

鋼材の腐食領域および付着がPC梁部材の構造性能に与える影響の解析的検討

名古屋工業大学

○村田 明弘

名古屋工業大学

正会員

博士(工学)

武田 健太

Abstract : In Japan, steel corrosion has been identified in many of the concrete structures constructed in 1960's and 1970's. When steel corrosion occurs in the PC structure, the range of reduction of pre-stress is determined by the corrosion area of prestressing bar. Moreover, even with the same prestressing bar, the amount of corrosion differs depending on the position. In this research, the influence of corrosion area and bonding condition of PC strand on structural performance of PC beam were confirmed with Finite Element (FE) analysis. As a result, it became clear that steel corrosion greatly affects the structural performance of PC beam. However, there were no difference in the clear reduction of load bearing capacity due to the corrosion area of PC strand. In addition, it was found that bonding condition of PC strand influence on loading bearing capacity of PC beam.

Key words : Steel corrosion, Bonding condition, Finite element analysis

1. はじめに

わが国では近年、高度経済成長期に建設された多くのコンクリート構造物の老朽化が進み、安全性や耐久性の問題が顕在化している。特に、コンクリート構造物内の鋼材腐食は、構造性能を大きく低下させる要因であるため、適切な調査に基づいた性能評価と対策が必要となる。加えて、老朽化したPC構造物の安全性評価を行う場合、内部鋼材の腐食の影響のみならず、腐食によって発生するプレストレスの低下や、付着劣化の影響を正確に考慮する必要がある。しかし、鋼材腐食の生じたコンクリート構造物の残存性能を定量的に評価する研究事例は、RC構造¹⁾と比較してPC構造²⁾は少ないのが現状であり、今後一層の知見の蓄積が求められる。そこで本研究では、劣化の生じた実PC橋における構造性能評価手法の確立を最終的な目標に据え、鋼材の腐食領域および付着状態をパラメータとして、これらがPC梁部材の構造性能に与える影響について有限要素解析により検証を行った。

2. 解析対象部材の概要

図-1に、本研究の解析対象部材における寸法および载荷条件を示す。本研究では、断面：100×150mm、支間長：2000mmのプレテンションPC梁を想定した。軸方向にφ2.9のPC3本より線を4本配置し、载荷条件に関しては等曲げ区間300mmの2点集中载荷とした。また、本研究では鋼材の腐食領域および付着状態がPC部材の構造性能に与える影響を検討するため、2つのシリーズに分けて解析的検討を行った。

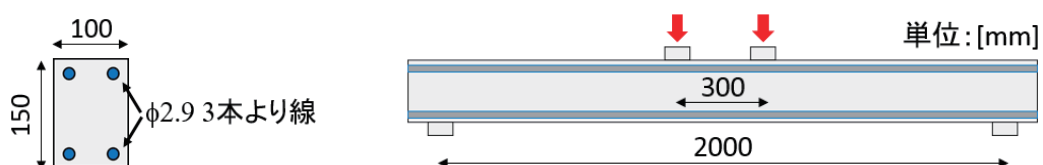


図-1 部材の寸法および载荷条件

表-1 解析ケース(シリーズ1)

ケース名		鋼材の質量減少率(%)	備考
case N	N-0	0	健全
case A	A-3	3	等曲げ区間のみ腐食 (全長の約15%)
	A-9	9	
	A-15	15	
case B	B-3	3	せん断スパン中央まで 腐食(全長の約50%)
	B-9	9	
	B-15	15	
case C	C-3	3	梁全長にわたり腐食
	C-9	9	
	C-15	15	

表-2 解析ケース(シリーズ2)

ケース名		鋼材の質量減少率(%)	備考
case N	N-0	0	付着あり
	N-0'	0	付着なし
case C	C-3	3	付着あり
	C-3'	3	付着なし
	C-9	9	付着あり
	C-9'	9	付着なし

2.1 シリーズ1 (鋼材の腐食領域の検討)

表-1に、シリーズ1における解析ケースと鋼材の腐食範囲を示す。腐食範囲は、等曲げ区間を腐食(case A)、せん断スパンの中央までを腐食(case B)、梁全長にわたり腐食(case C)の3ケースとした。各ケースで、鋼材の腐食領域がプレストレスの低下にもたらす影響に関して比較を行うため、鋼材の質量減少率と腐食範囲を変化させて解析を実施した。また、腐食については引張側に配置される鋼材2本を腐食対象とした。

