

建築物の強震観測の提言

PROPOSAL FOR SEISMIC OBSERVATION IN NEXT GENERATION

山村 一繁*

Kazushige YAMAMURA

The history of strong motion observation in Japan is reviewed in terms of the aim of observation. Although quality and quantity of strong motion observation and knowledge of strong motion have increased for fifty years, it is not sufficient yet and there still remains many problems about the performance of sensors, structural analyses and design loads. For performance based seismic design, more observations are required and observation in buildings is especially important.

Keywords: performance based seismic design, strong motion observation, seismometer, structural analysis

耐震性能設計, 強震観測, 強震計, 構造解析

1. はじめに

性能設計では, 想定する荷重および外力と, それに対する建築物の状態を明らかにすることが必要となる. 耐震性能設計を考えた場合, 外力の一つである地震動を測定する強震観測が前者にとって重要なものであることは明白であろう. 一方後者については, 地震時の建築物の挙動はある程度解析的に求めることができるようになったものの, 十分に満足できるレベルとは言い難い. 観測によって現実の挙動の把握し, 解析精度を高めてゆくことが, より良い構造設計のために必要である. 大量生産・大量消費型社会から省資源型社会への移行が期待されている現在, 合理的で無駄のない建築物を設計することは, 大きな社会貢献にもなる.

本稿では, これまで行われてきた日本における強震観測を概観し, 耐震性能設計に対して強震観測がどのように貢献できるかを検討することで, 建築物の強震観測について考える.

2. 強震観測の歴史

日本の強震観測のスタートは, 初めて地震計が製作された1880年と考えることができる¹⁾. しかしながらこの時点での観測の目的は, 地震そのものの発生メカニズムや地球の構造を解明するといった理学的なものであった. それに対し耐震工学を目指した動きはそれから半世紀が過ぎて始まっている. 米国においては, 1931年

～1932年の末広恭二東京大学地震研究所所長の“Engineering Seismology”の講演が契機となり1931年に強震計の開発が始まった. 翌1932年から全米沿岸測地局(USCGS)による観測が開始され, 1933年にはロングビーチ地震による地震動の加速度を記録した. 一方日本においては, 1953年にSMAC型強震計が東京大学地震研究所に設置され, 翌1954年に茨城県南西部の地震の加速度記録が得られている.

ここで, 日本における強震観測が何を対象として, どんな目的でなされてきたかを, 強震計の開発のきっかけとなった福井地震の発生した1948年以降についてまとめてみる²⁾.

福井地震(1948)における被害原因の究明に当たって, 強震動とはどのようなものであるのか, その性質を明らかにすることが必要となった. そしてそのことをきっかけに, 1951年に標準強震計試作試験研究会が結成される. 研究会では実際に強震計を試作するために, 具体的で詳細な検討がなされたが, その中で注目しておくべきことは, 地震計の様式を加速度計としたことであろう. 変位計は, 強震時には巨大な振り子を必要としたため, 不安定になったりするため採用されなかった. また, 固有周期は0.1秒で, この値は土木構造物に対しては長すぎる場合もあるが, 建築物に対しては十分に短いとして設定されており, 強震観測の対象として建築物も考慮されていたことがわかる.

*1 東京都立大学工学研究科建築学専攻 助手

Research Associate, Course of Architecture, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University

このようにして1953年にSMAC型強震計が開発され、同年観測が開始される。続いて1955年にはDC型強震計が開発された。最初のDC型強震計はスタータや刻時装置を持たずSMAC型強震計からの信号で運動するものであり、強震計を限られた予算で全国的に、特に「建物内にも数多く設置する」ことを目的として作成されたものであった。

1955年には「強震測定計画に対する勧告」が内閣総理大臣より勧告されている。ここでは「気象官署43箇所43台、建築物32箇所124台、堰堤および橋梁は31箇所186台、港湾10箇所60台で、合計116箇所413台」の強震計を全国的に配置するように計画されており、この時点でも建築物の強震観測が重視されている。

1964年には新潟地震で良好な強震記録が得られことから、強震観測の機運が高まった。同年の日本学術会議による「耐震工学研究の強化拡充について」の勧告でも強震計の増設が提案されている。1964年末現在198台の強震計が設置されていたが、建造物主の自発的設置によるものが多く、また60%が東京・大阪に集中していたため、増設は全国展開が主眼とされ396台の増設の中で建築物は90台に過ぎない。この時点から、建築物の強震観測よりも、地盤の、そして全国的な観測が重視されるようになったようである。

