

対地震構造システムへの時流

— 「免震構造」「制振構造」から「対地震構造」へ —

日本大学理工学部建築学科教授 秦 一 平

1. はじめに

阪神淡路大震災から約24年が経過した。その教訓から免震構造と制振構造が劇的な進歩を遂げ、多くの建物に採用されている事例が多くなった。特に平成23年の東日本大震災、平成28年の熊本地震においては、免震構造や制振構造が有効に機能していた事例が報告されている。

免震・制振の技術開発に関わる動向は、性能検査におけるデータ改ざんが報じられるなど、免震・制振研究に関しての根拠を脅かす状況になっている。しかし、大地震に対する被害低減において必要な技術であることに変わりはなく、今後も技術開発は進化を遂げていくものだと思っている。特に、免震構造の基本となる支承材は、ゴム材質の改良とともに進化し、繰り返し依存性、温度依存性や耐久性の向上が見られている。また、制振構造においては、オイルダンパーなどの粘性系ダンパーや鋼材系の履歴ダンパーの開発が進み、現在では質量を有効に用いた方法として、回転慣性質量を利用した新しい技術も開発されている。

近年では、都心部の再開発が進み超高層建築物も多く建設されるようになってきている。その中で、免震構造と制振構造を併用した事例も多くなっている。

免震構造は、開発当初は居住性を重視した構造形式として採用されていたが、地震動の低減効果があることから、超高層建物には構造部材の一つとして用いられている。一方、制振構造のダンパーは応答低減方法として、各階に分散配置することで、応答低減効果を機能させているが、大地震に対しては免震構造より性能がやや劣る。極まれに起こる大地震を想定した性能を得ようとする、ダンパー数が非常に多く必要となってしまうのである。そこで、ここ最近では、免震構造とハイブリット化することで、ダンパー数を少なく配置することが可能とな

る方法も用いられている。

以上のような背景から、本稿では「免震+制振」ハイブリット構造の事例を紹介、また、ハイブリット構造の設計上のポイントを示し、次世代に向けた免震と制振構造のあり方を述べさせていただこうと思う。

2. 「免震+制振」ハイブリットシステム

免震構造や制振構造が普及しているなかで、近年では「免震+制振」を組合せたハイブリットシステムを採用した事例が増えつつある。このハイブリットシステムは、基本的には図-1に示すような3つに分類される。

図-1 (a) の構造全体では、基礎免震構造を採用しており、その上部構造に制振ダンパーを採用している。ハイブリットシステムを採用している理由としては、免震支承材である積層ゴムが負担する引抜き力軽減を目的とした上部構造に履歴系ダンパー（摩擦ダンパーや抵降伏点系鋼材ダンパーなど）を用いた事例や、上部構造の地震や風応答を軽減するために、粘性系ダンパー（オイルダンパーや粘性壁など）や同調質量ダンパーを用いる事例がある。後者は主に60mを超える超高層建物に多くみられる。

図-1 (b) は、中間階免震を採用し、

その下部構造に制振ダンパーを用いている。中間階免震を採用する理由としては、主に建物用途上の都合によることが多い。中間階免震層に入力される地震応答の増幅を抑えるために、粘性系ダンパーを用いている事例や下部構造の補強として履歴系ダンパーを採用している事例もある。

図-1 (c) は、免震層に2棟の上部構造があり、その建物間で連結制振方法を採用している事例もある。非常に画期的であり、今後このような建物の重量をうまく利用した建物が設計されることを期待する¹⁾。

以上のような、「免震+制振」ハイブリットシステムの事例の特徴として、60mを超える超高層建物に対して採用される傾向がある。免震構造を採用する場合、建物の1次固有周期が非常に長くなるが、この時、建物の振動モードのうち、2次モードや3次モードの固有周期において、地震応答や風応答の影響を強く受けてしまう。ハイブリットシステムはこれらの応答を抑えるために採用されるのである。

