

強震観測とモニタリングの共通点・相違点 Similarity and Differences between Strong Motion Observation and Structural Monitoring

中村 充
Mitsuru Nakamura

大林組技術研究所、上級主席技師、博士（工学）（東京都清瀬市下清戸 4-640、nakamura.mitsuru@obayashi.co.jp）
Obayashi Corporation Technical Research Institute、 Senior Engineer、 Dr. Eng.

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、阪神・淡路大震災以後整備が進められた多数の地盤や建物の観測点において、量的にも質的にも過去に例のない規模の強震観測記録が得られた。これらの観測結果を通じて、M9という巨大地震の実像が明らかにされると共に、長周期地震動が建物挙動に与える影響など多数の新たな知見が得られており、強震観測は地震工学・建築振動工学分野において極めて大きな貢献を果たしている。また、建物強震観測の応用として一部の建物に設置されていたモニタリングシステムの有効性に注目が集まり、その後、大都市圏における帰宅困難者問題対策としての大地震直後における建物被災度推定へのニーズの高まりを受けて、モニタリングシステムの実装が徐々に広がりを見せつつある。

このような背景を受けて、東日本大震災以後も、強震観測とモニタリングに対する関心と期待は高まり続けている。一方で、両者の違いについて一般的な認識が確立しているとは言えないのが実状であり、建物強震観測とモニタリングが混同して語られることが多くなっているように思われる。

建築学会振動運営委員会の傘下にある強震観測小委員会と構造モニタリング小委員会では、2012年の建築学会大会において「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」と題したパネルディスカッションを開催し、両技術の現状と役割、さらに将来展望について討議を行った。東日本大震災から1年半後に開かれたこのパネルディスカッション以後も、両技術を取りまく環境は変化を続けており、今あらためて両者の現状と今後について見直すことが求められている。

本報告では、本日のパネルディスカッションでの議論を深めていただくために、まず、強震観測とモニタリングそれぞれの現状を概観し、さらに、両者の共通点と相違点について整理することで、議論の共通基盤を提供することを目指したい。

2. 強震観測の現状と課題

この節では、強震観測がこれまでたどってきた歩みを簡単に概観し、現状とその課題について整理してみたい。

2.1 日本における強震観測の歴史

日本における地盤系強震観測は、1950年代に開発された日本独自のSMAC型強震計（図1）が1953年（昭和28年）東大地震研に設置されたことが始まりとされている¹⁾。一方、建物系強震観測については、1956年から1957年にかけて建設省(当時)によってSMAC型強震計25台が導入され、各地に設置されたものが建築研究所に移管されたことに始まっている²⁾。地盤系強震観測、建物系強震観測とも、60年前後の歴史を有している。

その後、1980年代に入って強震計のデジタル方式への移行が進み、気象庁による87型強震計の配備等が進められた。一方で、強震観測点配置の面からは、大規模地震の強震動を逃さず記録するための全国観測網の重要性は認識されつつも、具体的な実施には至っていなかった¹⁾。

その後、1995年に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）が強震観測に与えた影響は極めて大きいものであった。この地震を契機に、K-NET、KiK-netなどの全国を網羅する均質な地盤強震観測網が整備され、その観測結果が極めて多方面に多大

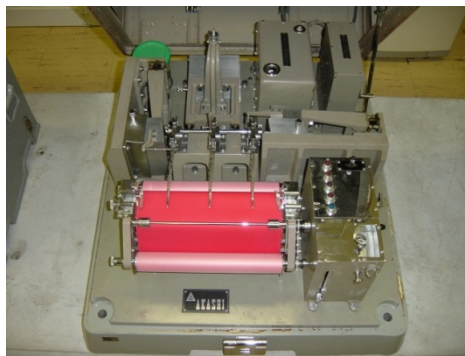


図1 SMAC型強震計（建築研究所鹿嶋氏提供）

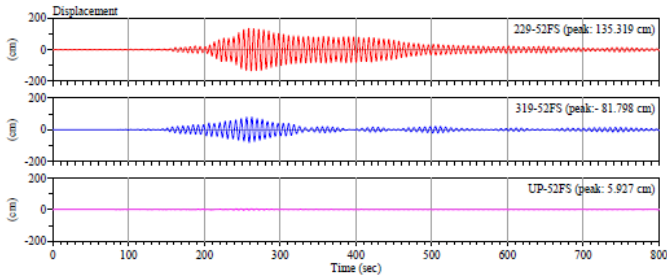


図2 東日本大震災における超高層建物の観測事例⁸⁾

な貢献を果たしているのは良く知られたところである。現在、K-NET、KiK-netに加えて、広帯域地震観測網 F-net をあわせると、全国約 1,800 箇所に強震計が設置されている。さらに、気象庁、自治体が設置している強震計を合わせると全国で 5,000 箇所あまりにおいて地盤強震観測が行われている。なお、これらの地盤系強震観測にまつわる歴史と現状については、参考文献 1) に詳しく述べられているので参照いただきたい。

