

土木構造物の地震時挙動観測システムの高度化 ～強震モニタリングシステムの構築～

石井洋輔・大道一步・増田 仁・片岡正次郎

1. はじめに

国土交通省国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では、構造物の耐震設計基準の合理化・高度化及び地震時挙動の解明を目的として、昭和33年から地震応答観測を実施してきた。研究成果を、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編をはじめ、道路・河川・ライフライン施設等の土木構造物の耐震設計基準に反映している。さらに、観測記録は国総研資料やウェブサイト等で公開され、構造物の地震被害究明や、耐震技術の高度化のための研究に活用されている。

国総研は従来、地震計の価格等の理由により、橋等をはじめとした土木構造物の地震応答観測を一つの構造物あたり3箇所程度に厳選して行っている。この観測記録から、構造物の地震時挙動の分析も踏まえ、実地震時の被害状態等に照らして包括的に耐震設計法の妥当性を検証してきた。しかし、新たな構造形式の開発などを想定すると、部材毎の減衰特性等やその構造物全体の挙動との関係も精度良く把握することが必要と考えられる。

そこで、国総研が実施してきた地震時挙動観測システムを高度化し、構造物全体系の挙動を観測するシステム（以下「強震モニタリングシステム」という。）を構築した。

2. 従来の観測システムの概要と課題

従来実施してきた橋の地震応答観測は、個別の橋脚の卓越周期や支承部の挙動を観測することを目的として、図-1に示す3箇所程度で観測している。しかし、一つの橋脚に着目しているため、各部材ごとの減衰特性等の把握は困難である。

また、従来の観測では、地震記録の回収を現地で行う必要があり大規模地震発生時には、記録の回収に即時性がなく、人件費等のコストを要している。さらに、地震計の観測部（以下「センサー」という。）と観測記録の収録部が有線で接続されている

地震計は、配線等が複雑であり、設置コストが多くなるのが課題であった。

以上の課題を踏まえると、構造物全体系の地震時挙動の把握、記録回収の即時性確保、さらにセンサーの設置を容易にするためには、図-2に示すように、構造物の多くの箇所でも同時観測を行い、構造物全体系の挙動を観測できる無線通信観測システムの構築が重要である。しかし、図-2のような観測システムを構築するためには、安価な地震計の選定と、安定した無線通信網の構築が必要である。橋を対象とした地震応答観測は、既往の取り組み^{2)~5)}で多く行われているものの、いずれも配線による有線通信を用いて観測が実施されている。図-2に示すような無線通信を用いて、構造物を対象にした地震応答観測を実施した事例はみられない。

近年では、MEMS式加速度計などの小型かつ安価な計測機器が開発されており、従前は簡単に実現できなかった観測システムの構築が期待できる。また、通信速度が早く、広い範囲に伝送できる無線通

