

# PC 橋の改造技術に関する研究

## — その 3 : PC 部材のはつりの適切性に関する研究 —

中村 定明\*1・濱田 譲\*2・谷口 秀明\*3・中村 雅之\*4

### 1. まえがき

高強度コンクリートを使用し、PC 鋼材によってひび割れを制御した PC 橋は、本来 RC 構造よりも耐久性にすぐれた構造物である。しかし、近年 PC 橋においても、海岸付近での飛来塩分や冬期に散布される凍結防止剤による塩害劣化が顕在化している。PC 鋼材付近まで塩分が浸透している場合は、劣化部分を除去し、適切な材料で補修することが必要となる。そのような大規模な補修を行った PC 橋ではプレストレスの再分配や桁の変形に伴う PC 鋼材の応力変化が無視できなくなることが予想される。これまでの実験および解析<sup>1,2)</sup>では、鉄筋位置まではつりの実績はあるものの、PC 鋼材を完全に露出するような大断面を除去したという報告はほとんどない。また、はつり後の断面補修および外ケーブルによる補強を行った PC 桁についての経時変化および力学挙動についてもほとんど報告されておらず、塩害によって劣化した PC 橋の補修・補強設計においてこれらの知見を得る必要がある。

このような背景より、本稿では PC 鋼材まで塩分が浸透したと想定する PC 桁を対象に、PC 鋼材を完全に露出するまでコンクリートを取り除いた場合の力学挙動を非線形 FEM 解析によりシミュレーションし、実験により検証を行った。また、はつり後の PC 桁は高流動コンクリートによる補修および外ケーブルによる補強を行い、1 年間の暴露試験後曲げ載荷試験を実施した。暴露試験期間中の挙動および曲げ載荷試験によるひび割れおよび部材の挙動についても非線形 FEM 解析を実施し、実験結果との整合性について検証を行った。

### 2. これまでの研究成果の整理

塩害により劣化した PC 桁の挙動を検討した事例は少なく、十分に解明されているとはいえないが、JH 試験研究所（現：高速道路総合技術研究所）とプレレスト・コンクリート建設業協会の共同研究において、約 27 年間供用されたのちに撤去されたポストテンション PC 単純 T 桁（以下、PCT 桁）に及ぼすはつりの影響が検討された<sup>1,2)</sup>。この検討では、撤去した PCT 桁をモデル化し、はつり深さを変化させた場合の残存プレストレスの増加量を 3 次元弾性 FEM 解析により算定し、限界はつり深さについて検討している。また、3 次元弾性 FEM 解析の妥当性を検証するため、撤去

した PCT 桁のコンクリートを実際にはつり取り、PCT 桁にあらかじめ設置しておいたひずみゲージから、はつりに伴うコンクリートの応力変動を計測した。これらの検討結果を整理すると以下のように集約される。

- ① はつりに伴うプレストレスの再分配の影響は FEM 解析により比較的精度よく推定できる。
- ② PCT 桁のはつり範囲には限界がある。典型的な塩害対策を想定した場合、はつり後の PCT 桁のプレストレスは支間中央の下縁部ではつり前の約 1.5 倍となり、道路橋示方書の曲げ応力度の許容値に近い値となった。
- ③ 対象とした PCT 桁でウェブの軸方向鉄筋の裏側までコンクリートをはつり取る場合には、段階的にはつりと断面補修を繰り返すなどの配慮が求められる結果となった。

これらの知見を基に、PC 鋼材を完全に露出するまではつりを行った場合の検討について以下に詳述する。

### 3. はつりによる PC 桁の力学挙動に関する検討

#### 3.1 検討概要

PC 鋼材近傍まで塩分が浸透し、劣化が広い範囲に及ぶ場合、はつりによる断面除去は PC 鋼材が完全に露出するまで実施する必要が生じることがある。この場合、プレストレスの再分配や桁の変形に伴うコンクリートおよび PC 鋼材応力度の変化が無視できなくなる。本検討では、部材寸法が比較的小さく、はつりによる断面除去の影響が鋭敏に表れるプレテンション方式の PC 床版桁（以下、PC 桁）を用いて、PC 鋼材が完全に露出するまでの過程におけるコンクリートおよび PC 鋼材のひずみや PC 桁変形の推移を FEM 解析および試験により求めた。とくに、はつり範囲の限界を見極めることを目的とするため、PC 桁がひび割れを発生する領域まではつり試験および非線形領域までの解析を試みた。試験結果および非線形 FEM 解析結果から、PC 桁の大断面をはつる場合の PC 桁の力学挙動について検討を行った。

#### 3.2 実験概要

##### (1) 実験条件

図 - 1 に解析対象とする PC 桁の断面形状、鉄筋および PC 鋼材配置を示す。対象桁は支間 10 m で、充実断面を有する A 活荷重対応の JIS 桁（AS10 - JIS）である。はつり高

