

無線通信を用いた 橋全体系の強震モニタリングシステムの開発

石井 洋輔¹・山田 雅行²・荒木 正之³・中尾 吉宏⁴

¹正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)
E-mail: ishii-y92ta@mlit.go.jp (Corresponding Author)

²正会員 株式会社ニュージェック 研究開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

³非会員 株式会社 aLab 代表取締役社長
(〒151-0053 東京都渋谷区代々木 1-42-10 ブルックリンコート 2F)
E-mail: araki@logvox.jp

⁴正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)
E-mail: nakao-y82ac@mlit.go.jp

道路橋は、全体系の複雑な挙動を観測することが困難であり、地震時挙動観測の高度化が課題であった。本研究は、道路橋の全体系の地震時挙動を解明することを目的として、MEMS 式加速度センサーを道路橋の複数個所に設置するとともに、多点の地震時挙動の観測に適した無線通信を用いて構築し、橋全体系の複雑な挙動を観測する強震モニタリングシステムを開発した。観測システムは、多数のセンサーを扱うことに適した通信プロトコルやリレー伝送を構築することで、屋外で多数の観測記録を無線で回収できる準リアルタイムの橋の多点連続観測を可能にした。強震モニタリングシステムで観測された記録は、波形解析にも十分使用できることが確認され、橋全体系の複雑な挙動を捉えることができた。

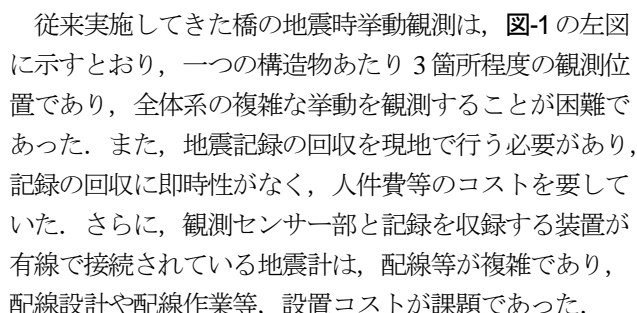
Key Words: Strong motion monitoring system, wireless communication, structure behavior observation, seismic observation record

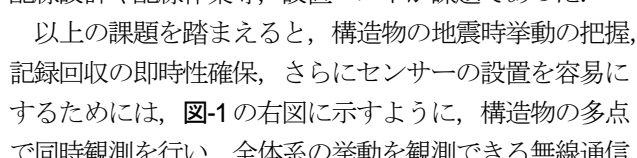
1. はじめに

国土技術政策総合研究所 (以下、「国総研」という。) では、道路橋や盛土、河川構造物等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 年から地震時挙動観測を実施してきた。研究成果を、道路橋示方書・同解説¹⁾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。

国総研は従来、地震計の価格等の理由により、道路橋等をはじめとした土木構造物の地震時挙動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²⁾。この観測記録から、構造物の地震時挙動の分析を踏まえ、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、道路橋は架設規模が大きいのものが多く、耐震補強技術の高度化等の影響もあり、

道路橋の全体系挙動の複雑化が考えられる。今後、新たな構造形式等の開発には、構造全体の挙動や部材ごとの振動特性の関係を精度良く把握することが必要であることが考えられ、全体系の複雑な挙動の観測は重要である。

従来実施してきた橋の地震時挙動観測は、図-1 の左図に示すとおり、一つの構造物あたり 3 箇所程度の観測位置であり、全体系の複雑な挙動を観測することが困難であった。また、地震記録の回収を現地で行う必要があり、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た。さらに、観測センサー部と記録を収録する装置が有線で接続されている地震計は、配線等が複雑であり、配線設計や配線作業等、設置コストが課題であった。

以上の課題を踏まえると、構造物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-1 の右図に示すように、構造物の多点で同時観測を行い、全体系の挙動を観測できる無線通信

