

今、免震が熱い

Seismic Isolation is hot, now

菊地 優¹

1, 北海道大学大学院工学研究院

Masaru Kikuchi¹

1, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract

In this paper, the author focuses on the thermal-mechanical coupled behavior of seismic isolation devices. In Japan, long-period and long-duration ground motions have been a great concern since the 2003 Tokachi-oki Earthquake and the 2011 Tohoku Earthquake. Such motions induce excessive and numerous cyclic deformations in seismic isolation devices. Some types of those devices absorb seismic input energy and convert it into heat energy. Therefore, a large number of cyclic deformations might cause the performance of the devices to deteriorate due to internal heat generation. The author has been working on this issue and has now reached the stage of developing a design method for seismically isolated buildings that takes performance degradation into account and proposing measures to mitigate it.

Key Words: Seismic Isolation, Isolation Device, Long-Period Ground Motion, Cyclic Deformation, Thermal-Mechanical Coupled Behavior

キーワード：免震，免震装置，長周期地震動，繰り返し変形，熱・力学連成挙動

1. はじめに

2003年十勝沖地震では、北海道苫小牧市において長周期地震動が観測され、同市内の石油タンクでは浮き屋根が大きく振動する液面のスロッシングが発生し、大規模な火災に至った。この地震で免震構造は直接的な損傷を被ってはいないものの長周期構造物であるがゆえに、①免震層の過大な応答変位と、②免震装置の多数回繰り返し変形による性能変動という2つの極限事象への懸念が生じた。2011年東北地方太平洋沖地震では数分間にわたる継続時間の長い地震動（以後、長時間地震動と呼称）が観測され、震源域から遠く離れた高層建築物が長時間揺れ続けたことにより、後者の極限事象への懸念がいつそう高まった。以降、長周期・長時間地震動対策が免震構造に関する主要な研究テーマと位置づけられ、研究開発が継続されている。現在、日本国内で用いられている主要な免震装置については、多数回繰り返し変形による性能変動の現象理解が大きく進み、この現象を設計に取り込むための評価法の開発や性能変動を抑制する諸策を講じる段階にある。本稿では免震構造の現状解説に始まり、今後の免震構造の展開の一つとして長周期・長時間地震動に関する最新の研究成果と新たな取り組みを紹介する。

2. 免震構造の現状

2-1 免震構造の原理

免震構造は図1に示すように、建物基部に水平方向に柔らかく変形する特殊な装置（免震装置）を設置することで、地盤から入る震動を絶縁する。「絶縁」という用語が用いられるように、英語では Seismic Isolation と称される。免震装置により、建物の固有周期は3～5秒程度に伸長される。一般構造では震動が建物内に直接入り増幅されて激しく揺れるのに対して、免震構造では加速度が低減されゆっくり揺れる。

免震装置には様々なものがあるが、日本国内では図2に示す積層ゴムが主流となっている。積層ゴムは、薄いゴムシートと鋼板を何層にも積み重ねて接着させた構造を有する。ゴムの弾性率は鉄やコンクリートと比較して圧倒的に低い。しかし、鋼板と積層させることで、図3のように鉛直力を受けた際の横方向のゴムのはらみ出しを鋼板が拘束し、高い鉛直剛性と大きな荷重支持能力が発揮される。一方、鋼板はゴムのせん断変形を拘束しないので、ゴム本来の低いせん断弾性率のもとで水平方向には低い剛性かつ大きな変形能力を発揮できることになる。

2-2 免震構造の普及

免震構造を採用した建築物は、上述の積層ゴムが実用化された1980年代に入ってから世界各国で建築されるようになった。図4に日本での免震建築棟数の推移を示す。同図内には日本で

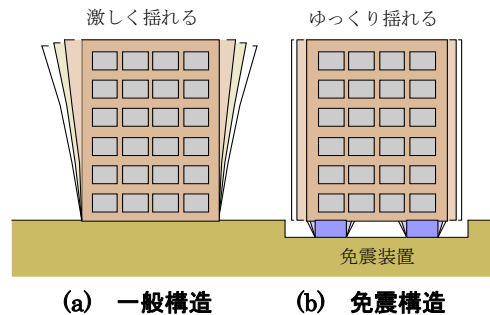


図1 免震構造の原理

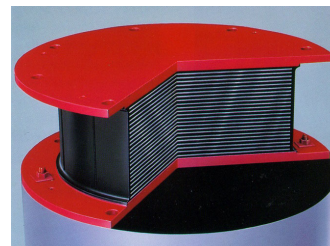


図2 積層ゴムの構造

(写真提供：株式会社ブリヂストン)

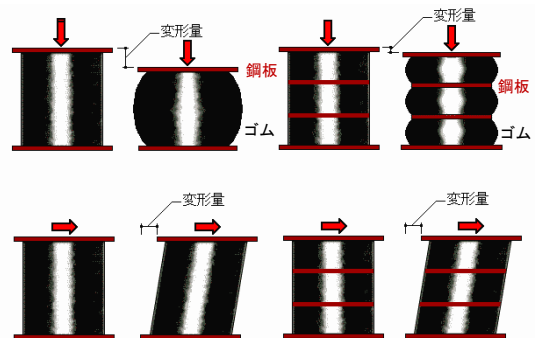


図3 積層ゴムの原理

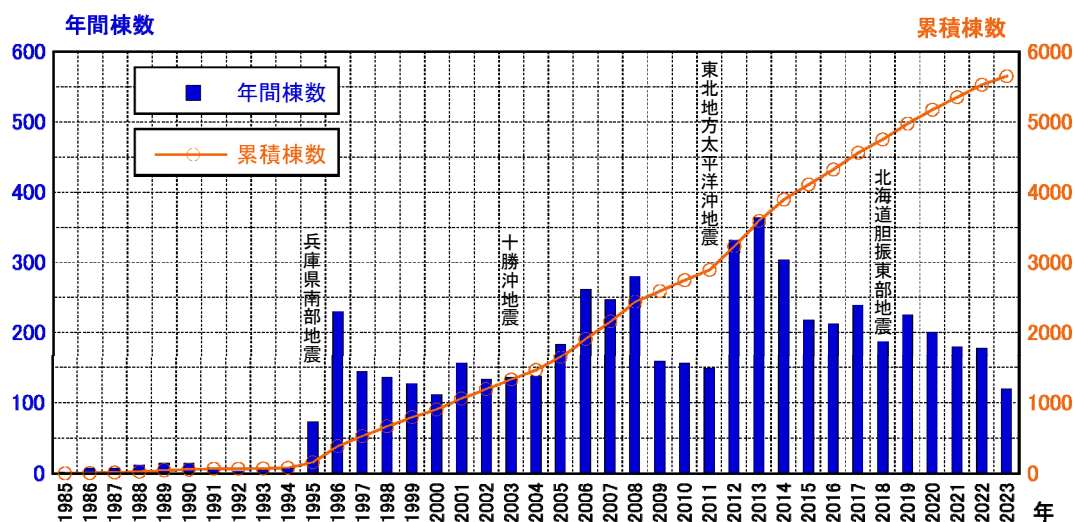


図4 日本の免震建築棟数の推移

(データ提供：日本免震構造協会)

