

報告 既設 RC 道路橋のモニタリングによる健全度評価

恒国 光義^{*1}・堤 洋一^{*2}・加藤 佳孝^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨: RCT 形式の既設道路橋についてモニタリングによる健全度評価について検討を行った。対象とした道路橋は架設から 35 年経過しており、交通荷重による主桁の疲労、地震による橋脚の損傷などが懸念された。そこで、本報告では、交通荷重に対する桁のひずみ、地震時の橋脚の加速度応答などの計測から健全度をモニタリングする方法について検討を行ったものである。

キーワード: モニタリング, RC 道路橋, 健全度

1. はじめに

近年の経済の低迷化や将来の投資余力の減少が予想される中で、既存ストックの有効活用が議論されており、道路橋など、既存コンクリート構造物の維持管理の重要性が高まっている。現存する膨大な数のコンクリート道路橋の維持管理を効率的に行っていくためには、モニタリング技術などを活用しながら道路橋の健全度を定量的に評価していくことが重要であると考えられる。

現状のコンクリート道路橋の維持管理では、目視検査などに基づいて、主に第三者影響度・耐久性能を考慮した補修がはじめに行われるものと考えられるが、さらに劣化が進行した場合、あるいは予測される場合には、劣化した部材の補強、供用制限、あるいは架け替えなどの対策のための定量的な判断が必要となってくる。そのためには、使用性能や安全性能が損なわれる状態を定量的に評価できる手法の確立が必要である。

現在、架設から 35 年が経過した RCT 形式の道路橋について、交通荷重に対する主桁の応答、あるいは地震時の橋脚の応答のモニタリングを試験的に実施している。この対象橋は、主桁に

曲げに起因した橋軸直角方向のひび割れが発生しており、交通量の増大や自動車の重量化による健全度の低下が懸念されているものである。

本報告は、交通荷重に対する主桁の応答や地震時の橋脚の応答の計測に基づく健全度の評価およびそのモニタリングについて検討を行った結果を報告するものである。

2. モニタリングの概要

2.1 対象橋の概要

写真-1 に示す対象橋は、T 桁を用いた鉄筋コンクリートの 3 径間連続道路橋（片側 1 車線、合計 2 車線）で、昭和 45 年の架設から既に 35 年経過したものである。交通量は約 24,000 台（8:00~20:00 の 12 時間）で、そのうちの約



