

E-アイソレーション：日本初の実大免震・制振部材実験施設の建設

「水平移動可能な PC アンカーが実現した新しい反力計測システム」

高橋良和、竹内 徹、吉敷祥一、篠崎洋三、米田雅子、梶原浩一、和田章

1. はじめに

大地震時に一般的な耐震構造には一定以上の構造的損傷が生じることが予想される一方、免震構造は居住者を含め殆ど被害を受けないことが期待される。その保証のために、構造物の地震応答を引き受ける重要な部材である免震装置や制振部材は、大地震時の挙動を設計・施工前に総合的に把握することが必須である。具体的には実際の地震が免震構造物を襲ったときの諸条件を模擬した地震挙動に基づく実物大の免震装置の動的試験を実施することが重要となる。

免震構造に使用される代表的な積層ゴム支承のうち、天然ゴム系の積層ゴム支承（NRB）は力と変位の関係がおおむね線形であるのに対し、鉛プラグ積層ゴム支承（LRB）や高減衰ゴム支承（HDRB）は力と変位の関係の非線形性が強い。付加減衰能力は高い垂直力と大きな動的水平変形の下で複雑な挙動を示すことが知られており、性能も部材サイズに大きく依存する。従ってこのような免震支承の挙動を実物大の試験体を用いて動的試験機で検証することは非常に重要である。しかし今まで大規模建物や橋梁などに使用される直径400mmを超える免震支承を動的に試験できる施設は日本国内になく、このような試験は国外の試験施設で実施されてきた。図1(a)は、カリフォルニア大サンディエゴ校（UCSD）の試験装置（SRMD）試験装置の構成を示す。試験体にせん断力を与える加振台は、数万kNの高鉛直力を受けながら、水平方向に動的に稼働する。しかしこの際、水平動的ジャッキに取り付けられたロードセルの測定反力には、大きな垂直力と重いテーブルの慣性力による支持ベアリングでの摩擦反力が混入してしまう課題があった。

