

## 外ケーブル補強効果が評価可能な解析手法の開発に関する研究

EC19003 浅野 陽平

### 1. 序論

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎えるなか、さまざまな劣化要因による損傷事例が報告され、劣化した既設 PC 橋の残存性能評価手法および補修補強後の性能評価手法の確立が求められている<sup>1)</sup>。劣化した既設 PC 橋の耐荷性能を回復させる手法には、外ケーブル工法が効果的で多用されている。しかしながら、外ケーブル補強による補強効果に関する知見は、健全な PC 桁に対する研究<sup>2)</sup>によるものが多く、また PC 鋼材が多数破断した PC 桁では補強効果が得られないとの報告<sup>3)</sup>もある。すなわち、劣化した PC 構造物では外ケーブル補強効果が十分に検証されていない。そこで本研究では、将来的に劣化した PC 桁に対する外ケーブル補強効果を数値解析的に評価するために、外ケーブル補強効果を予測できる解析手法の構築を目的とした。具体的には、外ケーブルに緊張力を導入する手法を構築し、要素分割や境界条件が導入プレストレス量に及ぼす影響を評価するとともに、健全な桁を対象に外ケーブル補強が耐荷性能に及ぼす効果を数値解析的に評価した。

### 2. 解析概要

#### 2.1 外ケーブル要素のモデル化と緊張力の導入手法

図-1 に本研究における外ケーブル要素のモデル化手法の概念図を示す。一般に外ケーブル要素内の応力状態は一様であるため、モデル化にあたっては偏向ごとに 1 要素で良いと考えられる。しかしながら、外ケーブル補強後に、外ケーブルに腐食などの何らかの変状が生じた場合、応力の再分配などを再現するには、1 要素でのモデル化では不都合である。また、汎用プリソフトでは、棒要素やはり要素の要素分割の際に、これら線要素が立体要素通過するごとに節点を設け、1 本の鉄筋などを複数の要素に分割する機能が備わっている。そこで本研究では、外ケーブル要素のモデル化にあたり、図-1 に示すように、補強対象となる桁周囲に剛性の低い空間要素を設けることで、外ケーブルを複数の要素でモデル化した。これにより、図-1 下に示すように、空間要素の描画を削除すると、内ケーブルと同様に外ケーブル要素をモデル化できることを確認した。外ケーブル要素への緊張力導入は、図-2 に示すように外ケーブル要素の端節点に直接荷重を作用することにより実施した。その際、桁要素などが剛体変位しないように、荷重を作用させる外ケーブル要素節点と同高さ位置の定着部要素の節点を変位拘束することで、反力を確保した。所定の緊張力を作用させたのち、外ケーブル要素と定着部要素間の付着を剛とすることで定着させ、その後緊張力を除荷した。最後に、力の釣合いが満足されたことを確認したのち、反力を確保するために変位拘束した節点の拘束を解除した。

上記のように外ケーブル要素や緊張力の導入を実施するとき、図-2 に示すように、空間要素の要素分割に応じて定着部の要素分割も粗となるので、反力を確保する際に変位拘束する節点が桁要素の構成節点となりえる。要素分割はユーザーの選択によるので、このような要

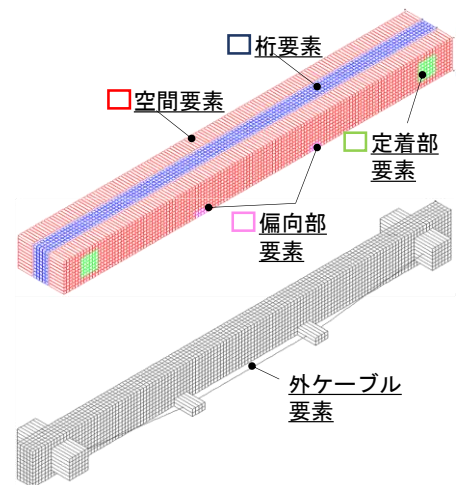


図-1 解析モデルの概要

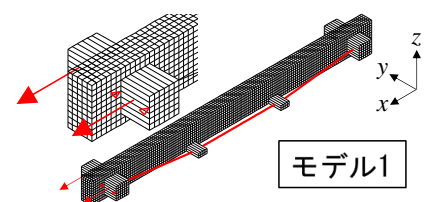


図-2 緊張力の導入

素分割でも適切な解がえられるのか、また、剛性の低い空間要素が複数存在しても適切な解が得られるのかを確認するために、図-2 に示す解析モデルに加えて、図-3 に示すように空間要素部を細かく要素分割した解析モデルについても同様な緊張解析を実施することで、解析手法の妥当性の検討を行った。

## 2.2 解析対象の概要

本研究では外ケーブルの付着を表現するために研究室で開発する付着モデルを使用した。実橋での外ケーブル補強工を再現したモデルの寸法を図-4 に示す。この解析では、橋梁を模した断面  $250 \times 500 \text{mm}$  で支間  $6800 \text{mm}$  の PC 桁を使用して外ケーブル補強のモデル化を断面  $300 \times 500 \text{mm}$  の断面で両側面に剛性の低い空間要素を設け、 $300 \times 300 \text{mm}$  の定着部と  $200 \times 100 \text{mm}$  の偏向部を除き削除することによって外ケーブル補強をモデル化した。プレストレスの導入による固定位置が一要素だった場合に結果に変化をもたらす恐れがあるため、それを避けるために今回は定着部をモデル 1,2,3 とし 1,3,5 分割に分けて比較することにする。緊張力の導入、除荷、境界条件の変更と step を分けて解析を回すことによってひずみを算出し数値を元にグラフをそれぞれ作る。そこから 3 つのモデルのひずみ・応力結果に差がないことを確かめる。健全な桁を対象に外ケーブル補強が耐荷性能に及ぼす効果を数値解析的に評価するとともに解析が正常に行われたか手計算による実数値と比較することによって本解析手法での妥当性や改善点などを検討する。

## 3. 解析結果

### 3.1 引張におけるひずみ変化

各ステップでのひずみ変化量を解析によって算出。要素分割モデルごとのプレストレス導入後、定着と除荷時のひずみ変化量を図-5 に示す。左が定着で右が除荷での外ケーブルにおけるひずみ変化量であるが  $6500 \text{mm}$  の位置でひずみが急激に減少したのは引張した外ケーブルの露出した部分を切断したことにより切断面を外ケーブルがすべったためである。 $0.0028$  で横ばいになっているが  $2300 \text{mm}$  と  $4500 \text{mm}$  の位置で  $0.0002$  ほど減少している。外ケーブル補強で偏向装置により図-4 のように外ケーブルが曲がっているためその分引張に対しての伸びが少なかったからだと考えられる。本研究では要素分割を 3 つのパターンに分けて解析を行ったが全てのパターンにおいて近似したデータを算出することができた。緊張力を加えた際のコンクリートの応力を上面と下面でそれぞれ数値化した結果を図-6 に示す。外ケーブルのひずみグラフと同じようにコンクリートの応力と位置関係をグラフに表示した。

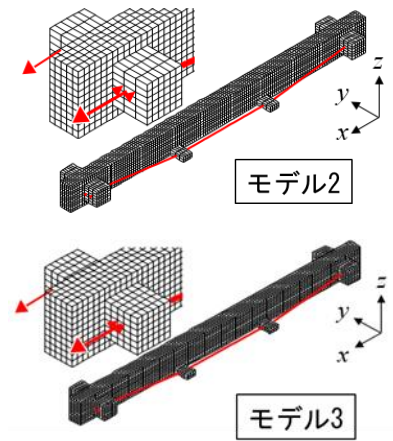


図-3 要素分割モデル

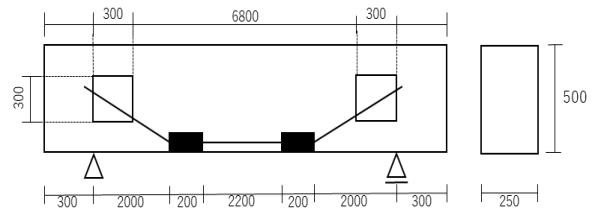


図-4 外ケーブル補強寸法図

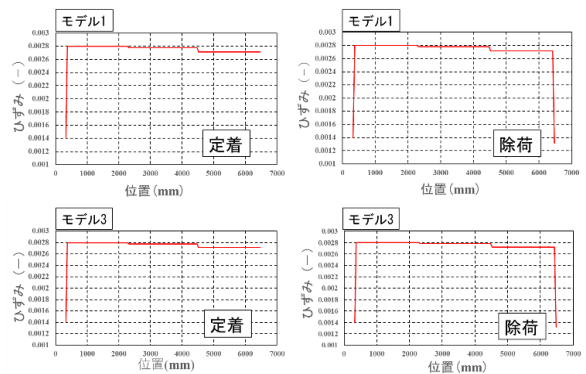


図-5 外ケーブルひずみ分布

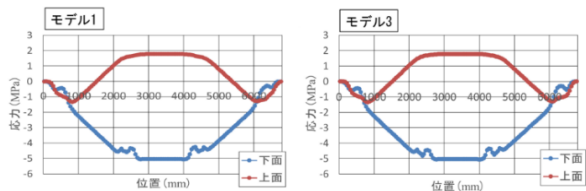


図-6 コンクリート応力分布

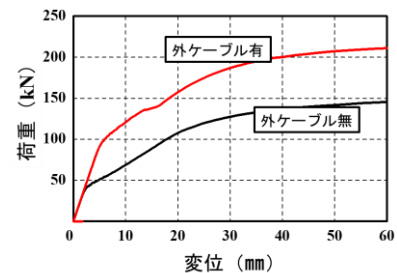


図-7 荷重変位関係図

3つのモデルにおいてどの引張力導入でも上面と下面は位置軸方向に対称になるようなグラフになったため解析結果として正しいと言える。しかし偏向部で下面の応力に変化が見られた。

断面高さにおける手計算でのひずみ理論値と解析によって算出したひずみを出した。理論値は475mmと25mmで59.8466, -168.068, 解析値は59.7886, -167.865であり、理論値と解析値にはほぼずれがなかったことからこの解析結果は正しいと言える。

### 3.2 荷重によるひずみ変化

外ケーブルの有無による荷重変位関係を図-7に示す。荷重は200kNで緩やかな曲線になっており外ケーブル有の耐荷性能が外ケーブル無しより高いことがわかる。

外ケーブル補強の有無によるひずみ変化を色で表しものを図-8に示す。外ケーブル補強の有無でひずみに差がでており外ケーブル有のほうが、ひずみが小さく耐荷性能が上がっていることがわかる。ひび割れを図-9に示す。上2つの最大荷重とした2つの100kNの荷重どちらもひび割れが外ケーブル無のほうが多く入っていることから耐荷性能が高くなっていることがわかる。しかし外ケーブル有の上図を見てみるとひび割れが発生していない場所が2箇所存在する。ここには外ケーブル補強をするにあたって設けた偏向装置があり、コンクリートとの接合面でずれが生じたと考えられる。

### 3.3 荷重による外ケーブル補強偏向部の変形

図-10には最大荷重を加えた後のコンクリートの変形について示す。荷重を加えたことにより偏向部との接合面で変形が起き、鉄筋に伸びが生じなかった。この結果から定着部と偏向部に奥行き方向に鉄筋を差し込むことや接合面を広げることで防げると考えられる。

## 4. 結論

本研究では空間要素部を要素分割した解析モデルについての緊張解析を実施することで、解析手法の妥当性の検討を行ったがどの要素数でも同じような結果が得られたため解析結果として妥当だったと言える。しかし荷重を加えた際に外ケーブル補強の偏向部が変形してしまったことにより正しいひび割れが発生しなかった。そのため外ケーブル補強のモデル化によって横締めなどの適切なモデル化が必要である。

### 参考文献

- 1) (国研) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター, (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会: 撤去橋梁を用いた既設PC橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究報告書—既設PC橋の性能評価法および外ケーブル補強技術に関する研究—, 2020.12
- 2) 津野和男, 和泉公比古, 山田実, 森康晴: 外ケーブルによるPC 桁の補強効果に関する研究, プレストレスト・コンクリート, Vol.34, No.1, pp.41-48, 1992.1
- 3) 国土交通省土木研究所: 塩害を受けたPC 橋の耐荷力評価に関する研究 (IV) —旧芦川橋の載荷試験—, 土木研究所資料第3816号, 2001

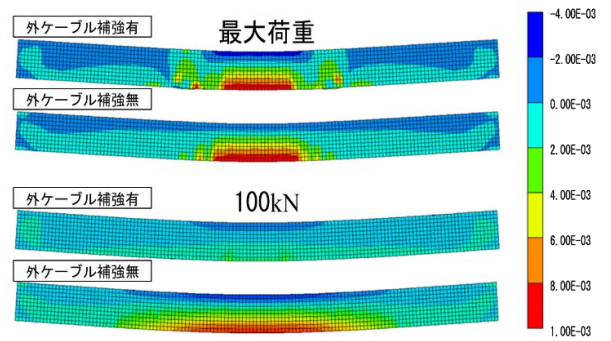


図-8 外ケーブルの有無によるひずみ図

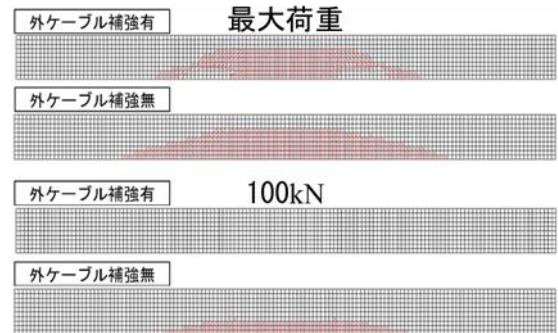


図-9 外ケーブルの有無によるひび割れ図

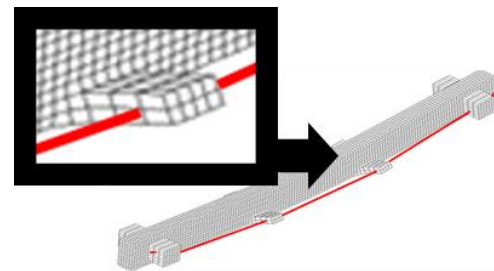


図-10 荷重後のコンクリート変形図



# PC 鋼材破断時の付着特性と残存プレストレス分布の数値解析的評価

EC19014 遠藤滉大

## 1. 研究背景と目的

現在日本国内に建設された橋梁で15mを超える橋は全体で16万を超えており、そのうちの約6.9万橋はPC橋が占めているが、約5割が約30年、約3割が40年建造から経過しているように、高度経済成長期に建造された多くのインフラ設備に寿命が迫っている。これらの老朽化したPC橋を適切に維持管理して安全に供用を継続できるようにしていくことが現在の土木技術者に求められている。また、老朽化したコンクリート構造物で合理的な維持管理には、経年などで劣化・損傷した構造物が保有する残存構造性能を適切に評価する技術が必要と考えられ、社会基盤の維持管理・更新が大きな課題となっている。ポストテンション式PC桁において、PC鋼材の腐食や破断が報告されており、早急な力学性能の評価と維持管理・更新が求められている。より合理的にPC桁の力学性能を評価するには残存プレストレス量の評価が必要不可欠なため、PC鋼材とグラウト間の付着特性を把握することが重要となる。そこで本研究では、数値解析的検討を通じて、PC鋼材破断時の付着特性の評価と残存プレストレス分布の評価を目的に据えて研究を行った。

## 2. 解析内容

前田らのPC鋼材切断実験を対象に数値解析手法の妥当性を評価するとともに、グラウト強度が付着特性や残存プレストレスに及ぼす影響を評価した。図-1、表-1に供試体諸元と材料特性値を示す。

本研究では、前田らの実験で作成された供試体のうち1-1から1-5の5本を対象とし、解析ソフト上で実験状況を再現し、数値解析を行った。解析対象全ての供試体は、250mm×250mmの矩形断面を有するPC部材であり、鋼材を破断するために、左端部より280mmの位置に120mm×120mm×120mmの開口部が設置されている。また、コンクリートの目標圧縮強度は53.6N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は32kN/mm<sup>2</sup>である。シース管の周囲には軸方向鉄筋(D16)が4本設置されている。供試体1-1にはPC鋼材SWPR7AL7本より9.3mmを1本(1T9.3)、

表-1 材料特性値

No.	供試体寸法						PC						グラウト		コンクリート	
	断面幅 mm	断面高さ mm	開口部位置 mm	開口部 mm	試験長 mm	全長 mm	種別		断面積 mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>	緊張力 kN	初期ひずみ	強度 N/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>
1-1	250	250	280	120	3000	3400	1T9.3	SWPR7AL	51.61	1683	219	58.4	0.005166957	48.8	53.6	32
1-2												107.6	0.00570713			
1-3							1T12.7	SWPR7BL	98.71	1824	191	113.5	0.006020067	48.8		
1-4												105.7	0.005606353	67		
1-5							1T15.2					1875	191.8	0.010173118		

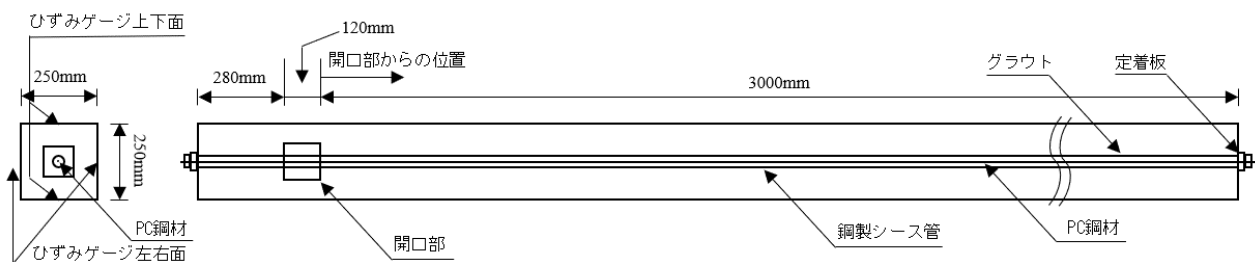


図-1 供試体諸元



供試体 1-2~1-4 には PC 鋼材 SWPR7BL7 本より 12.7mm を 1 本 (1T12.7)、供試体 1-5 には PC 鋼材 SWPR7AL7 本より 15.2mm1 本 (1T15.2) を、それぞれシース管内に沿って導入している。グラウト強度は供試体 1-1、1-3、1-5 で 48.8N/mm<sup>2</sup>、供試体 1-2 で 30.3N/mm<sup>2</sup>、供試体 1-4 で 67N/mm<sup>2</sup> となっている。実験では供試体に設けた開口部で PC 鋼材を切断した際の部材軸方向のコンクリートひずみを計測することで、次式によりプレストレスの残存割合  $r$  を求めている。

$$r = (\varepsilon_{pin} - \varepsilon_{pde}) / \varepsilon_{pin} \quad (1)$$

ここで  $\varepsilon_{pin}$  と  $\varepsilon_{pde}$  は、それぞれ緊張後のひずみ量および切断によるひずみ量変化である。

数値解析において、PC 鋼材とグラウト間の付着モデルには、**図-2** に示す仮想仕事の原理から導いた付着剛性方程式を使用した。ここで  $[Q]$  は、グラウト要素内仮想接点と PC 鋼材要素接点の変位から積分点でのすべり量の評価するマトリクスであり、本研究ではすべり量を、鋼材要素両端における両接点間の相対変位を線形補完することで評価した。鋼材要素軸方向の付着応力  $\tau$ —すべり  $S$  関係には式(2)に示す島ら<sup>2)</sup>が提案する付着応力—すべり—ひずみ関係に、かぶり厚や鋼材ふし形状の影響を簡易に導入する強度パラメーター  $a$  を乗じた。なお、強度パラメーター  $a$  は、実験結果と解析結果が整合するように決定した。鋼材要素軸直角方向の付着特性は、剛な弾性とした。

$$\tau = a \times 0.73 f'_g (ln(1 + 5s))^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad s = 1000S/D \quad (2)$$

ここで、 $f'_g$ : グラウト強度、 $\varepsilon$ : PC 鋼材ひずみとし、 $\varepsilon$  はグラウト後の切断に伴う PC 鋼材ひずみの変化量とした。解析的検討では、実験と同様に、アンボンド状態で緊張力を導入した後に PC 鋼材とグラウト間の付着をモデル化し、PC 鋼材の切断は供試体左端から 400mm 位置で、切断する PC 鋼材要素の断面積を 16 段階に分けて徐々にゼロとすることで実現した。本研究では、グラウト強度が付着特性やプレストレス現象範囲に及ぼす影響を解析的に評価した。

