

論文 腐食調査にもとづく PC 箱桁橋の安全性に関する信頼性解析

田中 泰司*1・寺尾 静夏*2・湯原 彩人*3・大海寺 巧*3

要旨: グラウトの充填不足と凍結防止剤による塩害によって PC 鋼材の腐食が進行した PC 箱桁橋を対象として、ファイバー解析により構造安全性を評価した。供用中に行われた内視鏡調査結果や載荷試験結果を解析に反映したうえで、不確定な情報には確率的に入力値を与えて断面耐力を計算する信頼性解析を行った。その結果、腐食調査や載荷試験を行うことによって耐力の推定値のばらつきが抑えられ、合理的に構造安全性を評価できるようになることが示された。また、橋梁の解体時に行われた鋼材の腐食調査結果と耐力の推定結果は、信頼性解析の結果と整合的であった。

キーワード: ファイバー解析, 内視鏡調査, 鋼材腐食, PC 箱桁橋, 安全性, 信頼性解析

1. はじめに

塩害等で鋼材腐食が進行しているコンクリート構造物を維持管理する際には、安全性の評価が必要となる。評価の精度と信頼性を確保するためには、鋼材腐食の状況を把握し、材料劣化の影響を適切に考慮して構造計算を行う必要がある。構造計算の方法を巡っては、鋼材腐食の影響を材料構成則に反映させることで考慮可能であることが近年の研究¹⁾により、明らかとなっている。高精度の解析を行う場合には高密度な劣化情報が必要となるものの、予算等の制約があるので、調査数量には限りがあり、情報量が不足しがちであることが現状の課題のひとつである。調査数が少なすぎると、実際の劣化状況を過少評価する可能性が高くなり、その結果、安全性が損なわれたり、補修補強設計に手戻りが生じたりして余分なコストや時間を消費することにもつながりかねない。

本研究の目的は、未調査箇所を取り扱い方法を検討し、調査によってどの程度の不確実性が低減されるのかを明らかにすることにある。調査の価値を定量的に明らかにすることによって、最適な調査方法や調査数量の検討に資することを企図している。

この研究目的を達成するために本研究では鋼材腐食が進行した PC 箱桁橋である妙高大橋旧橋²⁾を研究対象とした。妙高大橋旧橋は 1972 年に建設されたが、PC シース内にグラウトが充填されていなかった箇所が多く、そこに凍結防止剤を含んだ水が浸入したために塩害による鋼材腐食が生じた。2021 年には新橋に交通振替が行われ³⁾、2024 年に上部工が解体撤去された。供用中には約 1200 か所で内視鏡調査により鋼材の腐食状況が調査され⁴⁾、その結果にもとづいて構造安全性が評価された⁵⁾。しかし、調査ができなかった鋼材が相当数にのぼったために、それらの鋼材の取り扱いが課題として残されてい

た。そこで本研究では未調査箇所の腐食を確率的に取り扱い、信頼性の観点から構造安全性を検討することにした。また、解体工事の際に橋桁の切断面観察を行い、実際の腐食状況を把握したうえで未調査箇所の取り扱い方について考察を行った。

2. 供用中に実施された腐食調査と解体前に実施された載荷試験

2.1 検討対象と検討部位

研究対象とした妙高大橋旧橋の側面図を図-1 に示す。橋長は 300m であり、4 径間連続 PC 箱桁橋である。本研究では供用中に PC 鋼材の破断がもっとも多く発見された第 1 径間の第 8 セグメントを検討対象とした。図-2 に第 8 セグメントの断面図を示す。正曲げを受ける部位であるため、下フランジに 60 本の PC ケーブルが配置されていた。それぞれの PC ケーブルは 7 束の $\phi 12.7\text{mm}$ 7 本より線で構成され、内径が $\phi 55$ のシースに収められていた。

2.2 鋼材の腐食調査

供用中の 2012 年に実施されたはつり調査および内視鏡調査の結果を図-3 に示す。鋼材の腐食状況は、塩害橋梁維持管理マニュアル(案)⁶⁾を参考にして「健全」「腐食小」「腐食大」「破断」の 4 つに区分して判定された。ここで腐食小はごく表面的な腐食、腐食大は断面欠損が著しい腐食と定義した。

