

第6回強震データの活用に関するシンポジウム(2018)

# 将来の大地震に備えて

2018.12.21

一般社団法人 日本建築学会  
構造委員会 振動運営委員会  
強震観測小委員会

第6回強震データの活用に関するシンポジウム(2018)

将来の大地震に備えて

目次

1. 主旨説明	1
中村 充 (大林組/小委員会主査)	
2. 強震観測の歴史と現状	3
飛田 潤 (名古屋大学)	
3. 地盤強震観測における成果と課題	11
高井伸雄 (北海道大学)	
4. 建物強震観測における成果と課題	20
大野 晋 (東北大学)	
5. 建物管理者の視点による強震観測の活用と課題	27
田沼毅彦 (都市再生機構)	
6. 建物設計者の視点による強震観測の活用と課題	43
今枝裕貴 (日建設計)	
7. 強震観測の応用としての「モニタリング」	52
杉村義文 (NTTファシリティーズ)	
8. これからの強震観測	64
小阪宏之 (戸田建設)	

## 関係委員名簿 (2018年12月時点)

### 強震観測小委員会

主査	中村 充	(大林組)
幹事	植竹 富一	(東京電力ホールディングス)
	大野 晋	(東北大学)
委員	相澤 幸治	(気象庁)
	赤澤 隆士	(地域地盤環境研究所)
	池浦 友則	(鹿島建設)
	鹿嶋 俊英	(建築研究所)
	神原 浩	(清水建設)
	功刀 卓	(防災科学技術研究所)
	重藤 迪子	(九州大学)
	高井 伸雄	(北海道大学)
	徳光 亮一	(大成建設)
	飛田 潤	(名古屋大学)
	三浦 弘之	(広島大学)
	吉田 治雄	(竹中工務店)
オブザーバ	北川 良和	(元慶應義塾大学)

### 強震観測成果普及展開ワーキンググループ

主査	飛田 潤	(名古屋大学)
幹事	安井 健治	(奥村組)
	山村 一繁	(首都大学東京)
委員	石川 理人	(前田建設工業)
	今枝 裕貴	(日建設計)
	栗田 勝実	(東京都立産業技術高等専門学校)
	小阪 宏之	(戸田建設)
	佐々木 透	(鹿島建設)
	芝 良昭	(電力中央研究所)
	杉村 義文	(NTTファシリティーズ)
	田中 清和	(大林組)
	田沼 毅彦	(都市再生機構)
	仲野 健一	(安藤ハザマ)

# 主旨説明

中村 充

強震観測小委員会 主査、(株)大林組技術研究所

強震観測小委員会は、強震観測データに関する情報の収集・整理、強震観測に関わる諸問題を横断的に検討し、建築学会における情報発信及び先導的役割を果たすことなどを目的として活動を継続している。建築学会において強震観測を扱う委員会は、日本における強震観測の開始直後からの長い歴史を有している。記録に残る限りでは、1956年に発足した耐震連絡委員会において強震測定事業として活動が行われており、その後1992年に、耐震連絡委員会が地震災害委員会に改編されたことに伴い、その傘下に強震観測運営委員会、強震データ小委員会が置かれた。その後、1997年に研究委員会として発足した振動運営委員会傘下に、強震観測小委員会の名称で委員会が設立され、現在に至っている。[1, 2]

当小委員会では、活動の一環として、過去5回、「強震データの活用に関するシンポジウム」を主催してきた。各シンポジウムの開催時期と副題は、以下のとおりである。

- ・第1回（1995年4月12日） -強震データベースの現状と共同利用の試み-
- ・第2回（2000年12月1日） 建物の耐震性能設計を目指した強震観測
- ・第3回（2002年12月18日） 建物の強震観測に関する将来像
- ・第4回（2005年3月11日） 最近の地震に建築物はどう応答したか
- ・第5回（2008年12月15日） 社会に役立つ強震観測

これらのシンポジウムでは、強震観測の普及展開を目指して、開催時点における様々な課題の分析、実状紹介、将来への提言などの話題を取り上げて議論を重ねてきた。例えば、前回のシンポジウムでは、2008年に発生した岩手・宮城内陸地震において建物で得られた強震記録の紹介や、構造設計における強震観測記録の活用例、強震観測とヘルスマonitoringの関係、地域防災システムへの展開などに関する討議が行われている。なお、これら過去5回のシンポジウム資料は、当小委員会のホームページにて公開している。[3]

小委員会では、上記シンポジウム以外の場を通じた成果の展開も行っている。直近では、2016年2月の振動運営委員会主催のシンポジウム[4]や、2012年および2016年の建築学会大会におけるモニタリング小委員会との共催パネルディスカッション[5,6]において議論を深めてきた。

これらのシンポジウムやパネルディスカッションでは、強震観測の課題についても議論が交わされてきた。例えば、地盤の観測と比較して建物観測が量・質ともに不足していること、地盤の観測点についても、地盤液状化などの局所的な増幅への関心や、建物設計用入力地震動としてのサイト波作成の期待を鑑みれば観測点密度は充分ではないこと、観測結果を活用した建物構造設計検証への取組がまだ不十分であること、観測対象とする地震の再現期間と比較して極めて短命である観測機器を維持管理することの困難さ、など多数の課

題が提示されてきた。しかしながら、そのかなりの部分が依然未解決として取り残されているのが実状である。

一方で、強震観測を取り巻く環境も大きく変化しつつある。今回のシンポジウムの開催は、前回から10年目となるが、この間に、2011年東北地方太平洋沖地震をはじめ、2016年熊本地震、2016年鳥取県中部の地震、さらには、今年に入って大阪府北部の地震、2018年北海道胆振東部地震と、被害を伴う地震が頻発している。

特に、東北地方太平洋沖地震は、日本全国の非常に広範囲において、地盤・建物を含めてこれまでにない数の地震記録が同時に観測されたという点で、強震観測の歴史に残る出来事であったということが出来る。地盤系の観測においては、阪神・淡路大震災を受けて整備されたK-NET、KiK-netなどの均質な地盤強震観測網によって、単一の地震についてこれまでにない数の観測点における同時観測記録が収録された。建物強震観測についても、超高層建物や免震建物のみならず、多様な建物における観測結果が多数報告されたことは注目すべき特徴であった。このように強震観測の着実な成果が確認された一方で、前述したような、様々な課題を改めて認識する機会でもあったことは事実である。

また、東日本大震災後における、建物地震被災度推定への関心の高まりと、近年特に発展が著しいIT技術を応用した新しい地震観測技術の展開についても、強震観測を取り巻く環境の変化として見逃すことはできない。

これらの強震観測を取り巻く大きな環境変化を受けて、本日のシンポジウムは、強震観測の現状と課題を改めて確認し、強震観測による成果および今後果たすべき役割について認識を深める機会としたい。話題提供として、強震観測と小委員会の歴史と現状・地盤観測と建屋観測それぞれにおける成果と課題・建物管理者あるいは設計者の立場から見た建物強震観測の活用と課題・モニタリングへの展開・これからの強震観測といった7件を予定している。フロアからの参加も含めた活発な議論を期待する次第である。

## 参考文献

- [1] 片岡俊一：強震観測と耐震設計，シンポジウム「建築振動工学の発展と耐震設計」資料，pp.9-14，2007.3
- [2] 鹿嶋俊英：強震観測とモニタリング（その1 強震観測の立場から），シンポジウム「阪神・淡路大震災を振り返り，来たる大地震に備える」資料，pp.37-42，2011.3
- [3] URL：[http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/smo\\_ajj/](http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/smo_ajj/)
- [4] 中村充：強震観測－強震観測に求められる役割，その現状と課題－，シンポジウム「東日本大震災から5年－建築振動工学の到達点と残された課題－」資料，pp.49-54，2016.1
- [5] 強震観測とモニタリング技術が災害時に果たすべき役割，2012年度日本建築学会大会（東海）構造部門（振動）パネルディスカッション資料，2012.9
- [6] 将来の大地震に備える強震観測とモニタリング，2016年度日本建築学会大会（九州）構造部門（振動）パネルディスカッション資料，2016.8

# 強震観測の歴史と現状

飛田 潤

名古屋大学災害対策室

## 1. はじめに

地震災害に対する建築・都市・社会の安全確保と機能継続にむけて、強震観測は必須の基礎データの一つと言える。現状で観測、通信、システム化の技術的な進展は著しく、それを受けて地盤における一元的な観測や防災面の利用は高度化しているが、一方で建物の挙動の把握やデータの有効活用には課題が残る状況となっている。被害地震が頻発し、南海トラフ地震や首都直下地震などの大規模地震災害への備えが求められるいま、今後のビジョンを定めることが必要と考えられる。そのために、これまでの経緯と成果を見直し、その延長上で現状を見ておくことも大切であろう。

ここでは、我が国のこれまでの強震観測の経緯や成果を既存資料[1~4 など]から概観するとともに、強震観測小委員会の活動をまとめ、最近の状況や将来に向けての課題を考えてみたい。

## 2. 日本における強震観測の経緯とその影響

### 2.1 地震計から強震計へ

古くからたびたび地震災害を受けてきた日本で、科学的なアプローチが始まったのは1880（明治 13）年横浜地震がきっかけで、イギリス人教師ジョン・ミルンによる地震学会の創設につながったといわれる。1891 年濃尾地震の甚大な被害から震災予防調査会が設置され、建物の耐震性、地震ハザードの地域性や地盤との関係、地震予知などが重点課題と認識されている。このころから地震計の開発が行われている。

1915 年に佐野利器が「家屋耐震構造論」で震度法を提示した。1923 年に関東地震が発生し、耐震壁を持つ RC 造の被害が相対的に軽微だったことが知られている。関東地震の際に東京帝国大学（本郷）で今村式 2 倍地震計の記録が得られ、振り切れていたが最大 300gal 程度と推定された。翌 1924 年に市街地建築物法が改正され、耐震規定が初めて定められ、地震力は水平震度 0.1 で許容応力度設計、安全率はコンクリートで 3 とされた。建物が剛に近い（建物上部での増幅が少ない）とすれば、0.3g の地動に対して水平震度  $0.1 \times \text{安全率 } 3$  でほぼ対応する。有名な柔剛論争についても、入力地震動と構造物の応答に関する強震観測記録が得られるまで決着がついていない。

当時の地震計は周期が 10 秒程度と長く、強震動の観測には適していなかった。末広恭二東京帝大地震研究所長は 1931 年に米国で強震観測の重要性を述べ、米国は直ちに強震計（SMA）を製作して観測を開始した。1933 年ロングビーチ地震、1940 年インペリアルバレイ地震などの記録が得られ、後者は観測場所の名称でエルセントロ地震動と呼ばれている。日本ではエルセントロ 1940 やタフト 1952 が動的解析の標準波として使用されてきたが、

観測場所や当時の地震計の特性を踏まえれば、個々の記録に対する応答を重視すること（卓越周期を外して設計する等）は適切でなく、多様な入力波の1つと考えるべきであろう。

戦後、1948年福井地震で強い揺れにより甚大な被害となり、震度7が定められた。気象台でも地震観測記録が得られず、大地震の強震動を観測しうる機器の重要性が高まった。1951年より東大地震研、建研、明石製作所などにより試作が始まり、1953年7月から東大地震研で観測を開始した。これがSMAC-Aであり、石本の短周期の振り子（周期0.1秒）による加速度計で、地震時にスタータで起動し、頑丈な筐体により保護されていた。機能を絞った安価なDC型や、SMACの改良型も作られた。1955年に科学技術庁資源調査会から内閣総理大臣へ「強震測定計画に関する勧告」が出され、強震測定計画（設置数の増）と強震測定機構（連絡組織）が検討され、1963年までに設置85か所、200台弱になったとされている。

## 2.2 1960～1970年代（強震観測の整備、耐震設計に関する重要記録）[5]

1964年の新潟地震では液状化による被害が発生し、転倒した川岸町アパートの隣の棟に設置された建研の地震計による記録が得られて、特異な被害とともに強震観測も注目された。液状化は直前のアラスカ地震と合わせて初めて注目され、研究が進むことになる。

1968年十勝沖地震では、特にRC造柱のせん断破壊による被害が多数発生し、1971年の建築基準法施行令の改正でせん断補強筋の規定が強化された。この地震で強震記録が多数得られ、特に被害の多かった八戸市の八戸港の地表面でSMAC-Bにより得られた記録は、やや長周期の成分を含む標準波として設計や研究に使われている。

この時点で港湾技術研究所（現在の港湾空港技術研究所）の港湾の観測が整備されつつあり、各地の港湾の地表で観測された記録は構造物の影響が比較的少なく、一方で海岸の地盤条件の影響を受ける場合も考えられる。日本電信電話公社では、全国の主要な電話局建物の最下階と最上階に強震計（SMAC-B）を設置し、重要機能を持つ中低層建物の観測記録を蓄積した。電力中央研究所では、電力重要構造物の入力地震動策定のため、露頭岩盤上を中心とした全国観測網を1970年代から整備した。

1963年に31mの高さ制限が撤廃され、超高層建物の検討が進んだ（霞が関ビルの着工は1965年）。耐震設計に用いる地震動には当初エルセントロ1940やタフト1952が使われたが、日本でSMACにより観測された記録も使われるようになった。一方、構造評定において強震観測を行うことが求められたため、強震計設置数が増加した。強震観測は超高層建物の実現に大きく寄与し、この実績が強震観測の一層の普及につながったといえる。

設置数や記録が増加すると観測状況や観測記録の整理・保管・分析・公表などの作業は重要であり、強震観測事業推進連絡会議として、国立防災科学技術センター（現在の防災科研）と東大地震研が担当するようになった。1972年には同会議で全国の強震計配置計画が作られ、全国均一50kmメッシュで分散配置（各県20カ所程度）、都市域や地震活動度の高い地域ではさらに高密度で観測を強化することなどが示された。これは現在の基盤観測網よりやや粗く、M6.5程度の被害地震で震度5程度の記録を得るための密度と解釈される。

1970年代にはいと、強震計の紙の記録をデジタル化する方法の進展（自動化）や、電磁記録式で性能が向上した強震計SMAC-Mが使われた。固有周期は0.05秒と短周期になり、短周期の感度が上がって、最大加速度が大きめに出るようになったと考えられる。1978年宮城県沖地震で、仙台市の東北大学工学部建設系研究棟（SRC造9階）に設置された建研のSMAC-Mにより、最上階で1000galを超える最大加速度が記録された。この建物は連層耐震壁などにかかなり損傷を受けたものの、その後の何度かの補修・耐震補強を受け、2011

年の東日本大震災で大破となるまで30年以上使用された。このとき1階では260gal程度で、建物の応答増幅を考えれば  $C_0=1.0$  よりやや小さい入力にあたり、建物の設計時点の性能や被災状況と観測記録がおおむね整合する。当時検討が進んでいた新耐震設計法に対しても有効な情報を与えたと考えられる。

### 2.3 1980年代～1995年頃（多様な観測体制、対象建物、現象）

1985年メキシコ地震では、湖を埋めたメキシコシティの盆地状の軟弱地盤のため長周期地震動が卓越し、高層建物の共振による倒壊が多数発生した。この20年以上前の1960年代に、メキシコシティに設置された日本の強震計（メキシコ大学のSMAC-Bと考えられる）で小地震の記録が得られ、応答スペクトルの周期3～4秒に明瞭なピークがあった。当時は長周期地震動について認識されておらず、機器の問題か分析の誤りとみなされたが、1985年の地震で同様の地震動特性が観測され、中高層ビルの大被害となった。1960年代に記録を詳細に検討していれば、いち早く不整形地盤による地震動特性の把握につながり、20年後の大災害を減らすことができたかもしれず、観測記録の評価の重要性を示している[6]。

1980年代後半以降、SMAC-MDや気象庁87型強震計など、デジタルデータをメモリ等に記録する方式になり、電話回線による遠隔操作・データ回収も一般化した。1993年釧路沖地震では、釧路気象台で87型強震計により震度6、3成分合成で1gを超える最大加速度が観測されたが、気象台周辺の建物被害は少なかった。1962年広尾沖地震でも同様の傾向があり、気象台が立地する丘陵地の地盤の影響や、地震動特性と被害の関係、さらに北海道の住宅の耐震性などが検討された。その後、ESG（表層地質が地震動に及ぼす影響）に関する研究として、釧路市内での20数点で多くの機関が地震計を持ち寄って共同観測を実施し、北海道東方沖地震の記録などが得られている。北海道・東北では続いて1993年北海道南西沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震などが続いた。

新たな強震観測対象としては、70年代の超高層に続き、原子力施設と免震・制振建物の技術開発があげられる。免震建物の理論的な扱いは、1965年にニュージーランドの第3回世界地震工学会議（WCEE）で発表されている[6]。海外ではニュージーランド、フランス、ユーゴなどで免震建物が実現したが、日本では評定を受けて免震建物が最初に建設されたのは1983年であり、1995年兵庫県南部地震までは毎年10件前後であった。免震建物では、研究開発・性能確認とアピールの両面で実地震時の応答低減効果を明らかにするため、多くの免震建物で強震観測が行われ、観測結果が公開された。

1978年に科学技術庁資源調査会は科学技術庁長官あてに「地震危険度推定に必要な強震観測に関する勧告」を出し、強震動特性の把握に向けた観測と体制の整備を強調した。このころの大規模なプロジェクトによる観測の例として、電力共通研究による「アレー観測による岩盤の共振地動に関する研究」がある。アレー観測とは地中・地表に複数の地震計を並べた観測体制であり、これにより深部・広域の地震動伝搬特性を明らかにした。建研による仙台高密度強震観測事業（1983-1999）では、仙台市周辺に11地点の観測点を整備して一元管理し、表層地盤の影響など耐震設計や有効な知見の蓄積を行った。このような観測成果の有効な共同利用を目指して、震災予防協会は強震動アレー観測記録データベースを作成した（1992-1998）。記録整理と継続のための技術上・運用上の基盤構築に加えて、地震工学にかかわる建築、土木、地盤、地震、機械などの分野の連携が重要であった。なお震災予防協会の地震防災に関する分野横断的な活動は、2001年発足の地震工学会へ引き継がれている。

## 2.4 兵庫県南部地震とその後の地盤観測体制の飛躍的発展

1995年兵庫県南部地震では主に建物の倒壊により多数の被害を出した。大都市直下の活断層の地震で、初めて震度7が記録された（1996年の震度階級改定前で、震度計ではなく現地調査によって）。被害の分析に加えて、「震災の帯」と呼ばれる建物被害の集中地域が生じたことで、その原因について多くの検討がなされ、強震動地震学に大きな影響をあたえた。この地震で神戸海洋気象台（JMA神戸）の87型強震計による記録があり、最大加速度818galである。一方、「震災の帯」の中に位置するJR鷹取で観測された記録は、最大加速度は650gal強でJMA神戸より低い、震度は同程度で、やや長い周期1~2秒の卓越成分を持ち、建物への破壊力はJMA神戸より大きいことが知られている。波形の後半（10秒程度より後）には液状化の影響と考えられる特徴がある。

このように、最大震度7を地震後すぐに発表できなかったこと、「震災の帯」の中の地震記録がほとんどなく、地震動入力の検討が十分できなかったこと、さらには地震防災や地震学・地震工学研究における高密度の強震動・震度観測の重要性が認識されたことにより、その後の地盤の強震観測はトップダウンで全国一律に整備されることになった。気象庁はデジタル強震観測波形の収録と震度計測の機能を備えた95型震度計を全国に設置した（約600地点）。消防庁は全国の全市区町村に計測震度計を設置して「震度情報ネットワーク」を構築し、自治体の初動対応の迅速化と、震度情報の速報による広域応援体制確立を図った（約2900地点）。防災科学技術研究所は強震観測網としてK-NETを整備し、1996年6月から稼働した（約1000地点）。また1995年に地震調査研究推進本部が設置され、防災科研による地震に関する基盤的調査観測網の一部として、各観測点に地表と地中（岩盤）を備えた基盤強震観測網KiK-netが整備された（約700地点）。K-NETとKiK-netでは、観測記録が速やかにウェブで公開されるようになっており、観測の質・量と合わせて速報性・公開性も実現した。

これらはいずれも兵庫県南部地震のすぐ後に整備されており、それ以降の防災体制整備や研究に不可欠の基盤となっている。一方で、当初は機関相互のデータ共有は一部にとどまり、自治体震度計は震度のみ記録して強震波形記録は利用しない（一部には波形記録が保存されない震度計もあった）など、目的の異なる観測システムの共有の難しさも明らかになった。その後は観測機器やシステムのリプレースや改良が進み、リアルタイム性も加えながら活用が進んでいる。気象庁の震度情報の発表に使われる観測点は、気象庁、地方公共団体、防災科研などを合わせて約4200か所、緊急地震速報では気象庁と防災科研を合わせて約800か所が使用されている。

兵庫県南部地震を受けて、防災体制強化のための地震観測体制やそれを用いたリアルタイム被害推定などのシステムを整備・強化した組織も多い。例として大規模自治体（東京都、横浜市、名古屋市など）、ライフライン事業者（東京ガスなど）などがあげられる。

また地域の観測機関・研究者の連携の例もある。兵庫県南部地震前からの活動として関西地震観測研究協議会（関震協：1991~）があり、大学研究者、行政機関、独立行政法人、公共機関、建設、コンサルタントなどの参加により、地域内の強震観測網を整備・維持し、記録の有効活用を図ることを目的としている。1994年の観測開始直後に兵庫県南部地震が発生したことも重要である。

2000年には、全国6大都市圏で「大都市圏強震動総合観測ネットワークシステム」が整備された。これは拠点国立大学が中心となり、地域の各機関で設置している観測網の波形データを整理し、共同利用するための枠組みである。特に、各自治体に整備された震度計

の波形データの回収が大きな目的となった。東大地震研による首都圏強震動総合ネットワーク SK-net は周辺自治体の 700 地点以上のデータを回収している。中京圏では名古屋大学が中心となって、ライフライン事業者や建物系の記録も含めて 600 地点以上を一元化した。これらの枠組みは、強震データ共有にとどまらず、防災に関する研究機関、自治体、ライフライン事業者等の担当者の連絡会に発展した点が重要である。

2011 年東北地方太平洋沖地震は、上記のように全国を覆う高密度の地震観測体制が整備されてから初めての巨大地震災害であり、東北から関東を中心に全国で多数の記録が得られた。最大震度 7 (宮城県栗原市築館)、宮城・福島・茨城・栃木の 30 地点以上で震度 6 強、東北から関東に到る広い範囲で震度 6 弱、さらに北海道から九州まで全国で震度 1 以上の有感となった。この地震の前後の 2000 年代、2010 年代にも、重要な知見を含む地震災害とそれに関連した強震記録が得られている。

最も特徴的なのは震度・最大加速度が大きな記録であろう。2004 年新潟県中越地震の川口 (計測震度 6.5、以下同じ)、2011 年東北地方太平洋沖地震の築館 (6.7)、熊本地震の益城 (前震 6.6、本震 6.7)、同地震本震の西原 (6.6)、2018 年北海道胆振東部地震の厚真 (6.5) があげられる。地表面最大加速度で 1g を超える記録もいくつかある (上記 2011 年の築館で 2.9g、ただし局所的な地形の影響を受けたと考えられている)。これらはいずれも設計レベルを大きく上回っており、一方で建物被害は大きくない場合もある。つまり入力地震動レベルと被害程度の不整合があり、建物の実際の性能を評価する難しさを理解できる。

## 2.5 建物の強震観測記録

建物については、地盤観測網のような全国統一的な観測体制は、兵庫県南部地震以降も整備されていない。建研などの研究機関などでは比較的広域の一貫した建物観測体制を保有・維持しており、記録の公開もなされる場合がある。一方、建設関連やライフライン関係などの民間では、それぞれの目的で観測を行っているが、建物所有者や観測目的などにより結果が公開されないことが多く、観測事実も明らかではない場合もある。

強震観測小委員会では、2002 年の第 3 回強震データの活用に関するシンポジウムで、全国建物強震観測網の提案を行っている。これは観測密度も含めて K-NET などの基盤的強震観測を意識した一元的・統一的な計画案となっている。一方で、2000 年の第 2 回シンポジウムでは、2000 年の建築基準法の改正に対応して、建物の動的挙動の不明点を明らかにするための観測を検討している。同様の観測体制の整備は、例えば国総研プロジェクト「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」(2010-2012) などがあるが、いずれも多く建物の展開するには困難がある。

2003 年十勝沖地震では、苫小牧の石油タンクのスロッシング被害を生じ、長周期地震動による大規模構造物の被害が注目された。日本建築学会構造委員会では、2007～2010 年度に内閣府から「長周期地震動対策に関する検討業務」を受託し、長周期地震動に対する超高層建物等の対応を検討した。

そのような状況で、2011 年東北地方太平洋沖地震により、広域で多数の建物の強震観測記録が得られた。建物の挙動や被害への関心の高さから、何らかの形で公表されるケースが増え、学協会や研究グループ等が特定の目的の下に統一的に観測状況の把握や観測記録の収集を行う例もあった。これらについては、2012 年度の大会 PD で議論された。[7]

この地震では、観測対象建物の多い関東で震度 5 強～6 強となり、多数の観測記録が得られているが、超高層や免震などが多いため顕著な構造損傷を生じた観測例はほとんどない。

なかでは、建研が強震計を設置して間もなく観測された大阪咲洲庁舎の強震記録は、重

要な意味がある。1階で振幅 30gal、8cm 程度の揺れが、最上階では 120gal、130cm 以上まで増幅し、大振幅部分だけでも数分にわたって継続している。1階の応答スペクトルと 52階/1階スペクトル比にはいずれも 6~7秒のピークがあり、地盤入力と上部構造と共振が明確である。もちろん、設計時には建物が深部地盤の周期と共振しないよう計画されたはずで、今回の地震における地盤卓越周期は必ずしも事前に把握できていない。この建物では構造躯体には顕著な損傷はなかったものの、内装材や防火戸などに 360箇所もの被害を生じ、直後の継続使用や今後の耐震補強に課題を残した。震源から 700km 以上遠方で、地震動、地盤条件や建物特性の偶然の一致によりこれほど大きな応答を生じたことは、将来の耐震設計にあたってきわめて重要であり、客観的な強震観測記録があったからこそ問題点の明確化と適切な対応につながったといえる。このような超高層建物の応答などの知見から、気象庁は 2013 年に長周期地震動階級の発表を開始している。

免震については、日本免震構造協会が東日本大震災における免震・制振建物の状況と課題についてまとめている。免震建物 20 棟、制振建物 18 棟などについて、強震観測記録の分析も含む詳細な分析がなされた。多くの建物で免震層に 5~40cm の変形が生じたこと、長周期地震動に対しても免震効果は発揮されたこと、継続時間の長い繰返し振動を受けて免震装置に変状が発生した例があること、免震エキスパンションジョイントの不作動に伴う損傷の例があったこと、などがまとめられている。

構造ヘルスマニタリングについては、かなり以前から多くの研究開発が行われていたが、実際に運用している例は少数であった。東北地方太平洋沖地震では、首都圏の高層建物が大きく応答し、外見上の被害がなくても継続使用に不安を感じるケースが多かったと考えられる。このときモニタリングを備えた建物では、地震後直ちに安全性を確認でき、その後の建物運用に差を生じた。これらの背景と、センサや通信、データ処理技術の向上で、構造ヘルスマニタリングの例は増加している。もちろん、類似の観測機器や分析手法を用いるとしても、強震観測とモニタリングでは目的や意味が異なる面がある。しかし、建物ユーザーにとっての直接的なメリット（被災時に適切な情報を提供）を考慮することで、観測のハードルを下げる効果に期待することも、普及が進まない建物強震観測の将来のために必要と考えられる。

### 3. 強震観測小委員会の活動

#### 3.1 強震データの活用に関するシンポジウム[4]

ここでは、これまでに 5 回開催された「共振データの活用に関するシンポジウム」の概要をまとめ、その背景となった地震災害や強震観測状況などとの関係を考察する。なお、シンポジウム資料は本小委員会のウェブページ ([http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/smo\\_ajj/](http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/smo_ajj/)) で公開している。

##### 第 1 回 強震データベースの現状と共同利用の試み

1995 年 4 月 20 日開催（当初の 1 月 20 日から延期）。内容は、兵庫県南部地震以前の地盤と建物の強震観測体制とデータベース利用状況をまとめ、それらを前提とした強震観測とデータ活用について、課題と将来像を論じている。当初計画の日程からわかるように、まさしく「阪神・淡路大震災以前」の強震観測や関連分野の状況を明確に示している。

##### 第 2 回 建物の耐震性能設計を目指した強震観測

2000 年 12 月 1 日開催。当時導入された性能設計や限界耐力計算法について、実建物の多様な動的挙動を強震観測により明確にすることの重要性を議論している。そのためにはさ

らなる観測事例の拡大(特に建物)、自由なデータ活用を担保するデータベース・公開方式、そして構造ヘルスマニタリングとの関係などが課題とされている。

### 第3回 建物の強震観測に関する将来像

2002年12月18日開催。兵庫県南部地震をうけた学会の提言に「強震観測体制の強化によるデータの充実と公開を推進すべき」があり、それを受けて小委員会で検討した結果を以下の6項目にまとめている。

- A. 日本全土をカバーする建物の地震時挙動観測の実施とデータの公開
- B. 高密度建物振動観測の実施とデータの公開
- C. 観測記録、建物構造、地盤情報の共通書式の提案と電子化の推進
- D. 観測記録の権利関係の指針作成と広報
- E. 建物の強震観測指針の策定
- F. 強震観測の推進、観測記録の収集整理と公開のための組織の創設と予算措置

またこれらの方針に従って、具体的な観測計画の案として全国建物強震観測網 T-Net を提示している。これは建築物における強震観測の量の絶対的な拡大と質の改善のために、「必要最小限の観測体制を備えた建物の全国展開」と、対象建物の数や種類を限定した上で「高密度、高精度観測の集中実施」を基本方針としている。

### 第4回 最近の地震に建築物はどう応答したか

2005年3月11日開催。2003年十勝沖地震、2004年紀伊半島沖地震、2004年中越地震などの観測記録の分析から、新たな知見や将来に向けての課題を議論している。

### 第5回 社会に役立つ強震観測

2008年12月15日開催。建物の強震観測が建物の所有者や利用者、そして社会に認知されることを目指し、社会にとって役立つ強震観測とは何か、またどのような方針やアイデアで実現するか、モニタリングや防災などの機能を付加することの可能性などの議論がなされた。

## 3.2 将来に向けた課題

第5回から10年が経過し、東北地方太平洋沖地震や熊本地震の経験を経て、現状と将来を議論するのが今回のシンポジウムの課題となろう。2016年1月に開催された振動運営委員会主催のシンポジウム「東日本大震災から5年—建築振動工学の到達点と残された課題—」では、強震観測に求められる役割の現状と課題について、以下の様にまとめられている[8]。

東日本大震災において強震観測が果たした役割として、①膨大な観測結果の利活用と成果の公開と、②構造モニタリングへの関心の高まりがある。①については、兵庫県南部地震以降に整備された地盤強震観測体制により大量かつ質の高い記録が得られ、巨大地震に関する多様な研究が進んでいる。建物の強震観測では多数かつ多様な建物で記録が得られ、その結果の多くが公表されたことは重要な成果だが、一方で耐震設計への応用などは必ずしも十分ではない。むしろ②のモニタリングの関心が高まっており、地震直後に建物の健全度を速やかに判定する機能への期待が高い。強震観測とモニタリングの差も意識しつつ、普及につなげることが期待される。このような観点から、2016年度の大会のPDでは、構造モニタリング小委員会と合同で「将来の大地震に備える強震観測とモニタリング」と題して討論を行った[9]。