また、グラウト強度と緊張力を変数として平均付着応力度とプレストレス残存割合が 1.0 になるまでの距離を評価する解析も同時に行い、前田らの実験再現のデータと比較して解析手法の妥当性と、グラウト強度と引張力の違いがプレストレス減少量に及ぼす影響を評価した。グラウト強度は 20、30、40、50、60、70N/mm<sup>2</sup>、緊張力は 4000  $\mu$  相当、6000  $\mu$  相当のひずみ量となるように引張り、合計 12 パターンの試験を行った。なお、供試体寸法、破断位置、破断方法、解析方法は前田らの実験のものと同じ条件で行った。

### 3. 解析結果

**図-3** から **図-6** に解析で得られた PC 鋼材切断時のプレストレス残存割合、PC 鋼材ひずみ減少割合および PC 鋼材のすべりと付着応力分布を示す。なお、**図-3** に示す実験値と解析値との比較から、本研究では式(2)中の  $a$  を 0.3 とした。図より、プレストレス残存割合は PC 鋼材切断位置から線形的に変化し、この分布は PC 鋼材のひずみ分布と同様である。すべり分布は、**図-4** 中に破線で示す鋼材ひずみが線形的に変化する領域の近似直線が横軸と交わる位置でほぼゼロとなり、付着応力は、鋼材ひずみが線形的に変化する領域で一定となった。これは、鋼材ひずみの直線分布はその領域で鋼材ひずみの変化率  $d\varepsilon/dx$  が一定であり、微小区間でプレストレス力の減少量が一定であるためである。なお、減少プレストレス力が

付着力と釣合うとして、**図-3** 中に示す  $d\varepsilon/dx$  を用いて付着応力を算出した結果、1-2 から 1-4 に対してそれぞれ -3.38、-4.63、-5.75N/mm<sup>2</sup> となり、これらの値は、**図-6** 中の矢印区間の平均付着応力と比して 1 割程度の

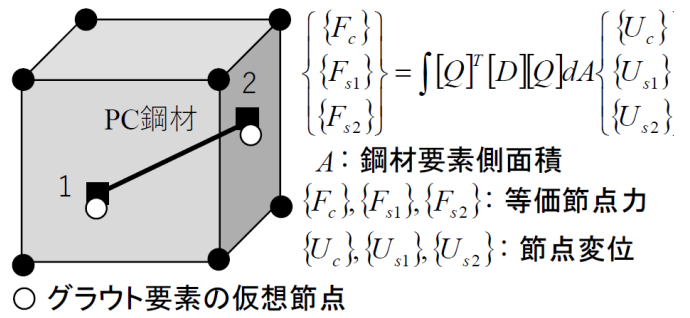


図-2 付着剛性方程式の定式化

差異で一致した。これらから、式(2)の $\varepsilon$ を切断に伴うPC鋼材ひずみの変化量とすることは妥当と考えられる。

図-7 と図-8 にグラウト強度と緊張力を変数として、図-6 中の平均付着応力と図-3 中のプレストレス残存割合が 1.0 になるまでの距離を評価した解析の結果を示す。また、開口部からの距離-ひずみ減少量のグラフを作成し、減少範囲の直線部分の傾きを求めその結果を比較することで緊張力やグラウト強度が平均付着応力に及ぼす影響を求め、図-9 と表-2 にまとめた。図-9 と表-2 に示すようにひずみ減少区間では平均付着応力はほぼ一定であり、緊張力の大きさの違いによる影響はないという結果が得られた。グラウト強

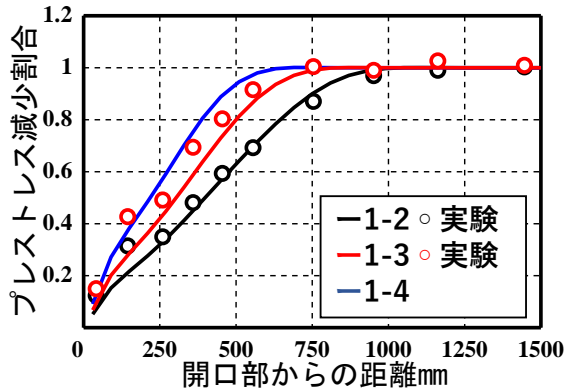


図-3 プレストレス残存割合分布

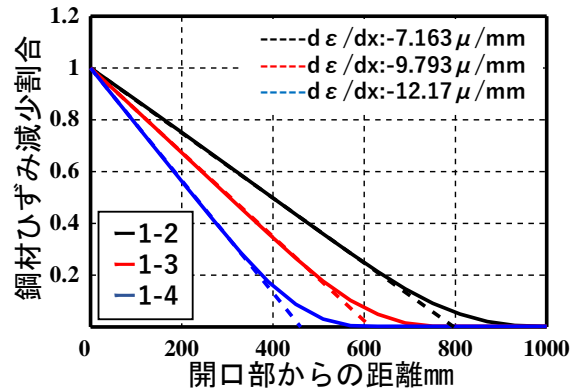


図-4 鋼材ひずみ分布

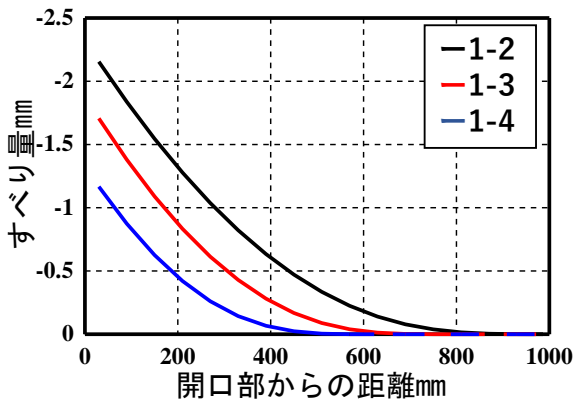


図-5 すべり分布

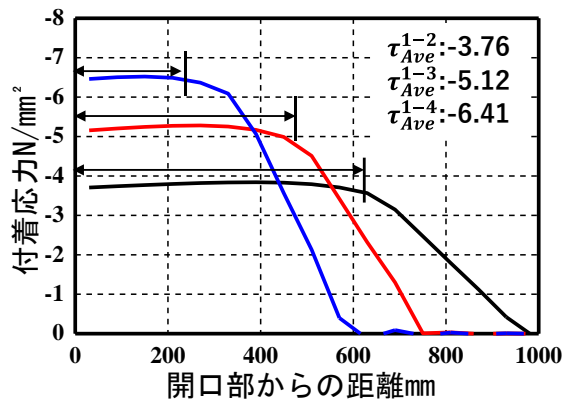


図-6 付着応力度分布

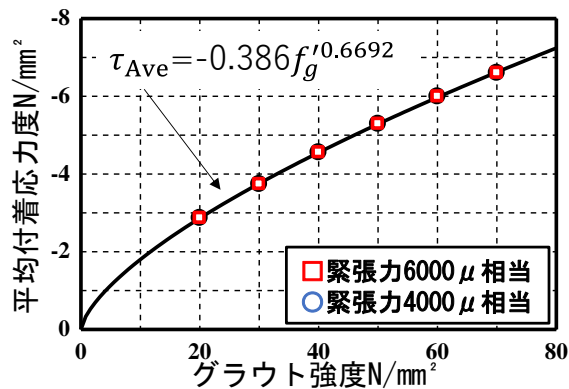


図-7 プレストレス現象範囲の付着応力度-グラウト強度関係

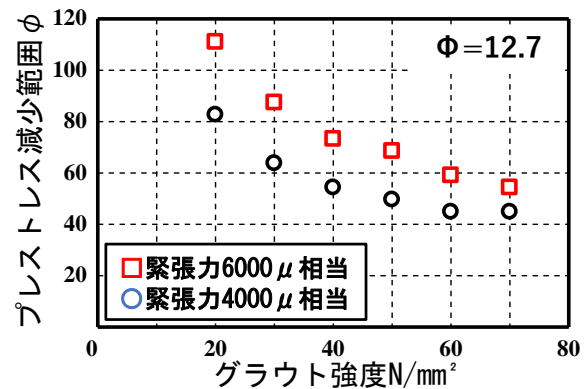


図-8 プレストレス減少範囲

表-2 グラウト強度と  $d\varepsilon/dx$  の関係

グラウト強度 $N/mm^2$	20	30	40	50	60	70
4000 $\mu$ : $d\varepsilon/dx$ ( $10^{-6}$ )	-5.46409	-6.8258	-8.37841	-9.21632	-10.2554	-12.2792
6000 $\mu$ : $d\varepsilon/dx$ ( $10^{-6}$ )	-5.38952	-7.11534	-8.60019	-9.91661	-11.1645	-12.0728

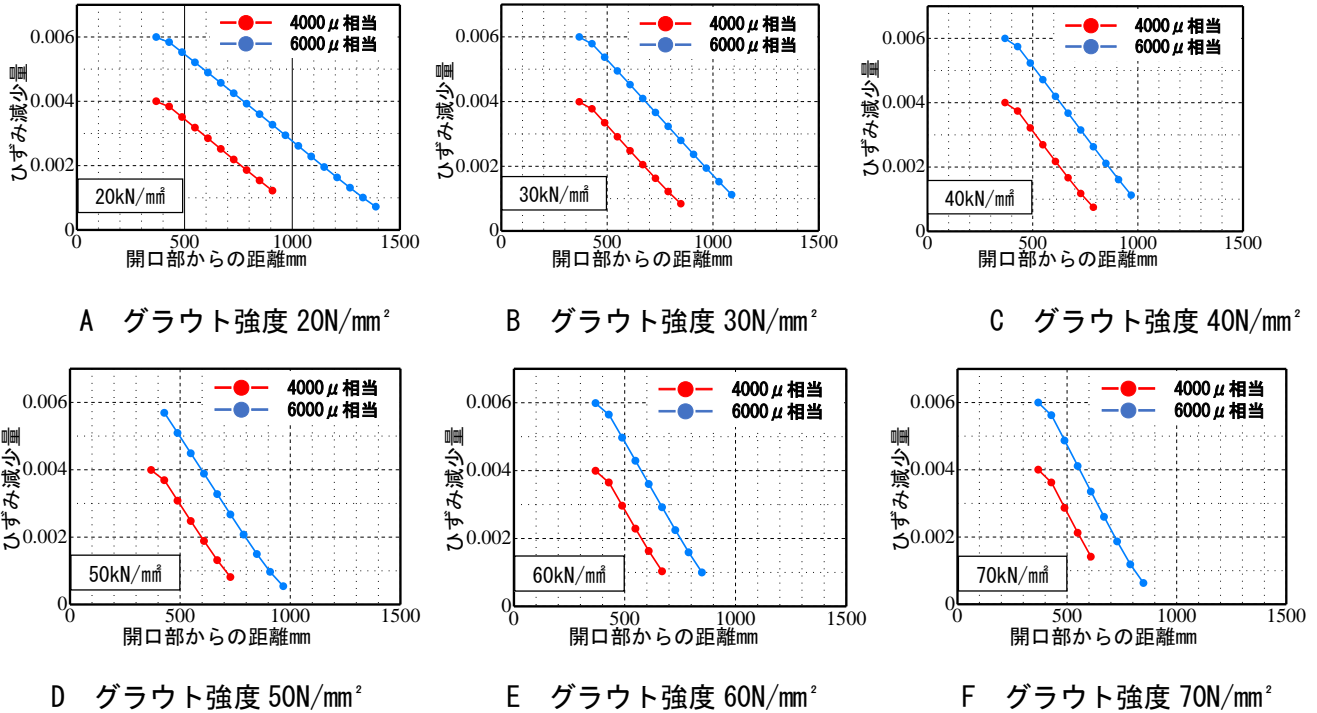


図-9 ひずみ減少量まとめ

度はひずみ減少区間に関して影響を与え、強度が大きくなるほど緊張力は抜けにくく、ひずみ減少範囲は短くなるということが分かった。また図-8は図-7で示したよう平均付着応力度はグラウト強度に依存し引張力によらないことが判明しているためこのようなグラフとなった。図-7中の平均付着応力度を近似直線で結び近似式を求めたところ以下の式(3)ようになった。

$$\tau_{Ave} = -0.386 f_g'^{0.6692} \tag{3}$$

ここで  $f_g'$ : グラウト強度である。この式から平均付着応力度は、グラウト強度の 0.6692 乗、つまり約 2/3 乗に比例するということが分かった。

#### 4. まとめ

数値解析的に PC 鋼材破断時の付着特性および残存プレストレス分布を評価した。その結果、プレストレス減少区間では平均付着応力度はほぼ一定となり、その大きさは緊張力によらず、グラウト強度の 2/3 乗に比例すること、プレストレス減少範囲はグラウト強度と緊張力の大きさに依存する結果が得られた。

#### 参考文献

- 1) 前田友章、徳永光宏、田所敏弥、谷村幸裕：鋼材破断時の付着特性に着目した PC 梁の曲げ耐力に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No2，pp.529-534，2010
- 2) 島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，Vol.378/V-6, pp.165-174，1987



## 導入緊張量が丸鋼 PC 鋼材の付着特性に及ぼす影響に関する実験

EC19017 大堀 真琴

### 1. 研究背景と目的

厳しい環境下に置かれる PC 橋の中には PC 鋼材の破断が報告されている<sup>1)</sup>。このため、PC 鋼材の破断が進行した PC 橋の安全性評価やモニタリングに関する検討を行い、適切な維持管理限界を設定できるようにすることが強く求められている。PC 構造物の使用性や安全性には PC 鋼材とグラウト間の付着特性に影響を受けるが、PC 鋼材とグラウト間の付着特性に関する知見は、異形鉄筋とコンクリート間のそれ<sup>2)</sup>と比べて非常に少ない。特に、緊張状態にある鋼材とグラウト間の付着特性に関する検討はこれまで実施されていないのが現状である。そこで本研究では、導入緊張量が丸鋼 PC 鋼材とグラウト間の付着特性に及ぼす影響に関する知見を得ることを目的とした。具体的には、導入引張量を変数とした試験体の両引き試験を実施することで、PC 鋼材とグラウト間の付着特性にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験概要

図-1 に、本研究で使用した試験体概要と試験装置の諸元を示す。PC 鋼材には長さ 2m のネツレン 9.2mm、B 種 1 号の丸鋼を使用した。使用した鋼材の引張試験の結果、ヤング係数は  $194679\text{N/mm}^2$  であった。シース管には内径 23mm の鋼製シースを使用した。本研究では 4 本の供試体を準備し、導入緊張量が異なる条件の下で丸鋼とグラウト間の付着特性にどのような影響がでるのかを検討することとした。導入緊張量は、それぞれ鋼材ひずみが  $0\mu$ 、 $1000\mu$ 、 $2000\mu$ 、 $3500\mu$  になるように緊張力を与えた。実際は、表-1 に示すように、グラウトの収縮により両引き試験開始直前の鋼材ひずみは  $-50\mu$ 、 $1071\mu$ 、 $1992\mu$ 、 $3375\mu$  であった。本試験では導入緊張量が丸鋼 PC 鋼材の付着特性に及ぼす影響について実験的に明らかにする事を目的とした両引き試験を行うので、次の手順で供試体を作製した。まず、丸鋼の一端を原点  $0\text{mm}$  とした時、 $100\text{mm}$ 、 $300\text{mm}$ 、 $500\text{mm}$ 、 $700\text{mm}$ 、 $900\text{mm}$ 、 $1100\text{mm}$ 、 $1300\text{mm}$ 、 $1500\text{mm}$ 、 $1700\text{mm}$ 、 $1900\text{mm}$  の位置にひずみゲージを張り付けて、両引き試験時の鋼材のひずみ分布を計測することとした。なお、ひずみゲージのリード線が試験結果に影響しないように、ひずみゲージの位置のシース管に穴を設け、この穴からひずみゲージのリード線を取り出すとともに、グラウトを注入した。緊張力導入時から両引き試験終了まで連続して鋼材ひずみを測定し、グラウトした 7 日後にグラウトが強度発現していることを確認し、両引き試験を実施した。

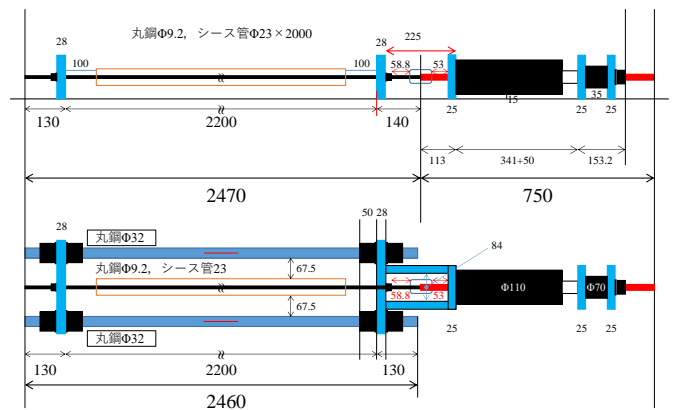


図-1 試験体諸元と両引き試験の概要

表-1 緊張力導入直後と両引き試験開始前の鋼材ひずみ

No.		試験体中央からの距離(mm)										平均値
		-900	-700	-500	-300	-100	100	300	500	700	900	
1000 $\mu$	定着直後	1181.0	1173.3	1129.5	1151.4	1114.3	1181.9	1047.6	1116.2	1076.2	1077.1	1124.9
	両引き前	1072.4	1247.6	1246.7	1051.4	1019.0	1117.1	930.5	1030.5	1007.6	986.7	1071.0
2000 $\mu$	定着直後	2041.0	2032.4	2078.1	2031.4	2050.5	1989.5	2083.8	2034.3	2061.9	1985.7	2038.9
	両引き前	1969.5	1978.1	1989.5	2059.0	1973.3	2040.0	1971.4	1942.9	2128.6	1864.8	1991.7
3500 $\mu$	定着直後	3442.9	3456.2	3526.7	3499.0	3501.0	3509.5	3534.3	3532.4	3529.5	3534.3	3506.6
	両引き前	3261.9	3354.3	3456.2	3373.3	3368.6	3348.6	3413.3	3397.1	3392.4	3384.8	3375.0

### 3. 試験結果

両引き試験の結果、導入緊張力相当の引張荷重が作用する前に鋼材ひずみに変化が生じ、場合によってはグラウトにひび割れが生じた。このため、ひずみ分布にひび割れが影響したので、本研究では図-2 に示すように引張荷重とひずみの関係を評価した。ここで、図中の荷重とひずみは、表-1 の両引き試験前の平均ひずみから計算される緊張力相当荷重からの増分値であり、図には各ひずみゲージ位置でひび割れが生じる前までの関係を示している。図-2 より、導入緊張力が少ないほど勾配が変化する荷重が大きくなるのが分かる。勾配が変化することで荷重増分に対して鋼材ひずみがより大きく増加するので、この荷重レベルに相当する付着応力が付着強度であると考えられる。そこで、図-3 に示す自由体図の力の釣合いから付着応力を定義して算出した。なお、試験体には複数のひび割れが生じていることから、すべり量や図-3 中の L を評価することができない。本研究の両引き試験では試験体中央ですべりがゼロであることから、L を一律 1000mm として付着応力を評価した。算出した付着応力と鋼材ひずみの関係を図-4 に示す。なお、図ではひび割れ発生後の関係も示している。図-4 より、導入緊張力が低い供試体のほうが、付着強度が高くなるのが分かる。また、ひび割れの発生により付着応力が急激に低下していることがわかる。この結果から、導入緊張量は鋼材とグラウト間の付着強度に影響を及ぼし、その傾向は、導入緊張量が大きくなると付着強度低くなることが明らかとなった。また、ひび割れ後は丸鋼鉄筋とグラウトの付着が一瞬にて外れることが予想される。

### 4. 結論

本研究は導入緊張量が丸鋼 PC 鋼材の付着特性に及ぼす影響について実験的に明らかにする事を目的として両引き試験を行いひずみ計測を行なった。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) グラウトにひび割れが発生することで付着力低下する。そのため、ひび割れ後は丸鋼 PC 鋼材とグラウトの付着が一瞬にて外れることが予想される。
- (2) 緊張ひずみが増加すると付着強度が直線的に低下することから、導入緊張量は鋼材とグラウト間の付着強度に影響を及ぼし、その傾向は、導入緊張量が小さくなると付着強度高くなり、大きくなると低くなると考えられる。

本研究では実験のスケールが小規模だったため理論上うまく説明できることが思うようにいかなかった。今後、両引き試験前でのグラウトへのひび割れ発生を防ぐため、鋼材に対してより多くのグラウトを注入した試験の検討をするといふと考えた。

### 参考文献

- 1) 小野 聖久, 野島 昭二ほか: グラウトされた実物大 PC 桁における PC 鋼材破断時の残存鋼材のひずみ挙動, プレストレストコンクリート工学会 第 30 回シンポジウム論文集, pp.539-544, 2021.10
- 2) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着 応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集 第 378 号/V-6 1987 年 2 月