\*1 Sadaaki NAKAMURA : プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*2 Yuzuru HAMADA : プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*3 Hideaki TANIGUCHI : プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*4 Masayuki NAKAMURA : プレストレスト・コンクリート建設業協会

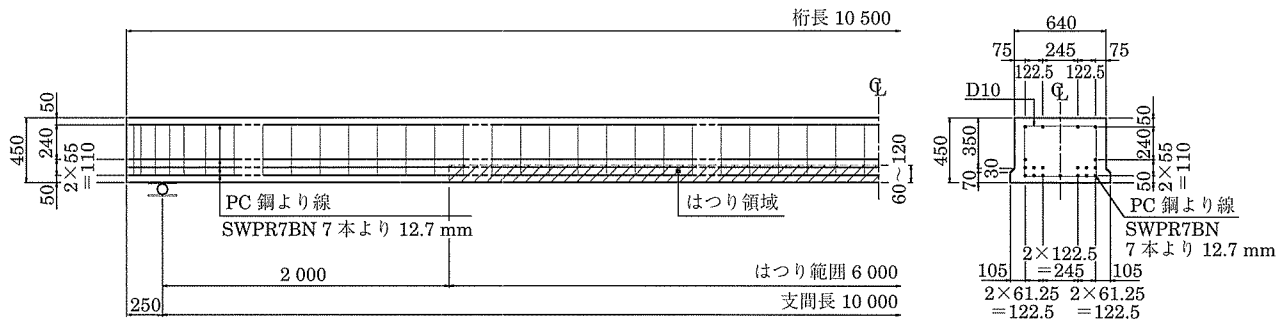


図 - 1 PC 桁寸法および鋼材配置図

さは 2 段目の PC 鋼より線が完全に露出する高さとするため、最大 120 mm とした。また、はつり範囲は、端部の定着破壊およびせん断破壊を起こさせない範囲として、中央部の 6 m と設定した。

(2) 試験方法

図 - 2 にウォータージェットによるはつり試験の手順を示す。はつりは高さ 60 mm、90 mm および 120 mm の 3 段階に分けて行った。90 mm のはつり終了後、荷重 (片側あたり 50 kN) し、120 mm までのはつりを継続して行い、その後除荷した。

写真 - 1 に試験体および機器設置状況、写真 - 2 に 120 mm はつり後の主桁下縁の状況を示す。

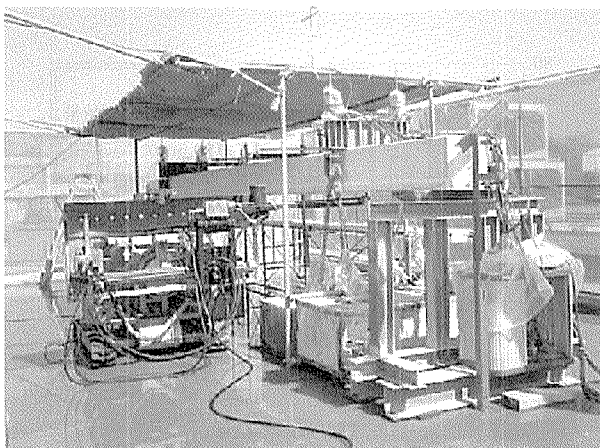


写真 - 1 試験体および機器設置状況

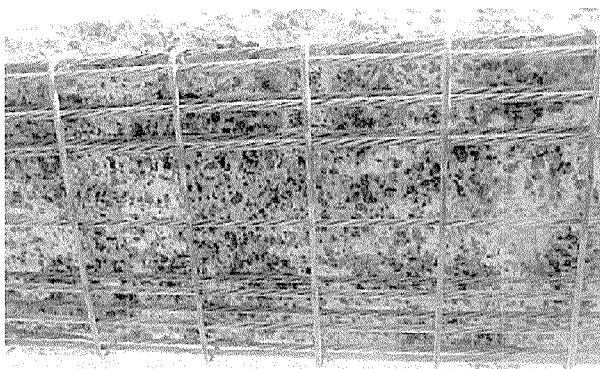


写真 - 2 120 mm はつり後の主桁下縁

はつり高さの実測値は、設計値 60 mm および 120 mm に対して、58 mm および 121 mm でほぼ一致しているが、設計値 90 mm に対しては約 13 mm 小さい 77 mm であった。

