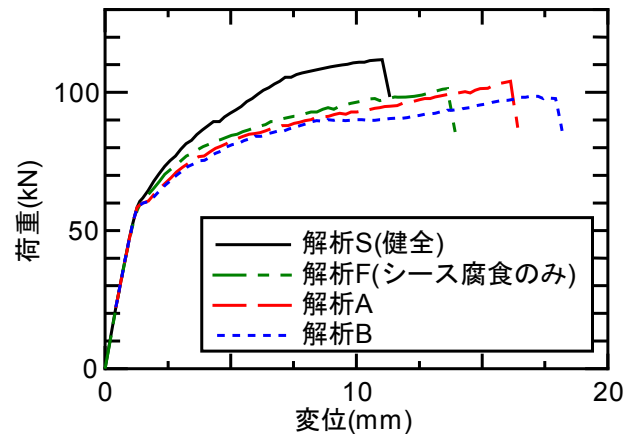


図-8 荷重-変位関係 (全解析結果)

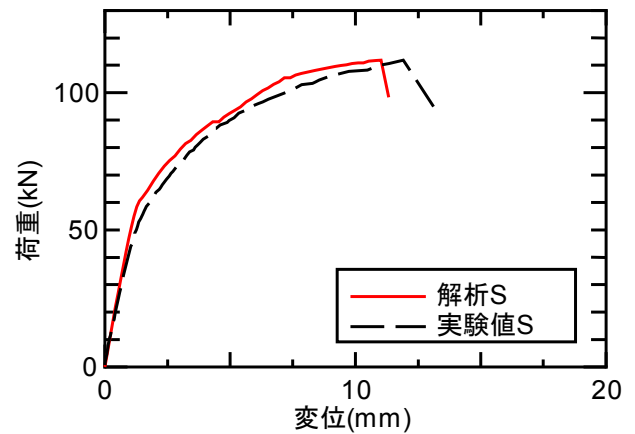


図-10 実験値との比較(解析S)

3.3 解析結果

解析より得られた耐力比および荷重-変位関係をそれぞれ表-4, 図-8 に示す。また, 解析より得られたひび割れ性状を図-9 に示す。解析では, 全供試体でコンクリート上部の圧壊により耐力低下を示した。健全な供試体である解析 S では, 解析より得られた荷重-変位関係は, 実験結果とよく対応している (図-10)。解析 F, 解析 A, および解析 B のひび割れ性状を見ると, シースの腐食による付着劣化を考慮したことにより, ひび割れ分散性が悪くなっており, 実験と同様の傾向を示している。シースの付着劣化のみを考慮した解析 F では, 健全な解析 S に比べて剛性および耐力が低下しており, 耐力低下率は約 10% である。表-3 に示す通り, 実験から推定したシースとコンクリート間の付着劣化の影響は 12% 程度であり, ほぼ妥当な評価であったことが確認できる。

PC 鋼材の最大重量減少率が 2% 程度の解析 A では, PC 鋼材および組立筋の腐食を考慮しているものの, 解析 F とほぼ同様の耐力を示した。図-11 に示す通り, 解析結果は実験結果を耐力, 剛性ともにやや過大評価していることが分かる。解析 A では, PC 鋼材はほとんど腐食しておらず, PC 鋼材の引張応力が減少したとは考え難いことから, 組立筋に沿って発生した腐食ひび割れにより, 供試体下部のコンクリートに作用していたプレストレスが見かけ上減少したことが原因ではないかと考えられる。

図-11 に示すように, PC 鋼材の最大重量減少率が 10% 程度の解析 B では, 解析結果は実験結果を過大評価している。この原因の一つは, 解析 A と同様に, 腐食ひび割れにより供試体下部のコンクリートに作用するプレストレスが減少したことによるものと考えられる。解析 B において, 断面全体に作用するプレストレスを低減させたところ, 図-12 のような結果が得られた。プレストレスが 2~3 割減少すると実験値に近づくが, 断面内のプレストレスの分布など, 今後, より詳細な検討が必要である。