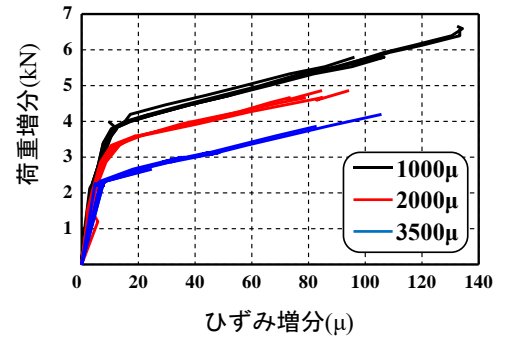


図-2 引張荷重-鋼材ひずみ関係

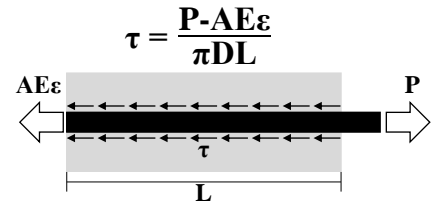


図-3 付着応力の定義

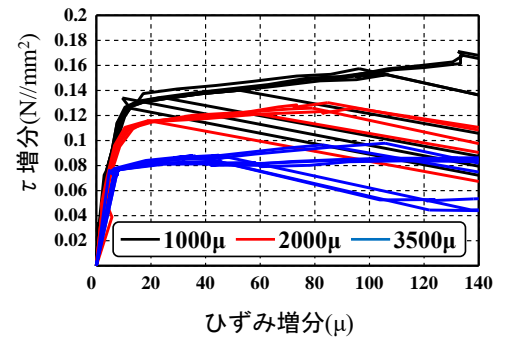


図-4 付着応力-鋼材ひずみ関係

## 導入緊張量が異形 PC 鋼棒の付着特性に及ぼす影響に関する実験

EC19018 小木 季織

### 1. 序論

一般に鉄筋とコンクリート間の付着挙動には、鉄筋の形状、コンクリート強度、かぶり厚などが影響するとされている。他方、プレストレストコンクリート部材内の PC 鋼材には大きな緊張力が導入されているので、PC 鋼材破断時の付着挙動には、導入緊張力の大きさが影響を及ぼすのではないかと考えられる。そこで本研究では、導入緊張量が PC 鋼材とグラウト間の付着特性に及ぼす影響に関する知見を得るために、導入緊張量を変化させた試験体の両引き試験を行うことで、緊張量が異形 PC 鋼材とグラウトとの付着特性に及ぼす影響を評価することを目的とした。

### 2. 実験概要

本研究では、PC 鋼材とグラウト間の付着挙動に着目していることから、はり試験体を作製するのではなく、**図-1**に示すようにシース管内に異形 PC 鋼材を配置してグラウトした試験体を使用した。PC 鋼材には高強度せん断補強筋ウルボン 1275 ( $\Phi 9.0\text{mm}$ 、公証断面積  $64.0\text{mm}^2$ 、降伏強度  $1275\text{N/mm}^2$ ) を使用し、シース管には内径  $23\text{mm}$  の鋼製シース管を使用した。PC 鋼材の引張試験の結果、ヤング係数は  $210\text{kN/mm}^2$  であり、降伏強度は  $1361\text{N/mm}^2$  であった。試験体の全長は  $2000\text{mm}$  であり、鋼材のひずみを計測するために、ひずみゲージを試験体中心から  $200\text{mm}$ 、 $400\text{mm}$ 、 $600\text{mm}$ 、 $800\text{mm}$  反対側に  $100\text{mm}$ 、 $300\text{mm}$ 、 $500\text{mm}$ 、 $700\text{mm}$ 、 $900\text{mm}$  の位置に貼り付けた。なお、ひずみゲージのリード線が試験結果に影響することを避けるために、シース管に穴を設けてリード線を取り出し、またこの穴からグラウトを注入した。試験変数は導入緊張量であり、両引き試験開始時の鋼材ひずみが  $3000\mu$ 、 $3600\mu$ 、 $4200\mu$  となるように設定した。実際の緊張時および両引き試験前の鋼材ひずみを**表-1**に示す。

### 3. 実験結果

**図-2** に両引き試験時のひずみ分布の一例を示す。図中の青線は両引き試験開始直前のひずみ分布であり、赤線は、**表-1**中の両引き試験開始前の平均ひずみから計算される緊張力相当時の引張荷重を作用させたときのひずみ分布である。図から分かるように、多くの試験体において、緊張力相当荷重レベルの引張荷重を作用させる前にひび割れが発生する結果となった。このため、ひずみ分布を関数近似できなかつたので、**図-3**に示すように荷重とひずみ関係により試験結果を考察した。ここで、増分荷重、増分ひずみとは、緊張力相当荷重時の荷重およびひずみ値からの増分を意味している。**図-3**より、導入緊張の大きい  $4200\mu$  から  $3000\mu$  と減少するにつれて、勾配が変化する荷重が小さくなる傾向が確認できる。なお、 $4200\mu$  の初期の剛性が他の結果と比較して低い理由は、 $4200\mu$  の両引き試験時のみ、緊張力相当荷重が作用する前に複数のひび割れが発生したためと考えられる。**図-3**より導入緊張量が増分荷重と増分ひずみ間に相関が確認できることから、**図-4**

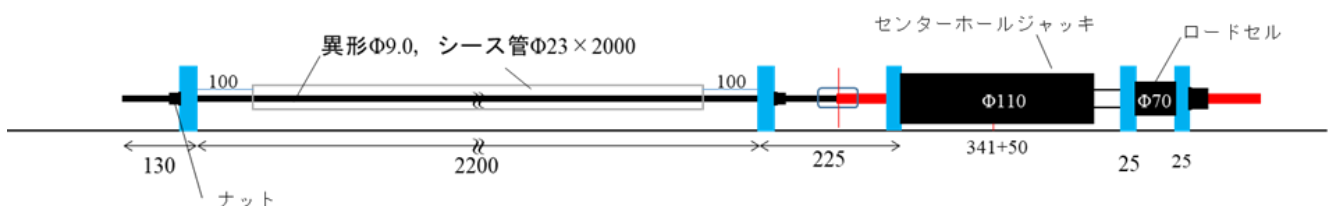


図-1 試験体概要と緊張力導入および両引き試験方法



表-1 緊張力導入時と両引き試験開始前の鋼材ひずみ

No.	時刻	試験体中央からの距離(mm)									平均値
		-800	-600	-400	-200	-100	300	500	700	900	
3000 $\mu$	定着直後	3101.0	3066.7	3061.0	3013.3	3007.6	3049.5	3027.6	2967.6	2979.0	3030.4
	両引き前	2996.2	2952.4	2969.5	2916.2	2922.9	2948.6	2937.1	2842.9	2850.5	2926.2
3600 $\mu$	定着直後	3650.5	3682.9	3591.4	3629.5	3679.0	3693.3	3628.6	3350.5	3033.3	3548.8
	両引き前	3555.2	3635.2	3535.2	3574.3	3637.1	3661.0	3589.5	3297.1	2999.0	3498.2
4200 $\mu$	定着直後	4220.0	4171.4	4158.1	4175.2	4229.5	4263.8	4235.2	4227.6	4321.0	4222.4
	両引き前	4164.8	4113.3	4081.0	4091.4	4124.8	4206.7	4174.3	4174.3	4263.8	4154.9

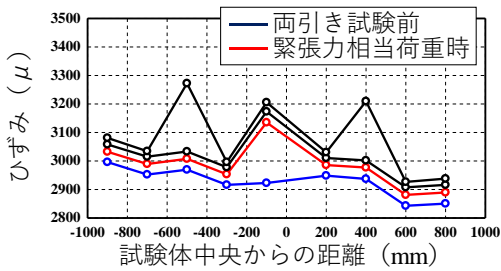


図-2 両引き試験時のひずみ分布例

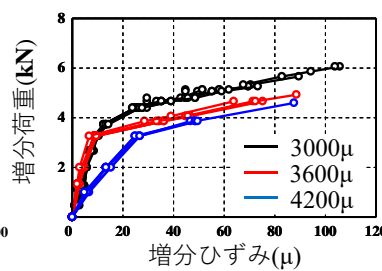


図-3 荷重-ひずみ関係

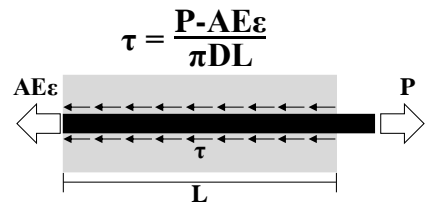


図-4 付着応力の定義

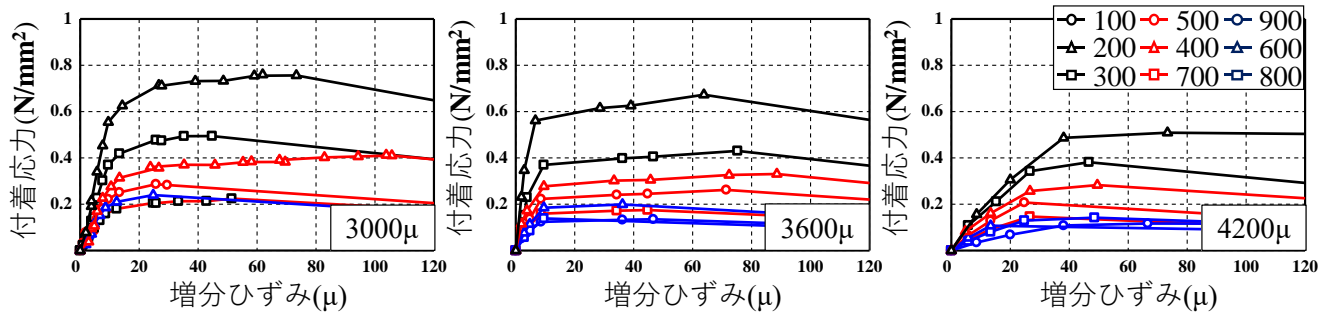


図-5 付着応力-ひずみ関係

に示すように、自由体図の力の釣合いより空間平均的な付着応力を評価した。ここで、付着応力式中のLは、シーす管両端からひずみゲージ位置までの距離とした。なお、本研究試験結果からは、前述のように早期に複数のひび割れが生じたことから、すべり量を算出することができなかつた。図-5に付着応力-ひずみ関係を示す。なお、図にはひび割れ発生後についても算出した付着応力を示している。図より、最も大きい導入緊張量与えた4200 $\mu$ の付着応力が、3つの試験体の中でひび割れ発生後の付着応力が低いことが確認でき、最も導入緊張量の小さい3000 $\mu$ は付着応力が高いことが読み取れる。このことから、鋼材への導入緊張量が大きいほど付着強度が低下し、導入緊張量が小さいほど付着強度が上昇するという傾向が明らかとなった。すなわち、導入緊張量は、付着特性に影響することが明らかとなった。また、ひび割れが発生すると、算出される付着応力が急激に低下する結果が得られた。

#### 4. 結論

本研究では、導入緊張量を変数とした両引き試験を実施した。その結果、鋼材の緊張量が大きくなると、付着強度が低下する傾向が得られた。

#### 参考文献

1) 吉村 満ほか：鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.613-618，2007

新たな緊張力導入解析手法の開発に関する研究

EC19019 尾崎 俊甫

1. 序論

プレストレストコンクリート (PC) 構造物を設計・照査するには、プレストレスによる影響を把握する必要があるため、PC ケーブルの応力状態を正しく評価する必要がある。数値解析的にプレストレス状況を再現する手法はいくつか存在し、その中でも温度応力解析機能を使用して PC ケーブル要素に初期ひずみを導入する手法が多用されている。しかしながらこの手法では、あらかじめ各 PC ケーブル要素に導入する初期ひずみを把握する必要があること、曲線配置された PC ケーブルの場合には、PC ケーブル要素とコンクリート要素との付着状況の仮定が緊張後のプレストレス状況に影響を及ぼす課題が挙げられる。ポストテンション方式の PC 部材では、緊張はアンボンド状態で実施され、シース管との摩擦や偏向部における摩擦より PC ケーブルの応力状態は一律ではないので、施工時の緊張管理や PC 構造物の性能予測に資するために、緊張時の PC ケーブルの応力状態を精度良く予測する必要がある。そこで本研究では、将来的に緊張時の PC ケーブルの応力状態を精度よく予測するために、新たな緊張力導入解析手法の構築を目的とした。

2. 解析概要

2.1 緊張力導入解析手法の概要

本研究で構築した緊張力導入方法手順を図-1 に示す。緊張力の導入を (a) から (e) の 5 段階で実施した。まず、(a) に示すように、PC ケーブル左端を定着した状態で、PC ケーブル右端に荷重を作用させることで緊張力を導入した。所定の緊張力に相当する荷重を作用させた状態で、(b) に示すように右端の PC ケーブルを定着したのち、(c) に示すように緊張力を除荷することで緊張力の解放を行った。緊張力を導入したのちに (d) に示すようにグラウトをモデル化し、最後に荷重載荷などの検討が実施できるように、幾何学的境界条件の変更を行った。

上記の緊張力導入解析手法を構築するにあたり、ベースとした解析ツールの構成を図-2 に示す。図に示すように、本解析ツールでは、リスト step、時間 step および荷重 step の 3 つの step で構成されている。各 step では、それぞれ構造モデルや幾何学的境界条件の設定、温度応力解析や湿気移動解析などを解く初期応力解析および耐荷力などを評価する耐荷力解析が実行される。本研究では、図-1 中の (a) と (c) を荷重 step で実施し、(c) と (d) を時間 step で、(e) をリフト step 内で実施できるように、入力インターフェイスの整備を実施した。なお、グラウトのモデル化は、グラウト要素を新たに

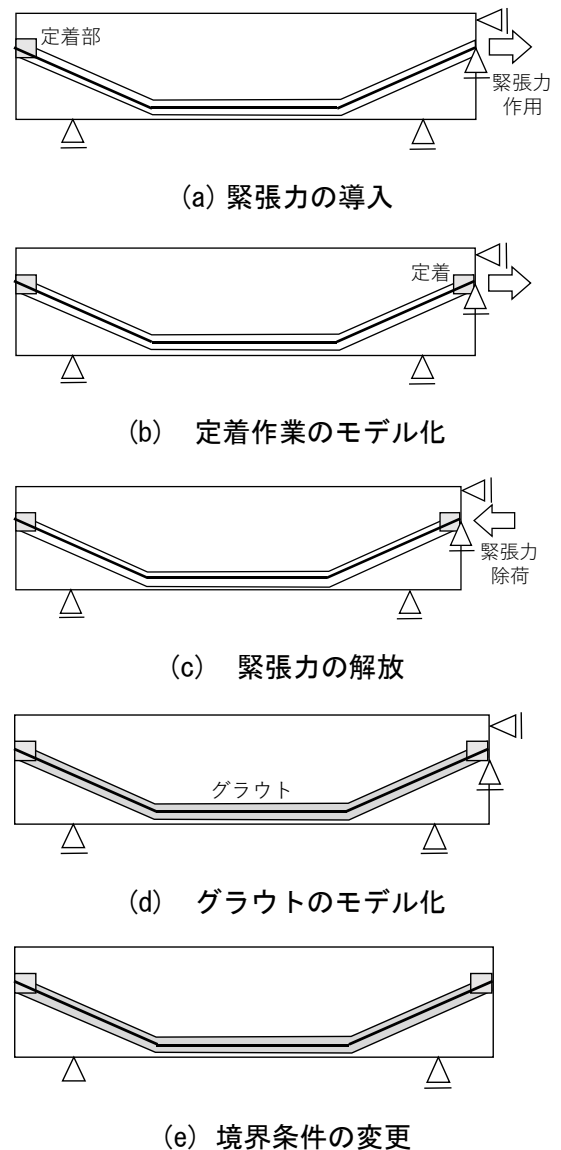


図-1 数値解析フロー

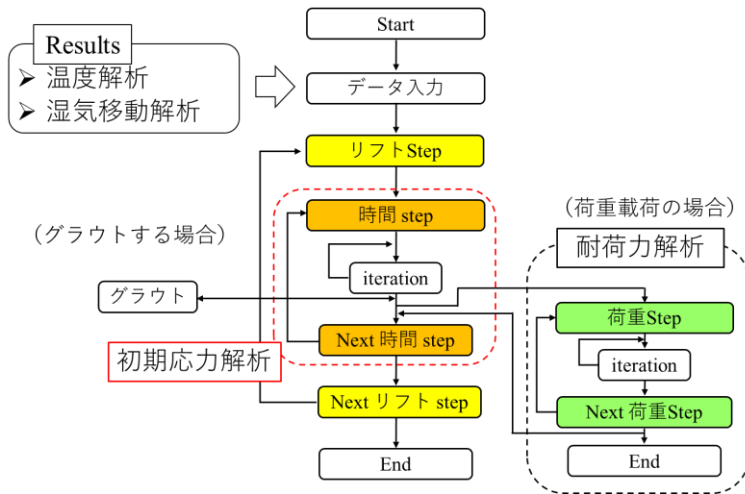


図-2 数値解析フロー

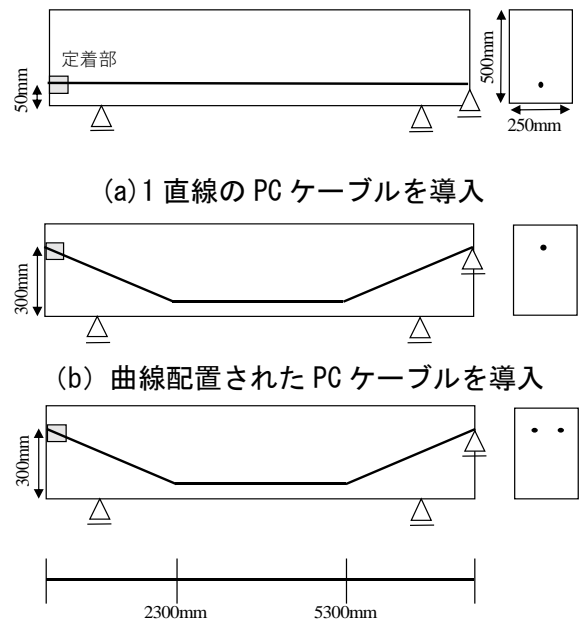


図-3 解析モデル

追加できるリフト step 内でも可能であるが、本研究では(a)と(d)を所定の時刻で PC ケーブルと定着部間もしくは PC ケーブルとグラウト間の付着が発現させることでモデル化することとした。

解析モデルは、断面が 250mm×500mm,全長 7600mm とした。断面のメッシュサイズを 50mm×50mm のとし、長手方向のメッシュサイズも同様に 50mm×50mm とした。

本研究では、新たな緊張力導入解析手法の構築を目標としているため、コンクリート内部に導入する PC ケーブルについて直線の PC ケーブル 1 本を導入した場合 (モデル 1) と曲線配置された PC ケーブルを 1 本導入した場合 (モデル 2)、曲線配置された PC ケーブルを 2 本導入した場合 (モデル 3) の 3 パターンについて、それぞれアンボンド状態とした解析モデルを使用した数値シミュレーションを実施した。解析で使用した解析モデルについて図-3 に示す。供試体の右端、7600mm 地点を支点とし引張した。解析における労力を低減させるため曲線配置された PC ケーブルについては簡略化し再現することとした。曲線配置された PC ケーブルについて、2300mm と 5300mm の 2 点で屈曲させてモデル化することで曲線を再現した。3 パターンについて引張り導入解析を行い、そこから得られる PC ケーブルのひずみ分布やコンクリート上縁と下縁におけるひずみ分布の特徴、計算により算出した理論値との比較から本解析の妥当性について評価した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 PC ケーブルとコンクリート上縁と下縁におけるひずみ分布

解析の妥当性を示すため使用した直線 PC ケーブルのひずみ分布を図-4 に示す。曲線 PC ケーブルのひずみ分布を図-5 に示す。コンクリートの上縁と下縁におけるひずみ分布を図-6 に示す。

#### 3.2 直線の PC ケーブルを導入した解析結果

図-4 (a)に引張時の直線 PC ケーブルのひずみ分布を示す。図-4 (b)に引張荷重を除荷した際の直線 PC ケーブルのひずみ分布を示す。図-4 (a), (b)から PC ケーブルの両端でひずみが小さくなっていることが分かる。図-6 (a)に直線 PC ケーブル導入時のコンクリートの上縁と下縁における応力分布を示す。コンクリートの上縁と下縁には同様な増減傾向が見られた。具体的に、上縁では長手方向に伸びるひずみが見られ、下縁では長手方向に縮むひずみが見られた。緊張力の導入により湾曲したコンクリートのひずみ分布図を図-7 に示す。図-7 で示すように、緊張力導入によりコンクリート内に緊張力が加わりコンクリートが湾曲したことが理由であると考えられる。計算より上縁では約 2.04MPa, 下縁では約 5.74MPa の理論値が算出された。コンク