3.3 非線形 FEM 解析

(1) 解析コードおよび解析モデル

解析は汎用非線形構造解析システム DIANA Ver. 8.1 を用いた。図 - 3 にメッシュ分割を示す。メッシュの大きさは、ウォータージェットの 1 回 (1 パス) あたりの標準的なはつり高さ 30 mm を基本とした。本解析では、はつりによりひび割れ発生までを想定して材料の非線形を考慮したが、幾何学非線形については考慮していない。また、コンクリートと PC 鋼材の付着については、完全付着モデルとしている。

(2) 材料特性

本解析においては、圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係はバイリニアでモデル化し、破壊基準については Drucker-Prager の破壊基準を用いた。また、引張側コンクリートの応力-ひずみ関係はコンクリート標準示方書の 1/4 モデル、ひび割れは Smeared Crack モデルを適用した。コンクリートの引張強度は、部材寸法および収縮の影響を考慮して、コンクリート標準示方書によって算出した曲げひび割れ強度を用いることとした。

PC 鋼より線の応力-ひずみ関係はトリリニアモデルとした。曲げ荷重試験時のプレストレス力はクリープ・乾燥収縮による減少を考慮して、引張強度の 60 % として解析を行った。

(3) 解析ステップ

解析ステップは、実験で計測された平均はつり高さとして、ステップ 1 : 60 mm はつり → ステップ 2 : 77 mm はつり → ステップ 3 : 荷重 (片側 50 kN) → ステップ 4 : 120 mm はつり → ステップ 5 : 除荷とした。

3.4 はつりが PC 桁の変形挙動に及ぼす影響

(1) 材料試験結果

表 - 1 にコンクリートの材料試験結果を示す。

(2) はつりが PC 桁の力学挙動に及ぼす影響

1) ひび割れ

はつり試験では、ステップ 4 の 50 kN 荷重状態で 120 mm はつった状態ではひび割れの発生は見られず、ステップ 5 の除荷時に主桁上縁に確認された。一方、解析ではステップ 5 の (はつり 120 mm + 除荷) の状態で発生してお

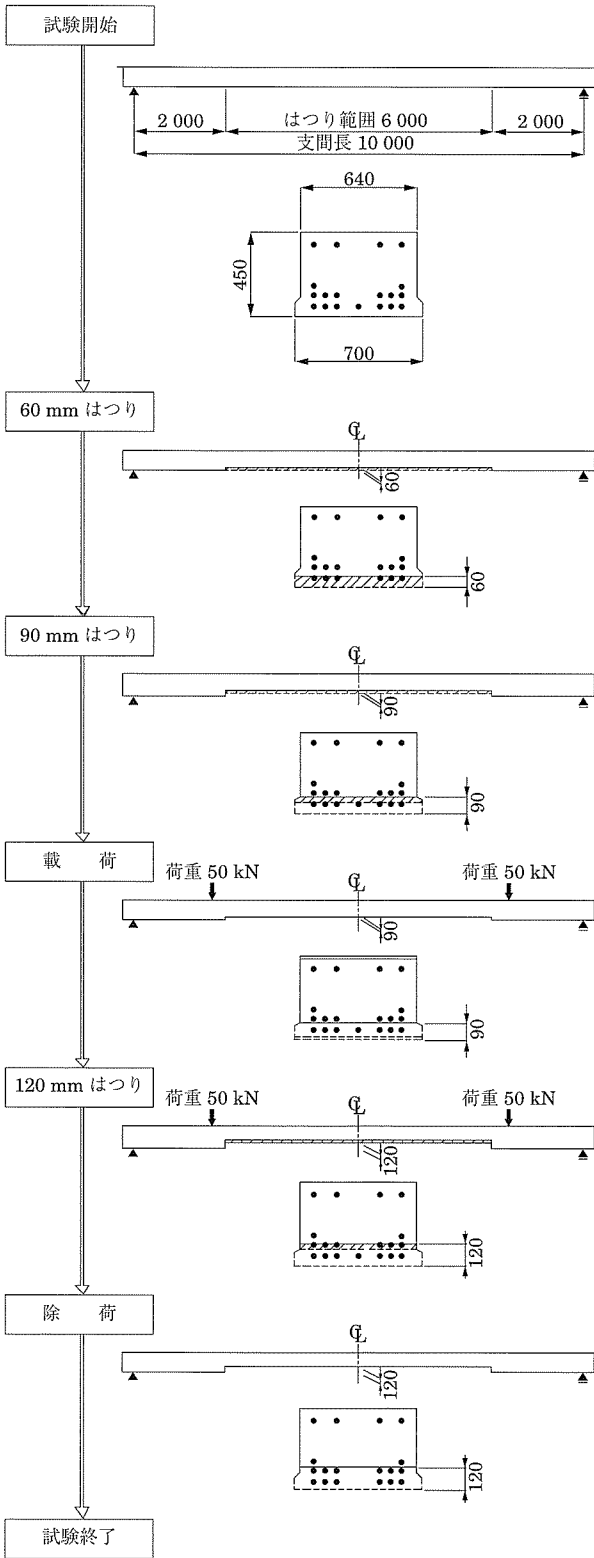


図 - 2 はつり試験手順

り、実験結果を正しくシミュレーションすることができたことが分かる。

2) 主桁鉛直方向変位

図 - 4 にはつり高さに伴う主桁の鉛直変位を示す。この図に見られるように、120 mm はつり完了時では支間中央で約 30 mm の鉛直変位が観測された。はつり高さ 60 mm

