SIP 戦略的イノベーション創造プログラム
Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

国家レジリエンス(防災・減災)の強化

研究開発項目　Ⅸ. 実大部材地震挙動 解析システム開発
研究開発課題

高精度荷重計測機構を有する動的試験機を活用した解析法の開発

研究開発グループ

高橋良和

京都大学 教授
研究責任者

社会背景と研究開発の目的

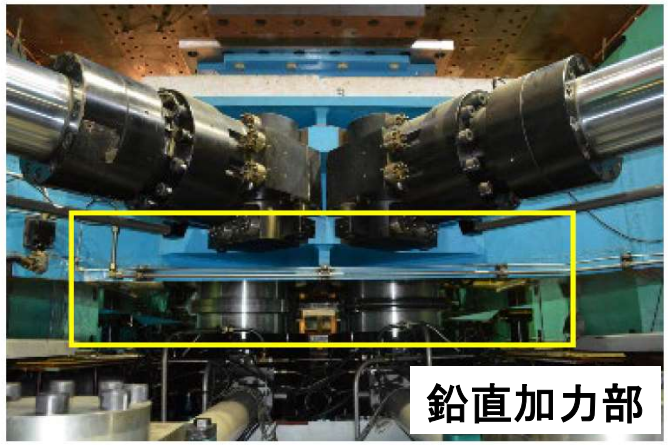
大型構造物の次世代評価法のための フィジカル空間情報の「質」の重要性

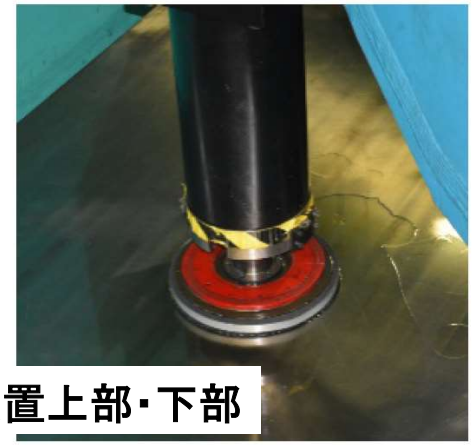
- 社会インフラ整備を強靭化する事前の備えを確実にするためにも、フィジカルな大きさが数百メートル以上の規模となる大型構造物の構造設計が重要である。
- 土木・建築構造設計において、その挙動や安全性を実験で試すことは不可能であり、サイバー空間におけるシミュレーションへの依存度が非常に高いことにある。
- シミュレーションの信頼性を高めるV&V、つまり解析の検証(Verification)と妥当性確認(Validation)のために、実際の建設物の地震時や強風時の観測と記録、および構造部材、免震・制振部材など構成要素の実験データなどの質の高いフィジカル空間情報とを照合することが必要。

- 産業競争力懇談会(COCN) 2019年度報告書「大型構造物の次世代評価法」
- 日本学術会議提言「免震・制振のデータ改ざん問題と信頼回復への対策」

社会背景と研究開発の目的

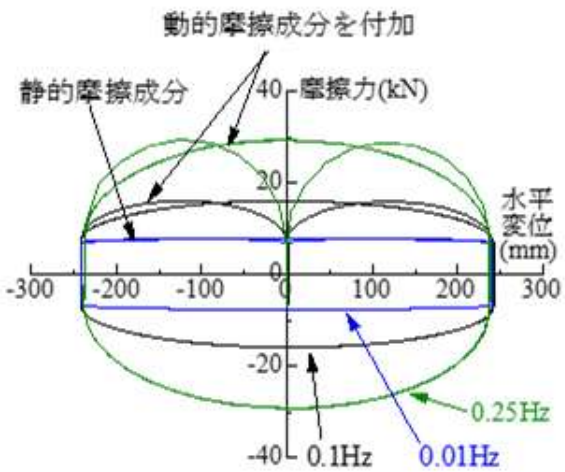
大鉛直荷重下の動的加力試験に残された重要な技術課題



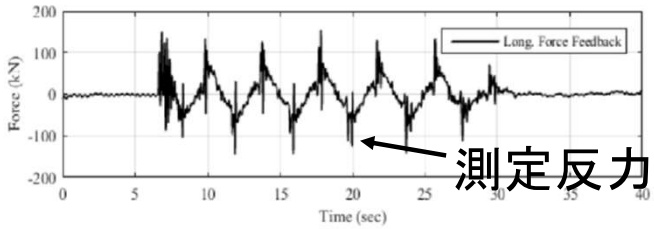


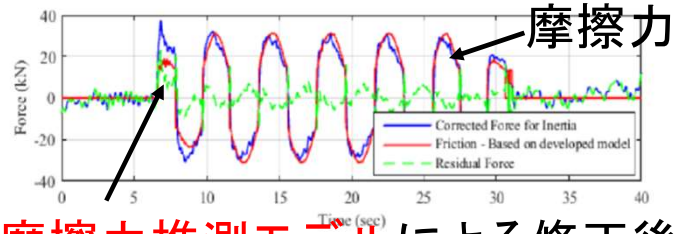
＊ Sarebanha, A et al. Real-time hybrid simulation of seismically isolated structure with full-scale bearings and large computational models, CMES, Vol.120, no.3, pp.693-717, 2019

UCSD:動的加振装置SRMDにおける摩擦発生箇所*



台湾NCREE: BATSの摩擦力推測モデル





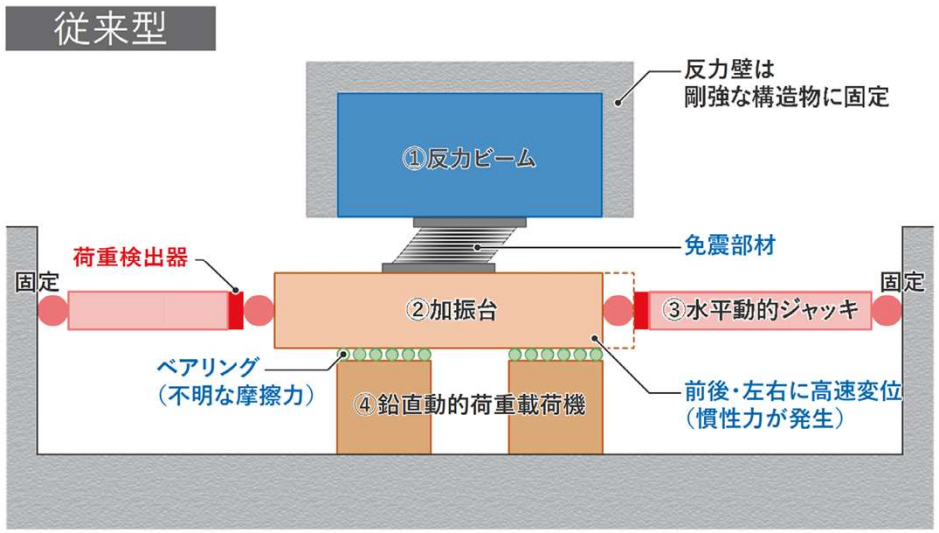
UCSDの摩擦力推測モデルによる修正後

大鉛直荷重を支持する免震部材の動的加力試験機計測値における摩擦力・慣性力の影響を受けない技術の開発

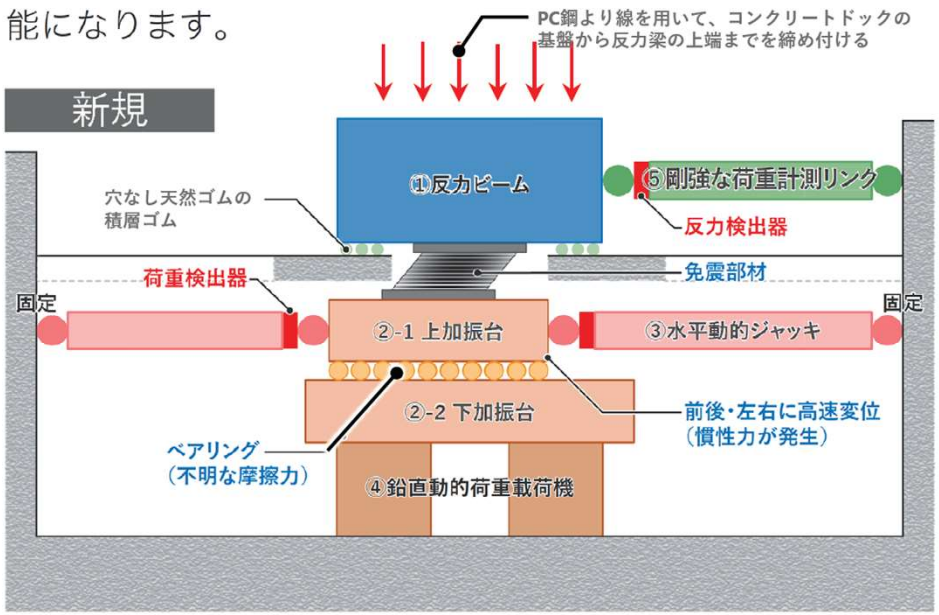
【目標】

- 鉛直荷重1万トン級で水平2方向に加振できる世界最大級動的加力試験機でも機能する試験機に起因した摩擦力・慣性力の影響を受けない荷重計測技術の研究開発を行い、大鉛直荷重下において高速度で試験体を大変形させる際の高精度荷重計測技術を確立することを目標とする。

能になります。



従来の試験機コンセプト図（変形を考慮した状態）



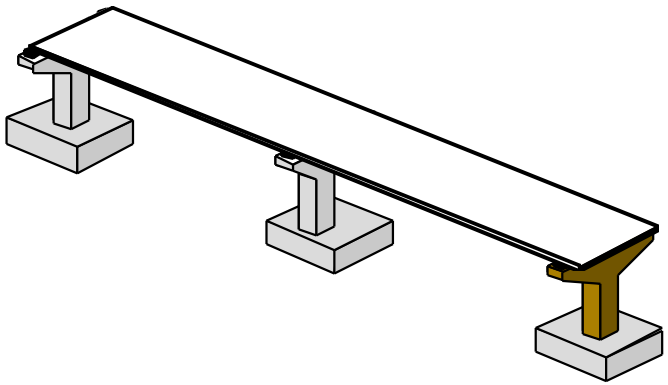
新しい試験機コンセプト図（変形を考慮した状態）

社会背景と研究開発の目的

リアルタイム計測技術を併用した Society5.0時代の大型構造物の評価法

- 一体として実験できない大型構造物の動的応答評価法について、単独の方法論で検討することの限界に直面している。
- フィジカル・サイバー空間が同期しつつ同時に機能する高度な融合を実現する取り組みが必要である。これを可能とすれば、COCNプロジェクト報告書を超えるSociety 5.0時代の大型構造物の評価法を構築できる。
- これを実現するためには、日本で最初に提案されたハイブリッドシミュレーション技術がブレークスルーとなる。

