

進化する地盤-建物系強震観測 Evolution of Strong Motion Observation for Ground-Building System

鹿嶋俊英¹⁾
Toshihide Kashima

1) 国立研究開発法人建築研究所, 主任研究員, 博士(工学) (茨城県つくば市立原 1, kashima@kenken.go.jp)
Building Research Institute, Senior Research Engineer, Dr. Eng.

1. はじめに

日本で強震計が開発されてから 65 年、建物を対象とした強震観測網の整備が始まってから 60 年が経とうとしている。この間、強震計の改良と観測網の整備は弛まなく続けられ、繰り返し発生した大きな地震時に得られた強震記録は地震工学や耐震工学の研究者と技術者に貴重な知見を提供してきた。

強震観測技術の発展の中で、大きな転機となったのは 1970 年代のフィードバック式(いわゆるサーボ式)センサーの導入と、1980 年代のデジタル強震計の登場であろう。前者は従前の機械式のセンサーに比べて飛躍的な性能の向上を実現し、また強震計の小型軽量化に寄与した。後者は記録処理の省力化と強震記録の品質の向上に大きな役割を果たした。

そして 1995 年の兵庫県南部地震を迎えることになる。この地震の経験は強震観測の環境を劇的に変えた。その翌年の 1996 年には防災科学技術研究所の K-NET や KiK-net、気象庁の震度計、地方自治体の震度情報ネットワークの整備が始まり、現在 5,000 を超える強震計が全国各地に配備されている。それ以降地震のたびに、多くの高品質の強震記録が得られ、研究者や技術者はその強震記録を容易に入手できるようになった。これらはいずれも地盤上の強震観測であるが、豊富な強震記録はその応用研究の進歩の基礎となっている。

一方で、建物系の強震観測は、観測網の充実という視点では、地盤系の観測網ほど派手な進展はなかったように見える。それでも、建築学会の年次大会などで紹介された強震観測建物数は、2000 年代の 120 棟ほどから¹⁾、2010 年代には 500 棟弱に増加している²⁾。これは純粋な観測地点の増加に加え、2011 年東北地方太平洋沖地震などを経験し、観測記録が蓄積され、その分析や解析が活発に行われたことも要因であろう²⁾。

このような背景を踏まえ、近年の地盤と建物の強震観測の進化を多面的にとらえてみたい。

2. 観測技術

まずは、強震観測の基盤となる観測技術、すなわち強震計と呼ばれる観測機器や観測に関連する周辺技術の進展を見る。

2.1 強震計

図 1 に、強震計の主要な技術の変遷を簡単に示す。前述のように、フィードバック式に代表される電気式のセンサーの導入は 1970 年代に、デジタル強震計の普及は 1980 年代に始まった。例えば気象庁の 87 型電磁式強震計は、電磁式の加速度センサーと 16 bit の AD 変換器を有するデジタル強震計で、1988 年から主な気象台や測候所に配備が開始された。同時期に開発された SMAC-MD 型強震計は、フィードバック式の加速度計と 16 bit の AD 変換器を持つ。1993 年釧路沖地震では、釧路地方気象台に設置されていた気象庁の 87 型強震計と建築研究所の SMAC-MD 型強震計が最大加速度 1G 近い強震記録を収録し、デジタル強震計の威力を示した。1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の強震記録(いわゆる JMA 神戸)も 87 型強震計で得られたものである。

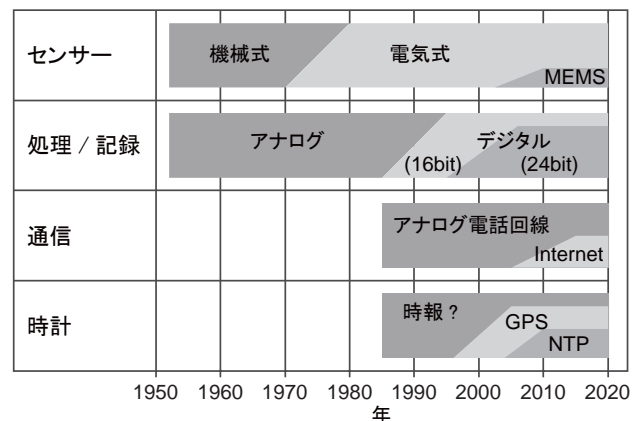


図 1 強震計の技術的変遷

さて、その兵庫県南部地震を受けて防災科学技術研究所の K-NET が設立されることになる。K-NET の強震計はフィードバック式センサーと 24 bit の AD 変換器を有しており³⁾、以降の強震計の標準的な仕様となった。K-NET が最初に導入した強震計は K-NET95 型と呼ばれ、その後 K-NET02⁴⁾、K-NET11 (A)型と機器の更新が行われ、分解能の向上、測定範囲の拡大、機能の追加が図られている。以降の標準的な強震計の仕様を表 1 に示す。

