

大阪テクノセンターの強震観測と建物振動特性

Strong Motion Observation and Building Vibration Characteristics of OSAKA R&D Center

森清 宣貴*¹ 成島 慶*¹
Nobuki Morikiyo Kei Narushima
星野 隼人*¹ 河井 翔太郎*²
Hayato Hoshino Shotaro Kawai

要旨

当社創業 150 周年事業の一環で、新たな技術研究拠点として大阪テクノセンターが建設された。当センターの管理棟は、高い耐震性を確保するために免震構造を採用しており、さらに、免震フェイルセーフ機構として制動装置を設置するなどして、長時間長周期地震動や長周期パルスへの対策が講じられている。本報告では、主に免震関連の採用技術の検証や強震時の挙動把握を目的として設置した強震観測システムの概要を示すとともに、実測記録に基づく建物振動特性について報告する。

キーワード：免震建築物 強震観測 振動特性 応答推定

1. はじめに

当社の新たな技術研究拠点として、大阪湾岸の大阪市住之江区南港に大阪テクノセンターが建設された。写真 1 に建物外観、図 1 に建設地および後述する観測記録の地震の震央 (2022. 03. 16 福島県沖を除く) を示す。当センターは、管理棟、実験倉庫棟および駐車場棟の 3 棟で構成されており、管理棟は実験室とオフィスを含むことから、免震構造を採用して高い耐震性を確保している。

一方、建設地周辺では、南海トラフ沿いの巨大地震による長時間長周期地震動や大阪府を縦断する上町断層帯地震の発生により生成される長周期パルスによる被害が懸念されている。このため、免震構造の管理棟では、告示レベルを超える地震動により免震層が大きく変形し、擁壁に衝突する可能性があることから、免震フェイルセーフ機構を設置して対策を講じている。

上記のような敷地に免震建築物を建設することから、主に強震時の挙動把握を目的として、強震観測システムを設置した。本報告では、強震観測システムの概要と実測記録に基づく建物振動特性の評価に関する検討を示す。なお、本報告は 2022 年度日本建築学会大会 (北海道) で発表した論文¹⁾を加筆修正したものである。

2. 建物および強震観測の概要

2.1 建物概要

大阪テクノセンター管理棟は、鉄骨造 (CFT 柱)、地上 4 階建て塔屋 1 階、軒高 16.8m、建築面積 710m²、延床面積 2,665m² の基礎免震建物である。図 2 に建物・地盤構造概要

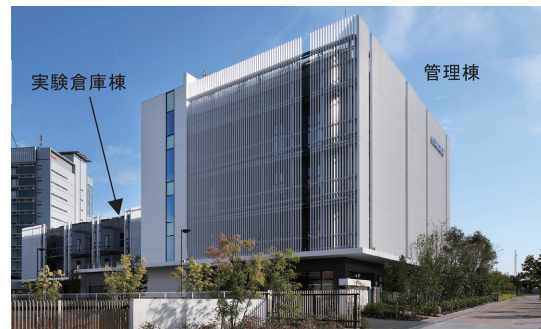


写真 1 建物外観

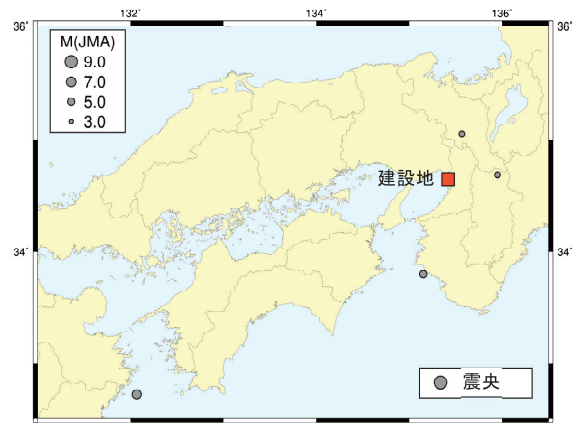


図 1 建設地と観測記録の震央 (2021 年 11 月から)

