SDR Report No.58 (2021_January) 修正版

都庁舎の2011年東北地方太平洋沖地震記録を用いた振動状況動画の作成と分析

中村 豊 (SDR)

1. はじめに

都庁舎の長周期地震対策としてオイルダンパーの設置工事が行われている。第二本庁舎に ついては、2020 年夏に工事が終了し、地震観測システムの更新が進行中である。そこで、 遅ればせながら、現在の地震観測システムの動作状況を把握するため、2011 年の東北地方 太平洋沖地震(以下「311 地震」と称す)時の記録を使って、様々な分析を行うことを計画 した。これは現状の問題点を把握するとともに、新たな観測システムが備えるべき機能など を検討するための資料となればとの思いからである。まず、ここでは、どのような振動状況 であったのかを記録に基づいて再現することを試みる。なお、分析の対象としたのは、第一 本庁舎と第二本庁舎の 311 地震時の記録開始時(2011 年 3 月 11 日 14 時 47 分 20 秒)から 1200 秒間の記録である。

2. 観測点位置と記録された加速度波形

都庁舎およびその近傍に設置された地震計の配置状況は図1に示すとおりである。 記録された加速度波形の方向成分を建物の短辺方向と長辺方向に一致させるように、水平 面内で20度反時計回りに回転したものを図2に示す。

3. リアルタイム震度について

加速度記録から算定されたリアルタイム震度 RI の算定結果を図 3 に示す。第一本庁舎 TCH1 と第二本庁舎 TCH2 では、RI の変化の様子が異なっていることがわかる。TCH1 では 25F 以 上で、TCH2 では 13F 以上で、大きさだけが異なるものの、RI の変化状況はそれぞれで類似 しており、建物の特性を示すものとして注目される。TCH1 の 33F 以上は北塔と南塔に分か れているが、48FN と 48FS での RI は、概ね類似した変動を示す。ただし、特に 180 秒から 210 秒などごく一部の区間で相互に異なり、48FS の方が最大 0.8 ほど大きくなっている。 類似した外観を呈する両塔の RI が時折示す大きな相違の要因については非常に興味深い。 また、TCH2 では 2F、13F および 25F では 2 測点ずつ設置されているが、2F を除き同床上二 点の RI の細かな変動は明らかに異なり、ねじれが生じていることを示唆している。震度増 幅の割合は、平均的には 1 階あたり 0.04 程度であるが、低層階の 8F と 1F の間 (TCH1) や 13F と 2F の間 (TCH2) では、約 0.1 と大きくなっている。それでも、かなり柔な構造と考 えられる超高層ビルである SKS ビル (文献 1) と比較すると、増幅の程度は小さいようであ る。なお、TCH1 の 1F や B3F、TCH2 の 2F、さらには地下 25mの RI の時刻歴はすべてほぼ同



じである。防災科学技術研究所が運営する強震観測網の K-NET 新宿観測点はここから約



図3 都庁舎各階でのリアルタイム震度の時刻歴変化

2.5km 離れた軟弱な表層地盤上であるにもかかわらず、軟弱地盤の増幅作用によって大きな 値にシフトしているものの、RI の変化状況は都庁舎の 2F 以下のそれとよく類似しているの は興味深い。なお、リアルタイム震度は、地震動の持つパワーを指標化したもので、その最 大値は計測震度と同じ値になるように設定された(株)システムアンドデータリサーチの特 許技術である。以前に定義した指標に改めてリアルタイム震度と命名したのは文献 2 にお いてであり、その詳細についても同文献に述べられている。

4. 積分変位

記録加速度を積分して変位を算定するにあたって、まず加速度記録のゼロ線について調査 した。記録の始終端でゼロ線が大きく異なる場合にはフィルターで除去しきれないので、シ フトを含めてゼロ線が直線的に変化していることを確認した上で、その現象の始まりの時 点を見極めて、ゼロ線を修正した。大きな修正を要した観測成分は第二本庁舎の 25FN であ った。そうして得られた加速度波形に対して低周波数成分をフィルター(LCF)で除去した 上で、二回積分した。このLCFは、約30秒のカットオフ周期で4次のバターワースフィル ターである。なお、記録方向成分は、建物の短辺方向と長辺方向と20度回転しているので、 X 方向を短辺方向(東方向)、Y 方向を長辺方向(北方向)になるように記録を回転してい る。このようにして算定された変位波形を図4に示す。



