

1. はじめに

発生が予測される南海トラフ地震などの巨大地震は、長周期成分が卓越し継続時間の長い地震動を発生させ、超高層建築物の応答を増大させる危険性が指摘されている^{1),2)}。そこで BCP の観点から、安全性や耐震余裕度を高めた免震建物が求められている。筆者らは超高層建物を対象に、より耐震性能の高い免震架構としてコア貫通型複層免震架構を提案する(以降、提案架構)。提案架構は、1 つの架構内に複数の免震層を有し、建物全層を貫通するコア部直下に免震層を有する架構である。本論文では超高層建物において、従来免震構造^{3),4)}よりもワンランク上の耐震性を保有する架構を新しく提案し、その応答低減効果について検討する。筆者らが目指す具体的な目標性能値は、Lv.2 地震動(極めて稀に発生する地震動)に対して建物全層の加速度が 100cm/s^2 以下、層間変形角が $1/400$ 以下、かつ免震層変形が 400mm 以下と設定した。なお、これら目標値については、日本建築構造技術者協会(JSCA)が発行する性能設計説明書に記載の耐震性能グレード⁵⁾が免震特級よりも、ワンランク上の応答値である。これら目標値を達成するために考案した提案架構は、コアが建物全層を貫通し、コア下に免震層を有す点で既出の架構とは異なる。コア下免震層の変形は、2 層の免震層変形に追従する構造であるため、他の免震層変形の約 2 倍となる。すなわち、コア下免震層に設置するダンパーが効率的にエネルギー吸収し、既出の免震構造よりも大きな減衰性能を付与できる利点がある。本論文では、先に示した目標性能を設定し、その実現可能性を検討する。まず 2 質点系モデルを作成し、従来免震構造以上に応答低減が可能となる効果的な免震諸元について、複素固有値解析や周波数伝達関数を用いて明らかにする。次に、超高層建物を模擬する多質点系モデルを作成して地震応答解析を実施し、設定した目標性能の実現可能性を検討する。

2. 対象とするモデル

図 1 に提案架構の概念図を示す。提案架構は、基礎免震層だけでなく中間免震層を追加した複層免震架構であり、中間免震層以下(以後、基壇部と称す)とは絶縁され、中間免震層以上の構造(以後、基準階と称す)と一体化したコアを建物全層に貫通させた特徴を有す。さらにコア下には免震層が設けられている。建物全層にコアを貫通させることにより縦動線を確認し、かつ地震力を伝達することが可能な構造的な心棒としている。またコア下の免震層変形は、基礎免震層と中間免震層の変形のおおよそ和となるため、免震層 2 層分の変形が生じる。当該部に減衰装置(ダンパー)を設置することで、非常に効率的なエネルギー吸収が可能となり、大きな減衰性能を付与できる。

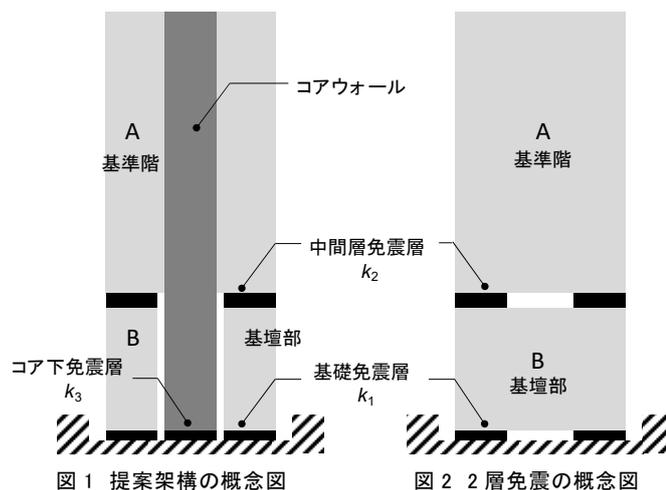


図 1 提案架構の概念図

図 2 2層免震の概念図

本論文では本提案架構の応答低減効果を検証するために、提案架構から全層貫通するコアを無くし、基準階と基壇部を免震層で分割した一般的な複層免震架構(以降、2層免震)と比較検討する。2層免震の概念図を図 2 に示す。両架構とも中間免震層より上層部を質点 A、基壇部を質点 B とし

