

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

篠原 聖二¹・中村 雄基²・玉置 脩人³・高橋 良和⁴

¹正会員 博(工) 阪神高速道路株式会社 技術部（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

²非会員 阪神高速技研株式会社 技術部（〒550-0011 大阪市西区阿波座1丁目3番15号）

³正会員 阪神高速技研株式会社 技術部（〒550-0011 大阪市西区阿波座1丁目3番15号）

⁴正会員 博(工) 京都大学工学研究科 教授（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. はじめに

道路橋における地震観測データの蓄積は、震度法から地震時保有水平耐力法への転換に重要であったとされるなど、耐震設計で考慮すべき地震動とその影響等をいかに科学的に設定するかという観点で、道路橋の耐震技術の発展と密接に関係している¹⁾。強震記録には地震の様々な特性が含まれており、被害地震の特性を有した強震記録を耐震設計基準に反映することで、わが国の耐震基準が高度化されてきた。しかし、耐震設計基準に反映している強震記録のほとんどは地盤面で得られた記録であり、土木構造物の地震時の挙動を再現できる強震記録は十分に得られていたとはいえず、応答を記録できる観測態勢を構築する必要がある。2016年熊本地震の際に、地震応答の記録が得られた道路橋は、3橋のみであったとされており²⁾、一構造物あたりの強震計の設置箇所を増加させるとともに、観測する構造物も併せて増加させる必要がある。

阪神高速道路では、地震発生時の迅速な交通管制対応や構造物の地震挙動の把握の観点から、1995年兵庫県南部地震よりも前から構造物等の地震観測システムを順次整備し、現在では、供用延長260kmの道路ネットワークにおいて22箇所の地点の構造物、地表面、地中部において、加速度、速度、変位など合計400成分以上の地震観測データが得られるシステムが整備されている。また、2014年には、地震計関係機器の老朽化に伴い、機器の更新がなされるとともに、阪神高速道路総合防災システムを改修し、得られた全ての成分の地震観測データを地震発生直後に、阪神高速道路全社員のPCから確認できるシステムが構築されている。

これらの地震観測データは、構造物の地震時挙動の評価や地震応答解析の精度検証など広く耐震技術の向上につながると考えられる。本稿では、耐震技術向上のために地震観測データの活用を推進することを目的とし、阪神高速道路ネットワークの地震観測システムについて整理するとともに、過去の地震観測データを用いた検討事例について紹介する。

2. 地震観測システム

(1) 概要

地震観測システムは、阪神高速道路総合防災システムのサブシステムとなる。総合防災システムは、1995年に発生した兵庫県南部地震の教訓を踏まえ、被害予測^{3,4)}や被害状況を情報共有する機能により、災害対策業務を迅速かつ的確に行うことができるように支援するシステムである⁵⁾。1999年度より運用を開始しているが、1)被災時に正にシステム利用できるよう日常の業務でも活用できるようにする、2)GISの活用により全社の情報基盤の骨格とする、等の方針のもと、2011年度に再構築を行った。

図-1は、GISの背景図として、一般電子地図、航空写真の他、構造物台帳や高架下平面図を表示する画面である。図-2は、過去に撮影した高速道路上および高架下道路の走行映像と表示位置をGIS上に表示する画面である。また、背景図から阪神高速道路の位置を特定するために、構造物の管理番号、キロポスト等の情報について、位置座標との関連性の整理を行っているので、図-3のように背景図から位置を指定することで、該当する構造物の保全情報管理システム（カルテ検索機能）にリンクすることがで

