

シリーズ「新・強震観測の最新情報」

(第17回) 東京ガスの超高密度リアルタイム地震防災システム

SUPREME の概要

東京ガス(株) 防災・供給部 田村 健・水上清二・土師正聖

1. はじめに

東京ガスでは1,000万件を超えるお客さまがいつでも安心して安全に都市ガスを利用できるよう、ガスの安定供給と保安の確保に努めている。こうした取り組みは、大規模地震が発生した場合も例外ではなく、過去に発生した地震の教訓を受けて地震に強い設備形成を進めるとともに、地震時の二次災害防止に向けた取り組みを進めている。その代表的なものとして、東京ガスでは超高密度リアルタイム地震防災システム (Super-dense Realtime Monitoring of Earthquakes : SUPREME) を開発・導入した¹⁾。本稿では、都市ガス供給の流れと地震時の安全確保の仕組みについて述べた後、SUPREME の概要を紹介する。

2. 都市ガス供給の流れ

都市ガスは、高圧、中圧、低圧と主に3段階の圧力で供給されており、LNG 基地から高圧で送出されたガスはガバナステーションで1MPa未満の中圧に減圧される。中圧ガスは、地域冷暖房やコージェネレーションなどの工業用・商業用に利用され、一部のガスは昼夜間の需給調整のためにガスホルダーに貯蔵される。その後、中圧ガスは地区ガバナで減圧されて低圧ガスとなり、網の目のように埋設された5万km超の低圧ガス導管網を通じて一般のご家庭へと供給される(図1)。

3. 地震時の安全確保の仕組み

地震発生時には、被害が大きな地域へのガス供給を速やかに停止し、火災などによる二次災害を防止することが重要である。地震時は、まず建物内の安全を確保し、被害が大きい地域は面的にガスの供給を停止することで、お客さまの安全を確保している。

3.1 建物内の安全確保

地震時の建物内でのガスによる二次災害を防止するため、お客さま宅に設置してあるマイコンメーター(ガスメーター)には震度5程度以上の揺れで安全装置が作動し、自動的にガス供給を遮断する機能がある。この感震遮断機能により、お客さま宅内へのガス供給を停止し安全を確保する。なお、安全が確認された後は、面的にガス供給を停止していない場合は、お客さまの簡単な復帰操作によりガスの供給を再開することができる。

3.2 被害が大きい地域の安全確保

マイコンメーターより上流側については、被害が大きい地域のガス供給を面的に停止することで安全を確保する。被害が小さい地域へはガスの供給を継続することも重要であるため、地震時のガス供給停止範囲を最小限とすべく、低圧のガス導管網はあらかじめ300以上のブロックに分割されている。地震時は、ブロック単位でガスの供給を停止

