

津波により甚大な損傷を受けたPC橋の振動計測

(独)土木研究所	正会員	○松沢 政和
(独)土木研究所	正会員	木村 嘉富
(独)土木研究所		本間 英貴
本州四国連絡高速道路(株)		花井 拓

1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋の高齢化が急速に進行していく中、コンクリート橋において、多種多様な劣化要因による損傷事例が報告されている。このような劣化損傷が重篤化し、落橋に至るような致命的な損傷につながるおそれがあるため、損傷部材の性能を適切に評価するとともに、供用可否や通行規制の判断、補修・補強の要否を判断する必要があるが、損傷を受けたコンクリート橋における耐荷性能を評価する手法が確立されていないのが実状である。そこで、(独)土木研究所では、耐荷力評価手法の提案や検査・診断手法の調査・開発を目的とした臨床研究を行っている。

構造物の損傷検知に関する検査・診断手法として、材料劣化やひび割れなどによる剛性低下に起因する構造物の振動性状の変化に着目した研究が行われており、実橋を対象とした載荷試験において損傷の進行とともに固有振動数が低下し、破壊直前の振動数は 8 割程度に低下するという報告¹⁾もある。本研究では、構造物の損傷検知手法の確立を目的として、東北地方太平洋沖地震で発生した津波によって甚大な損傷を受け一部が落橋した普代水門管理橋を対象に、構造物の損傷度を振動性状の差異によって評価する手法を検証した。

2. 対象橋梁

2.1 橋梁概要

本橋は岩手県下閉伊郡普代村に位置する普代水門の管理橋である。本橋の主な橋梁諸元を表-1に示す。本橋は、写真-1および図-1に示すとおり3主桁から構成される4連の単純ポストテンションPCT桁橋であるが、津波により左岸側の2径間が落橋した。

表-1 対象橋梁諸元

橋 梁 名	普代水門管理橋
架橋位置	岩手県下閉伊郡普代村
橋 長	100.05m (支間：22.0m×4)
橋梁形式	単純ポストテンション PCT 桁橋×4 連
竣 工 年	普代水門：1984 年 3 月 (27 年経過(被災時))



写真-1 橋梁全景（被災直後）

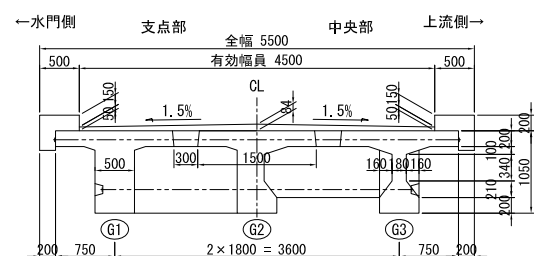


図-1 標準断面図

2.2 損傷概要

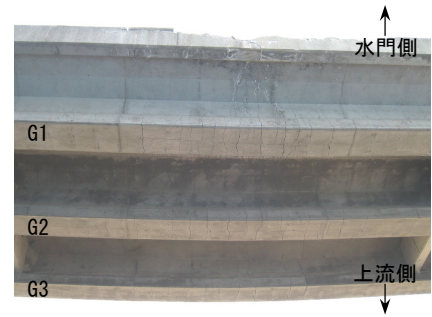
落橋を免れた右岸側の 2 径間も多数の曲げひび割れや地覆部の圧壊などの損傷が生じており、とくに第 3 径間の損傷が顕著であった(写真-2)。図-2 に第 3 径間の支間中央部付近において各桁下面から撮影した写真を加工したものを示すが、桁下面に軸方向ひび割れが生じているとともに、曲げひび割れが床版まで達していた(図中の矢印)。また、第 3 径間の G1 桁のみ両桁端の橋座部が損傷しており(写真-3)、津波により一時的に変形したのち、PC の復元力によりたわみが戻ったことが推察される。図-2 や写真-3 から第 3 径間の主桁のうち、水門側の G1 桁が最も損傷が大きいことがわかる。

図-3 にそれぞれの径間における各主桁の残留たわみの計測結果を示す。なお、本計測は桁下面から

光波測量により行った。第4径間の残留たわみが約8cmに対して第3径間は約30cmの残留たわみが生じていた。さらに、第3径間においては、3主桁のうち水門側のG1桁のたわみが最も大きく、この計測結果からも各桁において津波による作用力の差異があったことが窺える。



