

直下型地震動を受ける超高層免震建物の地震応答解析

2. 構造—2. 振動—i. 免震

免震構造 免震層変位 衝突

上町断層 大震研 クリアランス

1. はじめに

平成7年(1995年)兵庫県南部地震の直下型地震により、建物被害が多く発生した。その際に免震構造の建物の有効性が確認され、周知されたことにより、免震構造は1995年以降多くの建物に適用されだした^[1]。免震構造は建物の地震応答を低減させる有効な手段として普及が進み、高層建物にも採用されている。しかしながら、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震、平成28年(2016年)熊本地震、令和6年能登半島地震を始めとし、建築基準法で定める範囲を超える大地震動が観測されている。特に断層近傍で生じる地震では地表付近での強い地震動により、免震層が想定外の大きな変形や加速度を生じる可能性がある。免震建物では、免震層に設けられるクリアランスがその最大変位を考慮して設けられており、60cmとされているものが多い。想定外の大地震動に対してはこのクリアランスを超過する可能性がある。このような大地震が大都市圏で発生すると多大な被害が発生すると考えられる。大阪府域を縦断する上町断層帯は都市直下で活動する活断層であり、大阪府が公表した想定地震動は建築基準法で規定される設計地震動を大きく上回る。このような地震動特性下では、上町断層の地震動を免震建物が受ける場合、既設計建物の応答について、14の免震建物が選定され検討されているに過ぎない^[4]。上町断層帯地震のような都市直下型地震に対する免震建物(超高層建物470棟の2割以上を占める^[5])の応答を調査することは重要である。

本研究の目的は、上町断層帯地震に対する超高層免震建物の免震層変位の応答特性を調査し、擁壁への衝突問題について言及することである。

2. 研究方法

本研究では、上町断層帯地震を対象とし高層免震建物の地震応答を解析する。解析には時刻歴応答解析プログラム Dynamic PRO を用いる。入力地震動は上町断層帯地震の想定地震動^[4]を採用する。そこから免震層最大変位を算出し、擁壁への衝突について検討する。

準会員 ○ 黒田真央^{*1}
正会員 荘所直哉^{*3}

準会員 河村咲季^{*2}
正会員 永野康行^{*4}

3. 例題

3.1 建物モデルの概要

本研究では、免震構造の特性の違いが地震応答に及ぼす影響を検討するため、4つのモデルを用意した。各モデルは比較可能となるよう設定し、作成した。モデル概要を表1に示す。構造種別は全てRC造とする。

表1 設定建物モデルの概要^[2]

	25階モデル	30階モデル	47階モデル	70階モデル
建築高さ(m)	100	93	150	243
固有周期(s)	2.00	1.98	2.96	4.86
総重量(kN)	187500	356261	857419	1513733
柱本数	32	35	57	64
塑性タイプ	線形	線形	線形	線形
減衰タイプ	剛性比例型	剛性比例型	剛性比例型	剛性比例型
減衰定数	0.02	0.02	0.02	0.02

次に各モデルに作成した免震装置について述べる。免震装置には、ゴム高分子に特殊な重鎮材を加えた配合によってゴム材料自体に高いエネルギー吸収性能を与えた積層ゴムである高減衰ゴムを用いた^[3]。この免震装置を用いて免震層を作成する。免震層を作成する手順は免震装置一つあたりに抱え面圧を算出する。そして免震装置の製品仕様書^[3]から前文で求めた面圧を上回る座屈面圧性能を持つ製品を特定する。そして特定した免震装置の水平剛性を基に免震層全体の剛性を算定する。よって、免震層作成手順とする。全モデルで最低限の性能を持つ免震装置を採用した。各建物の固有周期を表2に示す。

表2 建物モデルの固有周期

建築モデル	固有周期(s)	
	耐震	免震
25階モデル	2.00	3.71
30階モデル	1.98	4.19
47階モデル	2.96	5.16
70階モデル	4.86	8.97

3.2 入力地震動

地震応答の解析において、日本建築構造技術者協会 関西支部 大震研委員会が公開している地震動を採用した。また、上町断層帯の地域をいくつか分割し、地震のレベルは予測地震大きさのうち平均的なレベルの 3A、より安全性を高めたレベルの 3B、特段に高い安全性を高めるレベルの 3C の 3 つの段階を採用し、解析する。本研究ではフラットタイプの地震動を活用した。