て2質点系せん断型モデルに置換し、図3に示す。本検討ではコアウォールの剛性は剛とし、基礎免震層、中間免震層、コア下免震層の剛性をそれぞれ k_1 、 k_2 と k_3 とし、減衰係数の記号も剛性と同様とする。なお、2層免震においては k_3 、 c_3 を0とすることで同モデルにより表現可能である。また図3に両解析モデルの1次の振動モード図を示す。ここで、質点A、Bの固有ベクトルをそれぞれ r_A 、 r_B とすると、 r_A を基準にした場合の固有ベクトル比を γ と定義し、質点A、Bの質量を、それぞれ m_A 、 m_B とすると質量比(m_A/m_B)を μ と定義する。 k_1 を基準とした k_2 と k_3 の剛性比を α と β と設定する。固有ベクトル比 γ が2の場合は直線モードを表し、1次モードに起因する振動だけを考えれば、基礎免震層と中間免震層の変形は等しくなる。

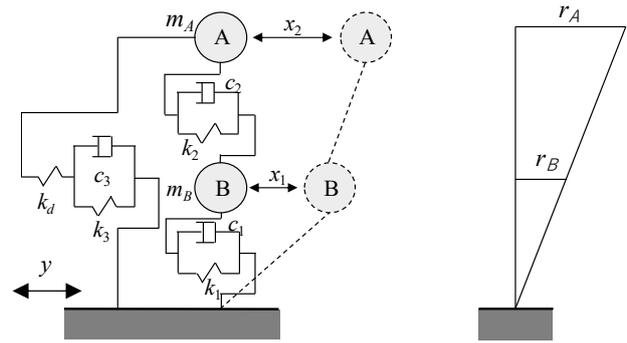
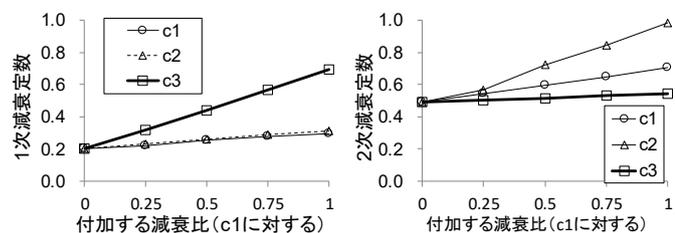


図3 2質点系解析モデルと1次振動モード

3. 免震諸元による提案架構の応答低減効果

3.1 コアウォール下の減衰(c_3)

図3の2質点系モデルを用い、各免震層の減衰係数 c_1 、 c_2 、 c_3 をパラメータとして複素固有値解析を実施し、各減衰の変化による1次と2次の減衰定数の変化について検討する。解析モデルの諸元は、1次固有周期を7.0秒とし、基礎免震層と中間免震層の減衰係数 c_1 と c_2 は初期条件として、1次固有周期に対してそれぞれ20%となるよう設定する。この初期状態から c_1 、 c_2 、 c_3 を初期の c_1 に対して各々0~1.0倍まで変化させる。図4(a)、(b)に検討結果を示す。図4(a)より、 c_3 を増加させることで、 c_1 、 c_2 を増加させるケースと比較して1次減衰定数が大きく増加しているのがわかる。一方で、図4(b)より、2次減衰定数は、 c_3 を増加させても大きく変わらない。これは、 c_3 を増加させることで2次の減衰定数を過減衰とすることなく1次減衰定数のみを大きく増加できることを示している。つまり、提案架構の特徴である2倍の変形が生じるコア下免震層の減衰(c_3)をより多く設置することで、1次の振動を効果的に低減可能と言える。