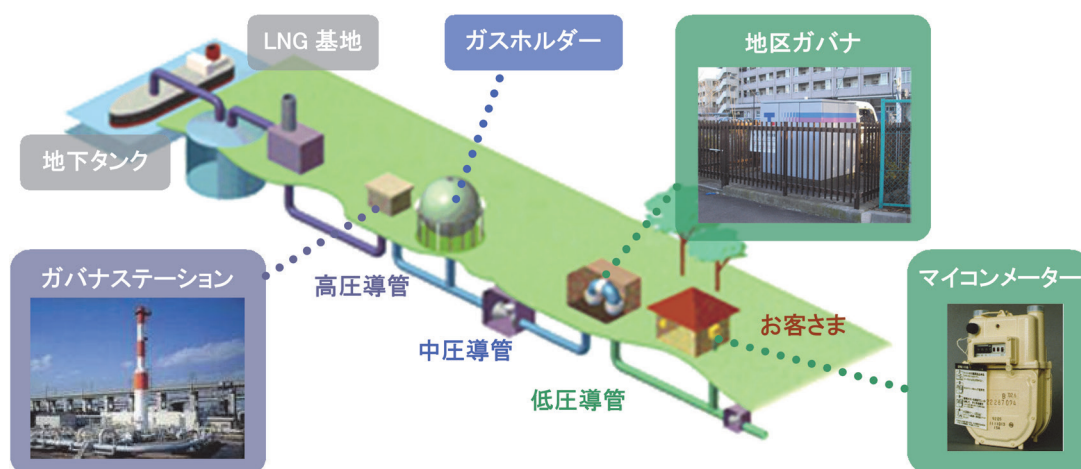


図1 都市ガス供給の流れ

し、安全を確保する。

東京ガスでは、地震時の迅速な供給停止措置などによる安全確保を目的としてSUPREMEを開発し、2001年から導入している¹⁾。

4. SUPREME の概要

SUPREMEは、東京ガスの供給区域内にある約4,000基の地区ガバナに設置されたSIセンサー*¹(約1km²に1基)を使った地震防災システムである。超高密度のデータ収集と遠隔操作による地区ガバナの遠隔遮断機能に加え、地震時のガス管被害推定機能や液状化推定機能を備えている。



図2 防災ブロックのイメージ (ブロック数は2021年3月現在)

4.1 SIセンサー (地震計)

SUPREMEでは、地区ガバナに設置されたSIセンサーと供給指令センター間の通信により、地震時にもSI値、最大加速度、ガバナ遮断状況、液状化警報状況等の遠隔監視・制御を可能としている。

SIセンサーは、センサー内部にSI値を計算する機能を有する地震計で、速度応答スペクトルを周期0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5秒の7点で近似計算し、SI値を算出する。

4.2 感震・遠隔遮断機能

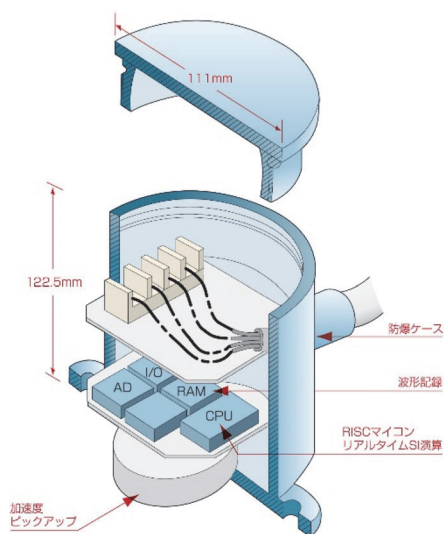
地震時の二次災害防止のためには、被害が大きい地域のガス供給を即座に停止しなければならない。このため、地区ガバナにはSIセンサーに連動して作動する感震遮断装置が設置されており、大きな揺れを観測した場合は地区ガバナの遮断装置が作動しガス供給を自動停止する。

しかし、ブロック内では地区ガバナがガス導管により相互に接続されているため、感震遮断した地区ガバナと未遮断の地区ガバナがブロック内に混在すると都市ガスの供給は継続されてしまう(図4左)。そのため、被害が大きいブロック内の地区ガバナ全てをSUPREMEにより遠隔操作で遮断することで、ブロック内のガス供給を停止する(図4右)。

SUPREMEが構築される前は、社員が地区ガバナに出動して停止操作をする必要があり、大規模地震発生時の供給停止に概ね40時間を要すると想定されていた。このSUPREMEを活用することで、供給停止までの時間は約10分間にまで大幅に短縮された。

4.3 被害推定機能

SUPREMEは、感震・遠隔遮断機能に加えて低圧ガス



- ★小型・軽量・低価格
- ★高機能・高精度
 - SI、加速度を計算/出力
高精度・リアルタイムSI演算
 - 警報出力(SI値/加速度任意設定可)
 - 遠隔監視/制御装置対応可
 - 地震波形保存可(XYZ3軸10地震)
 - 液状化検知
 - 計測範囲: ±2,000Gal
 - 精度: ±5%FSG
 - 常時自己診断
 - 耐久性(耐水、耐ノイズetc)
 - 防爆性
 - 誤遮断防止ロジック搭載(2種類)
 - リアルタイム液状化検知

図3 SIセンサー概要図 (提供: アズビル(株))