発生した主要な被害地震も記載している。同図を見て最も特徴的なことは、1995年兵庫県南部地震以降に建築棟数が急増していることである。翌1996年の建築棟数は、それ以前の累積建築棟数を上回るほどであった。1995年兵庫県南部地震では、被災地域での建物被害の甚大さとは対照的に、神戸市内に建築されていた免震建築が効果を発揮したことが棟数急増のきっかけとなったようである。それ以降はしばらく年間100～300棟程度で推移するが、2011年東北地方太平洋沖地震以降に一時的に急増し、再度、年間200棟程度で推移し現在に至っている。

2-3 免震構造の実績

被害地震発生の都度、被災地に建築されていた免震建築で発揮された免震効果が報じられ、それが普及の後押しをしている。以下に、その典型的事例の一つを紹介する。

写真1に示す石巻赤十字病院は地域災害拠点病院を目指し免震構造を採用して設計され2006年2月に竣工した¹⁾。2011年東日本大震災では、震源に近く被害が甚大であった宮城県石巻地区において津波浸水被害を免れ、免震構造により構造躯体の損傷のみならず医療機器の転倒・落下等による震動被害を免れたことで病院機能を維持し医療活動を継続できた唯一の医療施設として、被災者の救護活動に多大の貢献をした。そのことが高く評価され、2012年度日本免震構造協会賞「特別賞」を受賞している²⁾。写真2は地震発生時の病院内の状況が撮影された動画である³⁾。地震発生からわずか4分で災害対策本部が立ち上がった様子は圧巻である。この動画は筆者が同病院の調査に訪れた際に、免震構造の普及のためというご厚意のもとご提供頂いた動画であるが、YouTubeでも公開され現在でも視聴できる³⁾。自然災害に関わられる諸兄にはぜひご覧いただきたい動画である。さらに、その後の災害医療記録が同病院の医師によって執筆されており、免震構造によって可能となった被災地での救護活動の状況を図り知ることができる^{4),5)}。

一方、北海道においては2011年東北地方太平洋沖地震以前には、釧路市にある星が浦病院が、免震構造により新築されている(写真3)。免震構造の採用は、頻繁に被害地震に見舞われる釧路地域の人々の防災意識の高さを象徴している。また、同病院は、日本国内で初めて免震構造を病院建築に適用した事例としても有名である。



写真1 石巻赤十字病院(石巻市)
(写真撮影: 菊地 優)

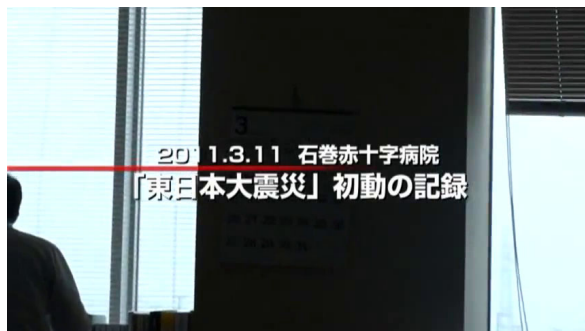


写真2 動画公開された病院内の状況³⁾



写真3 星が浦病院(釧路市)
(写真撮影: 菊地 優)

2011 年東日本大震災では、上述の石巻赤十字病院以外にも免震構造を採用したことで被災者の救護活動を継続できた事例が多数報告されており⁶⁾、地震被災後の災害対策拠点となる自治体庁舎、消防署、病院等への免震構造の適用が進むことになる。北海道においては 2011 年東日本大震災以前には釧路地方合同庁舎が 2000 年に免震構造で新築されているが、同様に庁舎建物では北海道庁本庁舎、釧路市役所防災庁舎、札幌市白石区役所、幕別町庁舎など適用事例が続く。なお、北海道庁本庁舎は図 5 に示すように地下 1 階に免震装置を設置するという免震レトロフィットを採用することにより、庁舎機能を止めることなく耐震性能を向上させている。また、2018 年北海道胆振東部地震では、庁舎内に設置された地震観測装置で得られた記録から、免震構造による応答加速度低減効果が確認されている⁷⁾。

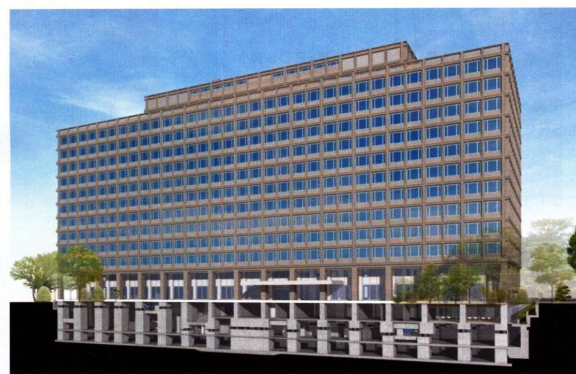


図 5 北海道庁本庁舎の免震レトロフィット
(イラスト提供：竹中工務店)

3. 長周期・長時間地震動を受ける免震構造

3-1 熱くなる免震装置

長周期・長時間地震動に起因する免震装置の性能変動の要因は、免震装置が減衰効果を発揮することによって発生する熱エネルギーが装置内部に蓄積して温度を上昇させることで、減衰性能が低下してしまうことによる。本稿のタイトルを「今、免震が熱い」とした所以は、ここにある。筆者は防災の備えとして社会で免震構造が熱く注目され普及することを切に願望するが、そうなるためには発熱による性能低下を克服しなければならないと考える。

多数回繰り返し変形による性能変動の一例として、鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）の加力試験結果を紹介する⁸⁾。LRB は図 6 に示すように積層ゴム内部に鉛プラグが挿入された構造を有する。積層ゴムのせん断変形時には、鉛プラグの塑性変形によって履歴減衰が発生する。支承機能と減衰機能が一体化された免震装置であり、LRB のみの構成で免震構造が成立するという利点を有する。ゴム直径 500φ、鉛プラグ径 100φ の LRB に対して、周期 4.0 秒で振幅 20cm（ゴムのせん断ひずみ 200%相当）の変形を 35 サイクル与える加振試験を行った。試験で得られた荷重変形関係を図 7 に示す。加振開始直後は最も外側の履歴ループとなり、繰り返し数の増加に伴い履歴ループは徐々に細くなる現象が確認された。このとき鉛プラグ内に挿入した熱電対で計測した温度は 200℃を超えた。鉛の降伏応力度

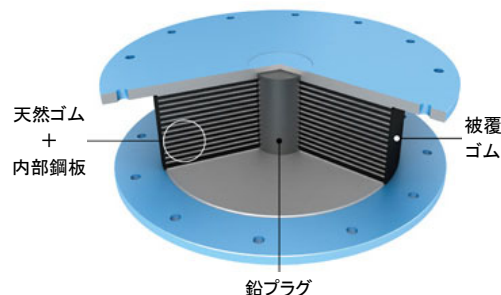


図 6 鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) の構造
(イラスト提供：オイレス工業)