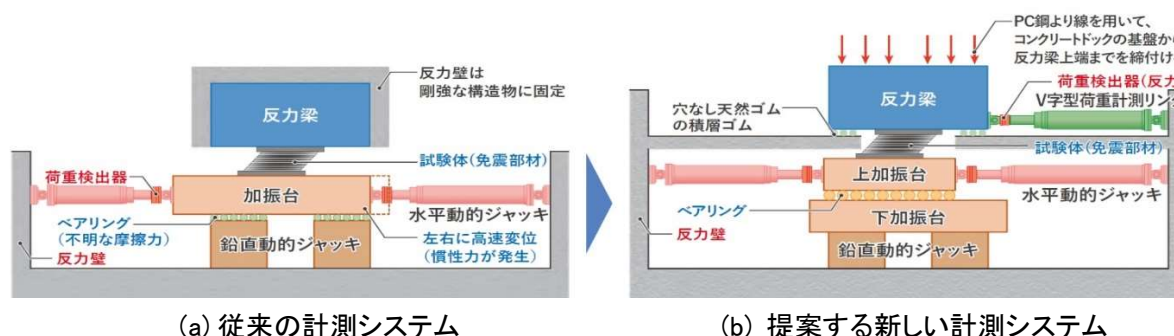


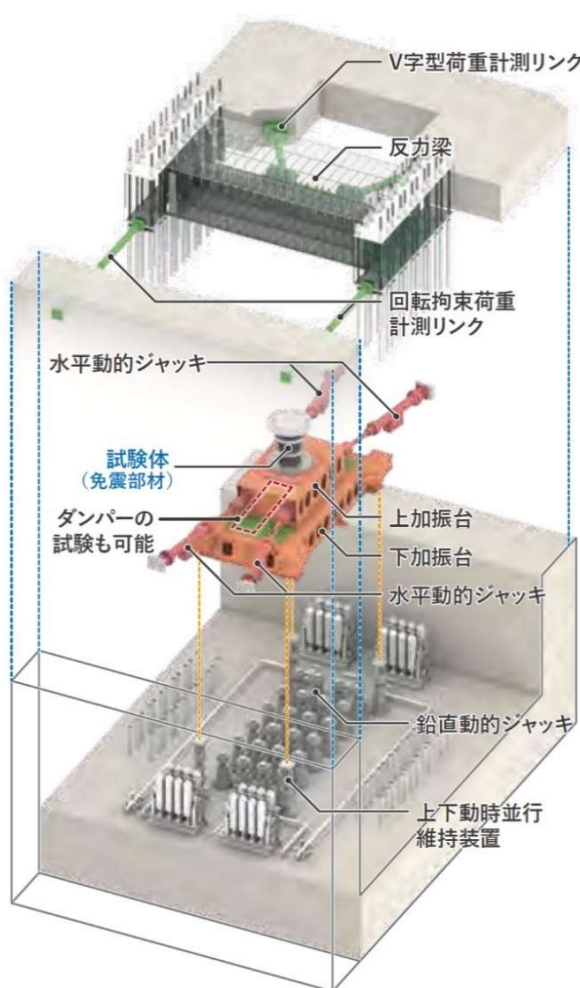
図 1 従来システムと提案する新しい計測システムの比較

これらの問題を解決するために、著者らは直接反力を定着側で計測するシステムの導入を提案した。図 1(b) に具体的な装置の構成を示す。この案では剛性の高い反力梁が天然ゴム系積層ゴム支承によって RC 反力壁より支持され、試験片の上側に配置されている。支承は水平方向にはほとんど剛性がなく、垂直方向にはほぼ固定に近い高い剛性を有する。反力計測リンクが、反力梁と RC 反力壁の間に水平に接続され、水平方向の反力の大部分はこれらの反力計測リンクを介してリアルタイムで測定され、反力梁の水平の動きは数 mm に収まるため、慣性力はほとんど発生しない。さらに、反力梁を天然ゴム系積層ゴム支承で支持することにより、支持層を介して伝達される水平方向の力は全体のわずか 1~2% に留まる。天然ゴム系積層ゴム支承は線形特性を示し、大鉛直荷重下で数 mm の小さな水平変形でも、支承を介し伝達されるこれらの水平力を正確に捉えることができる。

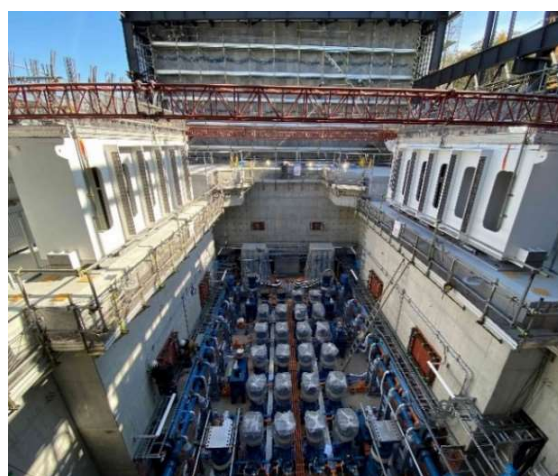
積層ゴム支承を常に圧縮状態に保つため、初期張力を導入した PC スtrandが積層ゴム支承の周囲に配置されるが、張力は変化しないため P- Δ 効果による水平方向剛性も正確に捉えることができる。ただし、本システムの実現には、水平移動が可能な特殊な PC アンカーの設置が重要な鍵となる。本発表では、この特殊な PC アンカーを含め、提案された測定システムを組み込んだ日本初の実大免震・制振部材実験施設の建設概要を紹介したい。

2. 提案する反力計測システム

提案された反力測定システムおよび実験装置の構成を図 2 および図 3 に示す。兵庫県三木市、E-ディフェンスの隣に建設されたばかりのこの新しい試験施設（E-アイソレーション）は、鉛直方向に 36,000kN（静的）、30,000kN（動的）の载荷能力、250mm の可動域、70mm/秒の载荷速度能力、水平方向に 6,500kN（静的）、5,100kN（動的）の载荷能力、 $\pm 1,300$ mm の可動域、800mm/秒の载荷速度能力を有している。この試験装置では UCSD の SRMD 施設と同様、剛な鋼製反力梁が試験体の上に設置されるが、本施設では先述したように RC 反力壁に固定されるのではなく、水平方向の剛性が低く垂直方向の剛性が高い積層天然ゴム支承によって支えられている。反力梁は、ロードセルを組み込んだ V 字型の反力計測リンクと、2 本の回転拘束計測リンクを通じて、



