

## PC 鋼材の緊張量がグラウトとの付着特性に及ぼす影響の実験的評価

EC20003 安達 亮喜

### 1. 研究背景と目的

橋の維持管理において、PC 鋼材を腐食させないことが基準とされてきたが、PC 橋の中には PC 鋼材の破断が報告されているものもある。したがって、PC 鋼材の破断が進行した PC 橋の安全性評価等に関する検討を行い、適切な維持管理限界を設定することが強く求められている<sup>1)</sup>。PC 鋼材が破断した際の、残存 PC 鋼材の付着挙動を知ることは、PC 鋼材が腐食した後の PC 橋を維持管理する上で必要となってくる。しかし、PC 鋼材への導入緊張量が付着特性に及ぼす影響について、十分に検討されていないのが現状である。そこで本研究では、PC 鋼材の緊張量がグラウトと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、導入緊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。また、島らは付着応力を算出するための式を導き出している。しかし、その式は、異形鉄筋のみ使える式であり、本研究のように PC 鋼材に使用できるか定かではない。したがって、島らの式が本研究においても使用可能であるか確認することも目的とした。

### 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、はり供試体の中心にシース管を通し、シース管の中心に PC 鋼材を配置してグラウトした試験体を使用した。図-1 に、本研究で使用した試験体概要図を示す。使用した PC 鋼材は長さ 2000mm、φ9.2、降伏強度 1275MPa、公証断面積 66.44mm<sup>2</sup>であり、シース管は内径 23mm、長さ 2000mm である。本研究では供試体を 3 本準備し、導入緊張量が異なる条件の下で PC 鋼材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。本試験では、導入緊張量が 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こと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、150mm×150mm×1760mm の大きさで 1 本、200mm×150mm×1760mm の大きさで 2 本供試体を作製した。以後、200mm×150mm×1760mm の大きさのはり供試体 1 本目を供試体 1、150mm×150mm×1760mm の大きさのはり供試体を供試体 2、200mm×150mm×1760mm の大きさのはり供試体 2 本目を供試体 3 とする。次に、PC 鋼材の中心を原点

0mm とした時、-660mm、-440mm、-220mm、0mm、220mm、440mm、660mm の位置にひずみゲージを貼り付けて、両引き試験時の PC 鋼材のひずみ分布を計測することとした。供試体 1 の PC 鋼材のひずみが 2500μ、供試体 2 及び供試体 3 の PC 鋼材のひずみが 3500μ になるように緊張力を与え、シース管内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時まで連続して鋼材ひずみを測定し、グラウトが固まるまで 1 週間程度置き、その後両引き試験を実施した。両引き試験では、目標の緊張力に達するか、ひずみゲージの値に変化が見られなくなるまで緊張力をかけ続けた。目標となる緊張力の値は、84.71kN であり、最終的にかけた緊張力の値は、供試体 1 が 69.7kN、



図-1 試験体概要

表-1 各試験体データ

	大きさ(mm)	ひずみ(μ)	緊張力(kN)
供試体1	200×150×1760	2500	69.7
供試体2	150×150×1760	3500	81.9
供試体3	200×150×1760	3500	85.6

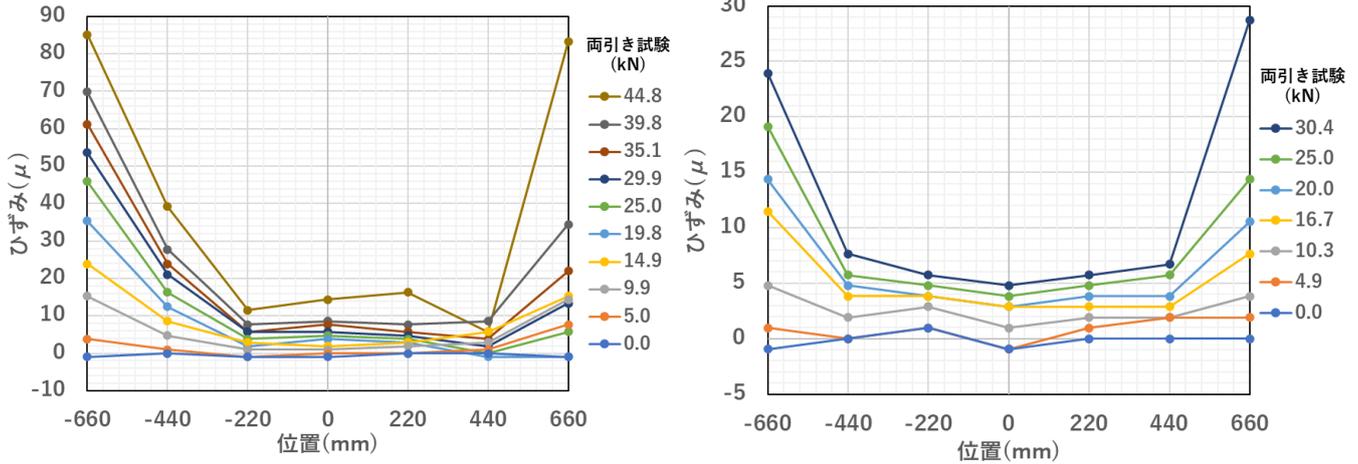


図-2 緊張力を増加させた時のPC鋼材のひずみの変化の一例

供試体 2 が 81.9kN、供試体 3 が 85.6kN であった。供試体 1, 2, 3 について断面積、ひずみ、両引き試験でかけた緊張力をまとめたものを表-1 に示す。

3. 実験結果

緊張力を増加させたときの PC 鋼材のひずみの変化の一例を図-2 に示す。図より、緊張力が増加すると鋼材の両端のひずみが増加し、反対に中央付近のひずみはそれほど増加しない傾向にあり、端に近づくほどひずみの増加量が大きくなる傾向にあることが分かる。付着応力を求めるためにひずみ分布曲線を近似する。供試体 3 のひずみ分布曲線を近似したものを図-3 に示す。鉄筋に沿った任意の点における鉄筋の付着応力は、その点におけるひずみ分布曲線の傾きを用いて、次式のように求められる<sup>2)</sup>。

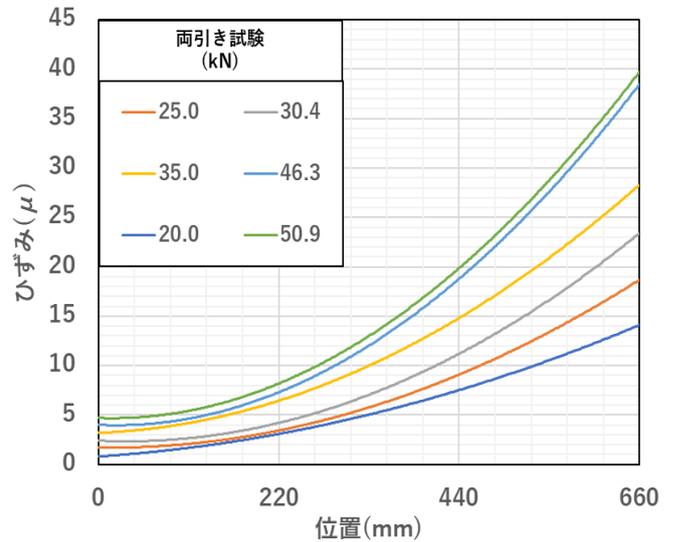


図-3 ひずみ分布近似曲線

$$\tau = \frac{E \cdot D}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\tau$  は付着応力であり、 $E$  は PC 鋼材のヤング係数、 $D$  は鉄筋径、 $d\varepsilon/dx$  はひずみ分布曲線の傾きである。付着応力-すべり-ひずみ関係は、次式のように表される<sup>3)</sup>。

$$\tau/fc' = 0.73(\ln(1+5s))^3 / (1+\varepsilon \times 10^5) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $s=1000 S/D$  であり、 $\tau$  は付着応力、 $fc'$  はグラウト強度、 $S$  はすべり量、 $D$  は鉄筋径、 $\varepsilon$  はひずみである。付着応力-すべり関係を式(1)及び式(2)によって求め、比較する。ここで、式(1)を実験結果、式(2)を異形

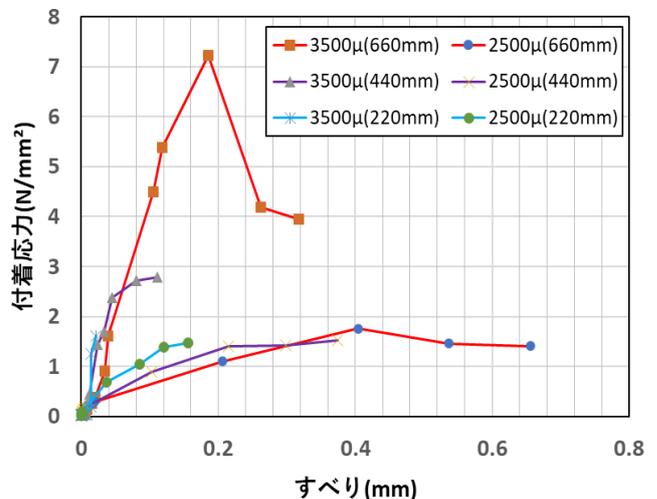


図-4 実験結果の付着応力-すべり関係

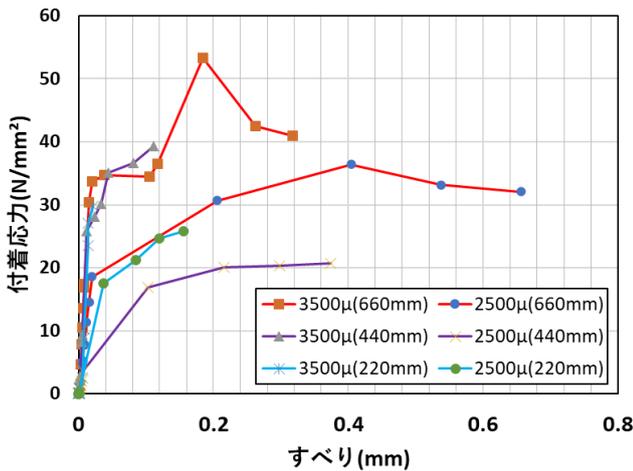


図-5 異形鉄筋島式の付着応力-すべり関係

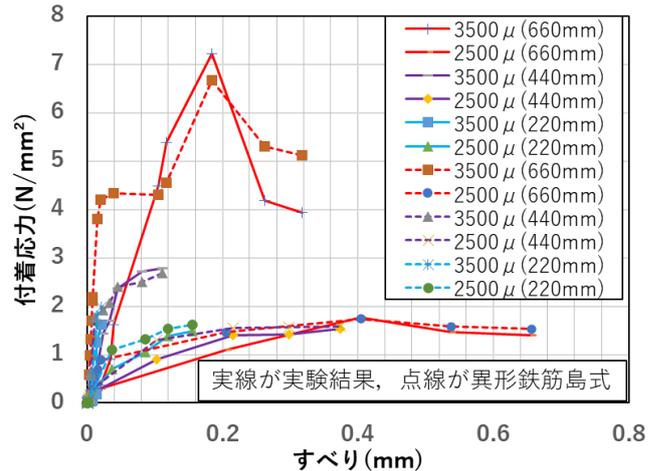


図-6 付着応力-すべり関係の比較

鉄筋島式とする。式(1)によって求めた付着応力-すべり関係を図-4に、式(2)によって求めた付着応力-すべり関係を図-5に示す。図より、導入緊張量が高く、中心から遠い方が、付着応力の値が高くなる。異形鉄筋島式に定数をかけ実験結果に重ねたものを図-6に示す。図より、実験結果及び異形鉄筋島式で付着応力-すべり関係に大きな差異がないことが確認できる。このことから、異形鉄筋の付着応力を求める式である異形鉄筋島式は、PC鋼材に対しても使用可能であるといえる。また、本試験前までは異形鉄筋島式中の $\varepsilon$ は、緊張量導入開始時からのひずみを考えていたが、緊張力を与えた時からのひずみについて考えればよいということもいえる。

#### 4. 結論

本研究では、PC鋼材の緊張量がグラウトとの付着特性に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的として、導入緊張量をお変化した試験体を作製し、両引き試験を行い、PC鋼材のひずみの変化を測定した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)緊張力を与えるにあたって、予め与えられた導入緊張量まではひずみに大きな変化は見られず、導入緊張量を超えるとひずみが大きく増加する。
- (2)ひずみの値は、PC鋼材の中央ではあまり増加せず、両端で大きく増加する。
- (3)導入緊張量が大きいほど、付着応力が高くなる。
- (4)PC鋼材の中央から離れるほど、付着応力は高くなる。
- (5)異形鉄筋の付着応力を求める式： $\tau/fc' = 0.73(\ln(1+5s))^3 / (1+\varepsilon \times 10^5)$ は、PC鋼材に対しても使用できる。
- (6)異形鉄筋島式中の $\varepsilon$ は、緊張力を与えた時からのひずみについて考えればよい。

#### 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) Nilson, A.H.: Internal Measurement of Bond Slip, ACI Journal, pp.439-441, 1972, 7
- 3) 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 pp.171, 1987.2.

