

E-Isolation : 免震支承・制振部材の高性能実大動的試験機

高橋 良和	京都大学 社会基盤工学専攻 教授
竹内 徹	東京工業大学 建築学系 教授
吉敷 祥一	東京工業大学 科学技術創成研究院 教授
篠崎 洋三	大成建設 設計本部 副本部長
米田 雅子	東京工業大学 建築学系 特任教授
梶原 浩一	防災科学技術研究所 研究員
和田 章	東京工業大学 名誉教授

概要

免震・制振技術は、20世紀後半から世界中の研究者や技術者の挑戦によって開発・実用化され、40年以上の時を経て、現在では世界の多くの地震地域において数千のビルや住宅、高速道路などに利用されるようになった。免震・制振構造は大地震においても構造物の損傷を防止し、安全性のみならず継続使用を可能とする技術である。今日、この性能は建築技術者だけでなく一般の人々にも認識されるようになり、レジリエントな社会の形成に欠かせないものとなっている。この重要な要素である免震支承の動的特性は、各種の載荷条件、製品の大きさ、載荷速度などに大きく依存することが分かっている。これらの支承の実際の特性と性能は、実物大の試験体を用いて動的実荷重条件の下で確認することが必須である。しかし、このような能力を備えた試験施設の数はまだ世界の中でも限られており、米国、中国、台湾、イタリア、トルコなどの公的試験機があり、これらの性能試験が行われているだけであり、我が国には、実大の試験体に動的大変位を与える試験機はなかった。一方、これらの動的載荷試験機の水平荷重測定には、試験機の水平可動部分に大鉛直荷重によって生じる摩擦力、および大重量の加振台の慣性力が含まれてしまい、正しい試験結果を得るのが難しい。この問題を解決するため、筆者らを中心とするグループでは摩擦や慣性力の影響を受けないように、直接反力を計測するシステムを提案した。2023年3月にこのシステムを用いた実大免震試験機（E-Isolation）が兵庫県三木市に完成した。本試験機では免震支承やダンパーの動的載荷試験だけでなく、免震構造や、ダンパーが設置される制振構造のハイブリッドシミュレーションも実施可能である。ここでは、実大免震試験機の設計の詳細と建設の過程を紹介する。

Abstract

The dynamic characteristics of seismically isolated bearings are highly dependent on the size effect and rate-of-loading, and confirming the actual properties and performance of these bearings with full-scale specimens under dynamic loading protocols is essential. The limited testing facilities with such capacity in the US, China, Taiwan, Italy, etc. are conducting these tests, their dynamic loading test setups are subjected to friction generated by the large vertical loads and inertial force of the heavy table which affect the accuracy of measured forces. To solve this problem, the authors have proposed a direct reaction force measuring system that can eliminate the effects of friction and inertia forces, and a testing facility with the proposed system (E-Isolation) have been completed on March 2023 in Hyogo, beside E-defense. This test facility is designed to conduct not only dynamic loading tests of seismic isolation bearings and dampers but also to perform hybrid simulations.

Yoshikazu Takahashi (Kyoto University)
Toru Takeuchi (Tokyo Institute of Technology)
Shoichi Kishiki (Tokyo Institute of Technology)
Yozo Shinozaki (Taisei Corporation)
Masako Yoneda (Tokyo Institute of Technology)
Koichi Kajiwara (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
Akira Wada (Tokyo Institute of Technology)

キーワード

免震構造, 免震支承, 動的試験, 摩擦, 慣性力, スケール効果, E-アイソレーション

1 はじめに

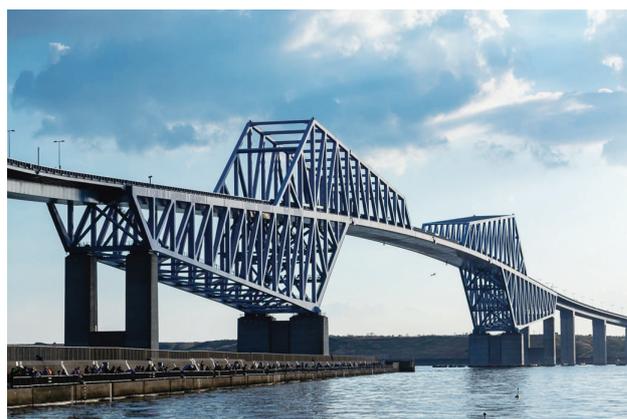
耐震構造の開発の歴史を振り返ると、大きな地震に対し構造物がほぼ弾性的に強度で抵抗する「強度構造」と、構造物に塑性変形を許容する「靱性構造」の2つの考え方があることが分かる。強度構造は低層の建物に適用できるが、中層以上の建物には適用できない。靱性構造は、日本だけでなく、アメリカ、中国、イタリアなどの地震国で、あらゆる高さの建物や橋梁に推奨され、鉄筋コンクリート構造や鋼構造の骨組に安定した塑性変形能力を与えるための膨大な研究が行われてきた。これらの成果は各国の教科書や設計規準に反映されてきたが、ここで推奨されている「塑性変形」は、実際には「構造の損傷」でもある。構造技術の専門家は靱性の高さを論じるが、住み手の人々には壊れたようにしか見えない。靱性構造の考え方に従い、大地震の際に人命が確保されたとしても、損傷を受けた住宅、病院、工場、事務所、学校、橋などは殆どの場合続けて使用することができず、機能を失い、場合によっては解体して建て直さなくてはならなくなる。その一方、1970年頃から開発されてきた免震・制振構造は地震時に構造本体の損傷を最小限に抑え、あるいは完全に防止し得る構造法として開発・実用化されてきた。この革新的な構造法は、地震時に柱や梁、壁などの構造本体ではなく、免震部材や制振部材で地震エネルギーを吸収する方法である。この結果、主要な構造本体を地震後も無損傷にすることができ、建物の継続使用が可能となる。これらの技術は、図1に示すように、多数の高層ビルや大型橋梁にも広く適用されている。



(a) ロスアンゼルス市庁舎



(b) 代ゼミタワー



(c) 東京ベイブリッジ

図1 免震装置を使用した高層建物や大型橋梁

免震部材や制振部材は、言うまでもなく構造物の地震応答を引き受ける重要部材であり、設計・施工前に大地震時の挙動や性能を総合的に把握する必要がある。具体的には実際に用いられる実物大の免震部材・制振部材に、実際の地震が免震構造・制振構造を襲ったときの条件を模擬した過酷な動的試験を実施することが必須となる。過去70年間の地震の経験より、靱性構造には構造的な損傷が生じることが覚悟され、構造設計者はこの状況を納得して設計している。一方、免震構造・制振構造では、免震部材や制振部材の安定した大変形性能とエネルギー吸収能力に期待し、構造本体は大地震でも全く被害を受けないようにしている。免震構造・制振構造の飛躍的な普及には、免震部材や制振部材の性能について、国民が納得できる理解が不可欠である。実大部材の実荷重かつ実速度試験の取り組み、および具体的な橋梁・建築への活用と実際の地震時の優れた性能を示すことの相乗効果により、よりレジリエントな社会の構築に向けて、これらの新しい技術の発展と展開を推進しなければならない。

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）は力と変位の関係に非線形性が強い。これらの付加減衰能力は、大きな鉛直荷重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。特に直径1mを超える大型のゴム支承は、

