# 常時微動及び新幹線列車振動を利用した建設段階における超高層免震建物の振動挙動の分析

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 博士前期課程2年 福和研究室 井上莉彩子

# 1. はじめに

大地震後の建物の健全性評価のために,常時微動計測 を行うことは有効である.また,将来大地震の発生が危惧 される我が国では,免震建物の需要が高まるものと予想 され,その振動特性を把握することは重要である.

本論では、同一地盤・基礎構造において建物の質量や高 さといったパラメータが変化することに伴う振動特性の 変化を追うことを目的として建設段階において超高層免 震建物の振動計測を継続的に行った.

また,一般的にはノイズとして扱われる,対象建物の敷 地から約 300 m 離れた新幹線線路を走行する列車の振動 (以下,新幹線列車振動)を,対象建物の振動分析に利用す る方法を検討する.ここで,新幹線列車振動は再現性が高 く,比較的パワーの大きなサンプルを多数得られるとい う利点があると考えている.

#### 2. 対象建物及び計測の概要

対象建物の概要を表 1 に, 免震層配置図を図 1 に示す. 対象敷地の地盤の H/V スペクトル(図 2)から深部地盤の卓 越周期は約 4 秒であることがわかる. また, S 波速度構造 を図 3 に示す.

常時微動計測には、白山工業製のサーボ型加速度計を 用い、サンプリング周波数は 100 Hz とした.建設中の対 象建物について、マットスラブの打設過程を4回、上部建 物の建設過程を5回の計9回の計測を行った.計測の過程 及び計測点配置を図4及び図5に、計測の日程及び気象条 件を表2に示す.なお、計測時間は計測日の欄に記してあ る時間の全てとする.

### 3. マットスラブの打設に伴う振動特性の変化

第1回~第4回の地盤の加速度フーリエスペクトル(図 6)より,地盤での振幅は各回において変化がない.一方, 基礎/地盤の振幅比(図7)より,マットスラブの拡大に伴っ







図 5 上部建物建設過程の建物概形および計測点配置

計測回	計測日	施工完了状況 *()内は建物高さ	気象条件 *()内は1時間の平均風速
第1回	2018/7/16(月)12:00~13:00	捨てコンクリート	晴(3.3 m/s)
第2回	2018/7/30(月)12:00~13:00	マットスラブ 1/5	晴(4.4 m/s)
第3回	2018/8/7(火)12:00~13:00	マットスラブ 2/3	曇(6.1 m/s)
第4回	2018/10/5(金)12:00~13:00	マットスラブ全体	曇(5.4 m/s)
第5回	2019/3/19(火)12:00~13:00	4 階床 (14.4m)	曇(1.3 m/s)
第6回	2019/6/7(金)12:00~6/11(火)15:00	11 階床 (44.26 m)	6/9(日)12:00~: 雨(6.8 m/s)
第7回	2019/7/29(月)12:00~8/5(月)15:00	17 階床 (70.02 m)	8/4(日)12:00~: 晴(4.4 m/s)
第8回	2019/9/20(金)18:00~9/24(火)15:00	23 階床 (99.46 m)	弱風時:9/20(金)23:00~: 雨(1.7 m/s)
			強風時:9/22(日)12:00~: 曇(6.5 m/s)
			9/22~9/23 にかけて台風接近
第9回	2019/12/20(金)12:00~12/24(火)15:00	構造躯体完成 (118.18 m)	12/22(日)12:00~: 曇(3.1 m/s)

表 2 計測日程及び計測条件の概要

て、6 Hz 以上の振動数帯域において振幅比が低減され、入 力損失がみられる振動数帯域が低振動数側へと推移した ことがわかる.これは、基礎の一辺の長さの増大によって、 より波長の短い波が均一化されるようになったためであ ると考える.