表 1 標準的な強震計の仕様

センサー	フィードバック式加速度計
サンプリング周波数	100 Hz
測定成分数	3 (水平 2, 鉛直 1)
測定範囲	±2G ~ ±4G
AD 変換器	24 bit
実効分解能	18~22 bit
時刻校正	GPS, NTP
通信機能	シリアル, Ethernet

一方、1996 年から気象庁が発表する震度は、震度計によって計測される方式に切り替えられた⁵⁾。震度計は、震度算出機能を有する強震計であり、強震計としての性能は K-NET とほぼ同等である。また、同時期に整備された各地方自治体の震度情報ネットワークの震度計の仕様も同様であり、時代の要請に応じて機能の強化が図られている⁶⁾。

これらの強震計(震度計)のフルスケールは±2G、±3G、±4G と種類があるが、例えばフルスケールが±2G と仮定すれば、24 bit の AD 変換器だと 1 単位が $4G/2^{24} \approx 0.23 \text{ mgal}$ (ミリガル= 10^{-3} cm/s^2)となる。実際には、総合的な分解能がそこまで向上したわけではない。実質有効な分解能はビット換算で 18 bit ~ 22 bit 程度である。例えば有効 bit 数が 18 bit なら分解能は 15 mgal 程となる。この結果、従来使われなかった小さな振幅の強震記録も解析できるようになった。条件が良ければ、地震ではなくとも微動レベルの記録も分析できる。

また、デジタル強震計にとって時計は必須の機能である。通常、強震計に内蔵されている時計は常に正確な時刻を保持するための校正機能を持っている。最近の強震計は、全地球測位システム(GPS)や Internet を通じたネットワーク・タイム・プロトコル(NTP)によって時刻を校正する。

2.2 多点観測

1996 年以降に建築研究所が設置した強震計も、初期の K-NET と同等の性能を有している。建築研究所が行っているような建物の観測と K-NET や震度計との大きな違いは、前者が複数の観測点を必要とすることである。複数の観測点で観測する場合は、各観測点に独立した強震計を置く場合(独立型)と、各観測点には加速度計を配して記録を 1 か所で行う場合(集中型)がある。その概念を図 2 に示す。

独立型は設置が容易だが、各強震計が連動、あるいは同期する工夫が必要になる。このため各強震計が精度よく時刻校正を行うか、連動・同期のための信号線を敷設することも多い。更に複数の独立型強震計を効率的に管理するために、制御用の PC を併設することもある。また、収録後各強震計で得られた記録を統合する手間が生じる。

集中型は加速度計と収録装置の間に加速度計用の信号ケーブルを敷設する必要がある。この場合、従来は専用ケーブルを用いて加速度計からアナログ信号を直接取り出していたが、最近では加速度計側で AD 変換を行い、Ethernet などを通じてデジタル信号を送る方法も取られる。既設の LAN を使えばコストを抑えられるが、通信容量やセキュリティ上の懸念から、新たにネットワークを引くことが多い。

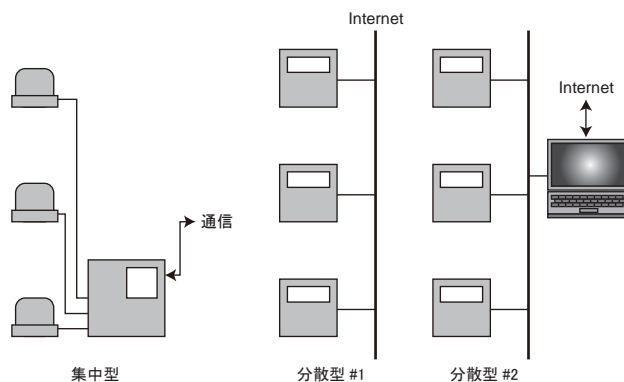


図 2 多点観測の方法

2.3 通信環境

デジタルの時代になって、強震計は標準的に通信機能を備えるようになった。通信手段は、当初はアナログの電話回線を介した通信が主流であったが、その後 ISDN などのデジタル通信網、そして最近では Internet へと移行してきた。それに伴い通信速度も向上している。強震計の通信機能の実装は、遠隔での強震計の管理、記録の回収を実現する。その結果、強震記録や関連情報の収集が極めて迅速に行えるようになった。Internet に接続できる強震計では、常時接続環境の構築も容易で、強震記録の即時処理も可能となる。

2.4 収録システム

強震記録は、その開発当時からトリガシステムによって収録されてきた。あるトリガレベルを設定し、信号がそのトリガレベルを超えると収録を開始し、トリガレベルを下回ってから一定の時間が経過したら収録を終える。アナログ強震計のトリガレベルは 5 gal から 10 gal で、当然トリガレベル以前の記録は収録されない。デジタル強震計では、トリガ発生の前の信号から収録する、プレトリガ記録を容易に実現できるようになった。プレトリガ記録の概念を図 2 に示す。デジタル化された記録をメモリ内に保持しておくことができるからである。トリガレベルは任意に設定することができ、設置環境に応じて柔軟に対応できる。ちなみに建築研究所の観測網では標準で 2 gal、地中のセンサーでは更に小さく設定している。この結果、強震記録の始まり、すなわち P 波到達以前から収録できるようになった。