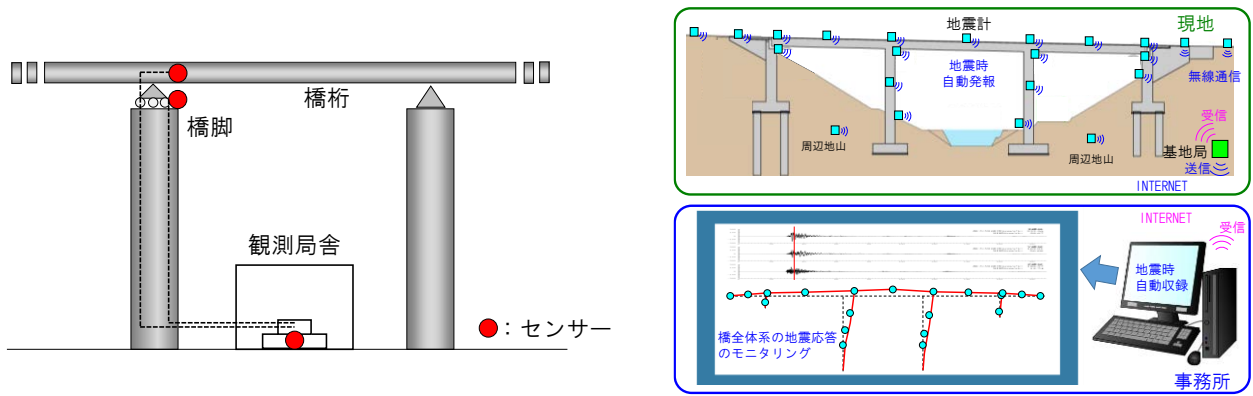


図-1 これまでの道路橋の地震観測（左図）と多点観測（右図）

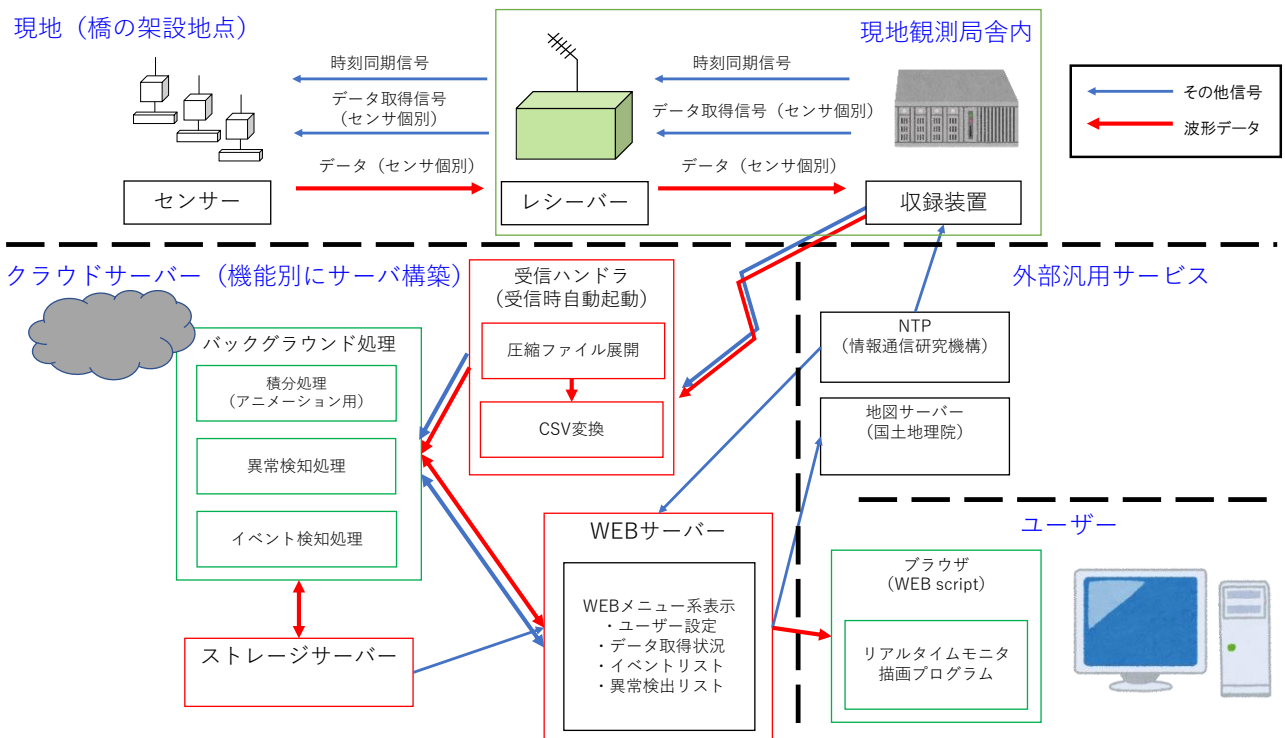


図-2 強震モニタリングシステムのシステム構成の概要図

観測システムの構築が重要である。しかし、図-1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や、外環境に対しても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観測は、既往の取り組み³⁾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-1の右図に示すような無線通信を用いて、橋を対象とした地震時挙動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信技術⁸⁾も使用されるようになってきている。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、道路橋の地震時挙動観測に適用でき

るかは不明であった。

そのため、本研究では、MEMS式加速度センサーを道路橋の複数個所に設置するとともに、多点の地震時挙動の観測に適した無線通信を構築して、橋全体の複雑な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）を開発した。強震モニタリングシステムで観測された記録より、橋全体の複雑な挙動を分析した。

2. 強震モニタリングシステムの概要

(1) 観測システムの全体構成

本研究で構築した強震モニタリングシステムの全体構

表-1 加速度センサーの仕様

センサー種別	MEMS 加速度計
観測方式	24 時間常時稼働連続観測
計測軸	3 軸 (水平 2 方向, 鉛直 1 方向)
計測レンジ	水平±2G, 鉛直+1G/-3G
分解能	0.004cm/sec/sec 以下
他軸感度	±3%以下
ノイズ	1 秒あたり 0.1cm/sec/sec 以下
サンプリング周期	100Hz
時刻同期	GPS を基とした無線同期
動作温度	-10 ~ 40°C
防水性能	IP67
重さ	600g
電源	バッテリー (2.7V 以上)

成を図-2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、現地観測局舎内の収録装置に集約される。集約されたデータはインターネットを経由して、クラウドサーバに保存され、計算処理をするとともに、PCで閲覧・管理等を行うことができる。

(2) 観測機器

構造物や地盤の挙動を観測するセンサーの性能を表-1に示す。強震モニタリングシステムは、橋の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、24 時間常時稼働連続観測方式を採用した。

なお、センサーはバッテリーで稼働しており、本研究で構築した強震モニタリングシステムでは、維持管理の持続可能性を踏まえ、約 2 年間の連続観測を可能とするバッテリー容量とした。

(3) 強震モニタリングシステムの現地設置

a) センサーの設置

センサーは、MEMS 式加速度センサー、2 個のバッテリー、アンテナによって構成されている。バッテリーは電力容量と消費電力より、1つのセンサーに対し2個必要である。それぞれ、接着面に強力な磁石が配置され、磁石による設置を想定した設計である。

鋼製桁部への設置は、図-4に示すように、センサーの接着面に配置された強力な磁石を鋼材に貼り付ける。地震計の位置は、設置方位や観測方向に注意する必要があるが、磁石で設置しているため、それらの調整作業が容易である。



図-4 鋼製桁部設置例



図-5 コンクリート部設置例



図-6 既存局舎の例

図-5にコンクリート部への設置例を示す。橋脚や橋台のコンクリート部への設置は、図-5(右)に示すように、表面がコーティングされた座金を強力ボンドでコンクリート部に固定し、その座金にセンサーの接着面に配置された強力な磁石で貼り付けた。鋼製桁部への設置と同様に磁石で設置しているため、センサーの設置方位や観測方向の調整は容易である。

なお、図-4の設置例は、センサーの設置面が水平方向、図-5の設置例は、設置面が鉛直方向になっているが、センサーの取り付け方向が異なってもセンサーは正常に動作し、方向等を補正したデータとして収録される。

また、観測局舎までの電源ケーブルおよび信号ケーブル



図-7 強震モニタリングシステムで採用した観測局舎



図-3 強震モニタリングシステムの設置橋位置図
(地理院地図に加筆)

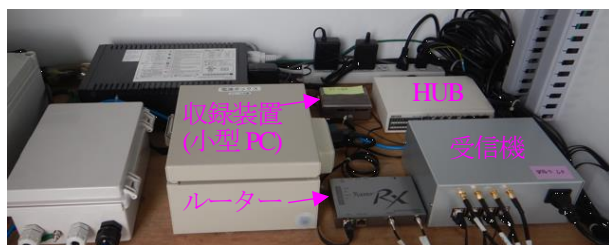


図-8 局舎内部

ルが不要なため、観測位置にセンサーを配置することで設置作業は完了する。

b) 現地観測局舎の設置

橋を対象とした地震観測では、従前は図-6に示すような大がかりな現地観測局舎が必要であった。強震モニタリングシステムにも現地観測局舎が必要であるが、収録装置や受信機器の小規模化等により、図-7に示す小型キャビネットを採用した。図-7では、商用電源を引き込む柱に小型キャビネットを固定している。

局舎内部を図-8に示す。主要な機器は、無線式センサーの電波を受ける受信機、地震記録の収集、取得、インターネットへの送信などの制御を行う収録装置、インターネット接続のためのルーター、それらの機器類を LAN 接続する HUB である。なお、多くの観測地点で SIM を用いた無線インターネット通信を採用している。

c) 強震モニタリングシステムの設置

従前の観測システムは、配線設計等も踏まえ設置に 2 週間程度有していたが、a)と b)のような設置方法を採用することより、橋の規模にもよるが、本システムは概ね 2 日程度で設置することが可能である。強震モニタリングシステムを表-2 に示す道路橋 23 橋に令和元年度～令