防災技術の向上に向けて
―メガ構造全体系の動的挙動把握―



$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(x) = -M\ddot{z}$$

数値解析

一体として実験できない
大きな構造システムの
動的挙動を把握するた
めの手法の開発・検証

数値解析にはモデル化が必須

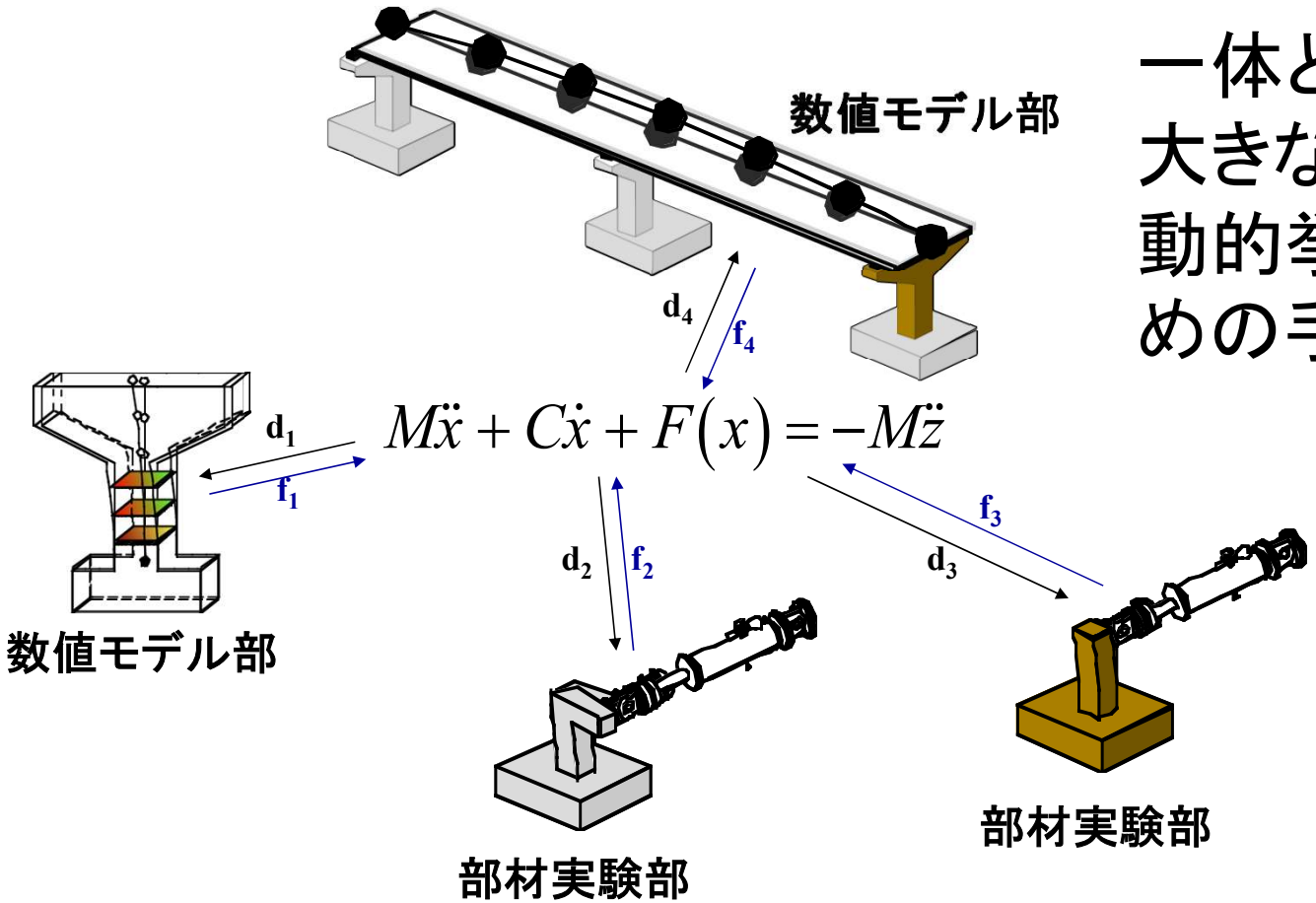
↓

モデル化困難な構造を含む全体系を扱いたい

↓

数値解析と複数の部材実験を融合させた
ハイブリッドシミュレーション法

防災技術の向上に向けて
―メガ構造全体系の動的挙動把握―



一体として実験できない大きな構造システムの動的挙動を把握するための手法の開発・検証

時々刻々運動方程式を解くことと実験を連動させることで動的挙動を表現

数値解析と複数の部材実験を融合させた
ハイブリッドシミュレーション法

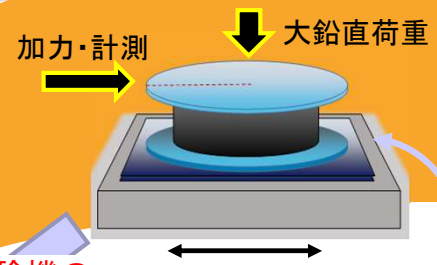
研究開発項目と目標

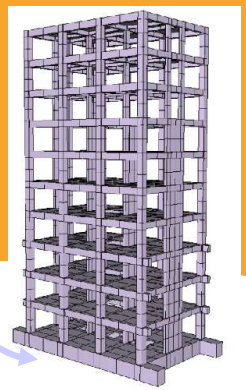
本研究開発の範囲

高精度荷重計測機構を有する動的試験機を活用した解析法の開発

協力機関:
防災科学技術研究所
兵庫耐震工学研究センター
- Eディフェンスの運用実績に基づく大型加力試験機の技術的検討と活用策

協力機関:
日本免震構造協会
- JSSI基準との連携・免震技術に関する助言・協力



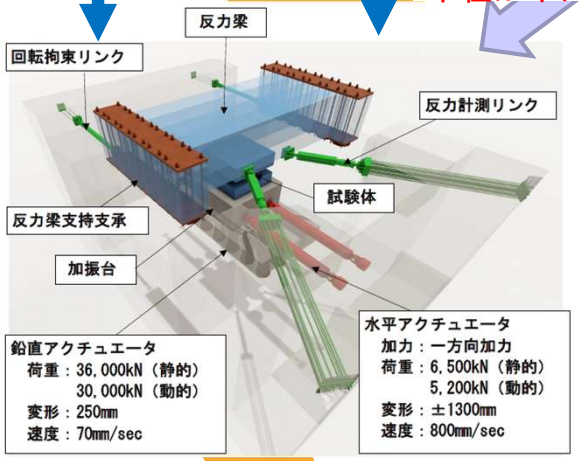


フィジカル空間での
実大(詳細)免震装置モデル

サイバー空間での
大規模システムモデル

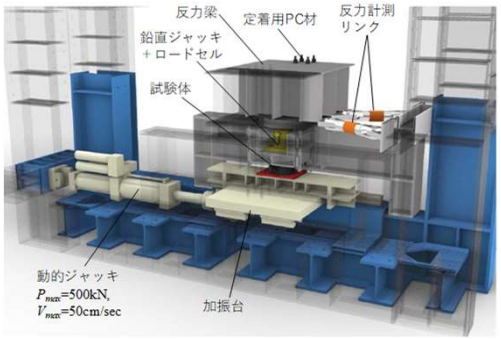
リアルタイムハイブリッドシミュレーション技術の高度化と大型構造物の動的性能評価法の開発
(研究開発責任者:高橋良和・京都大学)

大型加力試験機の不在がボトルネック



大鉛直荷重・高速度・大変形で試験体を加振させる大型動的加力試験機技術の開発
(社会実装責任者:和田章:免震研究推進機構)

クリティカル技術の開発



高鉛直荷重を支持する免震部材の三方向動的加力試験機計測値における摩擦力・慣性力除去技術の開発
(主担当:竹内徹・東京工業大学)

- 現在、世界には実大免震試験機が存在するが、試験体の正確な測定値を得るのに時間がかかる(数ヶ月かかることも)
- 大鉛直荷重下での動的試験において、「摩擦力・慣性力をリアルタイムに除去する計測システム」が存在しない