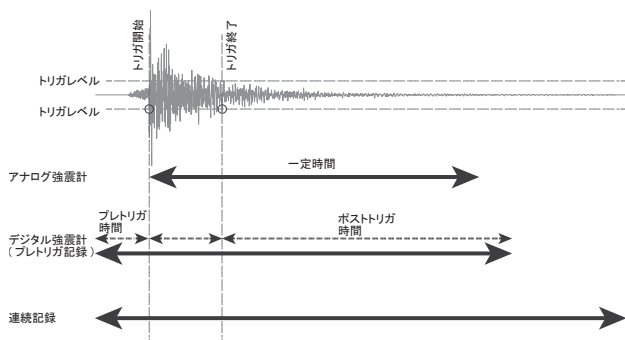


図 3 プレトリガ記録の概念

強震計の多くは収録した強震記録を、コンパクトフラッシュ(CF)カードのようなスタティックな記憶媒体に保存する。強震計の収録可能な時間長、あるいは記録数はその記憶媒体の容量に依存する。近年の記憶媒体の大容量化と価格の低下は著しく、最近の強震計はそのような大容量記憶媒体もサポートしている。その結果、トリガ記録だけでなく連続記録を収録することも可能となった。例えば、32 GB の記憶容量があれば、3 成分の連続記録を 1 年以上に渡って収録することができる。連続記録であれば、例えば震源が遠く加速度レベルの低い長周期地震動やそれに対する超高層の応答など、トリガシステムの苦手とする記録も取り逃がす恐れはない。建物の観測であれば、常時微動記録なども分析に用いることが可能となる。

2.5 新技術の導入

近年の新たな動きとしては、MEMS センサーを使った計測システムの普及が挙げられる。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサーは、センサーと必要な電子回路を半導体上に集積したもので、小型で安価なことが特徴である。地震動の計測に使われるのは加速度センサーである。MEMS 加速度センサーはゲームのコントローラやスマートフォンなどに用いられる微小なものから、地震計測を目的に開発されたある程度の性能を有するものまでさまざまである。基本的には加速度センサーの感度はその錘の質量に依存し、質量が大きいほど性能の高いセンサーが実現できる。またコストは製造数と歩留まりに左右される。

このようなセンサーは、センサー自体が収録機構を持たず、Ethernet や他のインターフェイスを通じて加速度波形のデジタル信号を常時出力するものが多い。記録の収録は専用の収録装置や PC を用いて行うことになる。比較的廉価であること、PC との親和性が高いことなどからモニタリングシステムによく用いられる。

さて、近年普及が著しいスマートフォンやタブレットなどの携帯端末は、標準として加速度センサー、GPS、通信環境を搭載している。これらの機能を利

用すれば、ソフトウェアだけで震度計や強震計が実現できることになる^{7),8)}。このようなソフトウェアは、Internet 接続を前提とした端末の特性を利用して、揺れの情報を集約する機能も併せ持っている。世の中にある膨大な数の携帯端末の一部でも活用できれば、超高密度の観測が実現できる可能性がある。

従来型の強震計では、一部機種では加速度値や震度を知らせるモニタ画面があるものの、その情報を得るには強震計のそばに行かねばならず、波形を確認するには更に処理が必要であった。一方、建物管理者の震災時の対応を考えると、波形を含めたあらゆる情報に即座にアクセスできることが望ましい。

特に超高層建物では管理部署や防災センターが低層階にあり、担当者が建物頂部の揺れを実感できないと、対応の遅れに繋がりがねない。このため、最近の強震観測では地震直後に観測結果を表示できるモニタリング装置を併設する例も増えている。モニタリング装置を有する実在の観測システム例を図 4 及び図 5 に示す⁹⁾。この例は基礎免震構造の庁舎で、中央監視室では常時波形をモニタしており、更に震度 3 以上の揺れを検知したらロビーの大型モニタに震度や波形などを表示する。