表-2 観測システム設置橋一覧

橋 No	形式	基礎形式	橋長 (m)	無線式センサ	
				橋	地盤
1	合成箱桁橋	直接基礎	150	12	1
2	アーチ橋	直接基礎、杭基礎 (深礎杭)	315	9	1
3	鋼箱桁橋	直接基礎	470	9	1
4	鋼桁橋	場所打ち杭	514	31	1
5	連続鋼桁橋	既製 PC 杭	439	9	1
6	鋼桁橋	既製鋼杭	240	9	1
7	PC 箱桁橋	杭基礎	198	9	1
8	床版橋	杭基礎 (場所打ち杭)	577	9	1
9	鋼桁橋	杭基礎 (場所打ち杭)	216	21	1
10	箱桁橋	杭基礎 (場所打ち杭)	809	10	0
11	箱桁橋	杭基礎	886	10	0
12	鋼床版橋	ケーソン基礎	280	10	0
13	PC 床版橋	場所打ち杭	268	9	1
14	PC 床版橋	杭基礎	1,200	9	1
15	PC 桁橋	杭基礎	329	10	0
16	鋼桁橋	杭基礎	152	13	1
17	連続鋼合成鋼桁橋	杭基礎	234.25	10	0
18	鋼逆ランガ一橋	直接基礎	152	13	1
19	鋼桁橋	杭基礎	176.65	36	2
20	少数主桁橋	杭基礎	332	29	1
21	箱桁橋	杭基礎	156.7	19	1
22	上り	鋼非合成箱桁	443.65	17	0
	下り	鋼非合成箱桁		18	0
23	上り	連続鋼桁橋	575	55	0
	下り	連続鋼桁橋		61	0

和 2 年度にかけて設置した。設置位置図を図-3 に示す。表-2 に示すとおり、様々な構造形式の道路橋で観測を実施している。

3. 観測に適した無線通信の開発

(1) 無線通信の性能

橋の各観測点に設置されたバッテリーで長時間の連続

表-3 無線通信の仕様

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

観測をするため、本システムに用いる無線通信は、少ない電力で膨大なデータ量の通信と、数百メートル単位の距離での通信安定性が必要である。本研究では、現地観測実験^{8,9)}で見通し環境で 1km で安定した通信が出来た 920MHz 帯の通信モジュールを採用した。

さらに、橋の挙動観測に用いるため、屋外環境による通信ノイズや遮蔽物により無線通信に障害があることが考えられ、それらを避けて無線通信を行うことを想定し、後述する通信プロトコルに加え、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。

(2) 無線通信機能の構成

無線通信は、同時に2台以上で通信を行うと電波の混線が発生することから、同一時間内における同一周波数帯の発信は、必ず一対一である必要があり、半二重通信となる¹⁰⁾ (以下、「ポーリング方式」という)。ポーリング方式を地震観測に適用すると図-9のようになる。図-9は収録装置と各センサーの通信の状況を示しており、収録装置が各センサーに通信命令等の信号を送信すると各センサーが観測記録を送信することを示している。

ポーリング方式は、コマンドが順次発行されるため、受信欠落が起こっても再送による立て直しが迅速で、通信破綻が発生しにくい。しかし、橋の地震観測環境である屋外でポーリング方式を適用すると、ノイズ等に起因する通信欠落により、再送が多く必要であることが分った。また、センサーの電力消費量の制約上、一時的にセンサー部で保存する記録の量には限りがある(3分間)。以上より、無線通信による橋の地震観測を実現するためには、3分間の一時保存期間中に観測記録の伝送を完了することが必要であり、少ないコマンドで再送回数を多く得られるような通信プロトコルの開発が重要である。

これらの課題を踏まえ、本研究では、1回のコマンド発行に対し、複数のセンサーが能動的に順次応答する高効率の通信プロトコルを開発した(以下、「マルチスケジュール方式」という)。マルチスケジュール方式のコ

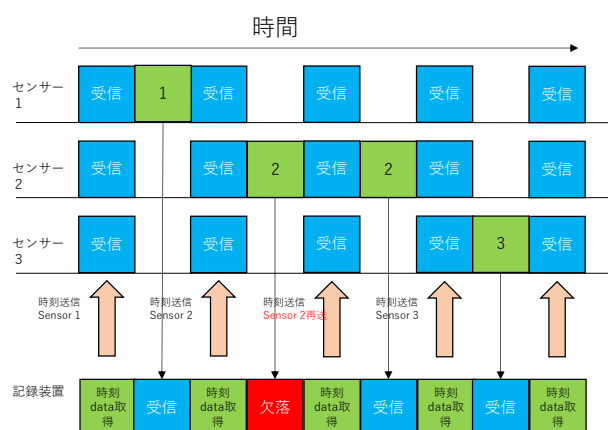


図-9 従来の手法の概念図 (ポーリング方式)

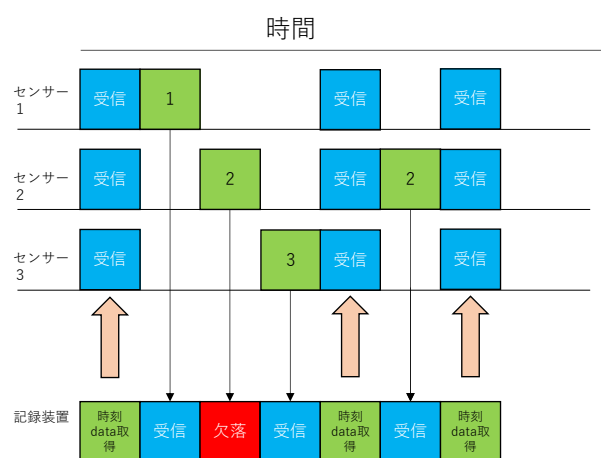


図-10 今回採用した手法の概念図 (マルチスケジュール方式)

ンセプトを図-10に示す。図-10は、収録装置と各センサーの通信の状況を示しており、ポーリング方式と異なり、収録装置からの1回の命令で各センサーが収録装置へ記録を送信する状況を示している。なお、記録装置側で上りデータが欠落したような表現であるが、記録装置が発行した下りの時刻同期パケットをセンサー側で欠落する場合等、様々な箇所でも同じ通信手順となる。

なお、マルチスケジュール方式は、少ないコマンドで制御できるため、ポーリング方式と比較して通信効率が良い。一方、地震観測は時刻同期が必須で、無線通信のコマンドに時刻同期を含む必要があるが、マルチスケジュール方式は観測機器間の通信回数が減少するため、ポーリング方式と比較して時刻同期の精度に課題が生じる。そのため本システムでは、データが溜まっておらず、通信の必要無い状態であっても、一定期間で時刻同期のみのコマンドを発行することで時刻同期精度を維持している。