強震観測を維持管理する機関としては、1956年に設置された強震測定委員会、1965年に設置され強震測定委員会の業務を引き継いだ東京大学地震研究所強震計観測センター、1967年に設置された強震観測事業推進連絡会議がある。これらの活動の中で、強震計観測センターでは1970年以降建築物の強震計の維持管理業務の負担を減らし、地震学的な研究の観測へと重点を移している。また、強震観測事業推進連絡会議でも1988年の「強震計全国的配置基本計画に関する報告書」で、記録の利用性の高い地盤上における強震観測に視点を置いた強震計配置計画を作成している。一方耐震工学上必要な各種構造物での強震観測については、各関係機関がそれぞれの目的に応じた適切な配置計画を立案するものとされてしまった³⁾。

公的機関を中心とした強震観測に目を移すと、現在も様々な観測が行われているが⁴⁾、その多くは地盤および基盤を対象としており、強震動の性質や発生メカニズムを明らかにすることが第一の目的であると考えられる。その中では、科学技術庁防災科学研究所のKyoshin Net(K-NET)⁵⁾および基盤強震観測網(KiK-net)⁶⁾が、その観測点の数と均質性において特筆されるべきものであろう。

その他の強震観測の事例としては、いくつかの共同観測が挙げられる⁷⁾⁸⁾⁹⁾。基本的な目的は上記の場合と同様であり、観測対象は地盤または基盤がほとんどである。

例えば、高密度強震観測事業の目的は、「種々の地盤条件下で地震動の同時観測を行うことにより表層地盤が地震動の特性に与える影響を解明するための資料を蓄積し、より合理的・経済的な耐震設計法の開発に資すること、釧路ESG共同強震観測の目的は、「1993年釧路沖地震の際に、釧路市内で観測された異常強震動記録の要因を解明することとされている。

以上のように、日本における強震観測は、全く実態の分らなかった地震動および建築物の地震応答を明らかにするために、建築物に設置された強震計による観測から始まり、次第に利用性の高い地盤および基盤上における観測へと移行してきたことがわかる。

3. 現在の強震観測の問題点

前節で述べたように、日本における強震観測は開始からの約半世紀の間に、質、量ともに飛躍的な進展を遂げている。しかし、強震動予測¹⁰⁾、建物-地盤の動的相互作用¹¹⁾、建築物の地震時挙動¹²⁾といった観点から見ても、未だ十分な観測が行われているわけではなく、理論が先行し検証が不足している部分も多いことが指摘されている。本節では、現在の強震観測について、その背後にある耐震工学・耐震設計との関連も考慮にいれながら、強震計の性能、構造解析、設計荷重のそれぞれに関わる問題を検討する。

強震計の性能に関わる問題

まず最も基本的な問題として、強震計の性能が現在のもので十分であるかの検討が必要であろう。

日本初の強震計であるSMAC型強震計とKyoshin Netで用いられているK-NET95とを比較すれば、周波数特性などの基本的な仕様は大きな進歩を遂げているが、将来的に現状の特性で十分であるという保証はない。製作のしやすさや力が加速度に比例するといったことから、これまではほとんどの場合で加速度計が用いられてきた。しかし加速度計では長周期側の特性に本来的な限界がある。速度計は実績という観点からまだ十分な信頼を得られていないが、今後は観測対象に応じた機器の選択が重要となるだろう。

建築物の挙動は、並進運動だけではなく回転も存在する。ねじれ応答を把握するために1フロアに複数の強震計を設置する方法もあるが、回転成分を記録できるような強震計の開発も考慮されてよいだろう。また、現在、入力としての回転は考慮されていないが、記録が蓄積されれば考慮の必要性が生ずる可能性も考えられる。

また、設置台数が増えることで個々の強震計の管理が疎かになることが危惧される。本来持つ特性が発揮できるような設置計画、設置工事、そして維持管理の重要性を十分に認識する必要がある。