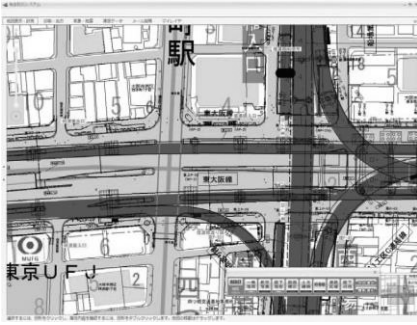


図-1 GIS 背景画面



図-2 走行映像画面

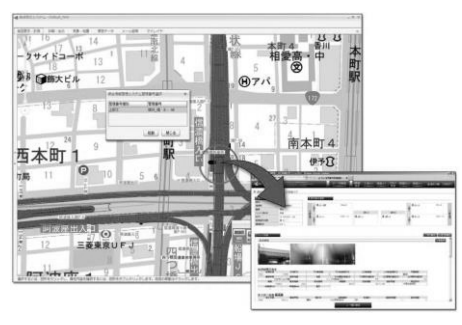


図-3 GIS と保全情報管理システムとのリンク

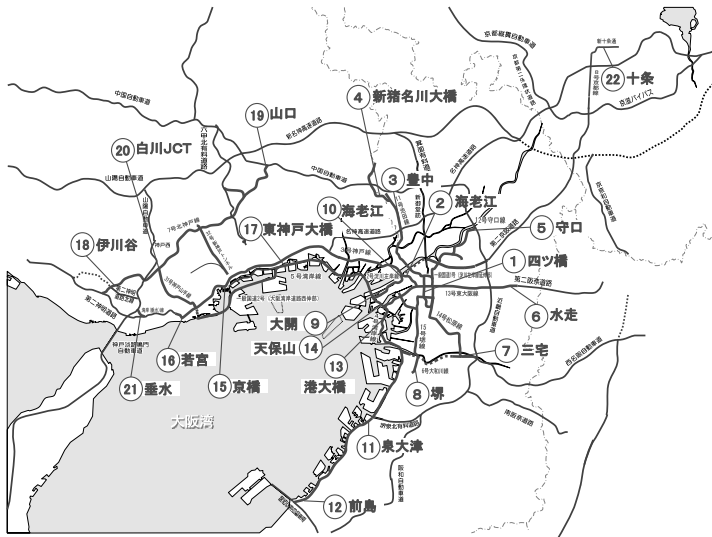


図-4 阪神高速道路ネットワークにおける地震観測点

きる。

この総合防災システムには、気象・地震情報表示機能が備わっており、地震発生直後に地震観測データを確認することができる。阪神高速道路ネットワークにおける地震観測点を図-4に示す。基本的に各路線に1箇所以上設置されており、2018年6月時点で計22箇所の地震観測点が整備されている。

(2) 地震計

地震計は主として(株)東京測振のブロードバンド地震観測に適したサーボ型速度計を採用し、構造物や地上部には地表設置タイプのVSE-355EIを、地中では地中埋設タイプのVSE-355JEを設置している⁶⁾。地震計の仕様を表-1におよび写真-1に、地震計の設置状況例を写真-2に示す。示す。地震計は、速度(L)(5V/m/s×3成分)、速度(H)(200V/m/s×3成分)、加速度(5V/Gal×3成分)の3成分を同時に出力することができる。1回の地震において、成分ごとに0.01s単位で最大300秒間分のデータ(30000データ)を取得する。阪神高速道路ネットワークにおける地震計設置箇所の一覧を表-2に示す。

表-1 サーボ型速度計の仕様

型式		VSE-355EI (地表設置型) VSE-355JE (地中埋設型)
測定範囲	加速度	±2000gal
	速度	±200cm/s
	変位	±1000mm
出力単位	加速度	Gal (0.01Gal単位)
	速度	cm/s (0.001cm/s単位)
	変位	mm (0.01mm単位)
サンプリング周波数		100Hz (10ms)



(a)地表設置タイプ(VSE-355EI)



(b)地中埋設タイプ(VSE-355JE)

写真-1 サーボ型速度計⁶⁾

(3) データ転送・管理

地震観測データの取得の流れを図-5に示す。地震観測システムは、1)地震計、2)データ収集装置、3)総合防災システムで構成されている。まず、地震が発生したことを1)地震計が感知し、記録を開始する。記録されたデータは、一旦2)データ収集装置に送信される。2)データ収集装置は、所定の震度以上の場合、送信されたデータを3)総合防災システムに観測位置ごとにCSV形式のファイルで送信する。図-6にCSVデータの取得画面を示す。総合防災システムは、阪神高速道路社員が有する卓上PC等の端末で利用できるため、社員は地震発生直後に各観測位置の地震観測データを確認することができる。

(4) システムの維持管理

地震計の維持管理には、定期的な点検が必要である。土木構造物における一般的な強震観測はネットワーク化されていないものもあり、文献2)によると国総研では全国の強震観測施設に対し、現地点検が実施されている。