加硫接着に時間がかかり、製品不良の発生のリスクが高いとも言われている。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。しかし今まで直径が400mmを超える免震支承を動的に試験できる試験機は日本国内に無く、実大の免震支承の試験は国外の試験施設で実施されてきた。図2 (a) に、カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) の試験施設 (SRMD) (Benzoni et al., 1998) を示す。試験体にせん断力を与える加振台は、数万kNの大鉛直荷重を受けながら、水平方向に動的に可動する。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値には、大きな垂直力と可動するテーブルのあいだの滑り部分に生じる摩擦力、及び重い加振台が高速度で可動するために生じる慣性力が混入してしまう。Alizeraら (2019) は加速度を測定して慣性力を補正し、摩擦モデルを構築することで、リアルタイムハイブリッドシミュレーション試験を実現した。ただし、圧力、速度、位相、および温度に依存する複雑な現象を摩擦モデルによって正確に再現することは容易ではなく、計算に関連する時間遅延もあり、リアルタイムハイブリッドシミュレーション試験の実施には課題を残している。

これらの問題を解決するために、著者らは直接反力測定システムを提案した。図2 (b) に示すように、剛性の高い反力梁を剛強なRC反力壁上の12台の天然ゴム系積層ゴム支承の上に設置し、試験体はこの反力梁の中央下面に設置する。12台の積層ゴム支承の水平方向の剛性 (K_h) は非常に小さく、垂直方向には高い剛性 (K_v) を有する ($K_h < K_v/3000$)。ここで用いた積層ゴム支承は通常のものとは異なり、中央に孔がなく大きな鉛直力を受けると多層のゴム内部に縮むことの出来ない剛なゴムボールのような応力分布が形成される。内部の薄鋼板にも孔が開いていないため、ゴムの膨張がより抑制され、鋼板中央の応力集中も効果的に防止されている。

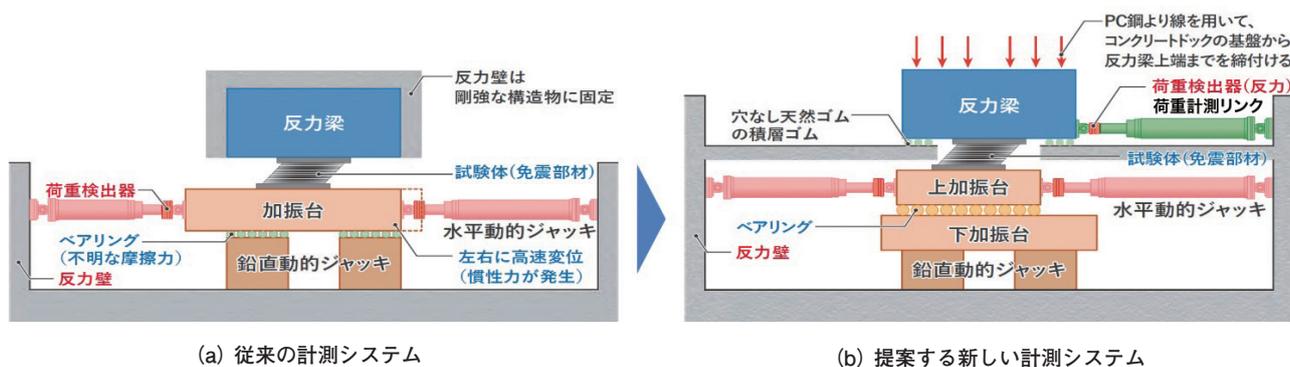


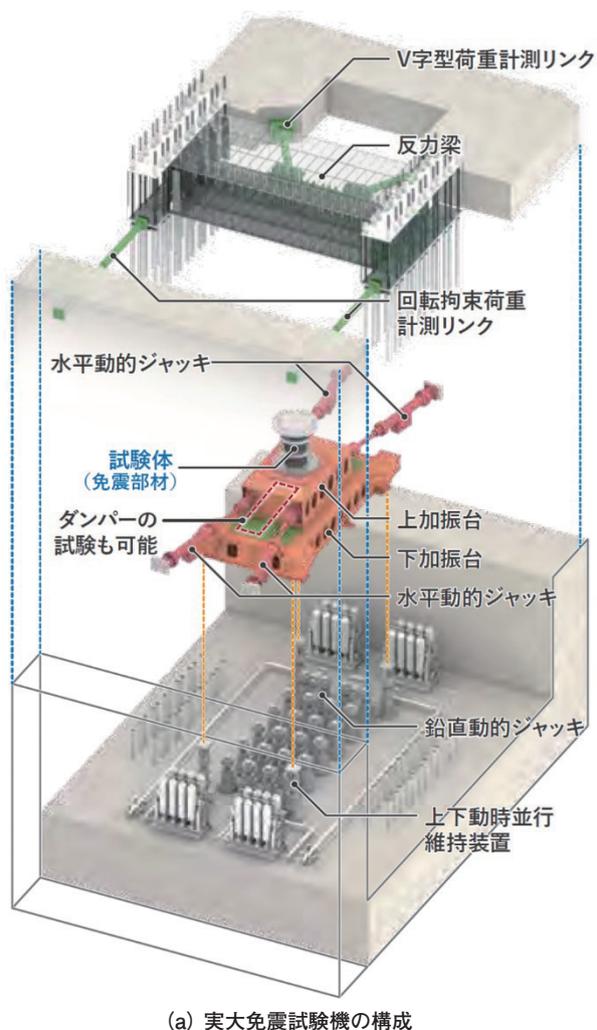
図2 従来システムと提案する新しい計測システムの比較

4本の荷重計測リンクは、反力梁と剛強なRC反力壁の間に水平に接続する。水平方向の反力の大部分は、これらの荷重計測リンクを介してリアルタイムで測定され、反力梁の動きは2mm以内であるため、反力梁の慣性力はほとんど発生しない。反力梁を支持している12台の積層ゴム支承の水平変位が小さいこと、積層ゴムの剛性が十分に小さいため、この支持層を介して伝達される水平方向の力は全体水平力のわずか1%以内に留まる。ここに用いた積層ゴム支承は安定した線形特性を有し、大鉛直荷重下で数mmの小さな水平変形でも、支承を介して伝達される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ストランドが積層ゴム支承の周囲に配置されるが、長さ (14.6m) が十分に長いので張力は変化せず、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。この反力梁に生じる反力を計測することで摩擦の影響を排除するという考え方は、過去の骨組試験で用いられた例があるものの、ロードセルを導入し本格的な動的試験機に適用した例はほとんど無い。一方、国内外に試験体と加力治具の間に多数の3軸ロードセルを挿入した例がある (Shimoda, 1990s, Zayas, 2023)。

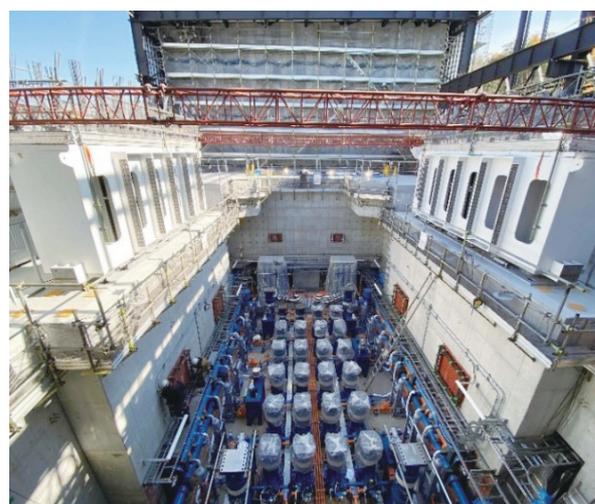
本研究開発における設計は、MITのSuh教授が1990年に提案したDesign Axiom²⁾の考えに従っている。どのような設計においても要求する機能functional requirements (FRs) ベクトルがあり、設計によって決めべきdesign parameters (DPs) ベクトルがある。これらの関係はdesign matrix (A) によって「FRs = A · DPs」のように表される。A は非常に複雑な行列になるが、複雑なまま対処しようとするのではなく、新しい発想を組み込むことによってAを単純化し、設計の信頼性や確実性を高めようとする考えである。試験機と試験体の間に多数のロードセルを挿入するデータ取得システムの設計行列 A は複雑であり、大きな圧縮力を受けるロードセルは、垂直荷重の約10%の水平力を測定する必要があるが、試験機の最大鉛直荷重の能力に比べて、小