(a) 1次減衰定数 (b) 2次減衰定数

図4 各減衰係数を変化させた場合の減衰定数の変化

3.2 免震層剛性比

提案架構の各免震層の剛性を変化させ、加速度の周波数伝達関数を比較する事で、提案架構における応答低減効果が大きい剛性比について検討した。表1に比較する4つの解析モデルの諸元を示す。各モデルの1次固有周期は7.0秒で統一し、固有ベクトル比により4つのケースを設定する。基礎免震層と中間免震層の変形を同一($\gamma=2$)とするモデル(Case1, Case2)を基準とし、質点Aが質点Bと比較し大きく振動する場合($\gamma=3$)をCase3、逆に中間免震層の変形が小さい場合($\gamma=1.4$)をCase4として設定する。表中の剛性比は、全てのケースでCase1の k_1 を基準としている。

表1 2質点系解析モデル諸元

$\mu=1.0$ (μ :質量比)		2層免震		提案架構	
		Case1	Case2	Case3	Case4
固有ベクトル比	γ	2	2	3	1.4
周期(s)	T	7.00	7.00	7.00	7.00
剛性比 (k_1 基準)	k_1	1.00	1.10	1.20	0.83
	k_2	0.66	0.65	0.42	0.83
	k_3	0.00	0.22	0.24	0.25
	α	0.67	0.59	0.35	1.00
減衰比 (c_1 基準)	β	0.00	0.20	0.20	0.30
	c_1	1.00	1.00	1.00	1.00
	c_2	0.67	0.13	0.13	0.13
	c_3	0.00	0.54	0.54	0.54

ここで、図3に示す解析モデルは層変位に対する座標系を用い質点Aの変位を x_2 、質点Bの変位を x_1 として、地動入力加速度 \ddot{y} とすれば式(1)に示す振動方程式が構成できる。式(2)で表される固有値問題から固有ベクトルの比(r_A/r_B)で整理した式(3)、式(4)を得る。ここで $\gamma = r_A/r_B$ として式(3)、式(4)を用いて、 γ を表したのが式(5)である。表1の免震諸元は式(5)を用いて算出している。Case1の減衰は1次固有周期に対して剛性比例減衰として20%となるよう c_1 と c_2 を設定する。Case2~Case4の減衰は、3.1節の結果より c_3 の応答低減への影響が大きいと判明したため、Case1の c_2 を c_3 に8割振り分ける。なお、Case1~Case4の c_1 の減衰量は変えていない。

$$\begin{bmatrix} m_A & 0 \\ 0 & m_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_A & 0 \\ 0 & m_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y} \dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} k_3 + k_2 - \omega^2 m_A & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_1 - \omega^2 m_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_A \\ r_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots (2)$$

$$\frac{r_A}{r_B} = \frac{k_2}{k_3 + k_2 - \omega^2 m_A} \dots (3) \quad \frac{r_A}{r_B} = \frac{k_2 + k_1 - \omega^2 m_B}{k_2} \dots (4)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha} - \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) \frac{1}{\mu} \right\} \pm \sqrt{\left[\frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha} - \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) \frac{1}{\mu} \right\} \right]^2 + \frac{1}{\mu}} \dots (5)$$

Case1~Case4について各質点の加速度について周波数伝達関数を算出し、図5(a),(b)に示す。図5の(a)より、質点Aの加速度は2層免震架構のCase1と比較し、提案架構は全てのケースにおいてピーク値が50%程度の大幅な応答低減となっている。これは提案架構の c_3 に減衰を振り分けたことにより、1次の減衰定数が増加したためだと考えられる。また図5の(b)よりCase2~Case4を比較すると、質点Bの加速度について、 γ が大きい程2次の応答が励起されていることがわかる。提案架構は、応答加速度が全層で 100cm/s^2 以下を目標クライテリアと設定しているため、加速度に影響が大きい高次モードの応答低減が重要である。従って、図5(b)に示すCase4のように質点Bの2次の振動を抑える事が望ましく、提案架構における γ の効果的な範囲として、本論文では $1.0 < \gamma < 2.0$ を設定する⁶⁾。

