

■高層建物における制振、免震構造形式比較

	耐震構造		制振構造		免震構造		備考
		鋼材系(履歴系)ダンパー	粘性系ダンパー	鋼材系粘性系ダンパー併用	基礎免震	中間免震	
構造上の特徴	本体柱梁の強度により耐力を確保	ダンパーと本体柱梁を合わせて耐力を確保	ダンパーと本体柱梁を合わせて耐力を確保	ダンパーと本体柱梁を合わせて耐力を確保	柔らかい免震層を地下2階床下に配置することにより地震動の入力を低減する。	柔らかい免震層を4階の床下に配置することにより地震動の入力を低減する。*1)	
	大地震時には、大梁・柱・ブレースの塑性変形でエネルギー吸収するため、大梁・柱に損傷が生じる。	大地震時には鋼材系ダンパーが先に塑性化するよう設定し、大梁・柱の損傷発生のリスクを低減する。	中小地震から大地震まで、粘性系ダンパーがエネルギーを吸収し、大梁・柱の損傷発生のリスクを低減する。	鋼材系ダンパーと粘性系ダンパーの両方の特性を併せ持つ。	一般的に、同じ建物を耐震構造とした場合の応答の約1/2に揺れを抑制できる。	免震の効果は基礎免震より低下する。免震層下部は耐震構造と同様の応答性状となる。	
主なダンパー、免震材料等	純ラーメン構造もしくは鉄骨ブレース併用構造	座屈拘束ブレース 制振間柱 鉛押し出しダンパー等	オイルダンパー 粘性制振壁 摩擦ダンパー 粘弾性ダンパー等	座屈拘束ブレース オイルダンパーなど	使用する免震材料に制限なし	弾性すべり支承が使用できない。(耐火被覆が必要のため)	参考資料 「制振・免震構造について」
耐震安全性	大地震時には、大梁・柱に損傷を受けることが倒壊・崩壊に至らない。(被害の程度は中破) 最大層間変形角で1/100程度	ダンパーを先に塑性化させることにより大地震時の本体架構の損傷発生のリスクを低減する。(被害の程度は小破以下) 最大層間変形角で1/200~1/100程度	中小地震時からダンパーが効くので中小地震から建物の揺れを低減する。 本体架構の損傷発生のリスクを低減する。(被害の程度は小破以下) 最大層間変形角で1/200~1/100程度	中小地震時からダンパーが効くので中小地震から建物の揺れを低減する。 本体架構の損傷発生のリスクを低減する。(被害の程度は小破以下) 最大層間変形角で1/200~1/100程度	中小地震から大地震まで免震効果を発揮し、建物全体の損傷を防ぐ。(被害の程度は軽微) 最大層間変形角で1/300~1/200程度	中小地震から大地震まで免震効果を発揮し、建物全体の損傷を防ぐ。(被害の程度は軽微) ただし、免震層下部は耐震構造なので、揺れは大きい。(耐力は確保する) 最大層間変形角で1/200~1/300程度	
	△	○	○	○	◎	○	
大地震時の建物の揺れの状況 *2)	大地震時の揺れの強さは、全階にわたり応答加速度で400~600gal程度となっている。20階以上の階で応答が大きくなる傾向がある。	大地震時の揺れの強さは、全階にわたり応答加速度で400~600gal程度となっている。階によって若干異なるが、耐震構造とほぼ同程度の揺れとなっている。	大地震時の揺れの強さは全階にわたり応答加速度で200~400galとなっている。21階程度の建物のシミュレーション結果では、下層階、上層階で揺れが大きいのが、6階から15階で200~250gal程度と揺れが小さくなる傾向がある。*3)	大地震時の揺れの強さは全階にわたり応答加速度で200~400galとなっている。粘性系ダンパーの場合と同程度の揺れとなっている。	大地震時の揺れの強さは、全階にわたり応答加速度で150~350gal程度となる。	大地震時の揺れの強さは、全階にわたり応答加速度で150~350gal程度となる。	
	△	△	○	○	◎	○	
建物機能保持 *4)	家具・什器が転倒しないレベルまで低減することは難しい。 大地震後においては、建物の主要機能を復旧するのに相当の時間を要する。	家具・什器が転倒しないレベルまで低減することは難しい。 大地震後においては、建物の主要機能を復旧するのに相当の時間を要する。	大地震時の揺れの強さを低減することはできるが、全階にわたり家具・什器の転倒を抑制するところまでには至らない。応答加速度が比較的小さい5階から15階に、災害対策機能や市長執務機能等の業務継続の必要性が高い機能を配置して、主要機能を守る方法は可能である。 大地震後において損傷の程度は低いが、建物の主要機能を復旧するのにある程度時間を要する。	粘性系ダンパーの場合と同程度の建物機能保持性能となっている。	全階にわたり家具・什器の転倒しにくいレベルまで揺れの強さを低減できる。*5) 大地震後においても、建物内部の主要機能を守ることができる。	免震構造部分は、家具・什器の転倒しにくいレベルまで揺れの強さを低減できる。 免震層より上部の、建物内部の主要機能を守ることができる。	参考資料 「防災拠点となる中央庁舎事例」
