

非線形解析による鋼材腐食が生じた PC 橋の構造性能評価に関する基礎的研究

神戸大学 学生会員 ○糸井 聡志
神戸大学 正会員 三木 朋広

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 橋は目視点検によるコンクリート内部の鋼材の劣化把握が困難であり、FEMによる構造性能評価が必要とされている。本研究では、鋼材腐食による破断が生じた PC 箱桁橋を対象として、3次元非線形有限要素解析によりその構造性能の変化を検討することを目的とする。具体的には2024年のカローラ橋崩落事例¹⁾を対象としたモデルを構築し、鋼材の断面欠損や破断率が橋梁全体の耐力、変形性能、および応力再配分機構に及ぼす影響を検証した。

2. カローラ橋の崩壊事例¹⁾

カローラ橋は全長375mで桁Aから桁Cの3つのスパンから構成されている。1つのスパンはa軸からe軸の5径間からなるPC箱桁橋である。写真-1に崩壊直後のカローラ橋を示す。

次にカローラ橋の支柱DのPC鋼材の損傷状況を図-1に示す。崩壊時の各PC鋼材の有効断面積割合を赤(0~20%)から緑(健全)まで色分けして示した図である。上床板部の3分の2以上の有効断面積が0~20%となっており、深刻な構造性能の低下が推察される。



写真-1 崩壊後のカローラ橋¹⁾

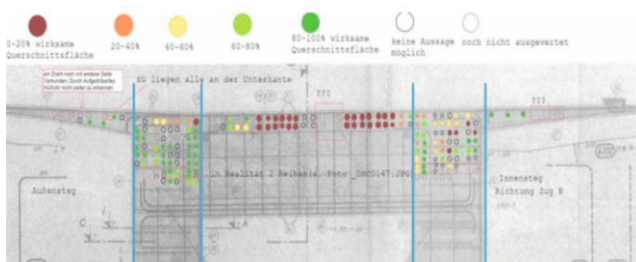


図-1 支柱DのPC鋼材の損傷状況¹⁾

3. 解析概要

3.1 解析モデル

本解析で用いたモデルを図-2に示す。2024年に崩壊の起点となった桁Cの支柱Dを含むヒンジで挟まれた区間を解析対象とした。カローラ橋は橋軸方向に断面変化を有しているため支柱と支柱以外で中空断面の形状を変化させた。橋軸方向にX軸、鉛直方向にZ軸を設定し、D軸の下端を $x=0, z=0$ の点として設定した。また、PC鋼材は1束あたりより線 $\phi 5 \times 24$ 本で断面積 1200mm^2 とした。モデル化では、実橋の複雑な構造を考慮し、1本のシース内に配置された24本のPC鋼より線を個別にモデル化するのではなく、集合断面として扱った。PC鋼材には降伏強度の約55%に相当する緊張力(765kN)を一様に導入した。プレストレスを導入後、PC鋼材とコンクリートに完全付着条件を適用することで、部材全体へのプレストレス導入をモデル化した。

3.2 材料構成則

解析で用いた各種構成則は以下の通りである。圧縮応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係については圧縮破壊エネルギーを考慮したParabolicモデルを採用し、引張構成則は、引張破壊エネルギーを考慮したHordijkの指数関数型軟化モデルを採用した。鉄筋とPC鋼材には降伏基準としてvon Mises塑性モデルを採用し、PC鋼材とコンクリートは完全付着とした。コンクリートの圧縮強度は 30N/mm^2 、引張強度は 2.9N/mm^2 、静弾性係数は 33000N/mm^2 を用いた。

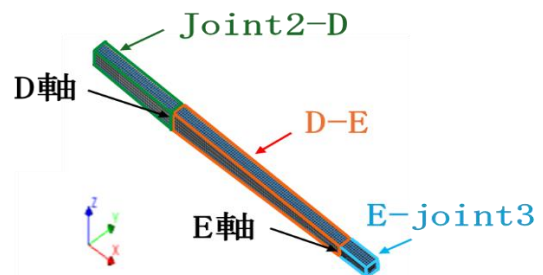


図-2 モデル概要

キーワード プレストレスとコンクリート、カローラ橋、鋼材破断、引張ひずみ

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 TEL: 078-803-6333 E-mail: mikitomo@port.kobe-u.ac.jp

4. 解析結果と考察

解析では支柱 D 軸上の上床板部に配置した PC 鋼材を 0~100%まで段階的に破断させた。破断箇所周辺のコンクリートからウェブ部分、さらに桁端部の変位へと評価対象を拡張し、橋梁全体の挙動を把握した。また、線形解析により全体の概略挙動を確認した後、コンクリート非線形条件で解析を行い、損傷による影響を評価した。

4.1 支承部付近のコンクリートひずみ

まず、コンクリート上面中央部の支柱 D から橋軸方向に前後 10m の範囲で、橋軸方向のひずみを確認した。コンクリート非線形条件でのコンクリートひずみ分布の結果を図-3 に示す。図から鋼材の破断率が 30%に達すると中央部の引張ひずみが顕著に増加することが確認できる。