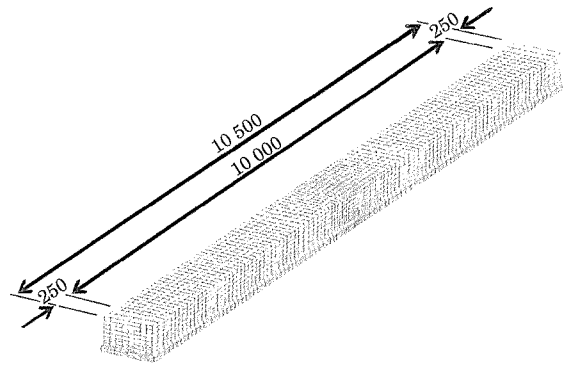


図 - 3 メッシュ分割図

表 - 1 材料試験結果

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
7	48.8	34.7	—
28	57.2	36.8	—
89	64.7	38.4	—
151 (試験時)	65.7	39.9	3.54

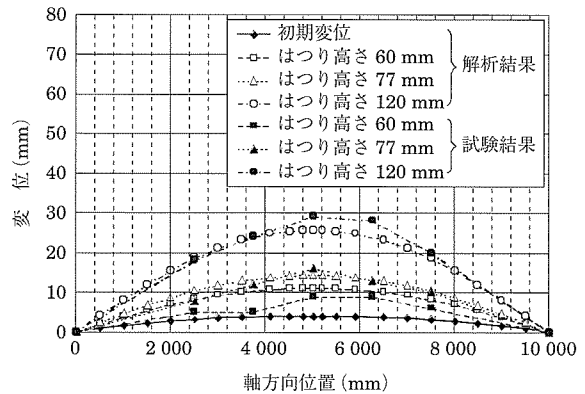


図 - 4 はつり高さと鉛直変位

では試験結果が小さめになっているが、77 mm および 120 mm では解析結果は試験結果と良く一致していることが分かる。

3) コンクリート・PC 鋼材ひずみ

図 - 5 に上縁コンクリート表面ひずみ、図 - 6 に下縁側(下から3段目)のPC 鋼材ひずみの解析値と試験結果との比較を示す。コンクリートひずみについては、解析値と試験結果は、高い精度で一致していることが分かる。また、PC 鋼材ひずみに関しては、試験結果は解析値より大きめの値を示している。この原因としては、解析ではコンクリートとPC 鋼材の付着を完全付着と仮定したが、試験では両者のすべりが生じた可能性が高い。

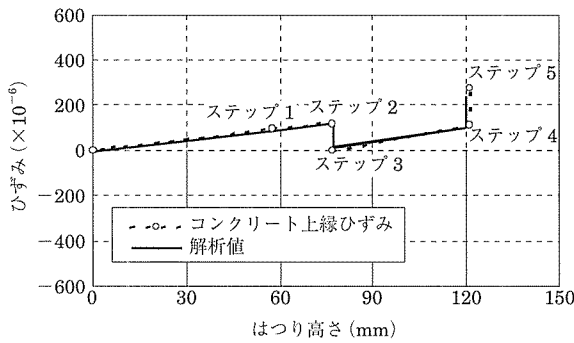


図-5 コンクリート表面ひずみ (支間中央断面)

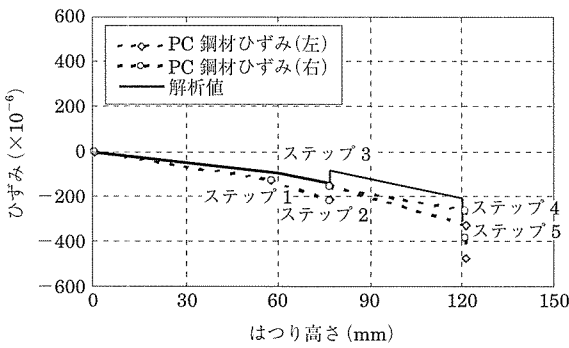


図-6 PC 鋼材ひずみ (支間中央断面)