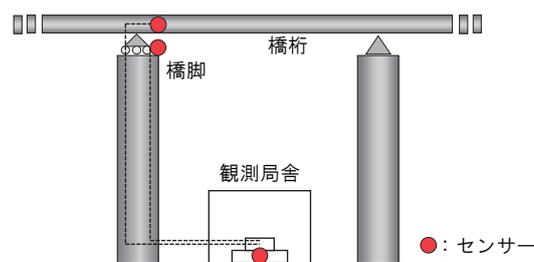


図-1 従来の観測システムの概念図

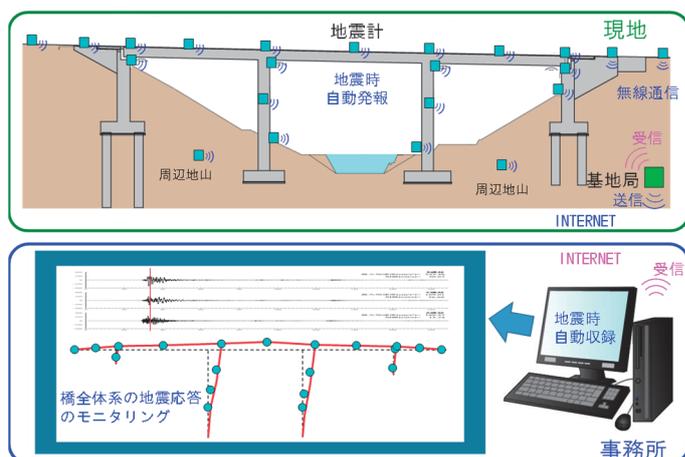


図-2 強震モニタリングシステム概念図

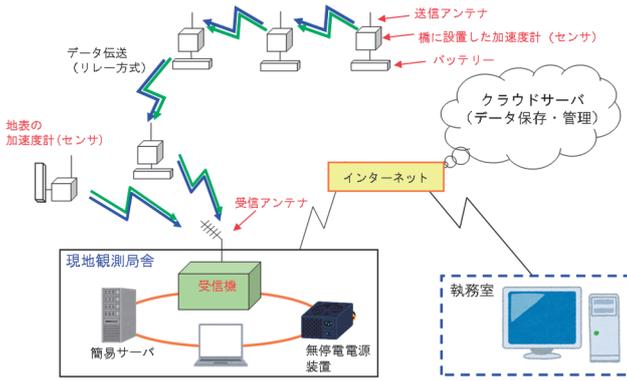


図-3 観測システムの全体構成概念図

信技術⁶⁾も活用されている。しかし、これらの新技術は、屋外での通信技術の検証や電源の確保など、維持管理面の検証が不十分であり、土木構造物の地震応答観測に適用できるかは不明である。

そのため、高架橋を対象に、無線通信を用いて強震モニタリングシステムを構築し、センサーの計測精度と無線通信技術の地震応答観測への適用性を検証した。

3. 新しい観測システム

3.1 観測システムの全体構成

構築した強震モニタリングシステムの全体構成を図-3に示す。センサーで観測された観測記録は無線通信で伝送され、現地観測局舎内の受信機に集約される。集約されたデータはインターネットを経由して、国総研のPCで収録、閲覧、管理等を行うことができる。

3.2 観測機器

3.2.1 構造物・地盤の挙動を観測するセンサー

構造物と地盤の挙動を観測するセンサーの性能を表-1に示す。本検討では、常時観測により、地震時と常時の比較観測を実施することを目的とし、地震時のトリガー方式による観測ではなく、常時稼働連続観測方式を採用した。

構造物の挙動を観測するセンサーは、観測記録を無線通信で収集するものを採用した。地盤の挙動を観測するセンサーは、地盤埋設型のため無線通信を行うことができず、有線で観測記録を収集するものを採用した。なお、構造物の挙動を観測するセンサーは、バッテリーで稼働しており、約2年間の連続観測が可能である。

3.2.2 間隙水圧計

地震時に地盤の液状化が懸念される構造物に対

表-1 構造物・地盤の挙動を観測するセンサーの性能

センサー種別	加速度計
計測レンジ	±10 m/s ²
感度	1 mm/s ² 以下
計測軸	3軸（水平2方向、上下1方向）
動作温度	-10 ~ 40℃で動作可能なもの
防水性能	IP65以上の性能を有するもの
重さ	1kg以下

表-2 地盤のセンサー（間隙水圧計、有線）の性能

センサー種別	圧力式水圧計
計測レンジ	0.035kg/mm ² 以上
動作温度	-10 ~ 40℃で動作可能なもの
防水性能	IP67以上の性能を有するもの

表-3 無線通信機能の性能

周波数帯	920MHz
通信速度	50Kbps
通信プロトコル	IEEE802.15.4準拠
接続機器数	最大64
無線送信出力	最大20mW
通信可能距離	市街地300m程度（20mW時）
リレー通信	可

し、液状化の現象を観測することを目的として、本検討では間隙水圧計も設置した。本検討で採用した間隙水圧計の性能を表-2に示す。なお、こちらも地盤埋設型のため、有線で記録を収集する。

3.3 無線通信機能

無線通信は、少ない電力で膨大なデータ量の通信と通信安定性を考慮できることを目的とし、920MHz帯の通信モジュールを採用した。さらに、屋外の土木構造物の挙動観測に用いるため、遮蔽物により無線通信に障害があることが考えられ、遮蔽物を避けて無線通信を行うことを想定し、観測機器同士でリレーして伝送する方式を採用した。本検討で採用した無線通信の性能を表-3に示す。

4. 観測システムの適用性検証

4.1 観測センサーの設置

橋長443.65m、4径間連続鋼非合成箱桁+3径間連続鋼非合成箱桁の河川橋を対象に、強震モニタリングシステムを設置した。観測センサーの設置位置概略図を図-4に、構造物に設置したセンサーの写真を図-5に示す。

