

自由振動実験に基づく偏土圧を受ける中間階免震建物の立体振動特性

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 飛田研究室 佐藤龍汰

1. 背景と目的

大地震時の建物被害軽減、機能維持の観点から免震建物の普及が進んでいる。今後も免震建物の棟数は増加し続け、それに伴い様々な平面形状や敷地条件の免震建物が現れると予想できる。本論で対象とする免震建物は中間階免震構造を採用しており、さらに対象建物の周辺地盤には高低差があるため、下部構造に偏土圧が作用している。このような特徴的な免震建物は、免震の多様化を象徴するようなものであり、その振動特性を詳細に分析することは免震に関する情報の蓄積という点で非常に意義がある。

本論では、常時微動計測や地震動観測、さらに対象建物に設置された油圧ジャッキを用いた振動実験の結果から、建物の立体振動特性を分析し、中間階免震としての特徴や偏土圧の影響などを考察することを目的としている。

2. 対象敷地及び対象建物の概要

対象建物は、上部構造3階+下部構造2階建てのRC造中間階免震建物(写真1)である。下部構造には東側と北側から約1層分の偏土圧が作用している(図1)。本論では東西方向を主に扱う。平面は南北に細長い形状となっている。

図2に示す免震層は、上部構造と下部構造の間に存在しており、免震装置には高減衰ゴム系積層ゴムアイソレーター(以下高減衰ゴム)8基、直動転がり支承(Cross Linear Bearing以下CLB)9基、弾性すべり支承1基、オイルダンパー各方向2基を採用している。敷地の深部地盤に起因する長周期側の卓越周期が約3.1秒であるのに対し、設計固有周期は免震層10cm変形時に3.1秒、45cm変形時に4.7秒と設定している。上部構造の質量は約5,300tである。

3. 計測体制・振動実験の概要

3.1 常時微動計測

対象建物ではこれまでに常時微動計測を計3回実施した。各回の計測体制を図3に示す。計測には3チャンネル式サーボ型加速度計を用いており、ねじれ振動や各方向のロッキング振動を計測できるよう各階L字型に3点置くことを基本とした。

3.2 地震動観測

対象建物内には強震計を常設している。免震層の変形やねじれ振動、上部構造の応答の観測のために免震層下に1点、免震層上の2階に2点、屋上に1点配置している。強震計の配置を図3に加えて示す。

3.3 自由振動実験

対象建物の免震層には、自由振動実験を行うために1基あたり1500kNの性能を持つ油圧ジャッキ(写真2)を2基常設している。油圧ジャッキを用いて建物本体を東側に引いて初期変位を与え、解放することで高減衰ゴムの復元力によってジャッキから離れる方向(西側)に応答し、上部