将来展望としては、来るべき巨大地震に備えて、地盤・建物ともに課題を整理し、そのための観測体制の整備と持続的な維持管理を行う必要がある。また、観測された膨大なデ

一々の活用法についての検討も必要である。強震観測小委員会では、現状の知見をまとめ、将来につなげるための資料として「強震観測の手引き」と、個別に実施されている多数の建物の強震観測についてまとめた「強震観測建物台帳」[10]の整備を進めている。地震工学や防災における基盤としての強震観測の発展と普及のための活動を継続する予定である。

#### 4. まとめ

今年には1968年十勝沖地震から50年、1978年宮城県沖地震から40年、あと5年で関東大震災から100年になる。我が国の地震観測・強震観測の歴史は長く見積もっても約100年であり、その間に得られた知見の大きさとともに、一方で巨大な自然災害に関する経験の短さを常に意識すべきと思われる。次の100年に向けて、近い将来に発生が予測される南海トラフ地震などを確実に観測し、災害軽減に活かすとともに、いかに将来の財産とするかは現在の取り組みにかかっていると見える。今回のシンポジウムも含めて活発な議論が行われ、強震観測の発展につながることを期待したい。

#### 謝辞

本稿を作成するにあたり、多くの資料を参考にさせていただき、また小委員会等で貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝いたします。筆者の力不足で誤りや不適切な点もあろうかと思しますので、忌憚のないご指摘をいただければ幸いです。

#### 参考文献

- [1] 防災科学技術研究所：記念シンポジウム「日本の強震観測50年」—歴史と展望—講演集、防災科学技術研究所資料、第264号、2005年3月
- [2] 日本地震学会：強震観測の最新情報（連載23回）、日本地震学会ニューズレター、Vol.9, No.5, 1998年1月～Vol.14, No.1, 2002年3月、地震学会ウェブページで公開：<http://www.zisin.jp/publications/document03.html>, 2018年11月15日閲覧
- [3] 小林啓美：日本の強震観測の歩み、強震観測事業推進連絡会議ウェブページ、<http://www.k-net.bosai.go.jp/KYOUKAN/ayumi/ayumitopnew.html>, 2018年11月15日閲覧
- [4] 強震観測小委員会：強震データの活用に関するシンポジウム（第1回～第5回）、小委員会ウェブページで公開：[http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/smo\\_ajj/](http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/smo_ajj/), 2018年11月15日閲覧
- [5] 北川良和：1968年十勝沖地震・1978年宮城県沖地震を振り返って—両地震がその後の建築耐震設計などにどのような影響を与えたか—、地震ジャーナル、65, pp.28-33, 2018年6月
- [6] 和泉正哲：建研から大学・ジェネコンと、官学民の3界を経験し、今、後期高齢者の自由の身となって（その1）、建築の研究、No.243
- [7] 日本建築学会構造委員会振動運営委員会：強震観測とモニタリング技術が災害時に果たすべき役割、2012年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料、2012年9月
- [8] 日本建築学会構造委員会振動運営委員会：シンポジウム 東日本大震災から5年—建築振動工学の到達点と残された課題—、2016年1月
- [9] 日本建築学会構造委員会振動運営委員会：将来の大地震に備える強震観測とモニタリング、2016年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料、2016年8月
- [10] 飛田潤ほか：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、第20巻第46号、pp.901-904, 2014年10月

# 地盤強震観測における成果と課題

高井伸雄

北海道大学大学院・工学研究院

## 1. はじめに

1996年6月に運用が開始された防災科学技術研究所の全国強震観測網 K-NET およびその後の基盤強震観測網 KiK-net により公開された強震記録は、国内の研究者に留まらず、世界中でデータが広く利用され、様々な解析に用いられてきている。これらネットワークをはじめ我が国では強震観測網が充実し、公開も国際的に進んでいる。本稿では1995年に開催された第1回から前回2008年に開催された第5回「強震データの活用に関するシンポジウム」までに取り上げられた、主に公的機関が実施している地盤強震観測の話題を概観し、さらに前回以降に実施された個別機関による強震観測の事例および、観測に関わる課題を報告する。

なお、タイトルにも用いた「地盤強震観測」とは、建物への地震動入力を知るための強震観測を意味し、建物応答を対象とした建物内強震観測以外の強震観測をそのように称することとし、岩盤観測点上での観測も、地表での観測を低層建物等の建物内で代替した強震観測もこれに含めることとする。

## 2. 地盤強震観測の意義

ある地点で観測される地震動は、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の合積で表現される。多くの公的な地盤強震観測は現在ではリアルタイム地震動把握、被害把握を目的として展開されているが（例えば、[1]）、建物の耐震設計を実施する上で最も重要な事は、建物を建設する地点での将来起こりうる地震動を正確に把握し、それに耐えうる設計を行う事に他ならない。当該地点での事前の強震観測記録の蓄積があれば、経験的グリーン関数法を用いた強震動予測[2]や、単一サイト予測式[3]を構築する等で、特にサイト特性や伝播経路特性を反映させた設計用入力地震動を得ることが可能となる。近年発達してきた連続記録を用いた手法（例えば、[4, 5]）による地下構造の検討等にも活用可能であり、より正確な強震動予測への重要な基礎資料の提供がなされるようになってきた。また、観測点密度の飛躍的向上に伴い、高震度で大加速度の強震記録が多く得られるようになり、その観測点の周辺で大きな被害が発生しないという事象が見られるようになり、建物の破壊力指標に関する再検討も実施されてきた（例えば、[6]）。今後の建築技術者の努力による耐震性能の向上を正確に評価するためにも、実地震時の建物被害発生状況を入力地震動から分析するためには、その地点での強震記録の有無が正確さを左右することは自明であろう。

このように、上記3特性を正確に知ること、常に建築物の地震動被害軽減を目的としたものであり、耐震設計・被害分析のためには、当該地点の地震動を正確に把握する事が重要で、地盤強震観測の意義として最も重要と考えられる。

### 3. 地盤強震観測に関わる報告概観および観測記録を用いた成果

1978年に科学技術庁資源調査会が強震時の地震動の特性を把握するための地盤強震観測網整備拡充を、科学技術庁長官あてに「地震危険度推定に必要な強震観測に関する勧告」として提出し[7]、地盤強震観測の重要性が説かれ始めた。この小林(2002)による歴史的概観[7]や工藤(1994)による現状と展望[8]の他、第1回シンポジウム(1995)において強震計の開発と初期の強震観測の概要が講演され[9]、(財)震災予防協会によるアレー観測記録のデータベース開発・活動に関して詳細な報告がなされている[10]。また、データを用いた研究に関して、1923年関東地震の強震動を1990年伊豆大島近海の地震を要素地震とした推定[11]、基盤によるP波がS波に変換されるPS変換波を用いた基盤構造推定[12]等の試みに関する報告がなされている。

第2回シンポジウム(2000)では、公的機関による観測が飛躍的に整備され、前述のK-NET、KiK-netを始めとするデータ供与に関して[13]や、共同観測による高密度強震アレー観測に関して[14]の詳細な報告がなされている。また、強震記録のユーザーサイドからの要望、記録の解釈の上で必要な情報等が整理されている[15]。強震記録を利用した研究としては、断層近傍で観測された強震動を用いることで、より詳細な断層の破壊過程が明らかになるとして、1995年兵庫県南部地震等の経験的グリーン関数法による強震動評価の報告がなされている[2]。

第3回シンポジウム(2002)、第4回シンポジウム(2005)では、建物強震観測に特化したシンポジウム構成となっているが、その中でも2004年紀伊半島南東沖の地震( $M7.4$ )の大阪平野での長周期地震動[16]、2004年新潟県中越地震( $M6.8$ )による新潟県柏崎市・刈羽村の強震動[16]に関しての報告がなされている。また、2003年には強震観測網が整備されて初めてのM8クラスの地震である2003年十勝沖地震( $M8.0$ )が発生し、長周期地震動と深部地下構造の関係等が、これらのデータ等を用いて議論されている(例えば、[17, 18])。

2005年には日本の強震観測が開始されて50年として、防災科学技術研究所により記念シンポジウム「日本の強震観測50年—歴史と展望—」が開催され、その歴史と併せて多くの機関の強震観測に関する報告がなされている[19]。

第5回シンポジウム(2008)では、最近の被害地震の強震観測例として2008年岩手・宮城内陸地震( $M7.2$ )、2008年岩手県沿岸北部の地震( $M6.8$ )の強震動特性が建物応答と併せて報告され[20]、オンライン地震観測にニューラルネットワークを適用させた早期地震警報システムに関しての提案[21]もなされている。

2009年には強震計・強震観測の歴史からリアルタイム地震防災を踏まえた強震観測網の整備に関する報告が地震学会の論文誌上でなされており[22]、提供側の公的機関として、観測網の敷設が地震被害軽減に直接役立つ素地ができてきたと結ばれている。

公的機関の強震観測網では敷設当時から時刻校正にGPSを利用して行う場合が多く、特に高密度の観測点が設置してあれば、地震波の伝播を正確に把握することができ、その様子が最大震度5以上の揺れを観測された地震に関しては、動画として公開されている[23]。このように正確な時刻校正を持つ強震観測網の記録を用いて、振幅やスペクトルの分布のみならず、地震波の伝播の性質に関して詳細に議論されるようにはなっており(例えば[24])、三次元シミュレーション結果と併せて、地下構造の議論に用いられていくことも多くなると思われる。

2011年東北地方太平洋沖地震( $M_w9.0$ )は日本の強震観測史上最大規模の地震であり、余震を含めた多くの強震記録が広い研究分野で活用されているが、強震観測網を用いて把握

された強震動分布の特徴[25]、強震記録を用いた震源モデル[26]に関する数多くの成果が発表されている。また、いくつかの地点での高震度・大加速度の要因解明等が余震観測等により精力的になされた[27, 28]。その後の被害地震においても、公開された強震記録を基に、震源過程・伝播経路特性・地盤増幅特性に関して議論された論文は多数に上る。

その後、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、海底での地震計整備が進められ、陸域の高感度地震観測網 (Hi-net)、強震観測網 (K-NET、KiK-net)、広帯域地震観測網 (F-net)、基盤的火山観測網 (V-net) が海域の日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)、地震・津波観測監視システム (DONET) と統合され MOWLAS[29]として構成され (図1)、さらに早期に正確に海域で発生する地震が都市部に到達する前にその地震規模等を知ることが可能となっており[1]、第2回シンポジウム (2000) 報告[13]時からも大きな進展を見せていると言えよう。

また首都圏に関しては地中地震観測網が 2007 年より東京大学地震研究所により MeSO-net として構築され[30]、現在では防災科学技術研究所によりデータ公開されている。2011年東北地方太平洋沖地震に関しては、例えば首都圏およびその周辺の長周期地震動の特徴が地表の強震記録と併せて議論されている[31]。

このように、公的機関ではリアルタイム地震防災情報の提供による災害軽減を目的とし、設計用入力地震動を知ろうとする建築構造研究者にとっても有益な情報が多く公開されているが、極局所的な地下構造の変化等により高震度・大加速度が記録されることもあり、その解釈のために、当該地点での臨時強震観測・微動観測が個別の研究機関で実施されることも多い。次節では、そのような臨時観測等の事例と課題を紹介する。



図1 MOWLAS 観測点分布図[29]

#### 4. 臨時観測等の個別機関の観測時の課題

K-NET のような公的機関による強震観測点の設営では、寒冷地での強震計基礎の仕様が異なるものの[32]、観測機器以外の観測建屋、機器の固定等も全国一律の仕様によって観測がなされている。また長周期側の特性に関して K-NET では DC 成分までフラットな特性になっており、広帯域な解析に耐えうる記録である。しかし、個別機関で観測を実施する際には、機関毎の仕様となる。観測点設置に関しての詳細な報告として、東京大学地震研究所の強震観測室の事例として、観測点の選定・建設・設置までの詳細な報告がなされている事例[33]もあるが、論文等で記載される事は非常に少ない。

そこで本小委員会では強震観測を実施する際のマニュアルを強震観測の手引きとして情報提供しており[34]、本手引きは随時更新されているので参照されたい。ここでは主に報告者が実施している観測事例を紹介する。

##### 4.1 機器の選定

臨時観測点等では電源の問題が最も大きいため、電源を確保してのセンサー電源を必要とするサーボ型強震計よりも、電源が不要なミットヨ社製 JEP-6A3 (過減衰型動コイル型加速度計) [27, 35, 36] や動コイル型速度計である近計システム社製 KVS-300[37]等に低消費電源ロガー (白山工業社製 LS-8800、近計システム社製 EDR-X7000 等) を接続して、カーバッテリー等によりオフライン観測をする事例が多く見受けられる。カーバッテリーの容量・季節 (気温) にも依るが、小型バッテリーでも 2、3 ヶ月の連続観測に対応可能である。しかし、平坦な帯域が狭いために大地震時の記録では長周期側では特製補正の必要がある。より広帯域での観測を計画する場合には電源の確保が重要な課題となる。長周期地震動を計器の特性補正すること無く直接記録することを目指した場合、サーボ型地震計を選択する必要がある。設置および固定方法に関しては、報告者がネパール国カトマンズ盆地で実施している強震観測では、常設観測点でコンクリート床へのアンカーボルト設置による固定をしており[38]、臨時観測点では、センサー台座とコンクリート床・アスファルト道路への接着剤での固定をしている。一般に計器の地面への固定には、センサーは接着剤で固定し、センサー以外はバッテリーの重量で固定せずにプラスチック箱に入れて観測する事例が多いようである。写真 1 は 2018 年北海道胆振東部地震での臨時余震観測点の一例である。



写真 1 臨時強震観測点の一例：右側のセンサーはアスファルト舗装に多用途接着剤を用いて固定されており、左側の箱内にロガーと鉛蓄電池と乾電池を併用した電源が入っており、防水シートで保護した上で、ロガーの時刻校正に用いる GPS アンテナが外部に貼り付けられている。

## 4.2 トリガー観測・連続観測

トリガーレベルの設定は以前では電子記憶媒体の制約上の問題から慎重に検討されていた。トリガーレベルを小さくすれば、多くの記録が得られるが、メモリーを消費するために、古い記録から消去、容量の小さい記録から消去、等のアルゴリズムを選択して、記録容量の確保が必要であった。しかしメモリー容量の飛躍的な向上により、例えば白山工業社製 LS-8800 で 32GB の SD カードを利用すれば、3 成分で記録しても約 30 ヶ月のデータ蓄積が可能である。2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測では、ミットヨ社製 JEP-6A3 の 10V/g のセンサーを用いて、マグニチュードが小さい地震の欠測を防止するためと、微動記録の解析のために、連続観測を東茨城台地で実施した例[39]等がみられる。

## 4.3 感度の設定

ミットヨ社製 JEP-6A3 と白山工業社製 LS-8800 を組み合わせて使用する場合、LS-8800 の最大入力がアンプを使用しない場合で $\pm 5V$ となっており、JEP-6A3 (2V/g) の場合、フルスケールが  $2000 \text{ cm/s}^2$  となっており、余震活動の状況等から、アンプのゲインの設定に注意しなければ、振り切れてクリップした記録が得られ、その補正 (例えば、[40]) を施さなければならぬため、注意が必要となる。一方、微動の連続記録をメインに解析することを考えれば、アンプの増幅率を上げての観測となり、目的に応じて考慮する必要がある。

## 4.4 電源

ロガー等の電源に商用電源を用いる場合には、屋外観測は困難を要するため、建物内での観測となる。その際、なるべく建物応答の影響を排除するために低層建物を選択することになる。一方、野外観測で長期間の観測を実施する場合には、複数の蓄電池の利用や、太陽光パネルと蓄電池を併用したシステム (例えば、[41]) 等を利用する場合もある。

## 5. 臨時観測で得られる強震記録

公的機関の観測点密度では観測記録の解釈に十分では無い場合、観測点付近や観測点間の変化を把握するために臨時余震観測等を実施する場合がある。例えば、図 2 は 2018 年北海道胆振東部地震で震央付近の高震度エリアで、公的機関の強震観測点の存在しない地域に臨時観測点を展開した例である。使用した機器は前述のミットヨ社製 JEP-6A3 (2V/g) と白山工業社製 LS-8800 の組み合わせであり、観測点の一例は写真 1 に示した。周辺で特に建物被害が顕著であり、1~2 秒の応答値の大きい K-NET 鶴川観測点 (HKD126) の観測記録の解釈のため、堆積層厚が薄いと思われる台地上に設置した観測点 (HUE04) との余震記録の比較では、大きな振幅の違いに併せて、特徴的な周期帯域が臨時観測点では見られない等が明らかとなっている[42]。ここでは図 2 に示した観測点の 2018 年 9 月 14 日 6 時 54 分の地震 (M4.6、 $d=26 \text{ km}$ ) の加速度波形とフーリエスペクトルを図 3 に示す。臨時観測点の設置により、公的機関の強震観測により得られた強震記録の違いに加えて、波形・スペクトルの変化が狭い範囲内で見られるようになっている。これに地下構造の変化等をより詳細に議論する事が可能となる。

## 6. まとめ

本稿ではこれまでの本シンポジウムにて取り上げられた公的機関による地盤強震観測の報告の紹介と、それを補完する個別機関による臨時余震観測に関わる課題をいくつか報告

した。今後は、テレメトリー観測化、MEMS の性能向上によってはコスト問題から地盤強震観測においても利用を視野に入れての議論が展開されるものと思われる。

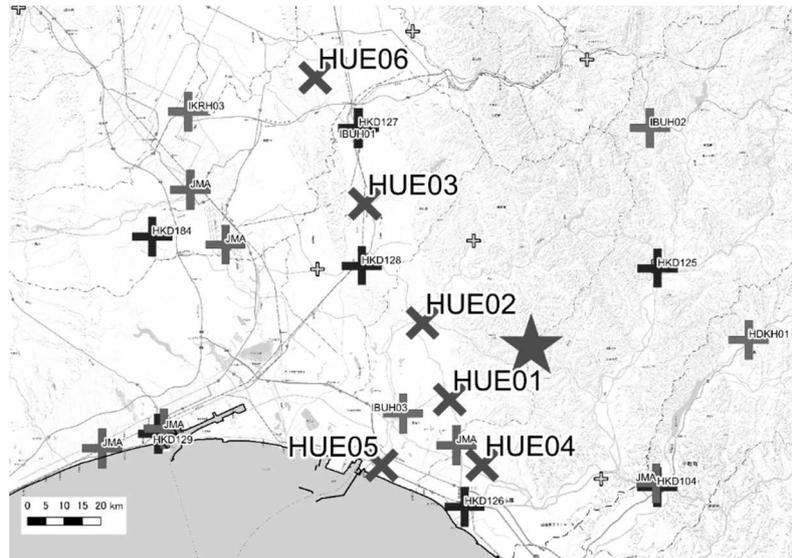


図2 2018年北海道胆振東部地震の震央付近における臨時余震観測点  
×は臨時観測点 (HUE)、+は公的機関の定常観測点。★印は本震の気象庁による震央位置。(地理院地図を使用)

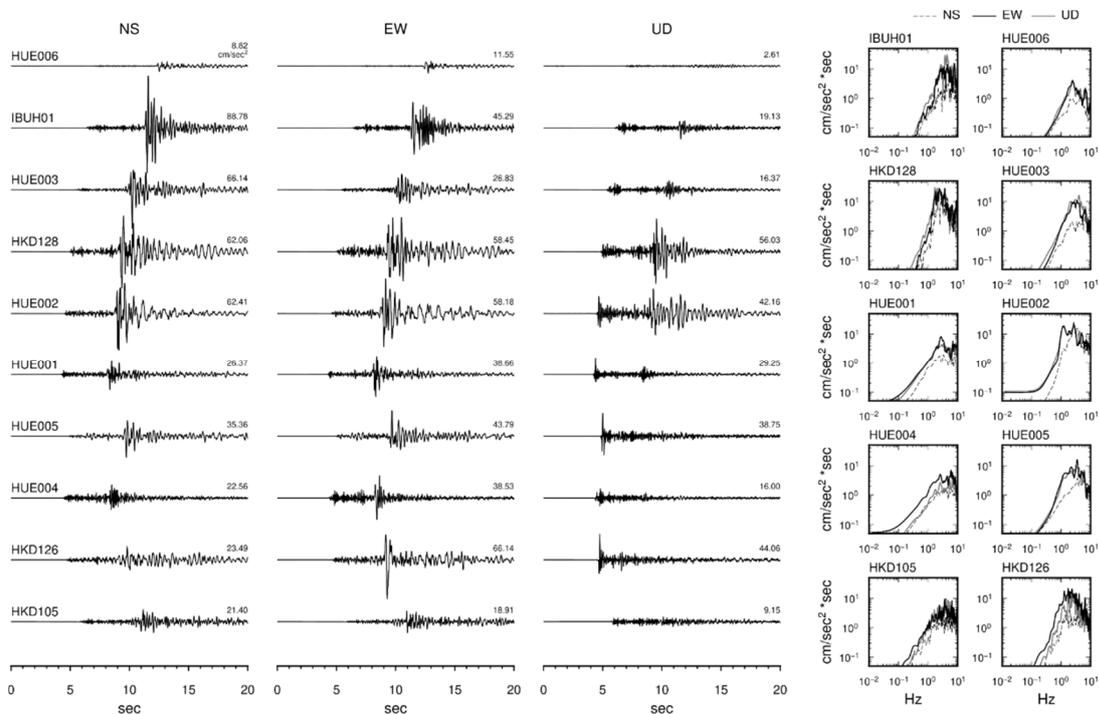


図3 2018年9月14日6時54分の地震 (M4.6、d=26 km) の  
加速度波形とフーリエスペクトル：コード名 HUE が地震後に設置した臨時観測点

## 謝辞

防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net のデータを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

原稿の校正には小委員会での議論が基となっております。

## 参考文献

- [1] 青井真: 全国を網羅する陸海統合地震津波火山観測網 MOWLAS, 地震本部ニュース, 10, pp.8-9, 2018.
- [2] 釜江克宏: 強震データの予測への利用法, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.51-56, 2000.
- [3] 高井伸雄, 前田宜浩, 重藤迪子, 笹谷努: 応答スペクトルの単一サイト予測式 (SS-GMPE) —三陸沖アウターライズ地震における検討—, 日本地震工学会論文集, 15, pp.18-37, 2015.
- [4] 中原恒: 地震波干渉法 その2 応用, 地震 第2輯, 68, pp.125-133, 2016.
- [5] 地元孝輔, 山中浩明: 短周期帯域における地震波干渉法によるレイリー波群速度推定の適用性, 物理探査, 66, pp.179-188, 2013.
- [6] 境有紀: 2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性—建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標—, 日本建築学会構造系論文集, 78, pp.35-40, 2013.
- [7] 小林啓美: 日本の強震観測の歩み, 日本地震学会ニュースレター, 13, pp.17-20, 2002.
- [8] 工藤一嘉: 強震観測 - 現状と展望, 地震. 2 輯, 47, pp.225-237, 1994.
- [9] 田中貞二: 日本における強震計の開発と初期の強震観測, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.39-48, 1995.
- [10] 杉戸真太: 強震動アレー観測記録データベースについて-(財)震災予防協会のアレー観測記録データベース開発・活動の紹介-, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.7-12, 1995.
- [11] 佐間野隆憲, 瀬尾和大: 関東地方広域における関東地震のスペクトル強度の推定, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.115-122, 1995.
- [12] 片岡俊一, 趙文方: SP,PS 変換波を利用した基盤構造推定の試み, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.61-66, 1995.
- [13] 佐藤吉之: 公的機関を中心とした強震観測の現状, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.3-10, 2000.
- [14] 植竹富一: 共同観測による高密度強震計アレイ, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.11-14, 2000.
- [15] 渡壁守正, 佐間野隆憲, 高橋克也: 強震動データベースに望まれる姿, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.27-34, 2000.
- [16] 植竹富一: 平成16年新潟県中越地震の地震動と原子力発電所の建屋応答, 第4回強震データの活用に関するシンポジウム-最近の地震に建築物はどう応答したか-, pp.39-44, 2005.
- [17] Hatayama Ken, Kanno Tatsuo, Kudo Kazuyoshi: Control Factors of Spatial Variation of Long-Period Strong Ground Motions in the Yufutsu Sedimentary Basin, Hokkaido, during the Mw

- 8.0 2003 Tokachi-oki, Japan, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 97, pp.1308-1323, 2007.
- [18] 笹谷努, 前田宜浩, 高井伸雄: 北海道の長周期地震動と深部地盤構造, 物理探査, 59, pp.315-326, 2006.
- [19] 防災科学技術研究所: 記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」--歴史と展望--: 講演集, 防災科学技術研究所 2005.
- [20] 大野晋: 最近の被害地震の強震観測例, 第 5 回 強震データの活用に関するシンポジウム-社会に役立つ強震観測-, pp.9-21, 2008.
- [21] 源栄正人: オンライン地震観測と早期地震警報システム, 第 5 回 強震データの活用に関するシンポジウム-社会に役立つ強震観測-, pp.39-56, 2008.
- [22] 功刀卓, 青井真, 藤原広行: 強震観測―歴史と展望―, 地震 第 2 輯, 61, pp.19-34, 2009.
- [23] 防災科学技術研究所: K-NET または KiK-net で震度 5 弱相当以上が観測された地震のリスト, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/cgi-bin/kyoshin/bigeqs/index.cgi>, (2018/11/13accessed)
- [24] Suzuki Wataru, Aoi Shin, Kunugi Takashi, Kubo Hisahiko, Morikawa Nobuyuki, Nakamura Hiromitsu, Kimura Takeshi, Fujiwara Hiroyuki: Strong motions observed by K-NET and KiK-net during the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Earth, Planets and Space, 69, pp.19, 2017.
- [25] 青井真, 功刀卓, 鈴木亘, 森川信之, 中村洋光, 先名重樹, 藤原広行: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動, 地震 第 2 輯, 64, pp.169-182, 2012.
- [26] 三宅弘恵, 浅野公之, 瀨瀬一起, 岩田知孝: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた震源モデルの概要, 日本地震工学会論文集, 16, pp.12-21, 2016.
- [27] 山中浩明, 津野靖士, 地元孝輔, 新色隆二: 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測と微動アレイ観測による KiK-net 芳賀観測点周辺での地盤震動特性の評価, 日本地震工学会論文集, 12, pp.143-159, 2012.
- [28] 山中浩明, 津野靖士, 地元孝輔, 山田伸之, 福元俊一, 江藤公信: 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測と微動探査による K-NET 築館観測点周辺での地盤増幅特性の評価, 物理探査, 64, pp.389-399, 2011.
- [29] 防災科学技術研究所: 陸海統合地震津波火山観測網 (MOWLAS) とは, <http://www.mowlas.bosai.go.jp/mowlas/>, (2017/11/13accessed)
- [30] 笠原敬司, 酒井慎一, 森田裕一, 平田直, 鶴岡弘, 中川茂樹, 楠城一嘉, 小原一成: 首都圏地震観測網(MeSO-net)の展開, 東京大学地震研究所彙報, 84, pp.71-88, 2010.
- [31] 津野靖士, 山中浩明, 翠川三郎, 山本俊六, 三浦弘之, 酒井慎一, 平田直, 笠原敬司, 木村尚紀, 明田川保: 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の本震記録と余震記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性, 日本地震工学会論文集, 12, pp.102-116, 2012.
- [32] 防災科学技術研究所: 概要―観測施設, [http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin\\_index.html](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin_index.html), (2017/11/13accessed)
- [33] 坂上実, 高橋正義: 強震観測室の変遷と現状: 観測点選定・観測点建設・強震計設置について, 技術研究報告, 2, pp.102-119, 1997.
- [34] 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/KyoshinTebiki/index.php>, (2017/11/13accessed)

- [35] Kudo Kazuyoshi, Kanno Tatsuo, Okada Hiroshi, Özel Oguz, Erdik Mustafa, Sasatani Tsutomu, Higashi Sadanori, Takahashi Masayoshi, Yoshida Kunikazu: Site-specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, pp.448-465, 2002.
- [36] 福島康宏, 山田真澄, 後藤浩之: 臨時余震観測記録を用いた東北地方太平洋沖地震における登米市迫町佐沼の地震動推定, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 68, pp.119-125, 2012.
- [37] 後藤浩之, 羽田浩二, 澤田純男, 吉田望, 大内徹: 常時微動観測と臨時余震観測による福島県浪江町市街地の地盤震動特性評価, *日本地震工学会論文集*, 16, pp.309-321, 2016.
- [38] Takai Nobuo, Shigefuji Michiko, Rajaure Sudhir, Bijukchhen Subeg, Ichiyanagi Masayoshi, Dhital Megh, Sasatani Tsutomu: Strong ground motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68, pp.10, 2016.
- [39] 津野靖士, 地元孝輔, 山中浩明: 東北地方太平洋沖地震の余震観測記録と微動観測記録の解析から推定された茨城県中部に於ける S 波速度構造—東茨城台地に注目して—, *物理探査*, 64, pp.401-412, 2011.
- [40] 上林宏敏, 浅野公之, 関口春子: 平成 30 年 6 月 18 日大阪府北部の地震の震源像と大阪平野における強震動の概況, 第 46 回地盤震動シンポジウム, pp.105-114, 2018.
- [41] 地震調査推進本部: 平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査平成 28 年度成果報告書, [https://www.jishin.go.jp/database/project\\_report/kumamoto\\_sogochousa-h28/](https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kumamoto_sogochousa-h28/), (2017/11/13accessed)
- [42] 高井伸雄, 重藤迪子, 一柳昌義, 高橋浩晃, 前田宜浩: 2018 年北海道胆振東部地震における強震動, 第 46 回地盤震動シンポジウム, pp.115-120, 2018.

