

令和 7 年 6 月 12 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K04292

研究課題名（和文）既設プレストレストコンクリート構造物の性能予測技術の開発

研究課題名（英文）Development of performance prediction method for existing prestressed concrete structures

研究代表者

伊藤 睦（ITO, Atsushi）

中部大学・工学部・教授

研究者番号：00345927

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：実験と数値解析により、PC鋼材が破断したプレストレストコンクリート部材の耐荷性能を予測できる解析技術の構築を目的とした。

緊張力を導入したPC鋼材とグラウト間の付着試験と数値解析的検討により、PC鋼材の付着挙動は、破断後や外力作用後の鋼材ひずみの変化量に依存して異なることを明らかとした。改良した数値解析技術により、既往のPC鋼材破断実験の残存プレストレス分布を精度よく予測可能とし、破断部位の付着応力-すべり関係は、グラウト強度の2/3乗を強度とするバイリニア型の包絡線になることを明らかとした。構築した解析技術はPC鋼材を破断させた部材の曲げ耐荷性能を妥当な精度で予測できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

点検で得られた腐食状況やひび割れ性状を解析モデルに反映させ、解析的にその損傷下の応力状態を評価したのちに構造性能を評価できる解析プラットフォームを1/0部分も含めて開発する。この解析技術の開発により、点検結果をダイレクトに反映させて劣化を深度化させることで、劣化した既設構造物に対して適切な時期に効果的な対策を施す検討などに広く利用されると期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a numerical analysis method capable of predicting the load-carrying capacity of prestressed concrete members with fractured prestressing tendons, based on experimental and numerical investigations.

Bond tests between tensioned PC tendons and grout, along with numerical analyses, revealed that the bond behavior after tendon fracture varies depending on the magnitude of tendon strain change following fracture or external loading. The improved numerical model enabled accurate prediction of the residual prestress distribution observed in previous fracture experiments. It was also clarified that the bond stress-slip relationship at the fracture location can be represented by a bilinear envelope, whose strength is proportional to the two-thirds power of the grout compressive strength. Furthermore, it was confirmed that the proposed analysis method can reasonably predict the flexural load-carrying capacity of PC members with fractured tendons.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：鋼材破断 残存プレストレス分布 数値解析 性能予測

1. 研究開始当初の背景

橋梁上部構造の劣化進展が深刻化するケースが増えており、劣化した既設橋梁に対する破壊安全性の定量的評価が求められている。既往の研究では現地載荷試験などが実施されているものの、多くは使用限界の評価に留まっており、最大耐力の評価は困難である。このため、既設コンクリート構造物の性能の経時変化を合理的に予測できる解析技術の構築が必要不可欠である。この技術の開発により、劣化が生じた構造物に対して、適切な時期に効果的な対策の検討・実施が可能となる。

プレストレストコンクリート (PC) 構造の性能の経時変化は、PC 鋼材の腐食による断面の欠損・破断や付着力の低下によるところが大きい。このため、既往の研究では、腐食量を変数とした PC 鋼材とグラウト間の付着試験や、電食により PC 鋼材を腐食させた PC 部材の載荷実験が実施され、前者では質量減少量の違いが付着特性に及ぼす影響が明らかにされつつあり、後者では鋼材の断面積減少と付着劣化により曲げ耐力が低下することが定性的に評価されている。これらの研究で得られた知見は貴重である一方で、数値解析による既設構造物の耐荷・変形性能評価の出発点となる荷重載荷前の損傷状態や応力状態について、特に応力状態に関する検討はほとんど実施されていない。RC 部材内の鉄筋と異なり、PC 部材内の PC 鋼材には大きな引張応力が導入されているので、例えば、PC 鋼材の断面積が複数個所で徐々に減少する過程で、鋼材のひずみはどのように変化するのか、また、島らは鉄筋とコンクリート間の付着に鉄筋ひずみが影響することを指摘しているため、導入緊張力の違いが、断面積減少時の付着挙動にどのように影響するのかなどである。この応力状態の適切な評価により、既往の実験で鋼材腐食のバラツキで説明された耐荷挙動も、適切に説明できると期待される。また申請者は、新たな解析技術による既往の実験の解析で、PC 鋼材が破断した場合、破断位置や載荷位置に応じて、設計で想定される耐荷機構が成立しない恐れがあることを示しているが、解析結果の妥当性を検証するための実験データが存在しないため、確証を得るに至っていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、以下を明らかとすることを目的とした。

【目的 1】 PC 鋼材破断時の鋼材およびコンクリートのひずみ変化から、PC 鋼材の緊張力やグラウト強度が PC 鋼材とグラウト間の付着特性に及ぼす影響を解明。

【目的 2】 緊張力を導入した PC 鋼材の両引き試験による提案する付着モデルの妥当性の確認。

【目的 3】 解析技術の高度化と PC 鋼材が破断した PC 構造の性能評価技術への拡張。

3. 研究の方法

目的 1 では、前田らの PC 鋼材切断実験<sup>1)</sup>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、PC 鋼材に SWPR7BL 7 本より 12.7mm を使用した実験を対象とした。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。