一方、建物系の強震観測については、地盤系強震観測のような網羅的な観測網の整備などは実現していないが、兵庫県南部地震以後、強震そのものに対する関心が高まったことによるためか、その後の学会大会などにおける報告件数は増加しており、観測建物棟数についても一定の増加があったものと推察される。

これら観測網の整備により、東日本大震災において、量的にも質的にも過去に例のない規模の強震観測記録を得ることが可能となったのである^{3),4),5),6),7)}など。

強震観測がこれまで耐震工学の発展に果たしてきた役割の大きさについては、ここであらためて強調するまでもないと思われるが、特に、振動工学分野においては、観測記録を通じた地震動そのものの現象解明、建物に入力する地震動の解明、地震動をうける建物の挙動解明、建物設計の検証、さらに新しい耐震技術の検証など、さまざまな局面において貢

献している。強震観測は振動工学分野のいわば「インフラ」としての役割を果たしてきたといえる⁸⁾。

2.2 強震観測が抱える課題

様々な分野において貢献している強震観測であるが、未だいくつもの課題が残されているのも事実である⁸⁾。

まず、大きな被害を生じるような巨大地震の記録については、地盤・建物とも十分とは言えないのが実状である。例えば、地盤と建物両方の大振幅記録が得られていて基礎地盤相互作用の分析が可能な記録などはほとんど得られていない。再現期間が非常に長い自然現象を相手とする強震観測にとって、60年足らずの歴史は余りにも短い「経験」であることを再認識する必要がある。

また、建物系観測については、その質・量と共にまだまだ不十分と思われる。具体的には、広域かつ多様な建物観測体制の整備が不十分と思われる。地盤における観測が、K-NET、KiK-net などの均質な観測網で展開される体制が整っているのに対して、建物観測は、建物規模、高さ、構造、立地地盤、地域などを網羅して比較検討・分析できる状況にはなっていない。観測建物が首都圏に偏在していることも、首都圏に位置する建物棟数の多さからやむを得ないとはいえ、なんらかの方策が望まれるところである。

本年 4 月に発生した熊本地震においては、大規模地震の発生が予想されていなかった地域性もあるが、建物における強震観測の報告が過去の大地震と比較して極めて少ない模様である。このことは、建物系観測の量的不足、地域偏在の影響であると推察される。すなわち、地震頻度が低い地域における観測建物密度の確保が課題として挙げられる。

一方、地盤における観測に関しても、少なからぬ課題は存在する。例えば、地盤液化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

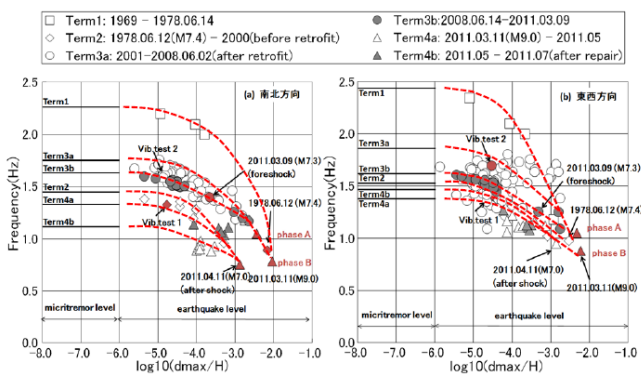


図17 変形角と1次固有振動数の関係

図3 同一建物における長期観測から得られた累積的損傷の評価事例⁹⁾



写真2 東側から見た被災建物

写真3 大破した南東の隅柱の柱脚

サイト波作成の期待に応えられるだけの観測点密度は十分とは言えない。

地盤系の観測については、整備された観測網を「インフラ」として活用することが日常となってしまったことが、逆に、そのインフラを維持管理していく上での苦労や、強震動を観測するという本来の目的だけでは観測網を維持していく大義として不十分な現実が、利用者には理解されていないことが隠れた課題でもある。