写真-1 対象橋の概観

*1 東電設計（株） 技術開発本部 構造・耐震技術部 工修（正会員）

*2 (財)道路保全技術センター（正会員）

*3 東京大学生産技術研究所 講師 博（工）（正会員）

*4 東京大学生産技術研究所 教授 工博（正会員）

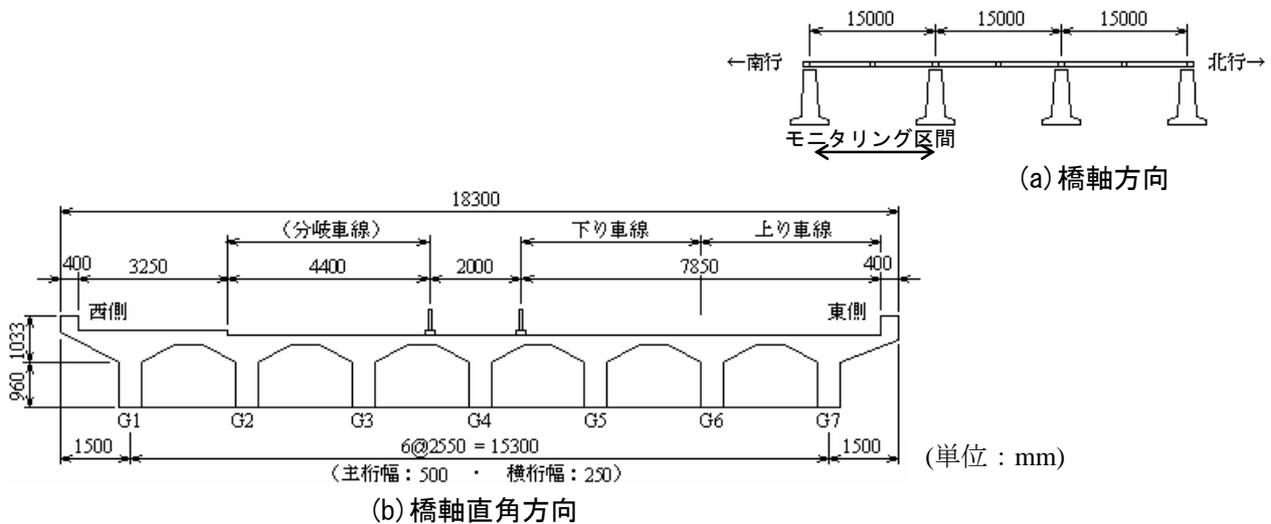


図-1 対象橋の諸元

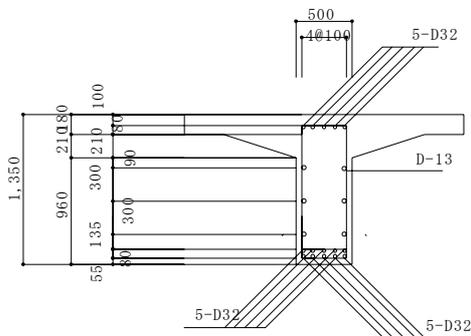


図-2 主桁断面の諸元 (単位: mm)



写真-2 主桁のひび割れの状況

11.5%が大型車となっていた。

対象橋の諸元、および主桁断面の諸元を、それぞれ図-1、図-2 に示す。3 径間とも径間長さは 15m である。モニタリングはこの 3 径間のうち、同図中に示すように南側の 1 径間を代表として実施している。主桁の桁高は 1.35m、ウェブ厚は 0.5m、支間中央付近の断面における引張鉄筋量は 79.42cm^2 (10-D32) で、この支間長のコンクリート橋としては一般的なものと考えられる。

主桁には写真-2 に示すように、最大曲げモーメント発生箇所付近に橋軸直角方向のひび割れが生じており、ひび割れの高さは床版にまで達している。超音波法(直角回折法)によるひび割れ深さの測定では、ウェブの両側からそれぞれ 200mm 以上となっている箇所も存在した。このことから、ひび割れの進展に伴う部材の剛性低下、交通量の増大、車両の重量化による上

部構造の耐荷・使用性能の低下が懸念された。また、設計当時からの準拠基準類の変遷に伴い、現行基準のものよりも地震に対する橋脚の安全性の不足も懸念されるものであった。

2.2 計測の概要

前述の通り、対象橋は上部構造(主桁)の耐荷・使用性能の低下、および地震に対する下部構造(橋脚)の耐力の低下とそれに伴う地震後の橋の機能の喪失が懸念された。そこで、本モニタリングでは、各構造要素(上部構造、下部構造)および全体系の挙動を計測するために、表-2 に示すようなセンサーとその設置を行った。詳細なセンサーの設置箇所は図-3 に示している。

このような計測から、交通荷重に対する主桁の安全性能(疲労を含む)あるいは使用性能、および地震時に対する橋脚の安全性能の満足度合、すなわち「健全度」の定量的な評価および推移のモニタリングを実施した。

表-2 計測対象と設置したセンサーの種類

対象	計測	指標	センサー		設置箇所
			種類	記号	
上部構造	部材剛性	固有振動数, たわみ	速度計	G7-V, G5-V	主桁側面
	疲労	累積損傷度	FBGセンサ	G7-FBG, G5-FBG	主桁下面
	荷重	ひずみ	高感度ひずみ計	W-1in, W-1out, W-2in, W-2out	主桁・床版下面
下部構造(橋脚)	応答(変形)	応答加速度	加速度計	1-ACC	橋脚天端
全体系	地震前後の機能	橋脚天端残留変位	傾斜計	1-K, 2-K	橋脚天端
		落橋の有無	超音波変位計	G7-U, G5-U	主桁端部~橋脚

