

A 3D architectural rendering of a cityscape with various skyscrapers and buildings, set against a light purple background. Several curved lines in orange, blue, and pink orbit around the city, suggesting a global or networked theme.

日本BCP白書

2020 第3号



地震被害等BCP研究会

目次

はじめに

目次

第1章 論文・エッセイ

- 1-1 免震構造の現状と課題
中川 理 6
- 1-2 マルチイベントモデルによる支援建物の条件付き被害評価
福島 誠一郎 28
- 1-3 新型コロナウイルス感染症と事業継続計画（BCP）
～ 感染症対策における災害復興法学の視点～
岡本 正 36
- 1-4 換気と感染リスク
横山 計三 48
- 1-5 「BCP住宅」の美学
岡野 真 54
- 1-6 微地形を利用した水害対策 … 高齢者福祉施設 事例 ～ 施設探訪3～
高橋 秀夫 56

第2章 BCP 関連の活動記録

- 2-1 セミナー記録（2019年11月～2020年10月） 58
- 2-2 セミナー紹介 見学会：大成建設株式会社技術センター 60
- 2-3 展示会記録
- 2-3-1 防犯防災総合展 2020 62
- 2-3-2 危機管理産業展（RISCON TOKYO）2020 64

第3章 BCP 関連の組織と情報

- 3-1 関連する組織 66
- 3-2 関連する書籍 67
- 3-3 関連する論文等 69
- 3-4 災害記録（2019年11月～2020年10月） 71

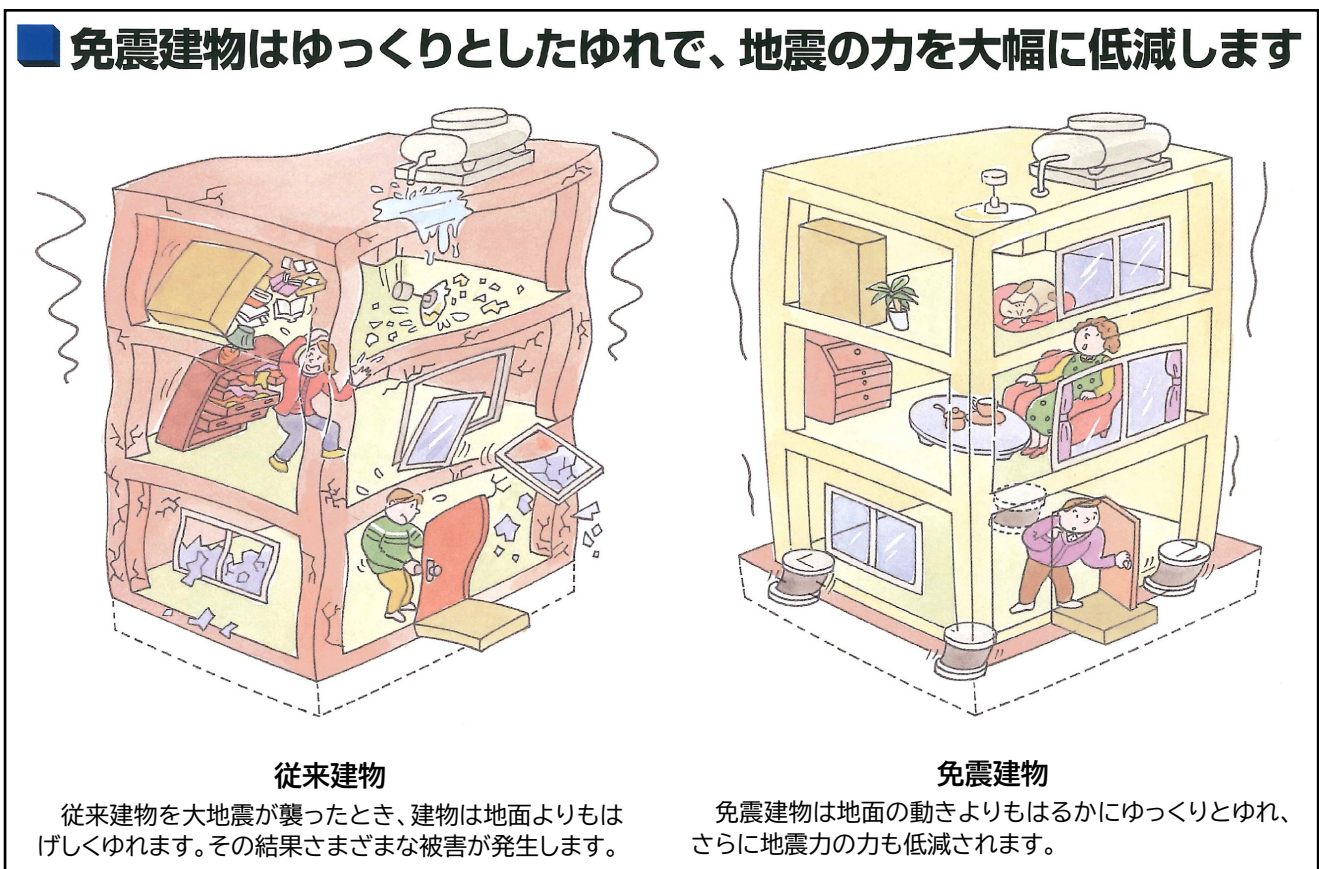
＜本章の構成＞

1. 免震構造について
2. 免震建物の構造計画について
 - 2.1 免震建物の構造計画
 - 2.2 鉄骨造免震建物の構造計画における一案（座屈拘束ブレースの採用）
3. 課題とその対応
 - 3.1 設計手法
 - 3.2 地震動
 - 3.3 エキスパンションジョイント
 - 3.4 免震部材の接合部
 - 3.5 津波
4. 免震レトロフィット
 - 4.1 免震レトロフィットの推移と用途
 - 4.2 免震層の設計や施工での配慮
 - 4.3 建物外周（一例）
5. 免震建物の維持管理
6. おわりに

1. 免震構造について

免震構造は、建物と地盤の間に水平方向に柔らかい免震部材を設置することで、地震の揺れを建物に伝わりにくくする構造です。

免震構造は、「安全性の向上」だけでなく、「機能性の維持」、「財産の保全」、「居住性の向上(安心)」、「設計の自由度の向上」などのメリットがあり、延いては「資産価値の向上」につながります。建物の特徴やメリットは、絵で見ると一目瞭然ですので、一般社団法人日本免震構造協会(以降「免震協会」)の「免震のすすめ」¹⁾に示される従来建物(耐震構造)と免震建物の比較を図 1-1 に示します。



〔図 1-1 従来建物(耐震建物)と免震建物の比較 出典:免震のすすめ¹⁾〕

耐震建物(左図)では、地震時の大きな変形や加速度の入力により被害が生じています。仮に柱や梁を丈夫にしても地盤からの入力加速度は低減できませんので、設備や内容物には建物の揺れに対してしっかり固定する(外装材は変形に追従する)などの配慮が必要

となります。免震建物(右図)では、建物への入力加速度が低減されることより、被害が生じていない状態が描かれています。

免震構造は、耐震構造と比較して、飛躍的に耐震性能が向上する構造と言えます。しかしながら、その性能は、どの免震建物でも同様というわけではありません。構造計画、設計、施工における様々な問題点やバラツキなどに、十分な配慮がされたものとそうでないものは、性能に差が出るだけでなく、想定通りの性能が発揮できない可能性も考えられます。

免震構造の性能を発揮し、大地震後も建物を継続利用するために、どのような課題に対応すべきかを踏まえ、以降に述べます。

2. 免震建物の構造計画について

2.1 免震建物の構造計画

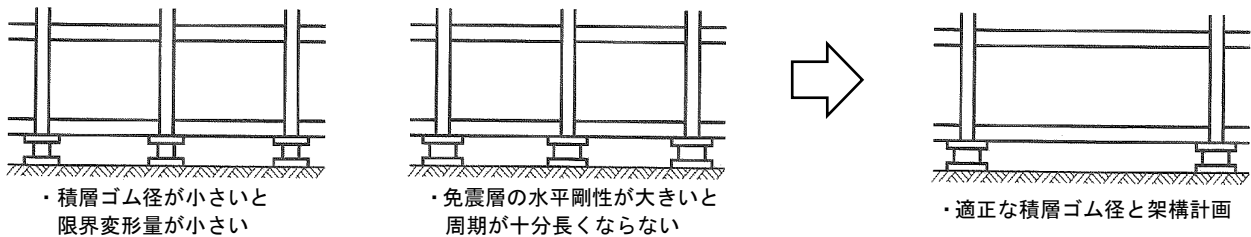
一般的な免震構造(積層ゴムとダンパーを採用した基礎免震)の構造計画では、免震効果を高め、積層ゴムも損傷させないためには、以下の構造計画が望ましい²⁾こととなります。

- ① 免震層の水平剛性を十分低くして建物の固有周期を長くする(図 2-1)。
- ② 積層ゴムに引張力を生じにくい架構計画とする(図 2-2)。
- ③ 上部構造は、免震層よりも相対的に十分高い水平剛性を確保する(図 2-3)。

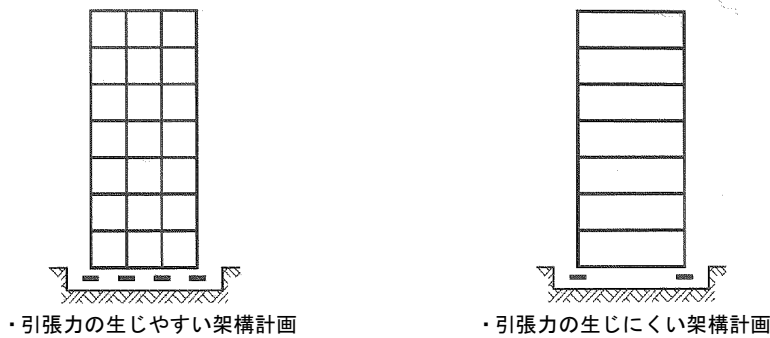
①は、積層ゴムは地震時の大変形に追従できる大きさ(径)を用いますが、上部構造の重量によっては、設置数が多いと長周期化できない場合があるため、柱本数を少なくしたスパン割での架構計画が、長周期化には望ましいことを示しています。

②は、積層ゴムは圧縮耐力に対してはせん断変形時にも高い鉛直支持力を有しているものの、引張力に対しては弱いため、引張りを生じさせない架構計画が望ましいことを示しています。

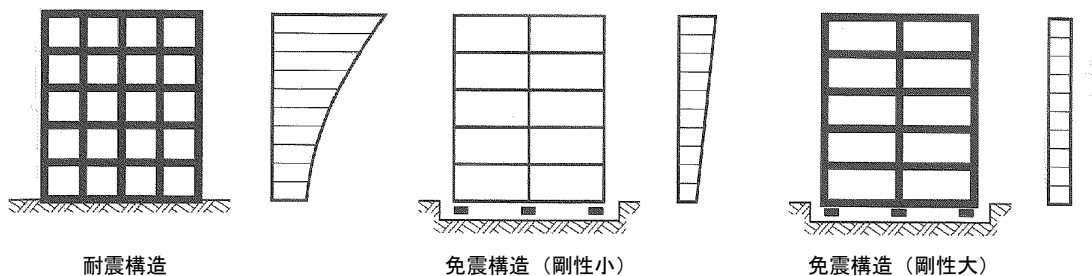
③は、耐震建物より上部構造の設計地震力(せん断力係数分布)は飛躍的に小さくなるものの、上部構造の水平剛性が免震層よりも相対的に十分大きな場合にせん断力係数分布が小さくなる傾向にあるため、上部構造の剛性確保が望ましいことを示しています。



[図 2-1 上部構造の架構計画(1)²⁾]



[図 2-2 上部構造の架構計画(2)²⁾]



[図 2-3 せん断力係数分布²⁾]

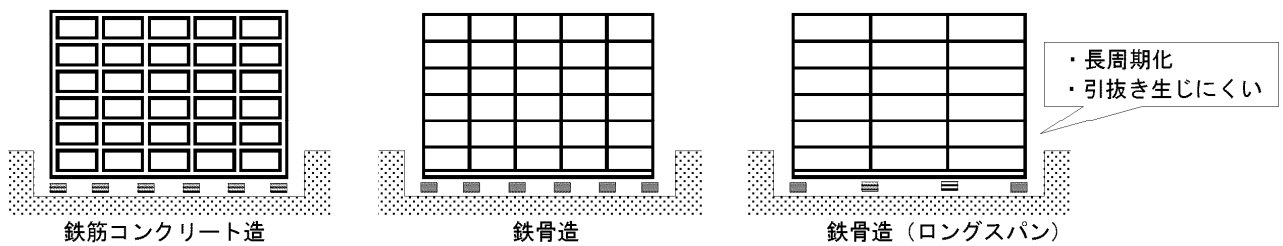
基本的考えを示しましたが、長周期化のためには弾性すべり支承の採用や、引張力が生じる箇所には引張抵抗がある直動転がり支承を採用することも考えられます。その場合には、各部材の特性を十分考慮して採用する必要があります。例えば、弾性すべり支承では、水平反力は軸力に依存するため、地震時の変動軸力や上下動の比較的小さな位置への採用や水平力への影響が小さい低摩擦タイプの採用(高摩擦タイプではバラツキを設計で多く見込むこと)、残留変形が大きいと想定される場合にはエキスパンションジョイントにも不具合が生じないことの確認、などの考慮が必要と考えます。