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

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

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節点と 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節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  $\alpha$  を乗じた。なお、強度パラメータ  $\alpha$  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。

$$\tau = \alpha \times 0.73 f_g' (\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \epsilon \times 10^5) \quad s = 1000S/D \quad (2)$$

ここで、 $f_g'$ : グラウト強度、 $\epsilon$ : PC 鋼材ひずみとし、 $\epsilon$  はグラウト後の切断に伴う PC 鋼材ひずみ

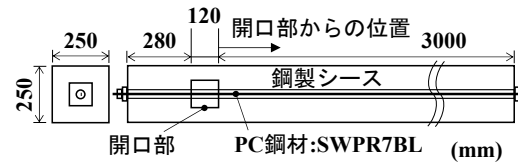


図-1 供試体諸元<sup>1)</sup>

表-1 材料特性値<sup>1)</sup>

供試体	各種強度 (MPa)	グラウト強度 $f_g'$ (MPa)	有効プレストロ力 (kN)
1-2	$f_c'$ :53.6	30.3	107.6
1-3		48.8	113.5
1-4	$f_{py}$ :1824	67.0	105.7

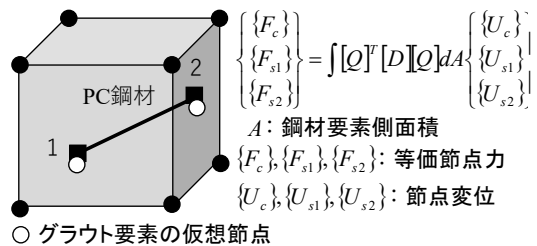


図-2 付着剛性方程式の定式化

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のちに 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、切断する PC 鋼材要素の断面積をゼロとすることで表現した。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。

目的 2 では、図-3 に示す試験体を用いて、表-2 に示すケースの両引き試験を実施した。使用した PC 鋼材は長さ 2000mm、 $\phi 9.2$ 、降伏強度 1275MPa、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。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、試験で得られたひずみ変化から付着応力-すべり関係を評価するとともに、式(2)を用いたそれとを比較することで、マッシブなコンクリート内の異形鉄筋に対して提案された式(2)が、緊張力を有する PC 鋼材にも適用できるかを検討した。

目的 3 では、渡辺らの実験<sup>3)</sup>を対象とした数値解析的検討を実施した。ここでは、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 3) 内の鋼材切断後の状況画像を参考に、図-4 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-4 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。

#### 4. 研究成果

目的 1 の成果として、図-5 から図-7 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-5 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  $\alpha$  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-6 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り合うとして、図-6 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-8 中の矢印区間の平均付着応力と比して 1 割程度の差異で一致した。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問題ないと考えられる。

図-9 と図-10 に、グラウト強度と緊張力を変数として、図-8 中の平均付着応力度と図-5 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。図より、平均付着応力度は緊張力によらず、グラウト強度の 2/3 乗に比例し、減少範囲は緊張力に依存した。

目的 2 の成果として、図-11 に式(2)に定数を乗じた算定値と実験結果の比較を示す。図より、実験結果および式(2)で評価される付着応力-すべり関係は概ね一致していることが確認できる。

