

# 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。

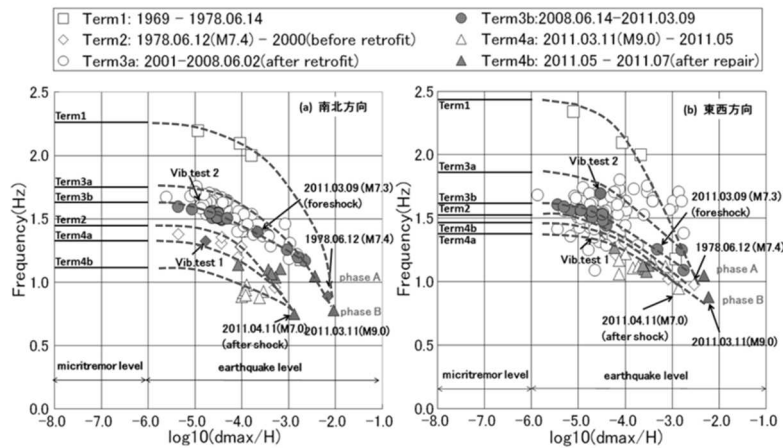


図1 東北大学人間環境系建物の変形角と固有振動数の関係の変化[8]

## (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。

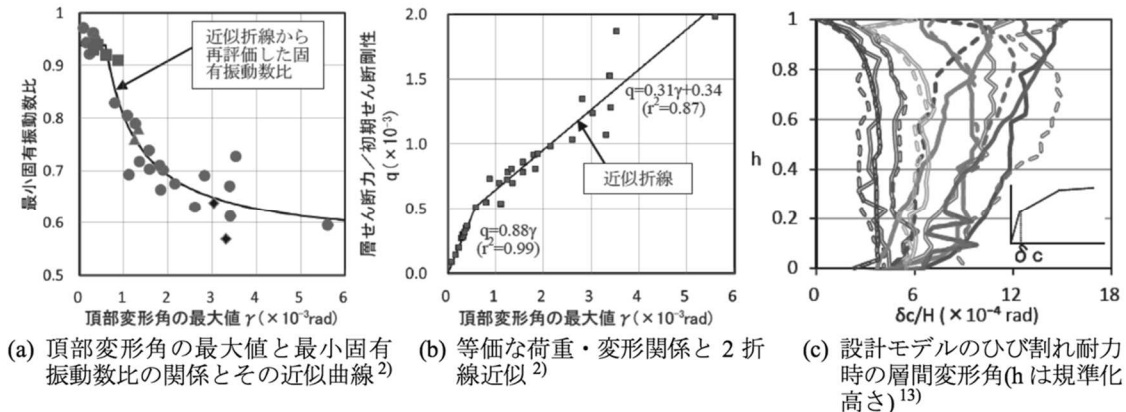


図2 超高層強震記録から求めた振動数低下率、荷重変形、設計モデルの層間変形角[11]

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。

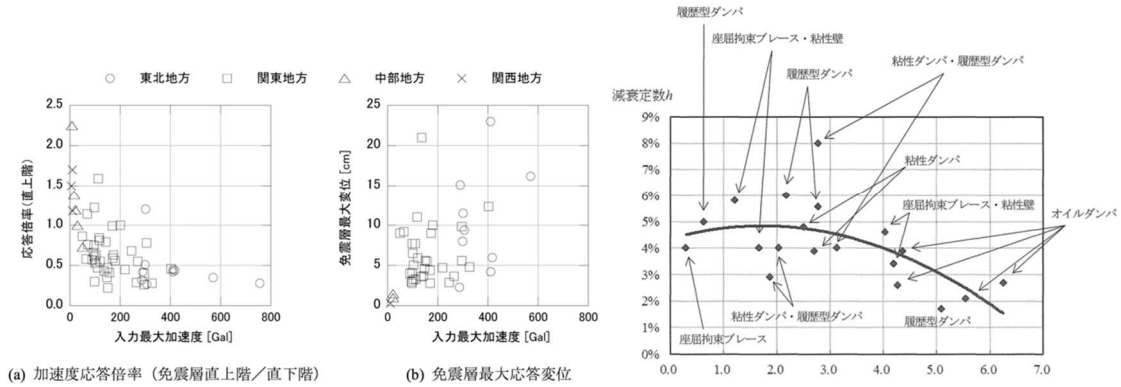


図3 免震建物強震記録の分析[15] 図4 パッシブ制振建物の固有振動数と減衰定数[16]

#### (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。

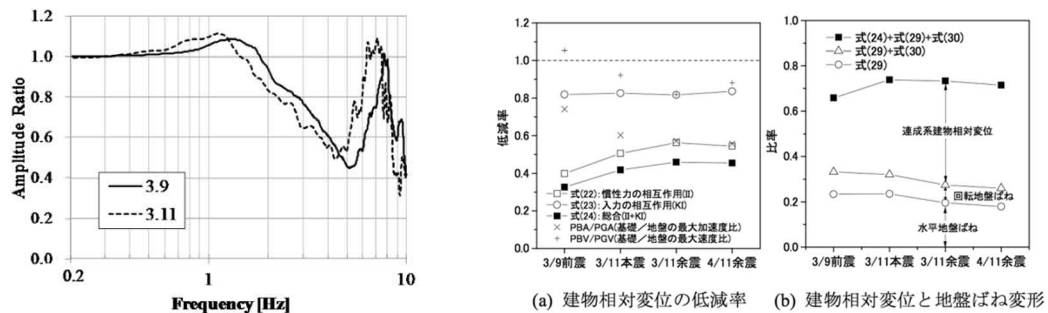


図5 地盤の非線形化が基礎入力動に及ぼす影響[17] 図6 相互作用効果の検討[19]

### 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。

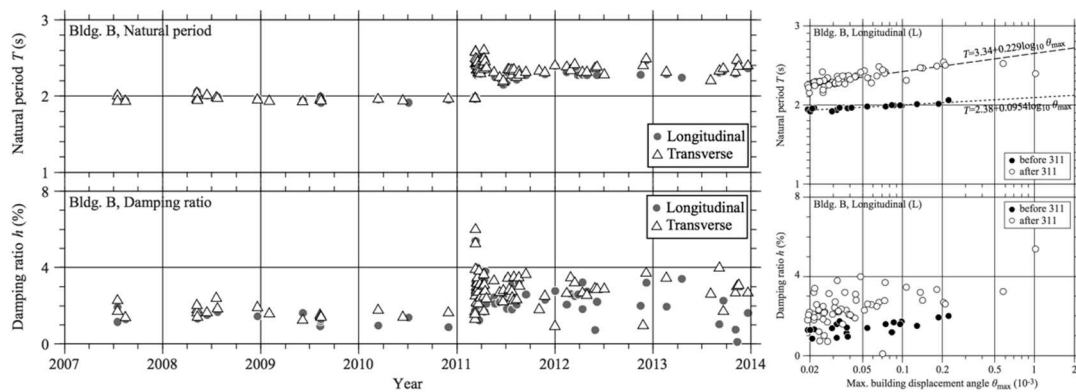


図7 超高層 RC 建物の振動特性の経時変化と本震前後の振幅依存性[20]

### 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)