#### 4. 断面補修および外ケーブル補強を実施した PC 桁の経時変化および力学挙動に関する検討

##### 4.1 検討概要

塩害によって劣化した PC 桁の大断面を補修する方法としては、プレストレスを有効に利用するため、有効な断面補修材としてヤング係数が母材コンクリートと同等以上で収縮量を低減させた高流動コンクリートが考えられる。本委員会では、断面補修材としての高流動コンクリートの材料特性および施工性について別途検討を行っている<sup>3)</sup>。ここでは、大断面を除去した PC 桁を高流動コンクリートにより断面補修と外ケーブル補強した後に実施した1年間の暴露試験および曲げ載荷試験による PC 桁の力学挙動についての検討結果について詳述する。

##### 4.2 実験概要

###### (1) 実験条件

実験に使用した PC 桁は、3.2 の JIS 桁 (AS10 - JIS) と同じである。はつりの目標高さは、先の実験と同じ 120 mm であるが、はつり範囲については、① はつり範囲の限界値 (6 m) は検討済みであること、および ② 外ケーブルの偏向装置および載荷試験での載荷幅 (3 m) 以内に収めること、を考慮して 2 m とした。また、本検討では、桁下縁より塩害劣化したことを模擬するために断面補修部に配置される最下段の PC 鋼より線の一部 (5 本) を切断した。図-7 にはつり高さ、はつり範囲および切断する PC 鋼より線を示す。

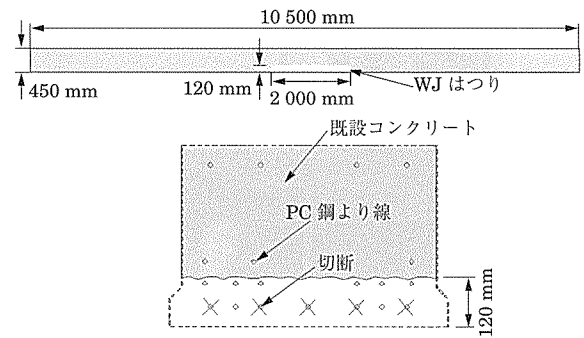


図-7 断面補修および PC 鋼より線切断箇所

はつり後の断面補修材には、充てん性および母材コンクリートとの一体性を考慮して高流動コンクリートを使用した<sup>3)</sup>。断面補修後には、外ケーブルによる補強を行った。外ケーブルは、φ 11.1 mm PC 鋼より線を片側 7 本の合計 14 本配置した。耐力および断面補修部の下縁応力が断面補修前と同等程度まで回復することができるように、事前解析を実施して片側 490 kN の緊張力を導入した。また、偏向具にはナイロン樹脂を使用し、鋼製と比較して外ケーブルの摩擦を小さくする構造とした。

本実験では、補修・補強を行っていない健全な試験体 (Case 1)、断面補修および外ケーブルによって補強した試験体 (Case 2) の 2 種類を比較した。

##### (2) 試験方法

PC 桁製作から曲げ載荷試験までの経過日数および母材コンクリートと断面補修材の材齢を表-2 に示す。補修・補強を行う試験体は、製作から1年以上経過した試験体を用いることとした。断面補修を実施してから、写真-3 の状態で1年間の暴露試験を実施した。その後、図-8 に示すように支間長 10.0 m、載荷スパンを 3.0 m とし、断面補修部より外側に載荷位置を設定し、曲げ載荷試験を実施した。

表-2 母材および断面補修材の材齢

	材齢 (日)	
	母材コンクリート	断面補修材
PC 桁製作	0	—
WJ はつり	440	—
断面補修	447	0
外ケーブル補強	477	30
曲げ載荷試験	812	365