2.2 シリーズ2 (鋼材の付着状態の検討)

表-2に、シリーズ2における解析ケースと鋼材の付着状態を示す。シリーズ2では、シリーズ1のcase N、C-3、C-9において、付着状態を変化させて解析を行った。コンクリートとPC鋼材の付着状態は、用いる鋼材要素を変化させることでその影響を考慮した。その詳細については次章にて述べる。腐食の条件に関しては、シリーズ1と同様に、引張側に配置される鋼材2本を腐食対象とした。

3. 解析方法および解析結果

3.1 解析方法

本研究における解析では、有限要素解析ソフトウェアのATENA 3D³⁾を使用した。メッシュには、1辺20mmの六面体を用いた。図-2に、解析におけるPC鋼材の配置例を示す。シリーズ1では離散鉄筋要素を用い、コンクリートとPC鋼材は完全付着とした。一方、シリーズ2では外ケーブル要素を用いた。外ケーブル要素は、その端部のみがコンクリート要素内の節点に結合され、他の箇所ではコンクリートの変形に追随しない特徴を有する。すなわち、コンクリートの変形が大きくなると、外ケーブル要素は上方へ移動することとなる。解析プログラムでは外ケーブル構造におけるデビエータ部を表現できるため、これを解析上でモデル化することで、外ケーブル要素をコンクリートの変形に追随させることとした。

コンクリートの応力-ひずみ関係(図-3参照)は、圧縮側の上昇曲線はCEB-FIP Model code 1990⁴⁾に準拠し、圧縮軟化は直線形状とした。定式化すると、式(1)~(3)のようになる。

$$\sigma'_c = f'_c \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x} \quad (1)$$

$$x = \varepsilon / \varepsilon_0, \quad k = E_0 / E_c \quad (2)$$

$$\varepsilon_d = \varepsilon_0 + \frac{w_d}{L} \quad (3)$$

ここに、 σ'_c は圧縮応力、 ε はひずみ、 f'_c は圧縮強度、 k は形状パラメータ (=2.0)、 x は正規化されたひずみ(式(2)参照)、 ε_0 は f'_c 時のひずみ(=2 f'_c/E_0)、 E_0 は初期弾性係数、 E_c は割線弾性係数(= f'_c/ε_0)、 ε_d は限界圧縮ひずみ(式(3)参照)、 w_d は限界圧縮変位、 L は要素長さ(20mm)である。一方、引張側

の軟化曲線には、Hordijkのモデル⁵⁾を採用し、指数関数とした。定式化すると、式(4)～(5)のようになる。

$$\sigma = f_t \left[\left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_u} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_u} \right) - \frac{w}{w_u} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \right] \quad (4)$$

$$w_u = 5.136 \frac{G_F}{f_t} \quad (5)$$

ここに、 f_t は引張強度、 w はひび割れ幅、 w_u は限界ひび割れ幅（式(5)参照）、 c_1, c_2 は係数（それぞれ3, 6.93）、 G_F は破壊エネルギーである。コンクリートの引張強度と破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書に準拠⁶⁾し、圧縮強度の関数とした。

PC鋼材の応力-ひずみ関係（図-4参照）には、式(6)に示す陸らが提案したPC鋼材の機械的性質と質量減少率の関係⁷⁾を用いた。式(6)は、コンクリート中で腐食させたφ2.9のPC3本より線を、コンクリート中より取り出して行った引張試験結果の回帰式である。

$$R_{pu} = e^{-6.467C}, R_{EA} = e^{-1.247C}, R_{py} = e^{-5.968C}, R_{es} = e^{-12.57C} \quad (6)$$

ここに、 R_{pu} は引張強度の残存率、 R_{EA} は弾性係数の残存率、 R_{py} は降伏強度の残存率、 R_{es} は破断伸びの残存率、 C は質量減少率である。解析上、PC鋼材の断面積は、健全時のものを用い、腐食の影響は、機械的性質の低下のみで考慮した。なお、式(6)が質量減少率と直線関係にないのは、腐食の不均一性を表しているためである。

健全時のPC鋼材のプレストレスは、φ2.9のPC3本より線を用いた場合における使用状態の許容値⁸⁾である1170N/mm²と仮定した。解析上、鋼材要素にプレストレスを導入する方法には、要素端部にプレストレス力を与える方法と、要素に直接ひずみを導入する方法があるが、本解析では後者の方法を選択し、鋼材要素に初期ひずみを約6000μ与えることによりプレストレスを導入した。なお、PC鋼材に与えるひずみは、各ケースすべて同一量とすることで、腐食による弾性係数の低下に伴うプレストレスのロスを考慮した。