	△	△	○	○	◎	○	
設計実績	2000年~2013年の高さ60mを超える鉄骨造超高層建物の設計実績では、全体の約6%となっている。	2000年~2013年の高さ60mを超える鉄骨造超高層建物の設計実績では、全体の約70%を占めている。			2000年~2013年の高さ60mを超える鉄骨造超高層建物の設計実績では、全体の約20%(22件)となっている。		参考資料 「免震構造と制振構造の設計実績」
	△	◎			○		
長周期地震対応	長周期地震に対して安全に設計することは可能であるが、ゆっくり長い時間続く後揺れを止めることは難しい。	長周期地震に対して安全に設計することは可能であるが、ゆっくり長い時間続く後揺れを止めることは難しい。	長周期地震に対して安全に設計することは可能であり、ゆっくり長い時間続く後揺れを粘性系ダンパーで減衰させることもできる。	長周期地震に対して安全に設計することは可能であり、ゆっくり長い時間続く後揺れを粘性系ダンパーで減衰させることもできる。	長周期地震に対して安全に設計することは可能であり、ゆっくり長い時間続く後揺れを粘性系ダンパーで減衰させることもできる。		
	△	△	○	○	○		
維持管理	〈地震後の点検〉点検を行うためには、仕上げ材や耐火被覆を一旦壊す必要があり、容易ではない。このような大規模な超高層建物で地震後の維持管理を適切に行うことは難しい。 〈補修取替えのリスク〉大地震時に大梁・柱に鉄骨の破断などの損傷を生じ、構造体の補修が必要となる可能性がある。 〈経年劣化〉コンクリート、鉄筋、鉄骨は長きにわたって使用してきた材料であり、耐久性は高い。	〈地震後の点検〉塑性化が進むダンパーの変形状態を確認することで維持管理ができる。アンボンドブレースでは地震後の健全性を評価するための測定装置が用意されている。 〈補修取替えのリスク〉大梁柱の補修のリスクは低い。座屈拘束ブレースは大地震を3回程度被災しても破断に至らないダンパーだと言われているが、大地震によりダンパー心材の鋼材の塑性化は進むので取替えのリスクは若干存在する。 〈経年劣化〉鉄骨、モルタルは長きにわたって使用してきた材料であり、耐久性は高い。	〈地震後の点検〉エネルギーを吸収する粘性ダンパーの状態を確認することで維持管理ができる。オイルダンパーでは、オイル漏れを目視確認することで地震後の健全性を評価する。 〈補修取替えのリスク〉大梁柱の補修のリスクは低い。オイルダンパーは大地震を受けても壊れることなく継続利用できる。鋼材系ダンパーより取替えのリスクは少ない。 〈経年劣化〉使用しているオイル、シール材は60年の使用に耐えられる材料となっている。	鋼材系ダンパーと粘性系ダンパーの両方の特性を併せ持つ。	〈地震後の点検〉入力される地震エネルギーの大半を吸収する免震装置の健全性(残留変形などで評価)を点検することで維持管理を行う。 〈補修取替えのリスク〉大梁柱の補修のリスクは低い。鋼材系ダンパーは大地震を3回程度被災しても破断に至らないダンパーだと言われているが、大地震により鋼材の塑性化は進むので取替えのリスクは若干存在する。 〈経年劣化〉積層ゴムや鉛入り積層ゴムに使用されているゴムは60年の耐久性に耐えられる材料となっているが、建物の重量を支える重要な部材であるので、取替え可能な納まりとすることが確認申請上求められている。免震装置の維持管理も5年から10年のピッチで確認申請上求められており、1回の維持管理点検で100~150万円の費用がかかる。		
	△	○	◎	○	○		
建築制約	平面的にバランスよく鉄骨ブレースを設置する必要があるので、平面計画上の制約とデッドスペースが発生する。	平面的にバランスよくダンパーを設置する必要があるため、平面計画上の制約とデッドスペースが発生する。			地下2階の床下に免震層があり、耐震構造制振構造に比べて約2.4m根切が深くなる。免震層が深いため大きな土圧を受ける擁壁が厚くなる。 1階の出入りする箇所にEXPJが必要。	基礎免震構造に比べて根切り深さは浅くなる。4階の床下に免震層を設ける必要があり、その分の約2.4m建物が高くなる。 3階以下のELVの出入り口にEXPJが必要。	
	○	○			△	△	
建設コスト比 *6)	99.8	100	101.9	100.9	103.9	103.5	
	5千万円(-)	±0	6億9千万円	3億5千万円	14億円	12億8千万円	
コスト差	◎	○	△	○	x	x	
	◎	○	△	○	x	x	
総合評価	コストは安い、市庁舎としての建物機能保持性能は劣る。	コストは安い、市庁舎としての建物機能保持性能は劣る。	多少コスト増となるが、市庁舎としての建物機能保持は可能である。	わずかなコスト増で、市庁舎としての建物機能保持が可能である。	市庁舎としての建物機能保持性能は高いが、大きなコスト増となる。	市庁舎としての建物機能保持性能は高いが、大きなコスト増となる。	

