

構造物の地震応答の観測に関する調査

矢部 正明¹・塚本 英子²

¹正会員 博（工）（株）長大 構造事業本部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

²非会員 （株）長大 構造防災技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

公表されている資料^{1),2)}から、国土交通省国土技術政策総合研究所が、橋梁の地震応答を観測している橋梁は18橋と予想される。これは、文献1), 2)で観測所名が橋梁名となっている観測箇所を計数したもので、18橋の全てで橋の地震応答が観測されているかどうかは不明である。北海道開発局が、橋梁の地震応答を観測している橋梁は29橋³⁾である。高速道路会社の状況は調査していないが、第17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の特別講演では、首都高速道路で11橋⁴⁾という説明があった。首都高速道路では、数多くの地震計を配置した集中観測が吊構造系橋梁だけでなく、免・制震構造を採用した橋梁や多連の3径間連続橋でも行われている⁴⁾。

建築研究所が建物の地震応答を観測しているのが60箇所⁵⁾で、多くが関東地方にあるが、他は全国を200km程度の間隔でカバーできるように配置されている⁵⁾。この他にも、国土技術政策総合研究所や都市再生機構（UR）および民間施工会社等によって建物の地震応答が観測されており、明らかに、橋梁よりも数多くの構造物を対象に、地震応答の観測が行われている。さらに、建築学会では、構造物の地震応答の観測の普及に関する活動も積極に行われている^{6),7),8)}。

本報告は、構造物を対象とした地震応答の観測記録の活用状況を、既存の公開資料から整理した。さらに、橋梁の地震応答の観測を普及させるために必要な活動案を示した。

2. 橋梁の地震応答の観測とその利用状況

文献9)から文献37)を対象に、橋梁の地震応答が

観測された地震と橋梁名・形式および観測記録の利用状況を整理した。整理結果を、表-1(1)と表-1(2)に示す。観測した地震応答を用いた検討内容は、大きくは、4つに分けられる。具体的には、固有振動特性の推定、減衰特性、地震応答特性、固有値解析結果と推定された固有振動特性の比較（＝動的解析モデルの質量分布と剛性分布および境界条件の検証）、地震応答の再現解析（＝耐震計算に用いる動的解析法の検証、減衰定数の推定）である。

橋梁の地震応答の基本となる固有振動特性のうち、固有周期と固有振動モードおよびモード減衰定数を地震応答の観測データから求めているのは、集中観測が行われている橋梁だけである。固有振動モード形を観測記録から確定するためには、多数点（位置）のモード縦距が必要となるため、特殊橋梁に分類される吊構造系橋梁がほとんどであるが、免震支承を用いた東扇島高架橋でも固有振動特性が推定されており、非常に貴重な観測点である。逆に、大鳴門橋と南備讃瀬戸大橋および櫃石島橋は、首都高速道路の吊構造系橋梁ほどには多数の地震計が配置されていないが、一応、集中観測が行われているにもかかわらず、固有振動特性の推定が行われていないようである（公表資料を確認できなかった）。

観測された地震応答から減衰特性を検討しているのは、配置されている地震計の数も多く、観測された地震（地震動によって励起された地震応答）も多い横浜ベイブリッジ^{9),11),16),27)}だけである。横浜ベイブリッジは、斜張橋としては珍しく主塔位置でリンク構造を採用しているダブルデッキの斜張橋であり、ここでの検討結果は、普遍性という観点では、他に適用できる橋も少ないが、貴重な観測点である。

地震応答特性は、多くの橋で検討されているが、その内容には質・量ともに、橋梁間で大きな差がある。観測された応答波形とフーリエスペクトルを描

表-1(1) 橋梁を対象とした地震応答の観測事例(その1)