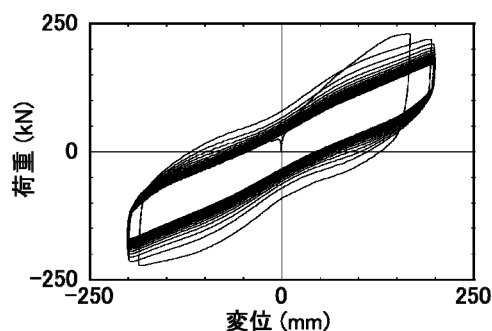


図 7 LRB の繰り返し加力試験結果

には温度依存性があり、温度上昇とともに低下する性質がある。この性質により履歴ループが徐々に細る。実際に図7の試験結果では最終的に1サイクル当たりの履歴エネルギーが概ね半分程度に低下している。

LRBにおいて鉛プラグを取り囲むゴムは熱伝導率が低いために、数分程度の地震継続時間では鉛プラグの発生熱の周囲への拡散は期待できない。また、積層ゴムのせん断ひずみが一定の状態では発熱量は鉛プラグの体積に比例するが放熱量は表面積に比例するという熱伝導の相似則により、例えば積層ゴムのサイズが辺長比で2倍になると発熱量は3乗の8倍、放熱量は2乗の4倍となり、径の大きな積層ゴムの方が温度上昇しやすく減衰性能の低下が大きくなることにも留意すべきである。温度上昇による性能変動は、他の免震装置でも確認されている。例えば、積層ゴムと併用して用いられることの多い弾性すべり支承のうち、高摩擦タイプのすべり支承では摩擦熱による摺動材の温度上昇により摩擦係数が低下することが報告されている⁹⁾。

3-2 国土交通省の対応

冒頭で述べた通り、免震構造は、2003年十勝沖地震で注目された長周期地震動、および2011年東北地方太平洋沖地震で観測された長時間地震動のように、近い将来に発生が予想される海溝型巨大地震による地震動に対峙すべく技術開発が鋭意進められている。2016年6月に国土交通省より公開された「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対策について（技術的助言）」¹⁰⁾により、高さが60mを超える建築物及び地上4階建て以上の免震建築物であって、翌2017年4月1日以降に申請する性能評価に基づく大臣認定によって新築されるものについては、建設地が長周期地震動対策の対象区域である場合、長周期地震動に対する検証が義務付けられた。対象区域は図8に示す関東地方1区域(KA1)、静岡地方3区域(SZ1~SZ3)、中京地方3区域(CH1~CH3)、大阪地方3区域(OS1~OS3)である¹¹⁾。建築研究所のウェブサイト¹²⁾では、時刻歴応答解析で用いるべき設計用長周期地震動（解放工学的基盤）が公開されており、当該地区における長周期地震動の時刻歴波形データを入手して設計を行うことになる。

免震建築物については、性能評価時に免震装置の多数回繰り返し変形による性能変動を考慮し、安全性の検証を行うことが要求されている。上記の建築研究所のウェブサイト¹²⁾には免震

<対象地域>

下図の対象地域内の既存の超高層建築物等については、対象地震による建設地の設計用長周期地震動の大きさが、設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性があります。

- ： 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が非常に高い地域
- ： 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が高い地域
- ： 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性がある地域

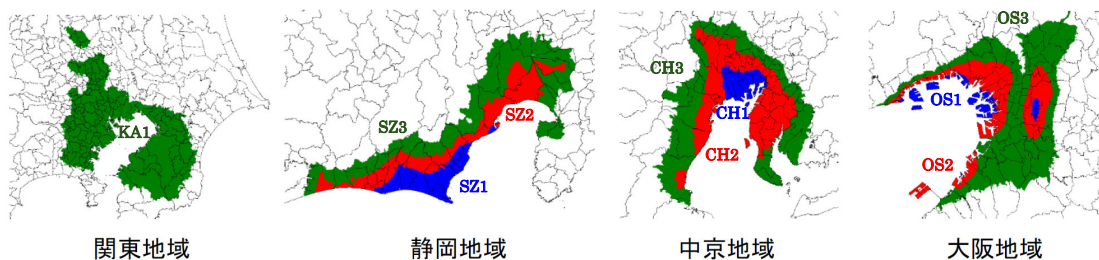


図8 国土交通省が定める南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対応を求める対象地域¹¹⁾

建築物の繰り返し依存性の検証方法も示されている。性能変動を考慮した解析方法として、精算的な方法と実用的な方法の 2 つに言及しているが、前者は高度な技術を要する煩雑な解析方法であるとして、設計実務では後者の方法が多用されているようである。なお、これらの解析方法の詳細については、筆者らが開発している解析方法の紹介を兼ねて 3-4 節にて解説する。

3-3 性能変動の抑制策

多数回繰り返し変形による発熱に起因する性能変動を抑制するには温度上昇を抑えることが肝要であり、LRB の場合には鉛プラグの分散配置が注目されている。例えば、積層ゴム中心に 1 本挿入される鉛プラグの直径を半分にした鉛プラグを 4 本分散配置すれば、鉛プラグの全断面積は同じなので降伏耐力は変わらずせん断特性は維持したままで、発生熱の集中は避けることができる。その結果、鉛プラグの温度上昇の抑制効果が期待できる。

以下に、和氣らが行った LRB の鉛プラグ分散配置による検討結果を示す¹³⁾。図 9 に示すように、シングルプラグ LRB とマルチプラグ LRB の 2 つを製作して、両 LRB の繰り返し加力試験を実施した。両試験体の断面形状は異なるが、積層ゴムと鉛プラグの断面積および体積はほぼ同じ値となっており、設計上のせん断特性もほぼ同様である。しかしながら、鉛プラグの周囲の積層ゴムへの接触面積はマルチプラグ LRB の方が 1.7 倍大きい。両試験体に対して、周期 4 秒のせん断ひずみ 200% (せん断変形 320mm) の正弦波変位を 40 サイクル与えた。なお、建築の耐震設計におけるレベル 2 地震動に対して免震建築物の積層ゴムでは概ね 200% 程度の応答せん断ひずみを示すことから、これを 40 サイクル繰り返すという加振条件は、免震構造に使用される積層ゴムにとってかなり過酷なものであることを付記しておく。