(a) 実大免震試験機の構成



(b) 鉛直動的ジャッキ



(c) 水平動的ジャッキ

図 2 実大免震試験機の概要

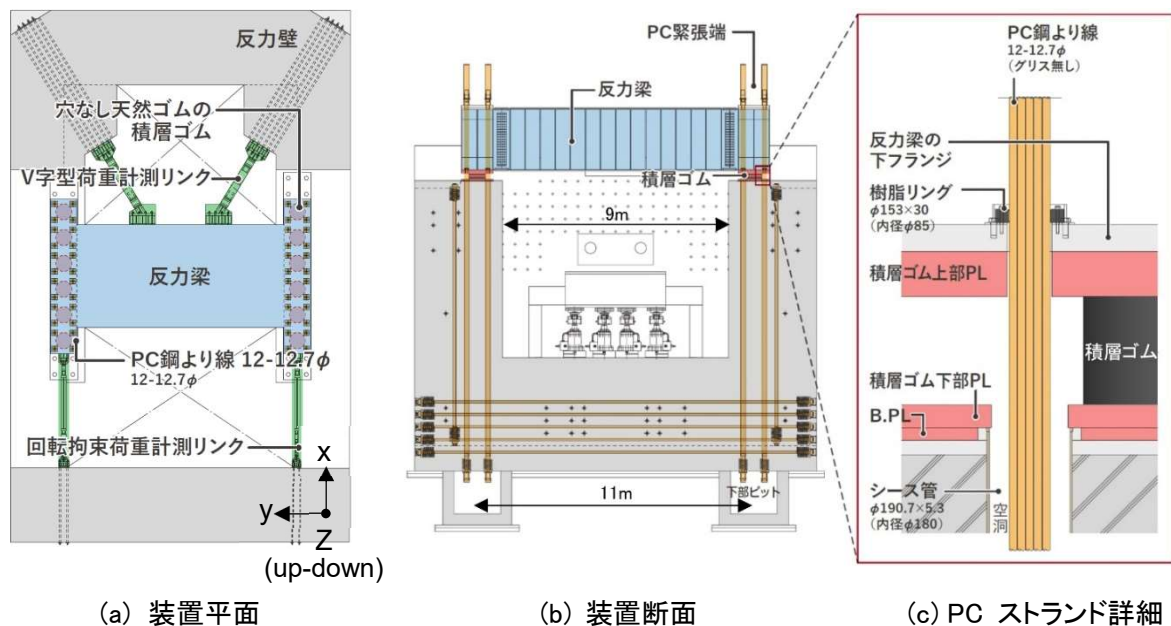


図 3 実大免震実験装置の平面および断面

水平方向に RC 反力壁に接続されている。反力梁の両端は積層ゴム支承に圧縮力を加えるため下端と上端の間の 14.6m に渡り水平方向に可動可能な PC スtrand (PC コンクリート用高張力鋼線) で初期張力が導入され圧着されている。このため実験中に反力梁が鉛直荷重により押し上げられても、支承部の圧縮応力は失われない。反力梁を支持する積層ゴム支承の水平剛性は低いため、水平力の大部分は荷重計測リンクを介して測定され、積層ゴム支承を介して伝達される水平力比はおおよそ 1%未満に留まる。さらに積層天然支承の線形性により、これらの支承の水平方向力は、水平方向の変形を利用することで精度良く求めることができる。反力梁の水平方向の変位は 1~2mm 程度と予想され、加速度は無視できるレベルに留まるため、計測リンクを通じて計測された反力は、既存施設で課題となっている摩擦力または慣性力の影響を受けない。