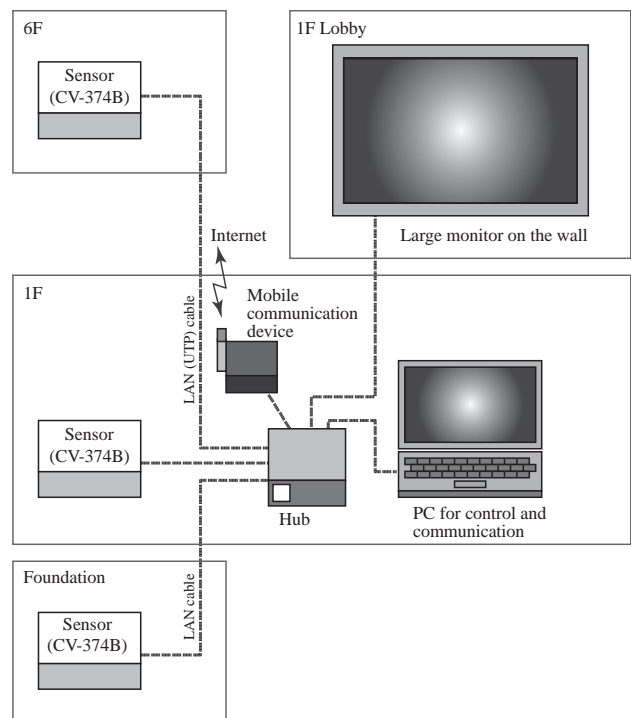


図 4 ネットワーク接続型の強震計を使ったシステム事例



図 5 モニタ画面例。震度 3 以上の揺れが観測されるとロビーのモニタに揺れの状況を表示する

3. 強震記録の利活用

地盤や建物で得られた強震記録は、研究者や技術者の分析や解析を経て、その成果が社会に還元される。解析手法や分析技術に短期的に飛躍的な進展があったとまでは言えないが、多様で高品質の強震記録が豊富に供給されることによって、解析精度の向上や適用範囲の拡大が進んでいる。本章では得られた強震記録がどのように利用・活用されているかを見てみたい。

3.1 経験的手法による地震動予測

距離減衰式に代表される経験的地震動予測式の構築には、良質な強震記録の蓄積が欠かせない。1996 年から構築された地盤系の強震観測網はこの要求に答えてきた。その後の活発な地震活動も寄与し、現在、様々な地震、震央距離、地盤環境下で得られた多数の強震記録が利用可能であり、種々の距離減衰式が提案されている(例えば 10), 11), 12), 13)。また、2011 年東北地方太平洋沖地震など、過去に経験したことのない強震記録が得られると、適宜経験式の修正が図られる。

また、応答スペクトルと位相スペクトルの経験式(距離減衰式)を構築し、それらを使って地震動波形を作成する方法も提案されている(14)~17)。経験式の構築には、K-NET や KiK-net でなどで得られた豊富な強震記録が用いられている。

3.2 半経験的手法による地震動予測(18), 19)

ある地点の地震動を半経験的に予測する手法として、経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法が挙げられる。経験的グリーン関数法では、地震動予測を行う地点で得られた強震記録が必要となる。全国に展開された強震観測網は、このような手法の適用可能性を大幅に広げた。また統計的グリーン関数法でも、伝播経路(減衰)特性や地震波形の経時特性などのパラメータを、経験的手法によって決める

ことも行われる。

なお、理論的手法や数値解析によって地震動予測を行う場合でも、その手法の妥当性や適用性を判断するために観測記録が重要な役割を果たす。

3.3 建物の振動特性の把握

建物系の強震観測では、建物の振動特性の把握が第一の目的となる。設計に必要な建物の振動特性は、経験式や数値解析で求めることができるが、実際に建てられた建物の振動特性が想定した値と一致するとは限らない。例えば地震応答が弾性範囲内であったとしても、固有周期が地震動の卓越周期と一致すれば共振が生じるし、減衰の過小評価は想定を超える応答振幅をもたらす可能性がある。このため、実際の建物の振動特性を知り、設計手法を検証すること、そして振動特性推定手法の精度向上を図ることは重要である。

また、建物の固有周期や減衰定数が応答振幅によって異なる、いわゆる振動特性の振幅依存性は従来から指摘されていたが²⁰⁾、大きな振幅領域での実証事例は少なかった。近年は、2011 年東北地方太平洋沖地震を経験したこともあり、様々な建物で小振幅から大振幅までの強震記録が分析され、振動特性の振幅依存性は一般的な現象であることが確認されている(例えば 21), 22), 23)。例として、つくば市に建つ建築研究所の新館(8 階建て SRC 造)の固有周期と減衰定数の最大建物変位角(頂部の最大変位を高さで割った値)との関係を図 6 に示す。振幅が大きくなると固有周期が長くなる関係が明瞭に表れている。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の前後で明らかな差異が認められる。減衰定数については、一般に評価値がばらつき解釈が難しいが、最新のデータを使って定式化の試みも行われている²⁵⁾。