と計測機器設置位置を示す。平面形状は矩形で、短辺 21.6m、長辺 27.6m の整形な建物である。図 3 に免震装置配置図を示す。上部構造が比較的重量の小さい建物であることから、免震装置には重量によらず球面半径で二次剛性が決まる球面すべり支承 (以下「SSB」) を採用している。装置の組合せは、低摩擦 SSB (摩擦係数 $\mu=0.013$) を 10 基、湾岸地域の風対策で中摩擦 SSB (摩擦係数 $\mu=0.043$) を 2 基、減衰力向上を目的として U 型ダンパーを 2 基配置している。建設

*1 技術研究所 つくばテクノセンター

*2 設計本部 建築設計第 1 部

地では、南海トラフ沿いの巨大地震などの告示レベルを超える規模の地震による揺れが危惧されることから、免震建物が擁壁に衝突するような大振幅地震動に対するフェイルセーフ機構として、免震層の過大変形を抑制する制動装置を2基設置している。図4に示すように、制動装置は1階鉄骨梁下フランジから片持形式で、下方にCFT柱を設け、免震層の下部に設けた緩衝材に衝突させる機構とした。緩衝材として、厚み80mmのクロロプレンゴムを円周上に4枚配置した。通常の変形時は免震装置の変形を阻害しないように、CFT柱と緩衝ゴムの間には、レベル2地震動時に許容する層間変形550mmまで衝突しないように570mmをクリアランスとして設けた。

2.2 強震観測概要

強震観測システムは、2021年11月より稼働している(地表の加速度計および2階層間変位計は2022年2月に設置)。図2に示すように、加速度計は、2階からR階の建物北側のEPSに各1ヶ所、免震ピットと1階(ピット内天井)の東西の計4ヶ所、建物から東に約40m離れた地点の地表および杭先端深さ(地表-40m)に設置した。加速度計は、サーボ型3軸加速度計(東京測振社製AS-303D3W2, AS-303D3BH)を用いた。また、免震ピットおよび2階には、層間変位計を設置した。免震ピットに設置した層間変位計は、角度センサーを使用した直交2方向直立型ロングストローク変位計(東京測振社製DPT-800)を用いた。2階に設置した層間変位計は、ジャイロセンサ(多摩川精機社製 干渉型光ファイバジャイロ i-FOG, TA7774) 2台を用いた当社開発の直交2方向層間変位計である。写真2に2階に設置した層間変位計の全景を示す。上下がピン支持で滑らかに伸縮するロッドに取付けたジャイロセンサの角速度から、層間変位角を演算し、あらかじめ設定した階高を用いて層間変位を算出する仕組みとなっている。加速度計、変位計ともに観測はサンプリング周波数100Hzで常時連続観測とトリガー観測を行い、データを蓄積する。表1に観測システム設置後に観測された5つの地震とその際の各階最大加速度を示す。なお、最大加速度[gal(cm/s²)]は水平方向の合成値が最大となるものを示しており、1階および免震ピットは東側に設置したものを示している。

3. 建物振動特性の評価

本建物で得られた実測記録(常時微動記録および地震観測記録)に基づき、建物振動特性の評価と応答推定に関する検討を行う。常時微動記録を用いてFDD法²⁾により上部建物の固有モードを同定し、得られた固有モードを用いて、

建物概要

構造種別	基礎免震構造, S造(柱CFT, CLT耐力壁)
規模	地下1階, 地上4階, 塔屋1階
軒高	16.8 m
基礎構造	場所打ちコンクリート杭 基礎底: GL-2.7m, 杭長: 42.0m
観測位置	杭先端, 地表, 免震PIT, 1F~RF

