

全国展開を可能とする観測システム

鹿嶋俊英

建築研究所 kashima@kenken.go.jp

1. はじめに

日本の強震計の歴史は半世紀を越えた。この間、計測技術の飛躍的な発展を背景に、強震観測網は着実な進展を遂げてきた。

1995年兵庫県南部地震は、強震観測の分野にとっても大きな転機であった。K-net、KiK-net、及び自治体の震度情報ネットワークの新設、また気象庁の震度観測地点の増強により、地表での観測地点は飛躍的に増加した。

しかしながら建物を対象とした強震観測はまだ十分とは言い難い。本稿は、建物の強震観測の進展に参考となるいくつかの話題を提供し、活発な議論を期待するものである。

2. 現状と課題

(1) 日本の観測事情

日本での強震観測の歴史は1951年に遡る。1948年福井地震を契機に、大地震を測定することの必要性が痛感され、1951年標準強震計試作試験研究委員会が組織された。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。1953年3月には標準強震計

の1号機が完成し、この委員会の名称(Strong Motion Accelerometer Committee)からSMAC型強震計と名付けられた。

その後改良と開発が続けられ、強震計の性能は飛躍的に向上した。表1にSMACシリーズを例に、主な機種を示す。特にサーボ式のセンサーとデジタル信号処理技術の導入は、観測機器の高性能化に加え、小型軽量化と記録処理の省力化に大きな役割を果たした。

強震観測地点も着実に増加しており、1996年3月時点で強震観測事業推進連絡会議に登録された強震計は1115地点2175台であった。このうち1024台の強震計が建物に設置されている。建物の場合は通常複数の強震計を設置するので、控えめに見て200棟程度の建物で強震観測が行われていることになる。一方地盤に設置された強震計はこの時点で1399台であった。

1995年兵庫県南部地震を契機に、主に地盤を対象とした観測は著しい進展を遂げることとなる。防災科学技術研究所のK-netやKiK-net、全ての市町村に震度計を配備した震度情報ネットワーク、また気象庁の震度観測地点も大

表1 主な強震計の性能

機種	SMAC-B	SMAC-M	SMAC-MD	SMAC-MDU
開発年	1957	1972	1988	1997
センサー	振子	フォースバランス	フォースバランス	フォースバランス
処理システム	アナログ(機械式)	アナログ(電気式)	デジタル(16-bit)	デジタル(24-bit)
記録媒体	スタイラス紙	カセットテープ	メモ리카ード	メモ리카ード
周波数範囲	DC~10 Hz	0.1~30 Hz	0.02~30 Hz	DC~30 Hz
振幅範囲	$\pm 1000 \text{ cm/s}^2$	$\pm 1000 \text{ cm/s}^2$	$\pm 1000 \text{ cm/s}^2$	$\pm 2000 \text{ cm/s}^2$
感度	$25 \text{ cm/s}^2/\text{mm}$	$1 \text{ cm/s}^2/\text{mV}$	$0.03 \text{ cm/s}^2/\text{digit}$	$0.0025 \text{ cm/s}^2/\text{digit}$
トリガレベル	10 cm/s^2	5 cm/s^2	$0.5\sim 32 \text{ cm/s}^2$	$0.1\sim 99.9 \text{ cm/s}^2$
測定成分	3	3	9 (max)	18 (max)
遅延時間	-	-	10 sec.	0~60 sec.
大きさ	54×43×37 cm	60×41×17 cm	40×42×21 cm	40×42×21 cm
重量 (kg)	100	23	20	17

注) (株)アカシのカタログより

幅に増強された。これらの観測地点を合わせると 5000 近い数になる。しかしながら建物の観測の新たな展開は限られたものであった。

(2) 米国の観測事情

一方米国の強震観測は、日本より 20 年程先んじている¹⁾。米国の全国規模の強震観測は U.S. Geological Survey (USGS) が中心となって観測網を展開している²⁾。USGS の National Strong-Motion Network (NSMN) は 160 の建物を含む 900 の観測地点を保有している。USGS が主導する Advanced National Seismic System (ANSS) は、建物への 3000 台を含む 7000 台の強震計の設置を将来の目標としている。

またカリフォルニア州では州の組織である California Geological Survey (CGS) が California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP) と呼ばれる観測網を展開しており、現在建物 170 棟を含む 900 の観測地点が稼働している³⁾。CSMIP は 2035 年までの長期計画で、最終的には 1800 台を超える強震計の設置を目指しており、その運営費は建物の建設時に建設費の 0.007% を徴収することによって賄っている。

1998 年には米国の主な強震観測実施機関が参加する非営利組織 Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS) が設立され、様々な強震観測システムを強化・統合することを目指している⁴⁾。現在までに COSMOS は強震記録の共通書式の作成や Internet 上のバーチャルデータセンターの開設などの活動を行っている。

以上米国での事情を概観したが、コアとなる組織が長期的な計画を立案し、それ見合った予算措置が取られていること大きな特徴である。また大規模な強震観測ネットワークは地盤の観測と建物などの構造物の観測が一体となった構成となっている。