# 建物強震観測における成果と課題

大野 晋

東北大学災害科学国際研究所

## 1. はじめに

建物における強震観測は、建物の地震時挙動の解明や耐震設計の検証のために設置され、例えば 1978 年宮城県沖地震で東北大学建設系建物頂部で観測された 1040Gal が標準せん断力係数  $C_0=1.0$  の基となる[1]など、耐震基準上も大きな役割を果たしてきた。近年では強震観測装置は地震後の即時被災度把握を目的とした建物構造健全性評価（構造ヘルスマニタリング）にも用いられるようになってきている。

2011 年東北地方太平洋沖地震から 7 年半余りが経過したが、強震観測小委員会では、2012 年の建築学会大会 PD[2]、2016 年の振動運営委員会シンポジウム[3]、2016 年建築学会大会 PD[4]などで建物の強震観測状況やそれらを用いた成果を報告している。本稿ではそれらを踏まえて、東北地方太平洋沖地震において建物強震観測で得られた成果を紹介するとともに、2016 年熊本地震など最近の被害地震の建物での観測状況について報告し、建物強震観測の課題について述べる。

## 2. 東北地方太平洋沖地震の建物強震観測

### 2.1 強震観測記録

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) での建物強震観測記録については、2012 年建築学会大会 PD[2]で紹介されている。建築研究所のデータは建築研究所のウェブページ[5]から申し込むことができ、原子力発電所のデータは日本地震工学会[6]から、仙台を中心とした建物強震記録は日本建築学会東北支部[7]から頒布されている。

### 2.2 強震記録を用いた成果

#### (1) 被災建物の分析

東北大学工学部人間環境系建物 (9 階建 SRC 造) では建築研究所と東北大学による強震観測が行われており、記録の分析[8]及び骨組モデルによるシミュレーション[9]が報告されている。この建物は 1969 年竣工後、1978 年宮城沖地震で損傷を受けたのち、2000 年に耐震改修を行ったが、2005 年宮城県沖の地震や 2008 年岩手・宮城内陸地震を経験したのち、2011 年東北地方太平洋沖地震で大破し、解体となっている。その間の常時微動計測、振動実験、強震観測により、図 1 に示すような竣工から 2 度の大地震を経て解体に到るまでの振動特性の変化が捉えられている。また、観測記録の分析により、この建物の主な被災要因が地盤と建物の共振にあったこと、本震では高層部の浮き上がり振動があったこと、応急補強工事での振動特性の変化が報告されている。

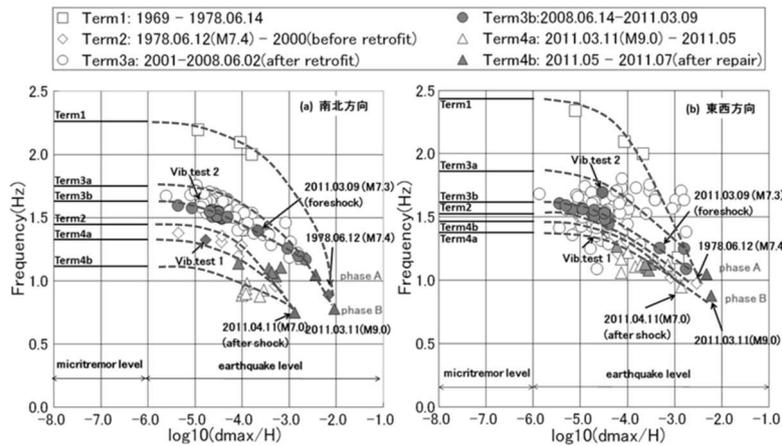


図1 東北大学人間環境系建物の変形角と固有振動数の関係の変化[8]

## (2) 超高層・中低層建物

文献[10][11]では関東と関西の超高層集合住宅（主に RC 造）を対象に強震記録の分析結果を報告している。図2のように頂部変形角と固有振動数低下率、荷重・変形関係、設計モデルとの対応などが検討されており、降伏耐力に相当する第2折点までは達していなかったものの、バイリニア型の荷重変形関係が確認され、折れ点は設計モデルのひび割れ耐力時の変形レベルに対応することが報告されている。

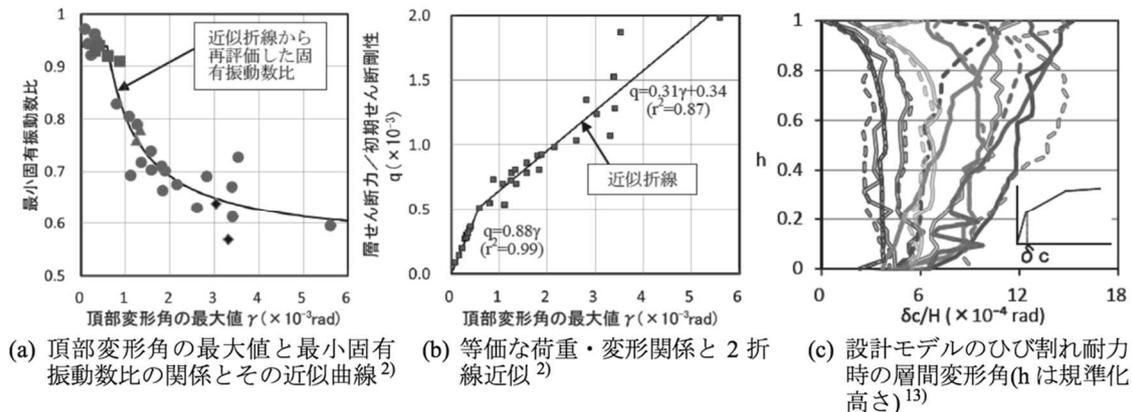


図2 超高層強震記録から求めた振動数低下率、荷重変形、設計モデルの層間変形角[11]

また、文献[12]では仙台、関東、関西の超高層建物を対象に、RC造とS造に分けてARXモデルによる同定で得られた固有周期・減衰定数とその振幅依存性を報告している。文献[13]では中低層RC・SRC建物を対象に、強震記録を用いた一質点系シミュレーション解析で得られた固有周期と減衰定数を報告している。

## (3) 免震・制振建物

文献[14][15]では免震建物の強震記録を調査し、入力加速度と応答倍率や免震層変位の関係について報告している。図3に示すように、入力加速度が大きい東北地方の免震建物では応答加速度の低減効果が顕著であったこと、免震層最大応答変位については、関東以西では概ね10cm以下であるが、東北地方で10cmを超えるものが多数見られたことが報告されている。

文献[16]ではパッシブ制振建物についての強震記録のシステム同定結果に基づき、東北地方太平洋沖地震の主要時間帯での1次固有周期と減衰定数の関係を図4のようにまとめている。非制振の場合の減衰定数を1-2%とすると、それに比べて明らかに制振効果が認められること、一方長周期構造物になるほど効果が下がる傾向があることを指摘している。

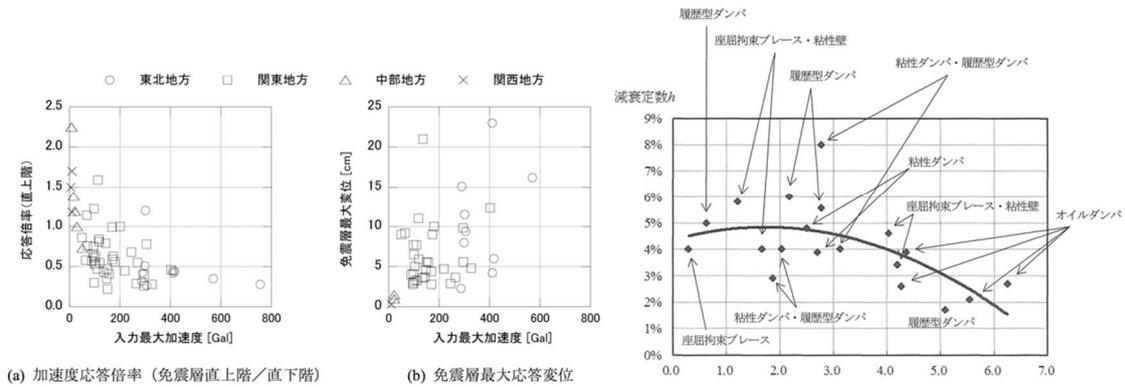


図3 免震建物強震記録の分析[15] 図4 パッシブ制振建物の固有振動数と減衰定数[16]

#### (4) 動的相互作用効果

文献[17]では、前震に比べて本震の方が有効入力動が低減し始める振動数が低振動数側になること(図5)や、上部建物の非線形化に伴う固有振動数の変化が有効入力動のスペクトル性状に影響を与えていることなど、建物や地盤の非線形化に伴う相互作用効果への影響を指摘している。また、文献[18][19]では杭基礎建物を対象に、東北地方太平洋沖地震の前震・本震・余震記録を用いて動的相互作用効果を検討し、図6のように慣性の相互作用の方が入力相互作用よりも建物応答の低減効果が大きかったと報告している。

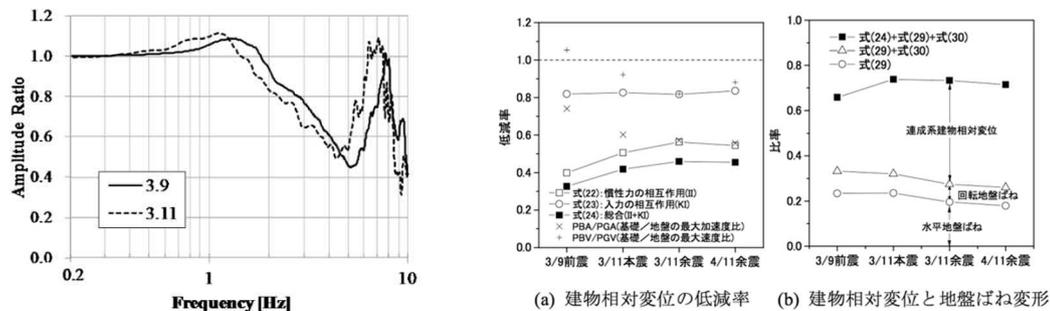


図5 地盤の非線形化が基礎入力動に及ぼす影響[17] 図6 相互作用効果の検討[19]

### 2.3 本震後の振動特性の変化

文献[20]では首都圏超高層建物の振動特性の変化を検討し、ひび割れ点を超えたRC建物では、図7のように東北地方太平洋沖地震前後で固有周期と減衰定数が変化して回復しないこと、地震後の方が固有周期の振幅依存性が大きくなっていること、が報告されている。

また、文献[21]では宮城県の低層RC建物を対象に、東北地方太平洋沖地震前後での常時微動レベルでの固有振動数の変化を検討し、本震後に上昇が見られること、気温変化と連動した変動が見られるが、本震後の方が変動量が大きくなっていること、気温依存性は本震前後で逆転していることを報告している。

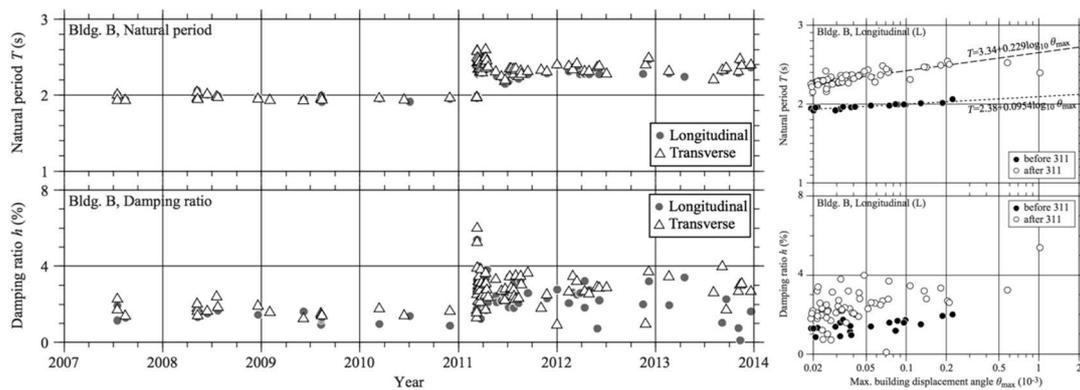


図7 超高層 RC 建物の振動特性の経時変化と本震前後の振幅依存性[20]

### 3. 最近の地震の建物強震観測

#### 3.1 2016 年熊本地震

2016 年熊本地震では益城町を中心として甚大な被害が発生したが、被災地での建物上部強震記録は報告されていない。ただし益城町役場では建物 1 階に震度計が置かれており、KiK-net 益城の観測記録を入力としたシミュレーション解析による非線形相互作用効果が検討されている。文献[22]では杭・地盤間にスリップ挙動が発生し、非線形性の影響が大きくなったこと、杭は前震で損傷し本震で被害が拡大したと考えられることを報告している。

免震建物でも加速度強震記録は報告されていないが、文献[23]によるとけがき記録の最大変位は阿蘇市の医療施設で片振幅で 46cm、両振幅で 90cm に達している。

#### 3.2 2018 年大阪府北部の地震

本年発生した大阪府北部の地震では、建築研究所による建物強震記録[24]や免震建物における強震記録[25]が報告されている。

### 4. 強震観測の意義とトレンド

被害地震における強震観測記録の意義としては、構造健全性評価による即時対応を除くと、前述のように建物の地震時挙動の解明や免制振装置の効果の確認があげられる。また、将来の地震時挙動を予測するための建物モデルの更新にも寄与する。文献[11]では本震を経験した解析モデルでないと余震記録を説明できないことを報告している。近年は超巨大地震の発生や地震活動の活発化に伴い、建物が複数回大地震を経験することが実際に起こっていることから、建物性能の変化を把握するためにも地震前からの強震観測は重要である。その意味で、2.2(1)で述べたような長期観測の意義は大きい。

文献[4]では強震観測システムの変遷についてまとめられており、近年のトレンドとしては連続観測と安価な MEMS 型強震観測が挙げられる。連続観測では長周期長時間地震動でも記録が途切れることもなく、連続的な荷重変形関係が検討可能である。さらに、気温依存性[21]、風速依存性[26]なども検討できる。

### 5. 強震観測の課題

強震観測の課題については文献[3]でまとめられている。観測システムとデータ公開の課題に分けて述べると、東北地方太平洋沖地震や最近の被害地震で明らかになったシステム上の課題としては、電源喪失による欠測、通信遮断によるデータ取得不可が代表的なもので

ある。著者の東日本大震災での経験からは、強震計としてスタンドアロンで記録を取るだけのものは（バッテリーの劣化を除き）上記の影響をあまり受けず、ネットワーク型やPCを用いたシステムの方が脆弱であった。なお、大地震の発生間隔が大きい強震観測は長期観測が前提であるが、設置の予算は確保できてもそれを維持・更新する予算は確保されないことがあり、維持更新の必要性への理解を広めることが必要である。

データ公開については、1995年兵庫県南部地震以降、地盤系では国や自治体による全国的な強震観測網の設置が進んだ。地盤系の場合基本的にデータは公開され、その後のリアルタイム化により現在では地震直後に揺れの分布が発表されるようになっている。建物系で該当するのは建築研究所の公共建築物への観測のみであり、量的に不足していることは明らかである。2015年度の振動運営委員会シンポジウムでは複数の小委員会から建物系強震観測の充実が課題としてあげられており[3,15,17]、その必要性は共通認識になっていると思われる。東日本大震災後はモニタリング目的の設置が増えているとされているが、その多くは民間ベースであり、実態が掴めないのが実情である。

海外では民間建物でも強震記録が公開されている例があり、文献[27]では米国カリフォルニア州の強震観測体制が紹介されている。地震活動度が高い地域では、耐震基準(UBC)にある規模以上の建物への強震計の設置を推奨する条項があり、これを採用した自治体では計器の設置が義務付けられること、カリフォルニア州では一定規模以上の建物の建設について、建設費に対して一律の割合での観測費用の徴収を行なっていることを記載している。文献[28]ではIBCに移行したのちは観測条項はなかったが、2012以降UBCと同様の観測条項が追加された事を記している。また、文献[28]では強震観測/SHMのステークホルダーとして、当該建物のオーナー/居住者だけでなく周辺の安全性に関心がある市当局者や救助者も挙げられており、社会的な必要性が認識されていることが背景にあると思われる。一方、日本では建物強震観測の社会的な認知度は低いことは否めない。

また、ニュージーランドのGNS Scienceでは建物強震観測データを提供しているが、再配布不可、GNS Science及び（必要な場合）オーナーの許可なしに発表しないこと、発表する場合も建物やオーナーを特定しないこと、などの制約を課している[29]。

#### 4. まとめ

東北地方太平洋沖地震や近年の被害地震の建物強震観測状況と、それを用いた成果について概説した。近年は建物が複数回大地震を経験することが実際に起こっており、被災による建物性能の変化を把握するためにも強震観測は重要であるが、地盤系と比べて量的な不足は否めない。海外での建物強震観測の公開例を考慮すると、社会的な必要性の認知度を高めることが必要と思われる。

#### 参考文献

- [1] 北川良和：1968年十勝沖地震・1978年宮城県沖地震を振り返って ―両地震がその後の建築耐震設計などにどのような影響を与えたか―，地震ジャーナル，65，pp.28-33，2018.6
- [2] 飛田潤：東日本大震災における地盤・建物の強震観測状況，強震観測とモニタリング技術が災害時に果たすべき役割，2012年日本建築学会大会構造部門(振動)パネルディスカッション資料，pp.7-14，2012.9.
- [3] 中村充：強震観測―強震観測に求められる役割，その現状と課題―，シンポジウム「東

- 日本大震災から5年ー建築振動工学の到達点と残された課題ー」資料, pp.49-54, 2016.1
- [4] 鹿嶋俊英: 進化する地盤-建物系強震観測, 将来の大地震に備える強震観測とモニタリング, 2016年日本建築学会大会構造部門(振動)パネルディスカッション資料, pp.17-24, 2016.8.
- [5] <https://smo.kenken.go.jp>
- [6] <https://www.jaee.gr.jp/jp/stack/data/>
- [7] 日本建築学会東北支部災害調査連絡会: 東北地方で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の建物・地盤系強震データ集, 2013.6
- [8] 源栄正人, ツアンバ・ツォグゲレル, 吉田和史, 三辻和弥: 東北地方太平洋沖地震における被災建物の振幅依存振動特性の長期モニタリング, 日本地震工学会論文集, 12, pp. 5\_117-5\_132, 2012.
- [9] M. Cao, M. Motosaka, T. Tsamba, K. Yoshida: Simulation Analysis of A Damaged 9-Story SRC Building during The 2011 Great East Japan Earthquake, Journal of Japan Assoc. for Earthq. Eng., 13, pp. 2\_45-2\_64, 2013.
- [10] 永野正行, 肥田剛典, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 中村充, 井川望, 保井美敏, 境茂樹, 森下真行: 2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性, 日本地震工学会論文集, 12, pp.4\_65-4\_79, 2012.
- [11] 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦, 中村充, 井川望, 保井美敏, 境茂樹, 森下真行, 北堀隆司, 上林宏敏: 強震下の超高層集合住宅の挙動解明と今後の被害低減に向けた取り組み, 日本地震工学会論文集, 16, pp.5\_2-5\_11, 2016.
- [12] 上林宏敏, 永野正行: 超高層建物の強震観測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, 19, 42, pp.435-440, 2013.6
- [13] 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, 22, 52, pp.905-908, 2016.10
- [14] 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, 19, 42, pp.457-460, 2013.6
- [15] 菊地優: 免震構造ー巨大地震への備えとしての取り組みー, シンポジウム「東日本大震災から5年ー建築振動工学の到達点と残された課題ー」資料, pp.43-48, 2016.1
- [16] 池田芳樹: 制振技術の東日本大震災前後の様相, 2013年日本建築学会大会構造部門(振動)パネルディスカッション資料, pp.15-24, 2013.8.
- [17] 護雅史: 地盤基礎系振動ー非線形動的相互作用の解明と設計への取り込みー, シンポジウム「東日本大震災から5年ー建築振動工学の到達点と残された課題ー」資料, pp.25-32, 2016.1
- [18] 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 No.866, 建築研究資料 No.167, 2015.10.
- [19] 岡野創, 小豆畑達哉, 井上波彦, 飯場正紀, 鹿嶋俊英, 酒向裕司: 観測記録から推測される地盤-構造物の動的相互作用による応答低減効果, 日本建築学会構造系論文集, 696, pp.237-246, 2014
- [20] 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, 21, 48, pp.493-497, 2015.6
- [21] 畠山智貴, 王欣, 大野晋, 源栄正人: 長期連続観測に基づく鉄筋コンクリート造建築物

- の地震時および通常時における振動特性の変動, 日本建築学会技術報告集, 23, pp.805-808, 2017.10.
- [22] 中野尊治, 宮本裕司, 川辺秀憲: 2016 年熊本地震で連続した大振幅地震動が作用した益城町庁舎の非線形相互作用, 日本建築学会構造系論文集, 748, pp.781-791, 2018.6
- [23] 森田慶子, 高山峯夫: 2016 年熊本地震と免震構造 免震構造の地震時の挙動と利用者の声, 福岡大学工学集報, 100, pp.95-109, 2018.3.
- [24] 国立研究開発法人建築研究所: 強震観測速報(2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震), <https://smo.kenken.go.jp/smreport/201806180758>
- [25] 宮本裕司: 2018 年 6 月 18 日大阪北部地震 免震建物の調査, 日本建築学会近畿支部大阪北部地震被害調査速報会資料, [https://janet-dr.com/050\\_saigaiji/2018/050\\_2018\\_gouu/20180725\\_aij\\_kinki.pdf](https://janet-dr.com/050_saigaiji/2018/050_2018_gouu/20180725_aij_kinki.pdf)
- [26] 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, 19, pp.59-64, 2013.2.
- [27] 大川出: 耐震性能の検証と強震観測, BRI-H19 講演会テキスト, <https://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h19/panel/2.pdf>
- [28] M. Celebi, Seismic Monitoring of Structures and New Developments, M. Garevski (ed.): Earthquakes and Health Monitoring of Civil Structures, 37 Springer Environmental Science and Engineering, DOI 10.1007/978-94-007-5182-8\_2, 2013.
- [29] [https://www.geonet.org.nz/data/types/structural\\_arrays](https://www.geonet.org.nz/data/types/structural_arrays)

# 建物管理者の視点による強震観測の活用と課題

田沼毅彦

独立行政法人都市再生機構、主幹

## 1. はじめに

独立行政法人都市再生機構（以下、UR 都市機構と略記）は、1955 年に発足した日本住宅公団を前身組織とし、主に東京・名古屋・大阪・福岡の大都市圏周辺に鉄筋コンクリート造の集合住宅を供給してきた。現在、建物棟数にして約 1 万 5.8 千棟、住宅戸数にして約 74 万戸を保有し、管理・運営している。

UR 都市機構における建物（その立地する地盤を含む）の強震観測は 1975 年に始められ、1990 年代半ばから 2000 年にかけて、UR 都市機構では超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の設計・建設が多く行われたこと、1995 年兵庫県南部地震において強震観測の必要性が再認識されたことなどを契機に、主に超高層集合住宅の建設時に強震計を設置することにより観測点が広げられ、これまでに 27 棟の建物で強震観測が行われてきている。

本稿では、多くの公的賃貸集合住宅を所有・管理する立場からの視点で、UR 都市機構における強震観測の概要、観測データの活用事例や今後の課題などについて紹介する。なお、建物管理者の立場を総花的に代弁するものではなく、オフィスや庁舎に関しては別の活用法や課題があるであろうことはあらかじめ承知おき願いたい。

## 2. UR 都市機構における強震観測の概要

### 2.1 観測対象建物の概要

UR 都市機構における強震観測対象建物の建設地を図 1 に、諸元一覧を表 1 に示す。強震観測対象建物の建設地は大都市圏周辺に集中しており、これまでに観測してきた 27 棟の内訳は関東で 19 棟、関西で 6 棟、中部で 2 棟である。なお、地盤のみの観測点はない。

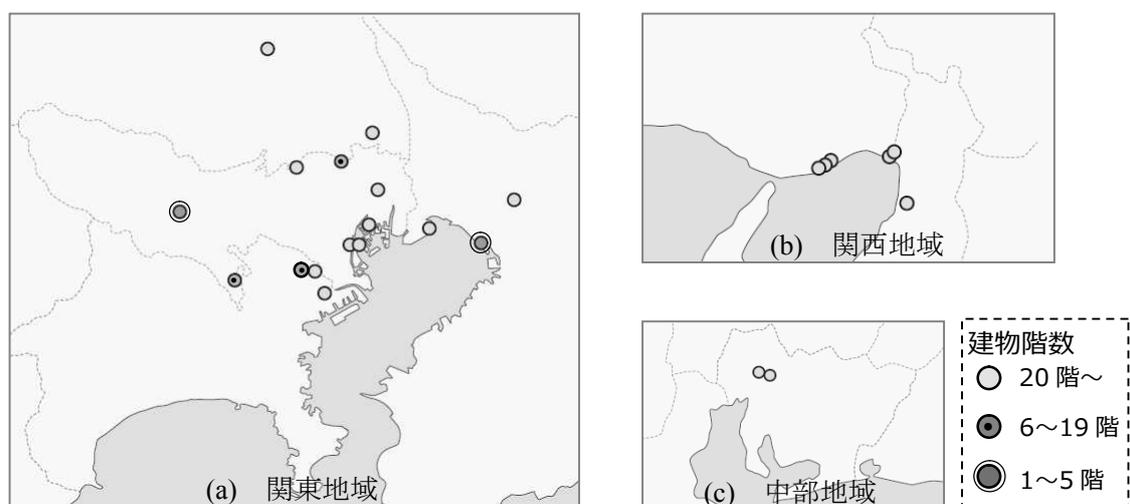


図 1 UR 都市機構における強震観測対象建物の建設地

表1 UR都市機構における強震観測対象建物の諸元一覧

No.	地域	構造種別	地上階数	軒高(m)	建物用途	観測開始年	竣工年	強震計設置箇所				
								地中・杭	地表	建物基部	建物中間	建物頂部
1	関東	SRC	11F	30.95	住宅	1975	1975	○	○	○		○
2	関東	SRC	23F	63.3	住宅	1984	1984		○	○	○	○
3	関東	RC	30F	88.35	住宅	1988	1988	○	○	○	○	○
4	関東	RC	24F	72.55	住宅,施設	1988	1988	○	○	○	○	○
5	関東	RC	24F	69.95	住宅	1993	1993			○		○
6	関東	RC	25F	74.9	住宅	1995	1995			○		○
7	関東	S	36F	108	実験施設	1996	1996		○	○		○
8	関東	RC	33F	99.95	住宅	1996	1996	○	○	○	○	○
9	関東	RC	28F	81.5	住宅	1996	1996	○		○	○	○
10	関東	RC 免震	2F	8.475	実験施設	1996	1996		○	○		○
11	関東	CFT	50F	158.68	住宅	1998	1998	○	○	○	○	○
12	関東	RC	30F	95.9	住宅	1999	1999	○	○	○	○	○
13	関東	RC	33F	103.8	住宅	2000	2000	○	○	○	○	○
14	関東	RC 免震	4F	12.5	住宅	2001	2001	○	○	○		○
15	関東	RC 免震	6F	18.6	住宅	2001	2001	○	○	○		○
16	関東	RC 制震	41F	134.3	住宅	2010	2010			○	○	○
17	関東	SRC 制震	11F	29.5	住宅	2011	1971		○	○	○	○
18	関東	RC 壁式	5F	13.75	住宅	2011	1973		○	○	○	○
19	関東	RC	35F	109.9	住宅	2014	2004			○	○	○
20	関西	SRC	25F	81.65	住宅,施設	1977	1977			○	○	○
21	関西	RC	31F	92.5	住宅	1989	1989	○	○	○	○	○
22	関西	RC	37F	111.65	住宅	1999	1999	○	○	○	○	○
23	関西	RC	43F	135.68	住宅,施設	1999	1999	○		○	○	○
24	関西	CFT 制震	40F	122.2	住宅	1999	1999	○	○	○	○	○
25	関西	RC	33F	98.35	住宅	1999	1999	○	○	○	○	○
26	中部	RC	26F	88.3	住宅,施設	1997	1997	○	○	○	○	○
27	中部	RC	25F	75.25	住宅	2011	1997			○	○	○

注1：No.1、No.2、No.17は、現時点において観測休止中。

注2：No.7は、2016年に建物を解体撤去。

### (1) 構造種別

観測対象建物の構造種別について、材料別に分類した棟数を図 2 に、免制震デバイスの有無別に分類した棟数を図 3 に示す。多くは RC 造で 20 棟を占めるが、S 造・CFT 造も 3 棟ある。RC 造のうち 1 棟は壁式構造であるが、他はラーメン構造である。SRC 造の 4 棟は、いずれも 1984 年以前に竣工した高層建物である。免制震デバイスの有無については、耐震構造は 21 棟、免震構造が 3 棟、制震構造が 3 棟である。制震構造のうち 1 棟（表 1 の建物 No.17）は、耐震改修により制震ダンパー付きブレースを設置したものである。



図 2 構造種別毎（材料別）の棟数



図 3 構造種別毎（免制震デバイスの有無）の棟数

### (2) 建物階数および軒高

観測対象建物について、建物階数毎に分類した棟数を図 4 に、軒高毎に分類した棟数を図 5 に示す。20 階建て以上（60m 超）が 21 棟あり、超高層建物が多い。UR 都市機構が保有・管理する超高層建物は全国で 80 棟程度なのでその約 1/4 で強震観測行っていることになる。また、5 階建て以下の 3 棟のうち 2 棟は免震構造である。

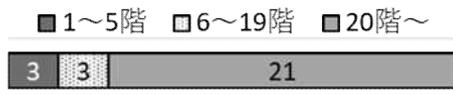


図 4 建物階数毎の棟数

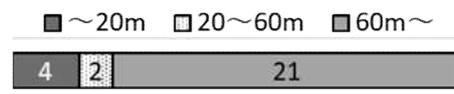


図 5 軒高毎の棟数

### (3) 建物用途

観測対象建物について、用途毎に分類した棟数を図 6 に示す。多くは集合住宅のみで 21 棟、集合住宅と商業施設の複合用途が 4 棟ある。また、集合住宅 25 棟のうち、所有形態毎に分類した棟数を図 7 に示す。多くは UR 都市機構が保有・管理する賃貸住宅であるが、一部に分譲住宅も含まれている。



図 6 建物用途毎の棟数



図 7 住宅における所有形態毎の棟数

### (4) 観測開始年および竣工年

観測対象建物について、観測開始年毎に分類した棟数を図 8 に、建物竣工年毎に分類した棟数を図 9 に示す。

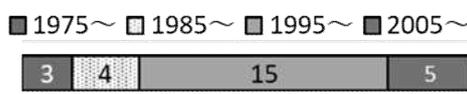


図 8 観測開始年毎の棟数

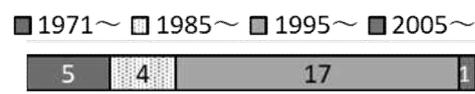


図 9 建物竣工年毎の棟数

強震計の設置時期が竣工時と同時であるのは 23 棟、竣工後は 4 棟である。

UR 都市機構における強震観測は、その前身の日本住宅公団時代の 1975 年に、当時の建設省の総合技術開発プロジェクト（以下、総プロと略記）[1][2]の一環として（財）国土開発技術研究センター（現、（一財）国土技術研究センター）に設置された「軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定委員会」が行った研究に協力するかたちで始められている。

その後、UR 都市機構では、超高層建物における構造解析モデルの妥当性や適用性を強震観測による実挙動と照らして検証するため、超高層集合住宅の建設時に可能な場合、強震計が設置され強震観測が開始された。1990 年代半ばから 2000 年にかけては、当時の建設省の総プロ「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発（New RC）」（1988～1992 年）の成果を受けて、UR 都市機構において超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の設計・建設が多く行われたこと、1995 年兵庫県南部地震で強震観測の必要性が再認識されたことなどを契機に、観測点が拡大されていった。2000 年以降は、免震・制震などの新技術の検証、軟弱地盤上に建つ中層壁式鉄筋コンクリート造の構造特性・相互作用効果の把握など個別の課題を受けて強震計が設置され、強震観測が行われている。

### (5) 強震計設置箇所

観測対象建物およびその立地する地盤における強震計設置箇所の組合せによる分類を図 10 に示す。ここで、「地表」は GL-1m 程度、「地中」は「地表」以深の地盤か杭体内部、「建物」は建物に強震計が設置されている場合である。「地中」+「地表」+「建物」の組合せが多く 14 棟が該当するが、「地中」については観測中に故障が生じ、現在は欠測しているものが少なくない。また、建物内における強震計設置箇所の組合せによる分類を図 11 に示す。ここで、「基部」は 1 階や地下階の床、「中間階」は建物高さのおおよその中間位置における階の床、「頂部」は屋上階や最上階の床に強震計が設置されている場合である。超高層建物が多いこともあり、「基部」+「中間階」+「頂部」の組合せが多く 20 棟が該当する。なお、「基部」や「頂部」だけで観測している建物はない。



図 10 強震計設置箇所（地盤と建物）

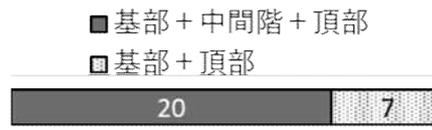


図 11 強震計設置箇所（建物内）

## 2.2 強震観測の実施体制および維持管理

UR 都市機構の強震観測は、UR 都市機構単独で行っている場合と、主に観測対象建物を設計・施工したゼネコンと共同研究協定または共同観測の覚書などを締結し共同で行っている場合に分けられる。その内訳は図 12 に示すように、UR 都市機構単独による建物が 7 棟、共同研究・観測による建物が 20 棟で、共同研究・観測している場合の方が多い。