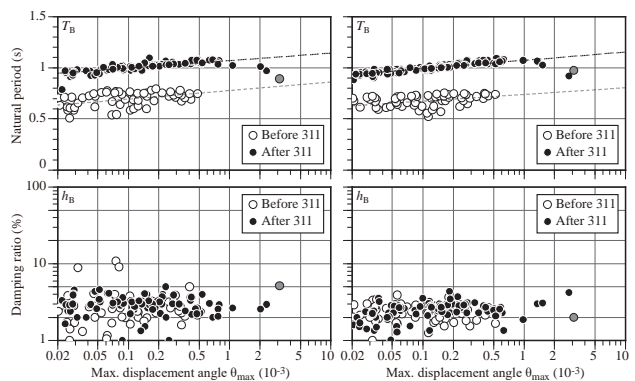


図 6 建築研究所新館の固有周期(上段)と減衰定数の振幅依存性

更に、長期に渡る強震記録が蓄積されることで、振動特性の経年変化も明らかになってきた。大きな地震動を経験しなくても、新しい建物の固有周期は

竣工後何年かは延び続けることがいくつかの建物で確認されている。図 7 は建築研究所の新館建物(SRC 造 8 階建て)の振動特性の経年変化を表している。1998 年の竣工直後から強震観測を行っており、固有周期は 2006 年頃まで時間の経過とともに延びている。2006 年以降固有周期は安定したように見えるが、2011 年東北地方太平洋沖地震によって軽微な被害を受け固有周期が顕著に延び、その後は安定している。

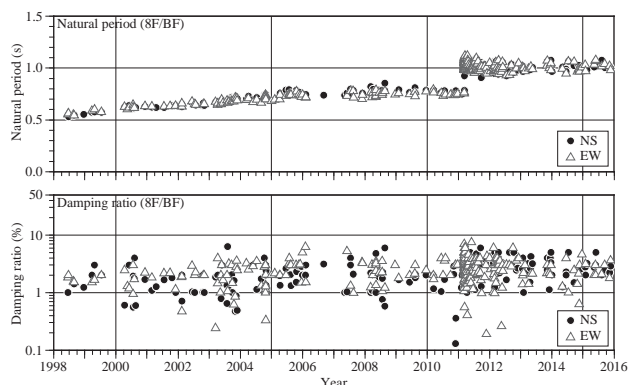


図 7 建築研究所新館の固有周期(上段)と減衰定数の経年変化

3.4 免震・制振技術の検証

免震構造や制振構造などの新しい耐震技術は、1995 年兵庫県南部地震を経て本格的に普及した。2011 年東北地方太平洋沖地震は、これら技術の真価が問われる最初の機会となった。強震記録の分析によると、免震構造や免震建物は概ね期待通りの挙動を示した(例えば 26), 27)。

一例として、2.5 節で示した免震建物で 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に得られた強震記録と、強震記録から算出した免震層のせん断力とせん断変形との関係を図 8 及び図 9 に示す。強震観測記録は、免震装置の実挙動やメンテナンスに関して有用な情報を提供してくれる。

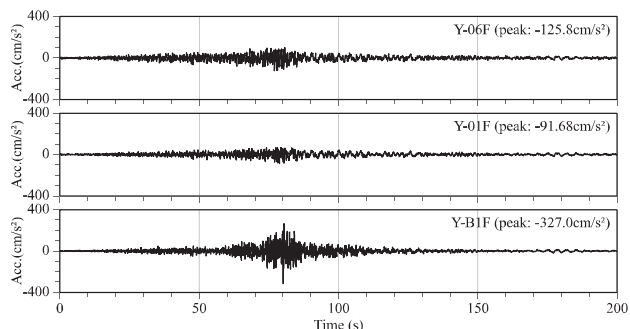


図 8 6階建て免震建物で得られた2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録(上段, 下から基礎上, 1階床, 6階床の加速度記録)

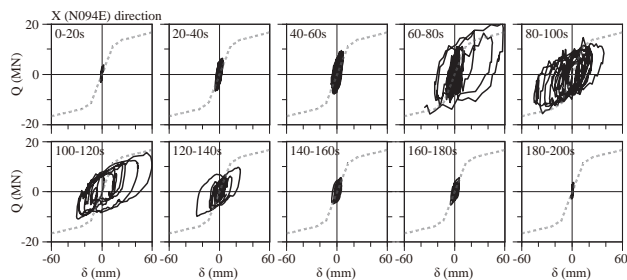


図 9 6階建て免震建物で得られた2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録から算出した免震層のせん断力-せん断変位関係

3.5 長周期・長時間地震動と長周期構造物の応答

長周期地震動に対する懸念は、2003 年十勝沖地震で顕在化し、2011 年東北地方太平洋沖地震で現実のものとなった。マグニチュード 9.0 の巨大地震から発生した長周期地震動は、震央から 800 km 近く離れた大阪湾岸の超高層建物を大きく揺らし、内装材や設備機器に被害を与えた。ここで得られた強震記録は、建物の 52 階で両振幅 2.7 m に及ぶ揺れを明瞭に捉えた(図 10)。また、この経験がその後実施された耐震改修に繋がっている 29)。