(3) 課題

前述したように、兵庫県南部地震以降地震動を対象とした観測網の飛躍的な拡充と比べて、建物の観測は充実しているとはいえない。また建物を対象とした強震観測にはその普及と

観測記録の有効活用を阻害する要因が種々存在し、それぞれが複雑に関連しあっている^{5), 6)}。例えば、近年建物の観測記録が一般に公開されることはほとんどない。その理由は、建物所有者の理解が得られない、観測コストに見合う業績を上げるために時間を掛けた検討が必要、などである。また観測のコストも大きな障害である。一般に建物の観測には複数のセンサーが必要であり、複雑な挙動を追いかけようとするればセンサーの数が増え、よって観測コストも増す。米国と比べると組織や予算措置の伴った長期ビジョンの点で、遅れをとっているといわざるを得ない。

3. 最近の動向

(1) 建築研究所の活動

建築研究所では 2001 年度より「公共建物を対象とした強震観測ネットワークの維持管理と活用技術の研究」と題する研究を行っている。この研究課題では、建築研究所が保有する強震観測網の維持管理を行うとともに、公共建物を対象とした強震観測ネットワークの基本計画の検討と作成、及び必要な要素技術や強震観測記録の活用技術の研究を行うことを目的としている。

観測の面では過去の記録と関連資料の整理を進めており、一部の記録は Internet で公開している⁷⁾。現段階では地盤上あるいは建物の基礎部の記録のみの公開であるが、将来的には全ての記録を利用できるような方策を講じたい。以下、この研究課題の下で行われている検討項目も含め、建物の強震観測の普及に関連する話題をいくつか取り上げる。

(2) 廉価な強震計の登場

近年強震観測の分野でも、マイクロマシン技術を用いたセンサーが注目を浴びている⁸⁾。マイクロマシンは半導体チップ上に微細加工技術を応用して電子部品と機械部品を搭載する超小型部品の総称で、センサーの超小型軽量化を実現し、低価格化、低消費電力化にも貢献する。ここ数年の間に登場したマイクロマシンセンサーを搭載した強震計(名称は機

器によって異なる)を表 2 に示す。表中“低コスト”とあるのは建築研究所が試作中の機器である⁹⁾。これらの観測機器の分解能は 1~5 cm/s² 程度で、アナログ時代の強震計と同程度であり、“強震”を対象とする限り不足はない。価格は 10 万円~40 万円程度で、高性能の強震計と比較すると一桁安い。

しかしながら建物の強震観測に利用する観点から考えると、改良が望まれる点も見受けられる。以下、なるべく廉価で調達し、できる限り多くの建物に設置することを想定して、仕様を考えてみる。

- 周波数範囲: DC~25 Hz
- 測定範囲: ±2 G
- 分解能: 1 cm/s² 以下
- サンプル周波数: 100 Hz (または 50 Hz)
- 記録時間: 20 min.以上
- インターフェイス: RS-232C
- 連動機能: 有
- 起動レベル: 5~10 cm/s²
- 遅延時間: 5~10 sec.
- 電源: 省電力、できれば電池駆動

近年の観測で、建物の応答が 1G を超える可

能性は実証されており、測定範囲 2G は必要である。これに廉価な 12bit AD 変換器を組み合わせると分解能は 1 cm/s² となる。ある程度の大きさの地震動(例えば震度 4 以上)を解析の対象とするとしても、この程度の分解能は必要であろう。また例えば加速度記録を積分して変位を計算し議論する場合、もっと分解能が必要となる。

建物が損傷を受けることを想定すると測定周波数の下限は DC から必要とある。一方特殊な例でない限り上限は 25 Hz で充分であろう。この結果サンプル周波数は通常 100 Hz、50 Hz として記録時間を稼いだほうがよい場合もあるだろう。

点検間隔が 1 年位と考えると記録時間は少なくとも 20 分程度は必要である。加えて最も大きい記録を残すような仕組みは必須であろう。建物の挙動を観測するには複数のセンサーが必要となる。記録の解釈には同時性が必要であり、多センサー記録あるいは連動機能は切に望まれる。ただしその場合何らかの配線が必要であり、設置を難しくする要因となる。既にある施設(例えば電力線や電話線、LAN

