

建築研究所の強震観測の 60 年

国際地震工学センター 主任研究員 鹿嶋俊英

目 次

- I はじめに
- II 建築研究所の強震観測の歴史
 - 1) 強震計の開発と建築研究所の役割
 - 2) 日本で最初の強震観測網の構築
 - 3) 1964 年新潟地震の強震記録
 - 4) 現在に至る強震計の改良・開発
- III 建築研究所の強震観測網
- IV 主な地震の観測記録とその影響
 - 1) 1993 年釧路地震
 - 2) 1994 年三陸はるか沖地震
 - 3) 1995 年兵庫県南部地震
 - 4) 2003 年十勝沖地震
 - 5) 2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震
 - 6) 2011 年東北地方太平洋沖地震
- V 強震記録が明らかにした建物の地震応答
 - 1) 長周期長時間地震動と長周期構造物
 - 2) 建物被害と建物の応答
 - 3) 変化する建物の動特性
- VI 強震観測の最近の話題
 - 1) 建築研究所の強震記録の公開と利活用
 - 2) 構造ヘルスマニタリングと強震観測
 - 3) 簡便な建物の応答予測
- VII おわりに

I はじめに

強い地震時の建物や地盤の揺れを計測しようとするのが、強震観測である。実際の地震時に建物を支える地盤がどのように揺れ、その上に建つ建物がどのように応答するかを知ることは、建物の耐震安全性を考える上で欠かせない。

日本では、1948 年の福井地震を契機に、独自の強震計の開発

が始まった。開発された強震計を使って、建築研究所が強震観測網の整備を始めたのが 1957 年であり、建築研究所の強震観測の歴史は 60 年を数えた。建築研究所の強震観測の歴史は日本の強震観測の歴史とも重なる。講演では、建築研究所の強震観測の歴史を振り返り、1990 年代以降に強震観測で得られた成果と、強震記録の分析から得られた知見を紹介する。更に、現在の強

震観測を取り巻く現状と将来に向けた課題を考えたい。なお、強震観測の対象は地盤や各種構造物と幅広いが、ここでは主として建物を対象とした強震観測を取り上げる。

II 建築研究所の強震観測の歴史

本章では、1950年代に始まった強震計の開発から1990年代後半に至る強震観測と強震計の開発の歴史を、主な記録の紹介を交えて振り返る。

1) 強震計の開発と建築研究所の役割

1948年福井地震を契機に、大地震時の地盤や建物の揺れを測定することの必要性が痛感され、1951年に東京大学地震研究所、東京大学建築学教室、建築研究所、明石製作所の研究者と技術者によって標準強震計試作試験研究委員会が組織された¹⁾。この委員会はいかなる大地震にも耐え得る実用的な強震計の開発を目指し、強震計の設計、試作、試験を行なった。1951年9月には試作機の公開実験が、当時新宿区百人町にあった建築研究所で行われている²⁾。1953年3月には標準型強震計の1号機が完成し、委員会の名称(Strong Motion Accelerometer Committee)からSMAC型強震計と名付けられた³⁾。SMAC型強震計を写真1に示す。SMAC型強震計は、水平2成分、鉛直1成分の計3成分の振り子式の加速度センサーを有している。振り子式の加速度センサーは重さ6kgの錘に板バネと空気減衰器を持たせたもので、錘の動きを梃子で拡大し、ロール紙上のペンを動かす。地



写真1 SMAC型強震計

震を感知するとロール紙が自走するので、加速度の変化は波形としてロール紙上に描かれる仕組みとなっている。

2) 日本で最初の強震観測網の構築

強震計の開発が成功し、その関係者の熱心な働きかけから強震観測の重要性が認められ、総理府資源調査会は1955年に「強震測定計画に関する勧告」を行う。この勧告は気象官署、建築土木構造物を対象に116箇所413台の強震計の設置を求めている³⁾。これを受けて1956~1957年に建設省で予算措置がなされて25台の強震計が設置され、その強震計の移管を受けて建築研究所が建物を対象とした全国的な観測網を展開して行くこととなった。強震観測台帳⁴⁾によれば、1958年1月から2月にかけて、東北大学建築学科本館、新潟県庁舎、広島県庁舎、秋田県庁舎に強震計が設置されている。以来、現在まで途絶えることなく、建築研究所は強震観測網の維持管理と充実を図ってきた。

3) 1964年新潟地震の強震記録

強震観測が、最初にその威力を見せたのは、1964年の新潟地震である。新潟市川岸町にあった県営アパートは、地盤の液状化によって、転倒や傾斜する被害を受けた(写真2)。傾斜したアパートのひとつに建築研究所の強震計が設置してあり、見事に



写真2 1964年新潟地震・川岸町アパートの被害状況⁵⁾

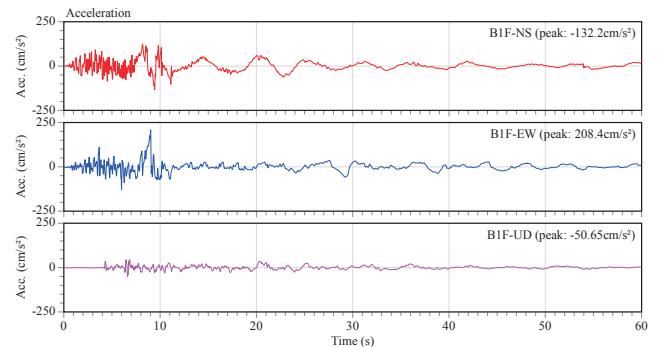


図1 1964年新潟地震・川岸町アパート地下階の強震記録^{6) 7)}

強震記録を採取することができた。この記録については、その後も再数値化され、長周期地震動の検討に用いられたりしている⁹⁾。再数値化されたアパート地下階で得られた1964年新潟地震の強震記録を図1に示す。この強震記録によって、強震観測の有用性が実証され、その後の各機関の強震観測網の構築や増強を推進することになった。

