MEMS 加速度センサによる SRC 造オフィスビルの振動計測

VIBRATION MEASUREMENT OF SRC OFFICE BUILDING USING MEMS ACCELERATION SENSORS

濱本卓司 — * 1 崔 井圭 — * 2
富岡昭浩 — * 3

Takuji HAMAMOTO — * 1 Jeongkyu CHOI — * 2
Akihiro TOMIOKA — * 3

キーワード：
環境振動, 振動計測, 全体振動, 局部振動,
MEMS 加速度センサネットワーク, 周囲振動

Keywords:
Environmental vibration, Vibration measurement, Global vibration,
Local vibration, MEMS acceleration sensor network, Ambient vibration

A temporary sensor network using 6 MEMS acceleration sensors is used to evaluate the vibrational characteristics of SRC office building globally and locally under environmental vibrations. Ambient vibrations inside and outside the building are measured after setting up the appropriate sensor network. The distance attenuation in soil, the input loss effect of foundation, and the amplification in a building skeleton and in individual members can be estimated at once by applying the proposed method.

1. はじめに

環境振動設計では、多様な入力に対する建物の応答が居住性能評価基準¹⁾を満たしていることを確認するために、振動モデルを用いて建物架構の全体振動と部位・部材の局部振動の予測解析が行われる。環境振動に対する建物の振動伝搬特性は、日常的に発生している周囲振動 (ambient vibration) を計測することにより推定可能である²⁾。このため、環境振動の予測に用いた振動モデルの妥当性は、竣工後に振動計測を行えば比較的容易に確認することができる。しかし、実際には、振動計測による振動モデルの妥当性の確認はほとんど行われていない³⁾。その一方で、竣工後に環境振動に関するクレームが出ると、歩行、設備機器、交通振動などの特定の振動源に対する事後対策のための計測はしばしば行われている⁴⁾。

建物の中で感じる環境振動は、全体振動と局部振動が混在している。振動源と建物の動特性の組み合わせに応じて、全体振動が卓越する場合もあれば局部振動が卓越する場合もある。高層建物や塔状比の大きな中層建物では、風や地震動が作用すると、躯体の水平振動が全体振動として励起されやすい。床や梁のスパンが大きいと、建物内部での歩行や設備機器により床の鉛直振動が局部振動として励起されやすい。交通振動や工場振動のように建物外部に振動源がある場合は、地盤を介して建物に振動が伝搬し、全体振動としての水平振動が卓越する場合もあれば、局部振動としての鉛直振動が卓越する場合もある。

本報告では、環境振動設計で用いる振動モデルの妥当性を竣工後に確認するために、不特定の振動源によって励起される建物の全体振動と局部振動に関する振動伝搬特性を一回の計測で把握する方法を提案する。センサ間の空間的配置に留意して一時的に振動センサネットワークを形成し、建物内外で日常的に発生している周囲振動を同期計測することを考える。本手法の有効性を示すために、7階建て鉄骨鉄筋コンクリート造オフィスビルを対象に、6基の3成分 MEMS 加速度センサを用いた計測例を示す。取得した振動データを適切に処理することにより、敷地境界から対象建物までの地盤振動

の距離減衰効果や基礎の入力損失効果を確認し、建物架構の全体振動の増幅・減衰特性、および床・梁の局部振動の増幅・減衰特性を包括的かつ効率的に推定できることを明らかにする。

2. 対象建物と周辺の状況

計測対象とする建物は7階建て鉄骨鉄筋コンクリート造オフィスビルである。図1に示すように、敷地の東側にやや交通量の多い一般道路 (片側1車線) が走り、そこから敷地内道路で約50m入ったところに対象建物の玄関がある。

標準階床伏図を図2(a)に、南側立面図を図2(b)に示す。8階建てに見えるが、屋上階の周囲は柱梁で鳥籠状に覆われている。長辺方向をx軸、短辺方向をy軸、高さ方向をz軸とした。建物は東西にコアを配したサイドコア形式で、オフィススペースは鉄骨鉄筋コンクリート造のラーメン、コアは鉄筋コンクリート造の耐震壁付きラーメンである。コアの剛性が大きいため、全体振動に寄与する建物の水平剛性は、長辺方向に比べて短辺方向の方が大きい。長辺方向は9スパンで、ラーメンの柱スパンと両コアのスパンはともに5.4m、短辺方向は2スパンで、柱スパンは12mと長い。このため、局部振動として短辺方向の大梁の鉛直振動が励起される可能性が高い。南側架構図を図2(c)に示す。階高は1階3.7m、2~7階3.6m、屋上階のペントハウス4.15mである。地階はなく直接基礎で支持している。

図1 対象建物の周辺状況

¹⁾ 東京都市大学 名誉教授・工博
(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
²⁾ レトロフィットジャパン協会 博士 (工学)
³⁾ 日本航空電子工業

¹⁾ Emeritus Prof., Tokyo City Univ., Dr. Eng.

