

つくば技術研究所・音響棟の地震観測記録に基づく振動特性

境 茂樹^{*1}・仲野 健一^{*1}・加藤 貴司^{*1}・仲村 崇仁^{*2}

つくば技術研究所の音響棟は、1992年に竣工した研究施設で免震構造物である。本建物では、免震構造の有効性を検証するため地震観測を実施している。2011年東北地方太平洋沖地震では、建物基礎上で約 300cm/s^2 の加速度記録が得られた。本報告では、免震構造物の応答変位に着目し、2008年～2022年に得られた観測記録から免震層の変位と建物の卓越振動数の関係を分析し、設計時の構造解析モデルによる固有振動数と比較して考察した。その結果、観測記録による免震構造物の卓越振動数は、免震層の変位が大きくなるほど低下し、その傾向は設計時の構造解析モデルによる結果と対応することを示した。

キーワード：免震構造物、地震観測、免震層相対変位、フーリエスペクトル比、卓越振動数

1. はじめに

免震構造物では、免震効果や設計の妥当性を検証するために、ケガキ盤の設置や地震観測を行うことが重要であり、これにより建物の動的な性状を把握することができる。

つくば技術研究所にある音響棟は免震構造物で、免震構造の有効性を検証するため竣工以来地震観測を実施している。記録の中で最も加速度が大きかったイベントは、2011年東北地方太平洋沖地震で、地盤上（GL-1.5m）で約 680cm/s^2 、建物基礎上で約 300cm/s^2 の加速度が得られた。地盤上の強震記録については、つくば周辺の地震記録と合わせて表層地盤の振動特性として報告している¹⁾。

本建物の免震層には積層ゴム支承と減衰装置（摩擦ダンパー）が用いられており、その剛性の変位依存性と経年変化を、地震観測結果から捉えられれば、今後の免震構造物の設計や維持管理に役立つものと考えられる。

本報告では、免震構造物の応答変位に着目し、2008年～2022年に得られた観測記録から免震層の相対変位と建物の卓越振動数の関係を分析し、設計時の構造解析モデルによる固有振動数と比較して考察した。また、地震観測結果に、積層ゴムの経年変化による振動特性の変化が現れているかを確認した。

2. 音響棟建物と地震観測の概要

2.1 建物の概要

音響棟は1992年に自社で設計施工した免震構造物

で、地上2階の壁式鉄筋コンクリート造建物である（写真－1）。高さは軒高7.55m（最高部高さ8.4m）で、建築面積709.210 m^2 、延床面積908.363 m^2 である。

音響棟に使用されている免震装置は、天然ゴム系積層ゴム支承と、高減衰ゴムと摩擦ダンパーが直列に配置された改良型摩擦ダンパーがそれぞれ8基ずつ設置されている。音響棟の断面図と免震層（基礎階）の配置図を図－1に示す。