また、特筆すべきはこのような強震記録の継続時間の長さである。前述の大阪湾岸の超高層建物では 800 秒近く建物は揺れ続けた。また、東京周辺の超高層建物では概ね 600 秒ほど揺れが継続している。多くの強震計は、このような長時間の強震記録の収録に成功している。

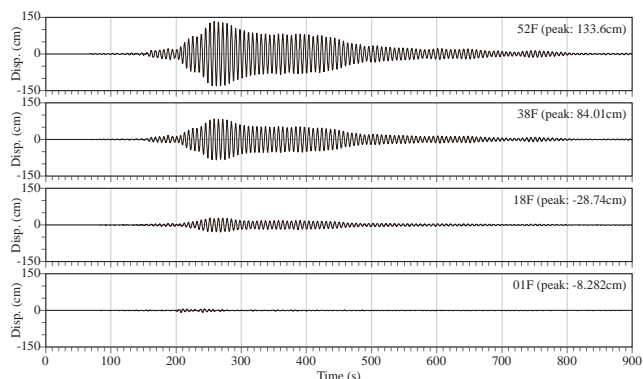


図 10 大阪湾岸に建つ超高層建物の強震記録(下から1階, 18階, 38階, 52階各床の変位記録)

3.6 損傷を受けた建物の挙動

2011 年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方に建つ多くの建物は、建設以来最も激しい地震動を経験した。建築研究所の強震観測の対象となっている建物でも、軽微な被害を受けた事例があった 27)。これらの建物で得られた強震記録は、構造部材の損傷による振動特性の変化を明瞭に捉えてい

る。この中でも、東北大学人間環境系研究棟の強震記録は、大破した建物で得られた希少な強震記録である(図 11)。この建物は、1978 年宮城県沖地震など何度も大きな地震動を受け、耐震改修なども行われており、長期に渡ってその振動特性が詳細に検討されている(図 12)。

被災した建物での強震記録は、まだ観測事例が豊富とは言えないが、建物の損傷検知や耐震性能評価の技術開発の有用な資料となりうる。

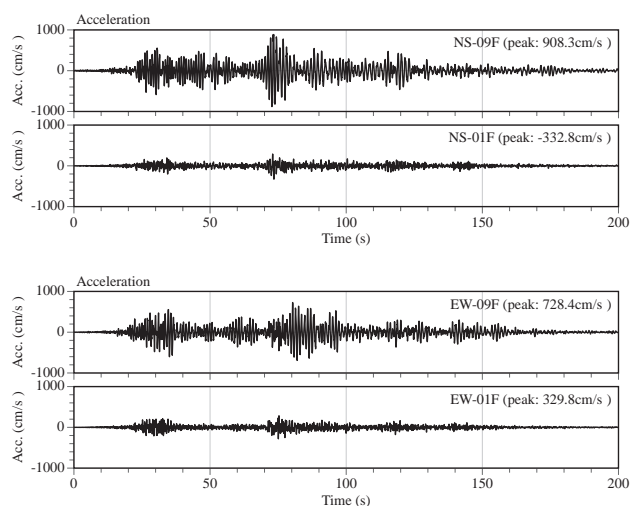


図 11 東北大学人間環境系研究棟で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震記録(上段 NS 成分, 下段 EW 成分, それぞれ上が 9 階床, 下が 1 階床で得られた加速度記録)

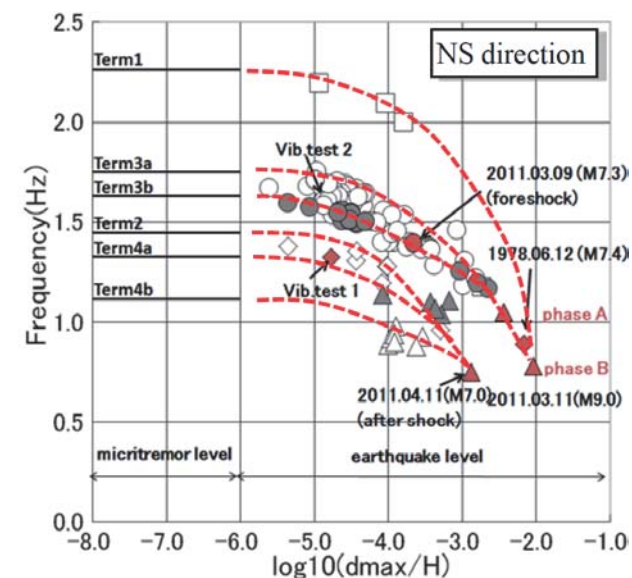


図 12 東北大学人間環境系研究棟の固有振動数の変化³⁰⁾

4. 強震観測を取り巻く環境と将来の課題

4.1 地盤系の観測網

地盤系の強震観測地点は、K-NET と KiK-net、気

象庁震度計、各地方自治体の震度情報ネットワークの震度計を合わせると優に 5,000 を超える。これほどの規模の観測網を維持管理してゆくには多大な予算と労力を必要とするが、これまでに得られてきた成果は何ものにも代えがたい。これまでの成果と将来に渡って果たすべき役割に対して関係者の理解を頂き、安定的かつ恒久的にこれらの観測網が稼働することが切に望まれる。