国家レジリエンスの未来

学術界
- 防災分野の基礎的研究の推進(応用研究との融合)
- 先端技術を採用した防災・減災科学研究の促進

産業界
- 実大免震・制振製品の性能検査による信頼度の向上
- 公正な技術開発競争による積極的な防災分野への投資
- 試験・評価法の世界的な規準化・規格化

世界の耐震研究拠点
- 日本が世界に誇るサイバー空間とフィジカル空間の競演

スーパーコンピュータ

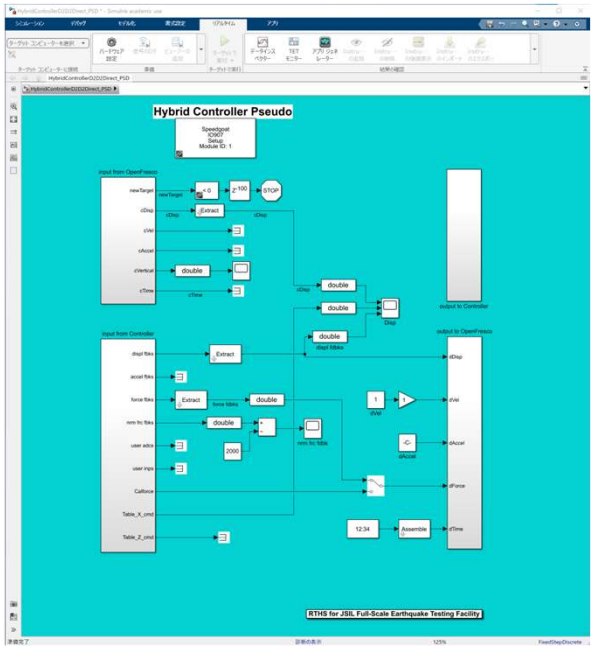
世界最大3次元振動台

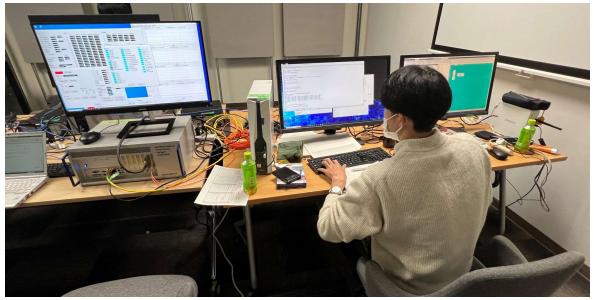
Society 5.0を支えるインフラは地震時でも機能を継続できるようになる

研究開発課題 I
ハイブリッドシミュレーション技術の高度化

京都大学（高橋研）におけるアルゴリズムの開発と検証実験

アルゴリズム開発と実装



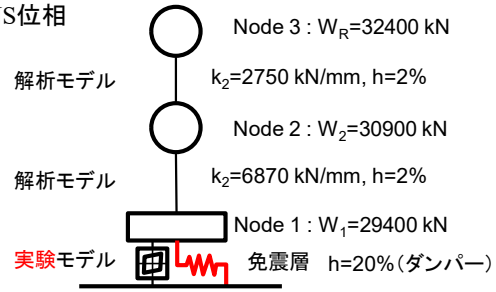


京都大学におけるリアルタイムハイブリッドシミュレーション

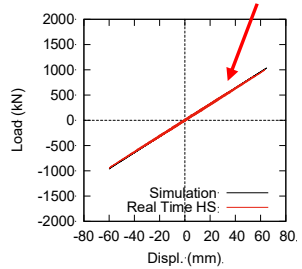
入力：告示波×1/5(Level 1 Hachinohe NS位相

シミュレーション時間：70秒

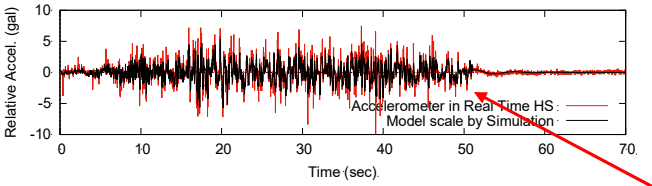
実験時間：70秒



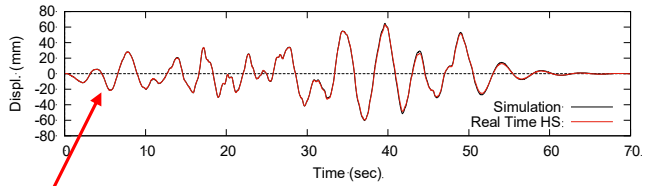
慣性力除去した計測荷重



実験モデル（鋼板使用）の荷重ー変位履歴
実験部計測：慣性力除去

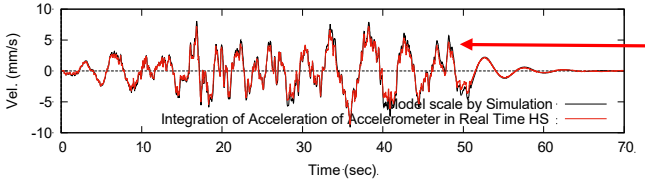


Node 1の相対加速度応答と計測加速度（実験モデルスケール）



Node 1の地表からの相対変位応答（プロトタイプスケール）

実験において、変位・速度・加速度が実現象を再現できている



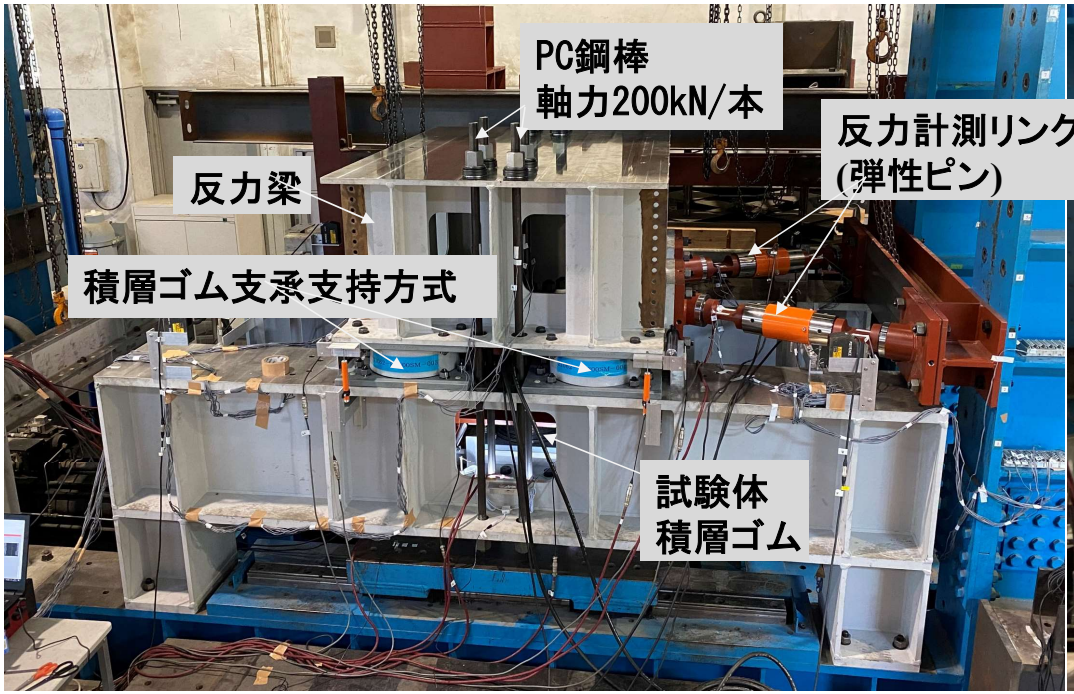
Node 1の相対速度応答と実験計測加速度の積分による速度計算値の比較（実験モデルスケール）

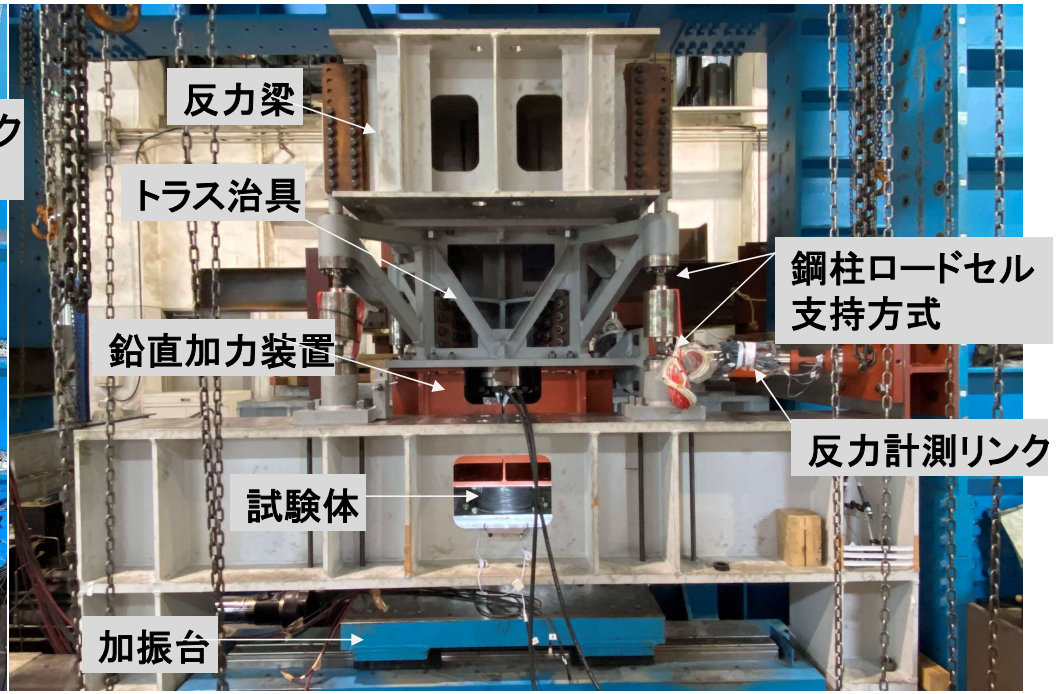
速度依存性が高い試験体についても実現象を再現可能

研究開発課題Ⅱ

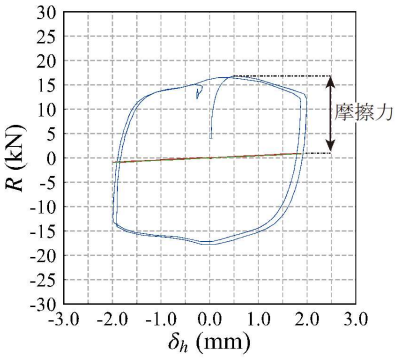
摩擦力・慣性力の影響を受けない高精度荷重計測技術の開発

東京工業大学（竹内研）における荷重計測小型パイロット試験システム

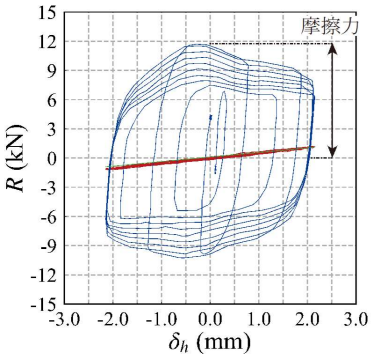




鉛直荷重1059kN



(g) A = 2 mm, f = 0.05 Hz, σ = 15 MPa



(j) A = 2 mm, f = 1 Hz, σ = 15 MPa

試験体積層ゴム支承は弾性挙動（天然ゴム）

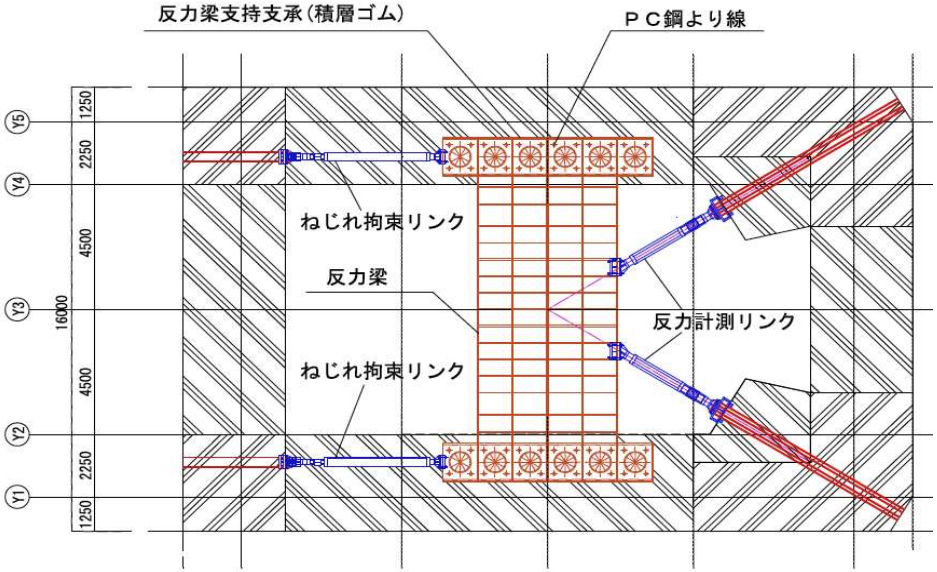
青線（従来技術）は載荷条件によって異なる履歴応答
赤線（SIP開発技術）はいずれもほぼ線形履歴応答
→　試験体の面圧・速度依存性は小さく（真実），提案する荷重計測技術が高精度であることを検証できた

