日本における想定被害地震を対象とした高層免震建物の地震応答性状と
アスペクト比効果に関する一考察強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状
に及ぼす効果に関する研究 その3THE EARTHQUAKE RESPONSE CHARACTERISTICS OF
BASE-ISOLATED HIGH-RISE BUILDINGS SUBJECT TO SCENARIO EARTHQUAKES
IN JAPAN AND THE EFFECTS OF ASPECT RATIO ON THEIR RESPONSESA study on the effects of simultaneous action of horizontal and vertical ground motion
on earthquake response characteristics of base-isolated high-rise buildings Part 3

池田雄一*, 長橋純男**

Yuichi IKEDA and Sumio NAGAHASHI

Base-isolated high-rise buildings with large aspect ratios are apt to be acted by the tensile stress in the isolators. In this paper, models of such buildings are subjected to simulated strong ground motions representing hypothetical scenario earthquakes for the purpose of earthquake response analysis. The two main findings of the study are the following:

- (1) Fluctuations in axial force induced by horizontal motion increase for base-isolated high-rise buildings with greater aspect ratios when the input waveform is the site wave of a large earthquake or a coupled earthquake at the plate boundary. In this case, tension occurs in the isolator.
- (2) Vertical motion is greatly affected by the site wave of an intraplate earthquake along an existing active fault. This induces tension in the isolator of a base-isolated high-rise building, with tensile stress exceeding the conventional seismic performance design target of $\sigma_t = 1\text{N/mm}^2$ at these points.

Keywords : *scenario earthquake, simultaneous input of three components of strong motion, base-isolated high-rise building, aspect ratio, displacement response of isolation interface, tension in the isolator*

想定地震, 強震動3成分同時入力, 高層免震建物, アスペクト比, 免震層変位応答量, アイソレータの引張地震応答

1. はじめに

日本免震構造協会の集計によれば免震建物（戸建免震住宅を除く）の都道府県建設数は、東京都、神奈川県、大阪府及び愛知県や宮城県・福岡県などに多く建設されている¹⁾。これら大都市に建設される免震建物は、地価等の影響もあって高層化の傾向にある。近年、東京都心部、横浜市、名古屋市及び大阪市等につく超高層建物や免震建物には、プレート境界地震から発せられる長周期地震動に対する耐震安全性の問題が指摘されているところである。既存及び今後計画される超高層建物及び免震建物は、東海地震、東南海地震及び南海地震のM8クラスのプレート境界地震に、若しくは、これら地震が連動して起きる巨大地震に遭遇する可能性が高いものと考えられている。この様な課題をふまえ、プレート境界地震に数回遭遇する超高層鋼構造建物の耐震安全性の評価に関する研究²⁾や鉄筋コンクリート造免震建物の実大3次元振動台実験³⁾も行われているところである。

著者らは、近年の免震構造の高層化に着目して、塔状比（以後、アスペクト比 H/B 。ここで、 H ：建物高さ、 B ：梁間（短辺）方向建物幅を示す）が大きい高層免震建物は、アイソレータに上下動による軸力と水平動による付加軸力の作用によって、その組み合わせによるアイソレータの引き抜き、及び座屈による圧縮耐力の安全性について研究を行ってきた。

まず最初に、高層免震建物を強震動水平1成分及び上下動の合計2成分同時入力を考慮した平面骨組振動系モデルの地震応答解析を行い、高層免震建物のアイソレータに引き抜きを生じさせる強震動が、国内

外の主要な強震記録において少なからず存在することを示し、またその強震動の地震動特性について報告した⁴⁾。

次に、耐震壁及び床スラブの曲げ剛性を適切に評価した立体骨組振動系モデルに、強震動水平2成分及び上下動の合計3成分を同時入力して、アスペクト比の大きな高層免震建物の地震応答解析を行った結果、特にアスペクト比が3及び4の整形高層免震建物隅角部アイソレータの最大引張面圧は、一般に免震建物の設計において耐震性能目標とされる 1N/mm^2 を上回るおそれがあり、また同じ隅角部アイソレータの最大圧縮面圧は圧縮限界強度を超えて座屈するおそれが少なからずあることを報告した⁵⁾。

さらに、セットバック立面形状を有する高層免震建物隅角部アイソレータの地震応答性状に着目し、その隅角部アイソレータの最大引張面圧及び最大圧縮面圧を把握し、立面形状がセットバックすることによって生じる隅角部アイソレータの地震応答量の特徴、水平動と上下動による応答軸力の主要動部位相の時間差、アイソレータの引き抜きに及ぼす上下動成分の強さと水平動成分の強さとの評価指標を抽出した。そして、これらの評価指標を利用した高層免震建物アイソレータの引き抜きに及ぼす地震動強さに関して簡便な評価尺度を提案した⁶⁾。

そこで本論文では、仙台市青葉区本町（以下「仙台・本町」と記す）、東京都千代田区北の丸公園（「東京・丸の内」）、東京都新宿区代々木公園（「東京・新宿」）、横浜市西区みなとみらい（「横浜・みなとみらい」）、名古屋市中村区名古屋駅前（「名古屋駅前地区」）、大

* 国際理工専門学校建築設計科 講師・修士(工学)
** 千葉工業大学工学部建築都市環境学科 教授・工博

Lecturer, Dept. of Construction Design, International Technical College, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

阪市北区梅田（「大阪・梅田」）及び福岡市中央区天神（「福岡・天神」）の七地区を対象として、想定した地震による模擬地震動（以下「サイト波」と記す）に対する高層免震建物の地震応答性状を把握する。具体的には、立体骨組振動系モデルを用いてサイト波の水平 2 成分及び上下動の合計 3 成分を同時入力した地震応答解析を行って、高層免震建物の免震層変位応答量及びアイソレータの引き抜きに及ぼすアスペクト比の影響とサイト波の水平動成分と上下動成分の効果について考察する。

2. 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成法

サイト波の作成法は、振幅特性と位相特性の二つの要因と、震源・伝播・地盤特性に関わる三つの要因で構成されるマトリクス、合計 6 個の構成要素をそれぞれ独立して規定し、以下のように作成するものである。

2-1. フーリエ振幅特性

フーリエ振幅に関する震源特性には、 ω^2 モデル⁷⁾を採用し、地震モーメント M_0 と立ち上がり時間 τ の関係式を用いて、コーナー周波数 f_c を求める。フーリエ振幅に関する伝播特性は Kanamori and Anderson⁸⁾ の評価式を用いている。フーリエ振幅に関する地盤特性は、地震基盤から地表への地盤特性について次元重複反射理論を適用する。但し、地盤の減衰定数は、S 波速度 700m/s 未満の場合に $h=2.0\%$ 、同じく 700m/s 以上の場合に $h=0.5\%$ とした。

2-2. フーリエ位相特性

次に、フーリエ位相の定量評価⁹⁾のため、隣り合うフーリエ位相の差である位相差分 $\Delta \phi_k$ (k 次数) を区間 $[0, -2\pi]$ で定義し、これと震源・伝播・地盤特性の関係を整理し¹⁰⁾、位相差分の分散の程度を表す指標としてその標準偏差 σ を用いている。フーリエ位相に関する震源・伝播特性は、位相差分の標準偏差と震源距離との関係¹¹⁾について、内陸直下地震及びプレート境界地震に対して提案した回帰式を用いた。フーリエ位相に関する地盤特性については、地盤増幅による位相差分分布の変化が小さいという性質¹²⁾を利用して、地表で観測された地震動の位相特性を基盤波にも適用した。

フーリエ位相の選択にあたっては、内陸直下地震の場合には 2000 年鳥取県西部地震による強震記録を、また、プレート境界地震の場合には 2003 年十勝沖地震による強震記録を利用し、それぞれのデータセットの中から σ/π の条件に適するフーリエ位相を採用して模擬地震動を作成する^{11),13)}。全合成波の擬似速度応答スペクトルを重ね描きして平均+標準偏差を周波数毎に算定し、これに近いスペクトル特性を有する模擬地震動を 3 波選択する。但し、本論文では対象サイト毎にこれら 3 波による高層免震建物の地震応答解析を行い、アスペクト比 2.5~5 の高層免震建物を対象とした各建物モデルの免震層変位応答量とアイソレータの引張面圧についての地震応答性状を把握し、サイト