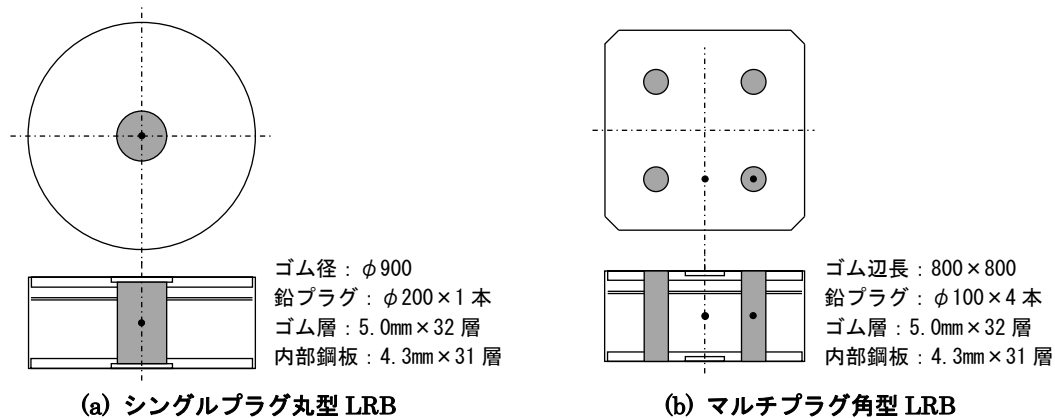


図 9 鉛プラグ分散配置の検討に用いた LRB 試験体

図 10 の試験結果にて同図(a)、(b)の荷重変形関係をみると、シングルプラグ LRB、マルチプラグ LRB とも加振回数が増大に伴い、履歴ループは徐々に内側に入り細くなっている。ただし、履歴ループが細る程度はマルチプラグ LRB の方が少ない。試験では鉛プラグ内に熱電対を挿入して、加力試験中の温度を計測した。同図(c)に示す鉛プラグの温度を比較すると、加振終了時において 100℃程度の温度差があり、マルチプラグ LRB では鉛プラグの温度上昇が抑制されていることがわかる。その結果、同図(d)に示すように履歴エネルギー吸収量の低下はマルチプラグ LRB の方が少なく、鉛プラグの分散配置の効果を確認することができた。

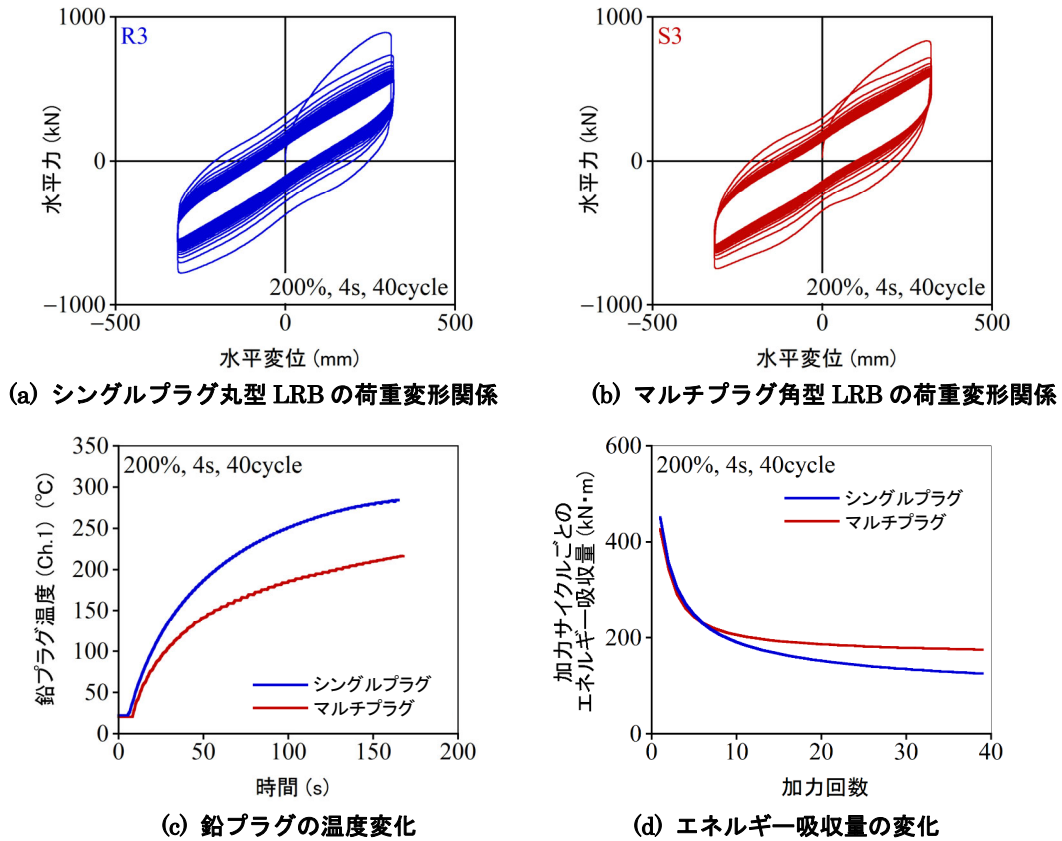


図 10 鉛プラグ分散配置検討の試験結果

3-4 繰り返し依存性を考慮した解析方法

免震装置の繰り返し依存性を時刻歴地震応答解析で考慮する方法としては、3-2 節で記述した通り、実用的な方法（以下、簡易法）と精算的な方法（以下、詳細法）の 2 つが用いられてきた。以下、両方法について解説する¹⁴⁾。

簡易法は、免震装置の地震応答中の時々刻々の性能変動を考慮せずに、図 11 のフローに示すように 2 回の時刻歴解析の中でそれぞれ力学特性を変えることで、性能変動を考慮した応答評価を行う。1 回目の解析では、初期温度による特性値を用いて地震応答解析を行い、免震装置のエネルギー吸収量を算出する。続いて、このエネルギー吸収量を用いて装置の温度上昇と特性変化を求める。温度上昇や特性変化の求め方は、免震装置メーカーから評価方法が提示されている。2 回目は、温度上昇による特性変化が最初から生じているとして地震応答解析を行う。簡易法では、温度変化による特性値を初期値として設定し、時刻歴応答解析中にはこれを変化させないため、既存の解析プログラムを修正せずに使

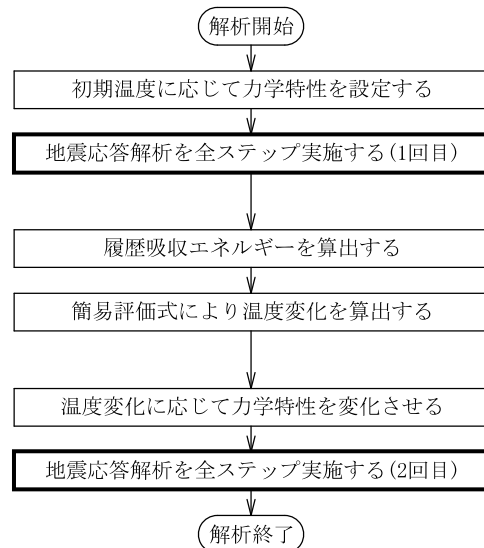


図 11 簡易法のフロー

用できるという利点がある。実際には免震装置内の温度上昇に呼応して減衰性能は徐々に劣化するの、最初から減衰性能が低下していると仮定している点において安全側の評価というところからえ方ができるが、一方で性能低下を過大に評価していることで無駄の多い設計となる可能性も否定できないと筆者は考える。