地盤構造概要

深度[m]	層厚[m]	地層	N値	Vs[m/s]
8.80	8.80	埋土	17~60以上	309
10.75	1.95	埋土	6~10	283
12.95	2.20	埋土	9~60以上	337
13.35	0.40	埋土	21	337
19.65	6.30	埋土	8~48	298
21.95	2.30	埋土	18~24	259
22.20	0.25	埋土	28	259
25.15	2.95	埋土	44~49	259
25.75	0.60	埋土	17	259
35.70	9.95	シルト質粘土	6~8	207
36.80	1.10	砂質シルト	8	230
37.90	1.10	シルト質砂	11	230
41.60	3.70	砂質シルト~砂質粘土	8~13	230
42.25	0.65	シルト質砂	13	230
42.25以下		砂礫~礫混じり砂	60以上	317

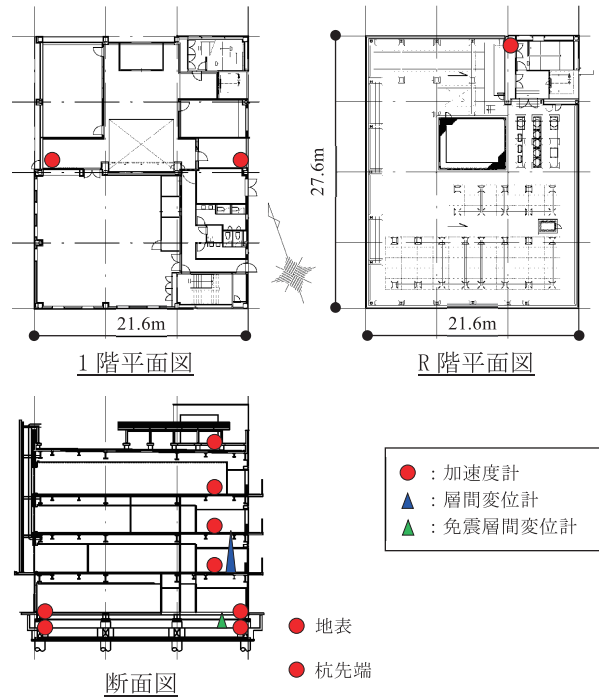


図2 建物・地盤構造概要と計測機器設置位置

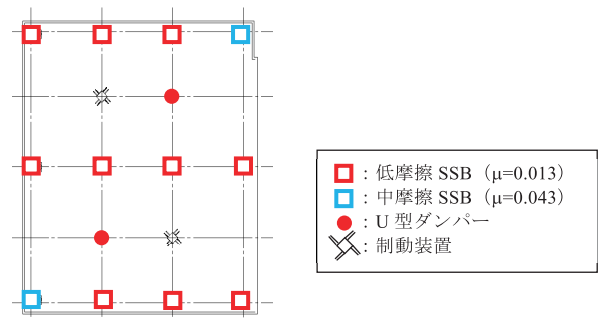


図3 免震装置配置図

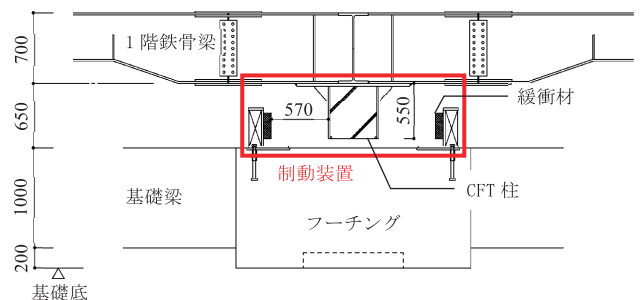


図4 制動装置断面図

地震時における各層の層間変位や最大層間変形角を推定し、実測記録と比較する。

3.1 建物の固有振動数

常時微動記録は、2022年3月15日0時00分～0時30分までの30分間の記録を使用する。主要観測位置（R階、1階東側、免震ピット（基礎）東側、地表）の記録のフーリエスペクトルを図5に、伝達関数を図6に示す。R階のフーリエスペクトルの1次卓越振動数はNS方向1.81Hz、EW方向1.83Hz、2次卓越振動数はNS方向、EW方向とも5.34Hzであった。伝達関数の卓越振動数は、R階／基礎の方がR階／1階よりも僅かに低く、免震層による影響が多少含まれるが、常時微動レベルにおいてその影響は小さい。また、基礎／地表の伝達関数において、1次の卓越振動数よりも高い振動数領域で基礎による入力損失効果がみられる。