図 12 UR 都市機構における強震観測の実施体制

### (1) UR 都市機構単独の場合

UR 都市機構単独による場合は、観測データの収集・分析、強震計の維持管理・保守点検などは当然ながら UR 都市機構が自らもしくは専門業者に発注するなどして強震観測を行っている。しかしながら、UR 都市機構内に強震観測を担当する技術者は一人であり、かつ他の業務を主としているため、効率的な運営が不可欠である。そのため、次に述べる共同研究・観測を多用するに至っている。

### (2) 共同研究・観測の場合

共同研究・観測による場合、その相手方は基本的に観測対象建物を設計・施工したゼネコンで担当は研究部門である。役割分担は、共同研究協定書または共同観測の覚書により個々の建物毎に定められている。観測データの収集は原則ゼネコン側の役割であるが、UR 都市機構側も全データを共有しているので、UR 都市機構における観測対象建物の観測データは UR 都市機構において一元管理されている。強震計の維持管理に係る費用（例えば、電気料金、通信料金）や保守点検費用の負担者、観測機器の所有者については、個々の建物の条件に応じて相手方と協議により決めているので、それぞれ異なっており、図 13～16 に示すとおりである。



図 13 電気料金の負担者



図 14 通信料金の負担者



図 15 保守点検の実施者



図 16 観測機器の所有者

共同研究・観測では、UR 都市機構側に単独で行う場合に比べて強震観測にかかる負担軽減のメリットがあるが、相手方のゼネコン側においても、建物所有者・管理者が観測主体の一翼を担っていることで、守秘義務のもとに各種建物情報・資料の共有、継続的な強震観測、地震時における建物合同調査などが可能となり相応のメリットがあると思われる。

### 2.3 観測データの分析および活用にかかる検討体制

強震観測で得られた観測データの分析やそれを活用した建物の応答解析などの検討を行う体制としては、UR 都市機構単独で強震観測を行っている場合は UR 都市機構単独で、ゼネコンと共同研究・観測を行っている場合は各建物毎にゼネコンと共同で行うのが原則であるが、UR 都市機構における強震観測対象建物全体を包括的・横断的に検討する場合には、建築研究所、国土技術政策総合研究所、大学などの研究機関と共同研究協定を締結して取組まれることが多い。UR 都市機構は、インハウスで強震観測にかかる研究者、専門家がいらないが、外部の研究機関と連携することによりデータ活用の機会が広がること、専門的な知見を得られること、UR 都市機構の業務に資する成果を共有できることなどのメリットがある。

近年では、2011 年東北地方太平洋沖地震を契機にして、東京理科大学と共同研究を締結し、主に UR 都市機構で強震観測を行っている超高層集合住宅を対象とした研究会「超高層集合住宅地震観測合同研究会」を立上げた。共同研究・観測を行っているゼネコン各社のほか学識経験者も参画し、現在も活動中で成果を多く情報発信してきている（例えば[3]）。

### 3. UR 都市機構における強震観測の活用例

#### 3.1 総プロや建築学会等における研究への協力

UR 都市機構における強震観測の活用例の一つとして、国交省（建設省）の総プロや建築学会等の研究に役立てられていることがある。長期的な視点になるが、多くの公的集合住宅を所有・管理する公的機関の立場として観測場所や観測データの提供に協力することで研究が進展し、そこでの成果が国の基準や学会の指針・技術資料作成などに反映されることにより、結果として UR 都市機構が管理している建物の地震時挙動の解明や設計へのフィードバックに繋がれば強震観測に参画することへの意義が見出される。

そもそも UR 都市機構における強震観測の始まりが、先述したとおり、日本住宅公団時代の 1975 年に、建設省総プロ[1][2]の一環として（財）国土開発技術研究センター（現、（一財）国土技術研究センター）に設置された「軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定委員会」の研究を受けて、東京都内にある SRC 造 11 階建て集合住宅（表 1 の No.1）およびその立地地盤に強震計を設置したことによるものであった。その観測概要および観測結果の分析例を紹介する[4]-[8]。観測対象建物の平面図および断面図を図 17 に示す。構造形式は、長辺（Y）方向がラーメン構造、短辺（X）方向が連層耐力壁構造である。図 18 に S 波速度分布を示す。杭基礎は深さ 24.9m 以深に支持されている。測定点は、建物一杭系・建物近傍地盤系・遠方地盤系（建物から 35m の離隔）に大別される。強震計（加速度計）は、頂部（屋上階）・基部（1 階）・杭中・杭先端、GL-2、5.5、9、13、30、100m に設置された。図 19 に、1976.6.16 に観測された記録の最大加速度の分布を、建物一杭列、杭間地盤、近傍地盤列、遠方地盤列に分けて示した。地盤中の加速度は遠方地盤列で大きく、近傍地盤列と杭の最大加速度ほぼ同程度になっている。図 20 に、1975.12.15～1980.9.25 に観測された 8 地震の短辺（X）方向における杭先端の最大加速度に対する各部の加速度増幅率を示す。建物基部、頂部でそれぞれ、1～6、4～13 の範囲にばらついており平均値は 3.07、7.95 である。また、建物内での増幅率は約 3 倍程度である。

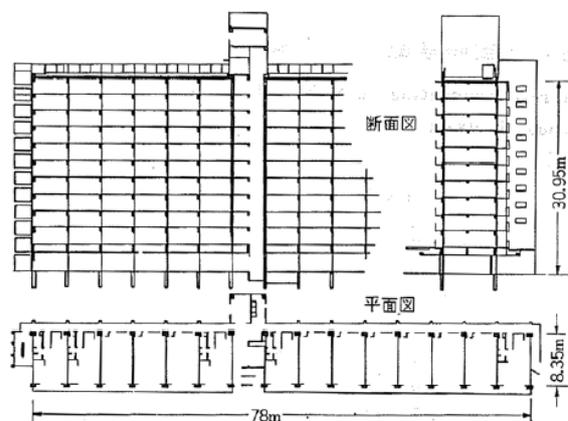


図 17 観測対象建物（表 1 の No.1）の概略図

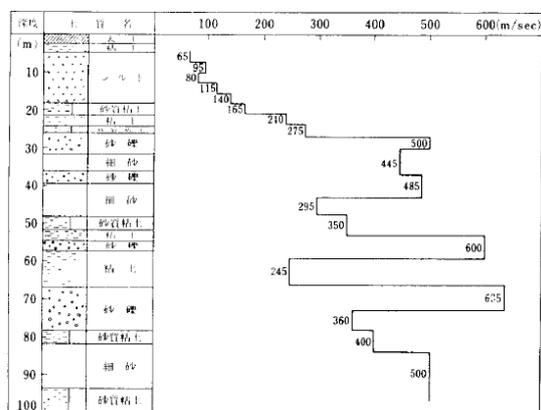


図 18 S 波速度分布図

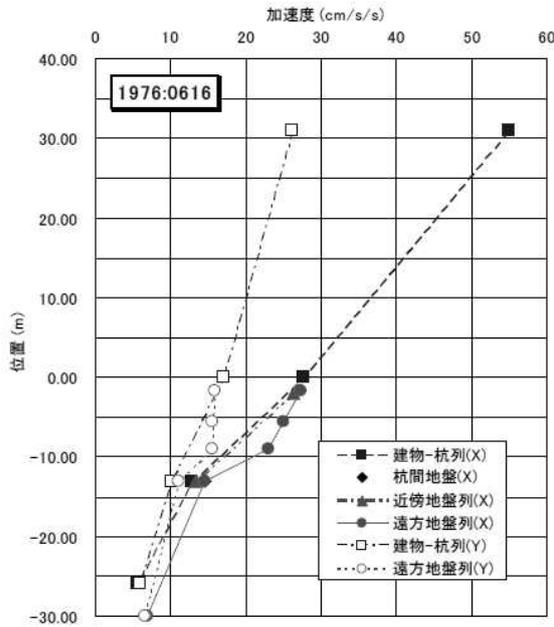


図 19 1976.6.16 の観測地震動での No.1 建物の最大加速度分布[9]

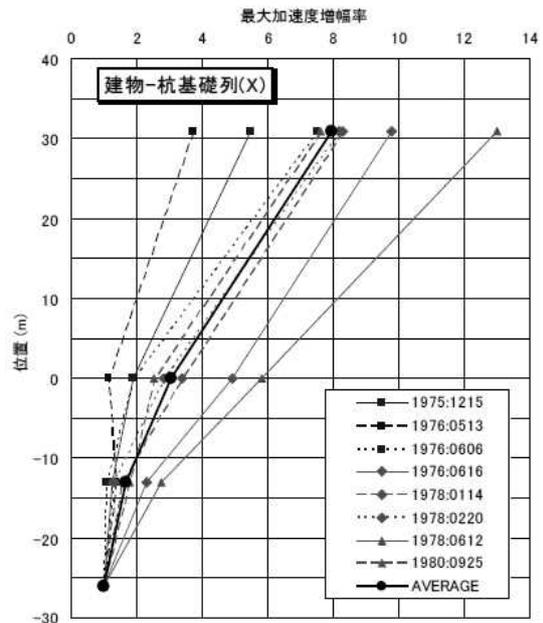


図 20 No.1 建物の最大加速度増幅率の分布 (建物-杭基礎列,X 方向) [9]

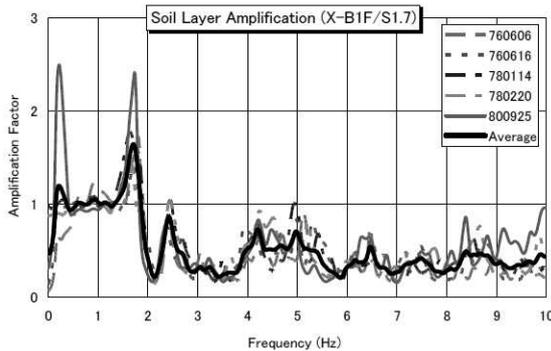


図 21 遠方地表面に対する No.1 建物基部のフーリエスペクトル比 (X 方向) [9]

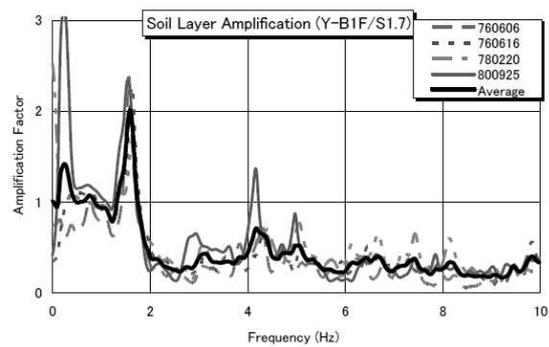


図 22 遠方地表面に対する No.1 建物基部のフーリエスペクトル比 (Y 方向) [9]

地表面に対する建物基部の増幅特性評価として、短辺 (X) および長辺 (Y) 方向における、遠方地盤の地表面に対する建物基部のフーリエスペクトル比をそれぞれ、図 21、図 22 に示す。フーリエスペクトル比において、2.0Hz 前後で、スペクトル比の大きさに差を生じ、2.0Hz より低振動数域では、1.0 程度か 1.0 より大きくなるのに対し、2.0Hz より高振動数域では、1.0 より小さくなる。表層地盤の 1 次卓越振動数 1.4Hz よりやや高い振動数で比がピークとなり、建物振動特性の影響を受けていることが考えられる。より高い振動数では、4～5Hz になだらかなピークを持つ。これは杭と周囲地盤の相互作用によるものであると考えられる。

1981 年建築基準法改正で導入された地震力の算定法の開発の際には、本建物の強震観測で得られた地盤、建物における地震動の増幅特性などのデータも参照されたようである。このように、ここでは強震観測によって得られたデータが構造設計に関する基準作成に寄与しているほか、その後も建築学会の委員会での研究活動において活用[9]されている。

### 3.2 構造解析モデルの妥当性検証・地震被災時の構造躯体の損傷評価

強震観測の活用として、建物の構造解析モデルの妥当性検証や地震被災時の構造躯体の損傷評価はこれまで一般的に行われていることである。特にUR都市機構は、基本・実施設計から建物供用中の維持管理まで関わる組織である。建物所有者・管理者の立場として、設計段階では設計者に対して準拠することを求める構造設計方針や要求性能を定めた仕様書（超高層では[10]）を作成しており、また、地震被災時には自らが損傷状態を調査・評価し、復旧に向けた補修・補強方針を定めなければならない。自社が所有・管理する建物について、地震時の挙動や損傷状態を精度良く評価できていることは、設計から維持管理までの各段階において構造安全性に関して合理的でより適切な判断が可能になると考える。

#### (1) 1995年兵庫県南部地震

これまで得られた観測データによる分析の中で、大地震時によるものとして代表的なものは、1995年兵庫県南部地震（Mj7.3）において震度7相当とされる地域に立つSRC造25階建て地下3階建ての建物（表1のNo.20）によるものである。

その観測概要および観測結果の分析例を紹介する[11]-[13]。観測対象建物の平面図および断面図を図23に、S波速度分布を表2に示す。用途は4階までが施設、5階以上が集合住宅である。構造形式は長辺（NS）方向、短辺（EW）方向とも地上階はラーメン構造、地下階は耐震壁付きラーメン構造で、基礎は直接基礎である。測定点は、建物頂部（24階）、5階、基部（地下1階）である。この建物の主な被害は、長辺（NS）方向の中廊下両側の小梁と非構造壁に集中しており、主体構造の柱・大梁には被害がほとんど確認されなかった。また、短辺（EW）方向の構面は非構造部材も含めてほとんど被害を受けていない。図24に建物頂部における加速度波形とフーリエスペクトル、図25に建物基部における加速度波形とフーリエスペクトルをそれぞれ示す。波形全体に観察される特徴としては、NS方向の大きさがEW方向に比べて際立っていることがあげられ、NS方向の最大応答加速度は頂部で950cm/s<sup>2</sup>程度、基部で350cm/s<sup>2</sup>である。NS方向の卓越は被害状況とも一致している。

被害状況のシミュレーション解析の結果として、復元力特性と質点系弾塑性応答解析による最大応答値を図26に、長辺（NS）方向の中廊下構面でせん断破壊した小梁の被害状況と解析結果を比較した軸組図を図27に示す。最大応答値は小梁がせん断破壊した時点をはるかに超えており、一部では大梁が曲げ降伏していることが推定される。頂部の加速度応答波形の観測値と解析値の比較を図28に示す。8秒付近まで良く対応している。観測による応答波形、破壊状況を質点系弾塑性応答により概ね再現することができている。

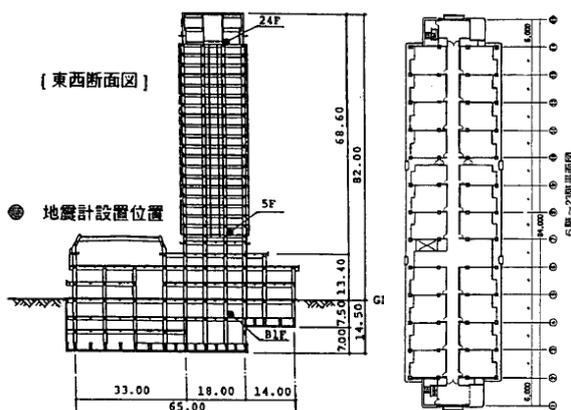
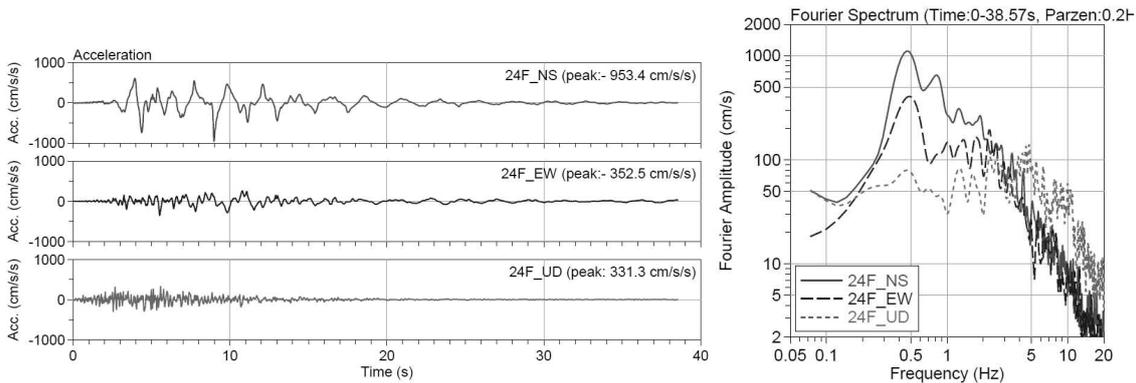


図23 観測対象建物（表1のNo.20）の概略図

表2 S波速度分布

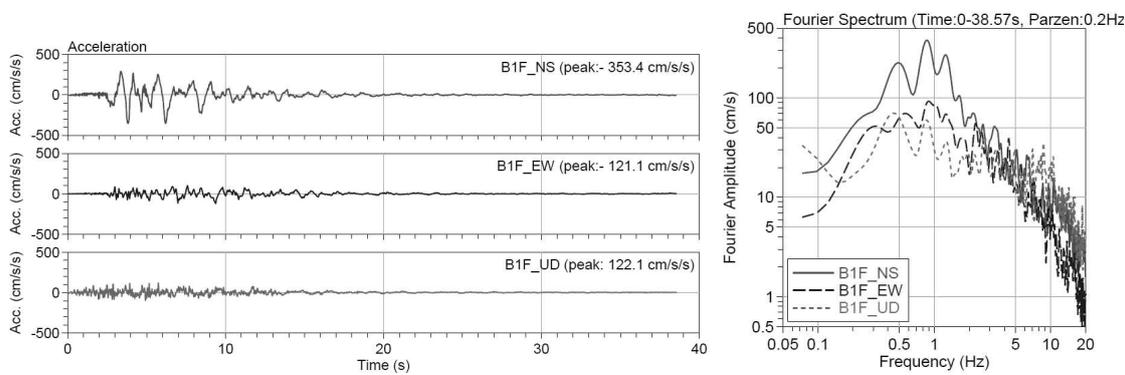
層区分 No.	深度 H(m)	層厚 Hi(m)	主な土質	密度 (g/cm <sup>2</sup> )	せん断波速度(m/s)
1	2.6	2.6	埋土、砂混りシルト	1.7	92
2	4.25	1.65	中砂、砂質シルト	2.1	92
3	6.7	2.45	粘土	1.6	147
4	10.45	3.75	砂礫	2.2	300
5	13.4	2.95	シルト混り細砂	2	280
6	15.35	1.95	砂礫	2.1	320
7	21.15	5.8	砂混りシルト	1.9	250
8	29	7.85	砂礫、個結シルト	2.3	400
9	38.25	9.25	個結シルト、砂礫	1.75	370
10	40.4	2.15	砂礫	2.5	400



(a) 加速度波形 (観測)

(b) フーリエスペクトル

図 24 1995年兵庫県南部地震での No.20 建物頂部の加速度波形とフーリエスペクトル



(a) 加速度波形 (観測)

(b) フーリエスペクトル

図 25 1995年兵庫県南部地震での No.20 建物基部の加速度波形とフーリエスペクトル

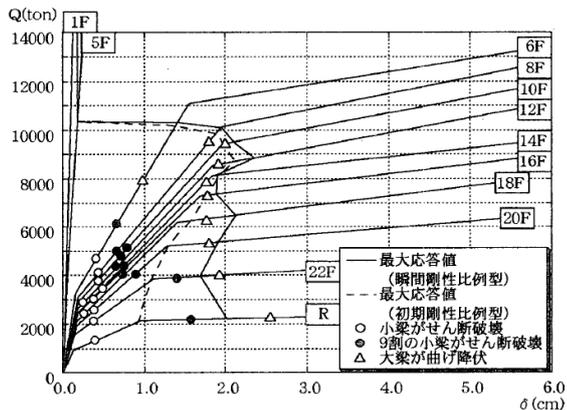


図 26 復元力特性と最大応答値[13]

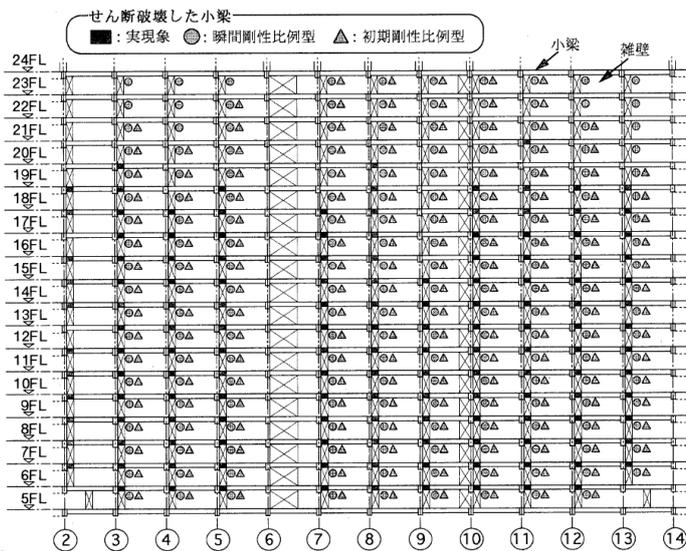


図 27 被害状況と解析結果の比較 (中廊下構面) [13]

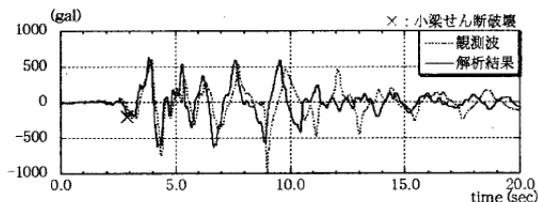


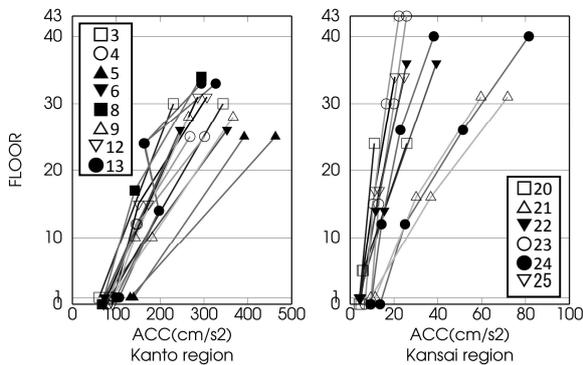
図 28 建物頂部における観測値と解析値の加速度波形の比較[13]

(2) 2011 年東北地方太平洋沖地震

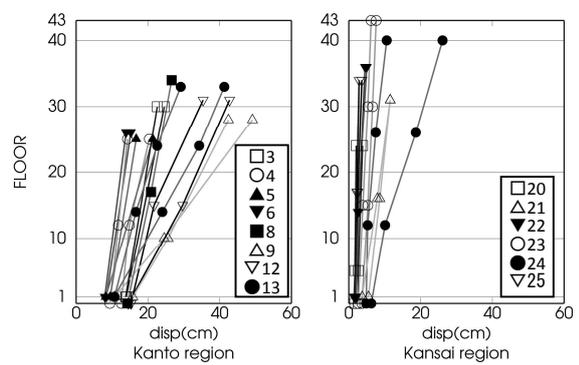
2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、強震観測を行っている超高層集合住宅個別ではなく、複数棟に対して横断的な分析を行っている。ここで対象とするのは、関東 8 棟 (表 1 の No.3~6、8、9、12、13)、関西 6 棟 (表 1 の No.20~25) である。

観測で得られた最大加速度の高さ方向の分布について、図 29 に関東を、図 30 に関西を示す。関東の基部では  $100\text{cm/s}^2$  前後、頂部で  $200\sim 500\text{cm/s}^2$  前後の比較的振幅が大きい継続時間が 10 分に及ぶ観測データが、また、関西においても建物基部で  $10\text{cm/s}^2$  前後、頂部で  $10\sim 80\text{cm/s}^2$  前後の観測データが得られている。UR 都市機構の各超高層集合住宅は構造的に類似形状であるものが多く、そこで得られた観測記録やシミュレーション解析結果を横断的に分析することにより、ある建物における特殊解ではなく、他の類似建物にも適用可能な汎用性のある知見が得られている[14]。その分析の一例を次に示す。

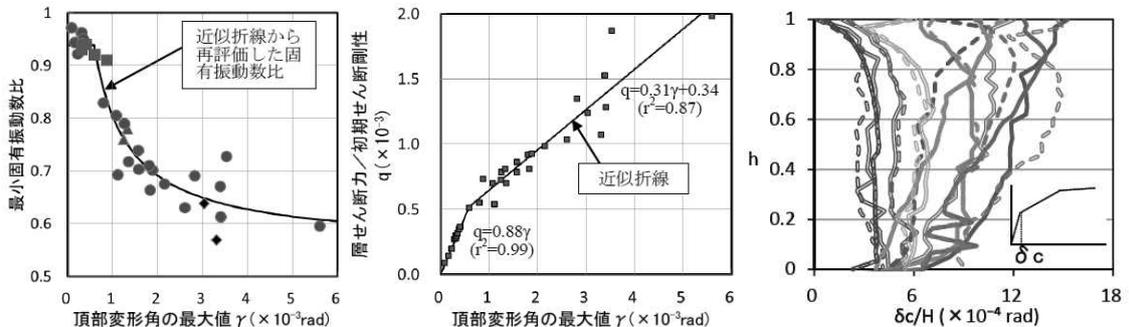
関東 8 棟、関西 6 棟の基部と頂部で得られた加速度波形を積分した変位波形から頂部の最大相対変位を求め、これを両地点の高さで割った値を建物の最大頂部変形角とした。図 31(a)に示すように最大頂部変形角が大きいほど、固有振動数の低下が大きくなった。これと最小固有振動数比から等価な力と変形の関係に変換すると、図 31(b)に示す  $6/10000\text{rad}$  を折れ点とするバイリニア特性が得られた[15]。これは図 31(c)に示す耐震設計に用いられる振動解析モデルのひび割れ耐力時の変形レベル[16]と対応する。最大頂部変形角の最大値が  $1/200$  強であるため降伏耐力に相当する第 2 折れ点を確認できるレベルではないが、耐震設計で用いられる振動解析モデルと整合する非線形特性を呈していることが確認できた。



(a) 関東地域 (b) 関西地域  
図 29 最大加速度の高さ方向の分布[14]



(a) 関東地域 (b) 関西地域  
図 30 最大変位の高さ方向の分布[14]



(a) 頂部変形角の最大値と最小固有振動数比の関係とその近似曲線[14] (b) 等価な荷重・変形関係と 2 折線近似[14] (c) 設計モデルのひび割れ耐力時の層間変形角(h は規準化高さ) [15]

図 31 2011 年東北地方太平洋沖地震時の等価固有振動数から求めたバイリニア特性と設計モデルの層間変形角[14] [16]

### 3.3 室内被害の分析

2011年東北地方太平洋沖地震時には、強震観測を行っている関東の超高層集合住宅8棟およびその他1棟について室内被害状況を調査し、強震観測記録を用いたシミュレーション解析および簡易推定手法から求めた最大層間変形角と対応させた検討を行った[17]。

図32は、最上階を1として基準化し0.1刻みの10段階に分割し、その基準化した階での室内被害件数を9棟分まとめて高さ方向の分布として示したものである。次に、最大層間変形角 $0.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 毎に各被害の件数を平均し、その範囲の最大層間変形角になる1階あたりの被害件数を求めた結果を図33に示す。図中の直線は回帰直線を示す。クロスに亀裂や剥がれが生じたような内装材の破損については、最大層間変形角 $5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降で被害が多くなる傾向が見られた。また、いずれの被害も、ややばらつきはあるものの最大層間変形角が大きくなるほど多くなる傾向にある。

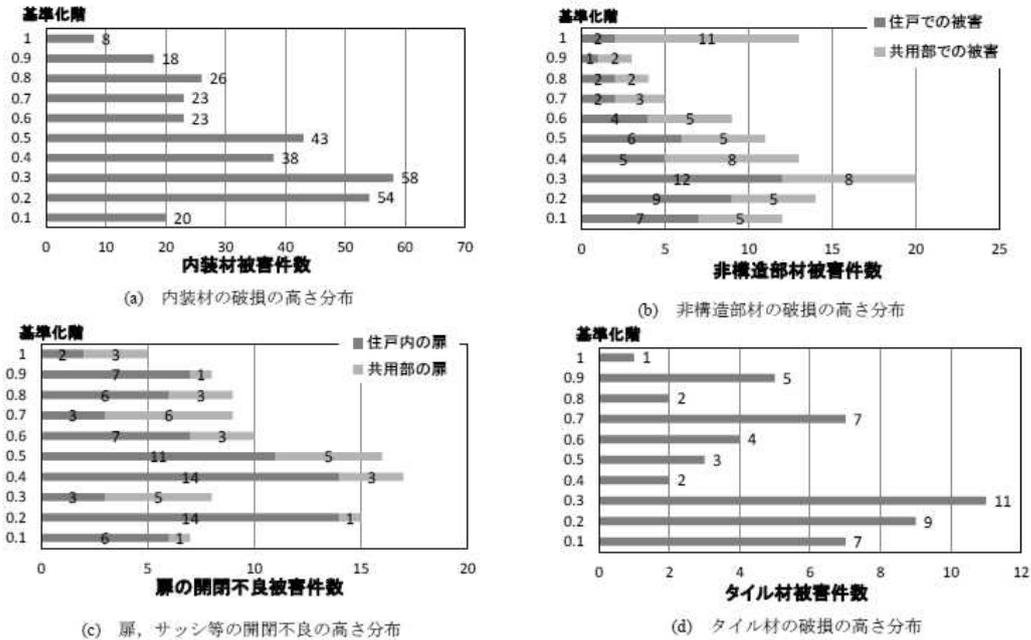


図32 2011年東北地方太平洋沖地震における超高層集合住宅9棟の室内被害の高さ分布[17]

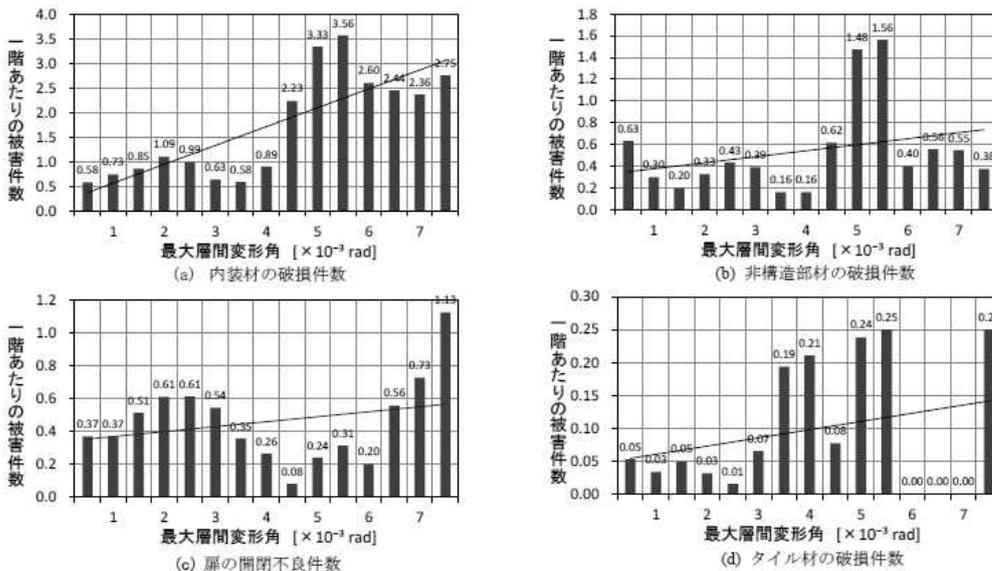


図33 最大層間変形角で分類した一階あたりの被害分布[17]