4) 現在に至る強震計の改良・開発

最初に開発されたSMAC型強震計は、頑強で信頼性の高い機器であった。一方で、幅84cm、奥行き74cm、高さ56cm、重さ300kgと大きく重く、また高価であった。本格的な強震計の普及のために、引き続き改良が加えられ、多くの後継モデルを生み出した。その過程で強震計の小型化、軽量化が図られてきたが、1960年代までは、基本的にはSMACのシステムを踏襲する振り子式のセンサーを用いた機械式の強震計が主流であった。

1970年代に入ると、強震計も「電化」が図られる。1973年ごろから導入が始まったSMAC-M型強震計は、サーボ型の加速度センサーを有し、加速度記録は終始電氣的に処理され、フィリップス型のコンパクトカセットテープに収録される。サーボ型の加速度センサーは、従来の機械式のセンサーに比べ、極めて小型軽量であるにも関わらず、観測記録の大幅な質の向上を実現した。また、機械的な機構の排除とカセットテープの採用は、強震計本体の小型化を図り、強震計や観測記録の取り扱いを容易にした(写真3)。

1980年代に入ると、強震計にもデジタル化の波が来る。加速度センサーの信号を早い段階でデジタル化して、以降の処理はデジタル信号として扱う。収録もデジタル記録としてメモリー

ドなどに書き込む。デジタル化のメリットは数多いが、従来のロール紙の上に描かれた記録やカセットテープ上の電気記録ではデジタル化処理をしなくては強震記録をコンピュータで扱えなかったが、この手間がなくなったことが最も大きい。またデジタル記録であれば遠隔であっても、何らかの通信手段を使って容易に記録の転送が可能となる。つまり、デジタル化によって多大な省力化が実現され、データ処理の迅速化が図られた。写真4は、SMAC-MD型と呼ばれる初期のデジタル強震計である。16ビットのAD変換器を採用し、自動校正可能な時計、メモリーカード記録、遅延記録、通信機能、任意の条件での起動停止設定など、現代の強震計が有する標準的な機能はすべて備えていた。また、複数の測定点を測りたい時は外部加速度計を増設できるなど、拡張性にも優れている。

その後も、分解能の向上やインターネットなど新しい通信技術への対応など、強震計は進化を続けている。現在、建築研究所では、複数の種類のデジタル強震計を使い分けている。

III 建築研究所の強震観測網

1957年に始まった建築研究所の強震観測網の構築は、全国の主要な都市に建つ、国や地方自治体の庁舎などに設置する形で構築されてきた。いつ、どこで発生するかわからない地震に備えるため、広く網を張る考え方であり、現在でもベースとなっている。

一方で、建築研究所は1983年より仙台高密度強震観測を開始する。これは、特に表層地盤が地震動に与える影響を解明するために、地中と地表に加速度計を有する強震観測装置を、仙台



写真3 SMAC-M型強震計



写真4 SMAC-MD型強震計

市とその周辺に高密度に配置したものである。当初、建築研究所単独のプロジェクトであったが、1987年からは官民共同研究として観測地点の整備が進められ、1989年に計11観測地点の観測網が完成した。各観測地点の強震観測装置は3台の加速度センサーを有しており、それぞれ地表、工学的基盤上、及びその中間深度に埋設された。官民共同研究としての観測は1999年まで続き、得られた強震記録は地盤増幅の定量的な評価手法の開発に利用された。

また、1995年兵庫県南部地震を受け、大都市圏の地震防災対策に資することを目的に、首都圏地震動観測網を構築した。これは東京を中心とした首都圏に20か所の観測地点を新たに設けたものである。観測の対象は建物であり、可能であれば建物と敷地地盤の同時観測を行っている。

更に2013年には、2010年から2012年にかけて実施された国土交通省の建築基準整備促進事業で整備された6つの観測地点を買い取り、建築研究所の強震観測網に加えた。これらの観測地点は、長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物、鉄骨造建築物、及び免震建築物の安全性検証方法に関する検討のために設けられたもので、東京、名古屋及び大阪に建つ超高層鉄筋コンクリート造2棟、超高層鉄骨造2棟、免震構造2棟となっている。

このような経緯があり、また従来からの観測網も随時見直しと改廃を行っており、現在の建築研究所の観測地点は計87か所

となっている。図2に建築研究所の観測地点の位置を示す。仙台市とその周辺には、仙台高密度強震観測で整備した観測地点が一部残っている。また、東京を中心とした関東地域には、首都圏地震動観測網として整備した観測地点があり、一段と観測密度が高くなっている。ほとんどの強震計は、アナログ電話回線やインターネットを通じて建築研究所と結ばれており、観測パラメータの変更や記録の回収は遠隔で行える。

各観測地点の観測対象による分類を図3に示す。観測対象が「地盤」は純粹に地盤上や地中にセンサーが配置されている観測地点である。観測対象が「建物基部のみ」の観測地点では、低層建物の地下階や1階に1台のセンサーを有している。併せて19地点では観測対象が「地盤」あるいは「建物基部のみ」となっており、その地域の地震動の特性を知るための観測となる。観測対象が「建物」は、少なくとも建物の頂部と基部に加速度センサーを有し、建物によっては更にセンサーが追加されている観測地点である。半数近くの観測地点ではこのような観測体制となっており、その強震記録からは地震時の対象建物の動的な挙動が検討できる。観測対象が「建物と地表」は、建物内の複数のセンサーに加え、地盤上にもセンサーを有する観測地点である。地盤と建物の相互作用によって、地表で観測される地震動と建物に入力する地震動は異なるので、そのような現象を解明するための観測体制となっている。更に、観測対象が「建物と地盤」となっている観測地点では、「建物と地表」に加えて、地中にもセンサーを配している。地盤増幅、地盤と建物の相互作用、及び建物の地震応答を総合的に捉えることができる。

観測対象が「建物」、「建物と地表」、「建物と地盤」となっている観測地点の建物数の合計は、68棟となる(2棟の建物を有する観測地点がひとつある)。それらの建物の階数による分類を図4に示す。低層建物から、超高層建物までバランスよく含まれている。68棟の建物の構造による分類を図5に示す。概して、低層建物はRC造、中層建物はSRC造、高層建物はS造が多くなっている。また、観測対象建物には、9棟の免震建物と、11棟の高さ60m超の超高層建物(内5棟は制振装置付)が含まれている。