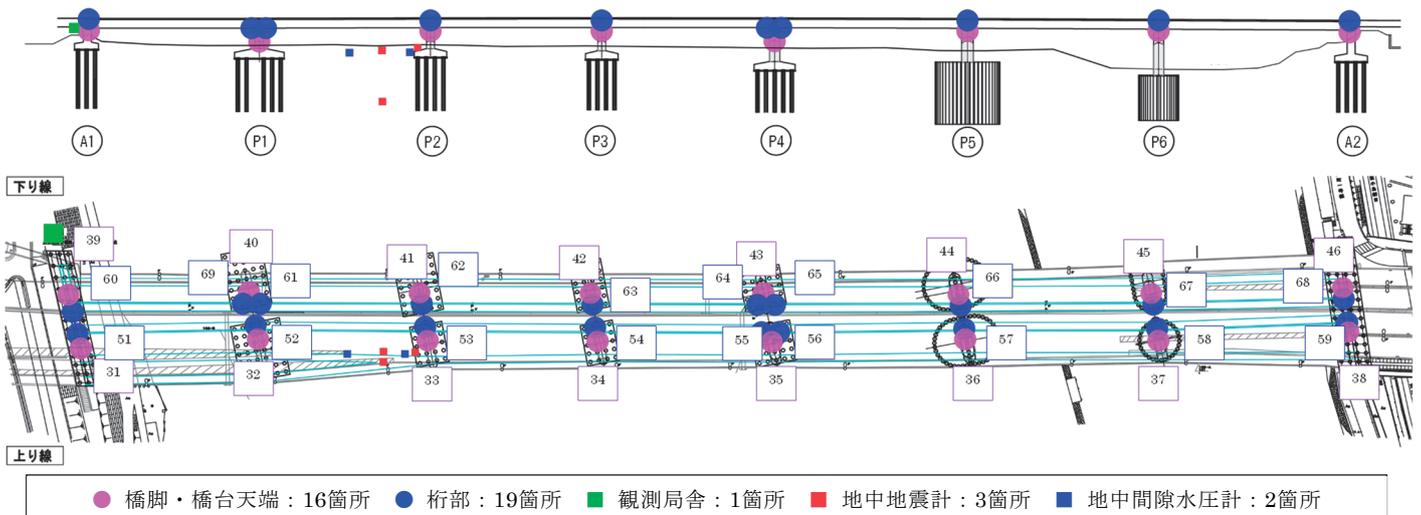


図-4 センサー設置位置概略図 (図内番号はセンサーID)



図-5 構造物に設置したセンサー

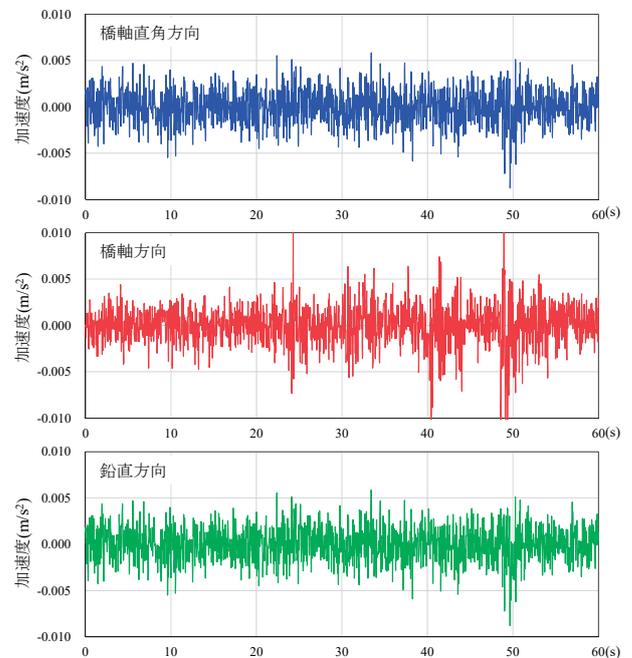


図-6 微動観測記録の時刻歴波形 (センサーID:39)

4.1.1 構造物の挙動を観測するセンサー (無線)

本システムは、構造物全体系の挙動観測を目的としており、構造物の挙動を観測するセンサーは、橋台と橋脚の天端に設置するとともに、連続桁の桁端部に設置した。なお、センサーは、橋脚等のRC部材には接着剤で接着し、桁等の鋼部材には磁石で固定した。

4.1.2 地盤のセンサー (有線)

地盤のセンサーは、上り線側堤外地のP1-P2間に設置した。地中の間隙水圧計は、地盤の液状化判定結果より液状化の可能性が高い層(GL-5.0m)を対象として、P1-P2の中央とP2フーチング近傍に設置した。地盤の挙動を観測する地中地震計は、2つの間隙水圧計の中央位置の基盤層(GL-28.5m)と地表相当(GL-2.0m)およびP2フーチング上面に埋設した。

4.2 観測記録

4.2.1 微動観測記録の時刻歴波形

本システムの観測記録の妥当性を検証するため、

微動観測記録を用いて評価を行った。対象橋に設置したセンサー(図-4に示すID:39)で得られた微動観測記録の時刻歴波形を図-6に示す。既往の検討では、観測記録を常時継続して無線通信するのは困難であり、波形が途切れてしまうことがあった⁶⁾。しかし、本システムで観測された波形は途中で途切れることなく、無線通信の伝送が十分できていたことを確認した。

