

建物の強震観測に関する将来像(案)
—強震観測小委員会活動報告(案)—

平成14年(2002年)12月時点

強震観測小委員会

建物の強震観測に関する将来像(案)
—強震観測小委員会活動報告(案)—

目次

1. はじめに	A.1
2. 強震観測に関する兵庫県南部地震以降の提言	
2.1 学会等による提言の概要	A.3
2.2 強震動解明のための観測に関する提言のまとめ	A.3
2.3 構造物の挙動解明のための強震観測に関する提言(地盤—構造物系)	A.4
3. 現状と問題点	
3.1 地盤における観測	A.6
3.2 構造物の地震時挙動の観測	A.6
3.3 地盤—構造物間の動的相互作用に関する観測	A.8
3.4 データ流通	A.10
4. 望まれる観測網	
4.1 建物強震観測網の全国展開	A.12
4.2 高密度建物振動観測点	A.14
5. まとめ	A.16

1. はじめに

我が国の強震観測は、1953年(昭和28年)に開発されたSMAC型強震計が東京大学地震研究所に設置されたところから幕が開く。当時の強震観測は、建築物や土木構造物に対する地震力の把握や地震力のどのような量で構造物が破壊したかなどを知ることが主たる目的であり、構造物中心の観測であった。しかしながら、当時の強震計は極めて高価で、翌1954年末の観測点は、民間協力によるものが4個所と国費によるものが2個所の計6個所に過ぎなかった。その頃から強震計の全国展開の構想は考えられており、1958年には国費による強震計が16個所に増設された。その後、我が国の高度経済成長と相俟って民間の強震観測が国費による設置分を大きく上回り、官学民の強震観測を束ねる強震観測事業推進連絡会議に登録された強震計(SMAC型強震計以外も含む)は、1990年現在で総数2000台程度にまで上った。これらの多くは建築物に設置され、特に高層建築などの先端的な耐震設計が行なわれた建物に偏り、また東京、関東地方に集中するなど地域的な偏在も目立った。

このように、我が国には相当な数の強震計が設置されていたが、被害地震が発生した際に、震源近傍の強震動や終局限界に至るような建物の挙動を確実に観測するには未だ十分な観測密度にはなっていなかった。このような観測体制の不備を我々の前にまざまざと見せ付けたのが1995年の兵庫県南部地震であろう。

兵庫県南部地震を契機にして、我が国の地盤を対象とした強震観測の状況は大きく変化した。公的機関により数千台に及ぶ地震計が全国に配置され、大地震時における初動体制の早期確立と共に、良質かつ均質な観測データが大量に収集、公開されるようになった。これらのデータは、地震学や耐震工学、地震防災等の発展に大きく寄与している。

一方、建物或いは地盤—建物系を対象とした観測は、前述したような歴史的背景から、その多くが民間によってなされているのが実状であり、近年整備された地盤を対象とした強震観測とは基本的な違いがある。兵庫県南部地震をうけて、建設省建築研究所(現在:独立行政法人建築研究所)が首都圏に建つ約20の建物を対象に建物観測地点の補強を行ったが、その他の機関ではこのような動きはみられない。日本建築学会では既に、建物の強震観測の充実を求める提言(1998年1月)を出しているが、建物を対象とした強震観測は必ずしも十分に整備されたとはいえないのが現状である。

兵庫県南部地震において、日本建築学会が収集した観測記録によると、地盤以外で少なくとも2点以上の観測が行われている建物観測点は30棟に過ぎず、その多くが民間の観測である。観測記録のデジタル値を公開した機関は、建設省建築研究所のほか僅かであり、民間の観測データは一般には公開され難いのが現状である。これは公開したデータの使われ方に共通な理解が得られていないことや被害建物の説明責任の所在が必ずしも明確になっていないことなどに問題があり、今後とも民間の観測データが公開されることは殆ど期待できないと思われる。

また、観測データが公開されても建物の設計資料が公開されないと十分にデータを活用できないことも考えられるが、民間の建物は個人の所有物であるため、設計資料までの公開を要求することは更に困難である。

このように観測自体を民間に強く依存していることがデータ公開を困難にさせている大きな要因である。

以上述べたようなデータ公開を含めた強震観測の現状が、建物の耐震安全性の向上、延いては都市全体としての地震災害軽減を図る上で、大きな研究的阻害となっている。また、民間が行っている観測は、経済的制約が大きく、個々の建物の観測体制が十分でない場合も有り、その継続性についても危惧される所である。

建物における強震観測は、実規模構造の破壊過程の解明・実証を目的とした三次元振動破壊実験では得られない、地盤と建物との連成効果及び材料や施工条件等によるばらつきや2次部材の影響などを含んだ現実の挙動が評価できると共に、終局に至る真の耐力を把握できる可能性があり、建物の強震時挙動の解明や耐震設計、建物健全性評価等への直接的な活用が期待される。取り分け、理想的な観測体制である地盤—建物系の強震観測データは、建物への真の入力地震動や地下逸散減衰を含めたトータルな減衰性能が高精度に評価できることから、近年導入された性能指向型の設計体系をより信頼性のあるものとして普及、促進する上で極めて重要である。

建物や地盤の違いを考慮し、建物を対象とした強震観測を統一的に考え、ある程度以上の地震が発生した時に確実に観測できるようにするための全国的配置について検討する必要がある。また、諸々のデータ公開を考えた場合、公共の建物を観測対象とすることが望ましいのではないだろうか。

建物を対象とした観測体制の整備は、建築計画、都市計画、防災など多くの分野での貢献が考えられ、その国家的利益は計り知れないものがあると思われる。強震観測のあるべき姿の具体的な内容について策定し、提言することが重要であると考ええる。

＜文責：若松邦夫＞

《参考文献》

- 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—，日本建築学会強震データ小委員会，1995. 1.20.
- 工藤一嘉：強震観測—現状と展望—，地震第2輯，第47巻，pp225—237，1994.
- 大谷圭一，田中貞二：全国強震観測網の現状，強震観測シンポジウム資料集，日本建築学会，1987. 3.27.
- 高橋克也：民間での強震観測の光と陰，日本地震学会ニュースレター，Vol.12 No.6，March 10，2001.