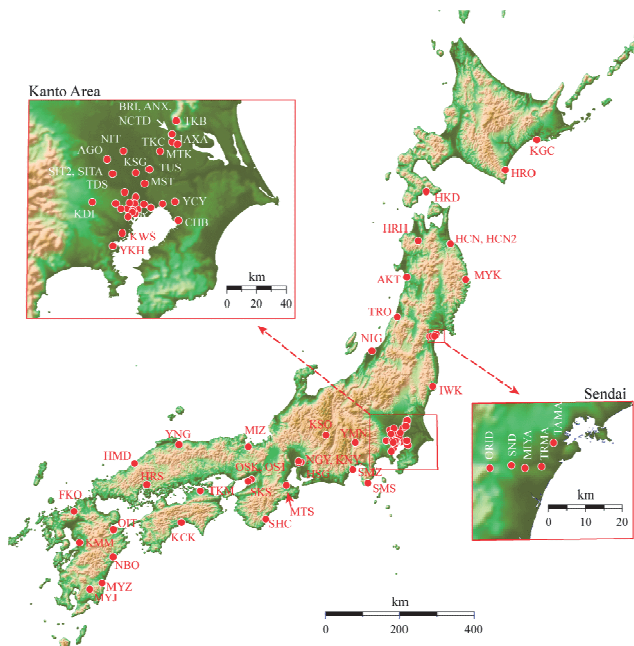


図2 建築研究所の強震観測地点

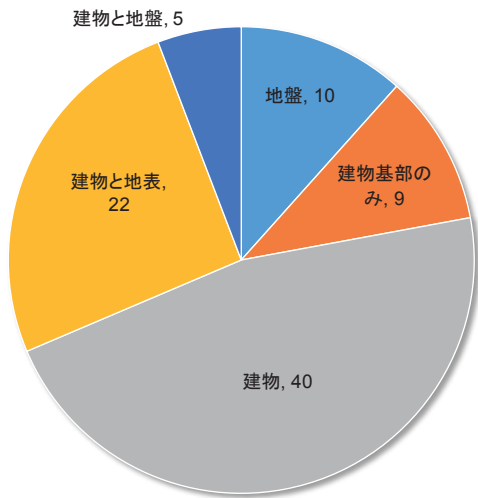


図 3 建築研究所の強震観測地点の観測対象による分類

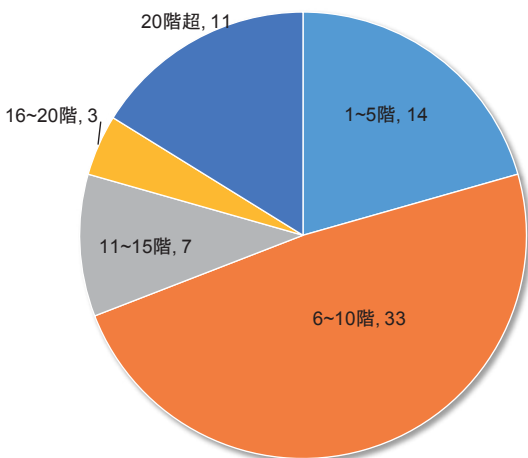


図 4 建築研究所の強震観測建物の階数による分類

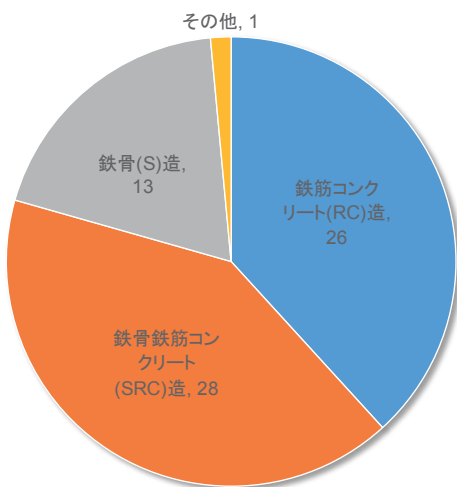


図 5 建築研究所の強震観測建物の構造による分類

IV 主な地震の観測記録とその影響

前述のように、1990 年前後からデジタル強震計の導入が始まり、センサーと計測技術の進歩は強震記録の質の向上をもたらした。また、小地震の強震記録も分析が可能となったため収録する強震記録の量も大幅に増加した。本章では、デジタル強震計導入以降の主な地震によって得られた強震記録と、強震観測に与えた影響を振り返る。

1) 1993 年釧路地震

1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震 (M7.5、深さ 101 km) は、デジタル強震計の威力を見せつける最初の地震となった。建築研究所が釧路地方気象台に設置していた強震計は、1990 年に SMAC-M 型からデジタル式の SMAC-MD 型に置き換えられていた。当時の釧路地方気象台敷地内の地盤上に設置されていた SMAC-MD 型強震計は、最大加速度が 711 gal (ガル、 cm/s^2) に達する大加速度の強震記録を採取した (図 6)。

また、当時気象庁は 87 型強震計と呼ばれるデジタル強震計を、全国の主要な気象台や測候所に配備していた。釧路地方気象台の 87 型強震計の記録は、さらに大振幅で、最大加速度は 919 gal であった⁸⁾。

気象台の周辺の建物には目立った被害がなかったことから、大加速度地震動の生成要因と、地震動特性と周辺被害との関係に大きな関心が集まり、産学官連携した大掛かりな調査が行われた^{例えぼ}。またこの地震を契機に、補正予算を得て、建築研究所の強震観測網の強震計のデジタル化が進んだ。

