

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04029

研究課題名(和文)プレストレストコンクリート橋の維持管理・長寿命化に関する研究

研究課題名(英文)Maintenance and Long Life Sustainability of Prestressed Concrete Bridges

研究代表者

睦好 宏史(MUTSUYOSHI, Hiroshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60134334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：腐食によりPC鋼材が断面欠損あるいは破断したPC部材の力学的性状を実験及び解析的に明らかにするために、PC鋼材を人為的に切断あるいは腐食により断面欠損させたPC梁部材を製作して載荷実験を行った。その結果、グラウトが完全に充填されている場合は、PC鋼材が腐食により欠損した場合においてもある大きさの断面耐力を維持することが明らかとなった。また、グラウトの再注入は耐荷力を回復させる効果があることが明らかとなった。また、上記の実験条件をモデル化して、解析的にシミュレーションできる手法を開発し、その適用性と精度を明らかにした。さらに、実PC橋についてPC鋼材が破断した場合の安全性について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the flexural behavior of prestressed concrete (PC) beams having damaged tendons. The tendons of the PC beams were intentionally broken by a core drilling machine or accelerated corrosion process. The loading tests were carried out to investigate the influence of location and degree of damage of the tendons on the load carrying capacity of the PC beams. A nonlinear pushover analysis was also performed using fiber model and the analytical results were verified by the experimental results. From the analysis it was found that the load carrying capacity of the PC beams having damaged tendons can be estimated with good accuracy. Furthermore, the fiber model was applied for actual PC box bridges assuming the degree of corrosion damage of the PC tendons and the location of the corrosion. The analytical results were used to estimate the safety of the PC box bridges when the tendons are heavily corroded.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：プレストレストコンクリート 腐食 グラウト PC鋼材破断

### 1. 研究開始当初の背景

近年、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・更新が大きな課題となっている。プレストレストコンクリート（PC）橋の代表的な損傷の1つに塩害があり、ポストテンション方式の場合には施工時のグラウト充填不良や桁端部からシース内へ塩分を含む水の進入によるPC鋼材の腐食や破断といった事例が報告されている。このような損傷を伴うPC橋に対する体系的で精度の高い性能評価手法を構築することは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。

これまでの実験的研究の多くはPCはり供試体のスパン中央で損傷を与えて評価を行っており、損傷箇所の相違がPC梁全体の耐荷性能に与える影響あるいはグラウトの存在が耐荷性状に及ぼす影響についてはほとんど明らかにされていない。また、解析的な耐荷力評価手法についてはPC鋼より線の損傷のばらつきや付着劣化あるいはグラウトの存在を考慮した解析手法はほとんど明らかにされていない。

### 2. 研究の目的

本研究の主な目的は、1) PC鋼材を人為的に切断あるいは腐食により損傷させたPC梁を用いて載荷実験を行い、PC鋼材の破断量や破断位置、グラウトの存在がPC梁の耐荷性能に与える影響を明らかにする、2) PC鋼材の腐食損傷を考慮した解析的な耐荷力評価手法を明らかにする、3) PC鋼材の腐食損傷が生じた実PC橋梁を対象にケーススタディを行い、PC鋼材の損傷量等が橋の耐荷性状に及ぼす影響を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