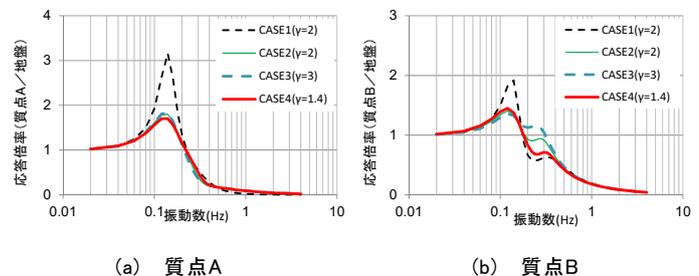


図5 応答加速度伝達関数

4. 多質点系せん断型モデルによる地震応答解析

3章で提案した効果的に応答低減が可能な免震諸元を適用した提案架構について、多質点系せん断型モデルを作成し時刻歴応答解析を行う。本章では、目標性能である応答加速度 100cm/s^2 以下かつ層間変形角 $1/400$ 以下、免震層変形 400mm 以下が実現可能であるかの検討結果を示す。対象とする建物は地上31階の超高層建物で1~3階を「基壇部」、4~31階を「基準階」とし、大きく二つのボリュームで構成された複合施設を想定する。ここで、提案架構の有効性を示すための比較として、コア部が貫通せず中間層免震層で分断される場合の2層免震架構と、基壇部を耐震構造としその上部に中間層免震を設けた従来の通常免震についても検討する。

4.1 解析モデル

提案架構は、図6(a)に示す通りコア下の基礎免震まで連なる基準階とコア部からなるA部と、基礎免震と中間層免震とに内包された基壇部Bとで構成する等価せん断型の多質点系でモデル化する。2層

免震および通常免震も同様にそれぞれ図6(b),(c)に示す通りモデル化する。

各モデルの免震層諸元を表2に示す。提案架構と2層免震の免震層剛性については、3章で示したように、AとBからなる2質点系に置換して求めた1次固有ベクトル比 γ が提案架構にあつては $\gamma=1.77$ 、2層免震にあつては $\gamma=2.0$ となるようにし、尚且つ1次の固有周期が約7.5秒となるように諸元を設定する。一方、通常免震は鋼材系ダンパーと天然ゴム系積層ゴムの併用を想定したバイリニア型の復元力特性とし、免震層歪200%時に1次固有周期が約5.0秒となるようにする。なお、提案架構および複層架構は天然ゴム系積層ゴムのみで線形とする。

減衰については、構造減衰として免震層を除く各層に剛性比例で2%の減衰を付与する。2層免震では1次の減衰定数がおおよそ12%となるように剛性比例で免震層に粘性減衰を与える。提案架構は、コア下免震層に50000[kNs/m]の粘性減衰を与え、他の免震層には2層免震で与えた減衰量の総和と等しくなるように勘案して配置する。

一方、通常免震は粘性減衰と等価線形化して得られる履歴減衰を合わせた1次の減衰定数が約12%となるように与える。なお各モデルとも粘性減衰はオイルダンパーを想定し、リリース速度0.32m/sとするバイリニア型としている。ここで、提案架構について設定した免震諸元は質量比 $\mu=2.43$ 、 $\alpha=1.0$ 、 $\beta=0.12$ 、 $\gamma=1.77$ であり、2層免震の免震諸元は $\mu=2.00$ 、 $\alpha=0.8$ 、 $\beta=0.0$ 、 $\gamma=2.00$ である。

時刻歴応答解析に用いる入力地震動は、JMA神戸NS位相とランダム位相のLv.2に基準化した基盤波を用いる。Lv.2を超える地震動として南海トラフ地震を想定した区域OS1と区域CH1の基盤波⁷⁾、さらに2016年に発生した熊本地震の本震における、益城町宮園⁸⁾で観測されたEW方向の地震波を対象とする。