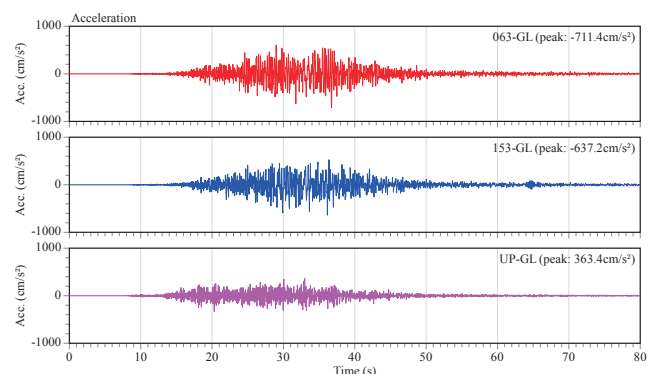


図 6 1993 年釧路沖地震・釧路地方気象台地表の強震記録

2) 1994 年三陸はるか沖地震

1994 年 12 月 28 日に発生した三陸はるか沖地震は、青森県八戸市の東方約 180 km で発生した M7.6 の地震である。更に 10 日

後の1995年1月7日は、より陸に近い岩手県沖でM7.2の余震が発生している。この地震により、八戸市を中心に被害が発生し、八戸市庁舎旧館も大きく被災した¹⁰⁾。被災した市庁舎旧館に隣接していたSRC造5階建ての新館には建築研究所のSMAC-MD型強震計が設置されており、三陸はるか沖地震の激しい地震動と建物の大きな揺れを着実に捉えた。建物地下階での最大加速度は416 gal、屋上階での最大加速度は963 galに達した。観測記録の詳細な分析では、被害によって建物の剛性が低下していることが確認できた¹¹⁾。

3) 1995年兵庫県南部地震

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、日本の強震観測にとってエポックメイキングな地震であった。建築研究所の強震観測網では、大阪や松阪、舞鶴など周辺の観測地点で良好な強震記録が得られたが、神戸市内などの被災地には建築研究所の強震観測地点はなかった。また、神戸市内でも、場所によって被害の様相が大きく異なり、都市域の地盤状況に応じた密な観測の必要性が再認識された。この経験が前述の首都圏地震動観測網の構築に繋がった。また、情報収集の確度と速度の改善も課題として浮上し、ほぼすべての観測地点を電話回線で結ぶテレメータ化を実現した。

日本の強震観測の世界では、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-net、各都道府県の震度情報ネットワークが新たに構築され、気象庁の震度観測網も大幅に増強された。これらの観測網は、基本的には地表の地震動を観測するものであり、総計で5,000を超える観測地点が日本全国を覆うこととなった。ちなみに、気象庁震度階級は、それまでの体感によるものから、強震計で得られた加速度記録を処理して算出する方式に改められた。

4) 2003年十勝沖地震

21世紀を迎えるころには、日本の強震観測体制は非常に充実したものとなっていた。建築研究所の強震観測網も、それなりに、増強されていた。

2003年十勝沖地震は、9月26日に北海道襟裳岬東南東約80kmの沖合で発生したM8.0の巨大地震であった。北海道から関東北部まで、広範囲で揺れが観測され、北海道を中心に被害が発生した。この地震で特に注目されたのは、苫小牧市で観測された長周期・長時間地震動であり、苫小牧市の石油タンクの火災の要因となった。

兵庫県南部地震以降、その有用性が認められたこともあり、

免震構造の採用が急増しており、国や自治体の庁舎も例外ではなかった。2000年に新築された釧路地方合同庁舎も、地下階に免震装置を有する9階建ての建物である。1993年釧路沖地震で大加速度記録が得られた釧路地方気象台も釧路地方合同庁舎に移転することとなっていたため、建築研究所は竣工前から合同庁舎敷地地盤の強震観測を開始し、竣工後は建物内に加速度計を増設した。2003年十勝沖地震の強震記録には、免震装置による加速度の低減効果が明瞭に表れていた(図7)。

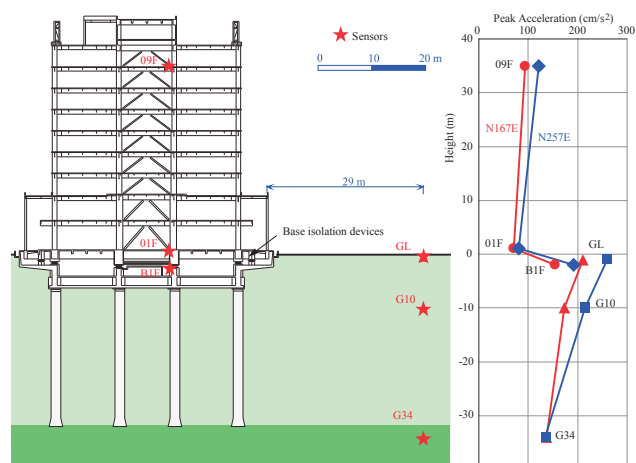


図7 2003年十勝沖地震・釧路地方合同庁舎の最大加速度分布

5) 2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震

新潟県上中越地方は、2004年10月23日の中越地震(M6.8)と、2007年7月16日の中越沖地震(M6.8)と、立て続けに被害地震に見舞われた。中越地震の時は、建築研究所の強震観測地点は上越市と新潟市にあり、それぞれ震央から57km、71km離れているが、震度5弱及び震度4に相当する強震動の記録を収録している。また中越地震の調査の一環として、小千谷市内の2棟の建物で余震観測を行い、建物の地震被害要因の解明に役立てた。このうち、小千谷小学校では、その後も断続的に余震観測を継続しており、2007年新潟県中越沖地震の強震記録を得ることができた¹²⁾。建築研究所の強震観測では、恒常的な観測網に加え、余震観測や臨時観測などにも機動的に取り組んでいる^{13), 14)}など。

6) 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震の強烈な地震動とその未曾有の地震と津波の被害は、未だ生々しい記憶である。牡鹿半島の東南東沖、約130kmで発したM9.0の巨大地震は、北は北海道から、南は九州のいくつかの地点に至るまで、日本列島のほとんどの地域を揺らした。

建築研究所の強震観測網では、当時稼働中であった79の観測地点のうち61の観測地点で強震記録が得られた¹⁵⁾。図8及び図9に、強震記録が得られた観測地点の位置を示す。観測地点の位置を示す○の色は、計測震度によって色分けされており、濃い赤の地点は大きな震度を記録した。建築研究所の強震観測地点では、震度6弱が1地点、震度5強が17地点、震度5弱が18地点であった。多くの観測地点では、観測開始以来最強の地震動を経験したことになり、これらの強震記録の分析により様々