4.2.2 微動観測記録のフーリエスペクトル比

対象橋で得られた微動観測記録のA1橋台に対するP1、P2、P3橋脚のフーリエスペクトル比を図-7に示す。橋軸直角方向に着目すると、周期0.8s付近のピークはP1、P2、P3で確認できた。これは、設計時

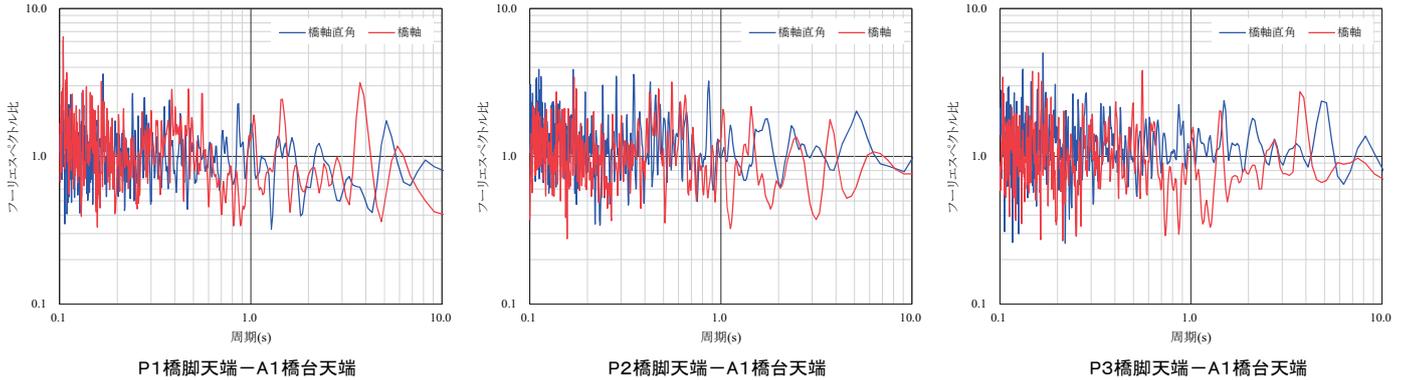


図-7 微動観測記録のフーリエスペクトル比

の固有周期と概ね一致し、本検討で構築したシステムで観測された波形は、構造物の固有周期を推定できる精度であることを確認した。

また、P3橋脚のみ、橋軸方向のフーリエスペクトル比の周期0.5s付近にピークが明瞭にみられるなど、橋脚ごとに異なる振動特性を有している可能性が確認できた。

以上より、本検討で構築した強震モニタリングシステムの無線通信で収集された記録は、解析にも十分使用できることが確認され、構造物の地震応答観測に適用できる精度であった。

5. まとめと今後の展開

今後、構築した強震モニタリングシステムを運用し、記録取得を継続するとともに、全国の様々な構造形式の橋梁の分析・検証を行う。さらに、挙動観測に加えて、強震時や被害発生時に、観測結果から構造物の地震被害を検知する即時被害検知機能の検証を行う予定である。

謝辞

強震モニタリングシステムの設置にあたり、関東

地方整備局の管理担当事務所より設置方法等のご助言をいただいた。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 石井洋輔、片岡正次郎：道路橋における強震観測の耐震設計基準への貢献と今後の展望、第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.263～270、2017
- 2) 山本泰幹、藤野陽三、矢部正明：地震観測された長大吊構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性、土木学会論文集A、Vol.65、No.3、pp.738～757、2009
- 3) 藤野陽三、シリゴリンゴディオンシウス、並川健司、矢部正明：2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答、土木学会論文集A1、Vol.69、No.2、pp.372～391、2013
- 4) 坂井公俊、本山紘希、室野剛隆、盛川仁、荒木正之、松田滋夫、浦口尚貴：高架橋の地震時不動変位計測のための高密度地震観測システムの構築、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.72、No.1、pp.107～118、2016
- 5) 篠原聖二、中村雄基、玉置脩人、高橋良和：阪神高速道路ネットワークにおける地震観測データの活用、第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.23～30、2018
- 6) 石井洋輔、片岡正次郎：高架橋における地震応答観測技術の現地観測実験、第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集、pp.76～81、2019

石井洋輔



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室研究官
ISHII Yosuke

大道一步



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室研究官、現 国土交通本省不動産・建設経済局情報活用推進課
OOMICHI Kazuho

増田 仁



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室長
MASUDA Hitoshi

片岡正次郎



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室長、現 道路構造物研究部道路構造物管理システム研究官博士（工学）
Dr. KATAOKA Shojiro