²⁾ Retrofitting Japan Institute, Dr. Eng.
³⁾ Japan Aviation Electronics Industry

3. センサネットワークの形成

MEMS加速度センサを用いて一時的にセンサネットワークを形成し、建物内外で日常的に発生している周囲振動を計測した。敷地境界から対象建物までの地盤振動の距離減衰効果、基礎における入力損失効果、建物架構の全体振動の増幅・減衰特性、および床・梁の局部振動の増幅・減衰特性を一回の計測で把握できるようなセンサ配置を考えた。地上レベルに3基、建物5階に3基をそれぞれ配置し、各センサからハブステーションまで有線ケーブルにより並列配線してデータ転送した。ハブステーションにGPSを組み込んで同期計測し、すべてのセンサの時系列データを記録した。

センサ6基とハブステーション2台の設置位置を地上レベルと建物5階に分けて図3に示す。地上レベルのセンサ番号は①～③、建物5階のセンサ番号は④～⑥である。地上レベルでは、①が一般道路に近い敷地境界の近傍（正門脇）、②が対象建物の玄関に近い敷地内道路の縁、③が建物1階の外柱近傍の床上である。建物5階では、④が会議室の外柱近傍の床上、⑤が同室の短辺方向大梁中央近傍、⑥が同室の床中央である。なお、③と④はそれぞれ1階と5階の同じ外柱近傍の上下ライン上に位置している。センサの設置状況を写真1に示す。会議室は計測期間中立入禁止とした。

MEMS加速度センサには、水平2成分・上下1成分が計測可能な6基の高精度センサを用いた。サンプリング周波数は1024Hz、センサの計測レンジは $\pm 2G$ 、ノイズレベルは1 μG rms、AD変換器の分解能は16bitである。AD変換器の入力レンジを $\pm 100mG$ に設定した。計測時間は15分間とし、2回計測を行い、計測後すぐに時系列波形と高速フーリエ変換による周波数特性の確認を行った。

4. 計測データの処理方法

2回の計測データから得られた結果はほとんど同じになった。再現性が確認できたので、以下では1回目の計測データを用いたときの結果を示す。計測後、MEMS加速度センサの時系列データから、もっとも交通量の多かった9分間を抜き出し、1セグメントのデータ長を16,384個として500セグメントに分割した。オーバーラップ率は94%である。各セグメントを高速フーリエ変換して加速度フーリエスペクトルを求め、500セグメントのスタッキング処理によりノイズ低減を図った。

敷地内の地盤振動、建物躯体の全体振動、および部位・部材の局部振動の増幅・減衰特性をそれぞれ把握するために、センサ間の伝達特性に着目する。地盤振動に関しては、①と②を比較して敷地境界から建物玄関前までの鉛直振動の距離減衰効果を、また②に対する③のスペクトル比から建物基礎による鉛直振動の入力損失効果を確認する。建物躯体の全体振動に関しては、③に対する④のスペクトル比から建物の長辺方向と短辺方向の水平振動の増幅・減衰特性を確認し、建物架構の各方向の1次の固有振動数と減衰比を推定する。梁と床の局部振動に関しては、④に対する⑤のスペクトル比から柱近傍の剛域から短辺方向の大梁中央までの鉛直振動の増幅・減衰特性を確認し、大梁の1次の固有振動数と減衰比を推定する。さらに、⑤に対する⑥のスペクトル比から短辺方向の大梁中央から床中央までの鉛直振動の増幅・減衰特性を確認し、床の1次の固有振動数と減衰比を推定する。

図2 対象建物の床伏図・立面図・架構図（単位：m）

図3 センサとハブステーションの設置位置

①敷地境界

②建物近傍地盤

③1階外柱近傍床上

④5階外柱近傍床上

⑤ 5階大梁中央近傍

⑥5階床中央

写真 1 センサの設置状況

図 4 敷地境界と建物近傍地盤の鉛直加速度フーリエスペクトル

図 5 近傍地盤に対する 1 階床の鉛直振動スペクトル比

5. 計測結果と検討

5.1. 地盤振動の把握

敷地境界①と建物近傍地盤②における鉛直加速度のフーリエスペクトルを重ね書きして図4に示す。長距離配線による感度低下は生じていなかった。広い周波数領域にわたり、近傍地盤のスペクトル振幅は敷地境界のスペクトル振幅に比べて大幅に低減しており、距離減衰効果が確認できる。建物近傍地盤②に対する1階外柱近傍床③の鉛直加速度のフーリエスペクトル比を求めて図5に示す。1階外柱近傍床のスペクトル振幅は建物近傍地盤に比べて15Hz以上の高周波数領域の低減が大きく、基礎の入力損失効果が確認できる。