波 3 波のうち、主に免震層変位応答量について平均値に近い応答量を示す 1 波を、各対象地区のサイト波における地震応答量の特徴を示しているものとして選択し、当該地区のサイト波として用いることとした。作成したサイト波は、水平動 2 成分及び上下動の合計 3 成分で構成されて、水平動 2 成分については、免震建物の水平振動応答周期範囲を考慮した 2~6 秒のバンドパスフィルター（以後、BPF とする）を施したサイト波水平動 2 成分の加速度時刻歴の軌跡において、2 成分合成振幅が最大となる方向から定めた主軸方向 (H1) と、主軸直交方向 (H2) の加速度時刻歴を水平動 2 成分として用いた（ただし、加速度・速度・変位の三種の最大振幅については、H2 の方が H1 より大きい場合もある）。サイト波の水平 2 成分の建物モデルへの入力方向は、梁間方向 (Y 方向) に主軸方向 (H1) を、桁行方向 (X 方向) に主軸直交方向 (H2) の加速度時刻歴をそれぞれ入力して解析を行った。

なお、本研究の入力設定が多くのサイト波において免震層変位応答量及び最大引張面圧が大きくなることを確認しているが、水平動の付加軸力と上下動による応答との時間差によっては斜め入力設定がやや大きくなる場合もある。

3. 対象サイト、想定地震、対象サイト地盤構造モデル及びサイト波
3-1. 対象サイトの選定

本論文において、サイト波を作成する対象サイト及び想定地震を表 1 に整理し、位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に必要な震源情報等を記載する。また、震源情報に関する参考文献番号も併せて示す。表 1 の対象サイトは、仙台・本町、東京・丸の内、東京・新宿、横浜・みなとみらい、名古屋駅前地区、大阪・梅田及び福岡・天神である。これらの都市地区は、日本の都市における行政官庁や企業の本社・支社が集中する地区である。このような大都市を対象として、高層免震建物を設計・建設する際に近い将来発生する可能性が高いものと考えられる地震や、設計においてしばしば考慮されている地震を、本研究では想定地震とした。

3-2. 地盤構造モデル

対象サイトの地盤構造について、地盤情報を表 2-1~表 2-7 に記載する。

表 2-1 から、仙台・本町²¹⁾は地表から深さ約 10m までは S 波速度が小さいが、約 230m 以深の地盤では Vs が 1km/s 以上、約 800m 以深では Vs が約 2km/s 以上となり、地表から約 1050m の深さに地震基盤がみられる。

表 2-2 の東京・丸の内²²⁾及び表 2-3 の東京・新宿²²⁾の地盤構造は、類似した地盤構造であり、ともに地表から約 2.5km の深さに地震基盤がみられる。

表 2-4 の横浜・みなとみらい²³⁾は、地表から約 3.3km の、東京・

表 1 想定地震、対象サイト及び震源情報等

No.	想定地震	都市名	対象サイト	地震モーメント M_0 ($N \cdot m$)	断層長さ L (km)	破壊開始点 ^{注1)}	震源距離 ^{注2)} r_0 (km)	立ち上がり 時間 τ (sec)	コーナー周期 T_c (sec)	震源情報 参考文献
1	長町・利府断層地震	仙台市	本町	$M_0=3.13 \times 10^{19}$	40	—	(40)	1.4	4.4	(14)
2	南関東地震	東京都	丸の内 新宿	$M_0=8.0 \times 10^{20}$	130	断層西端中央	(130)	4.0	12.6	(15)
		横浜市	みなとみらい							
3	東京湾北部地震	東京都	丸の内 新宿	$M_0=1.12 \times 10^{20}$	64	—	(64)	2.1	6.6	(16)
4	東海・東南海・南海連動地震	名古屋	名古屋駅前 地区	東海地震 $M_0=1.10 \times 10^{21}$ 東南海地震 $M_0=2.45 \times 10^{21}$ 南海地震 $M_0=8.76 \times 10^{21}$	150 200 300	足摺岬沖から 順次東へ	150 200 470	4.4 5.8 8.9	13.8 18.2 28.0	(17) (18)
5	上町断層地震			$M_0=3.13 \times 10^{19}$	42	—	(42)	1.4	4.4	(19)
6	東南海・南海連動地震タイプ2	大阪市	梅田	東南海地震 $M_0=2.45 \times 10^{21}$ 南海地震 $M_0=8.76 \times 10^{21}$	300 200	紀伊半島沖	330 230	8.9 5.8	28.0 18.2	(18)
7	磐固断層地震	福岡市	天神	$M_0=1.39 \times 10^{19}$	27	—	(27)	1.0	3.1	(20)

注 1) プレート境界地震の断層直上、または、内陸直下地震の震源近傍において、破壊開始点は、本手法では不要である。その場合、破壊進行方向に依らず、同じ振幅と位相を採用する。

注 2) () は、断層直上または、内陸直下地震の震源近傍であるため、 $r_0 = L$ (断層長さ) としてフーリエ振幅を評価したことを示す。

丸の内及び東京・新宿よりもさらに深い位置に地震基盤がみられる。

表 2-5 の名古屋駅前地区²⁴⁾は、地表から 580m の深さに地震基盤がみられ、対象サイトの中では比較的浅い位置に地震基盤がみられる。

表 2-6 の大阪・梅田²⁵⁾は、地表から約 1.2km の深さに地震基盤がみられる。

表 2-7 の福岡・天神²⁶⁾は、地表から約 600m の深さに地震基盤がみられる。

3-3. 想定地震の対象サイトにおけるサイト波

対象サイトの 7 地区について作成した想定地震によるサイト波の水平動 2 成分及び上下動について、データ長さ、最大加速度振幅、最大速度振幅及び最大変位振幅を表 3 に示す。

3-3-1. 長町・利府断層地震による仙台・本町のサイト波

作成されたサイト波の水平動速度振幅時刻歴 (H1) と上下動加速度振幅時刻歴 (UD) を図 1-1 及び図 1-2 に示す。水平動最大速度振幅 (H1) は 65cm/s であり、図 1-2 の上下動最大加速度振幅は 370cm/s² である。なお、水平動と上下動の主要動部が時間軸上でおおむね一致している。

3-3-2. 南関東地震と東京湾北部地震による東京・丸の内及び東京・新宿、横浜・みなとみらいのサイト波

東京・丸の内及び東京・新宿では、プレート境界地震の南関東地震、及び首都直下で発生する確率が高いと考えられる M7 クラスの東京湾北部地震も想定する。なお、横浜・みなとみらいでは、南関東地震のみを想定した。

東京湾北部地震の東京・丸の内における水平動速度振幅時刻歴 (H1) を図 1-3 に、南関東地震の横浜・みなとみらいにおける水平動速度振幅時刻歴 (H1) を図 1-4 に示す。図 1-3 は最大速度振幅が 50cm/s 程度であり、主要動の振幅が減衰しはじめたあとも比較的長時間にわたり震動が継続している。図 1-4 の横浜・みなとみらいでは、最大速度振幅は 50cm/s を上回り、さらに主要動継続時間は東京湾北部地震の東京・丸の内よりやや長くなっている。

3-3-3. 東海・東南海・南海連動地震による名古屋駅前地区のサイト波

南海トラフ付近では、M8 クラスのプレート境界地震が過去に繰り返し起き、近い将来これらが連動して発生する可能性が指摘されている。そこで、名古屋駅前地区では、東海・東南海・南海連動地震を想定する。図 1-5 に名古屋駅前地区における水平動速度振幅時刻歴 (H1) を示す。連動地震においては、波動の重ね合わせ技法²⁷⁾を用いて、サイト波を作成した。図 1-5 から東海・東南海・南海地震それぞれの地震による主要動部を見ることができ、長い時間にわたり大きな速度振幅が継続している。