3. RC 反力壁の設計および建設

RC 反力壁の PC 配置図を図 4 に示す。将来、2 方向加力の水平加振台を使用し最大 50,000kN の垂直負荷容量に拡張できるようにするため、RC 反力壁はこれらの条件に耐えるように設計された。反力梁のスパンは 11m、反力壁の厚さは 3.5m、基礎の厚さは 4.5m となっている。RC 壁のひび割れを防止するため、基礎と壁にはプレストレスが導入されている。コンクリートは Fc40 (低熱ポルトランドセメント) を使用し、PC ケーブルは PC 鋼より線 SWPR7B(7 本より)とし、鉛直に 72 本、水平に 115 本配置している。

反力梁は径 650mm の 12 個の積層天然ゴム支承で支えられた RC 反力壁に配置されている。上記とは別に 12 本束ねられた PC 鋼より線 SWPR7B(7 本より)が反力梁を支承を通して RC 反力壁に圧着されている。これらの PC 鋼より線は支承ごとに 4 セット (計 48 セット) 配置され、各セットに 1050kN/本の設計張力 (リラクゼーションを考慮し、施工時 1240kN/本)が導入されている。この初期張力は、最も厳しい試験条件下でも反力梁支持支承を圧縮状態に保つように設計されている。

予想される反力梁の数 mm の水平変形を可能とするため、各 PC スtrand は径 190.7mm のシース管内に配置されている。シース管厚 5.3mm のため設計段階で PC スtrand の周囲には

47mm のクリアランスが確保された。高さ 11.52m のシース菅は図 5 (a) に示すように仮設骨組を使用し、厳密な工事管理のもと、1/650 の建方精度で RC 反力壁に埋め込まれた。その結果、PC ストランドの周囲には 30mm のクリアランスが確保された (図 5(b))。

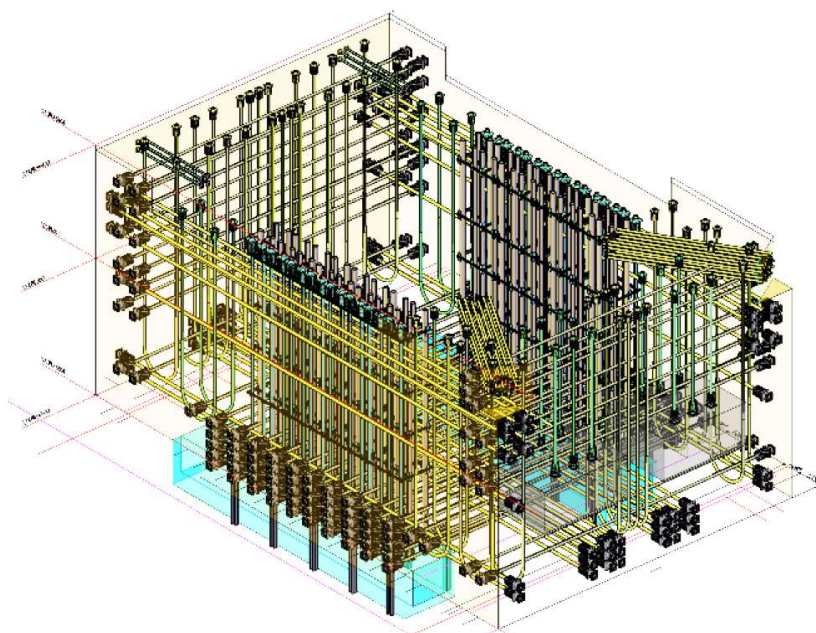
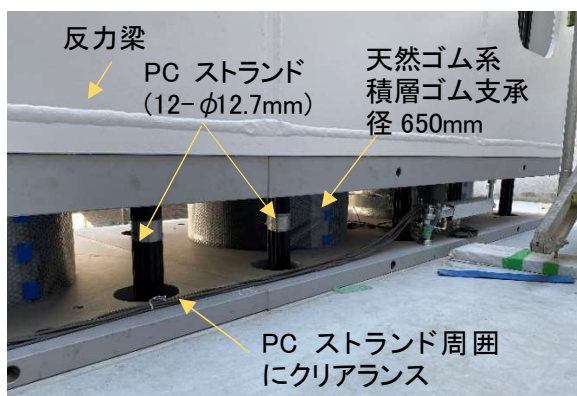