また、地震計に関しても、特に維持管理の観点から多数の課題が存在する。強震観測は、観測対象とする地震の再現期間が機器の寿命と比較して極めて長いという特殊性を有している。数年あるいは数十年に一度の機会を間違いなく捉えて記録する重要性は言うまでもないが、同一建物が共用期間内においてレベル2クラスの強震動に複数回遭遇した際の累積損傷の評価という点からも長期間にわたる確実な観測が求められる⁹⁾。このためには、日常の継続的な機器の維持管理、すなわち、機器が正常な状態で動作していることを、日々継続的に確認し続けることが重要となる。この努力を継続すること自体が課題であることに加えて、機器の老朽化や、新たな知見により既設機器が性能不適格となるという課題が存在している。

例えば、近年の地震においては、新しい地震計により、これまで想定されていた以上の大加速度が観測される事例が頻発しているが、古い地震計ではこのような大加速度を想定していない場合もあり、最新の地震計への更新が望まれる。また、近年関心が高まりつつある長周期地震動に対して、観測設備の仕様を更新することも必要とされている。同時に、老朽化が進んでいる観測設備を継続的に更新し、観測体制を維持し続けることも求められる。

一方で、観測に関わるコストと成果との費用対効果という観点について、昨今、より明確な説明性を求められるようになってきていることも事実である。

近年、無線やネットワークを活用した新しい地震観測システムの開発が盛んに行われているが、これらの新しいシステムに対する評価検討も、まだ始まったばかりである。

さらに、これらの新しい観測体制により得られる膨大な観測記録をどう効果的に活用していくかという、これまではない新たな課題も今後俎上に載ることが予想される。また、観測記録の活用という観点では、データの共有・共同利用といった枠組みに対する、社会的側面からの課題の検討も必要となると思われる。

今後予想される巨大地震に際して、確実に記録を得ることができるような観測体制や観測設備の整備ならびに継続的な維持管理に対する必要性は、今後

ますます高まるものと思われるが、そのためには、これら個々の課題の解決に向けて、関係者のたゆまざる努力が求められている。

2.3 建築学会強震観測小委員会の活動

ここで、話がそれるが、建築学会強震観測小委員会の活動について少しご紹介しておきたい。

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すでに強震測定事業として活動が行われている。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。さらに、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。(表1)^{10), 11)}

これら歴代の委員会を通じて、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。

現在、防災科研、建築研究所、気象庁をはじめとして、強震観測に関わる研究機関、大学、電力、ゼネコン、設計事務所など24機関から計27名の参加をいただいて活動を行っている。

小委員会活動成果の一つとして、強震観測に関わる様々な知識やノウハウを整理し、ウェブ上で「強震観測の手引き」¹²⁾として公開しているが、この「手引き」は、代々の委員によって継続的に整備が行われている。(図4)

また、国内における建物強震観測が、産官学にわたる多数の組織により実施されており、全体像の把握が非常に困難であるという課題に対処することを目指して、公開文献に基づき、国内における建物強震観測の実態を整理した「強震観測建物台帳」の整

表1 建築学会における強震観測関連委員会の変遷

開始年	部門	本委員会	運営委員会	小委員会
1956年～	事業		耐震連絡委員会 (武藤清)	
1982年～	事業		耐震連絡委員会 (大沢胖)	第2部会(強震観測) (大沢胖)
1990年～	事業		耐震連絡委員会 (渡部丹)	強震観測小委員会 (大谷圭一)
1992年～	事業	地震災害委員会 (渡部丹)	強震観測運営委員会 (大谷圭一)	強震データ小委員会 (瀬尾和和)
1996年～	研究	災害委員会 (渡部丹)		強震観測データベース小委員会
1997年～	研究	構造委員会	振動運営委員会	強震観測小委員会 (北川良和)
現在に至る				