No.	地 震	橋 梁	観測 状況	地 震 応 答 の 分 析 内 容								
				固有振動特性			減衰 特性	地震 応答 特性	固有値解析 の確認		地震 応答 の再 現 解 析	その他
				固有 周期	固有 振動 モード	モード 減衰			固有 周期	固有 振動 モード		
1	1978. 06. 12 宮城県沖 M _W 7.6	伊達橋:トラス橋						○ ¹⁾				
2	1990. 02. 20 伊豆大島近海 M _J 6.5 1990. 06. 05 神奈川県西部 M _J 5.3 1992. 02. 02 東京湾 M _J 5.7 1995. 07. 03 相模湾 M _J 5.2 1996. 12. 21 茨城県南部 M _J 5.6	横浜ベイブリッジ: 鋼斜張橋	集中 観測	○	○	○	○	○				
	1990. 02. 20 伊豆大島近海 M _J 6.5 1992. 02. 02 東京湾 M _J 5.7 2004. 10. 23 新潟県中越 M _W 6.6 2004. 10. 23 新潟県中越(余震) M _J 6.5 2005. 07. 23 千葉県北西部 M _J 6.0 2005. 08. 16 宮城県沖M _W 7.2	かつしかハープ橋: 鋼斜張橋	集中 観測	○	○	○		○				
3	1992. 01. 22 山形県中部 M _J 5.7 2005. 08. 16 宮城県沖 M _J 7.2 の27地震	福島県内の発電所 構内道路橋: 免震橋	集中 観測					○				○ ²⁾
4	1994. 08. 31 根室半島南東沖 M _J 6.3 1994. 10. 09 北海道東方沖 M _J 7.3 1995. 01. 21 根室半島南東沖 M _J 6.2 1995. 04. 29 北海道東方沖 M _J 6.7	温根沼橋:免震橋		○		○		○				
5	1994. 10. 04 北海道東方沖 M _W 8.3	山あげ大橋: 免震橋						○			○	
6	1994. 12. 28 三陸はるか沖 M _W 7.7	丸木橋:免震橋						○			○	
7	1995. 01. 17 兵庫県南部 M _W 6.9	大鳴門橋:吊橋	集中 観測					○			○	
		南備讃瀬戸大橋: 吊橋	集中 観測					○			○	
		櫃石島橋: 鋼斜張橋	集中 観測					○			○	
		松ノ浜橋:免震橋		○		○		○			○ ³⁾	
8	1998. 08. 29 東京湾 M _J 5.3	多径間連続免震橋					○			○		
9	2000. 10. 06 鳥取県西部 M _W 6.7 2004. 09. 05 19:07 三重県南東沖 M _J 7.1 2004. 09. 05 23:57 三重県南東沖 M _J 7.4	港大橋:トラス橋					○			○		
	2000. 10. 06 鳥取県西部 M _W 6.7	多々羅大橋: 鋼斜張橋					○			○		
10	2001. 03. 24 芸予 M _W 6.8	安芸灘大橋:吊橋	集中 観測	○				○	○		○	
11	2002. 04. 28 三重県中部 M _J 4.1 2003. 07. 09 愛知県西部 M _J 4.1 の8地震	木曽川橋: エクストラードス橋	集中 観測					○				

1) 地震応答特性(被害との関係) 2) 免震支承の等価剛性推定 3) 免震支承の剛性と減衰係数の同定

き、その最大値や卓越周期だけに着目しているものから、地震応答中に何が起きているかの挙動の推定

を行っているものがある。
固有値解析結果の確認は、東扇島高架橋²³⁾および

表-1(2) 橋梁を対象とした地震応答の観測事例(その2)

No.	地 震	橋 梁	観測 状況	地震応答の分析内容								
				固有振動特性			減衰 特性	地震 応答 特性	固有値解析 の確認		地震 応答 の再 解析	その他
				固有 周期	固有 振動 モード	モード 減衰			固有 周期	固有 振動 モード		
12	2003. 09. 26 十勝沖 M _W 8.3	十勝大橋： PC斜張橋	集中 観測	○	○	○		○			○ ⁴⁾	
13	2004. 09. 05 三重県南東沖 M _J 7.1	横浜ベイブリッジ： 鋼斜張橋	集中 観測				○	○				
14	2004. 10. 23 新潟県中越 M _W 6.6	横浜ベイブリッジ： 鋼斜張橋	集中 観測	○	○	○	○	○	○	○	○	
		レインボーブリッジ： 吊橋	集中 観測	○	○	○		○	○	○	○	
		鶴見つばさ橋： 鋼斜張橋	集中 観測	○	○	○		○	○	○	○	
15	2004. 11. 15 十勝沖 M _J 5.7 2005. 01. 18 釧路沖 M _J 6.4 2005. 01. 31 十勝沖 M _J 5.4 2006. 01. 10 十勝地方中部 M _J 4.2	札内清柳大橋： 鋼斜張橋	集中 観測	○	○	○		○			○	
16	2004. 11. 29 釧路沖 M _J 7.1	十勝大橋： PC斜張橋	集中 観測					○			○ ⁴⁾	
17	2011. 03. 11 東北地方太平洋沖 M _W 9.1	横浜ベイブリッジ： 鋼斜張橋	集中 観測	○	○	○		○			○	
		東扇島高架橋： 免震橋	集中 観測	○	○	○		○	○	○	○	○ ⁵⁾
		南太田高架橋： 2径間連続鋼鈑桁橋						○			○	
		山田高架橋： 地震時水平力分散 構造(国道45号)						○			○	

4) 地震応答の再現解析(減衰に着目) 5) 地盤の地震応答の再現解析

横浜ベイブリッジ²⁷⁾と鶴見つばさ橋²⁷⁾およびレインボーブリッジ²⁷⁾で行われている。吊構造系橋梁3橋の検討は、耐震補強設計を行う際に、耐震補強設計に用いる地震応答を求めるための動的解析モデルが適切かを確認するために行われたものである。近年、工学シミュレーションの品質保証という観点から、検証(Verification)と妥当性確認(Validation)が求められるようになってきている。著者は、耐震設計に用いる動的解析モデルの検証は、観測された地震応答から推定した固有振動モード形とその固有周期が、固有値解析より得られたものと近似しているかを確認することが一番精度が良い検証方法だと思っている。それは、固有振動モード形と固有周期は、構造物の質量と剛性および境界条件によって決定されるからである。事実、レインボーブリッジでは、補剛桁のねじれの固有振動モードの再現性を高めるために、解析モデルの質量の配置を換えており、そのことを、耐震補強設計の実施設計に申し送りしている。以上のような観点から、東扇島高架橋および横浜ベイブリッジと鶴見つばさ橋およびレインボーブリッジは、貴重な観測点である。