2.2 鉄骨造免震建物の構造計画における一案(座屈拘束ブレースの採用)

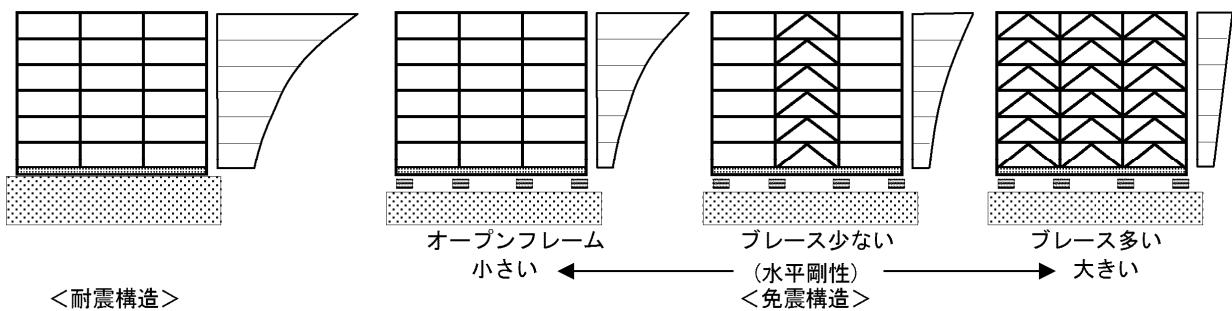
鉄骨造の免震建物において、座屈拘束ブレースを用いることで合理的となる一案を示します³⁾。

免震建物では、重量が大きく比較的剛性の高い鉄筋コンクリート造を上部構造の構造形式として用いることが多いですが、工期短縮やロングスパンの構造計画が可能な鉄骨造を用いることも近年増えています。上部構造を鉄骨造とする場合、鉄筋コンクリート造と同様の構造計画では積層ゴムの支持重量が小さくなるため、特に中低層建物では建物の長周期化が困難となり、積層ゴムに引抜き力が作用しやすくなる傾向にあります。この短所は、鉄骨造に向けたロングスパンの構造計画とすることで、柱本数を減らして積層ゴムの支持重量を増大させて積層ゴムへの引抜き力を抑制し、建物全体の長周期化を実現して解消できます(図2-4)。もちろん、ロングスパン化には、意匠上の自由度の高い内部空間が確保できて使用性が向上する長所もあります。

免震建物の上部構造に鉄骨造を用いる際には、上部構造の水平剛性確保も課題です。一般的に、免震建物の上部構造の地震応答加速度や応答せん断力は、通常の耐震構造に比べて大幅に小さくなりますが、その効果は上部構造の水平剛性の免震層の水平剛性に対する比が大きいほど顕著です。鉄骨造のロングスパン架構は水平剛性が比較的小さくなるため、上述の免震効果を得るためには鉛直ブレースを併用して架構の水平剛性を増大させる必要があります(図2-5)。しかし、鉛直ブレースを配置することは建物の内部空間の自由度を低下させることにつながるため、少ない数の構面に剛性の高いブレースを集中的に配置するような構造計画を採ることがより合理的です。



[図 2-4 免震構造種別とスパン割]

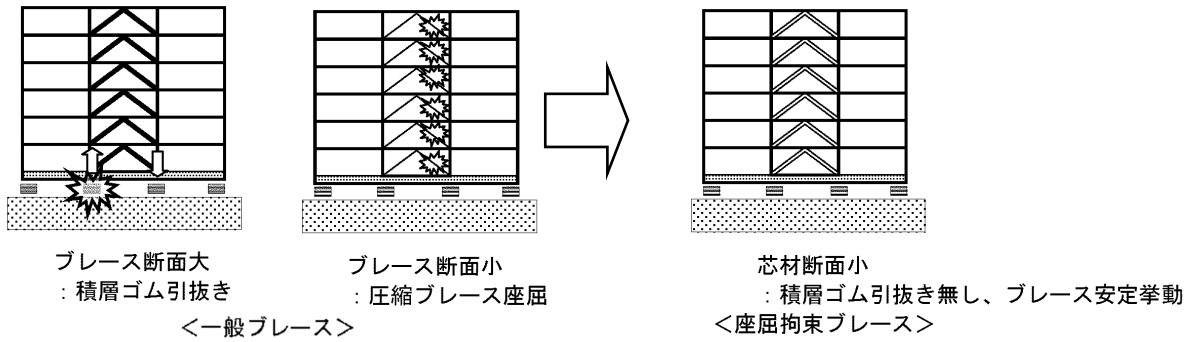


[図 2-5 鉄骨造の架構形式とせん断力係数分布]

しかし、上述の方針に沿ってブレース構面数の少ない計画を採ろうとすると、積層ゴムの引抜きとブレースの全体座屈発生という二つの相反する課題に直面します。つまり、高剛性のブレースが配置された架構では地震時にブレースに高軸力が生じることに伴う積層ゴムの引抜き発生が懸念されるが、引抜きを抑制するためにブレース断面を低減すると、所定の剛性を得にくくなる上に、ブレースの全体座屈が発生しやすくなります(図2-6)。

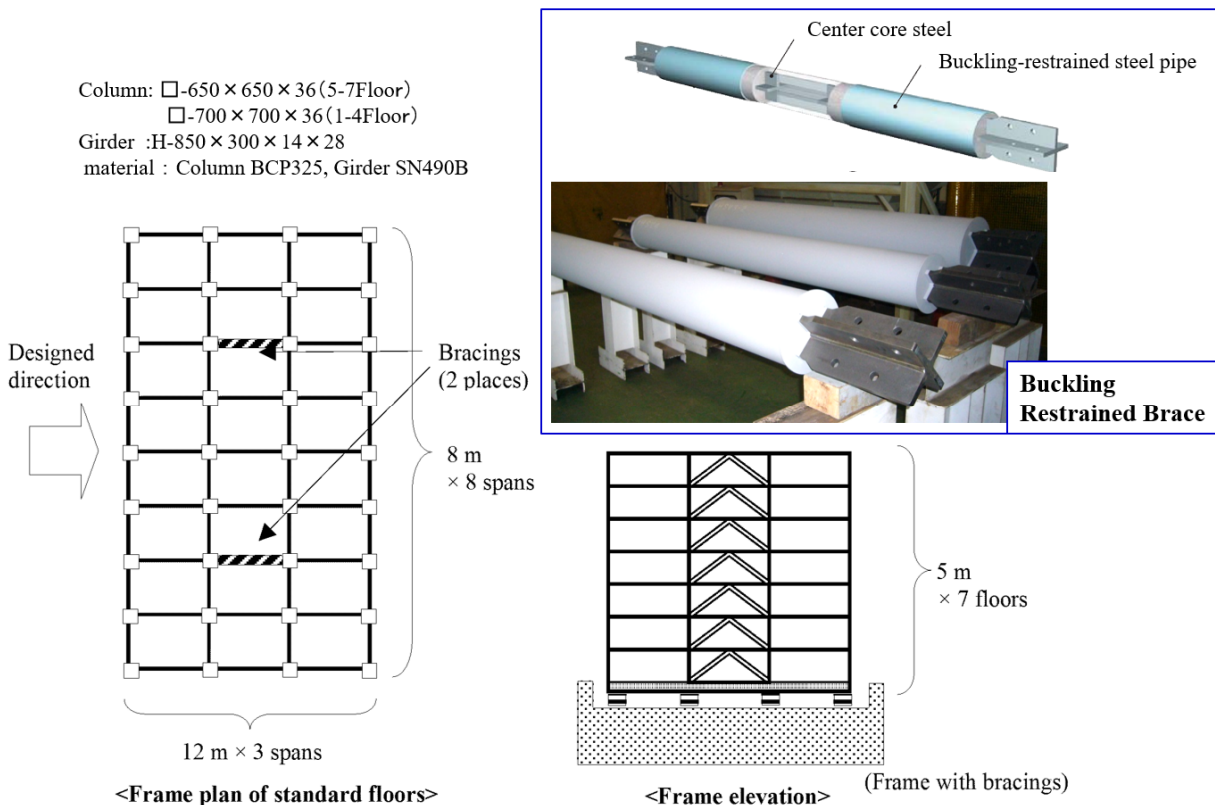
そこで、免震建物の上部構造に集中配置するブレースにまつわる上述の問題を解決する方法の一つとして、座屈拘束ブレースを用いることが考えられます。座屈拘束ブレースでは圧縮時にも全体座屈は生じないため、積層ゴムの引抜きを抑制するためにブレース断面

を低減する際の選択の幅は広がるのが期待できます。



[図 2-6 免震建物のブレース配置計画における一般ブレースの問題点と座屈拘束ブレース]

参考文献³⁾では、鉄骨造ロングスパンの免震建物に少ない構面数のブレースを集中配置したモデル(図 2-7)にて時刻歴応答解析による検討を行っています。検討結果では、積層ゴムの引抜きを抑制するために小断面の一般ブレースを用いると座屈が生じるが、座屈拘束ブレースでは座屈が生じず、集中配置が可能な範囲が広がる傾向にあると同時に、上部構造の応答性状の改善、および上部構造の応力負担の軽減がなされるため、座屈拘束ブレースの採用は大変有効であることが示されています。



[図 2-7 座屈拘束ブレースを考慮した鉄骨造免震建物の検討モデル]

3. 課題とその対応

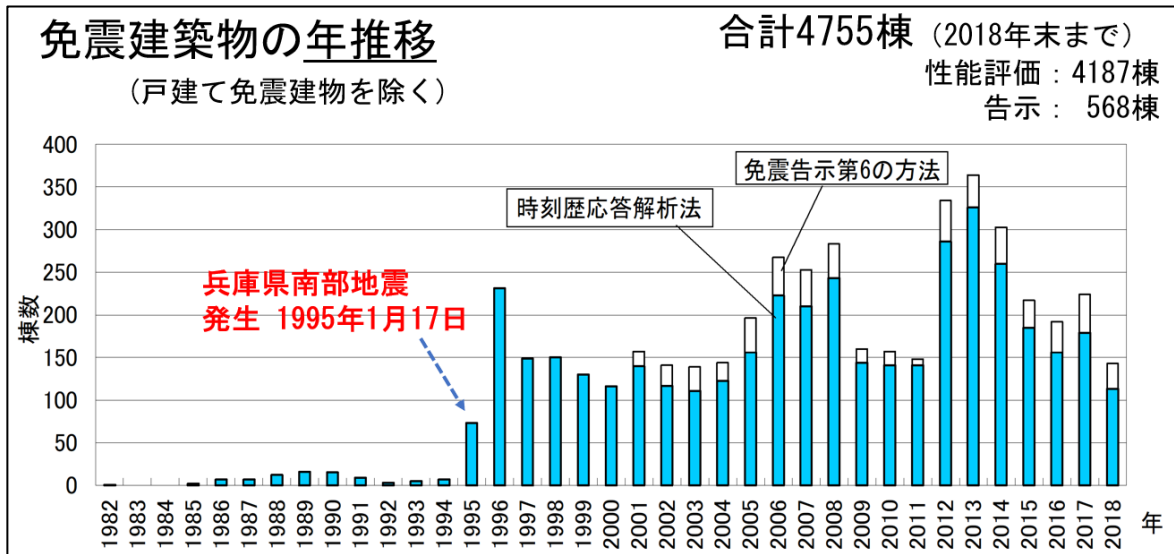
前章では構造計画について述べましたが、その他の主要な課題や対応等について以下に述べます。

3.1 設計手法

図 3-1 に免震協会が集計した免震建築物の年推移と設計手法の棟数を示します。合計 4755 棟の内、時刻歴応答解析法での設計が 4187 棟で全体の 88%が時刻歴応答解析法です。時刻歴応答解析では、質点系モデルか立体モデルとするか、免震部材の復元力特性やバラツキの評価など、設計者が配慮すべき点も多いですが、実状に近い挙動(動的挙動)を反映した設計手法となっています。

一方、平 12 建設省告示 2009 号第 6 による構造計算(以降「免震告示」)は、静的な検討より設計できる手法であり、大臣認定(性能評価書)の取得を必要としないことより、設計工期短縮のメリットがあります。しかしながら、時刻歴応答解析と比較すると動的挙動の評価

が設計に反映できていないケースもあるため、注意が必要です(なお、3種地盤や中間層免震では免震告示による設計法の適用範囲外です)。



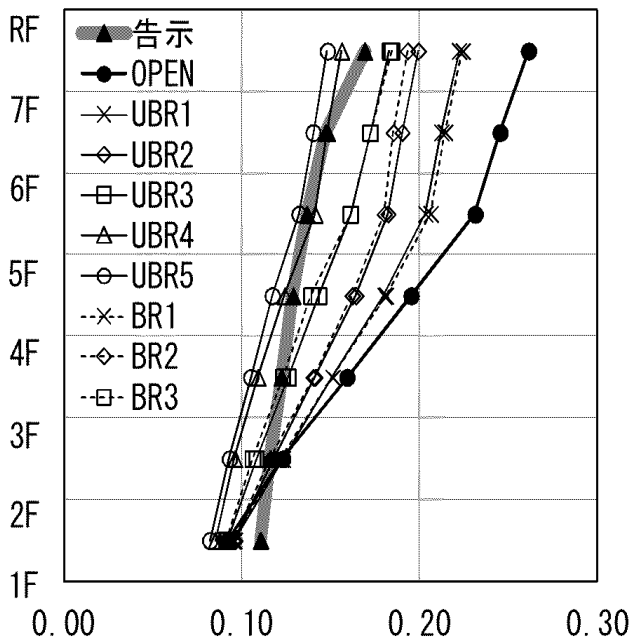
[図 3-1 免震建築物の年推移と解析手法⁴⁾]