## PC 鋼材の緊張量が破断時のグラウトとの付着特性に及ぼす影響の実験的評価

EC20008 岩田 峻汰

### 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<sup>1)</sup>。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ため、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。また、予めプレストレスが導入されているコンクリートと導入されていないコンクリートでは、PC 鋼材破断時の付着挙動に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、導入緊張量とコンクリート断面積を変数とした実験供試体を製作し、PC 鋼材を破断させたときの PC 鋼材やコンクリートのひずみ分布を計測することで、導入緊張量、コンクリート断面積、破断箇所からの距離に応じたひずみ量の変化量の関係を明らかにすることで、PC 鋼材の付着モデルの高度化に必要な知見を得ることを目的とした。また、共同研究者の村上<sup>2)</sup>が、本研究で作製する供試体と、コンクリート断面寸法と導入緊張力を同じにした供試体を 1 つ作製するため、緊張力を導入した段階でコンクリートにプレストレスが作用する場合と作用しない場合で、鋼材破断時の付着応力にどのような違いが表れるのか比較検討した。

### 2. 試験概要

本研究では、導入緊張力やコンクリート断面積が PC 鋼材とグラウト間の付着挙動に及ぼす影響に着目し、はり供試体を用いた実験を実施した。図-1 に供試体の寸法と試験概要を示す。導入緊張量とコンクリート断面積を変数とした供試体を 3 つ作製し、図-1 の切断位置で PC 鋼材を破断させた。これにより、導入緊張量とコンクリート断面積が鋼材ひずみ分布に及ぼす影響を計測した。PC 鋼材は、φ9.2mm(公証断面積 66.4mm<sup>2</sup>、降伏強度 1275N/mm<sup>2</sup>)を使用し、ひずみゲージを図-2 のように、5 カ所貼り付け、供試体 2 と供試体 3 の試験では、切断箇所から 1880mm の箇所にも、ひずみゲージ 1 つを貼り付けた。また、コンクリート上面には、PC 鋼材と同じ位置に貼り付けた。コンクリート側面は、図-3 のように、4 カ所貼り付けた。型枠の中央にシース間を通した上で、コンクリートを流し入れ、コンクリートが硬化するまで 1 ヶ月程養生した。コンクリート中央に PC 鋼材を設置した後、PC 鋼材に緊張力を導入し、シース管内にグラウトを注入した。グラウトが硬化するまで 2 週間程養生し、PC 鋼材の破断試験を行った。各試験のコンクリート断面の寸法と与える緊張力を表-1 に示す。

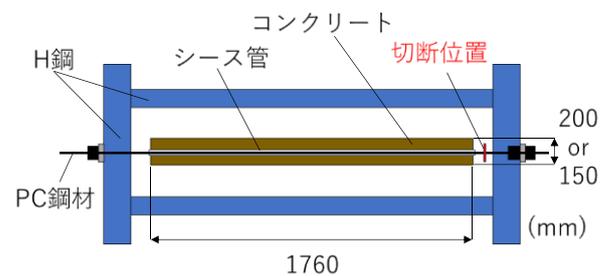


図-1 供試体寸法と試験概要

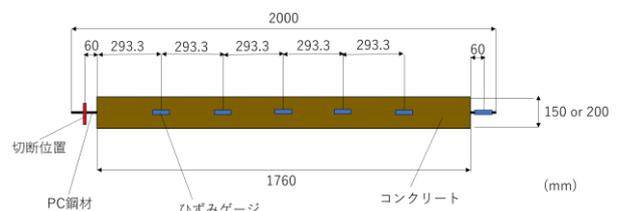


図-2 ひずみゲージの位置(PC・上面)

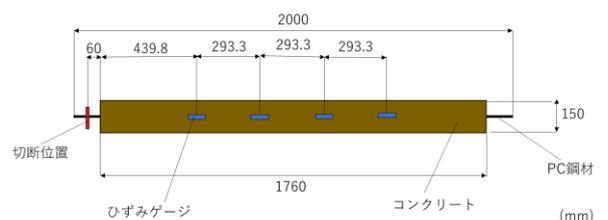


図-3 ひずみゲージの位置(側面)

表-1 各試験の断面寸法と緊張量

	供試体1	供試体2	供試体3
コンクリート断面(mm)	150×200	150×200	150×150
与える緊張力(μ)	2500μ	3500μ	3500μ

### 3. 試験結果

#### 3.1 コンクリート端面からの距離とひずみの関係

試験によって得られたデータを使用し、開始時のひずみを0に合わせることで、コンクリートとPC鋼材に分けて、ひずみの増分グラフを作成した。供試体2と3の試験では、切断箇所から353.3mmの位置に貼り付けた、PC鋼材のひずみゲージが鋼材破断時にちぎれてしまったため、グラフでは数値を省いている。ひずみ増分グラフを、図-4、図-5に示す。また、供試体1の試験では、コンクリート内のシース管が曲がっていた可能性が高く、鋼材破断時のコンクリートひずみに影響を与えたと考えた。供試体2と3のPC鋼材のひずみより、コンクリートの両端では、鋼材破断時に与えた緊張力とほぼ同量の緊張力が抜けたことが分かる。また、鋼材破断時にひずみの変化が見られない領域までの距離を、近似線を用いて求め、表-2に示した。供試体3は近似線が0を通る箇所がマイナスになるため、求める事は出来なかった。表-2から、ひずみに変化が見られない領域までの距離は、導入緊張量が大きい方が大きくなることが考えられる。同様に、コンクリートのグラフにも近似線を用いることで、ひずみの変化量が最大になる箇所を求めた。これを表-3に示す。表-3から、コンクリートひずみの変化量が最大になる箇所は、導入緊張量やコンクリート断面積の違いによる影響を受けないことが考えられる。次に、PC鋼材の付着特性には、付着応力が関係しているため、各試験の鋼材破断時の付着応力を算出した。付着応力は以下の式から求める。

$$\tau = -\frac{AE}{\pi D} \times \frac{d\varepsilon}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、付着応力:τ、断面積:A、ヤング係数:E、円周率:π、鋼材直径:D、傾き:dε/dxとする。傾きは、鋼材ひずみ変化量が0の領域を求めるときに用いた近似線の傾きを使用する。求められた付着応力を表-4に示す。導入緊張力に違いがある供試体1と2を比べると、導入緊張力が大きい方が、付着応力が大きくなることが分かる。また、コンクリート断面積の違いがある供試体2と3を比べると、断面積が大きい方が、付着応力が大きくなることが分かるが、供試体3の試験では、シース管内に充分グラウトが充填できていなかったことが考えられ、数値が小さくなってしまった可能性が高い。

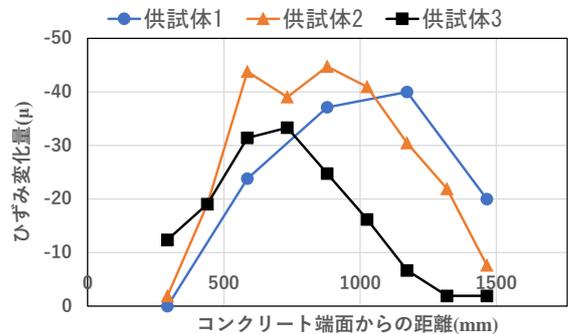


図-4 鋼材破断時のコンクリートひずみ

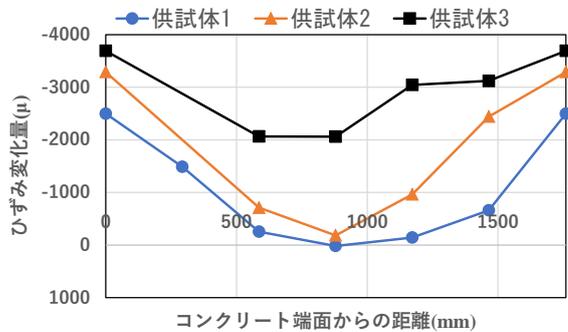


図-5 鋼材破断時のPC鋼材ひずみ

表-2 ひずみの変化が0の領域までの距離

	コンクリート端面からの距離
供試体1	662.2mm
供試体2	858.1mm
供試体3	—

表-3 ひずみの変化が最大の箇所

	コンクリート端面からの距離
供試体1	1038.9mm
供試体2	1058.1mm
供試体3	1027.9mm

### 3.2 コンクリートの応力が付着に及ぼす影響の比較

供試体2のコンクリート断面寸法が150mm×200mm、導入緊張力が3500 $\mu$ と同じ条件で、共同研究者の村上もPC鋼材の破断試験を行った。鋼材破断時のコンクリートひずみの増分を比較したものを図-6に示す。村上の供試体は、H鋼の治具がなく、コンクリートのみを使用した試験のため、緊張力を導入した際に、コンクリートが圧縮されるが、本研究の供試体は緊張力を導入した時点では、コンクリートは圧縮されない。そのため、グラフのように、鋼材破断時に本研究のコンクリートは圧縮され、ひずみが減少するが、村上のコンクリートは引っ張られることで、コンクリートが伸び、ひずみが増加する。次に、近似線を用いることで付着応力算出に必要な傾きを求めると、本研究の傾きが0.0741、村上の傾きが0.0756となった。傾きに差がなければ、付着応力にも差は生まれなため、コンクリートに作用しているプレストレスは付着応力には影響しないことが考えられる。

表-4 PC鋼材の付着応力

	付着応力(N/mm <sup>2</sup> )
供試体1	1.240
供試体2	1.668
供試体3	0.683

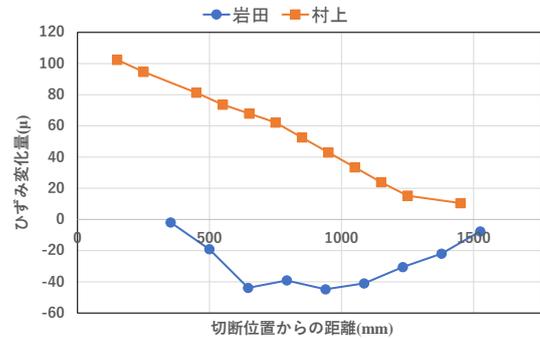


図-6 コンクリートひずみの比較

## 4. 結論

本研究では、導入緊張量やコンクリート断面積の違いがPC鋼材の付着特性に及ぼす影響を実験的に明らかとすることを目的として、導入緊張量とコンクリート断面積を変数とした供試体を製作し、PC鋼材を破断させたときのPC鋼材とコンクリートのひずみ分布の計測を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1)PC鋼材破断時、切断位置から一番離れた箇所は、導入緊張力とほぼ同量の緊張力が抜ける。
- (2)コンクリートひずみの変化量が最大になる箇所は、導入緊張量やコンクリート断面積の違いによる影響を受けない。
- (3) 鋼材ひずみに変化が見られない領域までの距離は、導入緊張量が大きい方が大きくなる。
- (4) PC鋼材に与えた緊張力が大きい方が、付着応力が大きくなり、断面積が大きい方が、付着応力が大きくなる。
- (5) コンクリートに作用しているプレストレスは付着応力に影響しない。

## 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
- 2) 村上 順彦：PC桁の断面寸法がPC鋼材破断時の付着特性に及ぼす影響の実験的評価，2023年度中部大学卒業論文

## 打音検査結果からひび割れの有無判別に関する研究

EC20019 蟹江 偉吹

### 1. 研究背景と目的

高速道路橋梁などの実構造物を点検する際に「打音検査」が非破壊検査方法の中で最も簡便であることから広く利用されている。打音検査は、橋梁等の事前検査では主要な検査方法であり、ひび割れ発生や背面の状況を知ることができる。

道路付帯構造物として切土法面などに利用される「コンクリート吹付工」は、昭和 30 年代後半から施行され、施工性の良さなどから全国的に広く施行実績のある法面保護工 である。このコンクリート吹付工の検査方法にも「打音検査」が行われている。検査は熟練技術者によって行われているが、明確な判定基準がなく打音の音質や叩いた感覚等で判定しているのが現状である。また、近年土木技術者が問題になっているが、コンクリート吹付工の検査技術者の高齢化、人手不足、技術伝承も著しい状況である。よって、打音検査結果の判別を特別な技術や経験を必要とせず、客観的に良否の判別をすることができる技術の確立が望まれる。

そこで本研究では、**図 1** に示す既往の卒業研究<sup>2)</sup>で計測された無損傷とひび割れを有する吹付コンクリート板の音圧-周波数関係からひび割れの有無を判別できるツールの開発を目的とした。対話型 AI である ChatGPT を用いて ExcelVBA を作成し、打音検査結果である音圧-周波数関係の数値データを処理することで、無損傷とひび割れ状態の場合の判別を明確にすることを目指す。技術や経験値がない技術者でも打音検査の良し悪しを判別できる打音検査技術の確立を目指しているので、確立されれば、高速道路橋梁などの実構造物の維持管理に大きく貢献することができると思う。

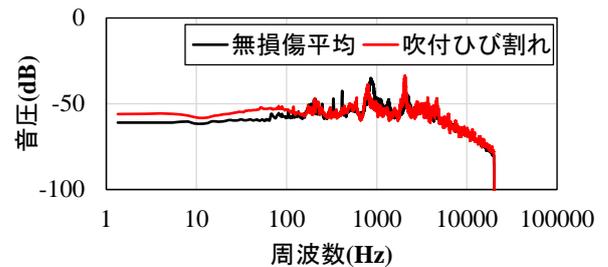


図 1 音圧-周波数関係の一例

### 2. 打音データと解析概要

#### 2.1 打音データ

打音データには、尾崎<sup>2)</sup>が取得した音圧-周波数関係を使用した。この打音データは、450mm×450mm×50mm の無損傷試験体 4 体から各試験体に対してそれぞれ 10 個取得された打音データ計 40 個と、ひび割れ状況の異なる 4 つの試験体からそれぞれ 10 個取得された打音データ計 40 個である。厚さ 50mm の試験体の 4 つのひび割れ状況のうち 2 つを**写真 1**と**写真 2**に示す。さらに、試験体厚さの異なる 450mm×450mm×100mm での無損傷試験体 5 体の打音データを 50 個、異なるひび割れ状況の試験体から得られた打音データ 50 個を使用した。厚さ 100mm の試験体の 5 つのひび割れ状況のうち 2 つを**写真 3**と**写真 4**に示す<sup>2)</sup>。

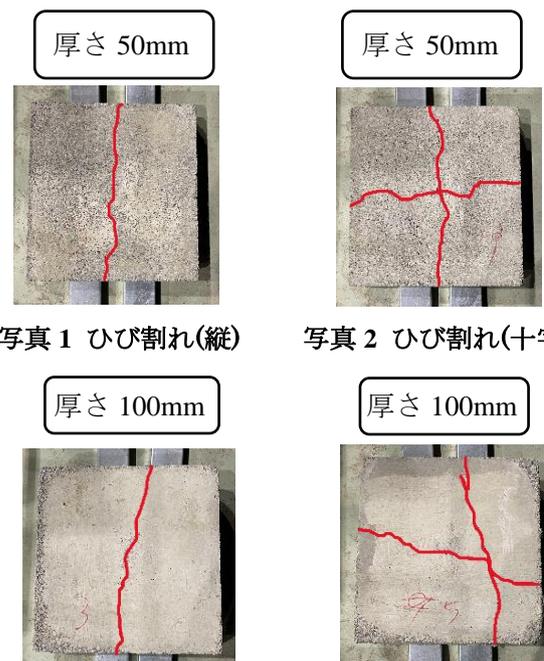


写真 1 ひび割れ(縦)

写真 2 ひび割れ(十字)

写真 3 ひび割れ(縦)

写真 4 ひび割れ(十字)

## 2.2 解析手順

図 1 の音圧一周波数関係の図をひび割れの有無がわかりやすい図に変えるために ChatGPT で ExcelVBA を作成した。ChatGPT を用いて ExcelVBA を作成するには、まず ExcelVBA を使用して実施したい処理作業を明確にする必要があるため、ChatGPT に実行したい処理作業を一つずつ伝えて逐次 VBA コードを作成することとした。ChatGPT を用いて作成された VBA コードを実行することで、実施したい内容通りに動作するのか確認した。コード実行時にエラーメッセージや問題が発生した場合は、ChatGPT に状況を説明し ExcelVBA コードを修正し、正しい解が得られる ExcelVBA コードができるまでこの作業を繰り返した。完成したら、2.1 節で示した打音データに対して VBA コードを実行し、解析対象の累積音圧一周波数関係の図を作成する。累積音圧一周波数関係図の最後の周波数値と最初の周波数値の差を求める。以後、周波数値の差を本研究では周波数幅と称する。