(a) 地覆部の圧壊



(b) 主桁に多数の曲げひび割れ

写真-2 第3径間の損傷状況

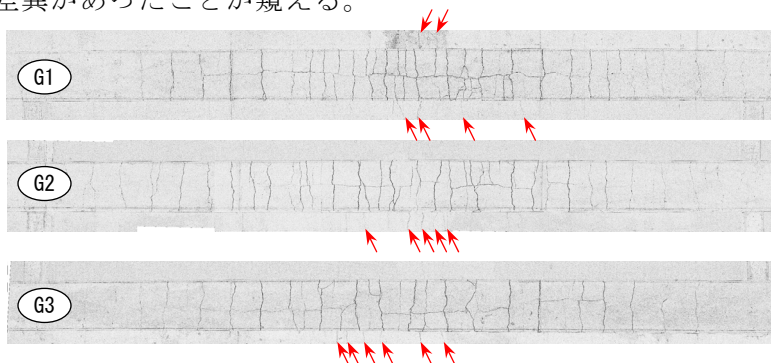


図-2 桁下面のひび割れ状況 (第3径間の支間中央部付近)

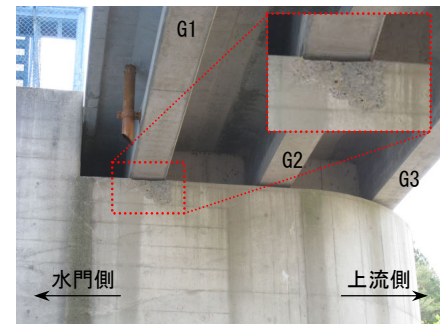
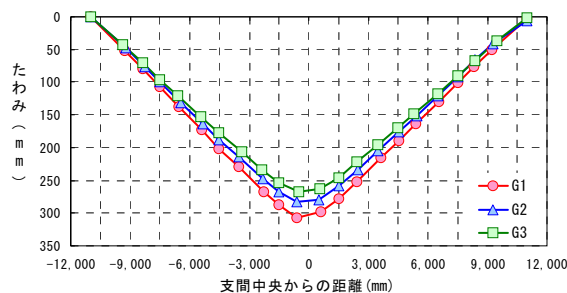
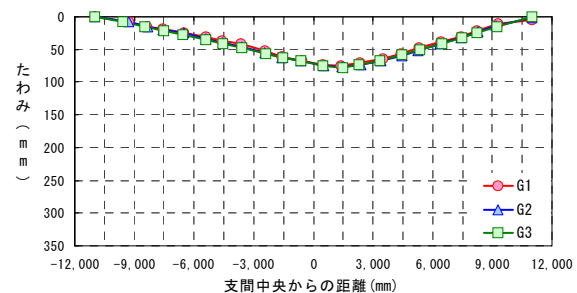


写真-3 橋座部の損傷状況 (第3径間)



(a) 第3径間



(b) 第4径間

図-3 残留たわみの計測結果

3. 損傷要因の推定

前述のとおり、一連の橋において落橋の有無や損傷程度の相違が確認されているため、その要因について分析した。まず、落橋の要因分析として、越流した水量を算出し、その全越流量が橋梁全体に分布荷重にて作用するものとして、桁の耐荷力との比較を行った。

その概念図を図-4に示す。なお、越流量の算出に際しては、既往の調査報告^{2), 3)}やシミュレーション⁴⁾を参考に越流深 H_T を 2~7m, 津波越流速度 V_T を 10m/s (36km/h) 以上とした。上記の前提から橋梁に作用する外力と橋梁の耐荷力との比較を図-5に示す。この図より橋梁の耐荷力以上の外力が作用したことにより、落橋したことがわかる。また、落橋を免れた径間について、簡易的な手法として、図-3の残留たわみから曲率を算出し、PC構造の非線形復元力モデル⁵⁾を用いて橋梁に生じた最大曲げモーメント

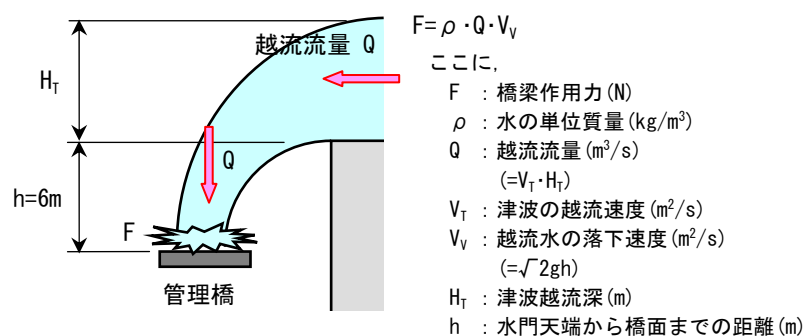


図-4 橋梁作用力の概念図

ントを推定した。なお、残留曲率は各径間における最大たわみを用い、曲げ耐力は振動計測後に採取したコアにて計測した材料試験結果を用いて算出した。図-6 に各径間の推定作用モーメントを示すが、損傷の著しい第3径間は道路橋示方書にて算出される曲げ破壊耐力を大幅に上回っており、落橋に至っていてもおかしくない荷重が作用したことがわかる。第4径間においても曲げ破壊耐力相当の荷重が作用したことが推察される。