表-2 阪神高速道路ネットワークにおける地震計設置箇所一覧

設置番号	名称	設置位置	加速度			速度			変位			CH数
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	四ツ橋	地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
2	海老江①	地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
3	豊中	地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
4	新猪名川大橋	地中部(GL-2.8m)	CH1	CH2	CH3	-	-	-	-	-	-	3
		地中部(GL-30.85m)	CH4	CH5	CH6	-	-	-	-	-	-	3
		橋脚部(池P-127)	CH7	CH8	-	-	-	-	-	-	-	2
		桁内中央部(池S-126)	CH9	CH10	-	-	-	-	-	-	-	2
		橋脚内(池P-126)	CH11	CH12	-	-	-	-	-	-	-	2
		主塔下部(池P-126)	CH13	CH14	CH15	-	-	-	-	-	-	3
5	守口	主塔頂部(池P-126)	CH16	CH17	-	-	-	-	-	-	-	2
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
6	水走	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
7	三宅	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
8	堺	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
9	大開	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
10	海老江②	頂版上部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
11	泉大津	地中部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		フーチング部(湾P-400)	CH19	CH20	CH21	-	-	-	-	-	-	3
		フーチング部(湾P-408)	CH22	CH23	CH24	-	-	-	-	-	-	3
		地中部(湾P-400)	CH25	CH26	CH27	-	-	-	-	-	-	3
		地中部(湾P-408)	CH28	CH29	CH30	-	-	-	-	-	-	3
		橋脚部(湾P-400)	CH31	CH32	CH33	-	-	-	-	-	-	3
		橋脚部(湾P-408)	CH34	CH35	CH36	-	-	-	-	-	-	3
		主桁部(湾S-400)	CH37	-	-	-	-	-	-	-	-	1
		主桁部(湾S-408)	CH38	-	-	-	-	-	-	-	-	1
12	前島	橋脚部(湾P-408)	CH39	CH40	-	-	-	-	-	-	-	2
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
13	港大橋	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
14	天保山大橋	桁端部(湾P-11)	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		桁中央部(湾S-11)	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	CH24	CH25	CH26	CH27	9
		地中部(GL-1.5m)	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		地中部(GL-41.0m)	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		主塔横梁部(岸P-11)	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	CH24	CH25	CH26	CH27	9
		主塔頂部(岸P-11)	CH28	CH29	CH30	CH31	CH32	CH33	CH34	CH35	CH36	9
15	京橋	主桁中央部(岸S-10)	CH37	CH38	CH39	CH40	CH41	CH42	CH43	CH44	CH45	9
		主塔横梁部(岸P-10)	CH46	CH47	CH48	CH49	CH50	CH51	CH52	CH53	CH54	9
16	若宮	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
17	東神戸大橋	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		主桁中央部	CH19	CH20	CH21	-	-	-	-	-	-	3
		主塔中段部	CH22	CH23	CH24	-	-	-	-	-	-	3
		主塔頂部	CH25	CH26	-	-	-	-	-	-	-	2
18	伊川谷	橋脚部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
19	山口	地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
20	白川	地中部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
21	垂水	地表部	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	9
		フーチング部	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18	9
		橋脚部(名谷P-2)	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	CH24	CH25	CH26	CH27	9
		橋脚部(名谷P-3)	CH28	CH29	CH30	CH31	CH32	CH33	CH34	CH35	CH36	9
		主桁内部(名谷S-2)	CH37	CH38	CH39	CH40	CH41	CH42	CH43	CH44	CH45	9
		主桁内部(名谷S-3)	CH46	CH47	CH48	CH49	CH50	CH51	CH52	CH53	CH54	9
22	十条	換気所内	CH1	CH2	CH3							3
合計CH数												473



写真-2 地震計の設置状況例 (NO.21 垂水観測局)

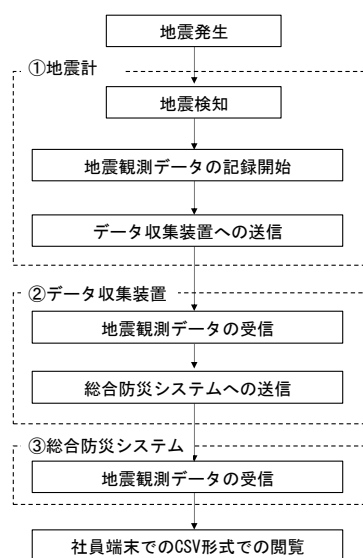


図-5 地震観測データ取得の流れ



図-6 総合防災システムにおける地震観測データの取得状況

阪神高速の地震観測システムは、ヘルスチェック機能が備えられており、装置間のヘルスチェックが定周期（60s）で行われている。具体的には、操作系副処理装置はヘルスチェックの電文を5回（300秒）受信できなかった場合、総合防災システムを異常とみなし、回線切断後イニシャルシーケンスへ移行することになる。さらに、年に1回、点検員が現地に赴き、模擬地震動を与えることで正常に作動しているかどうかといった定期点検も行っている。

3. 主な地震観測点の地震計設置状況

図-4、表-2に示した全22箇所のうち、主な観測地点として、No.4新猪名川大橋観測局、No.11泉大津観測局（松ノ浜高架橋）、No.21垂水観測局（名谷高架橋）の地震計設置状況を示す。