## 2.3 作成した ExcelVBA コード

写真 5 に作成した ExcelVBA の一部を示す。作成した VBA コードは、最初に打音データを Excel に読み込む。次に、読み込んだ音圧のデータの 1 番目をゼロに合わせる作業を行う。具体的には、1 番目の値を音圧データ全体に足し、1 番目の値をゼロにする。1 番目をゼロにした音圧データの前後の値より大きい値以外をスムージング処理する。スムージング処理をした音圧データの中から、前後の値より大きい値を抽出し、抽出した値の周波数値も併せて書出す。書出した音圧データの中から最大値を見つけ、最大値から 999 個の値を見つける。最大値を含めて 1000 個の音圧値及びその時の周波数値を書き出し、音圧値を累積させた値を計算して、累積音圧一周波数関係を作図する。また、周波数幅を求められるようにした。累積音圧一周波数関係の図を作成する際の周波数値を用いて、周波数値の最後の値と最初の値の差を出す。以上のことを行える ExcelVBA を作成した。

```
Sub ProcessAndOutputPeaksInColumn()
    Dim ws As Worksheet
    Set ws = ThisWorkbook.Sheets("ImportedData1") ' 必要に応じてシート名を調整

    ' A列にあるデータの最終行を取得
    Dim lastRow As Long
    lastRow = ws.Cells(ws.Rows.count, "A").End(xlUp).Row

    Dim i As Long
    Dim peakRow As Long
    peakRow = 1 ' E列とF列に出力を開始する行

    ' D列のデータをループ処理
    For i = 2 To lastRow - 1
        If ws.Cells(i, 4).Value > ws.Cells(i - 1, 4).Value And ws.Cells(i, 4).Value > ws.Cells(i + 1, 4).Value Then
            peakRow = peakRow + 1
            ws.Cells(peakRow, 6).Value = ws.Cells(i, 4).Value ' 頂点の値をF列に書き出す
            ws.Cells(peakRow, 5).Value = ws.Cells(i, 1).Value ' 対応するA列の値をE列に書き出す
        End If
    Next i
End Sub

Sub V_CopyDataBasedOnRangeFromFirstRow()
    Dim ws As Worksheet
    Dim lastRow As Long, i As Long
    Dim targetRow As Long

    Set ws = ThisWorkbook.Sheets("ImportedData1") ' シート名は適宜変更してください
    lastRow = ws.Cells(ws.Rows.count, "E").End(xlUp).Row ' E列の最終行を取得
    targetRow = 1 ' I列にデータを転記する開始行

    For i = 1 To lastRow
        If ws.Cells(i, "E").Value >= 0 And ws.Cells(i, "E").Value <= 20000 Then
            ws.Cells(targetRow, "I").Value = ws.Cells(i, "E").Value
            ws.Cells(targetRow, "J").Value = ws.Cells(i, "F").Value
            ws.Cells(targetRow, "K").Value = ws.Cells(i, "G").Value
            targetRow = targetRow + 1
        End If
    Next i
End Sub
```

写真 5 ExcelVBA の一部

## 3. 解析結果

作成した ExcelVBA を使用して、50mm 試験体の無損傷とひび割れ状態、100mm 試験体の無損傷とひび割れ状態で比較をおこない、累積音圧一周波数関係の図にまとめたところ傾向を得ることができた。図 2 は 50mm 試験体の無損傷 (4 枚)、図 3 は 50mm 試験体のひび割れ状況 (4 枚) の累積音圧一周波数関係である。図 2 を見ると、無損傷時は累積音圧一周波数関係の図が始まる周波数の位置が、40 個の打音データのうち 38 個のデータが 1000Hz 以下から始まる。図 3 を見ると、ひび割れ状況時には 40 個の打音データのうち 39 個のデータが 1000Hz 以上から始まっていることがわかる。

また、厚さ 50mm 時の無損傷とひび割れ状況の周波数幅を求めたところ、違いを得ることができた。無損傷の時、周波数幅の最大値が 4469.5Hz、最小値が 3836.9Hz となった。ひび割れ状況では、最大値が 6283.7Hz、最小値が 4500.4Hz となり、4485Hz 以下か以上で無損傷とひび割れ状況を判別できる。

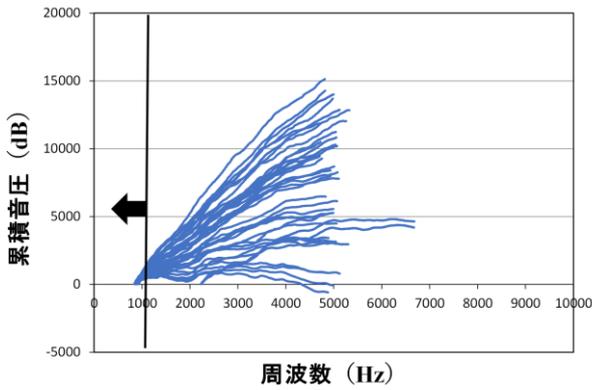


図2 累積音圧－周波数関係  
無損傷 厚さ 50 mm (吹付 6、8、9、10)

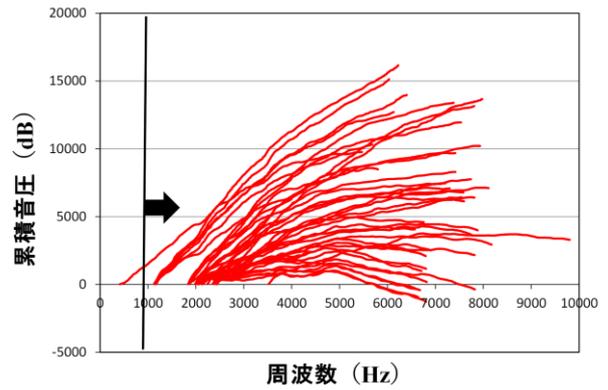


図3 累積音圧－周波数関係  
ひび割れ状況 厚さ 50mm (吹付 6、8、9、10)

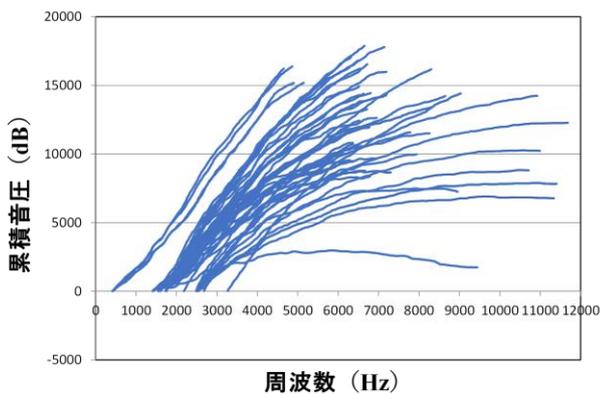


図4 累積音圧－周波数関係  
無損傷 厚さ 100mm (吹付 1～5)

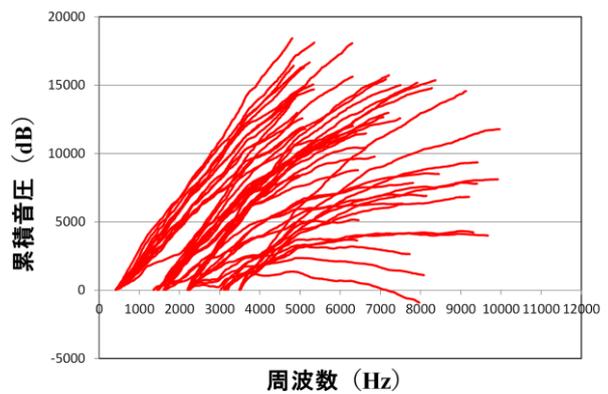


図5 累積音圧－周波数関係  
ひび割れ状況 厚さ 100mm (吹付 1～5)

図4は100mm試験体の無損傷(5枚)、図5はひび割れ状態(5枚)のExcelVBAを実行した累積音圧－周波数関係である。図4と図5を見ると、無損傷とひび割れ状況の累積音圧－周波数関係の図が重なっており、周波数幅からも違いを見つけることができなかった。

#### 4. 結論

本研究では、厚さ 50mm の吹付コンクリートの場合にひび割れの有無を判別できるツールを開発することができた。吹付コンクリートの厚さが 50mm の場合、作成した ExcelVBA を用いることで、累積音圧－周波数関係の図が始まる位置が 1000Hz 以上か以下なのか、周波数幅が 4485Hz 以上か以下なのかで、無損傷とひび割れ状況を判別できた。今回、厚さが 50mm の場合に打音データ 40 個中 38 個で判別することができたが、より多くの場面で用いることができることを調べるために、吹付コンクリートの厚さや叩き方を変えての検討が必要であると考えます。

#### 参考文献

- 1) 田沢雄二郎：吹付コンクリート工法，粉体工学会誌，Vol25，No3，pp168-174，1988
- 2) 尾崎龍吾：ひび割れ状況が吹付けコンクリート板の打音検査に及ぼす影響，2022 年度卒業研究

## 衛星位置が GNSS 測量に及ぼす影響の評価

EC20029 桑原 歩夢

### 1. 背景と目的

GNSS とは「Global Navigation Satellite System」の略で、近年では GNSS を用いた測量・機械操作などが行われており、年々需要が増してきている。しかし、数 m～数 cm の誤差があることによって自動運転での事故やドローンと GPS が切れることで飛行維持が難しく、風に流されることにより安全性を損なう危険性があるなどの課題がある<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、連続した数日間の結果から得られたデータを元に、測位される衛星の位置によって精度にどのような影響があるのか、測位計算による測位精度検証による定量的な評価をすることで多面的な測量精度に及ぼす影響の評価をすることを目的とする。

### 2. 研究の方法

GNSS 測量 (仰角 15°ネットワーク型 RTK-GNSS で行った。) を本学バス停付近で令和 5 年 6 月 7 日～6 月 9 日 (9:00～18:00)、9 月 9 日～10 日 (8:00～20:00 ただし、10 日の午後から天候が悪化したため、15 日の午後から補填した) での観測データを使用した。6 月の測量では GPS + GLONASS + Galileo での測量を行い、9 月の測量では GPS のみの測量 (10 分間隔) を行った。DOP による測量精度、衛星図による衛星のばらつき、観測値によるグラフなどから測量精度に与える影響を評価した。

DOP とは、衛星の配置状態が測量精度に影響し、それを定量指標にしたものをいう。一般的に DOP 値 3.0 以下であるといとされている。式(1)より測位に使用する衛星位置の x,y,z 方向を算出した。

$$l_i = \cos(el) \sin(az) \quad m_i = \cos(el) \cos(az) \quad n_i = \sin(el) \quad (1)$$

ここで、 $l_i$ : 衛星位置の x 方向成分,  $m_i$ : 衛星位置の y 方向成分,  $n_i$ : 衛星位置の z 方向成分,  $i$ : 衛星番号,  $el$ : 衛星位置の仰角,  $az$ : 衛星位置の方向角とした。

$$A = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (A^T \cdot A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{bmatrix} \quad DOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} \quad (2)$$

これらを成分とする行列 A を用いて式(2)に示す計算式で DOP を算出した<sup>2)</sup>。

### 3. 結果

#### 3. 1 GNSS 測位特性

表 1 と図 1 に 6 月に測量結果を示す。一般的に測量誤差は 1cm～5cm とされている<sup>3)</sup>ので、それぞれの平均誤差を評価すると誤差の範囲内であり、標準偏差は z 座標誤差が 1cm を超える結果となっているが他の部分では 1cm 以内とばらつきが少なくよい測量結果が得られた。

図 2 には誤差の最大値・最小値を観測した時間での衛星比較を行った。左の図が x 座標、右の図が y 座標についてである。衛星の位置についてみると誤差の大小によって衛星の偏りが見られるわけではなく、様々な時間で衛星を比較したが 5cm を超えない時でも衛星状態に偏りがあるという結果になった。

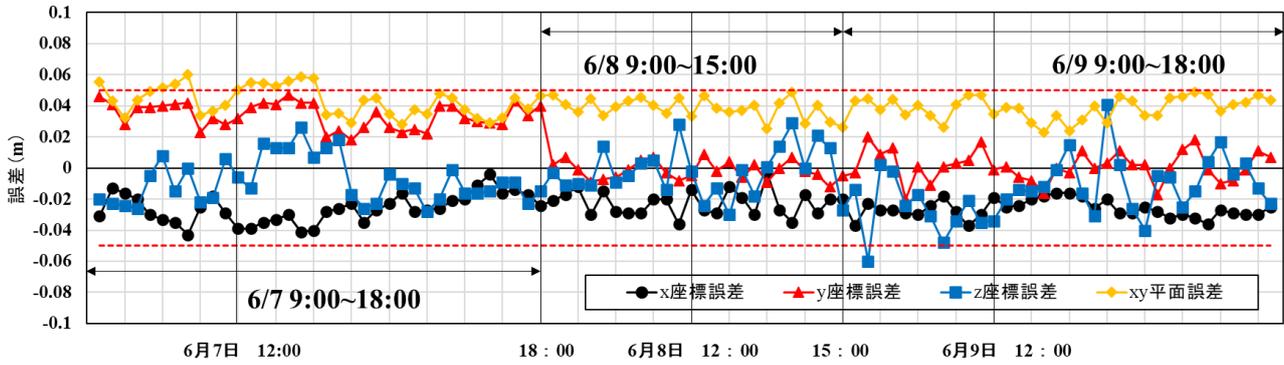
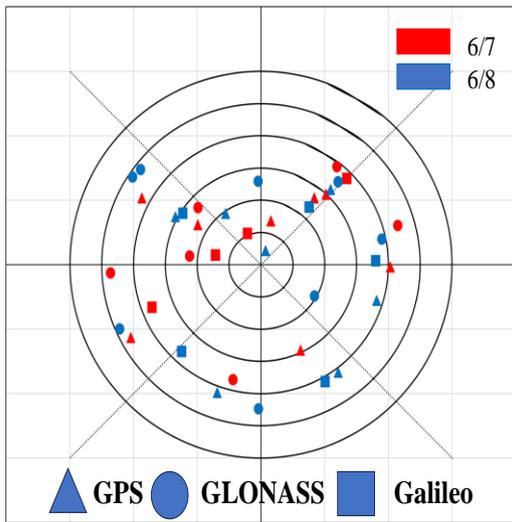


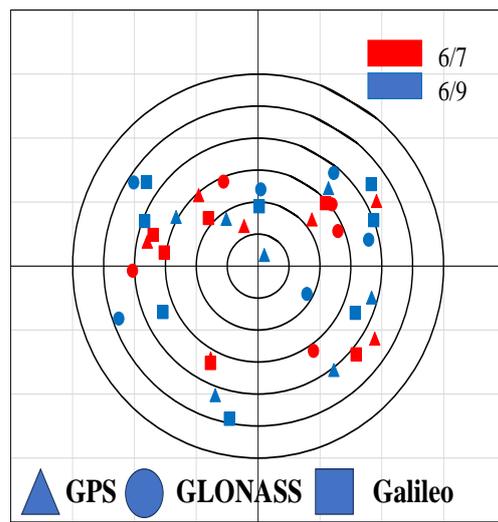
図 1 誤差の推移

表 1 GNSS 測量の結果

日付	平均誤差 (m)				標準偏差 (m)			
	x座標	y座標	z座標	xy平面座標	X座標	Y座標	z座標	xy平面座標
6月7日	-0.026	0.034	-0.008	0.043	0.009	0.008	0.014	0.009
6月8日	-0.023	-0.001	-0.001	0.039	0.008	0.005	0.015	0.006
6月9日	-0.026	0.001	-0.015	0.038	0.006	0.006	0.019	0.007



a) 誤差最大値 6/7 誤差最小値 6/8 (x 座標)