詳細法は、免震装置が履歴減衰を發揮して地震応答を制御するという一連の物理現象において、免震装置の発生熱が力学的特性に影響を及ぼすという熱と力学の連成挙動を物理モデルにより忠実に表現する方法である。竹中・近藤らが鉛プラグ入り積層ゴムと高減衰ゴム系積層ゴムを対象に、詳細法を多数回繰り返し加力実験結果の再現に用いたのが初めての適用事例である¹⁵⁾。現在でも様々な解析手法が開発されており、筆者の研究チームもオープンソース構造解析プログラム **OpenSees**¹⁶⁾をプラットフォームにして、詳細法による解析システムを構築している。図 12 に筆者らが開発している熱・力学連成挙動解析システムの概要を示す。本解析システムは同図(a)に示す詳細法のフローの通り、熱伝導解析と時刻歴応答解析で各解析ステップの時刻刻みごとに、履歴吸収エネルギーと温度の情報を相互に更新しながら、両解析を並行して進める。鉛プラグの温度変化は、時刻歴応答解析で得られた **LRB** の荷重履歴から得られたエネルギーを同図(b)に示す熱伝導解析モデル内の鉛プラグに与えて求める。ここでは丸型断面のシングルプラグタイプの **LRB** を例示しており、その場合には 2 次元軸対称モデルを用いることができる。また、発生熱の免震装置外部への放熱を考慮するために、免震装置が取りつく躯体および積層ゴム側面に接する外気もモデル化される。他の構造に対応したモデル化が施され、例えば前節で性能変動の抑制策として示したマルチプラグ **LRB** では 3 次元熱伝導解析モデルを用いる必要がある。熱伝導解析で得られた鉛プラグの温度をもとに、同図(c)に示す鉛プラグの温度と降伏応力度の関係を参照して、鉛プラグの降伏耐力を変化させ、次ステップの時刻歴解析を実施する。詳細法を用いた解析事例については、次節で紹介する。

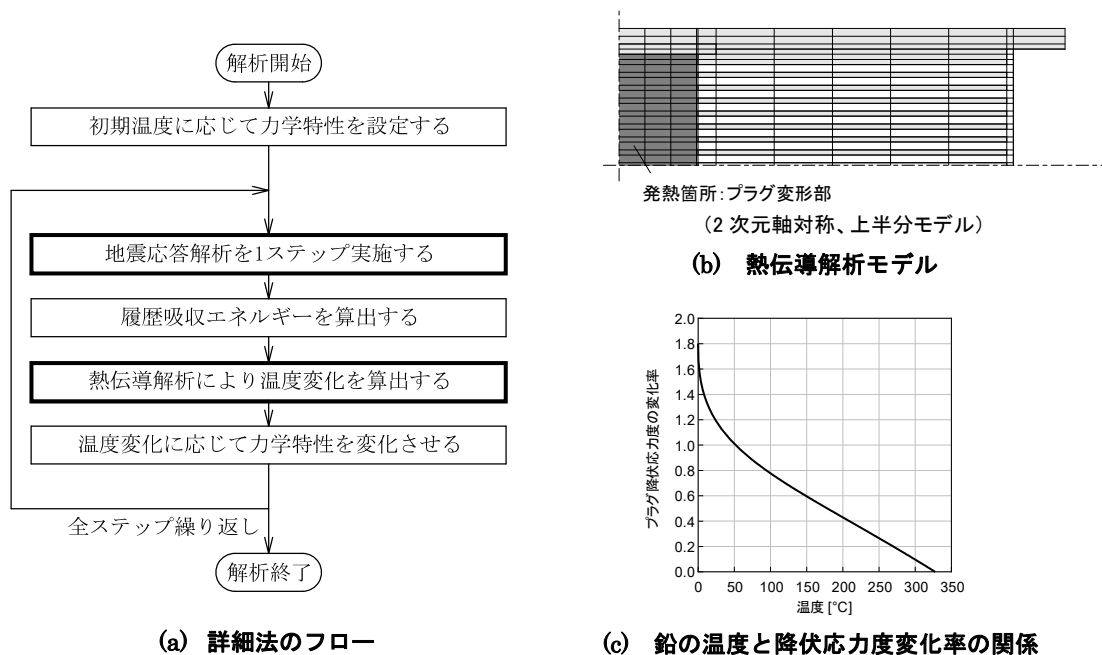


図 12 熱・力学連成挙動解析システムの概要 (LRB パージョン)

3-5 免震構造の地震応答

本節では、前節で解説した熱・力学連成解析システムを用いて免震建築物の時刻歴地震応答を行い、長周期・長時間地震動を受ける免震構造の地震応答特性について検討する⁸⁾。

図 13 に地震応答解析で用いた振動解析モデルを示す。上部構造は RC 造 15 階建てとする。基礎部の免震層にはシングルプラグ LRB のみ、あるいはマルチプラグ LRB のみで構成される 2 通りの免震システムを設定して地震応答値を比較する。上部構造は弾性とし、基礎固定時の 1 次固有周期 1.23 秒において 3% となる剛性比例型減衰を与える。

入力地震動としては、El Centro 1940 NS 成分（最大速度を 50cm/s に基準化）と、基整促波 CH1 の 2 種類を用いる。両地震動の加速度波形を図 14 に示す。前者は従来から耐震設計で標準的に用いられてきた観測地震動であり、後者は 3-2 節で解説した中京地域 CH1 の地震動である。国土交通省が前掲図 8 の各地域で公開した長周期地震動は、同省が平成 20 年度より実施した「建築基準整備促進事業」（略称：基整促）において作成されたことで、基整促波と称されることが多い。本稿においてもこの略称を用いる。両波形を比較する