な新たな知見が得られた。その一部については、次章で紹介したい。

V 強震記録が明らかにした建物の地震応答

2011年東北地方太平洋沖地震やその余震では、多くの建物の強震記録が得られ、その分析が進んだ。ここでは、以降に明らかにされた特徴的な建物の地震応答を整理する。

1) 長周期長時間地震動と長周期構造物

2003年十勝沖地震で注目を浴びた長周期地震動だが、2011年東北地方太平洋沖地震では、東京や大阪の長周期構造物が長周期地震動を実際に体験することになる。建築研究所の強震観測記録の分析からは、仙台市に建つ超高層建物は3分以上、首都圏の超高層建物は5分以上大きな揺れが継続したことがわかる¹⁵⁾。

特筆すべきは、震央から770kmも離れた大阪湾岸に建つ55階建ての超高層建物の地震応答である。この建物の1階、18階、38階、及び52階の変位波形(強震記録を積分したもの)を図10に示す。建物の上層部程、揺れが大きく増幅しているのが分かる。1階の最大加速度は30gal強、最大変位は11cm程度であったが、52階の最大加速度は130galを超え、変位は130cm以上に達し、また大きな揺れが10分以上続いた。建物の固有周期と地震動の卓越周期が一致した共振現象と、建物自体の減衰が小さかったことが大きな揺れの原因だが、長周期地震動対策の重要性を再認識させるものであった。この建物はその後、制振耐震改修が行われている。

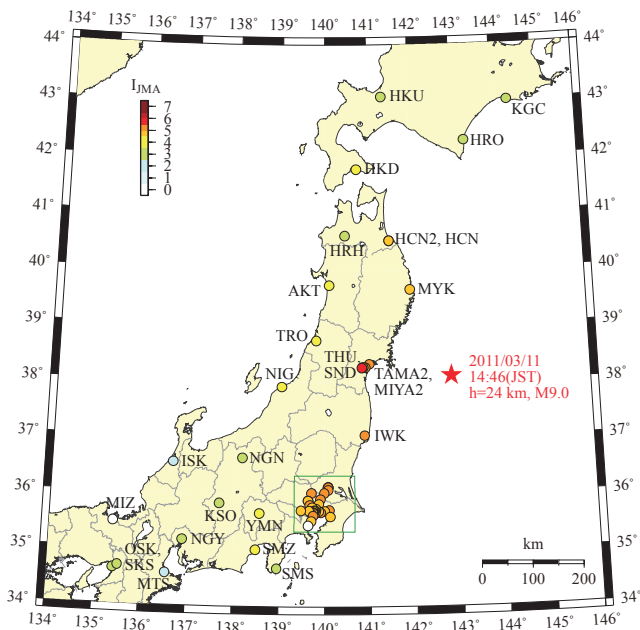


図8 2011年東北地方太平洋沖地震で強震記録が得られた観測地点

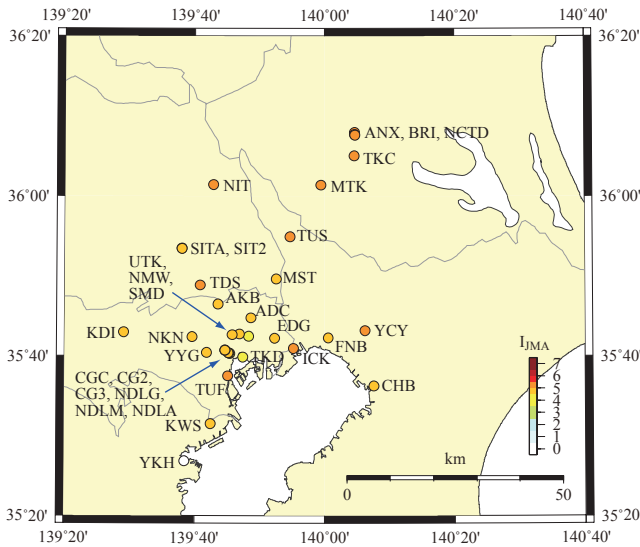


図9 2011年東北地方太平洋沖地震で強震記録が得られた関東地方の観測地点

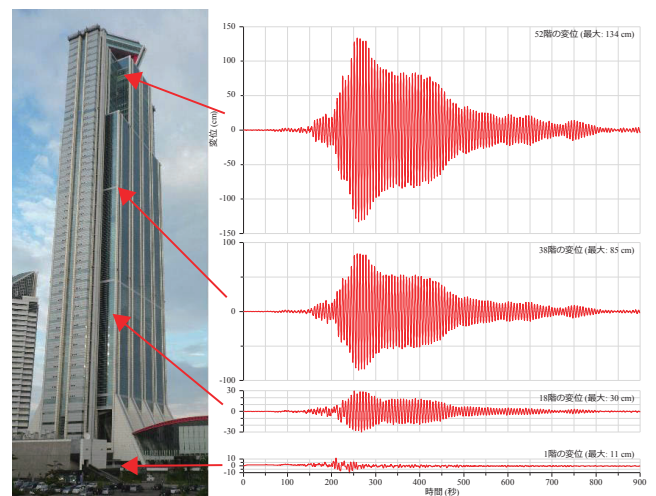


図10 2011年東北地方太平洋沖地震・大阪湾岸に建つ超高層建物の地震応答変位

2) 建物被害と建物の応答

建築研究所の強震観測網の中には、2011年東北地方太平洋沖地震によって、構造的な被害を受けた建物が複数存在した。このような建物で得られた強震記録は、被災の過程を検証するうえで貴重なものである。建築研究所が強震観測を行っている建物の中で、最も甚大な被害を受けたのは、東北大学の青葉山キャンパスにあるSRC造9階建ての人間環境系研究棟である(写真5)。写真6に示すように、セットバックしている3階の妻壁が曲げ破壊し、壁両端の柱が圧壊した。