表 2 低コストの強震計の例

形式	QDR	S-12	SP-711	SES55	低コスト
販売	応用地震計測	応用地震計測	東京測振	東京ガスエンジニアリング	東京ソイルリサーチ
周波数範囲	DC~25 Hz	0.6~50 Hz	DC~25 Hz	DC~50 Hz	0.2~20 Hz
測定範囲	±2 G (水平), ±1 G (鉛直)	±5 G	±2 G	±2 G	±2 G
AD 変換器	11 bit	12 bit	12 bit	16 bit	10 bit (+AGC)
分解能	2 cm/s ²	5 cm/s ²	1 cm/s ²	1 cm/s ²	1 cm/s ²
サンプル周波数	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz	50 Hz
記録時間	15 min.	30 min.	7 min.	2 min. × 10	1 min.
インターフェイス	RS-232C	RS-232C	RS-232C	RS-485	RS-232C
連動機能	有	無	有	無	無
起動レベル	?	30 cm/s ²	1~10 cm/s ²	1~ cm/s ²	5 cm/s ²
遅延時間	40 sec.	0 sec.	10 sec.	0 sec.	0 sec.
時計	有	有	有	有	有
電源	12V, 85mA	3V, 乾電池	12V	12/24V 0.2A	?
重量	5 kg	900 g	1.5 kg	1.6 kg	計 250 g
その他	上記重量は電源、ケース含む。	電池駆動	計測震度 (表示器別売)	防爆構造の SI センサー (表示器別売)	最大加速度表示器付記録部別置。

注) 上記仕様は原則各社のカタログ及び Web から引用している。

など)や無線技術の利用が望まれる。また電源の確保も問題であり、1~2 年間程度電池で稼動することが望ましい。

(3) 強震観測システムや記録の活用

さて強震観測の歴史を振り返ってみると、半世紀の間に多くの観測記録が得られ、研究的には多くの課題や成果を生んできた。例えば 1968 年十勝沖地震の八戸港湾の記録や 1993 年釧路沖地震の釧路地方気象台の記録は、地震動特性の多様性を提示した。また 1978 年宮城県沖地震の東北大学の記録や 1994 年三陸はるか沖地震の八戸市庁舎の記録は耐震設計の概念の妥当性を実証した。これらの記録を使った研究成果はその後の耐震設計技術の進展にも一定の役割を果たしてきたと言えるであろう。

一方で観測対象建物の所有者や利用者の関心と呼んだと言いはし難い。このことが強震観測の普及を進めるためには、強震観測が建物の所有者や利用者にとっても有用であることが必要である。

例えば最近の強震計には計測震度を計算し、表示する機能が標準で備わっている。しかしながら建築研究所の観測網を見る限り、この情報はほとんど活用されていない。計測震度だけでは防災に役立てるには不十分で、建物の耐震安全性に結びつくような情報が必要であろう。

この意味でいわゆる建物のヘルスマニタリングの技術は、観測装置や得られた記録を有効に活用する手段として注目すべき分野であるが、実用化にはまだ残された課題がある¹⁰⁾。また多数のセンサーを必要とする大掛かりなシステムを導入できるのは現状では限られた例であろうし、一般的に普及させるにはより簡易で、建物の保守管理に直結するようなシステムの開発が望まれる。このような観点から建築研究所では簡易なシステムで地震直後に建物の被災度を把握し、余震に耐えられるか判定しようとする残余耐震性能判定装置の開発を行っている¹¹⁾。エレベータの管制装置のように建物に付いていて当然なシステムを開発が目標である。

4. おわりに

技術的側面から全国展開が可能な観測システムを考えると、これまで述べてきたように観測装置の低価格化や観測記録の活用範囲を広げることで、強震観測を有用で身近なものにしていくことが有効であろう。しかし真に必要なのは十年単位の長期的なビジョンである。長期ビジョンでは強震観測の意義と効果を再確認し、それに対する社会からの認知を得る必要がある。その上で、観測計画と資金計画を立案し、成果の社会への還元まで含めて構想を立てることができる。この面でも米国での活動が参考となる。

参考文献

- 1) 鹿嶋俊英、長屋雅文: 米国における強震観測とデータベース、強震データの活用に関するシンポジウム、日本建築学会、1995 年
- 2) NSMP: U. S. Geological Survey National Strong-Motion Program (<http://nsmp.wr.usgs.gov/>)
- 3) CSMIP: California Strong Motion Instrumentation Program (<http://www.consrv.ca.gov/CGS/smip/>)
- 4) COSMOS: Consortium of Organizations for Strong Motion Observation Systems (<http://www.cosmos-eq.org/>)
- 5) 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、2001 年
- 6) 渡壁守正、佐間野隆憲、高橋克也: 強震動データベースに望まれる姿、第 2 回強震データの活用に関するシンポジウム、日本建築学会、2000 年
- 7) IISEE: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (<http://iisee.kenken.go.jp>)
- 8) 片岡俊一: 強震観測にかかわる新しい技術、第 2 回強震データの活用に関するシンポジウム、日本建築学会、2000 年
- 9) 飯場正紀、阿部秋男: 小規模建築物のための低コスト強震計の開発、日本建築学会大会、2002 年
- 10) 中村充、若松邦夫: ヘルスマニタリングと地震観測、第 2 回強震データの活用に関するシンポジウム、日本建築学会、2000 年
- 11) Teshigawara, M. and K. Kusunoki: Development of real-time residual seismic capacity evaluation system -Outline and numerical simulation-, Workshop on Smart Structural System organized for U.S-Japan Cooperative Research Programs on Smart Structural System (Auto-adaptive Media) and Urban Earthquake Disaster Mitigation, 2002