3. 耐震構造モデルと免震構造モデルの振動特性

さて、建物の高さが高くなるほど固有周期が長くなり、地震応答の影響が高次モードまで反映していると説明したが、ここでは解析結果を見ながら、その説明

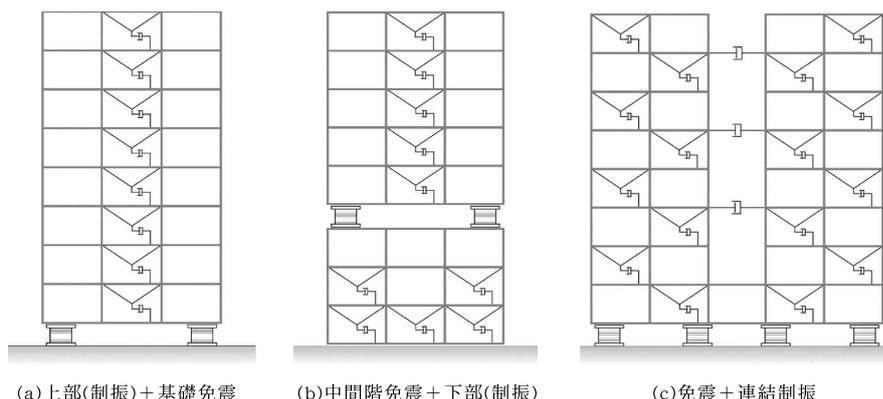


図-1 「免震+制振」ハイブリットシステムの事例モデル

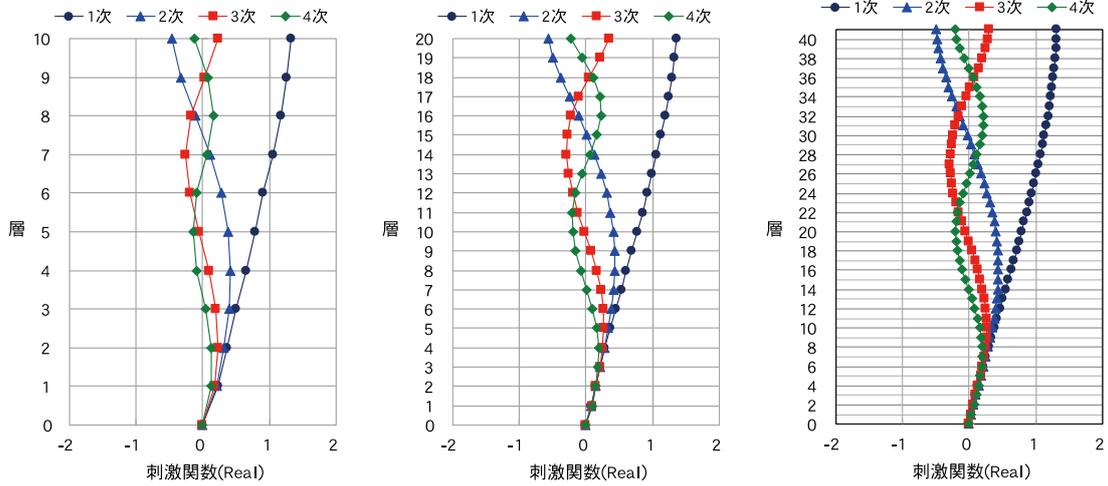


図-2 10, 20, 41階モデルの振動モード(刺激関数)グラフ

表-1 10, 20, 41階モデルの固有周期

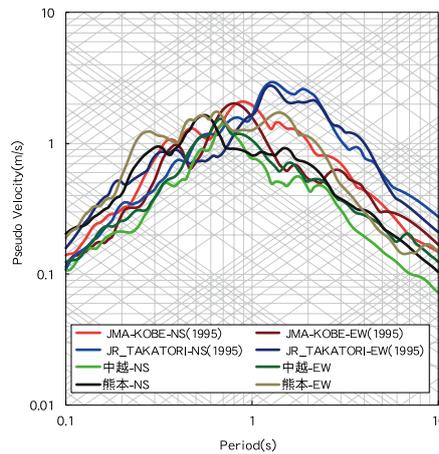
	10階建て	20階建て	41階建て
1次モード	1.42	2.46	5.00
2次モード	0.53	0.92	1.78
3次モード	0.32	0.57	1.07
4次モード	0.23	0.41	0.77