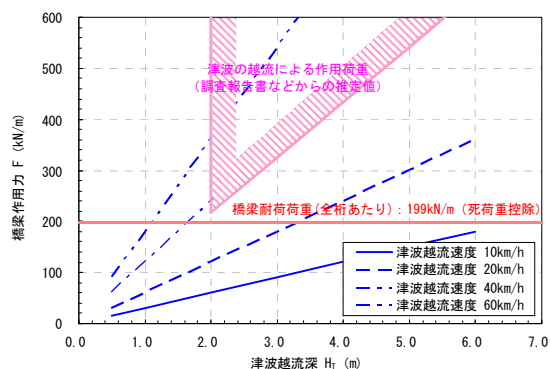


図-5 橋梁耐荷力と橋梁作用力の関係

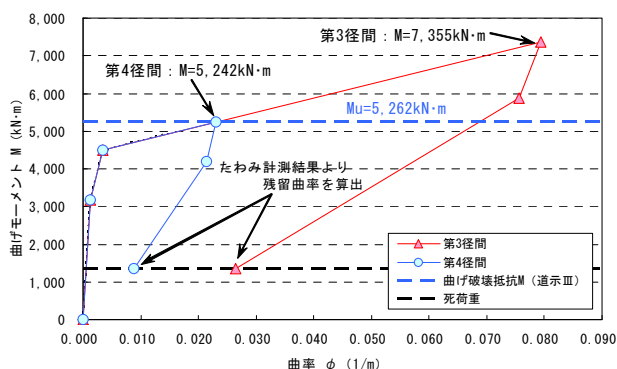


図-6 残留たわみによる橋梁作用荷重の推定

上記に対し第3径間および第4径間が落橋しなかった要因としては、地形や周辺の構造物の影響により越流量が異なったことなどが考えられる。写真-4 に当該橋梁周辺の航空写真を示すが、下流側の右岸側に窪地があることや、右岸側の交差道路のために BOX カルバートが設けられていることにより、越流量などが軽減されたと推察される。その軽減の度合いは右岸側に近いほど大きく、第3径間より第4径間の損傷が軽微であったと考えられる。

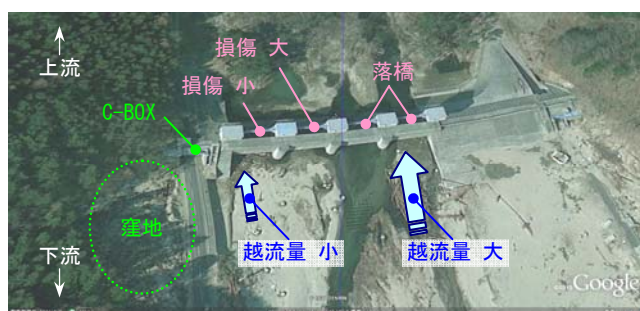


写真-4 橋梁周辺の上空写真

4. 振動計測

4.1 振動計測方法

振動計測は、主桁上の支間8等分点に加速度計を設置し、橋面上にて重錘落下法により加振して固有振動数の計測を実施した（写真-5）。なお、計測は図-7 に示すように、各主桁上に加速度計を設置し、支間の1/2点および1/4点にて加振して、各桁の固有振動数を計測した。