免震告示の設計で用いる地震層せん断力係数(C_{ri})の算出式は、分かり易くするために積層ゴムと履歴型ダンパーで構成された免震部材で整理すると、次式で表せます。

$$C_{ri} = (A_i \cdot Q_h + Q_e) / (M \cdot g)$$

Q_h : 免震層の弾塑性系減衰材の負担する水平力 (履歴型ダンパーの負担せん断力)
 Q_e : 免震層の支承材の負担する水平力 (積層ゴムの負担せん断力)
 M : 上部構造の総質量 g : 重力加速度

免震告示における地震層せん断力係数分布は、免震層における減衰材の負担せん断力分に関して A_i 分布を考慮しており、免震層の支承材の負担せん断力分に関しては増幅しないものとしています。但しこれは、文献⁵⁾でも述べられている様に、上部構造部分が免震層部分と比較して相対的に水平剛性が非常に高い場合に近似的に成立するものです。このため、剛性の低い建物においては、この外力を用いての設計は妥当ではなく、仮に設計で用いる場合にはこれらを加味して十分余裕のある断面で上部構造を計画する必要があると考えます。「2.2鉄骨造免震建物の構造計画における一案(座屈拘束ブレースの採用)」で示した解析モデルでの応答解析結果と告示免震の層せん断力係数の比較³⁾を一例として図3-2に示します。



左図の凡例および解説

「告示」は、免震告示での層せん断力係数。
 「OPEN」はブレース無しのオープンフレーム。
 「UBR*」は座屈拘束ブレース、「BR*」は一般ブレースを配置したモデル。*数値が大きくなるにつれ、各ブレース断面が大きくなる(水平剛性が高くなる)。
 水平剛性が高くなるにつれ、層せん断力係数は小さくなるのが分かる。

(補足) 層せん断力係数は、ある程度大きな水平剛性を確保しないと「告示」以内とならない。しかしながら、各階の層せん断力からブレース負担分を引いたフレームが負担するせん断力は、「告示」の設計せん断力以内(もしくは免震告示の値に近づく傾向)となり、水平剛性の低い鉄骨造建物ではブレース配置は有効となる。なお、本ケースでは、一般ブレース(BR1~3)は座屈が生じているが、座屈拘束ブレースでは継続使用可能な範囲となっている。

[図 3-2 鉄骨造ロングスパンモデルの最大応答層せん断力係数の比較(告示波:位相 HACHINOHE)]

上部構造の水平剛性が低いラーメン構造建物(ブレース無し。図中の「OPEN」)では、上部構造の最大応答層せん断力係数が免震告示よりもかなり大きい値を示しています。免震告示の層せん断力係数の算定式では上部構造の剛性に依存していませんが、応答解析結果ではブレースの断面を増大させる(上部構造の水平剛性が大きくなる)につれ、応答が改善されている(層せん断力係数の値が小さくなる)ことが示されています。この様に、上部構造の水平剛性が小さい建物では免震告示を用いて設計する際には注意が必要です。

3.2 地震動

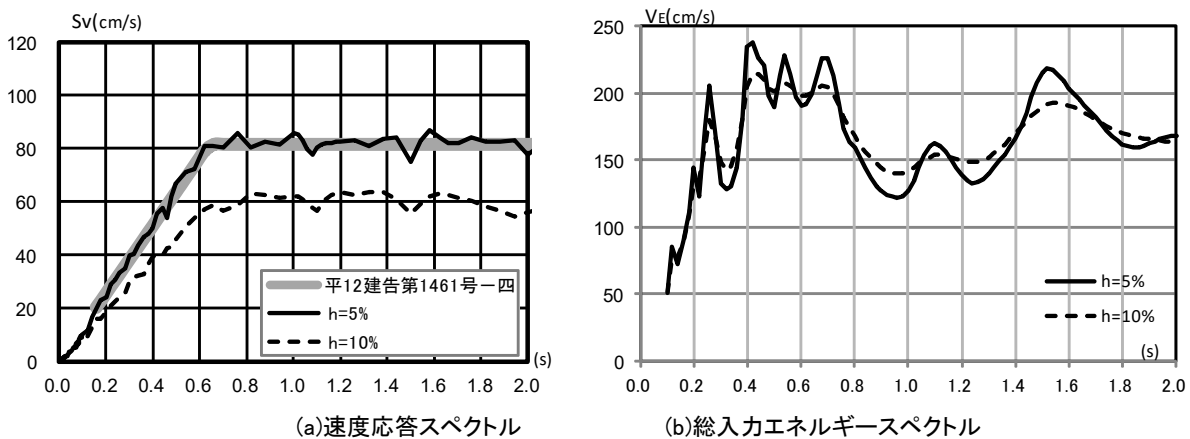
免震構造の応答解析結果は、どのような入力地震動を採用するかで大きく影響します。平 12 建告第 1461 号一四の極めて稀に発生する地震動(以降「告示波」)のエネルギー吸収量の変動、および免震建物に影響が大きな長周期地震動について以降に述べます。

3.2.1 告示波について

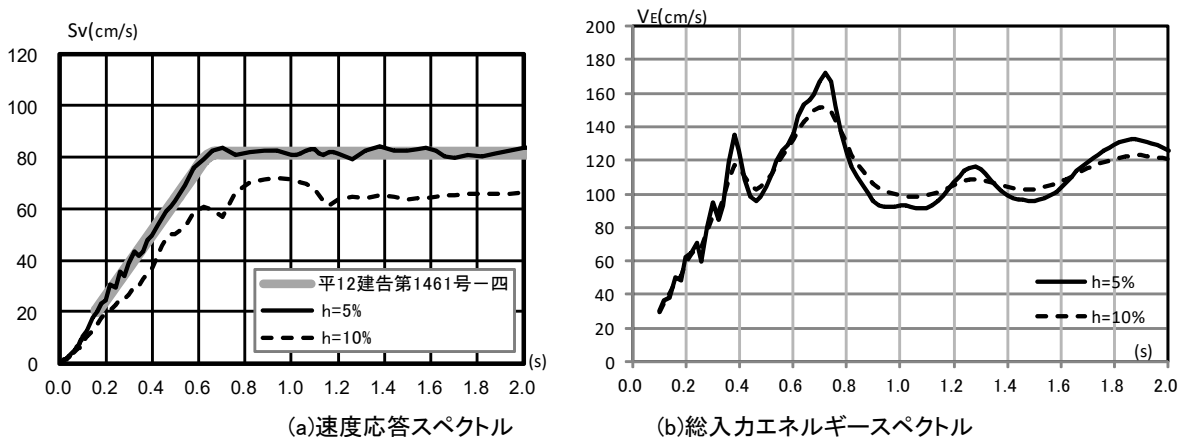
時刻歴応答解析では、工学的基盤に告示波を用いることとなります(その他、既往観測波や地域波も採用することがあります)。告示波は、継続時間 60 秒以上の減衰定数 5%の加速度スペクトルとして定義されていますが、採用地震動の位相特性などは特に定義されていないため、実際の応答解析結果は採用地震動(位相特性)によってある程度のバラツキが生じることとなります。

図 3-3、図 3-4 に、位相「HACHINOHE-EW」(1968 年十勝沖地震八戸港湾記録波 EW 方向)と位相「KOBE-NS」(1995 年兵庫県南部記録波 NS 方向)の速度応答スペクトル S_v と総入力エネルギースペクトル V_E を示します(それぞれ、 $h=5\%$ 、 10% を示す)。左図の速度応答スペクトル S_v ($h=5\%$)は、告示波(平 12 建告第 1461 号一四)とよく整合しており 0.64 秒以上で速度応答値は、一定となります(S_v の $h=10\%$ は $h=5\%$ より多少ばらつきが生じています)。一方、総入力エネルギースペクトル V_E は、周期により大きく変動していることが分かります。また、総入力エネルギースペクトル V_E は採用地震動が異なるとその値が異なることが分かります。これは、採用地震動の特性が、応答解析結果(上部構造の応答値やダンパーのエネルギー吸収量など)に影響することを意味します。

設計者は、応答スペクトルで定められた告示波(平 12 建告第 1461 号一四)を用いても、応答解析結果は大きく異なる可能性があることを理解した上で、余力ある設計を行う必要があると考えます。



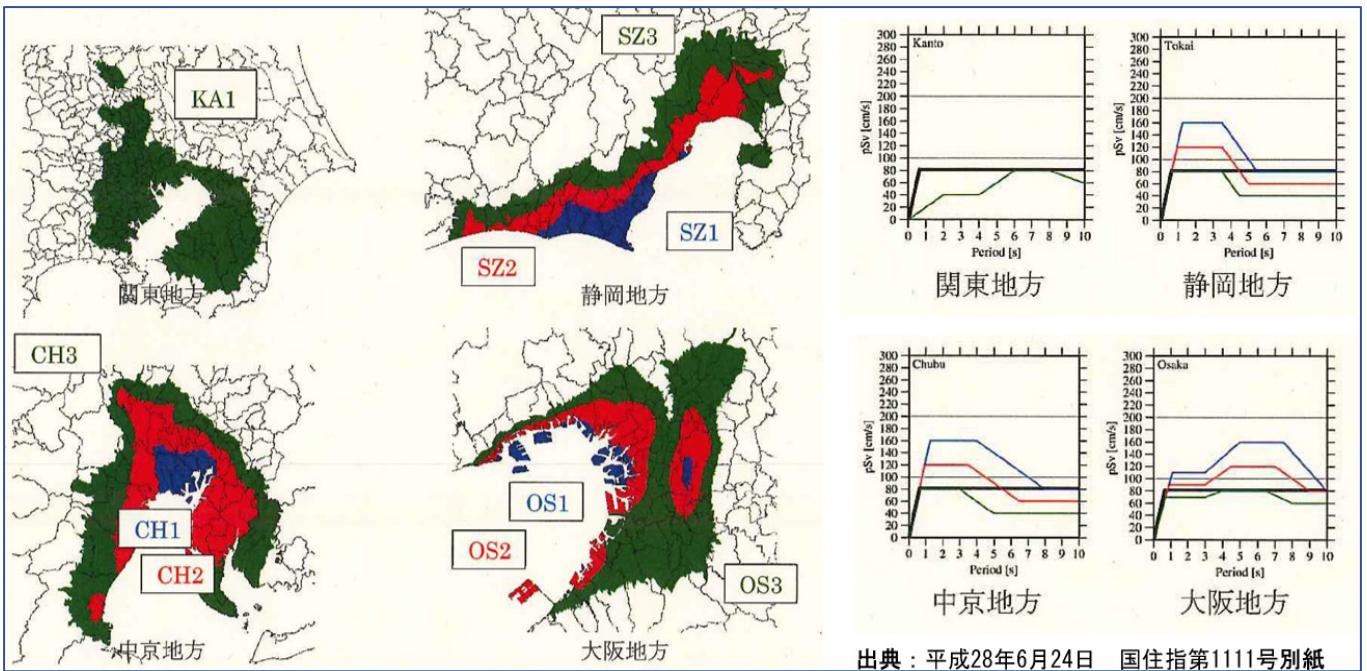
[図 3-3 速度応答スペクトル S_v と総入力エネルギースペクトル V_E : (告示①-HACHI)]



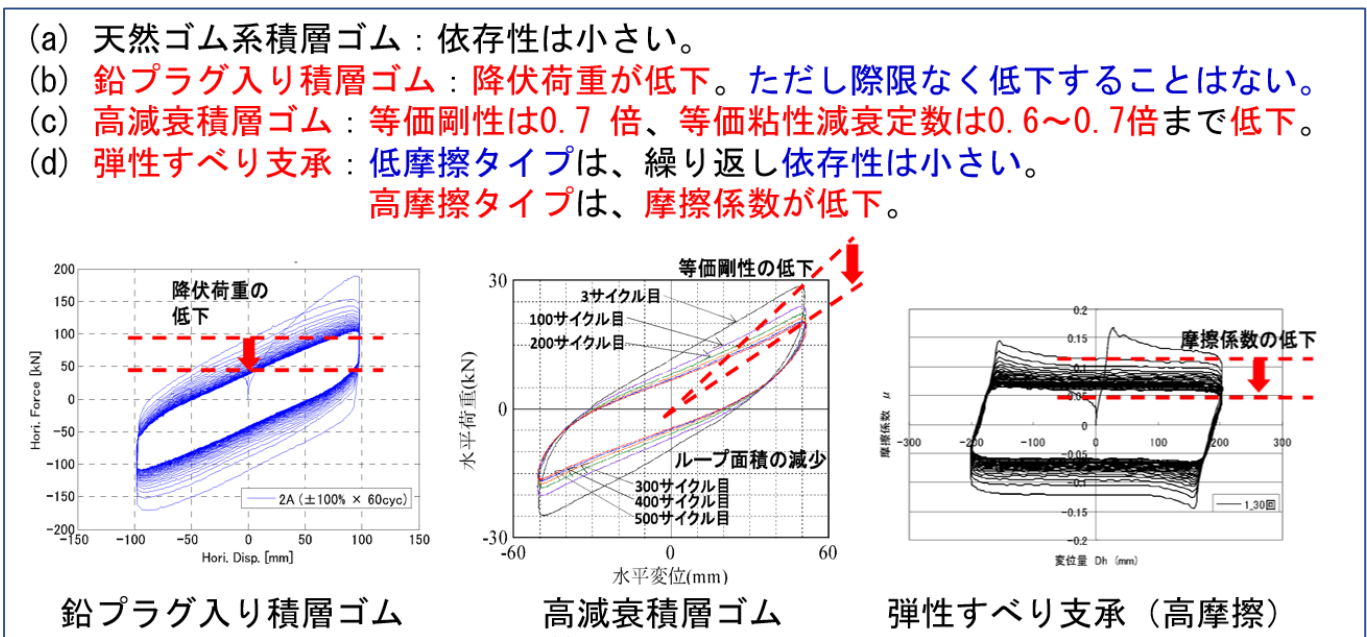
[図 3-4 速度応答スペクトル S_v と総入力エネルギースペクトル V_E : (告示②-KOBE)]