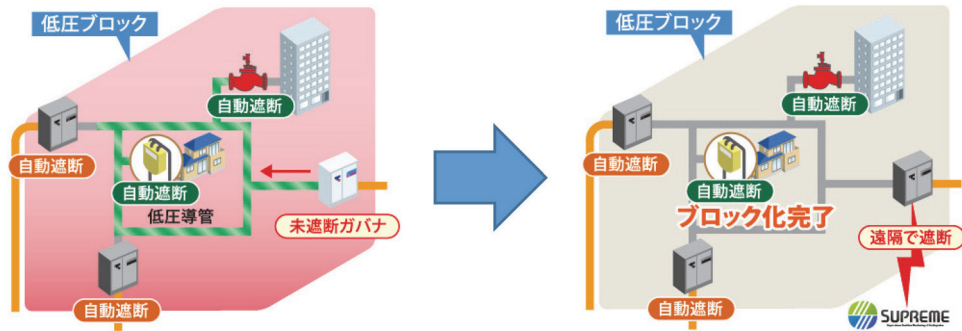


図 4 ブロック供給停止のイメージ

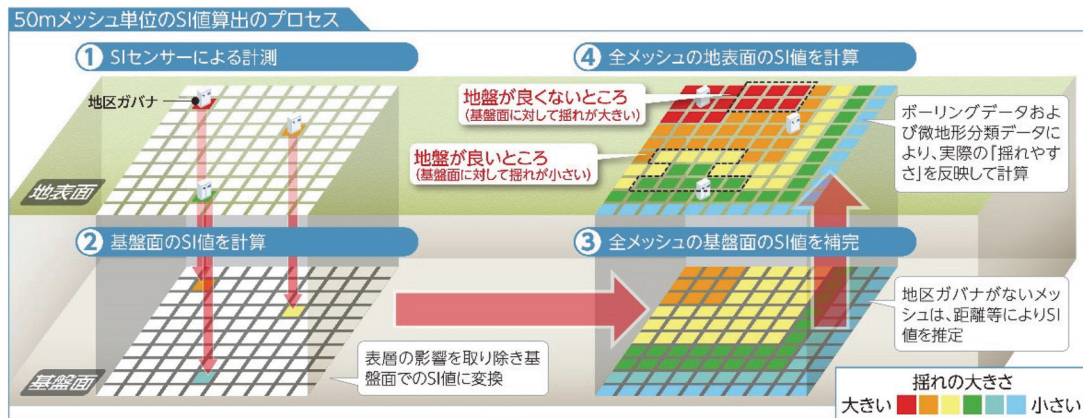


図 5 SI 値算出プロセスのイメージ

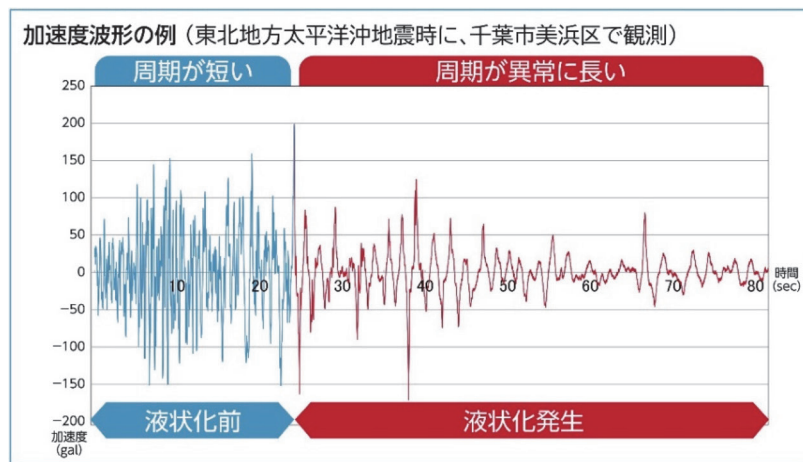


図 6 SUPREME で観測した加速度波形（千葉市美浜区）

導管の被害推定や液状化推定の機能を有しており、SUPREME によってガス導管の被害や液状化の発生が推定された地域でもガスの供給を停止する場合があります。

各種被害推定を行う上では、地盤情報が重要となるが、SUPREME には東京ガスが独自に作成した地質分類図と供給エリア内の約 6 万本のボーリングデータが収納されている。これらのデータを活用することで、ボーリング 1 本単位でのマイクロゾーニングが可能となっており、基盤面に