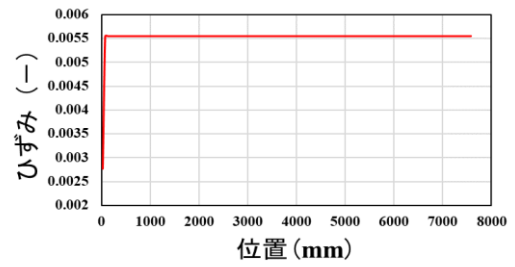
リート上縁と下縁における理論値を表-1に示す。解析により得られた応力は上縁で約2.03MPa, 下縁で約-5.73MPaとなった。解析結果と理論値を比較すると同様な値であることが分かる。ひずみ分布の特徴と理論値との比較から本解析結果の妥当性が確認できた。

### 3.3 曲線 PC ケーブルを導入した解析結果

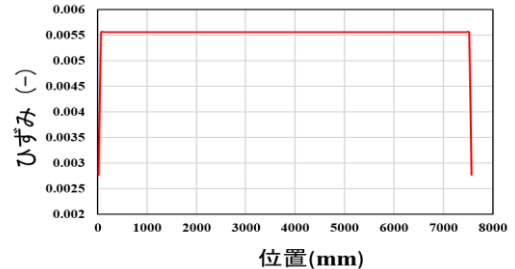
図-5(a)に緊張時の曲線 PC ケーブルのひずみ分布を示す。図-5(a)から曲線配置された PC ケーブルの偏向部においてひずみ分布の変化が見られる。図-6(b)に曲線 PC ケーブル導入時のコンクリート上縁と下縁の応力分布を示す。図-6(b)から左端から右端にかけてひずみの変化も大きくなっていることが分かる。また、上縁と下縁では対照的な増分傾向が見られる。コンクリート上縁には、左端と右端に限り左右非対称の長手方向に縮むひずみ分布、その他の点においては長手方向に伸びるひずみが見られる。長手方向に伸びるひずみについては3.2の解析と同様、コンクリートの変形が理由であると考えられる。左端と右端に見られる長手方向に縮むひずみについては PC ケーブルの支点の位置がコンクリート断面の中心ではないので、曲げモーメントの影響より軸力の影響が強い範囲で圧縮応力が発現したのだと考えられる。ひずみ分布が非対称な理由については片引きであることが理由であると考えられる。コンクリート下縁については一貫して長手方向に縮むひずみが見られる。これは、コンクリートが変形しコンクリート下縁が圧縮されたことが理由であると考えられる。また、図-6(a), (b)を比較してコンクリートの上縁と下縁のひずみ分布について異なる形状となった。これは、PC ケーブルの形状が異なることが理由であると考えられる。解析から上縁では、約2.65MPa, 下縁では約-6.34MPaの数値が得られた。解析結果と表-1に示す理論値を照らし合わせた結果、上縁、下縁共に約0.6MPaの誤差が生じた。この誤差については、PC ケーブルの形状と供試体の片引きであることが理由として挙げられる。上記で述べたような、ひずみ分布の特徴と解析から得られた数値と理論値を照らし合わせた結果から本解析結果はおおむね妥当であると言える。

### 3.4 曲線 PC ケーブルを2本導入した解析結果

ひずみ注入と境界条件の変更の手順に関しては2本のPCケーブルで同時に行った。1本目のPCケーブルの引張荷重を除荷した後のひずみ分布を図-5(b), 2本目のPCケーブルを引張した際の1本目のPCケーブルのひずみ分布を図-5(c)に示す。図-5(b)に示すように曲線配

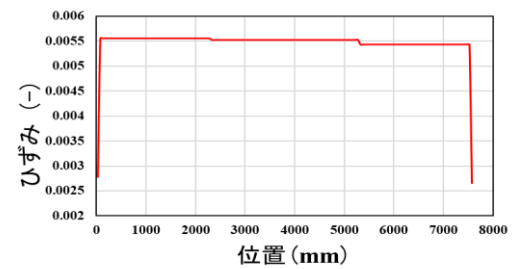


(a) 引張時のひずみ分布

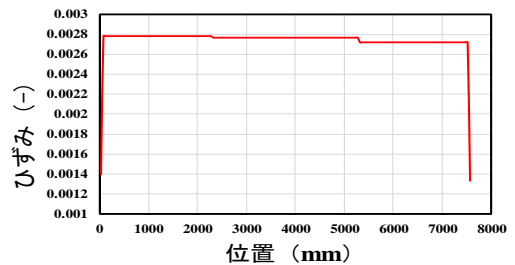


(b) 荷重除荷時のひずみ分布

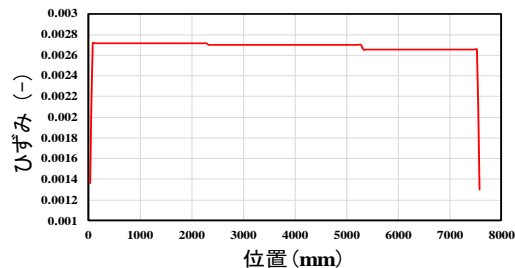
図-4 直線 PC 鋼材ひずみ分布



(a) 引張時のひずみ分布



(b) 荷重除荷時のひずみ分布



(c) 引張時のひずみ分布

図-5 曲線 PC 鋼材ひずみ分布

置された PC ケーブルを 2 本導入した際の PC ケーブルのひずみ分布は 3.3 の解析と同様な増分傾向が見られたが PC ケーブル 1 本当たりのひずみ量に関しては減少した。また、図-5 (b), (c) のグラフから 2 本目の PC ケーブルを引張した際にコンクリート内に既に導入されていた 1 本目の PC ケーブルのひずみが減少したことが分かる。これは、2 本目の PC ケーブルを引張した際にコンクリートが更に縮み、それに伴って既にコンクリート内部に導入されていた 1 本目の PC ケーブルも縮んだことが理由であると考えられる。定着後のコンクリートの上縁と下縁における応力分布を図-6 (c) に示す。2 本 PC ケーブル定着後のコンクリート上縁と下縁のひずみの増減傾向に関しては 3.3 の解析と同様な形状となった。また、図-6 (c) に示したように 1 本の PC ケーブルのみを定着した際のコンクリートの上縁と下縁のひずみ分布が特徴的な形状となった。このようなひずみ分布となった理由として、1 本の PC ケーブルのみを定着した段階であることが考えられる。解析から上縁では約 2.62MPa、下縁では-6.26MPa の数値が得られた。この数値と算出した理論値を照らし合わせた結果、上縁では約 0.58 MPa、下縁では約 0.52 MPa の誤差が生じた。この誤差に関しては、PC ケーブルの定着位置や片引きであることが理由として挙げられる。上記で述べたようなひずみ分布の特徴と理論値を照らし合わせた結果からこの解析結果はおおむね妥当であると言える。

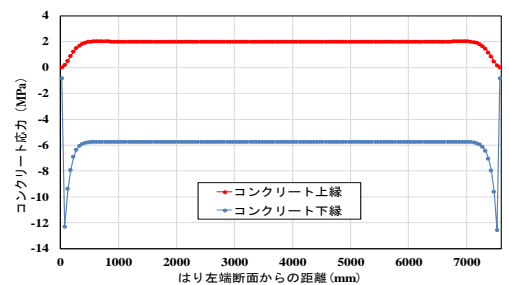
#### 4. 結論

本研究では、新たな緊張力導入解析手法の構築を目的に行った。コンクリート内部に導入する PC ケーブルについて、直線の PC ケーブルを 1 本導入した場合と曲線配置された PC ケーブルを 1 本導入した場合、曲線配置された PC ケーブルを 2 本導入した場合の 3 パターンについて数値解析を実施し本解析の妥当性について検討した。検討した 3 パターン全てにおいて、PC ケーブルのひずみ分布の特徴とコンクリートの上縁と下縁におけるひずみ分布の特徴、算出した理論値と本解析より得られた数値の比較から本解析はおおむね妥当であると言える。

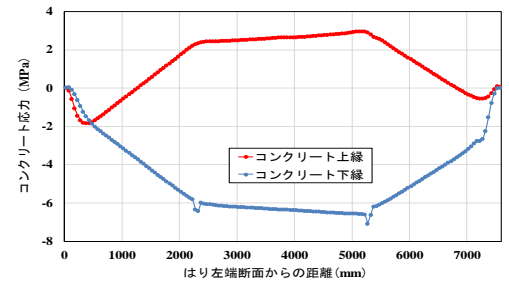
今後の課題として、本解析では片側断面のみを引張緊張力を導入したが、両引きでコンクリートに緊張力を導入した場合や PC ケーブルの導入本数を増加させた場合、コンクリート断面の PC ケーブル定着箇所の変更、PC ケーブルを 2 本導入時の解析手順の見直し等、更なる検討が必要であると考えられる。

#### 参考文献

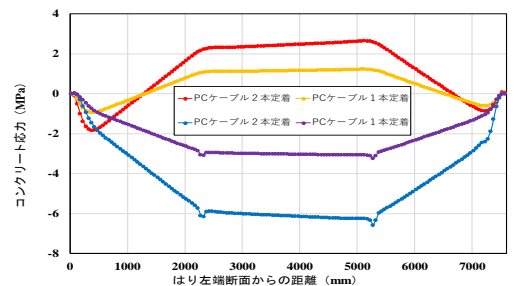
- 1) 小幡泰弘, 栗田哲也: よくわかる PC 構造物の FEM 解析 - 第 3 回 PC 構造で使ってみよう (その 1) -, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.3, pp.82-87, 2001.5



(a) モデル 1 のひずみ分布



(b) モデル 2 のひずみ分布



(c) モデル 3 のひずみ分布

図-6 コンクリートのひずみ分布

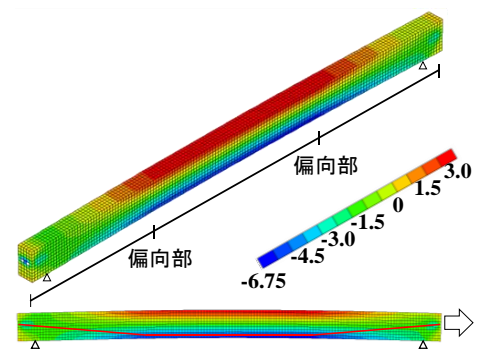


図-7 コンクリートのひずみ分布図

表-1 理論値

上縁	2.05	MPa
下縁	-5.75	MPa

## PC 鋼材の付着挙動に及ぼすグラウト領域の影響に関する実験研究

EC19032 桑山拓巳

### 1. 研究の背景, 目的

鋼材の付着特性について、既往の研究では異形鉄筋の付着応力-すべり関係に鋼材ひずみが影響することが指摘されており、また付着応力-すべり-ひずみ関係にかぶり厚の影響を考慮したモデル<sup>2)</sup>が提案されている。このため、PC 鋼材とグラウト間の付着特性についても、鋼材のひずみや鋼材周囲のグラウト量が影響していると考えられる。しかしながら、既往の研究において、緊張状態にある鋼材とグラウト間の付着特性に対して鋼材周囲のグラウト量が付着特性に及ぼす影響は検討されていないのが現状である。そこで本研究では、PC 鋼材周囲のグラウト量が緊張状態にある PC 鋼材の付着特性に及ぼす影響に関する知見を得ることを目的とする。具体的にはシース管径を変数とした緊張状態にある PC 鋼材の両引き試験を実施することで、シース管径（グラウト量）が PC 鋼材とグラウト間の付着強度に及ぼす傾向を明らかとすることを目的とする。これは、図-1 に示すように PC 鋼材が偏向に伴いシース管内に分布した際の付着特性の評価を意図したものでもある。

### 2. 試験体概要

試験体に使用したシース管、グラウト（モルタル）および使用した鋼材の鋼材表をそれぞれ表-1 に、表-2 および表-3 に示す。シース管には管径を変えた 1023, 1030, 1035, 1040 の 4 種類を使用し、シース管と鋼材の間に充填するグラウト（モルタル）は市販のものである太平洋ハイジェクター（超低粘性型 PC グラウトフレミックスタイプ）を使用した。鋼材には異形鉄筋であるウルボンを使用した。

作製手順については、初めに治具に鋼材を接続し、鋼材のひずみの変位を測定するためにひずみゲージを鋼材に貼付し、シース管を鋼材の中心位置に合わせてひずみゲージを貼付した位置と対応するようにシース管に一直線上かつバリが出ないように直径 4mm 程度の穴をあけた。ひずみゲージの貼付位置とシース管の穴の位置については図-2 に示す。



図-1 シース管内の PC 鋼材分布例<sup>3)</sup>

表-1 使用するシース管

呼び名	シース				ジョイント			
	内径 (mm)	外径 (mm)	鋼板厚(mm)	概算質量(kg/m)	内径 (mm)	外径 (mm)	鋼板厚(mm)	長さ(mm)
1023	23	27	0.25	0.18	26	30	0.25	170
1030	30	34	0.25	0.25	33	37	0.25	195
1035	35	39	0.25	0.29	38	42	0.25	195
1040	40	44	0.27	0.35	43	47	0.27	195

表-2 モルタルの配合

材料	記号	配合分量	W/M
太平洋ハイジェクター	M	1.0kg	
水	W	420cc	40%

表-3 使用する鋼材

鉄筋の種類	直径(mm)	公称断面積(mm <sup>2</sup> )	降伏強度(Mpa)
ウルボン	9.0	64.0	1275

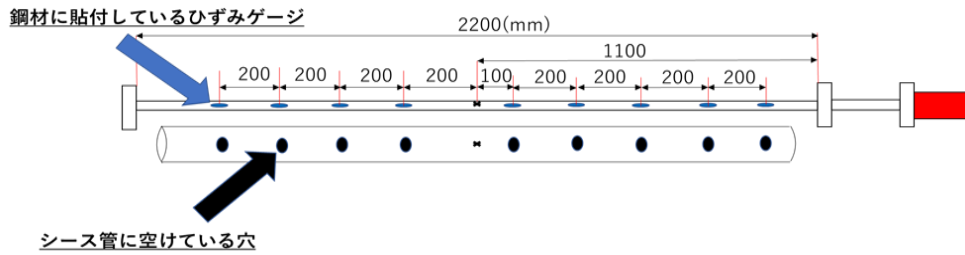


図-2 ひずみゲージ貼付位置と対応するシース管の穴

表-4 数値処理後のひずみの計測値の表

P'minからの差分 (KN)	引張力 (KN)	100mm	300mm	500mm	700mm	900mm	1200mm	1400mm	1600mm	1800mm
0	38.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.53	38.63	0.95238	0.95238	0.95238	0.95238	1.9048	0.95238	0.95238	0.95238	0.95238
0.93	39.03	0.95238	0.95238	1.90476	2.85714	3.8096	1.90476	1.90476	0.95238	0.95238
1.39	39.49	2.85714	2.85714	2.85714	3.80952	4.7619	2.85714	3.80953	3.80952	2.85714
2.06	40.16	3.80952	4.7619	3.80952	5.71428	7.6191	3.80952	4.76191	4.76191	4.76191
2.19	40.29	4.7619	5.71429	6.66667	5.71428	8.5715	5.71428	5.71429	5.71429	4.76191
2.93	41.03	6.66667	6.66667	7.61905	7.61905	10.4762	6.66667	6.66667	6.66667	6.66667
3.59	41.69	9.52381	8.57143	9.52381	9.52381	14.2858	8.57143	8.57143	8.57143	8.57143
4.19	42.29	10.47619	10.47619	11.42857	11.42857	18.0953	11.42857	10.47619	11.42857	10.47619
4.66	42.76	14.28571	14.28571	15.23809	15.23809	24.7619	14.28571	14.28571	14.28571	15.2381
5.32	43.42	26.66667	26.66667	27.61905	27.61905	41.9048	26.66667	26.66667	27.61905	27.61905
5.32	43.42	28.57143	28.57143	31.42857	28.57143	40.9524	25.71428	196.1905	24.76191	28.57143
5.59	43.69	40	36.19048	250.4762	36.19048	58.0953	37.14286	219.0477	36.19048	40.00001
5.72	43.82	49.52381	45.71429	266.6667	45.71429	74.2857	46.66667	234.2858	46.66667	49.52382
6.06	44.16	52.38096	202.8571	217.1428	54.28571	93.3334	60	257.1429	59.04762	62.85716
5.99	44.09	50.47619	194.2857	191.4286	260	75.2381	57.14286	251.4286	56.19048	60.00001
6.19	44.29	210.4762	203.8095	212.3809	281.9048	98.0953	71.4286	274.2858	70.47624	74.28576

次にひずみゲージを対応するシース管穴から引張出す必要があるためテープで補強を行いピンセットなどで穴から引張出した。次に両引き試験にて実験に使用する鋼材に初期導入緊張量をひずみが約 3000 $\mu$ （事前の鋼材引張試験において記録された降伏強度の 50%程度）になるまで 1 度目の引張を行い引張力が抜けないように固定したものを PC 鋼材とした。最終的にシース管内をグラウトで満たすためシース管の横穴を粘土とビニールテープでふさが漏れがないか確認を行った。PC 鋼材がシース管のちょうど中心位置を通るように調節し、供試体が水平をとれているか確かめた後グラウトは市販のものである太平洋ハイジェクター（超低粘性型 PC グラウトフレミックタイプ）を使用し水モルタル比 40%で、練り混ぜ時間は推奨されている 90 秒でグラウト、水の順番で混ぜムラがないようにミキサーにて均等に練り合わせた。バイブレータを当てながらグラウト内の気泡を抜きつつシース管内の隙間ないように迅速に充填を行った。モルタルの耐荷性能を確認するためにテストピースを 3 本作成し養生期間を試験体と同じ 1 週間とし、1 週間後テストピースと試験体ともに硬化しているのを確認し両引き試験を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験の数値処理概要

二度目の引張試験で測定できたひずみの測定値をジャッキ側の鋼材の端からひずみゲージがある距離ごとに（100mm~1800mm）で整理を行なった。次に計測できた値を空間的な引張力-ひずみの関係で評価するための事前の処理としてグラウトが硬化した後に行った 2 度目の引張試験の鋼材ひずみ測定の際の初期導入緊張量がどの程度の値になっているかの確認を行った。確認の方法としては一週間の養生が終了し、2 度目の引張試験を開始する距離ごと（100mm~1800mm）の直前のひずみ  $\epsilon(\mu)$  を、使用しているウルボン鋼材の断面積  $A$ （63.585mm<sup>2</sup>）、ウルボン鋼材のヤング係数  $E_s(210000N/mm^2)$  を式(1)に代入し求め、 $P'min$  とし、

$$P' = AE_s \epsilon \quad (1)$$

$P'min$ =各試験体の計測した引張力（P）となる値から距離ごとに計測したひずみの値にすべてひび割れが生じている値（急激にひずみの値が大きくなっている値）の引張力までを赤色で色付けを行った。後の処理がしやすいようにひび割れが生じており数値処理に使用できない値を黄色、数値処理に使用できる値を青色で判別し表-4 のように色付け、 $P'min$  相当の引張力とひずみを基準とし引張力とひずみの増分で表を作った。この処理を異なる管径のシース管の 4 本で行った。両引き試験の治具については図-3 に示す。