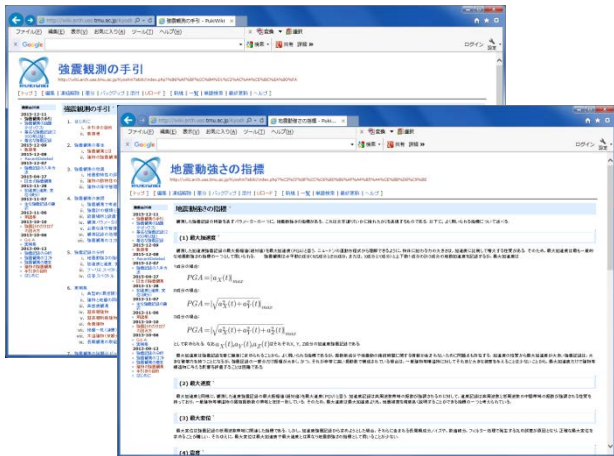


図4 「強震観測の手引き」例¹²⁾

備を進めている¹³⁾。台帳そのものは委員会外には原則非公開であるが、学術利用に限定して他委員会あるいは他学協会への提供を積極的に行っている¹⁴⁾など。ちなみに、2015年度末時点における台帳登録観測建物数は約500棟となっているが、観測結果が公開されていない建物はかなり多いことが想定されることから、日本における地震観測棟数はこの数倍に達するものと推定される。

これらの現在進めている活動に加えて、今後も、観測記録から地盤・建物の応答と被害を確実に捉える技術の追求、観測の普及を目指した啓発活動などを小委員会として継続することを予定している。

強震観測を取りまく将来的な多数の課題に対して、小委員会としてできることは限定的であるが、前述のように、観測体制整備推進のための技術や戦略の提示などを通じて貢献することを目指していきたいと考えている。

3. モニタリングの現状と課題

この節では、モニタリングがこれまでたどってきた歩みを簡単に概観し、現状とその課題について整理してみたい。

3.1 モニタリングの定義

ここでは、まず、モニタリングの定義とは、という点について述べたい。

本報告では「モニタリング」という用語を用いているが、経緯をさかのぼると、「ヘルスマニタリング」あるいは「構造ヘルスマニタリング」という用語が用いられることが一般的であったと思われる。(なお、本報告では、以降、文脈に応じて適宜使い分けるため用語の不統一はご容赦いただきたい)

構造ヘルスマニタリングの定義については、学術的に定まったものがあるわけではないが、一つの考え方として「センサから得られた情報に基づき、構

図5 「強震観測建物台帳」例

造物の損傷を検出評価したり、あるいはその構造健全性を監視したりといった技術」であり、「センサ」「構造物の損傷検出」「健全性の評価」を構成要素とする複合技術である、と大きく捉えることができる¹⁵⁾。

構造ヘルスマニタリングは、元来、地震による損傷に限定したのではなく、劣化や日常の繰り返し荷重による損傷なども含めて、広く構造物の損傷を検出することを目的とした技術であり、もっと言えば、「構造」の指す対象は、建物や橋梁といった建築物に限らず、航空機や機械、プラントまで含めた幅広い概念である¹⁶⁾。

筆者は、2006年大会P Dにおいて、構造(ヘルス)モニタリングの「構成要件」として以下の7項目を挙げている¹⁷⁾。

- (1) モニタリングの対象とすべき外的要因を想定する
- (2) その外的要因により構造物に生じる損傷程度を推定する
- (3) 損傷により生じる物理量の定量的変化を推定する
- (4) その物理量の変化をセンサで検出するメカニズムを想定する
- (5) 必要とされるセンサスペック・配置等を設定する
- (6) 全体システムの構成を決定する
- (7) システムによる損傷検出シナリオを構築する

この「定義」では、特に地震による損傷に限定しているわけではなく、劣化であっても繰り返し荷重による損傷であってもシステムを構成できる可能性が示されている。

しかしながら、後述するように、特に建築構造に限定した領域においては、兵庫県南部地震以来続く一連の大地震において、地震時における構造物損傷の即時評価、という観点から「ヘルスマニタリング」が語られる機会が増加し、結果的に「モニタリング

＝地震直後における建物構造被害の即時推定」という認識が広まったものと推察される。

モニタリングにおける損傷要因として地震動に限定して語られることが増加したことが、強震観測とモニタリングとに対する認識が混乱する一つの要因であったと思われる。

なお、本報告および本日のパネルディスカッションにおいては、モニタリングの対象は地震動および建築構造物に限定して進めていくことをここでお断りしておきたい。

3.2 モニタリングの歩み

ここでは、モニタリングのたどってきた歩みを概観してみたい。

山本¹⁶⁾によれば、「シビルインフラストラクチャのヘルスマニタリングシステムという言葉が言われ出したのは、1992年頃のアメ리카において」であった。当時、老朽化が進む土木構造物、特に橋梁の維持管理はアメ리카において喫緊の課題であり、その解決技術として構造ヘルスマニタリングに対する関心が高まっていた¹⁸⁾。