規模な試験体の場合、作用する水平荷重の絶対値が0.1%以下になることもあり、ここに設置される剛強なロードセルによる測定では精度を確保するのが難しい。この提案手法では、反力梁全体を水平方向に柔かく支持し、垂直方向に自由な4つの水平リンクによって水平荷重を測定するため、設計行列Aを単純な対角行列にすることができる。この考えによって、鉛直荷重の影響を受けない水平リンクで荷重を測定するようにしたため、水平力データ取得の精度を圧倒的に向上させることができる（図3）。

本寄稿では、この測定システムを実際の大規模な動的試験機に組み込むための詳細な設計を紹介する。新しいアイデアを実際のデバイスに統合するプロセスには、多くの事前試験が必要であったが、これらのプロセスを各要素の設計詳細とともに説明する。



(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3 実大免震試験機の概要

2 提案する荷重測定システム

はじめに、既存の動的試験機における荷重測定システムを概説し、これらのシステムの持つ問題を明らかにする。図2 (a) に示す一般的な試験機では、免震支承試験体の上部に、大きな鉄骨梁（例: UCSD の SRMD、Benzoni et al., 1998）またはコンクリート フレーム（例: 台湾NCREC の MATS, Lin et al., 2017）があり、ここに試験体上面が固定される。試験体の下面には、大きな上向き鉛直荷重を載荷できる加振台が水平ベアリング上に設置され、加振台に高速の水平変位を与えて試験体の性能試験を行う。免震支承試験体に生じる水平力は、水平動的ジャッキの先端に接続されたロードセルによって測定される。ただし、数万kNの高軸力を受ける免震支承の動的載荷試験の間、加振台の水平ベアリングの摩擦力と加振台自体の質量によって生成される慣性力が、測定される水平荷重値に紛れ込んでしまう。慣性力は加振台の加速度を測定し加振台の質量を乗じることで推定できるが、摩擦力に関しては常に変化する垂直方向の力だけでなく、速度、位相、温度およびその他のパラメーターにも依存するため、この影響を計算によって排除することは非常に困難である。Alizeraら（2019）は高度な摩擦モデルを提

案し、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーションを試みているが、捕まえどころのない摩擦力を明解に除去することはできていない。

これに対し、提案する荷重測定システムおよび試験装置の平面図と断面図を図2 (b) および図4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機は、鉛直方向に36,000kN (静的)、30,000kN (動的) の载荷能力、250mmの上下の可動、70mm/秒の速度能力、水平方向に6,500kN (静的)、5,100kN (動的) の载荷能力、±1,300mmの可動、800mm/秒の速度能力を有している。この試験機ではUCSDのSRMD 施設と同様、剛な鋼製反力梁が試験体の上部に設置するが、本施設ではRC反力壁に固定されるのではなく、先にも述べたように水平方向の剛性が低く垂直方向の剛性が高い12台の天然ゴム系積層ゴム支承によって支える。反力梁は、ロードセルを組み込んだ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によって、水平方向にRC反力壁に接続する。反力梁の両翼は積層ゴム支承に圧縮力を加えるためコンクリート壁の下端から反力梁の上端まで14.6mの長さの水平方向に可動可能なPCストランド(PCコンクリート用高張力鋼線)で初期張力を導入する。このため試験中に反力梁が鉛直荷重により押し上げられても、積層ゴム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は全水平力のおおよそ1%未満に留まる。さらに天然ゴム系積層ゴム支承の水平方向の線形性により、これらの支承の水平方向力は、水平方向の変位にこの接合部分の剛性を乗じれば、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ため、計測リンクを通じて計測された荷重は、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値として瞬時に計測することができる。

以降、このシステムを実現する各要素の設計の詳細について説明する。

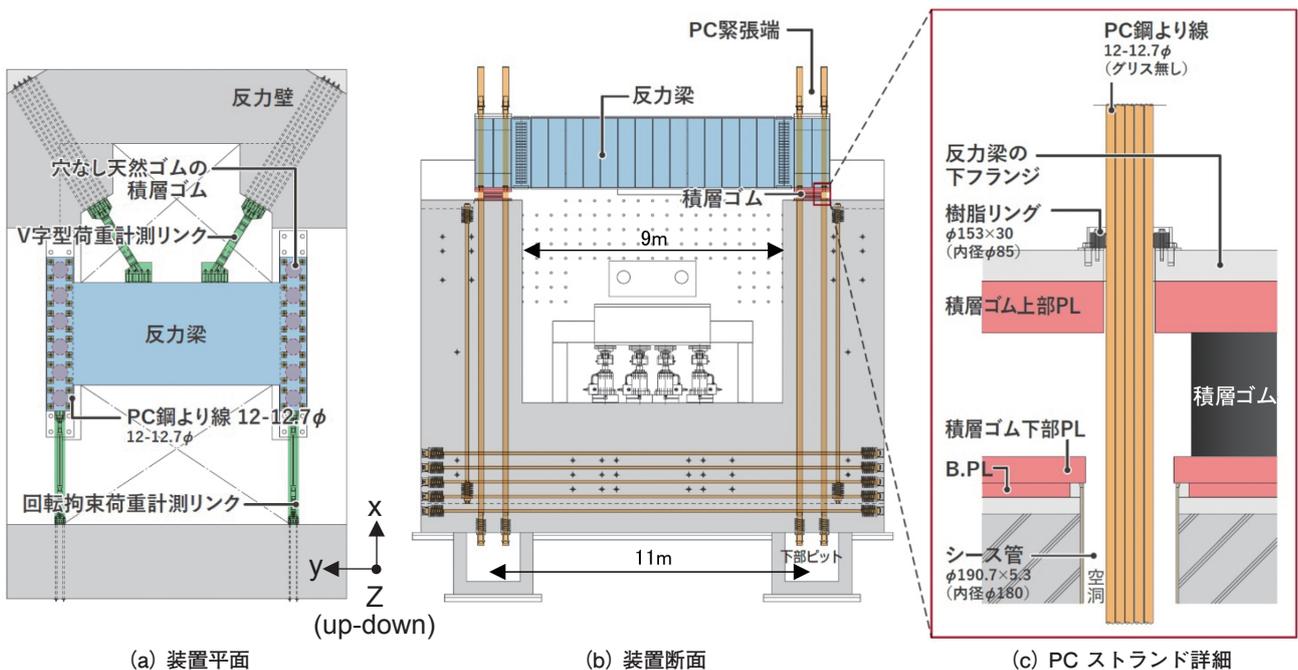


図4 実大免震実験装置の平面および断面

3 RC反力壁の設計および建設

RC反力壁の詳細な設計図の一部を図5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している。反力梁のスパンは11m、反力壁の厚さは3.5m、基礎マットの厚さは4.5mである。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を導入する。

反力梁は径650mmの12個の天然ゴム系積層ゴム支承で支えられRC反力壁上に配置されている。12本の径12.7mm鋼線からなるPCストランドが、反力梁の上フランジから積層ゴム支承を通してRC反力壁の基礎マッ

ト下面位置までアンボンドで通され、緊張されている。これらの PC ストランドは支承ごとに4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）を導入する。この初期張力は、最も厳しい試験条件下でも反力梁支持積層ゴム支承を圧縮状態に保つように設計している。