図4 RC反力壁とPCストランド配置 (提供: 黒澤建設)



(a) シース菅の仮設フレーム



(b) PCストランドおよび反力梁を支持する支承

図5 反力梁を固定するPCストランドの施工

4. 反力壁の設計と加工

反力梁は図 6 に示すように、高さ 2.5m、幅 1.2m、長さ 9.1m、厚さ 22mm から 30mm の断面、重量約 20t の鋼製箱型断面梁 4 本と、幅 1.25m、幅 7.2m、重量 26t の鋼製箱型断面梁 2 本を H 型平面に組合わせて構成されている。6 本の箱型断面梁は個別に輸送され、建設現場で摩擦ボルト接続によって組み立てられた。連結した箱型断面梁の上下には厚 30mm、幅 4.8m、長さ 8.4m の大型鋼板をボルト止めして一体化している。反力梁の設計は線材置換した手計算から始まり、精緻な有限要素解析を経て実施され、各構成要素が鋼材の許容応力レベルとボルトのすべり荷重の許容値以下に抑えられている。縦荷重 30,000kN、横荷重 6,000kN に対する反力梁の中央部最大鉛直たわみは約 7.6mm(1/1450)、ねじり角は約 1/759 に収まっている。各摩擦ボルト接続の品質を確保するために、反力梁の加工に当たっては厳密な公差管理が行われ、組立時、溶接による反りを最小限に抑え、摩擦接合部の公差を 1mm 以下にすることに成功した。



(a) 反力梁の加工状況



(b) 反力梁の弾性支承上への設置

図6 反力梁の加工と設置

5. 荷重計測リンクの設計と加工

荷重計測リンクは、図 2(a) に示すように反力梁の中心と交差する V 字型の荷重計測リンクと 2本の回転拘束荷重計測リンクで構成される。荷重計測リンクには4MN、回転拘束荷重計測リンクには1.5MNロードセルが組み込まれている。V 字型荷重計測リンクはX方向とY方向の反力梁の変位を拘束し、両方向の反力はそれぞれの軸力に余弦成分と正弦成分を乗算することによって評価できる。各荷重計測リンクは30,000kNの鉛直荷重下における反力梁の鉛直変位に対し弾性範囲内で追従し、かつロードセルにかかるせん断力と曲げモーメントを許容範囲内に制御する必要があるため、これらの計測リンク両端には図7に示すようにくびれを持った曲げ剛性を低減した接合部(弾性ピン)が導入された。



(a) V型に配置された荷重計測リンク



(b) 回転拘束荷重計測リンク

図7 荷重計測リンク

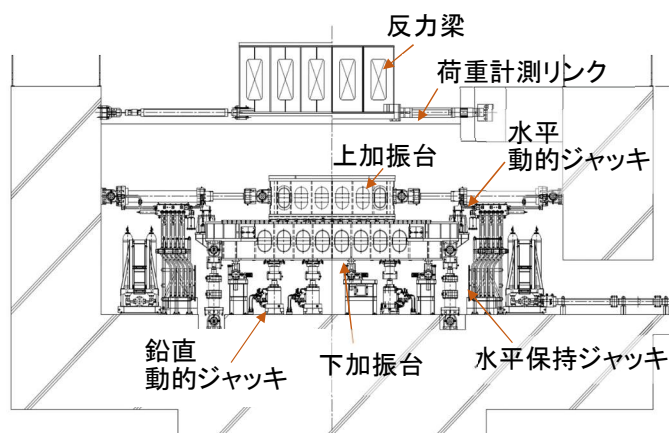
6. 反力梁を支持する弾性支承について

反力梁を支持する弾性支承には、直径 650 mm の天然ゴム系積層ゴム支承 12 個（せん断弾性係数 $G=0.39\text{N/mm}^2$ 、小振幅水平剛性 $k=1.1\text{ kN/mm}$ 、12 個のベアリングの合計剛性 13.2 kN/mm ）を使用している。ボールベアリングや油圧ベアリング等では摩擦反力が発生するが、この摩擦反力は運動の位相によって瞬間的かつ頻繁に変動するため、変位データから摩擦力を求めることは困難である。一方、天然ゴム系積層ゴム支承は水平方向の剛性が低く、線形的なせん断力-変形関係が確保されていれば、微小な変位から反力を正確に求めることができる。また、反力梁底部と RC 壁底部間の有効長 $12\text{m} \times 5/6$ （固定端効果）の PC ストランド 48 本（1 支柱あたり