1/60のみ	コネクタ内番	収録装置	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4	センサ5	センサ6	センサ7	センサ8	センサ9	センサ10
0	リクエスト：センサー1	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
1		C		C								
2	データ送信：センサー1	R	◀	S								
3		C		C								
4	リクエスト：センサー2	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
5		C		C								
6	データ送信：センサー2	R	◀	S								
7		C		C								
8	リクエスト：センサー3	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
9		C		C								
10	データ送信：センサー3	R	◀	S								
11		C		C								
12	リクエスト：センサー4	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
13		C		C								
14	データ送信：センサー4	R	◀	S								
15		C		C								
16	リクエスト：センサー5	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
17		C		C								
18	データ送信：センサー5	R	◀	S								
19		C		C								
20	リクエスト：センサー6	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
21		C		C								
22	データ送信：センサー6	R	◀	S								
23		C		C								
24	リクエスト：センサー7	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
25		C		C								
26	データ送信：センサー7	R	◀	S								
27		C		C								
28	リクエスト：センサー8	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
29		C		C								
30	データ送信：センサー8	R	◀	S								
31		C		C								
32	リクエスト：センサー9	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
33		C		C								
34	データ送信：センサー9	R	◀	S								
35		C		C								
36	リクエスト：センサー10	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
37		C		C								
38	データ送信：センサー10	R	◀	S								
39		C		C								
40	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
41		C		C								
42		R										
43		C										
44	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
45		C		C								
46		R										
47		C										
48	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
49		C		C								
50		R										
51		C										
52	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
53		C		C								
54		R										
55		C										
56	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
57		C		C								
58		R										
59		C										

図-11 シミュレーション (ポーリング方式)

1/60のみ	コネクタ内番	収録装置	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4	センサ5	センサ6	センサ7	センサ8	センサ9	センサ10
0	S1-S10リクエスト	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
1		C		C	C	C	C	C	C	C	C	C
2		R	◀	S								
3		R	◀	S								
4		R	◀	S								
5		R	◀	S								
6		R	◀	S								
7		R	◀	S								
8		R	◀	S								
9		R	◀	S								
10		R	◀	S								
11		R	◀	S								
12				C	C	C	C	C	C	C	C	C
13			◀									
14												
15												
16												
17		C										
18	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
19		C										
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
39												
40												
41												
42												
43												
44												
45												
46												
47												
48	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
49												
50												
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
59		C										

図-12 シミュレーション (マルチスケジュール方式)

(3) 無線通信のシミュレーション

図-11および図-12にポーリング方式とマルチスケジュール方式で10台のセンサーが伝送したシミュレーション結果を示す。図-11と図-12は、収録装置と各センサーの通信関係を示しており、「S」は送信、「R」は受信、「C」は受送信の切り替えである。なお、マルチスケジュール方式は、センサーから観測記録を送信する時間、及び通信モジュールを送信・受信で切り替えに必要な時間を一定にするため、1秒間を60分割したスロットを制御の基準としてスケジュールを組み、高精度で時刻同期をすることで、システム全体が同じタイミングで送受信できる通信方法である。そのため、シミュレーションも60スロットを基本とした。

図-11と図-12を比較すると、マルチスケジュール方式では、ポーリング方式と比較して少ないスロットですべてのセンサーの伝送が終了している。

図-13に、観測記録の伝送が失敗し、再送が必要とな

る場合のシミュレーションを示す。図-11、-12と同様に「S」は送信、「R」は受信、「C」は受送信の切り替えに加え、「×」は通信失敗である。シミュレーションは、それぞれの方式で1つのセンサーが1回のみ失敗するパターンとすべてのセンサーが失敗するパターンを示している。

ポーリング方式では、図-13の左下に示した全てのセンサーが1回づつ欠落するパターンで全てのスロットを消費してしまうため、60スロット内に観測記録を回収することが出来ず、遅延が発生することで定期的に観測記録に欠測が生じることが分かった。

一方、マルチスケジュール方式の場合、全てのセンサーが3回失敗してもスロットに余裕を確保できることが確認できた。これにより、ポーリング方式と比較して再送回数をより多く確保することができるため、欠測を減少できると考えられる。

時刻	シミュレーション	動作	1-4分	2-4分	3-4分	4-4分	5-4分	6-4分	7-4分	8-4分	9-4分	0-4分
0	リクエスト：センサー1	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
1		C		C								
2	受信失敗	X	◀	S								
3		C		C								
4	リクエスト：センサー1	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
5		C		C								
6	データ送信：センサー1	R	◀	S								
7		C		C								
8	リクエスト：センサー2	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
9		C		C								
10	データ送信：センサー2	R	◀	S								
11		C		C								
12	リクエスト：センサー3	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
13		C		C								
14	データ送信：センサー3	R	◀	S								
15		C		C								
16	リクエスト：センサー4	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
17		C		C								
18	データ送信：センサー4	R	◀	S								
19		C		C								
20	リクエスト：センサー5	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
21		C		C								
22	データ送信：センサー5	R	◀	S								
23		C		C								
24	リクエスト：センサー6	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
25		C		C								
26	データ送信：センサー6	R	◀	S								
27		C		C								
28	リクエスト：センサー7	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
29		C		C								
30	データ送信：センサー7	R	◀	S								
31		C		C								
32	リクエスト：センサー8	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
33		C		C								
34	データ送信：センサー8	R	◀	S								
35		C		C								
36	リクエスト：センサー9	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
37		C		C								
38	データ送信：センサー9	R	◀	S								
39		C		C								
40	リクエスト：センサー10	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
41		C		C								
42	データ送信：センサー10	R	◀	S								
43		C		C								
44	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
45		C		C								
46		R	◀	S								
47		C		C								
48	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
49		C		C								
50		R	◀	S								
51		C		C								
52	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
53		C		C								
54		R	◀	S								
55		C		C								
56	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
57		C		C								
58		R	◀	S								
59		C		C								

時刻	シミュレーション	動作	1-4分	2-4分	3-4分	4-4分	5-4分	6-4分	7-4分	8-4分	9-4分	0-4分
0	S1-S10リクエスト	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
1		C		C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	受信失敗	X	◀	S								
3		C		C								
4	受信失敗	X	◀	S								
5		C		C								
6	受信失敗	X	◀	S								
7		C		C								
8	受信失敗	X	◀	S								
9		C		C								
10	受信失敗	X	◀	S								
11		C		C								
12	S2リクエスト	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
13		C		C	C	C	C	C	C	C	C	C
14		R	◀	S								
15		C		C								
16		R	◀	S								
17		C		C								
18	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
19		C		C								
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
29		C		C								
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
39		C		C								
40												
41												
42												
43												
44												
45												
46												
47												
48	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
49		C		C								
50												
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58	時刻同期のみ	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
59		C		C								

