

第2部 分科会の取り組み紹介

1.建物付帯設備分科会

「建物付帯設備分科会の活動と E-ディフェンス実験」

楠 浩一(東京大学地震研究所 教授)

1.はじめに

われわれの分科会では、まずは地震動について考えていますが、システムとしては風等でも使えると考えています。図表1の右上の写真は関東大震災の状況です。実はこの地震に鑑みて、日本の耐震規定で考えている地震の大きさは決まっています。そのときの先生が未来を見越した設定値にしてくださったので、今もほとんど設計用地震動の大きさは変わっていません。

地震の大きさを検証するために、地面の上にたくさんセンサーが置かれてきました。地震時に建物は上に行くほどしなり大きく揺れます。1981年の建築基準法改正のときには、このしなり具合も設計法の中に取り込まれましたが、果たしてこれが正しいのかどうかは、建物の上の方にもセンサーを置いて測ってみたいと分かりません。それは言うは易しで、オーナーのところにお伺いして「センサーを置かせてください」と言っても、大体「帰れ」と言われてしまうので、設置によるオーナーのメリットが何かを考えなければいけません。

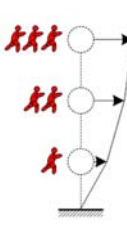
1

デ活
データ活用協議会

Tokyo Metropolitan Resilience Project 2019
防災科研

加速度記録をとって何をする？

耐震設計の基本情報として、そもそも、どの程度の大きさの地震に対して設計するかを決める必要がある。そのためには、地震の大きさを観測する必要がある。これまで、地表面には沢山の加速度計が設置され、**設計用地震動**に関する検討が行われてきた。





一方、建物は地震でゆすられると、釣り竿の様にしなり、**上層階に行くほど大きく揺れる**。この加速度に各階の質量を乗じると、地震力(慣性力)が求まる。つまり、各階で建物に必要な強度は、階によって異なることになる。

建物の耐震設計を精度良く実施するためには、建物の揺れ方を精度良く推定する必要がある。そのためには、**建物の揺れ方を実測して、データを蓄積し、検討を進める必要がある**。

センサーの価格も低下してきており、観測の推進が望まれる。

— **設置によるオーナーのメリットは？**

いろいろありますが、今日ご紹介するのは、巨大地震での被害を迅速に把握するということです（図表2）。これは今、構造の分野では結構研究がなされています。いわゆる構造ヘルスマモニタリングといわれるもので、センサーを建物に入れて被害状況を地震直後に測ります。そういった方法はもうあります。国が行っている応急危険度判定です。ただし、それは技術者の1棟1棟の目視によって行われています。そうすると建物の被害の跡しか分からないので、結局安全とも言えなければ危険とも言い難いということで、要注意という黄色の判定が出ます。また、超高層建物はきれいな仕上げがされているので、被害がなかなか確認できないという問題があります。あるいはオーナーにしてみると、事業を再開するためには、見た感じは大丈夫でもエビデンスが必要なので、計測データがあればいいということになります。

2.建物の被害度の判定

先ほど申し上げたように、被害度の判定はホットな分野であり、たくさんの研究がなされています。いろいろな手法が提案されていますが、今日はその一例で等価線形化法を紹介します。

2

デ活
データ活用協議会

Data use and application council for Resilience
Tokyo Metropolitan Resilience Project - 2019
防災科研

巨大地震での被害を迅速に把握する

地震の直後には、余震による2次被害の発生には細心の注意が必要である。その為には、地震発生直後に**建物の被害状況**をいち早く判断する必要がある。

我が国には、「**応急危険度判定**」という制度があり、地震発生後に判定士が1棟ずつ目視により被害を確認し、「確認済み」、「要注意」、「危険」と分類している。しかし、目視に飽るため**時間がかかり**、また、残留するひび割れ幅やその様子から被害を推定するしかなく、「**要注意**」という判定が多くなる。兵庫県南部地震の際には、判定士のべ5,068名で46,000棟調査するのに19日間かかった。また、危険と判定されたものが13.9%あったのに対して、**要注意は20.0%程度**あった。

さらに超高層建物など、目視による被害程度の調査は非現実的である。また、近年の建物は梁に被害が集中するように設計されている。梁は一般的に仕上げ材に覆われているため、**被害程度を調査できない**。