3.2 解析結果

(1) シリーズ1

プレストレス導入直後の軸方向応力分布図の比較を図-5に示す。図の応力は、引張を正、圧縮を負として示している。載荷点付近に応力の変化が見られるが、本解析では解析上の煩雑さを回避するため、載荷板を設置した状態でプレストレスを導入し

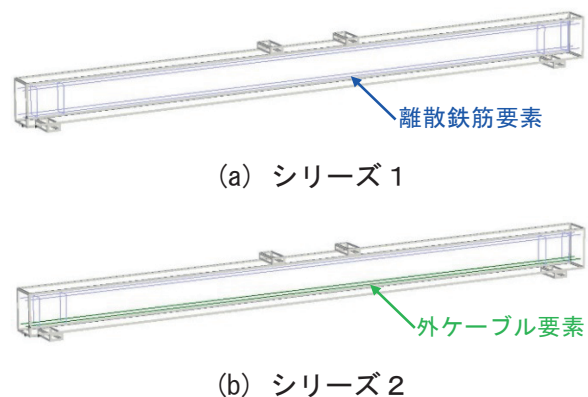


図-2 解析における PC 鋼材の配置図

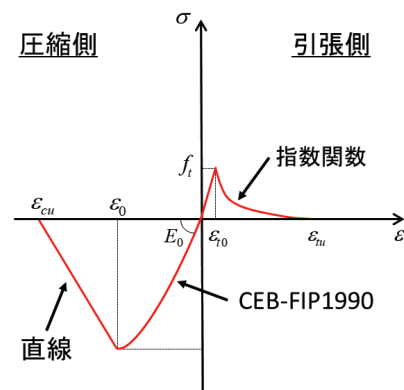


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

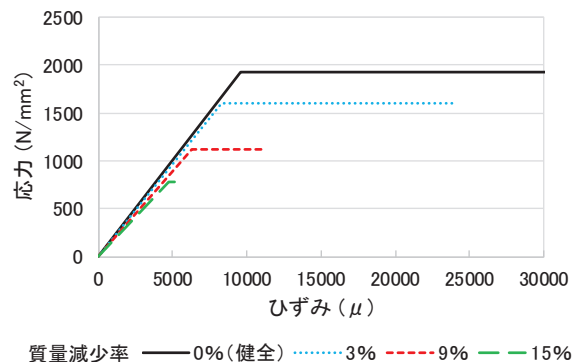


図-4 PC 鋼材の応力-ひずみ関係

ており、この載荷板が部材を拘束していることが原因と考えられる。健全時における部材下縁のコンクリートのプレストレスの計算値は約 6.2N/mm^2 であり、解析においても概ね表現できている。N-0と腐食考慮の解析ケース(A-9,B-9,C-9)をそれぞれ比較すると、部材の引張側においてプレストレスが低下していることが分かる。また、腐食領域の拡大に伴い、プレストレスが低下する範囲も拡大していることが確認できる。これより、鋼材腐食によるプレストレスの低下は、解析により再現できていると考えられる。

最大荷重時の最大主ひずみ分布・ひび割れ図の比較を図-6に示す。ひび割れの進展状況に着目すると、それぞれの解析ケースにおいて、質量減少率が3%までは部材上縁にひび割れが到達し、部材上縁のコンクリートの圧縮破壊を呈した。一方、質量減少率が9%を超えると、ひび割れは部材上縁に到達せず、鋼材破断で終局に至った。以上より、質量減少率の違いによって破壊モードが変化することが確認された。

各解析ケースの荷重-中央変位関係を図-7に示す。N-0と腐食考慮の解析ケースを比較すると、鋼材の質量減少率の増大に伴い、ひび割れ発生荷重や最大荷重、変形性能が大幅に低下していることがわかる。ただし、case A~Cそれぞれに着目すると、鋼材の腐食領域によらず、これらはほぼ同等となっている。このことから、本研究の範囲内では、鋼材の腐食領域が構造性能に与える影響は小さいと考えられるが、部材の長さ起因する影響や腐食分布などの影響についても検討を行っていく必要がある。