予想される反力梁の水平変形を可能とするため、各PCストランドは径190.7mmのシース管内に配置されている。シース管厚5.3mmのため内径は180mmであり、設計段階でPC ストランド（外形85mm）の周囲に47mmのクリアランスを予定した。高さ11.52mのシース管は図6（a）に示すように仮設骨組を使用し、1/650の建方精度でRC反力壁に埋め込まれた。この精巧な施工の結果、PC ストランドの周囲には最小でも30mmのクリアランスを確保することができた（図6（b））。

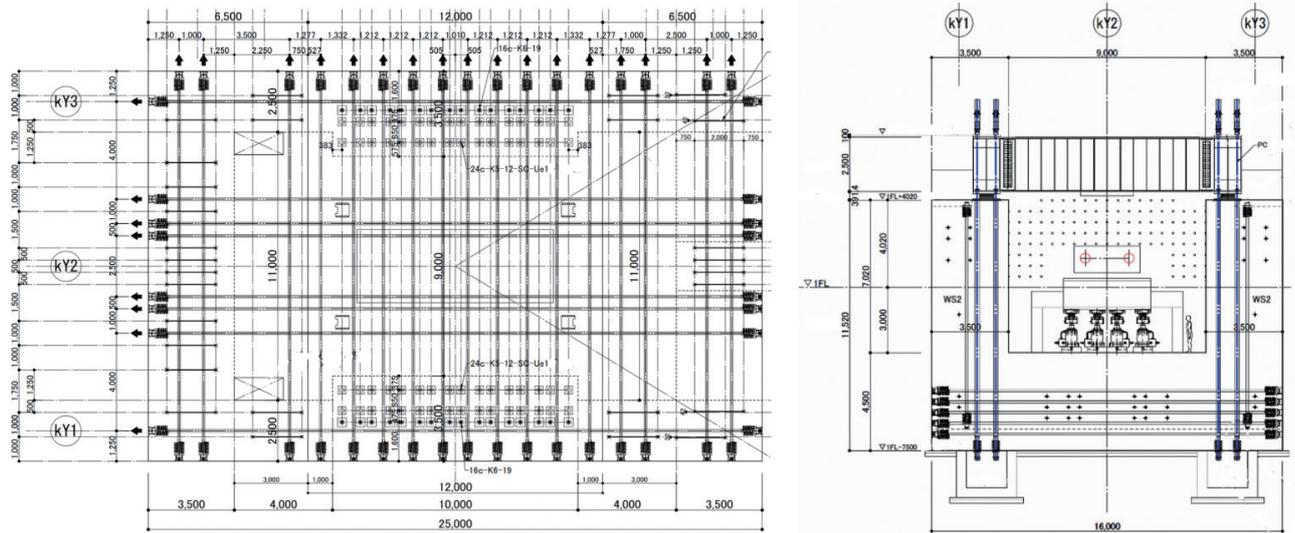
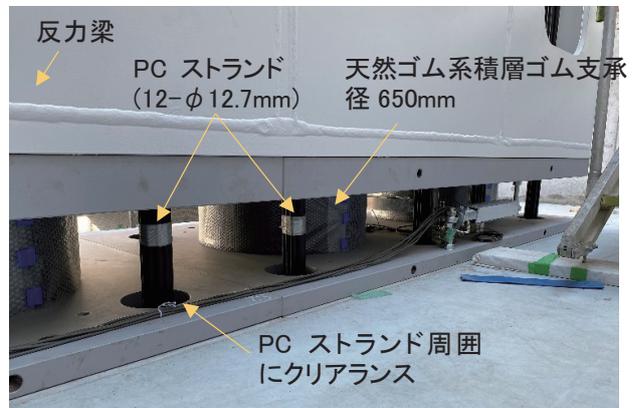


図5 RC反力壁とPCストランド配置（提供：黒澤建設）



(a) シース管の仮設フレーム



(b) PCストランドおよび反力梁を支持する支承

図6 反力梁を固定するPCストランドの施工

4 反力梁の設計と加工

反力梁は図7に示すように、高さ2.5m、幅1.2m、長さ9.1m、厚さ22mmから30mmの鋼板を用いた断面、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形状の平面に組合わせて構成する。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長期許容応力レベルとボルトのすべり荷重の長期許容値以下に抑えられていることを確認してある。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（図8）。

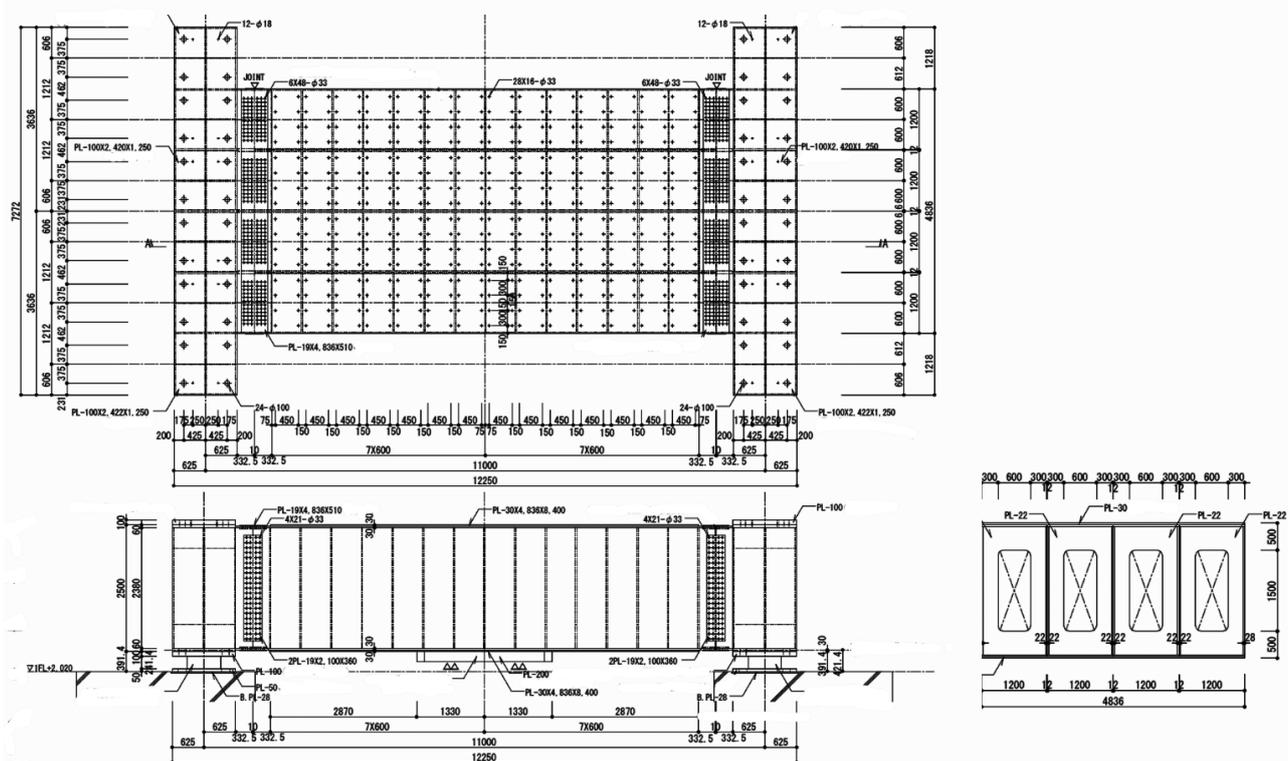


図7 反力梁平面・断面 (提供：日鉄エンジニアリング、向秀元)