この建物の1階と9階で得られた加速度記録を図11の上段ふたつの図に、9階の変位から1階の変位を引いて求めた建物の相対変位を図11の中段ふたつの図に示す。加速度波形の濃い太線は1階の、薄い細線は9階の波形である。また、加速度波形、変位波形の赤い方は建物の短辺方向、青い方は長辺方向に対応する。更に、図11の下段には、10秒ごとの建物の固有周期を強震記録から求めてプロットしている。これらの図からは、地震動には30秒過ぎと80秒過ぎに到来するふたつの振幅の大きな波群があったこと、最初の波群で建物はいくらか損傷し固有周期が若干伸びたこと、二番目の波群で更に損傷が進行し、建物の変形は30cmを超えていることがわかる。1階から9階床までの高さは29.6mなので平均的な層間変形角は1/100を超えている。この建物は大破と判定され、2012年に取り壊された。

この建物では、1978年宮城県沖地震で、当時設置されていたSMAC-M型強震計が9階で1G(980gal)を超える記録を採取したのをはじめ、長きに渡って強震観測を行ってきた。この間に幾度も大きな地震動を経験し、耐震補強もされている¹⁶⁾。長期間にわたる観測が、容易には得がたい知見を与えてくれた代表例と言えるであろう。

3) 変化する建物の動特性

2011年東北地方太平洋沖地震とその余震、誘発地震では、膨大な数の強震記録を蓄積することができた。様々な建物の様々な振幅の強震記録が利用可能となった。また、これまでに強震記録が蓄積されてきた建物も、大振幅の強震記録が加わることによって、分析の幅が広がった。この結果、建物の地震時応答に関する研究が盛んとなった。

建築研究所の地震防災研究センター棟(新館と称する)を例に、振動特性が、経年や振幅によっての変化する様子を見てみる。この建物では1998年の竣工時から現在まで、建物内や周辺地盤上に高密度にセンサーを配置した観測を行っている。図12は、



写真5 被災前の東北大学人間環境系研究棟

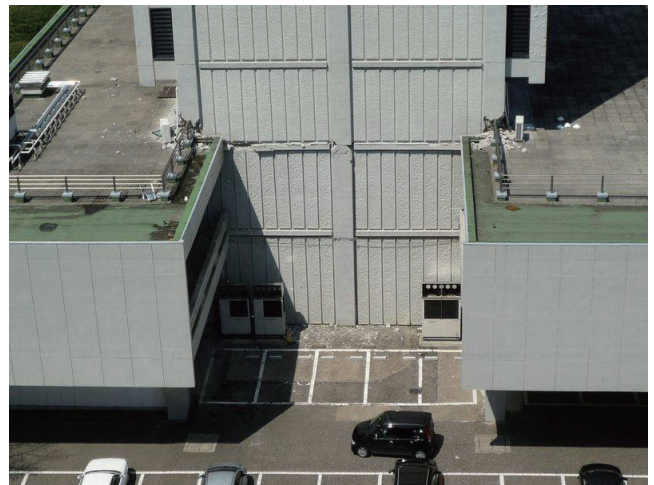


写真6 東北大学人間環境系研究棟の被災状況

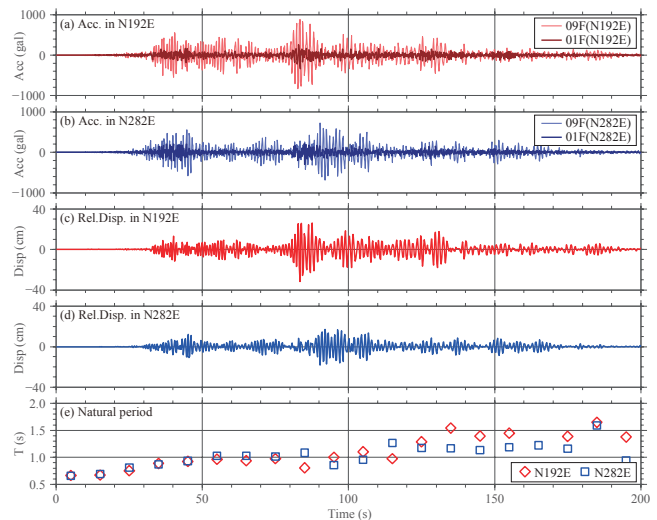


図11 2011年東北地方太平洋沖地震・東北大学人間環境系研究棟の強震記録、建物変位、及び固有周期の変化

新館の1次固有周期と減衰定数の経年変化を示している。上段が固有周期、下段が減衰定数を表し、●と△はそれぞれ南北方向と東西方向に対応する。竣工直後には0.5秒強であった固有周期は、その後徐々に伸びてゆき、2006年には0.7秒程になっている。その後しばらくは固有周期の伸びは収まったように見えるが、2011年東北地方太平洋沖地震(緑の破線の時)を受けて固有周期が1秒前後に伸びてそのまま現在に至っている。減衰定数に関しては、ばらつきが大きく、経年による傾向は見出し難い。

次に、振動特性の振幅依存性を見てみる。応答振幅を表す値として、最大変形角(建物の最大水平変形を1階から測定点までの高さで割った値)を採用する。最大変形角と、固有周期及び減衰定数の関係を図13に示す。上段が固有周期、下段が減衰定数で、それぞれ左が南北方向、右が東西方向を表す。また、記号は