4.2 支承部ウェブの PC 鋼材ひずみ

D 軸のウェブ部分に注目し、PC 鋼材の橋軸方向のひずみを確認した。これにより上床板部の損傷がウェブの部分に与える影響を評価する。コンクリート非線形条件でのウェブ PC 鋼材のひずみ分布を図-4 に示す。この図では、同一高さのウェブ PC 鋼材について、配置列ごとのひずみ変化を比較した。この図より、内側の列に位置する鋼材において破断率 50~60%を境にひずみが急増しているのがわかる。これらの破断率で上床板部の損傷による負担がウェブ部分へ転移したと考えられる。

4.3 桁端部の鉛直方向のたわみ

桁端部であるヒンジ部分の鉛直方向のたわみに注目し、上床板部の鋼材破断が橋梁全体に与える影響について確認した。コンクリート非線形条件でのヒンジ部分の鉛直方向のたわみを図-5 に示す。この図から破断率が 30%に達した段階からたわみの増加量が急増していることが分かる。また、これは D 軸部分のコンクリート上面中央部のひび割れ発生時期とおおよそ一致し、D 軸の剛性低下が桁端部のたわみを助長していると考えられる。

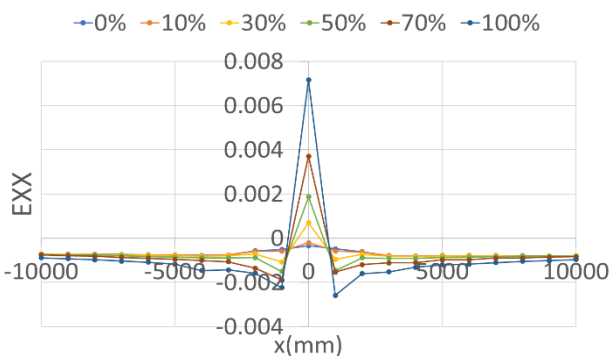


図-3 コンクリートのひずみ分布

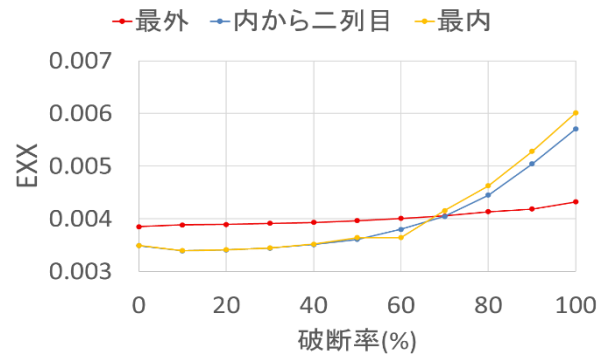


図-4 ウェブ PC 鋼材の同一高さでの列ごとのひずみ

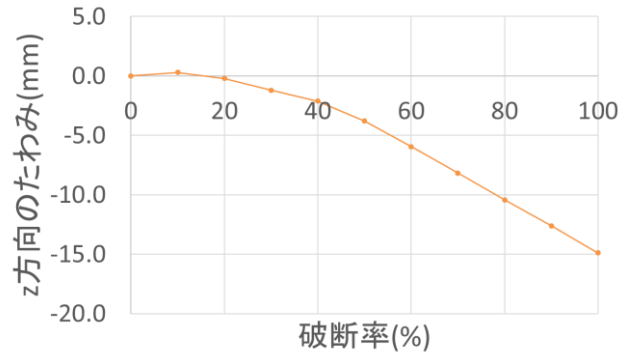


図-5 ヒンジ部分の鉛直方向のたわみ

5. 結論

- 1) 上床板部の鋼材破断率が 30%に達した段階で支柱 D 軸上のコンクリート上面に橋軸直角方向の曲げひび割れが発生した。
- 2) 上床板部の鋼材破断率が 60%を超えると支承部で負担していた曲げモーメントがウェブ部分に急激に転移した。
- 3) 桁端部のたわみは、上床板部の鋼材破断率が 30%に達した段階で支柱部のひび割れ発生と連動して急増した。これにより、鋼材の破断がある一定の割合に達すると橋梁全体の変形が加速する挙動を捉えた。

6. 今後の展望

今後は、ウェブ PC 鋼材の腐食や非対称な損傷による影響を検討するとともに、断面形状の変化や境界条件、鋼材配置を精密に再現することで実橋の挙動に基づいた解析モデルの妥当性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) Silke Scheerer, Gregor Schacht, Max Fiedler, Robert Ritter, Steffen Marx, Gino Ebell, Gero Marzahn : Die wechselvolle Geschichte der Carolabrücke in Dresden , 34. Dresdner Brückenbausymposium, Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, pp.11.42, 2025