(a) 反力梁の加工状況



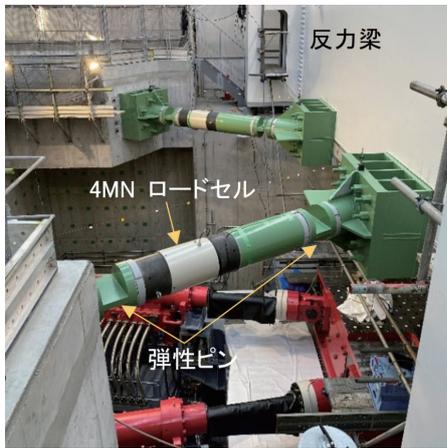
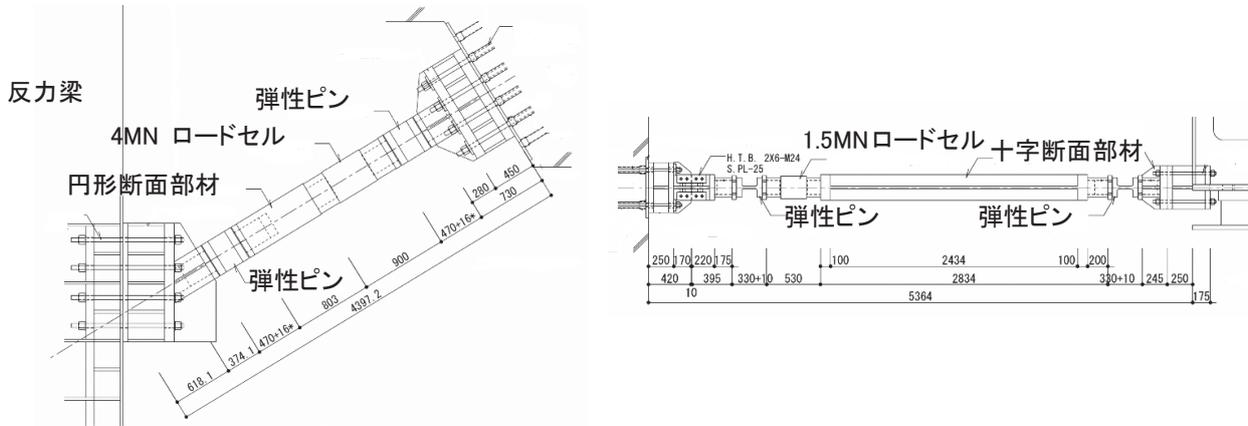
(b) 反力梁の弾性支承上への設置

図8 反力梁の加工と設置

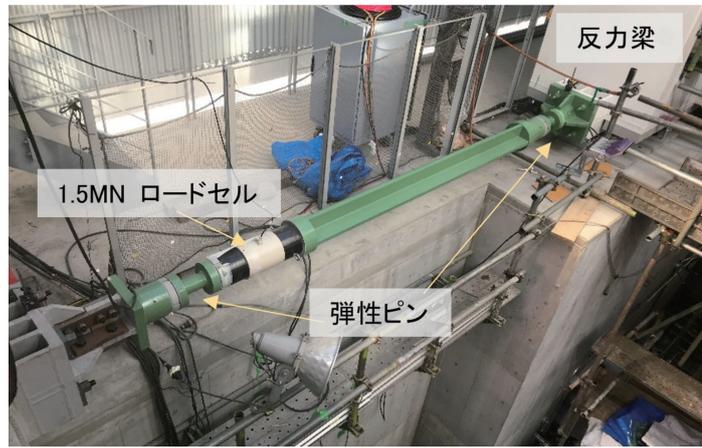
5 荷重計測リンクの設計と加工

提案する水平荷重測定の仕事の重要要素である荷重計測リンクは、図4 (a) に示すように幅4.8mの反力梁の中心線とこの軸線が交差する V 字型の荷重計測リンクと、反力梁の両翼に接続する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。以下図4 (a) に示すように、X軸を主荷重方向、Y軸を平面図の直交方向、Z軸は垂直方向と定義する。V字型計測リンクはX方向とY方向の反力梁の変位を拘束し、両方向の荷重はそれぞれの軸力の余弦成分と正弦成分によって評価できる。さらにZ軸周りの反力梁の回転を拘束するため、反力梁の南北端とRC反力壁の間に2本の回転拘束リンクを追加している。設計上、水平荷重の約75%がV字型荷重計測リンクによって測定され、残りの殆どが回転拘束荷重計測リンクによって測定され、これらの計測リンクによって測定される反力の合計は99%に達する。

V字型計測リンクは30,000kNの鉛直荷重下における反力梁の上下方向の動きに対し弾性範囲内で追従できる必要があり、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。このため、これらの計測リンク両端には図9に示すようにくびれを持つ曲げ剛性を低減した接合部を導入した。この接合部はロードセルに加わるせん断力と曲げモーメントを効果的に低減する機能があり、以降「弾性ピン」と呼ぶ。



(a) V型に配置された荷重リンク



(b) 回転拘束荷重計測リンク

図9 荷重計測リンク

6 反力梁を支持する弾性支承について

これまでも述べてきたが、反力梁を支持する弾性支承とPCストランドについて詳細に説明する。反力梁を支持する弾性支承には、図10 (a) に示すように直径650mm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台の合計剛性 13.2 kN/mm ）を使用した。図10 (b) に示すように、ボールベアリングや油膜ベアリング等では摩擦力が発生するが、この摩擦力は運動の位相によって瞬時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非常に困難である。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るため、微小な変位からこの部分を通る水平力を正確に求めることができる。線形挙動の安定性を確認するために、事前の設計段階で候補となる積層ゴム軸支承に対し微小変形試験を実施した。

また、反力梁下端とRC壁底面間の有効長 $12\text{m} \times 5/6$ （上下端固定の効果により有効長さは $5/6$ になる）のPCストランド48本（1台の積層ゴム支承あたり4ストランド）のそれぞれに1240kNの初期張力を与えるが、これら全体のP Δ 水平剛性は $48 \times 1240/10000=6.0\text{ kN/mm}$ となる。その結果、支持支承の総水平剛性は約 19 kN/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が負担する水平方向力と比較して、かなり小さく約1%未満であり、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ことが期待できる。

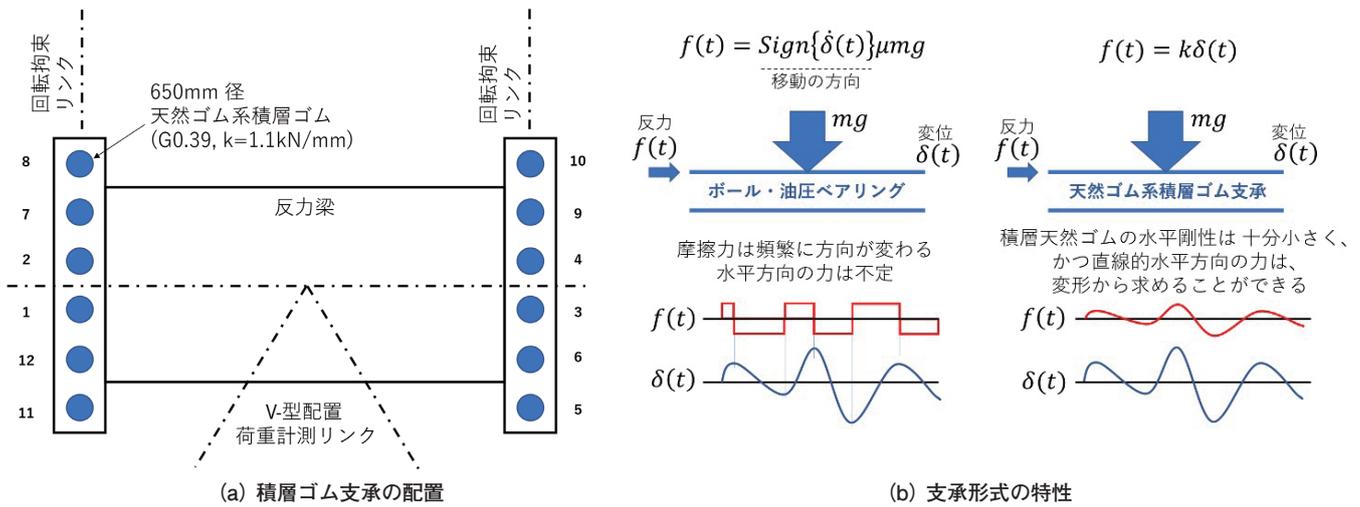


図10 反力梁を支持する弾性支承の選択

7 加振台の構成

図11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台の鉛直動的ジャッキによって支持され、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（合計252個）を備えたりニアスライダ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。