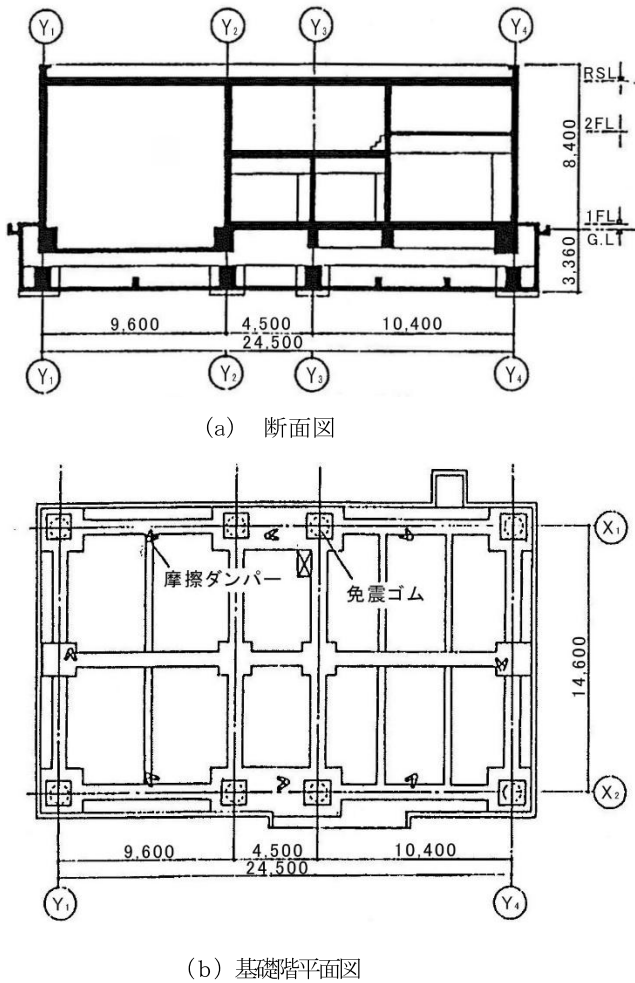


写真－1 音響棟（免震構造物）の外観

2.2 地震観測の概要

地震観測システムは旧間組技術研究所（埼玉県与野市（現在さいたま市））の観測システムを移設したもので、移設当時は16ビットの磁気テープ（MT）型デジタル集録装置（AD変換16bit, SAMTAC-160D）に収録していた。2008年に機器の劣化とデータの精度向上のために集録装置をICカード型集録装置（AD変換24bit, SAMTAC

*1 建築研究部 *2 先端技術開発部



図－1 断面図と基礎階平面図

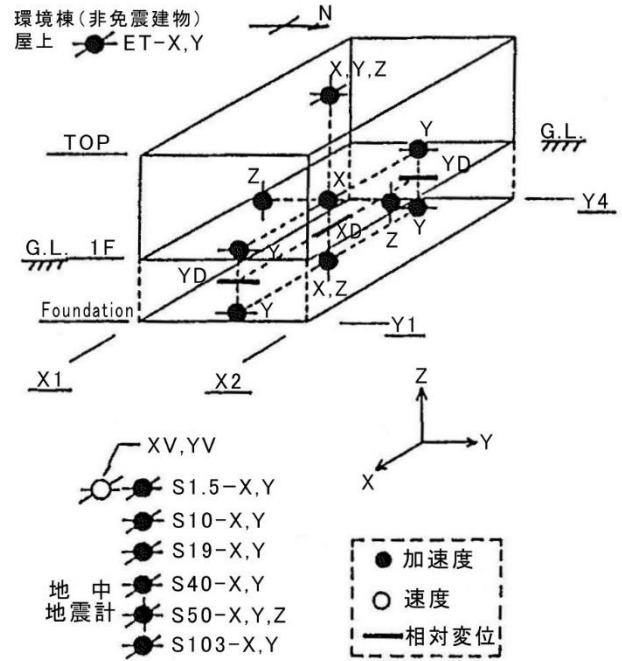
-700) に更新した。

地震計は、地中は地下 100m (砂礫層, $V_s=470\text{m/s}$) から地表付近までの 7 ヲ所 15 成分, 免震構造建物は基礎から建物頂部までの 12 ヲ所 15 成分, 非免震構造建物の頂部 1 ヲ所 2 成分で, 合計 32 成分の記録を収録するシステムである。その内 27 成分は加速度, 2 成分の速度, 3 成分の相対変位(免震装置を含む上下床版間)であるが, 相対変位計は正確なデータが得られなかった。このため, 詳細は後述するが, 免震層の相対変位は, 基礎上で 1 階スラブ下の加速度波形の 2 階積分から算出している。地震計の設置位置を図－2 に示す。なお, 移設初期のデータは残されていなかったため, 本報告は, 集録装置更新後の 2008 年以降のデータについての分析結果である。

3. 免震構造建物の卓越振動数

3.1 検討に用いた地震観測データの諸元

検討に用いた地震観測データは, 表－1 に示す 2008 年～2022 年までの地震である。つくば市内の計測震度



が 3 以上, かつ免震層の変位が生じると推定される地表面加速度が約 20cm/s^2 以上の 18 イベントである。それら地震のほとんどは, 茨城県から岩手県にかけての内陸から太平洋沿岸地域で発生した地震で, マグニチュードは 4.6 ～ 9.0 である。最も振幅が大きかった地震は 2011 年 3 月 11 日 14 時 47 分の三陸沖(東北地方太平洋沖地震, $M=9.0$) で, 技研の地盤上 (X 方向) で 684.9cm/s^2 を記録した¹⁾。