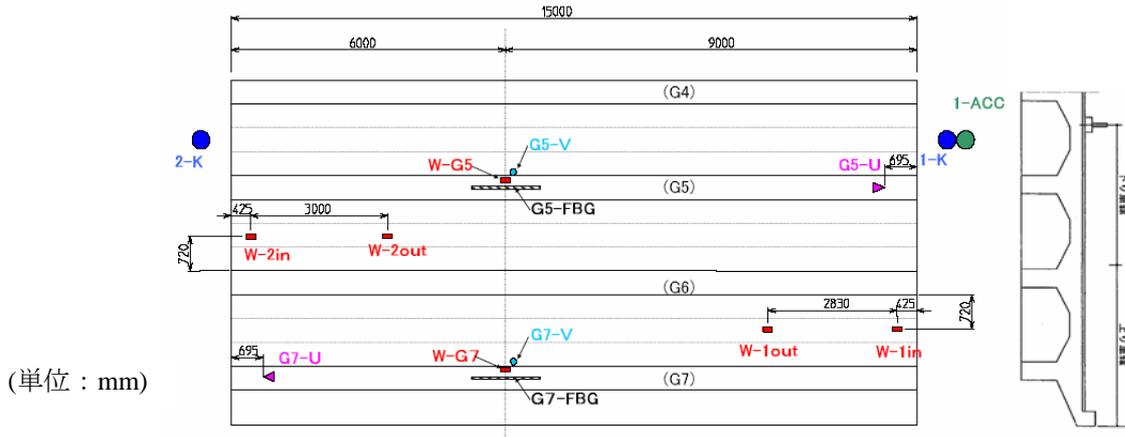


図-3 センサーの設置箇所

3. 計測結果と健全度評価

3.1 主桁の剛性の計測

(1) 振動に基づく評価

ひび割れを有する RC 部材では、繰返し荷重によるひび割れの進展，それに伴う剛性のさらなる低下が生じることも考えられる。そこで，主桁 G7 および G5 に取付けた速度計（図-3 中「G7-V」, 「G5-V」）による振動特性（固有周期），および荷重とたわみの関係で部材の剛性に関する計測を実施した。荷重の計測については 3.2 で後述する。

速度計 G7-V, G5-V の計測結果の一例を図-4 に示す。この記録は 373kN のラフタークレーン車が，上り車線をそれぞれ単独走行したときの記録である。図-5 には，ラフタークレーン車が通過した後に生じる自由振動時の変位時刻歴のフーリエ・スペクトルを示している。このときの卓越振動数は 7.9Hz であり，対象橋と同様な橋のもの同程度の値となっていた。この振動数の経時的な変化をモニタリングすることで，主桁の安全性能，使用性能の推移をみる事ができるものと考えられる。

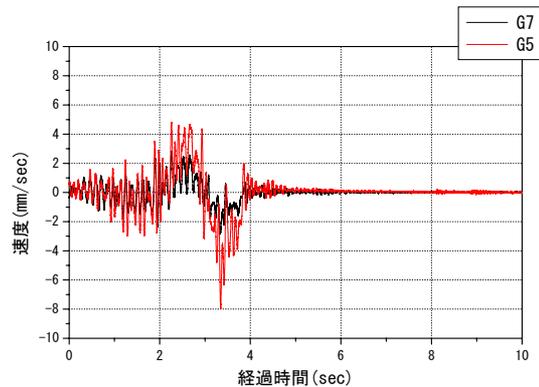


図-4 速度時刻歴(ラフタークレーン走行)

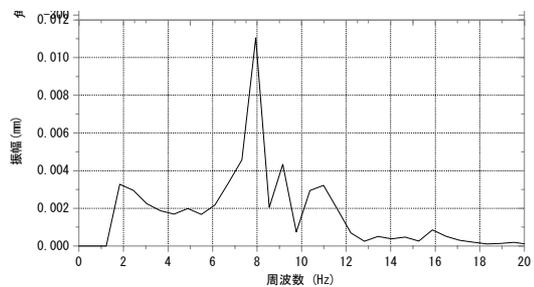


図-5 自由振動時のフーリエ・スペクトル (ラフタークレーン通過後)