3.2 FDD法による振動モード同定

常時微動の加速度データを用いて、FDD法により建物の固有モードを評価する。クロススペクトル密度行列の算出の際、フーリエ変換（FFT）のサンプルデータ個数は16384個とした。サンプルデータを時刻歴上で50%ずつオーバーラップさせ、Hanning窓でスペクトルを平滑化してアンサンブル平均した。クロススペクトル密度行列を周波数刻み毎に特異値分解（SVD）して得られる第一特異値（図7）から、R階のフーリエスペクトルの1次、2次の卓越振動数と対応するNS方向、EW方向の1次モードと2次モードを同定した（図8）。

3.3 地震観測記録を用いた応答推定の検討

得られた5つの地震観測記録について、前節で得た上部建物の固有モードおよびR階と1階の記録を用いて、既報³⁾のモード比による応答推定を行う。本節の検討では、1階に対する各階の相対値としたモードをR階位置のモード振幅で基準化して用いる。推定により得られる層間変位および最大層間変形角を実測記録（加速度計の2階積分により算出した層間変位および層間変位計による実測値）と比較する。

3.3.1 上部建物の入力特性

対象とする5つの地震観測記録の1階における疑似速度応答スペクトル（ $h=5\%$ ）を図9に示す。建設地から遠方の日向灘や福島県沖を震源とする地震の記録は2～4秒付近や6～7秒付近の長周期側が卓越しており、軟弱地盤による地盤増幅の影響がみられる。

3.3.2 モード比による応答推定

2022年3月31日の観測記録（京都府南部で発生したM4.4

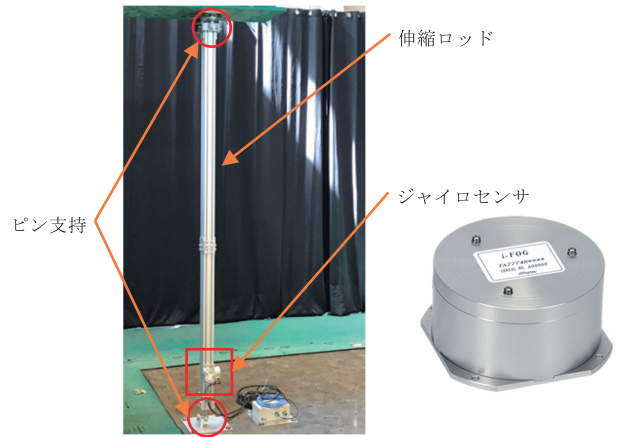


写真2 層間変位計（試験時）

表1 観測記録一覧

記録日時	震源	M	最大震度	最大加速度[gal(cm/s ²)]						
				RF	4F	3F	2F	1F	ピット	地表
2021.12.03	9:28 紀伊水道	5.4	5弱	15.8	12.7	9.9	6.5	4.8	4.4	-
2022.01.22	1:10 日向灘	6.6	5強	3.8	3.8	3.6	3.6	3.5	3.4	-
2022.01.30	15:36 奈良県	4.0	3	2.1	2.1	2.0	1.8	1.2	1.5	-
2022.03.16	23:39 福島県沖	7.4	6強	3.9	3.7	3.6	3.5	3.5	3.4	3.8
2022.03.31	23:34 京都府南部	4.4	4	6.4	5.5	5.2	5.1	4.9	4.8	9.4