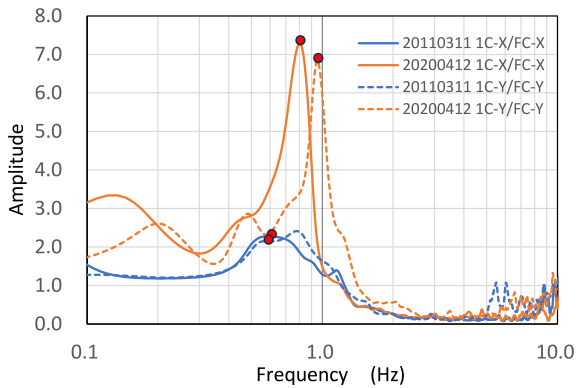
3.2 データの処理方法

免震層の相対変位は, 建物 1 階スラブ下と基礎上の加速度記録を 2 階積分 (FFT 積分, 低域遮断振動数 0.1Hz) し, その差から算出した。図－2 の地震計の配置図に示すように, X 方向は建物の重心位置のセンサの記録から算出できるが, Y 方向については, センサが基礎および建物の東西両端に設置されているため, 建物のねじれ成分を考慮して東西両端の記録を相加平均して重心位置の変位波形とした。

免震構造建物の卓越振動数の検討は, 基礎上の記録に対する 1 階スラブ下の記録のフーリエスペクトル比 (Parzen Window 0.2Hz) から算出した。フーリエスペクトル比も相対変位と同様に, X 方向は建物の重心位置のセンサの記録から算出し, Y 方向については, 建物のねじれ成分を考慮して東西両端の記録を相加平均して重心位置の振幅として算出した。X 方向および Y 方向のフーリエスペクトル比の結果の例を図－3 に示す。この例で

は、免震層相対変位が最も大きい2011年3月11日の三陸沖の地震（東北地方太平洋沖地震、基礎上の加速度：約300cm/s²）と、2020年4月12日の茨城県南部で発生した直下型の中地震（基礎上の加速度：約40cm/s²）の結果を示す。中地震ではフーリエスペクトル比は0.8～1.0Hz付近に明瞭なピークを示すが、大地震では0.5Hz付近に低下し、フーリエスペクトル比も緩やかなピーク形状となっている。

各地震について、免震層の相対変位とフーリエスペクトル比から求めた免震構造物の卓越振動数の結果を表－1に示す。なお、2025年6月に常時微動観測を行い、微振動レベルの上部建屋の卓越振動数を測定したので、その結果も合わせて示している。

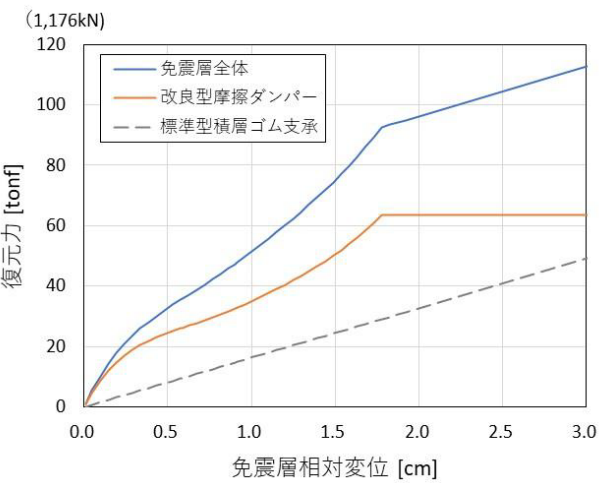


図－3 フーリエスペクトル比の例

(2011. 3. 11 三陸沖地震と2020. 4. 12 茨城県南部地震の例)

4. 設計モデルと観測結果の比較検討

本建物は設計時に地震応答解析を行い免震層に生じる相対変位、絶対加速度、層せん断力を求めて設計の妥当性を検証している。地震応答解析の構造解析モデルは、上部建屋を剛体とみなした水平1自由度系とし、免震層の復元力特性は、改良型摩擦ダンパー8基と標準積層ゴム支承8基を組み合わせた復元力特性を与えている²⁾(図－4)。