2. 強震観測に関する兵庫県南部地震以降の提言

2.1 学会等による提言の概要

日本建築学会では、下記のように過去に3回の提言をまとめ、公表している。

「建築および都市の防災性向上へむけての課題 ―阪神・淡路大震災に鑑みて―」

第一次提言 1995年7月

第二次提言 1997年1月

第三次提言 1998年1月

第一次提言は、震災直後に特に専門分野を越えて横断的に、かつ緊急的に取り組むべき課題として項目を挙げている。第二次提言では、都市計画・まちづくりに関わる諸課題に限定し、第一次提言の後の研究活動によりより鮮明になってきた緊急かつ重要な事項として20の提言を挙げている。第三次提言は最終提言であり、第一次提言ならびに第二次提言に示した項目をさらに具現化し、新たな項目を加えた74の提言より成る。

土木学会でも、3回の提言をまとめ、公表している。

「土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次提言）」1995年5月

「土木構造物の耐震基準等に関する提言（第二次提言）」1996年1月

「土木構造物の耐震設計等に関する提言（第三次提言）」2000年6月

第一次提言は、耐震基準の見直し等、耐震設計の今後の方向についての基本方針を示したものであり、二段階（レベル1，レベル2）の地震動強さに基づく耐震性能の照査，構造物の重要度の考慮，現行の耐震基準の見直し，耐震補強の推進，基準の見直しのための研究開発の促進の5項目を骨子としている。第二次提言では、第一次提言で示した土木構造物耐震性能の強化のための諸方策をより詳細に示すと共に、より広い観点からの地震防災性能向上のための基本方針を追加している。第三次提言では、第一次・第二次提言を具体化して実務に反映するためには多くの課題が残されている現実を受け、各分野で進行中の知見の見直し・技術開発・研究状況を集約し、今後指向すると思われる、あるいは指向すべき方向を示している。第一次から第三次提言は一体であり、全体として「土木学会による土木構造物の耐震性能と耐震設計法に関する提言」として位置づけられている。

日本学術会議では、第17期社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会における審議結果をとりまとめ下記の報告書を発表している。

「災害に強い社会をつくるために」 2000年4月

この報告は、災害に対する危機管理システムを確立する重要性の認識の高まりを受け、安全レベルに関する社会的合意形成、観測による自然災害の実体把握、災害情報の価値と役割について、現状及び問題点を整理し、改善策・提言等を挙げている。

以下では、上記に挙げた提言から、強震動の解明、構造物の挙動の解明を目的とした強震観測に関する部分を抜き出し、その内容と背景についてまとめる。尚、日本建築学会の提言については、第三次提言が第一次・第二次提言の内容も包括していると考えられるので、第三次提言のみを対象とした。

2.2 強震動解明のための観測に関する提言のまとめ

日本建築学会による提言では、

「震源の特性などを取り入れた設計用地震動の設定が必要である。」（提言5）

「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である。」（提言7）

「震源特性、地形及び地盤の動特性を考慮した地震動の予測・評価法を確立する必要がある。」（提言55）

「リアルタイム被害推定システムを一元化し、汎用できるものとして構築すべきである。」（提言64）

を挙げている。

提言7の背景として、兵庫県南部地震では多数の強震記録が得られ、地震動特性・建物挙動の解明に大きく寄与したが、一方では地盤・建物に関する系統的なデータが不十分であったため、依然として信頼性の高い設計用地震動を設定するには至っていないという問題点が挙げられている。そして、

「この現状を打破するために、特に地盤と建物における同時観測を実施する体制を強化した高度で高密度な強震観測システムを構築する必要がある。さらに強震観測記録を利用した研究のより一層の推進を図るために、データの早期公開および相互利用が可能な体制作りをする必要がある。」と述べられている。

土木学会においては、

「直下型地震による地震動特性の解明」（第一次提言）

「高密度強震観測網の整備」（第一次提言）

を挙げている。特に第三次提言におけるレベル2地震動の評価法に関しては、

「レベル2地震動は、対象となる震源断層の調査、当該地点の地盤調査、および当該地点で観測された地震記録に基づいて評価することを原則とする。」

と記されており、建設地点における観測記録に基づく評価方法を、レベル2地震動を算定する上で最も信頼性が高いと位置付け、強震観測の重要性を強調している。

日本学術会議の報告書では、「有効かつ効率的な観測展開のための提案」として横断的観測体制と公開性を確立し、自然災害に関する原データの保存と公開、およびデータ集積体制を整備することを課題として挙げている。また、「資料の有効活用のための具体的提案」として、公的資金による日常的データのオンライン化とデータベース化を挙げている。