3-3-4. 東南海・南海連動地震及び上町断層地震による大阪・梅田のサイト波

大阪・梅田では、南海トラフ付近において発生する M8 クラスのプ

レート境界地震の東南海・南海連動地震を想定する。東南海・南海連動地震では、足摺岬沖を破壊開始点として破壊が静岡県 の浜名湖付近まで連続して伝播する震源過程をタイプ 1 とし、紀伊半島沖を破壊開始点として破壊が東西に進行する震源過程をタイプ 2 として想定したが、このうち、本論文では後述する理由によりタイプ 2 を採用することとする。なお、東海・東南海・南海連動地震と同じく波動の重ね合わせ技法²⁷⁾を用いて、サイト波を作成している。

また、近距離地震として、大阪府豊中市から大阪市を経て岸和田市に至る上町断層帯を対象とした上町断層地震を想定する。図 1-6 に東南海・南海連動地震タイプ 2 の水平動速度振幅時刻歴 (H1) を示す。図 1-7 及び図 1-8 には上町断層地震の水平動速度振幅時刻歴 (H1) 及び上下動加速度振幅時刻歴 (UD) を示す。水平動の速度振幅時刻歴においては、図 1-1 の長町・利府断層地震の仙台・本町より大きな 73cm/s の最大速度振幅を示している。

3-3-5. 警固断層地震による福岡・天神のサイト波

福岡・天神では、警固断層を対象とした警固断層地震を想定する。図 1-9 及び図 1-10 に水平動速度振幅時刻歴 (H1) 及び上下動加速度振幅時刻歴を示す。水平動及び上下動ともに最大加速度振幅が大きく、特に上下動最大加速度振幅の 684cm/s² は、仙台・本町の 371cm/s² (図 1-2) や大阪・梅田の 263 cm/s² (図 1-8) に比して非常に大きな値となっている。

表 2-1 仙台・本町の地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	9	1.60	290	1440
9	220	1.80	680	1970
229	470	2.00	1260	2760
699	100	2.10	1380	2920
799	250	2.30	1940	3680
1049	-	2.80	3130	5300

表 2-2 東京・丸の内の地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	2	1.74	100	1060
2	5	1.80	270	1310
7	130	1.88	520	1670
130	260	1.93	690	1910
390	1170	2.01	940	2280
1570	1010	2.19	1500	3110
2570	-	2.71	3110	5450

表 2-3 東京・新宿の地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	5	1.75	110	1070
5	5	1.80	270	1310
10	60	1.87	510	1660
70	300	1.92	640	1840
370	1180	2.02	970	2330
1550	1010	2.20	1530	3150
2560	-	2.71	3110	5450

表 2-4 横浜・みなとみらいの地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	7	1.60	200	1600
7	3	1.60	300	1700
10	20	1.70	410	1810
30	120	1.70	560	1940
150	500	1.80	750	2140
650	1150	2.00	1350	2790
1800	1490	2.20	1840	3470
3290	-	2.80	3300	5740

表 2-5 名古屋駅前地区の地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	7	1.60	220	1600
7	13	1.60	300	1700
20	14	1.70	400	1800
34	40	1.70	500	1900
74	506	1.80	770	2170
580	-	2.70	3000	5500

表 2-6 大阪・梅田の地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	8	1.90	220	1600
8	9	1.90	310	2030
17	5	1.90	260	1630
22	10	1.90	370	1800
32	5	2.00	500	2110
37	143	2.10	350	1600
180	380	1.70	550	1800
560	620	1.80	1000	2500
1180	-	2.10	3200	5400

表 2-7 福岡・天神の地盤構造

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0	10	1.60	220	1200
14	4	1.60	360	1500
18	12	1.60	400	1550
30	10	1.90	600	1900
40	145	2.10	1100	2600
185	310	2.30	1700	3500
495	100	2.10	2000	3200
595	-	2.50	2850	5150

表 3 対象サイトのサイト波の最大加速度振幅、最大速度振幅及び最大変位振幅

No.	想定地震	対象サイト	データ長さ (秒)	最大加速度振幅 (cm/s ²)			最大速度振幅 (cm/s)			最大変位振幅 (cm)		
				H1	H2	UD	H1	H2	UD	H1	H2	UD
1	長町・利府断層地震	仙台・本町	120	1252	1209	371	65.4	44.4	41.9	18.2	15.3	13.6
2		東京・丸の内	180	263	243	89	55.9	44.7	27.2	39.4	43.4	19.7
3	南関東地震	東京・新宿	180	274	301	89	40.1	65.0	26.9	51.5	42.1	19.5
4		横浜・みなとみらい	240	538	730	104	55.6	63.5	24.9	29.3	33.0	22.4
5		東京・丸の内	240	321	431	111	47.6	50.8	21.2	18.3	33.9	12.5
6	東京湾北部地震	東京・新宿	240	348	468	117	45.3	53.8	20.5	17.5	33.2	12.2
7	東海・東南海・南海連動地震	名古屋駅前地区	300	450	440	209	61.1	50.3	22.0	33.1	27.7	21.6
8	東南海・南海連動地震	大阪・梅田	240	173	176	133	41.5	39.4	17.4	34.4	37.1	17.1
9	上町断層地震	大阪・梅田	120	491	484	263	73.4	56.4	36.9	37.4	29.2	13.8
10	警固断層地震	福岡・天神	60	1125	1284	684	129.9	67.4	97.6	25.7	12.3	20.5

図 1-1 仙台・本町の水平動速度振幅時刻歴 (H1)

図 1-2 仙台・本町の上下動加速度振幅時刻歴 (UD)

図 1-3 東京・丸の内の水平動速度振幅時刻歴 (H1)

図 1-4 横浜・みなとみらいの水平動速度振幅時刻歴 (H1)

4. サイト波の周期特性

4-1. 長町・利府断層地震及び磐固断層地震によるサイト波の水平動速度応答スペクトル

長町・利府断層地震による仙台・本町、及び磐固断層地震による福岡・天神のサイト波の水平動速度応答スペクトル (H1, $h=0.05$) を図 2-1 に示す。仙台・本町のサイト波は、短周期 0.3 秒以下の速度応答量が比較的大きくなっている。これは表 2-1 の地盤構造から、地表から 230m までとそれ以深の V_s の差が大きく影響していると考えられる。また、周期 1.2 秒と周期 2.6 秒に卓越する周期が見られ、これらの周期帯域では、100～180cm/s 程度の大きな速度応答量となっている。

同じく図 2-1 の福岡・天神のサイト波では、周期 0.6 秒に卓越する周期があり、速度応答量が 200cm/s を超えている。しかし、周期 3 秒以上では速度応答量が他のサイト波と比較して小さくなっている。この要因は、表 2-7 から地震基盤が地表から約 600m と浅いこと、及び震源距離が非常に近いことによるものと考えられる。

4-2. 南関東地震及び東京湾北部地震によるサイト波の水平動速度応答スペクトル

図 2-2 に南関東地震による東京・丸の内、東京・新宿及び横浜・みなとみらいの水平動速度応答スペクトル (H1) を示す。いずれも、東京・丸の内及び東京・新宿では周期 8～9 秒にかけて卓越する周期がみられ、これは既往の研究成果²⁸⁾とも整合している。これらの周期帯域では、およそ 120cm/s 程度の速度応答量となっている。表 2-2 及び表 2-3 の地盤構造から東京・丸の内及び東京・新宿の地震基盤は、地表から約 2.5km の深さに位置しており、この基盤構造が影響していると思われる。横浜・みなとみらいでは、周期 1.2 秒付近において速度応答量は 100～150cm/s 程度となり、周期 3.5 秒でも 100cm/s を超

図 1-5 名古屋駅前地区の水平動速度振幅時刻歴 (H1)

図 1-6 大阪・梅田の水平動速度振幅時刻歴 (連動地震、H1)

図 1-7 大阪・梅田の水平動速度振幅時刻歴 (上町断層地震、H1)

図 1-8 大阪・梅田の上下動加速度振幅時刻歴 (上町断層地震、UD)