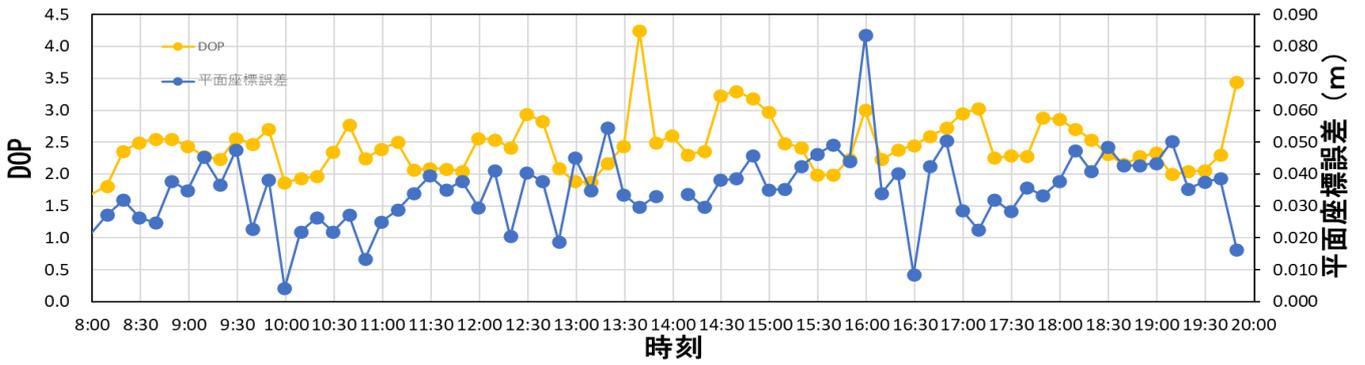
b) 誤差最大値 6/7 誤差最小値 6/9 (y 座標)

表 2 GPS 測量の結果

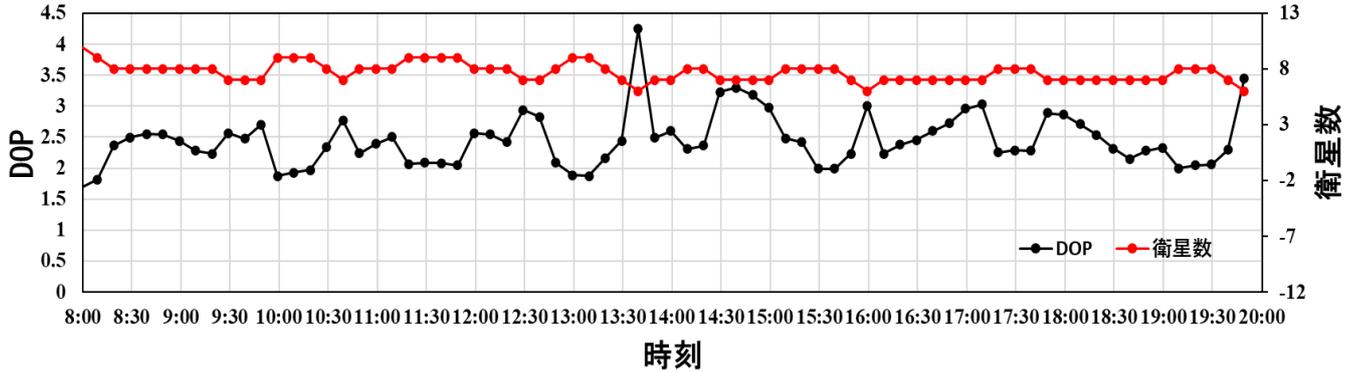
日付	平均誤差 (m)				標準偏差 (m)			
	x座標	y座標	z座標	xy平面座標	X座標	Y座標	z座標	xy平面座標
9月9日	-0.018	0.027	-0.001	0.035	0.013	0.011	0.021	0.012
9月10日	-0.014	0.017	-0.010	0.035	0.027	0.023	0.038	0.023

### 3. 2 GPS 測位特性

6月に行ったGNSS測量において衛星数が多く、衛星位置による違いを見つけることができなかつたため、周期が11時間58分であるGPSのみでの測量を行うことによって衛星数や衛星位置が近い状態での比較を行った。表2にはGPS測量の結果を示す。表1と同様に、平均誤差での評価を行うと各項目で5cm以内であることから測量結果として良好である。しかし、標準偏差を比較するとGPS測量では1cm~4cm程度となっており、GNSS測量よりばらつきが大きく誤差が出やすいと思われる。



a) DOP-xy 平面座標の関係性



b) DOP-衛星数の関係性

図 3 DOP と xy 平面座標誤差・衛星数の関係

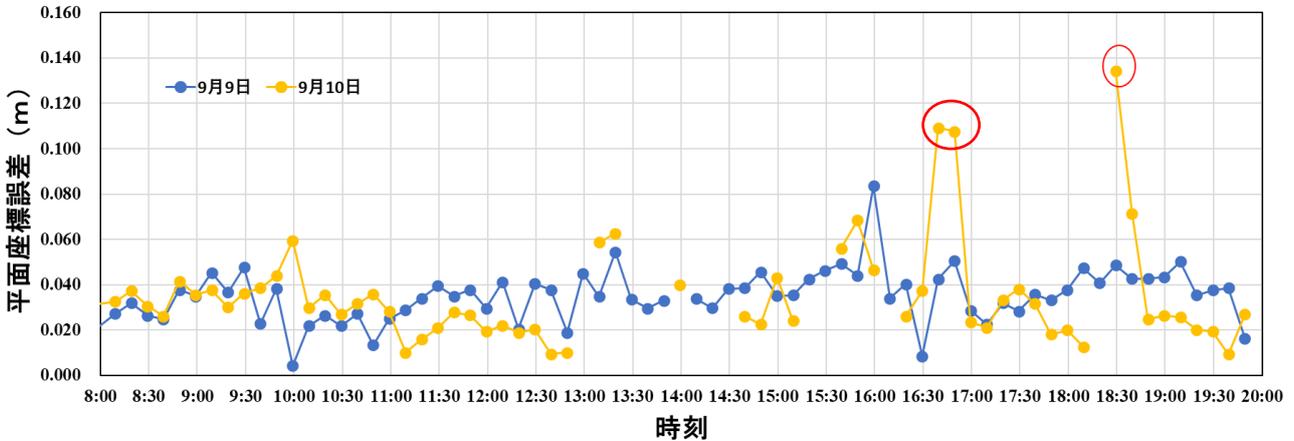


図 4 日付ごとの xy 平面座標誤差の推移

図 3 には DOP と平面座標誤差の関係、DOP と衛星数との関係を示す。図 3a)より DOP と平面座標誤差との間に関係性を見つけることが出来なかったが、一方図 3b)で DOP と衛星数において衛星数が上昇することによって DOP 値がそれに伴って減少するなど増減に応じて変化する関係が確認された。

### 3. 3 誤差の原因<sup>4)</sup>

誤差の原因として考えられるのが衛星軌道誤差・衛星ロック・電離層遅延・対流圏遅延が考えられるが、これらの原因はネットワーク RTK による観測、Fix 状態での観測、基準局までの距離が近いことからほとんど除去されていると考えた。また、本観測地点ではマルチパスを発生させる原因として考えられる建物などはなかった。そこで考える原因として、受信機が持つ定誤差、衛星の位置であると考え。衛星の位置が原因となっているのか GPS 測量で得られたデータをもとに評価した。

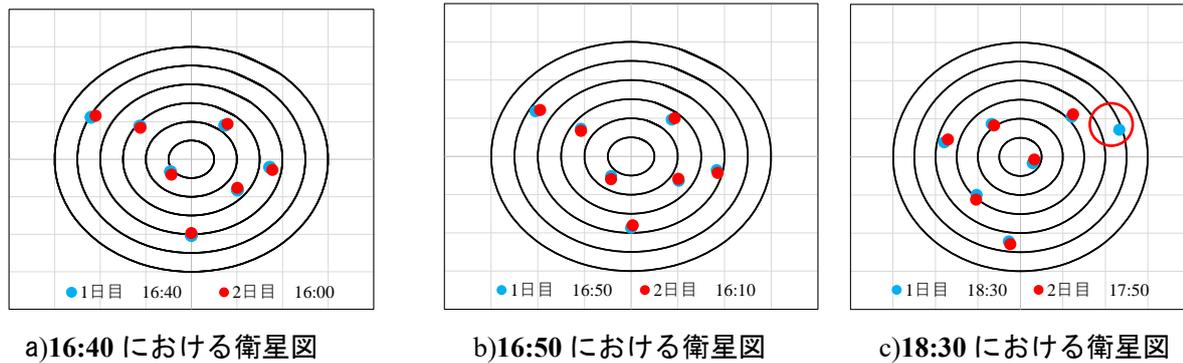


図 5 誤差が特出した時刻での衛星比較図

図 4 に、日付ごとの xy 平面座標誤差を示す (FLOAT 状態の値は除く)。図 4 の赤丸で囲まれた 16:40,16:50,18:30 における誤差が 9 日と 10 日で特出して違っていたため、焦点を置いて評価した。図 5 に、誤差が特出していた 3 つの同時間 (1 日目 16:40,16:50,18:30 2 日目は衛星の位置を合わせると 16:00,16:10,17:50 になる) ごとの衛星位置を示す。図 5a),b) は衛星の位置がほとんど同じであるにもかかわらず誤差が生じている。図 c) は、赤で囲まれた部分に衛星があることによって誤差が小さくなっていると考えられるが、精度の良し悪しに衛星位置は関係していないと思われる。

#### 4. 結論

衛星位置が測量精度に与える影響は小さいと考えられる。衛星数の上昇に応じて FLOTE 状態の減少、観測までの時間短縮、標準偏差が小さくなったことから、今回の観測結果からは、測位精度を向上させる要因として測位される衛星の数が一番大きいと明らかになった。また、GPS 測量から 1 日目は 4%、2 日目は 10% 程度で誤差 5cm を超える確率となったため、1 回の測量結果を使用するのではなく、10 回ほど観測して最大値・最小値を除く 8 つの平均値を使用することによって誤差を小さくした値が得られると考える。

#### 参考文献

- 1) Sony Network Communications : GNSS の測位方法とメリット・デメリット | 通信-SONY  
(<https://iot.sonymnetwork.co.jp/column/column006/>) (2023 年 9 月確認)
- 2) 山本義幸 マルチ GNSS による測位特性評価, 愛知工業大学研究報告, 第 47 号 (2023 年 12 月確認)
- 3) アカサカテック : RTK-GNSS とは? 測位方法の違いや精度を高めるデジタル簡易無線機のメリットを紹介  
(<https://www.akasakatec.com/blog/4138/>) (2023 年 12 月確認)
- 4) 日本テラサット株式会社 : GNSS 測位精度における主な誤差原因  
(<https://www.terasat.co.jp/archives/6847.html>) (2023 年 12 月確認)

## PC 鋼より線破断時の付着特性に関する数値解析的検討

EC20041 鈴木健太

### 1. 研究背景と目的

近年、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。今後、このような PC 橋梁を維持管理していくためには、現在や将来の構造物が保有する性能を適切に評価し、適切な対策を検討する必要がある。PC 橋梁は鋼材により緊張力を導入することで、剛性やひび割れ発生耐力を向上させているため鋼材腐食や破断が生じるとプレストレス力の低下などが生じ構造性能が著しく低下する。これらの影響を適切に考慮しながら構造性能を評価する方法には、数値解析技術の利用が有用と考えられる。

新設や PC 鋼材に腐食や破断が生じた PC 構造の性能を数値解析的に予測するためには、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、鉄道総研の前田らの PC 鋼材切断実験<sup>2)</sup>で使用されている PC はり供試体を対象に実験の再現解析を実施し、解析手法の妥当性の評価をすると共に、再現解析結果と実験値の比較から実験値を再現できる付着強度パラメーター $\alpha$ を求めること、PC 鋼より線破断時の付着特性に関する数値解析的検討を行った。

### 2. 実験概要

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、シース管に充填された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各要素が PC 桁の力学的性能にどう影響するかを明らかにすることを目的としている。解析対象とした PC 桁供試体の諸元を図 1、材料特性値の諸元を表 1 に示す。

本研究では、前田らの実験で作成された供試体 1-6、1-7、1-8、1-9 の 4 本を対象とし、解析ソフト上で実験状況を再現し、数値解析を行う。解析対象の供試体は二つあり、400 mm×400 mm、400 mm×550 mm の短径段断面を有する PC 部材であり、鋼材を破断するために、供試体 1-6、1-7 では、左端部 450 mm の位置に供試

表 1 供試体材料特性値

供試体	寸法					種別	PC鋼材			グラウト		コンクリート		緊張時の引張力	有効プレストレス力 (kN)
	a1 (mm)	a2 (mm)	b (mm)	c (mm)	シース径 (mm)		本数 (mm)	f <sub>py</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (GPa)	f <sub>g</sub> (MPa)	E <sub>g</sub> (GPa)	f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (GPa)		
No.1-6	400	400	10000	450	65	鋼より線	12T12.7	1883	191	26.8	10.9	54.5	40	PC鋼材 f <sub>py</sub> の80%程度	1191.6
No.1-7	400	400	10000	450						44.6	15.5	54.5	39		1192.8
No.1-8	400	550	4470	650						26.1	10.4	55.1	39.9		1211.6
No.1-9	400	550	4470	650						26.1	10.4	52.6	36.7		1113.8

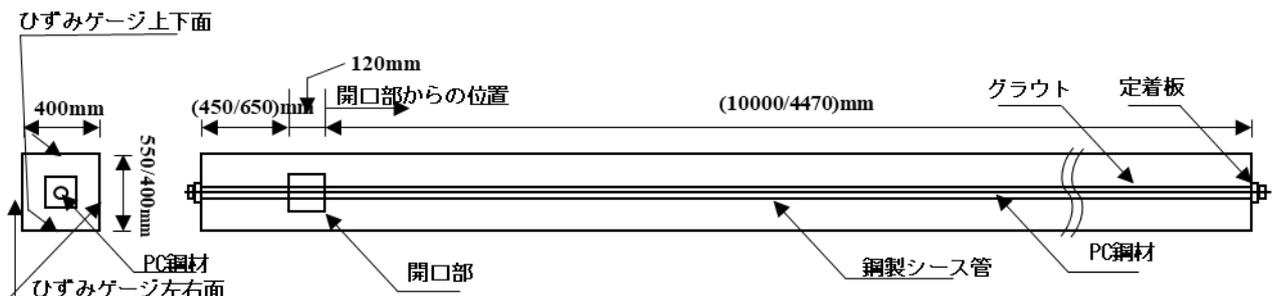


図 1 供試体諸元

体 1-8、1-9 では、650 mmの位置に 120 mm×120 mm×120 mm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 32kN/mm<sup>2</sup>である。供試体 1-7 には PC 鋼材 SWPR7BL7 本より 12.7mm を 12 本(12T12.7)供試体 1-8, 1-9 には PC 鋼材 SWPR7BL7 本より 12.7mm を 12 本(12T12.7)それぞれシース管内に沿って導入している。また、グラウト強度は、供試体 1-6 で 26.8N/mm<sup>2</sup>、1-7 で 44.6 N/mm<sup>2</sup>供試体 1-8、1-9 で 26.1N/mm<sup>2</sup>となっている。鋼製シース (φ38 mm) 内部には、PC 鋼材緊張後にグラウトを十分に充填するポストテンション方式で充填した。供試体に設置した開口部で PC 鋼材にグラインダーを使用し供試体端から 1-6、1-7 で 570mm の位置で 1-8、1-9 で 770mm の位置で破断させる。試験では打設 10 日でプレストレスを導入し、打設後 30 日に破断させている。その際生じた部材軸方向のコンクリートひずみを計測することで、プレストレスの残存割合  $r$  求めている。