3.2.2 長周期地震動

長周期地震動については、平成 28 年に国土交通省による「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(技術的助言)」が通知されており、対象地域内での超高層建築物や免震建築物に対し、長周期地震動への対策が必要となっています。このため、対象地域では、「従来からの検討に加えて、対象地震によって建設地で発生すると想定される長周期地震動による検討を行うこと。」「免震建築物について、長時間の繰返しの累積変形の影響を考慮して安全性の検証を行うこと。」となっています。長周期地震動の対象地域と擬似速度応答スペクトルを図 3-5 に示します。対象地域は、「関東地方」、「静岡地方」、「中京地方」、「大阪地方」で緑・赤・青で色分けされている区域が対象となります。地震動は緑・赤・青の順で大きくなり、特に青色に該当する地域では、設計に際し、長周期地震動が大きな影響を及ぼすものと考えられます。免震建築物が長周期地震動の作用を受けて応答する場合、免震層に設置された免震部材は通常想定する以上の長時間・大変形の繰返しを受けるため、その特性の変化(繰返し依存性)を考慮する必要があります。図 3-6 および図 3-7 に、代表的な支承材と減衰材を対象とした、長時間・大変形繰返しによる依存性についての確認実験の結果⁷⁾を示します

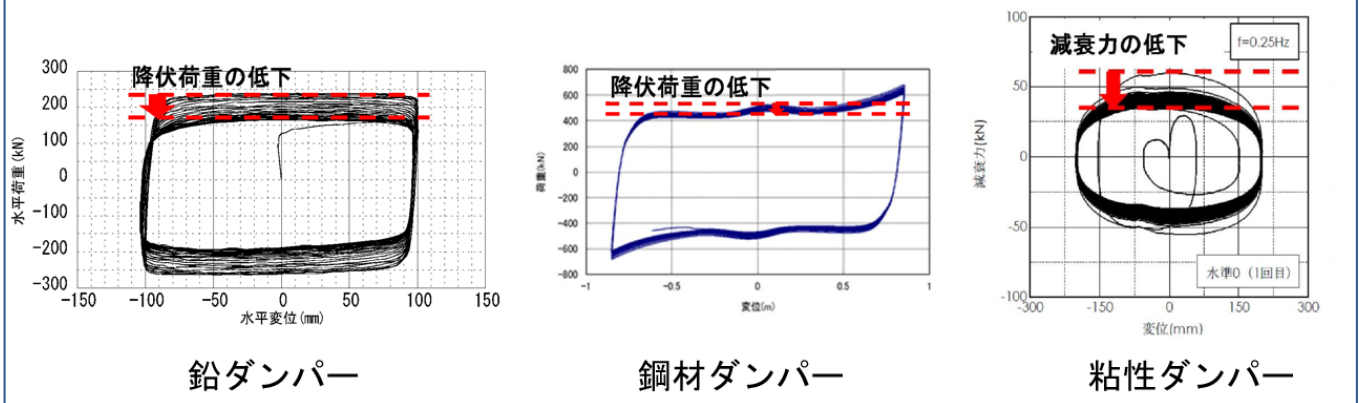


[図 3-5 長周期地震動の対象区域と擬似速度応答スペクトル⁶⁾]



[図 3-6 支承材の長時間大変形繰返しによる依存性についての確認実験結果⁷⁾]

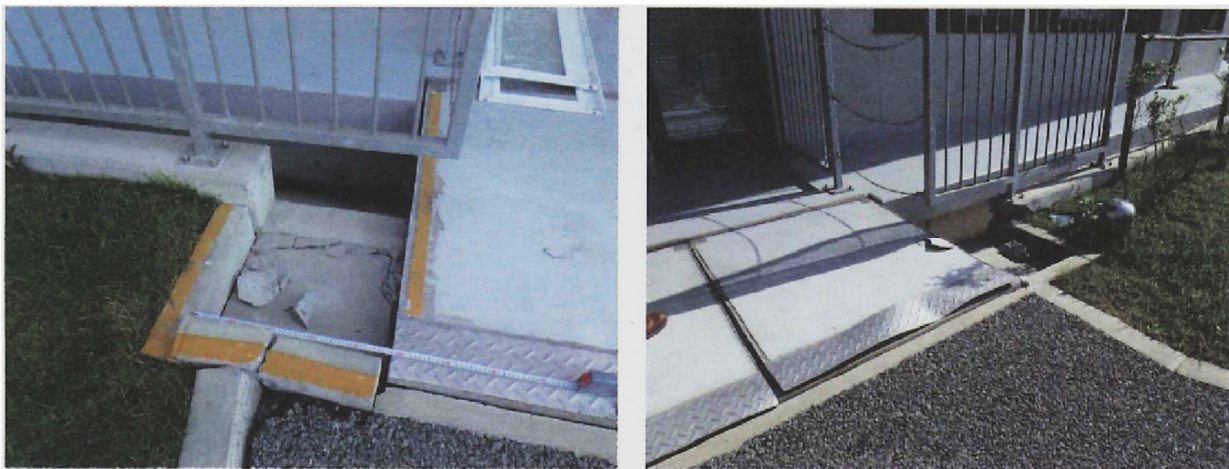
- (a) 鉛ダンパー：降伏荷重が低下。
- (b) 鋼材ダンパー：降伏荷重が低下。
- (c) オイルダンパー：依存性は小さいが、温度上昇の影響を確認しておく必要がある。
- (d) 粘性ダンパー：減衰力が低下。粘性体の温度上昇を考慮する。



[図 3-7 減衰材の長時間大変形繰り返しによる依存性についての確認実験結果⁷⁾]

3.3 エクステンションジョイント

東北地方太平洋沖地震(2011年3月)では、免震建物本体は地震による被害がほとんどありませんでしたが、エクステンションジョイント(以降「EXP.J」)の30%で稼働不良が生じたと報告されています(日本免震構造協会、応答建築物調査委員会報告)。また、熊本地震(2016年4月)でも図3-8や図3-9の写真にも示す様に、EXP.Jに損傷を生じた事例が報告されています⁸⁾⁹⁾。



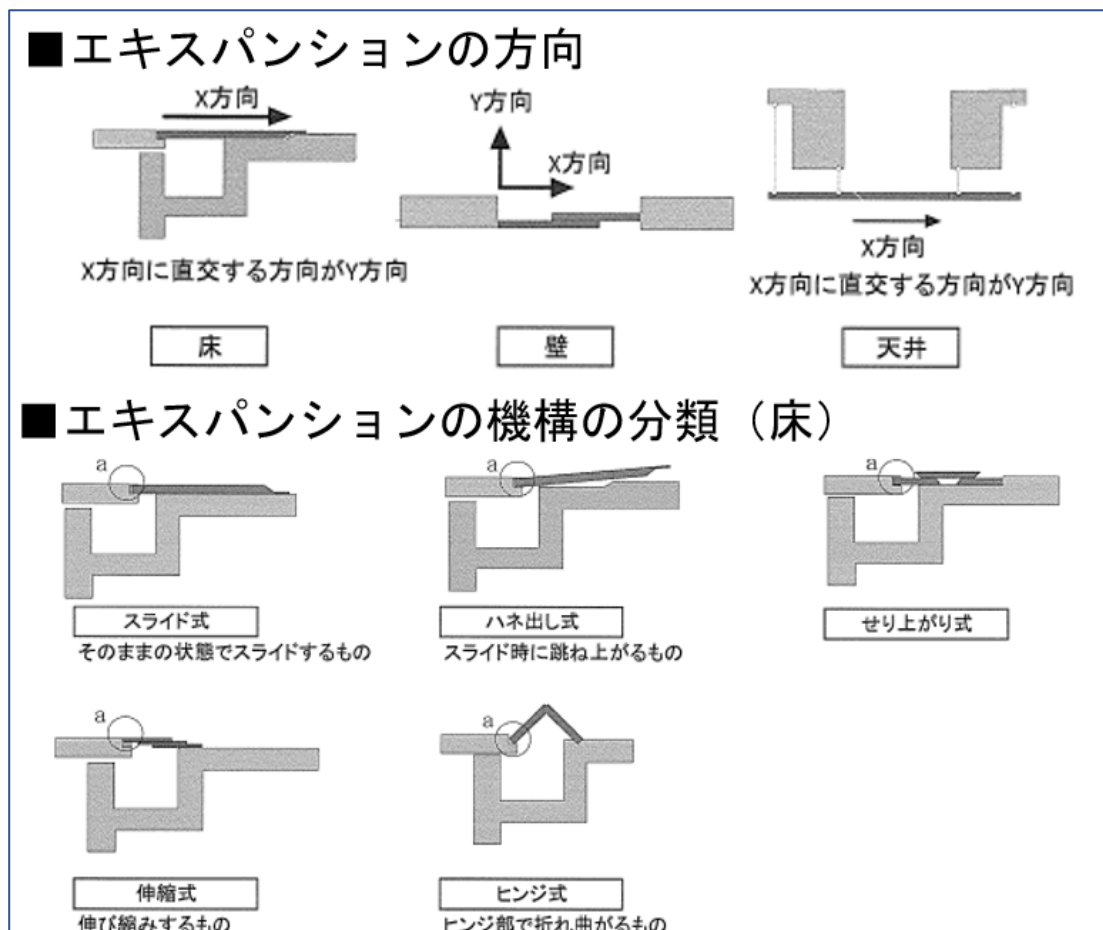
[図 3-8 周辺のクリアランスカバーの損傷⁸⁾]



エキスパンションカバー周囲の変状 破損したエキスパンションカバー (撤去済み)

[図 3-9 壁面や天井面での損傷⁹⁾]

既往の EXP.J の損傷を見ると、EXP.J 自体は問題なくとも、可動範囲での周辺との些細な干渉により損傷している事例も多いため、竣工検査時に十分確認するなど注意が必要です。また、EXP.J 自体は、日本免震構造協会の「免震エキスパンションガイドライン」¹⁰⁾にも記されているように、床だけでなく、壁や天井にも考慮する必要がありますし、床をだけを見ても、スライド式、ハネ出し式、せり上がり式など、様々な機構がありますので、設置位置や機構を十分理解して使用する必要があります(図 3-10 参照)。免震エキスパンションガイドラインでは、表 3-1 に示す様に3つの性能指標が示されており、大地震時において、「A種」は「機能保全」(無補修)、「B種」は「損傷1」(調整・補修で継続使用可)、「C種」は「損傷1」(大規模な補修または部品の交換で再使用可)と性能が分類されますが、「A種」は振動台試験で確認された場合のみで、図面のみで確認の場合は「C種」となります。人が通行する場所では「B種」以上が望ましいとされています。「A種」を採用することに越したことはありませんが、振動台実験には試験コストもかかるため、設計者が適切に判断して設定しましょう。なお、メーカーの標準品では、振動台実験を行った「A種」も増えておりますので、確認して用いるとよいでしょう。



[図 3-10 エキスパンションジョイントの方向、機構の分類 (床)¹⁰⁾]

[表 3-1 エキスパンションジョイントの性能指標の分類¹⁰⁾]

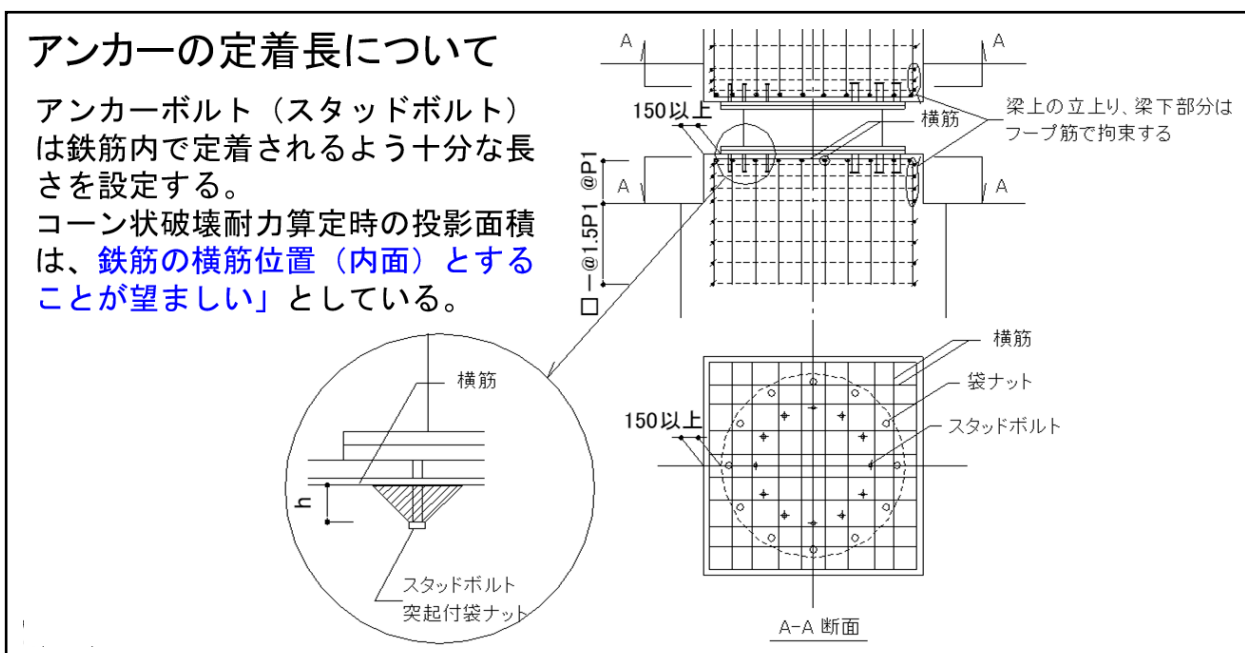
性能指標	中小地震 変位50mm 程度	大地震 設計可動量	確認方法	使用箇所 (参考)
A種	機能保全	機能保全	設計可動量まで損傷しないことを振動台試験により確認する。	避難経路 人・車の通行 の多い箇所
B種	機能保全	損傷状態1	設計可動量において軽微な損傷であること振動台試験により確認する。または、設定可動量まで損傷しないことを手動または加振台にて確認する。	人の通行の ある箇所
C種	損傷状態1	損傷状態2	図面により可動することを確認するのみ。	ほとんど人の 通行がない 箇所