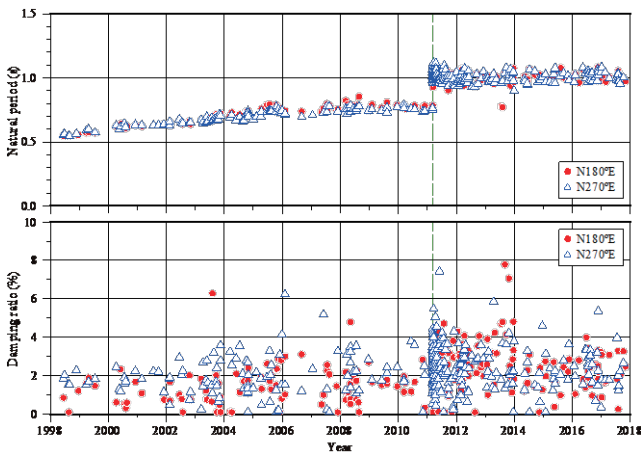


図12 建築研究所新館の基本固有周期と減衰定数の経年変化

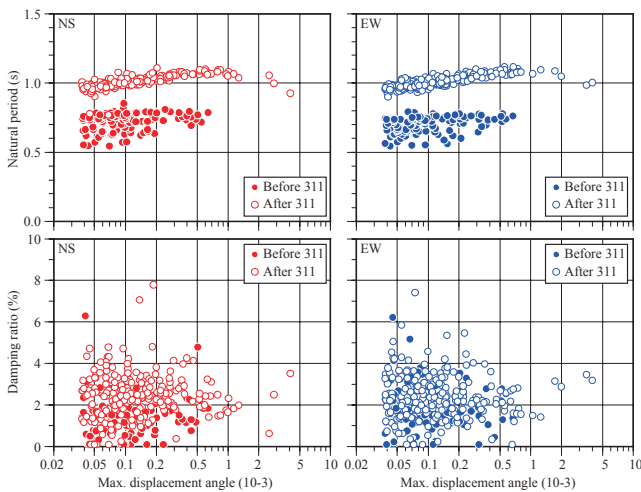


図13 建築研究所新館の最大変形角と固有周期及び減衰定数の関係

東北地方太平洋沖地震前の地震記録から得られた値を●と●、以降の地震記録から得られた値を○と○で示している。固有周期を見ると、最大変形角が大きくなると固有周期が長くなる傾向が明瞭に認められる。東北地方太平洋沖地震の前後いずれでも同様の傾向となっているが、東北地方太平洋沖地震の前の値の方がばらつく。これは、図12に表れた経年変化の影響であろう。

近年、同様の研究はさまざまな規模や構造の建物について行われており、竣工後10年程度の間固有周期の伸びや、振幅が増大すると固有周期が伸びる振幅依存性は共通の認識となっていると言える。今後このような知見をどのように耐震安全性の評価に繋げてゆくかが課題となっている。

VI 強震観測の最近の話題

近年の強震観測を取り巻く話題をいくつか取り上げ、建築研究所の強震観測の役割を考えてみたい。

1) 建築研究所の強震記録の公開と利活用

建築研究所の強震観測網で得られた強震記録はウェブサーバに登録され、その波形や応答スペクトルを閲覧することができる¹⁷⁾。また、地盤上や建物の基部で得られた強震記録は、誰でもダウンロードして利用できるようになっている。2017年末時点で、ウェブサーバのデータベースに登録されている地震数は5,288、強震記録の数は17,266となっている。ちなみに、東北地方太平洋沖地震の強震記録で最も早く公開されたものは、建築

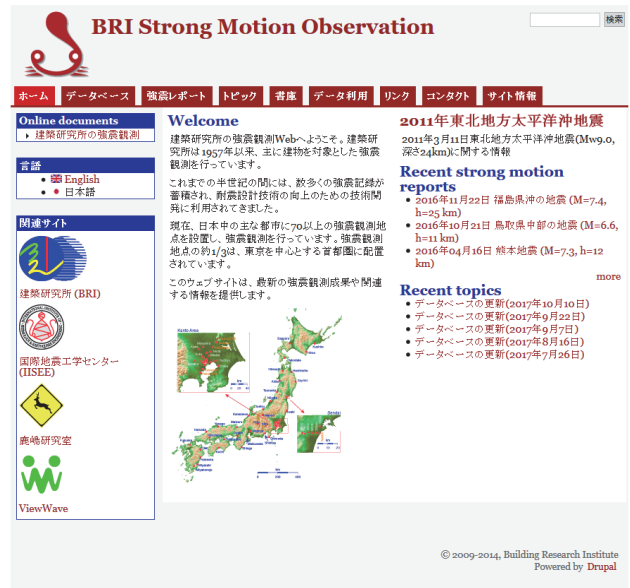


図14 建築研究所の強震観測のウェブサイト (<http://smo.kenken.go.jp/>)

研究所の観測網で得られたものであり、翌々日にウェブ上に掲載された。

加えて、建物の上部で得られた強震記録も含めたほとんどの強震記録は、書面による利用申請を行うことで誰でも入手できる¹⁸⁾。2014年の提供開始以来50余件の申請があり、4,000近い強震記録を提供している。強震記録の利用目的は、主に研究的なものであり、建物の地震応答の詳細な分析や耐震技術の検証に、振動実験の入力地震動としても用いられている。日本で強震観測が行われている建物の数は500棟ほどと推計されている¹⁹⁾。観測事例は少なくはないが、数値データを入手して利用できる建物の数は限られている。その中で建築研究所のデータ公開の取り組みは画期的であり、この分野の研究開発の進展に寄与するものと信じている。

2) 構造ヘルスマニタリングと強震観測

近年脚光を浴びている技術が、構造ヘルスマニタリングである。Structural Health Monitoringの頭文字を取ってSHMとも呼ばれる。以下では単にモニタリングと呼ぶ。モニタリングは、建物など構造物の状態を常時監視し、その健全性に異常が発生した場合検知する技術やシステムのことである。地震が対象の場合は、構造物の揺れを常時監視し、損傷が検知あるいは想定された場合、即座に知らせしてくれるシステムとして実装されることが多い。

建築分野のモニタリング技術は、1980年代から議論され、2000年ごろから研究開発が盛んとなったが、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を経て注目され、急激に実用化が進んだ²⁰⁾。一般的には、強震観測のように加速度センサーで建物の揺れを計測し、建物の変形量で構造的な被害の有無を判定する。また、設備機器や非構造部材の被害は、加速度の大きさから判断する。モニタリング分野の技術開発には、強震観測で得られた知見や経験が生かされているといえるであろう。

一方で、モニタリングでは、廉価で小型の半導体技術を使ったMEMSセンサーやデジタル通信技術など、最新の技術をうまく取り入れている。また、収録された波形やその振幅、建物の健全性の評価結果を迅速かつわかり易く知らせる技術も必要となる。このような技術は、強震観測でも積極的に取り入れてゆく必要がある。実際、前述の東北地方太平洋沖地震の際の大阪湾岸の超高層建物の場合、防災センターは1階にあり1階の震度は3相当であったので、建物の上層階がこれほど大きく揺れていたとは直ぐには把握できなかったと聞いている。その教訓か