2.3 構造物の挙動解明のための強震観測に関する提言（地盤—構造物系）

日本建築学会による提言では、

「地盤-基礎-構造物を一体とした耐震性能を評価した設計を行う必要がある。」（提言8）

「地盤-基礎-構造物の動的相互作用解明のための研究推進が必要である。」（提言56）

「基礎の地震時における挙動の解明と基礎の耐震設計法を向上させる必要がある。」（提言57）

「信頼性の高い高精度の地震応答解析手法を開発する必要がある。」（提言58）

を挙げている。

提言8では、建物一体としての安全性を確保するために、地盤—基礎—構造物の相互作用効果を適切に取り込んだ入力評価を行い、上部構造の動的応答と共に、基礎構造の地震応答を連成系として評価することの必要性を述べている。提言56は、「研究・技術開発の推進」の項で挙げられており、自由地盤に対する建物基礎入力地震動の低減効果をもたらす動的相互作用を定量的に解明するための研究の一層の推進を挙げている。さらに提言57では、地盤—基礎—構造物一体系の詳細解析を通して、建物と基礎の地震時挙動を把握し、基礎の挙動把握の必要性を述べている。その目的のためには、液状化地盤における地盤—杭基礎—構造物系の強震アレイ観測の蓄積が重要であることを主張している。提言58には、「強震動が入力する場合の建物の動的な挙動について信頼性が高く高精度に解析する手法を開発し、汎用の手法として確立する必要がある」と述べられている。その中で、「高信頼性の高

精度の解析手法の開発にあたっては、モデル化の基礎となる力学特性を定めるに際し、実構造物、実大・模型試験体、実大・模型部材を対象とした実験データの蓄積を欠くことができない。」と記され、建物のモデル化の際には実データの必要性を強調している。

土木学会においては、基礎構造物の耐震設計法の確立のための課題として以下の項目を挙げている。
「基礎―地盤系の非線形領域の動的相互作用の影響を設計に取り込むための研究推進」（第二次提言）
「地盤―基礎―構造物全体系の地震時挙動を把握するため、実構造物基礎での計測体制を整備すると共に、実験手法の開発や動的数値解析手法の確立を行う必要がある。」（第三次提言）

合理的な基礎構造物の耐震設計法の確立のためには、構造物基礎の実際の地震時挙動特性を把握することが不可欠であるが、幅広い地盤条件、構造条件に対し構造物基礎の地震時挙動の計測が必ずしも十分に行われていないことから、大規模な振動実験や起振機実験、あるいは遠心場での小型振動実験などの実験による評価手法の開発が課題として挙げられている。一方で、実験では地盤―基礎―構造物系の地震時挙動をそのまま実験により再現することは困難であることから、実構造物基礎における強震動の計測体制の整備を課題として挙げている。

3. 現状と問題点

3.1 地盤における観測

政府の地震調査研究推進本部は、平成9年に策定した「地震に関する基盤的調査観測計画」の一部として、強震観測施設の整備等を推進してきた。観測計画の目標として、水平距離で約20km 間隔の三角網を目安として設置する高感度地震計に併設して地下の基盤に強震計を設置し、これに近接して地表の強震計を配置することが目標とされた。防災科学技術研究所においては、平成12年度末までに、520点の高感度地震観測施設に併設する形で、地下の基盤および地表の強震計を設置した(KiK-net)。今後、高感度地震観測施設の設置に併せ、地下の基盤での強震計の整備を引き続き進めるとともに、関東・東海地域などにおいて以前から設置されていた観測点についても、高感度地震観測施設の更新の際に基盤・地表での強震計の整備を行うとされている。

基盤調査観測に基づく強震観測以外にも、気象庁、国土交通省、自治体、防災科学技術研究所などが合わせて数千点の強震観測点を整備してきた。例えば防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netは合わせて1500点以上の観測地点を全国規模で展開しており、観測記録は防災科学技術研究所のWeb Siteから入手することができる。また気象庁は95型震度計を全国に400点以上有しており、そのデジタル記録は定期的にCD-ROMで頒布されている。このような複数の機関の強震計記録の連携が今後の課題であると考えられるが、観測点の分布・数においては全国に渡ってほぼ均質な強震記録を取得するための整備がかなり進んだといえる。その一方で、記録の増大に伴い、使用されずに埋もれていく記録も増えていることも予想される。ユーザーの側にとってはデータの多さを有効に利用した解析法を考案することが課題であると考えられる。

観測の運営体制については、平成13年に出了れた地震調査研究推進本部の報告書において、「これらの基盤的調査観測は、データを継続的に取得して関係機関等へ提供していくことが重要であり、今後とも、業務的に長期間(少なくとも数十年間程度)に渡り安定して行う必要がある。」と、当初の基盤調査観測計画での方針が再度確認され、長期間の観測業務の継続が明文化されている。

以上のように、地盤上の強震観測については、データ取得・提供体制の体系化を含めて、基盤的調査観測計画を初めとする国レベルの計画で精力的に推進されている。しかし、基盤的調査観測計画では、防災対策自体に関わる調査項目は観測対象とされていないため、地盤上の観測と共に重要である建物内での強震観測の数の増強、体系化については遅れをとりつつある。

＜文責:佐藤吉之＞

3.2 建造物の地震時挙動の観測

3.2.1 現状

開始当初の強震観測は建造物の観測が中心であったが、その後地盤が中心となっていくた。地盤を含めた建造物の地震時挙動という複雑なシステムの全容を解明するためには、何らかの形で単純化が必要である。構造種別・構造形態などより複雑度が高く多様な建造物を切り捨て、地盤の観測を優先したことは理解できる。

現在実施されている建築物の強震観測に関する国家規模のプロジェクトは、独立行政法人建築研究所の強震観測事業(全国強震観測網・首都圏高密度強震観測)程度である。一方、個別な観測については、財団法人日本建築センターなどで性能評価を受けた建物に自主的な判断で強震計が新設されるケースもあるが、社会の経済状況から、公的機関以外による新設は当面期待できない。同様の理由で、既設の強震計についてもメンテナンスの不安がある。

