

マルチスケール解析を用いた過去の点検データに基づく妙高大橋の構造残存性能評価

東京大学大学院   フェロー会員   石田   哲也  
前田建設工業（株）   正会員   房   捷  
（株）コムスエンジニアリング   正会員   土屋   智史  
金沢工業大学   正会員   田中   泰司

1. はじめに

妙高大橋（旧）は新潟県妙高市の国道 18 号に位置し、約 50 年が経過した 4 径間連続 PC 箱桁橋である。過去に行われた詳細調査により、多くの PC 鋼材が腐食・破断しており、PC シース内のグラウトが未充填の状態であったことが分かっている<sup>1)</sup>。そこで、本論文は劣化が進んでいる第一径間を対象として、過去に実施した静的載荷試験を再現する解析を行い、劣化が進んでいた第一径間を主対象に、既に判明している PC 鋼材の腐食、破断とグラウト充填を反映した解析を実施する。各 PC 鋼材とコンクリートひずみの進展や終局時の耐力について考察し、橋梁の残存性能を明らかにすることを目指すとともに、健全性評価のために必要となるデータの取得とその活用方法の高度化を図るものである。

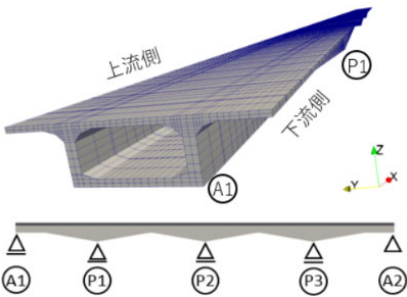


図-1 橋梁上部工モデルの概要と解析における拘束条件

2. 対象橋梁と FEM 解析の概要

図-1 に示した四径間全長を対象とするフルスケールの橋梁上部工モデルを制作した。節点数は 94800、3 次元ソリッド要素数は 74970 である。第一径間において、PC 鋼材（主ケーブル）は、軸力のみを伝達する合計 3466 個の線材要素でモデル化した。入力したコンクリートと PC 鋼材の材料物性値を表-1 に示す。連続 PC 鋼材および張出し PC 鋼材のプレストレス量は、 $900\text{N/mm}^2$  と仮定した。ウェブに配置されている鉛直鋼棒や上床版の横締め鋼材は、PC 鋼材比として考慮している。

表-1 材料物性値

|                                |         | 単位               | 設計値   |
|--------------------------------|---------|------------------|-------|
|                                |         |                  |       |
| コンクリート                         | 設計圧縮強度  | $\text{N/mm}^2$  | 40    |
|                                | 引張強度    | $\text{N/mm}^2$  | 2.69  |
|                                | 弾性係数    | $\text{kN/mm}^2$ | 31    |
| PC 鋼材<br>（張出用 PC 鋼材と連続用 PC 鋼材） | 断面積     | $\text{mm}^2$    | 886.3 |
|                                | 降伏強度    | $\text{N/mm}^2$  | 1600  |
|                                | 弾性係数    | $\text{kN/mm}^2$ | 200   |
|                                | プレストレス  | $\text{N/mm}^2$  | 900   |
| 鉄筋                             | プレストレイン | $\mu$            | 4500  |
|                                | 降伏強度    | $\text{N/mm}^2$  | 345   |
|                                | 弾性係数    | $\text{kN/mm}^2$ | 200   |

PC 鋼材の腐食、破断とグラウトの充填状況は現場の点検データに合わせて設定した。現地では、内視鏡カメラを用いて、シース管内部の鋼材状況が直接観察されている。調査した PC 鋼材に対して、健全、「腐食小」、「腐食大」の 3 つに区分した。「腐食小」、「腐食大」の平均腐食度はそれぞれ 2%、10% と仮定した。腐食した PC 鋼材の構成則は既往の文献<sup>2)</sup>を参考にして設定した（図-2）。グラウト未充填の領域では、PC 鋼材とコンクリートの縁を切り、両者の間で接触に伴う圧縮応力以外は伝達しないモデルとした。また、昨年現場で実施された磁気計測結果によると、第 8 セグメント上流側下フランジにあるすべての PC 鋼材（合計 16 本）が破断していることが判明したため、モデル上で同領域の線材要素を削除し、モデルに反映させることとした。

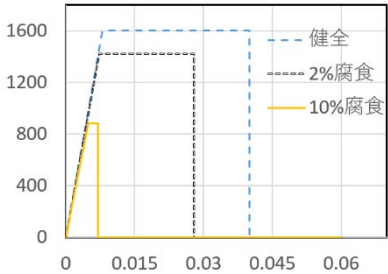


図-2 PC 鋼材の応力-ひずみ関係

本研究では、東京大学コンクリート研究室で開発された、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造物の動的/静的非線形有限要素解析手法<sup>3,4)</sup>（COM3）を適用した。