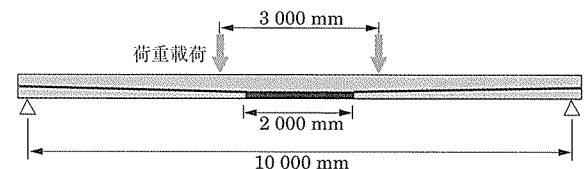


図-8 曲げ載荷試験

##### 4.3 非線形 FEM 解析

###### (1) 構造解析モデル

図-9 に構造解析モデルを示す。内ケーブルは埋込み鉄

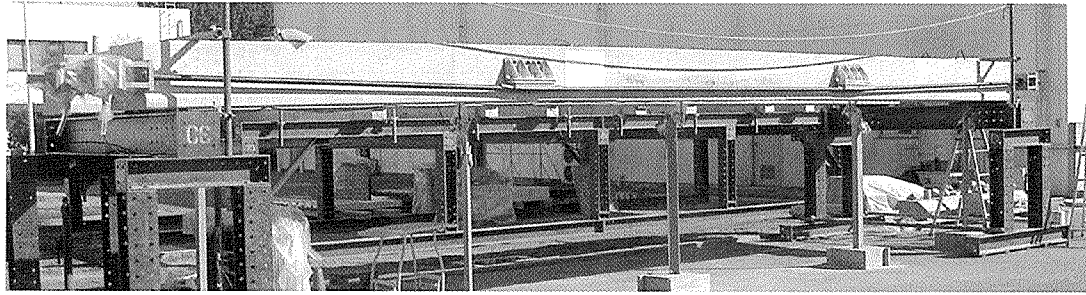


写真-3 暴露状況

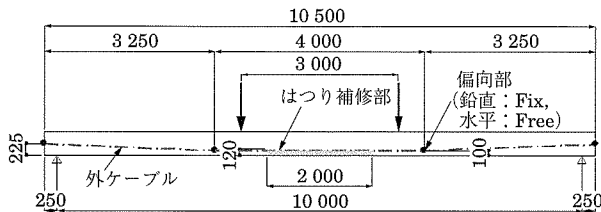


図-9 構造解析モデル

筋要素とし、コンクリートと完全付着モデルとした。一方、外ケーブルはトラス要素でモデル化した。偏向部の拘束条件は、鉛直方向に固定、水平方向には自由とした。解析は、PC 桁自重、PC 鋼材緊張、ウォータージェットによるはつり、断面補修、外ケーブル緊張、クリープ・収縮による経時変化および曲げ載荷試験の状態を非線形 FEM 解析によってシミュレーションした。ここで、解析でははつり高さは、実測の平均高さである 141 mm とした。

(2) 材料特性

コンクリートの圧縮、引張およびびび割れモデル、また PC 鋼より線の応力ひずみ特性は 3.3 と同じとした。材齢に伴う母材コンクリートおよび断面補修材の収縮度およびクリープ係数はコンクリート標準示方書によって算出した。

4.4 断面補修および外ケーブル補強した PC 桁のクリープ・収縮による経時変化

Case 2 のウォータージェットによるはつり深さは、平均で 141 mm であった。

支間中央における上縁から 50 mm の母材コンクリートおよび下縁から 77 mm 断面補修材のひずみについて、断面補修直後を初期値としたときの長期挙動と非線形 FEM 解析

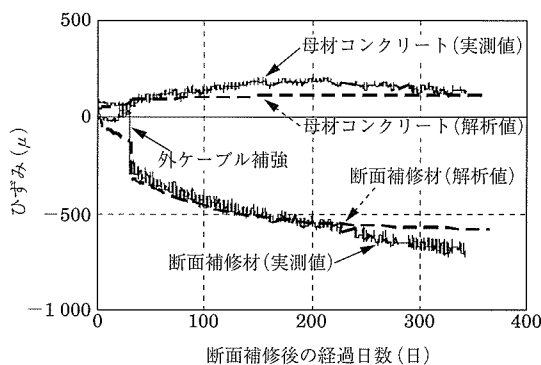


図-10 コンクリートひずみの経時変化

結果を、図-10 に示す。また、図-11 に断面補修部の最下段の PC 鋼より線ひずみ、図-12 に外ケーブル緊張前を初期値としたときのたわみの計測値と解析結果を示すが、良く整合していることが分かる。図-13 に中央断面の試験体製作時から暴露試験後の応力分布を示す。断面補修後に