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

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。

### 3. 解析概要

#### 3.1 数値解析

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<sup>5)</sup>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 鋼材要素節点の変位から積分点でのすべり量を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 n 式(2) に示す島ら<sup>6)</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。

$$\tau = a \times 0.73 f'_g (\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \tag{2}$$

ここで、 $f'_g$ : グラウト強度、 $\varepsilon$ : PC 鋼材ひずみ、 $s$ :  $1000S/D$ 、 $S$ : すべり量、 $D$ : 鉄筋径とし、 $\varepsilon$  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、実験と同様にアンポ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 540mm と 740 mm の位置で切断する。PC 鋼材要素の断面を 23 段階に分けて徐々に 0 に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減少範囲に及ぼす影響を解析的に評価した。

#### 3.2 付着強度パラメーター $a$ の同定

実験と解析で評価された残存プレストレス割合の比較を図 3 および図 4 に示す。なお、実験値と解析値の比較は、文献中に実験値が掲載されたもの表 2 示している。図の解析結果は、付着応力-すべり-ひずみ関係に強度パラメーター  $a$  の値を変化させた再現解析と実験値が概ね一致する値を求めた結果であり、比較検討の結果 12T12.7 の PC 鋼材より線に対し、付着強度パラメーター  $a$  が供試体 1-6、1-7、1-8、1-9 においては 0.1 が実験値とよく一致する結果が得られた。

解析によって付着応力度を算出した結果、1-6 から 1-9 に対してそれぞれ -2.62、-2.62、-1.50、-1.57N/mm<sup>2</sup> となった。解析値と実験値において値に差が生じたのは、付着応力が作用するときに、材料の内部に生じる抵抗する力を解析上で考慮できなかったのではないかと考えた。

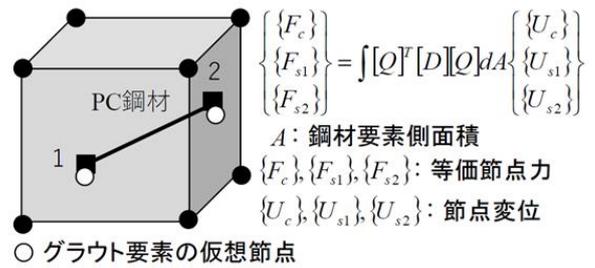


図 2 付着剛性方程式の定式化

表2 プレストレス減少範囲

供試体	グラウト強度	プレストレス減少範囲		付着応力度	
		実験値	計算値	実験値	解析値
	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
No.1-6	26.8	1757	1755	1.42	2.62
No.1-7	44.6	891	1405	2.8	2.62
No.1-8	26.1	1917	1905	1.32	1.5
No.1-9	26.1	1785	1755	1.3	1.57

4. 解析供試体比較結果

残存プレストレス比に着目して比較してみると以下の図3、図4のようになった。

これは付着応力-すべり-ひずみ関係に強度パラメータ  $\alpha$  の値を変化させて乗じ、再現解析と実験値が概ね一致する値を求めた結果であり、強度パラメータ  $\alpha$  は0.1であるということが分かった。

供試体 1-8 と 1-9 のグラフを比較してみるとプレストレス残存割合が 1 になるまでの切断場所からの距離が供試体 1-9 の方が短くなった。二つの供試体では、コンクリート強度と緊張力の大きさが変数となっている。そこで、コンクリートのヤング係数を二つの供試体で近づけるため供試体 1-8 のヤング係数を 30kN/mm<sup>2</sup> まで減らして解析を再度行ったところ、結果に変化はなかった。そのため、供試体 1-8 と 1-9 において、プレストレス残存割合が 1 になるまでの開口部からの距離に差が生まれたのは緊張力の影響によるものと言える。供試体 1-6 と 1-7 のグラフを比較したとき、プレストレス残存割合が 1 になるまでの切断場所からの距離が供試体 1-7 の方が短くなった。グラウト強度と緊張力が変数となっている緊張力の値は差が 1.0kN の間に収まっていることから、緊張力が影響していることは考えにくい。そのため、グラウト強度の値がプレストレス残存割合に影響を及ぼしている考えることが妥当である。供試体 1-6 と 1-7 の比較、供試体 1-8 と 1-9 の比較においてそれぞれの変数によって結果に違いが出たことから、プレストレス残存割合に影響を与えるものがグラウト強度と緊張力に依存していることが分かる。図3 見てわかるように、グラウト強度と緊張力を変数にして行った解析では、プレストレス減少範囲が緊張力の大きさに比例することはなく、グラウト強度が小さいほど、プレストレスの減少範囲は大きくなる傾向となった。

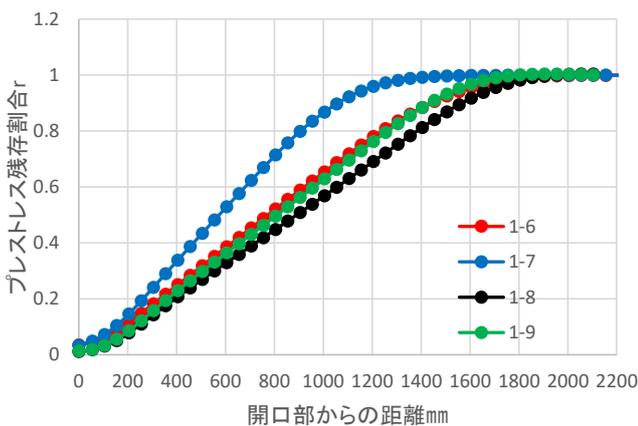


図3 プレストレス残存割合分布

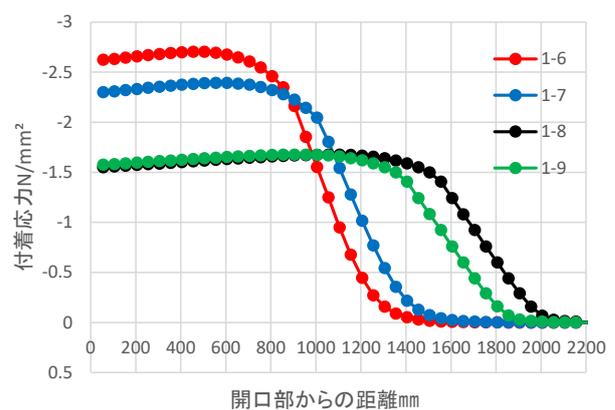


図4 付着応力分布

4.1 実験再現結果

供試体 1-8 における緊張力を変数とした結果を比較してみると緊張力が大きくなるにつれプレストレス残存割合が 1 になるまでの開口部からの距離が長くなった。解析で得られた結果と前田らの実験結果との比較を行う。前田らが行った実験のグラフが供試体 1-6 のみの掲載だったため、供試体 1-6 の解析値と実験値によ

る比較を行った。残存プレストレス比に着目して比較してみると以下の図6のようになった。グラフから読み取れるように実験値も解析値もおおむね同じような挙動を示している。しかし、データを見ると解析値のグラフよりも実験値の方が残存プレストレスの回復が緩やかでプレストレス減少区間が広がっていた。これは、グラウトの充填不良や細かな気泡の存在がグラウトとPC鋼材との付着力に影響を与え、解析上で作成したものよりも付着力が小さくなったのではないかと考える。また、PC鋼材破断位置に近い範囲において解析値より実験値のほうが大きく残存プレストレス比が変化している部分がある。これは解析上では考慮できない摩擦力の影響ですべりが大きくなるPC鋼材切断位置付近でグラウトとPC鋼材の付着関係に影響を与えたと考察する。この変化は発生範囲が小さく、最終的な結果には大きく関わってこないと考える。以上の差を考慮しても前田らの実験は精度が良く鋼材破断後のプレストレスの評価方法として有用な実験であると言える。

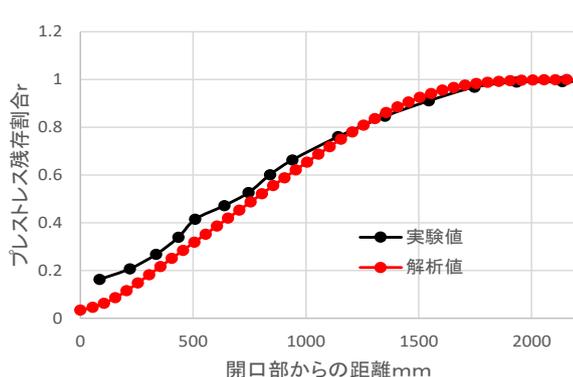


図5 1-6 実験比較

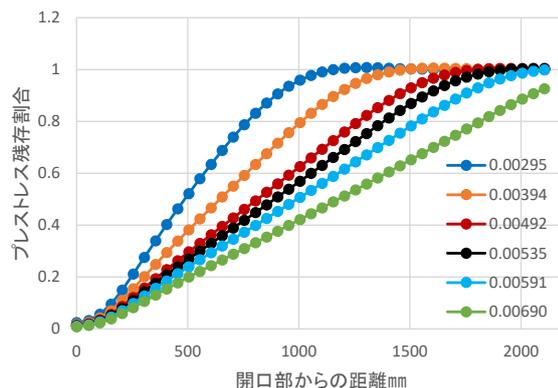


図6 1-8 緊張力比較

#### 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、グラウト強度と緊張力が変数として行われたときプレストレス減少範囲に影響を及ぼしていることから、プレストレス減少割合は、グラウト強度と緊張力の大きさに依存することが分かった。

#### 参考文献

- 1) 是永健好、渡辺英義：PC鋼材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
- 2) 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、鉄道総報告、Vol.25、No.2、pp.11-16、2011.2.
- 3) 伊藤 睦、Kongkeo,P. 中村 光、田辺忠顕：格子等価連続体化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.
- 4) 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.
- 5) 仮想仕事の原理：建築学生が学ぶ構造力学，<http://kentiku-kouzou.jp/advance-kasousigoto.html> (2024年1月26日確認)
- 6) 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

## PC 鋼材の破断が PC 桁の力学特性に及ぼす影響の数値解析的評価

EC20051 戸部広心

### 1. 目的

2m を超える橋梁などは 5 年に 1 回の頻度での近接目視点検が義務付けられている。しかしながら、近接目視中心の点検ではひび割れや腐食等といった外観変状や材料劣化が分かるのみで、安全性の評価は難しい。また PC 鋼材の破断は詳細点検でなければ確認できない。そのため、PC 鋼材の破断が桁のたわみに及ぼす影響や耐荷特性に及ぼす影響が明らかとなれば、今後の点検や維持管理計画の策定に有意義な指標を提示できると考えられる。そこで本研究では、PC 鋼材桁について、PC 鋼材破断が使用時のたわみ変化や耐荷性能などの力学特性に及ぼす影響を数値解析により評価することを目的とする。車両などの変化する活荷重や桁の死荷重を作用させ、PC 鋼材を破断させ、PC 鋼材を破断させる位置の変化によって PC 桁の剛性やたわみ及び耐荷性能などの力学的特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。

### 2. 検討概要

本研究において解析の対象とした PC はりは、渡辺ら<sup>1)</sup>の実験の供試体とした。図-1 に健全な PC 桁を想定した供試体概要を示す。この検討では、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 桁を想定した供試体の寸法としては、図-1 に示す。また、支点間のスパンに等分布荷重を作用させ、かつ図-2 に示すように PC 鋼材の破断箇所は、断面 1~断面 6 とする。供試体は左右対称のために左のみ切断箇所を選定した。これらの切断箇所を PC 鋼材 1~12 本を順に切断した。また PC 鋼材の破断箇所が 2 箇所発生した場合の位置と破断順番についての供試体への影響についても検討も行った。PC 鋼材の破断させるパターンとして表-2 に示すように 3 パターン選定した。本実験の解析対象とした渡辺らの実験<sup>1)</sup>では、供試体に PC 鋼材を破断するために、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。本実験において、健全な PC 桁を想定するため供試体にはグラウト充填不良区間を設けない。本実験では、PC 鋼材に銅より線 SWPR7BL7 本より 12.7mm を 12 本(12T12.7)が使用されている。また、軸方向鉄筋には公称直径が 12.7mm である異形鉄筋を使用し、せん断補強鉄筋には公称直径が 15.9mm である異形鉄筋を使用した。シー管内部に流し込むグラウト強度は、 $34.1\text{N/mm}^2$ とした。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 $\tau$ —すべり $S$ 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 $\alpha$ を導入した。1 本より線に対する

表-1 材料特性値

P C 鋼材			軸方向鉄筋		スターラップ		グラウト		コンクリート	
$f_{py}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$f_{pu}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$E_p$ ( $\text{KN/mm}^2$ )	$f_{xy}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$E_p$ ( $\text{KN/mm}^2$ )						
1849	2020	194	370	194	345	194	34.1	12.9	57.0	40.1

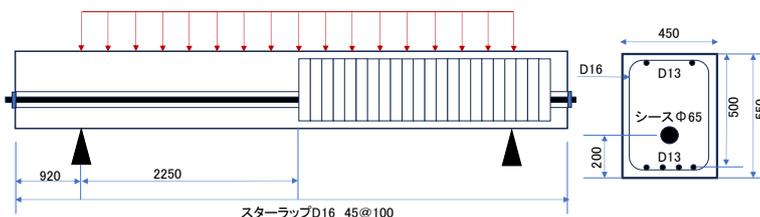


図-1 健全な PC 桁の検討供試体諸元

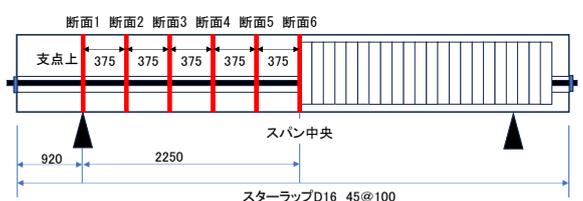


図-2 健全な PC 桁の切断箇所検討

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。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。

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

$$s = 1000S/D \tag{1}$$

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。耐荷性能評価では、より線要素の切断に引き続き、荷重増分法によりスパン中央から $\pm 250\text{mm}$ の位置に荷重載荷した。また、各断面12本すべて破断させるとその位置でひび割れが生じてしまうため、破断位置は表-2に示すもので破断量を半分にして耐荷性能評価を行った。それによって破壊した断面での断面耐力もPC桁の耐力とどのような変化が見られるのかを評価した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 PC鋼材1箇所破断の結果