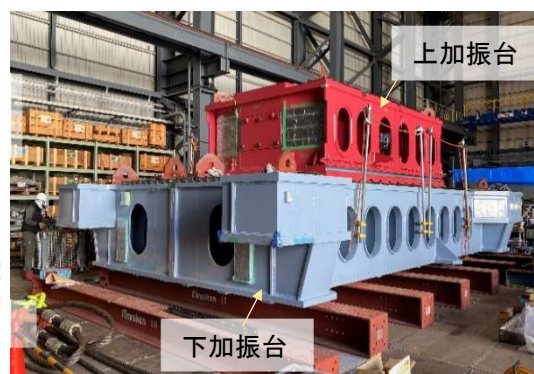
4 ストランド) を 1240kN の初期張力による $P\Delta$ 水平剛性は 6.0N/mm となり、支持支承の総水平剛性は約 19kN/mm に過ぎない。これらの支承に流れる水平方向力は測定リンクと比較し小さく約 1% 未満となり、これも反力梁の水平方向変位を測定することで精度よく評価できる。

7. 加振台の構成

図 8 に示すように、加振台は、垂直に移動する下加振台と X 方向に水平移動する上加振台で構成されている。下加振台は 24 の鉛直動的ジャッキによって制御され、上加振台は 18 本のレールと各レールに設置された 14 個のスライダー (計 252 のスライダー) を備えたりニアスライダーによって下加振台より支持され、4 本の水平動的ジャッキにより X 方向に動的加振される。



(a) 加振装置の加振方向断面



(b) 組み立てられた上下加振台

図8 上下加振台の構成 (提供: 三菱重工機械システム)

8. 様々な試験体に対する取付治具

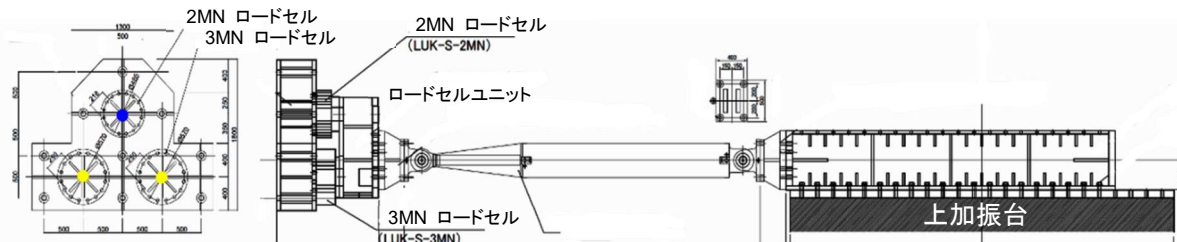
様々な免震支承試験体および制振部材試験体を実験装置に設置するための取付治具のイメージを図 9 に示す。免震支承だけでなく高さ 2.1m までの短柱試験体も本試験装置で実験可能である。



(a) 免震支承用取付治具



(b) 制振部材用ロードセルユニット



(c) 制振部材取付イメージ

図9 免震・制振部材の取り付け治具

制振部材実験の際には 3 つの皿型ロードセルを組み込んだロードセルユニットが RC 反力壁に取り付けられ、このロードセルユニットと上加振台間に試験体を取り付けることにより、計測リンクシステムと同様、摩擦や慣性力の影響を受けない制振部材反力(軸力、回転モーメント)が固定側で直接測定できる(図 9 (b), (c))。