調査の結果、破断が 9 本確認された。また、腐食小が 12 本であり、調査箇所の 60% で腐食が生じていた結果となった。また、40% の PC ケーブルが未調査のまま残された。かぶりが大きい場所や隅角部など配筋が密な場所では内視鏡調査の実施が困難であったためである。プレストレスへの悪影響や調査コストの制約もあるので、一般

*1 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博(工) (正会員)

*2 金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻

*3 金沢工業大学 工学部環境土木工学科

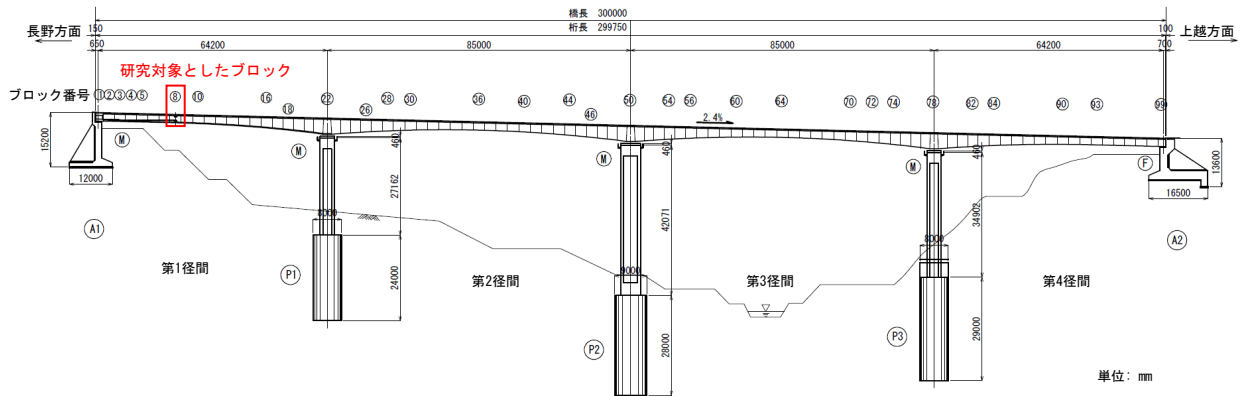


図-1 妙高大橋旧橋の側面図

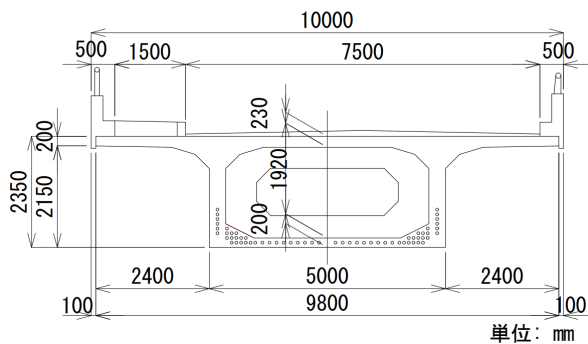


図-2 第8セグメントの断面図

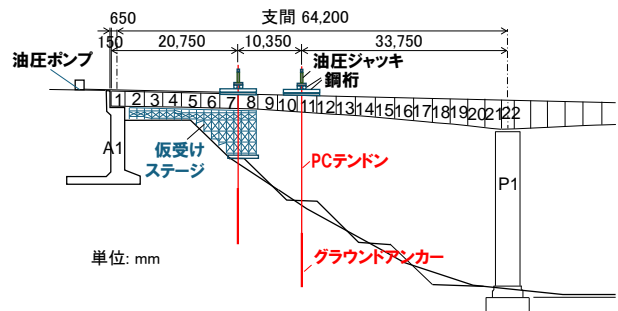


図-4 載荷試験方法 (2022年)