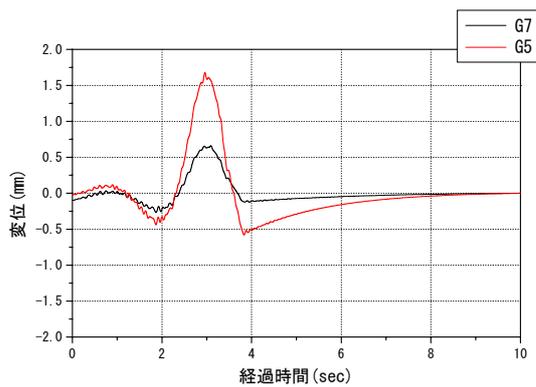


図-6 変位時刻歴(ラフタークレーン走行)

表-3 たわみの最大値(ラフタークレーン走行時)

	たわみ(mm)	
	計測値	計算値
G7	1.68	0.69
G5	0.65	0.28

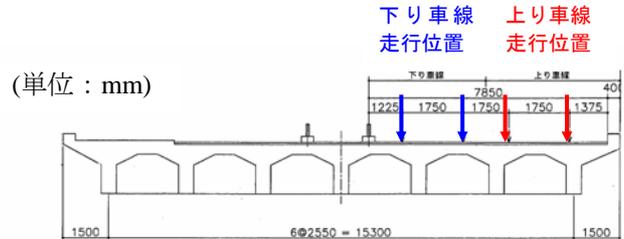


図-7 車軸の走行位置

(2) 荷重とたわみの関係に基づく評価

図-6には、速度時刻歴(図-4)を積分処理することで得られる変位時刻歴を示している。変位の最大値は表-3に示すとおりであった。

表中には、ひび割れによる部材としての剛性低下を考慮した線形計算で求めたたわみ(「3.2」で後述)も示している。計測値は計算値よりも大きなものとなっているが、この要因については、現在、確認中である。

3.2 荷重の計測

上り車線の床版下面に設置した高感度ひずみ計(図-3中 W-1in, W-iout), 上り車線の床版の高感度ひずみ計(同 W-2in, W-2out), および G7, G5桁の最大曲げモーメント発生位置の桁下面に設置した高感度ひずみ計(同 W-G7, W-G5)に基づき、上下車線をそれぞれ通行した車両の軸数、軸重、軸間距離のモニタリングを実施している。各車線の車両走行位置を図-7のように仮定して、格子理論から求めた各主桁の荷重分配係数¹⁾を用いれば、各主桁に作用する曲げモーメントを算出することができる。さらに、その結果から、最大曲げモーメント発生位置におけるたわみを求めることができる。なお、対象橋の主桁が、死荷重による最大曲げモーメント 745.3kN・m は、主桁のひび割れ発生モーメント 333.4kN・m を超過していることから、車両荷重によるたわみの

算出では、ひび割れを含む部材の剛性²⁾を用いた。

3.3 主桁の疲労の評価

RC部材では、ひび割れの発生から引張鉄筋降伏までの間は、中立軸、すなわちひび割れ高さは荷重によらず一定の値となる。対象橋の主桁断面では、ひび割れ発生後の中立軸高さは主桁下面から 1.15m の位置となり、ほぼ床版下面にまで達する。

そこで、図-8に示すように、FBGセンサで計測した桁下面のコンクリートのひずみから引張鉄筋位置、圧縮縁のひずみを求めることで、引張鉄筋および圧縮縁コンクリートの疲労の照査が可能となる。