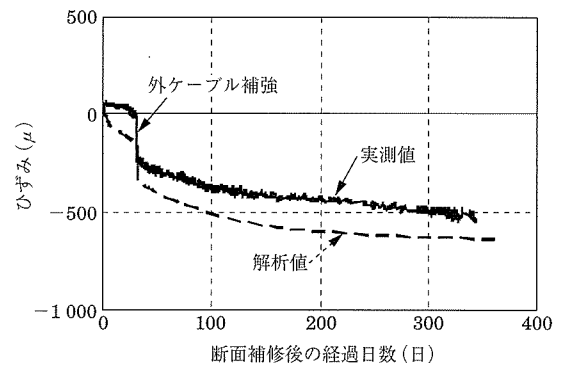


図-11 PC 鋼より線の経時変化

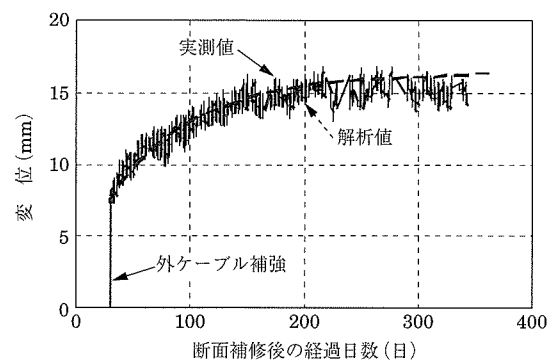


図-12 変位の経時変化

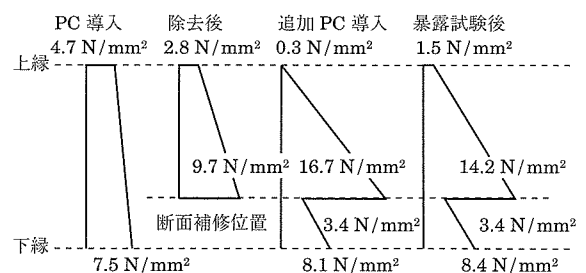


図-13 中央断面応力分布

プレストレスを導入した状態では、上縁で 0.3 N/mm<sup>2</sup>、下縁で 8.1 N/mm<sup>2</sup>であったが、曲げ載荷試験時には、上縁で 1.5 N/mm<sup>2</sup>、下縁で 8.4 N/mm<sup>2</sup>の応力分布になったと推定される。

4.5 断面補修および外ケーブル補強した PC 桁の曲げ載荷試験

曲げ載荷試験時のコンクリートの材料特性を表 - 3 に示す。断面補修材の圧縮強度は、母材コンクリートの 125 % 程度でありヤング係数はほぼ同程度であった。

表 - 3 材料試験結果 (曲げ載荷試験時)

コンクリートの種類	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
母材コンクリート	812	73.6	41.6	0.21
断面補修材	365	92.0	41.9	0.20

Case 1 の無補修・無補強の試験体と Case 2 の断面補修および外ケーブルによる補強を行った試験体について、載荷荷重と中央たわみの関係を図 - 14 に示す。ひび割れ発生荷重は Case 1 で 175 kN、Case 2 で 170 kN と同程度であった。一方、解析によるひび割れ発生荷重は 160 kN であり精度良く推定できている。その後のたわみ挙動も Case 1 と Case 2 では大差なく、残留変位においても同等程度であることから断面補修前の PC 桁と同程度の性能まで回復していることが分かる。また、解析結果においても、良く整合性がとれていることが分かる。

中央断面における載荷荷重と圧縮縁コンクリートひずみとの関係を図 - 15、最下段の PC 鋼より線ひずみとの関係を図 - 16 に示す。本実験では、Case 1 と Case 2 においても同程度のひずみ挙動を示す結果となった。また、解析結果は、コンクリートのひずみと整合性がとれていることが分かる。PC 鋼より線については、ひび割れ発生までは解析値と良く一致しているが、それ以後は誤差が生じている。これは、PC 鋼より線とコンクリートを完全付着モデルと仮定していることが要因と考えられ、今後の課題である。

ひび割れ図を図 - 17 に、下面の総ひび割れ幅と荷重の関係を図 - 18、下面のひび割れ本数および平均ひび割れ間隔を表 - 4 に示す。これらの結果から、ひび割れ本数、ひび割れ間隔および総ひび割れ幅は、Case 2 の断面補修した桁