図4 積分変位波形

5. 振動状況動画

都庁での強震観測記録(加速度)を積分して変位を算定し、各測点の動きを0.1秒毎に同時 に表示するとともに、建物外形の動きを見やすく表現した動画を作成した。動画からいくつ か静止画を抜き出して説明する。図 5(a)は最大震度発現直後の第一本庁舎が東西方向に大 きく揺れているところ、図 5(b)は第二本庁舎の捩じり振動が卓越して東西方向に大きく揺 れているところ、図 5(c)は第一本庁舎が南北方向に大きく揺れて第2本庁舎は捩じれなく 並進運動が卓越しているところである。建物の正面図と側面図上の動きとともに第二本庁 舎では上から見た平面図上の動きを示している。上からみた平面図には各階の測点が重な って表現されるため、25Fの測点を濃くして 13F や 2F は次第に青味がかった灰色で表現し て、遠近を表現した。動画の右上には各観測点のリアルタイム震度の時刻歴変化を示し、中 央上部に表示される記録開始時点からの経過秒数に対応する位置を縦の赤線で示した。ま た、各測点の横にはリアルタイム震度の数値を表示した。立面図、側面図、平面図は一辺 10 mの方眼目盛の上に表現した。変位は 50 倍に強調しており、一辺は 20cm の変位に相当す る。図 5(a)では第1本庁舎の 48F が 1F より西に 60cm ほど変位し、図 5(b)では第2本庁舎 の南側にある 34F が 2F より東に 60cm ほど変位し、図 5(c)では第一本庁舎の 48F が 1F より 南に 60cm ほど変位していることがわかる。



図 5(a) 振動状況動画の一場面_TCH1 の 48FS が西に約 60cm 変位



図 5(b) 振動状況動画の一場面_TCH2 の 34F が東に約 60cm 変位



図 5(c) 振動状況動画の一場面__TCH1 の 48F が南に約 60cm 変位

作成した動画を(株)システムアンドデータリサーチのウェブサイト www.sdr.co.jp に示す。

(1) 振動状況描画に際しての仮定

ひとつの観測点の強震観測は原則として 3 方向成分を観測記録している。建物の振動形態 として、並進や捩じれ、回転などがあり、建物の振動状況を記録するには、多数の観測点を 必要とする。しかし、現実には十分な数の観測点が設置されている訳ではないので、建物の 振動状況を再現するにはいくつかの仮定が必要となる。ここでは記録だけを元に建物の振 動状況を再現するにあたって用いた仮定について説明する。

ひとつの床面にひとつの観測点しかない場合、観測点は記録された並進運動のみで回転運 動はしていないとして、また、床面間の変形は線形で変化するものとして、振動状況動画を 作成した。同一床面にふたつの観測点がある場合、床を剛体とし、その回転中心を床の中心 位置と仮定して、中心位置での並進と回転の量を逐次算定した。このような仮定の下で並進 と回転の量を推定し、床面を包含する四辺形の頂点での変位を次節のようにして算定した。

(2) 水平面内での床面回転量他の算定

図6のように床面に2点の観測点01と02がある場合を考える。



図6 床面上測点の座標

回転中心の位置 Ct=(xc, yc)と並進量 (Xo, Yo)および回転量 θ の全5 個の未知数を決定する ためには、少なくとも5 個の情報が必要となる。ここでは、二点の観測値の情報量は4 個で あり、すべての未知数を決定することはできない。そこで、回転中心の位置を重心に仮定し て、並進量と回転量を推定する。

- 01 での変位ベクトルを、do1=(X1,Y1)
- Ct での並進ベクトルを、dct= (Xo, Yo)
- Ct での回転角を θ (正方向:反時計回り)とする。