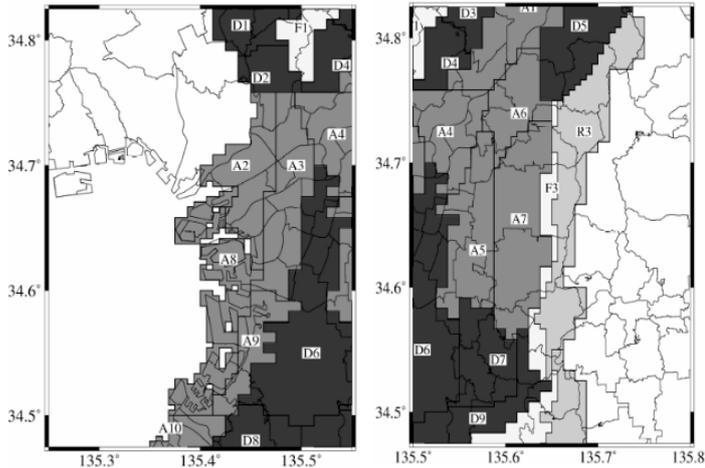


図 1 大阪府の区域分類^[4]より転載

4. 解析結果

本節では Dynamic PRO を用いて出た解析結果を 4 つのモデルごとに分析する。

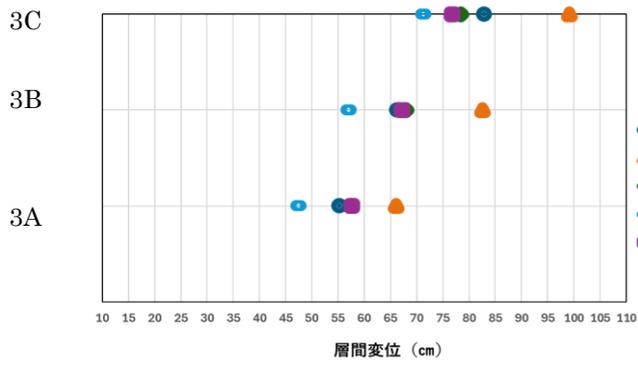
まず、25 階モデルを分析する。NS 方向において、3A のレベルでは A3 の地域のみ層間変位がクリアランスの 60 cm を超えている。それ以外の A2、A5、A8、D6 の地域は層間変位が 60 cm 以下の値を示した。層間変位の値が多い地域順は D6、A3、A2、A8、A5 である。3B のレベルでは A2、A3、A5、A8、D6 の地域は層間変位が 60 cm を超えた。一方、A8 の地域のみ層間変位が 60 cm 以下となった。層間変位の値が大きい地域順は A3、D6、A2、A8、A5 である。3C のレベルでは全ての地域で層間変位の値が 60 cm を超えた。層間変位の値が大きい地域順は A3、A2、D6、A8、A5 である。EW 方向において、3A のレベルでは A2、A5 の地域は層間変位が 60 cm を超えたが、A3、A8、D6 の地域では 60 cm 以下となる。層間変位の値が大きい地域順は A2、A3、D6、A8、A5 である。3B、3C のレベルでは全ての地域で層間変位が 60 cm を超えたが、3B より 3C の層間変位の方が 60 cm を大幅に超えた。3B のレベルにおいて層間変位の値が大きい順は A3、D6、A2、A8、A5 である。3C のレベルにおいては A3、A2、D6、A8、A5 である。NS 方向と EW 方向の両方に共通していることは各レベルにおいて最小値は全て A5 の地域である。

次に、30 階モデルを分析する。NS 方向において、3A の

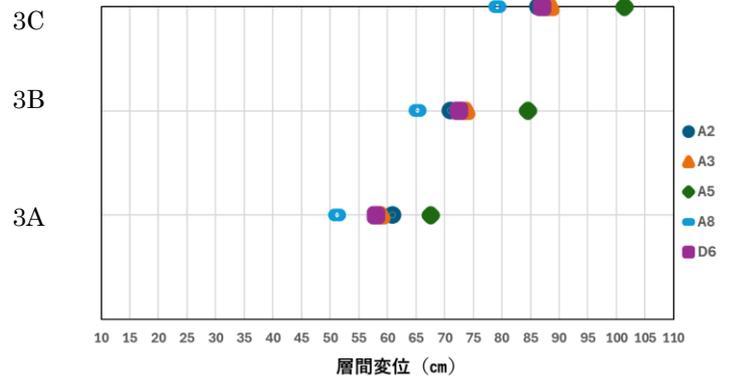
レベルでは A3、D6 の地域は層間変位が 60 cm を超える。A2、A5、A8 の地域は 60 cm 以下を示した。層間変位の値が大きい地域順は D6、A3、A5、A2、A8 である。3B の地域では 3A と同様の結果を示した。3B のレベルにおける層間変位の値が大きい地域順は A3、D6、A5、A2、A8 である。3C のレベルでは全ての地域において層間変位が 60 cm 以上を示した。層間変位の値が大きい地域順は A3、D6、A2、A8、A5 である。NS 方向において、A3、D6 の地域は各レベルにおいて層間変位の値が大きかった。EW 方向において、3A のレベルでは A5、D6 の地域は層間変位が 60 cm を示した。A2、A3、A8 の地域は 60 cm 以下を示した。層間変位の値が大きい地域順は A5、D6、A2、A3、A8 である。3B、3C のレベルでは両者どの地域も層間変位が 60 cm 以上を示したが、3C の方が大幅に 60 cm を上回った。3B と 3C のレベルにおける層間変位の値が大きい地域順は両者とも A5、D6、A3、A8、A2 である。