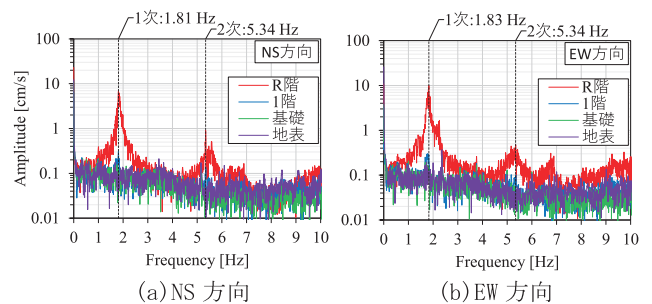


図5 常時微動記録のフーリエスペクトル

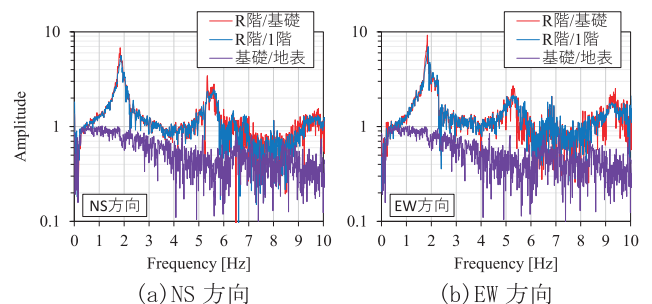


図6 常時微動記録の伝達関数

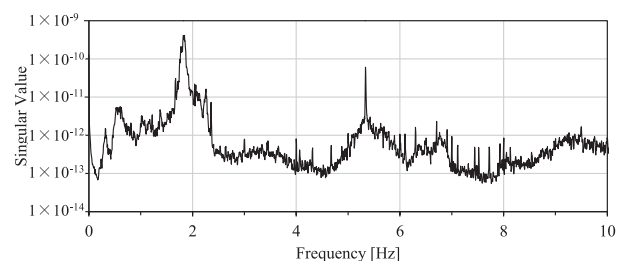


図7 クロススペクトル密度行列の第一特異値

の地震) について、主要動付近の時刻における応答推定結果と加速度計の2階積分により算出した層間変位および層間変位計による実測値の時刻歴波形 (EW 方向) を図 10 に示して比較する。層間変位計による実測波形 (3階-2階) は、加速度計から算出した層間変位と比べて振幅が大きい傾向にあるが、位相は概ね一致している。各層の応答推定結果は加速度計から算出した層間変位の時刻歴波形と概ね整合するが、最大振幅は僅かに異なる結果であった。

最大層間変形角の高さ方向分布 (EW 方向) を図 11 に示す。観測された記録のうち応答推定結果が最も大きい12月3日の地震 (紀伊水道) による最大層間変形角は3階-2階で $1/11667[\text{rad.}]$ であった。応答推定による最大層間変形角の高さ方向分布は、地震時の実測値と整合しない部分もあり、影響の大きいと思われる2次モード振幅比の設定 (帯域・位相) に課題が残る。

4. まとめ

大阪テクノセンター管理棟に設置した強震観測システム概要を示し、実測記録に基づく振動特性の評価を行った。振動特性評価で得られた知見を以下に示す。

- ・R 階の常時微動記録のフーリエスペクトルによる建物の1次卓越振動数はNS方向1.81Hz、EW方向1.83Hz、2次卓越振動数はNS方向、EW方向とも5.34Hzであった。
- ・層間変位計による実測波形 (3階-2階) は、加速度計から算出した層間変位と比べて振幅が大きい傾向にあるが、位相は概ね一致している。
- ・常時微動記録から同定した固有モードを用いた応答推定結果 (層間変位) は、加速度計から算出した層間変位と概ね整合するが、最大振幅は僅かに異なる結果であった。