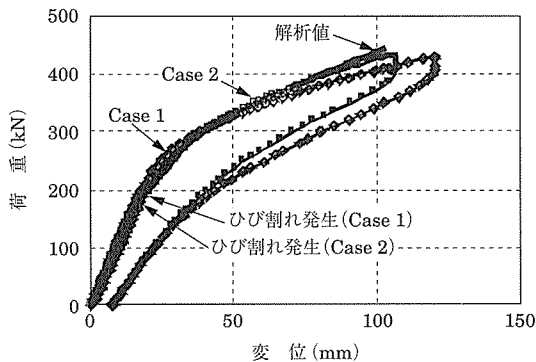


図 - 14 中央たわみ

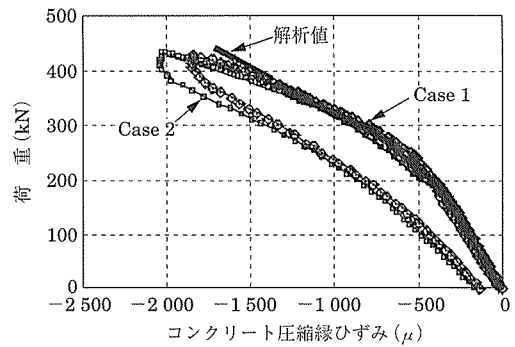


図 - 15 圧縮縁コンクリートひずみ

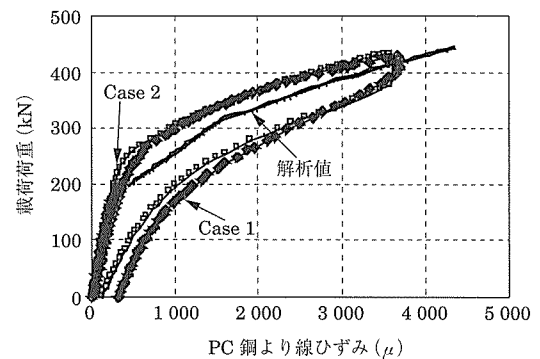


図 - 16 最下段 PC 鋼より線ひずみ

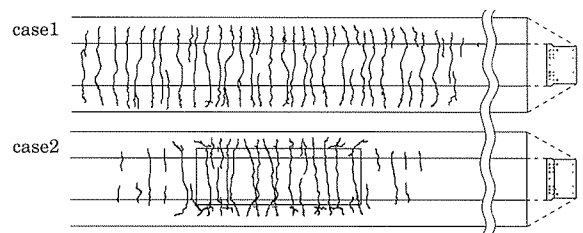


図 - 17 ひび割れ図

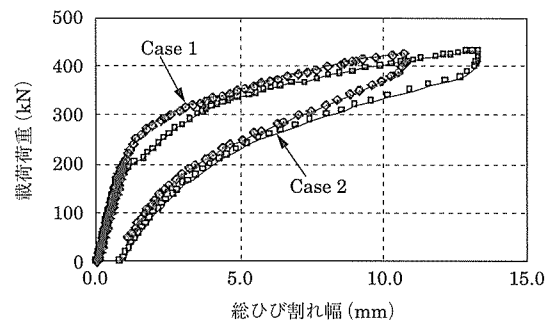


図 - 18 総ひび割れ幅

表 - 4 ひび割れ本数および間隔

試験体種類	ひび割れ本数 (本)	ひび割れ間隔 (mm)
Case 1	12	167
Case 2	11	182

が大きくなっている。しかし、ひび割れの分散性や性状に大きな差は見られないことから、本試験に使用した補修・補強方法は、PC 桁の性能を低下させる結果には至らないことが分かる。

また、断面補修を実施した場合に、打継目における付着切れが一般的には懸念される。本実験では、事前試験<sup>2)</sup>において母材コンクリートと断面補修材の間には高い付着性能を有していることを確認している。その結果、曲げ載荷試験において、打継目にひび割れが生じなかったのは、母材コンクリートと断面補修材の付着強度が断面補修材の曲げひび割れ強度より大きかったことが考えられる。水平打継目については、曲げひび割れが水平打継目まで進展した箇所では、打継目に沿ってクラックが発生したが、図 - 19 に示す中央断面におけるひずみ分布は最大荷重時近傍までほぼ直線であることから一体性は損なわれていないと考えられる。

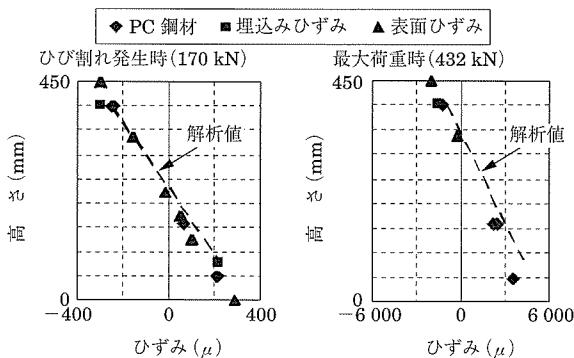


図 - 19 ひずみ分布 (中央断面)

## 5. ま と め

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① PC 鋼より線とコンクリートの付着モデルなどの残された課題はあるが、材料特性およびはつりの状態を考慮した非線形 FEM 解析は大断面をはつる場合の PC 桁を精度よく推定することが可能である。
- ② 断面補修部の収縮およびクリープの特性を適切に把握することができれば、PC 桁の経時変化を非線形 FEM 解析で比較的精度よく推定することが可能である。
- ③ 本試験で断面補修および外ケーブル補強は、健全桁と比較してたわみひび割れ性状に大差なく、健全桁と同程度の性能に回復することができた。
- ④ 劣化した PC 桁を補修・補強の評価する方法として非線形 FEM 解析は、有効な方法であることが検証された。

### 参考文献

- 1) 長田光司, 野島昭二, 佐藤正明, 濱田譲: PC 橋の補修・補強に関する取り組み, プレストレストコンクリート, Vol.47, No.2, pp.87-92, 2005.3
- 2) 長田光司, 野島昭二, 佐藤正明, 藤岡篤史: 撤去桁を用いた断面補修工法のはつり影響度に関する実験的検討, 第 14 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.603-606, 2005.11
- 3) 谷口秀明, 渡辺博志, 手塚正道, 藤田学, 久田真: PC 橋の大規模な断面補修を対象とした高流動コンクリートに関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 6 巻, pp.209-216, 2006.10

【2007 年 10 月 31 日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

# 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準

頒布価格：会員特価 4,000 円 (送料 500 円)

：非会員価格 4,725 円 (送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
技報堂出版