1995 年兵庫県南部地震の「震災の帯」に代表されるローカルな地盤や地形の影響は、その後の地震でも顕在化している。最近でも、2016 年熊本地震の益城町のように、極近傍での地震動特性の違いや被害の差異が議論となっている現在恒久的に設置されている地盤系の強震観測地点は、全国で 5,000 地点以上あるが、それでも極めてローカルな地形や地盤の影響は捉えきれない。このような局所的な地形や地盤の影響を恒久的な観測施設で把握するのは現実的には難しいので、機動的な余震観測が有効な手段となろう。

4.2 建物系の観測網

建物系の強震観測地点の数は、明らかになっているものだけで 500 地点弱、明らかになっていない観測地点も相当数存在すると推察される。数としては相当数あるように見えるが、対象建物や地域に偏りがある²⁾。これは観測を行っている機関が、建築研究所などの公的機関、大学などの教育機関、建設会社などの民間機関と多岐にわたり、観測目的も様々であることから、仕方ない面もあるが、少なくともそのような実態を正確に把握しておく必要がある。強震観測小委員会では強震観測台帳の整備などを通じてこの課題に取り組んでいる。

免震構造や制振構造に関していえば、その黎明期には、多くの場合、強震観測が行われ、その効果の検証が行われていた。技術が普及し一般的なものになった現在では、強震計が取り付けられる事例は相対的に減少しているようである。しかしながら、2016 年熊本地震でも設計変位を超える応答が報告され³¹⁾、長周期地震動が懸念される現状を見ると、免震構造や制振構造の強震観測の役割はまだ終わっていない。

4.3 観測体制

地震の発生確率は数十年、時には数百年の長いスパンで語られる。そして、地震は必ずしも警戒している場所で起きるわけではない。このような地震によって生じる強震動を観測するためには、長期間の安定した観測を実現する必要がある。また、建物の観測の場合は、長期間の観測を通じて判ってこくことも多い。建物の竣工から取り壊しまで、そのライフタイムを通じた観測事例は貴重である。しかし、数十年間の強震観測を行うには課題も多い。これまで述べてきたように観測技術は年々進展しており、

設置している機器の陳腐化は避けられない。常時稼働による劣化もあり、強震計や関連装置は定期的に更新が必要だが、種々の制約が存在する。強震観測を取り巻く環境は常に変化しており、関係者の理解を継続的に得られる努力が求められる。

4.4 強震記録の数値データ

K-NET、KiK-net 及び気象庁震度計で得られた強震記録の数値データはウェブなどから入手可能であり³¹⁾、地方自治体の震度計の強震記録の数値データも気象庁³³⁾、³⁴⁾や SK-net³⁵⁾などを通じて一部入手できる。

一方、建物で観測された強震記録の数値データを入手できる機会は限られている。これは、そもそも民間機関の観測では公開する意味も義務も存在しないし、公的機関であっても特定の目的をもって観測を行っているのであれば、その目的以外の用に供するのは難しい。また建物の応答を含んだ強震記録は建物の特性を反映しており、建物の所有者や利用者の意向も無視できない。このような状況の中、建築研究所は2014年から、ほとんどの建物の強震記録の数値データの一般への公開を開始した³⁶⁾。これまで多くの方に利用していただいております、更に多角的に検討していただき、有意義な成果が得られることを期待している。

5. おわりに

これまで述べてきたように、関連技術の発展により強震観測自体の難易度は下がり、多くの良質の強震記録が得られるようになった。強震記録を取ることとは目的ではなく、得られた強震記録が何を生み出したかが問われるようになった。この意味では強震観測の成果をきちんと整理して継承してゆくことが重要である。

21世紀に入ってからの日本の被害地震は、気象庁が命名したものだけでも8つに及ぶ。更に、東北地方太平洋沖地震では、本震に加え被害を伴う余震や誘発地震が多数発生している。我々は巨大なプレート境界の地震から、内陸部の活断層による地震まで多彩な地震を経験した。また、地震調査研究推進本部に拠れば、南海トラフで発生する巨大地震が懸念され、東北地方太平洋岸が大きな地震動に襲われる確率は高まっている³⁷⁾、³⁸⁾。地震に関する社会的関心は、まだ高い。その関心を、いかに強震観測への理解へ繋げてゆくかが課題である。

6. 参考文献

- 1) 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年2月
- 2) 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