(1) 新猪名川大橋観測局

新猪名川大橋観測局の地震計設置状況を図-7に示す。猪名川大橋は、橋長400mの2径間連続PC斜張橋である。地震計は、陸上部の地中-2.8m、主塔連壁基礎の支持層である-30.85m、主塔頂部、主塔中間部、主塔内、桁中央部、端橋脚天端の計7箇所、17CHの成分を取得することができる。

(2) 泉大津観測局（松ノ浜高架橋）

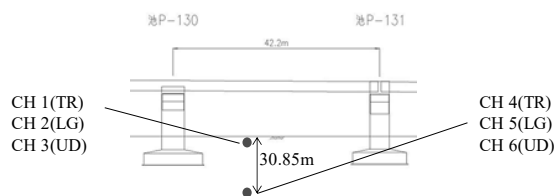
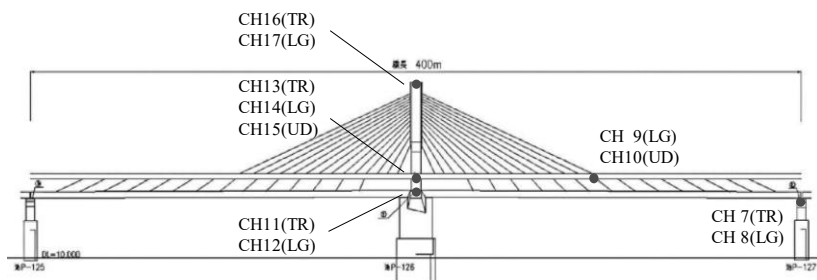
泉大津観測局（松ノ浜高架橋）の地震計設置状況を図-8に示す。松ノ浜高架橋は、4径間連続非合成箱桁橋2連で構成されている。支承には鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）が用いられている。地震計は、地表部、フーチング部、橋脚天端、主桁部など計11箇所、40CHの成分を取得することができる。



(a) 全景写真

(b) 構造諸元

橋長	400m (200m+200m)
有効幅員	20.1m
上部構造	2径間連続PC斜張橋
下部構造	RC小判型壁式橋脚
基礎構造	円形連壁基礎
支承	BP支承
地盤種別	I 種地盤



(c) 構造一般図および地震計設置状況

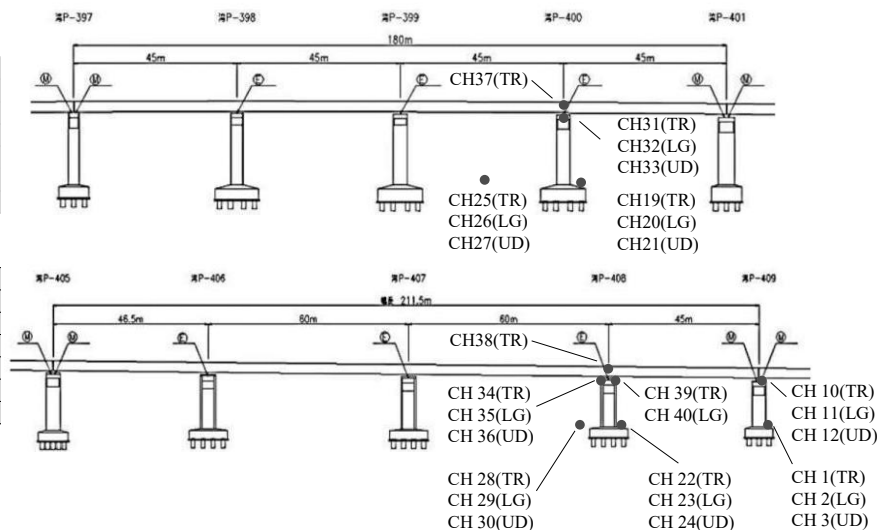
図-7 No.4 新猪名川観測局

(a) 構造諸元 (1)

橋長	180m (45m+45m+45m+45m)
有効幅員	34.4m
上部構造	4径間連続非合成板桁橋
下部構造	RCラーメン橋脚
基礎構造	場所打ち杭
支承	積層ゴム支承 (RB)
地盤種別	II 種地盤

(b) 構造諸元 (2)

橋長	211.5m (46.5m+60m+60m+45m)
有効幅員	17.6m
上部構造	4径間連続非合成箱桁橋
下部構造	RC単柱橋脚
基礎構造	場所打ち杭
支承	鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB)
地盤種別	II 種地盤