おける SI 値分布を算出することで SI センサーが無い場所でも 50m メッシュの超高密度で SI 値を推定できる。これらの情報に基づき、高精度で各種被害推定を行っている^{2),3)}。

低圧ガス導管の被害推定については、過去の地震におけるガス管被害データから東京ガスが独自に作成した被害推定式を活用しており、SUPREME で計算された地表面 SI 値、液状化層厚、微地形区分などのデータに基づき被害推定を行っている。

また、PL 値^{*2}を算出することで液状化の範囲を推定することも可能となっている。さらに、実際に液状化が発生した場合は地盤が大きく動き低圧ガス導管が破損する恐れがあるため、SUPREMEは観測された地震の加速度波形を解析することで、液状化発生の有無を警報で知らせる機能をもっている。図6に、東北地方太平洋沖地震の際に液状化被害のあった千葉市美浜区で観測された加速度波形を示す。

5. おわりに

東京ガスでは、マイコンメーターによる感震遮断によって建物内の安全を確保するとともに、高密度に配置されたSIセンサーとSUPREMEの感震・遠隔遮断機能や各種被害推定機能を活用することで、地震時の二次災害防止を実現している。なお、SUPREMEで取得した地震データは、公共性の高い機関を中心に有償提供している。

参考文献

1) 清水善久・石田栄介・磯山龍二・山崎文雄・小金丸健一・中山 渉, 2003, 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集, 第738号/I-64, 283-

296. https://doi.org/10.2208/jscej.2003.738_283

- 2) 石田栄介・末富岩雄・塚本博之・猪股 渉・濱中 亮・乗藤雄基・安田 進, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震の際に即時推定した液状化危険度分布の検証, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第68巻, 第4号 (地震工学論文集第31-b巻), I_268-I_273. https://doi.org/10.2208/jscejsee.68.I_268
- 3) 猪股 渉・乗藤雄基・石田栄介・塚本博之・山崎文雄, 2013, 東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度地震観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証, 日本地震工学会論文集 第13巻, 第2号 (特集号), 37-44. https://doi.org/10.5610/jaee.13.2_37

*1 SIセンサー: G.W. Housnerによって提唱された地震動による建物の被害への影響を表すSI (Spectral Intensity) 値を測定するセンサー。SI値は、一般的な建物の固有周期 (0.1~2.5秒) の速度応答スペクトルの積分値から求められる。

*2 PL値: 地盤の液状化危険度を表す指標。PL \geq 5で液状化危険度がやや高い, PL $>$ 15で高いことを表す。

(第18回) 超高層建築の強震観測とモニタリング

工学院大学 久田嘉章

はじめに

本報告では、東京都新宿駅西口超高層ビル街に位置する超高層建築の強震観測・モニタリングシステム、および、民間による建築物の強震観測の現状や課題を紹介する。

超高層建築と強震観測・モニタリングシステム

1968年竣工の霞が関ビルに代表される超高層建築は1970年代より多数建設され、多くの建物で強震観測が行われている。しかしながら、大半が民間建築であり、記録を公開して耐震対策の向上に活用される機会は殆ど無いのが現状である。超高層建築は柔構造であり、短周期の激しい強震動に対しては高次モードでしなやかに変形することで地震荷重を分散させることが可能である。一方、制振ダンパーを設置していない場合、一般に減衰が非常に小さいため、長周期地震動による1次モードでの共振の可能性が懸念されている。そのため大地震時の建物の応答性状と耐震性能を確認することを目的として、当初より超高層建築で強震観測が行われていた。当時は高価なSMAC型強震