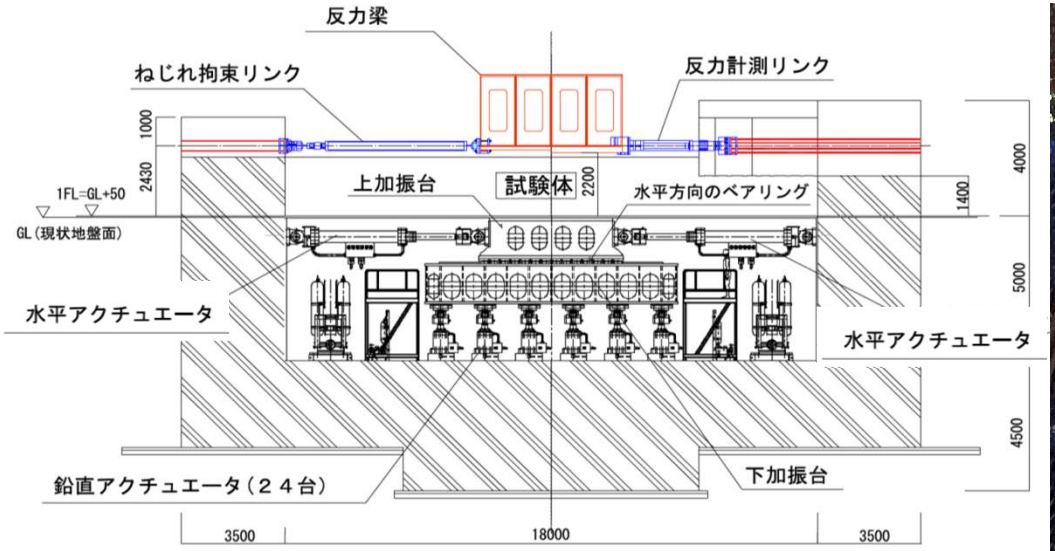
→研究開発課題IIIの実証試験機に積層ゴム支承支持方式を実装

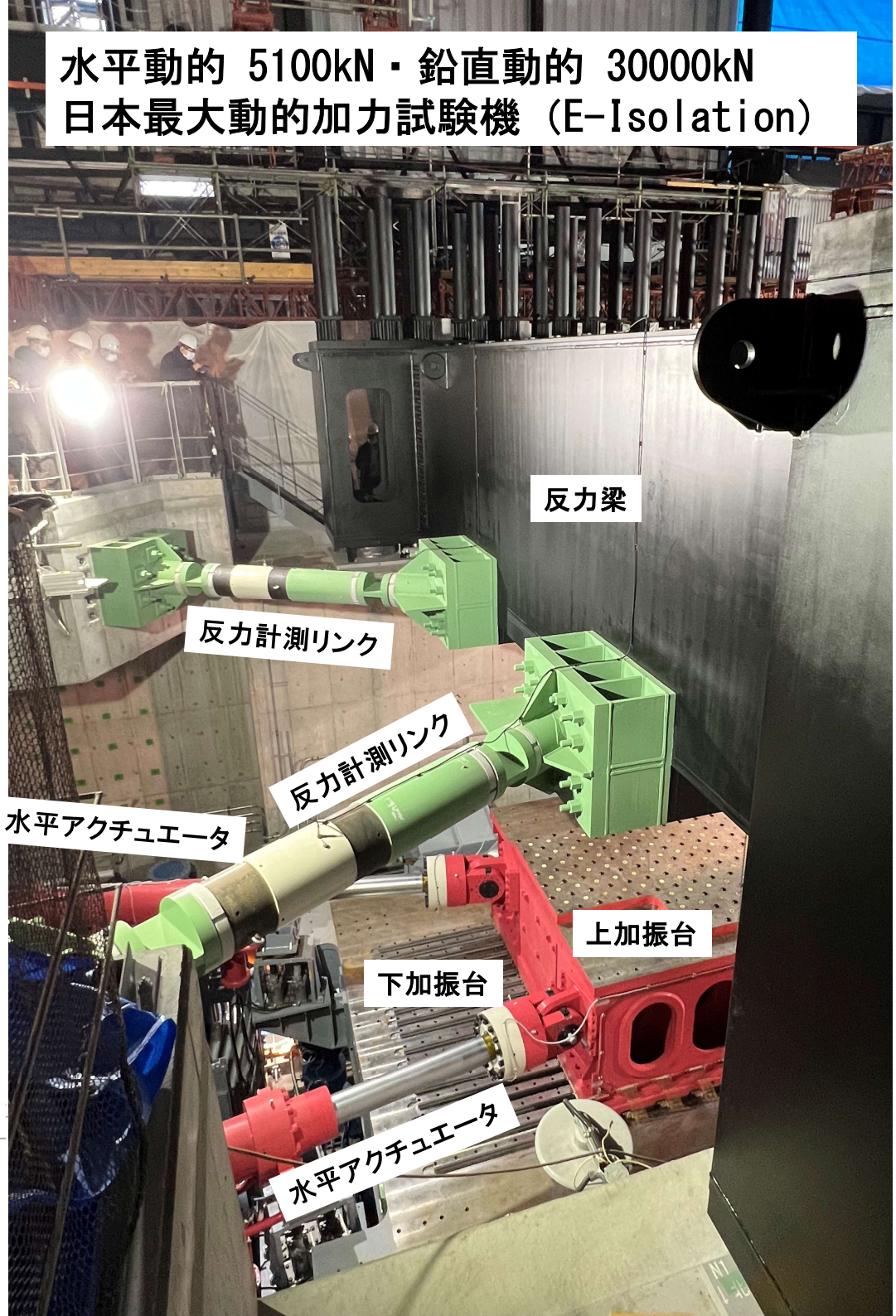
研究開発課題Ⅲ

開発した技術を検証できる大型試験機の開発

免震研究推進機構





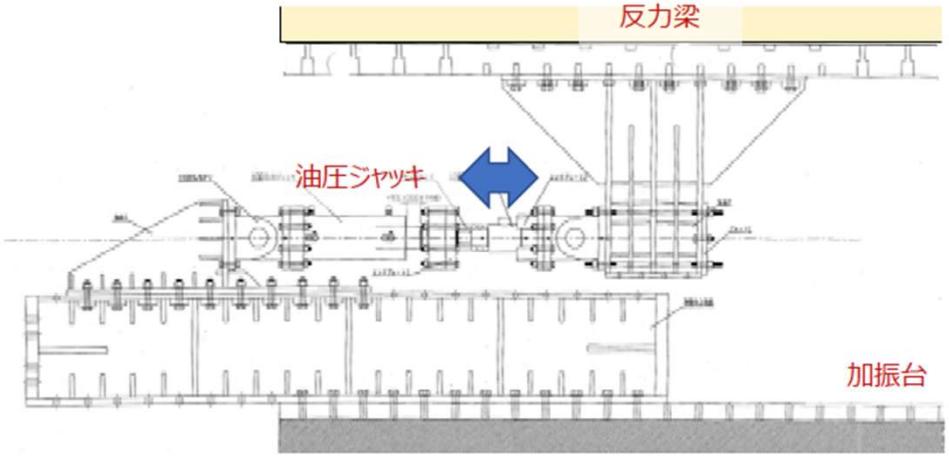


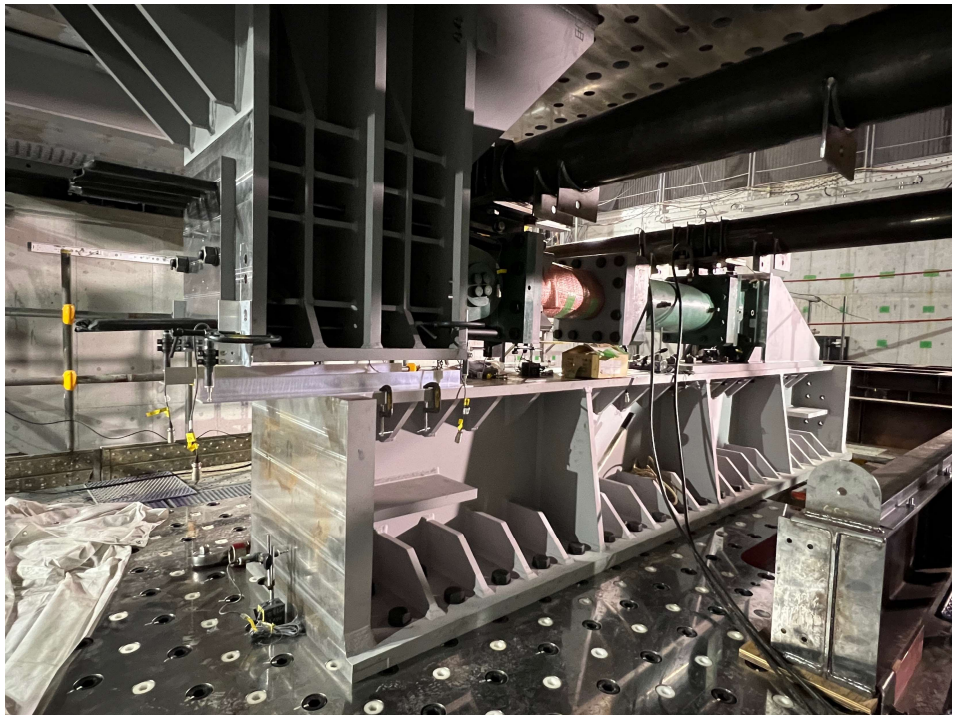
研究開発課題Ⅱ／Ⅲ
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

実験：計測リンクを用いた反力計測システム(SIP開発技術)の測定実験

【実験目的】
試験体Ⅰの油圧ジャッキを用いて、反力梁に強制的に最大1,000kNの荷重を発生させ、反力ビームのロードセルによる荷重計測値と、油圧ジャッキにセットしたロードセルの計測値を確認する。