をしたいと思う。

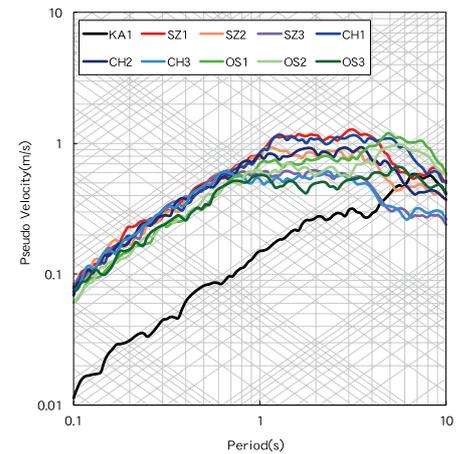
図-2および表-1には、10階、20階、41階の建物モデルの固有値解析結果を示す。図-2は刺激関数という建物の振動モード(建物がどのように振動するのかをあらわしたもの)が、建物高さに限らず比較的似ていることがわかると思う。しかし、揺れ方が同じでも表-1に示した固有周期結果をみると、階数が多い(建物高さが高い)建物の41階では、1次モードの固有周期が5.0秒であり、2次モードの固有周期が1.78秒となっている。この2次モードの固有周期は、10階建ての1次モードの固有周期とほぼ同等であることがわかる。固有周期とは、建物が共振する周期帯(周波数帯)を示すもので、この固有周期がわかれば、どの振動モードが地震応答に影響を及ぼすかがよくわかる。

図-3に応答スペクトルを表示した。この図は、横軸に固有周期、縦軸に応答速度(擬似速度)を示しており、地震動そのものの振動特性をあらわしている。図-3「(a) 主な地震観測データの応答スペクトル」には、過去実際に発生した地震のうち、主要な内陸型直下型地震の応答スペクトルを示している。また、平成28年6月に、国土交通省から「超高層建築物等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²⁾」について取りまとめられた「(b) 平28国住指第1111号基整促波」は、将来海溝型大地震により発生するであろうと予測されている長周期地震動の応答スペクトルを示している。

図-3の応答スペクトルを、先ほど示した建物の固有周期(表-1)と比較してみよう。41階建てのような高層モデルの場合、1次モード(固有周期5.00(s))



(a) 主な地震観測データの応答スペクトル



(b) 平28国住指第1111号基整促波

図-3 応答スペクトル

で、図-3 (b) の長周期地震動の影響を受けることに加え、2次モード(固有周期1.78 (s))では図-3 (a) の直下型地震のような地震動に対して、影響を受けやすいことがわかると思う。このように、超高層建物になればなるほど発生する高次の振動モードの影響を低減する方策として、「免震+制振」ハイブリットシステムを採用する必要がある。

さてここで、免震構造を理解している人は疑問が生じてくるかと思う。すなわち、免震にすれば高次モードの影響を受けにくいので、図-1 (a), (b) のようなハイブリットを採用しなくてもいいのではないかと。続いては免震構造の振動モードがどうなるか確認していく。

ここでは、表-1に示した20階建てモデルに免震構造を採用した場合の振動

モードを表-2と図-4に示す。免震層の固有周期は、建物モデルの1次モード固有周期2.46秒に対して、1倍~3.5倍の周期になるよう構成してある。この倍率を、以下では免震層周期比と呼ぶ。

そもそも免震構造では、免震層周期比が2.5倍程度となるよう免震層を設計したときには、上部構造の応答があまり大きくなる。しかし、今回の20階建てモデルや41階建てモデルのように、上部構造の固有周期が長い建物では、免震層周期比を2.5倍程度まで長くすることが技術的に難しくなる。固有周期を長くすれば、免震層の変形も大きくなるが、支承材である積層ゴムの高さ(総ゴム高さ)もその分大きくする必要があらからだ。