(1) PC鋼材を人為的に切断したPC梁の載荷実験

#### ①実験概要

実験供試体の断面図を図-1に示す。使用したPC鋼材はSWPD1L 7mmで、鋼製シース（φ

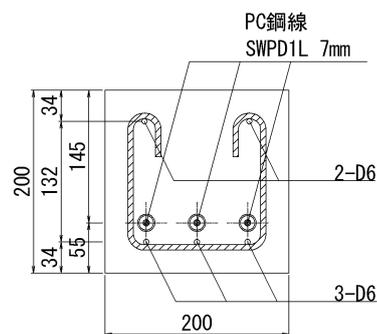
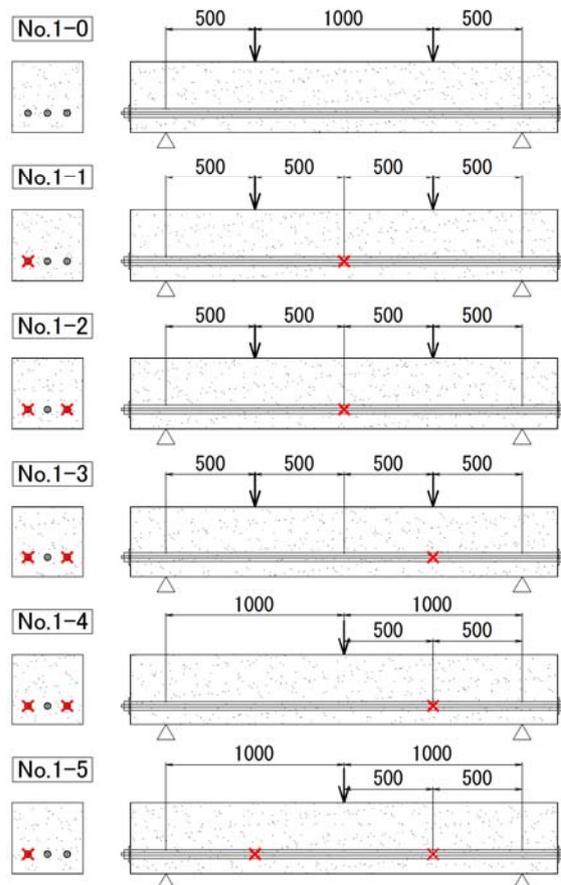


図-1 供試体 断面図



注：×は切断位置を示す。

図-2 PC鋼材の切断位置と載荷方法

18) 内に配置して緊張後にグラウトを充填したポストテンション方式PC梁である。梁下縁には引張鉄筋としてSD345 (D6) を3本配置している。各供試体におけるPC鋼材の切断位置と載荷方法を図-2に示す。図中の×印がPC鋼材を切断した箇所であり、梁側面からφ15mmのコンクリートコアドリルを用いて削孔し、PC鋼材を完全に切断した。供試体No. 1-0は損傷を与えない健全な梁とし、No. 1-1からNo. 1-5までの5体については、PC鋼材の切断本数と箇所および載荷方法(2点載荷

と1点荷重)が図-2に示されている。

## ② 荷重実験結果

各供試体の荷重実験結果について、荷重から換算した支間中央の曲げモーメント～鉛直変位関係を図-3に、支間中央の最大モーメント(実験値)とPC鋼材破断面における破壊抵抗曲げモーメントの比較を図-4に示す。また、No.1-2およびNo.1-4を例としたPC鋼材の破断を伴う梁の耐荷性能についての概念図を図-5に示す。図-4より、最大モーメントに着目すると、No.1-1は鋼材を1本切断した影響でNo.1-0の約71%、No.1-2およびNo.1-3は鋼材を2本切断した影響でNo.1-0の約50%程度に低下しており、この結果は、断面計算における抵抗モーメントの減少率とほぼ一致している。一方、No.1-4およびNo.1-5の最大モーメントはNo.1-0の約90%程度となっており、断面計算における抵抗モーメントよりも大きな値を示した。これは、図-5に示すように、1点荷重では、破断箇所が作用モーメントの最大を示す支間中央から離れて支点寄りであるため、破断箇所における抵抗モーメントが作用モーメントよりも大きくなったからである。すなわち、PC鋼材が破断したとしても、破断位置から付着長離れた箇所では引張鋼材として全断面有効に働くため計算通りの抵抗モーメントが期待できるのである。

## (2) グラウト未充填および再注入の影響

### ① 実験概要

No.1-0と同様のポストテンションPC梁供試体に対して部分的にグラウト未充填区間を設けてPC鋼材を切断した場合(No.1-6)と、さらにPC鋼材切断後にグラウト再注入を実施した場合(No.1-7)について荷重実験を行い、グラウト未充填の影響とグラウト再注入の効果について明らかにした(図-6)。

### ② 荷重実験結果

各供試体の荷重実験結果について、荷重から求めた支間中央部の曲げモーメント～

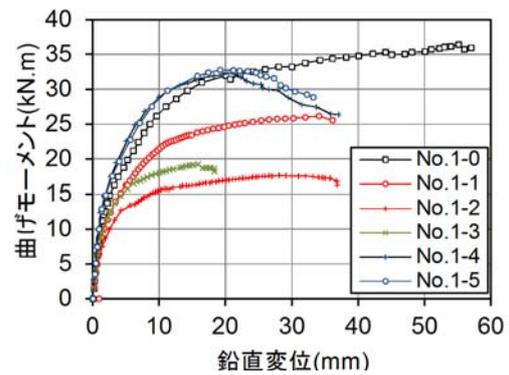
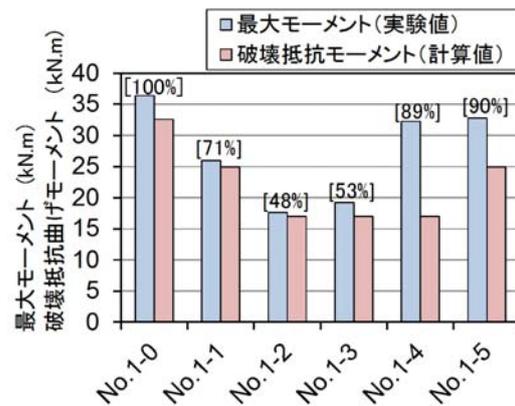