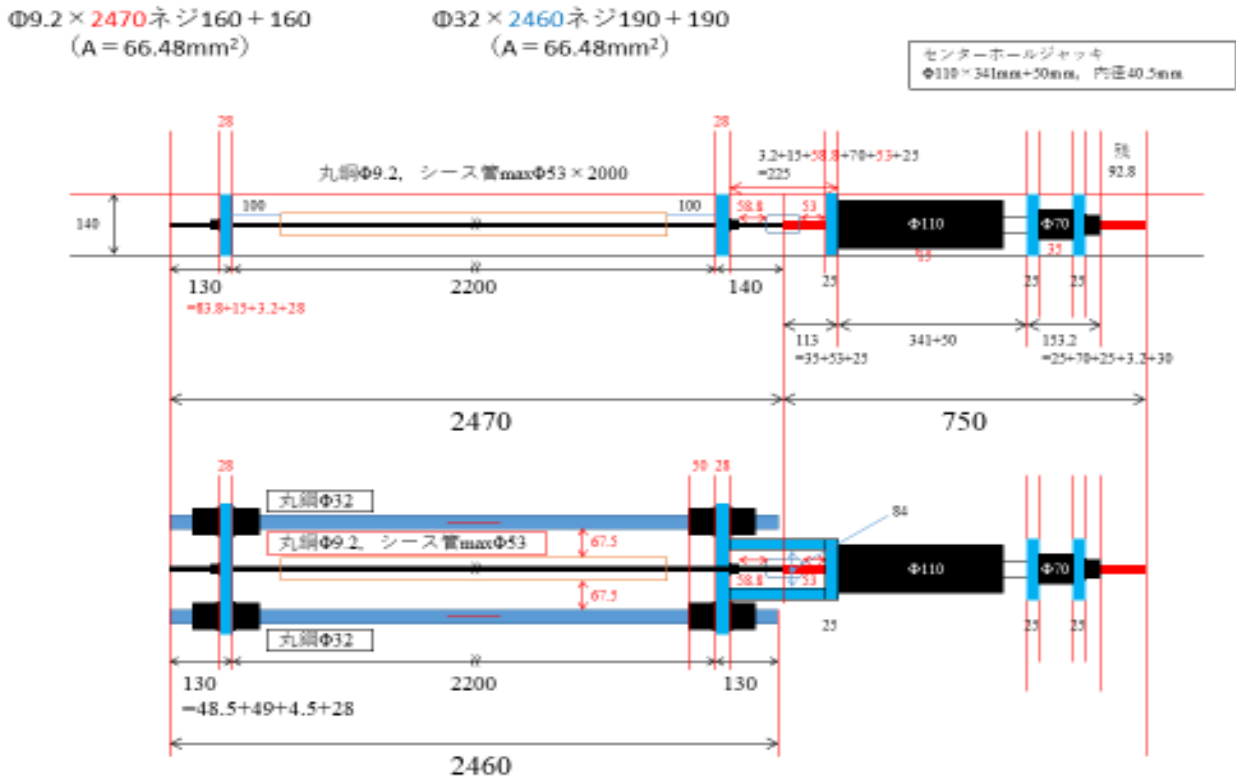


図-3 治具寸法詳細

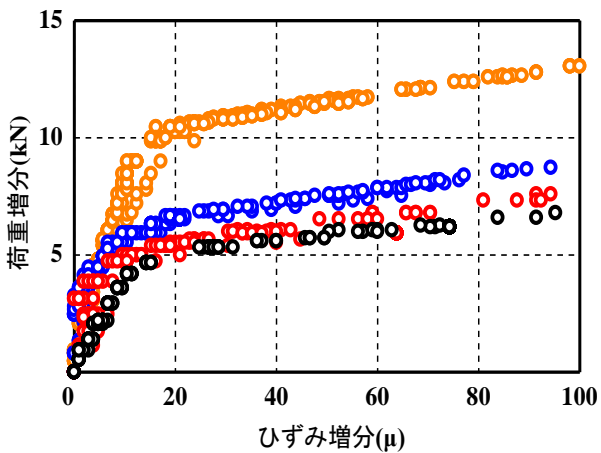


図-4 P' min 相当のひずみからの増分-  
P' min からの増分関係

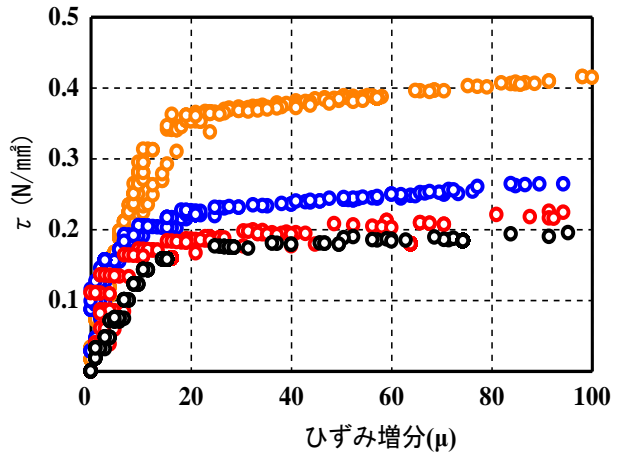


図-5 P' min 相当のひずみからの増分-  
付着強度 τ 関係

#### 4.1 解析結果 引張力-ひずみの関係

表-4 のように処理を行った数値を用いて引張力 (P' min からの増分) とひずみ (P' min 相当のひずみからの増分) からどのような関係があるのかを明らかにした。初めに横軸に引張力 (P' min からの増分), 縦軸にひずみ (P' min 相当のひずみからの増分) で図-4 を大幅に外れている値を削除し製作した。異なる管径のシース管 23mm, 30mm, 35mm, 40mm の各グラフ全てある点から傾きが大幅に変化していることが分かった。この点を変換点 (グラフの傾きが大きく変化している点) と呼称し, シース管ごとの変換点を求めた。変換点を含む塊を過ぎると試験体の PC 鋼材とグラウト間の付着強度が減少していき PC 鋼材にすべりが生じている状態になった。このことからシース管径が小さいものほど引張力を与えたときに PC 鋼材とグラウトの付着強度が減少し

ていきやすく、すべりが生じる変換点を含む塊が引張力が小さい値で生じることが判明した。すなわちシース管径を大きくしていくと同じ引張力をかけた際でも鋼材のひずみが小さく鋼材がすべるまでに必要な引張力が大きくなった。

#### 4.2 解析結果 引張力-付着強度の関係

式(2)を使用し算出した  $\tau$  を縦軸に  $P_{min}$  相当の引張力に対応するひずみの値からの増加分を横軸に使用して図-5を作成した。付着強度がある程度まで上昇していくとグラフを見てわかる通り PC 鋼材のすべりが生じた為大きく折れ曲がっていた。今回の場合は鋼材とグラウトの付着強度が引張試験にて引張力を与えることによって鋼材が元の位置からの変位(ひずみ)の変化に引張られ比例して変化していった。鋼材とグラウトの付着強度が許容できる範囲以上ひずみの変位が生じると PC 鋼材にすべりが生じてグラフに折れ曲がりが見られると考えられる。

$$\tau = \frac{P - AE_s \varepsilon}{\pi DL} \quad (2)$$

#### 5. まとめ

結論としてシース管径が大きくなる(グラウト量が増える)と引張力に対する試験体の耐力が上がっていることが分かった。またひずみ-付着強度関係においてもシース管径が大きくなる程(グラウト量が増える程)試験体の耐力が上がっていることが分かった。また本実験を実施し得た成果から今後への活用方法を考察する。ごくまれに高速道路や橋の桁においてシース管内の PC より線がシース管の中心を大きく外れてグラウトが図-1のように硬化していることがある。このような状態になると鋼材一本あたりが必要とするかぶり厚さを獲得できていない可能性が高く設計段階で算出された耐力に満たない可能性がある。このような現象は実際の現場でもごくまれに見られており、安全性の観点から架け代えを余儀なくされた橋などもある。そこで今回行った PC 鋼材の付着挙動に及ぼすグラウト領域の影響に関する実験は、緊張状態の試験体のかぶり厚を変更したときにどの程度付着強度が変わるのかを実際のモデルを作り実験を行った為、設計段階で算出された耐力を発現するために必要なかぶり厚を満たしより安全な建造物の維持管理や設計などを手助けできるのではと考える。

#### 参考文献

- 1) 島 弘, 周礼良, 岡村 甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集 第 378 号/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 2) 飯塚敬一, 檜貝勇, 斎藤成彦, 高橋良輔: かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.2, pp.280-296, 2011
- 3) 蒲和也, 渡邊晋也ほか: PC ケーブルの破断が PC 桁の耐荷性状に及ぼす影響, 構造工学論文集 Vol.66A, pp.725-732, 2020.3

PC ケーブルが破断した PC 桁の残存プレストレスと耐荷挙動の数値解析的評価

EC19033 小島悠生

1. 目的

ポストテンション式 PC 桁はその特徴からスパンの長い橋梁に多く用いられている。近年、PC 桁における PC 鋼材の破断が報告され、調査の結果グラウトのブリーディングや施工不良などに起因するグラウト充填不良から、PC 鋼材の腐食が進展し、破断に至っていることが分かっている。PC 鋼材の破断割合が増加すると、落橋に至る危険性があるため、PC 鋼材の破断が残存プレストレスや耐荷性能に及ぼす影響を把握する必要がある。

そこで本研究では、安全性の視点からグラウト充填不良を有する PC 桁において、SWPR7BL7 本より 12.7mm を 12 本(12T12.7)用いた PC はり部材の PC 鋼材を切断した既往の実験を対象に、付着状況のモデル化が PC 鋼材破断後に有する残存プレストレス分布や耐荷性能に及ぼす影響を把握する事を目的に数値解析的検討を実施した。また、健全な PC を想定して桁に荷重がかかった状態で PC 鋼材が破断した時のひずみの変化の様子の把握と残存プレストレス分布の把握をする数値解析的検討を実施した。

2. 検討概要

解析手法の妥当性を検討するために、渡邊らの実験<sup>1)</sup>を解析対象とした。図-1 に解析対象とした供試体 2-1 ~2-3 の供試体概要と表-2 に供試体材料の特性値を示す。供試体 2-1~2-3 では、表-1 に示すように、PC 鋼材を切断割合がそれぞれ 0%、50%、75%となるように切断したのち、2 点静的載荷が実施されている。

供用期間中の PC はりにおいて、PC 鋼材の破断が生じた際の挙動を検討するために、健全な PC 桁を想定した検討では供試体の寸法は供試体 2-1~2-3 と同じにして、図-2 に示すように支点間のスパンに分布荷重を作用させ、かつ供試体 2-1~2-3 と同じ位置の PC 鋼材を切断したのち、図中の II および III 断面位置の PC 鋼材を徐々に切断するケーススタディを実施した。

この検討内容の一覧を表-2 に示す。

上記の 2 つの検討において、渡邊らの実験<sup>1)</sup>では、供試体に PC 鋼材を切断するために、供試体端部付近に開口部を設けたが解析では開口部が無くても切断できるため設けなかった。PC 鋼材に一定のプレストレスを導入し、

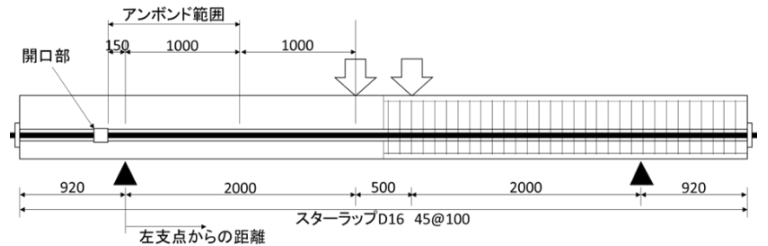


図-1 2-1~2-3 供試体諸元<sup>1)</sup>

表-1 材料特性値

供試体	PC鋼材			軸方向鉄筋		スターラップ		グラウト		コンクリート		有効プレ ストレス (kN)	切断割合
	$f_{py}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{pu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_p$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_{wy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_w$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_g$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_g$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )		
2-1	1849	2020	194	370	194	345	194	34.1	12.9	58.1	39.5	1213	0%
2-2										57.0	40.1	1174	50%
2-3										57.0	40.1	1174	75%

表-2 切断位置と切断割合

Case	Case1		Case2		Case3		Case4		Case5		Case6	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
切断位置	I	III	I	III	I	III	I	III	I	III	I	III
切断割合	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/3	1/2	1/3	2/3	1/3	2/3

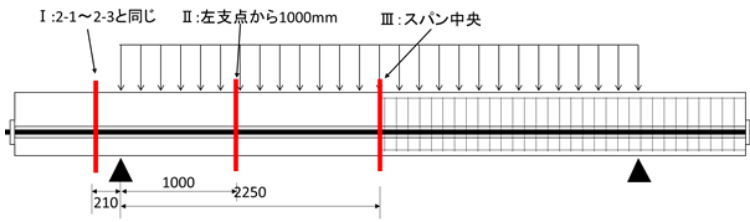


図-2 切断位置と分布荷重の様子

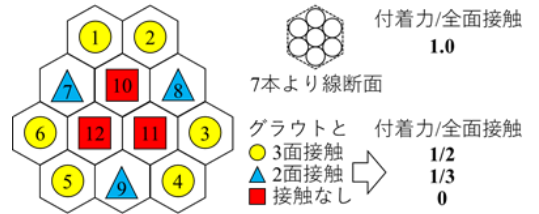


図-3 鋼材配置と付着特性の仮定

グラウトを充てんした矩形断面のPCはりのモデルを製作した。なお、供試体にはグラウト充てん不良区間を想定したアンボンド区間を設けたが、健全な橋梁を想定した検討では、アンボンド区間は設けない。本実験では、PC鋼材に12T12.7が使用されており、鋼材の切断量が残存プレストレスと曲げ耐荷性能に及ぼす影響が検討されている。複数のより線を束ねた場合、それらの配置により各より線がグラウトと付着する領域は異なると考えられる。そこで本研究では、12本のより線をそれぞれ棒要素でモデル化して、本解析対象のようにPC鋼材に偏向部がないPC鋼材に対して、文献1)内の鋼材切断後の状況画像を参考に、図-3に示すように12本のより線の配置とグラウトとの接触領域割合に応じた付着特性を仮定した。検討Case1として、図-3の付着特性を仮定した場合、Case2、Case3として、それぞれすべての鋼材要素の付着特性を一律、付着力割合1/3とした場合、2/3とした場合について、付着状況が鋼材破断時の残存プレストレス分布や曲げ耐荷性能に及ぼす影響を検討した。

鋼材要素軸方向の付着応力 $\tau$ -すべり $S$ 関係には、式(1)に示すように島ら<sup>2)</sup>が提案する付着応力-すべり-ひずみ関係に、かぶり厚や鋼材ふし形状の影響を簡易に導入する強度パラメータ $\alpha$ を乗じた。なお、1本のより線に対する強度パラメータ $\alpha$ は、遠藤ら<sup>3)</sup>の検討結果を用いて0.3とし、各検討Caseに対する強度パラメータ $\alpha$ を適宜設定することで反映させた。本研究では12本のより線要素を同位置に配置し、より線間の摩擦を無視した。

$$\tau = \alpha \times 0.73 f_g' (\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad s = 1000S/D \quad (1)$$

ここで、 $D$ ：鉄筋径、 $f_g'$ ：グラウト強度、 $\varepsilon$ ：PC鋼材ひずみとし、 $\varepsilon$ は、鋼材要素切断時および載荷時に対して、グラウト後のより線要素ひずみの変化量の大きさの最大値とした。解析では、アンボンド状態で緊張力を導入したのちにより線とグラウト間の付着をモデル化し、より線の切断は、切断するより線要素の断面積をゼロとすることで表現した。コンクリート構成則には格子等価連続体モデル<sup>4)</sup>を使用し、より線要素の構成則はトリリニア型とした。曲げ耐荷性能評価では、より線要素の切断に引き続き荷重増分法により荷重載荷した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 供試体 2-1~2-3 の結果

図-5に鋼材切断時に試験体表面のコンクリートひずみから評価したプレストレス残存割合<sup>1)</sup>を示す。解析ではより線1本を切断する毎に8%(1/12%)ほどずつプレストレスが減少した。予測された6本切断時の残

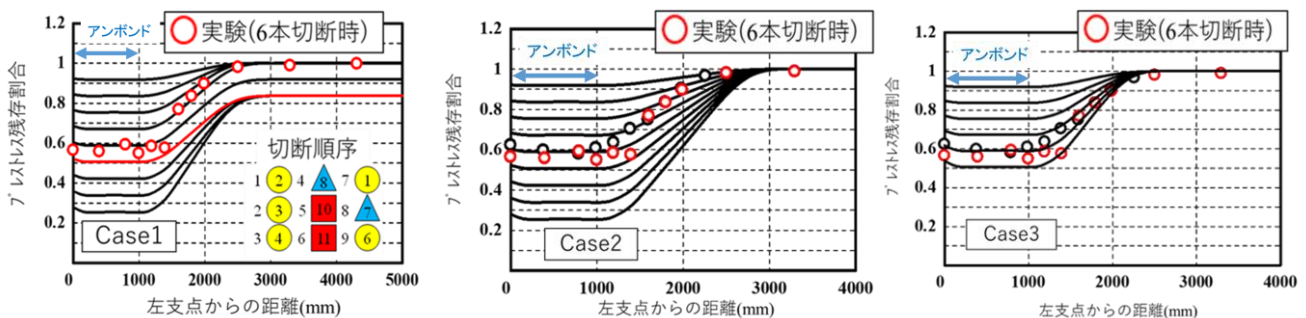


図-5 プレストレス残存割合



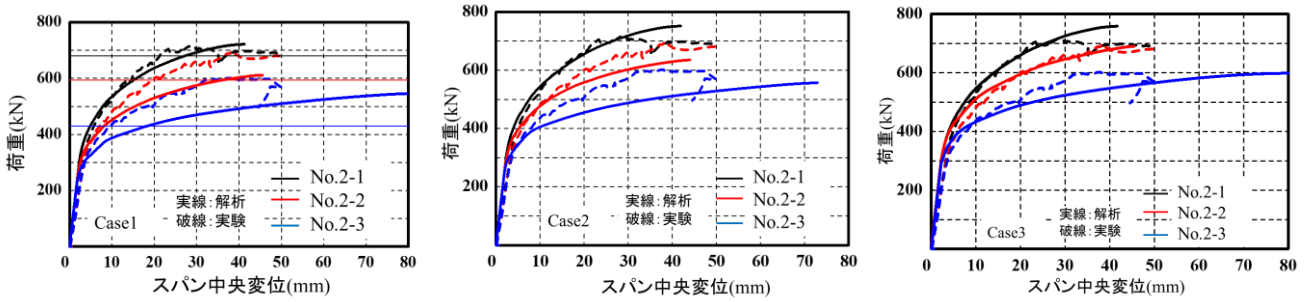


図-6 荷重—変位関係の比較

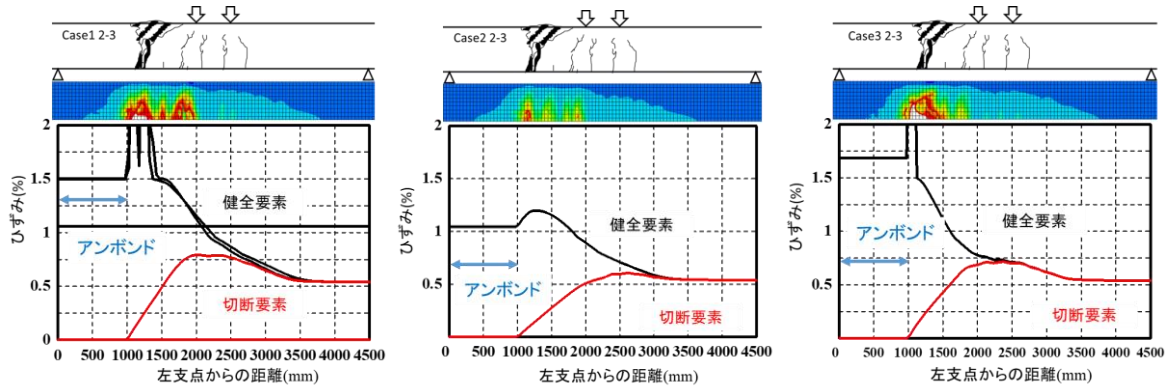
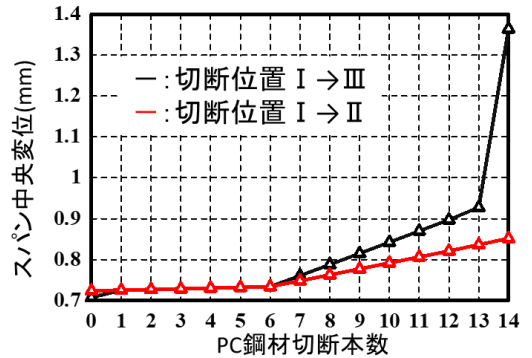


図-7 実験ひび割れ図、解析ひずみ分布、荷重最大時の鋼材ひずみ分布

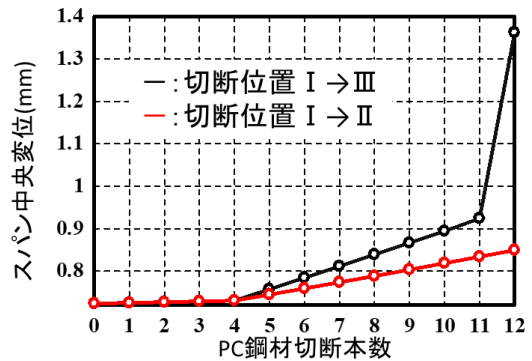
存割合がアンボンド範囲で実験よりやや小さい点については、実験ではより線間の摩擦が考えられる。なお、12本のより線を1本の鋼材要素でモデル化すると、このような減少は予測されなかった。また、プレストレスが回復するまでの距離は、切断本数によらず、各ケースにおいてほぼ一定となった。本解析対象の場合、12本の各より線の付着強度を、1本のより線に対するその2/3とすることで実験値と良い一致を示した。図-6に示す荷重—変位関係の比較より、実験と同様に、切断の有無は初期剛性に影響せず、ひび割れ発生後の剛性に影響した。最大荷重は、Case3が実験値と良い一致を示した。図-7に示す供試体2-3の荷重最大時の鋼材ひずみの分布図から、切断したPC鋼材はアンボンド範囲から離れた等曲げ区間内で抵抗し、健全なPC鋼材は実験で終局断面となった断面位置で抵抗するように断面位置で異なる挙動を示した。なお、ひずみ1.5%は、PC鋼材の応力—ひずみ関係において、応力が $f_{pu}$ となるひずみである。