図-3に破断本数とたわみ関係を示す。図より断面5、6はほ

表-2 破断パターン

I	II	III
1	1-6	2-3
2	2-6	2-4
3	3-6	2-5
4	4-6	3-4
5	5-6	3-5
6		4-5

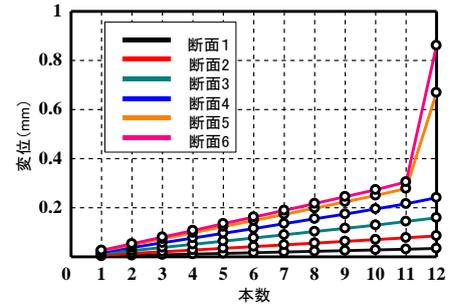


図-3 パターン I 破断本数-たわみ関係

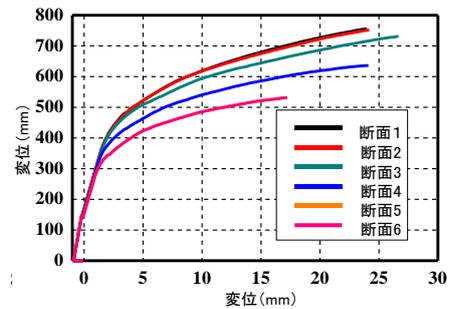


図-4 荷重-変位関係

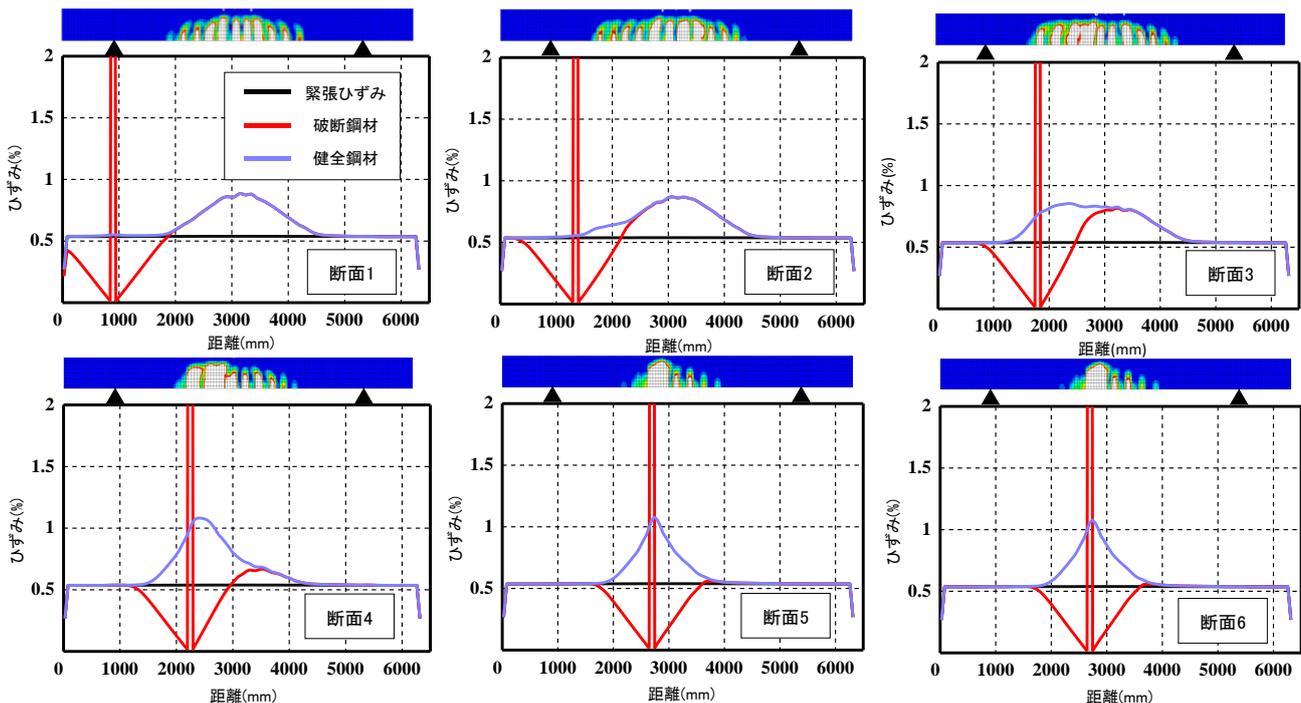


図-5 解析ひずみ濃淡図、最大荷重時の鋼材ひずみ分布

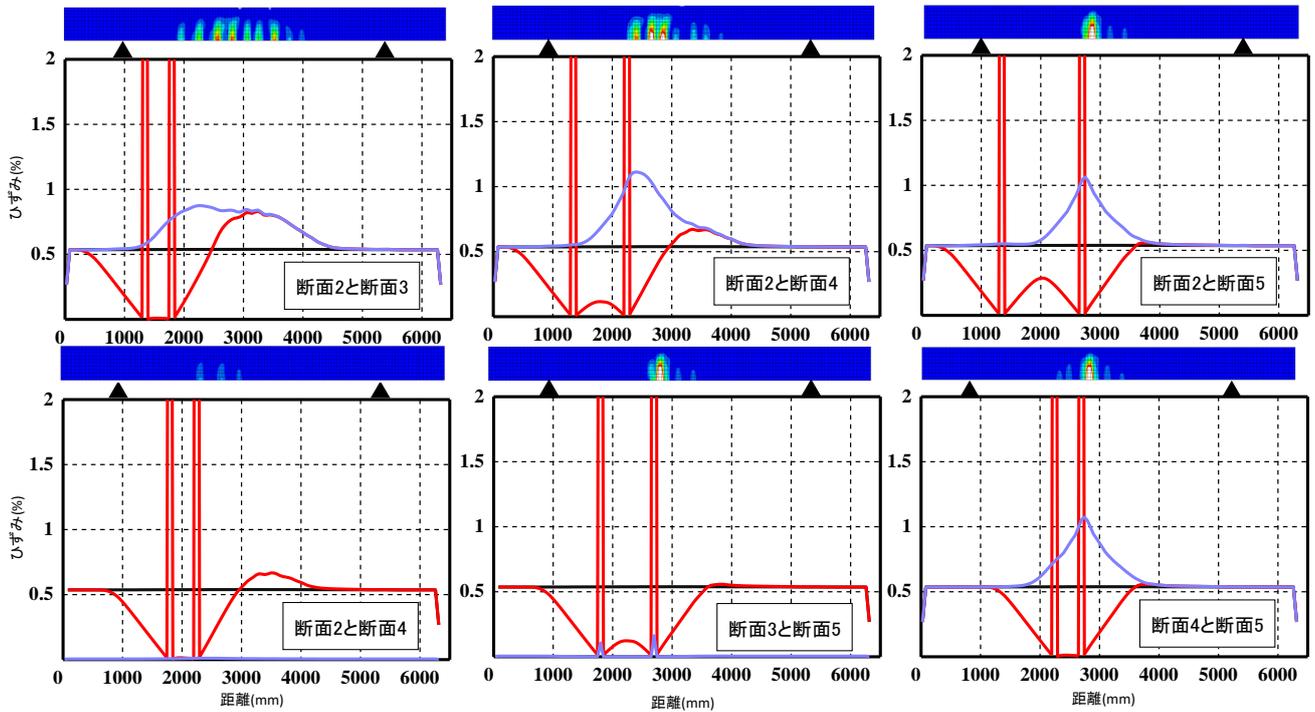
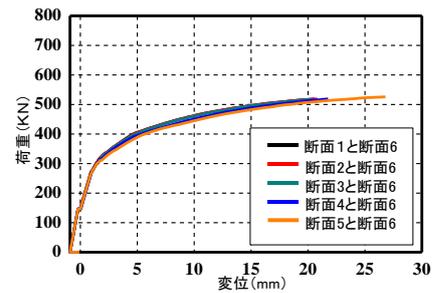
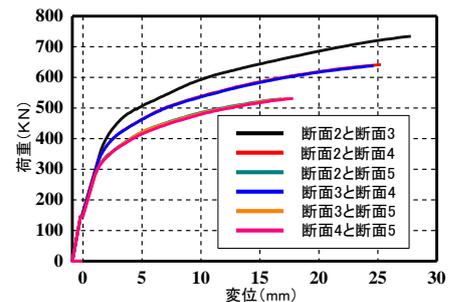


図-6 解析ひずみ濃淡図、荷重最大時の鋼材ひずみ分布

ばスパン中央にあるためすべて破断すると変位が急増し、供試体にひび割れが発生している。PC 鋼材がつながっているかではなく破断位置がスパン中央に近づくことでひび割れを発生させていると考えられる。次に図-4に荷重変位関係を示す。図-5は各断面において図-4より、PC 鋼材が破断したときの最大荷重時の解析モデル内の各要素のひずみの値を読み取り作成し示した。図-4より、供試体中央部の変位が大きくなっていることから、スパン中央に切断箇所が近づく耐荷性能が減少すると考えられる。図-5より、スパン中央へと破断箇所が移動すると、スパン中央の鋼材ひずみが小さくなっている。しかし、断面5と断面6では、破断箇所がスパン中央に近いために鋼材ひずみが切断箇所のみ大きく現れている。これは、破断箇所がスパン中央と近いために2つの断面のひずみが合成されたためと考えられる。また、断面3では破断位置と破壊断面が異なっているためすべりが発生し、すべりによりひずみが分布していることが分かる。破断位置と破断断面が同じになっていると破壊断面でひずみが大きくなっている。



(a) パターンII



(b) パターンIII

図-7 荷重-変位関係

### 3.2 PC 鋼材 2 箇所破断の結果

図-6に荷重最大時のひずみ分布図、ひずみ濃淡図を示す。図-6より断面5と断面6を切断したときのみひずみが断面5の位置で大きくなっているが、そのほかの断面1~4断面を先に切ってもスパン中央の断面6で大きなひずみが見られるのみだった。断面5の位置でひずみが大きくなったのは、スパン中央に近い位置で先に切断が起きたためだと考えられる。断面2-3では破断位置と破壊断面が異なっていると、図-6の断面3と同じくすべりが発生しひずみが分布する。図-7に荷重変位関係を示す。図より、スパン中央の位置で破断が発生すると耐荷性能が著しく低下すると考えられる。図-8に破断本数とたわみ関係を示す。(a)より、

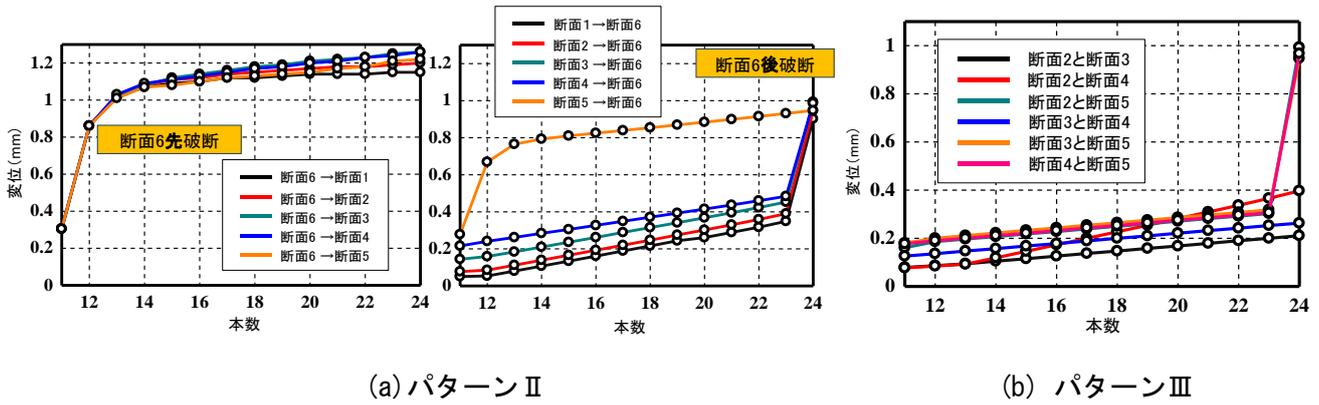


図-8 破断本数-たわみ関係

断面6を先に破断すると断面6を切った時点で変位が急増し、後に切る断面はあまり変位に差が出ない。また2つの断面でPC鋼材の破断が生じた場合、スパン中央の断面6が先に破断した方が全体のたわみは大きくなる。(b)では、最大曲げモーメントの作用位置に近い断面5を組み合わせたもののたわみが大きく影響している。最後に図-9にひび割れした位置の断面耐力を示す。図より、断面耐力が異常に低い断面では、滑りが発生していると考えられる。また1断面で6本破断のIと2断面で12本破断のIIとIIIでは、耐力が半減していないのは、破断していない6本が少しでも抵抗をしているため耐力が半減まではしていない。

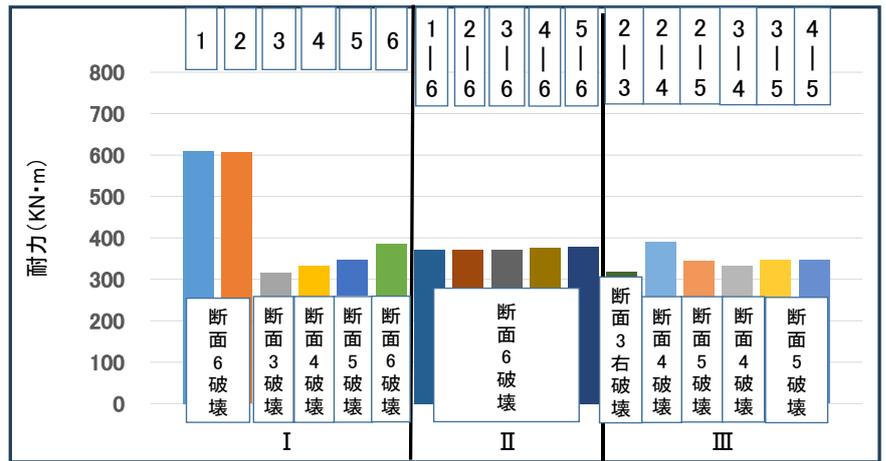


図-9 ひび割れした位置の断面耐力

#### 4. 結論

検討1より破断位置がスパン中央に近づくことで、PC鋼材破断量に応じてたわみが増加する。また2断面で鋼材破断が生じた場合たわみは破断する順番の影響を受ける。しかし、たわみ量がわずかであることからたわみ量でPC鋼材の破断を判断することが難しい。

検討2では、破壊位置と破断位置が同一の時、断面耐力はほぼ同一となり破断したPC鋼材も外力作用に抵抗する。また破壊位置と破断位置が同一とならないすべりが発生したときには、破断位置と残存PC鋼材の量では耐力を過大評価してしまう可能性がある。

#### 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.
- 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, 田辺忠顕: 格子等価連続体化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.