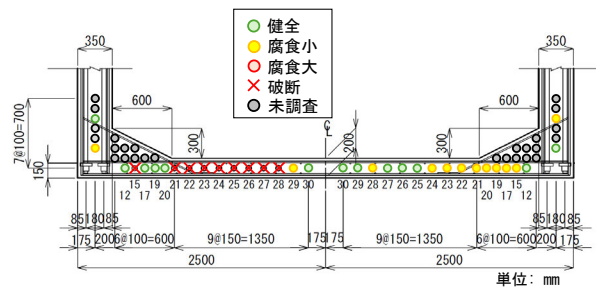


図-3 供用期間中に実施されたPCケーブルの腐食調査結果 (2012年)

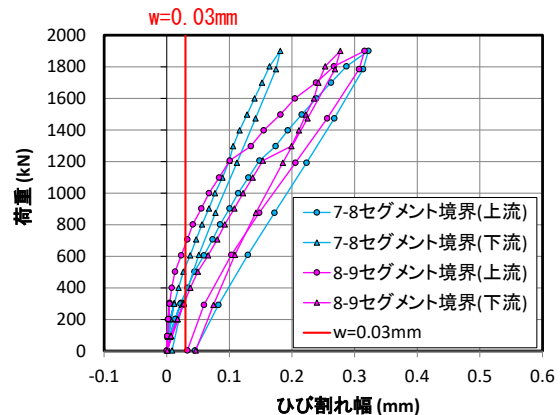


図-5 第8セグメント境界のひび割れ幅の計測結果

に鋼材の腐食状況を全数調査することは難しい。

2.3 載荷試験

供用停止後の2022年に現地にて載荷試験を行った⁷⁾。図-4に載荷方法を示す。第7-8セグメント境界と第11セグメントの吊り穴の位置に油圧ジャッキを設置し、地盤から反力を取って載荷を行った。図-5にセグメント境界に取り付けたパイ型変位計で計測されたひび割れ幅と荷重の関係を示す。プレストレスによるひずみが約 300μ であることとパイ型変位計の測長100mmを勘案してひび割れ発生のしきい値を0.03mmとした。その結果、第7-8セグメント境界も第8-9セグメント境界も荷重が約500kNのときにひび割れが発生したと評価された。この載荷荷重と死荷重の合計によって作用する曲げモーメントは、健全状態のひび割れ発生曲げモーメントの計算

値の48%であった。PCケーブルの腐食によってプレストレスが大幅に低下していたことがわかった。

3. 未調査箇所の確率的な取り扱い

3.1 検討の概要

供用中に実施した性能評価では、なるべく真値に近づけるように、未調査箇所の腐食状況を一意に設定しようとした。しかし、未知なものを正確に予測する方法はないので、どうしても実際とはずれが生じてしまう。確定的な考え方には限界があるため、本研究では未調査箇所の腐食状況を確率的に考えることにした。

3.2 解析方法

(1) ファイバー解析

構造解析手法としてファイバー解析を使用した。後述

するように、未調査箇所の腐食の影響をモンテカルロ法によって考えるため、1回あたりの計算時間の短縮とモデルの単純化が必要であったからである。ファイバー解析では平面保持を仮定するのに対し、対象橋梁はグラウト未充填箇所が多く、平面保持が成立しない可能性があるが、その影響については今後の課題である。

ファイバー解析では図-6に示すように断面を帯状のファイバーに分割する。その後、図-7に示した手順で解析を行う。設定した曲率 ϕ に対して力の釣り合いを満たすひずみ分布の切片 ε_0 を収束計算により求めた。収束計算にはNewton法を用いた。解が収束したのちに曲げモーメントを計算した。曲率を漸増させながらこのプロセスを繰り返すことによって曲げモーメント-曲率関係を取得した。

