

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 実験装置の設計コンセプトと概要—

免震支承
実大試験
動的試験

高精度荷重計測

正会員 高橋 良和*1 同 竹内 徹*2
同 吉敷 祥一*3 同 篠崎 洋三*4
同 米田 雅子*5 同 梶原 浩一*6
同 ○和田 章*7

1. 序

免震・制振構造は、1980年代から国内で実用化が進み、機能継続が可能な構造として普及してきた。一方、米国、イタリア、中国や台湾には、大型動的実験装置が設置され、実大の免震・制振部材の動的実験検証が行われているが、国内には実大動的免震実験装置が存在しなかった。

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)において、「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」が選出された。「その1」～「その17」では、本研究の検証のために開発された実大動的免震実験装置について報告する。特に、「その1」では実大動的免震実験装置の設計コンセプトと概要について報告する。

2. 実大動的試験機を活用した大型構造物の解析法の開発

2.1 研究概要

構造設計で求められる規模・精度を考えると、Society 5.0時代の大型構造物の評価・解析法として、数値計算と質の高い情報を得られる大規模実験とを同期・融合させることは有力な方法論と考える。これを実現するため、高精度荷重計測機構を有する動的試験機と数値解析を同期させるハイブリッドシミュレーションの高度化を図り、より安心・安全でレジリエントな社会の実現を目指す。

2.2 大型動的加力試験装置が抱えている課題

長大橋や超高層ビルを支持する免震装置は数千トンの大鉛直荷重を支持するため、質の高いフィジカル空間情報の取得のためには、大鉛直荷重下で高速度・大変形の動的加力試験を実施しなければならない。このためには、試験体を水平に高速で変形させるための加振台が必要になるが、加振台には、鉛直荷重(上下方向)、加振台と鉛直荷重載荷システム間の摩擦力(水平方向)、高速水平加振によって生じる加振台の慣性力(水平方向)、試験体の変形に伴うせん断力(水平方向・計測したい値)と試験体の上下端部に生じる曲げモーメント(回転方向)が作用する。

世界各国に存在する大型動的加力試験機は、固定端に試験体を設置し、加振台を動かすアクチュエータに設けた荷重検出器によって水平荷重を計測しているため、試験体の抵抗力に混入する力を除去することに苦心している(図1)。特に摩擦力は速度、大鉛直荷重などに依存する複雑な水平力であり、世界各国の試験機では摩擦面の潤滑を高める方策などが取られているものの、物理的に摩擦力をゼロにすることは不可能であり、リアルタイムで計測したい試

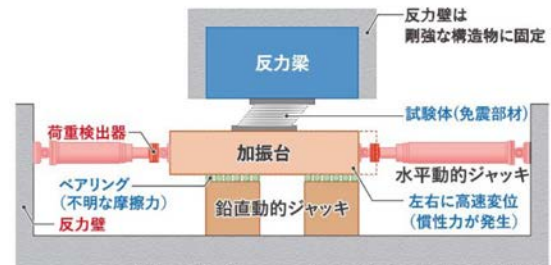


図1 従来の試験機計測技術

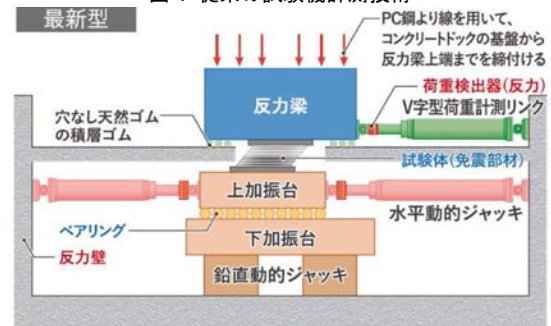


図2 新しい試験機計測技術コンセプト

験体反力を計測することは困難であるのが現状である。

2.3 大型動的加力試験装置の設計コンセプト

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べきfunctional requirements (FRs)があり、設計によって決めるべきdesign parameters (DPs)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ものである。

試験体の水平荷重を固定端側で計測する方法として、多くの二軸ロードセルを固定端と試験体の間に配置する試験機もあるが、ロードセル群が互いに依存し合い、また大きな圧縮力を受けるロードセルで鉛直荷重の10%程度の水平力を測定させねばならないことからAは複雑となり、不具合の特定や水平荷重の測定精度を高めるのが難しい。

試験体反力計測に潜む課題を解決するため、従来の固定側を、試験体の上側に水平方向は「ほぼ無抵抗」、鉛直方向は「概ね固定」となるように支持された反力梁を配置し、さらに反力梁に水平方向について剛な荷重測定リンクをピン接合に近い形で接合する(図2)。このように試験装置

を設計することで、加振台の水平ベアリングの摩擦力や慣性力の影響を受けない試験体の水平荷重を、鉛直方向に自由な荷重計測リンクの軸荷重として計測することができるため、A は単純な対角行列にすることができ、結果として水平荷重の測定精度を高めることができる。