【加振台の作動条件】
・鉛直方向は固定維持（非作動）
・水平方向はストロークを固定…0点制御（作動）



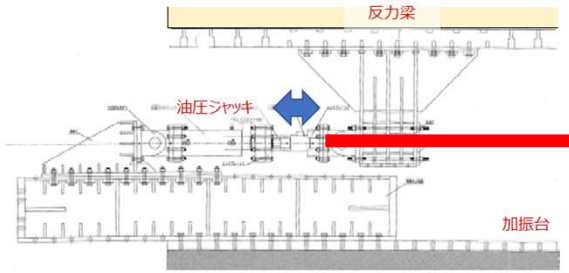


研究開発課題Ⅱ／Ⅲ

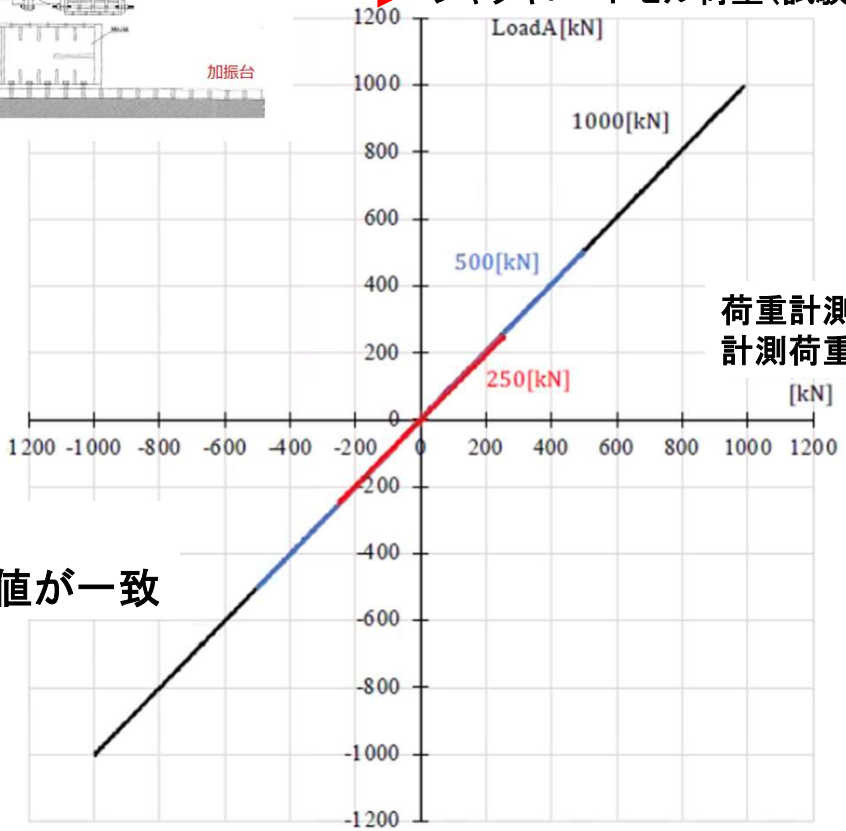
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

実験：計測リンクを用いた反力計測システム(SIP開発技術)の測定実験

実験結果：試験体の反力（ジャッキロードセル荷重・真値）と反力計測リンクによる測定荷重が一致し、大型試験機でも開発した荷重計測機構が機能することを実証

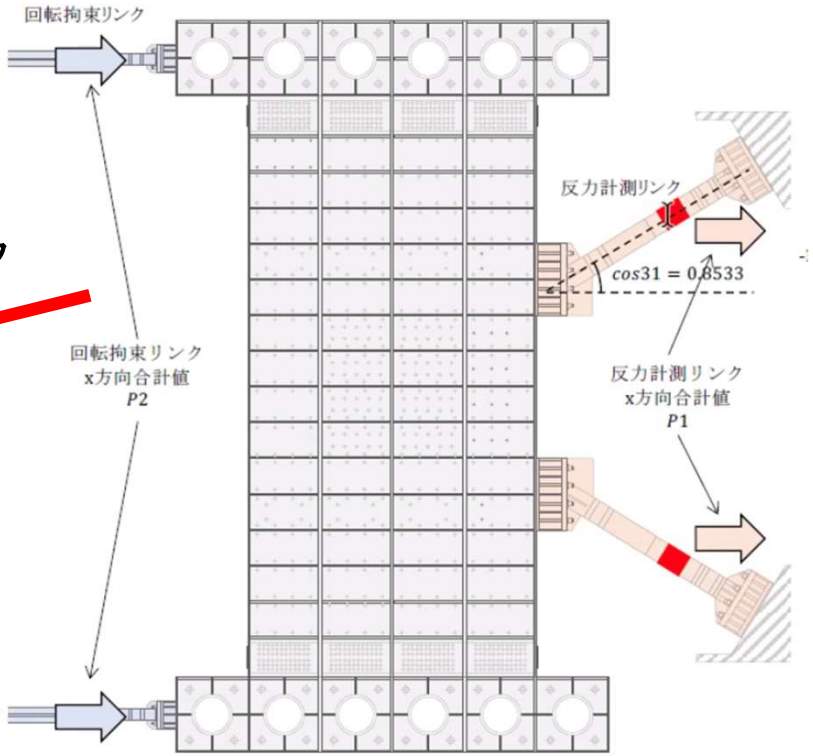


ジャッキロードセル荷重（試験体の真値）



荷重計測リンク
計測荷重
[kN]

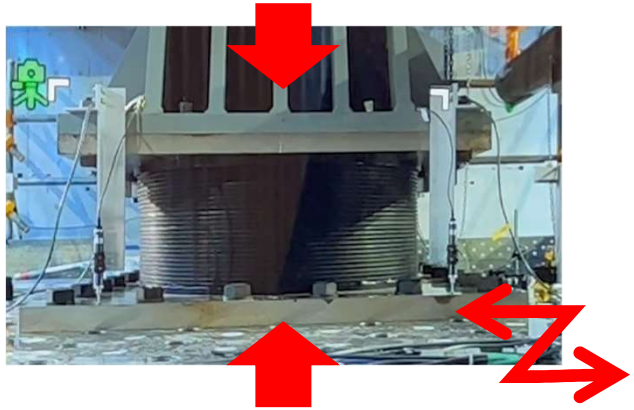
グラフが45度
→真値と計測値が一致



研究開発課題Ⅱ／Ⅲ
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

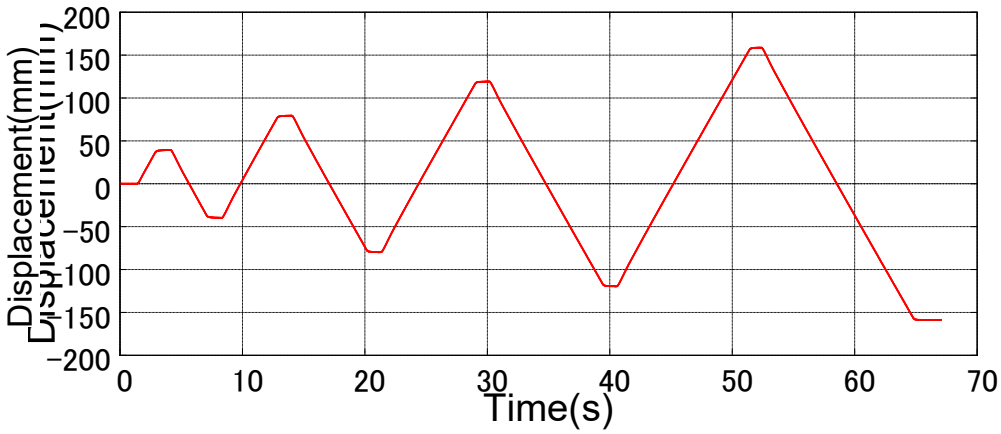
実験：免震積層ゴム支承の正負交番載荷実験

【目的】鉛直荷重作用下の試験体に対する強制水平変位



実大免震積層ゴム支承（弾性）
・倉敷化工製 Φ800mm，G0.29
　内部ゴム層厚：156mm
・鉛直力 4635kN（面圧9.2 N/mm^2）

【試験条件】
・実大免震支承の定格鉛直荷重（4635kN）を載荷
・試験機制御システムより水平変位漸増三角波指令
　基準振幅39mm(ゴム厚25%)から開始。漸増載荷し
　最大100%入力
　目標変位に到達した際は1s停止して次の目標値に
　向かって移動.
　載荷速度：2.5kine

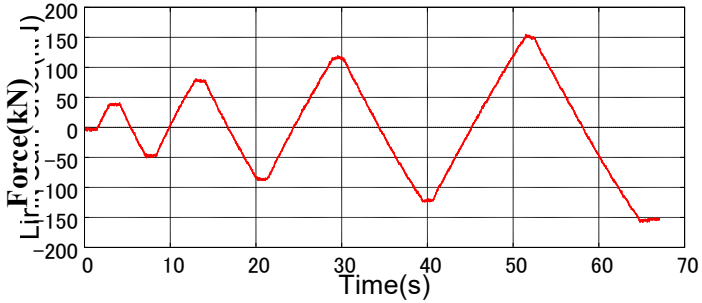


研究開発課題Ⅱ／Ⅲ

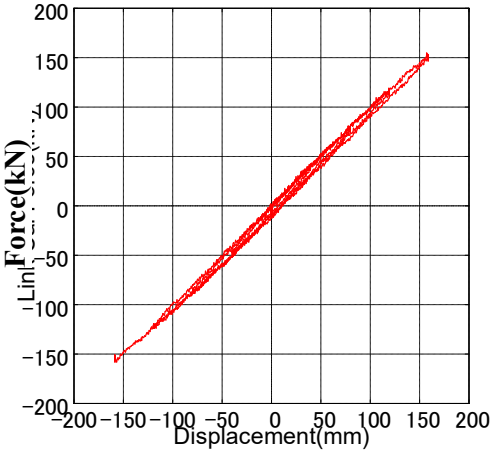
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