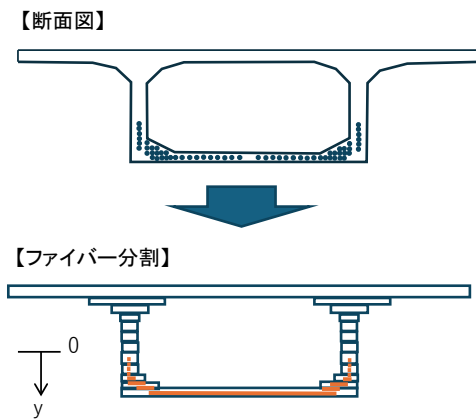


図-6 ファイバー分割のイメージ

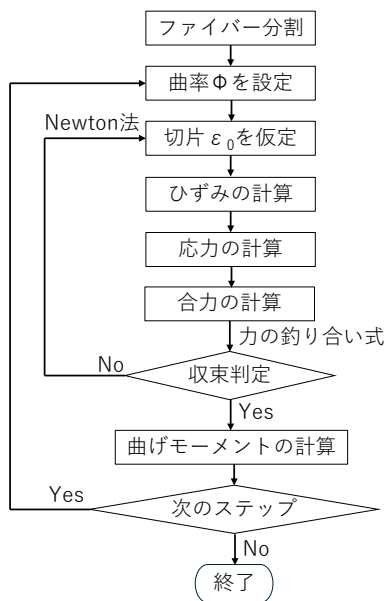


図-7 ファイバー解析の手順

(2) 材料構成則

ファイバー解析に使用した材料構成則を図-8に示す。

コンクリートは圧縮側が2次曲線と塑性を組み合わせた構成則とした。引張側はセグメント境界での接着力が小さいと考えられたことから引張強度をゼロとした。設計値より、コンクリートの圧縮強度は 40N/mm^2 、弾性係数は 31kN/mm^2 とした。PCケーブルにはトリニアモデルを使用し、弾性領域、ひずみ硬化領域、塑性域を考慮した。モデルに使用される諸数値は規格値を参考として弾性係数 E_s は 200kN/mm^2 、降伏応力 f_y は 1600N/mm^2 、最大応力 f_u は 1800N/mm^2 、破断のび ε_u は0.039とした。プレストレス力は鋼材に0.0045の初期ひずみを与えることで導入した。

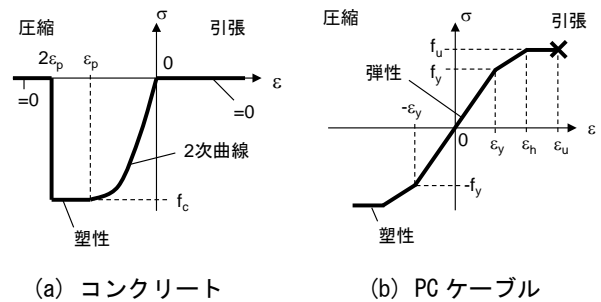


図-8 材料構成則

PCケーブルの腐食の影響は、質量減少率 $C(\%)$ に応じて、上記の諸数値を低減することによって表現した。式(1)~(4)の R_{fy} 、 R_{fu} 、 R_E 、 $R_{\varepsilon u}$ は弾性係数、降伏応力、最大応力、破断のびの残存率であり、質量減少率の関係を示したものである。これらの式は電食された長さ20cmで $\phi 12.4\text{mm}$ のPC鋼より線の引張試験結果⁸⁾を回帰して得られたものである。妙高大橋旧橋に使用されていた $\phi 12.7\text{mm}$ のより線も同様であると考えて、準用することとした。

$$R_{fy} = e^{-0.07C} \quad (1)$$

$$R_{fu} = e^{-0.076C} \quad (2)$$

$$R_E = e^{-0.06C} \quad (3)$$

$$R_{\varepsilon u} = e^{-0.175C} \quad (4)$$

これらの式により得られた応力-ひずみ曲線が図-9である。質量減少率 C よりも強度やのび、弾性係数が低下する割合が大きなモデルとなっている。

腐食の追跡調査により同じ場所の鋼材の腐食状況は2012年以降、数年のうちに進行していたことが明らかとなっている。そこで2012年の内視鏡調査で腐食小、腐食大と判定されたPCケーブルの2022年時点での質量減少率は、腐食の進行を考慮して、腐食小が50%、腐食大が70%とした。