### 3.4 最近の強震観測データの紹介

最近の強震観測の例として、2018年大阪府北部（Mj6.1）の地震において大阪府内の超高層集合住宅3棟（表1のNo.21、23、24）で観測されたデータおよびその分析を紹介する。建物No.21、24は震源から約30km離れた大阪市内の大阪湾岸近くであり2棟は1kmほどの距離で近接している。建物No.23は震源から約35km離れた堺市内の若干内陸寄りに立地する。

図34に各建物基部および頂部の速度波形、図35に各建物の床応答最大加速度分布（NS、EW方向）を示す。

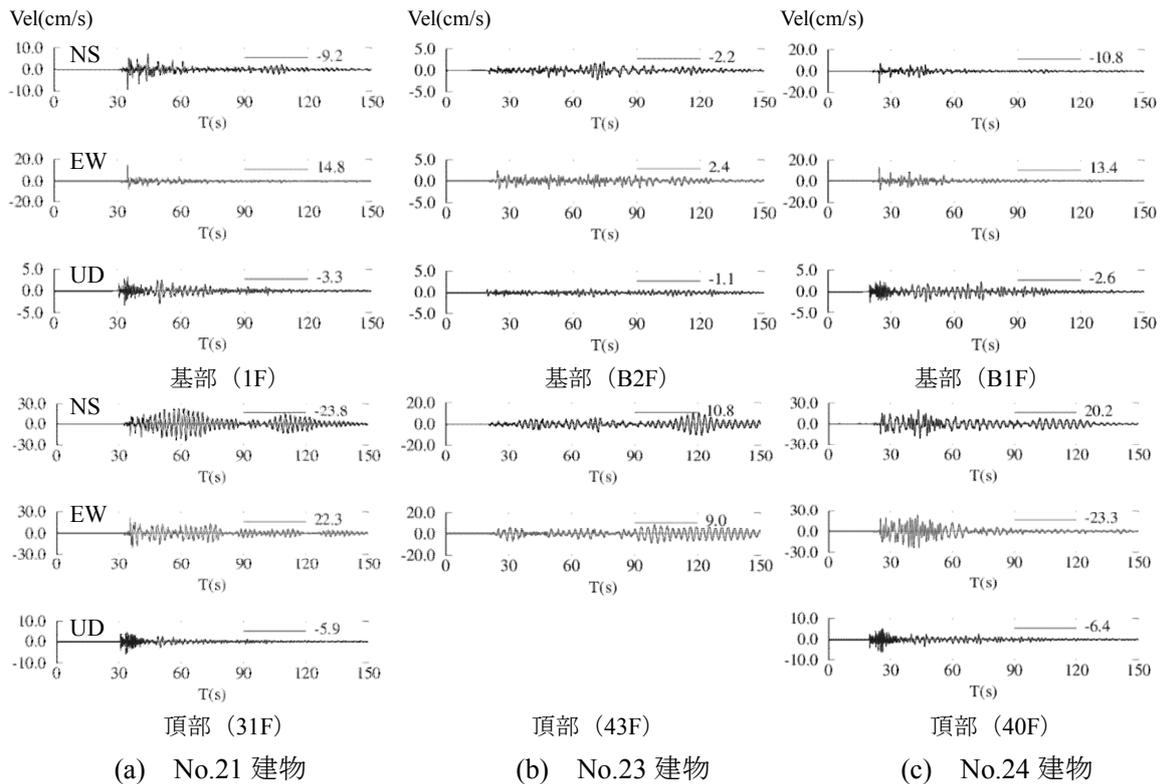


図34 2018年大阪府北部の地震におけるNo.21,23,24建物の速度波形

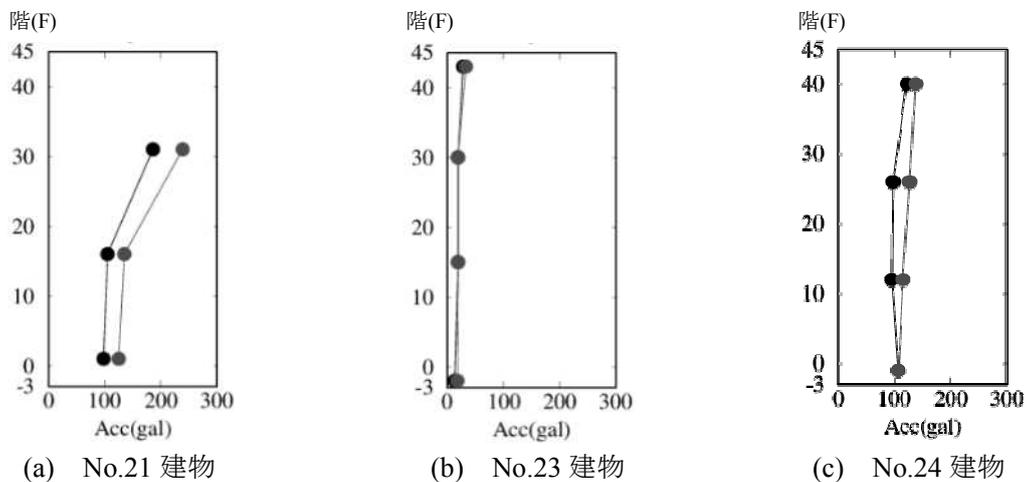


図35 2018年大阪府北部の地震におけるNo.21,23,24建物の最大加速度分布（NS,EW方向）

最大速度は、No.21、24 の基部で 14cm/s 程度、頂部で 23cm/s 程度、No.23 の基部で 2cm/s 程度、頂部で 11cm/s 程度である。また、110～120 秒をピークとして、後続の大きな波形が確認されている。

最大加速度は、No.21 の基部で 125cm/s<sup>2</sup> 程度、頂部で 240cm/s<sup>2</sup> 程度、No.23 の基部で 20cm/s<sup>2</sup> 程度、頂部で 35cm/s<sup>2</sup> 程度、No.24 の基部で 105cm/s<sup>2</sup> 程度、頂部で 135cm/s<sup>2</sup> 程度である。

図 36 に部分空間法 (MOESP) による解析で求めた、EW 方向における建物基部と頂部の相対変位、固有振動数および減衰定数の変化を示す。

基部と頂部の相対変位が一番大きかったのは建物 No.24 である。No.21 は建物二次モードの影響により、入力地震動および応答速度の大きさがほぼ同じである No.24 に比べて基部と頂部の相対変位が相対的に小さい。No.23 は基部と頂部の相対変位が最大となる時点が他の建物と比べて遅くなっている。固有振動数は各建物でほぼ変化が見られず、躯体に損傷は生じていないことが推定される。減衰定数は最大で 5～6% 程度、平均で 2～3% 程度である。

2018 年大阪府北部の地震で得られた観測データの分析、シミュレーション解析などは現在進めているところであり、今後、日本建築学会大会などで報告する予定である。

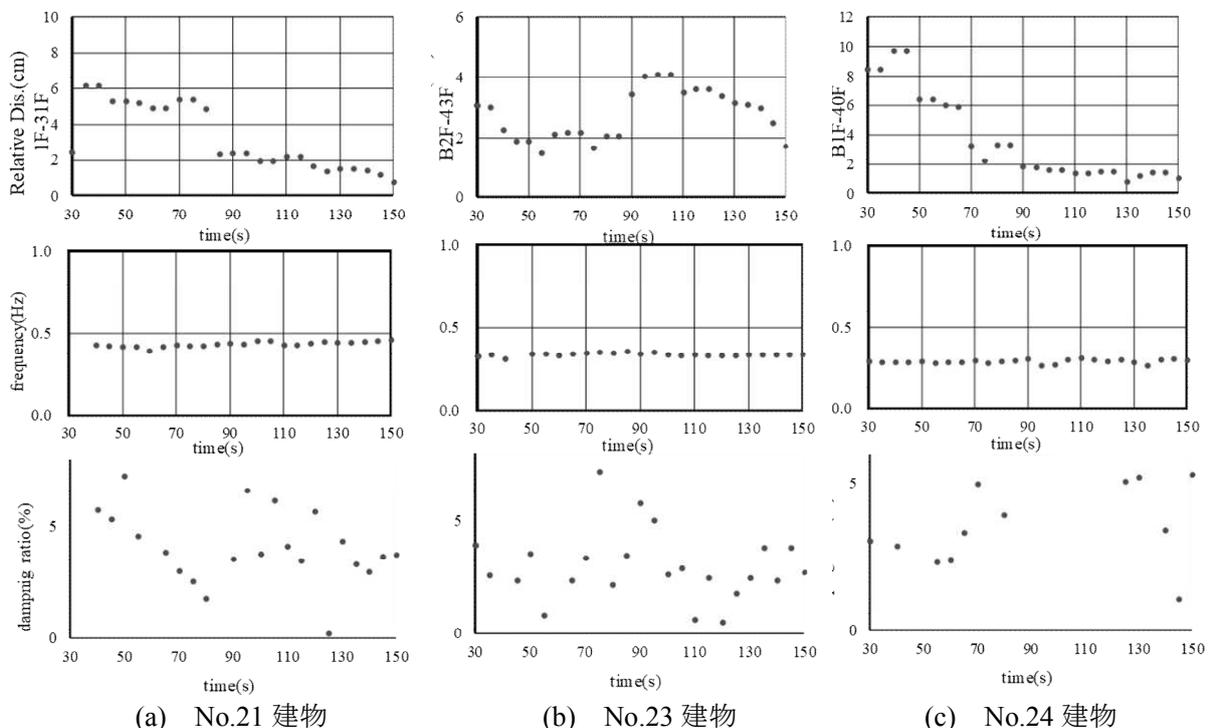


図 36 2018 年大阪府北部の地震における No.21,23,24 建物の基部と頂部の相対変位、固有振動数および減衰定数の変化 (EW 方向)

#### 4. 問題点および今後の課題や期待

UR 都市機構が抱える強震観測の問題点および建物管理者・所有者の視点から考える強震観測の今後の課題や期待について簡単に述べる。

##### 4.1 問題点

###### (1) 観測機器の老朽化による故障の頻発

強震観測にかかる機器は 1990 年代後半頃に設置されたものが多く、それから 20 年以上経過し、近年、特に故障が頻発している。部品の交換で対応できるうちはいいが、既に製

造中止されているような場合、観測を継続するには、最悪、観測機器を一式入れ替える必要が生ずる。また、地中や杭体内のセンサーは故障してしまうと、その交換は極めて困難である。強震観測にかけられる年間予算も制限があり、観測点の優先順位に応じて対応可能なものから修理・交換しているのが実状である。

### (2) 現在のインターネット環境への未対応

インターネット環境が広く普及する以前の電話回線時代に強震観測を開始したため、現在の高速で大容量データの送受信が可能なインターネット環境やデータを共有しアクセスしやすいクラウド環境には未対応である。

### (3) 少人数による維持管理

強震観測を長期間継続するためには観測機器およびその設置環境の維持管理やデータ管理を適切に行う必要があるが、前述したとおり、強震観測を担当する技術者は一人であり、かつ他の業務を主としているため、年々負担が大きくなっている。また、これまでの観測記録や観測環境の情報、強震観測におけるノウハウなどを引き継ぐ人材を育成していかなければならないが、人員配置上、OJTで指導を行いながら継承するということが難しい。

### (4) 観測対象建物の偏り

観測対象建物が超高層中心で、保有・管理しているストックの大半を占める中低層が極めて少ない。強震観測によって得られる知見や成果を適用できる対象が限定的であり、「強震観測を自ら行うメリットは何なのか」という必要性は常に問われている。

## 4.2 今後の課題や期待

### (1) 既存建物の耐震性能評価に用いる地震力への反映

建物所有者・管理者の立場からすると、強震観測により建物の動的挙動の把握や地震時の損傷評価が可能になるだけでなく、やはり事業上で具体的なメリットのあることがより強震計を設置するモチベーションにつながると考える。

例えば、既存建物にこれから強震計を設置していくことを検討する場合、強震観測で得られた観測データがその既存建物の耐震性能評価に用いる地震力の算定の合理化に反映できるような手法が確立され、かつ法的な取扱いも整備されれば、耐震性能評価や耐震設計においてかなり実用的であるので、建物での強震観測が普及していくと思われる。

具体には、旧耐震建物で行う耐震診断・耐震改修設計、あるいは現行法が遡及適用されるような既存建物の増改築において、地震力を算定する場合が一例としてあげられる。特に、壁式RC造は、動的相互作用効果による建物への実効入力を評価することで、設計用せん断力係数を低減できる可能性が高く、地震力の合理的な算定は既存ストックの改修・有効利用の促進に大いに役立つはずである。実現できたとして、当面は強震観測を行っている個別建物のみでの適用であろうが、多くの建物でデータが蓄積されていけば、将来的には新規建物設計における地震力算定の見直しにもつながるかもしれない。

### (2) 安価で更新しやすい強震観測システム

従来行われてきた強震観測は、限定的な建物に対して高価で高性能な強震観測システムを導入し、観測データを詳細に分析するものであった。そのような強震観測は調査研究として不可欠であるが、UR都市機構における強震観測の現状を踏まえて見ても、強震観測を早期に開始したが故に、その後の観測・通信技術の進歩を活用できていない、また観測装置が陳腐化しているなどの問題を抱えており、そうかと言って強震観測システムの全面更新もままならない状況である。

これは現在において最新の強震観測システムを導入してもいずれ陳腐化することは予想され、技術が加速度的に進歩していく以上は避けられないことである。建物所有者・管理者の立場からすると、特に、多くの建物を観測対象とし構造ヘルスマニタリング的な活用を検討する場合、長期的な継続観測やそれに伴う維持管理を考慮すれば、高性能でなくとも安価で更新しやすい強震観測システムの方が望まれると考える。

### (3) 他のモニタリングシステムとの一体的運用・管理

近年、あらゆる分野でモニタリングシステムの開発が進んでおり、まだ実用化には至っていないものも含めて集合住宅に関係するものだけでも、電気、ガス、水、エレベーター、設備機器、防犯カメラ、火災感知、温度・湿度、風、高齢者の見守り、コンクリートのクラック感知などに関するものがあげられる。

建物所有者・管理者の立場からすると、強震観測もその中の一つという位置づけとなり、いつか来るか分からない大地震に対してよりも他に常時使用されるものの方が必要性としての優先度が高いと判断されることもあるかもしれない。強震観測だけ独立して考え一部の専門家のみが関わるのではなく、今後は、その他のモニタリングシステムとサーバー、通信インフラ、モニターなど可能なものは共有し、データ管理・維持管理・保守点検なども建物全体の管理体系の中に組み込んで運用できるような仕組み作りをすることが、強震計設置の拡大、強震観測の長期間継続的な実施をするうえで必要であると考えられる。

## 5. まとめ

UR 都市機構は多くの公的賃貸集合住宅を所有・管理する組織であり、これまで主に超高層集合住宅を中心に強震観測を行ってきた。その建物管理者からの視点で、強震観測の概要や取組み体制、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2018年大阪府北部の地震で得られた観測データとその活用事例、強震観測で抱える問題点・今後の課題や期待について紹介した。

ここ最近でも震度7クラスの2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震が発生し、今後も首都直下や南海トラフを震源とする巨大地震の発生が高い確率で想定されている。建物を所有・管理する多くの自治体や企業などは被害軽減やBCPの策定に取り組み始めているが、強震観測はこれらに寄与する情報が多く得られるものである。潜在的な需要は多いと思われるので、建物所有者・管理者に正しい理解が得られかつ適正な初期投資・維持管理費用で強震観測が可能であれば、普及が拡大していくであろう。建築学会には今後も社会に向けて調査研究活動の成果の還元や分かりやすい情報発信を期待したい。

## 参考文献

- [1] 建設省建築研究所: 構造物及び周囲地盤中での地震測定: 地盤-構造物系の動特性実験と地震測定及びその解析, 昭和48年度総プロ報告書, 1973年3月
- [2] 建設省建築研究所: 構造物及び周囲地盤中での地震測定: 軟弱地盤杭基礎実在建物における地震測定, 昭和49年度総プロ報告書, 1974年3月
- [3] 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦, 中村充, 井川望, 保井美敏, 境茂樹, 森下真行, 北堀隆司, 上林宏敏: 強震下の超高層集合住宅の挙動解明と今後の被害軽減に向けた取り組み, 日本地震工学会論文集, 16巻(2016)5号, pp.5\_2-5\_11, 2016年4月
- [4] 太田外気晴, 内山正次, 丹羽正徳, 上野薫: 軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定: (その1)建物の強制振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.493-494, 1976

年 8 月

- [5] 太田外気晴, 内山正次, 上野薫, 丹羽正徳: 軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定:(その 2)地盤および建物の地震測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.495-496, 1976 年 8 月
- [6] 太田外気晴, 内山正次, 丹羽正徳, 上野薫: 軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定:(その 3)地盤および建物の同時地震測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.581-582, 1977 年 10 月
- [7] 太田外気晴, 内山正次, 丹羽正徳, 上野薫: 軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定:(その 4)シミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.583-584, 1977 年 10 月
- [8] 太田外気晴, 丹羽正徳, 上野薫: 軟弱地盤上杭基礎実在建物における地震測定:(その 5)測定記録から見た相互作用の特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.709-710, 1979 年 9 月
- [9] 日本建築学会鉄筋コンクリート構造運営委員会 RC 基礎部材の構造性能評価小委員会: RC 基礎部材の構造性能評価小委員会報告書第 II 編クライテリア検討 WG 報告書, 日本建築学会, pp.IV\_1-IV\_24, 2007 年 3 月
- [10] 都市再生機構: 超高層鉄筋コンクリート構造設計指針・同解説(案)(SH-RC), 2006 年 1 月
- [11] 木村匡, 田中幹夫, 此上典文, 中村充, 日下部馨: 兵庫県南部地震における新長田駅前高層 SRC 造建物の解析的検討:(その 1)建物の被害概要と観測地震波, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.533-534, 1996 年 7 月
- [12] 竹内香織, 木村匡, 沢井布兆, 江戸宏彰, 津田和明: 兵庫県南部地震における新長田駅前高層 SRC 造建物の解析的検討:(その 2)立体骨組静的弾塑性解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.535-536, 1996 年 7 月
- [13] 江戸宏彰, 木村匡, 沢井布兆, 津田和明, 竹内香織: 兵庫県南部地震における新長田駅前高層 SRC 造建物の解析的検討:(その 3)せん断型多質点系動的弾塑性解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.537-538, 1996 年 7 月
- [14] 永野正行, 肥田剛典, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 中村充, 井川望, 保井美敏, 境茂樹, 森下真行, 川島学: 2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性, 日本地震工学会論文集, 12 卷(2012)4 号, pp.4\_65-4\_79, 2012 年 9 月
- [15] 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, 第 19 卷 42 号, pp.435-440, 2013 年 6 月
- [16] 山根義康, 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦: 超高層 RC 造集合住宅の設計用動解モデルの分析, 日本地震工学会大会 2013, pp.103-104, 2013 年 11 月
- [17] 山根義康, 永野正行, 肥田剛典, 保井美敏, 山本健史, 井川望, 田沼毅彦: 2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害の分析と建物応答との対応, 日本建築学会技術報告集, 第 20 卷 44 号, pp.67-72, 2014 年 2 月

# 建物設計者の視点による強震観測の活用と課題

今枝裕貴

株式会社日建設計、エンジニアリング部門構造設計グループ主管

## 1. はじめに

「設計者の意見を聞きたい」、「委員に設計者がいた方が良いのでは」という意見が強震観測小委員会ではあり、弊社へ本小委員会への設計者の参加の打診があった。筆者は社内で最近開発したヘルスマonitoringシステムの担当をしており、本小委員会へ参加することになった。しかし、本小委員会へ参加して日も浅く、強震観測に特段の見識や経験がある訳でもなく、技術的なことを論じるだけの知見は持ち合わせていない。

本稿は、強震観測の研究を行ってきた訳でもない、小委員会ともやや距離のある立場の一設計者として、強震観測建物の事例、および、ヘルスマonitoringシステムに関わった経験を踏まえて、強震観測が普及していくための課題や対策について、本小委員会に対してやや客観的な立場から述べたものである。

## 2. 設計者が取り組んだ強震観測事例

### 2.1 事例概要

設計者が取り組んだ強震観測の事例を示す。2003年に竣工した高さ＝約60mの鉄骨造のオフィスビルである。サーボ型の加速度計を建物内、地表、杭先端に設置し、定常的に地震動を測定する地震観測システムを導入している[1][2]。加速度計はコアのEPS内を中心に配置し、上層階では大梁中央にも設置している。また、制振部材（粘性体制振壁、座屈補剛ブレース）に変位計を取り付け、制振部材の変位を直接計測できるシステムとしている。

#### 建物概要

建築主 : 株式会社日建設計  
所在地 : 東京都千代田区飯田橋  
階数 : 地下1階、地上14階、塔屋1階  
軒高 : 59.85m  
延床面積 : 20,580m<sup>2</sup>  
構造種別 : 鉄骨造（柱CFT）  
基礎 : 場所打ちコンクリート杭



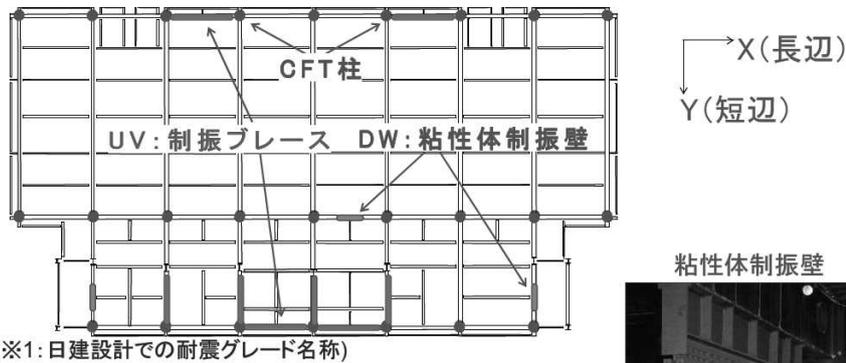
写真1 建物全景

### 2.2 計測、および、検討事例

竣工直後の2003年4月～12月の15回の地震記録（表1参照）をもとに、建物全体の解析モデルとの比較、ロングスパン大梁の振動性状、逸散減衰の効果、上下動地震時の振動性状などを解析と比較し、分析を行っている[1]。また、本建物が最大加速度を計測した2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録と解析の比較検討を行っている[2]。

## S※1グレードの制振構造

(大地震時:無被害(構造体 弾性範囲内))



(※1:日建設計での耐震グレード名称)

### 設計目標性能 層間変形角

L1(25cm/sec): 1/400~1/300

L2(50cm/sec): 1/200~1/150

制振ブレース  
(100N/mm<sup>2</sup>級)

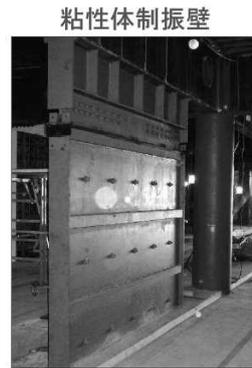
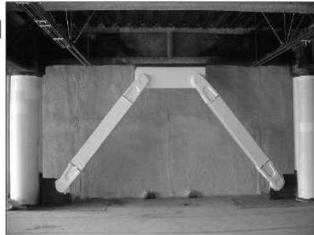


図1 構造伏図、制振部材写真

### 加速度計設置位置

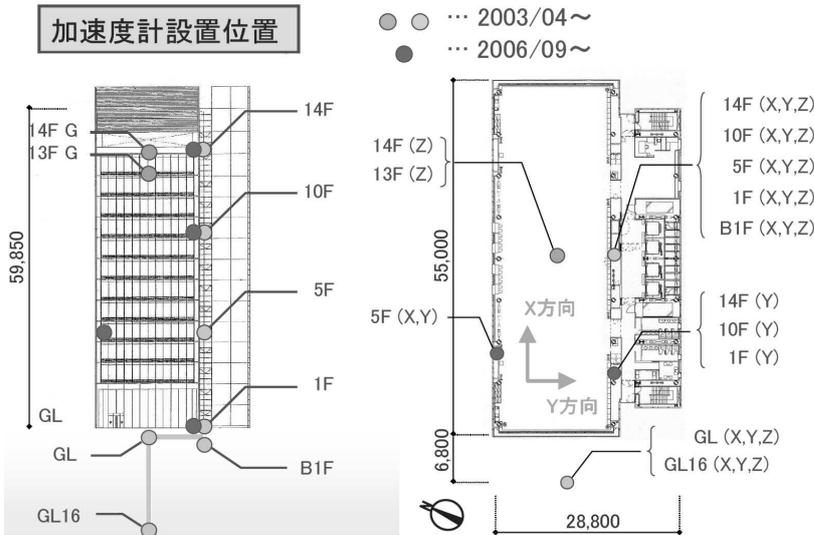


図2 地震観測システム

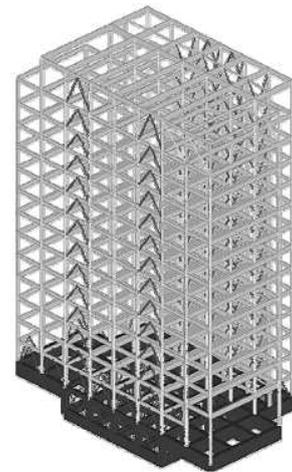


図3 架構概念図

### (1) 振動解析モデルと観測記録の比較

振動解析結果と計測記録の比較を行っている。解析モデルは部材レベルでモデル化した立体解析モデルであり、各部のモデル化は慣用的な手法を用いている。層間変形=1mm程度の微小振幅下での検証例である。固有振動数はほぼ一致していたが、減衰は若干過大評価する傾向が確認された。これは制振部材の配置によるもので、梁の変形や全体曲げ変形の影響により制振部材に生じた変形がやや小さくなったためと推察している。

表 1 観測地震波(2003年4月~12月)

記録 No.	観測日時			地震情報				観測情報											
	日付	時刻	震度階	震央位置	震央 距離 (km)	震源 深さ (km)	規模 (M)	X方向						Y方向					
								最大加速度値(cm/s <sup>2</sup> )			増幅率			最大加速度値(cm/s <sup>2</sup> )			増幅率		
							GL16	GL	1F	14F	GL/GL16	14F/1F	GL16	GL	1F	14F	GL/GL16	14F/1F	
1	4/8	4:17	1	茨城県南部	85	47	4.6	2.1	6.3	3.0	4.8	3.1	1.6	2.6	8.2	3.5	4.7	3.1	1.3
2	5/10	11:46	2	千葉県北西部	74	70	4.5	2.4	6.3	4.2	4.4	2.7	1.1	2.4	6.9	3.7	6.1	2.9	1.6
3	5/12	0:57	3	茨城県南部	77	47	5.2	<b>15.9</b>	32.5	<b>21.1</b>	22.0	2.0	1.0	9.7	31.8	21.2	32.3	3.3	1.5
4	5/12	0:59	3	茨城県南部	76	50	4.6	4.4	13.5	8.1	11.6	3.1	1.4	4.8	15.6	10.1	9.1	3.3	0.9
5	5/17	23:33	2	千葉県北東部	114	47	5.1	1.8	4.7	3.2	7.5	2.6	2.3	2.4	7.2	5.1	5.9	3.1	1.2
6	5/26	18:25	3	宮城県沖	425	71	7.0	6.1	11.5	9.0	21.9	1.9	2.4	7.5	13.2	11.0	<b>32.9</b>	1.8	3.0
7	7/26	7:15	1	宮城県北部	367	12	6.2	1.3	2.0	1.4	6.0	1.5	<b>4.2</b>	1.4	2.1	1.6	7.2	1.4	4.4
8	8/4	20:57	1	茨城県北部	160	58	4.9	2.3	6.8	3.1	2.0	2.9	0.7	2.2	5.6	3.3	3.1	2.5	0.9
9	8/18	18:59	2	千葉県北西部	73	69	4.6	4.7	12.7	7.4	13.0	2.7	1.8	5.7	11.1	5.8	8.0	1.9	1.5
10	9/20	12:54	3	茨城県北西部	83	70	5.8	9.9	21.1	18.1	<b>27.4</b>	2.1	1.5	<b>12.8</b>	29.1	21.8	23.4	2.3	1.1
11	9/26	4:53	1	十勝沖*	812	42	8.0	1.5	2.3	1.8	5.1	1.5	2.9	1.4	2.5	1.8	9.3	1.8	<b>5.2</b>
12	10/15	16:30	3	千葉県北西部	62	74	5.1	14.4	<b>49.4</b>	19.0	22.3	3.4	1.2	11.1	<b>68.0</b>	<b>22.1</b>	18.4	<b>6.1</b>	0.8
13	10/31	10:07	2	福島県沖	400	33	6.8	1.6	2.0	1.7	5.6	1.3	3.4	1.5	2.4	2.0	10.1	1.6	5.0
14	11/12	17:28	2	紀伊半島沖	296	390	6.5	5.8	14.8	11.5	15.6	2.6	1.4	6.0	26.0	11.9	12.4	4.3	1.0
15	11/15	3:43	2	茨城県沖	175	48	5.8	2.8	11.3	6.0	9.3	<b>4.1</b>	1.6	2.4	9.5	4.3	6.6	4.0	1.5

注) \*: 2003年十勝沖地震 震度階: 気象庁震度階級 規模: 気象庁マグニチュード **太字**: 各欄の最大値を示す

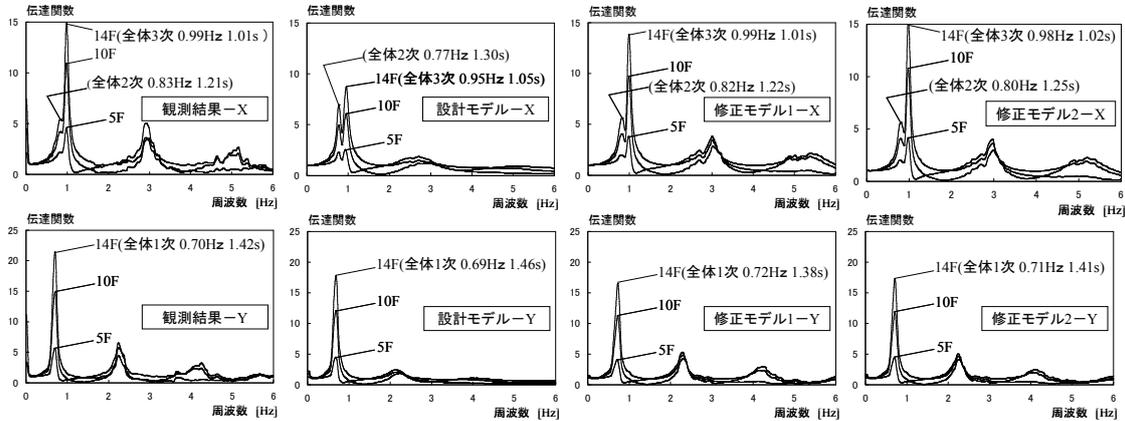


図 4 伝達関数 (観測結果) 図 5 伝達関数 (設計モデル) 図 6 伝達関数 (修正モデル 1) 図 7 伝達関数 (修正モデル 2)