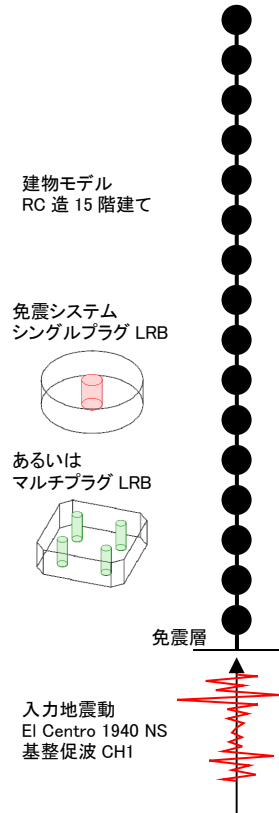


図 13 振動解析モデル

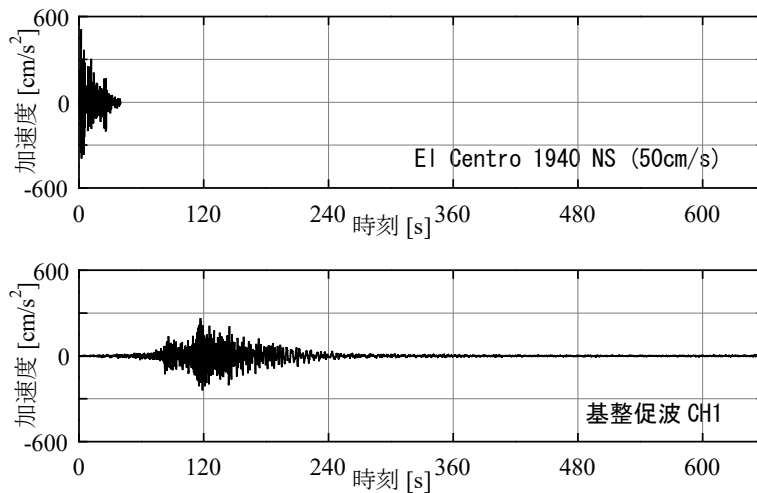
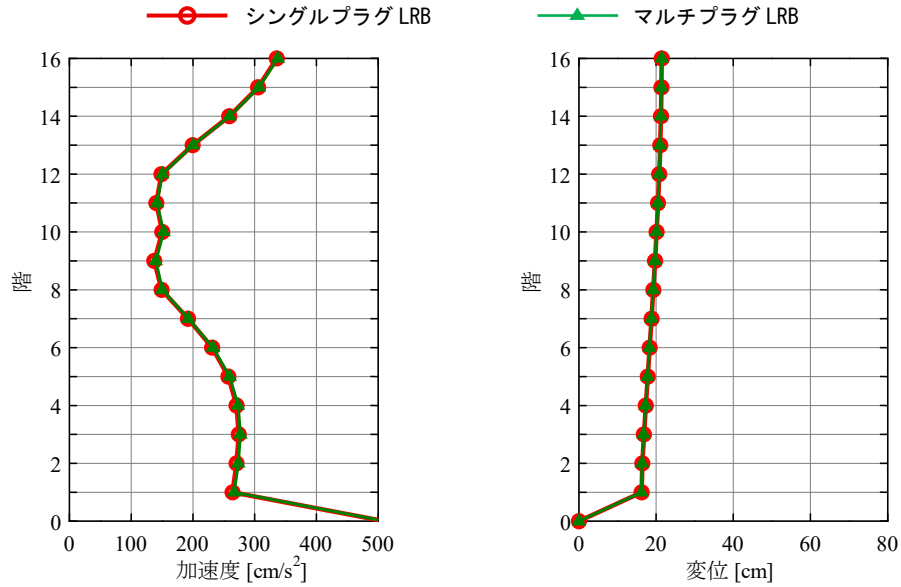


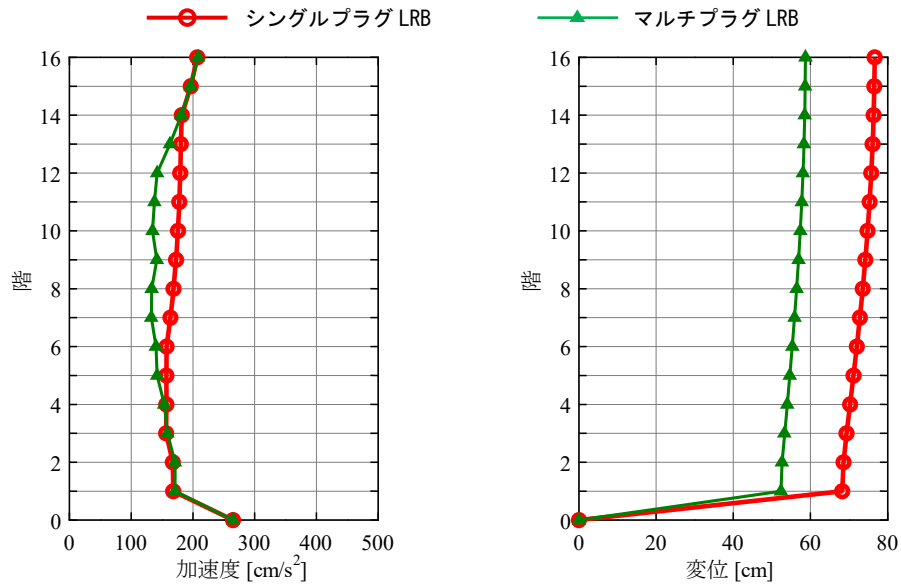
図 14 入力地震動波形

と、加速度値は El Centro 波の方が大きいですが、継続時間は圧倒的に基整促波の方が長い。

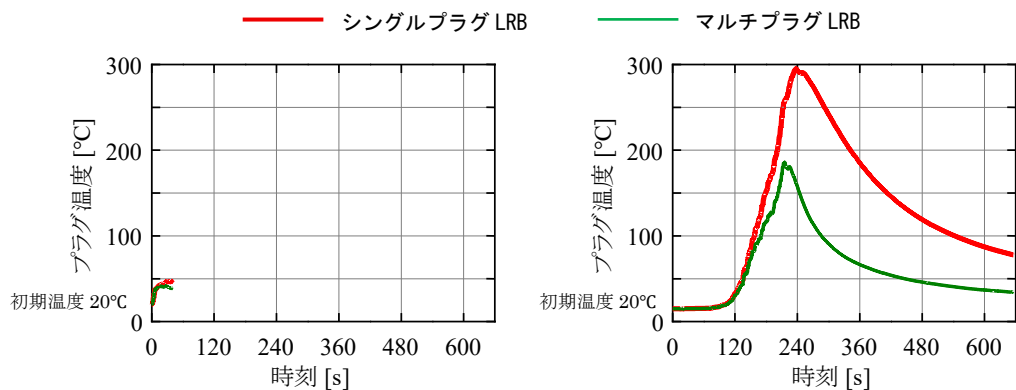
図 15 に地震応答解析結果を示す。同図(a)、(b)は、最大応答加速度と最大応答変位の建物高さ方向の分布を示している。El Centro 波を入力した場合の応答値の比較では、シングルプラグ LRB、マルチプラグ LRB とともに差は少なく、両者のプロットはほぼ重なっている。一方、基整促波を入力した場合は、最大応答加速度にはあまり差は見られないものの、最大応答変位ではマルチプラグ LRB の方が約 20cm 小さく、応答変位の抑制効果が確認できる。同図(c)に鉛プラグの温度変化を示す。左図の El Centro 波を入力した場合には、継続時間が約 40 秒と



(a) El Centro 1940 NS 入力時の最大応答値分布



(b) 基整促波 CH1 入力時の最大応答値分布



(c) 鉛プラグの温度変化 (左図: El Centro 1940 NS 入力、右図: 基整促波 CH1 入力)

図 15 地震応答解析結果

短いこともあって温度上昇はわずかであり、両 LRB で鉛プラグの温度に差は見られない。一方、右図の基整促波を入力した場合には両 LRB とともに温度は大きく上昇する。ただし、シングルプラグ LRB では鉛の融点 327.5°C に近い約 300°C まで上昇しているのに対して、マルチプラグ LRB の温度上昇は 200°C 程度に留まっており、鉛プラグの分散配置により 100°C 程度の温度上昇抑制効果が確認できる。マルチプラグ LRB では、鉛プラグの温度上昇とそれに起因する性能変動をシングルプラグ LRB よりも抑制したことで応答変位を 20cm も低減できたと推察される。

4. 免震構造の今後の展開

4-1 相模トラフ沿いの地震への対応

相模トラフ沿いでは、過去に 1923 年大正関東地震や 1703 年元禄関東地震など、M8 クラスの巨大地震が繰り返し発生している。今後、設計用地震動の公表など長周期建造物の対応方針が公表されるであろう相模トラフ沿いの巨大地震に関しては、震源域が首都圏に近いことで対応すべき免震建築物の設計案件数も多くなることから、免震装置の性能を十分に引き出せる効率的な評価方法の運用が求められる。筆者は免震構造のいっそうの普及を図る上で長周期・長時間地震動への対応は必須であり、免震構造の今後の展開としても最も注視すべき課題であるとする。その課題には大別して二つある。一つは免震装置の性能変動を考慮した実用的かつ効率的な時刻歴応答解析手法の開発であり、もう一つは本稿でも一例を紹介した性能変動の抑制策などの対応方法の開発である。前者に関しては、本稿で紹介した「簡易法」と「詳細法」の中間的な位置づけとなる「準詳細法」の設計実務への展開が期待される。準詳細法の詳細については、拙稿¹⁴⁾に譲ることとし、本稿での解説は割愛する。後者に関しては、可変減衰ダンパーへの期待が集まっている。免震システムにダンパーを付加すれば免震層の変形を抑制できるが、一方で減衰の付加は応答加速度の低減効果を損なうことにもなる。そのため、応答変位や応答速度に応じて減衰係数を変化させるという特殊な仕掛けを有する可変減衰ダンパーが開発されている。一例として、図 16 に免震層の応答速度に応じて減衰特性を切り替えるという、速度依存型可変減衰オイルダンパーを示す¹⁷⁾。