謝辞

一部図の作成には GMT を利用させていただきました。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 星野隼人、成島慶ほか：大振幅地震動が想定される地域に建つ免震建物の振動特性に関する研究 その1,2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 構造II, 2022.9
- 2) Brincker, R., et al.: Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proc. Of the 18th IMAC, San Antonio, TX, USA, 2000
- 3) 森清貴貴、成島慶、関谷英一、藤井睦：建物の構造ヘルスマニタリングに関する基礎的研究, 鴻池組技術研究報告, pp. 53-60, 2019

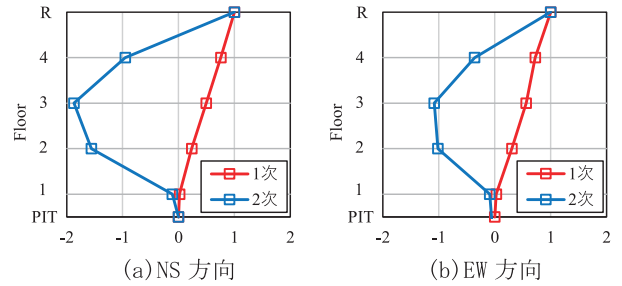


図8 同定した各方向の固有モード

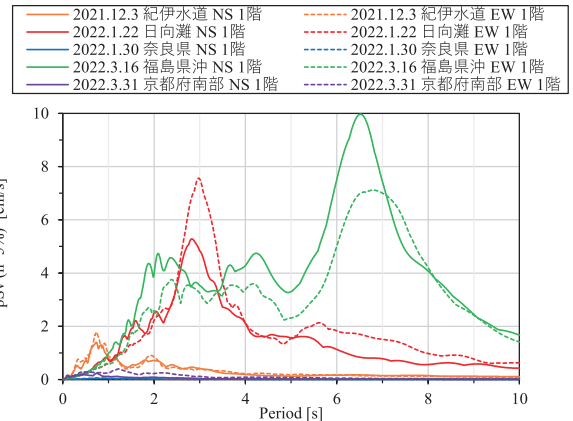


図9 観測記録 (1階) の擬似速度応答スペクトル (h=5%)

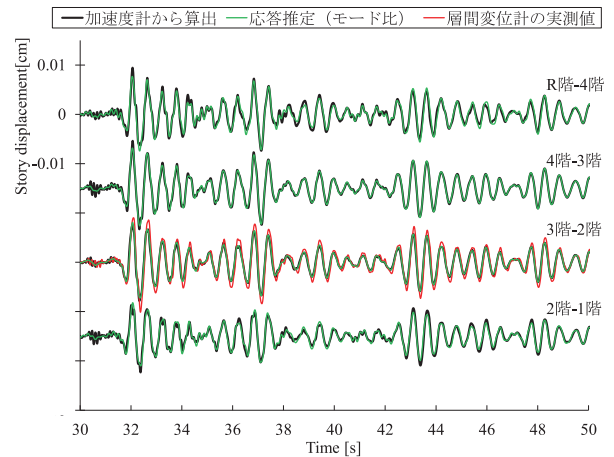


図10 層間変位の時刻歴波形 (EW 方向、2022.03.31 京都府南部)

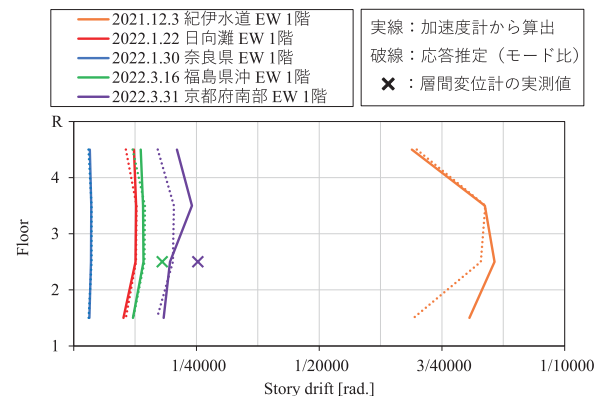


図11 最大層間変形角の高さ方向分布 (EW 方向)