計などのアナログ式の加速度計が用いられ、データ回収やデジタル化に多大な労力を要したが、1980年代にはデジタル式強震計やマグネティックテープ (MT) 等による大容量のデータ収録が可能になり、1990年代にはネットワーク回線を利用したオンラインでのデータ収録が行われ、最近ではMEMS加速度センサーなどにより安価かつ容易に強震データが得られるようになった。さらに1990年代後半あたりから建物内に多数のセンサーを配置し、リアルタイムに建物の構造性能の健全性を診断する構造ヘルスマニタリングが実施されるようになった。一方、2003年十勝沖地震 (M8.0) の際、苫小牧市の石油タンクでスロッシングによる延焼火災が発生し、長周期地震動の存在と超高層建築への影響が改めて広く社会的に認知された。特に2011年東日本大震災では、超高層建築の大きな揺れと室内被害や混乱の様子がSNSなどのメディアで広く知られるようになった。このため、構造ヘルスマニタリングシステムは、現在ではリアルタイムな建物や館内の被害推定を行い、適切な災害対応を支援するための被災度判定・災害

対応支援システムとしても広く活用されている。現在、多くの建物で強震観測が行われていると思われるが、残念ながらその貴重な記録が公開され、広く社会で活用される仕組みがないのが現状である。

工学院大学新宿校舎における強震観測・モニタリングシステムとデータの公開^{1)~3)}

著者が勤める工学院大学新宿校舎（鉄骨造地上 29 階、1989 年竣工）と、隣接するエステック情報ビル（鉄骨造地上 28 階、1992 年竣工）は竣工当初より強震・強風観測を行っている。図 1 に地震計の配置図、表 1 に観測システムの仕様、図 2 に 2011 年東北地方太平洋沖地震における強震観測記録の例を示す。地中 100m のボアホールと地下

6 階から地上屋上 29 階の屋上階まで計 40 チャンネルの加速度センサーが鉄骨の梁端部に設置され、風向・風圧計のデータの 2 チャンネルと合わせて、手動あるいは地震のトリガーにより、学内 LAN を経由して MT 収録装置に保存されるシステムであった。システムの維持管理とデータ活用のために工学院大学と 4 社の建設会社による研究会を立ちあげ、会員に対してデータを公開してきた。

2000 年に研究会は終了し、それ以降は獲得した様々な研究費などで維持管理している。2008 年には収録システムを一新し、図 3 に示すように、センサーの設置階の簡易震度（最大速度振幅からの換算値）と、層間変形角（セン