- 3) 木下繁夫, 上原正義, 斗沢敏雄, 和田安司, 小久江洋輔: K-NET95型強震計の記録特性, 地震第2輯, 第49号, pp.467-481, 1997年
- 4) 藤原広行, 功刀卓, 安達繁樹, 青井真, 森川信之: 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年
- 5) 気象庁監修: 震度を知る, ぎょうせい, 1996年9月
- 6) 総務省消防庁: 次世代震度情報ネットワークのあり方検討委員会中間報告書, 2005年3月
- 7) i震度, 白山工業株式会社, <http://www.hakusan.co.jp/yure/ishindo/>
- 8) Qingkai Kong, Richard M. Allen, Louis Schreier and Young-Woo Kwon: MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond, Science Advances, Vol. 2, no. 2, e1501055, February 2016
- 9) 鹿嶋俊英, 小山信, 飯場正紀, 森田高市: つくば市庁舎の強震観測, 日本地震工学会大会-2013梗概集, 日本地震工学会, 2013年11月
- 10) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999年9月
- 11) 西村利光, 堀家正則: 強震ネットワーク(K-NET)データから推定した水平・上下最大加速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp.63-70, 2003年9月
- 12) 堀家正則, 西村利光: 強震ネットワーク(K-NET)データから推定した水平動と上下動の最大速度距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第575号, pp.73-79, 2004年4月
- 13) 佐藤智美: 日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第647号, pp.67-76, 2010年1月
- 14) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明, 関松太郎: 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, 日本建築学会構造系論文集, 第649号, pp.521-530, 2010年3月
- 15) 大川出, 齊藤大樹, 佐藤智美, 佐藤俊明, 北村春幸, 鳥井信吾, 辻泰一, 北村佳久, 藤田聡, 関谷裕二, 関松太郎: 長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討, 建築研究資料第127号, 独立行政法人建築研究所, 2010年12月

- 16) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明: 長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第4号(特集号), pp.354-373, 2012年9月
- 17) 大川出, 佐藤智美, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 北村春幸, 鳥井信吾, 辻泰一, 北村佳久: 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ3連動地震による超高層・免震建物の応答解析-, 建築研究資料第144号, 独立行政法人建築研究所, 2013年8月
- 18) 日本建築学会(編集): 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成, 日本建築学会, 2009年3月
- 19) 日本建築学会(編集): 地盤震動と強震動予測—基本を学ぶための重要項目, 日本建築学会, 2016年4月
- 20) 日本建築学会: 建築物の減衰, 丸善, 2000年10月
- 21) 鹿嶋俊英, 小山信, 飯場正紀, 大川出: 2011年東北地方太平洋沖地震によるコンクリート系建物の振動特性の変動, 日本地震工学会大会-2012梗概集, pp.28-29, 2012年11月
- 22) 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, 第48号, pp.493-497, 2015年6月
- 23) 鹿嶋俊英: 強震記録の分析に基づく鉄骨造高層建物の振動特性の変動の考察, 日本建築学会大会梗概集, 2016年8月
- 24) 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年3月
- 25) 中村尚弘, 鹿嶋俊英, 木下拓也, 伊藤真二, 宮本泰志, 曾根孝行, 荏本孝久, 犬伏徹志: 振幅依存性を考慮した中低層RC, SRC造建物の水平1次振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第721号, pp.471-481, 2016年3月
- 26) 日本免震構造協会応答制御建築物調査委員会: 東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査報告会資料, 日本免震構造協会, 2012年1月
- 27) 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年3月
- 28) Masanori Iiba, Toshihide Kashima, Koichi Morita, Tatsuya Azuhata, Namihiko Inoue and Takehiko Tanuma: Behaviour of Seismically Isolated Buildings Based on Observed Motion Records during the 2011 Great East Japan Earthquake, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, September 2013
- 29) 大阪府: 咲洲庁舎における長周期地震動対策の取り組み状況, <http://www.pref.osaka.lg.jp/otemaemachi/saseibi/cyosyukitorikumi25.html>
- 30) Masato Motosaka, Tsoggerel Tsamba, Kazushi Yoshida and Kazuya Mitsuji: Long-term Monitoring of Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of a Damaged Building during the 2011 Tohoku Earthquake, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering Vol. 15, No. 3, pp.1-16, 2015
- 31) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所: 平成28年(2016年)熊本地震による建築物等被害第九次調査報告(速報)(免震建築物に関する調査), <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2016/index.html>, 2016年6月
- 32) 防災科学技術研究所: 強震観測網(K-NET, KiK-net): <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 33) 気象庁: 主な地震の強震観測データ, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>
- 34) 気象業務支援センター: <http://www.jmbc.or.jp/>
- 35) 首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net): <http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/>
- 36) 建築研究所強震観測・数値データの利用について: <http://smo.kenken.go.jp/ja/useofdata>
- 37) 地震調査研究推進本部: 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf
- 38) 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図2016年版, http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2016/