図 1-9 福岡・天神の水平動速度振幅時刻歴 (H1)

図 1-10 福岡・天神の上下動加速度振幅時刻歴 (UD)

える。また、東京・丸の内や東京・新宿に比べて、震源に近い横浜・みなとみらいは短周期側において大きな速度応答量となっている。

図 2-3 に示す東京湾北部地震の東京・丸の内及び東京・新宿では、周期 1.5 秒付近において約 100cm/s の速度応答量であるが、周期 8～9 秒における速度応答スペクトルは、南関東地震に比して小さな値となっている。これは南関東地震に比べて地震規模が小さいことによるものと思われる。

4-3. 東海・東南海・南海連動地震による水平動速度応答スペクトル

図 2-4 に名古屋駅前地区の水平動速度応答スペクトルを示す。周期 3 秒付近において卓越する周期があり、150cm/s 程度の速度応答量となっているが、周期 5 秒以上ではかなり小さくなっている。東京・丸の内及び東京・新宿の地震基盤深さ 2.5km と比べて、名古屋駅前地区では約 600m 程度と浅い基盤構造によるものと思われる。

4-4. 東南海・南海連動地震及び上町断層地震による水平動速度応答スペクトル

図 2-5 に東南海・南海連動地震及び上町断層地震による大阪・梅田の水平動速度応答スペクトルを示す。両地震ともに周期 5 秒において卓越する周期が見られ、上町断層地震では速度応答量は 200cm/s を超えている。表 2-6 の地盤構造から大阪・梅田の地震基盤は、地表から約 1.2km の深さに位置しており、この基盤構造が影響しているものと思われる。

4-5. 長町・利府断層地震、上町断層地震及び警固断層地震による上下動加速度応答スペクトル

図 2-6 に内陸直下地震の長町・利府断層地震による仙台・本町、上町断層地震による大阪・梅田及び警固断層地震による福岡・天神のサイト波について、3 波の上下動成分加速度応答スペクトル($h=0.05$)を示す。長町・利府断層地震の仙台・本町のサイト波は、周期 0.1~0.3 秒において $800\sim1200\text{cm/s}^2$ 程度の加速度応答量を示す。一方、警固断層地震の福岡・天神のサイト波は、同じ周期帯域において、 $1200\sim2200\text{cm/s}^2$ の非常に大きな加速度応答量を示している。上下動成分の周期 0.1~0.3 秒は、アイソレータの引き抜きに及ぼす効果の大きな上下動成分の周期帯域であることを前報⁹⁾において示したが、警固断層地震の福岡・天神の上下動成分は高層免震建物のアイソレータに大きな引き抜きを生じるものと推測される。

5. 建物解析モデル及び免震部材

解析建物モデルは、整形高層免震建物のアスペクト比 2.5 (10 階)、3 (12 階)、3.5 (14 階)、4 (16 階)、4.5 (18 階) 及び 5 (20 階) の 6 種類である。表 4 に各解析建物モデルの略式記号 (以後、本記号を用いる)、各建物モデルに用いたアイソレータ及びダンパーに関する免震部材の諸元を示す。

アスペクト比 4 の RS16F (16 階) の整形建物モデルの平面形状を図 3-1 に示す。桁行方向 5 スパン、梁間方向 1 スパンであり、6 種類の各建物モデルとともに基準階の平面形状は同じである。図 3-1 に示すように、住戸平面計画は片廊下形式の住戸配置とし、柱直下にアイソレータを配置する。平面形状は桁行方向 (X 方向) 7m×5 スパン、梁間方向 (Y 方向) 12m×1 スパン、階高は $H=300\text{cm}$ で構造種別は鉄筋コンクリート構造の高層免震共同住宅とする。架構形式は桁行方向をラーメン、梁間方向を連層耐震壁で構成している。図 3-2 に RS16F の桁行方向軸組図と梁間方向軸組図を示す。解析を行う 6 種類の建物モデルは、1 階床と基礎との間に免震層を設けた基礎免震形式とする。

本論文において解析を行う建物モデルの部材サイズ構成は、上部構造の層剛性を A_i 分布で与えた設計例を参考にして、その後、多質点系モデルによる予備応答解析を行い、各層の応答層間変位がおおよそ均等になるような層剛性分布を目標に部材構成を設定した。6 種類の上部構造部材サイズと上部構造総重量を表 5-1~表 5-6 に示す。また、梁間方向柱サイズは、連層耐震壁が配置されているため、桁行方向柱サイズより小さくなっている。

立体骨組振動系モデルにおける耐震壁及び床スラブの剛性評価、その他の振動系力学モデル及び地震応答解析手法については、前報^{5),6)}と同様である。なお、減衰評価は剛性比例型とし、上部構造の減衰定数は立体骨組振動系モデルの 1 次モードに対して 2%とし、免震層の減衰定数は水平方向 0%、上下方向 2%²⁹⁾とする。

免震部材は、天然ゴム系アイソレータと履歴減衰型ダンパーの組み合わせとして、アイソレータは水平バネ、ダンパーはエネルギー吸収部材として各々の機能を分離した。アイソレータの直径は、長期

図 2-1 仙台・本町及び福岡・天神の水平動速度応答スペクトル

図 2-2 東京・丸の内及び東京・新宿、横浜・みなとみらいの水平動速度応答スペクトル

図 2-3 東京・丸の内及び東京・新宿の水平動速度応答スペクトル

図 2-4 名古屋駅前地区の水平動速度応答スペクトル

図 2-5 大阪・梅田の水平動速度応答スペクトル

図 2-6 仙台・本町、大阪・梅田及び福岡・天神の上下動加速度応答スペクトル

面圧がおおよそ 10N/mm^2 、2 次形状係数 S_2 が 5 以上を目標に設定する。アイソレータとダンパーの諸元を表 4 に示している。建物モデルのアイソレータ配置番号①⑥⑦⑫ (図 3-1 参照) を隅角部アイソレータと呼び、これら以外のアイソレータ配置番号②③④⑤⑧⑨⑩⑪ (図 3-1 参照) を、一般部アイソレータと呼ぶこととする。ダンパーは鋼棒ダンパーを想定し、履歴減衰型ダンパーを用いる。アイソレータの水平方向履歴特性は弾性とし、アイソレータ周期 (以下、「 T_f 」と称す) を 3.5 秒 (以下、「 $T_f=3.5$ 秒」と称す) 及び 5 秒 (以下、「 $T_f=5$ 秒」と称す) の二種類に設定した。ダンパーは上部構造総重量の 5% で降伏 (降伏せん断力係数 $\alpha_s=0.05$) するよう設定する。免震層全体の水平方向履歴特性は、アイソレータとダンパーの組み合わせにより、全体で図 3-3 に示すようにバイリニア型の復元力特性となる。これまで設計されてきた免震建物のレベル 2 時の 1 次固有周期は平均 3.5 秒程度であるが、最近では年々長周期化の傾向にあると報告されており³⁰⁾、このような実情をふまえて本論文では 3.5 秒と 5 秒の二種類に設定したものである。

鉛直方向の圧縮剛性 k_{vc} は、アイソレータの鉛直固有振動数と地盤-建物連成系による連成効果及び実施設計例に鑑み、 $T_v=0.15\text{秒}$ ³¹⁾ に設定し弾性として取り扱い、アイソレータの引張剛性 k_{vt} は圧縮剛性 k_{vc} の 1/20 とし、さらに引張面圧 σ_t が 2N/mm^2 を超える³²⁾と圧縮