図-3 支間中央の曲げモーメント～鉛直変位



注：[ ] は、最大モーメントの比率を示す。

図-4 最大および破壊抵抗曲げモーメント

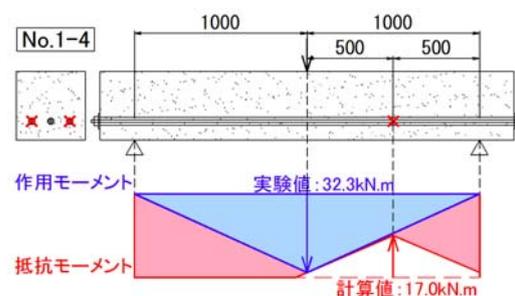
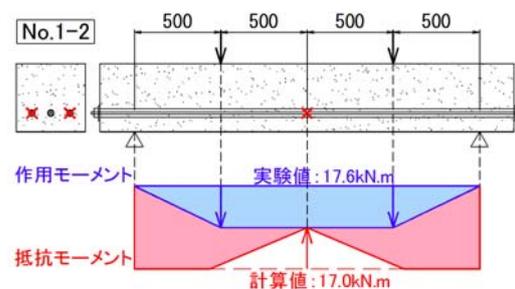


図-5 PC鋼材の破断を伴う梁の耐荷性能の概念

鉛直変位関係を図-7 に示す。No.1-6 の最大モーメントは No.1-0 の約 50%となり、2本切断した断面の破壊抵抗モーメントとほぼ一致する結果となった。これは、グラウト未充填区間でP C鋼材を切断したことで、その影響が支間中央の荷点まで及び、ここでは、断面中央に配置された1本のP C鋼材のみが抵抗しているからである。一方、No.1-7 の最大モーメントは No.1-0 の約 68%程度となっており、No.1-6 に対して 18%程度上昇した。これは、切断されたP C鋼材が再注入グラウトにより付着が確保され、引張抵抗材としてある程度の機能を果たしたためと考えられる。以上のように、グラウトが完全に充填されている場合は、たとえP C鋼材が破断したとしても付着長離れた位置では 100%抵抗モーメントが発揮される。また、グラウトが未充填である場合でも、再注入することによって、耐荷力がかなり回復することが明らかとなり、グラウトの重要性が再認識されたと言える。

### (3) Fiber モデルによる解析的検討

#### ①解析モデル

上記の実験結果を数値的に明らかにするために、Fiber モデルによる非線形解析を行った。本解析では破断したP C鋼材の付着特性の変化と負担する引張力を見かけ上、P C鋼材の断面積を変化させる事で評価した。

#### ②解析結果

支間中央の曲げモーメントー鉛直変位の関係について、No.1-0 を図-8、No.1-1、1-2、1-3 を図-9、No.1-4、1-5、1-6 を図-10 に示す。いずれの結果も、解析によって得られたモーメントは実験値よりも幾分小さい値を示しているが、比較的精度良く実験結果を表していると言える。