また、データの公開については、強震観測事業によるものは一部公開しているが、後者は経済的・社会的理由で公開は難しいとされている。

3.2.2 問題点

(1) 構造物の地震時挙動の把握

現在の工学のレベルで、構造物の地震時挙動はどの程度明らかになっているのであろうか。様々な解析手法が開発されている今日、ある程度の模擬は可能とされているが、現実の観測記録こそが最も信頼できるものである。

地震時挙動を観測する際の対象は、現在主に加速度であるが、速度や変位、目的に応じては回転、応力の測定も考えられる。また、高次モードやねじれ振動などの特性を明らかにするためには観測点数や位置の検討が必要である。さらに、部材レベルでの応答と建物レベルの応答を結び付けるには、様々な観測が必要となろう。

他にも、従前より指摘されている構造物の振動特性の振幅依存性を明らかにするため、微動から強震動まで幅広い帯域で観測が必要であろうし、将来的には「倒壊」まで観測できるようなシステムの開発が望まれる。

(2) 解析法の検証

現在の地震応答解析の手法はある程度の範囲で実現象を模擬できると考えられている。1次元せん断型モデルから3次元立体解析などへと、解析法はかなり複雑なものが開発されている。しかし、解析法やモデルが複雑になれば、パラメータを恣意的に設定することで、被害状況を再現することも可能になる。現実の入力地震動とは必ずしも同じものではない被害建物近辺の強震記録から被害状況を説明することはその様な問題を内包する危険性がある。

また、建物の固有周期は解析と実測では解析の方が長くなることが多い。2次部材をモデルに含めるなどで修正することが可能とされているが、そうであれば、現在のモデル化が十分なものに疑問が残る。

他にも、現在常識的に用いられている「剛床仮定」の適用範囲や、中低層建物の耐震設計における静的震度分布の妥当性など、初歩的な事柄の検証も必要と考えられる。

(3) ばらつきの評価

性能規定型の構造設計を行なうためには、実構造物の剛性や耐力などの様々な特性の評価が必要である。近年、実規模構造物の三次元振動実験が可能となったが、試験体とは異なり、現実の構造物は、建設資材のもつ本来的なばらつきが大きく、技術の低さによる幾何学的精度の不足などの様々なヒューマンエラーが存在する。そこで多数の観測を行なうことにより、ばらつきを含んだ現実の特性を評価することが必要と考えられる。

(4) 建物健全性の評価

観測結果を基に建物の耐震健全性の評価を行なう、いわゆるヘルスマonitoringに建物強震観測記録を活用しようという試みが近年盛んになりつつある。しかしながら、ヘルスマonitoringに関する研究の多くはシミュレーションによる検討レベルにとどまっており、実建物への具体的適用例は極めて限定的であるのが実状である。この大きな原因の一つが、実建物における観測記録の蓄積不足であり、例えば、建物損傷程度と建物動特性変化の関係に関する定量的知見が不足しているなど、観測を通じたさまざまな知見の蓄積が必要とされている。

現在、研究が行なわれているヘルスマonitoring手法の中には、対象となる建物に対して比較的高密度な記録、すなわち数多いセンサーを必要とするものもある。現在の研究を検証し次の過程に研究を進めるためには、少数の建物において比較的高密度の観測が行われることが望ましい。一方、建物における地震時挙動の現実的ばらつきを評価することもヘルスマonitoringを具体化する過程で必要となると予想される。

また、手法の中には強震動そのものではなく地震前後の微動測定結果を用いるものもある。従って、建物強震観測に用いられるセンサーとして微動範囲まで測定可能なものを採用することで、観測結果の多面的利用が可能となる。

(5) 情報公開

一般に建物の強震記録は公表されない場合が多い。しかし、工学的には強震記録によりその建物の性能が確認でき、精度の高い安全性評価が可能となる。すなわち建物の利用者側から考えても、建物の情報として強震記録は重要であり、公開が望まれる。たとえ地震によって被害があった構造物でも、その応答が観測されていれば、よりよい補修が可能である。さらに、十分な補修がなされた構造物は、観測記録のない無被害と思われる構造物よりも安全性の信頼度は高いと考えられる。

また、都市防災の観点からも、情報公開の必要性は大きい。個々の建物の耐震性に関する情報が公開されれば、その対策の策定において重要な資料となりえる。

他にも、近年注目を集めている地震保険においても、情報公開は重要な役割を果たすと考えられる。多様な判断基準を要求される保険の分野において強震記録は建物の耐震性能を評価するための貴重な情報となる。すなわち、「強震計を設置し、強震記録を公開すること」は保険会社の利益に繋がることであり、情報公開された建物へは保険料の低減などの利益の還元が期待できる。

＜文責：山村一繁＞

3.3 地盤-構造物間の動的相互作用に関する観測*

3.3.1 動的相互作用からみた強震観測の現状

従来、主たる強震観測の対象建物は、原子力関連施設を中心とする重要電力施設と、超高層建物や免震建物などの動的設計を前提とする長周期構造物に限られてきた。

電力施設の強震観測は主として電力会社によって行われてきた。原子炉建屋の場合、初期の段階から動的相互作用に着目した強震観測が行われ、また縮小モデルによる振動試験や強震観測も行われてきた。観測結

*本稿は、福和伸夫、飛田潤による「建物－地盤の動的相互作用から見た強震観測」、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、日本建築学会、57-68、2000. の抜粋である。

果や実験結果の公表は研究成果の公表として行われているものの、データそのものの公開はないのが現状である。一方、火力発電所施設などは、軟弱な地盤に立地する場合が多く、膨大な数の杭に支持された長大構造物としての特徴を有する。このため、杭の地震時挙動や位相差入力に着目した観測事例が報告されている。