一方、迅速な事業再開を考えると、**早急に安全性を確認する必要がある**。





この方法は、建物の中に少しだけ加速度計を置いて、揺れている情報を取ります。図表3の絵のように、5階建てなら普通は5マスぐらいにモデル化するのですが、それをもっと簡単に一つのマスにして、建物が壊れているか壊れていないかを1個の絵で比較するという方法です。これはわれわれが考え付いたわけではなく、建築基準法に2000年に追加された限界耐力計算法という手法と全く同じです。この研究グループのメンバーは私を含めて限耐法を作ったときのメンバーなので、それを援用しています。

壊れるところまでの記録は実建物ではなかなか取れませんが、力と変形の関係を計測してグラフに落とせば、このラインを超えていれば「ちょっとひび割れた」とか、平らになってしまうと「鉄筋が中であめのように伸びてしまった」ということがわかります。壊れる点が推定できれば、国の基準で定められている無被害、軽微、小破、中破、大破、倒壊に分類ができます。

われわれがこの方法で試しに計測してみると、例えば図表4の振動台実験では、揺すってみたら中破で、もう1回揺れたら倒壊するという結果が出ました。実際に実験の際は倒壊しました。この等価線形化法を用いたシステムの日本全国の設置状況は図表の右下のとおりで、なかなか設置が進みません。センサーを新たに入れてもらうとなると、オーナーに許可を頂いたり、新たな投資が必要となります。

3

建物の被災度の判定

ひび割れなどによる非線形挙動を加速度計のみから観測する。建物各階に発生する非線形挙動をまとめて、一つの「力と変形」の関係に帰納する。弾性の範囲では力と変形の関係は直線（線形関係）となる。非線形化するとだんだんと傾きが低下するため、被害を直感的につかみやすい。この手法は、「等価線形化法」とよばれ、2000年に建築基準法に追加された方法と同一である。

システムの特徴は、

- 数個の安価な加速度計を設置
- 応答変位は計測加速度から
- 限界耐力計算法を援用
- 本震がもう一度強った時の被害程度も推定

判定には、およそ数分で終了する。計算後は自動的にレポートが作成され、そのレポートは登録者に自動送付される。

4

判定の概要と設置例

振動台実験例

代表変形 (cm)

代表加速度 (cm/s²)

本震: 中破(III)
余震: 倒壊(V)

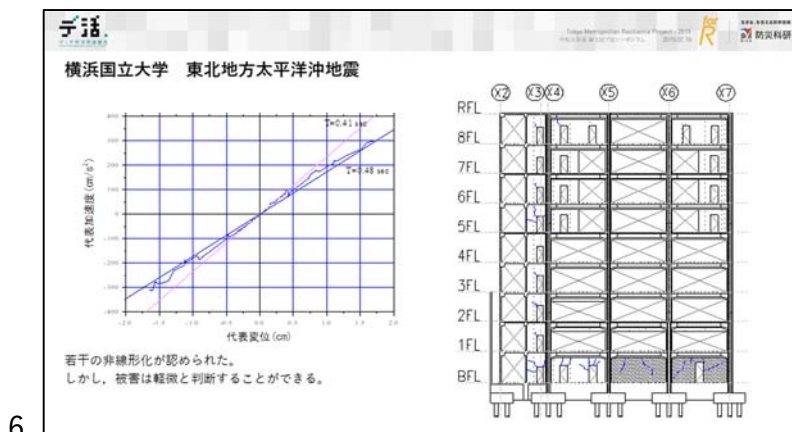
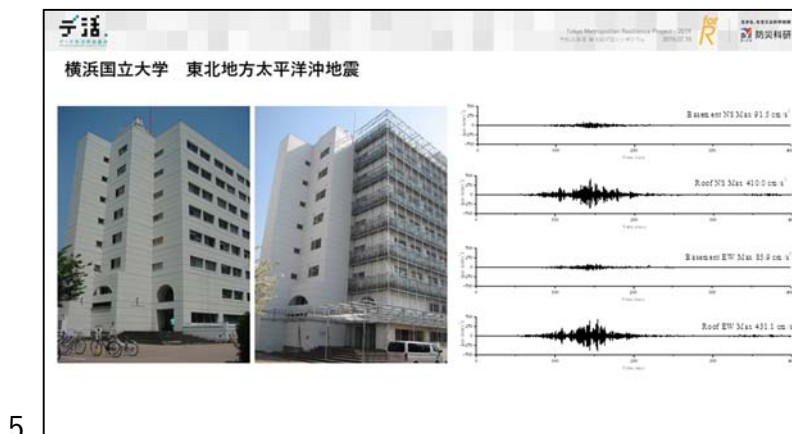
性能曲線モデル
要求曲線(5%減衰)
要求曲線(本震)
要求曲線(余震)
仮の性能曲線
性能曲線