実験：免震積層ゴム支承の正負交番載荷実験

【SIP開発技術：反力計測システム】

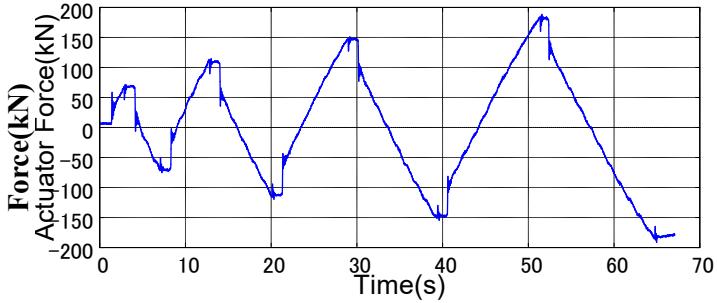


荷重時刻歴

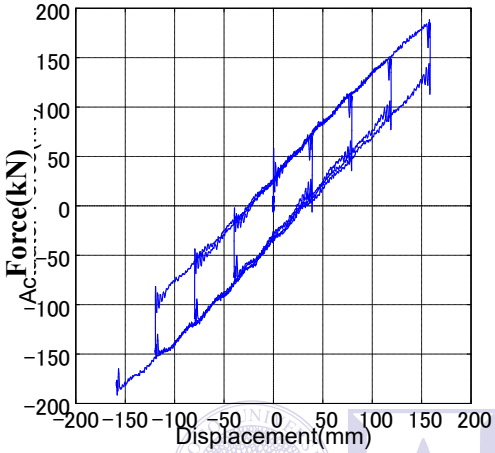


荷重ー変位関係

【従来技術：アクチュエータ計測】



荷重時刻歴



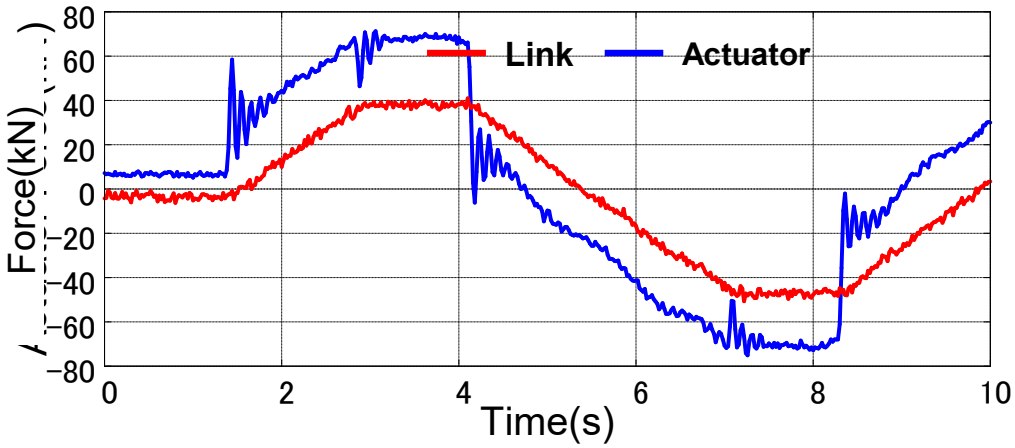
荷重ー変位関係

真値は線形履歴

研究開発課題Ⅱ／Ⅲ
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

実験：免震積層ゴム支承の正負交番載荷実験

【計測リンクシステム（SIP開発技術）とアクチュエータの荷重の比較】



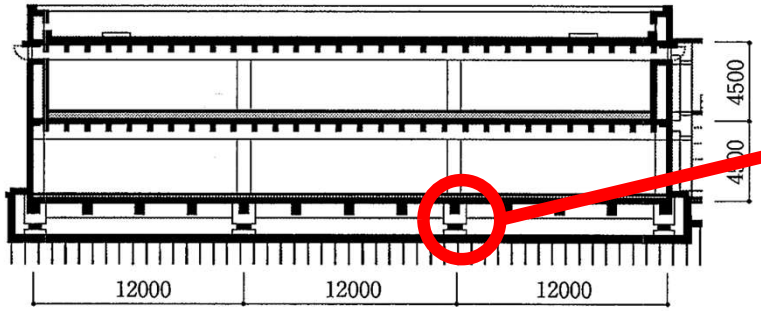
【アクチュエータ荷重のシフト】
逆方向に移動する際に50～60kNほどシフトする⇒混入している摩擦力の影響
【移動開始点と停止点】
速度反転時に荷重の振動が見られる⇒慣性力混入の影響

実験結果：SIP開発技術による計測リンクシステムは、摩擦力と慣性力の影響を受けていない高精度な荷重計測が可能であることを実証

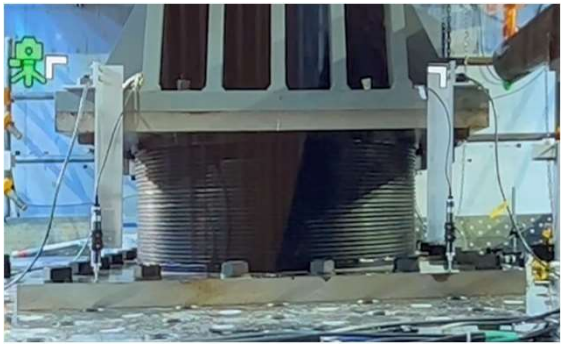
研究開発課題Ⅰ／Ⅲ
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

実験：反力計測リンク荷重を用いたハイブリッドシミュレーション

免震建物に告示波（Hachinohe EW位相）の地震動を入力した際のレベル1応答をシミュレーションするため、建物を支持する免震積層ゴム支承1基を実証試験機における実験モデルし、建物は数値モデルとして地震時応答をハイブリッドシミュレーション