超高層建物の場合、一般の建物に比べて構造特性が明快であり、固有周期が長周期であるので動的相互作用効果が小さいと考えられてきた。そのため多くの観測事例では、地下階あるいは一階と屋上階に各1台の強震計を設置しているに過ぎない。よって、動的相互作用効果やロッキング・ねじれ動を含む立体振動特性の考察が可能な観測事例は少なく、建物の振動特性について未解明な部分が残されている。

中低層建物では、動的相互作用効果が地震時挙動を支配している主要因の一つと考えられるが、これまでに発表されている観測事例は少ない。兵庫県南部地震では、重力加速度を超えるような地動を受けたと想定されるにもかかわらず、0.4G程度の地動に対して終局設計していた中低層RC造建物の建物被害は非常に少なかった。このことは、地盤における地震動と設計で想定している地震力および建物の耐震性能に大きな乖離があることを示唆している。今後の耐震設計の進歩を促すためには、建物の真の耐震性能を把握することと、地震時に建物に作用する地震力を把握することが不可欠である。

さらに、動的相互作用の地震力低減効果の実証的な把握は、動的相互作用効果が導入された限界耐力設計法の実証的裏付けや、地震力設定の妥当性の検証のためにも必要である。いずれにしても、地盤への振動エネルギーの逸散現象を考慮しなくてはならない動的相互作用の把握については、実験は容易ではなく、地震観測にかけられる期待は大きい。

3.3.2 動的相互作用に着目した強震観測のあり方

(1) 杭支持建物

杭支持建物では、地下部の地震荷重評価が未だ合理性を欠いていることからわかるように課題は多い。つまり、非線形状態を含む地盤の増幅特性の検証、群杭内地盤と周辺地盤の塑性化・液化化挙動の把握、側方流動の検出に始まり、地下部・基礎部の入力機構と抵抗機構、地下外周地盤・群杭・壁杭の慣性力の分布性状、内杭と外杭の荷重分担、杭の深さ方向の応力分布と杭頭慣性力・地盤変位の寄与度、地下外周部の設置条件による土圧分担性状の変動、逸散減衰・入力に対する群杭効果の解明など、多岐にわたる実現象を把握するための強震観測が望まれる。

(2) 免震建物

免震建物では、ロッキング入力や上下動入力に対しては免震効果はなく、ねじれ入力に対しては免震層隅角部の変形が大きくなる。したがって、これまで注目されてきた長周期化と減衰増大効果を実証することに加え、ねじれ動、ロッキング動、上下動に関する検討が望まれる。また、中間層免震の場合には、免震層以下の部分では動的相互作用の考慮が必要であり、この部分でロッキング動が励起される可能性もあるので、ロッキング入力の観測はこの点からも重要である。また、免震建物の場合には、地下外周部と接する擁壁の面外剛性が小さいため、その土圧の分担性状の把握も必要になってくる。

(3) 中低層建物

中低層建物は、建物単体として捉えても、一般的に構造的な明確さに乏しく、2次部材が相対的に多いことから、単純な振動モデルに置き換えることは容易でない。また、固有振動数が比較的高いため、動的相互作

用効果が強く、固有周期の伸び、逸散減衰の増加、スウェイとロッキング動の卓越、入力損失、などといった形で構造物の地震時挙動に影響を及ぼす。そこで、地震観測としては、スウェイとロッキング動が検出できるような観測を行うことが必須である。さらに、基礎入力動と有効入力動の差の把握をはじめ、2次部材の存在に伴うと考えられる振幅依存性の把握、隣接建物との動的相互作用による入力や抵抗機構の変動の把握が可能な強震観測も必要であろう。

＜文責：片岡俊一＞

3.4 データ流通

建物の強震観測は、地表での地震動を対象とした観測ネットワークと比べて、質・量ともに十分とはいえない。建物の観測を実施しているのは、一部の大学、建築研究所、都市基盤整備公団、NTT、及び一部の民間企業である。各観測機関はそれぞれの目的で観測を行っており、独自のノウハウのもと観測形態も様々となっている。この結果建物の強震観測の全容は明らかでなく、観測が行われている建物の用途や規模、構造などに偏りが生じている可能性が高い。

建物の強震観測では、建物の応答を含めた全ての記録を定期的に公開している例はない。例えば建築研究所では一部の記録をWeb上で公開しているものの、原則として地盤上または建物の下部の記録に限られており、建物上部の記録の扱いについては個別対応としている。大学や都市基盤整備公団、NTTについても状況は同様と考えられる。民間機関の観測は多くの場合自社技術開発の一環として行われており、観測記録は原則公開されない。

建物の強震観測記録が公開されたとしても、その観測記録を解析し、有用な知見を得るためには周辺地盤や構造物に関する資料が不可欠である。しかしながらそのような必要な情報の入手は困難な場合が多い。理由としてまず必要な情報を簡潔に整理する共通の書式が存在しないことが挙げられる。また収集されている関連情報の形態は様々で、整理には多大な労力が必要である。このため電子化及びデータベース化の作業が遅れている。この点に関しては、次のような明るい兆しがある。国土交通省は現在、公共工事のIT化を推進するため建設CALSの導入を進めている。ここでは建築図面類や地盤調査資料などの電子化共通書式が定められている。強震記録の活用の立場からも、建設CALSを援用し、必要な情報を整理し共通の書式を定めるとともに、現在観測中の建物についても資料の電子化を促す必要がある。