3.4 免震部材の接合部

免震部材と躯体との接合部は、大変重要な部位です。大地震に免震部材の性能が発揮される前に接合部が破損して伝達能力が損失することは絶対に避けなくてはなりません。また、仮に想定外の巨大地震動が生じた場合にも、免震部材・上部構造・クリアランスなどが限界値に達する前に接合部が先行して破損すべきでないと考えます。このため、接合部は安全側で余裕のある設計が行われるべきと考えます。

ここでは、接合部の設計方法、既往の地震時の損傷に見る注意点および新たな知見の反映などが示される免震協会の「免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針」¹¹⁾(以降「接合部指針」)について、主要な内容を抜粋し示します。接合部指針は、2005年の福岡県西方沖地震での鉛ダンパー取り付け部の破損などを受け、2009年に初版が発行され、2020年1月に新たな知見を加えて改訂した第3版が発行されています。

図3-11にアンカーボルトの定着について示します。アンカーボルトやスタッドボルトの頭部が、鉄筋より十分深くなる様に設定し、コーン状破壊耐力算定時の投影面積は、鉄筋の横筋位置(内面)とすることが望ましいとしています。コンクリートのコーン破壊は脆性的でもあるため、鉄筋に囲まれたコンクリート内のみで耐力を確保することで十分な安全を確保することとしています。



[図3-11 免震部材のアンカー定着長について¹¹⁾]

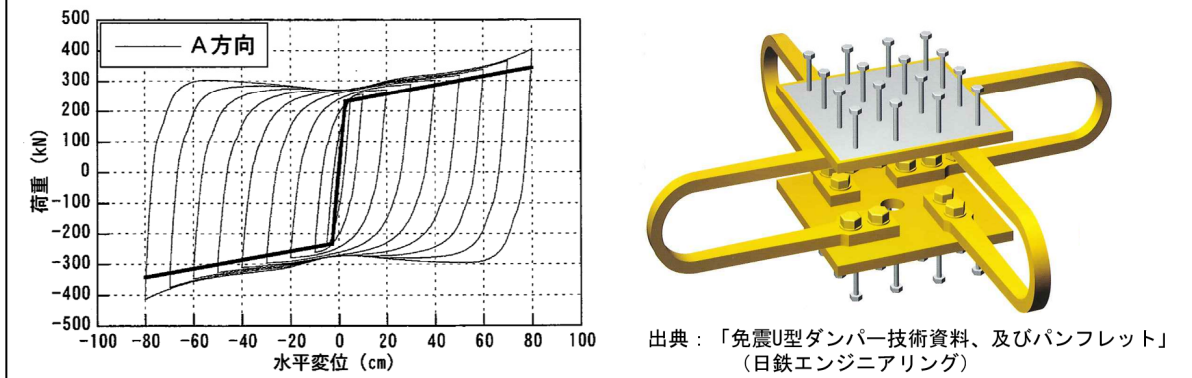
接合部の設計に用いる免震部材の反力ですが、免震部材の大臣認定書などでは地震時に等価なエネルギー吸収量となる様な復元力の諸元が示されており、応答解析などにはこれを用いますが、接合部には最大反力に対し問題ない設計とする必要があります。図3-12には鋼材ダンパーの復元力特性を示していますが、設計で用いているバイリニアの黒線よりも履歴ループの実験反力が大きいことが分かります。この反力に対しても、接合部は十分な安全な設計をする必要があります。

接合部指針のアンカーボルトの算定式は、日本建築学会の「各種合成構造設計指針」の準拠を基本としています。この指針でのアンカー一径の適用範囲は、9mm以上～25mm以下ですので、これを超え軸径が太い場合、特に突起付き袋ナットの引張耐力などで算定式を用いた場合、引張耐力が発揮できない可能性がありますので注意が必要です。また、突起付きボルト先端の突起形状は、引張耐力確保のため十分な大きさや首下長さが重要です。接合部指針で示されている具体的な突起部の形状を図3-13に示します。頭部径 D_n は軸部の2.5倍以上、軸部の長さは軸径 d_b の6倍以上、突起頭部の出 D_a の8倍以上として、アンカーに大きな引張力が生じてもが抜けることのない形状としています。

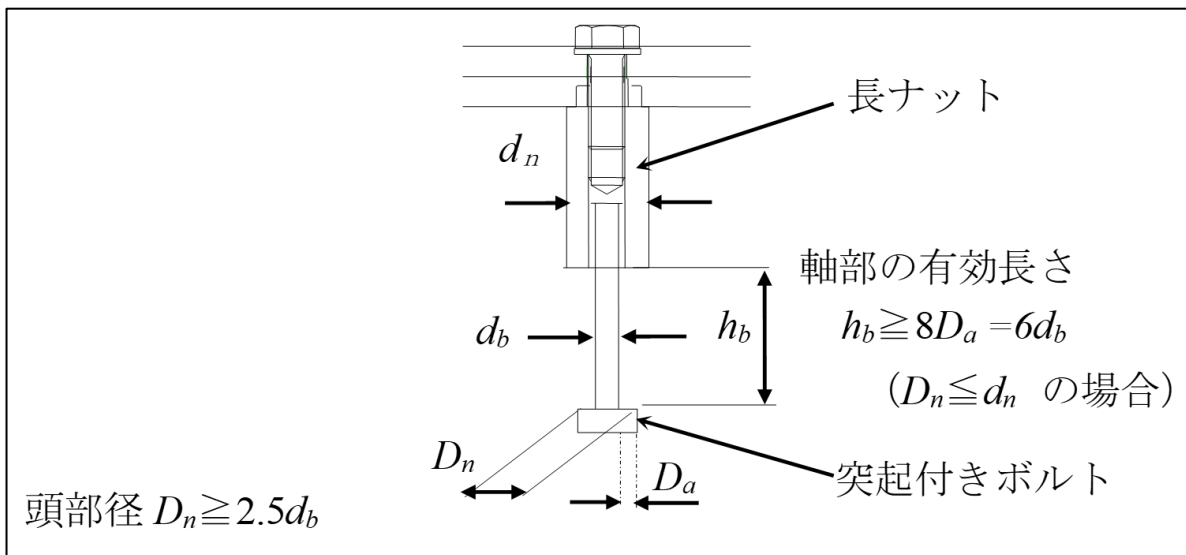
接合部指針の第3版では、積層ゴムに引張軸力が作用する場合、てこ反力を考慮することが新たに追加されています。てこ反力(図3-14)は、右図の厚いベースプレートでは考慮しませんが、左図の薄いベースプレートでは、てこ反力を考慮することとしています。この際、ボルトにてこ反力係数(α)として引張力の割増をボルトに考慮します。ちなみに、接合部指針のてこ反力が考慮された設計例では、1.6倍程度の割増が算出されています。

設計反力についての注意点

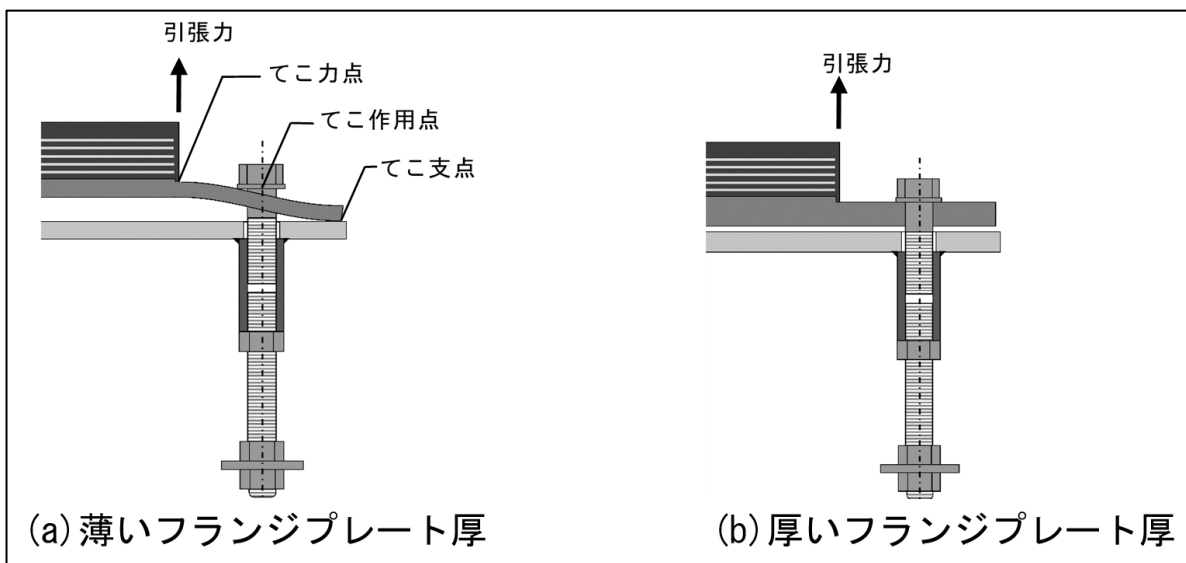
ダンパー等の部材認定書などには等価なエネルギー吸収量となるような復元力特性に対する諸元が示されているが、免震部材の最大反力は必ずしも示されていない。(設計者は部材メーカー資料等より最大反力を把握する)



[図 3-12 鋼材ダンパーの復元力特性と反力について¹¹⁾]



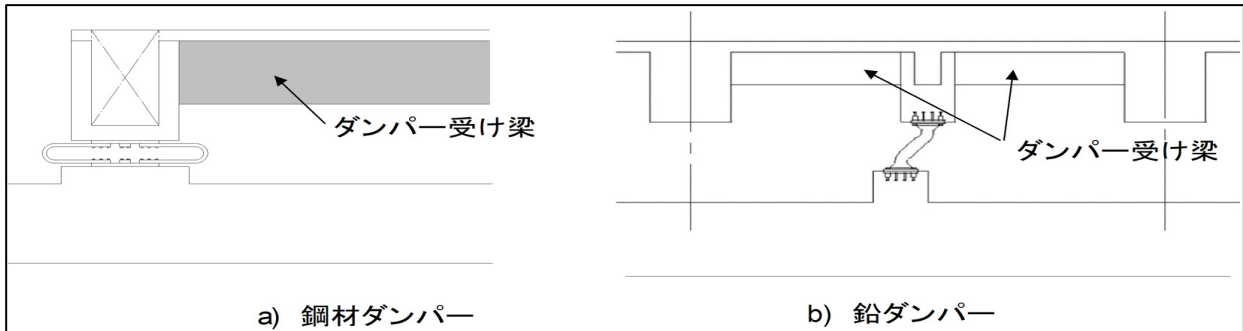
[図 3-13 突起部先端および軸部の形状 (頭部径 D_n がナット径 d_n より小さい場合)¹¹⁾]



(薄いフランジプレート厚の積層ゴムに引張軸力が作用する場合、てこ反力を考慮)

[図 3-14 てこ反力による取付けボルトに作用する引張力の割増¹¹⁾]

ダンパーが取り付け躯体の留意点について述べます。ダンパー性能を発揮するためには、ダンパー反力に対し、架台に取り付く周辺躯体(梁、耐圧版等)では剛性および耐力を確保する必要があります。このため、大梁に取り付くダンパーには、大梁の直交方向にダンパー受け梁を設けるなど、さまざまな方向のダンパー反力の伝達に考慮する必要があります。仮に、大梁など主フレームから離れてダンパーが配置する場合には、ダンパー受け梁などにより剛性と耐力を確保する必要があります(図 3-15)。



[図 3-15 ダンパー取り付け躯体とダンパー受け梁¹¹⁾]

図 3-16 に熊本地震でのダンパー取り付け躯体の破損状況¹²⁾を示します。

鉛ダンパーには、せん断力だけでなく引張軸力も発生するため設計時には水平反力だけでなく軸力についても考慮する必要があります。ダンパーは大梁付近に配置し、大梁と直交方向には小梁(受け梁)を設けるなどして反力を確保することが望ましいと考えられますが、仮に、スパン中央部(スラブの中央直下)に鉛ダンパーを配置した場合を想定すると、図 3-17 に示す検討例では、剛性および耐力の確保に、梁成 1.0m 程度のダンパー受け梁が必要となります。