### 4. 建物の建設に伴う振動特性の変化

#### 4.1. 固有振動数 減衰定数

1 階/基礎の伝達関数及び,最上階/1 階の伝達関数から それぞれ,免震層及び上部建物の固有周期を推定した.図 8(a)に免震層および上部建物の一次固有周期と建物高さ の関係を,(b)にねじれ周期の比と建物高さの関係を示し た.免震層及び上部建物の並進の固有周期は建物高さに 比例し,その回帰直線はT = 0.017Hとなった.また,ねじ れについても一次固有周期はT = 0.015H,二次固有周期 は並進・ねじれ共に一次固有周期の 1/3 程度の値となり, いずれも既往の研究 <sup>1</sup>による一般建物の計測結果とおお むね整合する値となった.常時微動という条件下では一 般的な建物と同様の特性を示すことが確認できた.

また,第6回~第9回の記録について,RD法によって 減衰自由振動波形(図9)を作成し減衰定数を算出したところ,いずれの計測回においても1%程度であった(図10).

### 4.2. スウェイ・ロッキング・弾性変形率

建物の一次固有振動数付近でのスウェイ・ロッキング・ 弾性変形率(図 12)を算出した(表 3). 建物の建設が進むに つれて,最上階の水平変位に対して,上部建物の弾性変形 が占める割合が上昇し,反対に免震層の水平変形及び基 礎のスウェイが占める割合が減少した.このことより,建 物の建設が進み,固有周期が長周期化し,地盤との相互作 用の影響が減少したことが確認できた.図 11 に示した一 次モード形状からも上部建物および免震層弾性変形が支 配的であることが確認できる.

#### 4.3. せん断波速度の抽出

王ら<sup>2)</sup>.が行った,地盤探査で用いられる地震波干渉法 を建物に応用して,常時微動記録から建物内を伝播する せん断波を抽出した既往の研究を参考に,対象建物のせ



ん断波速度を推定した.その方法を以下に示す.

まず, k階出力 x<sub>k</sub>(t)/i階入力 x<sub>i</sub>(t)の伝達関数を算出す る(式 1・式 2). なお, ここでは 1 時間の常時微動記録を 40.96 秒ごとに分け, 因果性考慮のための後続の 0 を付加 し, FFT 長さを 81.92 秒とした. また, 式 2 のE[]は期待 値を表す.

$$x(t) \xrightarrow{FFT} X(\omega) \tag{1}$$

$$H_{\nu}(\omega) = \sqrt{\frac{E[X_k(\omega)X^*_k(\omega)]}{E[X_i(\omega)X^*_i(\omega)]}} \frac{E[X_k(\omega)X^*_i(\omega)]}{|E[X_k(\omega)X^*_i(\omega)]|}$$
(2)

ここで,高振動数帯域のノイズ成分を除去するために, 入力波を中心振動数 5 Hz のリッカーウェーブレット(図 13)として各階の応答x<sub>r</sub>(t)を算出した.

$$X_r(\omega) = H_v(\omega)R(\omega) \tag{3}$$

$$X_r(\omega) \xrightarrow{IFFT} x_r(t) \tag{4}$$

第6回及び第9回の常時微動記録から抽出した建物内 を伝播するせん断波を図14に示す.今回,各層の剛性は 一様であると仮定し,各階のせん断波が極大値を取る点 の最小二乗近似によって算出した直線の傾きをせん断波 速度とした.上部建物の波動伝播から推定したせん断波 速度  $V_s \approx 300 \text{ m/s}$ となった.

建物の一次固有周期をT,建物の高さをHとしたとき建 物のせん断波速度V<sub>s</sub>は,

$$V_s = \frac{4H}{T} \tag{3}$$

と表される. これより算出したせん断波速度  $V_s \approx 250 \text{ m/s}$  となり, 実測値はこの値と比べてやや大きな値となった.