地震応答の再現解析も、多くの橋で検討されているが、その内容には橋梁間で大きな差がある。震源

から架橋地点が離れていたため、耐震設計で対象としているレベル2地震動のような地震動強度ではなかったが、2011.3.11東北地方太平洋沖地震の地震動によって励起された横浜ベイブリッジ²⁴⁾、東扇島高架橋²³⁾、南太田高架橋²²⁾、山田高架橋²⁵⁾の地震応答の再現解析は、少なくとも、レベル1地震動以上の地震動強度(レベル2地震動強度未満)による地震応答の算出法(=線形動的解析法)の妥当性は示すことができしており、貴重な観測点である。特に、東扇島高架橋では、橋脚基部の軸方向鉄筋のひずみが観測されており、ひずみの時系列データから求めた橋脚基部の曲げモーメントと動的解析結果は、良く近似している²³⁾ことが確認されている。

表-1(1)と表-1(2)より、地震計を多数配置している橋梁の数が多く、首都圏で観測される地震の多さから、首都高速道路における橋の地震応答の観測点が、質・量ともに、耐震設計上有用な情報を提供してきた観測地点であることがわかる。

3. 建築構造物の地震応答の観測とその利用状況

図-1は、文献38)から文献82)の内容を概観し、建

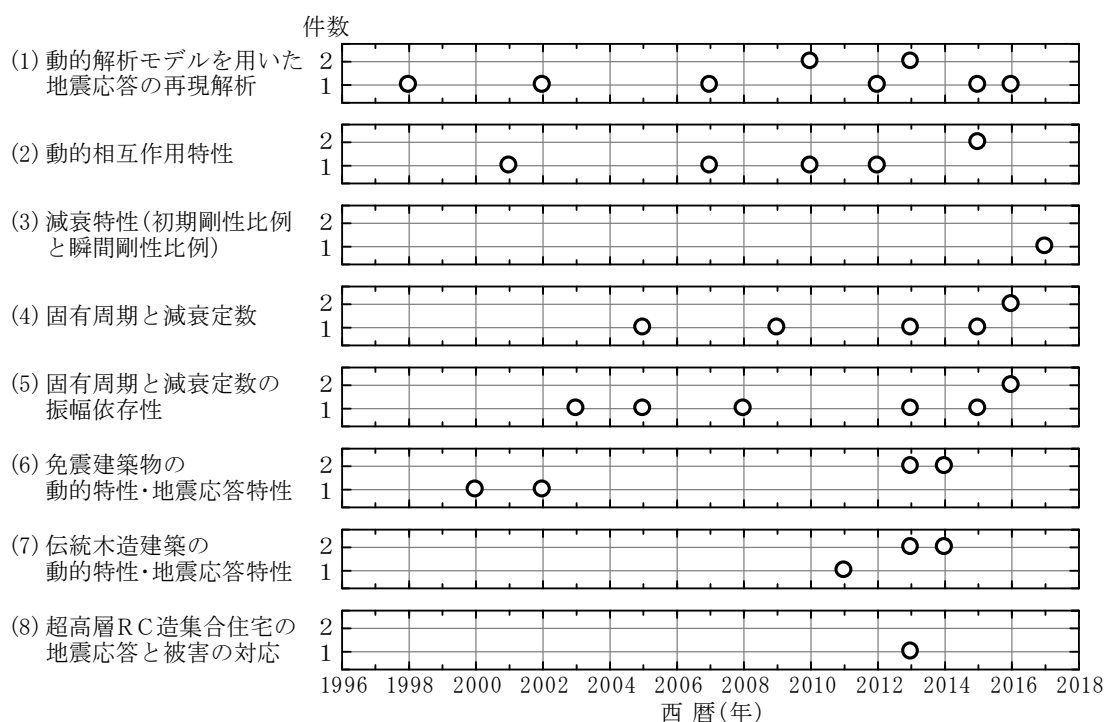


図-1 建築物の地震応答の観測記録を用いた分析内容とその発表件数の時系列的変化

建築物の地震応答の観測記録を用いた検討内容と論文や報告の発表件数を時系列的に整理したものである。対象とした論文と報告は、J-STAGEで公開（フリー）されているものである。

建築物の地震応答の観測記録を用いた検討内容は、大きく8つに分けた。具体的には、動的解析モデルを用いた地震応答の再現解析、動的相互作用特性、減衰特性（RC構造物の耐震設計に用いる動的解析モデルの粘性減衰マトリックスの剛性比例項を初期剛性に比例させるか瞬間剛性に比例させるか）、固有周期と減衰定数、固有周期と減衰定数の振幅依存性、免震建築物の動的特性と地震応答特性、伝統木造建築物の動的特性と地震応答特性、超高層RC造集合住宅の地震応答と被害の関係である。時系列的な変化を見ると、2011年を境に、発表数が増加していることがわかる。理由は、2011.3.11東北地方太平洋沖地震で観測された地震応答を用いた検討結果が発表されているからである。文献70)のように、1995年兵庫県南部地震での免震建築物での地震応答を検討した研究もある。表-1(2)に示した橋梁分野での2011.3.11東北地方太平洋沖地震の検討数と比較すると、建築分野の方が遙かに数が多いことがわかる。