3. 実大動的免震試験装置 E-Isolation

高精度荷重計測機構を採用した実大動的免震試験装置の概要を図3に示す。

3.1 大鉛直荷重作用下で試験体反力測定可能な反力機構

試験体に作用する力を、反力側で直接計測するためには、コンクリートドック上に設置される鉛直方向に高い剛性を有する反力梁について、鉛直方向を剛、水平方向を自由と見なせる接合法が必要であり、低剛性で小振幅でも線形性の高い複数の積層ゴム支承をコンクリートドック上面に設置し、プレストレスにより反力梁、支持支承とコンクリートドックを鉛直方向に締め付ける反力構造を採用する。

反力梁とコンクリートドックの4つのコーナーとの間に設けられた荷重計測リンクに設けられた荷重検出器により、加振台の慣性力や摩擦力を介在させることなく、リアルタイムで直接測定できるため、従来技術より圧倒的に精度が高い。反力梁を支持する複数の積層ゴムの弾性剛性の低さより、試験体水平反力のおよそ98~99%は反力計測リンクの軸力として直接測定されるため、単純で高精度な機構となるが、反力梁支持支承部に生じる水平変形(1~2mm)を測定し、予め同定した積層ゴムの水平剛性の積により、更に補正することができる。

3.2 安定性と高精度を兼ね備えた加振機構

加振台の動作は、取り付けられた複数のアクチュエータの制御により6自由度姿勢制御されるが、その制御を単純化するため、24台の鉛直アクチュエータが取り付けられる下加振台と4台の水平アクチュエータにより水平一方向に可動する上加振台を水平方向のリニアベアリングで接続した上下分離型加振テーブル機構を採用した。

本試験装置は二軸試験機であるため、大変形した試験体の上下端部に生じる曲げモーメントに対して下加振台の回転を抑制する必要があるが、ソフトウェアによる鉛直アクチュエータの姿勢制御に加え、平行移動定規の仕組みを応用した上下動時並行維持装置を開発、下加振台の四隅に設置(図4)して、メカニカルに姿勢制御を支援することにより、下加振台の転倒拘束モーメントを大きくした。

4. 結

- 1) 高精度荷重計測機構を有する実大動的免震実験装置の設計コンセプトおよび概要について報告した。

謝辞

本研究は、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

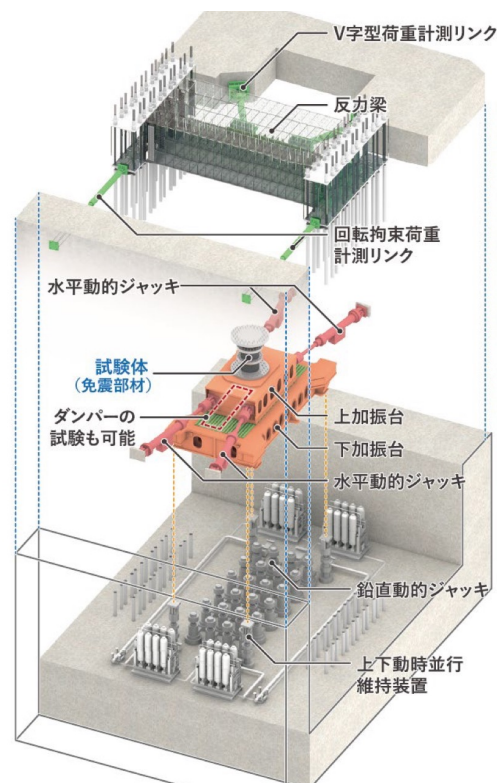


図3 実大動的免震試験装置(E-Isolation)の概要

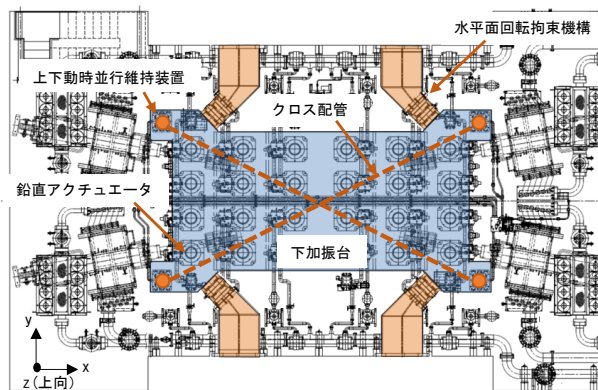


図4 安定した加振機構のための下加振台支持機構

エンス(防災・減災)の強化」(管理法人:国立研究開発法人防災科学技術研究所)によって実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Takahashi, Y. et al., E-Isolation : High-performance Dynamic Testing Installation for Seismic Isolation Bearings and Damping Devices, International Journal of High-Rise Buildings, Vol.12, No.1, pp.93-105, 2023.
- 2) Suh, Nam P., The principles of design, Oxford University Press, 1990.

*1 京都大学 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士(工学)

*2 東京工業大学 建築学系 教授 博士(工学)

*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 教授 博士(工学)

*4 大成建設株式会社 設計本部副本部長

*5 東京工業大学 環境・社会理工学院 特任教授 博士(環境学)

*6 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 主幹研究員 博士(工学)

*7 東京工業大学 名誉教授 工学博士

*1 Professor, Dept. of Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

*2 Professor, Dept. of Arch. and Build Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

*3 Professor, Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

*4 General manager for structural engineering, Taisei Corporation

*5 Specially Appointed Professor, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr. Env.

*6 Senior Researcher, Hyogo Earthquake Engineering Research Center, NIED

*7 Professor Emeritus, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.