構造解析に関わる問題

建築物の耐震性を評価・検証するひとつの方法として、実際の地震で被害を受けた建築物の構造解析が挙げられる。観測された強震記録を建築物のモデルに入力し被害状況を模擬するものである。現在の解析技術のレベルでは、崩壊までを完璧に模擬することはできないものの、全体的な傾向の把握は可能となっている。構造解析は構造設計のための道具であり、建築物の地震時挙動を完璧に模擬することが求められるわけではないわけで、ある程度は満足できるレベルとすることができる¹³⁾¹⁴⁾。

しかし解析法と強震記録との関係を別の角度から考えると、解析法は強震記録に左右されるということになる。強震記録と被害状況が確定したものであるとすれば、建築物のモデル化の方法および材料特性の与え方を含む解析法を調整することで強震記録に対応した被害状況を模擬することが必要となるためである。この場合、強震記録が適切なものでないと解析法を歪ませる恐れがある。適切でない強震記録を用いてしまう理由には、次の2つが考えられる。第一の理由は強震計の性能が適切でない場合である。前段で述べたようにSMACとK-NET95では歴然とした差があり、同じ場所で取ったとしても、おそらくK-NET95の方が大きな加速度を記録するであろう。開発時期の異なる強震計の性能が異なることは当然であり、古い強震計で得られた記録を解析するための方法で、新しい強震計で得られた記録をそのまま用いることができるとは限らない。このことは、特定の強震計で観測された強震記録は特定の解析法により解析すべきであること、すなわち解析法と強震記録（強震計）はペアで考えるべきであることを意味している。第二の理由は、入力とすべき強震記録とは異なるものを選択してしまう場合である。入力用の強震記録はその建築物で観測されたものではなく、その周辺で観測されたものであることが多い。また、建物-地盤の動的相互作用を考慮する必要がある場合もある。これらの条件を考慮しなければ、正しい入力地震動を得ることはできない。

それでは、解析精度をより高くするためにはどのような強震観測が必要であろうか。現在は強震観測に当たってその加速度を測定している。これは前節で述べたように、加速度計は比較的製作が容易であることや力加速度に比例するという理論的なことが理由となると考えられる。しかしながら建築物の部材に生ずる力は単純に加速度より求められるわけではなく、何らかの形で応力を直接観測する必要がある。かつそれら加速度と応力との関係を明らかにすることが必要であろう。また設計に当たっては力ではなく変形が重要となる場合もあり、その場合にはひずみまたは変形の観測が必要となる。さらに崩壊までの現象を明らかにするためには、崩

壊まで観測できるようなセンサが必要となる。

以上のように構造解析に関わる問題を解決するためには、広範な強震観測が必要であり、現状の観測技術では不足すること多いが、建築物の地震時挙動を明らかにするために、少しずつでも観測を進めていかなければならない。

設計荷重に関わる問題

設計荷重としての地震力は、佐野利器が1914年にまとめた「家屋耐震構造論」で示した設計震度に始まる¹⁵⁾。ここでは応答という概念は示されていないものの、推定された地震動の最大加速度をそのまま用いるわけではなく、地震被害なども考慮して地震動の大きさを工学的判断により評価したものと考えられる。法令としては1924年の市街地建築物法施行規則の改正の際に、初めてこの耐震規定が導入されている。その後、1980年の建築基準法施行令の改訂（いわゆる新耐震設計法）があり、1998年には建築基準法の性能規定化がなされた。そしてそのあいだには大量の強震記録の蓄積がなされ、法令の改正のための資料となっている。

これまでの強震記録の利用は、工学的判断のための資料としての意味合いが強いと考えられる。設計用地震荷重は地震被害を含め、総合的な判断のもとで設定されるべきものであり、現在の工学のレベルでは、単純な手順で設定することは不可能である。しかし、将来的には確率・統計論に基づいた評価による設定も考えられるべきであろう。確率・統計論は荷重設定において万能と言うわけではないが、設定の手順が明快であるところから社会的には受け入れられ易いと考えられるためである。

確率・統計論によって強震記録を評価するためにはどのような強震観測が必要であろうか。確率・統計論を用いるためには、標本となるデータは均質な条件を持つものであることが望ましい。建築物の最上階で取られた記録と基盤の記録を同等に扱えないことを考えれば当然であろう。そういった意味では、全て同じ強震計と観測小屋で観測されたKyoshin Netの強震記録は理想に近いものと言える。建築物の強震観測に対しても同じことが言える。様々な構造種別の建築物の観測をすることにより、種別の違いによる応答の差異を評価することも重要であるが、できるだけ似通った多数の建築物の観測することで、あるタイプの建築物の応答のばらつきを評価することができるようになる。