表 4 建物解析モデルと免震部材の諸元

記号	階数	高さ (m)	平面形状 Lx(m)×Ly(m)	階高 (cm)	アスペクト比	隅角部アイソレータ直径(mm)	2次形状係数 S_2	一般部アイソレータ直径(mm)	2次形状係数 S_2	ゴム総厚 m_g (mm)	アイソレータ 周期(sec)	ダンパー弾性限 変位 δ_y (mm)	ダンパー降伏 せん断力係数 α_s
RS10F	10	30	35×12	300	2.5	600	3.39	900	5.09	6.8×26=176.8	3.5 5.0	30	0.05
RS12F	12	36			3	700	3.96	950	5.37	6.8×26=176.8			
RS14F	14	42			3.5	750	4.26	1000	5.68	8.0×22=176.0			
RS16F	16	48			4	800	4.00	1000	5.00	8.0×25=200.0			
RS18F	18	54			4.5	850	3.52	1200	4.98	6.7×36=241.2			
RS20F	20	60			5	900	3.73	1200	4.98	6.7×36=241.2

図 3-1 建物モデル

図 3-2 建物モデル軸組

図 3-3 免震層水平剛性

図 3-4 免震層鉛直剛性

剛性 k_{vc} の 1/200 として、図 3-4 に示す復元力特性とした。また、圧縮剛性については、圧縮面圧に依らず一定として解析を行った。

また、固有値解析については、表 5-1～表 5-6 に建物モデル 6 種類の上部構造基礎固定時の 1 次固有周期、 $T_f=3.5$ 秒の場合の免震時のアイソレータとダンパーの割線剛性のせん断歪み 100%時の 1 次固有周期、せん断歪み 200%時の 1 次固有周期も同表に記載している。

なお、地震応答解析については、アイソレータせん断歪み 400%を超えた時点で解析を中断した^{5),6)}。

アイソレータの引張鉛直剛性及び水平剛性については、せん断変形依存性の報告がある。そこで最初に、せん断変形依存性を考慮した引張鉛直剛性の復元力モデル³³⁾による地震応答解析を行った結果、本研究で採用しているバイリニア型の引張鉛直剛性に比して、最大引張面圧がやや小さく、逆に引張歪みは大きくなることを確認している。これは引張初期段階からソフトニングが進行するため、引張面圧は小さくなる傾向にあり、かつ、引張歪みは大きく傾向にある。

次に、せん断歪み 300%を超えるとアイソレータの水平剛性が初期水平剛性に比べ 1.3 倍大きくなるようなハードニングを考慮した地震

表 5-1 RS10F の部材サイズ及び上部構造総重量及び 1 次固有周期

階数	柱サイズ(mm)	梁サイズ(mm)	桁行方向 梁間方向	桁行方向 梁間方向	耐震壁厚 (mm)	床スラブ厚 (mm)	上部構造総重量 (kN)	上部構造1次 固有周期(秒)
7-10階	900	750	600×900	600×800	200	200	62,370	0.612
4-6階	950	800	600×900	600×900	200	200		免震時100%1次
1-3階	950	850	600×900	600×900	200	200		3.228
基礎	—	—	600×1500	600×2000	200	200		免震時200%1次 3.369

表 5-2 RS12F の部材サイズ及び上部構造総重量及び 1 次固有周期

階数	柱サイズ(mm)	梁サイズ(mm)	桁行方向 梁間方向	桁行方向 梁間方向	耐震壁厚 (mm)	床スラブ厚 (mm)	上部構造総重量 (kN)	上部構造1次 固有周期(秒)
10-12階	900	750	600×900	600×800	200	200	73,710	0.722
7-9階	950	800	600×900	600×800	200	200		免震時100%1次
4-6階	1000	850	600×900	600×900	200	200		3.252
1-3階	1000	900	600×900	600×900	200	200		免震時200%1次 3.283
基礎	—	—	600×1500	600×2000	200	200		3.400

表 5-3 RS14F の部材サイズ及び上部構造総重量及び 1 次固有周期

階数	柱サイズ(mm)	梁サイズ(mm)	桁行方向 梁間方向	桁行方向 梁間方向	耐震壁厚 (mm)	床スラブ厚 (mm)	上部構造総重量 (kN)	上部構造1次 固有周期(秒)
13-14階	900	700	600×900	600×800	200	200	85,050	0.857
10-12階	900	750	600×900	600×800	200	200		
7-9階	950	800	600×900	600×800	200	200		
4-6階	1000	850	600×900	600×800	200	200		免震時100%1次 3.283
1-3階	1000	900	600×900	600×900	200	200		免震時200%1次 3.427
基礎	—	—	600×1500	600×2000	200	200		

表 5-4 RS16F の部材サイズ及び上部構造総重量及び 1 次固有周期

階数	柱サイズ(mm)	梁サイズ(mm)	桁行方向 梁間方向	桁行方向 梁間方向	耐震壁厚 (mm)	床スラブ厚 (mm)	上部構造総重量 (kN)	上部構造1次 固有周期(秒)
13-16階	900	700	600×900	600×800	200	200	96,390	0.993
10-12階	900	750	600×900	600×900	200	200		
7-9階	950	800	600×900	600×900	200	200		
4-6階	1000	850	600×900	600×900	200	200		免震時100%1次 3.347
1-3階	1000	900	600×900	600×900	200	200		免震時200%1次 3.476
基礎	—	—	600×1500	600×2000	200	200		

表 5-5 RS18F の部材サイズ及び上部構造総重量及び 1 次固有周期

階数	柱サイズ(mm)	梁サイズ(mm)	桁行方向 梁間方向	桁行方向 梁間方向	耐震壁厚 (mm)	床スラブ厚 (mm)	上部構造総重量 (kN)	上部構造1次 固有周期(秒)
16-18階	900	700	600×900	600×800	200	200	107,730	1.083
13-15階	900	750	600×900	600×800	200	200		
10-12階	950	800	600×900	600×800	200	200		
7-9階	1000	850	600×900	600×800	200	200		免震時100%1次 3.408
4-6階	1000	900	600×900	600×900	200	200		免震時200%1次
1-3階	1100	900	600×1000	600×900	200	200		3.518
基礎	—	—	600×2000	700×2500	200	200		

表 5-6 RS20F の部材サイズ及び上部構造総重量及び 1 次固有周期

階数	柱サイズ(mm)	梁サイズ(mm)	桁行方向 梁間方向	桁行方向 梁間方向	耐震壁厚 (mm)	床スラブ厚 (mm)	上部構造総重量 (kN)	上部構造1次 固有周期(秒)
19-20階	900	750	600×1000	600×800	200	200	119,070	1.186
16-18階	900	750	600×1000	600×800	200	200		
13-15階	950	800	600×1000	600×800	200	200		
10-12階	1000	850	600×1000	600×800	200	200		免震時100%1次 3.439
7-9階	1000	900	600×1000	600×800	200	200		免震時200%1次
4-6階	1100	900	600×1000	600×900	200	200		3.549
1-3階	1150	950	700×1000	700×900	200	200		
基礎	—	—	700×2500	700×3000	200	200		

応答解析を行った結果、せん断歪みは小さくなるものの、アイソレータの最大引張面圧や最大圧縮面圧はハードニングを考慮しない本研究の免震層水平剛性の結果と大きな違いは見られなかったことを確認している。

以上の検討結果をふまえて、本研究ではバイリニア型の免震層水平剛性及び免震層引張鉛直剛性を採用することとする。

6. 整形高層免震建物の免震層変位応答量と最大引張面圧

6-1. 東海・東南海・南海連動地震の名古屋駅前地区サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量とアイソレータ周期との関係

本研究では、東海・東南海・南海連動地震によるサイト波について、名古屋駅前地区に加えて名古屋市中区三の丸についても作成している。その作成したサイト波に対するアスペクト比 2.5～5 の建物モデル 6 種類について、高層免震建物の免震層変位応答量を図 4-1 に示す。図 4-1 は $T_f=5$ 秒に関するものである。アスペクト比 3.5～4

では名古屋駅前地区と名古屋・三の丸地区のサイト波の免震層変位応答量は同程度となるものの、他のアスペクト比では名古屋駅前地区の免震層変位応答量が多い。そこで、本論文では名古屋市の対象サイトとして名古屋駅前地区を選定したものである。なお、名古屋駅前地区については、アイソレータ周期を5秒のみとした。これは $T_f=3.5$ 秒の場合、図 2-4 の水平動速度応答スペクトルが示すように、周期 3 秒付近での速度応答量が大きく、 $T_f=3.5$ 秒ではアイソレータせん断歪み 400%を超えて大きな免震層変位応答量となるためである。このように、名古屋市においては、周期 3.5 秒のアイソレータを用いることは適正な選定とは見なし難く、本論文では周期 5 秒のアイソレータを用いることとした。

