

第 I 部門

PC 橋の弾塑性挙動に関する 3 次元 FEM 解析とモデルアップデート

京都大学 学生員 ○谷口 慶舟

京都大学大学院 学生員 Kwak, Sangkwon

京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. 序論

プレストレストコンクリート（以下 PC）橋は日本の橋梁の 40%以上を占めており、特に PC 鋼線の経年劣化や損傷事例が多く報告されている。供用中の PC 橋の異常や性能変化を適切に把握することは PC 橋の維持管理において重要である。その対策として、振動ヘルスマニタリングが注目されてきた。一方で、PC 鋼線破断によるプレストレスの損失が中立軸の変化を起ささない限り PC 橋全体系の振動特性には影響を及ぼさないことから、PC 橋を対象とする振動ヘルスマニタリングは難しいとされている。先行研究¹⁾では、架橋状態にある PC 橋を対象に載荷実験を行い、載荷レベルでの中立軸や振動特性の推移を検討し、耐荷性能との相関について報告している。また、数値解析で、計測振動特性の推移と荷重変位曲線を再現するために、まず、ファイバーモデルによる荷重変位曲線の再現を試みたが、非線形領域での再現性に劣る結果となった。

本研究では、3次元 FEM 解析を通して、荷重変位曲線の再現を試みる。関連して、PC 橋の 3次元 FEM 解析におけるモデルアップデートに有効なパラメータについての比較・検討と、ニューラルネットワークによるモデルアップデートの適用性の検討も行い、材料特性の構成則や境界条件等が PC 橋の解析応答に与える影響の関係性を検討することを本研究の目的とする。

2. 対象橋梁および実験の概要

本実験が行われた対象橋梁は、竣工後 57 年が経過し、日本海沿岸から約 170m という飛来塩分の影響を大きく受けてしまう環境にあり、実際に塩害による PC 鋼材の腐食やコンクリートの剥離が確認された。本橋は単純 PC ポストテンション T 桁の 5 径間 4 主桁 (G1~G4 桁) からなる支間長 34.3m、全幅員 7.2m の橋梁である。

載荷実験は Fig.1 に示す第一径間を対象とした。静的載荷実験では橋梁の破壊に至るまでの実験を想定し、Fig.2 の Loading-1~Loading-5 に示す載荷プロセスに従って、損傷が多くみられた外桁の支間中央に載荷を行っ

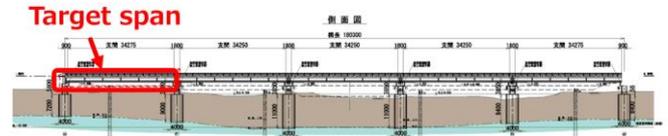


Fig. 1 Target bridge and target span

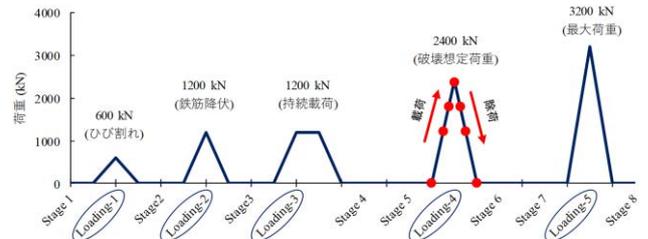


Fig. 2 Static loading and dynamic test histories

た。載荷実験とともに、各載荷段階における振動特性を把握するために、Fig.2 の Stage1~Stage8 に従って、衝撃加振実験を行った。計測した加速度を用いて、確率部分空間法 (Stochastic Subspace Identification : SSI)²⁾により振動特性の同定を行った。

3. 荷重 - 変位関係

載荷を行った G1 桁の荷重 - 変位関係について、Loading-1~Loading-3 までの載荷では弾性的で線形の挙動を示していることを確認している。一方で Loading-4 と Loading-5 によって残留変位が観測され、非線形の挙動が確認された。3次元 FEM 解析では線形・非線形の挙動を含む Loading-4 に着目する。初めに、荷重 - 変位曲線の剛性や初期勾配に影響を与えるパラメータを確認するために、プレストレス力、コンクリート圧縮強度、引張強度、密度、PC 鋼材のヤング率、降伏応力に対して、設計書から得られた値を基準値とし、 $\pm 10\%$ 以内で繰り返し変化させて有限要素解析を行った。この結果より、モデルアップデートに有用であるパラメータを選定した。しかし、非線形挙動や残留変位の再現が困難であることや、弾塑性挙動の再現性向上には選定したパラメータ (プレストレス力、コンクリート圧縮強度、コンクリート引張強度、コンクリート密度) を変更させ、数千通りの解析を行う必要があり、膨大な計算時間を要することが予想される。以上の理由から、全結合ニューラルネットワーク (Fully Connected Neural Network:

FCNN) を用いた代替モデル (Surrogate model) の適用について検討を行った。選定したパラメータを有限要素解析に適用させ、計算負荷を減らすために Loading-4 の解析ポイントを Fig.2 の赤点で示したように 7 点設定した。解析で出力したデータセット 1000 個で構成した FCNN によるモデルアップデート³⁾の結果と実験の Loading-4, ファイバーモデルの荷重-変位曲線を Fig.3 に示す。Fig.3 より、モデルアップデートによってファイバーモデルでは再現ができなかった非線形の挙動の再現性向上が確認できる。また、弾性挙動と残留変位についても実験値に近い挙動が再現できた。

4. 固有振動数の推移

固有振動数の推移について、衝撃加振実験のデータと FEM 解析と並行して行った固有値解析のデータの比較結果を Fig.4 に示す。対象橋の支承部が機能しないという仮定で、橋軸方向を固定した固有値解析も共に示している。実験データからは、一部曲げ 1 次振動数の上昇が確認され、また曲げ 2 次モードについては右肩下りの傾向を示す。しかしながら、終局状態を除いて、いずれのモード振動数についても载荷進行に伴う振動数の変化はほとんどないとも言える。

固有値解析からは、曲げ 1 次振動数の傾向の再現ができていない。また、橋軸方向の支承を固定することにより、曲げ 1 次振動数には大幅な増加、曲げ 2 次振動数には若干の増加が確認された⁴⁾。曲げ 2 次モードについては橋軸方向の支承を固定する条件で、実験と類似の傾向が見えた。全体的な傾向としても再現が不十分であった。ひび割れ発生による減衰特性の変化も考えられるが、固有値解析では反映できないことから、非線形の動的応答解析による解析時系列から振動特性を検討する必要があると考えられる。

5. 結論

初期プレストレス力、コンクリートの圧縮強度、引張強度および密度が初期勾配に影響を与え、PC 橋梁の 3 次元 FEM 解析におけるモデルアップデートに有効なパラメータであることを確認し、弾性挙動・非線形挙動・残留変位については、ファイバーモデルと比較して再現性の向上が確認できた。今後は、異なるパラメータやコンクリートモデル、材料特性の構成則や解析の条件等に関する検討を行う必要がある。さらに、今回は FE 解析の計算負荷を減らすために解析ポイントを 7 点に設定したが、特に非線形挙動の計算は解析ポイントが少ない場合、計算結果の精度が低下する恐れがあるた

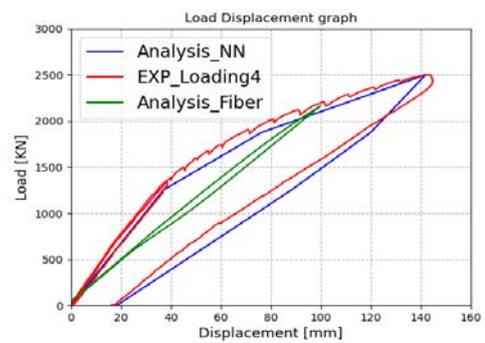
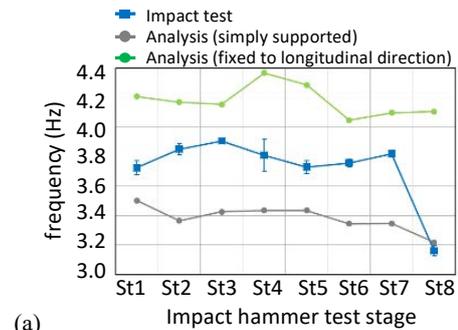
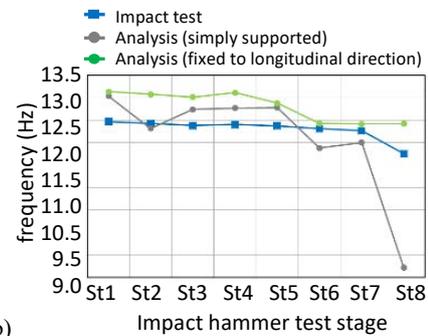


Fig.4 Load-displacement curve (G1-girder)



(a)



(b)

Fig.5 Frequency w.r.t. loading history: (a) 1st bending mode; (b) 2nd bending mode.

め、解析ポイント数についても検討が必要である。固有値解析による振動数推移の再現について、全体的な傾向としても再現が不十分であった。今後は、非線形の動的応答解析による解析時系列から振動特性を検討する必要があると考えられる。また、除荷時にはプレストレスによって損傷による剛性低下が表れにくいため、振動特性を評価する際には、载荷の履歴曲線を考慮に入れるなど、改善が必要である。

【参考文献】

- 1) 近藤ら：現地载荷試験に基づく PC 橋の橋梁性能および振動モニタリング, 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol.75, No.2, pp.1_51-I-I_62, 2019.
- 2) Van Overschee, and De Moor : Subspace identification for linear systems: Theory-implementation-applications. Springer Science & Business Media; 2012.
- 3) Kwak : 実 PC 桁橋載荷実験の有限要素解析による再現性とモデルアップデート, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 2023.
- 4) 金哲佑: 橋梁点検と構造ヘルスマニタリング, 橋梁と基礎, Vol.54, pp.46-51, 2020.