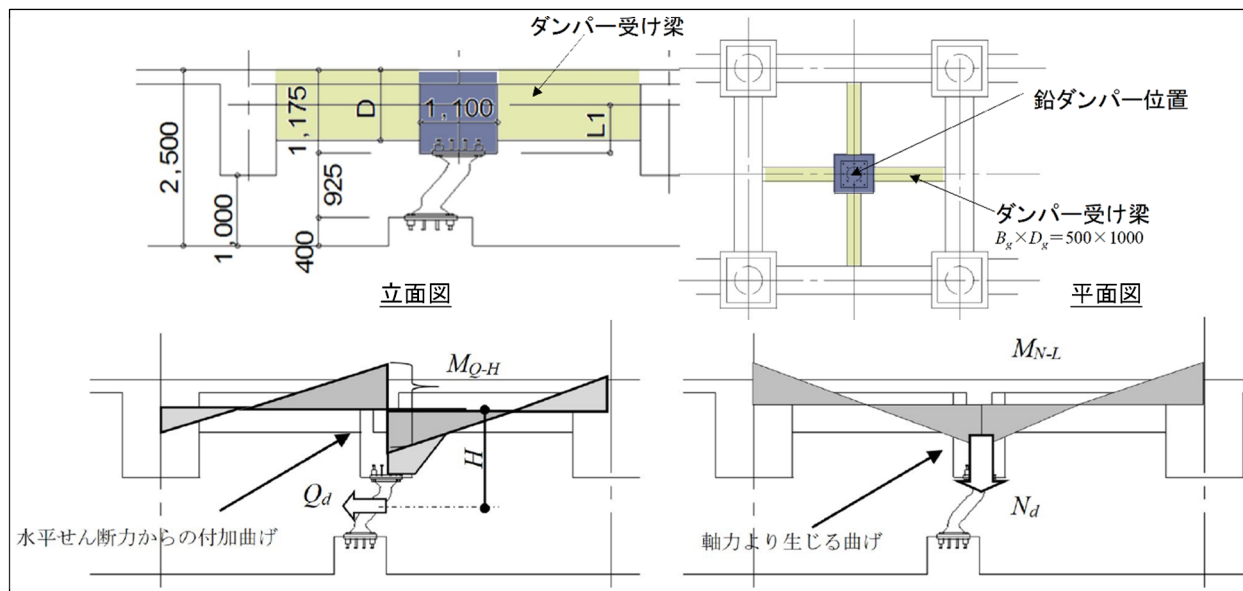


C 共同住宅：鉛ダンパー取り付け基部（床スラブの破損）

I 共同住宅：ダンパー基部の破損

「平成 28 年（2016 年）熊本地震による建築物等被害第九次調査報告（速報）（免震建築物に関する調査）
：平成 28 年 6 月 1 日、国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人建築研究所」より

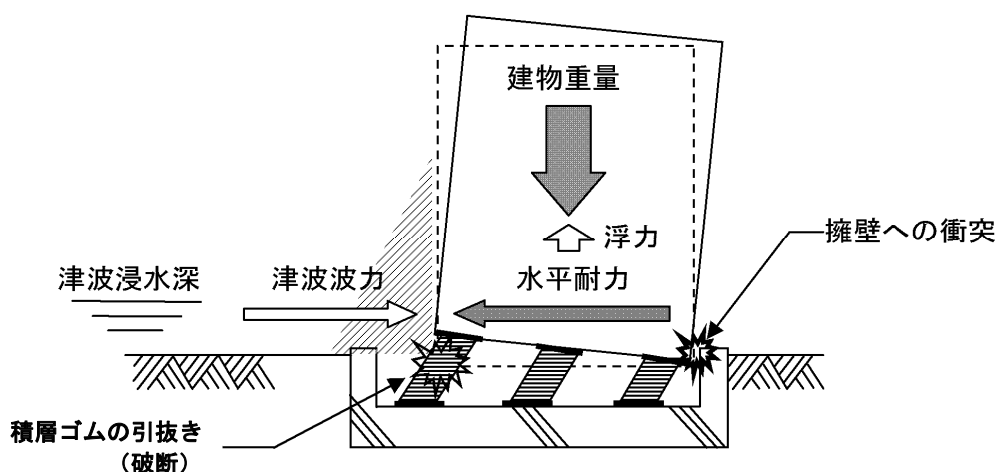
[図 3-16 熊本地震でのダンパー基部の損傷¹²⁾]



[図 3-17 鉛ダンパー取付き部の検討例¹¹⁾]

3.5 津波

免震建物は、水平抵抗力が小さいこともあり津波に対しては耐震建物よりも弱い傾向にあります。このため、津波波力や浮力が大きな場合には、図 3-18 に示す様に、積層ゴムの引抜・破断、擁壁との衝突などが考えられます。



[図 3-18 津波荷重作用時における状態の例¹³⁾]

津波における免震建物については、その留意点や、津波による損傷度に対する性能評価、および建物の流出防止策(フェールセーフ)などが、免震協会の「免震建物における対津波構造設計マニュアル」¹³⁾(以降「津波マニュアル」)に示されていますので、主要箇所の説明を以降に示します。

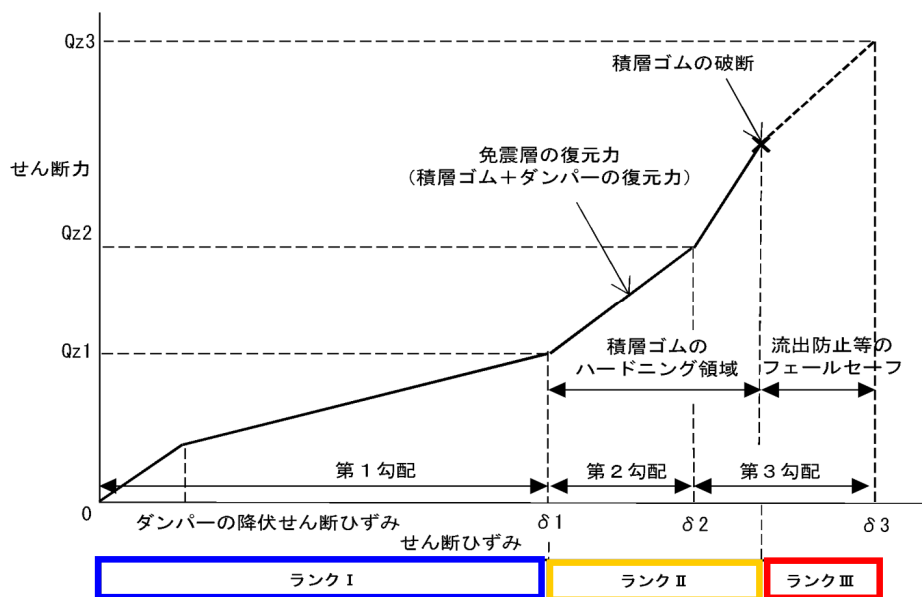
津波マニュアルでは、免震層の対津波目標ランクを設定し免震層が津波で浸水した場合には点検により損傷度を確認することとしています。表 3-2 に免震層の対津波目標性能ランク(積層ゴムの場合)を示しています。「免震部材の取替えなしで免震層を継続使用が可能」を「ランクⅠ」、「免震部材を点検結果により取替えの有無を判断し免震層を再利用が可能」を「ランクⅡ」、「建物の転倒・崩壊・流出防止」を「ランクⅢ」とした、三つのランクに分類しています。

図 3-19 には、積層ゴムのせん断ひずみとランクの関係を示しています。積層ゴムの状態がせん断ひずみで決まる場合には、積層ゴムがハードニングを生じない範囲であれば「ランクⅠ」、破断が生じない状態までは「ランクⅡ」となります。積層ゴム破断後の「ランクⅢ」では建物の流出防止などのフェールセーフに期待することとなります。なお、「ランクⅡ」では、調査より積層ゴムが損傷していると判断された場合には交換が必要となります。

表 3-3 には、建物の流出防止に用いる「フェールセーフ」の例を示しています。擁壁を丈夫にして衝突後の流出を防ぐ案や、チェーンやケーブルにより流出を防ぐ案が示されています。津波により転倒が想定される免震建物では、かん合型のコンクリート躯体や、口の字で組み合わせた鋼材による「引き抜き抵抗」を考慮したフェールセーフの案が示されています。

[表 3-2 免震層の対津波目標性能ランク（積層ゴムの場合）¹³⁾]

ランク	免震層の目標	積層ゴムの状態
I	免震部材の取替えなしで免震層を継続使用が可能	水平：地震用設計限界ひずみ以内 鉛直：引張限界ひずみ以内、引張限界応力度以内
II	免震部材を点検結果により取替えの有無を判断し免震層を再使用が可能	水平：損傷する可能性がある（ハードニングは許容 破断は許容しない） 鉛直：引張限界ひずみ以内、引張限界応力度以内
III	建物の転倒・崩壊・流出防止	水平、鉛直とも破断する可能性がある



[図 3-19 積層ゴムのせん断ひずみとランクの関係¹³⁾]

[表 3-3 免震建物の対津波フェールセーフ機構の例¹³⁾]

形式	擁壁衝突	チェーン形式	ワイヤー・ケーブル形式	かん合型 HV ストッパー	鋼材形式
種類	水平抵抗	水平抵抗	水平抵抗	水平・引抜き抵抗	水平・引抜き抵抗
イメージ図					
考え方	地震時設計クリアランスを超える変形に対して、地下擁壁に衝突して変形を抑制する。	免震部材に過大な変形が加わらないように、チェーンにより変形を抑制し、建物の流出を防ぐ。	免震部材に過大な変形が加わらないように、ケーブル等により変形を抑制し、建物の流出を防ぐ。	地震時設計クリアランスを超える変形に対して、免震層に構築したRC壁に衝突して変形を抑制する。	免震部材に過大な変形が加わらないように、鋼材をコの字または口の字型に組み合わせて変形を抑制し、建物の流出を防ぐ。

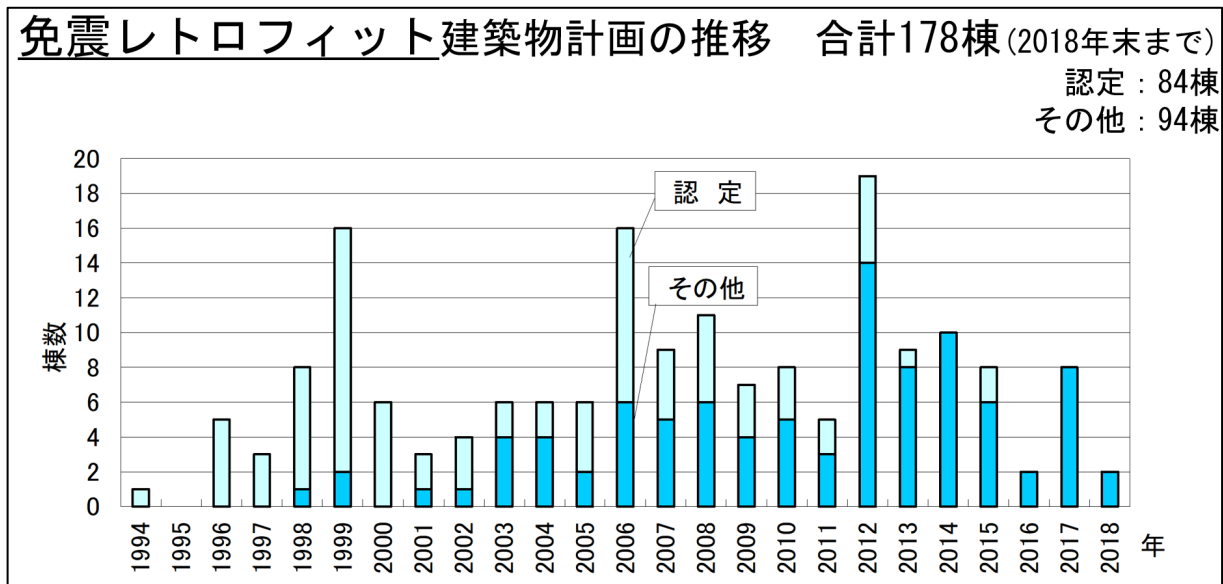
4. 免震レトロフィット

免震レトロフィットは、既存の耐震構造建築物を免震構造に改修した建物ですが、免震構造の採用により、上部建物への地震応答加速度（設計地震力）が飛躍的に小さくなります。このことより、免震層を除く上部構造への補強が生じない場合も多いため、居ながらの改修工事を行う事例も多くなっています。一方、新築と異なり改修の際には、既存建物の荷重をジャッキで支持させるなどして、免震部材を設置する必要があるため、免震層の構築には様々な配慮が必要となります。以降に免震レトロフィットの推移や、設計・施工での配慮などについて示します。