対象構造物
（Φ800mmの免震支承20基で建物を支持）

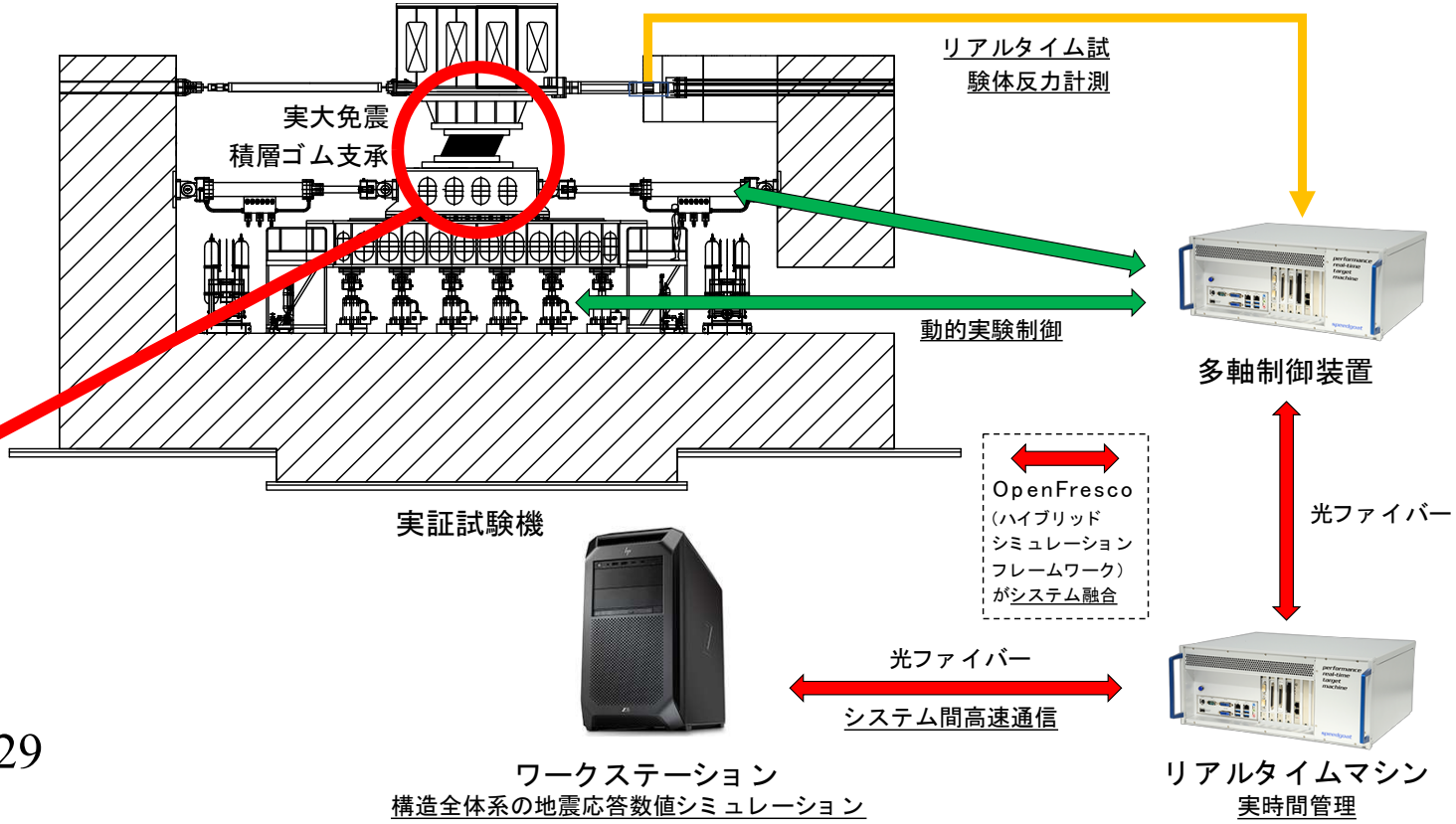


実大免震積層ゴム支承（弾性）
・倉敷化工製 Φ800mm，G0.29
　内部ゴム層厚：156mm
・鉛直力 4635kN（面圧9.2 N/mm^2）

研究開発課題Ⅰ／Ⅲ
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

実験：反力計測システムを用いたハイブリッドシミュレーション（SIP開発技術）

【目的】開発した技術が全て機能することを確認

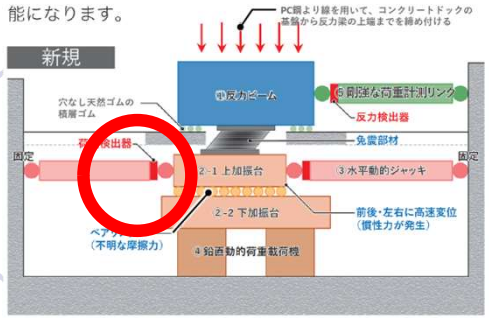


実大免震積層ゴム支承
- 倉敷化工製 Φ800mm，G0.29
  内部ゴム層厚：156mm
- 鉛直力 4635kN（面圧9.2 N/mm^2）

ハイブリッドシミュレーションによる検証実験

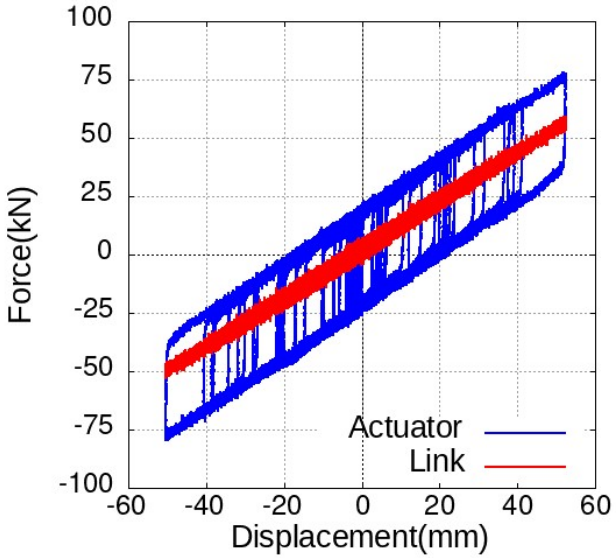
研究開発課題Ⅰ／Ⅲ

開発した技術を検証できる大型試験機の開発

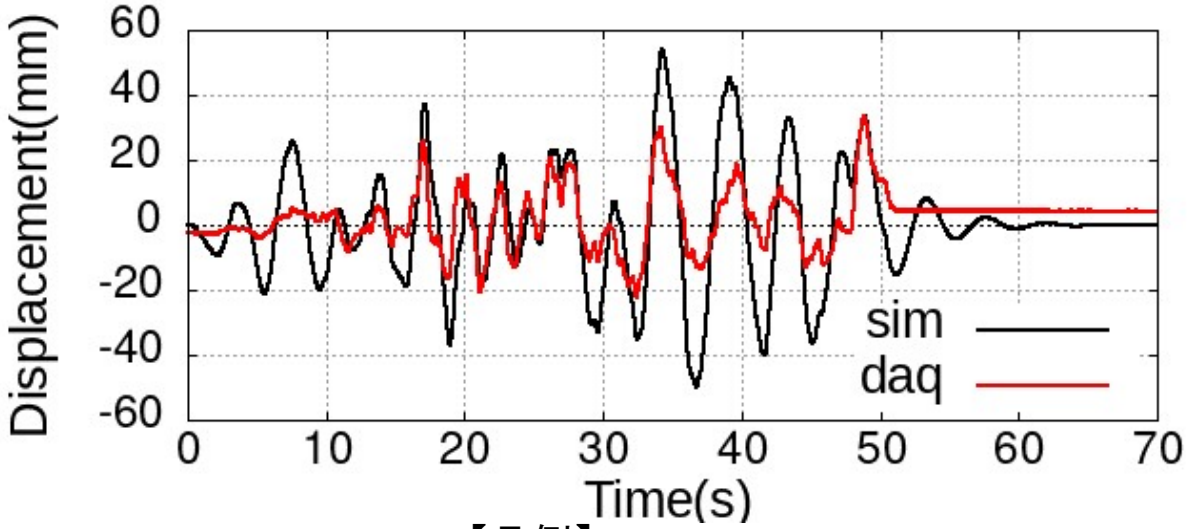


新しい試験機コンセプト図（変形を考慮した状態）

実験：従来技術を用いたハイブリッドシミュレーション（実証試験機により実施）



【凡例】
Actuator：水平アクチュエータ荷重
Link：計測リンク荷重
- アクチュエータの荷重には摩擦力が混入
- 摩擦力は片側20～25kNほど.

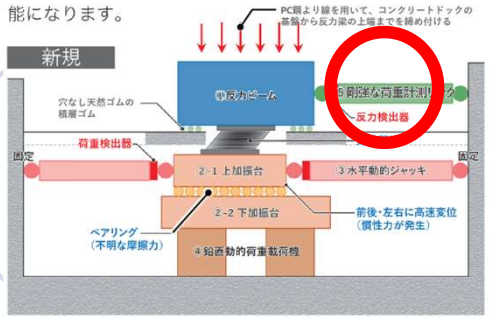


【凡例】
sim：純解析での変位（剛性1.05kN/mm）
daq：試験機の変位（読取変位）

実験結果：従来技術でハイブリッドシミュレーションを実施する場合、摩擦力等除去などの計測結果を修正することなしに正しいシミュレーションは不可能

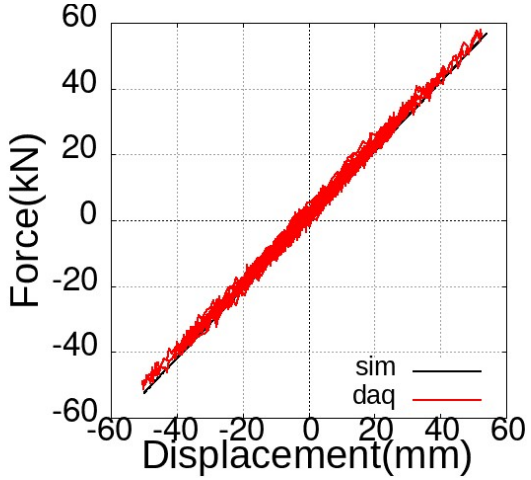
研究開発課題Ⅰ／Ⅲ

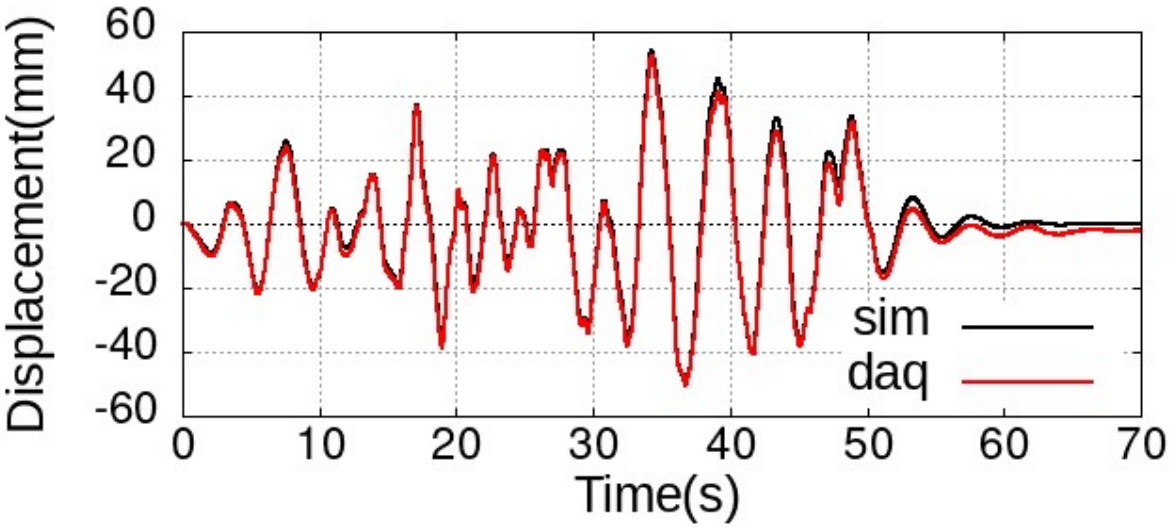
開発した技術を検証できる大型試験機の開発



新しい試験機コンセプト図（変形を考慮した状態）

実験：反力計測システムを用いたハイブリッドシミュレーション（SIP開発技術）





【凡例】
sim：純解析（剛性1.05kN/mm）
＊カタログ値：0.95kN/mm,
　メーカー出荷試験値：0.98kN/mm
daq：計測リンク荷重ー試験機変位

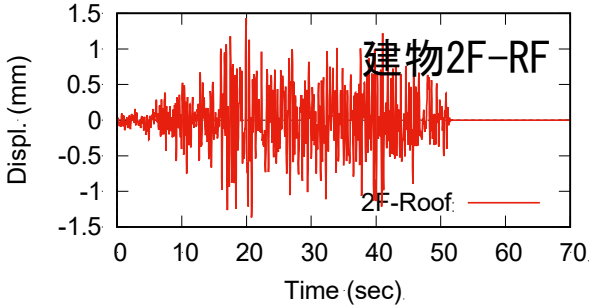
【凡例】
sim：純解析での変位（剛性1.05kN/mm）
daq：試験機の変位（読取変位）

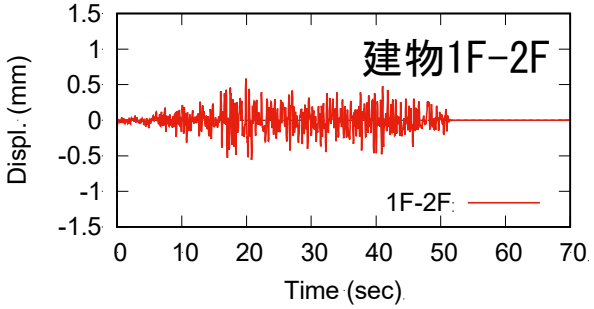
実験結果：SIP研究で開発した全ての技術が機能し、
大型構造物の地震時応答を評価可能であることを検証した

研究開発課題Ⅰ／Ⅲ

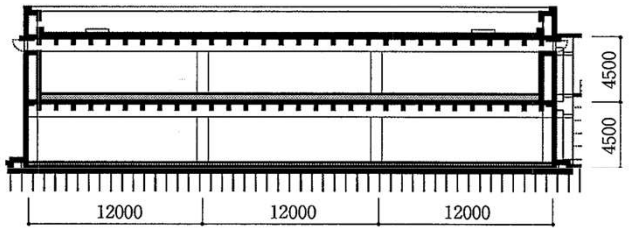
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