写真1 建物全景

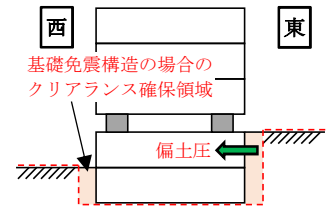


図1 建物断面図

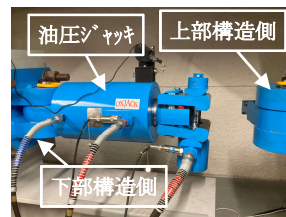


写真2 油圧ジャッキ

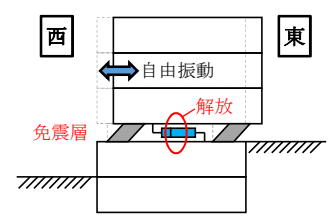


図4 自由振動実験概要

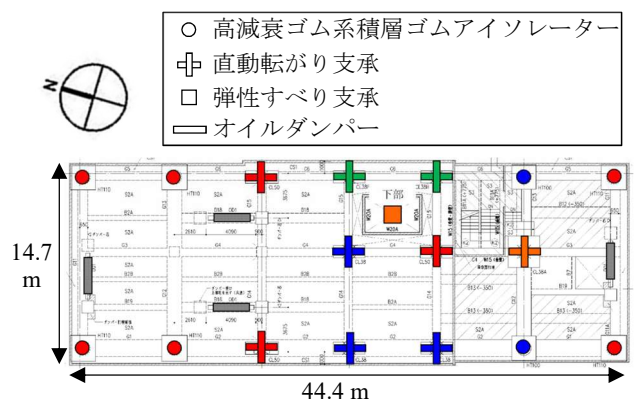


図2 免震層概要

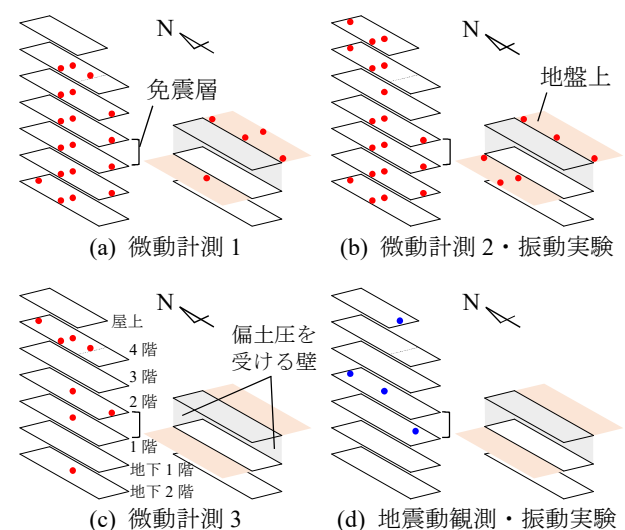


図3 計測概要

構造の自由振動を励起する仕組みとなっている(図4)。最大振幅は15cmである。本論で扱う振動実験時の計測点は、図3(b)と同じ配置の加速度計及び強震計である。

4. 常時微動計測及び強震観測に基づく振動特性評価

4.1 常時微動計測

図5に各常時微動計測回の結果から算出された伝達関数の振幅比を示す。短辺方向では2つのピークが確認でき、計測回によってその振動数及び振幅は変化していることが分かる。また、下部構造は常時微動レベルの振幅においてもある程度弾性変形していることが確認できる。一方で上部構造ではそのような増幅が確認できないため、対象建物の常時微動時の変形は、免震層が主であり、上部構造は剛体に近い動きをしていると考えられる。

図6に免震層におけるねじれ角の伝達関数を示す。ねじれ角は長辺に対し平行に並ぶ計測点同士の差を計測点間の距離で除することで算出した。図6より、ねじれ角の増幅は免震層で目立っており、そのピーク位置の振動数は、図5の高振動数側の固有振動数と一致する。よって、図5で確認できたピークのうち低振動数側が並進モード、高振動数側がねじれモードと考えられる。また各計測回を比較することで、ねじれ角伝達関数の変化に伴って建物全体のモードも変化していることが分かる。

図7にねじれ角を入力、免震層上の水平加速度を出力とした伝達関数の位相差を示す。中央と西側を出力とした場合は、並進モード固有振動数付近の位相差がほぼ同じであるのに対し、ねじれの影響が相対的に大きくなる南側を出力とした場合の位相差は他2つとは異なっている。ねじれ成分の割合によってこの位相差が変化すると考えられる。

以上から、常時微動レベルの振幅では、対象建物には並進モードとねじれモードが存在することが分かり、並進モードには、並進成分とは位相がずれたねじれ成分も含まれており、複雑なモードとなっていると考えられる。

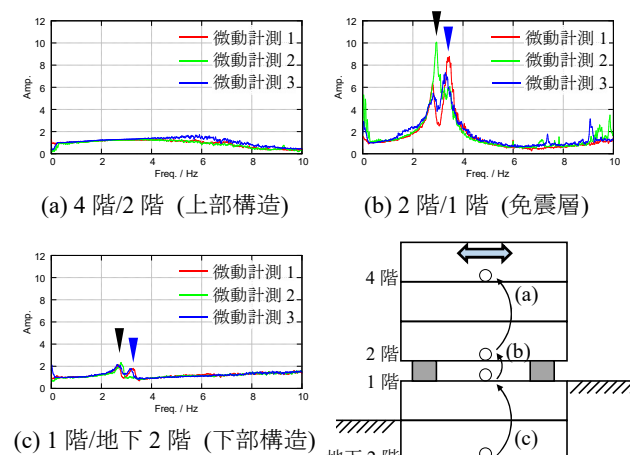


図5 伝達関数 (短辺方向)

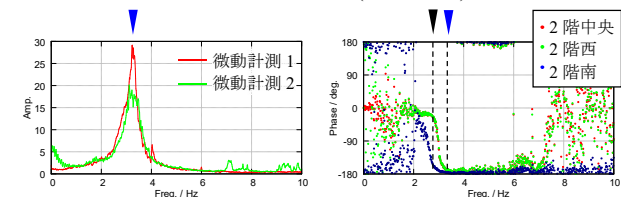


図6 ねじれ角伝達関数 (免震層)