鉛直アクチュエータはロッド頂部の圧縮面で下加振台を支えているだけであり、Y軸周りとX軸周りの回転による部分的な浮き上がりを抑える機能はない。また、Z軸周りの回転やY軸方向の変位にも抵抗しない。このため、下加振台の4箇所のコーナーに水平維持装置を設け、X軸周りとY軸周りの回転を抑制する。これに加え、4つのバックアップローラを設置してZ軸周りの回転とY軸の動きを制限する。さらに4本の水平動的アクチュエータをX軸から10°程角度を付けることで、予想される不整力によるY軸の動きとZ軸周りの回転を制御する（図12）。水平維持装置は図12 (c) に示すように、下加振台の鉛直方向の動きを妨げることなく水平を確保するため、交差接続された油圧配管を設ける。この水平維持装置と鉛直動的ジャッキを併せて計28個の鉛直ロードセルが組み込まれており、これらから合計鉛直反力（ F_z ）、X軸周りの回転モーメント（ M_x ）、Y軸周りの回転モーメント（ M_y ）を得ることができる。

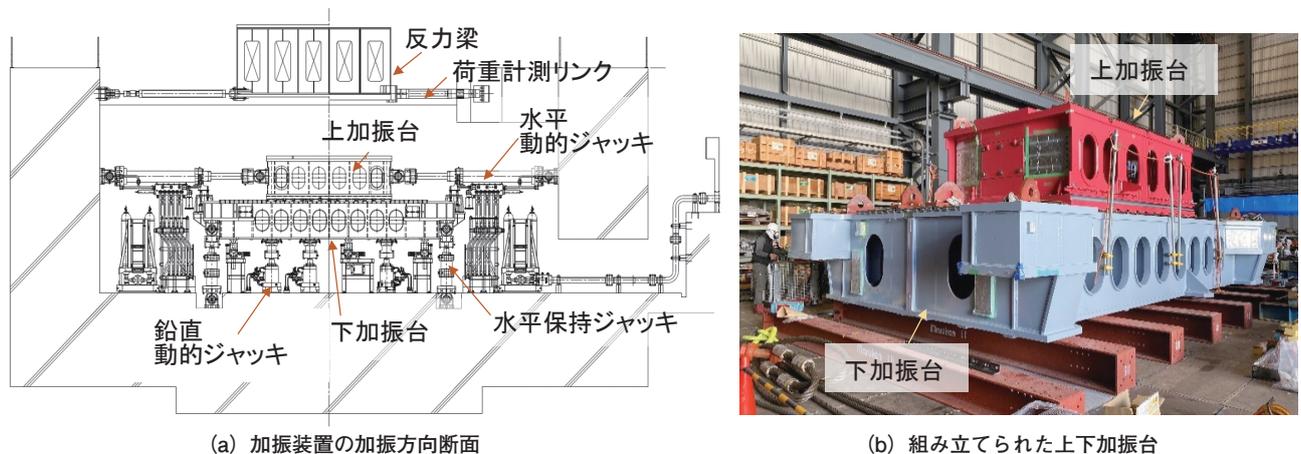
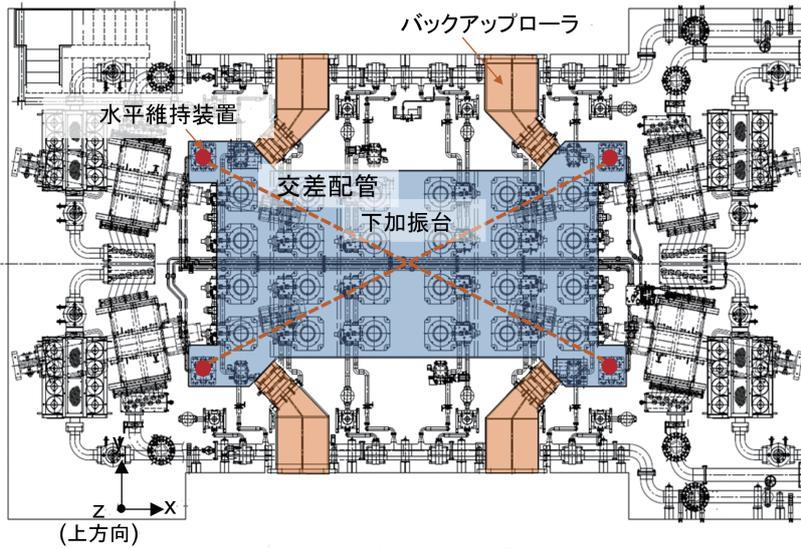
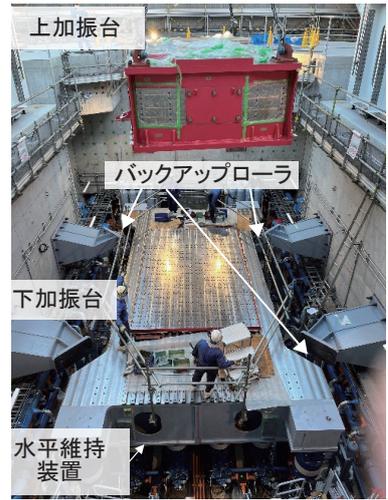


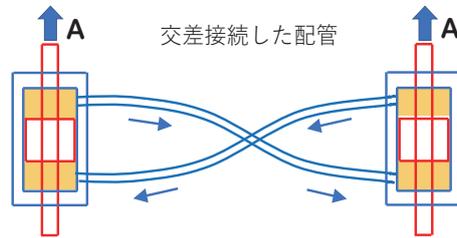
図11 上下加振台の構成（提供：三菱重工機械システム）



(a) 加振台と水平維持装置



(b) 水平保持治具および水平維持装置

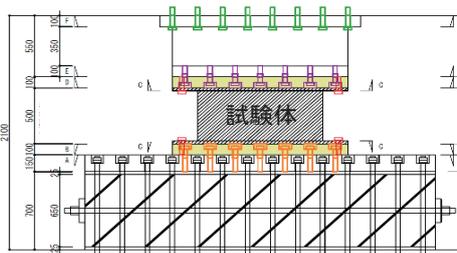


(c) 水平維持装置のメカニズム

図12 加振台の安定装置

8 様々な試験体に対する取付治具

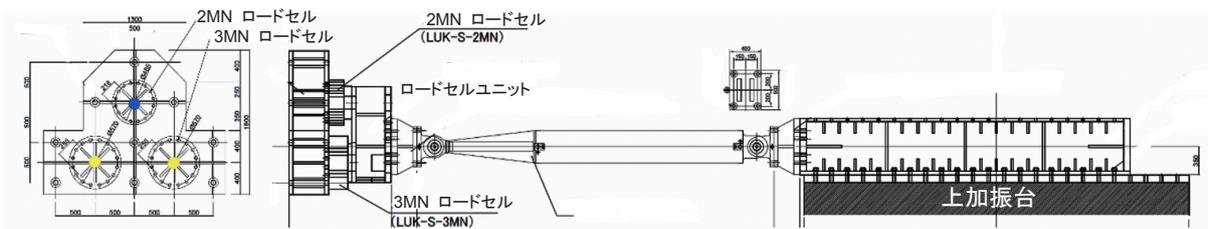
様々な免震支承試験体および制振部材試験体を試験機内に設置するための取付治具のイメージを図13に示す。制振部材の場合、3つの皿型ロードセルを組み込んだロードセルユニットを西側のRC反力壁に取り付け、このロードセルユニットと上加振台間に試験体を取り付けることにより、計測リンクシステムと同様、摩擦や慣性力の影響を受けない制振部材に生じる軸力とモーメントを反力壁の固定側で直接測定できる。