(c) 構造一般図および地震計設置状況

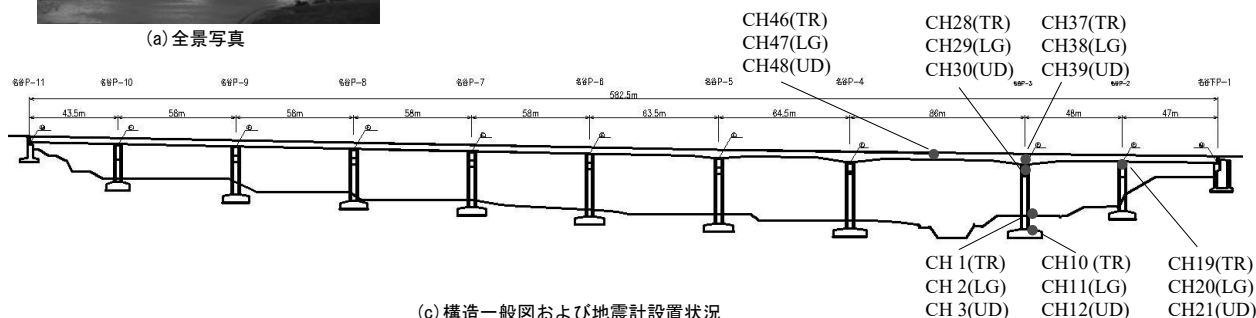
図-8 No.11 泉大津観測局 (松ノ浜高架橋)



(a) 全景写真

(b) 構造諸元

橋長	582.5m (42.5+58.0+4+63.5+64.5+86.0+48.0+46.0m)
有効幅員	21.19m
上部構造	10径間連続PC箱桁橋
下部構造	逆T式RC橋脚
基礎構造	直接基礎
支承	積層ゴム支承 (RB)
地盤種別	第I 種地盤



(c) 構造一般図および地震計設置状況

図-9 No.21 垂水観測局 (名谷高架橋)

(3) 垂水観測局（名谷高架橋）

垂水観測局（名谷高架橋）の地震計設置状況を図-9に示す。名谷高架橋は、橋長582mの10径間連続PC箱桁橋である。支承には積層ゴム支承（LRB）が用いられている。地震計は、地表部、フーチング部、橋脚天端、主桁内など、計6箇所、54CHの成分を取得することができる。

4. 地震観測データを用いた検討事例

阪神高速道路の地震観測データを用いた再現解析等の検討事例については、1995年兵庫県南部地震における東神戸大橋⁷⁾および松ノ浜高架橋⁸⁾を対象とした検討や、2004年紀伊半島南東沖地震を対象とした港大橋⁹⁾および天保山大橋¹⁰⁾を対象とした検討事例などがある。ここでは、東神戸大橋と天保山大橋の検討事例を紹介する。

(1) 東神戸大橋

東神戸大橋では、1995年1月17日兵庫県南部地震（M7.3）および翌年1996年1月25日に発生した余震をもとに再現解析が実施されている⁷⁾。

東神戸大橋の構造と地震観測点を図-10に示す。東神戸大橋では、長大斜張橋と大規模基礎の地震時挙動の解明を目的として、深江浜側の主塔およびケーソン基礎に5箇所（塔頂部：T1、塔中部：T2、桁レベル：T3、ケーソン上面、同底面：K1）、主塔から50m陸側の地盤内に2箇所（GL-34m：G1、GL-1.5m：G2）設置されている。

再現解析では最初に、微小ひずみ時の地盤定数を用い、動的サブストラクチャー法による3次元解析コードsassi⁷⁾を用いて、1996年1月25日の余震（G2:42.0Gal）の応答解析が行われた。図-11(a)は、

地表面と主塔中間部とのフーリエ振幅比であるが、解析結果は観測記録を非常によく再現している。また、図-11(b)に示すように、観測と解析の時刻歴波形もよく近似している。これらの結果より、小さな地震動に対する解析モデルの実証性が確認されている。

一方、本震のような強震時には、周辺地盤の特性は、時間により大きく変動すると考えられる。本検討で用いられた振動数領域の3次元解析では、物性値を時間変化させることはできない。したがって、液状化に至る直前付近（8-10s）での平均的な地盤物性値を用いて本震の応答解析が行われている。地盤物性値について何度か試行を繰り返すことにより、主塔中間部のフーリエ振幅比として、図-11(c)に示すような比較的よい一致が得られている。しかし、図-11(d)に示す波形においては、短周期成分は表現できていない。レベル2地震動のような強振動時には、桁同士の衝突、支承の損傷、ケーブルの一時的張力損失、地盤の液状化など、解析上の表現が難しい現象が生じている可能性が高く、解析手法における課題が示されている。