6-2. 東南海・南海連動地震の大阪・梅田サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量とアイソレータ周期との関係

東南海・南海連動地震のタイプ別（先に記述 3-3-4 節）による免震層変位応答量を図 4-2 ($T_f=3.5$ 秒) に示す。図 4-2 から免震層変位応答量は、いずれのアスペクト比についてもタイプ 2 の方がタイプ 1 よりも大きな地震応答量となる。よって、本論文ではタイプ 2 の大阪・梅田サイト波を用いることとした。また、大阪・梅田の高層免震建物のアイソレータには周期 3.5 秒を用いた。これは図 2-5 の大阪・梅田の水平動速度応答スペクトルの周期 5 秒付近で非常に大きな速度地震応答量となるものであり、これによる免震層変位応答量はアイソレータせん断歪み 400%に達することとなる。よって、アイソレータ周期は、前述した東海・東南海・南海連動地震による名古屋駅前地区とは逆に、周期 3.5 秒のアイソレータを採用した。

6-3. 対象サイトにおける高層免震建物の免震層変位応答量と最大引張面圧

免震建物の終局耐震性能については、上部構造の塑性化、アイソレータの引張破断、アイソレータの座屈、免震部材のせん断破断、エネルギー吸収能力の喪失及び免震建物の擁壁への衝突が想定されると指摘されている³⁴⁾。そこで、ここでは高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧を同時に表示して、免震層変位応答量と引張面圧を整理し、高層免震建物の免震層変位応答量と、特にアスペクト比に関するアイソレータの引張面圧との関係を対象サイト毎に定量的に把握する。今節以降、アイソレータに作用する圧縮面圧をマイナス（－）、引張面圧を（＋）と設定する。引張面圧が生じない場合、最小圧縮面圧を用いることとする。

6-3-1. 長町・利府断層地震の仙台・本町サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-1 に長町・利府断層地震による仙台・本町の高層免震建物の応答について、免震層変位応答量を横軸に、アイソレータの最大引張面圧（引き抜きが生じない場合は最小圧縮面圧を示す。以後、同じとする）を縦軸に、アスペクト比毎に表示している。アイソレータ周期としては、 $T_f=3.5$ 秒（左図）及び $T_f=5$ 秒（右図）の二種類である。まず、 $T_f=3.5$ 秒では、免震層変位応答量はアスペクト比 2.5～3（アイソレータのゴム総厚 176mm）において、アイソレータせん断歪み 400%に達している。アスペクト比 4 以上では、アイソレータのゴム総厚（200～241mm）が大きくなるため、せん断歪み 400%には達しないものの、免震層変位応答量は 70cm 程度となる。引張面圧はアスペクト比 2.5 からアイソレータに引き抜きが生じ、アスペクト比 4 以上では、引張面圧 1N/mm^2 を上回る。

図 4-1 名古屋駅前地区と名古屋・三の丸の免震層変位応答量

図 4-2 大阪・梅田の震源破壊タイプ別による免震層変位応答量

図 5-1 仙台・本町の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-2 東京・丸の内
の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-3 東京・新宿の
免震層変位応答量と引張面圧

図 5-4 横浜・みなとみらいの免震層変位応答量と引張面圧

図 5-5 東京・丸の内
の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-6 東京・新宿の
免震層変位応答量と引張面圧

次に、 $T_f=5$ 秒の場合には、アスペクト比 2.5～5 において、免震層変位応答量は 55～70cm に広く分布しており、アスペクト比 3 ではアイソレータせん断歪み 400%を超える。また、引張面圧については、 $T_f=3.5$ 秒に比して、アスペクト比 4～5 ではいずれも 1N/mm^2 を下回っている。

6-3-2. 南関東地震の東京・丸の内、東京・新宿及び横浜・みなとみらいサイト波による高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧

南関東地震を想定した東京・丸の内のサイト波による $T_f=3.5$ 秒の免震層変位応答量と引張面圧を図 5-2 に示す。免震層変位応答量はアスペクト比に依らずおおそ 35～42cm である。引張面圧はアスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり（引き抜き力が大きく作用して）、図 5-1 に比べてアスペクト比による分布幅が大きくなる特徴をもっている。アスペクト比 4.5 になるとアイソレータに引き抜きが生じる。なお、 $T_f=5$ 秒では、免震層変位応答量が $T_f=3.5$ 秒に比べて、やや大きくなり 40cm 程度となるが、アイソレータには引き抜きが生じないことを確認している。これは図 2-2 の水平動速度応答スペクトルから周期 5 秒程度になると速度応答量が周期 3 秒に比して小さくなり、水平動の転倒モーメントによる付加軸力が小さくなるためである。

図 5-3 に東京・新宿の $T_f=5$ 秒の免震層変位応答量と引張面圧を示す。図 5-2 の東京・丸の内に比べて免震層変位応答量が 32～35cm と小さくなる。アスペクト比が大きいほど免震層変位応答量がやや大きくなる傾向にある。なお、 $T_f=3.5$ 秒では、東京・丸の内と同じく免震層変位応答量は 40cm 程度となる。

図 5-4 に $T_f=3.5$ 秒（左図）及び $T_f=5$ 秒（右図）の横浜・みなとみらいの免震層変位応答量と引張面圧を示す。まず、 $T_f=3.5$ 秒の場合には、免震層変位応答量はアスペクト比に依らずに 45～50cm であり、同じアイソレータ周期帯域の東京・丸の内や東京・新宿よりも大きい免震層変位応答量となっている。アスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比 4 以上になるとアイソレータに引き抜きが生じて 0.5N/mm^2 程度の引張面圧となる。

次に、 $T_f=5$ 秒では、アスペクト比 2.5～5 においてアイソレータに引き抜きは生じない。図 2-2 の速度応答スペクトルが示すように、周期 5 秒付近では周期 3 秒に比べて速度応答量がやや小さくなっており、水平動の転倒モーメントによる付加軸力が周期 3.5 秒に比して、小さくなることによるものと思われる。

6-3-3. 東京湾北部地震の東京・丸の内及び東京・新宿サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧

東京湾北部地震は、南関東地震に比べ地震規模は小さいが首都直下で発生する可能性が高いため、首都圏に大きな被害が生じるとされる M7 クラスの地震である。図 5-5 ($T_f=3.5$ 秒) に東京・丸の内の免震層変位応答量と引張面圧を示す。図 5-5 から免震層変位応答量は 30cm 以内となっている。アスペクト比の増加とともに圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比 5 になるとアイソレータに引き抜きが生じる。同地震による東京・新宿のサイト波について、免震層変位応答量と引張面圧を図 5-6 ($T_f=3.5$ 秒) に示す。地震規模が南関東地震に比べて小さいため、免震層変位応答量は 25cm 程度と小さくなる。引張面圧については、図 5-5 の東京・丸の内と同じくアスペクト比 5 になるとアイソレータに引き抜きが生じる。なお、東京・丸の内及び東京・新宿の $T_f=5$ 秒ではいずれの建物モデルにおいても、アイソレータに引き抜きは生じていないことを確認している。

図 5-7 名古屋駅前地区の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-9 大阪・梅田の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-8 大阪・梅田の免震層変位応答量と引張面圧

6-3-4. 東海・東南海・南海連動地震の名古屋駅前地区サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-7 に $T_f=5$ 秒の免震層変位応答量と引張面圧を示す。名古屋駅前地区の免震層変位応答量は、40～55cm の範囲に分布しており、アスペクト比が小さいほど免震層変位応答量は大きくなる傾向にある。

引張面圧は、他の地震と同じくアスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比 5 になるとアイソレータに引き抜きが生じることとなる。連動地震のサイト波は、最も近い震源距離でも 150km と遠方であるが、名古屋駅前地区のアスペクト比 5 の高層免震建物アイソレータに引き抜きが生じている。