(3) 未調査箇所の腐食の設定

未調査箇所の鋼材は腐食状況が不明のため、確率的に腐食を設定することにした。未調査のPC鋼材の平均質量減少率を、確率密度分布が一定の値をとる一様分布

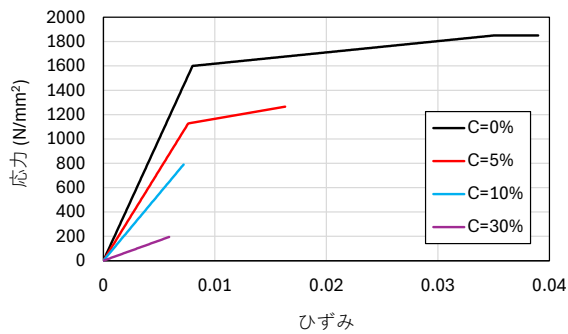


図-9 腐食したPCケーブルの応力ひずみ曲線

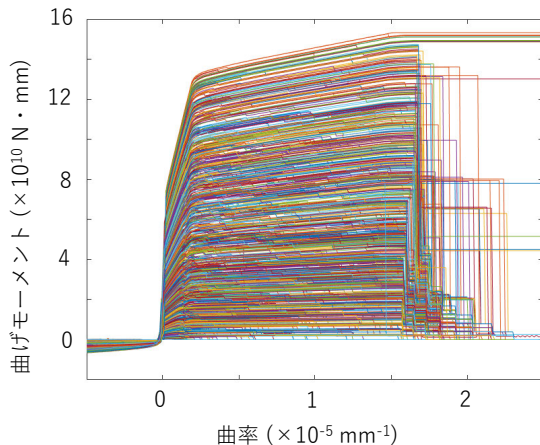


図-10 腐食の情報がない場合のファイバー解析結果

を仮定してランダムに設定し、その質量減少率となるように各鋼材の質量減少率を設定した。各鋼材の質量減少率を個別にランダムに設定すると、大数の法則によって平均値が50%に近づき、腐食の大小を検討できないためである。

3.3 解析結果

腐食の情報がない場合のファイバー解析結果を図-10に示す。試行回数は1000回とした。すべての鋼材に対して腐食をランダムに設定したので、健全な状態から耐力がゼロに近い状態まで様々なケースが可能性としてありえる。

腐食調査の結果を反映させたいうえで未調査箇所に対して確率的に腐食減少率を設定して、ファイバー解析を行った際の曲げモーメント-曲率関係を図-11に示す。調査箇所の腐食状況が確定するためにばらつきが少なくなった。その結果、下限の曲線も視認できるようになった。

図-12は载荷試験結果を反映したファイバー解析である。前述の载荷試験において、第8セグメント境界でひび割れが発生した際の作用曲げモーメントは、健全状態のひび割れ発生曲げモーメントの計算値の48%であった。既往の研究において、PC鋼材の質量減少率とプレストレス力の減少率はおおむね一致することが実験的に示