文献38)から文献82)の中から、幾つかの研究に着目してみる。文献44)は、2007年新潟県中越沖地震で被災した建物（K-NET柏崎NIG018近傍）で余震観測を行い、余震で精度を高めた解析モデルと解析条件で、本震時の検討を行っている。文献47)では、

約150棟の建物の常時微動・振動実験、強震観測より得られた応答を用いて動的相互作用等の分析を行っている。また、計測システムやデータの公開についても提案を行っている。文献50)では、免震建築物を対象に、土圧計と加速度計より得られた地震応答を用いた検討が行われている。

文献53)は、著者が感銘を受けた報告である。建築分野では、耐震設計に非線形動的解析が導入されたときから、粘性減衰マトリックスの剛性比例項は、初期剛性に比例させるべきか、瞬間剛性に比例させるべきかが議論となってきた。多くの論文が、振動台を用いた実験結果の再現解析を行い、瞬間剛性に比例させた方が、実験結果の再現性が高いとしてきた。文献53)は、その検討を、実構造物の地震応答観測記録を用いて行っている。結論は、瞬間剛性に比例させた方が、再現性が高いというものであった。橋梁分野でも、このような検討ができる環境とする必要がある。

文献54)は中低層RCとSRCの建物28棟、文献56)は超高層建物（RC造2棟、S造8棟）10棟、文献68)は免震建築物65棟を対象に、2011.3.11東北地方太平洋沖地震で観測された地震応答を用いて動的特性を検討・整理している。同様に、文献58)は2004年9月紀伊半島南東沖地震による建築物8棟、文献59)は建築物25棟の1990年から2004年までの地震応答の観測、文献63)はRC造超高層建物2棟の15年間の地震応答（2011年東北地方太平洋沖地震含む）の観測を用いて、動的特性を検討整理している。

文献55)は、RC造5棟、SRC造8棟で観測された地震応答から、固有周期や減衰定数の振幅依存性を検討している。大地震時の動的特性を外挿によって推定するためには、このような研究が欠かせない。

文献65)は、構造ヘルスマニタリングを意図して、超高層建物を対象に連続地震観測を行っている。文献75)は、筆者らが所属する大学の建物3棟を対象に、微動・強風時・地震時の応答を観測し、動的特性を検討整理している。

図-1には入れていないが、文献83)は、免・制振構造を採用した建築物（免震327棟：地震計14棟、けがき式変位計135棟、制振130棟：地震計15棟）の2011.3.11東北地方太平洋沖地震での地震応答を分析しており、学・官・民が協力して貴重な情報を提供している。文献84)は、超高層建築物10棟と免震建築物3棟および中低層一般建築物4棟の2011.3.11東北地方太平洋沖地震での地震応答を用いて動的特性を同定している。文献85)と86)は、異なる組織や異なる機関の研究者が連携して取りまとめたもので、価値ある情報を提供している。

4. まとめ

橋梁分野と建築分野を対象に、構造物の地震応答の観測とその観測記録を用いた検討状況について概観してきたが、明らかに、建築分野の方が、地震応答の観測を行うことに関して意識が高いことがわかる。ただし、学の方では自身が所属する大学構内の建物で地震応答の観測をできる点や、橋梁構造の地震応答の観測で問題となる耐環境性（外気に曝されること）や、電源確保が問題とならないという点も無視できない。しかし、橋梁分野と建築分野の地震応答の観測という点で大きく異なるものに、「連携」がある。文献83)や文献85)、86)にあるように、建築分野は、他の組織や他の研究機関に所属する研究者・技術者の連携がうまく機能しているように感じる。多くが、公的機関が管理する橋梁に関しては、この連携が橋の地震応答観測を普及させるためのキーワードとなる。

観測対象となる橋の提供（公開）、電源確保（電源提供）やクラウドを利用した収録データの共有化・公開などが連携することによって可能となるように思う。性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会とみやざきインフラモニタリング研究会および白山工業（地震計）が連携した高松橋の連続観測⁸⁷⁾は、観測開始時よりも設置されているセンサーの種類も増加している。観測対象となる橋と電源があれば、センサーを設置したいという

人達が出てくるのである。

地震計専門メーカーだけでなく、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサーやスマートデバイス⁸⁸⁾およびクラウドを利用した地震応答の観測システム⁸⁹⁾の構築などは、当該橋梁の管理者と地元大学の計測・通信・情報分野の研究者・技術者と連携することにより、安価で効率的な地震応答の観測⁹⁰⁾が期待できる。