### 3.2 健全なPC桁を想定した検討の結果

図-8にCase6-1、6-2、4-1、4-2のたわみの変化を示す。Case6-1、4-1ではPC鋼材を8本切った段階でひび割れが発生していることが分かる。ひび割れが発生するまでは切断した箇所ではひずみが漸進的に大きくなっていることが分かり、急激に変化が現れる瞬間は無かった。弾性状態のときはPC鋼材を切



(a) Case6-1、6-2



(b) Case4-1、4-2

図-8 たわみの変化の様子

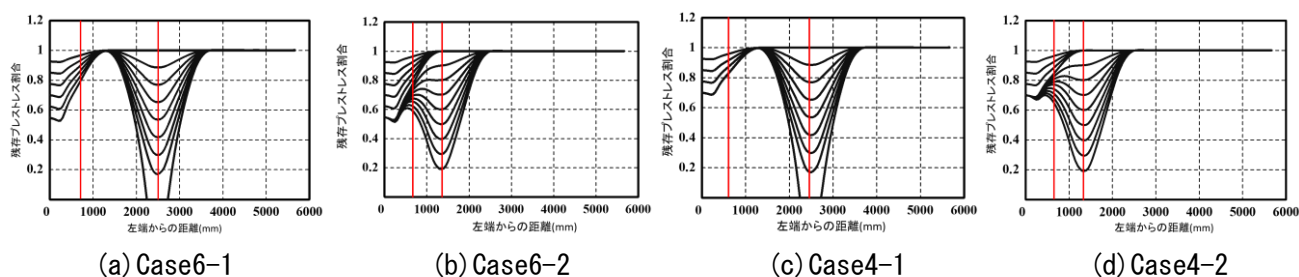


図-9 プレストレス残存割合分布(左から Case6-1, 6-2, 4-1, 4-2)

断すると線形的な変化を示しており、ひび割れが発生すると急激に上昇している。また、2つのグラフを比較すると、1か所目の切断割合が変わっても同一断面であればたわみの変化は同じくらいの傾きで上昇していることが分かる。図-9にCase6-1、6-2、4-1、4-2のプレストレス残存割合分布を示す。図中の赤線は切断した位置を示すPCより線を1本切った時のプレストレスの減少割合、プレストレスの戻る位置はともに供試体2-1~2-3と同じくらいの値を示した。本検討からひび割れが発生するまでにたわみの不自然な変化や、見た目に大きな変化が見られることはなく、ひび割れ発生直前まで線形的に変化した。そのため、たわみの変化を見ることによって、たわみの増加が確認出来たらその量によって内部のPC鋼材の切断割合とはりにひび割れが発生する時期を予測することができる。

#### 4. 結論

供試体2-1~2-3の検討から、より線束のPC鋼材のうち、複数本を切断した際にプレストレスが減少する区間は、グラウトの付着強度に依存しており、切断本数によらずほぼ一定となる。中心に配置されている鋼材はグラウトとの付着もしくはより線間の摩擦が存在すると考えられる。破断により、各PC鋼材は同一断面であっても鋼材のひずみは異なる抵抗を示した。

健全なPC桁を想定した検討から、スパンの中央でPC鋼材の切断を行った際に8本目の鋼材を切断した時にひび割れが発生する。供試体のたわみは、ひび割れが発生するまでは線形的にスパン中央での変位が上昇して、ひび割れが発生すると急激に変位が上昇した。1か所目での切断割合が変わっても同一断面でPC鋼材の切断を行うとたわみの上昇割合は同じ傾きになった。プレストレスの減少割合とプレストレスの戻る位置は供試体2-1~2-3と同様になった。

#### 参考文献

- 1) 渡辺健, 田所敏弥, 谷村幸裕ほか: グラウト充填不良を有するPC桁の鋼材破断後の耐力評価法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.11-16, 2011.2.
- 2) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, Vol.378/V-6, pp.165-174, 1987.
- 3) 遠藤滉大, 小島悠生, 伊藤 睦: PC鋼材破断時の付着特性と残存プレストレス分布の数値解析的評価, 令和4年度土木学会中部支部研究発表会概要集, 2023.3.
- 4) 伊藤 睦, Kongkeo, P., 中村 光, 田辺忠頭: 格子等価連続体法による鉄筋コンクリート部材の有限要素解析, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.115-129, 2004.
- 5) 玉越隆史, 横田 芳輝: 平成25年度道路構造物に関する基本データ集, 国総研資料第822号, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryon/tnn/tnn0822.htm> (2023年1月確認)
- 6) 是永健好, 渡辺英義: PC鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.1083-1084, 1999.9

## 水平ひび割れを有する RC はり部材の耐荷特性に関する実験的研究

EC19046 高橋 隆太

### 1. 序論

実橋において、床版内に複数の水平ひび割れが確認された。このような水平ひび割れ発生要因には、凍害<sup>1)</sup>、アルカリ骨材反応<sup>2)</sup>、交通荷重による疲労<sup>3)4)</sup>などが考えられており、耐荷性や耐疲労性の検討がなされている。水平ひび割れの存在により各種性能が低下する結果が報告されている一方で、田中<sup>5)</sup>は、人工的な水平不連続面を RC はり部材内に設けることでひび割れを制御し、部材の耐荷性能を向上させる検討を実施している。また、導入する人工的な不連続面の形状が波板形状である場合と平面である場合とでは、その耐荷機構に変化が生じることが報告されている。しかしながら、これら大規模で詳細な検討が実施されているものの、複数本の水平ひび割れが生じた部材の耐荷特性に関する検討は実施されていないのが現状である。そこで本研究では、複数本の水平ひび割れが RC はり部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響に関する基礎的な知見を得ることを目的とした。具体的には、水平ひび割れを人工的に模擬した小型実験供試体の載荷実験を通じて、導入した模擬水平ひび割れが RC 部材のせん断耐力やひび割れ発生状況与える影響を検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体概要

大型供試体を用いて検討を実施することは困難であるから、本研究で 100×100×400mm の小型供試体に引張鉄筋のみを配置して、健全な状態で斜め引張破壊させる供試体を基準とし、複数本の水平ひび割れがせん断耐力やひび割れ性状に及ぼす影響を実験的に評価する。配筋量や材料強度と破壊モード・破壊荷重の関係より、斜め引張破壊させるには、D13 鉄筋を使用すれば、コンクリート強度や鋼材の降伏強度は特に影響しないことが算出された。図-1 に示す実験供試体を基準供試体とし、試験体内に様々な水平ひび割れを導入した載荷実験を実施することとした。

#### 2.2 模擬水平ひび割れの導入方法

段ボールの構成要素の一つである「中しん」と呼ばれる波型の紙を用いることで、ひび割れ領域やひび割れ幅を明確にした模擬水平ひび割れを導入する。「中しん」を用いた理由は、波型のひび割れ面を再現できるうえ、剛性や強度が小さく、部材の変形には影響を与えず、入手や加工が容易なためである。この「中しん」を複数枚重ねることでひび割れ幅を制御し、様々な供試体を作製した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

実験より得られたそれぞれの荷重-変位関係を、それぞれの図に示す。模擬水平ひび割れが導入されていない健全供試体と様々な位置に模擬水平ひび割れを一カ所、二カ所導入した供試体を比較する。



図-1 実験供試体概要

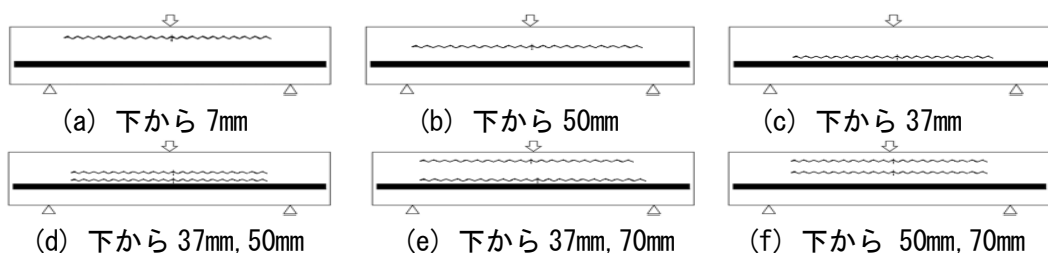
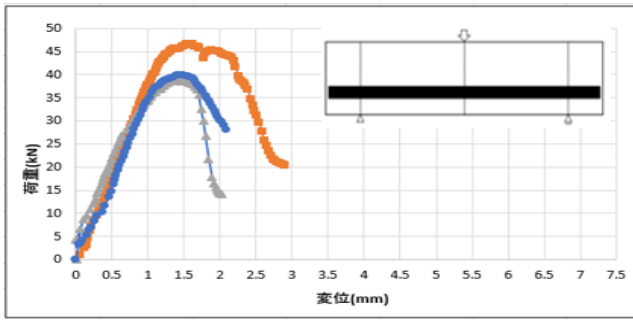
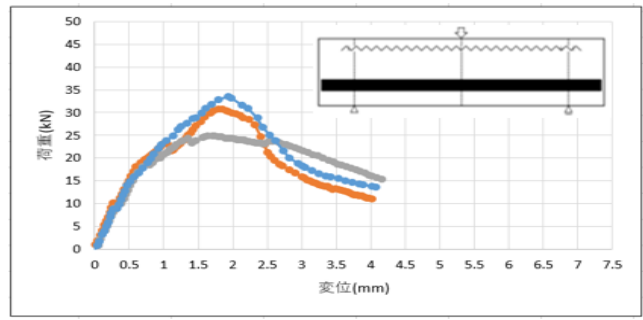


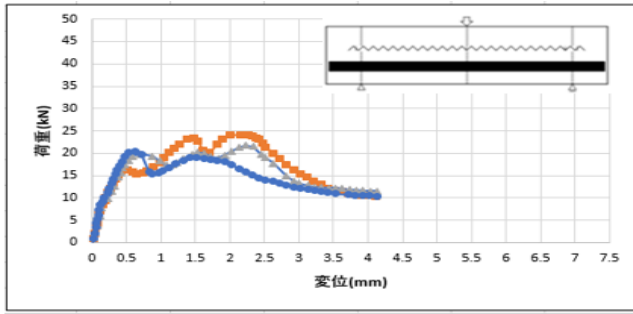
図-2 模擬水平ひび割れの導入ケース



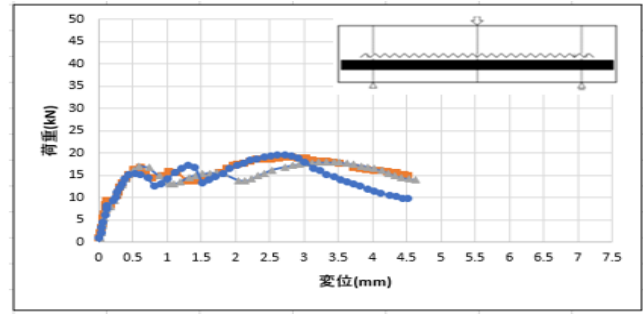
(a) Normal 荷重－変位関係



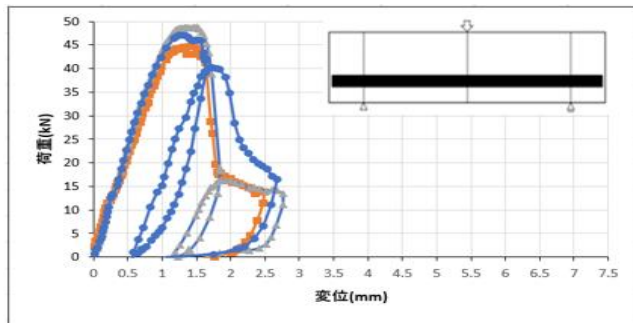
(b) 下から 70mm 荷重－変位関係



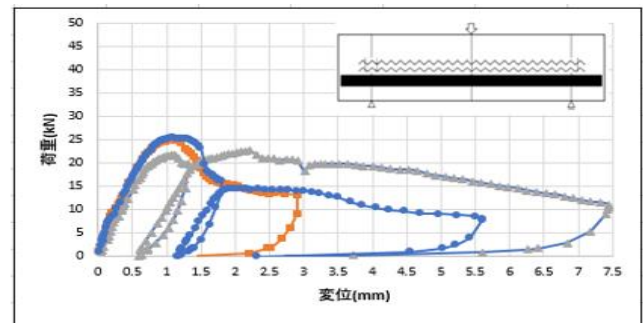
(c) 下から 50mm 荷重－変位関係



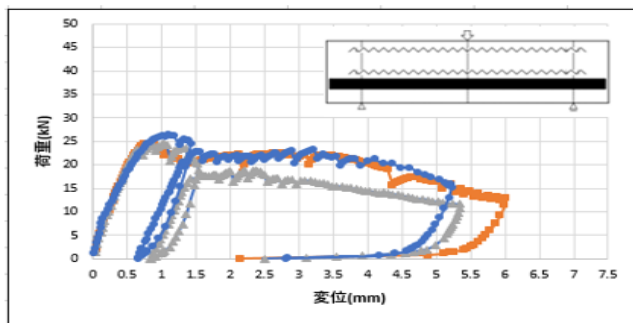
(d) 下から 37mm 荷重－変位関係



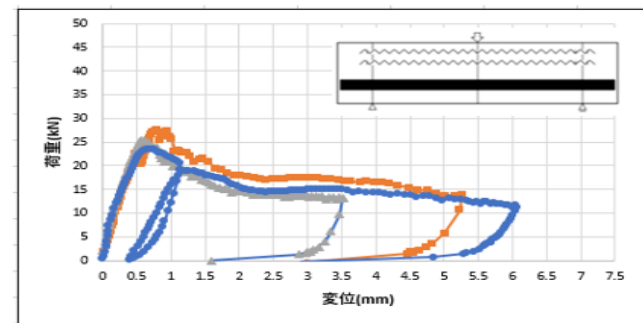
(e) Normal 荷重－変位関係



(f) 下から 37mm, 50mm 荷重－変位関係



(g) 下から 37mm, 70mm 荷重－変位関係



(h) 下から 50mm, 70mm 荷重－変位関係

図－3 各供試体の荷重－変位関係

(a)Normal の圧縮強度は  $35.62\text{N/mm}^2$ 、(e)Normal の圧縮強度は  $35.02\text{N/mm}^2$  であった。

これらより、健全供試体と模擬水平ひび割れを数カ所導入した供試体では、健全供試体の方が最大荷重は大きくなり、荷重の変化率も大きくなるのが分かった。

模擬水平ひび割れを一カ所導入した供試体と模擬水平ひび割れを二カ所導入した供試体では、最大荷重は同じぐらいであり、荷重の変化率も同じような挙動を示した。また、模擬水平ひび割れを一カ所、二カ所導入しても荷重－変位関係は似ているため、模擬水平ひび割れを二カ所以上導入しても同じような結果が出るのではないかと考えられる。一方で、初期ひび割れに関しては、模擬水平ひび割れを二カ所以上導入することで、健全供試体よりも早く発生するのではないかと予想される。



### 3.2 供試体のひび割れ性状

模擬水平ひび割れを下から 37mm、50mm、70mm のそれぞれ一カ所に導入した供試体では、写真-2、写真-3、写真-4 より模擬水平ひび割れが導入された位置で、水平ひび割れが起きていることが分かった。また、3 つとも模擬水平ひび割れが導入された上の位置から斜めひび割れが発生していることが分かった。模擬水平ひび割れを一カ所導入した場合には、模擬水平ひび割れの位置がどこにあっても、導入した位置で水平ひび割れや斜めひび割れが発生するのではないかと考えられる。

次に模擬水平ひび割れを 37-50mm、37-70mm、50-70mm の二カ所導入した供試体では、写真-5、写真-6、写真-7 より上側に導入した模擬水平ひび割れの位置で、水平ひび割れが発生していることが分かった。したがって、模擬水平ひび割れを二カ所導入する場合は、どの位置に模擬水平ひび割れを導入しても、上側に導入した模擬水平ひび割れの位置で、水平ひび割れが発生するのではないかと予想される。また、模擬水平ひび割れを様々な位置に二カ所以上導入した場合でも、上側に導入した模擬水平ひび割れの位置で水平ひび割れが発生するのではないかと考えられる。斜めひび割れも上側に導入した模擬水平ひび割れの位置ぐらいから発生していることが分かった。模擬水平ひび割れを導入した供試体は、初期ひび割れ、斜めひび割れ、水平ひび割れという順でひび割れが発生していることが分かった。これらより、模擬水平ひび割れを導入することで、斜めひび割れや水平ひび割れが発生する位置、進展に影響を及ぼし、このひび割れの相違が、結果としてせん断耐力を低下させたことが予想される。