(2) ロングスパン大梁の振動性状

最上階のロングスパン大梁 (スパン=17.6m) の上下方向の振動性状を検討している。大梁の上下動解析モデルと計測記録 (表 1 の NO3、5 の地震) の比較を行い、固有振動数や減衰定数を検証している。固有振動数は解析モデルとほぼ一致することを確認している。また、梁端部と梁中央部での観測記録から大梁の伝達関数を算定し、梁の減衰定数=7~8%程度あることを確認している。携帯型振動測定機を用いて 2 人歩行やヒールインパクトによる測定結果と観測記録の比較を行っており、地震時に確認された固有振動数や減衰定数と概ね一致することを確認している。

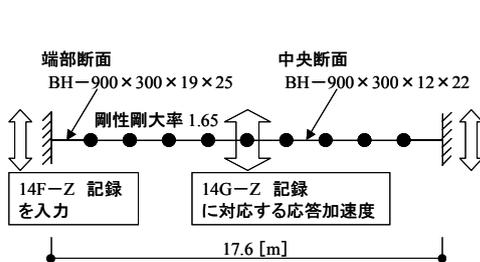


図 8 大梁上下動解析モデル

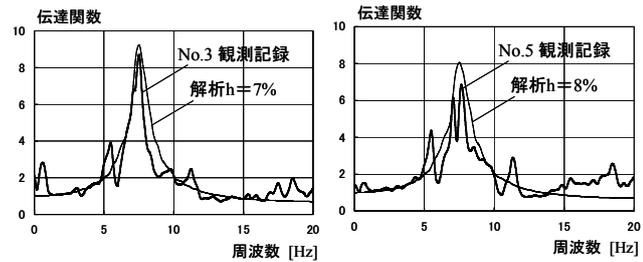


図 9 観測結果と解析結果の比較

### (3) 地盤増幅と入力損失

工学的基盤に位置する杭先端 (GL-16m)、地表面 (GL) と建物基礎底 (B1F) の観測記録から地盤増幅、および、入力損失による地震力の低減効果を検討している。地盤増幅は一次元重複反射理論 (SHAKE) との比較を行い、解析と一致することを確認している【3】。また、地表面 (GL)、および、建物基礎底 (B1F) に対する建物頂部 (14階) の伝達関数の比較から高振動数ほど入力損失効果が高くなることを確認している。

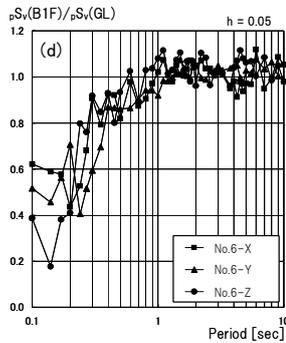


図10 自由地表面と建物地下1階の擬似速度応答スペクトル

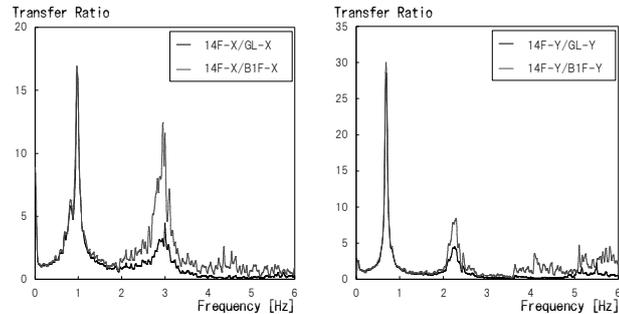


図11 14F/B1F と 14F/GL の伝達関数

### (4) 地下逸散減衰を考慮した鉛直方向解析モデル

鉛直動 (上下動) は水平動と比較して短周期であり、地盤との逸散減衰効果を考慮して解析を行うことがある。逸散減衰の効果を考慮した解析手法はこれまでも多く提案されている【4】。ここでは、逸散減衰の効果を評価したダッシュポットを設けたモデルで解析を行っている。ロングスパン梁の応答加速度を対象に、基礎固定モデルとダッシュポットを設けたモデルで比較して、後者のモデルで観測記録と近い値となることを確認している。

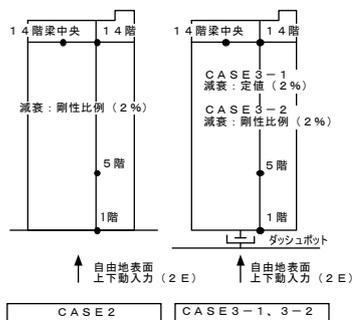


図12 解析ケース

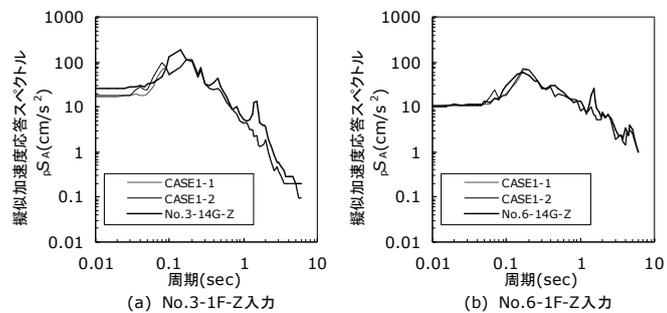


図13 14階梁中央レスポンススペクトル (E+F 入力、減衰 2%)

### (5) 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録と解析モデルの比較

2011 年東北地方太平洋沖地震は本建物で最大加速度を記録した地震である。観測記録をもとに補間計算等を行い、各階の層間変形角を算定している。最大層間変形角=約 1/560 (層間変形=約 7.0mm) である。前節までの記録と比較すると大きな変形となっており、固有周期や減衰定数に変化が見られた。同地震の本震前後で比較すると、減衰定数は増加し、固有振動数は 10%程度低下したことが確認された。外装材等の仕上げ材の影響によると考えられている。地表面 (GL) と建物 1 階の観測記録を入力地震動として振動解析を行い、観測記録との比較を行った。解析モデルは前述のモデルである。1 階での観測記録を入力地震動とした場合の解析結果は観測記録とほぼ一致していることが確認された。

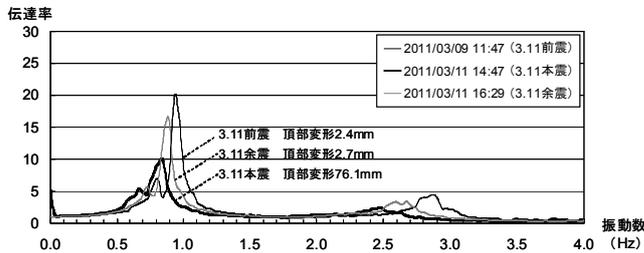


図14 本震前後の伝達関数 (14F-X/1F-X)

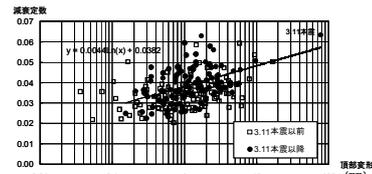


図15 X方向1次減衰定数の振幅依存性

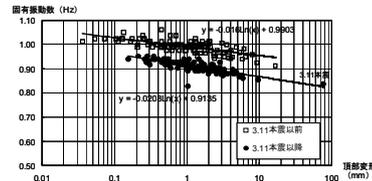


図16 X方向1次固有振動数の振幅依存性

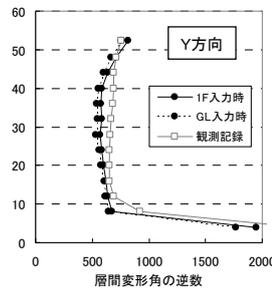
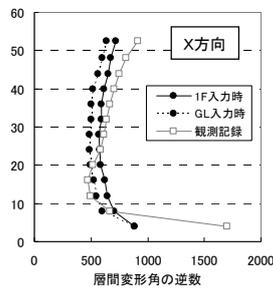


図17 最大層間変形角

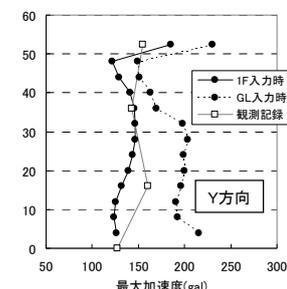
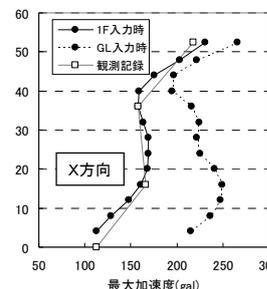


図18 最大床応答加速度

### 3. 強震観測の課題

#### 3.1 強震観測記録の設計への反映

前章の建物設計者はなぜ強震観測を行ったのだろうか。設計時の想定通りか確認したい、また、実構造物の挙動はまだ不明な点もあるだろうから、それらを確認して今後の設計へ活かしたいと推察される。

前章で紹介した検討結果より、設計へ反映された事があったかと言うと、色々な検証を行っているが、特筆すべき内容はないと思われる。解析と観測記録は概ね一致していたためかもしれないが、複数のモデルで検証を行っており、モデルが変われば異なった結果となっている。大梁の振動性状や地盤への逸散減衰の効果など、貴重なデータは得られている。上下動解析モデルの検討は、その後の解析モデルの検討には実測例として用いられているが、その結果を受けて解析の見直し等には至っていない。

理由としては、対象建物が1棟であること、評価の妥当性を検証するほどの大きな地震記録ではないことなどが考えられる。1棟では偶然の一致なのか、モデルの精度の高さによるものか、判断できない。弊社は非常に多くの設計事例があるが、強震観測を行っている事例は非常に少ない。観測したとしてもその記録を設計者が利用して解析や検証をした例はほぼないのが実情である。

2011年東北地方太平洋沖地震では、前節の建物の健全性の問い合わせが設計者の元に多く寄せられ、観測記録を用いた説明が行われた。この経験から、いち早く地震後に建物の状況を判定できるシステム、ヘルスマニタリングシステムへの関心が高まり、強震観測を用いた同システムの開発へと推移した。

仮に、具体的な数の見当はつかないが、多くの建物の観測記録が得られて、多くの検証を行うことができ、これまでの設計、解析との比較が行われ、諸々の仮定条件を検証することができるのならば、観測記録を設計へ活かすことに繋がるのではないか。そのためには多くの強震観測建物が必要であるが、前述の通り、少なくとも筆者の周りでは観測建物は多くはない。

### 3.2 強震観測の課題

では、建物の強震観測がなぜ普及しないのか、筆者の考える主な理由を下記に示す。

#### (1) 建築主のメリットとコスト

建築主にとって、強震観測によりどんなメリットがあるだろうか。メリットはあまりなく、むしろ、強震観測をするための費用、維持費が必要で、経済的なデメリットが生じる。「地震計を付けても建物の耐震性が向上する訳ではない、設計者にはメリットはあるかもしれないが、建築主にメリットはない。」ここまではっきりと言われることはないが、観測だけでは建築主の同意は得られにくい。費用を設計者が負担する事例もあるが、維持管理にも費用を要するため、設計者側での負担により観測建物数を増やすことは困難である。観測数を増やすためには、建築主にもメリットがあり、建築主の同意が得られ、費用は建築主が負担することが必要であると考えられる。

#### (2) 情報公開の難しさ

強震観測記録を公表して積極的に研究や設計に利用しても良い、と言う建物はどれほどあるだろうか。建物名を公表しないとしても非常に少ないと思われる。個人情報であるために公表したくないのが理由である。建築主にとっては建物の資産価値につながるため、被害が生じた場合に公表はありえないであろう。弊社ではヘルスマonitoringシステムにより最近の大阪北部地震、北海道胆振東部地震の記録は観測されているが、その記録は建築主の個人的な情報であり、被災度判定結果が伴っている。建築主にとってデリケートな情報であり、公表はしたくないのが実情である。当然ながら、弊社でもこの観測記録、および、被災度判定の結果は非常に慎重に扱うべき情報として扱われている。個人的情報の管理、取り扱いは大きな課題と考えられる。

#### (3) 設計者の責任

強震観測記録と解析は一致するだろうか。乖離があった場合、特に危険側（解析値の方が変形等が小さい）に乖離がある場合、設計者はその責を問われることにならないだろうか。そうなると、設計者から強震観測を提案しなくなってしまふ。そもそも記録と解析のどの程度の差を乖離と呼ぶのであろうか。一般の方は高度な解析、技術をもとに設計されているから、地震時には想定通りに建物は挙動し、解析と観測記録は一致するものだと考えているであろう。設計者は材料、外力、施工などの多くのばらつきを考慮しながら、安全である建物を設計している。正確に建物の挙動を再現することも設計の目的の一つではあるが、ある仮定条件を考える際に、正確さよりも安全側となる条件を選択して設計していることがある。また、不確定な要素に対してできるだけ鈍感な建物を設計することを心掛けるべきである。解析結果は多くの仮定の組み合わせによる特殊な解の一つであり、実現象と完全に一致することはあり得ず、工学的な視点で解析と観測は一致しているかどうかを判断する。その考え方に一般の方と設計者の間には乖離がある。強震観測と言うことは、設計との比較を伴うものと考えられる。そこに乖離がある場合の設計者の責任問題や、解析と観測記録のどの程度の差を乖離とするのか、考えるべき課題である。

## 4. 強震観測の課題への対策

前述の課題に対して筆者の考える対策、仕組みづくりについて以下に示す。

### 4.1 建築主にもメリットのある仕組み

建築主、建物利用者が単に観測記録を見てもメリットはないが、観測記録を用いて地震後に被災状況を提供するヘルスマonitoringシステムであれば、メリットがある。ヘルスマonitoringを行うためには、建物の観測が必要である。建築主には建物の被災状況を提示し、観測されたデータは設計者へ展開、利用することを願う。建築主の許可を得る必要があるが、ヘルスマonitoringシステムはBCP、LCDなどの観点からも建築主にとっても有益な情報を得ることができるため、建築主の了解も得やすいと考えられる。ヘルスマonitoringシステムに関しては、国の基準、防災拠点の設計に際してのガイドラインなどに紹介されており、今後も普及していくことが期待される[5][6]。設計者、研究者だけでなく、建築主にとってもメリットのあるシステム、仕組みとすることで建物の強震観測を増やすことは可能であると考えられる。既に技術は確立されており、比較的安価なシステムも多くある。加えて建物内だけではなく建物近傍の地盤など、ヘルスマonitoringでは不要となる箇所も観測できるようになると設計、研究への活用の幅が広がる。建物外の観測は建築主にメリットはないが、システム全体の費用に対するコストアップは僅かであるため、建築主を説得し、建物外での観測を行うことが望ましい。

### 4.2 情報公開、活用できる仕組み

極端な対策ではあるが、ある一定の規模以上の建物は観測を義務化して、観測した結果を公表するような社会、制度にはできないだろうか。大地震時には建物の被災状況を確認した上で帰宅困難者を受け入れる等の対応は減災や防災の観点から求められており、既に条例化されている[7]。観測した記録を公開することに対する建築主の了解を得られにくい、現状においても、大地震時に建物の被災度は応急危険度判定士により判定されている。自分の建物が被災したかどうか、公表したくない建築主の心情は当然かもしれないが、ヘルスマonitoringシステムがないとしても被災度は判定士により判定、公表されている。ヘルスマonitoringシステムも完全ではないので、従来が目視による判定と併せて利用すべきであると考え、ヘルスマonitoringも従来の応急判定も同じ判定であり、判定士の結果が公表されているのであれば、ヘルスマonitoringシステムの判定結果が公表されてもおかしくはない。防災に強い街や都市を作るためには、このような情報は少なくとも公共性の高い、不特定多数の人が集まる建物では公表されるべきで、帰宅困難者を受け入れるか否かの判断にも利用すべきである。被災度の判定結果の公表と合わせて、観測記録を公表、利用できる仕組みとすることで、建物の観測記録を増やすことが可能になる。公開することによる建築主のメリットとして、システムを導入する場合や情報を公開した場合に、経済的な補助を受けることができる等の仕組みも効果的であると考えられる。とは言え、民間の建物では匿名性を守ることが望ましく、情報の取扱に関する仕組みづくりが必要である。

### 4.3 設計責任を問わない仕組み

観測を行うと設計との比較を求められるのは必須ではないかと思う。大きな地震後に「今回の地震の揺れは設計の想定通りか、観測記録と比較してください。」と建築主に問われることもあるだろう。観測記録と解析は一致すると思っている一般の方と、ある程度の乖離はあるが工学的な視点から概ね一致すると考える設計者とは、そもそも認識が異なり、議論が平行線を辿る可能性もある。設計者は、乖離の度合いとして、例えば小振幅時では、

例えば、20~30%の乖離があってもおかしくないと思うかもしれないが、このような感覚が一般の方には受け入れられるだろうか。事前の設計段階における建築主への説明が必要と思われる。

JSCA では性能設計メニューの改定が行われ、耐震性能は施主とともに設定して、作りこんでいく、プロセスが整理され、耐震性能を建築主と共有しやすくなった[8]。設計時に想定した地震と同程度の地震が起きた場合に想定以上の変形や被害が生じた場合、施主と協議した耐震性能を満足できなかったことになる。(もちろん施工などの要因もあるので、本当に設計上の問題か、原因究明するのは困難を伴う。) 建築主は設計瑕疵と思うであろう。また、想定以下の被害であった場合でも、過剰設計と思われるかもしれない。設計者は設計当時の技術を駆使して、意匠性、経済性、施工性などを考慮しながら、施主と決定した耐震性を満足する建物を設計しようと努めている。審査やチェックを受けて設計内容に問題ないと認められた場合は、改ざんや故意でなければ、仮に設計時の想定と観測記録に大きな乖離があったとしても、設計者にその責を問わないような仕組みをつくる必要があるのではないかと考える。

設計内容に問題がないことを示す仕組みとしては、第3者による設計内容のチェックを行う。性能評価(超高層、免震)については一定の有識者による評価を得ている。また、性能評価の対象外の建物では、第3者によるピアチェックを受けることで設計の妥当性を認める。あらためて新しい審査、チェック機関を設けると設計者の負担や設計期間が長くなるなど懸念されることから、従前の性能評価や構造計算適合性判定を利用し、法への適合性や安全性を判断するだけでなく、求められる耐震性を有するか否かについても、審査するのが良いと思われる。一定の評価、審査を受けた建物は、仮に解析結果と異なる事象が生じ、設計時に約束した耐震性が満足できていない結果となったとしても、設計の責を問われないような仕組みとする。やや後ろ向きの考えかもしれないが、設計者が建物の強震観測を提案、実行しやすい環境とするためには必要な仕組みではないかと考える。

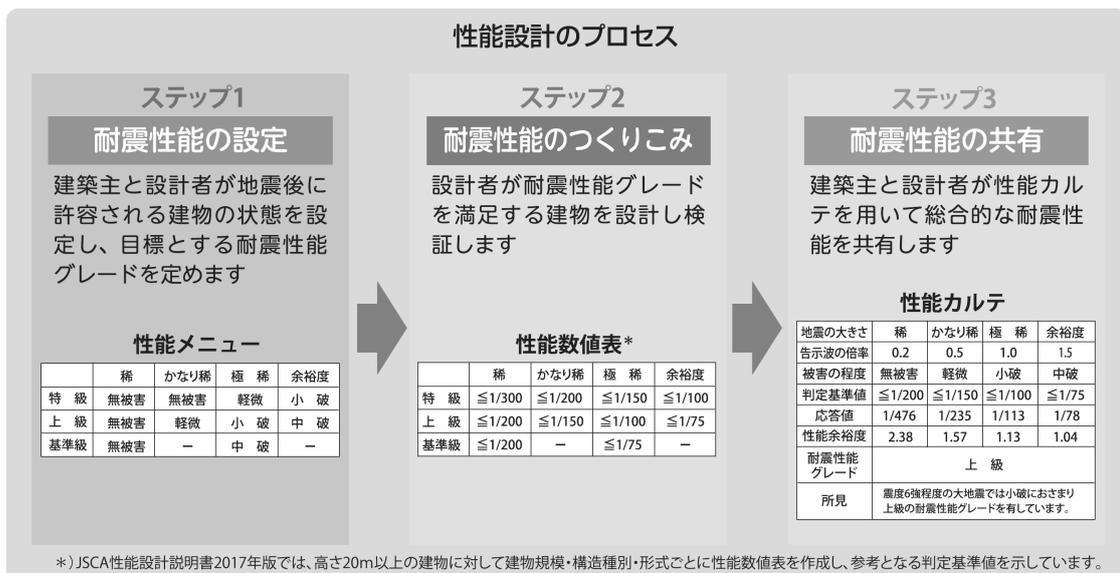


図 19 性能設計のプロセス

## 5. まとめ

本稿は強震観測に対する特段の経験や知見がある訳ではない、一構造設計者と言う立場で、強震観測の課題や対策を述べた。筆者の周りの強震観測建物の事例、この観測結果が設計へはあまり活用されていないこと、そもそも強震観測した建物の事例が少なくとも筆者の周りでは非常に少なかったことを述べた。一方で強震観測を活用したヘルスマonitoringシステムは急速に普及していることを述べた。

今後、強震観測が設計へ活用されるためには建物の観測数を増やすことが必要であると考え、観測数を増やすための課題とその対策について述べた。特にデータの取り扱い是非常に難しい問題である。ヘルスマonitoringシステムの普及により観測数は増え、その観測記録はビックデータとなる。膨大なデータをどのように扱い、どう活かすか。解析モデルとの検証には多くの検討が必要となるかもしれないので、AIなどの技術を活用していくことも考えられる。検証方法や活用方法も十分に議論していくべきであろう。

また、観測数を増やすことが本当に意義のあることか、検証すべきであろう。そもそも観測結果との検証をしなくても、現時点の設計は実挙動を評価することができており、観測数を増やしたところで、現状の設計の裏付けになるだけではメリットは小さい。

これらの問題は、一企業では到底解決できるものではなく、学会や本小委員会が中心となり、観測データを研究、検討しやすい環境を作り、設計へのフィードバックが進むことを期待したい。

## 参考文献

- [1]原田公明他：地震観測に基づく日建設計東京ビルの振動性状（その1）～（その6）,日本建築学会大会学術講演梗概集,2004年9月
- [2] 原田公明他：2011年東北地方太平洋沖地震を受けた日建設計東京ビルの地震記録（その1）～（その3）,日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）,2012年9月
- [3] Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.12
- [4]日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計
- [5]国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課：建築構造設計基準の資料（平成30年版）
- [6]国土交通省住宅局：防災拠点等となる建築物に閣下る機能継続ガイドライン（平成30年5月）
- [7]東京都：東京都帰宅困難者対策条例
- [8]日本建築構造技術者協会：JSCA 性能設計【耐震性能編】

# 強震観測の応用としての「モニタリング」

杉村義文

(株) NTT ファシリティーズ、主任研究員

## 1. はじめに

強震観測の応用としての「構造ヘルスマニタリング」がここ数年で急速に普及している。強震観測と構造ヘルスマニタリングは手法において共通点を持ち、目的において相違点を持つ[1,2]。共通点は、建物に取り付けたセンサでその挙動を観測すること、相違点は、前者が、構造物の地震時挙動を把握すること、後者は、地震時の挙動に関係なく、地震後の構造物の状態を把握することである。構造ヘルスマニタリングは、1990年代より研究が盛んになったものの、当初は、いくつかの課題の存在によりあまり普及が進まなかった。しかし、ここ数年、ニーズの高まりを受けて、急速に導入事例が増加している[3]。

本稿では、近年の構造ヘルスマニタリングのニーズの高まりの背景、続いて、モニタリングシステムの普及の状況、システムの導入・運用事例とデータ活用事例、最後に普及段階に入った本技術の抱える課題について述べる。なお、本来幅広い意味を有する「モニタリング」という言葉について、本稿では、「地震動を受けた建物の健全性評価およびそのための観測」という意味で使用する。

## 2. 東日本大震災において顕在化した構造ヘルスマニタリングのニーズ

### 2.1 東日本大震災にて発生した問題

東日本大震災では、主要な交通機関がマヒし、首都圏において大量の帰宅困難者が発生した。帰宅困難者が路上に滞留すると、火災や落下物による2次災害が懸念される。建物に目を向けると、入居者から建物所有者あるいは管理者に安全性の問い合わせが多発し、余震による災害を防止するために、建物が被害を受けていないか早急に判断する必要が生じた。さらに、建物をそのまま恒久的に使用してよいか、それとも補強が必要なのか、判断を迫られた。

### 2.2 行政の主な動き

そこで、東京都は2013年4月に「帰宅困難者対策条例」を施行し、条例およびそのガイドラインにおいて、建物に留まることが可能かどうかを地震後数時間で事業者が判断することを求めている。安全性が確認された場合は、従業者に対して当施設内での待機を指示し、一斉帰宅を抑制するよう、事業者に努力義務を課している。ここで、施設の安全性は、チェックシートを用いた目視調査にて実施することとなっている。

続いて、内閣府は2015年2月に「大規模地震発生直後における施設管理者等による建物の緊急点検に係る指針」、「大規模地震の発生に伴う帰宅困難者対策ガイドライン」を公表

している。カルテ、チェックシートを活用して、建物管理者が緊急かつ応急的に建物使用可否を短時間で判断するための体制整備、安全性確認方法を示している。

さらに、国土交通省は2018年5月に「防災拠点等となる建築物等に係る機能継続ガイドライン」を公表している。平成28年熊本地震においては、構造躯体の損傷、非構造部材の落下等により、倒壊に至らないまでも、地震後の機能継続が困難となった事例が多く見られたため、本ガイドラインは、防災拠点等となる建築物が大地震に見舞われた場合に、倒壊・崩壊を防止するだけでなく、機能継続を図るにあたり、建築主、設計者、管理者がそれぞれの立場で実施すべき事項を示している。

### 2.3 既存の危険度判定手法と課題

一方、大地震後の建物の危険度判定には、二次災害防止を主目的とする応急危険度判定[4]、継続使用・補修の判断のための被災度区分判定[5]という仕組みが既に存在している。ここで地震発生直後に注目すると、国および地方公共団体は自ら所有する被災建築物に対する応急危険度判定を速やかに行うことが定められており、これら実施主体からの要請により応急危険度判定士（以下、判定士）がボランティアで現地調査、判定を実施する。調査は、全国統一基準の調査表を用いて実施し、「危険」、「要注意」、「調査済」の3段階で判定される。阪神淡路大震災の前より運用されている本仕組みは、現在、全国に10万人を超える判定士の登録者を抱え[6]、一定の成果を上げているのは間違いないが、課題もいくつか指摘されている。そのひとつは、判定士の確保である[7]。災害時の交通手段や連絡手段の確保が必要とされているが、それにも増して、実際に判定業務に従事できる判定士が不足すると思われる。判定士自身、所属している組織の災害対応も重要な業務であり、ボランティア活動に十分に時間を割けるとは限らない。また、民間の建物でも同様の調査が任意に行われることとなる。その際に必要とされる建築構造の専門技術者は、被災地域が広範で、特に大都市が地震に襲われた場合、調査対象の建物数が膨大となるため、数が絶対的に不足すると言われている。このような人的リソース不足に加え、例えば鉄骨造建物では構造躯体が内装や耐火被覆等により覆われているため目視確認が事実上困難であること、高層建物の被災度評価に適用可能な基準等がないこと[8]、地震時の建物の応答がわからず判断の材料が少ないことなどから、大震災時の建物の危険度判定の対応が遅れる可能性が高い。

### 2.4 構造ヘルスマニタリングシステムへの期待

このような状況に対し、建物にセンサを設置して、地震時の挙動を計測し、建物の安全性・被災度を推定する構造ヘルスマニタリングシステムへのニーズが高まっている。当システムの導入により、専門家による調査を待たずとも、直ちに建物を継続して使用することが可能かどうかを、システムの判定結果を参考にして判断することが可能となる。前述の内閣府の指針、国土交通省のガイドラインにおいても同様のシステムの導入を建物の安全性の点検上、有効な手段の一つとして挙げている。実は、同様のシステムは東日本大震災以前の2000年代後半より、首都圏エリアを中心に一部の超高層・高層オフィスビルに導入されており、本震災でも成果を上げたことで注目されるようになった[例えば9]。この時は、地震直後の判定結果により全館避難必要なしと判断できた（その後に被害状況を建築に詳しいものを含めた数人で館内点検したとのこと）。そして、最近では、建物の構造設計者の間において、構造ヘルスマニタリングは広く認識されており、超高層・高層ビルや防災拠点ビルの設計段階では当然のようにシステムを盛り込んでいる。また、多くのディベロッパは、本システムの導入をBCP対策の一つとして採用している。

### 3. 急速に普及している現状

#### 3.1 最近普及しているシステム

こうして急速に普及している構造ヘルスマニタリングだが、その研究は1990年代より盛んになされており[例えば 10-16]、従来は、システム同定手法により固有周期や減衰などのモーダルパラメータや剛性などの物理パラメータを同定した上で、これらの変化から損傷を推定する方法が中心であった。そこでは、損傷の有無とその程度を、推定した指標からどう判断するかが課題として存在した。判定手法の一分類を図1に示す。分類の方法として、損傷評価の対象の大きさより、建物全体としたものから、層、部材、材料に分けることができる[17]。また、推定する指標を固有周期や層剛性のような「特性」としたものと、建物の地震時の変形量のような「応答」としたものに分けられる[18]。そして、最近実用化されているものは、加速度記録から層間変形角を算出し、基準値と比較して被災度を判定する、というものが大半であり、分類でいえば左上の領域、建物全体あるいは層レベルの「応答モニタリング」に位置付けられる。地震時の建物の変形が設計値（応答あるいはクライテリア）を超過しないことを確認するという意味で、構造設計の考え方と整合し、実務者（構造設計者）に理解されやすい、というのが普及の要因の一つであろう。また、普及のきっかけは低コスト化も寄与していると思われる。特にセンサについては、MEMSセンサの出現により、従来の加速度計に比べると、微小振幅時のノイズは大きいものの、大地震時の計測性能は、実用上、つまり建物の変形量を算出する上では、十分な精度を有する[19]ものが低コストで入手できるような状況にある。

#### 3.2 普及の状況

ここでは、筆者が調査した構造ヘルスマニタリングシステムの普及状況について述べる。情報源は、システムを提供している主な事業者である、研究機関、エンジニアリングサービス企業、設計事務所、ゼネコン、インフラ関連企業等に対するヒアリング、インターネット公開情報、シンポジウム講演内容等である。ヒアリングは、強震観測小委員会の委員の方々に対する自身が所属する組織に関するもの、および、特に導入実績数が多いと思われる一部の事業者に対する個別のヒアリングからなり、学会での話題提供という主旨に理解をいただき、可能な範囲で情報提供いただいた。主な調査項目は、これまでの導入実績数と、導入した建物の傾向についてである。なお、戸建住宅向けのシステムは含めていない。調査の結果、これまで累積で少なくとも850棟以上に導入されているようである（2018.10末時点）。導入時期の推移（イメージ）について図2に示す。2000年代後半から導入され、東日本大震災後のニーズの高まりを経て、2015年あたりから急激に増加してい