### (4) 実P C橋梁を対象とした構造解析による耐荷力評価

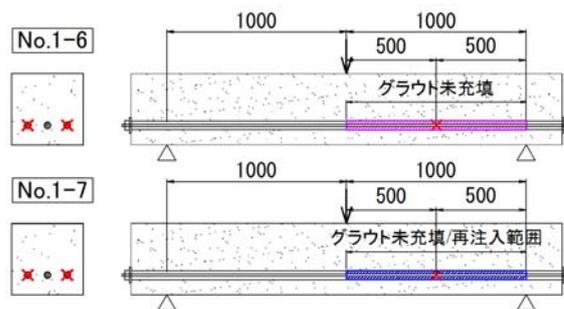


図-6 PC鋼材の切断位置と荷重方法およびグラウト状況

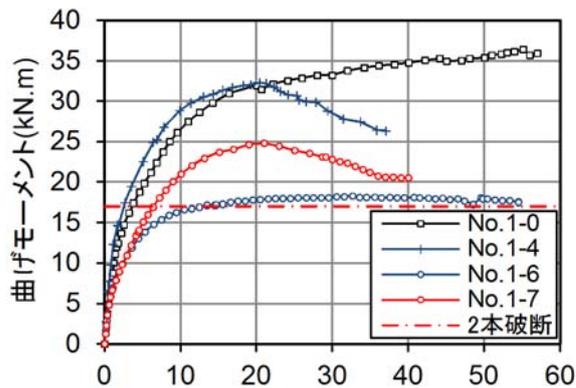


図-7 支間中央の曲げモーメント～鉛直変位

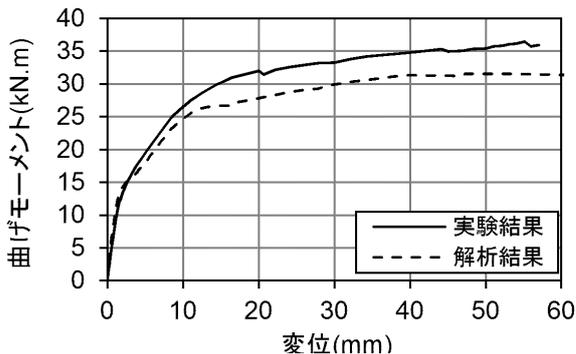


図-8 支間中央の曲げモーメント～鉛直変位

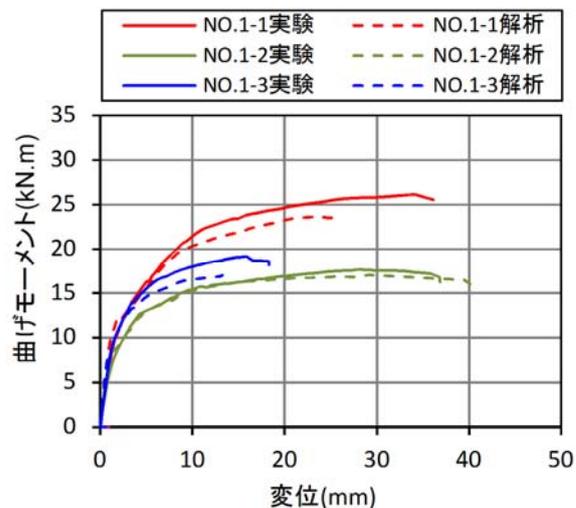


図-9 支間中央の曲げモーメント～鉛直変位

(No.1-1,1-2,1-3)

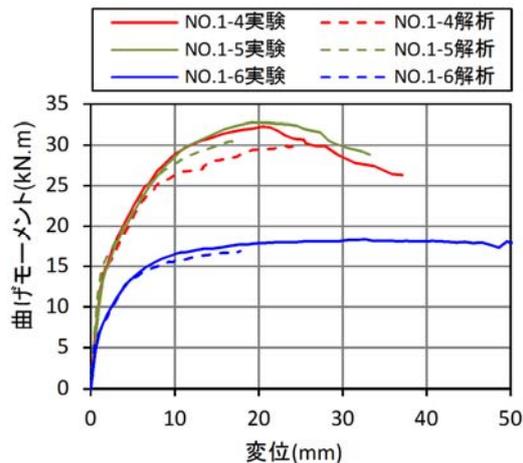


図-10 支間中央の曲げモーメント～鉛直変位  
(No.1-4,1-5,1-6)

本研究成果を利用して、損傷を想定した実PC橋梁の耐荷性状を解析により明らかにすることにした。その結果、損傷個所の違いやグラウト未充填の影響を考慮して耐荷性能を評価するとともに、PC鋼材のひずみに着目することで鋼材破断の発生に対する安全度を推定する事が出来た。

#### 4. 研究成果

本論文において得られた主な研究成果を以下に示す。

(1) グラウトが充填された状態においてPC鋼材に断面減少や破断などの局所的な損傷が生じた場合、損傷箇所から離れた健全な断面では損傷したPC鋼材の付着が確保されて引張抵抗材として有効し、破壊抵抗曲げモーメントが回復する。

(2) グラウト再注入を実施した実験では、破断したPC鋼材も再注入グラウトとの付着により引張抵抗材としてある程度機能し、梁の耐荷力を回復させる働きがある事を明らかにした。