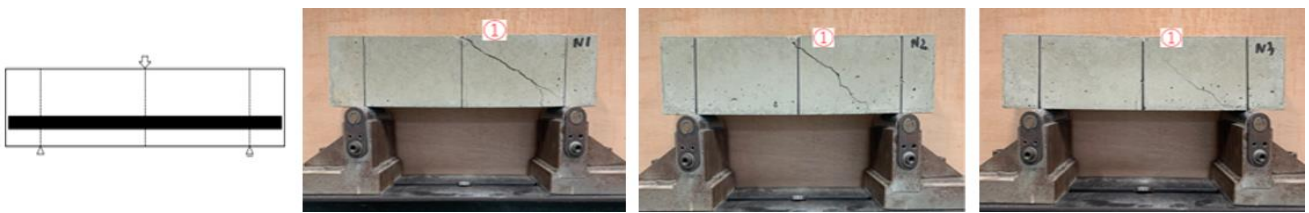


写真-1 (a)Normal ひび割れ

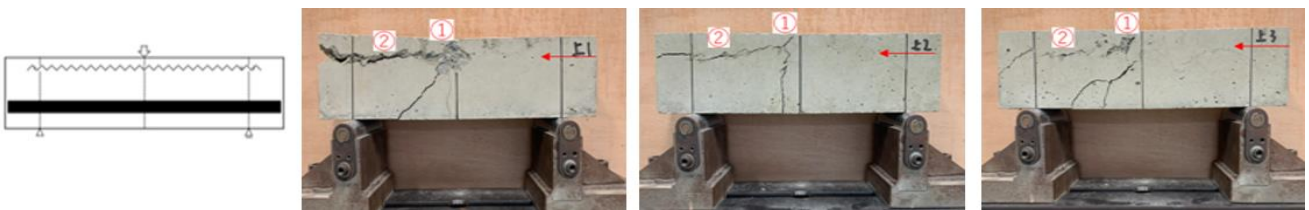


写真-2 (b)下から 70mm ひび割れ

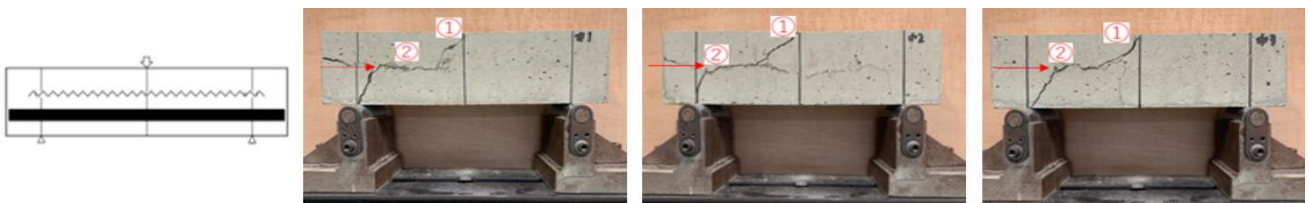


写真-3 (c)下から 50mm ひび割れ

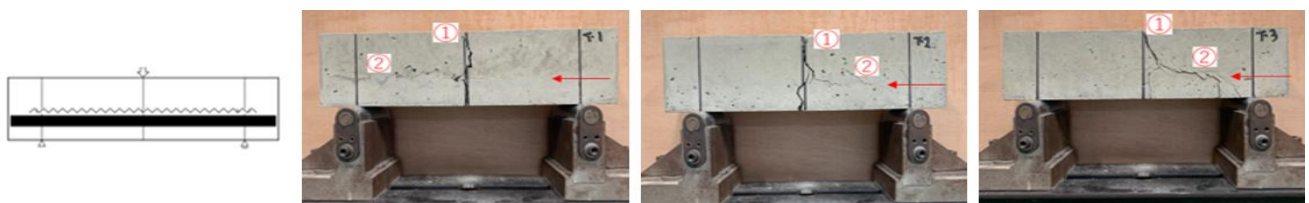


写真-4 (d)下から 37mm ひび割れ

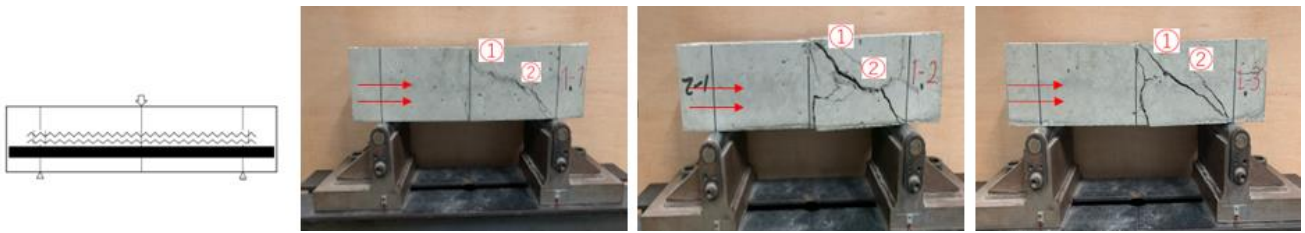


写真-5 (f) 下から 37mm, 50mm ひび割れ

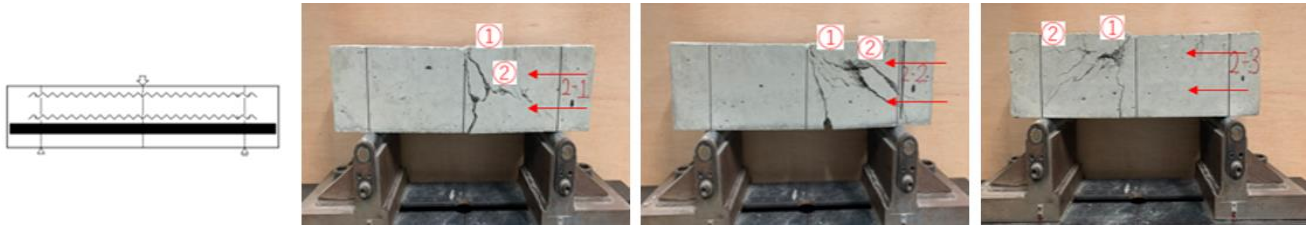


写真-6 (g) 下から 37mm, 70mm ひび割れ

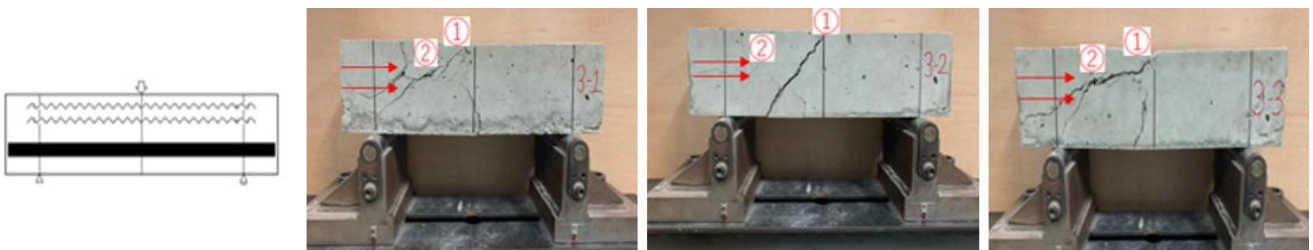


写真-7 (h) 下から 50mm, 70mm ひび割れ

#### 4. 結論

本研究では、複数本の水平ひび割れが RC はり部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、小型供試体で実験を行った。水平ひび割れを人工的に模擬した小型実験供試体の載荷実験を通じて、導入した模擬水平ひび割れが RC 部材のせん断耐力やひび割れ発生状況にどのような変化をもたらすのかを評価し、以下の結果を得た。

荷重-変位関係で初期剛性は、模擬水平ひび割れを一カ所、二カ所導入しても、健全供試体と同様の傾向にあり、最大荷重は、模擬水平ひび割れが存在することで、健全供試体よりも低下することが分かった。ひび割れの性状は、模擬水平ひび割れを導入することで、斜めひび割れや水平ひび割れに影響を及ぼしていることが分かった。これらより、模擬水平ひび割れが存在することで、結果としてせん断耐力を低下させていることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 林田 宏：水平ひび割れの位置や凍害劣化深さの違いが床版の耐力低下に与える影響，寒地土木研究所月報，No804，pp.2-13，2020.4
- 2) 前島 拓ほか：アルカシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響，土木学会論文集 E2，Vol.72，No.2，pp.126-145，2016
- 3) 横山 広，浦 修造，関口 幹夫，堀川 都志雄：床版の劣化現象および床版補強工法に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.451-455，2010
- 4) 石黒 裕崇，中村 光，山本 佳士，三浦 泰人：圧縮鉄筋近傍に水平ひび割れを有する RC 床版の押抜きせん断破壊挙動に関する研究 コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，2017
- 5) 田中 泰司：人工的な不連続面を設けた RC 部材のせん断耐荷挙動に関する研究，東京大学博士論文

## 残存プレストレス量の推定手法に関する研究

EC19052 永縄 篤

### 1. 序論

既往の研究<sup>1)</sup>では、PC道路橋の健全度評価は、目視を主体とした点検手法によることが多く、顕在化前の変状、部材内部の変状、応力状態の異常などの把握は難しいとされている。コンクリート橋のひび割れ等の変状については、これまでも課題が認識された都度、設計基準等の充実が図られ、変状を抑制するための努力が行われてきた。今後も、より高品質のPC橋を構築していくためには、コンクリートにひび割れが生じる事は宿命であることを理解しつつも、定期点検データの分析により抽出された供用後初期段階のPC橋の変状に対しての抑制に努めることが求められている。そこで本研究では、材料劣化した既設PC桁部材の残存プレストレス量の評価技術の構築を目的として、プレストレス量の違いが桁の挙動に及ぼす影響を解析的に検討した。

### 2. 解析対象と解析概要

#### 2.1 解析対象とした実験概要

解析対象とした供試体概要、载荷試験概要を図-1に示す。载荷方法は、等曲げ区間 1500 mm の 2 点载荷としている。载荷試験は、ひび割れ発生までを第一段階として荷重を一定のピッチで増加させ、ひび割れ発生時点で一旦除荷し、パイゲージを設置後、供試体の破壊まで第二段階の载荷を実施している。供試体の設計値と使用したコンクリートの配合および使用材料をそれぞれ表-1、表-2に示す。解析対象の供試体は所要のプレストレスが導入された直後において上縁側コンクリートの引張応力が許容応力度以下となるように決定されており、このプレストレス状態を 100%として、プレストレス導入量を 50%、10%と変化した 3 種類の供試体が作製されている。導入率 10%の供試体は鋼材配置形状の保持を目的に設定したものであり、積極的なプレストレスの導入がないとみなせる条件である。

表-1 実験供試体概要

項目	単位	100%	50%	10%	
プレストレス	種別	-	1S17.8		
	鋼材断面積	mm <sup>2</sup>	208.4		
	偏心量	mm	195		
	有効応力度	N/mm <sup>2</sup>	1110.0	555.0	111.0
	緊張量	kN	231.324	115.662	23.132
	偏心モーメント	kNm	-45108.180	-22554.090	-4510.818
	曲げ応力度	N/mm <sup>2</sup>	-2.48	-1.24	-0.24
	曲げ応力度	N/mm <sup>2</sup>	6.18	3.10	0.62
合成応力	上縁	N/mm <sup>2</sup>	-0.68	0.56	1.56
	下縁	N/mm <sup>2</sup>	4.38	1.30	-1.18

表-2 コンクリート配合

最大粗骨材寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
									減水材	AE剤
20	12.0	4.5	58.0	47.0	150.0	259	877	1015	2.07	1.04

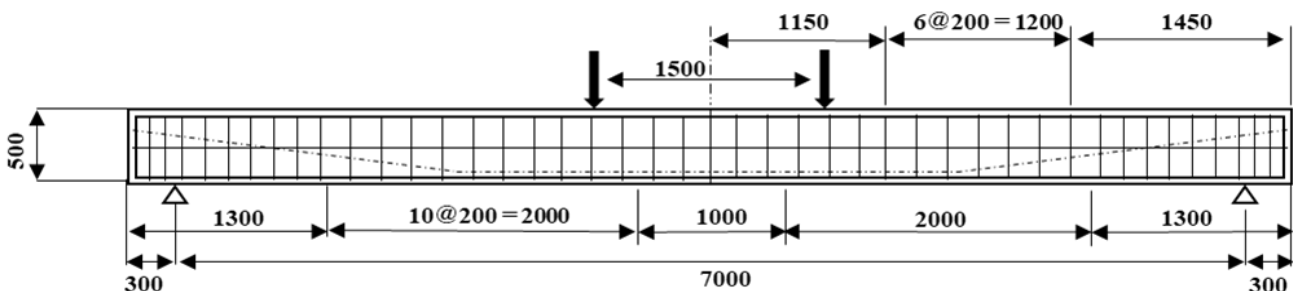


図-1 実験供試体概要

## 2.2 解析概要

本研究では、対象となる上記の荷重試験を、三次元解析ソフト LECOM<sup>2)</sup>を使用して解析した。解析をする際に、プレストレスは PC 鋼材とコンクリートは完全付着した状態で、PC 鋼材要素に初期ひずみを与えていることで導入した。解析結果と実験結果を比較することで、解析ソフトの妥当性を荷重-変位関係から評価した。また、プレストレス量を変数とした解析結果を用いて、導入プレストレス量と部材の剛性やコンクリート要素のひずみ量の変化などの関係を明らかにすることにより、非破壊的に既設橋梁の残存プレストレス量が評価可能であるかの検討を行った。

## 3. 解析結果

荷重変位関係を図-2 に示す。プレストレス導入量が 100%の供試体では 80kN でひび割れが発生しており、50%では 50kN で降伏している。10%では 30kN で降伏している。導入量が小さいほど早期に降伏している事が分かる。最大荷重に至る変位にも違いがある。図から実験結果と解析結果とで大幅な違いは見られないため解析結果の妥当性が言える。プレストレス導入量とひび割れ発生荷重関係を図-3 に示す。それぞれ導入量によってひび割れ荷重が大きく違っている事が分かる。導入量が 100%の時の数値を元にするると導入量が少なくなっていく毎にひび割れ荷重が小さくなっている事が確認できる。図-4 にひび割れ荷重での変位とプレストレス導入の関係を示す。この図から導入量が 100%を元に 50%、10%を比べると導入量が小さくなっていくたびに変位も下がっていることが分かる。図-5 に最大荷重での変異とプレストレス導入量関係図を示す。プレストレス導入量が 100%の時の変位が一番小さいことが分かる。ここで導入量 50%、10%と導入量が小さくなるごとに変位が大きくなっていることわかる。図-6 に最大荷重とプレストレス導入量関係図を示す。プレストレス導入量が 50%の時の荷重が最も大きく次に 100%の、10%と小さくなっている。ここからどのような関係性があるかどうか確認することができないため、プレストレス導入量を推定することは難しいと考える。ひび割れ発生直後の傾きについて図-7 に示す。この図は、ひび割れ発生直後の剛性をそれぞれ 100%、50%、10%のプレストレス導入量に分けて傾きを求めてある。導入量が 100%の傾きは 1.88、50%での傾きは 1.60、10%での傾きは 1.4 となっている。ここでプレストレス導入量が 100%、50%、10%と下がっていくにつれて傾きも下がっていることが分かる。

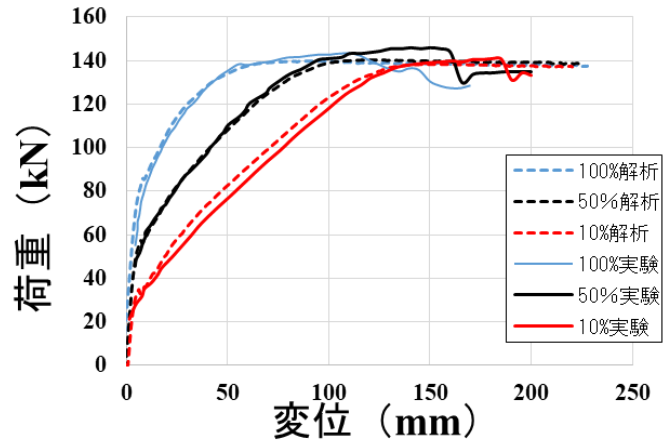


図-2 荷重-変位関係

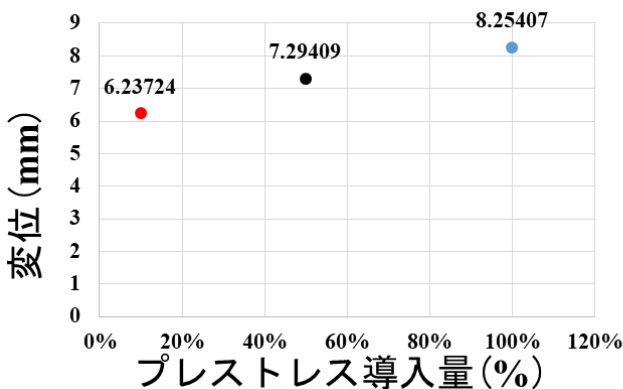


図-3 プレストレス導入量とひび割れ発生荷重

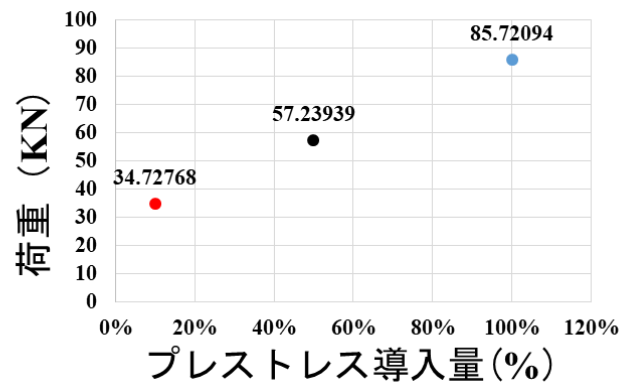


図-4 ひび割れ発生荷重での変位-導入量



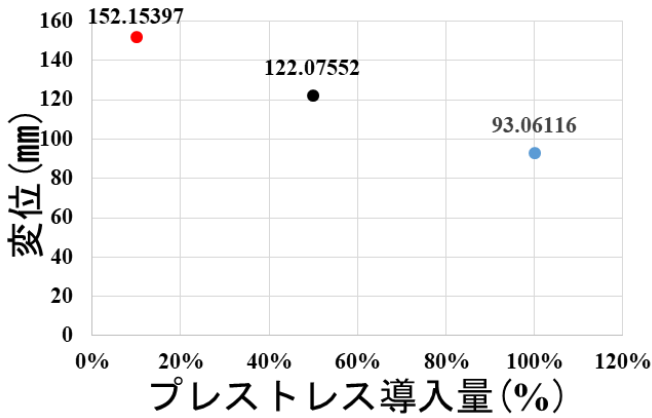


図-5 最大荷重での変位－プレストレス導入量

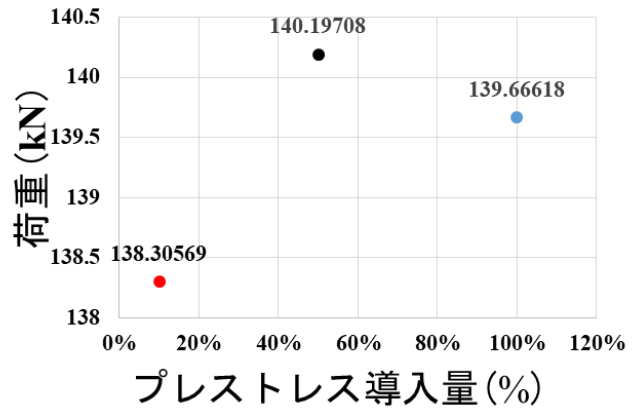


図-6 最大荷重－プレストレスと導入量

図-8 にプレストレス導入量が 100%、50%、10%の荷重をかけた時の位置－ひずみ関係の解析結果を示す。プレストレス導入量が 100%と 50%は同じようなグラフになっているが、ひずみが大きい。600mm のところと小さくなっている 2100mm 所の差が 100%の時のほうが大きくなっている。10%の時の結果ではグラフの形に大きな違いがあると確認できる。導入量が 100%、と 50%の時は 600mm、7000mm の位置でひずみが最大となっているが 10%の時は中央でのひずみが最も大きくなっている。ここからプレストレス導入量が異なることによって位置ひずみ関係が異なってくるのが分かった。

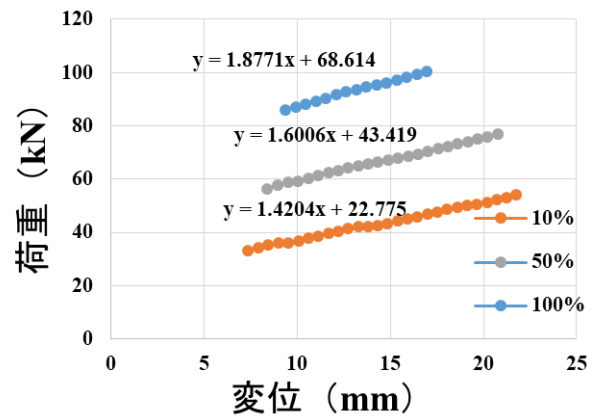


図-7 ひび割れ発生直後の剛性

また、図-9 にプレストレス導入量ごとの最大荷重付近でのひび割れ図について示す。最大荷重でのひび割れ解析結果をプレストレス導入量ごとで比較すると、それぞれ中央付近でのひび割れはさほどの違いはみられなかった。だが、導入量が小さくなるごとにひび割れの範囲が広がっていることが分かる。このことから解析することでもひび割れの違いから残存プレストレス量の推定が可能なのではないかと考える。図-10 にプレストレス導入量ごとの最大荷重付近でのひずみ図について示す。最大荷重でのひずみはプレストレス導入量によって大幅に変わってくる。やはり、ひび割れでの解析結果のように導入量が小さくなるごとに範囲が幅広くなっていることが分かる。導入量が 100%の場合中央でのひずみが大きくなっていることも分かる。導入量が大きくなることによって、ひずみの範囲が小さく中心で大きい。このことから 100%でのひずみを基本とし、求めたい残存プレストレス量のひずみ分布を比較することによって推定が可能なのではないかと考える。