ら、現在は防災センターで即時に観測された加速度波形のモニタができるようにしている。他にもいくつかの観測地点で、観測波形を表示するシステムを導入しており、建物の管理者にとって地震後対応の一助になるものと考えている。

3) 簡便な建物の応答予測

気象庁が試行的に発表している長周期地震動に関する観測情報は、「高層ビル等における地震後の防災対応等の支援を図るため、長周期地震動による高層ビル内での被害の発生可能性等について」地震発生直後に知らせるもので²¹⁾、いわば応答予測である。気象庁の情報では長周期地震動階級と呼ばれる1~4の4段階の数値で評価しているが、今後研究が進めば、応答変位や加速度などより詳細な応答予測も可能となってくるであろう。地震動の到来に先立って建物の揺れの大きさが予測できれば、その揺れに備えることができ、地震被害の軽減につながる。将来の発展が期待される分野である。強震観測で蓄積された建物の地震応答の資料は、そのような研究開発の基礎となり得る。

VII おわりに

本稿では、建築研究所の60年の強震観測を振り返り、近年明らかになった研究成果や、関連する話題を紹介した。建物の強震観測の将来について考えてみて、まとめたい。

ここで見てきたように、強震観測は地震工学や耐震工学の発展に少なからぬ貢献をしてきた。いったん大地震が発生すれば、何が起きたかを教えてくれるのは強震記録である。地震防災分野での強震観測の重要性は揺るぎない。

一方で、強震観測は地震の発生をひたすら待ち、いざという時に確実に強震記録を採取しなければならない。このため、非常に長い時間スパンで観測と取り組まなければならない。これが従来の強震観測像である。言い換えれば長期に渡って大きな地震が発生せず、目立った成果を挙げられなければ、強震観測が衰退してゆく可能性を否定できない。

この状況を打破し、将来渡って安定した観測網を維持し、更に発展させて行くには、社会のニーズをうまく取り入れて行ける、柔軟な観測システムと観測体制が必要となってくる。これまで述べてきたように、近年得られた膨大な強震記録は、建物の地震応答に関する豊富な知見を与えてくれた。この知見を建物の耐震安全性の向上に繋げられるように研究開発が続けられるべきであり、そのために更に積極的な情報発信を続ける必要がある。

また、モニタリング技術を取り込むことも一つの方向性であろう。従来の強震観測では、建物の耐震安全性や健全性を評価するにも、記録を回収して分析する手間が必要であった。時間を要すれば地震後対応に効果が薄い。モニタリングではこれを即時に行う。建物に何が起きたかを即座に示せれば、建物管理者や利用者にメリットがあり、強震観測の価値の創造にもつながる。

また、モニタリングでよく用いられる廉価で小型のセンサーの積極的な導入にも取り組む必要がある。実際に比較観測などを行っているが、センサー単体で見れば中地震以上では標準的な強震計に遜色のない性能を発揮するものも現れている。観測システムの低コスト化は強震観測の一層の普及に欠かせない。

安定した強震観測網の維持と更なる発展には、課題も少なくないが、強震観測の必要性和重要性に対する社会の理解を得て、前進してゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 高橋龍太郎: SMAC 型強震計, 地震第 2 輯, 第 6 巻第 3 號, pp.1-5, 地震学会, 1953 年
- 2) 中川恭次: 強震計の試作について, 建築技術 No.7, pp.12-13, 1951 年 10 月
- 3) 田中貞二: 日本における強震計の開発と初期の強震観測, ORI 研究報告 94-02, 大崎総合研究所, 1994 年 10 月
- 4) 強震観測事業推進連絡会議: 全国強震観測地点台帳, 防災科学研究センター
- 5) Wikimedia Commons:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liquefaction_at_Niigata.JPG, 2018 年 1 月閲覧
- 6) Kazuyoshi Kudo, et al.: Re-evaluation of Nonlinear Site Response During the 1964 Niigata Earthquake using the Strong Motion Records at Kawagishi-cho, Niigata City, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE), Paper No.0969, 2000
- 7) http://smsd.eri.u-tokyo.ac.jp/smad/?action_1964niigata=true, 2018 年 1 月閲覧
- 8) 気象庁: 強震波形(平成 5 年(1993 年)釧路沖地震), <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/kusirooki/index.html>, 2018 年 1 月閲覧
- 9) 坂上実: 釧路市における共同強震動観測, 東京大学地震研究所技術報告集, No.1, pp.30-49, 1996 年
- 10) 萩尾堅治, 梅野岳, 吉崎征二: 三陸はるか沖地震による八戸市庁舎旧館の被害調査, 日本建築学会学術講演梗概集(北海道), B-2, pp.31-32, 1995 年 8 月
- 11) 飛田潤, 杉村義広: 八戸市庁舎新館の地震時動特性の推定(近畿), 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.599-600, 1996 年 9 月
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震建築物被害調査報告, 2007 年 12 月
- 13) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: 能登半島地震建築物被害調査報告, 2007 年 10 月
- 14) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: 平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震建築物被害調査報告・平成 20 年 7 月 24 日岩手県沿岸北部の地震建築物被害調査報告, 2008 年 10 月
- 15) 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, 建築研究報告, No.135, 独立行政法人建築研究所, 2012 年 3 月
- 16) Masato MOTOSAKA, et al.: Long-term Monitoring of Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of a Damaged Building during the 2011 Tohoku Earthquake, Journal of Association for Earthquake Engineering, Vol.15, No.3, pp.1-16, 2015
- 17) BRI Strong Motion Observation: <http://smo.kenken.go.jp/>, 2018 年 1 月閲覧
- 18) BRI Strong Motion Observation 数値データの利用について: <http://smo.kenken.go.jp/ja/useofdata>, 2018 年 1 月閲覧
- 19) 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
- 20) 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, 日本建築学会, 2017 年 2 月
- 21) 気象庁: 長周期地震動に関する観測情報(試行), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqv/data/ltpgm_explain/kaisetsu.html, 2018 年 1 月閲覧