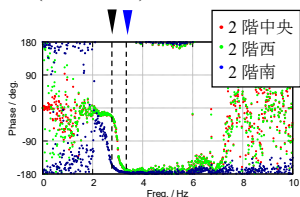


図7 2階ねじれ角との位相差

4.2 地震動観測

対象建物では、これまでに計13の地震動観測に成功している。表1に地震の諸元を示す。免震層相対変位は、免震層上下の水平加速度差の波形に1 Hz以下のローカットフィルターを施し、振動数領域における2回積分を行うことにより算出した。表より、観測された地震動の多くが数 cm/s^2 程度のものであり、設計時に想定される地震動の振幅に比べ極めて小さな値となっている。免震層相対変位の最大値は全て1 mmにも満たないことから、高減衰ゴムの剛性はいずれの地震でも初期剛性の範囲内であると考えられる。

図8に、1階の加速度波形から得られた各地震の卓越振動数 ($\text{PGA}/\text{PGV}/2\pi$) と震央距離の関係を示す。なお、免震層相対変位の最大値が0.1 mmを超えた地震を区別するために、ここではマーカーの種類を変えている。図から、震央距離が長いほど卓越振動数は低振動数となる傾向が確認できる。また、Eq4では地動加速度が比較的大きく、卓越振動数が常時微動時の建物固有振動数の近傍に存在しているため、共振現象が起これ、免震層の変形が他の地震に比べ増大したと考えられる。

図9に、各階最大加速度を1階最大加速度で除して求めた最大加速度応答倍率を示す。2階の応答倍率が1.0を超えるのは、いずれも卓越振動数が低振動数域の地震であり、震央距離が短い地震の多くでは応答倍率が1.0未満となる。

表1 観測された地震の諸元

#	発生日時	震央	規模 (Mw)	震央距離 (km)	1階最大加速度 (cm/s^2)	免震層相対変位最大値 (mm)
Eq1	2020/8/10 17:17	愛知県西部	3.4	27	1.96 (EW)	0.0
Eq2	2020/8/27 08:55	岐阜県中西部	4.0	53	2.13 (NS)	0.0
Eq3	2020/9/4 09:10	福井県嶺北	5.0	130	1.49 (NS)	0.1
Eq4	2020/9/27 13:13	静岡県西部	5.1	75	6.69 (EW)	0.5
Eq5	2020/10/19 03:28	岐阜県中西部	4.1	31	27.88 (EW)	0.2
Eq6	2021/2/13 23:08	福島県沖	7.3	512	3.38 (NS)	0.2
Eq7	2021/2/18 03:58	愛知県西部	4.2	31	11.03 (EW)	0.2
Eq8	2021/3/20 18:09	宮城県沖	6.9	556	1.47 (NS)	0.1
Eq9	2021/4/5 06:22	静岡県西部	4.3	85	2.07 (EW)	0.0
Eq10	2021/5/1 10:27	宮城県沖	6.8	543	0.91 (NS)	0.0
Eq11	2021/8/16 05:03	滋賀県北部	4.6	67	2.39 (EW)	0.0
Eq12	2021/8/16 08:17	滋賀県北部	4.4	67	1.55 (NS)	0.0
Eq13	2021/10/7 22:41	千葉県北西部	5.9	289	1.06 (NS)	0.1

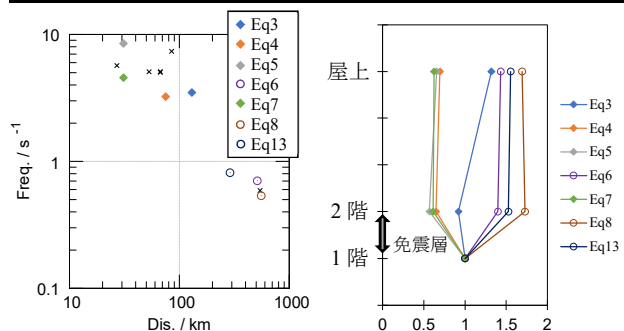


図8 卓越振動数

図9 最大加速度応答倍率

4.3 自由振動実験

4.3.1 最適化手法の提案

図 10 に、振動実験で観測された短辺方向加速度波形のうち、2 階中央と 1 階中央のものを示す。振動実験は振幅を 8 cm, 12 cm, 15 cm の 3 種類に分けて行っている。いずれの振幅でも上部構造と下部構造のどちらも自由振動波形となっており、上部構造の方が長周期である。本項では免震層の基本的な応答を確認するため、下部構造を無いものとみなし、免震層の振動パラメータの推定を行う。