注記

- \*1) 中間免震構造は、重要機能諸室、機械室を含む4階以上を免震構造として計画した場合とする。
- \*2) 大地震としては、建築物の耐用年限中に一度遭遇するかもしれない程度の地震動が想定されており、地動の最大加速度は300~400gal程度とされている。(「官庁施設の総合耐震計画基準及び動解説」による)  
本検討では、同規模同用途の地上21階建て庁舎建物に最大地動加速度350galの設計用地震波(建築センター波:現行基準法の告示波と同等の設計用地震波)を入力した事例の結果を用いている。  
今後、基本設計において、本敷地の地盤調査結果を使って作成する設計用地震波(告示波)、長周期地震動波、および近隣の想定断層地震波を用いて解析を行い、最適な構造を選択する。
- \*3) 同規模同用途の地上21階建て庁舎建物に、最大地動加速度350galの設計用地震波を入力した事例の応答結果による。
- \*4) 大地震時の建物の上部構造の揺れは、耐震構造では400~600gal程度、場合によってはそれ以上の揺れとなることもある。その際は、固定していない机や家具什器は移動・転倒・破損し、転倒防止金物で補強されている棚は転倒は免れるが図書などの内容物は飛び出してしまうような状況となると予想される。
- \*5) 家具や什器が転倒しやすくなる応答加速度値は、建物の固有周期や形状による影響はあるが、おおむね200~300galと言われている。
- \*6) 建設コストの検討は、2014年10月の川崎市本庁舎等建替基本計画検討委員会に提出したプランのうち、A案をモデルとして積算した。

大臣認定では設計に+2ヶ月、性能評価2ヶ月、大臣認定2ヶ月、確認申請1ヶ月程度かかる。  
性能評価の手数料は201万円となる。特定天井がある場合は別途50万円。詳細な地盤調査が必要で200~400万円程度余分に費用がかかる。