図－4 評定資料²⁾に基づく免震層の復元力特性

図－5には、表－1の観測結果による免震層相対変位と免震構造物の卓越振動数の関係をプロットし、構造解析モデルの復元力特性から推定される、免震層相対変

表－1 検討に用いた強震記録の地震諸元と免震建屋の応答結果

番号	発震年月日*1	竣工からの経過年数	震央地名*2	地震規模*2 M	震央距離*3 (km)	震源深さ*2 (km)	計測震度*3	つくば技研加速度 地盤GL-1.5m(cm/s ²)		つくば技研加速度 基礎上(FC) (cm/s ²)		免震層の相対変位 (cm)		FS比の卓越振動数*6 1F/FC (Hz)	
								X方向	Y方向	X方向	Y方向*4	X方向	Y方向*5	X方向	Y方向
1	2008年6月14日 8:43	16	岩手県内陸南部	7.2	330	8	3.8	27.3	－	8.9	12.9	0.704	0.246	0.87	1.01
2	2008年8月20日 15:13	16	茨城県南部	4.6	19	45	3.0	18.3	－	25.0	16.4	0.038	0.014	0.89	0.90
3	2008年8月22日 19:59	16	茨城県北部	5.2	59	56	3.0	26.6	－	16.5	21.9	0.101	0.067	0.89	0.94
4	2011年3月11日 14:47	19	三陸沖	9.0	330	24	5.6	684.9	－	296.0	300.3	8.764	6.991	0.59	0.57
5	2011年3月11日 15:12	19	福島県沖	6.7	106	39	4.7	85.7	－	57.0	69.6	0.997	0.740	0.83	1.05
6	2011年3月16日 12:52	19	千葉県東方沖	6.1	80	10	3.5	17.9	－	15.0	16.3	0.207	0.150	0.92	0.81
7	2011年3月19日 18:56	19	茨城県北部	6.1	85	6	4.0	39.7	－	35.3	34.3	0.358	0.230	0.85	1.05
8	2011年4月11日 17:16	19	福島県浜通り	7.0	105	6	4.5	79.0	－	54.9	60.6	1.471	0.851	0.88	1.05
9	2011年4月16日 11:19	19	茨城県南部	5.9	27	79	4.0	32.6	－	27.4	28.0	0.231	0.202	0.76	0.96
10	2012年5月18日 17:19	20	茨城県南部	4.8	23	51	3.3	19.4	－	16.2	21.3	0.041	0.038	0.79	1.10
11	2012年12月7日 17:19	20	三陸沖	7.3	396	49	4.2	53.4	－	39.0	38.2	0.949	0.362	0.82	1.08
12	2015年5月25日 14:28	23	埼玉県北部	5.5	41	56	3.7	57.0	－	68.8	64.4	0.189	0.228	0.87	0.95
13	2016年5月16日 21:23	24	茨城県南部	5.5	21	42	3.7	44.7	－	61.6	72.3	0.578	0.170	0.87	0.78
14	2016年12月28日 21:39	24	茨城県北部	6.3	79	11	3.7	24.9	－	22.0	27.9	0.381	0.145	0.87	1.23
15	2017年8月2日 2:2	25	茨城県北部	5.5	85	9	3.8	46.4	－	39.7	38.7	0.494	0.242	0.86	1.01
16	2020年4月12日 0:44	28	茨城県南部	5.0	14	53	3.5	64.4	55.2	35.4	38.5	0.128	0.116	0.81	0.95
17	2021年2月13日 23:08	29	福島県沖	7.3	228	55	4.1	107.0	115.0	68.1	70.1	1.191	1.286	0.94	0.96
18	2022年3月16日 23:37	30	福島県沖	7.4	221	57	4.2	131.0	130.0	70.2	92.8	1.300	1.134	0.95	0.95
－	2025年6月30日 10:30	33	(常時微動測定)											1.31	1.42

*1: 発震日時時刻、震源距離は防災科研のK-NETによる
*2: 震央地名、地震規模、震源深さは、気象庁震度データベース検索に基づく
*3: 震央距離、計測震度は、防災科研のK-NETつくばによる
*4: Y方向の値は、W-YとE-Yの記録の大きい加速度を記載
*5: Y方向の値は、W-YとE-Yの記録から重心位置のY方向の振幅を求めて算出
*6: FS比はフーリエスペクトル比の略、FS比は0.2HzのParzenウィンドウで平滑化処理

位と免震構造物の固有振動数の関係（図中の破線）と合わせて示した。また、解析モデルによる推定結果には、一般的な積層ゴムの経年変化を考慮して³⁾、剛性を10%増やした結果も図中に示す（赤色破線）。