一方、米国の場合USGS (米国地質調査所)やCDMG (カリフォルニア鉱山地質部)、大学など公的な機関が中心となって強震観測を行っており、観測記録は原則公開されている。これらの観測では地盤や建物等の構造物を総合的に観測対象としていることが特徴的である。1997年には強震観測機関の協議会であるCOSMOS(強震観測機関協議会)が設立され、強震観測に関する施策の提案や観測の促進のために活動している。またCOSMOSやPEER(太平洋地震工学研究センター)等は国の内外から強震記録を広く収集し、データベースを構築してInternet上で公開している。これらの活動には国や州などから予算上のサポートが行われている。

以上のような状況を踏まえ、日本の強震観測の状況を改善するためには、まず、建物における強震観測を推進し、観測記録を収集・整理・公開する組織を整備することが必要であろう。その際には、予算的裏付けが必要

なことは言うまでもない。この組織により現状の観測状況を調査し、その調査結果に基づく中長期的な観測計画を立案することが次になすべきことであろう。また、観測記録に加えて建物構造や地盤情報を記述する共通書式を設定し、電子化を進めることも必要である。

参考URL

建設CALS: <http://www.mlit.go.jp/tec/cals/>

COSMOS: <http://www.cosmos-eq.org/default.html>

USGS: <http://nsmp.wr.usgs.gov/>

CDMG: <http://docinet3.consrv.ca.gov/csmip/>

PEER: <http://peer.berkeley.edu/smcat/>

<文責:鹿嶋俊英>

4. 望まれる観測網

以上に見てきたような状況を考えると、建物の耐震性能と建物に作用する地震力を明らかにする強震観測が必要であることが分かる。現在でも建物の強震観測は実施されているが、現況を考えると、圧倒的な量の拡大と質の改善が望まれる。同時に両者を満たすことが理想であるが、その量を想像すると残念ながら現実的ではないように思える。そこで、必要最小限の観測態勢をもった「観測点の全国展開」と対象建物の数・種類を限定した上での「高密度、高精度観測の実施」が改善の策として考えられる。以下にその具体案を示す。

4.1 建物強震観測網の全国展開

建物の強震観測を考える場合、建物があるという条件から都市部に集中しがちであるが、被害を引き起こす地震の発生状況を見ると、都市域に集中して地震計を設置することは強震動の観測機会が減るので不適切である。また、K-NETやKiK-netの利用状況を見ると、日本全国に同一の仕様の地震計を遍く設置し、そのデータを迅速に公開することは、科学の進歩を加速していることが良く分かる。そこで、全国の建物に強震計を設置し、そのデータを可能な限り迅速に収集、公開する全国建物強震観測網(仮称、T-Net)を提案する。

対象とする建物としては、全国的な比較を容易にするために、上部構造が全国的に見て標準と言えるような建物が望ましい。前述の条件を満たす建物には、小中学校の校舎あるいは都市基盤整備公団や類似の公社が建設している共同住宅などが考えられる。一方、下部構造(基礎形式)については、地震動と建物に作用する地震力の関係を検討することを考え様々な種類のものがあつた方が望ましい。さらに言えば、意図的に選別することも考えられる。

ここで挙げたような建物では、耐震性に欠ける場合には耐震補強を行って、建物寿命を延ばすことが民有の一般建物に比べて多いと思われる。強震観測を耐震補強の前から実施しておけば、補強前後の地震記録の分析から補強の効果を把握できる可能性もある。また、観測対象建物を学校とすることは、強震観測を実施しているといった点で防災教育の一環となりうる。さらに、小学校は地域の拠点としての位置づけもあるので、この点においても優先的に考えるべきであろう。

いずれにしても、全国一様の建物とすると低層建物が主体となると思われる。そこで、1つの建物における観測点位置としては、自由地盤、1階中央、1階短辺方向の両端部、屋上階、屋上階長辺方向の両端部が考えられる。建物が4階建て以上の場合には中間階中央部にも設置した方がよいであろう。1階端部の観測点は、建物のロッキング振動検出用のものであり、屋上階端部の観測点は捻れ振動検出用のものである。結局7カ所で計21成分となるが、端部に設置するものを1成分でよいとすると、13成分となる。また、敷地あるいは周辺状況から理想的な自由地盤が無い場合も考えられるが、この場合にはK-NETやKiK-netの記録を援用することも考えられる。特にKiK-netは地中にも地震計が設置されているので、その記録は有効に利用できよう。

T-Netの全国的な配置計画は、文献1)に倣って決めることができる。文献1)では、M6.5が発生した時に震度5(V)以上になる面積を基に基本観測点の配置計画を考えている。村松²⁾によると、ある地震が発生した時に震度V以上になる面積 S_V [km²]は、

$$\log S_V = M - 3.2$$

と表される。そこで、この式に $M=6.5$ を代入し、震度 V の範囲が正方形と考えると一辺の長さが45kmとなることから、配置間隔を50kmとしている。文献1)では、以下のような原則に基づき1辺50kmのメッシュを作成して、メッシュ総数を177としている。

- 東京都中央区日本橋を原点としてメッシュを作成する
- 各メッシュはその中に陸地が約1/3以上存在する場合にそのメッシュがあると判断する。
- 沖縄県にはメッシュが1つ存在するものとする。

因みに震源深さを15km、震央距離を25kmとして福島・田中の式³⁾により最大加速度を求めてみると、震源距離を断層面からの最短距離とおくことで、 $M=6.5$ の場合には概ね 200cm/s^2 が得られる。 $M6.5$ の地震を被害を起こす最低規模の地震と考えると、被害を起こすような地震が発生した場合には、少なくとも 200cm/s^2 の地震動を受けた建物の応答が観測できることになる。