道路橋は、交通状況の把握のためのカメラ映像から、橋の地震時の挙動を推定するという方法⁹¹⁾も考えられる。

高松橋で試行している⁸⁷⁾ように、トリガーを設定せずに、24時間連続観測を行い、そのデータを維持管理に活用⁹²⁾することも、地震観測を普及させるために有効な手立てだと思う。ケヴィン・ケリーはその著書⁹³⁾で、近い将来に実現可能な夢として、人間の体調管理に関して、次のように述べている。将来チップがさらに小さくなり、毎日センサーが心拍数・血圧・体温・血糖値・リンパの状態・睡眠のパターン・体脂肪・活動レベル・気分・脳波の状態を記録すれば、医学における正常値（架空の平均値のこと）ではなく、個人の基準値（個人の正常値）に行き着き、具合が悪いときや検査をしたいときに価値あるものになる。⁹³⁾対象が橋梁であれば、「近い将来」は、人間の体調管理よりも「より近い将来」に感じる。当然、行動を起こさなければ何も始まらない。

金井は、1948年に、「建物の損傷から見た地震動の性質について」という論文⁹⁴⁾を発表している。地震観測（地盤上）がどれだけ高密度となっても、必ず、激震地で地震計がない場所があるので、建物の振動性能の面から震害を解析し地震動の性質まで遡って考えてみるという内容である。このようなアプローチは、当然、将来も必要であるが、構造物の地震応答の精度が、約70年前と同様ではあまりにも情けないと思う。

参考文献

- 1) 日下部毅明，上原浩明，松本俊輔：道路施設における強震観測調査（研究期間平成 16～18 年度），<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0253pdf/ks025324.pdf>
- 2) 金子正洋，片岡正次郎，長屋和宏，松岡一成：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による強震記録―土木構造物における加速度強震記録（No.28）―，―高密度強震観測記録集（No.5）―，―地震計ネットワーク観測記録集―，国総研資料第 726 号，2013.
- 3) 構造研究室：北海道開発局の強震観測，北海道開発土木研究所月報，No.622，pp.52-55，2005.
- 4) 溝口孝夫：首都高速道路における地震観測と 2011 年

- 東北地方太平洋沖地震による橋の地震応答, 第 17 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特別講演: 地震観測の活用 (2014.7.2), 2014.
- 5) 鹿嶋俊英, 小山信, 大川出: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録, 建築研究所資料, No.135, 2012.
 - 6) 片岡俊一, 境茂樹, 栗田勝実, 神原浩, 山村一繁, 安井健治: 建築物における強震観測の現状調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.32, pp.87-90, 2010.
 - 7) 飛田潤, 鹿嶋俊英, 中村充, 植竹富一, 山村一繁, 栗田勝実, 神原浩: 国内の強震観測建物台帳の作成, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.46, pp.901-904, 2014.
 - 8) 日本建築学会強震観測小委員会: 強震観測の手引き, http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/Kyoshin_Tebiki/index.php, Last-modified:2013-09-12(木)17:07:25
 - 9) 藤野陽三, シリゴリング ディオンシウス, 並川賢治, 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 (構造・地震工学), Vol.69, No.2, pp.372-391, 2013.
 - 10) 若林登, 高野晴夫, 七井英子, 矢部正明: 地震観測記録による横浜ベイブリッジの固有振動特性, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.336-337, 1993.
 - 11) 矢部正明, 七井英子, 若林登, 高野晴夫: 地震観測記録による横浜ベイブリッジのモード減衰定数の推定, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.334-335, 1993.
 - 12) Shigeki UNJOH, Yukio ADACHI: Damping Characteristics of Long-Span Suspension Bridges, *IABSE SYMPOSIUM KOBE 1998 Long-Span High-Rise Structures*, pp.335-340, 1998.
 - 13) 吉澤努, 森谷俊美, 福永勸, 川端淳: 本州四国連絡橋の地震時挙動とシミュレーション解析, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.685-694, 2000.
 - 14) 鈴木周一, 栗原敏広, 加島延行, 磯江浩: 地震時動態観測結果を基にした長大橋の挙動解析, 橋梁と基礎, Vol. ,No.7, pp.27-31, 2001.
 - 15) 萩原勝也, 西森孝三, 新田勉: 芸予地震による安芸灘大橋の地震応答解析, 橋梁と基礎, Vol.36, No.5, pp.31-36, 2002.