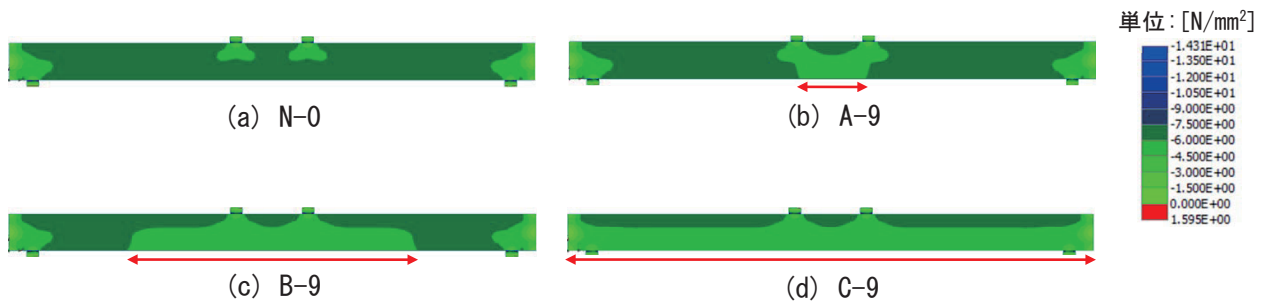


図-5 プレストレス導入直後の軸方向応力分布図の比較 (引張: +, 圧縮: -)

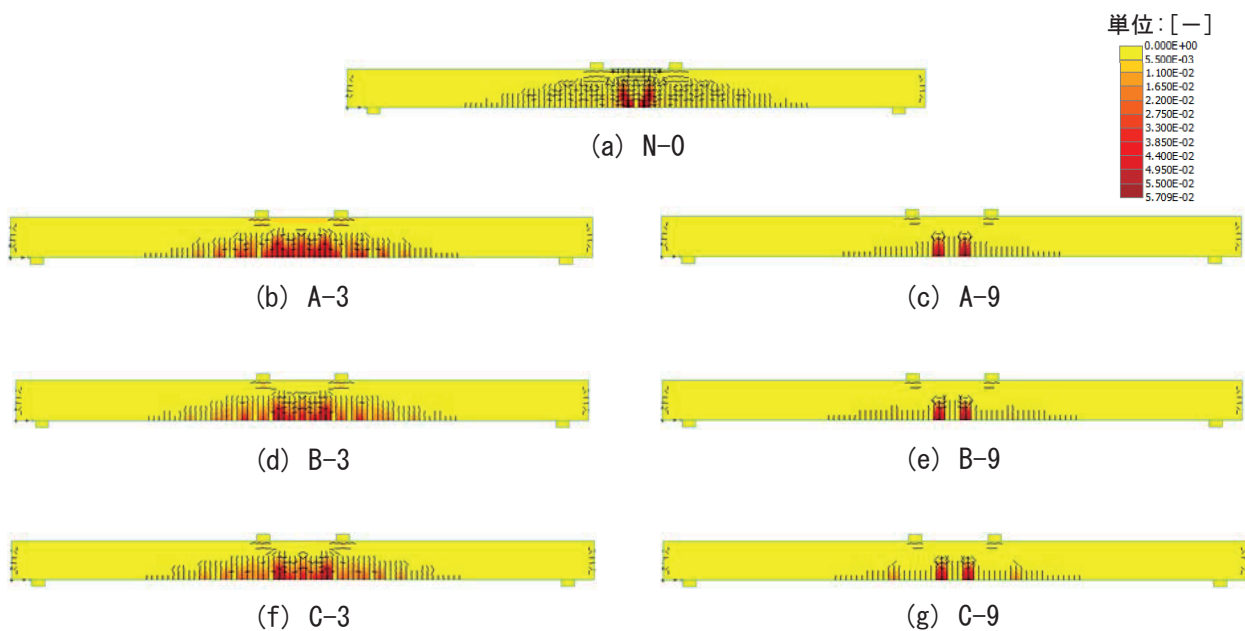


図-6 最大荷重時の最大主ひずみ分布・ひび割れ図の比較 (シリーズ1)