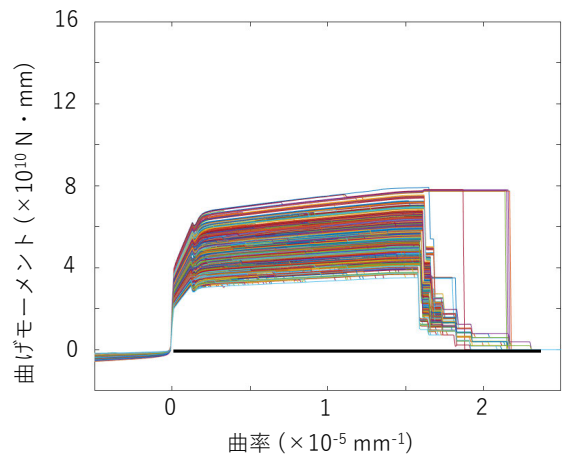


図-11 腐食調査結果を反映した場合のファイバー解析結果

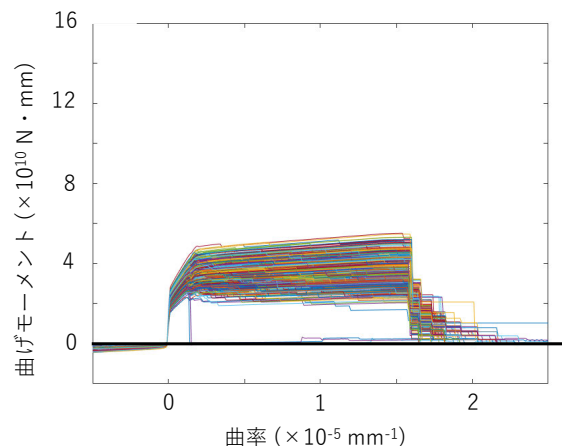


図-12 载荷試験結果を考慮した場合のファイバー解析結果

されていることから、このセグメントの質量減少率の断面平均は52%と考えられる。この値を固定して、各PCケーブルに腐食をランダムに割り当てて1000回試行を行ったのが図-12である。曲げひび割れの発生まで载荷を行うことで構造性能をある程度特定することが可能であるといえる。一方、質量減少率の断面平均が同じであっても腐食分布によって構造性能に差が生じることがわかる。

図-13は腐食調査と载荷試験の両方を考慮した場合のファイバー解析結果である。調査されたPCケーブルの腐食状況を設定したうえで、未調査区間を含めた質量減少率の断面平均が52%になるように腐食分布を生成した。構造解析の結果は狭い範囲に絞られた。载荷試験から得られた情報によって腐食分布の範囲が限定されたためである。

図-14に最大曲げモーメントの累積分布関数を示す。この関数は作用曲げモーメントと破壊確率の関係を示している。ばらつきが小さくなるほど水平に近づく傾向となっている。破壊確率を1, 5, 10%とした場合の最大曲げ

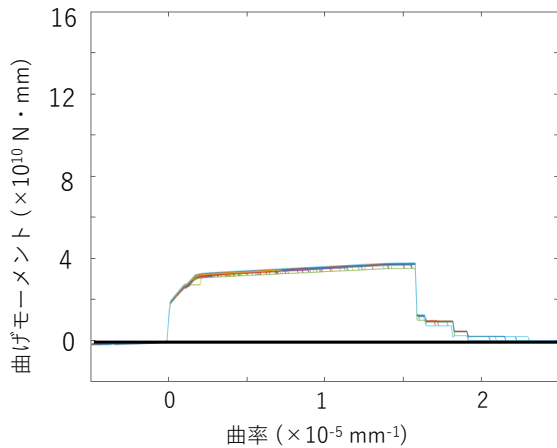


図-13 腐食調査と載荷試験の両方を考慮した場合のファイバー解析結果

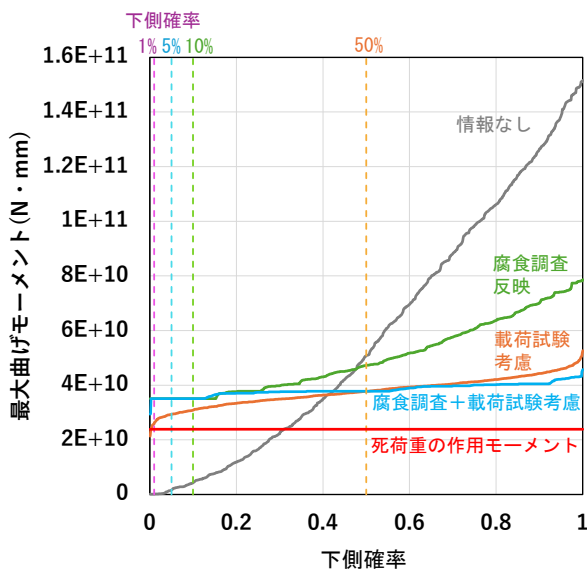


図-14 最大曲げモーメントの累積分布関係

モーメントは、腐食情報がない場合には小さな値となった。この断面に作用する死荷重による曲げモーメントは $2.39 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}$ と最大曲げモーメントよりも大きいので、安全性は確保できないことになる。一方、腐食調査や載荷試験を考慮した場合にはいずれの破壊確率においても最大曲げモーメントが作用モーメントを上回るので安全性が担保される。このような信頼性解析を用いることで、調査や試験の価値を定量的に説明することが可能となる。