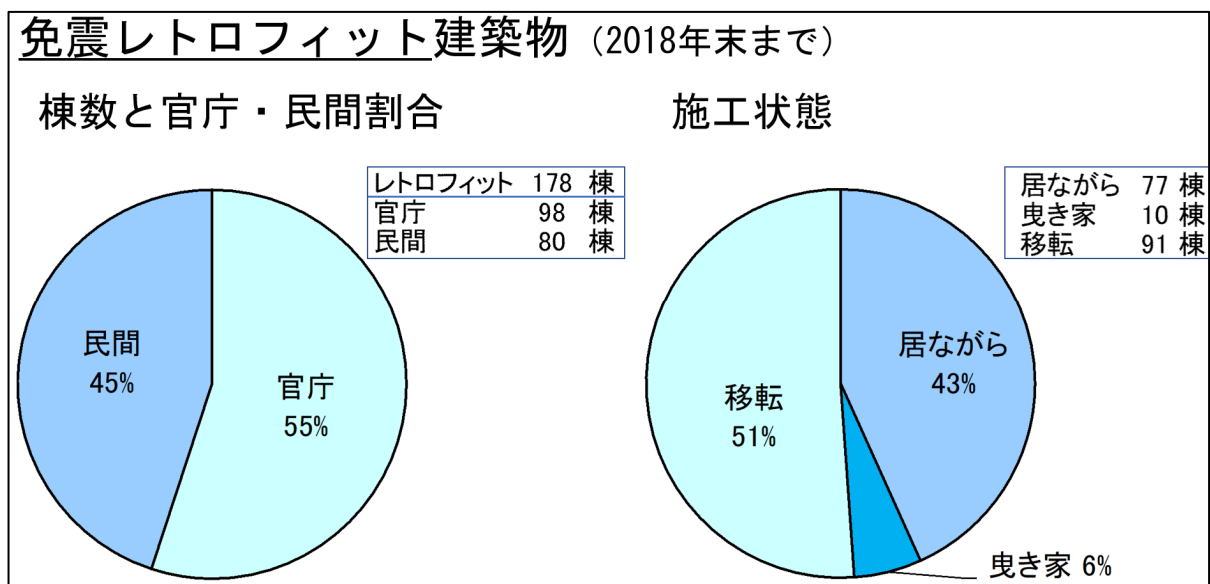
4.1 免震レトロフィットの推移と用途

免震協会が集計した免震レトロフィット建築物の年推移と大臣認定取得棟数を図 4-1 に示します。2018 年までで 178 棟となっています。面積増や用途変更などの問題が生じなければ、法律上は大臣認定まで取得する必要はないため、大臣認定まで取得しないケースが近年増えています。

図 4-2 には、免震レトロフィットの官庁と民間の割合を左の円グラフ示しています。免震レトロフィットでは、55%が官庁施設となっています。右の円グラフには、施工状態を示していますが、43%で居ながらの工事が行われています。免震レトロフィットの多くは、居室に補強を施さない場合が多いため、耐震性能を満足しない既存建物で移転を行わず業務継続できることが、官庁施設などでは、大きなメリットとなっています。



[図 4-1 免震レトロフィットの年推移⁴⁾]

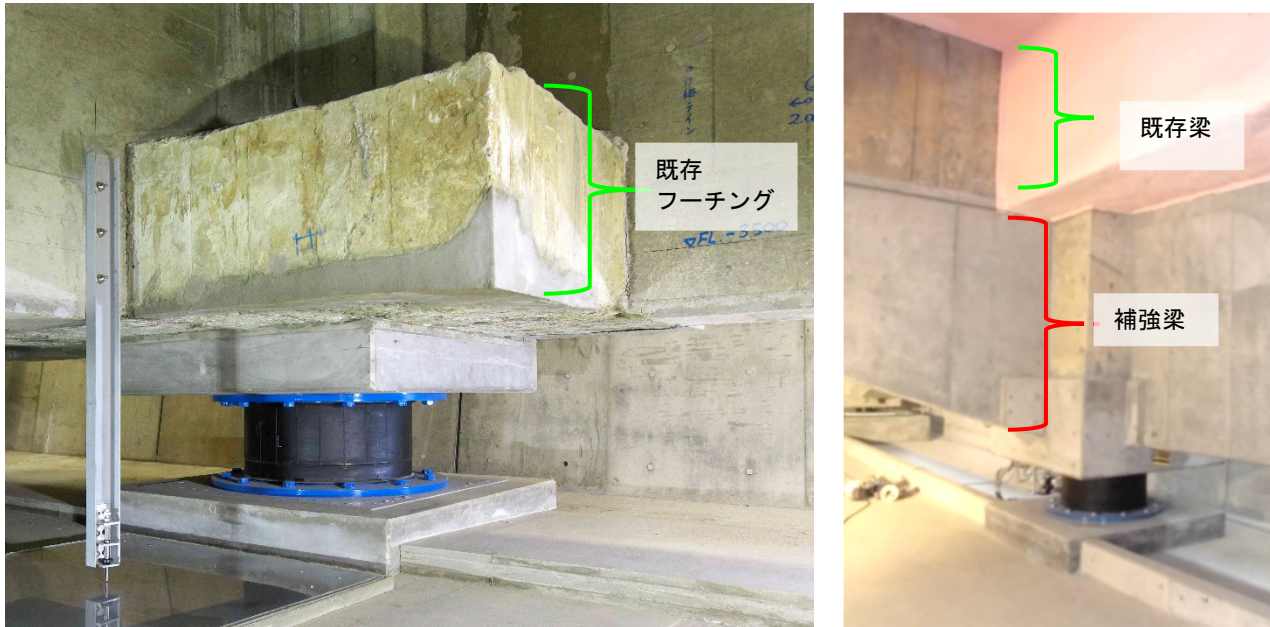


[図 4-2 免震レトロフィットの官庁施設割合と居ながら施工の割合⁴⁾]

4.2 免震層の設計や施工での配慮

免震層の設計では、免震部材の応力伝達に必要な断面を確保する必要があります。特に、柱直下の積層ゴム周辺躯体では地震時の水平変形時に生じる曲げ応力を負担できる躯体とする必要があります。免震レトロフィットでは、免震層の上部の既存梁を補強するなどして断面性能を確保することや、免震層の下部では、応力伝達可能な丈夫な躯体を構築する必要があります。

図 4-3 には、免震レトロフィットでの積層ゴム周辺躯体(例)を示しています。共に免震層上部の既存基礎梁下を積層ゴムの曲げ応力を伝達するため補強している基礎免震です。①の写真は直接基礎で、既存フーチングはそのまま残し周囲を新設躯体で補強した例です。②は杭を切断し積層ゴム配置した箇所で、既存梁下に補強梁を設けた例です。



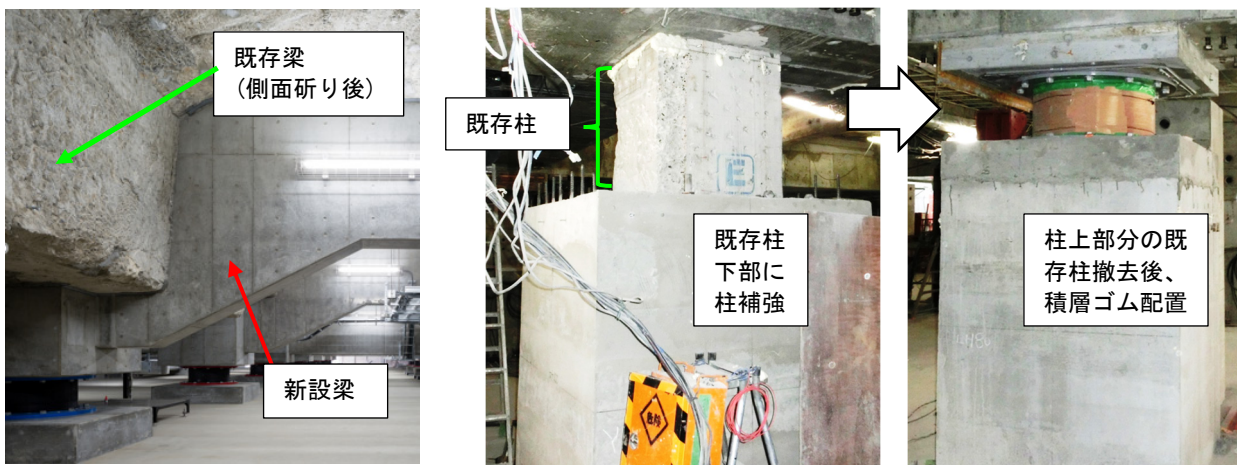
①直接基礎の免震部材周り (例)

②杭基礎の免震部材周り (例)

[図 4-1-3 免震レトロフィットでの積層ゴム周辺躯体 (例)]

余談ですが、基礎免震のレトロフィットでは、地中内の既存基礎躯体は掘削してみるまで図面通りの形状であることが確認できないため、無筋コンクリートが周辺にあり躯体外形が異なった例があります。大きな荷重増となる場合には、時刻歴応答解析結果や積層ゴムの支持面圧に影響するため、この箇所を研り取る作業が生じることとなります(施工者に大きな負担が生じる場合があります)。図 4-4 の免震層の写真では、既存基礎梁(積層ゴム直上の梁)に研り作業を行った跡が確認できます。

中間層免震では、柱を大きく補強し積層ゴムの応力を伝達できる断面とする必要があります(図 4-5)。補強柱は、大地震時に曲げひび割れが生じると剛性低下が生じる可能性があるため、柱は十分な大きさを確保し、繰り返しの応力にも剛性低下を生じない断面とすることが望ましいです。



<既存梁側面ふかきを研り>

<杭既存柱と補強>

<積層ゴム挿入後>

[図 4-4 基礎免震免震層 (例)]

[図 4-5 中間層免震の柱補強 (例)]

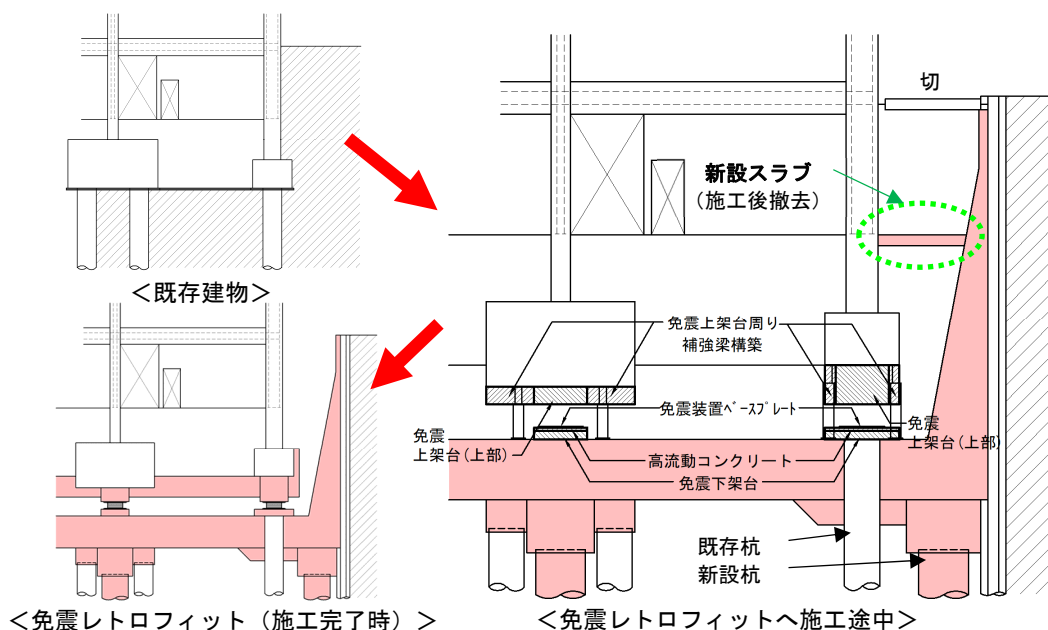
基礎の設計においては、直接基礎の場合は、上部の軸力伝達や地震時の免震部材より生じる反力に対する伝達を考慮することになりますが、杭基礎の場合には既存杭への影響を確認することが必要となります。上部構造より先行して杭が損傷した場合、建物全体としての性能が確保できない可能性があるため、杭の健全性への配慮が必要となります。杭基礎では、免震構造の採用により、上部構造からの慣性力(上部構造からの地震反力)は小さくなりますが、地盤の動的変形を考慮した設計(応答変位法による解析)に対応することも多いことや、そもそも旧耐震基準時に設計された既存杭では水平耐力が小さいことなどの問題が生じます。一案として、既存杭より大きな新設杭を増し杭し、地震時のせん断力はこの新設杭で殆どを負担し、柱直下にある既存杭は主に軸力保持に期待するなどの対応が考えられます。なお、狭い免震層での杭施工には、場所打ち杭の配筋を短く分けて施工(鉄筋は機械式接手を考慮)や、小さな重機で施工可能な小径の鋼管杭を多く配置するなどの配慮が必要です(図4-6)。



＜既存杭（掘削後、新設杭施工前）＞ ＜杭配筋の分割施工＞ ＜鋼管杭の施工＞

[図4-6 免震レトロフィットでの杭施工（例）]

免震レトロフィットでは、施工時(ジャッキアップ時)の地震対策(水平拘束)にも十分な配慮が必要です。地震時の水平拘束は、小規模な建物では免震部材周りに拘束材を設けることや擁壁への切梁で可能な場合もありますが、建物が大規模な場合にはこれらの拘束のみでは不十分な場合も多いため、新設擁壁と既存建物を新設スラブで接続するなど、大きな水平反力を確保する対応が必要です。図4-7に地下1階の直下を免震層とした免震レトロフィット建物の施工例を示します。この例では、擁壁構築時に既存基礎梁(免震層直上の基礎梁)と擁壁との間にスラブを新設し施工時に地震が生じた場合の水平反力を確保できる様にしています。このスラブは、平面的にX・Y方向共にバランスよく配置し、スラブの軸力伝達ではなく、主にスラブと擁壁の面内方向でのせん断伝達に期待します。この施工時のみ必要なスラブは竣工前に撤去します(ワイヤーソー工法などで切断)。