キーワード   非線形有限要素解析（COM3）、連続 PC 箱桁橋、残存性能、腐食、破断  
連絡先   〒113-8656   東京都文京区本郷 7-3-1   tel:03-5841-7498   fax:03-5841-6010

### 3. FEM 解析結果と考察

解析結果の信頼性を確認するために、現場で測定したセグメント 8 での荷重－たわみ関係と解析結果を図-3 で比較した。現場は様々な制約があるため、約 1900kN までの荷重に留めたが、初期の傾きは解析結果とよく一致し、モデルは現状の橋梁の再現度が高いと判断している。セグメント 8 の大変形領域までの荷重－たわみ関係を、健全状態の結果も併記して図-4 に示す。腐食と破断を考慮することで、最大荷重が健全状態の約 60% となり、靱性も大幅に低下した。このように精緻なモデルを用いて、橋梁の構造性能を定量的に評価することができるが、有限要素解析の利点の一つと言える。

荷重中の PC 鋼材ひずみの発生状況を図-5 に示す。張出用 PC 鋼材のひずみは比較的小さく、終局状態においても、ひずみが 0.04 に超えた PC 鋼材は少ない。一方、連続用 PC 鋼材のひずみは比較的大きく、特に、第 8 セグメントは腐食により多くの鋼材が破断していたため、ひずみが集中的に発生し、荷重による鋼材の破断も付随して生じ、終局状態に至った。橋梁下床版のコンクリートのひずみ分布を図-6 に示す。第 8 セグメントで、引張ひずみが集中的に大きくなっていることが分かる。図-5 から第 8 セグメント以外にも、ひずみが比較的に大きくなった PC 鋼材がある。そこで、個別の PC 鋼材を抽出し、その原因について調べた (図-7)。ひずみが大きくなったのは、10% の腐食が発生し、かつグラウトが未充填の箇所であった。グラウトの充填が、橋梁の耐久性と安全性に重要な役割を果たしていると言える。

### 4. まとめ

点検データに基づき、腐食、破断とグラウトの充填状況をモデル上に再現し、解析をしたところ、初期剛性は現地計測結果とよく一致するとともに、健全状態に対する耐荷力の低下や PC 鋼材の破断が進行する状況を定量的に評価できた。PC 鋼材の腐食による破断が多い第 8 セグメントにひずみが集中し、最終的に断面内の残存していた PC 鋼材も外力によって破断に至り、耐力低下に至った。その際、PC 鋼材を可視化し、ひずみ発生と破断状況を調べたところ、グラウト未充填エリアの 10% 腐食が発生していた PC 鋼材が早期に破断に至ることも確認できた。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 田中泰司, 長田光司, 野島昭二: 電気化学的に腐食させた PC 鋼材の機械的に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, 2021年10月
- 3) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor & Francis, London, 2008.

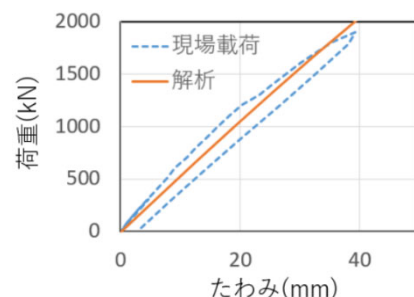


図-3 セグメント 8 の荷重－たわみ関係 (解析値と測定値の比較)

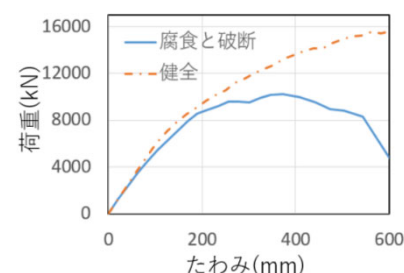


図-4 セグメント 8 の荷重－たわみ関係 (解析値)

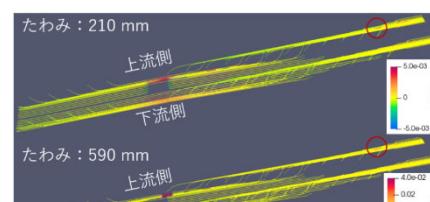


図-5 異なるたわみ時での PC 鋼材のひずみ分布

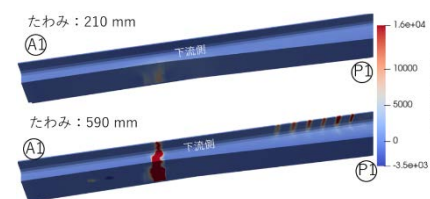


図-6 異なるたわみ時での橋梁下床版コンクリートのひずみ分布

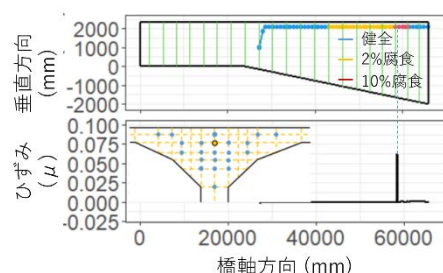


図-7 個別 PC 鋼材の腐食とひずみの発生状況