時刻	シミュレーション	動作	1-4分	2-4分	3-4分	4-4分	5-4分	6-4分	7-4分	8-4分	9-4分	0-4分
0	リクエスト：センサー1	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
1		C		C								
2	受信失敗	X	◀	S								
3		C		C								
4	リクエスト：センサー1	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
5		C		C								
6	データ送信：センサー1	R	◀	S								
7		C		C								
8	リクエスト：センサー2	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
9		C		C								
10	受信失敗	X	◀	S								
11		C		C								
12	リクエスト：センサー2	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
13		C		C								
14	データ送信：センサー2	R	◀	S								
15		C		C								
16	リクエスト：センサー3	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
17		C		C								
18	受信失敗	X	◀	S								
19		C		C								
20	リクエスト：センサー3	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
21		C		C								
22	データ送信：センサー3	R	◀	S								
23		C		C								
24	リクエスト：センサー4	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
25		C		C								
26	受信失敗	X	◀	S								
27		C		C								
28	リクエスト：センサー4	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
29		C		C								
30	データ送信：センサー4	R	◀	S								
31		C		C								
32	リクエスト：センサー5	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
33		C		C								
34	受信失敗	X	◀	S								
35		C		C								
36	リクエスト：センサー5	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
37		C		C								
38	データ送信：センサー5	R	◀	S								
39		C		C								
40	リクエスト：センサー6	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
41		C		C								
42	受信失敗	X	◀	S								
43		C		C								
44	リクエスト：センサー6	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
45		C		C								
46	データ送信：センサー6	R	◀	S								
47		C		C								
48	リクエスト：センサー7	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
49		C		C								
50	受信失敗	X	◀	S								
51		C		C								
52	リクエスト：センサー7	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
53		C		C								
54	データ送信：センサー7	R	◀	S								
55		C		C								
56	リクエスト：センサー8	S	▷	R	R	R	R	R	R	R	R	R
57		C		C								
58	データ送信：センサー8	R	◀	S								

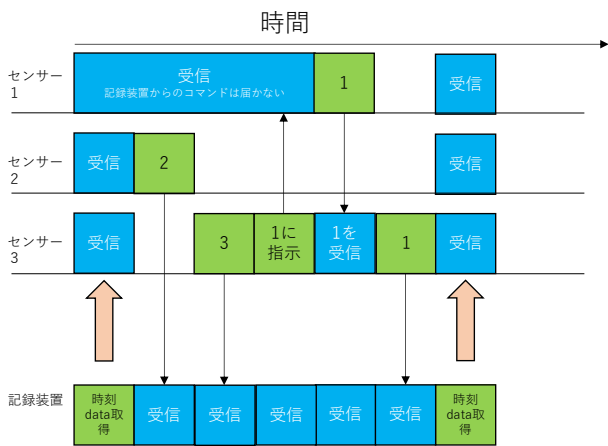


図-14 通信機器間のリレーの概念図

(4) 観測機器間のリレー伝送機能の構築

道路橋は全長 500m 近くあるものも多く、無線通信の電波が物理的に届かないケースがあることが想定される。そのため、近いセンサー同士を踏み台にし、データをリレーして伝送する機能が必要となる。本研究で構築した、無線通信のリレーの概念図を図-14に示す。図-14では、センサー1のデータをセンサー3を踏み台にリレーするが、センサー3は先に自らのデータを記録装置に送り、メモリを空けた状態でセンサー1のデータを受信している。そのため、センサー3はメモリが空くまでセンサー1からデータを受信することはない。

(5) 現場環境に適した無線通信の自動設定機能の構築

道路橋の地震観測で無線通信の設定を行う場合、センサーから収録装置への直送、または、センサー同士のリレーして経由する等を個別に設定する必要がある。そのような無線通信の設定は、通信ノイズの調査やセンサーの設置位置等の調整、それらを現地でPCを操作して最適な通信環境を設定する必要があるため、現場環境で無線通信の設定作業を行うことは困難であった。

この課題を解決するため、センサーから収録装置までの無線通信設定について、設置完了直後に環境に最適な組み合わせを自律的に設定する仕組みを構築した。具体的には、センサーから収録装置への無線通信による観測記録の回収経路について、センサーから収録装置への直送や、センサー同士のリレーの有無等、個別のセンサーに対する設定を全パターン100回ずつ試行することで、最適な無線通信の構成を自動で構築する。また、最適な構成であっても、センサーの故障や電池切れ等で通信経路が経時変化することが考えられるため、「24時間連続して欠測があった場合」などの状況設定も自動的に全試行を行い、無線通信の設定を更新している。これにより、自動的に最適なデータ回収経路を構築することが可能と

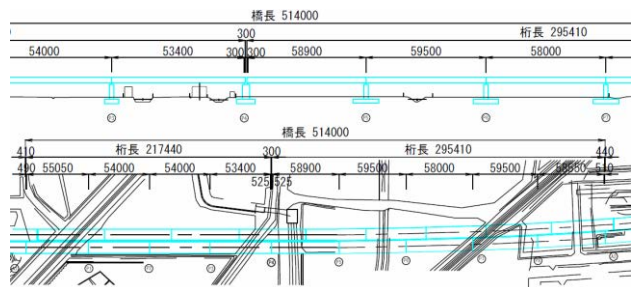


図-15 対象橋 A (表-2 通し番号 4)

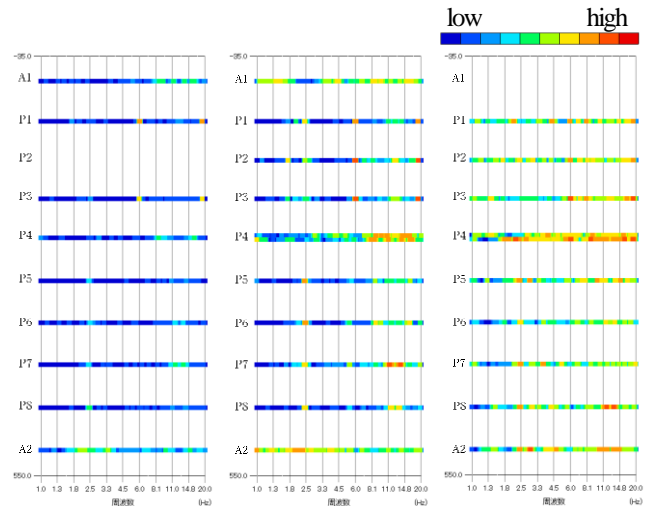


図-16 対象橋 A の観測点間のコヒーレンス

(左：橋脚・橋台下部，中央：橋脚・橋台天端，右：桁部)

なった。

一方、センサー間の無線通信のリレーは、消費電力が増大するデメリットがある。このため、全試行時に直送かリレーかの判定は、通信品質ではなく欠落回数を優先して回収経路の構築を行う。ただし、同じ程度の欠落回数の場合は次点として通信品質を優先する。例えば、平均2回欠落するリレーと、平均4回欠落する直送では、後者の方が電力効率が良いと判断している。この判断の目安は現状2倍の回数としている。