その後、1994年に発生したノースリッジ地震、続く1995年に発生した兵庫県南部地震においては、多数の構造物が壊滅的な被害を被ったが、その中でも、鉄骨構造における梁柱接合部の破断に注目が集まった¹⁹⁾。一般的に耐火被覆に覆われている鉄骨造において、地震後に破断の有無を検出することは容易ではなく、これが、構造ヘルスマニタリングが「地震時の損傷検出法」のひとつとして注目を集め始めた大きなきっかけであった²⁰⁾。

技術面では、構造ヘルスマニタリングに関心が集まる以前から「システム同定」という分野において、様々な理論的・実験的研究が行われており、初期の構造ヘルスマニタリングにおいては、システム同定技術を応用した研究が主流であった²¹⁾など。システム同定は、未知のシステムの入力と出力からシステムをモデル化する技術であり、この技術を用いてモデルの特性変化すなわち構造損傷を間接的に検出しようという試みが研究されていた。

一方で、光ファイバセンサなど全く新しいセンサを用いて損傷そのものを直接的に捉えようというさまざまな試みも盛んに行われるようになっていた²²⁾、²³⁾など。

しかしながら、いずれの研究も、実験的な研究であったり、理論に偏った研究であったりと、必ずしも実務的な有用性が確認されたわけではなかったように思われる。また、この技術の受益者である建物所有者や管理者、防災関係者における関心が低かったこともあり、構造ヘルスマニタリング技術の適用は極めて限定的であった。

そのような状況下において、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震が発生し、その後、モニタリングを取りまく環境も大きく変化することになった。

東日本大震災においてモニタリングが注目されるようになったきっかけは、震災以前から都内のある超高層建物に設置されていた地震被災度即時推定システムが、地震直後の行動判断に大きく貢献したと報道されたことにある。すなわち、BCP的観点から、モニタリング＝「被災度即時推定」の有用性が実証されたのである。

この時用いられた技術は、ハードウェア的には従来からある地震計と同等であったが、従来と異なっていたのは、観測結果を即時に処理し一定の判断を建物ユーザに提示する、という仕組みが組み込まれていたことである。実は、この点が強震観測とモニタリングの大きな相違点になるのであるが、ハードウェア的には強震観測と同等であったことが、その後、強震観測とモニタリングが混同して語られるようになった一つの要因であったと思われる。

東日本大震災においては、特に首都圏において顕在化した「帰宅困難者問題」に対する関心が高まり、その後、行政が対策を条例化するなどの動きが続いている。例えば、東京都は2013年4月に「帰宅困難者対策条例」を施行したが、そのガイドラインでは、大地震が発生した場合、建物にとどまることが可能かどうかを地震後数時間内に事業者が判断することを求めている²⁴⁾、²⁵⁾。この動きを受けて、建物を多数所有するビルオーナーなどにおいて、地震直後における被災度即時推定すなわちモニタリングに対するニーズが急激に高まっており、モニタリングシステムの実装は確実に浸透しつつある。

話を強震観測の視点に少し戻すと、このような構造モニタリングに対する関心の高まりは、強震観測を推進する立場としても歓迎すべき傾向である。これを機に、モニタリングのみならず強震観測に対する関心も同時に高まれば、強震観測の普及への弾みにつながることを期待される。

3.3 モニタリングの抱えてきた課題

モニタリングが抱えている直近の課題については、本日の他の話題提供に譲りたいが、ここでは、10年前に筆者が掲げた「課題」を紹介し、その課題が現状どうなっているかという点について触れてみたい。

筆者は、2006年大会PDにおいて、モニタリングが抱える課題として以下の3点を紹介している¹⁷⁾。

- (a) 想定される外的要因でどの程度の損傷が生じ、その損傷に伴い検出対象の物理量がどの程度変化するかといった点につき、定量的に評価するための知見不足、ならびに検証不足

- (b) 技術の受益者であるはずの建物エンドユーザにおける関心の低さ(エンドユーザに対する専門家からの説明不足)
- (c) モニタリング結果の「所有権」の問題といった社会的課題

(a)については、「損傷を定量的に評価する指標に関する知見不足」と「実構造物における手法の検証不足」の2つの課題に分けて考えることができる。

前者については、本日の他の話題提供でも触れられているとおり、実用的なシステムの普及展開において層間変形角などを指標とする事例が増えているものの、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、まだ課題は残されていると言えそうである。