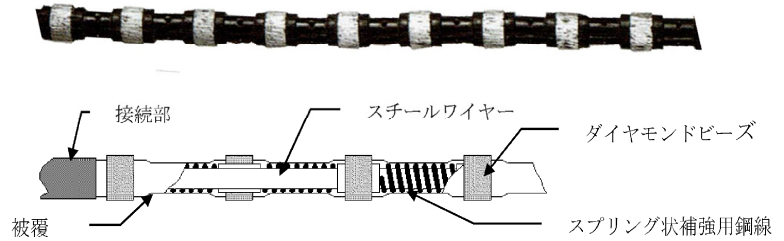


[図4-7 免震レトロフィット基礎周りおよび施工途中図例]

免震レトロフィットで大断面の躯体(コンクリート・鉄筋)の切断には、ワイヤーソー工法が用いられることがよくあります。ワイヤーソー工法は、切断対象物にダイヤモンドワイヤーを環状に巻きつけ高速走行させて切断する工法です。図 4-8 にダイヤモンドワイヤーの説明図¹⁴⁾を示します。ダイヤモンドワイヤーは、ダイヤモンド砥粒を埋め込んだビーズが一定間隔に配置された構造になっています。図 4-9 は既存フーチングをワイヤーソー工法で切断している状況を示しています(免震建物と擁壁とのクリアランス確保に不要な既存フーチング躯体を切断)。なお、切断面で設計に考慮している既存鉄筋の定着長が確保できない場合には、座金溶接などで鉄筋の抜けを防ぐなどの細部への配慮も必要です(図 4-10)。



(フーチング切断)
[図 4-9 ワイヤーソー施工例]



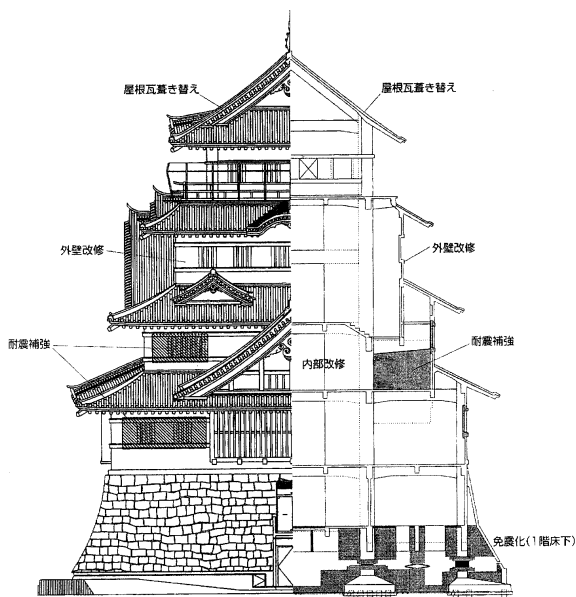
[図 4-8 ワイヤーソー (ダイヤモンドワイヤー)¹⁴⁾]



(座金溶接対応)
[図 4-10 鉄筋抜け出し防止例]

4.3 建物外周(一例)

建物外周では、新築と同様に通行箇所には EXP.J の設置などを行い対応しますが、既存建物の外周全てで 50~60cm の移動スペースを確保するため、建物によっては工夫を要する場合があります。ここでは一例として、城郭建築物(博物館)の免震レトロフィットの外周に植栽を配置し、外観を損なわず改修した例を示します。既存建物の石垣は厚い石を壁に打ち込んだ躯体より構築されていたので、この石垣の内側を免震層とした事例です(図 4-11)。



[図 4-11 免震レトロフィット事例:建物外周に植栽を配置し美観に配慮した例(千葉郷土資料博物館)]

石垣の美観を損ねないため、外周部では柱脚部(石垣の地上近く)、およびアプローチ階段傾斜部で、免震建物が変形する設計として
います(図 4-12)。当初(左写真)では植栽が成長していませんでしたが、現状(右写真)では植栽が成長し、免震建物と分らないきれ
いな外観となっています。



＜植栽直後(竣工直前)＞

＜現在の状況＞

[図 4-12 建物外周に植栽を配置して美観に考慮した例]

4. 免震建物の維持管理

免震建物は建物の年月が経っても、設計で考慮された免震機能を維持していくことが必要です。そのため、免震建物の維持管理は大変重要となります。

免震建物が数十年に渡り存続していく過程で、建築主や居住者が変わるなどで、建物が免震建物との認識がない場合や免震建物はどうのような維持をすればよいのか理解できていない場合、大きな問題となる可能性も考えられます。例えば、「建物の犬走と地面の段差をアスファルトで埋めてしまった(免震建物の変形を拘束してしまった)」、「ガス管などの設備配管の更新や新設でフレキシブル配管でない変形追従できない配管としてしまった」などが想定されます。このような場合、本来の機能が発揮できないばかりか、大変危険な状態となる可能性もあります。このため、建築主や居住者には免震建物であることの認識と最低限の知識は必要と考えます。また、免震建物には、専門家(「免震建物点検技術者」:免震協会の資格)による点検が必要となります。

以降に、免震建物の維持管理として、免震協会の「ユーザーズマニュアル¹⁵⁾」および「維持管理基準¹⁶⁾」について簡単に説明します。「ユーザーズマニュアル¹⁵⁾」は、一般向けに、免震建物とはどのような建物かの簡単な説明や、免震建物を維持管理していくために必要な項目が分かりやすく示されています。6つの約束として、「火を使わない」「立ち入らない」「物を置かない」「変更は事前にご相談を」「建物周囲に注意」「改築も事前にご相談を」があり、免震建物を維持するための基本事項が示されています。機能維持のためのメンテナンス(専門家による点検)も示されています(図 5-1)。

専門家による点検内容や具体的な点検方法は「設計図書」や「維持管理基準¹⁶⁾」に示されています。維持管理基準¹⁶⁾に示される点検は、「通常点検」「定期点検」「応急点検」「詳細点検」「更新工事後点検」の5つがあります。地震などの被災を被らなくても「通常点検」や「定期点検」を行う必要があります。「通常点検」は毎年行う目視を中心とした点検です。「定期点検」は竣工後5年、10年以降10年毎に行う計測を含めた点検です。特に毎年を目視点検を行い、クリアランスが確保されているか、免震部材周りに問題となる劣化等が生じていないかを毎年確認することは重要と考えます。クリアランスに問題がある事例としては、「免震層に荷物が置かれている」、「新たな設備が免震層内の擁壁との隙間に存在しクリアランスが確保できていない」、「建物外周部のクリアランス内に障害物(看板・標識・大木)がある」などがあり、問題がある場合には改善が必要となります。免震部材周りの劣化としてもっと多いのが発錆です。免震層では湿気が多い場合も多く、図 5-2 に示す様な鋼材部の錆びが確認されることがあります。発錆が進んだものでは、ボルト部のワッシャーが手でボロボロと取れるようなものもありました。早期の発見および発錆部の再塗装などの対応が必要です。被災時(大地震後)には、「応急点検」

を行います。大変形をした建物では免震部材周りに変状が生じている可能性があります。大地震後に確認された事例として、「鋼材ダンパーの変形と塗装剥離」・「オイルダンパー取付ボルトの緩み」を図 5-3 に示します。なお、点検を行う専門家である免震建物点検技術者は、点検結果を報告するまでが役割で、問題があった箇所の改善策は、設計者が行うこととなります。

免震で安心

ユーザーズマニュアル



JSSI
The Japan Society of Seismic Isolation

～免震建物6つの約束～

1 火を使わない



免震層には、免震装置が設置されています。この装置を傷つけたり、火気にさらしたりすることのないよう充分注意してください。

2 立ち入らない



免震層への立ち入りは、建物管理者の許可のもとに実施してください。

3 物を置かない



地震時に免震装置や配管の動きを制約する可能性があるため免震層には物を置かないでください。

4 変更は事前にご相談を



設備配管や電気配線等は、大地震時でも損傷しないよう、特殊な設計がなされています。配管類に影響を及ぼすような工事を実施する場合は、設計者など専門家にご相談ください。

5 建物周囲に注意



建物は、大地震時に地面に対して大きく動きます。建物外周約50cmの範囲には物を置かないで下さい。
例) 標石、門柱、樹、庭石、車両、設備機器および配管、街灯、樹木等

6 改築も事前にご相談を



免震建物は、特別な構造計算に基づいて設計および施工がなされています。建物に変更を加える場合は、設計者など専門家にご相談ください。

免震層内での約束

屋外での約束

●機能維持のためのメンテナンス

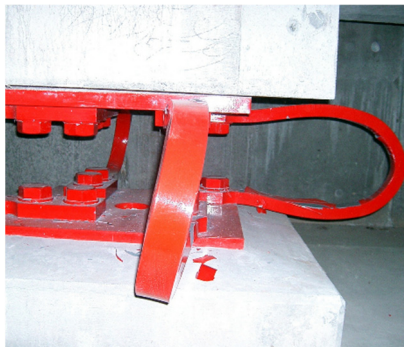
免震建物には、設計時点で「維持管理要領書」が作成されており、それに基づき、専門家による下記のような通常点検・定期点検・応急点検・詳細点検が必要になります。

1. 通常点検：毎年の目視点検
2. 定期点検：建物竣工後5年、10年以後10年ごとの計測を含む点検
3. 応急点検：地震・強風・水害・火災等の被災時の目視を主体とした点検
4. 詳細点検：各種点検において異常が認められた場合の計測を含む点検
5. 更新工事後点検：免震層など免震機能に関わる部分の変更工事実施後の計測を含む点検

[図 5-1 ユーザーズマニュアル¹⁵⁾より、免震建物6つの約束、機能維持のためのメンテナンス]



(積層ゴムフランジ PL の発錆)
[図 5-2 免震部材の発錆]



(鋼材ダンパーの変形と塗装の剥離)



(オイルダンパーのボルトの緩み)

[図 5-3 地震後の免震部材の変状¹⁷⁾]

6. おわりに

免震建物は、一般的な耐震建物より高い性能を有していますが、仮に想定通りの性能を発揮できない場合、一般建物以上にその影響は大きい可能性も考えられます。また、巨大地震時にこそ建物の継続利用が求められる免震建物では、想定外の地震が発生した場合にも、即NGではなく、ある程度の性能確保が可能な構造とすることが望ましいと考えます。

構造計画・構造設計・設計細部・施工・維持管理等に十分な理解と配慮を行うとともに、様々な事象は必ずしも想定通りにならないことも踏まえ、法律や規準を満足することだけでなく、謙虚な姿勢で性能確保に努めることが大切と考えます。

最後に余談ですが、1999年台湾集集大地震での活断層直上の建物被害状況写真を図6-1に示します。写真左下に当時の同僚が映っていますが、右側建物の基礎(フーチング)が頭上のかなり上にあることから、5m程度は建物が断層によって持ち上がったことが分かります。日本でここまでの現象が起きる可能性は低いと考えますが、想像を絶することが実際に起きることを実感しました。



[図 6-1 1999年台湾集集大地震での活断層直上の建物被害状況(台湾台中豊原) 撮影:中川理]

出典(および参考資料)

- 1) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震のすすめ
- 2) 日本免震構造協会編: 免震構造入門 第1版, オーム社, 1995年9月
- 3) 中川理、原田幸博: 鉄骨造免震建築物における座屈拘束ブレースの集中配置の有効性, 日本建築学会技術報告集 第22巻 第22号頁 959(2016年10月)
- 4) 一般社団法人日本免震構造協会: 2019 免震制震データ集積
- 5) 飯場正紀, 田村和夫, 猿田正明, 西村拓也, 森川和彦, 北村佳久, 小林正人, 石原直, 独立行政法人建築研究所: 免震建築物の設計用地震層せん断力係数に関する検討, 建築研究所 建築研究資料 No.1627号(2014(平成26年)8月)
- 6) 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(技術的助言)」平成28年6月24日 国住指第1111号(別紙)
- 7) 国立研究開発法人 建築研究所: 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ「別紙5-2」免震建築物の繰り返し依存性の検証方法
- 8) 日本免震構造協会 第16回免震フォーラム(2016.9.02)「熊本地震による耐震建物と免震建物の挙動: 福岡大学 高山峯夫」
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人建築研究所: 「平成28年(2016年)熊本地震による建築物等被害第九次調査報告(速報)(免震建築物に関する調査)」平成28年6月1日
- 10) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震エキスパンションジョイントガイドライン

- 11) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針(第3版)
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人建築研究所: 平成 28 年(2016 年)熊本地震による建築物等被害第九次調査報告(速報)(免震建築物に関する調査) 平成 28 年 6 月 1 日
- 13) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震建物における対津波構造設計マニュアル
- 14) 一般社団法人日本コンクリート切断穿孔業協会: ワーヤーソーイング工法 施工計画の手引き
- 15) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震で安心 ユーザーズマニュアル
- 16) 一般社団法人日本免震構造協会: 免震建物の維持管理基準-2018-
- 17) 一般社団法人日本免震構造協会: 施工監理技術者更新講習テキスト, 免震情報の紹介

●著者プロフィール

中川 理 (なかがわ・おさむ) 博士 (工学)・構造設計一級建築士

(株)構建設計研究所 代表取締役

一般社団法人日本免震構造協会: 資格制度委員会委員、維持管理委員会委員、
設計小委員会委員長