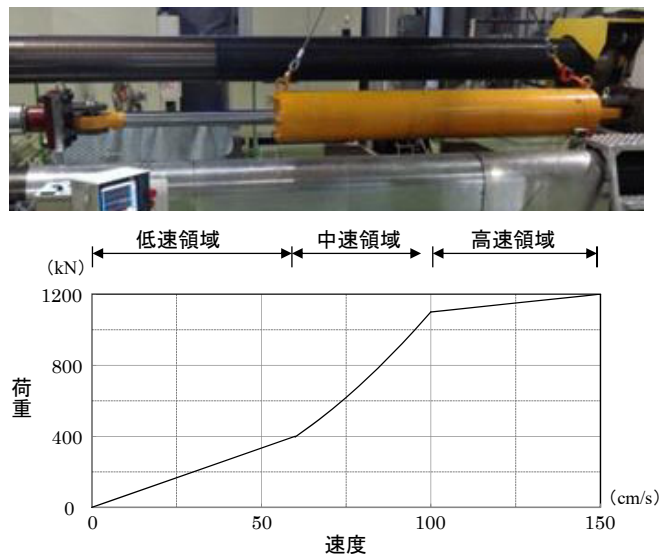


図 16 速度依存型可変減衰オイルダンパー¹⁷⁾

4-2 実大免震試験機 E-Isolation の稼働

2023 年 6 月に兵庫県三木市にて図 17 に示す実大免震試験機（通称：E-Isolation）¹⁸⁾が稼働を開始した。通常、免震装置メーカーは自社工場内に大型試験機を所有しており、これにより製品の出荷検査を実施している。しかし、出荷検査は基本的に静的加力試験によるものであり、実地震による地動を模擬した動的加力試験を行うことは難しい。そのため、E-Isolation 稼働以前は、動的加力試験を実施する場合は海外の試験機を使用せざるを得なかった。筆者も新たな

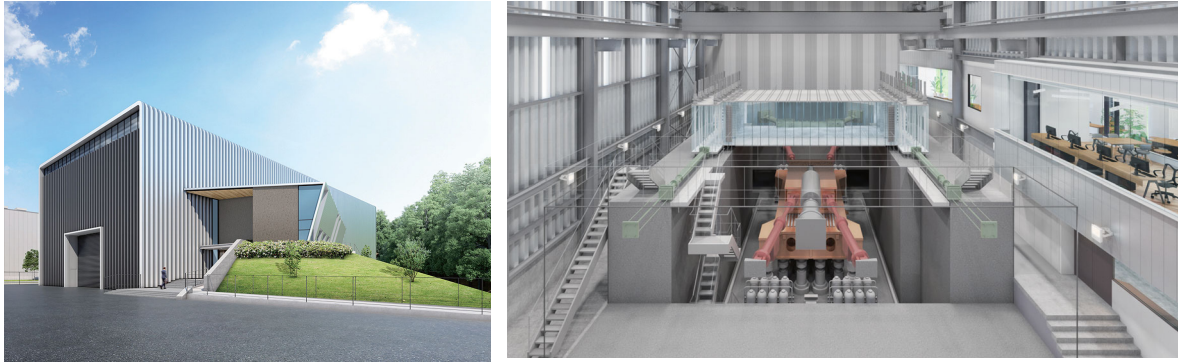


図 17 実大免震試験機 E-Isolation¹⁸⁾

免震装置の開発のため、実大試験体を米国カリフォルニア大学サンディエゴ校にある試験機へ船便で輸送して加力試験を実施したことがある。当然のことながら、海外の試験機を使った加力試験には多大のコストと時間を要するため、それが日本国内で実施できるようになったことは画期的である。また、同試験機は、摩擦力と慣性力を含まずに試験体に作用する荷重を直接的に測定できる機構を採用しており、試験データの補正の必要がなくリアルタイムに高精度な試験データを取得できることが特徴的である。

2024年7月からは同試験機を用いた免震装置・制振装置の「動的性能認証制度」も始まった。この制度は、免震装置・制振装置の実大・実荷重・実変位・実速度の動的試験を行うことで、第三者機関として動的性能を認証するものである。これにより、免震構造・制振構造の信頼性を大きく向上することが期待される。稼働から2年が経過した現在、動的加力試験のニーズの高さから試験機の稼働率は非常に高い状態となっている。

4-3 気象災害への対応

近年、台風や豪雨などの気象災害の頻発化、狂暴化を受けて、免震装置の繰り返し変形による性能変動は長周期・長時間地震動のみならず、免震建築物が台風などの強風に長時間曝されることでも生起し得る事象として懸念されるようになった。免震建築物の大規模化、高層化により風の受圧面積が増大すると、風外力による免震装置の変形が無視できない状態が起り得る。このような状況下での免震建築物の耐風安全性を確保すべく、日本免震構造協会からは2012年に耐風設計指針が公表・刊行され、2023年には改定版も出版されている¹⁹⁾。

耐風設計指針¹⁹⁾によると、風荷重による免震建築物の応答評価に関しては、図18のように免震層の応答状況を免震部材の弾性限界内外で分類し、その状況に応じて検討手法を使い分け耐風安全性を確認している。高層免震建築物や大規模免震建築物では、地震応答の免震効果と風応答の免震層変位抑制とのトレードオフの関係から、風荷重の変動成分に対して弾塑性挙動を示す

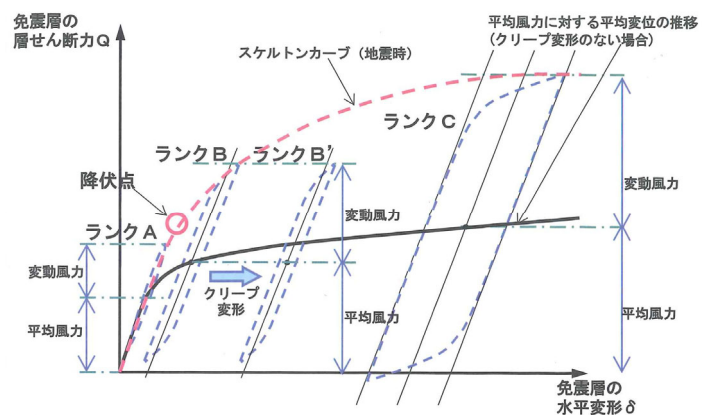


図 18 風荷重に対する免震層の応答とランク分け¹⁹⁾

状態のもとで設計することが多分にあり、時刻歴応答解析による評価が必要となる。加えて、風荷重による免震部材の弾塑性挙動にはクリープ挙動を考慮することも必要となる。図 19 は角型 LRB に対して、図 18 のランク B の状態を想定した風荷重を模擬した周期 3 秒の正弦波荷重を 2 時間 1200 サイクル作用させた加振実験結果である²⁰⁾。風荷重を長時間受ける免震装置の状況は、内部での熱エネルギーの蓄積による温度上昇が力学特性に影響を及ぼし得るという点において、前章で紹介した長周期・長時間地震動下での状況と酷似する。このように頻発化、狂暴化する気象災害においても免震が熱くなる状況が十分に想定できるようになってしまった状況に筆者も大いに懸念が募り、令和 6 年度から 3 か年度の期間で研究課題「複合自然災害に対する免震構造の耐性強化に関する研究」(基盤研究(B)) (一般) を実施している。