4.2 解析結果

図7に最大応答加速度、図8に最大応答層間変形角を示す。図7の最大応答加速度において、提案架構は1次固有周期の長周期化したことと、コア下免震層に減衰を集中配置したことにより、Lv.2に基準化した2波とOS1の3つの入力地震動に関しては、全層で応答加速度100cm/s²以下を実現できている。一方で、2秒以下の短周期成分を多く含むCH1と益城町の地震動に関しては、中間免震層以下の基壇部(B部)と最上階で100cm/s²を若干超えているが、通常免震と比較し、応答加速度を約6割低減できている。また、図8に示す層間変形角に関しては、2層免震と通常免震に対して5波全ての地震動において大きく減少しており、全層で1/400以下となっている。図9に各免震層の最大応答変形を示す。提案架構の免震層変形は基礎部および中間部いずれもJMA神戸NSおよび告示ランダム位相では250mm以下で、最大の益城町宮園EWでも398mmであり、目標性能として設定した400mm以下である。また、コア下基礎免震層の変形はOS1の時に最大で708mmとなるが、これはゴム

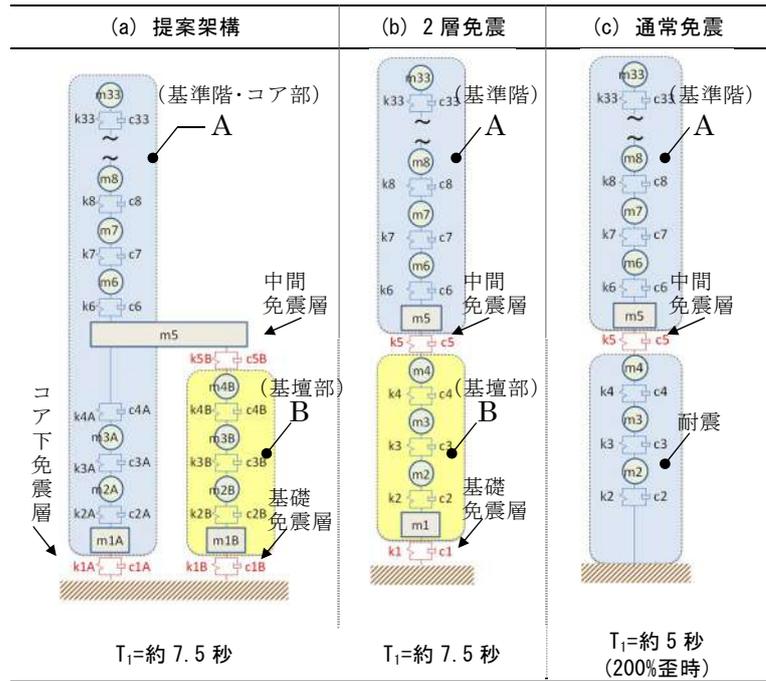


図6 多質点系解析モデル

表2 各モデルの免震層諸元

免震層諸元	提案架構		2層免震		通常免震	
	剛性 [kN/m]	粘性減衰 [kNs/m]	剛性 [kN/m]	粘性減衰 [kNs/m]	剛性 [kN/m]	粘性減衰 [kNs/m]
中間免震層	160000	30000	176000	57500	227500	25000
基礎免震層	160000	50000	220000	72500	-	-
コア下免震層	18900	50000	-	-	-	-

総厚 320mm を想定すれば性能保証変形 800mm 以下を満足できる。さらに、JMA 神戸 NS 位相入力時のコア部 A(m1A)と基壇部 B(m1B)の最下層における相対応答変形の時刻歴波形を図 10 に示す。質点 A と B は、常に概ね同位相で動いており、コア外周の免震クリアランス部分で適切なクリアランス(ここでは 400mm 程度)を確保すれば A と B が衝突する怖れはないことがわかる。