4. 解体調査

4.1 調査方法

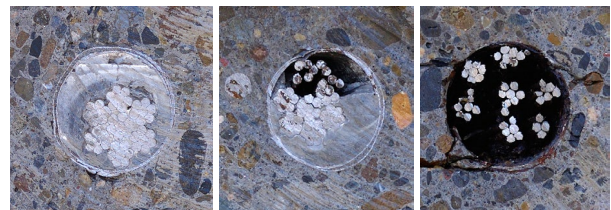
前章では供用中に実施された腐食調査をもとに構造解析を行った。未調査箇所は確率論的に取り扱った。その妥当性を確認するために、未調査箇所を含むすべての鋼材の解体調査を行った。妙高大橋旧橋では 2024 年に橋梁上部工の解体工事が行われた。建設時と反対の順でセ

グメントをワイヤーソーで切断し、クレーンで運搬して撤去した。工程や作業ヤードの関係から短時間での調査が求められたので、PC ケーブルの腐食状況は切断面観察により行うこととした。作業ヤードにセグメントを仮置きし、切断面を高圧洗浄機で洗浄して、有効素数が 5000 万画素の高解像度カメラで撮影を行った。撮影画像からシース内のグラウト充填状況と PC ケーブルの腐食状況を目視で観察した。

4.2 調査結果

(1) グラウト充填状況

グラウトの充填状況は図-15 に示すように、「充填」「一部充填」「未充填」の3段階で目視判定した。また、断面修復材に覆われてグラウトやシースが確認できない場合は「未充填」とした。グラウト充填状況の観察結果を図-16 に示す。一部充填および未充填の割合は 70%であった。未調査箇所は充填不良が大半を占める結果となった。



(a) 充填 (b) 一部充填 (c) 未充填

図-15 グラウトの充填状況の判定例

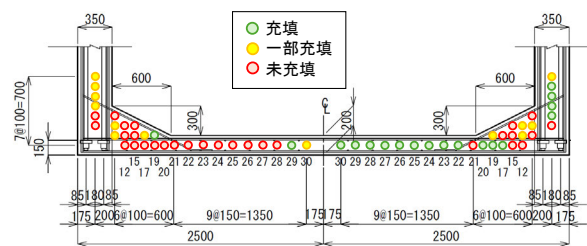


図-16 グラウトの充填状況の断面観察結果

(2) PC 鋼材の腐食状況

PC 鋼より線の腐食判定基準を図-17 に示す。7 本ある素線の数が減少したり、素線の断面減少が見られたりした場合には腐食しているものと判定した。また、よりがほどけている場合は近傍で破断していることが多かったため腐食判定に加えた。断面のみから腐食の大きさを判定するのは困難であったので、腐食判定した PC 鋼より線は有効断面から除外し、安全側に判定することとした。

第 7-8 セグメントの境界面で観察された PC ケーブルの腐食状況を図-18 に示す。供用中の腐食調査結果とおおむね整合していたものの、調査断面が橋軸方向に 1m

ほどずれているために異なる判定となった箇所もあった。未調査箇所では腐食判定された PC 鋼より線が 4 本以上であったものが大半を占めた。この断面の質量減少率の平均値は 46% となった。載荷試験から推定された値である 52% とおおむね整合する結果となった。