次に 47 階モデルを分析する。NS 方向において、3A のレベルでは全ての地域の層間変位が 60 cm 以下の値を示した。層間変位の値が大きい地域順は D6、A3、A2、A8、A5 である。3B のレベルでは、A3、D6 の地域は層間変位が 60 cm 以上を示し、A2、A3、A5、A8 の地域は 60 cm 以下を示した。層間変位の値が大きい地域順は A3、D6、A2、A8、A5 である。3C のレベルでは全ての地域の層間変位が 60 cm 以上の値を示した。層間変位の値が大きい地域順は A3、A2、D6、A8、A5 である。EW 方向において、3A のレベルでは全ての地域の層間変位が 60 cm 以下を示した。層間変位の値が大きい地域順は A2、A3、D6、A8、A5 である。3B、3C のレベルでは全ての地域において層間変位が 60 cm を超えていた。3B のレベルにおいて、層間変位の値が大きい地域順は A3、D6、A2、A8、A5 である。3C のレベルにおいて、層間変位の値が大きい地域順は A3、A2、D6、A8、A5 である。NS 方向と EW 方向の両者に共通していることは、どのレベル・地域において A5 の地域の層間変位が最小値を示す。

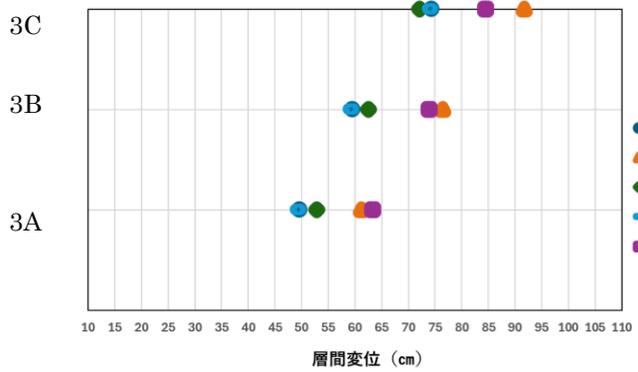
最後に 70 階モデルを分析する。NS 方向において、3A、3B、3C の全てのレベルにおいて各地域の層間変位が 60 cm 以下を示した。3A のレベルにおいて、層間変位の値が大きい地域順は A3、D6、A8、A2、A5 である。3B と 3C は両者とも、層間変位の値が大きい地域順は A3、A8、D6、A2、A5 である。EW 方向において、3A、3B、3C の全てのレベルで各地域層間変位が 60 cm 以下を示した。また、3A、3B、3C のレベルにおいて、層間変位の値が大きい地域順は全て A2、A3、A8、D6、A5 である。NS 方向と EW 方向の両者に共通していることは層間変位の最小値は A5 の地域である。