 - 16) Dionysius M. Siringoringo and Yozo Fujino: Observed dynamic performance of the Yokohama-Bay Bridge from system identification using seismic records, *STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING*, 13, pp.226-244, 2006.
 - 17) Dionysius M.Siringoringo, Yozo Fujino: Dynamic characteristics of a curved cable-stayed bridge identified from strong motion records, *ENGINEERING STRUCTURES*, 29, pp.2001-2017, 2007.
 - 18) Dionysius M Siringoringo, and Yozo Fujino: System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS*, Vol.37,pp.361-386,2007.
 - 19) Dionysius M Siringoringo: PRELIMINARY ANALYSIS ON THE SEISMIC RESPONSE OF TOKACHI CABLE-STAYED BRIDGE SUBJECTED TO THE 2003 GREAT-TOKACHI EARTHQUAKE
 - 20) Muhammad Tariq Amin Chaudhary, Masato Abe, Yozo Fujino and Junji Yoshida: SYSTEM IDENTIFICATION OF TWO BASE-ISOLATED BRIDGES USING SEISMIC RECORDS, *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, pp.1187-1195, OCTOBER, 2000.
 - 21) Muhammad Tariq Amin Chaudhary, Masato Abe, Yozo Fujino: Investigation of atypical seismic response of a base-isolated bridge, *Engineering Structures*, 24, pp.945-953, 2002.
 - 22) 溝口孝夫, 大西孝典, 佐藤崇, 塚本英子: 首都高速道路南太田高架橋における強震記録による地震応答解析, 橋梁と基礎, Vol.47, No.8, pp.68-70, 2013.
 - 23) 溝口孝夫, 大西孝典, 矢部正明, 鍋島信幸: 東北地方太平洋沖地震の強震記録による免震支承を有する PC 箱桁橋の地震応答解析, 橋梁と基礎, Vol.47, No.10, pp.30-36, 2013.
 - 24) 高木剛太郎, 水谷司, 藤野陽三, シリゴリング ディオンシウス: 東北地方太平洋沖地震においてみられた横浜ベイブリッジの主塔主桁間の衝突とその再現による動的特性の解明, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.242-248, 2014.
 - 25) 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 (構造・地震工学), Vol.68, No.4 (地震工学論文集第31-b巻), pp.1-444-1-457, 2012.
 - 26) 川島一彦, 荻本英典, 渡邊学歩, 西弘明: 強震記録に基づく PC 斜張橋の減衰特性, 土木学会論文集A, Vol.65, No.2, pp.426-439, 2009.
 - 27) 山本泰幹, 藤野陽三, 矢部正明: 地震観測された長大吊橋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.
 - 28) 奥田基, 矢野賢晃, 今和也: 南備讃瀬戸大橋の地震応答記録と解析値の比較, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.821-831, 1997.
 - 29) 吉田修: 兵庫県南部地震による大鳴門橋の動態観測値と応答解析値の比較分析, 鋼構造論文集, Vol.6, No.22, pp.41-56, 1999.
 - 30) 伊奈義直, 中谷泰子, 長嶋文雄: 免震道路橋の同時多点観測と簡易モデルを用いた構造同定解析, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1 (地震工学論文集第30巻), pp.478-487, 2009.
 - 31) 伊奈義直, 菊池敏男: 免震支承を用いた PC 道路橋の地震時挙動, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.778-788, 2008.
 - 32) 宮森保紀, 池田憲俊, 木村浩士, 三上修一, 大島俊之: 鋼斜張橋モデルの地震時応答解析と実測データの比較, 土木学会地震工学論文集第29巻, pp.468-474, 2007.
 - 33) 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, pp.277-286, 2007.
 - 34) 忽那孝治, 鹿野善則, 芦塚憲一郎, 大保直人, 山野辺慎一, 河野哲也: 伊勢湾岸自動車木曾川橋における地震時挙動観測とその活用, 土木学会地震工学論文集第27巻, 2003.
 - 35) 中村博一, 藤田亮一, 森敦, 水上善晴: 多径間連続免震橋梁の地震時挙動と解析モデル化に関する一考