9. 各種性能確認実験

1) 荷重計測リンク精度測定実験

実験施設の完成に先立ち、提案した反力計測リンクの精度を確認するための予備実験を行った。Fig. 10(a) に示すように上加振台と反力梁下部間にオイルジャッキとロードセルを直列に設置し、オイルジャッキにより最大 1000 kN の水平荷重を加えながら、ロードセルの測定値を反力計測リンクシステムの測定値と比較した。結果の一部を図 10(b) に示す。計測リンクによって測定された反力測定値と、48 本の PC ストランドの P- Δ 剛性と 12 個の積層ゴム支承を介して伝達される力の合計は、ロードセル測定値と 1% 未満の誤差精度で捕捉できていることが確認された。

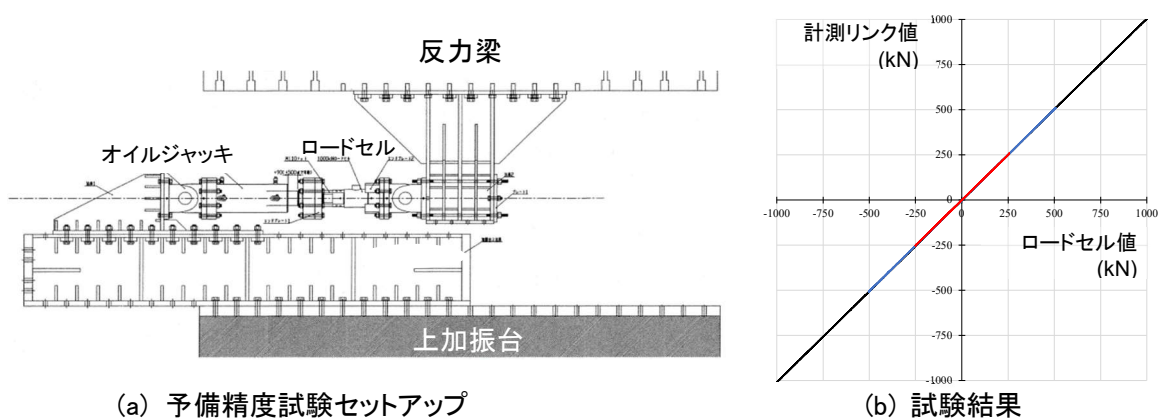


図10 計測リンク予備精度試験(2022年12月)

2) 実大積層ゴム免震支承動的載荷実験

実験施設の竣工後に径の実大積層ゴム免震支承(天然ゴム系、経 1,200mm)を試験装置に設置し、動的載荷実験(鉛直軸力 17,000kN, 水平載荷 0.1Hz, ± 500 mm)を実施した。実験の様子および得られた荷重-変形関係を図 10(a), (b)にそれぞれ示す。図 10(b)中、青線がアクチュエータに付けられたロードセルの測定値、赤線が計測リンク測定値となる。アクチュエータ付きロードセルの値には上加振台-下加振台間のリニアスライダの摩擦力および上加振台の慣性力が混入

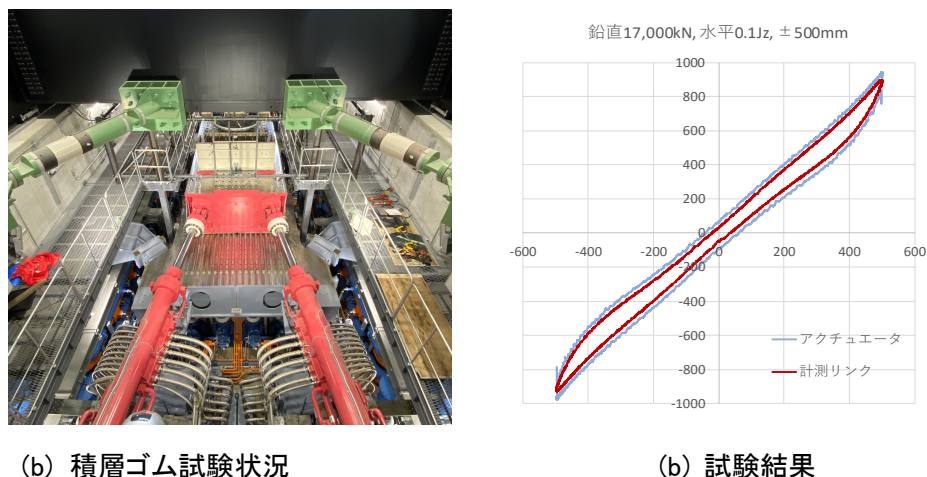


図10 計測リンク予備精度試験(2023年4月)