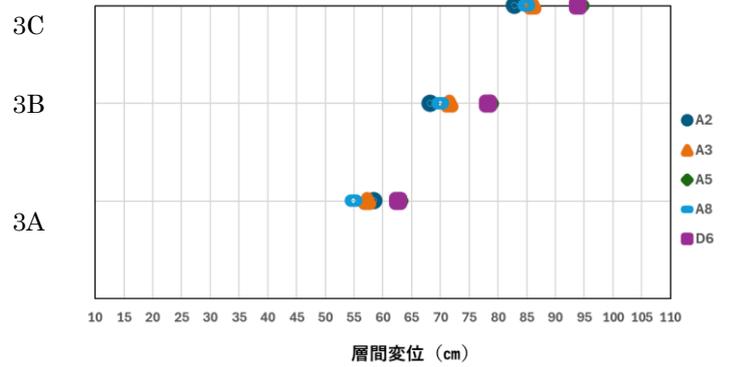
25 階モデル NS 方向



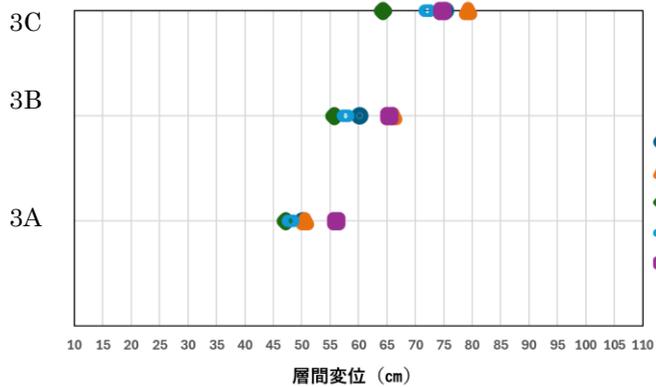
25 階モデル EW 方向



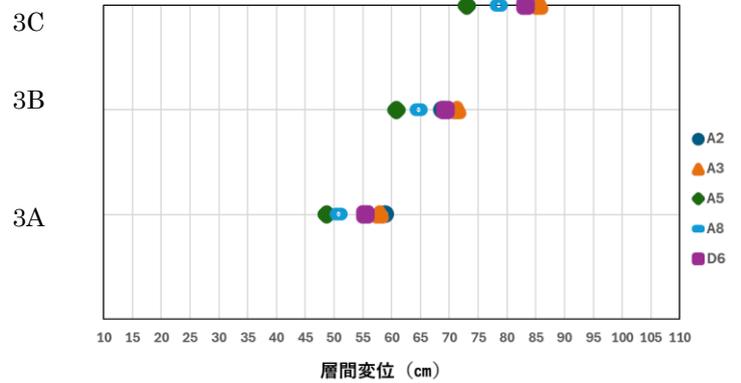
30 階モデル NS 方向



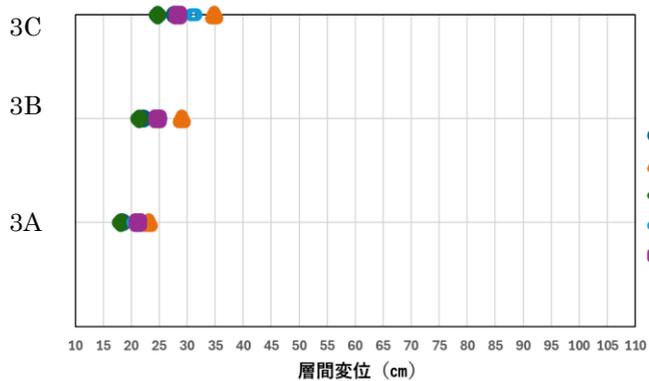
30 階モデル EW 方向



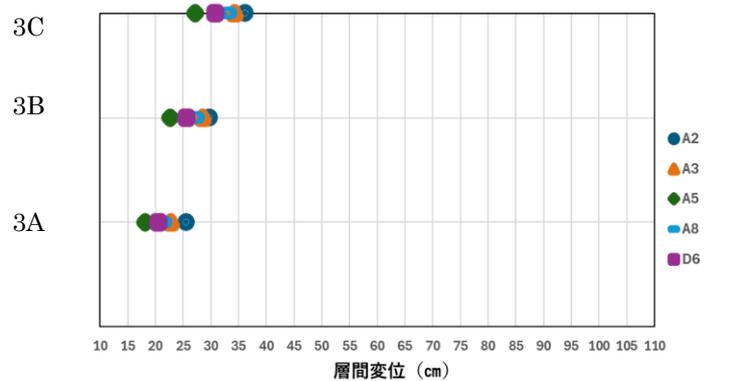
47 階モデル NS 方向



47 階モデル EW 方向



70 階モデル NS 方向



70 階モデル EW 方向

図 2 各建物モデルの免震層最大変位

4. まとめ

本研究では、上町断層帯地震を入力地震動とし、4つの高さの異なる高層免震建物の地震応答として得られる免震層最大変位の値を検討した。

結果として3A→3B→3Cと3段階のレベルが上がるごとに4つのモデルのどの地域においても層間変位の値は大きくなった。この傾向はNS方向およびEW方向の両者において一貫している。層間変位の大小関係は、モデルの高さや方向が異なっても大きく変化しない。層間変位において、NS方向よりEW方向の方が層間変位の値が大きくなった。また、25階、30階、47階のモデルでは3Cのレベルにおいて多くの地域で層間変位がクリアランスである60cmを超過している。この結果からクリアランス超過における衝突はやむを得ない結果となった。