(a) 積層ゴム試験体用試験治具



(b) 仮設試験体設置状況



(c) 制振部材用試験治具

図13 種々の試験体用治具

9 計測リンクの予備精度確認実験

実大免震試験機の竣工に先立ち、提案した荷重計測リンクの精度を確認するための予備試験を行った。具体的には図14 (a) に示すように上加振台と反力梁下部間に手動の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正負の1000 kNの水平荷重を加えながら、ロードセルの測定値を荷重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14 (b) に示す。計測リンクによって測定された荷重測定値と、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%未満の誤差精度で一致することを確認した。

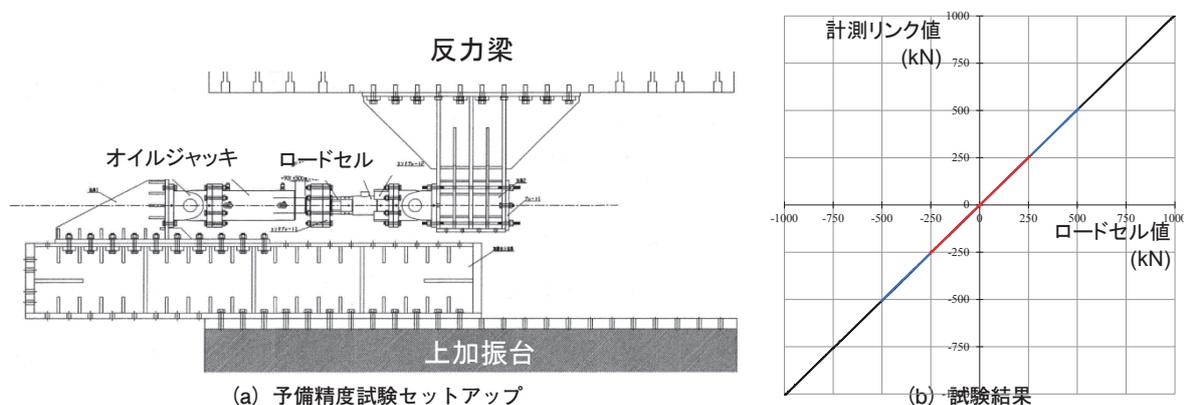


図14 計測リンク予備精度試験 (2022年12月)

10 ハイブリッドシミュレーション対応性能

フィジカル空間上 (実際の空間上) にある部材試験結果を構造物のサイバー空間上 (電子空間上) で行われる応答解析に直接組み込むハイブリッドシミュレーション (伯野他., 1969, Nakashima et al., 2020) は日本で提案され、現在では大規模構造物の地震応答をシミュレートするために世界中で広く使用されている。これは、動的応答のオンラインコンピュータ制御システムを使用し、地震による動きに応答しているかのように部材試験体の変位を制御することで実施される。ハイブリッドシミュレーションでは、構造システムの一部が試験体として用意され、残りの部分は計算モデルを使用してモデル化され、構造システムの運動方程式が時間積分スキームによって解かれる。試験体の復元力特性は、解析と並行して実行された試験機の荷重計測装置からのデータによって取得される。特に、試験時間軸を応答時間軸と一致させたリアルタイム・ハイブリッドシミュレーション (RTHS) は、速度依存部材を含む構造システムの動的応答を評価するために有効な方法となる。

本試験装置は摩擦や慣性力の影響を受けないリアルタイム直接荷重計測方式を採用しているため、ハイブリッドシミュレーションの精度を大幅に向上させることが期待できる。この動的試験機のサーボコントローラーには分析コンピュータとリアルタイムで通信するためのOpenFresco (Takahashi et al., 2006, Schellenberg) を通じて応答計算アルゴリズム (OpenSeesなど) を駆動させるハイブリッドシミュレーションモードが用意されており、反射メモリ (GE Intelligent Platforms 5565PIORC 製品ファミリー) により高速で低遅延のデータ通信を提供することができる。

11 おわりに

本寄稿では、摩擦と慣性力の影響を排除した免震支承試験用及び、ダンパー試験用に設計した、日本初の実大動的試験機を紹介した。全体をまとめると下記の様に要約できる。

- 1) 動的試験システムで課題となる計測荷重に混入する摩擦力と慣性力を、直接荷重計測リンクを導入し排除する方法が提案された。
- 2) 30,000kNの鉛直力に耐えうるようプレストレスが導入されたRC反力壁の設計が、反力梁の水平方向の変位を可能にするPCストランドの詳細を含めて提示された。
- 3) 鋼製反力梁は、6つの鋼製箱型断面梁で構成された。溶接歪みを防止し必要な公差を確保するため、特別な加工と組み立てが行われた。

- 4) V型配置された2本の荷重計測リンクと2本の回転拘束荷重計測リンクからなる荷重計測リンクシステムが提案された。これらの計測リンクは、従来の試験施設では避けられなかった試験機の摩擦力や慣性力の影響を受けることなく、試験体に作用する力の大部分を捕捉することができる。これらの計測リンクの両端部には鉛直方向の動きに追従して正確な測定値を得るために弾性ピン接合部が導入された。
- 5) 南北の反力壁の上に6台ずつ設置した天然ゴム系積層ゴム支承は、水平方向の剛性が低く水平荷重を明確に識別できる弾性線形挙動が確認されたため、反力梁の支持システムとして選択された。
- 6) 変位・回転に関する6軸方向の安定機構を含む加振台の構成が提示された。
- 7) 免震支承試験だけでなく、制振部材・ダンパーについても、摩擦や慣性力の影響を排除した試験装置構成を導入した。
- 8) 提案した荷重計測リンクの精度を確認するための予備試験が行われ、誤差が1%未満であることが確認された。
- 9) 試験体反力をリアルタイムで正確に計測できる本試験機の性能は、本試験機を用いたリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションにとって大きな利点となることが期待される。

この新しい施設は米田雅子の提案により、2005年に設立された隣接施設E-Defenseにちなみ、E-Isolationと呼ぶことが合意された（図15）。両施設により、この場所が世界の地震工学の一つの中心になることを願っている。