そのため、免震層周期比は2.5倍に満

表-2 免震層周期比ごとの各モードの固有周期

周期比	1倍	1.5倍	2.0倍	2.5倍	3.0倍	3.5倍
1次周期	3.33	4.28	5.36	6.50	7.67	8.86
2次周期	1.22	1.35	1.41	1.44	1.46	1.47
3次周期	0.72	0.75	0.75	0.76	0.76	0.76

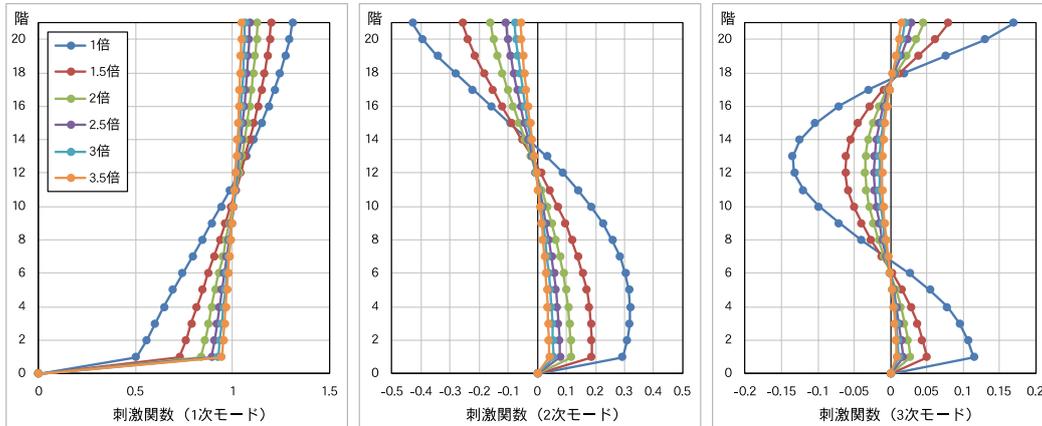


図-4 免震層の周期比の違いによる各振動モードの変化図

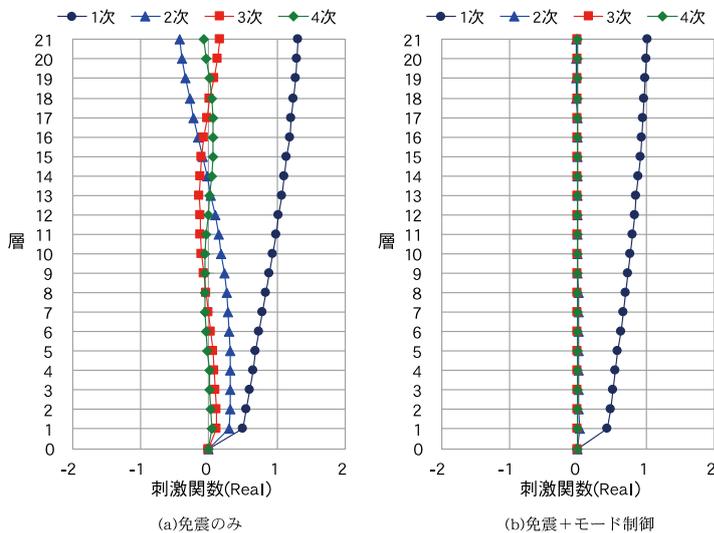


図-5 「免震」と「免震+モード制御」の振動モード図

たないケースが多くなるわけだが、図-4を見てもらえばわかるように、免震層周期比が1倍や1.5倍では、各振動モードとも上部構造の応答が大きくなる。よって、超高層建物ほどハイブリットシステムを採用することが望ましい。