この時、

X1=Xo+(y1-yc) θ Y1=Yo-(x1-xc) θ X2=Xo+(y2-yc) θ Y2=Yo-(x2-xc) θ

ここで、

(y1-yc)=L1 (x1-xc)=B1 と置くと、 $\theta x = -(X1-X2) / (L1-L2)$ $\theta y = (Y1-Y2) / (B1-B2)$

これから、L2=L1 でなく、B1=B2 でもなければ、

 $\theta = (\theta x + \theta y) / 2$

さらに、 Xo=(L2X1-L1X2)/(L2-L1) Yo=(B2Y1-B1Y2)/(B2-B1)

L2⇒L1 の時、 $\theta = \theta$ y Xo=(X1+X2)/2-(L1+L2) θ /2

 $B2 \Rightarrow B1 の時、$ $<math>\theta = \theta x$ Yo=(Y1+Y2)/2+(B1+B2) $\theta/2$

Ciの変位量(Xci, Yci)は以下のように算定される。

Xci=Xo+Lciθ Yci=Yo-Bciθ

```
(3) 作成した動画の留意点
```

前述のように、動画作成にあたり、算定された応答変位を 50 倍に強調した。すなわち、建 物寸法 10m と応答変位 20cm を同じ大きさで表現している。また、測点の動きは観測加速度 を 2 回積分して得た変位をそのまま描画し、建物外形は床を剛体として前節に示すように して 0.1 秒の時間ステップ毎に算定した。測点の動きは観測結果そのものであるが、建物外 形については仮定を含む推定結果である。観測点に動きに対して、建物外形の動きは大きな 違和感を与えないので、概ね妥当な仮定であったと思われる。ただし、第 2 本庁舎 34F の動 きは 120 秒周辺で激しく、25F のねじれ回転の影響を考慮すべきことを示唆している。

6. 分析結果のまとめ

概ね200秒より前では、いずれの庁舎もたくさんのモードが重なりあって出現しているが、

それ以後では一次モードが卓越して現れていることがわかる。また、100 秒から 150 秒の間 で、第二本庁舎の 34F と 13F (N および S) が強烈に振動している様子が上から見た平面図 における各測点の動きから伺える。34F 観測点直下近傍の 33F にある職員体育室のスプリン クラーが損傷して天井版が落下しているが、この強烈な振動と関係しているのかもしれな い。第一本庁舎については各床に観測点がひとつであり、ねじれ要素を検出することはでき ないが、48F の南北棟の動きをみる限り、大きなねじれ成分はないように見える。ただし、 時折現れる両塔の異なる動きには注意しておきたい。第二本庁舎の 25F などは明瞭なねじ れ振動を示しており、また、34F の測点は 25FN や 25FS の動きとはかなり異なった動きを示 している。34F 部分もかなりのねじれ振動をしている可能性があり、現状の観測点では第二 本庁舎の動きを正確に把握できていないのではないかと思われる。さらに以上の所見は観 測点間の時刻やサンプル周期が一致していることが前提であるが、記録波形を分析した結 果、各測点間などで少なくとも数サンプル(サンプル時間間隔は 0.01 秒)の同期誤差など が生じている可能性があることがわかった。この程度の同期誤差は、ここで用いた 0.1 秒毎 の変位波形による振動状況動画には大きな影響はないと考えられるが、次の報告では、時刻 精度を確認した上で、建物内を伝播する波動速度などについて考察したい。

謝辞:

ここでは、都庁舎の強震記録ならびにこれと比較するため防災科学技術研究所が運営する 強震観測網の K-NET 新宿観測点の強震記録を使わせていただきました。関係の方々に心か らの謝意を表します。

文献:

[1] 中村 豊・齋田 淳・佐藤 勉: CERS 法を用いた地震記録に基づく超高層ビル SKS の制 振装置を含む動特性の変遷、第15回日本地震工学シンポジウム講演概要集、pp. 1599-1608、 仙台、2018.

[2] 中村 豊: 合理的な地震動強度指標値の検討-DI 値を中心にした地震動指標値間の関係 - 、第 27 回地震工学研究発表会概要集、2003. 12.