

実 PC 橋の載荷実験に基づく耐荷性能と振動特性の推移に関する研究

京都大学大学院 学生会員 ○近藤 洋佑 京都大学大学院 正会員 林 厳
土木研究所 正会員 大島 義信 京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. はじめに

近年、PC（プレストレスコンクリート）橋に関して多くの劣化・損傷事例が報告されており、これらを適切に維持管理するため、PC 橋の健全度を定量的かつ簡易的に評価できるモニタリング手法の開発が喫緊の課題となる。

橋梁の健全度評価は、これまでも様々な手法が提案されており、その手法の一つとして振動モニタリングが提案されている。しかしながら、架橋状態にある実 PC 橋の耐荷性能と振動特性の関連性についてデータが不足しており、振動モニタリングによる橋梁の健全度評価まで至っていないのが現状である。

本研究では、実 PC 橋に対して耐荷力実験を行い、架橋状態にある PC 桁の破壊までの各状態に対して振動実験を行うことで、PC 橋の耐荷性能と振動特性の関係について明らかにすることを目的とする。

2. 対象橋梁ならびに実験概要

対象橋梁は、北海道羽幌町に位置する 4 本の PC ポストテンション T 桁からなる支間長 34.3m、幅員 7.2m の 5 径間単純 PC 桁橋である。Fig.1 に示す第一径間を対象とし、載荷装置・センサを設置する。対象橋梁は、沿岸地域に位置し、竣工後 50 年以上経過しており、主桁の塩害劣化が著しく、内部鋼材の腐食に起因する主桁のひび割れやコンクリートの剥離が確認された。

静的載荷試験では、2 台の 3000kN センターホール型油圧ジャッキを用いて、載荷ブロック上に設置した載荷梁を介して載荷した。また、載荷梁を水平に保つように油圧を制御しながら、Fig.2 に示す載荷プロセス（Loading-1- Loading-5）に従って静的載荷実験を行った。変位によりジャッキストロークを監視し、荷重はロードセルにより制御を行った。PC 橋の耐荷性能を把握するため、橋梁の変位およびひずみ応答を計測した。

さらに、載荷実験の各載荷状態における振動特性を把握するため、各載荷ケースの除荷後に車両走行実験およびインパクトハンマーによる衝撃加振実験を行った（Fig.2 の Stage 1～Stage 8 参照）。振動実験では、桁下に

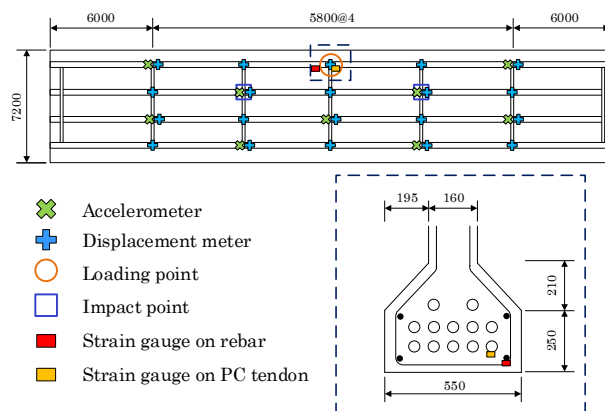


Fig. 1 対象橋梁概要とセンサ配置図 (単位: mm)

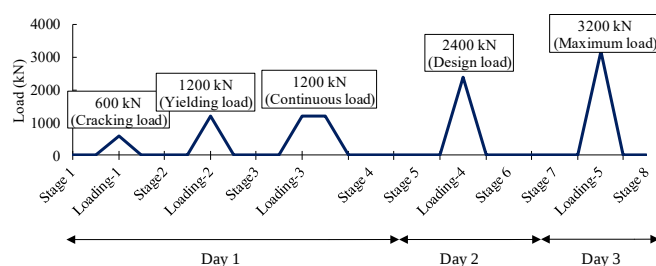


Fig. 2 静的載荷 (Loading-1- Loading-5) および振動実験 (Stage 1 - Stage 8) プロセス

設置した加速度計を介して橋梁の加速度応答を計測した。なお、橋梁の振動特性は、計測した加速度データを用いて、Stochastic Subspace Identification¹⁾により振動特性の同定を行った。

3. 静的載荷実験結果

載荷桁である G1 桁支間中央における荷重 - 変位曲線と G1 桁の鉄筋および PC 鋼材における荷重 - ひずみ曲線をそれぞれ Fig.3 と Fig.4 に示す。Fig.3 より、主桁の最外縁鉄筋が降伏する Loading-3 までは残留変位が発生しておらず、可逆的な挙動を示す。そして、設計上の最大耐力となる Loading-4 後には、16mm 程度の残留変位が生じる。その後、Loading-5 では、Loading-4 の除荷開始時 (Fig.3 の点 A) の変位および荷重まで再帰し、十分な耐荷力を有していることがわかる。Loading-5 における荷重レベルが低い場合の接線勾配 (下縁側のコンクリートに引張張力が生じるまで (Fig.3 の点 B)) は、Loading-1 から Loading-4 まで同程度であることから、プレストレスが残存して

キーワード PC 橋 破壊実験 振動実験 ヘルスモニタリング

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 工学研究科社会基盤専攻 TEL 075- 383-3421