PC 桁の断面剛性が PC 鋼材破断時の付着特性に及ぼす影響の数値解析的検討

EC20052 富崎 湧仁

1. 本研究の目的

PC 鋼材破断時にプレストレスが減少する領域は、グラウト強度や導入緊張力の大きさ、断面寸法など様々な要因の影響を受けると考えられる。遠藤<sup>1)</sup>は、鉄道総研の前田らの PC 鋼材切断実験<sup>2)</sup>の再現解析を実施するとともに、グラウト強度を変数としたパラメトリック解析により、プレストレス減少領域における付着応力度は、グラウト強度の 2/3 乗に比例することを報告している。しかしながら、前田らの実験や遠藤による研究では、PC 鋼材が配置される断面剛性が鋼材破断時の残存プレストレス量に及ぼす影響が十分に検討されていない。そこで本研究では、PC 桁の断面剛性が PC 鋼材破断時の残存プレストレス分布に及ぼす影響に資する知見を得ることを目的とした。具体的には、今年度、同研究室の村上<sup>3)</sup>が実施した断面寸法を変化させた PC 鋼材破断実験の再現解析や鉄道総研の前田らの試験体を対象に軸方向鉄筋の断面積や軸方向鉄筋ごとに算出した緊張力といった断面剛性を変化させた数値実験を行うことで、断面剛性が PC 鋼材破断時の付着特性に及ぼす影響を検討した。

2. 解析対象とした実験概要と解析概要

2.1 実験概要

本研究では、村上による断面寸法の異なる PC はりによる PC 鋼材切断実験の再現解析を通じて、PC 鋼材の付着特性について検討を行った。村上の実験で使用された試験体の諸元および断面寸法と材料特性値をそれぞれ図-1 および表-1 に示す。村上の実験では、PC 鋼材を破断するために、はり試験体左端部より 135mm の位置に 100mm×100mm×100mm の開口部が設置されている。また、図-1 に示すように、この実験では多くのひずみが計測されており、コンクリート内部のひずみを計測するために、断面上縁から 50mm の位置に D10 鉄筋が配置されている。

2.2 解析概要

村上の実験の再現解析を実施するにあたり、FEMIS を用いて、解析対象とするはり試験体データを作成し、実験内容を再現し、数値解析を行い、解析結果と実験値を比較した。

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(1)に示す島ら<sup>4)</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付着強度パラメーター $a$ を乗じた。なお、付着強度パラメーター $a$ は、村上が行った実験結果と本解析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。

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

ここで、 $f'_g$  : グラウト強度,  $\varepsilon$  : PC 鋼材ひずみ,  $s = 1000S/D$ ,  $S$  : すべり量,  $D$  : 鉄筋径であり,

表-1 断面寸法と材料特性値<sup>3)</sup>

試験体名	供試体寸法		種別	PC鋼材			グラウト	
	断面幅 mm	断面高さ mm		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 μ	強度 N/mm <sup>2</sup>
小	120	200	SBPR 930/1080	66.48	1361	210	2800	52.6
中	150						3500	
大	180						4200	

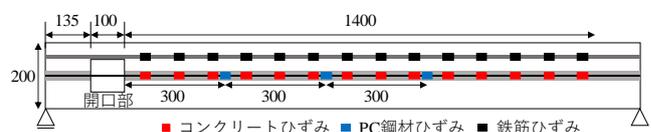


図-1 試験体諸元とひずみ計測位置<sup>3)</sup>

$\varepsilon$ 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、PC鋼材とグラウト間の付着をモデル化し、PC鋼材の切断は切断するPC鋼材要素の断面積をゼロにすることで再現した。村上の実験を再現する本解析では、実験の過程を計15ステップとし、1から10ステップにかけて、緊張力を導入、11から15ステップにかけてグラウトを導入し、12から15ステップにかけてPC鋼材を1/4ずつ切断することで、実験の再現をした。その際生じた部材軸方向のコンクリートひずみを計測し、次式によりプレストレス残存割合 $r$ を評価した。

$$r = (\varepsilon_{pin} - \varepsilon_{pde}) / \varepsilon_{pin} \tag{2}$$

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後のひずみ量である。式(2)から求められたプレストレス残存割合やプレストレス減少範囲から、グラウト強度が付着特性やプレストレス減少範囲に及ぼす影響を解析的に評価するとともにコンクリートの断面寸法が付着特性に影響を及ぼすのかを評価した。グラウト強度は一定とし、緊張力とコンクリートの断面寸法を変数とし、プレストレス残存割合が1.0付近になるまでの距離を評価する解析を行った結果、本解析と村上の実験データにて、プレストレス残存割合が1.0付近になるまでの開口部からの距離が概ね一致する式(1)中の付着強度パラメーター $\alpha$ のおおよその値を探した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 村上の実験解析結果

本解析と村上の実験データから得られた付着強度パラメーター $\alpha$ をもとに、コンクリートの断面寸法と緊張力を変数として、本解析結果にて算出した解析値におけるプレストレス残存割合が1.0付近になるまでの距離とそのときの付着強度パラメーター $\alpha$ の値と村上の実験によるプレストレス残存割合が1.0付近になるときの開口部からの距離の関係を示した結果を以下の図-2に示す。

右の図-3から、付着強度パラメーター $\alpha$ の値は、幅

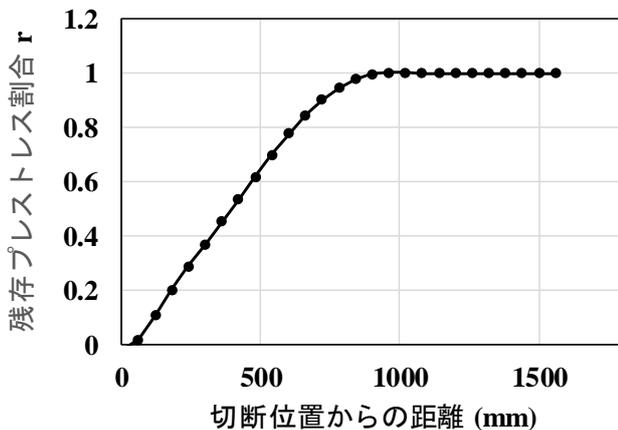
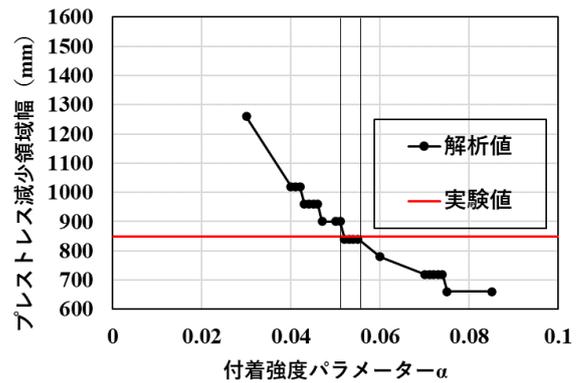
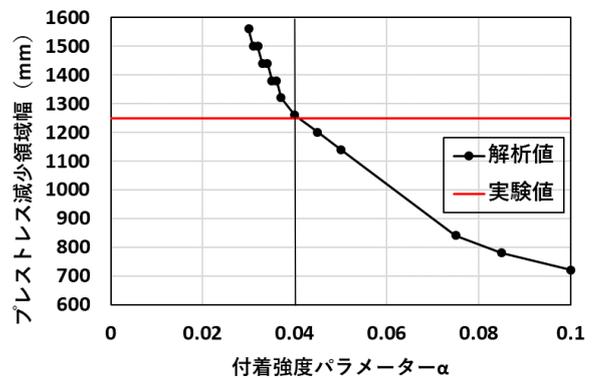


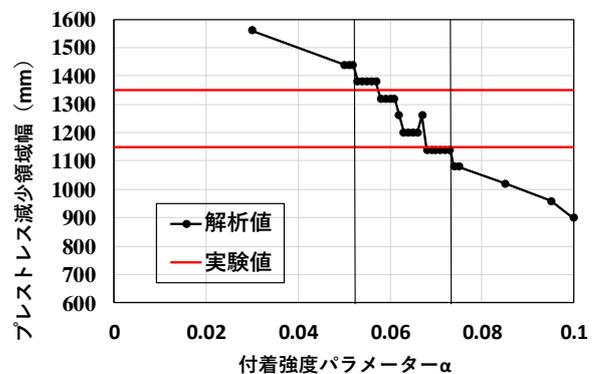
図-2 残存プレストレス割合分布の一例



(a) 試験体 小



(b) 試験体 中



(c) 試験体 大

図-3 付着強度パラメーター $\alpha$ がプレストレス減少領域幅に及ぼす影響

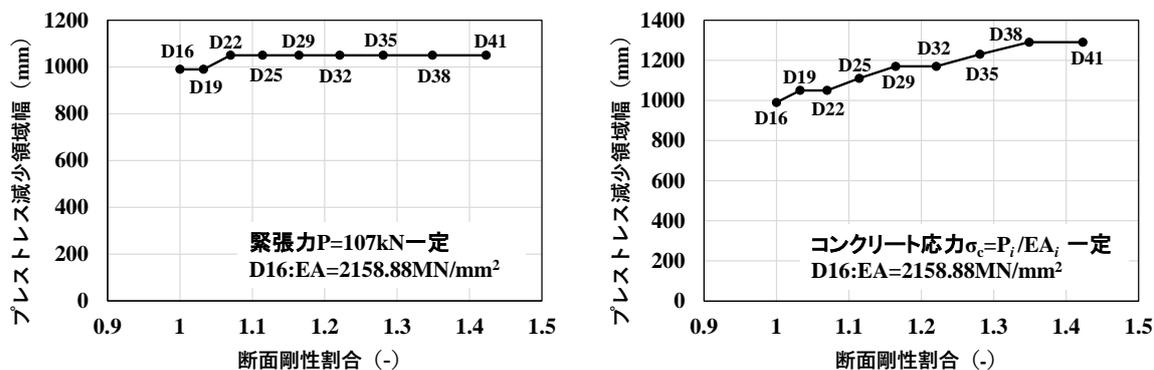


図-4 断面剛性割合がプレストレス減少領域幅に及ぼす影響

120mm×高さ 200mm の試験体小で  $\alpha=0.052\sim 0.055$  の区間に、幅 150mm×高さ 200mm の試験体中で、 $\alpha=0.04$ 、幅 180mm×高さ 200mm の試験体大で、 $\alpha=0.053\sim 0.073$  の区間にあることが分かった。よって、村上の実験値と本解析におけるプレストレス残存割合が 1.0 付近になるまでの開口部からの距離が概ね一致する付着強度パラメーター $\alpha$ の値の平均値を取ると、幅 120mm×高さ 200mm の試験体小で  $\alpha=0.054$ 、幅 150mm×高さ 200mm の試験体中で  $\alpha=0.04$ 、幅 180mm×高さ 200mm の試験体大で  $\alpha=0.063$  であることが分かった。

各断面寸法における平均の数値のみに着目すると、断面寸法が大きくなると、付着強度パラメーター $\alpha$ の値は大きくなるという解析結果が得られた。

ここで、各試験体の付着強度パラメーター $\alpha$ について、村上による実験では、幅 150mm×高さ 200mm の試験体中に関して、PC 鋼材の緊張力が破断時に他の断面寸法のものよりも抜けたため、実験結果が正確ではないとされている。よって、幅 150mm×高さ 200mm の試験体中の実験データを無視し、幅 120mm×高さ 200mm の試験体小と幅 180mm×高さ 200mm の試験体大の付着強度パラメーター $\alpha$ の区間に着目すると、付着強度パラメーター $\alpha$ の値は、断面寸法に関係なく、ある程度一定の値、本解析においては、0.05 付近の値をとる取り、付着強度パラメーター $\alpha$ の値が断面寸法ごとに大きくなるのは、緊張力の大きさが影響しているのではないかと推測し、以下の解析を行った。

### 3.2 断面剛性がプレストレス減少領域幅に及ぼす影響

図-4 左図では、緊張力の値を一定とし、鉄筋の断面剛性（断面積）を変数として、図-4 右図では、コンクリートの応力を一定の値にし、そこから算出した各鉄筋における緊張力の値を変数としてそれぞれ解析を行い、プレストレスが減少する領域の大きさに変化が生じるのかを検討した。

緊張力の値を一定とし、鉄筋の断面剛性（断面積）を変数とした場合の解析結果は、図-4 左図から、プレストレスが減少する領域の大きさに変化は生じなかった。

次に、コンクリートの応力を一定の値にし、そこから算出した各鉄筋における緊張力の値を変数とした場合の解析結果は、図-4 右図から、緊張力の大きさに比例して、プレストレス減少領域も大きくなった。

## 4. 結論

本研究にて、以下に示すことがわかった。

- ・村上の実験再現解析から、断面寸法に応じて、プレストレス減少領域幅に違いが見られること。
- ・軸方向鉄筋の断面剛性（断面積）を変数とした場合、プレストレスが抜ける領域の大きさに変化は生じないこと。
- ・コンクリートの応力を一定として、軸方向鉄筋ごとに算出した緊張力を変数とした場合、緊張力の大きさに比例してプレストレス減少領域も大きくなること。

以上のことから、本研究の数値解析的には、PC 桁の断面剛性は、PC 鋼材破断時の付着特性に影響を及ぼさないという結果が得られた。

#### 参考文献

- 1) 遠藤滉大：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，中部大学卒業論文，2023.3
- 2) 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
- 3) 村上順彦：PC 桁の断面寸法が PC 鋼材破断時の付着特性に及ぼす影響の実験的評価，令和 5 年，中部大学卒業論文，2024.3
- 4) 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

PC 桁の断面寸法が PC 鋼材破断時に付着特性に及ぼす影響の実験的評価

EC20078 村上 順彦

1 研究の背景と目的

近年、既設構造物の長寿命化が求められている。我が国において高度経済成長期から多数建設されてきた社会基盤の老朽化に伴い、これらの維持管理と更新が大きな課題となっている。様々な環境や自然災害による外力作用を考慮し、コンクリート構造物の将来の機能低下や構造性能変化を精度良く評価する耐久性力学的な技術の開発が求められている。損傷を伴う PC 橋は詳細検査とともに性能評価を実施し、供用に耐えられない場合には交通規制等の荷重制限や、外ケーブルなどを用いた耐力補強、モニタリングによる経過観察などの処置が必要となる。以上の背景から、これらの PC 鋼材の腐食や破断を伴う劣化した PC 橋に対する体系的で精度の高い性能評価手法の構築は、国内の PC 橋を合理的に維持管理更新していく上で必要不可欠であると考えられる。

そこで、本研究では、PC 鋼材破断が残存プレストレスや耐荷性能に及ぼす影響が評価可能な解析技術の構築を主眼として、PC 鋼材破断時の残存プレストレス分布を実験的に評価することや、PC 桁の断面寸法が PC 鋼材とグラウトの付着特性にどのような影響を及ぼすのかに着目し、これを実験により明らかにすることを目的とした。具体的には試験体の断面寸法を変化させた PC 鋼材の切断実験を実施し、コンクリートおよび鋼材のひずみに変化を計測することで、コンクリートの断面寸法が付着特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2 試験概要