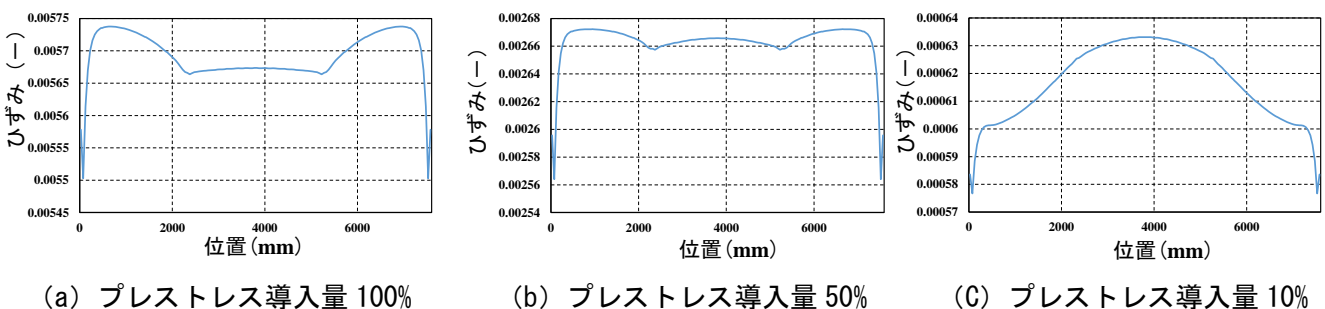


図-8 緊張力導入時のPC鋼材のひずみ分布

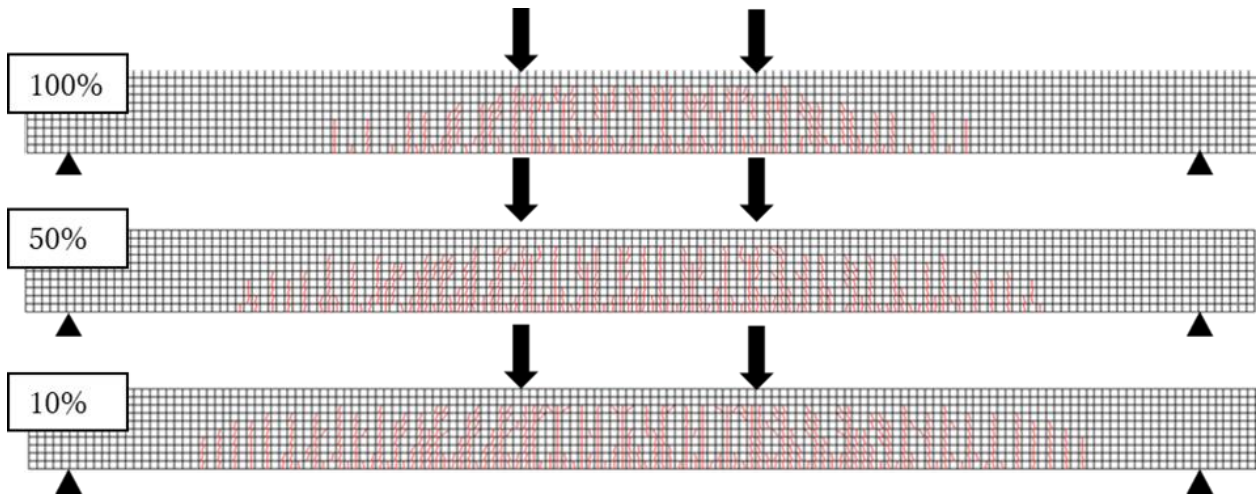


図-9 解析による最大荷重でのひび割れ図

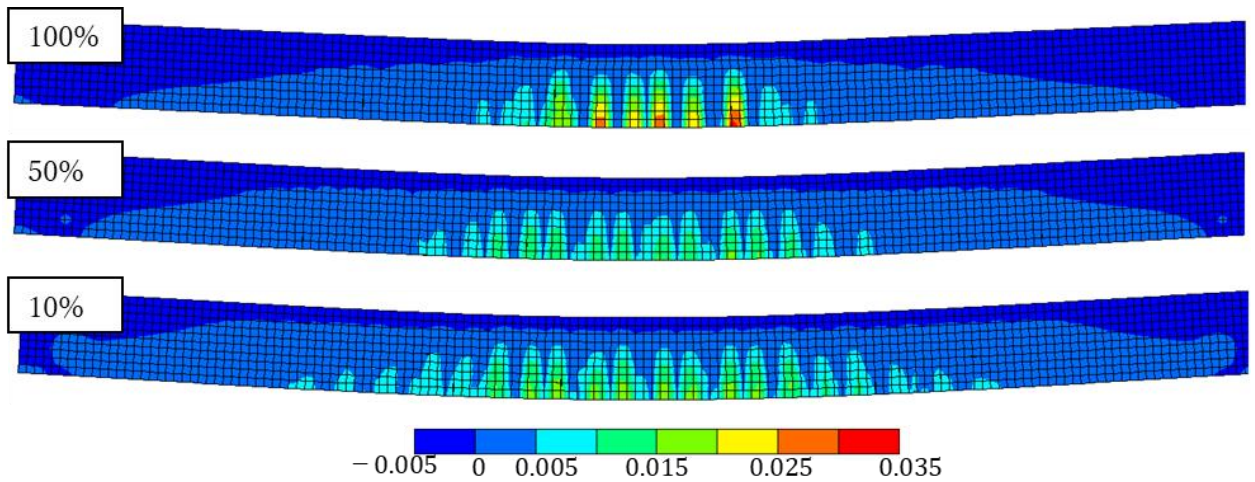


図-10 解析による最大荷重でのひずみ図

#### 4. 結論

本研究では、解析手法の妥当性を評価し、既設構造物を非破壊的にプレストレス導入量推定するための解析手法の検討を行った。本検討では、解析で求めた結果と既往の実験結果を比較することでプレストレス評価の指標になりえる事が分かった。ひび割れが発生していない場合プレストレス導入量が低下するとひび割れ発生荷重が低下することかプレストレス導入量の推定の可能性がある。ひび割れが発生している部材の場合載荷試験等の荷重と変位とも関係から剛性を出すことによって、プレストレス導入量を100%とした解析結果と比較することによってプレストレス量の推定の可能性がある。加えて、プレストレス導入量が低下すると鉛直方向のひび割れ発生する範囲が広がることからプレストレス導入量低下の推定の可能性が否定できない。これらのことから材料劣化した既設PC桁部材の残存プレストレス量の評価技術の構築することが可能なのではないかと考える。

#### 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究資料共同研究報告書・PC道路橋の健全度評価に関する共同研究，国総研資料第613号 平成22年10月
- 2) 石川 靖晃・伊藤 睦・荒畑 智志・河合 真樹・原 健悟：コンクリート構造物建設工程シミュレータの開発ー各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォームー，J-STAGE 53 巻2号，pp.172-180，2015

## 実橋梁の床版内で確認された水平ひび割れの発生原因と構造性能に及ぼす影響の検討

EC19056 長谷川 直輝

### 1. 研究背景との目的

昨年、実橋の詳細点検において、床版からコンクリートコアを採取したところ、写真1のような複数の水平ひび割れの発生が確認されたり。この橋梁は、車通りの少ない山間部にあるため、ひび割れ発生要因には、凍害やASRなどでの複合劣化が考えられるが、その要因は明らかとなっていない。このことから、この水平ひび割れの発生メカニズムの解明とこの水平ひび割れが安全性に及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。本研究では、研究対象である実橋に、なぜこのような水平ひび割れが発生したのか、このような水平ひび割れが生じた部材の使用性や耐荷性は健全な状態と比較してどのように、どの程度変化するのかを明らかにすることにより、実橋の維持管理計画の検討において、補修・補強でよいのか、もしくは床版取替えを要するの可否かの判断材料を得ることを目的とする。

### 2. 模擬水平ひび割れを導入した RC はりの載荷実験

#### 2.1 実験概要

部材内に生じた水平ひび割れが部材の耐荷特性やひび割れ発生状況に及ぼす影響を把握するために、本研究では、水平ひび割れを模擬した段ボールを図-2 に示すように配置した試験体を作製し載荷実験を行った。試験体寸法は断面100mm×100mm、試験体長400mmであり、Case1は、断面高さ中央に4mmの模擬ひび割れを導入した試験体、Case2は断面高さ中央に2mmの模擬ひび割れを導入した試験体、Case3は断面高さ中央と上縁から30mmの位置に2mmの模擬ひび割れを導入した試験体である。なお、段ボールを支点間に配置することで、模擬ひび割れを試験体長さ方向全長に模擬した。これらの試験体各3体と模擬ひび割れを導入していない基準試験体3体を合わせて計12体の試験体を作製した。コンクリートの配合は表-1に示すとおりであり、載荷試験時のコンクリートの圧縮強度は41.56N/mm<sup>2</sup>であった。なお、試験体を斜め引張破壊させるために、試験体にはD13鉄筋を有効高さ70mm位置に配置し、荷重載荷位置はスパン中央とした。



写真1 ひび割れ状況<sup>1)</sup>

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
47	46	4	170	356	810	969
密度(g/cm <sup>3</sup> )			1	3.15	2.6	2.65

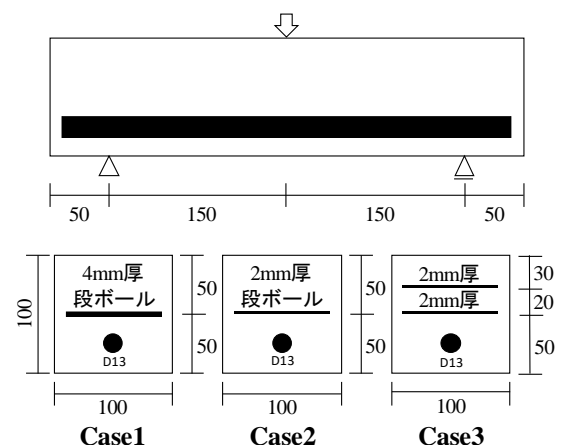


図-2 試験体概要

#### 2.2 実験結果

試験より得られた荷重-変位関係を図-3 から図-6 に示す。なお、健全供試体の3本の内1本は、異なる方法で載荷したため除外した。

これより、図-3 に示す健全供試体、および図-4 から図-6 に示す模擬水平ひび割れ導入供試体、どちらも最大荷重に達するまでは変位に変化は見られず、最大荷重に到達後、荷重の低下に伴い変位にも変化が見



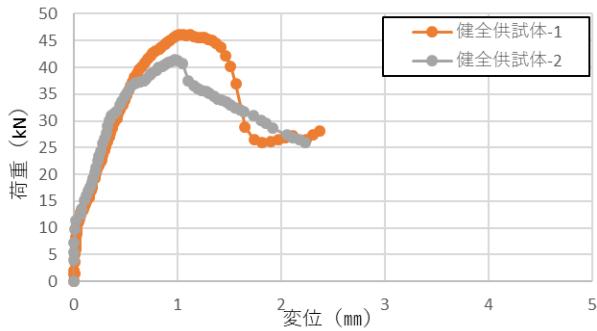


図-3 健全供試体

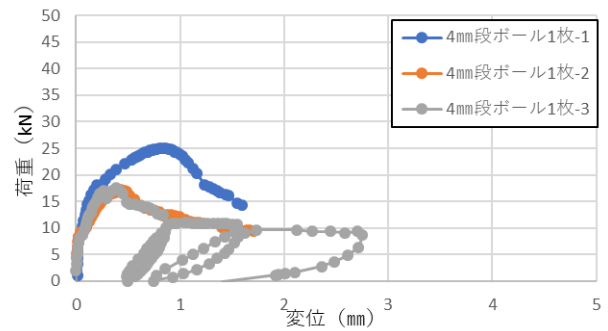


図-4 4mm段ボール

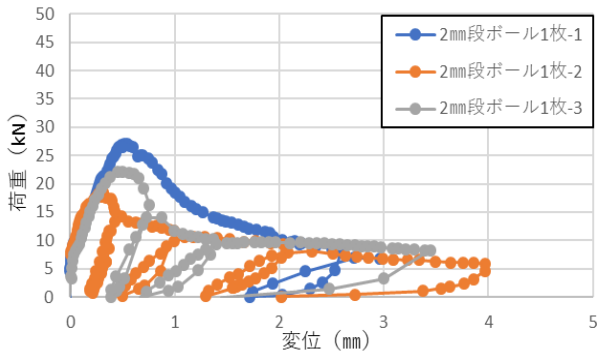


図-5 2mm段ボール1枚

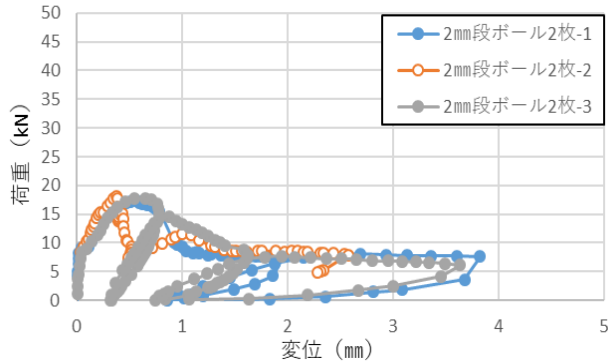


図-6 2mm段ボール2枚

られ始める。その後、荷重に変化が見られなくなると変位が大きく変化することが確認された。

最大荷重は、健全供試体が平均 45.5kN であったのに対し、模擬水平ひび割れ導入供試体は 4 mm 段ボール 1 枚が 19.9kN、2 mm 段ボール 1 枚が 22.5kN、2mm 段ボール 2 枚が 17.7kN であった。模擬水平ひび割れが存在することで、最大荷重が 50%程度低下することが確認された。

図-4 から図-6 模擬水平ひび割れ導入試験体に除荷と再載荷を繰り返し行ったところ、再載荷後の最大荷重は除荷と再載荷を繰り返し行っても大きな変化は見られなかったが、再載荷後の剛性は除荷と再載荷を繰り返すたびに、荷重が小さくなる傾向があると確認された。

2 mm 段ボール 2 枚の模擬水平ひび割れ導入供試体の 1 つを、除荷することなく載荷し続けた結果、最大荷重後に見られた 2 つ目の山が 12kN のところであると確認された。

### 2.3 梁の破壊性状

載荷試験で使用した試験体を写真 2 から写真 5 に示す。写真 2 の健全供試体は初期剛性発生後、コンクリート底面に曲げひび割れが発生し、その後、コンクリート上面の載荷点からコンクリート底面の支点方向へ、斜めのひび割れを確認できた。写真 3 から写真 5 の模擬水平ひび割れ導入供試体も健全供試体と同様初期剛性発生後、曲げひび割れが発生し、その後、コンクリート底面の支点から模擬水平



写真 2 健全供試体



写真 3 4mm段ボール1枚供試体

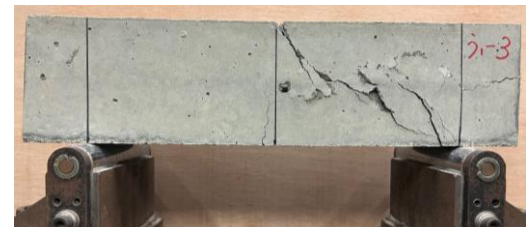


写真 4 2mm段ボール1枚供試体



写真 5 2mm段ボール2枚供試体



ひび割れ導入部への斜めひび割れを確認でき、最大荷重に到達後、荷重を与え続けると水平ひび割れが広がっていくことが確認できた。模擬水平ひび割れ導入供試体の内 2 mm 段ボール 2 枚の水平ひび割れは、コンクリート梁底面から 50 mm の位置に入れた模擬水平ひび割れの位置でひび割れ破壊が起こった。

## 2.4 ひび割れ発生荷重と初期剛性

図-7 から図-10 は図-3 から図-6 荷重-変位関係のグラフからひび割れ発生荷重と初期剛性を確認するために、曲げひび割れが生じる前後を切り取った図である。この図から健全供試体は平均 12kN で、曲げひび割れが生じており、模擬水平ひび割れ導入供試体では 4mm 段ボールが 9kN、2mm 段ボール 1 枚が 9kN、2mm 段ボール 2 枚が 9kN で曲げひび割れが生じていることが確認できた。

健全供試体と模擬水平ひび割れ導入供試体とで剛性の平均を求めた結果、健全供試体が 336.8 kN/mm、4mm 段ボールが 233.7 kN/mm、2mm 段ボール 1 枚が 176.0kN/mm、4mm 段ボール 2 枚が 181.6 kN/mm という結果となった。このことから、ひび割れがあることで剛性が 40%程度低下することが確認された。また、剛性はひび割れの数ではなく、大きさによって変わることが確認された。

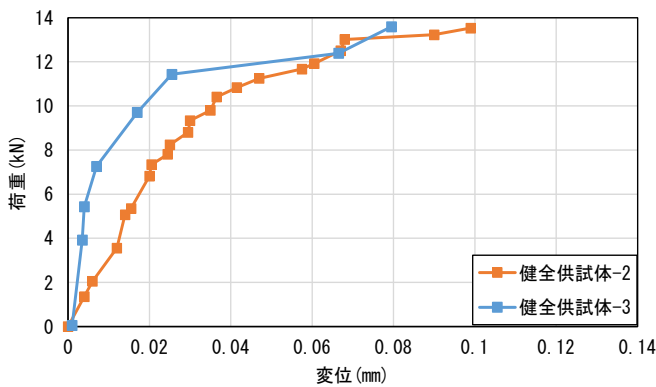


図-7 健全供試体

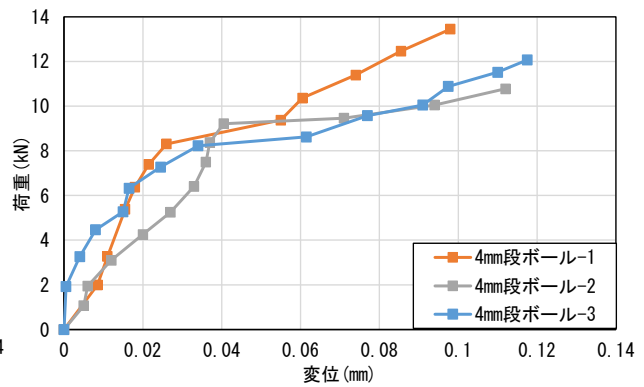


図-8 4mm段ボール供試体

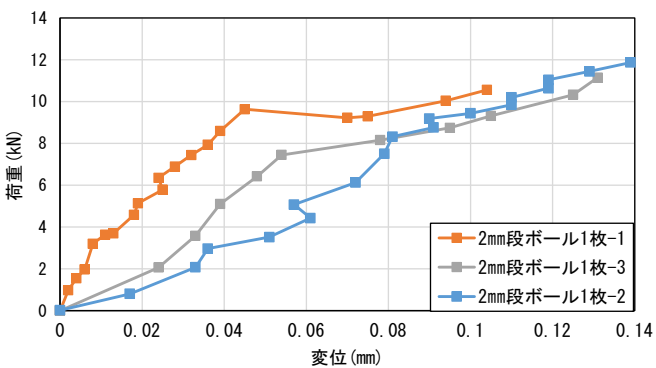


図-9 2mm段ボール 1 枚供試体

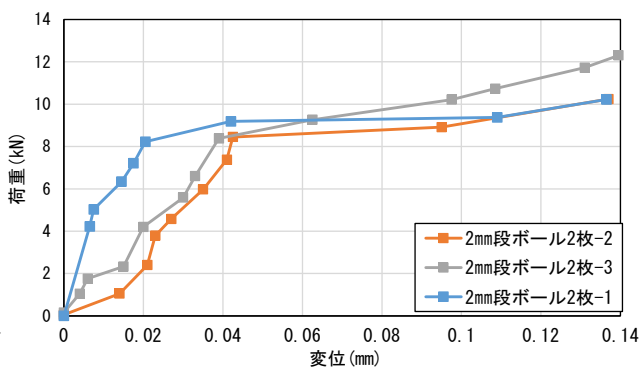


図-10 2mm段ボール 2 枚供試体

## 3 実橋のひび割れ要因

### 3.1 ひび割れ発生要因

ひび割れの発生要因としては、床版上面が大気乾燥などの影響を受け、コンクリートに含まれる水分が蒸発することで、コンクリートの体積が縮んで引っ張られ床版上面にひび割れが生じた。その後、ひび割れ発生箇所に通車車両などの荷重がかかることにより、写真 6 のような土砂化が起こる。土砂化が起こった場所から雨水や凍結防止剤などがコンクリート内に浸透することで、コンクリートが劣化し床版内部にひび割れが発生したと考えられる。



写真 6 土砂化<sup>1)</sup>

### 3.2 水平ひび割れ発生要因

研究対象である実橋は、山間部にあるため、冬場には路面の凍結や積雪などが起こることが多々あると考えられる。また、実橋の床版底面には写真7のような微細ひび割れとエフロレッセンスによって遊離石灰など成分が析出していることが確認できる。

それらのことと、3.1 で書かれたひび割れ発生要因とで検討した結果、実橋で水平ひび割れが起こった要因は、実橋内部で起こったひび割れが、凍害劣化とアルカリシリカ反応による複合劣化によって水平ひび割れになり、可能性が高いと考えられる。



写真7 床版底面のひび割れ<sup>2)</sup>

### 3.3 実橋の補修・補強もしくは床版取替えの必要性

凍害劣化とアルカリシリカ反応による複合劣化によって水平ひび割れが広がっている可能性が高いと考えられる。凍害とアルカリシリカ反応では劣化進行は水の供給を受ける環境下で促進されるという共通の環境要因があるため、劣化進行を抑える必要があると考える。その方法として、ラテックスコンクリートで床版の上面の修復を行うことで、コンクリート内に水分の浸入を防ぐことができ今後も使用可能であると考えられる。

版取替えの必要性について、除荷と再載荷を繰り返し行った試験結果をもとに考えると、再載荷後の梁の最大荷重はひび割れ発生後、ひび割れの数とは関係なく同程度の値だった。そのため、床版取替えの必要性は極めて低いと考える。

## 4. 結論

本研究は、研究対象である実橋になぜこのような水平ひび割れが発生したのか、このような水平ひび割れが生じた部材の使用性や耐荷性は健全な状態と比較してどのように、どの程度変化するのかを明らかにすることを目的とし、実橋の維持管理計画の検討において、補修・補強でよいのか、もしくは床版取替えを要するのかの判断材料を得ることを目的とする。

実橋に水平ひび割れが発生した要因として、床版上面が大気乾燥などの影響を受け、コンクリートに含まれる水分が蒸発することで、コンクリートの体積が縮んで引っ張られることにより床版上面にひび割れが生じた。その後、ひび割れ発生箇所に通車車両などの荷重がかかることにより、土砂化が起こり、そこから水が浸透することでコンクリート内が劣化し、水平ひび割れが発生したと考える。その後、凍害とアルカリシリカ反応による複合劣化により、水平ひび割れが広がった可能性が高いと考えられる。

床版取替えの必要性について、除荷と再載荷を繰り返し行った試験結果をもとに考えると、再載荷後の梁の最大荷重はひび割れ発生後、ひび割れの数、大きさとは関係なく同程度の値だった。そのため、凍害劣化とアルカリシリカ反応による複合劣化の対策として、ラテックスコンクリートで床版を修復することで、床版取替えの必要はないと考える。

## 参考文献

- 1) 令和3年度A市橋委第1号B橋梁耐震補強補修 測量設計業務委託, pp.5-21, 2021年12月
- 2) B橋 床版耐力調査(案) p3