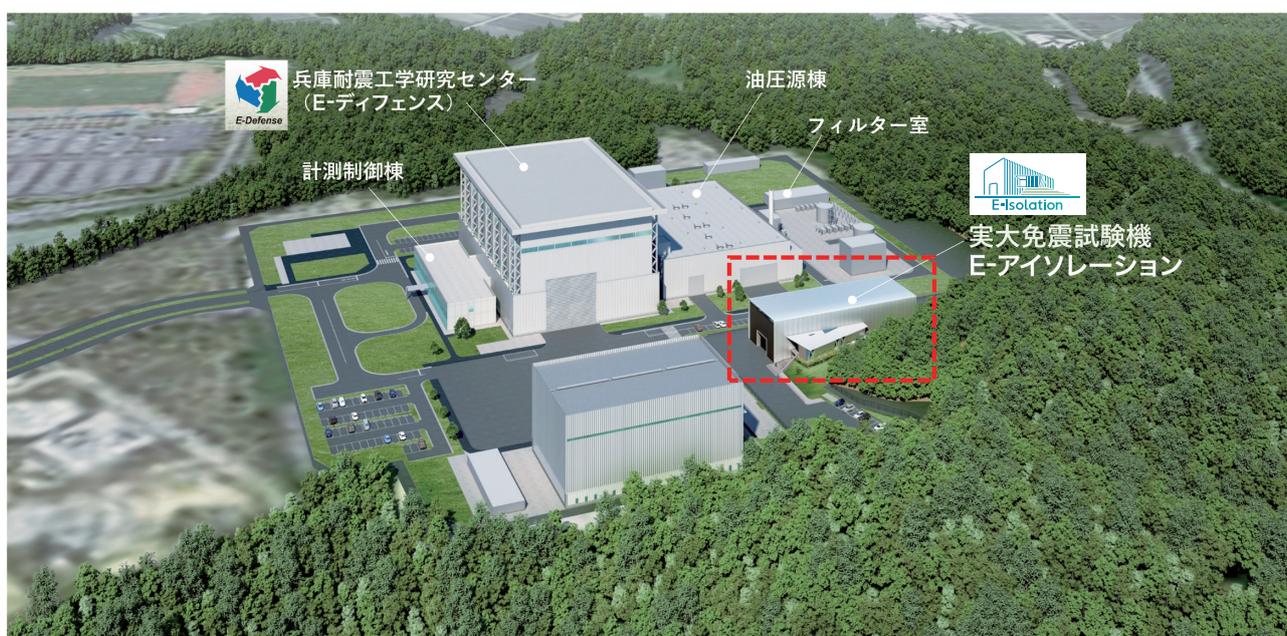


図15 E-ディフェンス と E-アイソレーション（兵庫県三木市）

謝 辞

この研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理人：国立研究開発法人防災科学技術研究所）によって実施されました。本研究プロジェクトにご協力いただいた内閣府、国土交通省、文部科学省、国立研究開発法人防災科学技術研究所をはじめとする関係者の皆様に深く感謝いたします。第一に、新施設の建設を強力に後押しして下さった、兵庫県 齋藤元彦知事、三木市 仲田一彦市長、東京工業大学 益一哉学長に感謝します。特にE-Defenseの中埜良昭センター長、井上貴仁様、坂口智子様、京都大学の植村佳大先生、上田知弥様、東京工業大学の寺澤友貴先生、黒澤未来先生、平野一郎様、梅村幸央様、酒井一至様、小林真帆様に心よりお礼申し上げます。

また、設計・製作・施工・組立・監理を極めて短期間で進めた大成建設株式会社、株式会社構造計画研究所、三菱重工機械システム株式会社、日鉄エンジニアリング株式会社、株式会社熊谷組、日鉄鋼構造株式会社、扶桑機工株式会社、倉敷化工株式会社、黒沢建設株式会社、向構造設計室、株式会社コイズミ、関電プラン

ト株式会社、株式会社共和電業、及び日本免震構造協会（JSSI）、日本免震研究推進機構（JSIL）に深く感謝いたします。

特に、大成建設：長島一郎様、小室努様、欄木龍大様、上田恭平様、佐保田幸美様、遠藤晃様、三村渉様、中島崇裕様、高澤昌義様、野口裕介様、岡山真之介様、増野泰介様、鈴木あゆみ様、上野恭宏様、小林祐樹様、小池拓生様、齋藤豊様、吉田幸司様、構造計画研究所：服部正太会長、郭猷群様、後藤尚哉様、三菱重工機械システム：清水將之様、末次正幸様、井狩頌平様、ならびに向秀元様、小泉学様、日鉄エンジニアリング：市川康様、渡辺厚様、酒井光晴様、倉敷化工：栗田雅之様、東山孝治様、扶桑機工：渡瀬昌明社長、村崎收二様、浅生一樹様、黒沢建設：黒沢亮太郎様、柏崎司様、関電プラント：森川浩様、日本免震構造協会：中澤昭伸会長、可児長英様、北村佳久様、免震研究推進機構：宮原貴昭様、海老原和夫様、林章二様、田村和夫様、沢田研自様、二井内秀実様、小島裕一様、林崎正伸様、アドバイスをいただいたブカレスト土木大学Andreea Dutu先生、イスタンブール工科大学Fatih Sutcu先生に感謝いたします。

このプロジェクトは、日本の免震・制振構造に関する研究・設計・施工に携わる多くの方々のご支援により実現しました。感謝の気持ちを込めてここにお名前を挙げさせていただきます。

お世話になっている先生方：

岡田恒男先生、齋藤公男先生、西敏夫先生、瀧口克己先生、家村浩和先生、金田勝徳先生、依田照彦先生、神田順先生、上谷宏二先生、藤野陽三先生、北村春幸先生、中島正愛先生、金箱温春先生、壁谷澤寿海先生、菊地優先生、坂田弘安先生、藤谷秀雄先生、高山峯夫先生、秋山充良先生

ご協力・ご支援を受けている協会、設計事務所、建設会社の技術者の方々：

林理様、石崎和志様、鶴飼邦夫様、細澤治様、三輪富成様、山中昌之様、勝俣英雄様、佐野剛志様、新居努様、榊間隆之様、福喜多輝様、児嶋一雄様、福田孝晴様、黒川泰嗣様、辻泰一様、近藤明洋様、高岡栄治様、東野雅彦様、上田博之様、山本雅史様、中島徹様、荻野伸行様、関戸博高様、土橋徹様、城戸隆宏様、小林秀雄様、杉浦盛基様

免震ゴム支承の専門に詳しい技術者の方々：

室田伸夫様、中村昌弘様、加藤直樹様、宮崎充様

参考文献

- [1] Alireza, S., Schellenberg, A. H., Schoettler, M. J., Mosqueda, G., Mahin, S. (2019) . Real-time hybrid simulation of seismically isolated structure with full-scale bearings and large computational models, CMES, Vol.120, no.3, pp.693-717
- [2] Benzoni, G., Seible, F. (1998) . Design of the Caltrans seismic response modification device (SRMD) test facility, Research co-ordination meeting of the IAEA's co-ordinated research programme on intercomparison of analysis methods for seismically isolated nuclear structures, pp. 101-115.
- [3] Lin, T. H., Chen, P. C. and Lin, K. C. (2017) . The multi-axial testing system for earthquake engineering researches, Earthquakes and Structures, Vol.13, No.2, pp.165-176
- [4] 伯野 元彦, 四俵 正俊, 原 司 (1969) . 計算機により制御された, はりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, 171 号 p. 1-9.
- [5] Nakashima, M. (2020) . Hybrid simulation: An early history, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 49, pp. 949-962
- [6] Schellenberg, A., Kim, H. K., Takahashi, Y., Fenves, G. L., Stephen A. Mahin, S. A., OpenFresco Command Language Manual (Ver.2.6) , <available at <https://openfresco.berkeley.edu/>>
- [7] Shimoda, I (1990s) . personal communication, Oiles Corporation.
- [8] Suh, Nam P. (1990) . The principles of design, Oxford University Press
- [9] Takahashi, Y., and Fenves, G. L. (2006) . Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, pp. 267-291
- [10] Zayas, V. (2023) , personal communication, January 25, 2023, EPS (<https://www.earthquakeprotection.com>)

注:本原稿は下記の発表英論文を和訳したものです。

Takahashi, Y., Takeuchi, T., Kishiki, S., Shinozaki, Y., Yoneda, M., Kajiwara, K., Wada, A., E-Isolation: High-performance dynamic testing installation for seismic isolation bearings and damping devices, *International Journal of High-rise buildings*, March, 2023