4.2 振動計測結果

表-2 に各径間における各桁上に加速度計を設置して計測



写真-5 振動計測状況

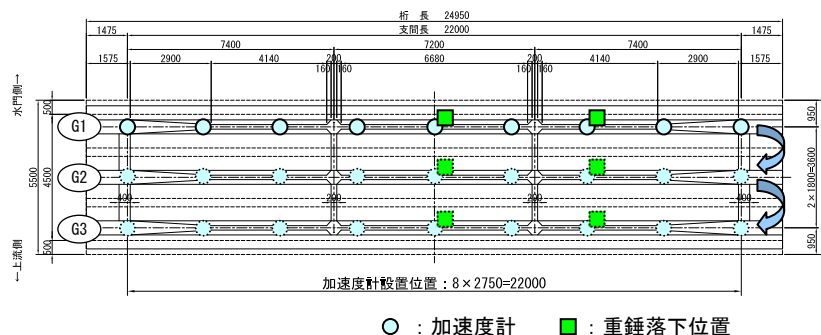


図-7 計測位置および加振位置

した固有振動数を示す。同表に図-3 の残留たわみから各桁の最大たわみ位置にて算出した残留曲率をあわせて示す。また、図-8 に健全時の解析値（梁モデル）に対する計測値の比率を示す。なお、解析値における弾性係数は材料試験用に採取したコアにて計測した動弾性係数を用いた。また、加振は前述のとおり、支間の 1/2 点および 1/4 点にて実施しているが、曲げに関する固有振動数に関しては両者に大差が無かったため、代表として 1/2 点にて加振した結果を示す。第 3 径間にて 2～3 割程度、第 4 径間にて 1～2 割程度の振動数の低下が確認された。ここで、第 3 径間の曲げ 2 次の低下度が曲げ 1 次および 3 次に比べ小さいのは、損傷位置が振動モードの節に該当するためと推測される。また、第 4 径間においては、高次の振動数の低下が顕著であった。さらに、各主桁上の振動数にて若干差異が確認され、概ね残留たわみ（曲率）の大小関係との相関を確認できた。

表-2 固有振動数計測結果および残留曲率

		固有振動数 (Hz)			残留曲率 (1/m)
		曲げ 1 次	曲げ 2 次	曲げ 3 次	
解析値(梁モデル)		4.31	17.24	38.78	—
第 3 径間	G1	3.07 (0.712)	14.31 (0.830)	27.99 (0.722)	0.0265
	G2	3.07 (0.712)	14.34 (0.832)	28.06 (0.724)	0.0184
	G3	3.07 (0.712)	14.40 (0.835)	28.04 (0.723)	0.0185
第 4 径間	G1	3.80 (0.882)	15.31 (0.888)	30.88 (0.796)	0.0070
	G2	3.73 (0.866)	15.31 (0.888)	30.85 (0.795)	0.0056
	G3	3.80 (0.882)	15.20 (0.882)	30.76 (0.793)	0.0088

※()内は解析値に対する計測値の比率を示す。

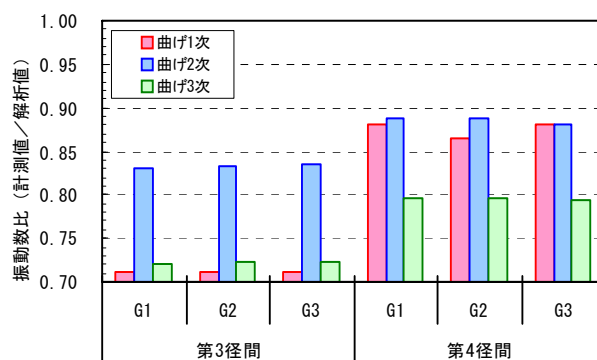


図-8 健全時の解析値に対する固有振動数比

5. まとめ

構造物の損傷検知手法の確立を目的として、甚大な損傷を受けた PC 橋を対象に、振動計測を実施した。本計測により得られた主な知見を以下に示す。

- ・ 損傷が著しい径間では、簡易な解析値と比較して最大で 3 割程度の固有振動数の低下が確認された。
- ・ 損傷位置が振動モードの節に該当する場合には、固有振動数の低下度が小さくなる。
- ・ 各主桁の固有振動数にて若干の差異が確認され、概ね残留たわみの大小関係との相関を確認できた。

謝辞 本調査にあたり、計測を快諾頂いた岩手県の関係各位をはじめ、計測にご協力頂いた(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会ならびに CAESAR メンテナンス技術交流会の皆様深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤雅史, 高木保志, 島田静雄: PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 341 号, pp.113-118, 1984.1
- 2) 土井宣夫, 越谷信, 土谷信高, 佐野剛: 地中写真判読による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の浸水域図の作成と津波被害, 岩手の地学, 第 41 号, pp.4-25, 2011.6
- 3) 内閣府中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告参考図集, 中央防災会議, 2011.9
- 4) 岩手県津波防災技術専門委員会: 【資料 No4】津波再現シミュレーション結果等, 第 2 回岩手県津波防災技術専門委員会, 2011.5
- 5) (社)プレストレストコンクリート技術協会: プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン, 1999.11