固有振動数及び減衰定数を推定するために、1 自由度粘性減衰モデル (図 11) に基づいて算出される(1) 式 (単位は加速度) を用いて、免震層の加速度波形の同定を行った。初期値として用いるのは、初期加速度 α_0 及び初期速度 v_0 であり、速度波形は加速度を時間積分して算出した。なお、自由振動波形には固有振動数以上の振動数域の影響を除去するために、5 Hz 以上のハイカットフィルターを施している。

$$\ddot{x}(t) = e^{-h\omega t} \left(\alpha_0 \cos \sqrt{1-h^2}\omega t + \frac{-\omega^2 v_0 - h\omega \alpha_0}{\sqrt{1-h^2}\omega} \sin \sqrt{1-h^2}\omega t \right) \quad (1)$$

図 12 に、振幅 15 cm 時の自由振動波形の主要区間である 10.2~13.2 秒の 3.0 秒間における最適化波形 $\ddot{x}(t)$ を示す。最適化波形は観測波形 $y(t)$ との誤差を最も小さくするため、主に振幅の大きい区間に適合した波形となる。振動の後半である 12.3 秒付近には観測波形と大きな誤差が生じており、振動パラメータは時刻によって変化している可能性がある。

本論では、自由振動中に振動特性が変化すると仮定し、自由振動中の一定区間で最適化し、その変化を評価することを試みる。最適化評価区間の長さ ΔT を 0.5 秒, 1.0 秒, 2.0 秒の 3 種類とし、(2) 式に示す誤差関数の値を最小とするように最適化を行った。初期値は上記と同じとし、その区間に対応する加速度・速度波形の区間の中央の値を用いた。

$$P(\tau) = \frac{\int_{\tau-\Delta T/2}^{\tau+\Delta T/2} |\ddot{x}(t) - y(t)|^2 dt}{\int_{\tau-\Delta T/2}^{\tau+\Delta T/2} |y(t)|^2 dt} \quad (2)$$

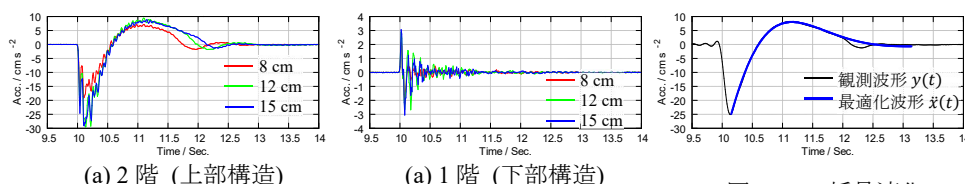


図 10 観測された加速度波形

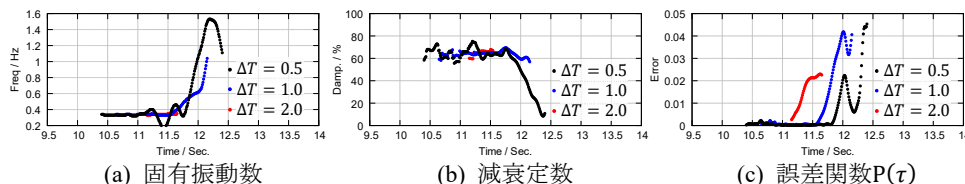


図 13 提案手法による最適化 (振幅 15 cm)

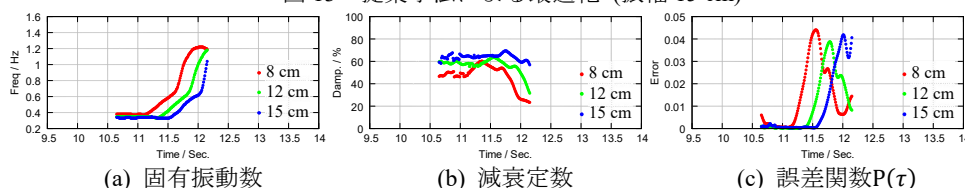


図 14 振幅によるパラメータの違い

4.3.2 パラメータ推定結果

最適化によって算出される固有振動数、減衰定数及び誤差関数の値を図 13 に示す。固有振動数と減衰定数は、どの評価区間長さ ΔT においても自由振動の主要区間ではほぼ一定であることが確認できる。推定された固有振動数は 0.33 Hz であり、相対変位 10 cm 時の設計固有周期 3.1 秒に比べ、変形が 5 cm 多い分を考慮すると、やや短周期な値となった。これは地震時とは異なり片方向のみの応答となっていることが関係していると考えられる。また、減衰定数の約 60% という値は設計時より大きい値となった。