マルチスケジュール方式の通信プロトコルおよびリレー伝送を構築することより、無線通信を用いて、多数の観測点より安定して観測記録を回収することができ、橋の多点連続観測を可能にした。また、観測記録は概ね10分でweb上で確認することができ、準リアルタイムの観測が可能である。

4. 強震モニタリングシステムで観測された記録

(1) 常時観測記録

図-15に表-2の通し番号4の道路橋(以下、「対象橋A」とする)の図面、図-16に隣接する観測点間の常時

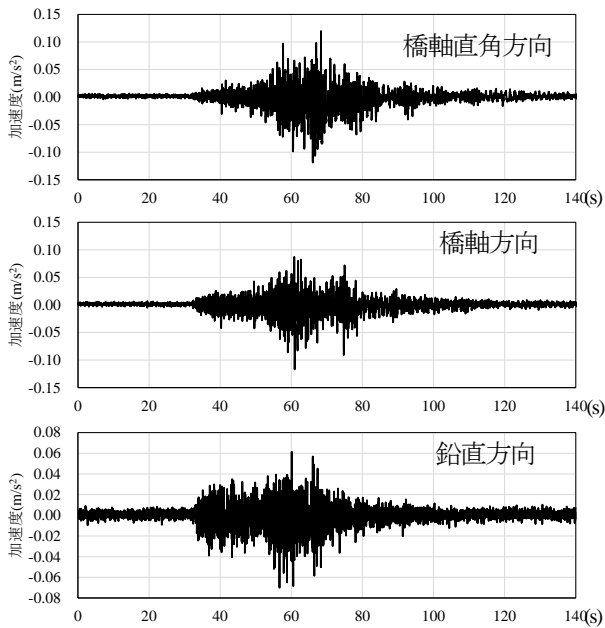


図-17 対象橋 A の地震①の観測記録の例

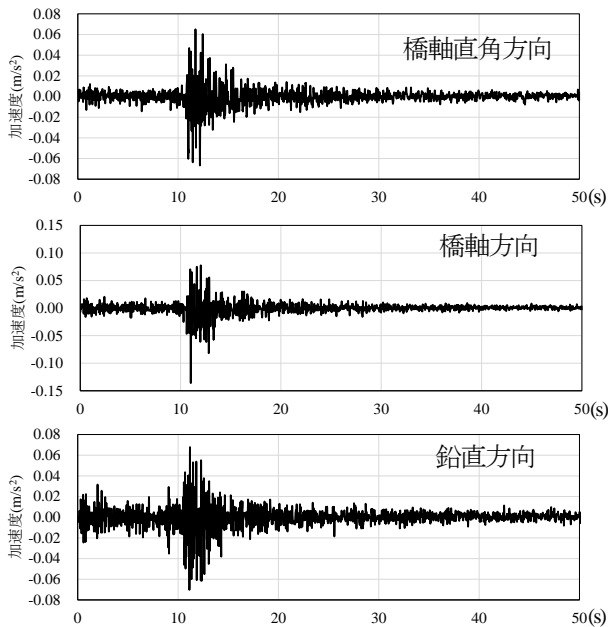


図-18 対象橋 A の地震②の観測記録の例

観測記録のコヒーレンスを示す。図-16 は、横軸を周波数として、橋脚・橋台天端—橋脚・橋台下部 (図-16 左), 桁部—橋脚・橋台天端 (図-16 中), 桁—桁 (図-16 右) で橋軸方向のコヒーレンスを示した。高コヒーレンスが赤 (暖色系), 低コヒーレンスが青 (寒色系) を示す。コヒーレンスは波形の類似度を示す指標であり、図-16 より、桁—橋脚・橋台天端間, 桁—桁間では、2~2.5Hz 付近で大きい値を示した。対象橋 A は、P4 橋脚に桁端を有する 4 径間連続+5 径間連続鋼桁橋であり、弾性支承によって支持されている。観測記録より、弾性支承上の連続桁が、2~2.5Hz 付近で常時振動していること

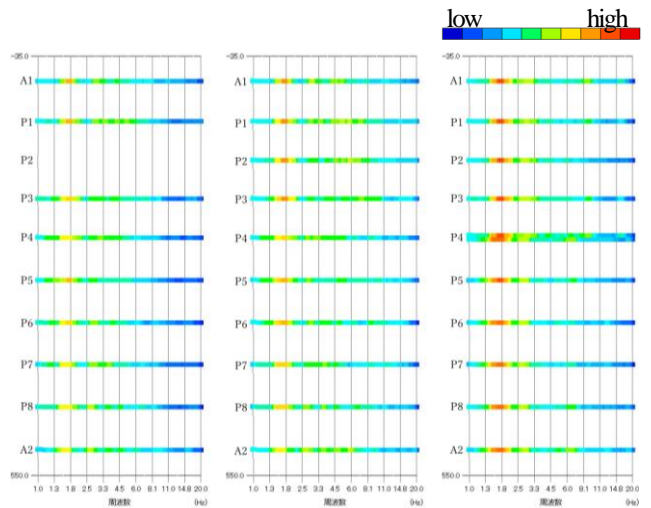


図-19 対象橋 A の地震①のフーリエスペクトル
(左: 橋脚・橋台下部, 中央: 橋脚・橋台天端, 右: 桁部)

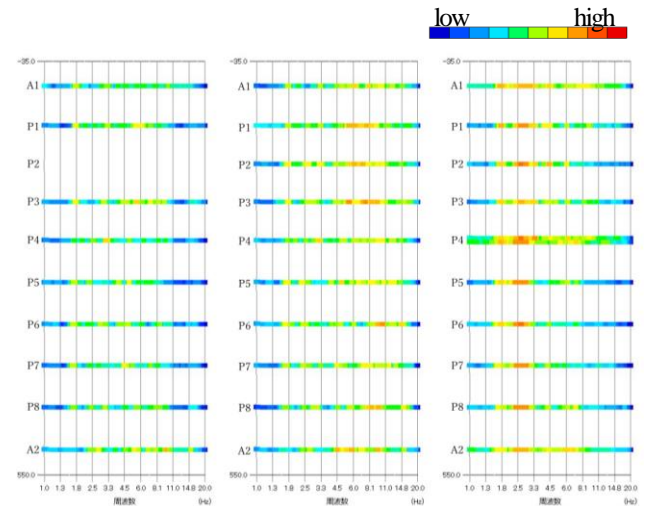


図-20 対象橋 A の地震②のフーリエスペクトル
(左: 橋脚・橋台下部, 中央: 橋脚・橋台天端, 右: 桁部)

が推察される。

(2) 地震観測記録

図-17 に対象橋 A で 2021/10/6 02:46 の地震 (地震①, M5.9, 震央距離約 200km) 時に観測された地震観測記録の地表時刻歴波形, 図-18 に 2021/11/23 18:49 の地震 (地震②, M4.7, 震央距離約 100km) 時に観測された地震観測記録の地表時刻歴波形を示す。図-17, 図-18 の地震波形は、ともに水平動で $0.1m/s^2$ 程度である。