(2) 天保山大橋

天保山大橋では、2004年9月4日紀伊半島南方沖地震（M7.4）で得られた観測データをもとに、再現解析が実施されている¹⁰⁾。天保山大橋の設計時における橋軸方向1次固有周期は3.79s、橋軸直角方向1次固有周期は2.38sである。天保山大橋には、7箇所において速度計による3成分（橋軸LG、橋軸直角TG、鉛直）の地震観測が行われており、AP-2地点の地下-30m(Sensor1)、地表部(Sensor2)、フーチング上面(Sensor3)、桁部(Sensor4)、タワー頂部(Sensor7)、主桁中央部(Sensor5)、およびAP-3側の桁部(Sensor6)に設置されている（図-12）。フーチング上面

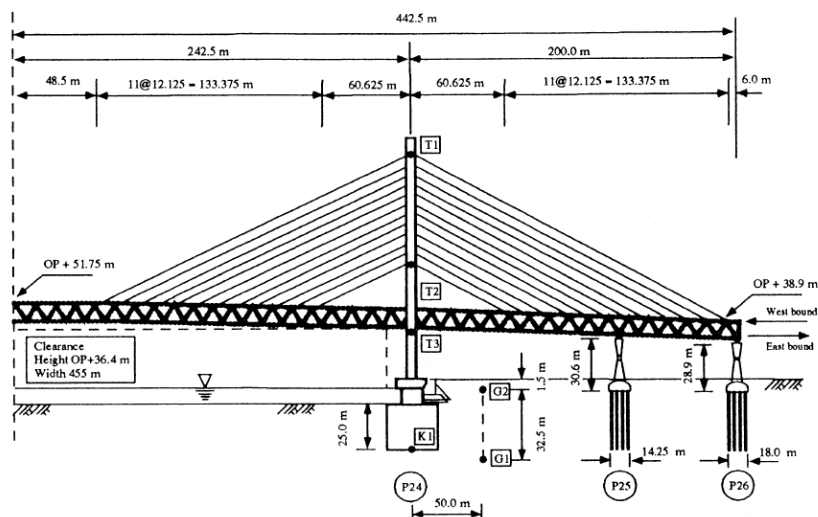
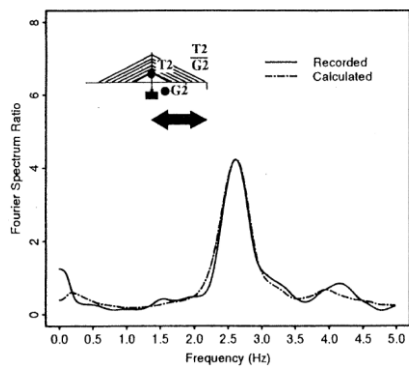
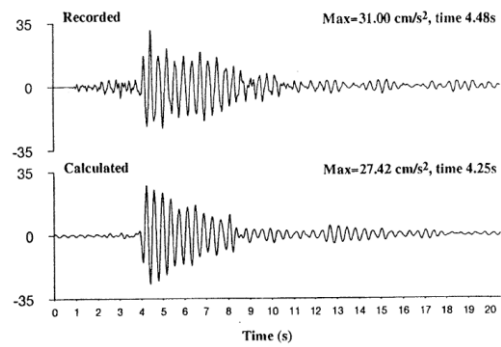


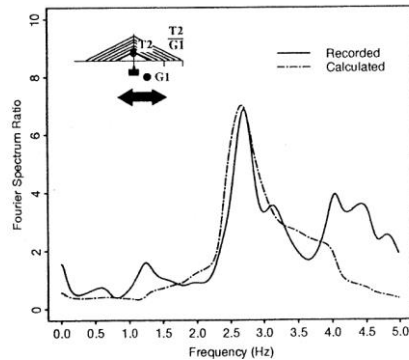
図-10 東神戸大橋の構造と地震観測点位置⁷⁾



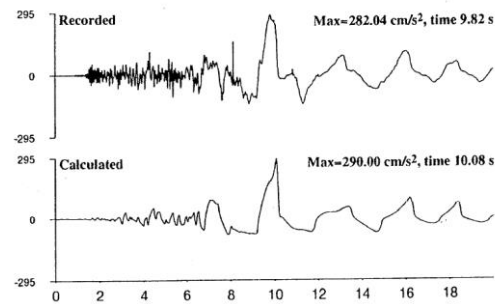
(a) 観測と解析によるフーリエ振幅比 (余震)