評価区間長さを増加させると、各パラメータの変動は緩やかになる一方で、実際にはばらついているパラメータを一括で最適化するために誤差は増加する傾向にある。

誤差関数が大きくなるのは、振動の後半部分であり、これらの時刻周辺では 1 自由度系粘性減衰モデルではないメカニズムで振動している可能性がある。また区間内の加速度の振幅が総じて小さい場合は、最適化波形とのわずかな誤差によって相対誤差が大きくなるため、それらも関係している。一方で誤差が小さくなる自由振動の序盤から中盤では、他の時刻と比べ精度よく同定できていると言える。

同様の最適化を各振幅の自由振動波形でも行い、その結果を図 14 に示す。ここでは $\Delta T = 1.0$ とした。固有振動数は、ジャッキ解放直後はいずれも安定した値となっており、加振時の振幅が大きくなるにつれてその値は減少する傾向にある。その後は振幅が小さいほど固有振動数の増加が早い時刻に現れ始めている。それに伴い、誤差関数の値も早い時刻で大きくなる。一方で減衰定数に関しては、加振時の振幅が小さいほど、その値は小さくなる傾向にある。

固有振動数の時刻や振幅ごとの変化は、高減衰ゴムの水平剛性には振幅依存性が存在することを示している。同様に減衰定数の変化からは、オイルダンパーに速度依存性が存在すると言える。

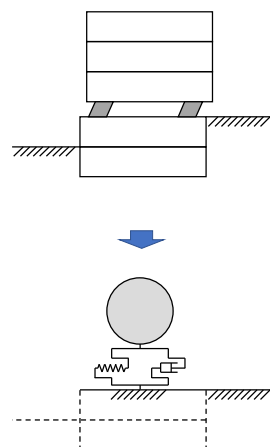


図 11 本項におけるモデル化

5. 自由振動実験に基づく立体振動特性評価

図 10 に示した 1 階 (下部構造) のフーリエスペクトルを図 15 に示す。下部構造には、4.3 で同定した免震層の固有振動数 0.33 Hz 周辺にはピークが確認できず、9 Hz 周辺に大きな振幅が現れている。図 16 に、その振動数周辺のモード形状を FDD 法を用いて算出した結果を示す。上部構造の底面と頂部において、また免震層の上下において逆位相となっていることが確認でき、これらは免震の 2 次 (逆せん断型) モードによるものであると推測され、対象建物の振動実験において、下部構造にはこのモードが現れると言える。また、下部構造もある程度変形していると考えられる。

図 17 に、下部構造各層の短辺方向加速度波形とロッキング角加速度波形を示す。各波形には 15 Hz 以上のハイカットフィルターを施している。ロッキング角は短辺方向に対し平行に並ぶ計測点 2 点の上下方向加速度の差を計測点間の距離で除して算出した。図から、それぞれの波形の極大値・極小値を記録する時刻は概ね一致しており、下部構造の水平方向の変形及び回転は一体となっていることが分かる。以降では、各波形の位相差がないものとして分析を行う。

下部構造頂部の水平方向加速度にどのような成分が含まれているかを確認するため、図 18 に示す 4 成分に分けて考える。それぞれの成分の算出方法は以下の式とした。

(a) 下部構造スウェイに相当する加速度成分

$$\alpha_S = \alpha_{B2F(EW)} \quad (3)$$

(b) 地下 2 階 ~ 地下 1 階弾性変形に相当する加速度成分

$$\alpha_{E1} = \alpha_{B1F(EW)} - \alpha_{B2F(EW)} - \theta_1 H_1 \quad (4)$$

(c) 地下 1 階 ~ 1 階弾性変形に相当する加速度成分

$$\alpha_{E2} = \alpha_{1F(EW)} - \alpha_{B1F(EW)} - \theta_2 H_2 \quad (5)$$

(d) 下部構造ロッキングに相当する加速度成分

$$\alpha_R = \theta_1 H_1 + \theta_2 H_2 \quad (6)$$

ロッキング角 θ_1, θ_2 及び階高 H_1, H_2 は図 18 中に定義する。

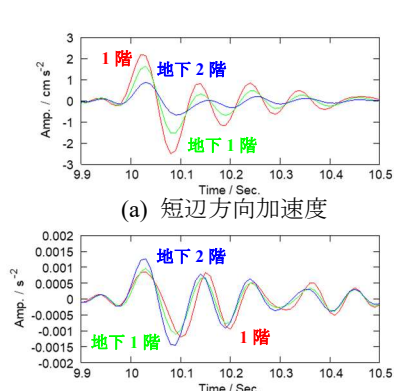
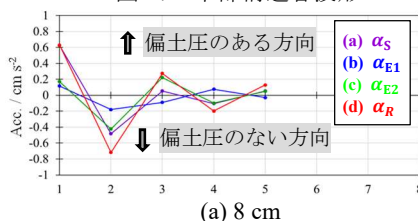