解析モデルによる結果と観測結果を比較すると、観測結果は免震層の相対変位が小さいところではばらつきが大きいものの、全体的な傾向として相対変位が大きくなると卓越振動数は低下し、その傾向は解析モデルの結果と良く対応することが分かった。また、経年変化の影響を検討するため、観測結果については竣工から20年未満と20年以上のデータを識別してプロットしているが、両者の差異に関して、明確な傾向は認められなかった。竣工から約20年経過した時点での2011年3月11日の観測値（免震層相対変位約7cm、約9cmのプロット）を、一般的な積層ゴムの20年程度の経年変化を考慮して、剛性が設計値から10%上昇した場合のプロット（赤い点線）と比較した。その結果、観測値のX方向の振動数は、設計値から10%上昇した場合のプロットと一致しているが、Y方向については設計値のプロットよりもやや低くなった。同様な免震層変位レベルにおける竣工直後のデータが無いこともあり、本比較から積層ゴムの経年変化による影響を明確に確認することはできなかった。2011年3月11日の大振幅観測値は設計値と概ね対応し、それ以外の多数の小振幅観測値もばらつきは大きいが概ね設計値を平均値とした分布となっていることから、本建物はこれまで概ね設計通りの応答を示しているといえる。

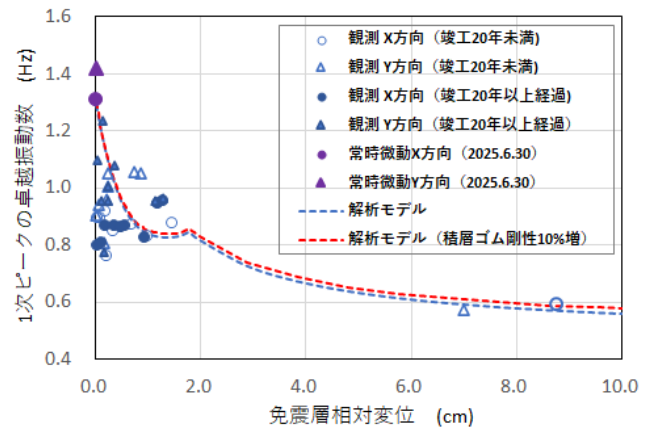
5. まとめ

本報告では、強震観測を実施している音響棟免震構造物について、地震時の応答変位に着目し、免震層の相対変位と建物の卓越振動数の関係を観測結果から分析するとともに、設計時の構造解析モデルによる固有振動数と比較して考察した。その結果、以下のことが示された。

- ①観測記録による建屋の卓越振動数は、免震層の変位が大きくなるほど低下し、その傾向は設計時の構造解析モデルによる結果と良く対応した。
- ②観測結果は竣工から15年以上経過したデータであり、一般的に積層ゴムの剛性は経年変化に伴い高くなるが、観測結果から積層ゴムの経年変化による影響を明確に確認することはできなかった。
- ③2011年3月11日の大振幅観測値は設計値と概ね対応しており、それ以外の多数の小振幅観測値もば

らつきは大きい概ね設計値を平均値とした分布となっていることから、本建物はこれまで概ね設計通りの応答を示しているといえる。

今後も地震観測を継続的に実施し、データを蓄積して免震装置の経年変化による振動特性の変化をモニタリングしていく予定である。



図－5 免震層相対変位と建屋の卓越振動数の関係

参考文献

- 1) 森清隆，仲野健一，境茂樹，小山信，鹿嶋俊英，飯場正紀：つくば市庁舎における東北地方太平洋沖地震の地震動特性について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 395-396，2014。
- 2) 株式会社間組：つくば技術研究所新築工事 音響・電波棟，免震構造評定委員会 B C J - 免 48，1990。
- 3) 日本免震構造協会：積層ゴム系の免震材料の経年変化の基準値に係る対応について，2025. 2

Vibration characteristics based on earthquake observation records at the Acoustics Building of the
Tsukuba Technical Research Institute

Shigeki SAKAI, Kenichi NAKANO, Takashi KATO and Takahito NAKAMURA

The Acoustics Building at the Tsukuba Technical Research Institute is a seismically isolated building completed in 1992, and earthquake observations have been conducted to verify the effectiveness of the seismic isolation structure. In this report, we focused on the displacement response of the seismically isolated building for 18 strong earthquake events, including the 2011 Tohoku Pacific Coast earthquake, and analyzed the relationship between the displacement of the seismic isolation layer and the predominant frequency of the building. We then compared the observation results with the natural frequency of the structural analysis model at the time of design. The results showed that the predominant frequency of the seismically isolated building from the observation records decreased as the displacement of the seismic isolation layer increased, and that this trend corresponded to the results from the structural analysis model at the time of design.