図-19 に地震①の各観測点のフーリエスペクトル, 図-20 に地震②の各観測点のフーリエスペクトルを示す。また、図-21, 図-22 に地震①の地表に対する各観測点のフーリエスペクトル比および隣接する観測点間のコヒーレンスを示す。

図-19, 図-20, 図-21, 図-22 は、橋脚・橋台下部 (図

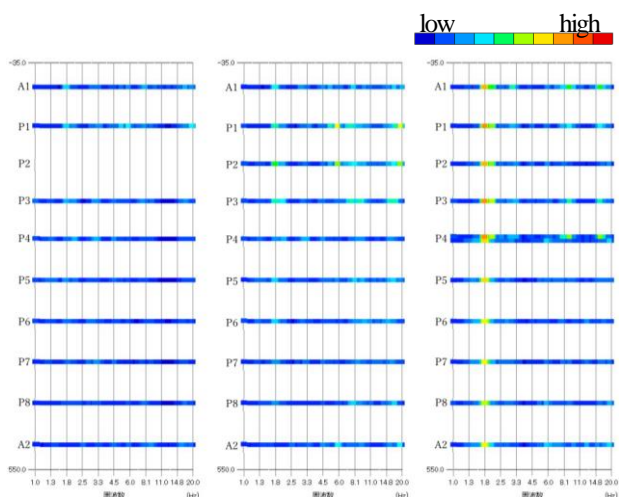


図-21 対象橋 A の地震①で観測された地表地震動に対するそれぞれ観測点のフーリエスペクトル比
(左：橋脚・橋台下部，中央：橋脚・橋台天端，右：桁部)

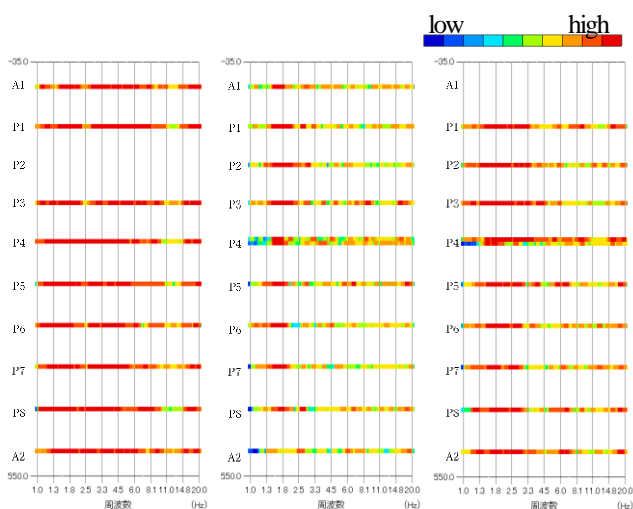


図-22 対象橋 A の地震①で観測された隣接する観測点間のコヒーレンス
(左：橋脚・橋台下部，中央：橋脚・橋台天端，右：桁部)

左)，橋脚・橋台天端（図中央），桁（図右）で観測された橋軸方向の地震記録のフーリエスペクトル，地表に対するフーリエスペクトル比および隣接する観測点間のコヒーレンスを A1 橋台（図上）から A2 橋台（図下）に並べて表示した図である。なお，地震①，②も P2 橋脚下部（図左）は欠測であった。それぞれ横軸を周波数としてカラーチャートで示した。赤（暖色系）はそれぞれの指標が高い値，青（寒色系）は低い値であることを示す。

図-19 に示した地震①のフーリエスペクトルより，すべての橋脚下部で 1.8Hz 付近にピークを有する似た傾向を示した。A1 橋台と A2 橋台は 300m 以上離れているが，震央距離が遠い地震①は，概ね同様の地震動特性の地震

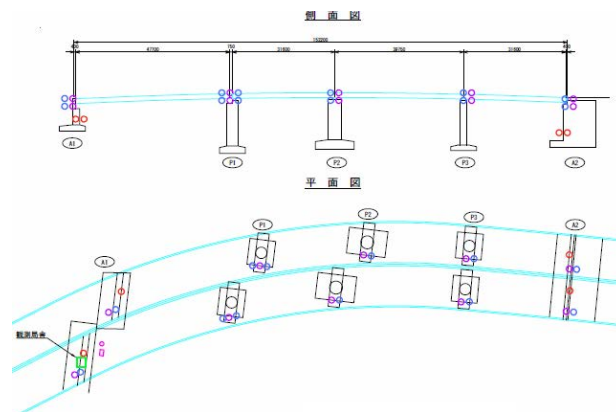


図-23 対象橋 B（表-2 通し番号 16）

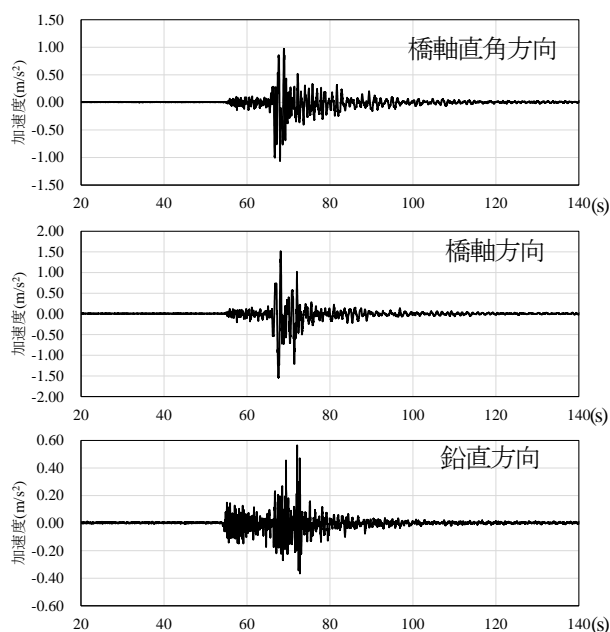


図-24 対象橋 B 近傍地表面の地震③の観測記録

動が作用したと考えられる。一方，図-20 の地震②は，橋脚ごとの卓越する周波数が異なっている。地震によって，橋全体系に同一の地震動を入力が一樣ではなく，各橋脚ごとで作用される地震動特性が異なる傾向が確認できた。

図-21 のフーリエスペクトル比（各観測点／地表）では，桁部のすべての観測点で 1.8Hz 付近で大きな値となっており，1.8Hz 付近の振動は地震による桁部の特徴的な振動特性であることが考えられる。常時振動時に 2～2.5Hz 付近に卓越周期が確認できたが，地震外力が加わったことより，橋全体系の卓越周波数が変化した可能性が考えられる。

図-22 のコヒーレンスでは，橋脚・橋台下部－橋脚・橋台天端および桁－桁間のコヒーレンスが大きく，橋脚や桁は，おおむね剛体的な挙動をしていると考えられる。一方，橋脚上－桁間のコヒーレンスは 1.3～2.5Hz 付