以上、全国に遍く均一な地震観測点を設置することについて提案してきた。そのために、様々な構造種別の建物の地震時挙動を知るという目的は除外されている。また、地盤の差異による建物応答の比較もできない。このような問題点を解決するために、以下のような重点観測点網(以下、TS-Net)を考える。なお、全国に遍く設置されている観測点網を重点観測点網と対比する意味で、基本観測点網(TB-Net)と呼ぶ。TS-Netが設置される地域は、多種多様な建築が建設されている大都市が考えられる。このような都市においては、基本観測点網と同種の建物において強震観測を行うとともに、さらに2棟以上の建物で強震観測を実施する。追加する2棟の選別方法にはについては様々な考えを認める方が望ましい。つまり、基本観測網と同種の建物で異種地盤に立つものを選ぶことや、全く異なる構造の建物を選ぶことなどが考えられる。また、上部構造の応答特性の研究を主体とした観測点を設定することも考えられる。

先に大都市と言ったが、具体的には、人口30万人以上の都市や県庁所在地などの地方中核都市を想定している。2000年現在で、人口30万以上の都市は全国に66都市ある。さらに、この閾値にはいない県庁所在地14都市を加えて、総計で80都市に重点観測点を設ける。表1に基本観測網と重点観測網を整理して示す。

表-4.1 建物の地震時挙動観測網の案

	基本観測網	重点観測網
配置・地域等	全国一律 50km間隔	大都市, 地方中核都市
対象建物	小中学校校舎, 共同住宅	基本観測点と同等の建物1棟に加え, 様々な構造種別建物の建物2棟
建物規模	低層	低層(基本観測点と同じ)1棟 建物規模には拘らないもの2棟以上
棟数	1棟	計3棟以上
地盤条件	特に拘らず	同種の構造の3棟ならば, 異種の地盤条件であることが望ましい
観測点位置	自由地盤, 1階中央, 1階両端部, 屋上階中央部, 屋上階両端部. 建物が4階建て以上の場合には中間階にも設置	左に同じ
観測目的	強震時の建物挙動(特にロッキング, ねじれ振動について)の把握 入力機構の把握	左に加えて, 異種地盤での地震応答の比較検討, 他
観測成分数	3成分×7箇所=21成分	1棟につき左+3~6成分

	最低:13成分	
仕様等	F.S.2000cm/s ² , 最小分解能:0.5～1.0 cm/s ²	左に同じ

基本観測網、重点観測網ともに、各建物毎にデータ収集と管理を行うとともに、観測網全体を管理するセンターとネットワークを通じて接続されている形態を想定している。各観測点で観測された地震記録は、地震後直ちにセンターに転送され、その後センターからデータが公開されるものとする。また、観測点においても、観測された地震動記録から分かりやすい指標（例えば計測震度）を算出し、建物利用者、保有者にも通報することが望ましい。

なお、観測記録の権利関係を明確にすることを本提言では唱っているが、当面の解消は難しいと考えられるので、地震計を設置する建物は、公的な建物（所有者が公）にならざるを得ないであろう。

参考のために、3成分を強震計1台として、T-Netにおける強震計の台数を計算してみる。

1. 基本観測点:	177地点×7台	1239台
2. 強化観測点:	80都市×3棟×7台	1680台
総計		2919台

つまり、台数としてはK-NETの約3倍であることが分かる。

4.2 高密度建物振動観測点

上述した全国建物強震観測網によって量の向上は図られる。次に質の拡充として高密度建物振動観測システムを提案する。このシステムの目的は、建物への地震動の入力機構、地盤の抵抗機構、建物の立体振動特性を把握することである。着目点は以下の通りであるが、これは理想像であり、すべてが満たされる必要はなく、対象建物像を絞る必要もない。設置地域については、建物総数、観測システムのメンテナンスの容易さ、地震の発生頻度を考慮して決定する。

- a. 地盤応答の空間的変動を把握し、入力 of 相互作用検討の基礎資料を得る。
 - 平面及び深度方向でアレイ観測が必須となる。
 - 杭基礎構造にあつては、群杭内部及び自由地盤の違いも比較する。場合によっては、液状化監視の水圧計も設置する必要がある。
- b. 杭基礎構造にあつては、群杭の応力分担性状を把握する。また深さ方向の応力変動も計測する。これにより、杭の応力分担、杭応力への杭頭慣性力と地盤変位の影響を把握する。また、側杭と中杭について深さ方向の何断面かで鉄筋の歪を計測する必要もある。
- c. 地下側壁での土圧を計測することにより、杭と根入れ部の支持力分担性状を把握する。同時に地盤が加力側に働くか、支持側に働くかを把握する。
 - 前後面、側面の土圧分布を高さ方向、水平方向に同時に計測する。
- d. 基礎の水平・上下動に加え、ロッキング、捩れ、面外変形を把握し、剛床仮定の妥当性を検証する。また、入力の相互作用効果を実証する。
 - 面外変形検出用に基礎上の多点に上下センサーを設置する。
 - 水平センサーは面内変形の有無を確認する程度の密度が必要である。

- e. 上部構造の応答増幅特性, モード特性を把握する.
 - 高さ方向に, 建物剛心或いは図心位置を中心に3chセンサーを設置する.
- f. 建物の立体振動性状を把握し, 質点系モデルの有効性を検証する.
 - 代表的な階において, 振れ動, 床の面内・面外変形も検出できるセンサー配置とする.

これ以外の留意点としては,

- ◆ センサーは微動計測も可能な高精度なものを採用する.
- ◆ 微動時も振動計を有効に機能させ, 有用なデータを得るために風向風速計を設置する.
- ◆ 一部の階では, 層間変形を直接計測する.