(a) 素線減少 (b) 素線の断面減少 (c) よりが戻っている

図-17 PC 鋼より線の腐食判定基準

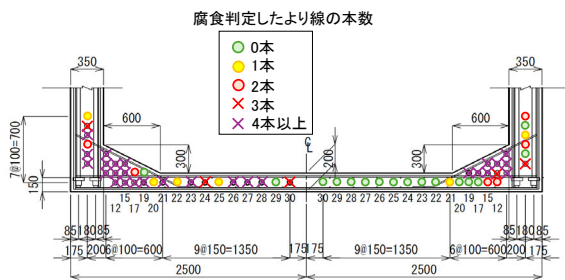


図-18 PC 鋼より線の腐食状況の断面観察結果

4.3 構造性能

上記の腐食判定結果を反映したファイバー解析の結果を図-19 に示す。腐食調査を反映した図-11 や載荷試験結果を考慮した図-12 のばらつき範囲と整合する結果となった。一方で、図-13 よりも若干大きめとなったことから腐食調査と載荷試験結果の両方を考慮する際の方法や調査結果自体の精度の考え方に改善が必要であり、今後の課題である。

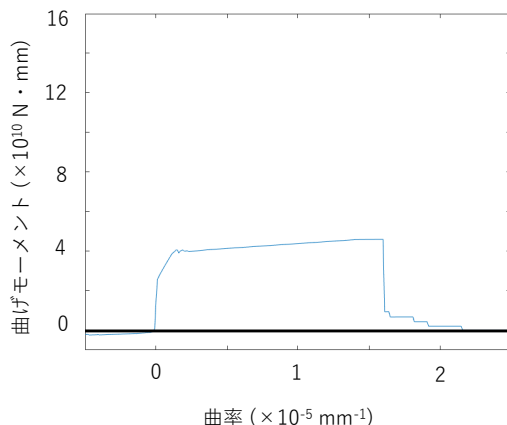


図-19 切断面観察にもとづくファイバー解析結果

5. 結論

本研究では、鋼材腐食が進行した PC 箱桁橋を対象と

して、構造解析を行い、安全性を評価した。腐食調査結果や載荷試験結果を考慮し、未調査箇所に対しては確率的に腐食分布を設定して信頼性解析を行ったところ、腐食調査や載荷試験を行うことによって作用力を超える耐力を保有していることを説明可能となることが示された。また、解体調査結果より、供用中に未調査であった箇所の大半がグラウト未充填であり、シーす内の半数以上の PC 鋼より線に腐食が認められた。解体調査にもとづくファイバー解析結果は、供用中の調査結果にもとづく信頼性解析の結果と整合的であった。

謝辞

本研究は、国土交通省北陸地方整備局のご協力を得て、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「スマートインフラマネジメントシステムの構築」(研究推進法人: 国立研究開発法人土木研究所) および JSPS 科研費 24K00962 の助成によって実施されました。

参考文献

- 1) 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, 2012.10
- 2) 樋口徳男: 妙高大橋のモニタリングによる管理, 北陸地方整備局平成 25 年度事業研究発表会概要集, 2013.
- 3) 国道 18 号妙高大橋新橋が開通します, 国土交通省高田河川国道事務所記者発表資料, 2021.7
- 4) 早川博, 樋口徳男, 高瀬秀樹, 登石清隆, 渡辺浩二, 伊藤裕章: 妙高大橋の継続追跡調査, 橋梁と基礎, pp.41-46, 2015.
- 5) 武田健太, 田中泰司, 伊藤裕章, 大谷拓矢, 登石清隆, 樋口徳男: 鋼材の腐食劣化が進行した PC 連続箱桁橋の構造性能評価, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 712-724, 2020.3
- 6) 橋梁塩害対策検討委員会: 塩害橋梁維持管理マニュアル(案), 北陸地方整備局, 2008.4
- 7) 寺尾静夏, 田中泰司, 新井崇裕, 登石清隆: 塩害腐食が進行した 4 径間連続 PC 箱桁橋の載荷試験とモニタリングによる安全性評価の検討, 構造工学論文集, 70A 巻 p. 762-773, 2024.3
- 8) 田中泰司, 長田光司, 野島昭二: 電気化学的に腐食させた PC 鋼材の機械的性質に関する実験的検討, 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, Vol.30, pp.117-120, 2021.10