4. 「免震+制振」ハイブリットシステムを可能とする技術

「免震+制振」ハイブリットシステムを採用している理由として、高次モードの振動をどのように抑えるかが重要な要素であることが理解いただけだと思う。

続いては、さまざまなダンパー開発の成果の中から、近い将来にでも可能となる方法を一部紹介する。

紹介する方法は、ダイナミック・マス(以降、「D.M.」と呼称する)と呼ばれる

回転慣性質量を用いたダンパー³⁾である。動的解析における振動方程式の上で、オイルダンパーは粘性減衰係数に、履歴系ダンパーは剛性係数に、そのダンパー特性が反映されるが、D.M.は質量項に影響を及ぼすダンパーで、特に振動モードを操作することができる特徴がある。例えば、20階建てモデル、免震層周期比1倍となる免震構造の場合、図-5「(a)免震のみ」の場合は高次の振動モードが発生する。ここで、適切な量のD.M.をモデルの各層に設置すると、高次の振動モードを抑えることができる。その結果が図-5「(b)免震+モード制御」になる。

さらに比較するため、免震層の粘性減衰定数を10%とし、地震波を入力した際の応答を図-6に示す。入力地震波は、長周期地震動として平28国住指第1111号に示される中京地方「基盤促波CH1」

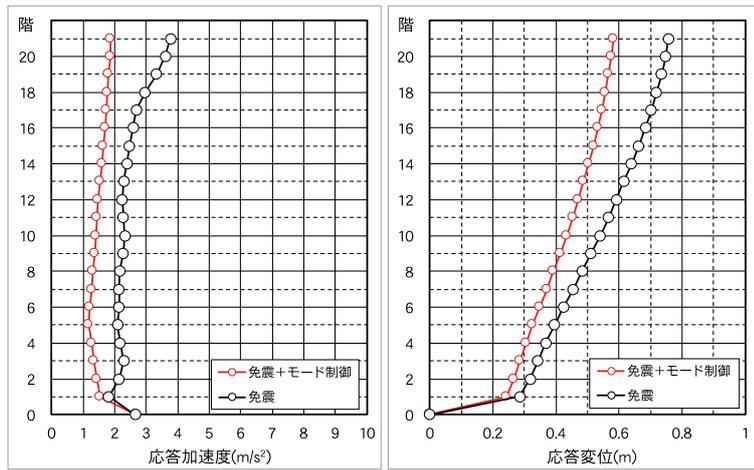
の基盤波と、阪神淡路大震災で観測されたJR-TAKATORI-NS波とした。

「免震」モデルの場合、図-6「(a)基盤促波CH1」では、長周期地震動のため応答加速度および応答変位とも1次モードの振動モードが応答に影響を及ぼしていることがわかる。しかし、「(b)JR-TAKATORI-NS波」の結果では高次の振動モード応答が影響を及ぼし、特に応答加速度は非常に大きくなっている。それと比較し、「免震+モード制御」では、「(a)基盤促波CH1」ではD.M.による質量効果により応答が小さくなっていること、「(b)JR-TAKATORI-NS波」では、完全モード制御の効果で、高次の振動モードがないために応答加速度が大きく低減していることがわかる。

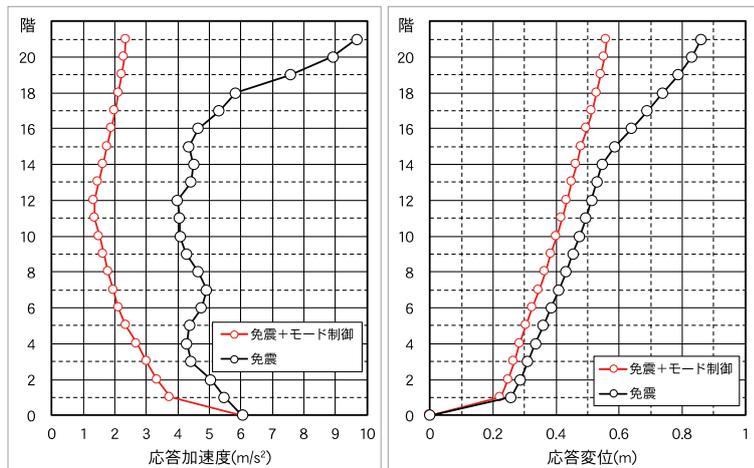
以上のように、D.M.による「完全モード制御」が可能となれば、設計者が振動モードを制御し、より「免震+制振」ハイブリットシステムの発展が期待される。もっとも、この技術もまだ研究段階であり、実用化するにはダンパー数の削減や取付け部を考慮した設計など、さまざまな課題が残されている。