が挙げられる.

この観測網においても, 地震直後にデータがすみやかに公開できることが望ましい.

参考文献

- 1) 強震観測事業推進連絡会議編: 強震計全国配置基本計画に関する報告書, 国立防災センター, 45p, 昭和63年9月.
- 2) 村松郁栄: 震度分布と地震のマグニチュードとの関係, 岐阜大学教育研究報告4(3), 168-176, 1969.
- 3) 福島美光, 田中貞二: 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 地震学会講演予稿集, No.2, p.116, 1992.

5. まとめ

これまで述べてきた建物を対象とした強震観測のあるべき姿を簡潔にまとめると以下ようになる。

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

建物における強震観測網を日本全国に均一に展開する。観測点間隔は概ね50kmとし、対象建物は低層建物とする。地震計は、地盤-建物の動的相互作用、建物のねじれ振動、ロッキング振動が検出できるように配置する。観測記録は各々の建物で収集したうえで、全観測点を統括するデータセンターに転送され、地震後すみやかに公開する。また、地震計を設置した建物の所有者や利用者に分かりやすい地震動指標の通報を行う。

さらに、大都市、地方中核都市においては同様な観測点を重点的に設置する。

B. 高密度建物振動観測の実施とデータの公開

日本全国をカバーする観測網によって、建物における強震観測データの充実は図られるが、センサー数を制限したために、地震動の建物への入力機構や立体振動特性については、未解明な部分が残る可能性が高い。そこで、必要十分なだけの数の高精度センサーを建物及び地盤に配置した建物観測点を設ける。この観測では、建物への地震動の入力機構および地盤の抵抗機構などを解明し、建物の立体振動特性を詳細に把握することを目的とする。また、この高密度観測点のデータも地震後すみやかに公開する。観測点の設置地域については、その地域の建物総数、観測システムのメンテナンスの容易さ、地震の発生頻度などを考慮して決定する。この観測点で得られるデータは、その建物だけではなく、日本全国に設置した強震観測点における観測記録の解釈にも有効である。

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

現在日本には強震観測記録の共通の書式は存在しない。また建物の強震観測記録の活用には建物や基礎の構造、地盤や地形などの周辺情報が整備されていることが必要な条件となる。しかしながら現在これらの周辺情報を整理する共通の書式と方法がない。また周辺情報の整理と電子化には多大な労力が必要となる。このような背景から周辺情報の整備と公開は殆ど進んでいないのが現状である。

一方国土交通省は公共工事のIT化を推進するため建設CALSの導入を進めている。ここでは建築図面類や地盤調査資料などの電子化共通書式が定められている。そこで、強震記録の活用に必要な情報を整理し、建設CALSを援用して、共通書式を定めるとともに、現在観測中の建物についても資料の電子化を促す必要がある。

D. 観測記録の権利関係の指針作成と広報

建物の観測の場合、観測実施者と建物所有者が異なることが多い。このような場合、建物や地盤の情報、そして観測記録自体の所有権の問題が生じる。建物が公共機関のものであれば問題が生じる可能性は低いが、私有の場合には、所有者が不利益を感じ公開を希望しない可能性もある。そこで、地震記録と建物・地盤の情報に関する権利関係を総合的に議論し、強震記録の活用が図られるように指針を示す必要がある。

E. 建物の強震観測指針の策定

前述したように建物の強震観測は様々な機関がそれぞれの目的で行っている。このため観測の形態も一様ではない。一方強震観測記録の有効な活用を図る立場からは、ある程度共通の認識に立った観測計画であることが望ましい。また各観測機関に培われたノウハウを纏めて文書化することは、効果的な観測計画の立案を助け、強震観測の普及に資する。そこで、予め建物の強震観測指針を策定し、公布しておく必要がある。

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

現状では、建物における観測記録は観測実施機関が保有しており、定常的に観測結果全てを公開している例はない。過去を振り返ると、兵庫県南部地震など被害地震が起こった場合には特例的に公開される場合もあるが、ボランティア的に活動したものであり、収集、整理、公開に相当の時間がかかっていた。安定した観測記録や関連情報の提供のためには、建物の強震観測の普及や関連する技術開発の中心的な役割を担う組織を創設し、予算措置を講じることが必要である。この組織は前述の提言項目の実現を図り、また過去及び将来の観測記録や関連資料の収集整理と公開を行う。

以上

委員名簿

強震観測小委員会

主査	若松 邦夫	(株)大林組 技術研究所地盤震動研究室
幹事	片岡 俊一	弘前大学 理工学部地球環境学科
幹事	山村 一繁	東京都立大学 工学研究科建築学専攻
	青井 真	防災科学技術研究所 防災研究情報センター
	鏡味 洋史	北海道大学 工学研究科都市環境工学専攻
	鹿嶋 俊英	独立行政法人建築研究所 国際地震工学センター
	北川 良和	慶應義塾大学 大学院理工学研究科
	工藤 一嘉	東京大学 地震研究所
	佐藤 吉之	(株)竹中工務店 技術研究所先端研究開発部
	高橋 克也	鹿島建設(株) 技術研究所
	福和 伸夫	名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻
	堀家 正則	大阪工業大学 建築学科
	元木 健太郎	東京工業大学 総合理工学研究科瀬尾研究室
	源栄 正人	東北大学 工学研究科災害制御研究センター 地震地域災害研究分野
	吉村 智昭	大成建設(株) 技術研究所建築研究部地震・風研究室
(オブザーバ)		
	猿田 正明	清水建設(株) 技術研究所構造研究開発部