判定方法

国内設置状況

横浜国立大学の実建物の例を紹介します。図表5の左側が2008年にセンサーを入れたときの写真です。私が元いたところで、今はないのであまり言うてはいませんが、当時、耐震診断をしてみると目標値の半分ぐらいしかなく、これでセンサーを置けば振動台実験ぐらいに壊れるところまでデータが取れると思ってセンサーを置きました。しかし、すぐに学長にばれて、「何かセンサーを置いたらいいね。じゃあ耐震補強してあげよう」と言われて耐震補強されてしまいました。ところがその後すぐに東日本大震災が起これ、学長には命を救われて感謝しましたが、横浜も結構揺れました。地面で100ガル、トップではその4倍ぐらい揺れて、本棚から本が全部飛び出しました。

私も学生たちも「どうしよう」という感じでしたが、ある学生に「そういえば先生、あれは計算しなくていいのですか」と言われて、そうだったと思って計算した結果が図表6です。途中から少し寝てしまったことがわかりますが、平らにもなっていませんし、被害はひび割れぐらいだということで、当時は災害時のメールや表示システムがなかったので、この紙を持って各先生の部屋を「建物は大丈夫ですから逃げる必要はありません」と言って回りました。後でゆっくり確認してみると、足元に多少修復できないぐらいの細かいひび割れが発見されました。



3.建物へのセンサーの設置

そういう技術があるわけですが、建物への電気仕掛けのものの設置は、なかなか認めてもらえないという長い歴史があります（図表7）。災害時に電力があるのかということが問題になって、電気仕掛けのものはプラスアルファだといわれることが多かったのです。例えばアクティブ制振とって、建物が揺れたときにそれを感知して反対側に力をかけて揺れを止めるという機構があります。もちろん今も一部で採用されていますが、電力確保が本当にできるのかという大きなネックがあり、なかなか普及しませんでした。一方、免震装置は置いておけばいいだけで電気が要らないので、非常に広く普及しています。センサーも、置くとなったら電気が要るので、建設業としては普及が遅れてきました。

ところが建物の中を見ても、そんなこととは関係なく、既にたくさんのセンサーが置かれています（図表8）。例えばエレベータは、いち早くP波センサーで地震を感知してエレベータを止めたり、空調設備は温度・湿度を集中管理するのでネットワークがつながっていたり、感震ブレーカーは地震を察知して電力を止めたり、それぞれ本業のためのシステムとして既に建物の中に入っているものがたくさんあります。これを全てIoT技術でネットワークでつなぐことができ

7

建物と装置

建築基準としては、建物の耐震安全性に関する事項では、いわゆる「電力を要する機械」の活用は最も遅れてきた。

例【アクティブ制振】
振動を検知してアクチュエータ等で振動をキャンセルする
一 地震時にも電力が確保できるか？
なかなか普及しなかった。

【免震建物】
免震装置やオイルダンパーなどは、基本的には電気が不要振動に対して機械的に作用する。

構造分野は先端技術利用が遅れている！



8

設備・環境でのモニタリング


一方、設備・環境分野では、コンピュータ管理を目的として、センシングとネットワークの構築が進められてきた。

例えば、エレベータなどは、地震発生時にエレベータを安全に最寄り階に停止させるため、地震動のP波を観測することが古くから実施されている。一般的に建物脚部にP波センサーを設置し、最上階の加速度は係数倍して求める例が多いようである。エレベータの停止状況は、ネットワークを介して、中央防災室や管理センターに集約されている。

空調設備では、温度や風速・風向の効率的な集中制御のため、各種センサーが吹き出し口付近に配されている。その観測状況は常時、集中管理装置に結ばれているものがある。

感震ブレーカーでは、地震動を感知し、建物の被害に伴うショート・漏電などにより火災の発生が危ぶまれるほどの加速度が観測されると、自動的に電力を遮断する機能を有している。