(b) 観測と解析による加速度波形 (T2, 余震)



(c) 観測と解析によるフーリエ振幅比 (本震)



(d) 観測と解析による加速度波形 (G2, 余震)

図-11 観測と解析によるフーリエ振幅比と加速度波形の比較⁷⁾

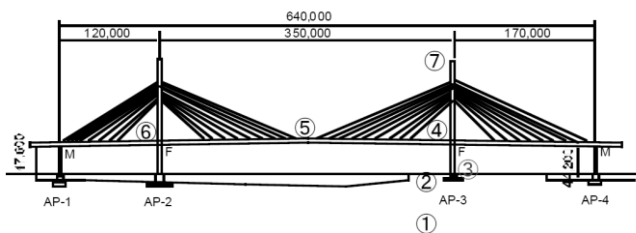
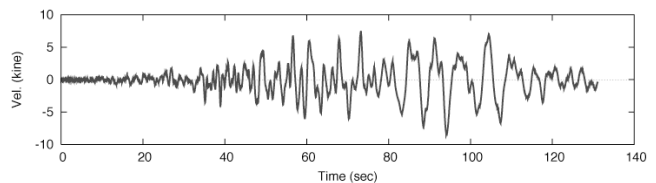
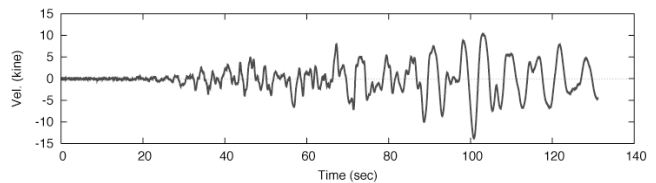


図-12 天保山大橋の構造と地震観測位置⁸⁾

単位(mm)



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-13 フーチング位置 (Sensor3) の速度記録⁸⁾

(Sensor3)における速度観測記録を図-13に示す。

解析モデルは図-14に示す3次元フレームモデルであり、節点数315、桁・主塔部は3次元梁モデル、ケーブル部はトラスモデルを用いた弾性モデルである。本モデルを用いた固有値解析結果を図-15に示す。先に示した天保山大橋の設計値とは少し異なっており、解析結果と実橋梁の応答にはこの程度の差異が含まれている。

フーチング上面における記録である図-13の加速度波形を全体系モデルに対する入力地震動として用い、天保山大橋のSensor5およびSensor7の位置での応答と観測記録との比較を試みる。解析においては1次および2次モードに対して2%のレーリー減衰を与え、Newmarkの β 法により応答計算を行った。解析結果(Calc.)と観測記録(Obs.)の比較を図-16に示す。

応答成分の周期や最大値について大きく異なる結果ではなく、本モデルにより天保山大橋の挙動をある程度表現できるとされている。

5. まとめ

本稿では、耐震技術向上のために地震観測データの活用を推進することを目的とし、阪神高速道路ネットワークの地震観測システムについて整理し、過去の地震観測データを用いた検討事例について紹介した。文献11)においても述べられているように、橋の地震観測を普及させるためには、道路管理者や研究機関の研究者、技術者の連携が重要であると考えられる。これまで、阪神高速では主に地震発生時

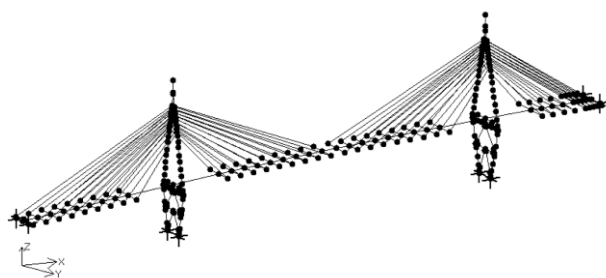


図-14 天保山大橋の解析モデル¹⁰⁾

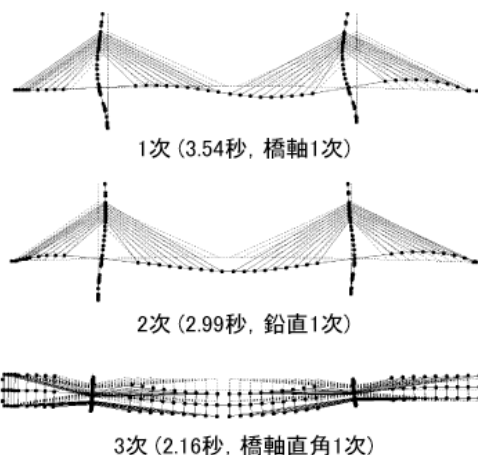


図-15 固有値解析結果¹⁰⁾

の道路管制のために地震観測データを使用してきたが、今後は、この貴重なデータを防災・減災技術の高度化、および、広く耐震技術の向上のために活用（オープンデータ化）する方法を検討していく。