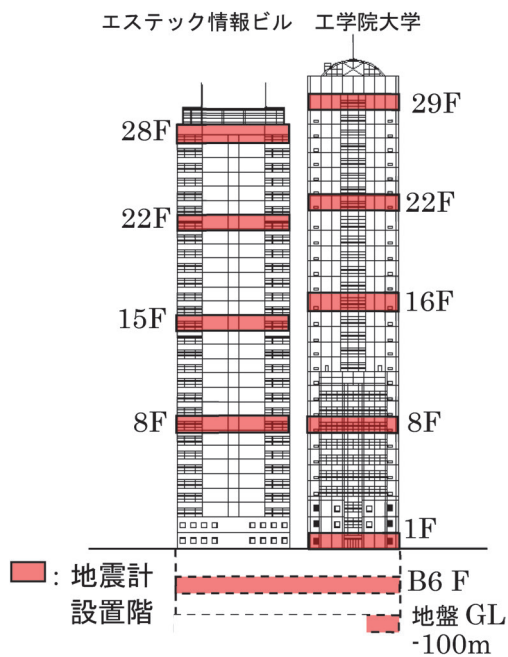


図 1 工学院大学とエステック情報ビルの立面と地震計の配置図

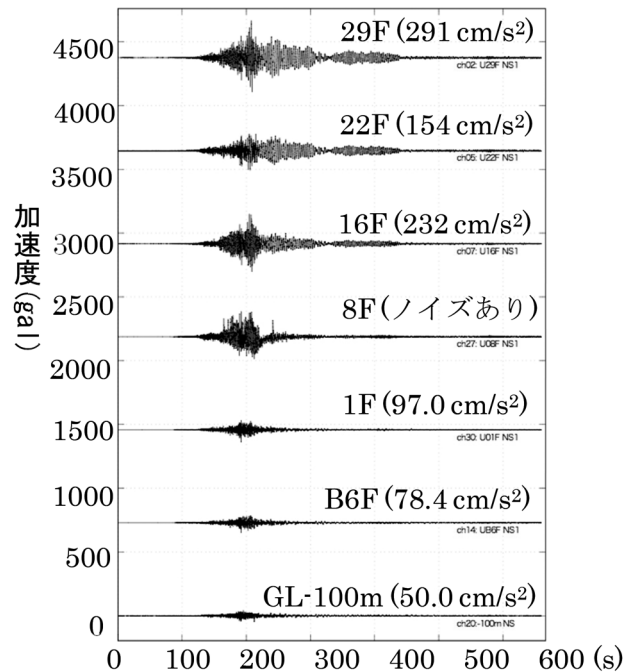


図 2 2011 年東北地方太平洋沖地震時の工学院大学における加速度記録 (NS 方向)。地震計設置高さ順に上下に並べて表示。記録の上の () 内の数値は最大加速度

表 1 工学院大学・エステック情報ビルの旧強震観測システム（株式会社東京測振：1990～）

| | |
|----------|------------------------------------|
| 設置場所 | 地中 100m ボアホール、および、建物鉄骨の梁端部（図 1 参照） |
| サーボ型加速度計 | SA-175CT（水平）、SA-176CT（上下） |
| A/D 変換 | 16 bit |
| サンプリング | 100 Hz |
| 測定レンジ | 0.04~1000 cm/s ² |
| 測定周波数範囲 | 0.1~30 Hz |
| 加速度計増幅器 | SAG-12, PCS-1025 |
| デジタル収録装置 | SAMTAC-160-24（MT 収録装置：2008 年まで） |
| | LS-7000（2008 年以降） |

サー間の変位波形からの平均層間変形角) をリアルタイムで表示する被災度判定システムを試験的に導入した。図2は2011年東日本大震災時にシステムが稼働したときの加速度波形であり、図3は、それを用いた被災度判定システムの最終判定画面である。波形記録より継続時間が5分間以上も続いたこと、上層階ほど加速度が大きい、波形の前半では中間階で加速度が小さくなっており、主に2次モードで揺れていたこと、波形の後半では高層階ほど加速度が大きい1次モードで揺れていたこと、などが分かる。一方、被災度判定システムより、層間変形角から最大でも1/300程度以下であり、構造的な被害がないこと、簡易震度から低層階では震度4と小さいが、中層から高層階では震度5強~6弱と大きくなっており、室内被害の可能性があること、が地震直後に分かった。写真1は当時の室内被害の様子であるが、高層階に実際に被害が発生しており、推定結果に対応していた。大半の家具の転倒防止対策は行っていたが、持ち込まれた本棚が固定されておらず転倒が生じた。またシステム天井の天井板が数カ所で落下し、固定していないキャスター付きのコピー機が大きく移動した。さらに非常用エレベータのメインロープ等が絡まり、損傷が発生したために約3か月間使用できなくなった。モニタリングシステムにより構造的な被害はなく、低層階は無被害と判断され、施設担当職員により実際に館内の安全を確認した後、速やかに新宿駅周辺の帰宅困難者を1階と地階に約700名受け入れることができた。

2011年東日本大震災を契機に、構造モニタリングによる即時被災度判定・災害対応支援システムの有効性が広く認識されるようになり、それ以降に新築される超高層建築の多くにシステムが導入されている。本学とエステック情報ビルでもその有効性が認識され、新規の商用システムによる運用を開始した。しかしながら、震災後10年が経過し、エステック情報ビルでは現在もシステムを継続しているが、大学では経費削減により運用を停止している。一方、著者らによる表1のシステムも老朽化により現在では運用を停止しており、2020年からは株式会社エイツーの協力を頂き、表2に示す新しいシステムで強震観測を継続している。なお、ここで紹介した強震観測データは著者の研究室のweb page (<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp>) より公開している。

おわりに

強震観測は、いつ来るか分からない大地震に備えて永年にわたる維持管理とシステム更新に多大な労力を必要とする。本システムも多くの方々や機関の協力を頂きながら何とか継続しているが、著者の力不足により研究成果の点では苦戦中である。一方、社会貢献として、強震観測データや地震による被害写真なども原則として全て公開している。公共施設を含めて強震記録や地震時の被害写真などを公開している超高層建築の例は恐らく他にはない。一般建築に比べて超高層建築は高い耐震性を有しており、安全性