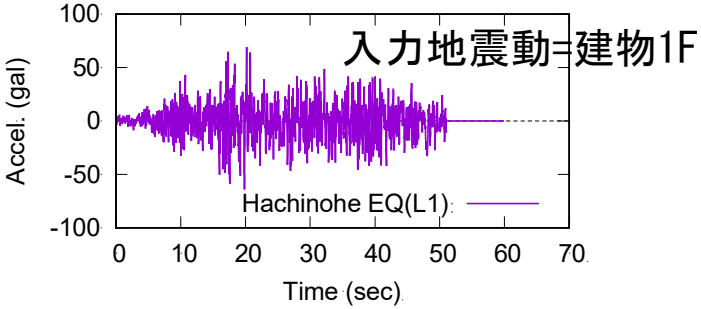
非免震建物の地震時シミュレーション（純解析）

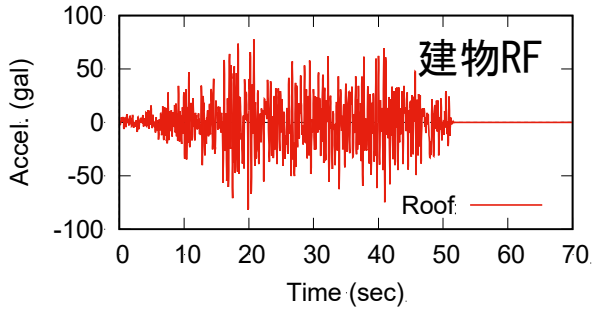


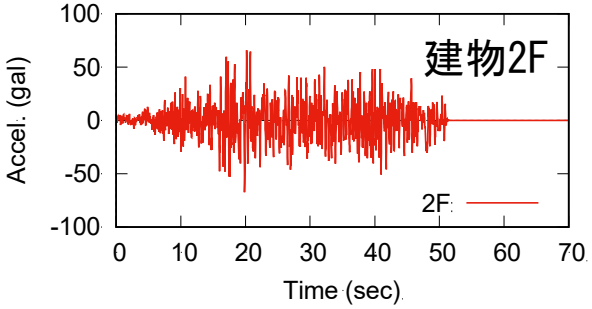


地震時変位応答









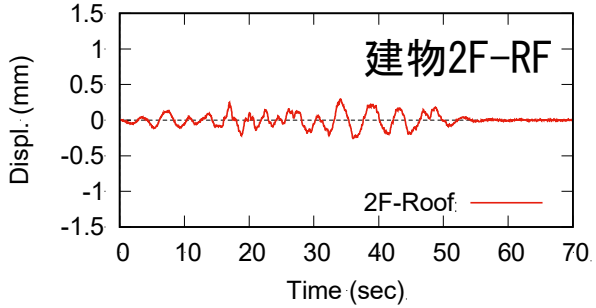
地震時加速度応答

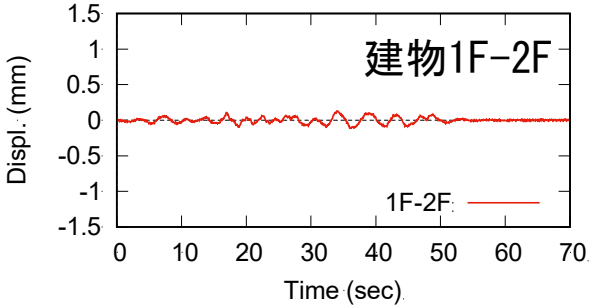
研究開発課題Ⅰ／Ⅲ

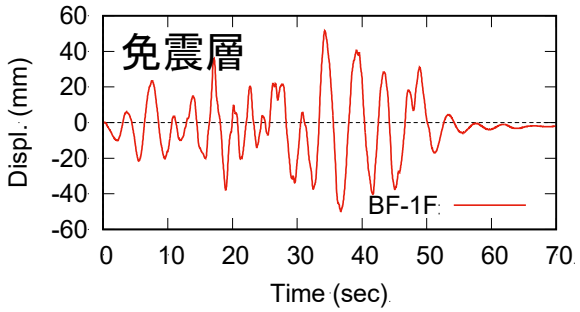
開発した技術を検証できる大型試験機の開発

高精度荷重計測機構を用いた免震建物の地震時ハイブリッドシミュレーション（SIP開発技術）

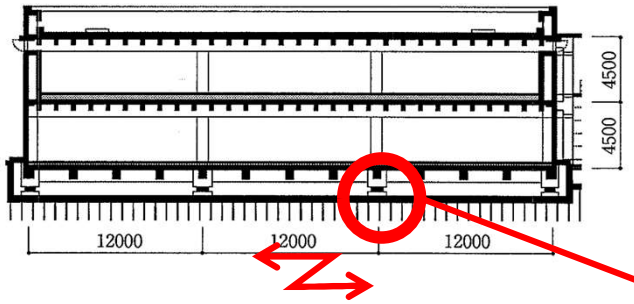
免震技術により建物(RF)の加速度を820galから143galへ約1/6に低減できることを実証

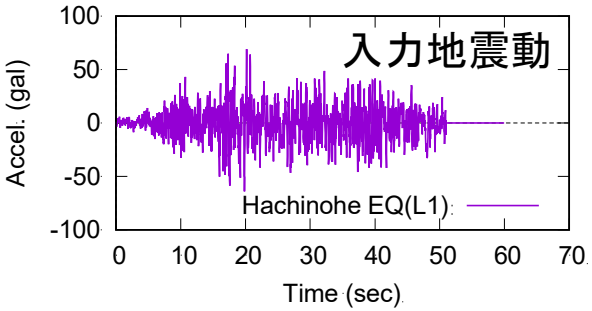


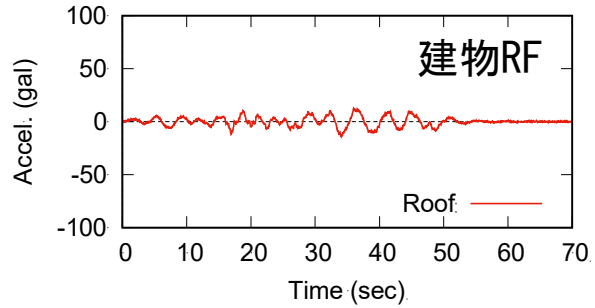


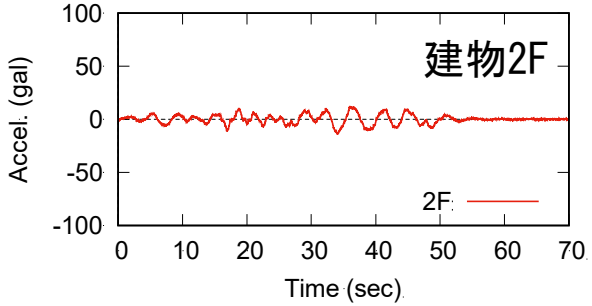


地震時変位応答







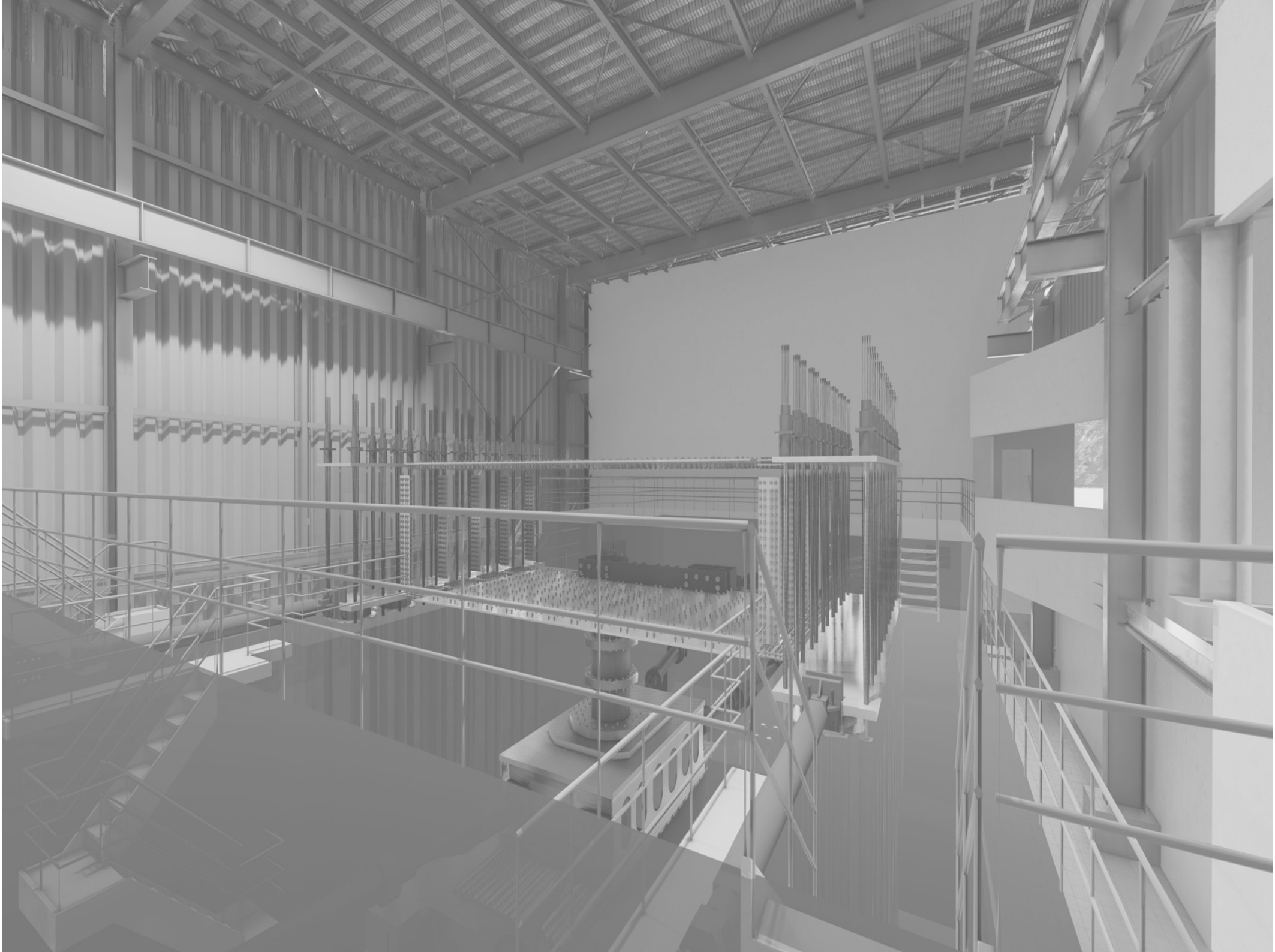


地震時加速度応答

大型免震試験機により加力試験

東工大
吉敷
免震研究推進機構
東野
構造計画
後藤
京大
高橋
東工大
梅村
免震研究推進機構
藤野
免震研究推進機構
篠崎
東工大
竹内
東工大
米田
東工大
寺澤
京大
上田
京大
植村
免震研究推進機構
和田
東工大
小林

免震研究推進機構
宮原
関電プラント
松本
大成建設
高澤
東工大
梅村
東工大
寺澤
大成建設
渡辺
三菱重工MS
山口
三菱重工MS
清水
三菱重工MS
酒井
大成建設
斎藤
三菱重工MS
松本
三菱重工MS
出口
関電プラント
土肥
京大
高橋
東工大
吉敷
三菱重工MS
井狩
東工大
酒井
東工大
黒沢
東工大
平野
東工大
小林

研究開発成果

- 実大免震装置を試験可能な大型試験機でリアルタイムハイブリッドシミュレーションを実施可能なアルゴリズム開発と制御装置への実装を行った。
- 大鉛直荷重・高速度・大変形下の試験体反力計測システムを考案、検証し、摩擦力・慣性力の影響を受けずに高精度に荷重を計測できることを実証した。
- 上記開発技術を大型試験装置に実装するための反力構造、計測リンク構造、加振台構造などを開発し、実証試験機を建設した。
- 実大免震支承を用いた免震建物のハイブリッドシミュレーションを実施し、質の高いフィジカル空間情報とサイバー空間での解析を組み合わせた大型構造物の次世代評価法になり得る検証実験結果を得た。