後者の定量評価可能な検証例不足、という課題については、損傷指標の如何に関わらず、実状としては10年前と大きな変化はないのではと思われる。これはモニタリングの課題であると同時に、建物系強震観測における課題でもある。すなわち、2.2節において示したように「建物系観測については、その質・量と共にまだまだ不十分」という課題が現存するが、このことが、その後の大規模地震において、十分な検証例を得ることができなかった原因となっている。しかしながら、東日本大震災以後、モニタリングシステムを含めて強震を観測するシステムの普及が進みつつある現状を見ると、次の「機会」においては、これらの課題解決につながる何らかの新しい知見が得られるのではと期待したい。

(b)のエンドユーザにおける関心の低さ、については、前述の通り、東日本大震災をきっかけに大きく状況は変わり、現在ではほぼ解消していることは疑いの余地はないと思われる。大地震の発生とそれに伴って顕在化した新たな課題(帰宅困難者問題)が外力となり、既存の課題が解決された一つの事例といえることができる。

(c)については明確な評価が難しいところではあるが、筆者が感じる限りは、10年前に想定していたほど普及に際しての抵抗になっていないように思われる。すなわち、(b)の課題の解消が連鎖的に(c)の課題の低減をもたらしたように思われる。このあたりは、本日の他の話題提供にて、掘り下げた議論がなされると期待したい。

このように、ある時点で課題と思っていたことが、大きなイベントをきっかけに一気に解消に向かうことも歴史の事実である。現時点の課題も、今後の「イベント」における経験を通して解消に向かうことを期待したい。

4. 強震観測とモニタリングの共通点・相違点

建物強震観測とモニタリングは、「建物にセンサを取り付けてその挙動を観測する」というハードウェア面での共通点を有しているが、一方で、得られた観測結果の活用において明らかな相違点を有している¹⁵⁾。本節では、両者の共通点と相違点について比較解説してみたい⁸⁾。

4.1 共通点

繰り返しになるが、建物強震観測とモニタリングは、センサを用いて建物の「揺れ」を観測するところから始まる、というハードウェア面での共通点を有している。この「揺れ」を捉えるセンサとしては、「地震計」が用いられることが一般的である。この点が両者の基本的な共通点であるが、同時に、この点が、両者が混同して語られる一つの根本的な要因となっている。

ハードウェア面に加えて、観測されたデータを処理する技術、すなわち信号処理技術においても両者は共通性を持っている。ただし、強震観測では一般的に「地震後、時間が経ってから、研究者が能動的に処理」するのに対して、モニタリングでは「地震直後に、機械が自動的に処理」する点が異なる。すなわち、結果に求められる即時性の点で差異が認められる。

4.2 相違点

次に、両者の相違点を見てみたい。共通点が前述の2項目程度に絞られるのに対して、相違点については、異なる観点から複数の差異を挙げることができる。

(1) 目的の差異

まず、両者の目的における差異がある。すなわち、強震観測が、観測された建物そのものと言うよりは、観測建物の設計検証などを通じて次の建物設計に活かすことを究極の目的にしていることに対して、構造モニタリングの主目的は、設置した建物とその関係者に限定した効果に集中しているという点で、明確な差が見られる。

強震観測においては、地盤系観測も含めて、常に、その成果を次の設計に活かすことと、そのためのフィードバック、すなわち、観測と設計との比較が繰り返して行われてきている。一方で、モニタリングにおける目的は、当該建物そのものに対する評価に限定されており、他の建物や未来の設計へのモニタリング成果の波及は原則的に対象外とされている。

この目的における差異が、両者の他の差異を生じさせる根源となっていると思われる。すなわち、両者の本質的な差は「その目的」にある、といえることができる。

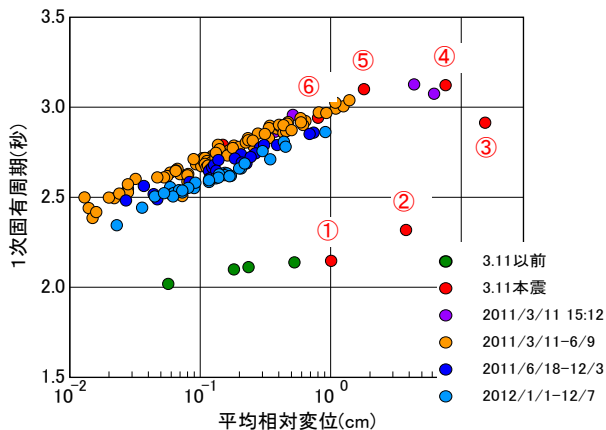


図6 観測結果に見られる建物動特性振幅依存の例²⁶⁾

一方で、これらの目的をさらにさかのぼって考察すると、そもそも強震観測もモニタリングも、建物や都市とそこに居住する人間の安全・安心を確保するために貢献する、という共通の大きな目的を持っているわけであり、この点では両者の目的は一致しているということもできる。