また、今回は建物の各層の剛性が一様であると仮定し たが、大地震などによって損傷を受けた場合、各層の剛性 の変化に伴ってせん断波速度が変化することが予想され る.層ごとのせん断波速度差異を抽出することができれ ば、建物全体だけでなく、損傷階の特定が可能になること が期待される.

# 5. 新幹線列車振動を用いた分析

# 5.1. 新幹線列車振動の抽出方法

新幹線線路脇で行った計測記録を用いて新幹線列車走 行によって励起される振動数を特定した(図 15(a)).対象 敷地のフーリエスペクトル(図 15(b))と比較すると 5~6Hz の範囲に共通のピークがみられた.敷地内の常時微動記 録(図 16)に 5~6 Hz のバンドパスフィルターをかけると, 新幹線列車走行の時間帯を特定(図 17)することができ,新 幹線列車走行振動を含む 40.96 秒間の記録を抽出した.

#### 5.2. 強風下の常時微動記録を用いたせん断波の抽出

第8回計測時に、台風が接近したことによって強風下で の微動記録を得た.そこで、強風下の新幹線列車走行時と 非走行時の建物内の波動伝播の様子を比較する.弱風時 (サンプル数 87)、強風時(新幹線走行時・非走行時を含む、 サンプル数 87)、強風下の新幹線列車走行時(5 サンプル)、 強風時の新幹線列車非走行時(5 サンプル)の記録を用いて



図 10 建物高さ-減衰定数





(a) ウェイ
(b) ロッキング
(c) 弾性変形
図 12 スウェイ・ロッキング弾性変形イメージ図表3 スウェイ・ロッキング・弾性変形率の変化



抽出したせん断波をそれぞれ図 18(a)~(d)に示す.

弱風時(図 18(a))では建物内を下層から上層へと伝播す るせん断波の様子が明瞭であるのに対して,強風時(図 18(b))では建物の下層階から上層階への明瞭な波動伝播が 見られない.これは,強風によって上層階で建物の揺れが 励起されており,下層階から上層階へと伝播する波のパ ワーが相対的に小さいことが原因であると考えられる.

次に、強風下の新幹線列車走行時、新幹線列車非走行時 のみを取り出した記録を用いて算出したせん断波を比較 する.新幹線列車走行時(図 18(c))は、下層から上層への波 動伝播が明瞭になった.一方で、新幹線列車非走行時(図 18(d))は図 18(a)と同様に下層階から上層階への明瞭な波 動伝播は見られない.これは、強風によって励起される建 物の揺れと比較して新幹線列車振動のパワーが大きいた めであると考えられる.図 19(a)(b)に示した建物頂部及び 基礎上の加速度フーリエ振幅スペクトルから、新幹線列 車走行時は、建物基礎及び最上階において 5~6 Hz の振幅 が他の記録と比べて増大しており、振動が最上階まで伝 播していることが確認できる.新幹線列車走行時の記録 を用いると 5 サンプルという非常に少ないサンプル数で、 強風下では波動伝播が明瞭になることが示された.

#### 6. まとめ

建設段階における超高層免震建物の継続的な振動計測 によって建設に伴う振動特性の変化を追い、その傾向は 既往の研究とおおむね一致した.

建物内を伝わるせん断波の波動伝播速度を抽出したこ とで,対象建物においてせん断波速度の抽出による大地 震後の損傷同定を行う準備が整った.

通常,常時微動計測においてノイズとして扱われる新

幹線列車振動を,建物振動分析に利用した例はこれまで にない.新幹線列車振動のパワーの大きさを利用するこ とで,強風下においても建物内を下層から上層へと伝播 する明瞭なせん断波を抽出することができた.



 日本建築学会:建築物の減衰,2000.10
王欣、正木和明、入倉孝次郎、源栄正人、久田嘉章:常時微動の鉛直 アレイ観測に基づく超高層ビルにおける1次元波動伝播解析および 層間せん断波速度の抽出、日本建築学会構造系論文集,第80巻,第 718号,pp.1859-1868,2015.12