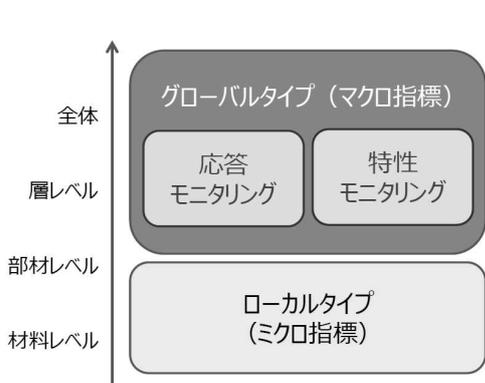


図1 判定手法の一分類

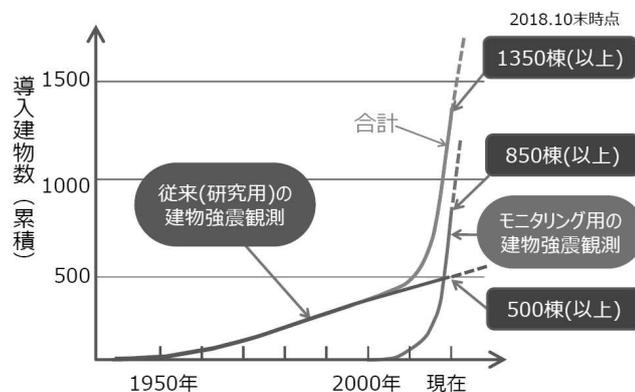


図2 建物強震観測の普及のイメージ

るようである。図 2 にはモニタリング用の建物強震観測に加えて、従来の研究用の建物強震観測も示している。使用しているセンサなどシステムが異なるため、単純比較するものではないが、後者の実績数は約 500 棟とされており[20,21]、設置数だけでみるとここ数年の増加でモニタリング用の建物強震観測の方が多数派となっている。ただし、後者は主に投稿論文の情報に基づいた調査であり、投稿されていないものは観測していても含まれていない可能性があるため、実際にはもっと多いと思われる。

続いて、導入建物の傾向の比較（ヒアリングに基づく推測）を表 1 に示す。構造ヘルスマニタリングシステムは当初、超高層・高層オフィスビルへの導入が進められてきた経緯がある。したがって、地域分布を見ると、従来の建物強震観測では、関東エリアに次いで、北海道・東北、東海エリアが多くなっている（それ以外は大きな地震が少なくまだ公開されていない可能性はある）が、構造ヘルスマニタリングでは、関東が大半で、関西、東海エリアが次ぐ。これは、経済活動の活発さ、およびそれに伴うニーズの多さに起因すると思われる。階数分布、主要構造、建物用途は、当初の経緯から、超高層・高層の鉄骨造のオフィスビルが中心であり数的には多いが、それらに限らない防災拠点ビルや建物所有者にとって BCP 対策を進めたいビルへの適用も増加し、近年、多様化が進んでいる。耐震・制振・免震の区別については、免震建物、制振建物の挙動把握を目的にしたものも多い従来の建物強震観測に比べると、耐震建物の比率が多く、免震建物の比率は少ないと思われる。導入建物の傾向ではないが、使用しているセンサの種類は、構造ヘルスマニタリングでは MEMS などの低コストセンサが主力であり、従来型の建物強震観測との決定的な違いはここにあるだろう。

表 1 地震観測導入建物の傾向の比較（ヒアリングに基づく推測）

項目	従来の建物強震観測	モニタリング用の建物強震観測
地域分布	全国に設置、関東が半数近く、北海道・東北、東海が次ぐ	全国に設置、関東が大半、関西、東海が次ぐ
階数分布	10 階以下が 3/4 近くを占める	当初は超高層・高層が多かったが、近年、低層・中層にも展開
主要構造種別	RC 造・SRC 造が 6 割、S 造が 2 割、その他は混合や木造など	当初は S 造が多かったが、近年、RC 造・SRC 造にも展開
建物用途	学校施設、公共施設、ライフライン施設、住宅など多様	当初はオフィスビル中心であったが、近年、商業施設、集合住宅（寮）、物流倉庫、データセンターなど多様
耐震・制振・免震の区分	免震・制振が 1/3	当初は制振が多かったが、近年、耐震も増加、免震は少ない
旧耐震・新耐震の区分	—	新耐震建物中心
（参考）センサの種類	加速度計（従来型）が 3/5、MEMS など簡易センサ 1 割、速度計もあり	MEMS などの低コストセンサが主力

## 4. 事例紹介

本章では、実際に構造ヘルスマニタリングシステムを導入・運用している事例、および構造ヘルスマニタリングシステムで得られた地震観測記録を活用した研究事例を示す。

### 4.1 大阪府北部の地震での運用事例

ここでは、2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震（マグニチュード6.1、最大震度6弱）の時の大阪市内のオフィスビルの事例を取り上げる。建物は、大阪市中央区に建ち、1993年竣工、地下2階、地上14階、延床面積約19,100㎡、軒高約60m、地下SRC造耐震壁付ラーメン構造、地上S造純ラーメン構造の事務室用途の建物である。本ビルには図3に示すように、構造ヘルスマニタリングシステムが導入されている[22]。MEMS加速度センサを建物各階に設置、記録・分析を行う収録装置を1階の中央管理室に設置し、それらをUTPケーブル（LANケーブル）にて接続している。収録装置は、外部通信のネットワークと接続し、地震発生後、メールサーバを介してあらかじめ登録している関係者に判定結果のメールが届くようになっている。大阪府北部の地震時に配信されたメールを図4に示す。建物1階における震度が5弱相当であること、建物の層間変形角は最大で1/639であり、事前に設定されていた基準値と比較することで判定結果が「安全」であることがわかる。メールに添付されている判定結果レポートを図5に示す。判定結果レポートは、一般ユーザー向けの簡略なレポート（図5上）と、専門家向けの若干詳細なレポート（図5下）が用意されている。簡略なレポートは、判定結果が一目でわかるような構成とし、詳細なレポートでは、各階の震度（相当値）、最大加速度、最大層間変形角を確認できる。実際に、本ビルでは、現地の大阪のビル管理担当者および東京の災害対応メンバーにメールが送付された。当日は、現地のメンバーはもっと震源に近い他のビルを含めた被災状況の情報収集に追われたが、遠隔地にいる東京の災害対応メンバーは、発生直後にメールの内容を確認

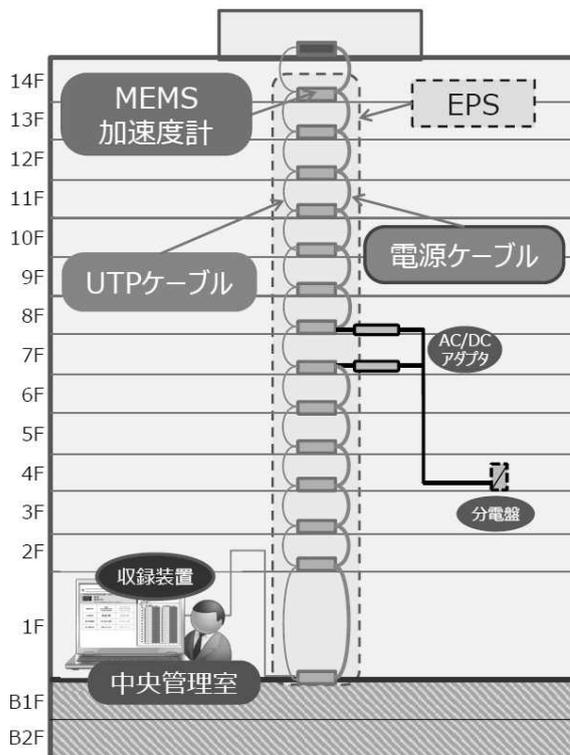


図3 システム構成

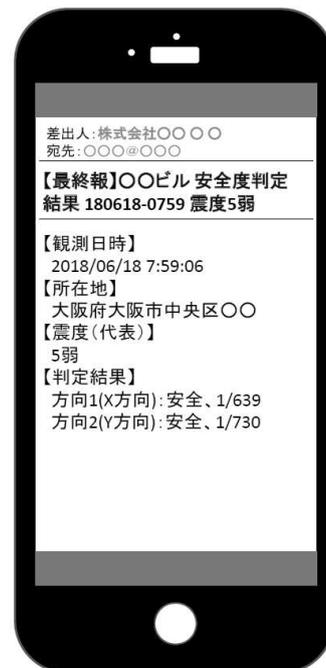


図4 配信メール

認め、判定結果が「安全」であり、かつ層間変形角も 1/500 以下とさほど大きくなかったため、詳細な調査は不要と判断できた。客観的な情報を元に詳細な調査を省略できたことで、導入の意義があったようである。なお、災害対応メンバーには、建築構造の専門家ではない者も含まれるが、事前に運用方法を議論していたこともあり、判定結果のみならず専門的な理解力を要する層間変形角の意味と程度を元にして、行動を決定することができた。システム導入と合わせて、運用ルールの策定とその理解が重要であると言える。

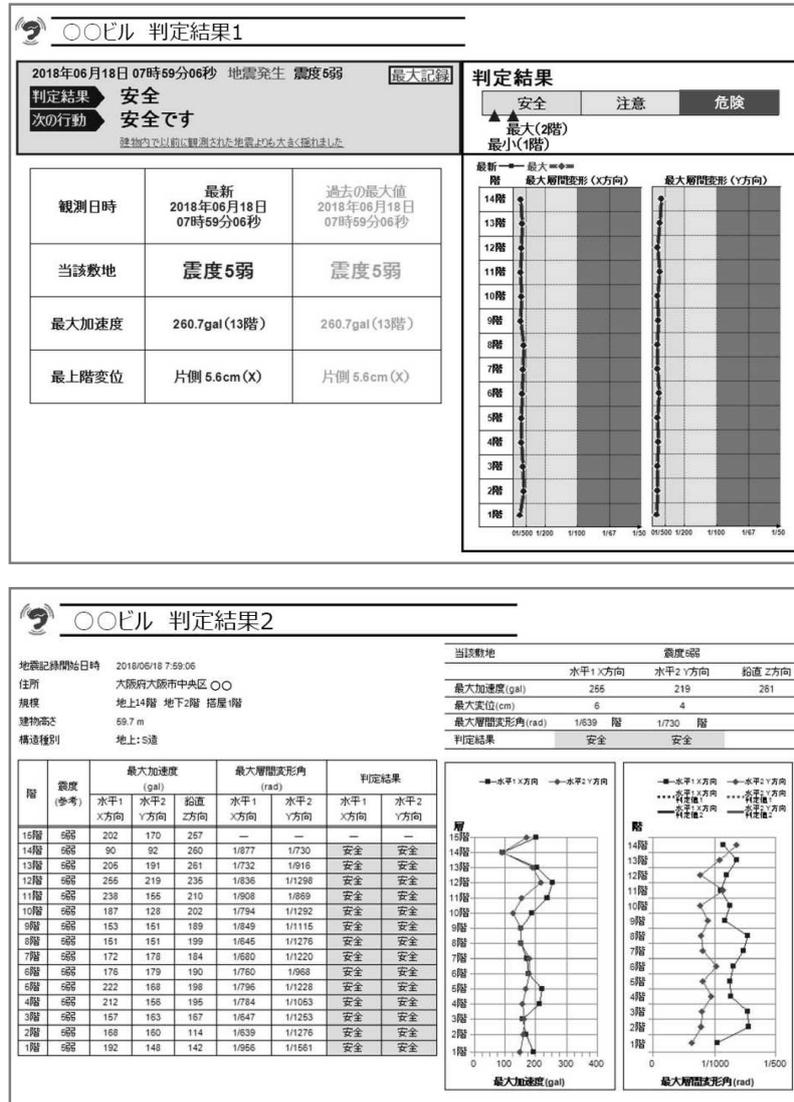


図5 判定結果レポート

#### 4.2 観測データの活用事例

本来、地震直後の構造の状態を把握することを目的に導入したモニタリング用システムから数多くの記録が得られることがある。神田、日下、小笠原らは、得られた多数の中小地震の記録を活用して、強震観測の目的さながら構造物の地震時挙動を把握すべく、地震動の建物への入力損失に関する研究を報告している[23]。建物内に設置したセンサによる地震観測記録は貴重なデータであり、非常に有意義な活用例と言える。

## 5. 解決された課題と残されている課題

### 5.1 課題の振り返り

構造ヘルスマモニタリングの普及に向けた課題について、これまでの建築学会大会 PD、シンポジウム等にて中村氏が述べている[1,2]。今からおよそ 10 年前の 2006 年の大会 PD、2008 年の第 5 回強震観測データの活用に関するシンポジウムで示された課題は、①損傷指標とその定量的検証（さらに、「損傷を定量的に評価する指標に関する知見不足」、「実構造物における手法の検証不足」の二つの課題にわけられる）、②建物エンドユーザーの関心の低さ（建物エンドユーザーに対する専門家からの説明不足）、③モニタリング結果の所有権の問題といった社会的課題（観測結果の所有性、公表性に関わる課題）、④低コスト化（システムコストだけでなく、設置コスト、維持管理コストも含めた全体コストの低減）である。そして、2016 年の大会 PD での中村氏自身の振り返りでは、①については、層間変形を指標とする実用的なシステムの事例が増えてきているものの、損傷そのものを指標化しその指標を定量的に説明している訳ではないという点でまだ課題が残っている、②については、東日本大震災をきっかけに解消していると言える、③については、想定したほど抵抗になっていない、としている。

ここからは、別の視点で見てみる。①について、現在普及しているシステムは、損傷指標として主に建物の変形を採用し、損傷との関係については建物の構造設計の考え方に依存している。従来から続く高度な研究の成果を活用して精度を高めることは可能であり、その部分はまだ改善の余地があると感じる。また、②については、エンドユーザー側の関心は解決したようだが、専門家からの説明には課題が残っていると感じる。エンドユーザーに対して、本システムが“できること”について十分に説明を行う必要がある。これらの重要な 2 件については、次節でさらに詳しく述べる。③については同感である。④については、センサの低コスト化が全体コストの低減、ひいてはシステムの普及に寄与しているのは間違いないが、それにも増して低コスト化の裏返しとも言える得られる利益（効果）の高まりが普及に大きく寄与していると感じる。冒頭で述べたように構造ヘルスマモニタリングは、システムを導入した実施者が直接的にメリットを享受できる。オフィスビルのテナントの入居継続、工場や商業施設の事業継続など、構造ヘルスマモニタリングから得られる可能性のある価値は、その導入コストを大幅に上回る場合がある。このように費用対効果の“効果”の部分にスポットがあたったことにより普及が進んでいると捉えることもできる。今後は、エンドユーザーの期待にさらに応えるために、過去から続く研究開発を継続し、あるいは新たなセンシング技術を活用するなどして、本システムにとっての“要”である判定精度の向上に取り組み続ける必要がある。

### 5.2 普及段階を迎えて気を付けるべきこと、残されている課題

#### (1) エンドユーザーへの説明および表現

構造ヘルスマモニタリングシステムに対するエンドユーザーの関心は高まり、普及が進んでいるが、気を付けないといけないこととして、エンドユーザーへの専門家からのしつかりとした説明と表現が挙げられる。すなわち、システムは、例えば「安全」、「要注意」、「危険」あるいは、「無被害」、「損傷の可能性あり」、「倒壊の可能性あり」といった判定結果を出力するが、これらは確定的な情報ではないということと、複数の意味を持ち得るということである。これは、本システムだけの問題ではなく、専門技術者による判定であっても同様の問題があるが、根本的な原因は、建物の構造安全性に関わる様々な余裕およびばらつきが存在である。具体的には、設計段階、施工段階の余裕度などであり、通常、全ての

部材を許容値ぎりぎりには設計せず、施工時の材料の強度は決められた下限値を上回るように製造される。そのことで、建物の耐震性能は設計時のものよりも結果的に余力を持つ。ただし、それを厳密に把握することは実質的に不可能である。したがって、構造設計の考え方に依存したこのような方法をもって損傷を完全な精度で評価することも不可能であり、判定結果と実被害にも乖離が生じる。図 6 に建物の損傷の発生とモニタリングシステムの判定の関係を示す。あくまでイメージではあるが、建物毎の余裕度・ばらつきの違いの影響で、応答や外力が 1 次設計や 2 次設計などのそれぞれの状態を超過しても全ての建物が一様に「一部損傷」や「倒壊・崩壊」を起こすわけではなく、応答や外力の上昇に伴い、徐々に発生確率が高まると考えられる。このことは建築構造の専門家にとっては当然のことだと思うが、それゆえ、意識から薄れて説明することを忘れがちである。エンドユーザーは専門家ではないことを忘れてはならない。さらに、システムの判定結果である「安全」、「要注意」、「危険」、あるいは「無被害」、「損傷の可能性あり」、「倒壊の可能性あり」が何を意味するのか、構造物の状態を意味するのか、それとも入居者が取るべき行動を意味するのか、あるいは両方を含むものなのか、導入したシステムをエンドユーザーがスムーズに運用するために、導入時、運用中ともに導入側が正しく認識する必要があり、提供側はそれを正確に伝える必要がある。同じ構造物の状態でも異なった行動を選択することもあり得るが、例えば参考文献[24]では、「安全」、「要注意」、「危険」はそれぞれ、「軽微損傷以下、継続使用可能、退避不要」、「健全度低下、塑性化しているが軽微な損傷、余震を考慮しても建物崩壊の危険性はなし、避難検討」、「余震により崩壊の危険性有り、避難」としている。そして、基準値（図 6 中の安全・要注意・危険のしきい値）をどう選択するか、人命優先で最も安全側の選択をとるのであれば、ケース 1 がよいと思われ、自社のオフィスビルや工場など一旦避難することにさほど抵抗がない場合は容易に適用できると思われる。なお、本サービスを提供する側の事情としても、危険の恐れのあるものを「安全」と評価することに技術者として強い抵抗を持つため、この選択が選ばれることもある。一方、平均的な判定精度を高めたいのであれば、ケース 2 を選択するかもしれない。さらに、テナ

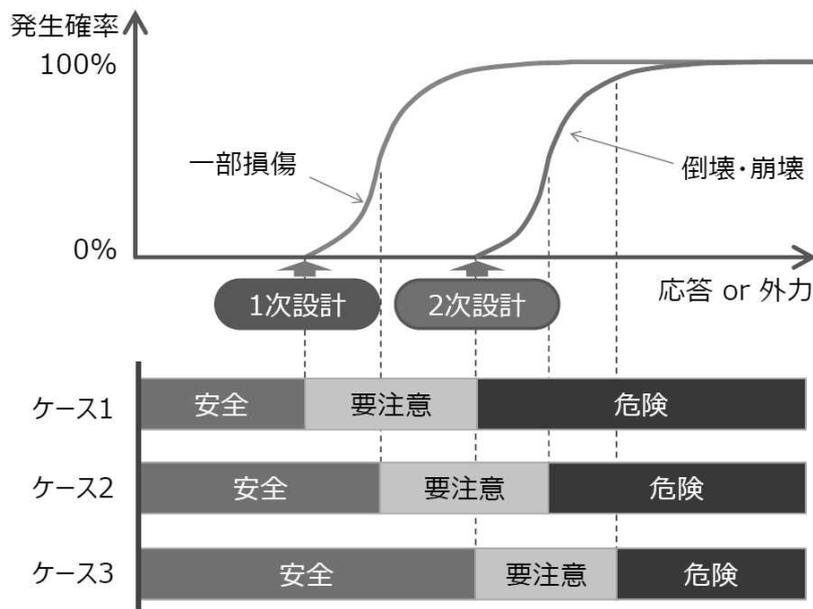


図 6 建物の損傷の発生とシステムの判定結果の関係のイメージ

ントが入居するオフィスビルでは不必要に避難の指示を出すことを極力避けたいというエンドユーザー側の意識も作用するため、ケース 3 を選択することも考えられる。ここで重要なことは、どのような選択をしたとしても、判定には前述のような不確定な要素が含まれていること、具体的には、危険な状態であっても「要注意」との判定にとどまる恐れがあること、あるいは、安全な状態であっても「危険」と判定する可能性があることをエンドユーザーにしっかりと説明することである。そして、判定と実被害の乖離が存在する可能性があるため、本システムは建物所有者あるいは管理者の継続使用に係る意思決定を支援する目的で導入するもの、意思決定に有用な客観的な情報を提示するものであり、最終的に判断するのは”ひと”であることを利用者に十分に伝える必要がある。なお、利用者側であるディベロッパが自ら判定の表示方法と運用とをセットで検討した事例がある[25]。運用に合わせた設定・表示がなされており、今後、設定の妥当性が検証され、エンドユーザーとしての納得性が高まると思われる。

## (2) 判定の精度の向上

前項で述べたように建物の持つ構造安全性の様々な余裕度、ばらつきが存在する限界があるとは言え、エンドユーザーの要求に応じるために判定精度を高めることがよいとは言ってもない。そのためには、まずは既存のシステムで地震記録が取れた際の判定の精度検証が重要である。さらに、過去および将来の耐震性能に関する研究との関連が重要である。現在普及しているシステムは、図 1 に示した分類の左上の領域であるが、既に述べたようにそれ以外の領域の研究も古くから進められている。例えば、野口らは、光ファイバーセンサーを用いて鉄骨梁のひずみ計測の可能性と課題について述べている[26]。また、家らは、RC 造の柱梁、耐震壁のひび割れをカメラで撮影した画像を用いて分析するシステムを開発している[27]。強震観測から得られた記録及びその他の方法から得られた記録を図 7 に示すように組み合わせることで判定精度を高めることが可能ではないか、と考える。

ここでは、判定精度の向上に関わる筆者らの取り組みを二つ紹介する。一つ目は、多角的な視点からの判定である。普段、建築構造技術者は、地震が発生し、ある建物で地震記録が得られた場合、まずは入力地震動の応答スペクトルを求め、建物の固有周期との交点から、建物に作用したであろう地震力の大きさを把握して、損傷の有無を推測することができる。さらには、図 8 のように各階の加速度記録を元に各階の層せん断力を算出し、層間変形角との関係を描くことで、塑性化の状況、エネルギーの吸収状況を知ることができる[28,29] (図 8 では縦軸を加速度としているが質量を乗じることで層せん断力に変換)。そして、図 9 に示すように、層間変形角と入力地震動のスペクトル (建物上下階で地震記録が得られているため、地震時の実際の周期も把握でき、建物に作用したであろう地震力の大きさをピンポイントで把握可能)、建物の吸収エネルギーを組み合わせることにより、層間変形角のみを用いた場合よりも、高精度に判定できる可能性がある。複数の間接指標からどのような判定結果を出力するかは、実際の強震観測記録による検証を経て説得力が増すが、建物が大きく損傷するような記録は現時点では限られているため、当面、E-Defense の建物崩壊実験のデータや、数値解析シミュレーションのデータを用いることも考えられる。この方法は、システム化・自動化が容易であり、実現性が高い。

二つ目は、振動解析と観測記録の連携である。通常、設計用の振動解析モデルは実物との乖離が必ず存在する。設計は安全性を確保するのが目的であるため、乖離そのものは受け入れている (そうせざるを得ない)。一方、実際の損傷を把握しようとなると、少なくとも実物と乖離したモデルでは正確な判断は困難である。時刻歴応答解析の応答値やそのス

ペクトル解析等を通じ振動解析モデルを調整することで、観測記録と整合した解析を行うことが可能となる。図10は東日本大震災の際の仙台市内の超高層ビルの屋上階の変位について、地震観測記録と立体フレームモデルによる振動解析の結果を比較したものである[30]。調整方法は無限に存在するため、観測記録との整合は、実現象の再現のための必要条件ではないが、少なくともその振動解析結果から得られる、例えば、大梁や柱の負担力、塑性化の状況は、乖離しているもの比べると信頼性が高いと考えられる。これらの結果から部材レベルで損傷を把握することも可能である。解析モデルの調整方法、調整の解釈、その扱いについては検討する必要があるが、システム化・自動化は、若干ハードルが高くなるものの可能である。いずれの方法も、実務的発想であり、既往の理論的で高度な研究に比べると独自性は少ないかもしれないが、判定精度を高める工夫のひとつとして有効であろう。あるいは、設計の考え方には依らないもっと別の方法を組み合わせることで判定精度を格段に高められる可能性があると考えられる。

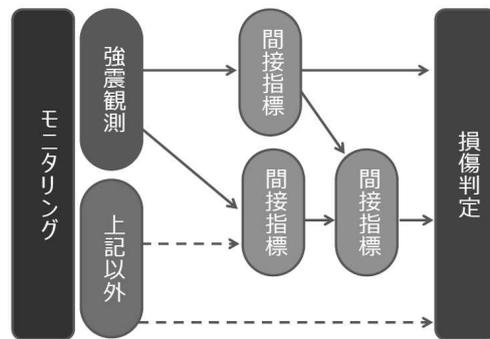


図7 指標化と損傷把握概念図

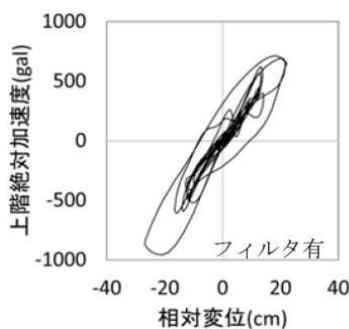


図8 絶対加速度－相対変位関係 (参考文献[28]より)

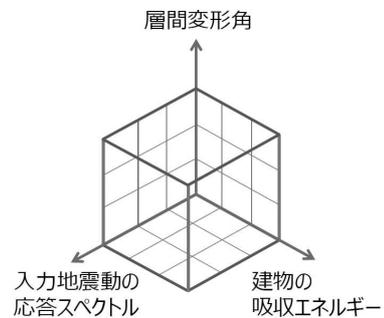


図9 複数の指標を組み合わせ例

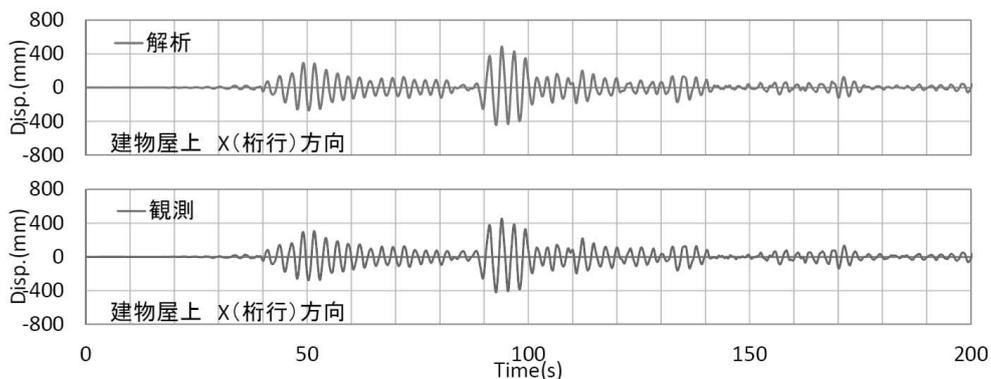


図10 観測と解析の変位時刻歴応答の比較 (参考文献[30]の図より作成)

## 6. まとめ

近年の構造ヘルスマモニタリングのニーズの高まりの背景、同システムの普及の状況、導入・運用および活用事例、本システム普及に向けた解決された課題と残された課題について述べた。エンドユーザーへの説明、判定精度の向上という重要な課題が残されているが、同様のシステムは急激に普及しており、導入実績は当面増え続けると思われる。そのことが、本分野の研究の推進、本システムの精度向上にもつながり、さらなるニーズの向上とシステムの普及という、いい循環を生み、強震観測の普及、そのデータ活用を通じた建築物・都市の地震災害軽減に寄与することに期待する。

## 参考文献

- [1] 中村充：構造ヘルスマモニタリングと地震観測，建築物の地震時挙動を知るためにー建築物における強震観測の意義ー，2006 年度日本建築学会大会 構造部門（振動）パネルディスカッション資料，pp.9-16，2006.9
- [2] 中村充：強震観測とモニタリングの共通点・相違点，将来の大地震に備える強震観測とモニタリング，2016 年度日本建築学会大会 構造部門（振動）パネルディスカッション資料，pp.4-12，2016.8
- [3] 日本建築学会：構造委員会 振動運営委員会 建物健全性モニタリング小委員会主催シンポジウム「建物の構造・機能評価に関するモニタリング技術の現状」資料，2017.2
- [4] 日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998
- [5] 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2015
- [6] URL：<http://www.kenchiku-bosai.or.jp/assoc/oq-index/>（一般財団法人日本建築防災協会 全国被災建築物応急危険度判定協議会 HP）
- [7] URL：<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/39739.pdf>（宮城県 HP 被災建築物応急危険度判定の実施実績について，平成 23 年東北地方太平洋沖地震における応急危険度判定について）
- [8] 鈴木芳隆，小鹿紀英，高橋元美：高層建物に対する震災後被災度評価の現状と課題，鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術，2017 年度日本建築学会大会 構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料，pp.14-21，2017.9
- [9] 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対応策，2014.10
- [10] 斎藤知生：モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定，日本建築学会構造系論文集，第 508 号，pp.47-54，1998.6
- [11] 中村充，安井譲：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第 517 号，pp.61-68，1999.3
- [12] 演本卓司，森田高市，勅使川原正臣：複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第 560 号，pp.93-100，2002.10
- [13] 楠浩一，勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法，日本建築学会構造系論文集，第 569 号，pp.119-126，2003.7
- [14] 中村充，柳瀬高仁，池ヶ谷靖，圓幸史朗，米山健一郎：構造物のヘルスマモニタリングを目指したスマート加速度センサの開発，日本建築学会技術報告集，第 14 巻，第 27 号，pp.153-158，2008.6
- [15] 白石理人，森井雄史，岡田敬一，杉本浩一，佐藤俊明，倉田真宏，飛田潤：多点高密度配置した振動センサと部分構造の出力誤差による局所損傷検出 多点同期計測シス

- テムの構築と鉄骨造高層建物の大型振動台実験への適用, 日本建築学会構造系論文集, 第 736 号, pp.801-811, 2017.6
- [16] 山田有孝: わが家の地震健康診断—地震時のリアルタイムモニタリング—, 日本建築学会 情報システム技術委員会 スマート建築モニタリング応用小委員会主催「IoT スマート建築と知的環境シンポジウム」資料, pp.56-63, 2017.5
- [17] 伊山潤: 鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術の確立に向けて, 鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術, 2017 年度日本建築学会大会 構造部門 (鋼構造) パネルディスカッション資料, pp.1-7, 2017.9
- [18] 白石理人, 森井雄史, 岡田敬一: 高層建物の振動台実験へのモニタリング技術の適用事例, 鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術, 2017 年度日本建築学会大会 構造部門 (鋼構造) パネルディスカッション資料, pp.22-29, 2017.9
- [19] 仲野健一, 小阪宏之, 山本健史, 鹿嶋俊英: MEMS センサを搭載した計測デバイスの性能評価と 6 階建木造実験住宅における強震観測の実施, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, 2018.12
- [20] 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, 第 16 巻, 第 32 号, pp.87-90, 2010.2.
- [21] 飛田潤, 鹿嶋俊英, 中村充, 植竹富一, 山村一繁, 栗田勝美, 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, 第 20 巻, 第 46 号, pp.901-904, 2014.10
- [22] 吉田献一, 松下剛史, 西井宏安, 後藤和弘: リジリエンスの向上を目指した構造ヘルスマモニタリング技術開発 (その 1) システム概要と層間変位算出精度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.93-94, 2014.9
- [23] 神田克久, 日下彰宏, 小笠原さおり: 安全性判定のためのモニタリングシステムの実建物への適用と観測データ活用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1119-1120, 2017.7
- [24] 文部科学省 都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト 都市機能の維持・回復のための調査・研究: 健全度判定システムを用いた地震時の建物の管理マニュアル作成指針 (案), 2017.3
- [25] 内田篤志, 谷沢弘容, 高野陽介, 伏見晋悟, 井口真吾: 構造ヘルスマモニタリングシステムの被災度区分判定の閾値に関する考察 (その 1) 構造ヘルスマモニタリングシステムと被災度区分判定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.119-120, 2018.9
- [26] 野口和也, 松島由到, 諏訪田晴彦, 勅使川原正臣: 高知能建築構造システムの開発に関する日米共同構造実験研究 (その 7) 光ファイバーセンサーによる歪み分布測定基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.531-532, 1999.7
- [27] 家哲也, 井野昭夫, 宇佐美祐人, 土橋徹, 安田正治: 中低層 RC 造ビル向けひび割れ検知システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.207-208, 2018.9
- [28] 吉海伸祐, 渡邊信也, 渡辺真司, 杉村義文, 鈴木幹夫: 地震観測記録から得られる動的履歴特性に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.931-932, 2016.8
- [29] 渡辺真司, 松下剛史, 林政輝, 鈴木幹夫: RC 造建物における鉄筋降伏前後の等価減衰定数に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.127-128, 2017.7
- [30] 永島茂人, 杉村義文, 後藤航, 鈴木幹夫, 元樋敏也, 土肥博: 東北地方太平洋沖地震における超高層制振建物の地震応答評価 (その 1) 強震観測記録の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.315-316, 2011.7