6-3-5. 東南海・南海連動地震及び上町断層地震の大阪・梅田サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-8 に $T_f=3.5$ 秒の東南海・南海連動地震タイプ 2 による大阪・梅田のサイト波についての免震層変位応答量と引張面圧を示す。免震層変位応答量は、40～47cm の範囲に分布している。アスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比が 4.5 になるとアイソレータに引き抜きが生じることとなる。東海・東南海・南海連動地震による名古屋駅前地区のサイト波と同じように、連動地震による大阪・梅田のサイト波は、震源距離がかなり遠方であっても、アスペクト比 4.5 を超える高層免震建物のアイソレータには引き抜きが生じることとなる。

図 5-9 の上町断層地震の大阪・梅田では、アスペクト比 2.5 においてアイソレータのせん断歪みが 400%を超える。これ以外では 400%を超えないものの、免震層変位応答量は 65～85cm と大きな応答量となる。

引張面圧は、アスペクト比に依らずアイソレータに引き抜きを生じる。これは、図 2-6 に示すサイト波の上下動加速度応答スペクトルの周期 0.1～0.3 秒付近で大きな加速度応答量となるため、上下動の効果が大きく影響していることによるものと思われる。

6-3-6. 警固断層地震の福岡・天神サイト波による高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧

図 5-10 に $T_f=3.5$ 秒の警固断層地震の福岡・天神における免震層変位応答量と引張面圧を示す。免震層変位応答量は、アスペクト比に依らずに 40cm 程度である。また、 $T_f=5$ 秒の場合でも免震層変位応答量は 40cm 程度であることを確認している。

引張面圧については、アスペクト比 2.5 以上からアイソレータに引き抜きが生じて、アスペクト比 4.5 では引張面圧 1.5N/mm^2 以上、アスペクト比 5 では 1.8N/mm^2 の大きな引張面圧となる。これは図 2-6 の上下動成分の加速度応答スペクトルが示すように、警固断層地震による福岡・天神のサイト波の上下動成分は、同じく内陸直下地震の長町・利府断層地震による仙台・本町や上町断層地震による大阪・梅田の上下動成分に比して、周期 0.1~0.2 秒付近においてかなり大きな加速度応答量を有していることによるものと考えられる。

7. 地震規模の違いによるサイト波の水平動 2 成分及び上下動成分の強さが高層免震建物アイソレータの引き抜きに及ぼす影響

ここでは、高層免震建物の最大引張面圧に及ぼすサイト波の水平動 2 成分及び上下動成分の効果を考察する。そこで、3 成分同時入力時の最大引張面圧の発生時刻において最大引張面圧から長期圧縮面圧を差し引き算出した面圧を $\sigma_{H\&V}$ とし、同時刻の同じ方法で算出した水平動 2 成分単独入力時及び上下動単独入力時のそれぞれの面圧を σ_H 及び σ_v とし、これを 3 成分同時入力時の $\sigma_{H\&V}$ によってそれぞれ除した値を、「水平動寄与率」及び「上下動寄与率」と定義⁹⁾する。

図 6-1 及び図 6-2 には M8 クラスの地震の場合、図 6-3 及び図 6-4 には直下地震の場合の、それぞれのサイト波による $T_f=3.5$ 秒の応答量について、水平動寄与率（横軸）及び上下動寄与率（縦軸）を示した。また、図 7-1 及び図 7-2 については $T_f=5$ 秒の寄与率について表した。ここでは、前記 7 地区に名古屋・三の丸及び東南海・南海連動地震タイプ 1 の大阪・梅田も加え、各対象サイト毎に三種類の位相を用いて作成した総計 36 波のサイト波について、水平動寄与率及び上下動寄与率の応答量を示している。なお、本論文のサイト波において、水平動寄与率と上下動寄与率を合計すると寄与率が 1 を超えるサイト波がある。これは 3 成分同時入力時引張面圧と、水平動及び上下動単独入力時引張面圧発生時刻が必ずしも一致しないために生じるものである。

図 6-1（アスペクト比 3, RS12F, $T_f=3.5$ 秒）の M8 クラスの地震によるサイト波は、水平動寄与率が約 0.6 以上、上下動寄与率は約 0.4 以下となって、上下動よりも水平動の効果が大きいことを示している。なお、図中の●はアイソレータに引き抜きが作用し、○は引き抜きが生じないことを表す。図 6-2（アスペクト比 5, RS20F, $T_f=3.5$ 秒）では、高層化によって、転倒モーメントによる付加軸力の増加に伴い、水平動寄与率約 0.8 以上、上下動寄与率約 0.2 以下となり、水平動の効果がさらに大きくなる。これに伴って、アイソレータに引き抜きを生じさせるサイト波の数も多くなっている。図 6-3（アスペクト比 3, RS12F, $T_f=3.5$ 秒）の M7 クラスの直下地震によるサイト波は、図 6-1（M8 クラス）とは逆に、上下動寄与率の値が大きくなっている。特に、アイソレータに引き抜きを生じさせるサイト波は、上下動寄与率が 0.8 以上、水平動寄与率 0.6 以下に多く分布している。図 6-4（アスペクト比 5, RS20F, $T_f=3.5$ 秒）の M7 クラスの直下地震では、高層化に伴う転倒モーメントによる付加軸力の増加があり、直下地震のサイト波も多く

図 6-1 M8 クラスの地震によるサイト波の水平動及び上下動寄与率

図 6-3 M7 クラスの直下地震によるサイト波の水平動及び上下動寄与率

図 6-2 M8 クラスの地震によるサイト波の水平動及び上下動寄与率

図 6-4 M7 クラスの直下地震によるサイト波の水平動及び上下動寄与率

図 7-1 M8 クラスの地震によるサイト波の水平動及び上下動寄与率

図 7-2 M7 クラスの直下地震によるサイト波の水平動及び上下動寄与率

が水平動寄与率約 0.8 以上となり相対的に上下動の効果が小さくなるものの、依然として上下動寄与率が大きなサイト波もみられる。

次に、 $T_f=5$ 秒の場合について考察を行う。図 7-1（アスペクト比 5, RS20F, $T_f=5$ 秒）の M8 クラスの地震によるサイト波は、図 6-2（アスペクト比 5, RS20F, $T_f=3.5$ 秒）と同じ建物モデルよりもアイソレータの長周期化により、転倒モーメントによる付加軸力が小さくなって水平動寄与率が小さくなり、相対的に上下動寄与率が大きくなっている。水平動寄与率が約 0.4~1.0 と広く分布し、 $T_f=3.5$ 秒の場合（図 6-2）では上下動寄与率が 0.4 以下であるが、 $T_f=5$ 秒の場合（図 7-1）では、上下動寄与率が約 0.6 程度までと大きな寄与率となっていることを示している。また、図 7-2（アスペクト比 3, RS12F, $T_f=5$ 秒）の M7 クラスの直下地震によるサイト波は、特にアイソレータに引き抜きが生じるサイト波（図中●）に注目すると、図 6-3（アスペクト比 3, RS12F, $T_f=3.5$ 秒）よりもさらに上下動寄与率の値が大きくなり、水平動寄与率が小さくなっている。これは、アイソレータ周期の長周期化によりアイソレータの引き抜きに及ぼす水平動の影響を小さくしても、上下動成分の強さを有する直下地震のサイト波は、アイソレータの引き抜きに及ぼす影響が大きいことを示唆している。

8. 結論

日本の大都市である仙台、東京、横浜、名古屋、大阪及び福岡の

対象サイトにおけるアスペクト比 2.5 (RS10F) ～5 (RS20F) の 6 種類の高層免震建物を対象とした、想定地震によるサイト波の水平動 2 成分及び上下動成分の合計 3 成分同時入力による立体骨組振動系モデルの地震応答解析を行い、以下の結論を得た。