一方で、70階モデルのような免震層を通常より硬い設計の物にすると全てのレベル・地域で60cm以下となった。

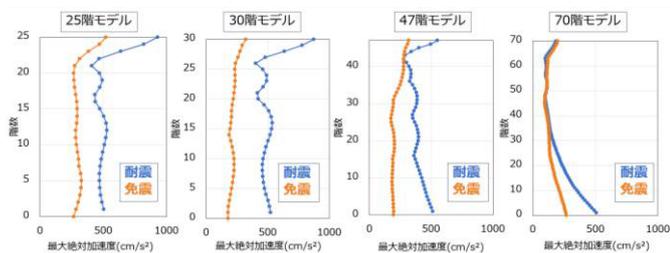
今後の展望として、25階モデル、30階モデル、47階モデルの免震層を硬く設計したり、ダンパーを入れたりするなど、免震層の設定を操作することで、3Cのレベルでも耐えることが出来るのか解析し、調査していく。

謝辞

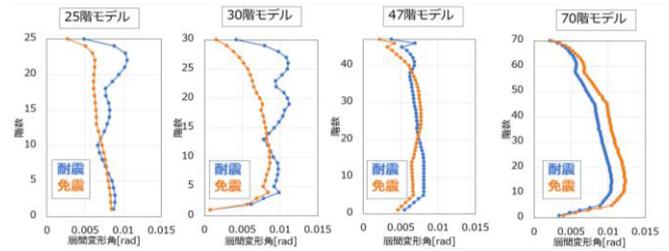
時刻歴応答解析にはユニオンシステム株式会社より導入している「研究室バック」のうちDynamic PROを使用した。ここに記し、謝意を表す。

付録

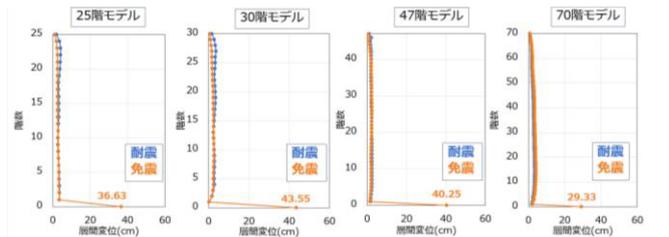
地震応答解析用の耐震モデルと免震モデルに入力地震動(告示波、JMA神戸NS位相、極稀レベル)を入力した時の応答結果を以下に参考に示す。付図1に最大絶対加速度応答、付図2に最大層間変位角(上部構造)、付図3に最大層間変位応答を示す。



付図1 最大絶対加速度応答



付図2 最大層間変位角(上部構造)



付図3 最大層間変位応答

参考文献

- [1] 日本免震構造協会：免震建築物等の計画推移、p.1、2025.6
<https://www.jssi.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2025/06/2024nendo-datasyuseki.pdf>
 (最終閲覧日：2026年1月4日)
- [2] 建築研究所：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討ー長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ3連動地震による超高層・免震建物の応答解析ー、建築研究資料、pp.4-160~4-182、2013.8
<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publication/s/data/144/4.pdf>
 (最終閲覧日：2026年1月4日)
- [3] ブリヂストン：建築免震用積層ゴム製品仕様一覧2024 Vol.1、pp.21-24、2024.
https://www.bridgestone.co.jp/products/dp/antiseismic_rubber/product/pdf/product_catalog_202411r3.pdf
 (最終閲覧日：2026年1月4日)
- [4] 日本建築構造技術者協会 関西支部 大震研委員会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針 2020 2版、2020.
<https://jscakansai.com/%E5%A7%94%E5%93%A1%E4%BC%9A/%E5%A4%A7%E9%9C%87%E7%A0%94%E5%A7%94%E5%93%A1%E4%BC%9A/>
 (最終閲覧日：2026年1月4日)
- [5] 林康裕、村瀬詩織、杉野未奈：大阪府域に立地する超高層建物、日本建築学会技術報告集、第24巻、第58号、pp.1075-1078、2018.10

*1 兵庫県立大学環境人間学部環境人間学科 3年
 *2 兵庫県立大学環境人間学部環境人間学科 4年
 *3 兵庫県立大学環境人間学部 准教授・博士(工学)
 *4 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)

*3rd-year undergrad, Sch. Hum. Sci. and Env., Univ. Hyogo *1
 *4th-year undergrad, Sch. Hum. Sci. and Env., Univ. Hyogo *2
 *Assoc. Prof., Sch. Hum. Sci. and Env., Univ. Hyogo, Dr. Eng. *3
 *Prof., Grad. Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. Hyogo, Dr. Eng. *4