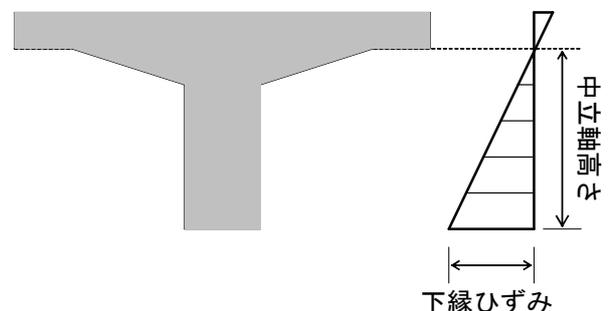


図-8 中立軸高さ と下縁ひずみを用いたひずみ分布の推定

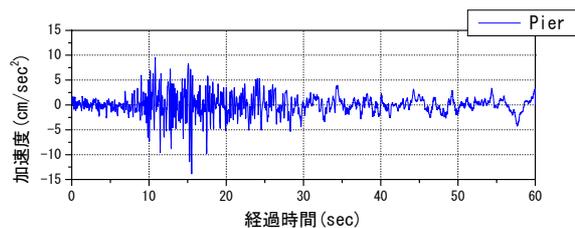
3.4 橋脚の変形の計測

橋脚天端および地中に設置した加速度計で記録された、新潟県中越地震時（対象地点の震度は3）の加速度時刻歴を図-9に示す。加速度は、地中、天端ともに橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向の3成分の計測を実施しているが、同図はそのうちの橋軸方向の記録を例として示している。この時刻歴を積分処理することで算出される地盤および橋脚天端の変位について、同時刻での両者の差分によって算出した相対変位時刻歴を図-10に示す。相対変位の最大値は0.04mmとなった。このとき、図-11に示すように、1つの橋脚に含まれる4本の柱を、柱1本の4倍の曲げ剛性 $4EI$ を有する1本の片持ち梁と置き換えたモデルで、梁の上端に上述の相対変位0.04mmを与えたときの梁下の曲げ剛性を算出し、対象橋の橋脚の柱の耐力との比較を行った。その結果、橋脚基部に発生する曲げモーメント $56.9\text{kN}\cdot\text{m}$ は、橋脚基部のひび割れ発生モーメント $593.3\text{kN}\cdot\text{m}$ と比較して小さく、この程度の加速度とそれによる変形では損傷が生じないこと分かり、記録された地震に対して橋脚は安全であることが確認できる。このような方法で地震時の橋脚の安全性能のモニタリングを実施することが可能となる。

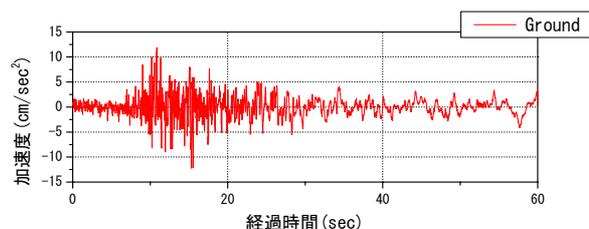
3.5 地震後の橋の機能

地震によって橋台・橋脚が傾斜あるいは移動して桁間での段差、あるいは落橋が発生することで、橋の機能が失われる可能性が考えられる。これらの地震後の機能・使用性について、橋台・橋脚天端に設置された傾斜計、および主桁端部と橋台・橋脚との変位のそれぞれについて、地震前後の変化を評価し、地震後の機能をモニタリングした。

上で用いた地震記録の発生前と発生後の橋脚天端の傾斜計（図-3中「1-K」）の値の比較、および主桁と橋脚との距離を計測している超音波変位計（図-3中「G5-U」）の値の比較を表-4に示す。なお、傾斜計は、橋軸方向および



(a) 橋脚天端



(b) 地盤

図-9 地震時の応答加速度の時刻例

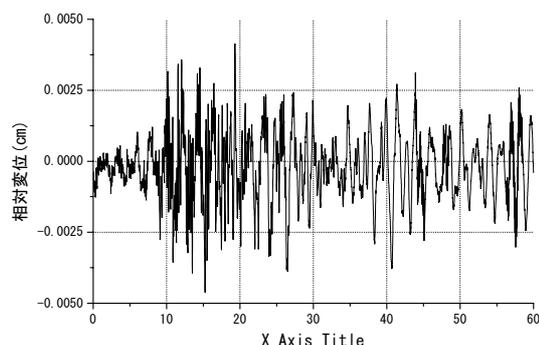


図-10 地盤と橋脚天端の相対変位時刻歴

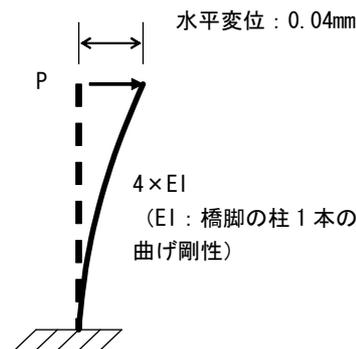


図-11 地盤と橋脚天端の相対変位による橋脚の柱基部の曲げモーメントの算出モデル

表-4 地震の発生前後における傾斜計および主桁と橋脚との距離の比較

		地震前	地震後	差分
橋脚天端	橋軸方向	-0.013	-0.018	-0.005
傾斜計(°)	橋軸直角方向	-0.068	-0.099	-0.031
超音波変位計(mm)		693.4	696.1	2.7