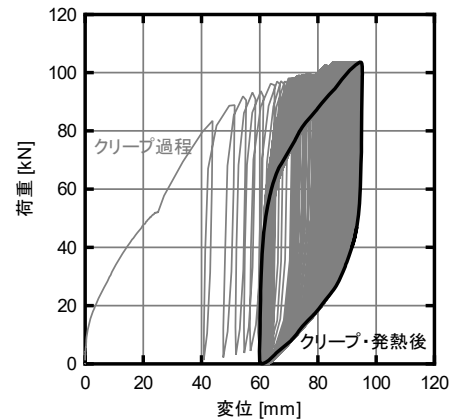


図 19 LRB の風荷重加振実験結果²⁰⁾

5. まとめ

被害地震発生の際に公表される免震建築物の活躍を見聞きすれば、建築物の耐震性能を飛躍的に向上させ、機能維持をも可能にする免震構造の社会展開は必然であると筆者は考える。国が進める国土強靱化においても、免震構造は注目されるべき構造技術である。その意味において、免震は熱いと言えよう。一方で、免震の効果を損なう現象として、免震装置が熱くなるという問題が顕在化しつつあることも見逃せない。2003 年十勝沖地震以降、海溝型巨大地震によって発生が予測される長周期・長時間地震動が免震装置に多数回の繰り返し変形を強いることで装置内部に熱エネルギーが蓄積して熱くなり、減衰性能が低下する可能性が指摘されるようになった。2011 年東北地方太平洋沖地震では数分間に渡る揺れが全国各地で観測され、長周期・長時間地震動に対する懸念は現実のものとなった。それ以降、免震構造の長周期・長時間地震動対策は、主要な研究課題の一つとして認識され、研究開発が進められ今日に至っている。

本稿では、長周期・長時間地震動によって免震装置が熱くなる現象に関して、その発生要因、力学挙動の予測方法、性能変動への対処方法、国の施策など、多岐にわたる取り組みを解説した。耐震技術は被害地震が発生するたびに露呈した技術的課題を克服することで進歩し、都度、建築基準法の改正という形で社会展開されてきた経緯がある。1968 年十勝沖地震で被災した RC 造建築物の柱のせん断破壊現象に対して、北海道大学工学部大野研究室がその発生要因を解明し、対処法が 1971 年建築基準法施行令改正で反映されたことは、上述の経緯を端的に物語る一事例である。比較的新しい耐震技術である免震構造はその轍を踏んでおらず、未だ致命的な被害を被っていない。しかし、筆者はそれを幸いとはせず、豊かな想像力をもって技術的課題を先回りして解決する姿勢を望む。免震装置が熱くなる現象は可能性として指摘されただけであり、未だそれを要因として免震構造が被害を受けてはいない。免震が熱くなる事象への一連の対応は、まさに想像力によって課題を予見し先回りして解決をしようとする姿勢であると映る。筆者も免震構造のいっそうの社会展開を目指し、微力ながら本課題の解決に尽力する所存であることを明言して本稿の結びとする。

参考文献

- (1) 日本免震構造協会：石巻赤十字病院，免震建築訪問記 85，MENSIN No.82，2013 年 11 月。
- (2) 日建設計：免震構造普及の起爆剤となった病院，第 13 回日本免震構造協会賞特別賞，2012 年。
- (3) 日本赤十字社：石巻赤十字病院～東日本大震災初動の記録～，
<https://www.youtube.com/watch?v=Pc1ZO7YwcWc>，（参照 2025-11-24）。
- (4) 石井正：石巻災害医療の全記録，講談社ブルーバックス，2012 年 2 月。
- (5) 石巻赤十字病院・由井りょう子：石巻赤十字病院の 100 日間，小学館，2011 年 10 月。
- (6) 菊地優：巻頭言 東日本大震災から 1 年を経て免震に思うこと，日本免震構造協会 MENSIN No.76，2012 年 1 月。
- (7) 菊地優：2018 年北海道胆振東部地震での免震・制振建物調査，日本免震構造協会 MENSIN No.103，2019 年 1 月。
- (8) M. Kikuchi, K. Ishii: *Thermal-Mechanical Coupled Behavior of Elastomeric Isolation Bearings Under Cyclic Loading*, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 18-21 June 2018.
- (9) 石井建，菊地優，入澤祐太，和氣知貴：すべり系支承の力学特性における速度依存性と温度依存性を同時に評価するための加振実験および分析手法の提案，日本建築学会構造系論文集 88 巻，第 814 号，pp. 1646-1654，2023 年 12 月。
- (10) 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対策について（技術的助言），国住指第 1111 号，平成 28 年 6 月 24 日。
- (11) 国土交通省住宅局建築指導課：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対策について，平成 28 年 6 月 24 日。
- (12) 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，
<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>，（参照 2025-11-1）。
- (13) 和氣知貴，石井建，菊地優：鉛プラグ入り積層ゴム支承の減衰材分散配置による熱力学特性の改善効果，日本建築学会構造系論文集，第 84 巻，第 763 号，pp. 1187-1197，2019 年 9 月。
- (14) 菊地優，大宮幸，井上波彦，北村春幸：長周期地震動に対する免震材料の性能変動に関する評定経緯と時刻歴応答解析法について，日本建築センタービルディングレター，2022 年 7 月。
- (15) 竹中康雄，近藤明洋，高岡栄治，引田真規子，北村春幸，仲村崇仁：積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 646 号，pp. 2245-2253，2009 年 12 月。
- (16) OpenSees, Pacific Earthquake Engineering Center, UC Berkeley,
<https://opensees.berkeley.edu/>（参照 2025-12-17）。
- (17) 荻野伸行，石井建，菊地優，岡本真成：大振幅地震動に対するオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した時刻歴応答解析に関する研究，構造工学論文集，68B 巻，pp. 376-385，2022 年 4 月。
- (18) 一般財団法人免震研究推進機構，<https://jsil.or.jp/>，（参照 2025-11-15）。
- (19) 日本免震構造協会，免震建築物の耐風設計指針（2023），2023 年 3 月。
- (20) 和氣知貴，長弘健太，河内山修：角型鉛プラグ入り積層ゴムの風荷重加振実験（その 1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 607-610，2022 年 9 月。