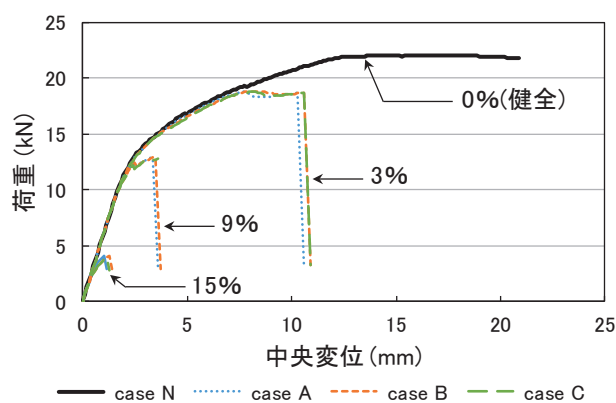


図-7 荷重-中央変位関係 (シリーズ 1)

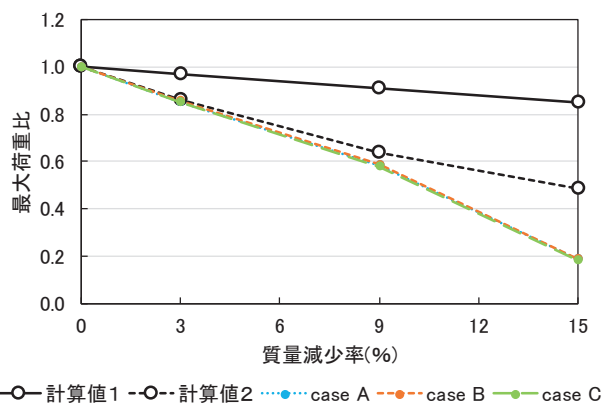


図-8 最大荷重比-質量減少率関係 (シリーズ 1)

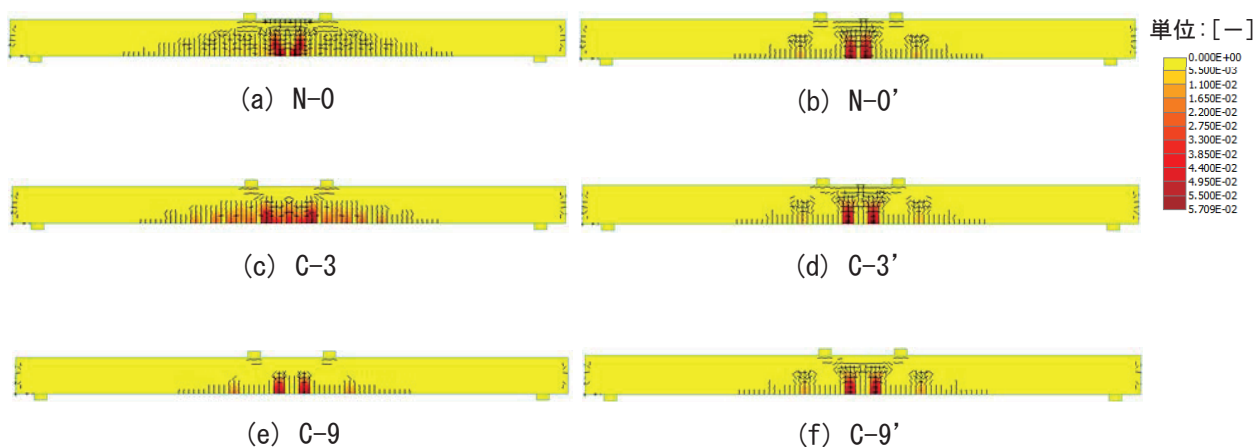


図-9 最大荷重時の最大主ひずみ分布・ひび割れ図 (シリーズ 2)

最大荷重比-質量減少率関係における解析値の比較を図-8に示す。図中には比較として、2つの計算値を示した。計算値1は、鋼材の降伏強度を質量減少率分だけ低下させた計算値、計算値2は鋼材の降伏強度を式(6)より低下させた計算値であり、いずれも梁理論より求めたものである。また、計算値に鋼材破断の影響は考慮されていない。計算値1と各解析値を比較すると、大幅に乖離していることが分かる。一方、計算値2と解析値は、質量減少率が3%までは概ね一致しており、質量減少率の増加に伴い、計算値よりも解析値の方が最大荷重は低下している。これは、解析において鋼材の破断を考慮しているためである。したがって、腐食の生じたPC梁部材の耐力評価を解析により行う際には、鋼材の耐力の低下のみならず、破断伸びの低下を適切に考慮する必要があることが示された。