図3 2011年東北地方太平洋沖地震時の工学院大学(左)とエステック情報ビル(中)における被災度判定結果(簡易震度と層間変形角)と、結果の解説(右)



写真1 2011年東北地方太平洋沖地震時の工学院大学内の室内被害用と帰宅困難者受入れの様子

表 2 工学院大学の強震観測システム（株式会社エイター：2020～）

| | |
|---------|-------------------------------|
| 設置場所 | B2, 1F, 7F, 14F, 21F, 28F の床面 |
| センサー | MEMS 加速度センサー |
| A/D 変換 | 20 bit |
| サンプリング | 200 Hz |
| 測定レンジ | ±2G |
| 測定周波数範囲 | DC～サンプリング 20% (40 Hz) |
| データ収録 | 外付け SSD, 外部データセンター（インターネット経由） |

を売りにしているため、「長周期地震動で大きく揺れた」、「室内に被害が発生した」などという事実はタブー視され、その証拠となる強震記録も一般に公開されることはない。巨大なスケールの超高層建築では 1～2m 程度の大きな揺れでも倒壊することは無いが、対策を怠れば室内の人間は非常に危険な状況にさらされることは自明である。地震時には一般に高層階ほど大きく揺れ、負傷者や閉じ込め事故が発生する可能性も高い。地震でエレベータは止まり、電話回線も輻輳するため、低層階の警備員や外部の警察・消防に連絡はできず、被害が出て誰も助けに出来ない状況になる。従って超高層建築では、その安全性と危険性を正しく理解し、まずは建物・設備機器の耐震・制振対策と館内の安全対策を推進することが重要である。次に、設置が義務化されている火災・煙探知機と同様に強震観測によるモニタリングシステムを導入し、火災を想定した避難訓練だけでなく、震災を想定した災害対応訓練を繰り返し行う必要がある³⁾。最後に、超高層建築の強震観測データは公共の財産であることについて社会の理解を得て、公的な支援による観測の充実と維持管理、そしてデータ公開への制度化が強く望まれる。その際、日本と同様な地震災害の環境下にあるカリフォルニア州の地盤・建物の強震観測プログラムなどが大いに参考になると思う⁴⁾。

謝辞

本報告で紹介した強震観測システムは、STEC 街区強震・強風振動研究会（工学院大学・浅沼組・安藤建設・戸田建設・日本国土開発、1992～2000）、工学院大学総合研究所・地震防災・環境研究センター（EEC、2001～2008）、同・都市減災研究センター（UDM、2009～）、JST 研究開発成果実装支援プログラム「研究領域高層ビル耐震診断に基づ

く帰宅困難者行動支援システムの社会実装（2013-2016、代表：慶応大学・三田教授）」の支援を頂き、東京測振、白山工業、富士電機、三菱総研、エイターによる協力により実施しています。

参考文献

- 1) 星 幸男・久田嘉章・山下哲郎・鱈沢 曜・島村賢太, 2010, 超高層建築における常時微動・人力加振・地震観測記録と 3 次元立体解析結果の比較検討による振動性状評価に関する研究, 日本地震工学会論文集, 10, p. 2_73-2_88.
https://doi.org/10.5610/jaee.10.2_73
- 2) 久保智弘・久田嘉章・相澤幸治・大宮憲司・小泉秀斗, 2012, 東日本大震災における首都圏超高層の被害調査とアンケート調査, 日本地震工学会論文集, 12, p. 5_1-5_20.
https://doi.org/10.5610/jaee.12.5_1
- 3) 久田嘉章, 2011, 第 4 回 超高層建築の震災対策, 耐震の入口と出口の話—強震動と地震防災—, SEINWEB, NTT ファシリティーズ総研
<https://www.sein21.jp/TechnicalContents/Hisada/Hisada0104.aspx>
- 4) Anthony F. Shakal, 2001, 第 21 回 カリフォルニア強震観測プログラムと最近の発展, 強震観測の最新情報, 日本地震学会ニュースレター, Vol. 13, No. 2, 50-54.
https://www.zisin.jp/publications/document03_21.html (英語)
https://www.zisin.jp/publications/document03_21j.html (日本語訳)