このことは表層地盤の影響についても同様に考えることができる。ボーリング調査などによる地盤調査を行いその影響を評価することが理想であるが、現実には金銭的な問題も含め全国で地盤調査を実施することは不可能である。局所的な地震動の差異について、確率・統計論的評価が行われていれば、表層地盤の特性が明らかでな

い場所でも、地震動がどの程度の範囲でばらつくかは判断することが可能となる。

また、現実の建築物には材料や寸法のばらつきがあり、たとえ入力地震動を確定的なものと考えても、確定的なモデルだけでは十分な評価ができない。さらに崩壊までを解析するとなれば、材料特性のばらつきが結果に対して大きな影響をおよぼすことは明らかである。このようなことを踏まえ、確率・統計論に基づく評価が可能となるに十分な量の観測も必要ではないだろうか。

4. まとめ

日本における強震観測が何を対象として、どんな目的でなされてきたかを歴史的に概観した。強震計の性能、構造解析、設計荷重などの観点から考えると、現在の強震観測はまだまだ不十分であり、より良い耐震性能設計を実現するためにも、より一層の観測体制の強化が期待される。

全く実態の分からなかった地震動・地震応答について、建築物に設置された強震計による観測からスタートし、徐々に強震記録を蓄積することでその実態が少しずつ明らかになってきた。現在は地盤および基盤の観測が主であるが、今後は再び建築物の強震観測も精力的に実施する必要がある。

最後に、1953年3月18日に建築研究所構内で行われた標準強震計の公開実験のために作成された武藤清名の案内状の一部を再掲²⁾して本稿のまとめとしたい。強震観測がある程度の成果を示した今日、もう一度原点に立ち戻る時期が来たのではないだろうか。

「破壊的地震に当たって、その地震動が完全に測定でき、また建築物その他に起る実際の振動と作用する地震力とを直接に測定することが出来れば、耐震構造の理論にも技術にも画期的な進歩が期待されます。この目的に適った強震計の設置については、各方面から多年に亘って要望されておきながら、我が国ではまだ実現を見ずにあります。この点ではアメリカが先鞭をつけて、すでにこの種の強震計を地震地帯に設置していますが、その測定結果は充分とは申されない様です。問題の鍵は精密であり耐久的な強震計の設計製作にあると考えられます。

(中略) これで、強震計は出来ました。どのような方法をとればこれを全国的に配備することが出来るかに頭を悩ましておる次第ではありますが、このためには各方面の御援助による他に道はないと思われまふ。ついてはこの機会に、かねてから耐震問題に関心を寄せられていらっしゃる皆様の御高見を拝聴いたし、今後の問題について御援助を願いたく存じ、別紙のように公開実験及び懇談会を催したくご案内申し上げます。」(武藤清、「試作強震計公開実験案内」)

【参考文献】

- 1) 大崎順彦：地震と建築，岩波新書，1983
- 2) 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，pp.39-48，1995
- 3) 大谷圭一：強震観測事業推進連絡会議の活動について，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，pp.3-6，1995
- 4) 佐藤吉之：公的機関を中心とした強震観測の現状，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，2000
- 5) <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 6) <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 7) 片岡俊一：共同観測事例，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，pp.13-18，1995
- 8) 植竹富一：共同観測による高密度強震計アレイ，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，2000
- 9) 小林孝至，境茂樹：静岡における共同観測，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，2000
- 10) 釜江克宏：震動データの予測への利用法，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，2000
- 11) 福和伸生：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，2000
- 12) 鹿嶋俊英：建築物の地震時挙動の把握に関する動向，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，2000
- 13) 和田章：数値解析と構造設計—数値解析は構造設計の創造的過程に如何に寄与できるか—主旨説明，1998年度日本建築学会大会（九州）構造部門（応用力学）パネルディスカッション資料，日本建築学会，pp.1-4，1998
- 14) 動的外乱に対する設計—現状と展望—，日本建築学会，1999
- 15) 大橋雄二：日本建築構造基準変遷史，日本建築センター，1993