以上の「免震+モード制御」を参考にした、一部の振動モードを制御するD.M.と免震のハイブリットシステムの事例として、著者が勤務する日本大学理工学部駿河台校舎に建設された「タワースコラ」の構造形式を紹介する。

タワースコラは、地上18階、地下3階、高さ83mの超高層建築物であり、地上部は鉄骨純ラーメン構造、地下部はSRC造耐震壁付ラーメン構造である。地下1



(a) 基整促波 CH1



(b) JR-TAKATORI-NS波

図-6 「免震」と「免震+モード制御」の時刻歴応答解析結果



写真-1 D.M.ダンパーの設置状況



写真-2 免震層の積層ゴム設置状況

する設計方法が、今後ますます要求されるはずだ。

そして、技術が普及する上で、コストは避けられない問題であるが、対地震構造においてそれは、「効果的な粘性減衰の付与」と置き換えられる。大きな粘性減衰を付与するには、多くのダンパー、多くのコストが必要である。しかし、粘性減衰の大きさが単純に応答性能を決めるわけではなく、その配置や組み合わせ、接合方法などによって、発揮される性能は大きく変化する。効果的な粘性減衰の付与方法を明らかにすることは、今後の対地震構造の普及に直結する重要なテーマと言えるだろう。

【参考文献】

- 1) 西村幸他3名：アイランドタワースカイクラブ：構造技術による新たな建物形態の創造、(一社)日本建築学会大会梗概集，pp. 284-285，2010年
- 2) 国土交通省：超高層建築物等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について，2016.6
- 3) 石丸辰治，秦一平，古橋剛：擬モード制御によるD.M.同調システムの簡易設計法、(一社)日本建築学会構造系論文第661号，pp. 509-517，2011年3月

階と1階との間に免震層を設けた、中間階免震構造が採用されており、上部構造の1～3階にD.M.ダンパーを設置している。

免震層は、錫プラグ入り積層ゴム17基、天然ゴム系積層ゴム7基、直動転がり支承6基で構成され、上部構造の固有周期約3.0秒に対して、免震周期は5.0秒となっている（免震層周期比1.7倍程度）。図-4の結果と同様、2次モードが励起されて、免震層のエネルギー吸収率の低下、上部構造の応答加速度、応答せん断力が大きくなりやすいことから、上部構造にD.M.ダンパーを採用していることで、2次モードを制御している。

5. おわりに

以上、「免震+制振」のハイブリットシステムに関して、数値解析や採用事例を通して紹介してきた。しかし、ダイナミック・マスの項でも述べたように、これらは未だ発展途中の技術である。そこで最後に、これからのハイブリットシステムの動向について、展望、あるいは筆

者の期待するところを述べさせて頂きたい。それは、以下の3点に集約される。

- ・免震と制振というくりからの脱却
- ・振動モードをコントロールする
- ・効果的な粘性減衰の付与

まず「免震と制振というくりからの脱却」だが、これはハイブリットシステムが必然に行き着く先であろう。応答解析を通して紹介したように、免震と制振はそれぞれ補完し合う技術であるから、「免震構造」と「制振構造」は分けて考えるべきではないのである。私はこれを、「対地震構造」と呼んでいる。この言葉は、私の恩師である故石丸辰治先生が提唱している言葉である。

続いて「振動モードをコントロールする」は、対地震構造のそもそもの目的であるが、この実現には、質量、剛性、減衰、地震動の特性などの複雑な関係のもとで、バランス良く免震層・ダンパー性能を設定しなければならない。それを応答解析の繰り返しによって探索していくのでは、とても「コントロール」とは呼べないだろう。クライテリアから部材性能を逆算