図-13 に示す PC 鋼材の応力増分量を見ると, 腐食した供試体でもひび割れ発生荷重に変化はなく, 全ての供試体がほぼ同様の傾向を示している。

図-14 に, PC 鋼材の軸方向ひずみ分布を示す。実験では供試体 B で PC 鋼材の破断が確認されたが,

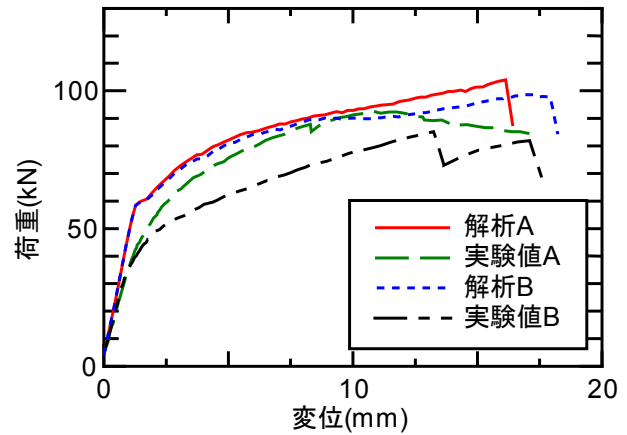


図-11 実験値との比較

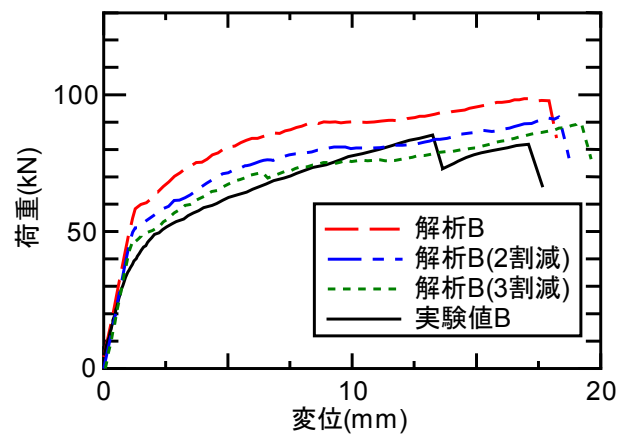


図-12 プレストレス量の影響 (解析 B)

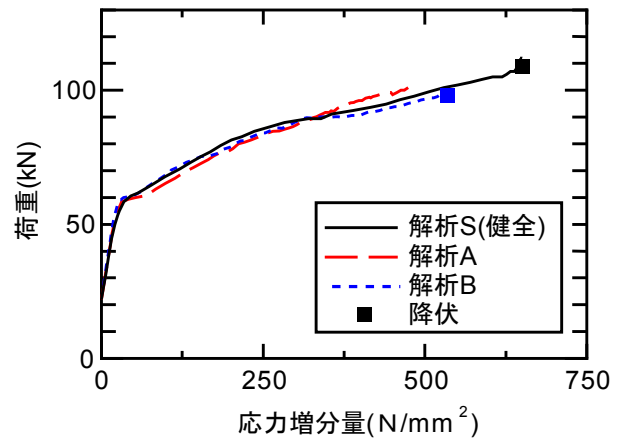


図-13 PC 鋼材の応力増分量

解析では腐食の軸方向分布を考慮しているのにもかかわらず、破断に至るような局所的なひずみの増加は見られなかった。これより、実験では7本よりPC鋼線の腐食が均一に生じていないことが原因であると考えられ、より線ごとの腐食量を忠実にモデル化する必要があることが分かる。また、本解析では、PC鋼材に関してシーースとコンクリート間の付着劣化のみを考慮しているが、局所的な腐食によるより線ごとの破断を再現するには、PC鋼材とグラウト間の付着分布も別途考慮する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、電食により鋼材を腐食させたPCはり部材の実験、および非線形数値解析により、以下のことが明らかになった。

- (1) 電食によりPC鋼材を腐食させたPCはりの静的載荷試験より、シーースの腐食に伴うシーースとコンクリート間の付着劣化、およびPC鋼材の腐食による断面減少によって、耐力および剛性の低下が生じることが確認できた。
- (2) 2次元剛体バネモデルによる非線形数値解析により、健全な場合のPCはり部材の曲げ耐荷性状を精度よく予測することができた。また、鋼材の腐食による付着劣化を考慮することにより、曲げひび割れの分散性の低下を再現することができた。
- (3) 実験および解析により、シーースの腐食に伴うシーースとコンクリート間の付着劣化により、耐力が10%程度低下することが確認された。しかしながら、鋼材腐食の生じた供試体については、解析結果は実験結果を過大評価する傾向を示した。
- (4) 非線形解析により、鋼材腐食の生じたPCはり部材の耐荷性状を精度よく評価するには、PC鋼より線の不均一な腐食状況、シーースとコンクリート間およびPC鋼材とグラウト間の付着性状、腐食ひび割れの影響などを適切にモデル化する必要がある。

謝辞

本研究に用いたPCはり供試体の製作にあたり、平井圭氏（黒沢建設株式会社）のご協力を得ました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ71，2006
- 2) 例えば，中村典昭，睦好宏史，Ha Minh，西岡友樹：塩害によるポステン式PC梁の劣化予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1025-1030，2006
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅲコンクリート橋編）・同解説，1996
- 4) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring networks with random geometry, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.289-303, 1999
- 5) 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
- 6) 斉藤成彦，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

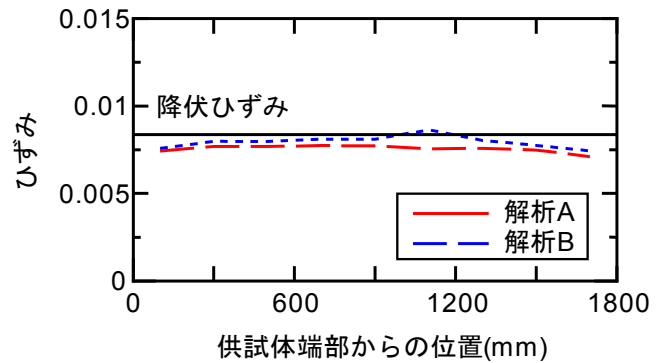


図-14 PC鋼材軸方向ひずみ分布