# 制振・免震構造について

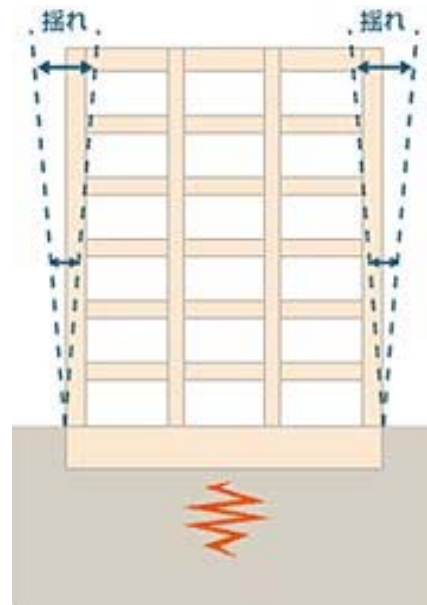
## 制振構造

耐震構造の中に制振部材を組み込んだ建物です。制振部材の設置スペースの確保は必要ですが、自由度の高い空間と高い耐震安全性を実現します。地震による建物への入力エネルギーの多くを制振部材が吸収します。建物の損傷は軽微となります。

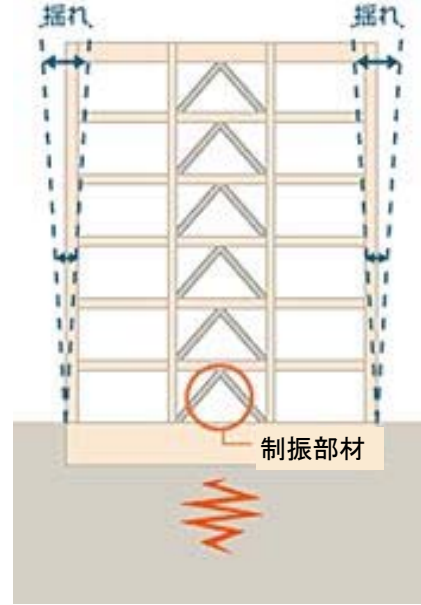
## 免震構造

耐震構造と基礎の間又は建物の中間に免震部材を設置した建物です。自由度の高い空間と高い耐震安全性を実現します。地震による建物への入力エネルギーの殆どを免震部材が吸収します。建物の損傷は殆どありません。

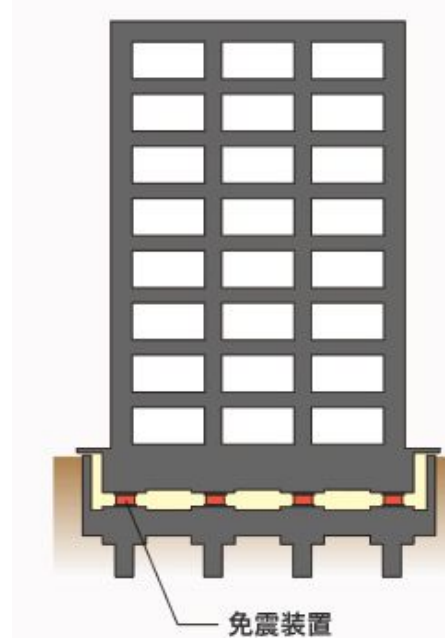
耐震構造



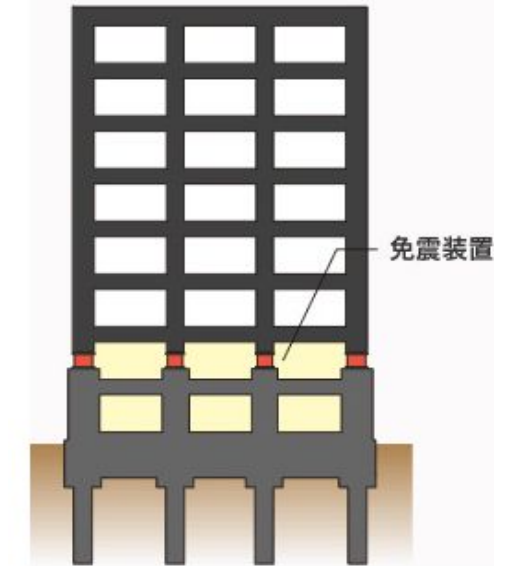
制振構造



基礎免震構法



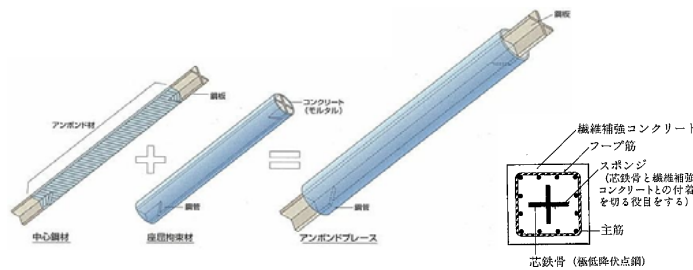
中間階免震構法  
(2階の例)