2.1 試験体概要と実験要因

図-1 に、本研究で使用した試験体概要を示す。幅 180mm、高さ 200mm の長方形断面と幅 150mm、高さ 200mm の長方形断面、幅 120mm、高さ 200mm の長方形断面の 3 種類作製し、有効高さ 100mm の位置に PC 鋼材を配置した。PC 鋼材のひずみを計測するために、PC 鋼材には  $\Phi 9.2\text{mm}$  の B 種 1 号の SRPR930/1080 (実測降伏強度  $1100\text{N}/\text{mm}^2$ ) を使用した。また、ひずみゲージのリード線を通すために、シース管には PC 鋼材に対して太径の外径  $25.5\text{mm}$  の鋼製シース管を使用した。シース管を型枠に固定

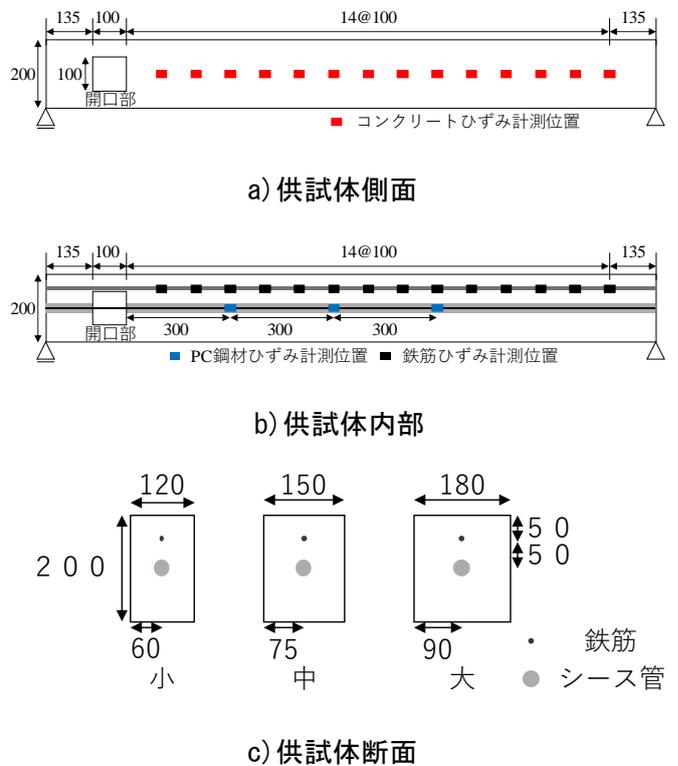


図-1 PC はり部材の寸法とひずみゲージ貼付位置

表-1 コンクリート配合

W/C	s/a	空気量	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	AE
(%)	(%)	(%)					
55	44.3	7	196.9	420	706.2	888.8	2.1
密度			1	3.15	2.6	2.65	

するために、型枠両脇に厚さ 15mm の固定材を配置した。このため試験体全長は、1770mm である。コンクリート内のひずみを計測するために、有効高さ 50mm に位置に D10 の鉄筋を配置した。また試験体には、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る。ひずみを計測するために、図に示す位置に鉄筋に 14 枚、PC 鋼材に 3 枚、供試体の側面に 14 枚ひずみゲージを張り付けた。使用したコンクリートの配合を表-1 に示した。緊張力はコンクリートの応力レベルに合わせて断面が大きい供試体から順に 4200 $\mu$ 、3500 $\mu$ 、2800 $\mu$  程度になるように導入した。

### 3 実験結果

#### 3.1 コンクリートの圧縮強度と PC 鋼材の緊張力

表-2 に各試験体の圧縮強度と緊張力を示す。圧縮強度は試験体と同一のコンクリートで作製したテストピースの圧縮試験から得られた数値である。

#### 3.2 PC 鋼材の分布

図-2 に各供試体の切断後の PC 鋼材のひずみ減少量分布を示す。なお、ひずみ値は切断前を 0 とし他の数値から切断前を減算した数値を使用している。図-3 には PC 鋼材のプレストレス残存割合分布を示す。PC 鋼材切断に伴う残存プレストレス割合(r)を、切断時の部材軸方向のコンクリートひずみを計測することで、次式により求める。

$$r = (\epsilon_{pin} - \epsilon_{pde}) / \epsilon_{pin} \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $\epsilon_{pin}$  と  $\epsilon_{pde}$  は、それぞれ切断前のひずみ量および切断によるひずみ変化量である。図-2 から各供試体の PC 鋼材のひずみの増加量は切断箇所から徐々に変化が小さくなっていることが分かる。また中の PC 鋼材の増加量が 大2 に比べ大きくなっていることが読み取れるが、図-3 よりプレストレス残存割合から中の PC 鋼材の緊張力一番抜けていることが読み取れるため中が大2の PC 鋼材より大きな変化をしたと考えられる。

#### 3.3 PC 鋼材の付着応力度

表-3 に PC 鋼材の付着応力を示す。付着応力は図-2 の PC 鋼材のひずみ減少量の分布図から近似曲線を求め近似曲線の傾き  $d\epsilon/dx$  から次式で求める。

$$\tau = \frac{-AE}{\pi D} \frac{d\epsilon}{dx} \dots \dots \dots (2)$$

ここでの  $\tau$  は付着応力、A は PC 鋼材の断面積、E はヤング係数、D は鋼材直径である。

表-3 から断面が大きくなるにつれて付着応力が小さくなる傾向があることが分かった。図-3 のプレ

表-2 緊張力と圧縮強度

	切断箇所から 350mm	切断箇所から 650mm	切断箇所から 950mm	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
大1	4163 $\mu$	4246 $\mu$	4261 $\mu$	32.79
大2	4217 $\mu$	4186 $\mu$	4123 $\mu$	39.14
小1	2884 $\mu$	2904 $\mu$	2868 $\mu$	32.79
小2	2948 $\mu$	2833 $\mu$	2986 $\mu$	39.14
中	3616 $\mu$	3647 $\mu$	3676 $\mu$	36.58

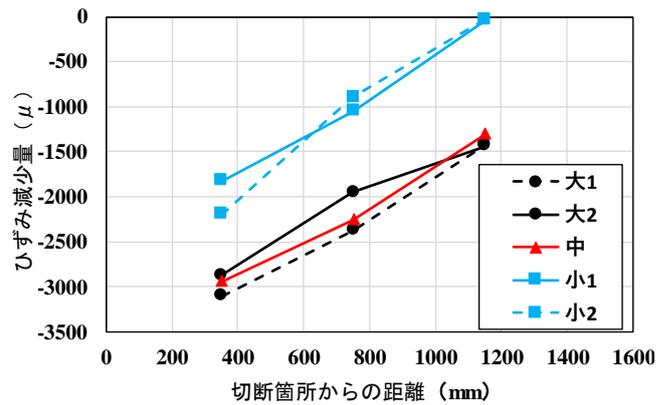


図-2 PC 鋼材ひずみの減少分布

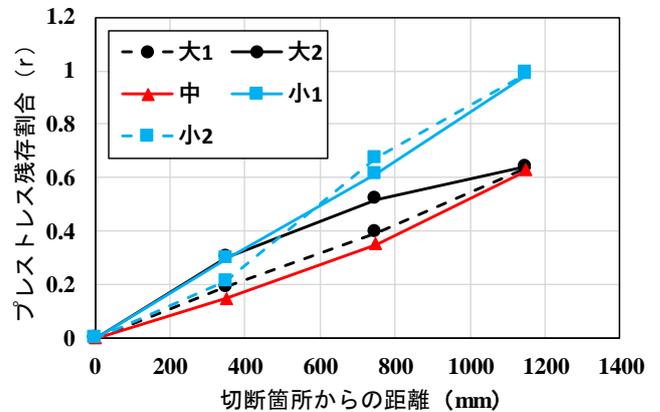


図-3 PC 鋼材プレストレス残存割合分布

トレス残存割合と見比べると、緊張力の抜け方が大きいと付着応力の値が小さくなると考えられる。大1が中より付着応力が大きくなっているのは中の緊張力の抜け方が大1より大きくなっているためだと考えられる。

### 3.4 供試体内部ひずみとコンクリート側面ひずみ

図-4 に各供試体のコンクリート内部と側面のひずみ増加量分布を示す。なお、ひずみ値は切断前を0とし他の数値から切断前を減算した数値を使用している。また図-5 にコンクリート内部とコンクリート側面のプレストレス残存割合分布を示す。図-4 から各供試体のひずみ分布は、コンクリート内部と側面のひずみの挙動は類似している。また図-4 と表-4、表-5 に示したひずみ変化領域とプレストレス減少領域から各供試体、内部と側面でひずみの変化量が0に近くなる箇所と緊張力が抜けなくなる箇所も供試体ごとにほぼ一致している。表-4 の値は図-4、図-5 から読み取り、読み取れない場合、近似値を用いて代用した数値を示しているため多少の誤差が出ている。ひずみの増加量を見てみると中が一番大きく変化しているが図-3 より中の緊張力が一番抜けていることが分かっているためその影響が出ていると考える。図-5 の供試体の側面と内部のプレストレス残存割合からも中の緊張力の抜け方が大きいことが分かる。図-4 と図-5 から、プレストレスがほとんど抜けなかった場所とひずみの変化量

表-3 PC 鋼材の付着応力

	付着応力(N/mm <sup>2</sup> )
大1	1.751797286
大2	1.165987261
小1	2.261564664
小2	3.233220714

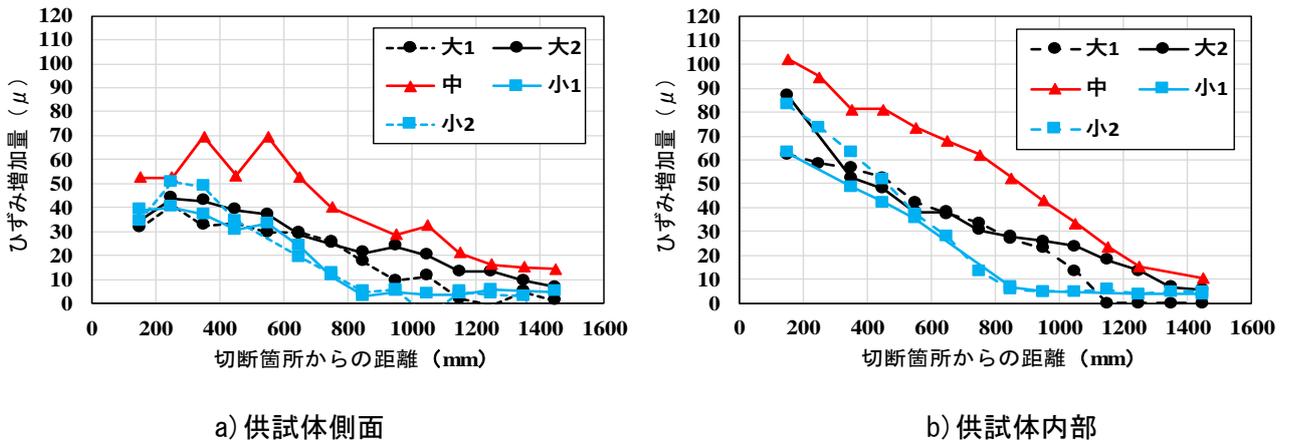


図-4 ひずみの増減分布

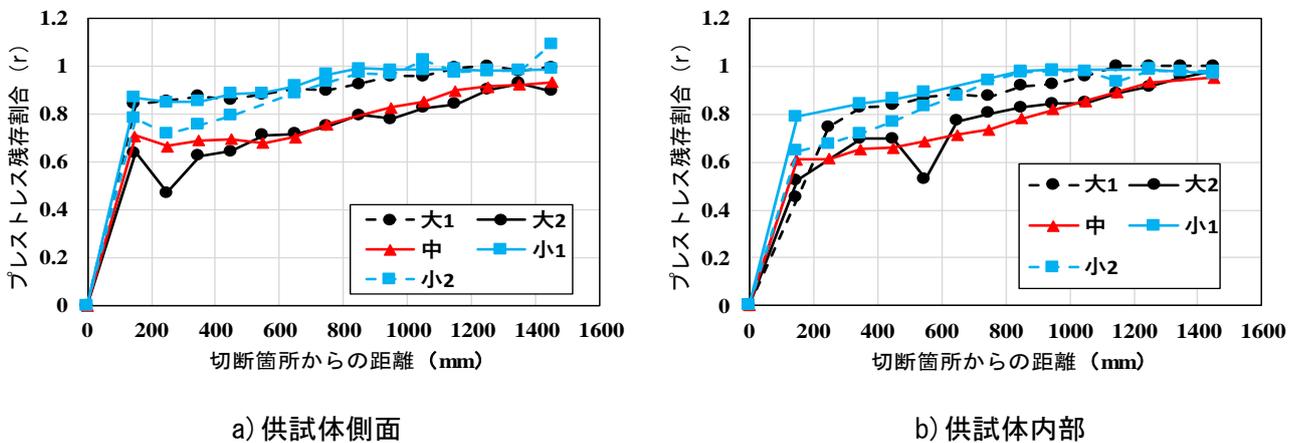


図-5 プレストレス残存割合分布

表-4 ひずみ変化領域

	供試体側面	供試体内部	PC鋼材
大1	1150mm	1150mm	1814.9mm
大2	1662.8mm	1599mm	1914.7mm
中	1705.5mm	1607.2mm	1787.8mm
小1	850mm	850mm	1168.0mm
小2	850mm	850mm	1160.2mm

表-5 プレストレス減少領域

	供試体側面	供試体内部	PC鋼材
大1	1150mm	1073mm	1847.3mm
大2	1591.mm	1558.1mm	1915.3 mm
中	1576.mm	1575.1mm	1788mm
小1	902.3mm	940.4mm	1114.3mm
小2	950.4mm	900.0mm	1125.1mm

が0に近くなる場所がほぼ一致していることが分かる。これらの結果よりコンクリートの応力レベルを合わせて行った場合、コンクリートの断面が大きい方がひずみの増加量が大きくなり、変化しなくなる位置も切断箇所から遠くなることが確認できた。

#### 4 結論

本研究では、PC桁の断面寸法がPC鋼材破断時に付着特性に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的として、はり供試体の断面積を変化させた試験体を作製し、PC鋼材破断試験を行い、ひずみの変化の計測を行った。本研究で得られた成果を示す。

- (1)PC鋼材は断面寸法が大きいとひずみの減少量が大きくなりプレストレスが大きく抜けるしかし中の供試体はPC鋼材の緊張力が破断時に他の供試体よりも抜けたため、大の供試体と同じようなひずみの変化をしたと考えられる。そのため中の供試体の実験をもう一度実施する必要があると考えられる。
- (2) コンクリートのひずみ変化領域は内部と側面で同じである
- (3) 断面寸法によってひずみの最大変化量はあまり変化しない。
- (4) 断面寸法が大きいほどプレストレスは破断位置から遠くの位置まで抜ける。
- (5) 断面が大きいほど付着応力が小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 大津 宏康：地盤工学分野における維持管理とアセットマネジメントの取り組み(<特集>土構造物,基礎構造物の維持管理), 地盤工学会誌,59 巻 9 号, pp.1-5, 2011.
- 2) 予防保全型維持管理の導入に向けてーアセットマネジメントと点検・検査技術の将来展望ー, 土木学会誌 Vol.95, No.12, 2010.12