同様の装置はガスメータにもあるが、鉄球の落下による機械的な閉鎖機構が多いようである。



ば、新たなセンサーを入れるまでもなく、ただ情報を統合するだけで、今日紹介したような地震直後の継続利用性の判断ができるようになります。

4.建物付帯設備分科会の活動

たくさんのセンサーが既に仕込まれているので、本業の目的からそのセンサーを開発してこられた企業の皆さまから情報提供していただくことができれば、いろいろなことに使えます。付帯設備分科会は、そのようなことを検討し、かつ、その普及を目指しています（図表9）。普及すれば、災害情報の把握だけでなく、日常的に振動の状況を見ることができるので、防災リテラシーの向上にもつながると考えています。

今まで、地域の被災状況は目視で測る以外ありませんでした。従って、加速度からある程度想定してマップに落としていたわけですが、例えばその推定を実被害で塗り替えることが、こういったシステムが普及すれば可能になります。実際に計測してマップに落とし、「青い点は大丈夫な点」「赤い点は壊れている点」「黒い点はブラックアウトして情報が来ない点」とすることができます。

われわれは日東工業さんから感震ブレーカーの情報を提供していただいているので、今はそれをモデルケースとして、技術的な課題（センサーの性能がどれぐらいか、どのようにIoTでつないでいくか）や、社会的課題（被災度評価をどうするか、日常生活のために劣化度判断ができないか）という議論をしています（図

9

建物付帯設備分科会の活動目的

- ・IoT技術の普及
建物の中、特に付帯設備には、既に多くのセンサーが内蔵されている。IoT技術により、それらのセンサーは既に接続されている例もある。グローバルネットワークにつながっている例もある。
- ・災害情報把握
建物や構造物の地震時の損傷把握は、極めて重要である。住民の避難判断、避難所・重要施設の継続利用判断、企業の継続利用性判断、地域被災度把握
- ・国民の防災リテラシーの向上
地震発生状況の見える化、建物振動の可視化、災害状況の可視化。

—IoTを活用した、国民の防災・減災につながる情報利活用の方向性、課題の掘り起こしとその解決策を探ることが目的



感震ブレーカー



地域被害即時把握のイメージ

5.建物付帯設備分科会

表10)。それから、社会実装的な課題として、どうやって普及させるかと同時に、どうやって学術利用を担保するかということも検討している最中です。

この後、日東工業の鈴木さんから、感震ブレーカーを例にとり、既に実施したケーススタディの結果を紹介していただきます（図表11）。

今年12月には、鉄筋コンクリートの3階建てで、今までやってきたような構造体だけの実大建物ではなく、仕上げのタイルや窓、天井配管などを全て含んだ実物建物の振動台実験を行います（図表12）。もちろん、この中に感震ブレーカー一等を設置して状況把握をしようと考えています。主目的で開発されたセンサー

10

議論の内容
感震ブレーカーを対象のひとつとする。

- 目指す方向性
地震観測の高密度化
観測データ情報の防災・減災活用
- 3つの課題を議論
 - 技術的課題
センサー性能、IoT技術（ビッグデータ）
計測データの仕様、見える化
 - 社会的課題
防災・減災活用の内容：被災度評価・危険度評価
日常利用の可能性：劣化度判断？
 - 社会実装的課題
導入のシナリオ：メリットは？必要な機能は？
市場の形成：新しいビジネス分野
データ活用への道筋：学術利用
必要な広報活動：試験設置

高密度な震度把握のイメージ
(横浜市HPより)

調査済 要注意 危険

センサーを用いた建物被害把握
(イメージ)

11

感震ブレーカーを一例として
主目的は、震災時の電気火災の防止。
その加速度計測データを建物の被災度判定に活用する。
戸建て建物ではブレーカーは一般的には1つしかないで、PLC
で接続できる加速度計（子機）も開発。
安価で簡単に加速度計の配置が可能となる。

精度を検討し、損傷判定への利用を目指す。
レジリエンスの向上に資する。

ブレーカーを自動遮断
建物の揺れを分析
省施工なシステム

12

2019年度の振動台実験
鉄筋コンクリートの実大3層試験体で、壁・垂れ壁・袖壁を有する。
構造体だけでなく、非構造部材も有する

- 天井
- 窓・サッシ
- 仕上げタイル
- 天井配管

感震ブレーカー等の基本性能も振動台実験で確認できる！

のデータを提供できる方で、興味を持っていただいた方には、ぜひ分科会に参加していただければと思います（図表13）。

13