(1) M8 クラス及び連動による地震規模の大きな地震によるサイト波は、アイソレータ周期 3.5 秒の場合、震源が遠方であっても水平動やや長周期成分の効果が大きく作用し、アスペクト比の増加に伴ってアイソレータの付加軸力が大きくなり、アスペクト比 4.5～5 程度以上になると高層免震建物隅角部アイソレータに引き抜きを生じさせる可能性が高い。

(2) M7 クラスの内陸直下地震によるサイト波は、上下動成分の効果が大きく作用するため、高層免震建物の隅角部アイソレータに引き抜きを生じさせる可能性が高い。また、アイソレータ周期を長周期化して転倒モーメントによる付加軸力を小さくしても、上下動成分による効果が支配的となり、高層免震建物のアスペクト比に依らず、アイソレータに大きな引き抜きを生じさせる可能性が高くなる。

長町・利府断層地震による仙台・本町のサイト波は、アイソレータ周期 3.5 秒の場合、アスペクト比 4 以上の高層免震建物隅角部アイソレータに 1N/mm² 以上の引張面圧を生じさせる可能性が高い。

警固断層地震による福岡・天神のサイト波は、アイソレータ周期 3.5 秒の場合、アスペクト比 4.5 以上で隅角部アイソレータに 1.5N/mm² を超える大きな引張面圧を生じさせる可能性が高い。

(3) 本研究の対象サイトの名古屋及び大阪については、アイソレータ周期をそれぞれ 5 秒と 3.5 秒に設定したように、対象サイトの基盤構造による卓越周期とアイソレータ周期帯域の関係によっては、高層免震建物のアイソレータせん断歪みが 400%を超え、せん断破断する可能性が高い。よって、アイソレータ周期については、対象サイトの基盤構造に留意して選定することが望ましい。

謝辞

本論文における想定地震を対象とした各サイトの模擬地震動の作成にあたっては、(株)日建設計構造設計室・主査 山根尚志博士のお力添えに依るところ大である。茲に記して深甚の謝意を表する次第である。

なお、本研究の一部は平成 21 年度及び 22 年度科学研究費補助金 [基盤研究 (C) 20560533] によるものである。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：2009 年度免震制振建物データ集計結果, MENSIN, No.69, pp.38-42, 2010.8
- 2) 北村春幸, 野村綾, 川崎恵, 壇一男, 佐藤俊明：長寿命鋼構造建物が遭遇する複数の強震動を想定した累積損傷評価法の提案, 一名古屋三の丸地区で想定される強震動を対象として, 日本建築学会構造系論文集, 第 642 号, pp.1443-1452, 2009.8
- 3) 佐藤栄児, 酒井久伸, 福山國夫, 古川幸, 鎌田崇義, 寛淳夫, 小林健一, 井上貴仁, 中島正愛：医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験, 震災時における都市施設の安全性・機能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 650 号, pp.771-780, 2010.4
- 4) 池田雄一, 長橋純男：高層免震共同住宅を対象とした積層ゴムアイソレータの引き抜きに及ぼす地震動水平・上下両成分同時入力による影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 515 号, pp.75-82, 1999.1
- 5) 池田雄一, 長橋純男：耐震壁及び床スラブの曲げ剛性を考慮した高層免震建物の地震応答解析, 強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 620 号, pp.17-26, 2007.10
- 6) 池田雄一, 長橋純男：セットバック立面形状を有する高層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに関わる地震応答性状, 強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集, 第 651 号, pp.913-922, 2010.5
- 7) Aki, K：Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., 72, pp.1217-1231, 1967.2
- 8) Kanamori, H. and D. L. Anderson：Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., 65, pp.1073-1095, 1975.10

- 9) 山根尚志, 長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究, その 1 位相差分分布と地震動経時特性の関係に関する理論的背景, 日本建築学会構造系論文集, 第 553 号, pp.49-56, 2002.3
- 10) 山根尚志, 長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究, その 2 位相差分分布と震源・伝播・地盤特性の関係に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.55-62, 2002.9
- 11) 山根尚志, 長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究, その 4 ω^2 モデルで規定したフーリエ振幅と位相差分の標準偏差を基準として選択したフーリエ位相を用いた模擬地震動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 590 号, pp.45-53, 2005.4
- 12) 山根尚志, 長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究, その 3 ω^2 モデルに基づいた地震動評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp.55-64, 2003.10
- 13) 山根尚志, 長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究, その 5 水平動との相関関係に基づいた鉛直動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 609 号, pp.31-40, 2006.11
- 14) 地震調査研究推進本部：地震調査委員会, 長町ー利府線断層帯の評価, 2002.2, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/02feb_rifu/index.htm, 2010.11.14 参照
- 15) Wald, David J. and Paul G. Somerville：Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake：Geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, No.1, pp.159-177, 1995.2
- 16) 中央防災会議：首都直下地震対策専門調査会, 第 12 回資料, 地震ワーキンググループ報告書 (図表集), 2004.11
- 17) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会, 第 11 回資料, 2001.12
- 18) 中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会, 第 16 回資料, 2003.12
- 19) 地震調査研究推進本部：地震調査委員会, 上町断層帯の長期評価について, 2004.3, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04mar_uemachi/index.htm, 2010.11.14 参照
- 20) 地震調査研究推進本部：地震調査委員会, 警固 (げご) 断層帯の長期評価について, 2007.3, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/07mar_kego/index.htm, 2010.11.14 参照
- 21) 宮城県：平成 16 年度仙台平野南部地域地下構造調査に関する調査成果報告書, 地震調査研究推進本部, 2005.3, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Miyagi9frm.htm>, 2010.11.14 参照
- 22) 東京都：平成 15 年度 23 区内微動アレイ探査委託 (その 2) に関する調査成果報告書, 地震調査研究推進本部, 2004.3, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Tokyo8Cfrm.htm>, 2010.11.14 参照
- 23) 横浜市：平成 10 年度関東平野 (横浜市域) の地下構造調査に関する調査成果報告書, 地震調査研究推進本部, 1999.3, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Yokohama3frm.htm>, 2010.11.14 参照
- 24) 文部科学省：2003 年活断層調査成果及び堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 2003.11
- 25) 文部科学省研究開発局, 東京大学地震研究所, 京都大学防災研究所, 独立行政法人防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクト I 地震動 (強い揺れ) の予測「大都市圏地殻構造調査研究」平成 14 年度成果報告書, pp.536-561, 2003.5
- 26) 中道聡, 川瀬博：福岡市における三次元地下構造を考慮したハイブリッド法による広周期帯域強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 560 号, pp.83-91, 2002.10
- 27) 山根尚志, 長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究, その 7 連動型地震に関する波動の重ね合わせ技法, 日本建築学会構造系論文集, 第 649 号, pp.539-548, 2010.3
- 28) 佐藤俊明, 壇一男：関東地震による首都圏の広域強震動予測, 入力地震動, 日本建築学会免震構造設計指針第 3 版, pp.263-274, 2001.9
- 29) 柚木孝裕, 加藤朝郎, 寺村彰, 野畑有秀, 梅木克彦：免震建物の上下応答特性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.653-654, 1997.9
- 30) 大宮幸, 寺本隆幸：免震建物の調査研究 ー公表されたデータに基づく免震建物の傾向把握ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.513-514, 2006.9
- 31) 竹中康雄：実建物モデルによる検討, シンポジウム「免震構造の研究と設計」, 日本建築学会 免震構造小委員会, pp.41-46, 1996.10
- 32) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能, 日本建築学会技術報告集, 第 1 号, pp.160-165, 1995.12
- 33) 菊池優, 北村佳久, 林章二, 河島庸一, 坂口達, 山田親文：引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 524 号, pp.57-64, 1999.10
- 34) 高山峯夫：免震構造物の終局耐震性能と応答評価指標, シンポジウム増大する地震動レベルと建物の終局耐震性の課題と展望 ー地震動と建築物の耐震性との関係を横断的に評価する指標の確立に向けてー, 日本建築学会 構造委員会 振動運営委員会 耐震設計小委員会, pp.89-106, 2008.12

(2010 年 7 月 10 日原稿受理, 2010 年 11 月 5 日採用決定)