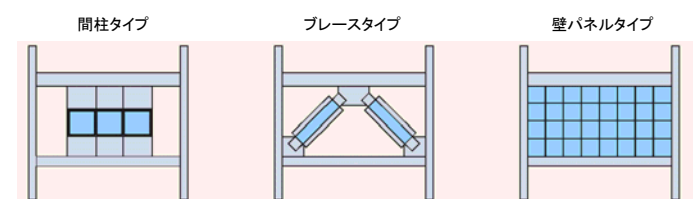
### 鋼材系ダンパー

鋼材の塑性化(力を受けて元の形に戻らなくなる)によるひずみエネルギー(変形により部材内に蓄えられるエネルギー)によって地震のエネルギーを吸収するダンパーです。低降伏点鋼と呼ばれる小さな力でもエネルギーを吸収できる鋼材が多用されています。

- 座屈拘束ブレース (メーカー多数)  
低降伏点鋼の塑性吸収エネルギーを利用した制振装置



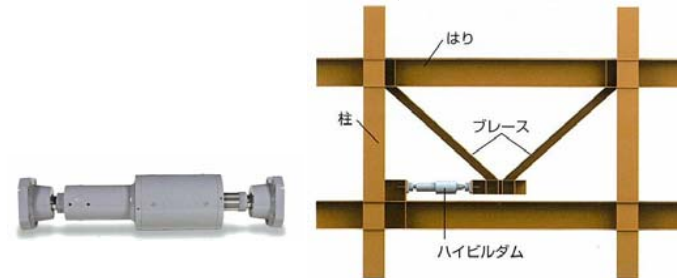
- 低降伏点鋼ダンパー



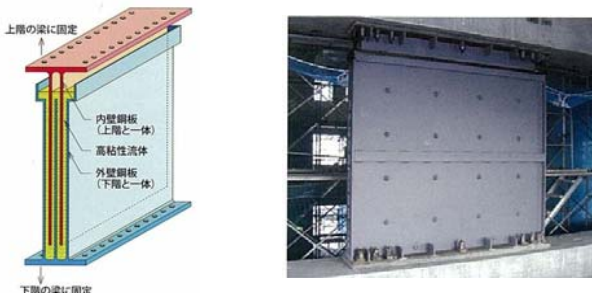
### 粘性系ダンパー

作動油の抵抗力を減衰力として利用したものです。ダンパーが伸縮し、粘性体(油)が調圧弁を通過するとき生じる抵抗力を減衰力としています。

- オイルダンパー (カヤバ、日立)  
作動油の抵抗力を利用した制振装置

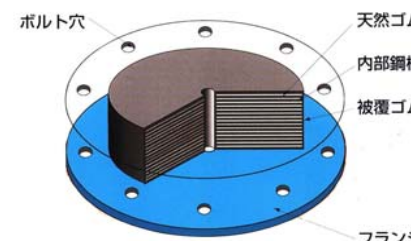


- 粘性体制振壁 (オイス工業、免制震デバイス)  
流体を鋼板に挿入し、その粘性を抵抗力とした制振装置



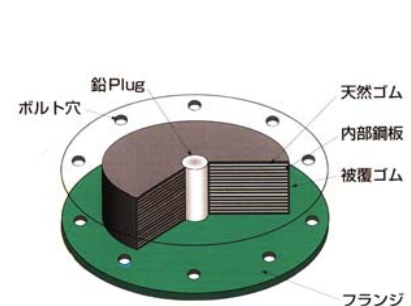
### 免震装置の種類

- NRB  
天然ゴム系積層ゴムアイソレータ



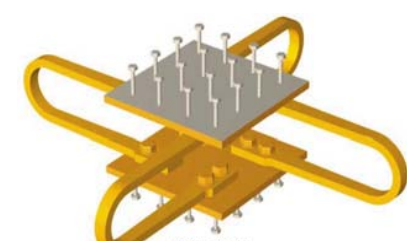
天然ゴムと鋼板を多層に重ね合わせたもので、鉛直方向に硬く、水平方向に柔らかい特性を有しています。地震エネルギーを吸収する能力はないので、他のダンパーと組み合わせることで様々な設定が可能です。