図 17 下部構造各波形



(a) 8 cm

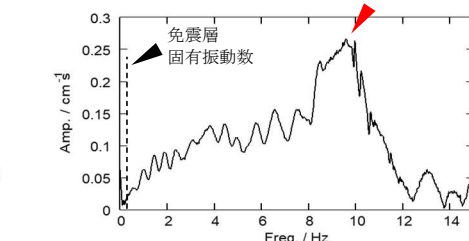


図 15 フーリエスペクトル

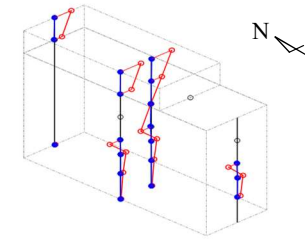


図 16 免震 2 次モード形状

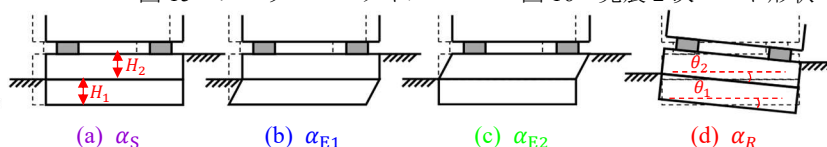
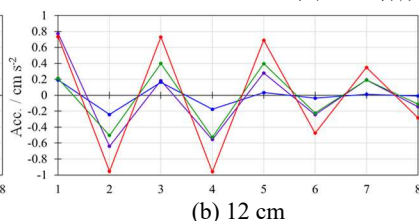
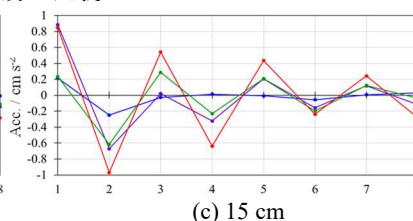


図 18 各成分の定義



(b) 12 cm



(c) 15 cm

図 19 各成分の振幅 (横軸は極値を記録した回数)

図 19 に各振幅における加速度波形から抽出した成分を示す。各波形同士に存在する若干の位相差を無視し、本論では各波形の極大値・極小値のみを扱う。図から、各成分は減衰していることが確認できる。またジャッキ解放直後に下部構造に励起される水平方向成分の多くは、ロッキングやスウェイといった地盤との関係に起因するものであり、下部構造の弾性変形の影響は相対的に小さいことが分かった。

偏土圧が作用する地下 1 階 ~ 1 階の弾性変形成分 α_{E2} は、偏土圧のある正方向 (横軸 1) に比べて、偏土圧の無い負方向 (横軸 2) で大きくなっており、その増幅率は実験の振幅が大きくなるにつれて増加している。これは偏土圧の影響だと考えられ、偏土圧部分がばねの役割を果たしていると言える。また、振幅が 12 cm の実験では多くの成分が減衰しにくくなっており、他の振幅にはない特徴となっている。

6. 結論

本研究では、下部構造に偏土圧が作用する中間階免震建物の振動特性を様々な振幅レベルの振動から分析した。常時微動時のモードでも免震層の変形が主体的であり、大振幅時には想定されていないねじれの影響も微動時には大きいことが分かった。振動実験からは、免震層の振動パラメータを細かく設定することで、高減衰ゴムの水平剛性の振幅依存性を追える可能性があることを示した。また、上部構造が自由振動する際に下部構造に現れた波形は、主に免震の 2 次モードであり、そのモードにおいては地盤との関係や偏土圧の影響が下部構造に現れることを明らかにした。

謝辞

本建物の振動実験及び計測等に当たり、名古屋第二赤十字病院・藤本幸士氏、内藤建築事務所・川口剛志氏、ほかのご協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 飯山かほり, 栗田哲: 近接モードの影響を考慮したスペクトル分解による FDD 法の理論的背景, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 2013