- 察, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.669-672, 1999.
- 36) 大塚久哲, 運上茂樹, 西原史和: 実測記録に基づく免震橋の地震時振動特性に関する研究, 土木研究所資料第3383号, 1995.
- 37) 岩崎敏男, 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 伊達橋強震記録の解析 (第1報), 土木研究所資料第1695号, 1981.
- 38) 山本健史, 保井美敏, 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦: 地盤一杭一建物の動的相互作用を考慮した超高層集合住宅の地震応答解析による2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録の再現, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第8号 (特集号), pp.75-81, 2016.
- 39) 荒川利治, 徳永至, 谷口竜紀, 中村尚弘, 木下拓也, 東城峻樹: 実験データに基づく高層建物の地盤一建物連成系による地震応答解析, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.505-509, 2015.
- 40) 中村尚弘, 木下拓也, 石川裕次, 太田博章, 池田周英, 伊藤優, 斎藤大樹, 福山洋: 2011年東北地方太平洋沖地震における超高層SRC建物の地震応答解析, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.41, pp.53-58, 2013.
- 41) 荒川利治, 沼昌昭, 菊永祐太, 中村尚弘, 鈴木琢也, 木下拓也: 実測データに基づく鉄骨造中層建物の震動特性および地盤一建物連成系の地震応答解析, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.441-446, 2013.
- 42) 川井望, 古城豊光, 渡辺一弘, 田沼毅彦: 2011年東北地方太平洋沖地震における超高層集合住宅の地震応答評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.18, No.40, pp.859-864, 2012.
- 43) 星幸男, 久田嘉章, 山下哲朗, 鱒沢曜, 島村賢太: 超高層建築における常時微動・人力加振・地震観測記録と3次元立体解析結果の比較検討による振動性状評価に関する研究, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp.73-88, 2010.
- 44) 護雅史, 飯場正紀, 山本耕司, 宮本裕司, 古山田耕司, 小山信, 鹿嶋俊英: 2007年新潟県中越地震における強震観測記録を用いた被災建物の応答評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.651, pp.933-942, 2010.
- 45) 片谷陽子, 児玉智彦, 桃山健二, 荒木秀夫, 菅野俊介: 2011年芸予地震における広島大学工学部研究棟の地震観測および弾塑性解析, 日本建築学会技術報告集, 第15号, pp.383-388, 2002.
- 46) 福岡篤信, 宮本裕司, 酒向裕司, 古江守, 安達直人, 喜多村英司, 宮本賢治: 複合基礎の地震応答解析法に関する実証的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第506号, pp.109-116, 1998.
- 47) 飛田潤, 福知伸夫, 小島宏章, 浜田栄太: 地盤・建物系の高密度強震観測の展開と建物動的挙動の検討, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号 (特集号), pp.37-56, 2007.
- 48) 川崎哲朗, 田守伸一郎: 常時微動観測記録と地震観測記録を用いた動的相互作用ばねの同定, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.49, pp.937-942, 2015.
- 49) 伊藤真二, 山下忠道, 宮本裕司, 犬伏徹志, 荏本孝久: 耐震建物と免震建物の地震観測記録とFEM解析による有効入力動の検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.471-476, 2015.
- 50) 周方圓, 護雅史, 福知伸夫, 飛田潤: 地震観測記録に基づく建物一地盤間の相対変位と地震時側面土圧の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.675, pp.685-693, 2012.
- 51) 水野正行, 飯場正紀, 鹿嶋俊英: 大小地震時における9階建免震建物の上下応答特性と地盤との動的相互作用効果, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp.77-86, 2010.
- 52) 入江康隆, 野俣善則: 観測記録に基づく木造2階建て住宅とRC造5階建て建物の動的相互作用 木質構造物の地震入力に関する研究 (その1), 日本建築学会構造系論文集, 第548号, pp.27-34, 2001.
- 53) 森田高市, 鹿嶋俊英: 強震観測データに基づくRC・SRC造超高層建物の減衰定数の傾向について, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.53, pp.49-52, 2017.
- 54) 森田高市, 鹿嶋俊英: 2011年東北地方太平洋沖地震における中低層RC造・SRC造建築物の振動特性の評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.52, pp.905-908, 2016.
- 55) 中村尚弘, 鹿嶋俊英, 木下拓也, 伊藤真二, 宮本泰志, 曾根孝行, 荏本孝久, 犬伏徹志: 振幅依存性を考慮した中低層RC, SRC造建物の水平1次振動特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.721, pp.471-481, 2016.
- 56) 鹿嶋俊英, 小山信, 小豆畑達哉, 井上波彦: 東北地方太平洋沖地震による超高層建物の振動特性の変動, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.493-497, 2015.
- 57) 上林宏敏, 永野正行: 超高層建物の強震観測記録に基づく増幅特性と動特性評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.435-440, 2013.
- 58) 上林宏敏, 大西良広, 林康裕: 2004年9月紀伊半島南東沖地震の観測記録に基づく大阪平野の超高層建築物の振動特性, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.31, pp.679-684, 2009.
- 59) 鹿嶋俊英, 北川良和: 強震観測記録から推定した建物の振動特性の特徴, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp.163-166, 2005.
- 60) 森田高一, 鹿嶋俊英: 強震観測に基づく建物・地盤相互作用の影響を考慮した減衰定数の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.9, pp.1-12, 2016.
- 61) 荒川利治, 谷口竜紀, 中村尚弘, 木村拓也, 東城峻樹: 高次モードを含めた鉄骨造中層建物の地震時における振動特性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.717, pp.1657-1666, 2015.
- 62) 松下卓矢, 西澤崇雄, 飛田潤, 福知伸夫: 常時微動計測・振動実験・強震観測に基づく超高層建物の振動特性とその変化, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.46, pp.879-884, 2014.
- 63) 森下真行, 斎藤芳人, 龍神弘明, 田沼毅彦, 渡辺一弘: RC造超高層建物の長期地震観測結果に基づく動特性評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.45, pp.527-532, 2014.
- 64) 荒川利治, 菊永祐太: 実測データに基づく鉄骨造高層建物の構造ヘルスマニタリングと減衰特性評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.419-424, 2013.
- 65) 岡本佳久, 赤澤隆士, 山田真澄, 大西良広, 林康裕: 連続地震観測記録に基づく超高層建物の振動特性評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.41,