- LRB  
鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ



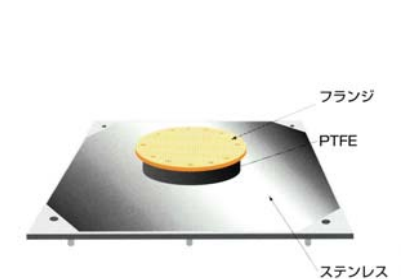
積層ゴムの中央に設けられた円形の孔に鉛を封入し、水平変形時に鉛が変形することでエネルギーを吸収するダンパー内蔵型の積層ゴムです。ダンパーが一体型であるため、省スペースで施工上の利点があります。

- UD  
鋼材ダンパー



鋼板をU型に加工したものを組合せたもので、必要に応じて4本~8本を1箇所に設置します。鋼材の変形によりエネルギーを吸収します。

- SR



端面にテフロン樹脂のすべり材がついた積層ゴムとすべり板(ステンレス板に表面処理したもの)を組合せた支承です。変形が小さい時は積層ゴムが変形し、変形が大きくなるとすべり板の上を水平移動し変形に追従します。

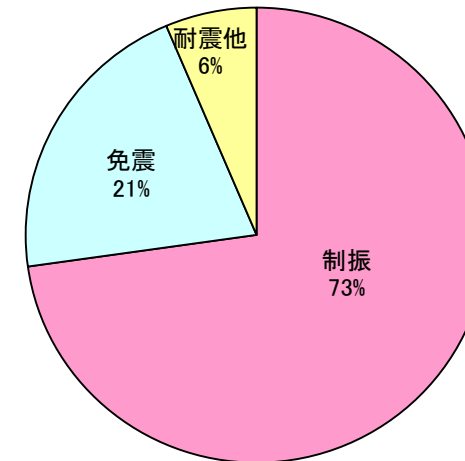
免震構造と制振構造の設計実績

鉄骨造高層免震構造事例(日本免震構造協会出版部より)								
認定年月	件名	所在地	設計	軒高	地上	地下	面積(m <sup>2</sup> )	注記
2000/10/30	(仮称)日本工業倶楽部会館・永楽ビルディング新築工事	東京都千代田区	三菱地所	141.4	30	4	110,103	高層部オフィス：制振構造 低層部既存再現部、ロビー：免震構造 ※免震は低層部のみ、高層部は制振
2002/2/28	(仮称)恵比寿1丁目共同ビル	東京都渋谷区	東急設計コンサルト	75.9	18	1	28,260	
2002/3/8	(仮称)汐留住友ビル開発計画	東京都港区	日建設計	128.1	27	3	99,400	中間層免震構造(12階床下) 免震層上部：オフィス 免震層下部：ホテル
2002/3/6	(仮称)品川駅東口B-4地区計画	東京都品川区	大成建設	91.1	19	1	39,933	
2002/7/3	バンダイ新本社ビル	東京都台東区	大成建設	64	14		13,430	
2002/12/25	神保町1丁目南部地区代一種市街地再開発事業東棟	東京都千代田区	山下設計	97	23	3	88,647	
2003/1/28	(仮称)麹町1丁目再開発ビル計画	東京都千代田区	日建設計	67.1	15	2	23,879	
2003/1/27	信濃毎日新聞社本社ビル	長野県長野市	日建設計	60.4	21	2	47,969	
2003/5/14	東京工業大学すずかけ台総合研究棟	神奈川県横浜市	東工大、松田平田	85.3	20		15,746	
2003/9/1	(仮称)芝浦工業大学都豊洲キャンパス校舎棟	東京都江東区	日建設計	67.3	14	1	57,355	
2005/7/20	代々木ゼミナール代々木2丁目プロジェクト	東京都渋谷区	大成建設	131.1	26	3	27,446	基礎免震構造 用途：専修学校、共同住宅
2006/3/15	(仮称)朝日放送新社屋	大阪府大阪市	NTTフアンリティ	75.3	16	1	44,838	
2006/5/8	新本部ビル(仮称)	福岡県福岡市	松田平田	78	14	1	27,745	
2006/9/20	日赤和歌山医療センター新棟	和歌山県和歌山市	横河建築設計	63.8	13	1	52,490	