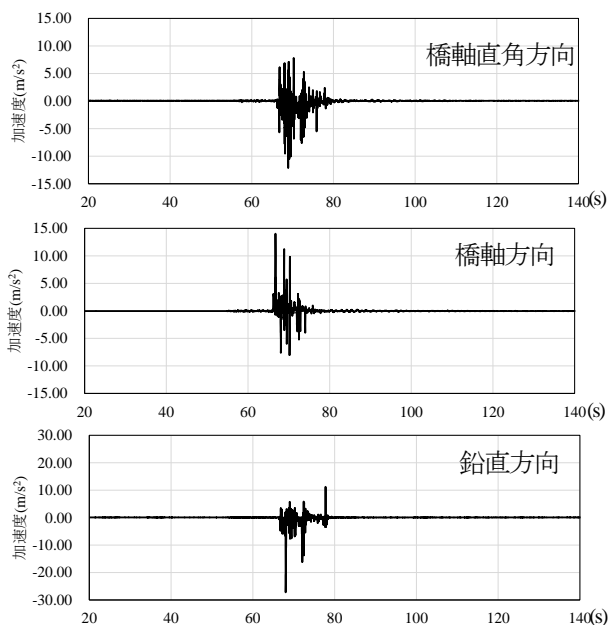


図-25 対象橋 B (A1 橋台) の地震③の観測記録

近を除き、小さい値を示しており、地震動が橋脚天端から桁に伝播する過程で大きさに変化があったことを示している。

図-23 に表-2 の通し番号 16 の道路橋（以下、「対象橋 B」とする）の図面、図-24 対象橋 2022/1/22 01:08 の地震（地震③、M6.6）時に観測された地表面の地震観測記録、図-25 に A1 橋台直上の桁部の時刻歴波形を示す。図-24 より、橋軸直角方向、橋軸方向、鉛直方向の最大加速度は、それぞれ約 1.03m/s^2 、 1.63m/s^2 、 0.57m/s^2 である。これに対して、図-25 に示した A1 橋台の記録は、橋軸直角方向、橋軸方向、鉛直方向それぞれ約 10.51m/s^2 、 12.98m/s^2 、 25.22m/s^2 の最大加速度が観測された。

図-26 に対象橋 B の地震③の橋脚・橋台下部（図-26 左）、橋脚・橋台天端（図-26 中央）、桁部（図-26 右）で観測された橋軸方向の時刻歴波形を A1 橋台（図-26 上）から A2 橋台（図-26 下）に並べて表示した図を示す。上述の大振幅の記録は、A1 橋台の桁部のみで観測されている。A1 橋台では地震時に、橋台と桁の衝突などの特異な現象が生じた可能性が考えられる

以上を踏まえ、強震モニタリングシステムで観測した記録より、様々な橋に対し、橋全体系の複雑な振動特性を捉えることができたと考えられる。

5. まとめ

無線通信を用いて、橋全体系の複雑な挙動を観測できる強震モニタリングシステムを開発した。本研究で得られた知見は下記の通りである。

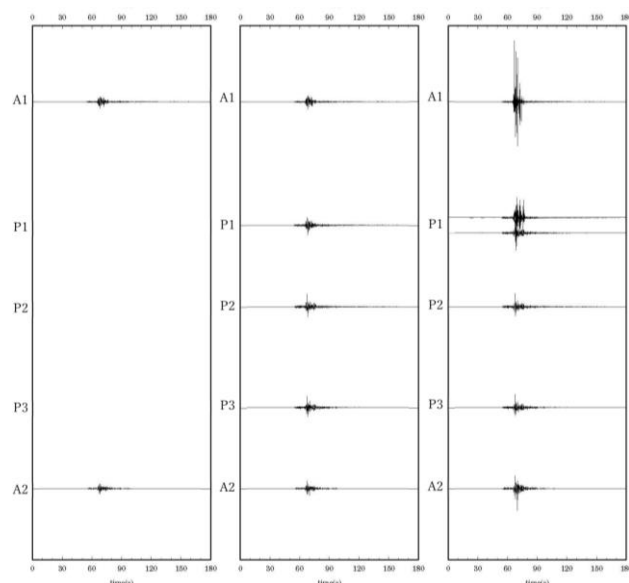


図-26 対象橋 B の地震観測記録

（左：橋脚・橋台下部，中央：橋脚・橋台天端，右：桁部）

- ・ 設置方法等を工夫することで、従前の観測システムより簡易に設置することができるシステムを開発することができた。
- ・ マルチスケジュール方式の通信プロトコルおよびリレー伝送を構築することで、無線通信を用いて、多数の観測点より安定して観測記録を回収することができ、準リアルタイムで橋の多点連続観測を可能にした。
- ・ 強震モニタリングシステムで観測された記録より、橋全体系の複雑な振動特性を捉えることができた。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、全国の様々な橋の構造形式の挙動記録の分析・検証を行う。さらに本システムで取得できる連続観測記録を維持管理等の様々な分野に活用できるよう、強震モニタリングシステムの活用可能性を検討する。

謝辞：強震モニタリングシステムを設置するにあたり、道路橋を管理する国土交通省各地方整備局の担当者に調整や橋の使用許可等の対応をいただいた。ここに記して謝意を示す。

REFERENCES

- 1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017。
- 2) 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.
- 3) 片岡正次郎, 長屋和宏, 矢部正明, 松岡一成, 金子正洋: 東北地方太平洋沖地震の強震記録による地震時水平力分散構造を有する高架橋の地震応答解析, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 4, pp. I444-I457, 2012.
 - 4) 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.
 - 5) 藤野陽三, シリング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.
 - 6) 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.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 石井洋輔, 片岡正次郎: 土木構造物全体系の地震時挙動観測システムの構築, 国総研レポート 2019, p.75, 2019
 - 10) 宮崎誠一: データ伝送技術実用ノウハウのすべて, CQ 出版, 2016.3

DEVELOPMENT OF STRONG MOTION MONITORING SYSTEM FOR ENTIRE BRIDGE SYSTEM USING WIRELESS COMMUNICATION

Yosuke ISHII, Masayuki Yamada, Masayuki Araki and Yoshihiro NAKAO

It is difficult to observe the complex behavior of the entire system of road bridges, and the sophistication of seismic behavior observation has been a challenge. This study aims to clarify the seismic behavior of the entire highway bridge system. In addition to installing MEMS-type acceleration sensors at multiple locations on the highway bridge, wireless communication suitable for observing the seismic behavior of multiple points is installed. We have developed a strong motion monitoring system that observes the complex behavior of the entire bridge system. By constructing a communication protocol and relay transmission suitable for handling a large number of sensors, the observation system enables quasi-real-time multi-point continuous observation of bridges that can collect a large number of observation records wirelessly outdoors. It was confirmed that the records observed by the strong motion monitoring system can be used sufficiently for waveform analysis, and we were able to capture the complex behavior of the entire bridge system.