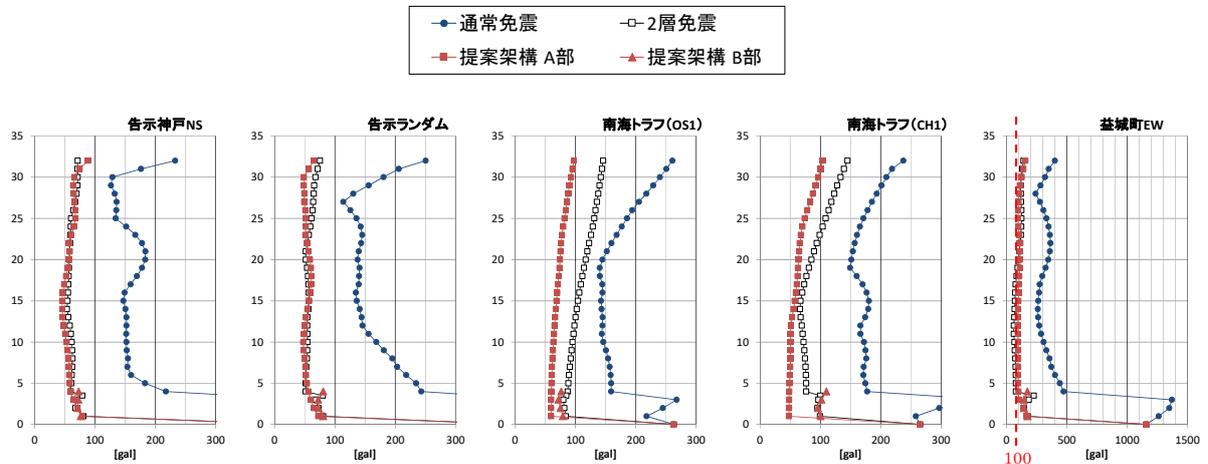


図 7 最大応答加速度

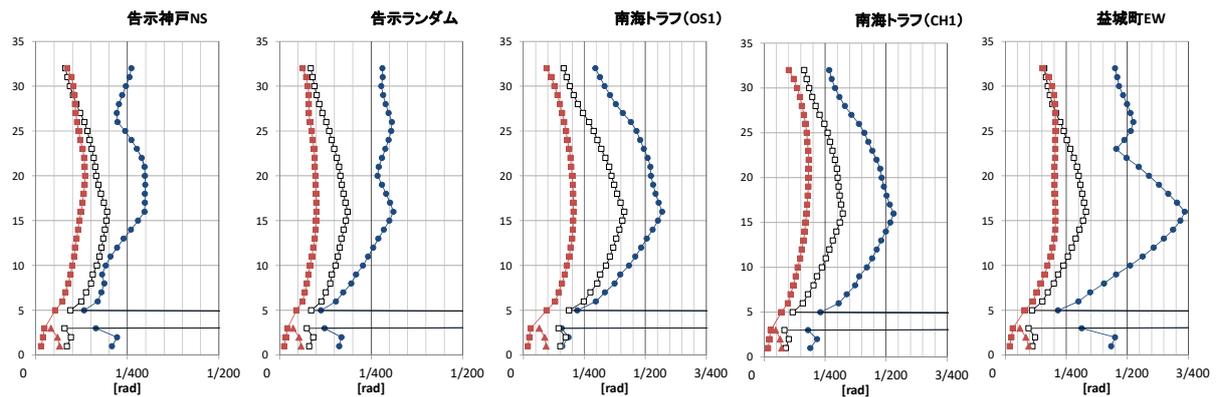


図 8 最大応答層間変形角

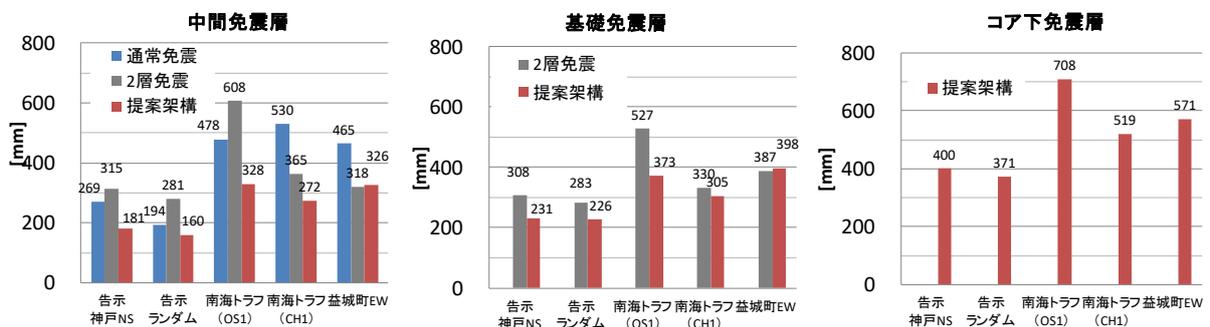


図 9 免震層の最大応答変形

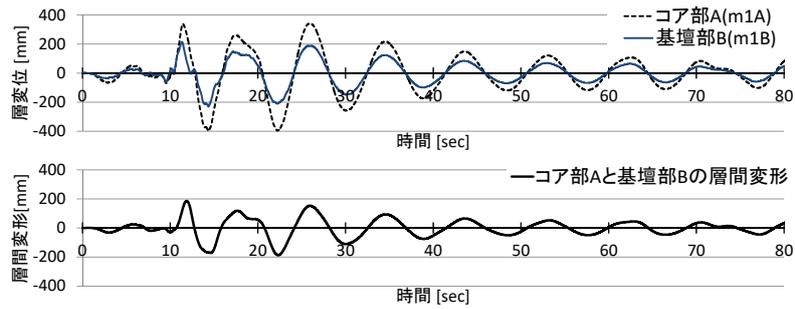


図 10 質点 A, B の最下層における層変位(上段)と層間変形(下段)

5. まとめ

本論文では、1つの架構内に複数の免震層を有し、建物全層を貫通するコア部直下にも免震層を有する新しい免震架構を提案した。提案架構に関して効果的な応答低減を実現するための免震諸元を検討するとともに、その諸元を用いた多質点系モデルによる地震応答解析を実施した。これらの結果から以下の知見を得た。

- ① コアウォール下の減衰量を増加させることで2次の減衰定数を過減衰にせず、1次の減衰定数のみ増加させることが可能となる。よって、コアウォールとコア下免震層を持たない2層免震架構と比較し、共振域において大幅な応答低減効果が期待できる。
- ② 各免震層の剛性比を固有ベクトル比が $1.0 < \gamma < 2.0$ となるよう設定することで、中間免震層以下の高次モードを低減することができる。
- ③ Lv.2 に基準化した地震動に対しては、建物全層の応答加速度が 100cm/s^2 以下を実現した。Lv.2 を超える地震動に対しても通常免震よりも大幅に加速度を低減することができ、検討した全ての地震動に対して層間変形角を $1/400$ 、かつ免震層変形 400mm 以下を実現した。

【参考文献】

- 1) 建築研究所:長周期・長時間地震動の予測のためのデジタルデータの公開(2014年11月25日)について,資料1
- 2) 日本建築学会構造委員会・振動運営委員会:シンポジウム東日本大震災から5年-建築振動工学の到達点と残された課題-,2016
- 3) 山本雅史 他:複数の免震層を持つセットバックした建物の動的挙動(その1~その3),日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),B-2, pp. 633-638, 2015.9
- 4) 辻聖晃 他:複数の免震層を有する多段免震構造の地震応答特性,日本建築学会構造系論文集,第79巻 第705号, pp. 1613-1623, 2014.11
- 5) 一般社団法人 日本建築構造技術者協会:JSCA 性能設計説明書 2017年版【耐震性能編】,2018.3
- 6) 杉本 他:免制震複合システムに関する研究(その1,2),日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),B-2, pp.835-837, 2017.9
- 7) 国土交通省:超高層建築物における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について,別紙2:長周期地震動を考慮すべき主な地点と地震動の考え方:2015.12
- 8) 気象庁 HP:http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/