していることから、荷重計測リンクの値よりやや大きく、細かい振動が載っている一方、荷重計測リンクからは、スムーズな積層ゴム支承特有の履歴曲線がリアルタイムで得られている。

3) ハイブリッドシミュレーション実験

径 800mm の天然系積層ゴムを用いて 2 層建物のハイブリッド・シミュレーション (HS) 試験を行った事例を図 11 に示す。鉛直力は 5,030kN である。青が従来のアクチュエータ付きロードセルの計測値による応答、赤が荷重計測リンクの計測値によるものである。このような小振幅の時には摩擦力の影響は大変大きく、摩擦力が混入した従来システムによる応答評価値は純解析値と大きく異なってしまう。一方、荷重計測リンクを用いたシミュレーションでは純解析の評価値と良く整合した応答結果が得られている。

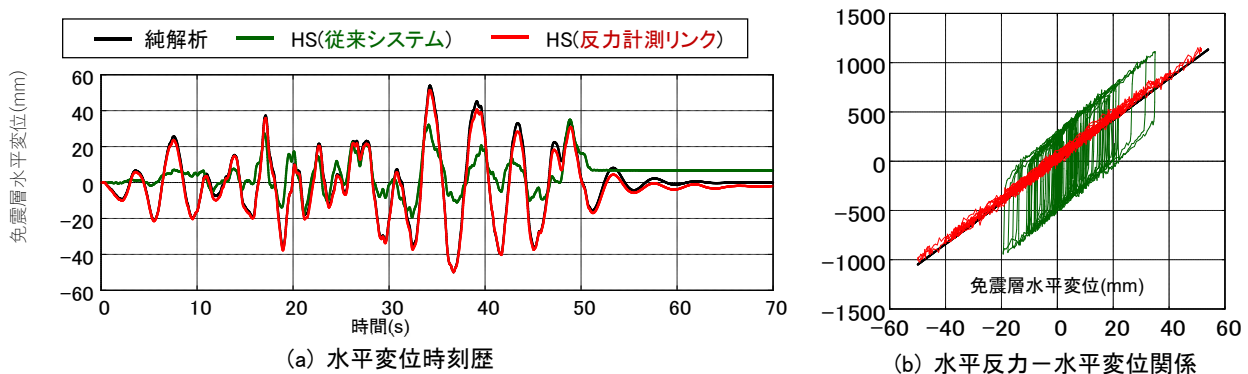


図11 実大動的免震実験装置を用いたHS試験結果 (2023年3月)

6. さいごに

本項では、摩擦と慣性力の影響を排除した免震支承実験用に設計された、日本初の実大動的免震・制振実験施設を紹介した。試験体反力をリアルタイムで正確に計測できる本試験装置の性能は、本試験機を用いた各種の実験にとって大きな利点となることが期待される。

謝辞：本原稿は下記の発表原稿を抜粋し加筆したものであり、本施設の設計、施工に関わられた多くの方々に深謝いたします。

- 1) 高橋他：E-Isolaton:免震支承・制振部材の高性能実大動的試験機、MENSIN, No.121, 2023.7
- 2) 高橋他：高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現 その 1~16、日本建築学会大会学術発表会梗概集、2023

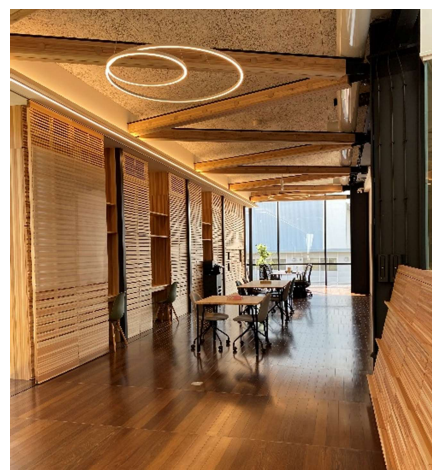


写真 1: E-Isolaton の外観および計測準備室