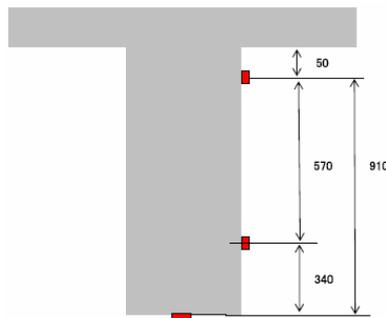


図-12 光学ストランドセンサを用いたひずみ分布と中立軸の計測

橋軸直角方向で計測されている。また、変位計測を行っている支承は、橋軸方向は自由、橋軸直角方向は固定条件となっているため、表-4中の距離は橋軸直角方向のものである。いずれの値も地震前後の差は小さいものと考えられる。また、先に示した橋脚の変形の照査と併せて、地震後における橋の状態を確認することができる。

4. 中立軸とひずみ分布の計測

前述のモニタリング・システムの試験運用後、図-12に示すような光学ストランドセンサー（OSMOS）による中立軸ならびに断面内のひずみ分布の計測を実施した。センサの設置は、最大曲げモーメント発生点（桁端部から6mの位置、図-3参照）を挟んで橋軸方向に前後1m、合計2mの範囲とした。約40分間の連続計測を行った結果を図-13に示すが、主桁下面のひずみの大きさ、すなわち荷重によらず、1.2mでほぼ一定の中立軸高さとなっている。また、この値は、主桁断面で計算した1.15mと同程度の値であり、妥当な計測結果であると考えられる。この計測から得られるひずみ分布を用いることで、荷重分配係数を用いることなく、センサーを設置した主桁に発生している断面力をコンクリートと鉄筋の合力の釣合いから直接評価することも可能になると考えられる。

5. まとめ

架設から35年経過したT桁を用いた鉄筋コン

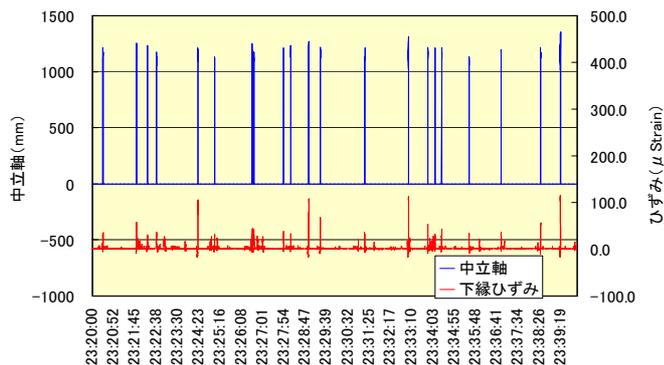


図-13 中立軸と主桁下縁の計測結果の例

クリート橋（T桁を用いた3径間連続道路橋）の計測に基づく健全度のモニタリングを実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)今回設置したセンサーから、常時の主桁の安全性能（疲労を含む）あるいは使用性能の経時変化、および橋脚の地震時安全性能、地震後の橋の使用性能をモニタリングすることが可能である。
- (2)計測された主桁のたわみは線形の構造計算によるものよりも大きな結果となり、計算条件と実際との違いなどを確認することで、モニタリング精度を向上させる必要がある。
- (3)主桁の中立軸は、荷重による影響がないことから、中立軸の変化を計測することは直接部材の損傷を検知するための有効な方法となると考えられる。

謝辞：本報告は（財）道路保全技術センターと東京大学生産技術研究所との共同研究の成果であり、関係各位のご協力に深く感謝の意を表す。また、東京大学生産技術研究所と（財）生産技術奨励会で実施している「コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会」で実施した中立軸の計測結果を使用させていただいており、関係各位のご理解に感謝する次第である。

参考文献

- 1)猪又稔：コンクリート橋の設計と計算，pp.121～163，工学出版株式会社，2001。
- 2)大塚・庄谷・外門・原：第三版 鉄筋コンクリート工学，pp.79～80，技報堂出版，1998。