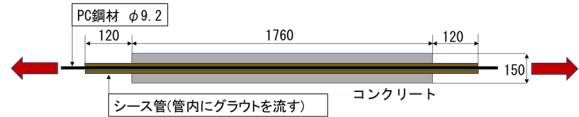


図-3 試験体概要

表-2 各試験体データ

	大きさ(mm)	ひずみ( $\mu$ )	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

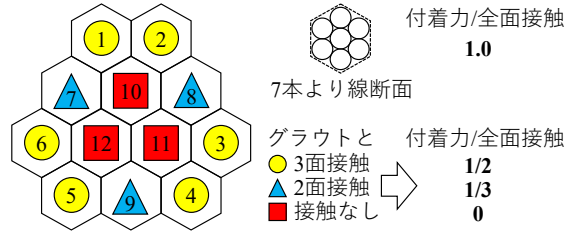


図-4 鋼材配置と付着特性の仮定

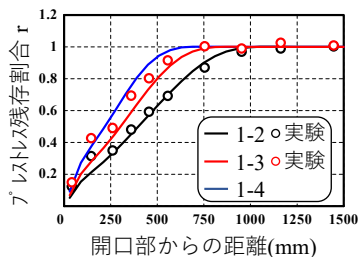


図-5 プレストレス残存割合分布

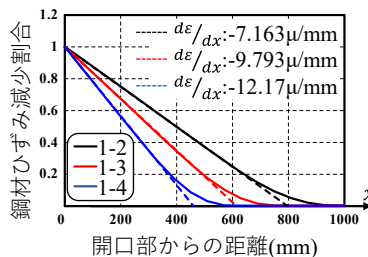


図-6 鋼材ひずみ分布

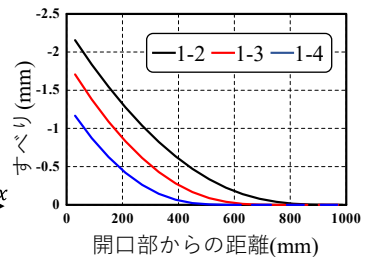


図-7 すべり分布

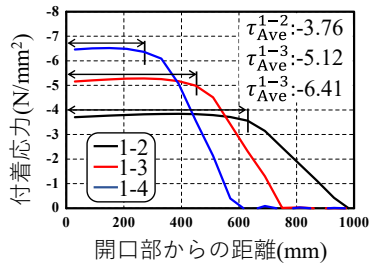


図-8 付着応力分布

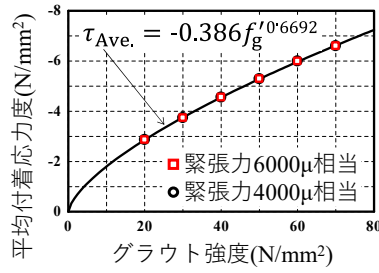


図-9 プレストレス減少区間の付着応力度ーグラウト強度関係

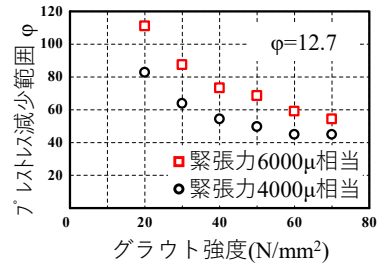


図-10 プレストレス減少範囲

このことから、異形鉄筋の付着応力ーすべり関係として提案されている式(2)は、緊張力を有するPC鋼材に対しても使用可能であると考えられる。また、式(2)の適用に当たって、式(2)中の  $\epsilon$  は、グラウト硬化後のひずみ変化量とすればよい。

目的3の成果として、図-12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分布を示す。解析では、より線1本を切断するごとに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。Case1ではアンボンドと仮定したより線を切断した結果、全スパンでプレストレスが減少したため、図-4のような鋼材配置の場合であっても、束の中心にある鋼材にも付着もしくは摩擦の考慮が必要である。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より一致を示した。図-13に示すCase1とCase3の荷重ー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-14に示すNo.2-3の最大荷重時のPC鋼材ひずみ分布から、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。

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, No.2, pp.529-534, 2010.
- 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ーすべりーひずみ関係, 土木学会論文集, Vol.378/V-6, pp.165-174, 1987.
- 3) 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.

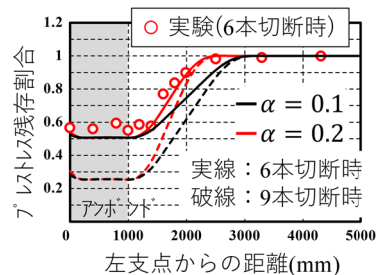
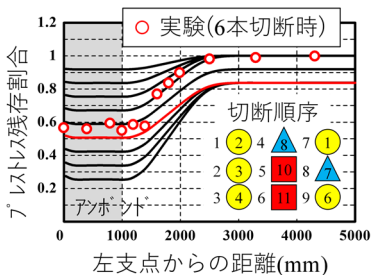


図-12 プレストレス残存割合分布(左:Case1, 右:Case2, 3)

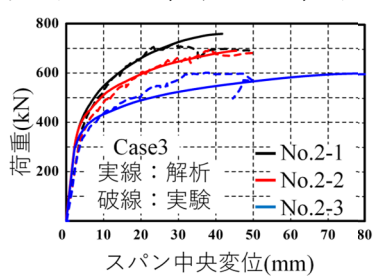
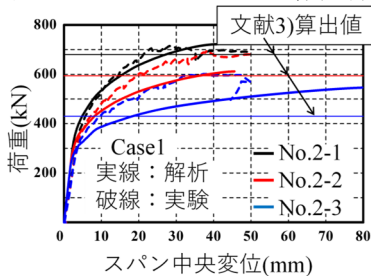


図-13 荷重ー変位関係の比較(左:Case1, 右:Case3)

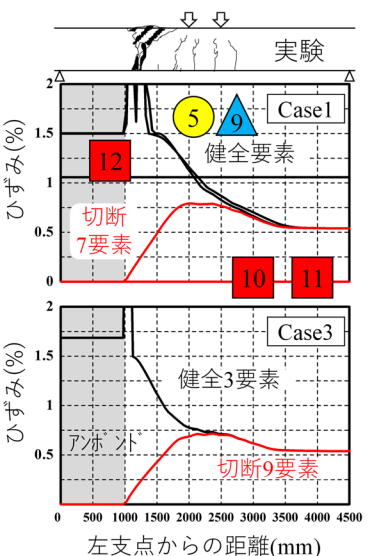


図-14 荷重最大時の鋼材ひずみ分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 遠藤 滉大, 小島 悠生, 伊藤 睦
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島 悠生, 遠藤 滉大, 伊藤 睦
2. 発表標題 PC鋼より線束の付着が鋼材破断したPC桁の残存プレストレスと耐荷挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------