# これからの強震観測

小阪宏之

戸田建設(株)技術開発センター、研究員

## 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として、防災科学技術研究所の K-NET[1]を始めとする地盤系の強震観測網は急速に展開し、今や全国津々浦々どこで地震が発生しても、オンラインですぐにデジタルデータを手に入れる事が出来るようになった。ローカルな地盤特性の違いによる振動特性への影響等の課題は残されてはいるが、大局的に特性を捉えるという点では十分な密度で観測がなされていると言える。一方、建物系の強震観測は観測目的が多岐にわたる事や観測対象の所有者や管理者の意向といった社会的な要因が絡む事から、全国で統一的な公開観測網は建築研究所の観測網[2]が唯一であり、その数も地盤系の強震観測網と比して非常に数少ない物となっている。耐震工学を考える上で、震源の破壊過程から構造物の破壊による被害に至るまで一体で考えられるべきであり、その点において建物系の観測網の進展はこれからの強震観測を考える上で緊結の課題であると言える。

強震観測は常時稼働していなければならないにもかかわらず、機能を発揮するのは稀であるという特殊な性質を持っているため、その意義は一般には理解されにくい。ユーザの感覚としては、常時動いているものならともかく（実際は常時動いているのであるが）、地震発生時にしか機能しないものにコストを掛けるには抵抗があるだろう。建物系の強震観測を行う場合、従来型の強震観測を行おうとすると設置費用だけで数十万~数百万円、高密度観測を行うとすれば一千万円に上る事もある。長期観測を続ける場合は、当然ながら維持管理にもそれに匹敵するコストと人的リソースが必要であり、普及を阻害する要因である事に疑いの余地はない。強震観測においてコストは切り離す事が出来ない問題である。

これまで、建物系の強震観測は設置及び維持管理にかけられる人的リソースやコストが比較的潤沢である免制震、超高層建物といった特殊建物で行われるのが主流であった。東北地方太平洋沖地震で極めて広範囲で観測記録が得られた事も追い風となり、これらの特殊建物については地震時挙動解明に向けた取り組みが進められてきている[例えば 3,4]。一方で、観測対象建物位置は都市圏に偏っており、大多数を占める「普通」の建物では観測が十分とは言えない[5]。中低層建物については静的な耐震設計しか行われないケースがほとんどであり、強震観測の目的が設計へのフィードバックであるとするならば、観測記録が必要とされてこなかった背景もあるが、社会防衛的な観点からミクロなスケールで被害や地震時の挙動を把握するにはこれらの一般の建物でも観測データを蓄積する必要がある。

通常、強震観測で用いられているのは「サーボ型」と呼ばれる形式のセンサを使用したシステムが主流であるが、近年になってモニタリングの普及が追い風となり、主に建物を対象として、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサを利用したローコストシステムが多数提案され、実際の導入も進んでいる[例えば 6,7]。それに伴い、コストの問題でこれまで

参入が出来なかった機関や、MEMS の扱いを得意とする IT 技術者や半導体メーカといったこれまで強震観測にあまり関わってこなかった業態の新規参入も著しく、これまで地震動や構造物の専門家が担ってきた強震観測の転換期が訪れている。これらの安価なシステムと新しい知見を持った技術者の参入はこれまでに構築が出来なかったマイクロな領域までを網羅する観測網の展開を可能とする事が期待される。

本稿では、強震観測における性能検証と実観測記録から MEMS 加速度センサで何が出来るかを示し、最後に MEMS 加速度センサを用いた現状の観測技術の進展とそれによって可能となるであろう強震観測の今後の展望について議論する。

## 2. ローコスト MEMS 加速度センサの性能検証

一般に MEMS 加速度センサの特性として、自己ノイズが卓越する事と長周期域の計測に難があるという事が言われている。例え安価であっても地震が発生した際に全く使い物にならなかったという事では話にならない。ここでは従来型の加速度センサとの比較実験を通して、MEMS 加速度センサの性能について考察する。

MEMS センサが従来型と比して安価と言われる理由としては、大量生産によるスケール効果が寄与する所が大きい。強震観測目的に特化して低ノイズに特化した一点物として制作してしまうと、数が出ない限り安価にならない。実際、強震観測に特化した MEMS 加速度計では既に微動レベルでの測定が可能であるものも存在するが[例えば 8,9]、価格帯としては二十万円程度とそれなりに高価である。ここでは、より大量普及を追求してそれよりも更に安価な価格帯のローコスト MEMS センサを対象とする。なお、MEMS 加速度センサには静電容量式、 piezo 抵抗式、熱感知式等があるが、ここで検証を行ったセンサは全て最も普及している静電容量式のセンサである。

### 2.1 弱震動計測におけるローコスト MEMS 加速度センサの性能

ローコスト MEMS 加速度センサが強震動時に従来型センサとある程度遜色なく加速度記録を計測出来るという事はこれまでも提示されているが[例えば 10,11]、中程度の弱震動においてどの程度効果を発揮するかについても把握しておく必要がある。建物が強震動を受けた際には、それ以前に得られている微動記録や弱震時の記録との比較を通して初めて振動特性の変化を把握する事が出来るからである。

筆者らは複数のローコスト MEMS 加速度センサとサーボ型加速度センサの加振比較実験を行い、その特性の違いについて検証を行った。ここで比較を行ったローコスト MEMS 加速度センサはデバイスとして販売されている物はほとんどの物が数万円、センサチップとして販売されている物は数千円のオーダーで購入できる物で、本来の用途についても自動車制御からゲーミング用まで様々である。図 1 に震度相当値で 3 程度の実地震を模擬したケース、図 2 に正弦波加振を行ったケースのサーボ型加速度センサ及びローコスト MEMS 加速度センサの比時刻歴波形及びフーリエ振幅スペクトル、サーボ型の出力に対するローコスト MEMS センサのコヒーレンスを示す。

図 1 より震度相当値で 3 程度の地震については、主要動部においてサーボ型と同程度の計測が可能である事が分かる。一見すると、長周期域と短周期域で適切に計測が行えていないように思われるが、図 2 よりスペクトルの谷にあたる領域については周期帯に関係なく実効振幅が自己ノイズを下回っている事が分かる。つまりローコスト MEMS 加速度センサの特性として、強震観測に必要な周波数帯域においては一定の大きさの自己ノイズが存在

する事が分かる。また、振幅スペクトルで自己ノイズの閾値を下回る場合については位相特性についても従来型加速度計と異なる傾向となる。詳細については文献[12]を参照されたい。

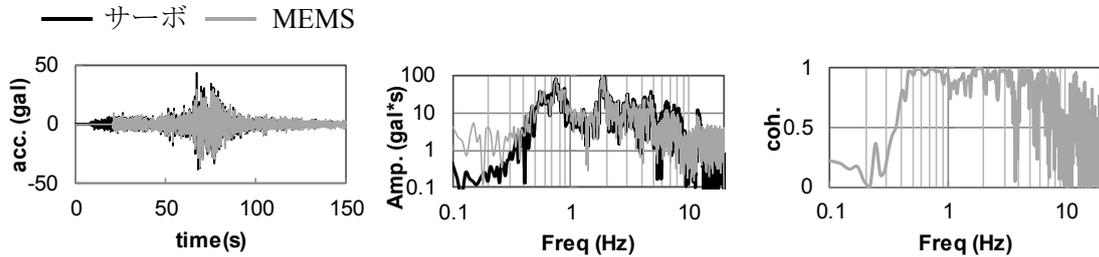


図 1 弱震動加振時のサーボ型加速度センサとローコスト MEMS 加速度センサの比較[12]

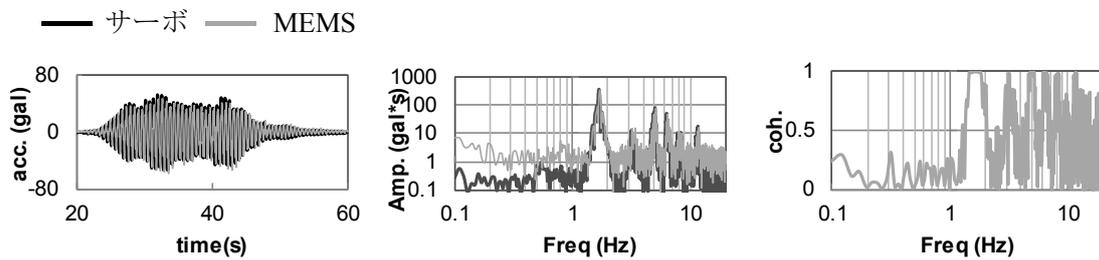


図 2 正弦波加振時のサーボ型加速度センサとローコスト MEMS 加速度センサの比較[12]

## 2.1 長周期地震動計測におけるローコスト MEMS 加速度センサの性能

長周期域の性能については、通常小型の MEMS センサでは固有周波数を数 kHz に取る事から、バネマス原理を鑑みるに基本的には地震計の特性として必要とされる DC~数十 Hz にかけてはフラットであるはずである。図 3 は傾斜させたテーブル上を回転させる事で重力加速度を利用して疑似的に時刻歴長周期大加速度入力を再現し、サーボ型加速度計とローコスト MEMS センサの振動性状の比較を行ったものである。短周期の自己ノイズが載っているのは見て取れるが、長周期域については入力が十分に大きければ加速度記録を観測する事が可能である事が分かる[13]。

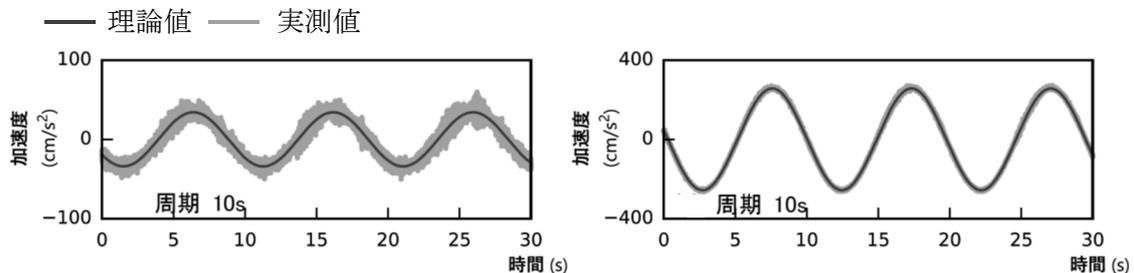


図 3 長周期域の大加速度入力時のサーボ型加速度センサ及びローコスト MEMS センサの比較[13]

### 3. ローコスト MEMS 加速度計による建物強震観測事例

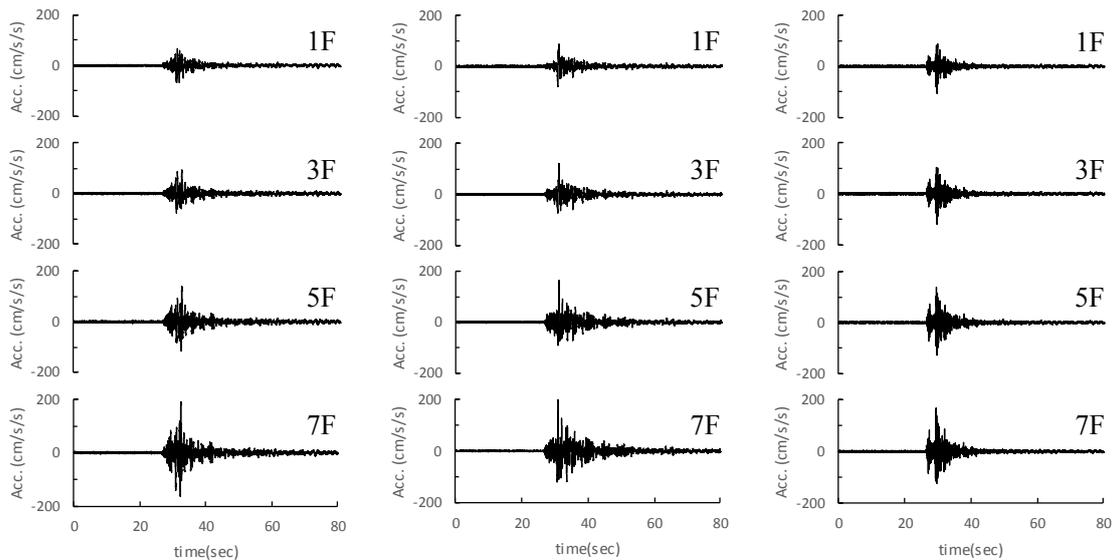
実験的な環境では震度相当値で 3 程度であれば弱震動でも主要動部は捉えられる事、長周期域でも入力が大きければ十分に計測が行える事は既に示した通りだが、実際の建物上での強震観測に適用した際にその性能に問題がないか、観測記録から何が分かるかを確認する必要がある。本年度には 6 月 18 日には大阪府北部の地震(Mj6.1)が、9 月 6 日には北海道胆振東部地震(Mj6.7)と 2 つの被害地震が発生した。ここでは一例として、ローコスト MEMS 加速度センサを使用したシステム[14]において得られた建物での強震観測記録について簡単に紹介する。

#### 3.1 2018 年大阪府北部の地震の観測記録

2018 年大阪府北部の地震における大阪市内の建物で得られた強震観測記録について報告する。当該建物は大阪市西区に立地する 8 階建て RC 造建物であり、竣工は 1975 年である。センサは 1 階、3 階、5 階、7 階に設置されており、2016 年 2 月より観測を行っている。写真 1 に建物外観を示す。図 4 に建物内で得られた加速度波形を、図 5 に各階と 1 階のフーリエスペクトル比を示す。



写真 1 観測建物外観



(a)建物短辺方向

(b)建物長辺方向

(c)上下方向

図 4 大阪市内の建物で得られた加速度波形

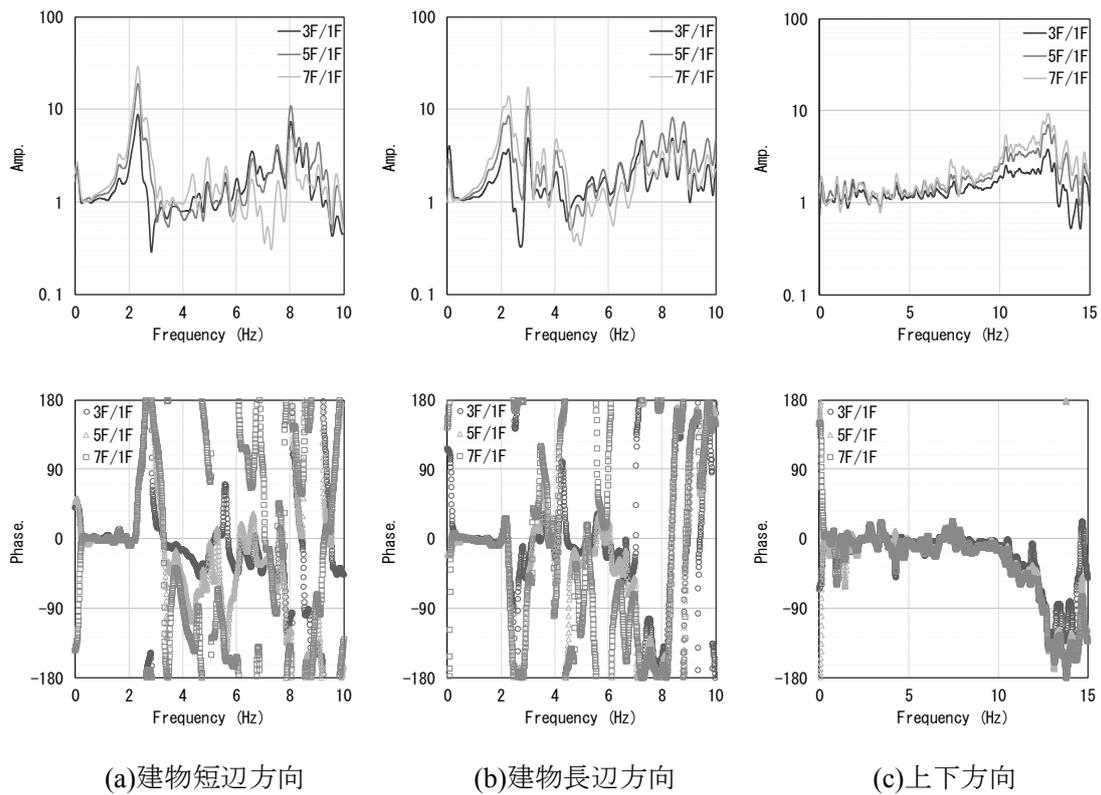


図5 各階と1階のフーリエスペクトル比

上階に行くにつれて1次固有周波数における振幅が大きくなり、位相についてもそれまではよく合っており、1次モードが卓越した挙動をした事が分かる。この規模の強震動であれば、実建物においても1次モードまで十分に計測が可能である事が確認できる。

### 3.2 2018年北海道胆振東部地震における建物観測記録

北海道胆振東部地震発生時に札幌市内の建物で得られた記録について紹介する。当該建物は札幌市中央区に位置する1968年竣工の4階建てRC造建物であり、3階部分でセットバックしている。センサは1階と4階に設置されており、2016年3月より観測を行っている。図6に得られた加速度波形を示す。

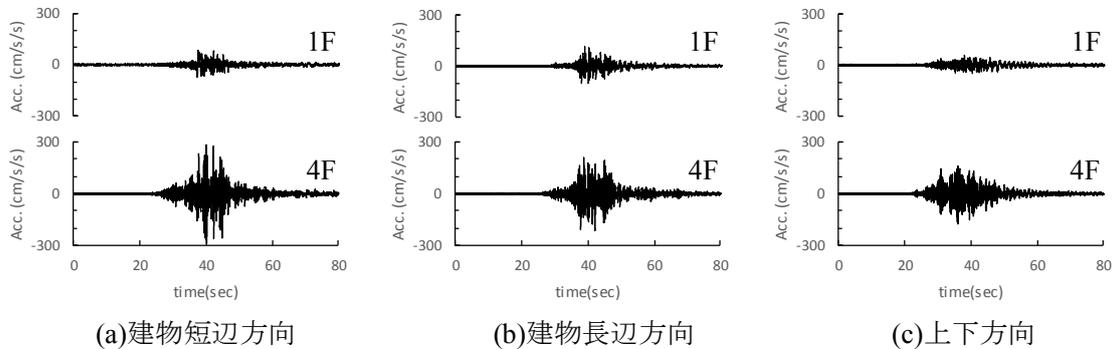


図6 札幌市内の建物で得られた加速度波形

本観測点では無停電電源装置を併設していたが、地震に伴うブラックアウトにより、9月

6日3時25分48秒にネットワーク切断が発生し、9月7日15時40分9秒に復旧するまで観測は停止してしまっただけでなく、余震記録を含めて複数の観測記録が得られている。図7は観測記録の主要動部を用いてMOESP法[15]を用いて同定した1次固有周波数の変動である。本震を受けて固有周波数が低下し、やや回復している傾向が見える。

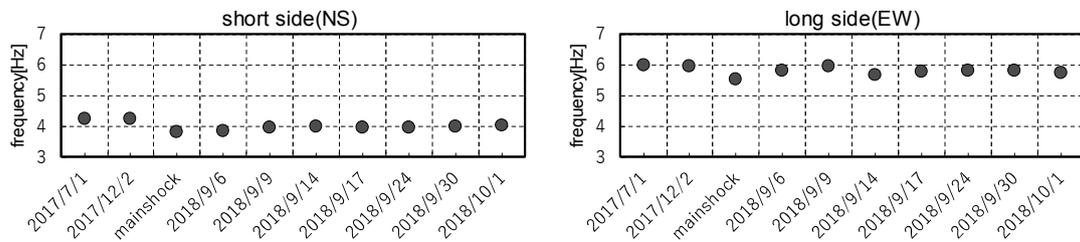


図7 札幌市内の建物の固有周波数の変化

本震記録中の1階センサと4階センサのランニングスペクトル比を図8に示す。主要動部で固有周波数が低下している事が分かったと共に、建物長辺方向の結果に注目すると、1次周波数近傍で異なる周波数帯域に卓越がある事がうかがえる。これはねじれ特性であると推察されるが、観測記録が得られた事によって初めて得られた知見であると言える。また、100秒以降については、建物長辺方向、上下方向記録でピークが明瞭に見えなくなっているが、前述の自己ノイズに埋もれてしまっていると推察される。

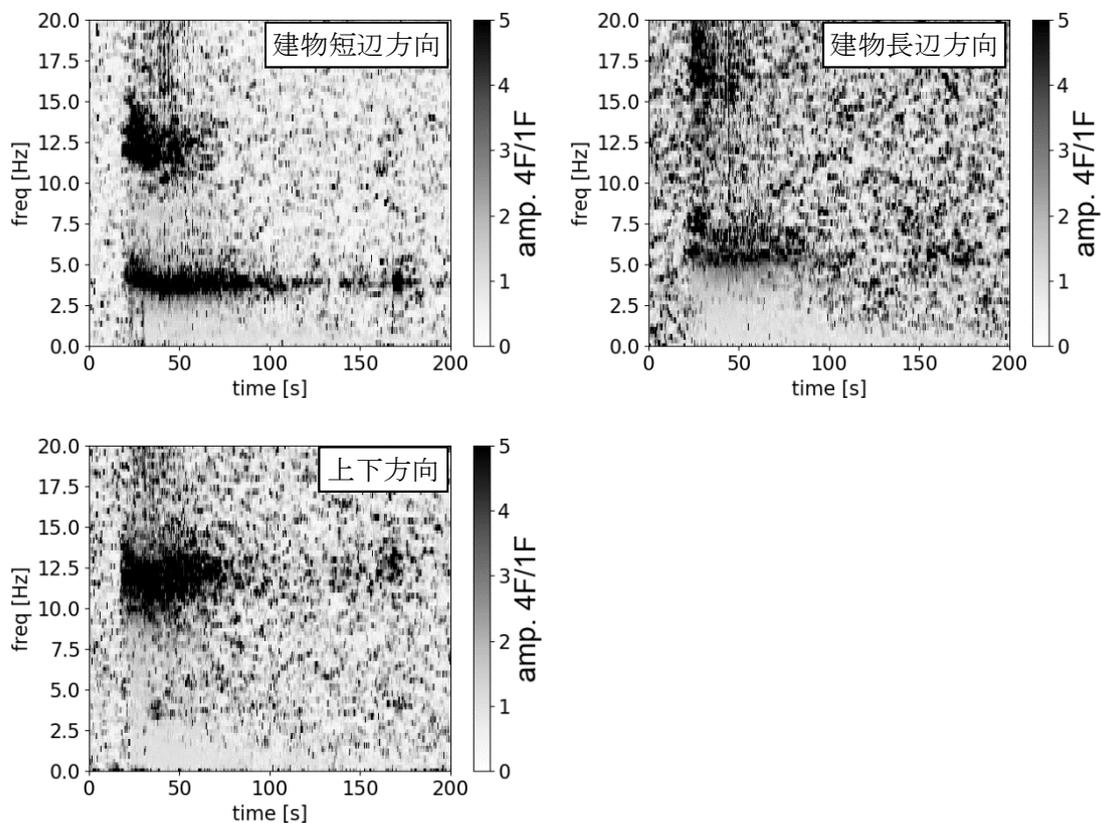


図8 胆振東部地震本震時における札幌市内の建物内観測記録のランニングスペクトル比

なお、ここで紹介した札幌市内の建物における北海道胆振東部地震本震観測記録については web 上で加速度時刻歴波形を公開している[16]。強震動観測時におけるローコスト MEMS 加速度センサの性能がどのようなものであるかを実際に確かめて頂ければと思う。

#### 4. 更なるローコスト化と新しい強震観測

大量生産によるスケール効果が MEMS センサが安価である所以である事は既に述べたとおりだが、実際我々の生活レベルでは既に至る所で MEMS センサが使われており、多用途で大量生産されている物を転用するというのも更なるローコスト化に寄与する所である。例えば全世界での利用台数は 40 億に達すると推計されているスマートデバイスにはそのほとんどに MEMS 加速度センサが組み込まれており、無線通信、GPS 等の強震観測に必要である機能を有している。これらをセンサネットワークとして強震観測に応用する取り組みも様々な機関で行われている[例えば 17,18]。

長期的な強震観測を行う上で、最も障害となるのが、記録の回収や、維持管理に関する人的コストである。従ってなるべく現地に行く回数を減らしてやる事はローコスト化に直結する。近年ではストレージも大容量化したため、ストレージ内に記録を収録しても頻繁に記録の回収に行く必要はなくなったが、インターネットを利用した遠隔による記録の回収がいかに有効であるかはここで改めて言及するまでもない。データサーバを構築するとその維持管理には膨大なコストが掛かる。そこでパブリッククラウドサービスを利用する試みも出てきている[例えば 14,18]。強震観測はいつ発生するか分からない地震に備えて常時稼働しなくてはならないというシステムの性質上、メンテナンスが必須であるが、パブリッククラウドサービスを用いた管理ではシステムのアップデートやセンサの死活監視が容易である事や、観測点数の増加等に伴うストレージの増設が用意に行えることも挙げられる。

給電方式についても、従来型のセンサに比して省電力である事を生かして、ソーラーパネルを用いて常時計測するシステム[19]や、電池式でも数年単位で連続観測を行えるシステム[20]も登場している。電池式、充電式であれば配線が不要となり、導入時のコストダウンに大きく寄与するのはもちろん、臨時観測を行う場合や地震による停電等で商用電源が使えない場合には威力を発揮する。こうした無線技術は、相互作用系、地盤建物系の観測といった多点配置を必要とする観測の普及を可能とする事が期待される。

#### 5. まとめ

本稿では強震観測の普及を阻害する主な要因となっているコストに焦点を当て、ローコスト MEMS 加速度センサの強震観測における性能とそれを用いた新しい強震観測について示した。本日の話題提供でも挙げられている通り、既にモニタリングを対象とした観測では MEMS センサを使用したローコストシステムが主力となっており、ユーザのメリットとコストのバランス、前章で述べたような IoT 技術との親和性の高さ、維持管理やリプレースの手軽さ等から、今後の強震観測の主流となっていく事は間違いないだろう。

一方で、これまで見てきたように、ローコスト MEMS センサには常にその自己ノイズという性質が付きまとうため、これまで行われてきた強震観測に直ちに取って代わるものではない。例えば、現在の耐震設計の基準とされている層間変形角の算出等を行う場合は工夫や割り切りが必要である。また、微動や震度階で 0 や 1 に相当する微小地震を観測することは出来ないため、設置数が増加したとしても有意な観測記録数が大幅に増加するという事にもならない。しかし近年頻発している内陸地殻内地震に対して、被害地震発生時に適切

な強震観測記録がない事によって分析が困難となっている例を考えるに、広く網羅的に地震計を配置する事には意義があると言える。いわば「大きな地震が発生した際の保険」としての導入であるが、高性能なセンサを使った詳細解析を目的とする基幹観測とこのような大量普及を目指した廉価なシステムの使い分けを行う事がこれからの強震観測の鍵である。

## 参考文献

- [1] 藤原広行, 功刀卓, 安達繁樹, 青井真, 森川博之: 新型 K-NET : 強震動データリアルタイムシステムの構築, 日本地震工学会論文集, 第 7 巻, 第 2 号 (特集号), pp.2-16, 2007
- [2] 鹿嶋俊英: 建築研究所の強震観測の 60 年, 建築研究所講演会, 2017
- [3] 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, 建築研究資料, No.135, 建築研究所, 2012
- [4] 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦, 中村充, 井川望, 保井美敏, 境茂樹, 森下真行, 北堀隆司, 上林宏敏: 強震下の超高層集合住宅の挙動説明と今後の被害提言に向けた取り組み, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻, 第 5 号 (特集号), 2016
- [5] 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, 第 20 巻, 第 46 号, pp.901-904, 2014 年 10 月
- [6] 清水善久, 小金丸健一, 中山渉, 山崎文雄: 超高密度地震防災システム (SUPREME) の開発, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1285-1288, 2001
- [7] 山本健史, 保井美敏, 成田修英, 小阪宏之: 振動モニタリングに基づく地震後の健全性評価とその情報提供に関する技術, JACIC 情報 118 号「自然災害と ICT」, 2018
- [8] 坂上智, 村上敬三, 北川慎治: MEMS 応用感振センサを用いた構造ヘルスマモニタリングシステム, 富士電機技報, Vol.87, No.1, pp.63-67, 2014
- [9] 市川真太郎, 松崎政彦, 田村博規, 富岡昭浩: 構造ヘルスマモニタリング向け加速度計 JA-70SA の開発, 航空電子技報, No.37, pp.9-14, 2015
- [10] 三浦篤, 仲野健一, 境茂樹: スマートデバイスに搭載された MEMS センサの地震計としての性能把握試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.209-210, 2018
- [11] 森田高市, 長谷川隆: 鉄骨部分骨組の振動台実験に基づく梁端部の損傷検知手法に関する研究 (その 3) 試験体の固有振動数の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.883-884, 2017
- [12] 小阪宏之, 鹿嶋俊英: 安価な MEMS 加速度センサの振幅特性及び位相特性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.211-212, 2018
- [13] 成田修英, 保井美敏, 山本健史, 小阪宏之: 安価な MEMS 加速度計の低周波数領域における周波数応答特性検証とその方法, 日本地震工学会大会 2017, P3-25, 2017
- [14] 矢吹慎悟, 保井美敏, 成田修英, 山本健史, 石田琢志, 渡壁守正: 安価なシングルボードコンピュータと MEMS 加速度計を用いた地震情報配信システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.5-6, 2016
- [15] Verhaegen, M. and P. Dewilde: Subspace model identification Part 1. The output-error state-space model identification class of algorithms, International Journal of Control, Vol. 56, No. 5, pp. 1187-1210, 1992
- [16] 戸田建設: 平成 30 年北海道胆振東部地震の観測データを公開, 戸田建設ニュースリリース, <http://www.toda.co.jp/news/2018/20181016.html>
- [17] Kong Q., M. A. Richard, D. K. Monica, H. H. Thomas, and B. Julian: Structural Health

Monitoring of Buildings Using Smartphone Sensors, Seismological Research Letters, Vol. 89, Number 2A, pp.592-602, 2018

- [18] 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
- [19] 富岡昭浩, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト その2 長期振動計測システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.955-956, 2016
- [20] 鈴木誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之: 同時送信型フラッドィングを利用した構造モニタリング, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J100-B, No. 12, pp.952-960, 2017

第6回強震データの活用に関するシンポジウム(2018)  
将来の大地震に備えて

---

2018年12月

編集  
著作人

一般社団法人 日本建築学会

〒108-8414 東京都港区芝5丁目26番20号

TEL 03-3456-2051

FAX 03-3456-2058

<http://www.ajj.or.jp/>

印刷所

株式会社 エーヴィスシステムズ

---