(2) シリーズ 2

最大荷重時の最大主ひずみ分布・ひび割れ図を図-9に示す。図のように、付着があるケース (N-0, C-3, C-9) はひび割れが分散しているのに対し、付着がないケース (N-0', C-3', C-9') はひび割れが支

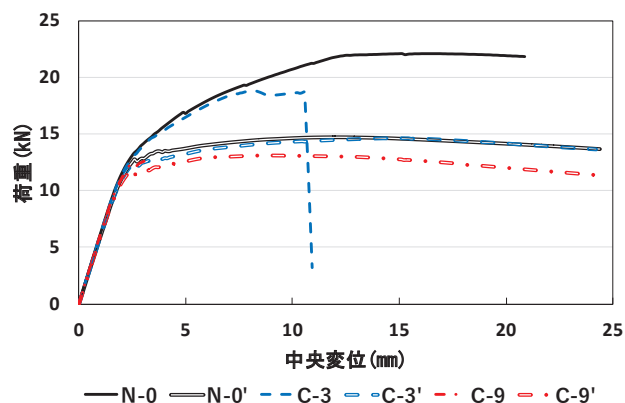


図-10 荷重-中央変位関係 (シリーズ 2)

間中央付近に集中しており、鋼材の付着状態により異なるひび割れの分散性の傾向は再現できている。これは、楠見らの研究と同様な傾向となっている⁹⁾。質量減少率が0%、3%の場合においては、付着状態に関わらず、部材上縁にひび割れが到達し、部材上縁のコンクリートの圧縮破壊を呈した。質量減少率が9%の場合においては、付着ありのケースでは部材上縁までひび割れが到達せず、鋼材破断で終局に至ったが、付着なしのケースでは、部材上縁のコンクリートの圧縮破壊となった。

各解析ケースの荷重-中央変位関係を図-10に示す。健全なN-0とN-0'の最大荷重を比較すると、付着の有無で最大荷重が30%程度異なっている。道路橋示方書によると、鋼材とコンクリートの付着がない場合の破壊抵抗曲げモーメントは、付着がある場合の破壊抵抗曲げモーメントの70%とすると記載されている⁸⁾ことから、この結果は妥当なものと考えられる。また、付着ありのケースでは、質量減少率の増大に伴い最大荷重が大幅に低下したが、付着なしのケースでは、質量減少率によらず同等な最大荷重となっている。これは、鋼材の付着がある場合に比べ、付着がない場合は鋼材のひずみ増加が小さくなり、鋼材が弾性域においてコンクリートの圧縮破壊が生じたためと考えられる。このように、鋼材の付着の有無はPC部材の耐荷性能に影響を与えることが示された。しかし、本手法により腐食の生じたPC部材の構造性能評価を高精度に行うためには、鋼材の付着モデルの導入など、さらなる検討を行う必要がある。そのための手法の提案は、今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究では、鋼材の腐食領域および鋼材の付着状態がPC部材に与える影響を有限要素解析により確認することを主目的とした。その結果、鋼材腐食が部材の破壊モードや構造性能に大きく影響を与えるものの、腐食領域による明確な耐力低下の違いは確認されなかった。また、鋼材の付着状態に着目した検討結果より、付着なしの場合においてPC部材の耐力低下が確認されたことから、付着状態の重要性が改めて示された。以上を踏まえ、鋼材の腐食範囲および付着状態の影響をある程度確認できたものの、腐食範囲や腐食分布、付着劣化のより詳細な検討が必要であると考えられる。さらに、本研究で得られた知見は、対象部材に適用範囲が限定されるため、今後は、より詳細かつ多様な条件設定を行い、これらが部材の挙動に与える影響について引き続き検討を進めていく。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ71，2006.
- 2) 上原子晶久，岩城一郎，鈴木基行：塩害による鋼材腐食を考慮した実PC上部工の構造性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1525-1530，2009.
- 3) Cervenka, V., Jendele, L. and Cervenka, J.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007.
- 4) CEB: CEB-FIP Model code 1990, Thomas Telford, 1993.
- 5) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 6) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.
- 7) 陸賢，田中泰司，山口貴幸，下村匠：腐食したPCより線の機械的性質とプレテンションPC梁の残存耐力の評価，プレストレストコンクリート工学会 第21回シンポジウム論文集，pp.211-216，2012.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説/III コンクリート橋編，2002.
- 9) 楠見将司，武田健太，梅原秀哲：鋼材の付着の有無がポストテンション式PCはりの挙動に与える影響に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.421-426，2018.