(2) 対象とする地震動の差異

強震観測が、微小振幅から大地震まで幅広い挙動を網羅的に把握することを目指しているのに対して、モニタリングは、巨大地震時における建物居住者の安全性の確保に役立てることを主目的にしているという点でも差がある。

この差異は、前述の両者の目的における差異がそのまま反映されたものということができる。

すなわち、広範囲な振幅における設計モデルの妥当性を検証するために、強震観測においては振幅にかかわらず成果の利用が図られてきている。例えば、構造物特性が振幅依存性を有している場合、中小地震から大振幅に至る広範囲における特性変化を評価すること自身が目的となることもある²⁶⁾など。

一方、モニタリングにおいては、一定規模以上の地震において、その効果が発揮され始めるため、対象とする地震動は比較的大振幅に限定される。もっとも、モニタリングの「効果」として、安全であることを居住者に伝えるという側面もあることから、中小地震であっても評価対象として意義があるという考え方もある。

(3) 結果分析における差異

建物被害の分析という観点からは、強震観測が被害原因を追及することを指向しているのに対して、構造モニタリングは被害結果を正確に評価することを指向している点でも差が見られる。

この差異も、両者の目的における差異がそのまま

反映されたものである。

建物系強震観測においては、観測結果の分析は、入力地震動の評価から始まって、応答挙動を「どう説明できるか」という観点からの評価分析が中心となる。これは、建物応答あるいは被害の因果関係を明確にすることで、次の設計に対するフィードバックを図るものであり、目的そのものを実現する手段の現れということができる。

一方、モニタリングにおいては、入力動や被害をもたらした構造上の要因など「原因」についての評価にとらわれることなく、粛々と「結果」の評価分析に注力する、というのが具体的な姿となっている。

また、分析に際して、即時性が求められるか否かが両者の差異でもあることは、前述したとおりである。

(4) ハードウェアの差異

両者は共通のハードウェア基盤を有しているが、細かい点で見ると、ハード面においても差異が見られる。

前述の通り、強震観測とモニタリングは、センサを用いて建物の「揺れ」を観測するところから始まる、というハードウェア面での共通点を有しており、この「揺れ」を捉えるセンサとしては、「地震計」が用いられることが一般的である。

強震観測において「地震計」以外のセンサが用いられることはまれであるが、モニタリングにおいては、「比較的大振幅における損傷の検出」に特化して、地震計とは全く異なる仕様によるセンサを用いた事例も見ることができる。例えば、いわゆる損傷制御構造において、エネルギー吸収を司るダンパー部分の最大変形の検出に焦点を絞って、最大値検出センサを設置した事例などが見られる²⁷⁾。

この差異も、時刻歴波形を観測しなければ始まらない強震観測と、損傷を評価さえできればその検出方式にはこだわらないモニタリングとの、主目的の差異から生じる違いである。

4.3 強震観測とモニタリングの協働

強震観測とモニタリングは、以上のような共通点と相違点を有しているが、安全・安心な社会の実現に向けて貢献するという大きな共通目的を有しており、両者が協働して今後の課題解決に取り組む意義は大きい。そのために、両者がお互いに求める方向性を明らかにしていくこともその一つの取組となり得る。

一例として、筆者は2008年の強震観測シンポジウムにて、「モニタリングから強震観測への要望」について以下のような項目を提示している¹⁵⁾。

- (a) 免震、超高層建物あるいは損傷制御構造といった特殊構造物ではない「普通」の構造物において観測事例を増やすことが望ましい。
- (b) 加速度観測だけでなく、部材歪や層間変位といった、損傷指標となりうる物理量の観測事例を増やすことが望ましい。
- (c) 「強震」ばかりではなく、微動から強震に至るまで、建物の広い振幅範囲を観測対象とすることが望ましい。
- (d) 観測結果は分野全体における貴重な財産であり、可能な限り成果を公開して、他の研究者と共有することを目指すことが望ましい。

これらの項目は、当時のモニタリングを取りまく課題を解決するための方向性として、強震観測に対して提起した提案であったが、あらためて項目を眺めると、現在、強震観測が抱える課題の一部を解決するための提案にもなっていることに気づかされる。一方、強震観測の立場からモニタリングに対する要望を現時点で挙げるとすれば、以下のような項目が候補となる。