- pp.59-64, 2013.
- 66) 山下哲郎, 久田嘉章, 坂本有奈利, 久保智弘: 新宿区超高層街区に建つ鉄骨造超高層建築の東北地方太平洋沖地震前後の振動特性, 日本地震工学論文集, 第12巻, 第4号(特集号), pp.14-26, 2012.
 - 67) 石井正人, 寺本隆幸, 長田亜矢, 浅野美次, 篠原達巳: 微振動及び地震観測記録に基づく14階建て鋼構造建物の振動特性評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.26, pp.435-440, 2007.
 - 68) 米田春美, 高岡栄治, 欄木龍大, 飯場正紀: 東北地方太平洋沖地震の公表観測記録等に基づく免震建築物の特性と挙動, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.457-460, 2013.
 - 69) 猿田正明, 山本祥江, 森川和彦, 中西啓二, 飯場正紀, 小豆畑達哉, 井上波彦: 東北地方太平洋沖地震における超高層免震建物の挙動, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.477-480, 2013.
 - 70) 古川忠稔, 伊藤雅史, 小野聡子, 橘英三郎: 実地震観測記録を用いた2棟の免震建物動特性の同定, 日本建築学会構造系論文集, 第558号, pp.117-124, 2002.
 - 71) 中村充, 竹脇出, 安井譲, 上谷宏二: 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, 第528号, pp.55-82, 2000.
 - 72) 渡辺哲史, 加藤研一, 立石一: 東北地方太平洋沖地震の観測記録に基づく日光山輪王寺本堂の振動解析モデルの適用性, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.45, pp.533-538, 2014.
 - 73) 渡辺哲史, 加藤研一, 福元俊一, 江藤公信: 東北地方太平洋沖地震とその余震に対する日光山輪王寺本堂の振動特性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.685, pp.521-528, 2013.
 - 74) 渡辺哲史, 宮本裕司, 鈴木祥之: 伝統木造寺院・東本願寺御影堂における地震観測記録の分析とシミュレーション, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.35, pp.117-122, 2011.
 - 75) 福和伸夫, 山崎靖典, 小島宏章, 飛田潤: 観測記録に基づく微動時・強風時・地震時の建築物の応答性状の違いの分析, 日本建築学会構造系論文集, 第598号, pp.61-68, 2005.
 - 76) 中田信治, 福和伸夫, 西畑尚: 実大振動実験と強震観測に基づく低層鉄骨住宅の振動特性の振幅依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第574号, pp.85-92, 2003.
 - 77) 松田和浩, 笠井和彦: 東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.704, pp.1445-1455, 2014.
 - 78) 天竺貴仁, 高橋武広, 福和伸夫, 護雅史, 飛田潤: 継続的な地震観測及び微動計測に基づく高層免震建物の建設時における振動特性の変化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.700, pp.721-730, 2014.
 - 79) 箕輪親宏, 御子柴正, 花里利一, 日塔和彦: 重要文化財法華経寺五重塔の地震・風応答観測とその考察-解析モデルによる地震・風応答計算と風観測その2-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.698, pp.481-489, 2014.
 - 80) 箕輪親宏, 松田昌洋, 新津靖, 花里利一: 重要文化財法華経寺五重塔の地震・風応答観測とその考察-画像計測による2011年東北地方太平洋沖地震を含む観測、五重塔の地震・風挙動その1-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.692, pp.1787-1796, 2013.
 - 81) 山本健史, 保井美敏, 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦, 渡辺一弘: 軟弱地盤に建つ超高層RC造集合住宅の地震応答評価と被害との対応-2011.3.11東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく検討-, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.447-452, 2013.
 - 82) 飛田潤, 福和伸夫, 松井政樹, 小島宏章: 建設時の継続的な振動観測に基づく高層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.625, pp.391-398, 2008.
 - 83) (一社)日本免震構造協会・応答制御建築物調査委員会: 東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査報告書(CD), 2012.
 - 84) 飯場正紀, 大川出, 斉藤大樹, 森田高市, 長谷川隆: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震において観測された強震記録に基づく建築物の地震時挙動の分析, 建築研究所資料, No.138, 2012.
 - 85) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 地震動情報の高度化に対応した建築物の耐震性能評価技術の開発, 国総研プロジェクト研究報告第47号, 2015.
 - 86) 小豆畑達哉, 井上波彦, 飯場正紀, 鹿嶋俊英, 小山信, 中川博人, 田沼毅彦, 森田高市: 地震観測に基づく地盤-建築構造物の動的相互作用に関する研究, 国総研資料第866号・建築研究資料第167号, 2015.
 - 87) 矢部正明, 松永昭吾, 水谷司: 地震計を用いた橋の24時間振動計測と2016年熊本地震による地震応答, 第19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.439-446, 2016.
 - 88) 党紀, 菊池友介, Ashish SHRESTHA, 王欣: スマートデバイスをを用いた構造の地震応答計測のための性能確認実験, 第18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.233-240, 2015.
 - 89) 藤原広行, 東宏樹, 内藤昌平, 先名重樹, 中村洋光, はお憲生, 吉田稔, 結城昇, 平山義治: センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システム, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第5号, pp.44-61, 2013.
 - 90) 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: 高架橋の地震時不同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.
 - 91) 程春, 川口健一: お天気カメラ映像を用いた2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時における鉄骨造建物の地震時挙動に関する基礎的考察, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第1号, pp.25-33, 2014.
 - 92) 藤野陽三, 楠原栄樹, 阿部雅人: 長大橋の対風動態観測記録のヘルスマonitoring研究への活用, 日本風工学会誌, 第34巻, 第4号, pp.480-494, 2009.
 - 93) ケヴィン・ケリー著: <インターネット>の次に来るもの 未来を決める12の法則, NHK出版, pp.319-320, 2017.
 - 94) 金井清: 建物の損傷から見た地震動の性質について, 地震第2輯, Vol.1, No.2, pp.44-47, 1948.