2007/11/28	丸の内SF計画	東京都千代田区	三菱地所設計	157.1	34	4	204,786	高層部オフィス：制振構造 低層部既存再現部、美術館：免震構造 ※免震は低層部のみ、高層部は制振
2008/7/11	(仮称)汐留浜離宮計画	東京都中央区	日建設計	114	21	1	47,969	中間層免震構造(3階床下) 免震層上部：オフィス 免震層下部：ホール
2008/8/26	中日新聞社品川開発計画	東京都港区	日建設計	88.1	19	3	69,396	
2008/12/22	(仮称)大崎西テクノロジーセンター	東京都品川区	日建設計	139.2	25	2	123,877	中間層免震構造(2階床下) 用途：オフィス、店舗
2009/9/16	(仮称)三田ベルジュビル	東京都港区	竹中工務店	163	33	4	55,811	中間層免震構造(25階床下) 免震層上部：住宅 免震層下部：オフィス
2009/12/18	(仮称)中ノ島フェスティバルタワー	大阪府大阪市	日建設計	199.2	39	3	145,602	中間層免震構造(7階床下) 免震層上部：オフィス 免震層下部：ホール
2010/9/30	神田駿河台4-6計画	東京都千代田区	大成、久米設計	109.9	23	2	102,000	中間層免震構造(3階床下) 免震層上部：オフィス、大学 免震層下部：貸会議室、店舗
2013/2/26	(仮称)ラゾーナ川崎東芝ビル	神奈川県川崎市	大林組	64.1	15		104,531	

・日本免震構造協会では、毎年、全国の各性能評価機関で審査した免震構造の実績調査を行っている。当協会の資料によると、2000年以降、高さ60mを超える鉄骨造の免震構造の設計事例は22件で、このうち100m以上の事例は7件である。  
 ・免震構造は、開発当初、上部構造が鉄筋コンクリート系の比較的剛強で中低層建物に採用されていたが、オイルダンパーや滑り支承などの種々の免震デバイスが開発され、構造設計も進歩したことで、柔構造である鉄骨造や高層建物にも利用される事例が出てきている。但し100mを超える超高層鉄骨造建築においては、上記7件のみであり、採用される事例はまだ多くない。  
 ・前述100m以上の7件の事例においても、縦横比が非常に大きく制振構造では難しい特殊形状事例や、下層部と上層部構造の特性が異なることから免震により構造を切り替えた事例、下部のオフィスと上部の住宅で構造を切り分けて高層部の住宅のみを免振にしている事例など、特殊な事例が多い。

注記:  高さ100m以上の事例

日本ERI高層評定委員会の審査物件数の内訳(2001年以降)



高さ60m以上の鉄骨造建物審査物件数

平成	制震	免震	耐震他	合計
13	0	0	1	1
14	4	0	1	5
15	9	0	0	9
16	13	0	0	13
17	7	2	1	10
18	1	1	0	2
19	2	0	0	2
20	7	4	2	13
21	5	2	0	7
22	1	1	0	2
23	5	1	0	6
24	2	5	0	7
計	56	16	5	77

現在、高層建築物や免震構造などの審査を行う確認申請機関で、もっとも多くの物件を扱っているのは㈱日本ERIである。  
 性能評価業務を始めた2000年以降、高さ60mを超える鉄骨造の高層建築物の審査物件数の集計を見ると、鉄骨造制振構造が56件、鉄骨造免震構造が16件であった。鉄骨造の高層建築物の場合、大多数の70%以上が制振構造を採用している。