おり、初期剛性の変化がないと推定できる。鉄筋のひずみに着目すると、Loading-2 の 1100kN 時点 (Fig.4 の点 C) は解析上の降伏荷重と近く、挙動も鉄筋の降伏であるように見えるが、除荷後に残留変位がほとんど生じてないことから、実際の降伏ではない。ひび割れ進展により付着力が減少したため、このような挙動が生じたと考えられる。また、PC 鋼材の荷重ひずみ曲線においても、同様な挙動が確認できる。PC 鋼材では、Loading-4 において残留ひずみが生じているため、降伏したと推測でき、その後、Loading-5 のときにひずみが 4000μ を超えた点で、鋼材の素線に破断が生じたと考えられる。

次に、PC 鋼材による復元力を評価するために残留変位に着目する。Stage 1 での各観測点の変位を基準とし、各ステージにおける残留変位の面積を算出した結果を Fig.5 に示す。Fig.5 より、PC 鋼材に残留変形が生じる荷重レベル (Stage 6 以降) だと PC 橋の残留変位が大きく増加することが分かる。また、Stage 4 と Stage 5 の間、Stage 6 と Stage 7 の間はそれぞれ荷重除荷後と、翌日の載荷開始前に計測している結果であるが、残留変位がゼロへ戻る方向へ推移している。これは、前述の通りプレストレスが残存しており、復元力が作用したものと考える。

4. 振動実験における同定結果

各振動実験で同定された曲げ 1 次および曲げ 2 次モードに対応する振動数の変化と MAC (Modal Assurance Criteria: モード信頼性評価基準) 値の変化を Fig.6 に示す。車両走行と衝撃加振実験により同定された振動数の傾向はそれぞれ類似しているが、多くのステージで $0.2 \sim 0.4\text{Hz}$ の差がある。これは、車両走行実験では、加振力が小さく、車両走行により様々な周波数成分が含まれるため、振動特性の同定精度が低くなったと考えられる。また、衝撃加振実験から同定された曲げ 2 次振動数は、全体的に右肩下がりであり、曲げ 1 次振動数よりも橋梁の剛性変化との関連性が強いと考えられる。一方、MAC 値による橋梁の剛性変化の検討は難しいと考えられる。

5. 載荷実験と振動実験の結果の比較

振動数の変化と構造物の剛性低下との関連性を調べるために、載荷実験による残留変位量と同定振動数を比較・検討する。

各ステージにおける残留変位量と衝撃加振実験から同定される振動数との関連性を Fig.7 に示す。なお、Stage 8

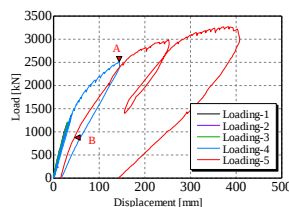


Fig. 3 荷重-変位曲線

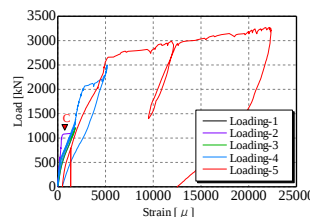


Fig. 4 荷重-ひずみ曲線 (左: 鉄筋, 右: PC 鋼材)

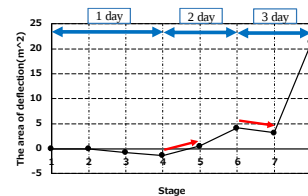


Fig. 5 残留変位量の推移

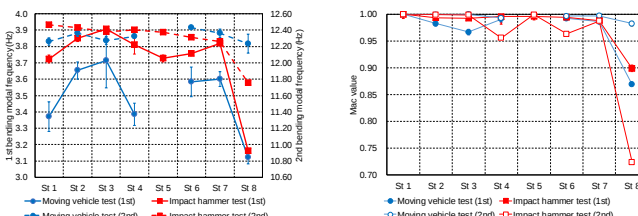
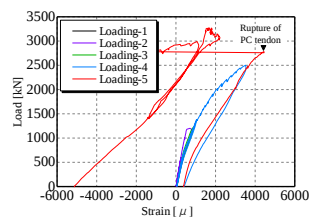


Fig. 6 振動特性の推移 (左: 振動数, 右: MAC 値)

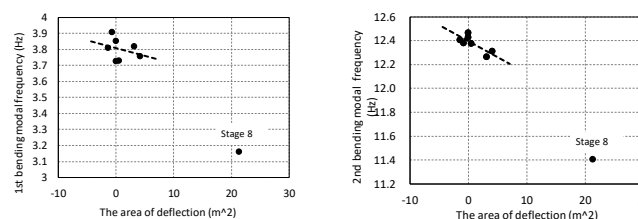


Fig. 7 残留変位量と振動数の関係 (左: 曲げ 1 次, 右: 曲げ 2 次)

は、大きく残留変形が生じた状態であるため、Stage 8 を除く、Stage 1 から Stage 7 までのデータに対して、最小二乗法を用いて図中に近似直線を描いた。この近似直線の傾きから、曲げ 1 次および 2 次振動数ともに残留変位との相関があることが分かる。特に、曲げ 2 次振動数については顕著であり、これは、PC 桁の室内損傷実験²⁾でも同様な傾向を示しており、特徴量として有用であることを示唆する。

6. まとめ

PC 橋の剛性変化と曲げ 2 次振動数の変化には高い相関があることが分かった。今回観測された橋梁性能と振動特性との相関については、数値解析によって検証する予定である。

【参考文献】 1) P. van Overschee and B. De Moor: Subspace Identification for linear Systems, Kluwer Academic Publishers, 1996. 2) O.S. Luna Vera, C.W. Kim, and Y. Oshima: Energy dissipation and absorption capacity influence on modal parameters of a PC girder, J. of Physics: Conf. series 842, 2017.