- (a) モニタリングの結果に注目するばかりではなく、設計の検証という観点でモニタリング結果の分析を試みることが望まれる。
- (b) 可能であれば、モニタリング結果もしくは検証結果を公開し、モニタリングおよび強震観測の貢献を広くアピールすることを目指すことが望まれる。
- (c) モニタリングに新しいセンサを用いている場合、モニタリングを通じて得られたセンサの特性等の知見について、可能であれば公開し、他の研究者・実務者と共有することが望ましい。

今後、このような両者間の協働を通じて、両者が抱える課題が解決に向かうことが、両者の一層の普及、発展のためには欠かせないと思われる。

5. まとめ

本報告では、強震観測とモニタリングそれぞれの現状を概観し、さらに、両者の共通点と相違点について整理を試みた。

共通点と相違点、さらにそれぞれが抱える課題を並列に俯瞰すると、両者は相違点がありながらも密接な関係を保ち、お互いに進化しつつ現在に至っているということを実に認識することができる。

両者は、建物や都市とそこに居住する人間の安全・安心の確保に向けて貢献するという大きな共通目的を有している。両者の今後の普及、発展、さらには、安全・安心な社会の実現のためには、今後、

両者の共通点と相違点を明確にしなが、望まれる協働あるいは住み分けについて、一層の議論を深めていく必要があると思われる。

参考文献

- 1) 功刀卓・青井真・藤原広行：強震観測－歴史と展望－、地震 第2輯、第61巻特集号、pp.19-34、2009
- 2) 鹿嶋俊英：公共建物における強震観測、建築防災、日本建築防災協会、No.352、pp.9-14、2007.5
- 3) 防災科学技術研究所：東日本大震災調査報告、主要災害調査第48号、2012.3
- 4) 気象庁：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告 第I編 気象庁技術報告 第133号、2012.12
- 5) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 共通編 地震・地震動特徴的な地震記録、pp.148-151、2014.3
- 6) 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号、2012.3
- 7) 飛田潤：東日本大震災における地盤・建物の強震観測状況、2012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.7-14、2012.9
- 8) 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
- 9) 源栄正人、ツェンバ・ツォグゲレル、吉田和史、三辻和弥：東北地方太平洋沖地震時における被災建物の振幅依存特性の長期モニタリング、日本地震工学会論文集 第12巻、第5号(特集号)、2012
- 10) 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
- 11) 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
- 12) <http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/KyoshinTebiki/index.php>
- 13) 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
- 14) (社)日本免震構造協会：第7回技術報告会梗概

- 集、2015.9
- 15) 中村充：建物の強震観測と構造ヘルスマモニタリング、第5回強震データの活用に関するシンポジウム資料、pp.31-38、2008.12
 - 16) 山本鎮男編著：ヘルスマモニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視ー、共立出版、1999
 - 17) 中村充：構造ヘルスマモニタリングと地震観測、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
 - 18) Doebling, S.W., C.R.Farrar, M.B.Prime and D.W.Shevitz : Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS、1996.5
 - 19) 中島正愛：米国ノースリッジ地震と兵庫県南部地震からみる被害の特徴と相違点、G B R C、20-3 1995.7、pp.4-15、1995.
 - 20) 中村充、安井讓：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、517、pp.61-68、1999.3
 - 21) 中村充、竹脇出、安井讓、上谷宏二：限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定、日本建築学会構造系論文集、第528号、pp.75-82、2000.2
 - 22) 岩城英朗、岡田敬一、柴慶治：FBG型光ファイバセンサを用いた建築構造ヘルスマモニタリングシステム、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、B-2、pp.523-524、2002.8
 - 23) 圓幸史朗、池ヶ谷靖、中村充、柳瀬高仁：スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマモニタリングシステムの開発、日本地震工学会論文集、第7巻、第6号、pp.17-30、2007
 - 24) 東京都：東京都公報、平成24年3月30日
 - 25) 首都直下地震帰宅困難者等対策協議会：事業所における帰宅困難者対策ガイドライン、2012.9
 - 26) 中村充、勝俣英雄、福山洋：超高層S R C建物の地震観測結果に見られる動特性の振幅依存性、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、B-2、pp.591-592、2013.8.
 - 27) 川合廣樹：性能目標設計としての損傷制御構造、2003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.32-37、2003.9