(3) Fiberモデルによる実験の再現解析においては、破断や腐食による鋼材断面の減少と破断の影響範囲(付着長)をPC鋼材の断面積に換算してモデル化する事で、実験の再現解析として比較的精度の良い結果を得た。

(4) 実PC橋梁に対する解析では、損傷範囲の

違いによって主桁の曲げ破壊安全度が異なる事をFiberモデルで評価できるとともに、鋼材破断の発生に対する安全度を明らかにする事が出来た。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

①徳田裕美・睦好宏史・横田敏広：破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状に関する解析的検討，プレストレストコンクリート工学会 第26回シンポジウム論文集，pp. 365-370，2017

②横田敏広・Isuru Wijayawardane・睦好宏史：腐食劣化したPC鋼材を有するポステンPC梁の力学的性状，プレストレストコンクリート工学会 第26回シンポジウム論文集，pp. 371-374，2017

③真田修・睦好宏史・Luan Yao：イオン交換樹脂を混和したPCグラウトの実用的な配合について，プレストレストコンクリート工学会 第25回シンポジウム論文集，pp. 119-124，2016

④横田敏広・Isuru Wijayawardane・睦好宏史：破断したPC鋼材を有するPC梁の力学的性状，プレストレストコンクリート工学会 第25回シンポジウム論文集，pp. 567-572，2016

⑤横田敏広・睦好宏史・Isuru Wijayawardane：PC鋼材が破断したPC桁の力学的性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38, No. 2, pp. 487-492，2016

⑥Toshihiro Yokota, Hiroshi Mutsuyoshi and Isuru Wijayawardane：Influence of Ruptured PC Tendons on Mechanical Behavior of PC Girders, 11th International PhD Symposium in Civil Engineering, Tokyo, Japan, August, 2016

[学会発表] (計9件)

⑦Rikako Kawana, Luan Yao, Hiroshi Mutsuyoshi, Fang Jie and Kosuke Sato: An Experimental Study of Crack Repairing for Mortar Using Different Microorganisms, The 5th International Conference on Engineering, Energy and Environment, 2017

⑧Yumi Tokuta, Hiroshi Mutsuyoshi and Toshihiro Yokota: An Analytical Study on Flexural Behavior of PC Beams with Ruptured PC tendons: Influence of Ruptured PC Tendons

on Mechanical Behavior of PC Girders, The 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Energy and Environment, 2017

⑨本田美樹・睦好宏史・横田敏広：腐食等により断面欠損したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状に関する研究、土木学会第72回年次学術講演会講演概要集、v-327、pp. 653-654、2017

⑩徳田裕美・睦好宏史・横田敏広：破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状に関する解析的研究、土木学会第72回年次学術講演会講演概要集、v-326、pp. 651-652、2017

⑪川名梨香子・房捷・ルアンヤオ・睦好宏史：微生物を用いたコンクリートのひび割れ修復技術の開発、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、v-180、pp. 359-360、2016

⑫今村光希・睦好宏史・ルアンヤオ・真田修：イオン交換樹脂を混和したPCグラウトの開発、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、v-425、pp. 849-85

⑬塩野誠・徳田裕美・睦好宏史・横田敏広：破断したPC鋼材を有するPC梁の非破壊検査法に関する研究、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、v-485、pp. 969-970、2016

⑭徳田裕美・塩野誠・睦好宏史・横田敏広：破断したPC鋼材を有するPC梁の曲げ性状に関する研究、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、v-578、pp. 1155-1156、2016

⑮Nguyen Thi Loan・Hiroshi Mutsuyoshi・Yao Luan・Koki Imamura : A COMPARISON STUDY OF TWO ION-EXCHANGE RESIN MIXED GROUTES: CHLORIDE ABSORPTION, STRENGTH AND FRESH PROPERTIES, Proceedings of JSCE Annual Convention, JSCE CS2-048, pp.95-96

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

睦好 宏史 (MUTSUYOSHI, Hiroshi)  
埼玉大学・理工学研究科・教授  
研究者番号：60134334

### (2) 研究分担者

岩城 一郎 (IWAKI, Ichirou)  
日本大学・工学部・教授  
研究者番号：20282113

### 研究分担者

欒 堯 (Luan, Yao)  
埼玉大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：20725288

### 研究分担者

浅本 晋吾 (ASAMOTO, Shingo)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50436333

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

真田 修 (SANADA, Osamu)

青木 圭一 (AOKI, Keiichi)