また、阪神高速道路から地震観測データや解析モデル等を大学等の外部研究機関に提供し、固有振動特性、減衰特性、地震応答再現等の研究を実施し、その成果を全路線シミュレーションモデル¹²⁾の精度向上にフィードバックできるような仕組みについても検討していく。

参考文献

- 1) 川島一彦：地震との戦い なぜ橋は地震に弱かったか、鹿島出版会、2014。
- 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.263-270,2017.7。
- 3) 宮口智樹，荒川貴之，丹波寛夫：阪神高速のアセットマネジメントの取組—アセットマネジメントシステムの活用—，土木施工，2013 Jul VOL.54 No.7，2013.7。
- 4) 加賀山泰一，澤登善誠，奥西史伸：地震時被害推定機能の開発，阪神高速道路公団技報，Vol.19，pp.82-89，2000。

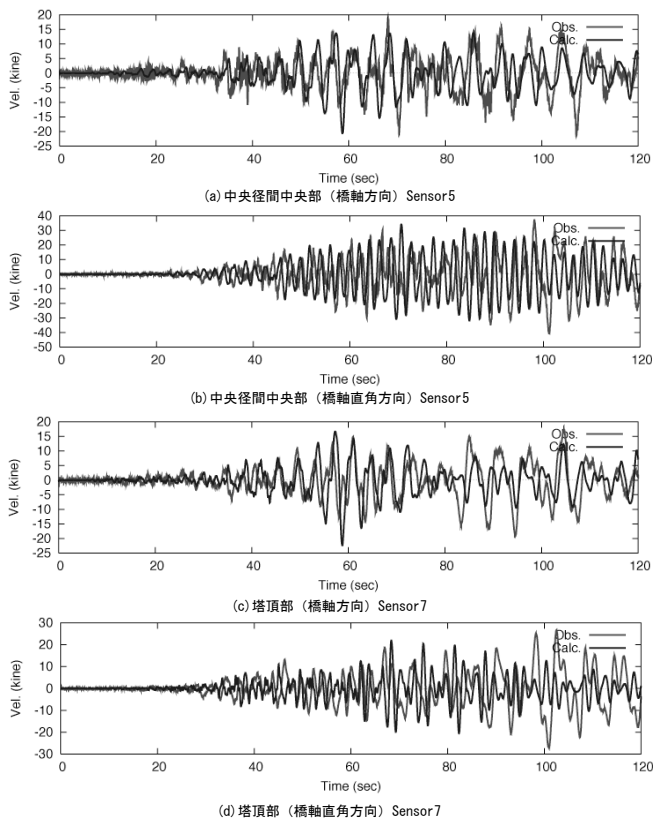


図-16 観測と解析による速度波形の比較¹⁰⁾

- 5) 堀江佳平，西岡勉，篠原型二：阪神高速道路の地震防災対策，橋梁と基礎，Vol.2008-8，pp.57-59，2008.8。
- 6) (株)東京測振：ブロードバンド地震観測と被害予測に適したサーボ型速度計，<http://www.to-soku.co.jp/products/servo/pdf/vse355ei-je.pdf>
- 7) 山崎文雄，Todor Ganev，石崎浩，北沢正彦：東神戸大橋の兵庫県南部地震時の応答シミュレーション，第24回地震工学研究発表会講演論文集，1997.7。
- 8) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三：兵庫県南部地震における阪神高速松ノ浜免震橋の地震時挙動，土木学会論文集No.626/ I -48，pp.37-50，1997.7。
- 9) 金治英貞，鈴木直人：長大カンチレバートラス橋の地震応答に関する観測結果と解析的検証，構造工学論文集，Vol.53A，2007.3。
- 10) 高橋良和：長周期土木構造物の応答観測記録と解析，地震防災フォーラム'06—来るべき南海，東南海地震に備えて(4)—講演資料，2007.1。
- 11) 矢部正明，塚本英子：構造物の地震応答の観測に関する調査，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.297-304，2017.7。
- 12) 松下麗菜，篠原型二，馬越一也，中村真貴，本橋英樹，服部匡洋：広域道路ネットワークにおける地震応答シミュレーションの実現可能性に関する検討，(公社)土木学会，第37回地震工学研究発表会，2017.10。