5.2. 全体振動の把握

1階外柱近傍床③に対する5階外柱近傍床④の長辺方向と短辺方向の水平加速度のフーリエスペクトル比をそれぞれ求めて図6に示す。長辺方向のフーリエスペクトルには2.1Hzと3.9Hz、短辺方向のフーリエスペクトルには2.9Hzと3.9Hzにそれぞれ明瞭なピークがある。これらのピーク振動数から建物架構の長辺方向の1次固有振動数は2.1Hz、短辺方向の1次固有振動数は2.9Hzと考えられる。短辺方向の1次固有振動数は長辺方向の1次固有振動数よりも高振動数になっており、増幅率は低振動数の長辺方向が大きくなっている。長辺方向と短辺方向の両方に現れる3.9Hzのピークは建物架構のねじれ振動数と考えられる。実際に3.9Hzがねじれ振動数であることは以下の方法で確認できる。

(a) 長辺方向 (x 方向)

(b) 短辺方向 (y 方向)

図 6 1 階床に対する 5 階床の水平振動スペクトル比

図7 5階のセンサ位置における変位リサージュ（単位：cm）

(a) 5階外柱近傍床に対する床中央

(b) 5階外柱近傍床に対する大梁中央近傍床

(c) 大梁中央近傍床に対する床中央

図8 床と梁の鉛直振動スペクトル比

表1 全体振動と局部振動における1次の固有振動数と減衰比

全体振動					
長辺方向		短辺方向		ねじれ	
固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
2.1	2.9	2.9	4.3	3.9	3.1
局部振動					
大梁			床		
固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
9.5	3.5	10.1	5.9		

図3の④⑤⑥で計測された加速度時系列x成分とy成分から各位置における変位リサージュを描き図7に示す。それぞれの変位リサージュは図6に示した3つのピーク振動数、2.1Hz、2.9Hz、3.9Hzの近傍の周波数領域のバンドパスフィルタ（バンド幅はピーク振動数の $\pm 5\%$ ）をかけて求めた。④⑤⑥のいずれの位置においても、2.1Hzのピーク振動数のときは主にx方向、2.9Hzのピーク振動数のときは主にy方向に揺れており、各方向の1次並進固有振動数であることが確認できる。3.9Hzのピーク振動数のときは右上から左下への斜め方向に揺れており、建物の対称性から剛心は中心付近にあると考え、ねじり振動の固有振動数であることが確認できる。

5.3. 局部振動の把握

5階外柱近傍床④に対する5階床中央⑤の鉛直加速度のフーリエスペクトル比を求め図8(a)に示す。9.5Hzの大きなピークと10.1Hzの小さなピークをもつ二峰性の形状をしている。床振動はこの2つのピークを含む8～11Hzの狭い周波数領域において大きく増幅されることがわかる。5階外柱近傍床④に対する5階大梁中央近傍床⑤の鉛直加速度のフーリエスペクトル比を求め図8(b)に示す。図8(a)と同じように2つのピークがあるが、入出力関係から共振が明瞭に現れている低振動数側のピークが大梁の1次固有振動数と考えられる。5階大梁中央近傍床⑤に対する5階床中央⑥の鉛直加速度のフーリエスペクトル比を求め図8(c)に示す。10.1Hzに小さなピークが一つだけあり、二峰の高振動数側のピーク振動数と一致している。入出力関係からこのピークが床スラブの固有振動数と考えられる。図8(b)のフーリエスペクトル比に図8(c)のフーリエスペクトル比を乗じた結果は図8(a)と完全に一致する。鉛直加速度の応答倍率は床中央で最も大きくなるが、その応答は床そのものの揺れよりも大梁の揺れの方が支配的であることを示している。

全体振動と局部振動における1次の固有振動数と減衰比をまとめて表1に示す。減衰比は $1/\sqrt{2}$ 法により求めた。

6. 結び

高精度のMEMS加速度センサを用いて建物内外に一時的に振動センサネットワークを構築し、周囲振動を計測することにより、一回の計測で環境振動に対する全体振動と局部振動の伝搬特性を包括的かつ効率的に把握できることを示した。なお、今回は計測方法の有効性を確認することを目的としたため、使用したセンサは6基と比較的小規模なセンサネットワークの構築となったが、地盤振動、躯体の全体振動、および梁・床の局部振動をさらに詳細に把握したい場合は、センサの数を増やしてネットワークを拡張することにより対応可能である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説，2018.11
- 2) 濱本卓司：設計から見た環境振動計測の重要性，音響技術—特集「建物の環境振動を巡る最近の話題」，pp.53-57，Vol.46，No.4，2017.12
- 3) 濱本卓司：計測による性能確認，第36回環境振動シンポジウム「居住性能の性能ランクと設計フロー」，日本建築学会，pp.78-83，2018.1
- 4) 日本建築学会：環境振動・固体音の測定技術マニュアル，オーム社，1999.3

[2018年9月26日原稿受理 2018年11月30日採用決定]