

高性能大型三軸振動台の性能と浮き基礎の振動特性

境 茂樹^{*1}・三浦 篤^{*1}・仲村 崇仁^{*1}・加藤 貴司^{*1}・田中 靖彦^{*2}・仲野 健一^{*3}

1990年に技術研究所に設置した大型三軸振動台を改修し、2024年8月に完成した新しい大型三軸振動台は、過去に発生した大振幅地震動や、南海トラフ地震等で発生が懸念される長周期長時間地震動を考慮して加振性能を決定した。テーブル寸法は5m×5m、加振性能は最大加速度±3G（定格20ton搭載時）、最大速度±200cm/s、最大変位水平±60cm・上下±30cmである。周辺への振動を低減するため、既存の浮き基礎を改修し空気ばねと粘性ダンパーを増設した。浮き基礎の振動特性を検証し、固定基礎とのクリアランスや敷地境界における振動レベルについて問題がないことを確認した。

キーワード：大型三軸振動台、性能曲線、長周期地震動、浮き基礎、防振対策

1. はじめに

地震ハザードの高い我が国は度重なる地震被害に見舞われ、地震に強い安全な社会を構築していくためには、耐震・免震・制振に関する技術・研究開発は欠かせないものとなっている。大型三軸振動台は、地震動をリアルに再現する試験装置で、耐震設計の検証や免震・制振技術の実証において重要なものである。

既存の大型三軸振動台は1990年に茨城県つくば市の技術研究所内に建設されてから30年余り経過し、機械設備が老朽化し部品調達も困難になったことから、2021年6月より大型三軸振動台の改修計画がスタートし、2024年8月に工事が完成した（写真－1）。

1995年阪神・淡路大震災以来、国内の強震観測網は整備された^{たとえば1)}、強震観測記録の数が増加するとともに、これまで経験していなかった振幅レベルの大きな記録が得られるようになった。一方、国土交通省では2016年6月に超高層建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通知し（国住指第1111号）²⁾、大阪地域など4地域における長周期地震動対策を定めた。また、原子力発電所施設等では基準地震動のレベルが見直され、敷地内の防火設備や緊急時の発電設備などに対する耐震性が強化され、大型三軸振動台を用いた各種設備機器の耐震試験のニーズが増加した。それに伴い、大型三軸振動台の加振性能の向上も求められた。

新しい大型三軸振動台では、上記の点を考慮して要求性能の仕様を決定した。テーブル寸法は5m×5mで、加振性能は最大加速度が水平上下ともに±3G（定格20ton搭載時）、最大速度は水平上下ともに±200cm/s、最大変位は水平±

60cm・上下±30cmである。また、周辺施設への振動伝搬を低減するために、既存の浮き基礎を新しい振動台の形状に合わせて改修し、さらに振動台の加振性能に合わせて空気ばねと粘性ダンパーを増設を行った。浮き基礎の振動特性を検証し、固定基礎とのクリアランスや敷地境界における振動レベルについて問題がないことを確認した。また、計測システムは、ひずみや電圧センサーの他にカメラ映像やモーションキャプチャーの同期収録機能を備えるとともに、計測時の省力化、操作者の負担軽減の目的で、制御システムからの開始信号で自動計測が始まり、さらにその後測定結果の一次処理や解析結果の出力まで一貫して自動的に処理するように設計した。



写真－1 大型三軸振動台の全景

2. 高性能大型三軸振動台の概要

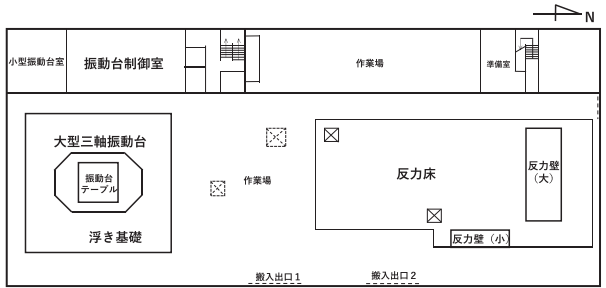
2.1 構造・振動棟と工事の概要

大型三軸振動台は技術研究所敷地内の構造・振動棟の

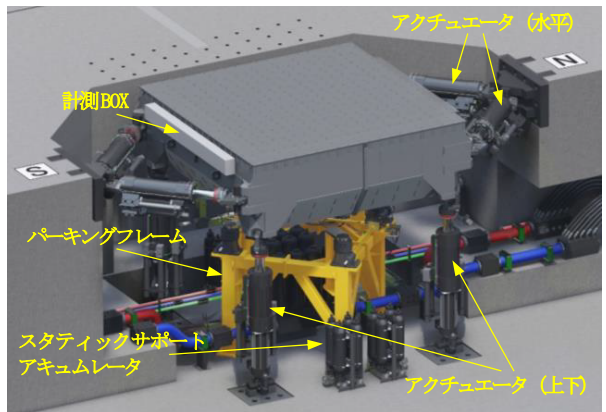
*1 地盤・基礎研究部 *2 環境研究部 *3 研究開発推進部

中に設置されている。構造・振動棟は、主に土木・建築の静的な構造実験と動的な振動実験を行う施設であり、鉄骨造で地下1階、地上3階で、高さは約25mである。この棟の北側には既存の反力床（32.5m×13m）と大型反力壁（18m（H）×11m（W）×4m（Th））、小型反力壁（9m（H）×7m（W）×2m（Th））、建研式の鉄骨汎用フレームを保有しており、柱や梁、杭、壁などの静的加力実験を行うエリアである。この棟の南側は、大型三軸振動台が設置され動的な振動実験を行うエリアである。構造・振動棟の1階平面図を図－1に示す。

大型三軸振動台の改修工事は、北側の静的加力実験エリアを稼働させながら実施した。旧振動台は、水平8本、上下4本のアクチュエータで振動台を駆動し、水平方向X軸、Y軸それぞれに4本のアクチュエータが対向する形で配置されていた。それに対して新しい振動台は、水平4本、上下4本のアクチュエータで駆動し、水平アクチュエータはV字配置となり、大幅な基礎形状の変更が必要となった。建設場所の制約と工事費削減、廃棄物の最小化を図るため、既存の浮き基礎を活用して一部解体、一部増築する形態で実施した。また、制御室を2階から1階に配置変更し、振動試験の管理運用が円滑にできるように配慮した。新しい大型三軸振動台のパスを図－2に示す。



図－1 構造・振動棟の1階平面図



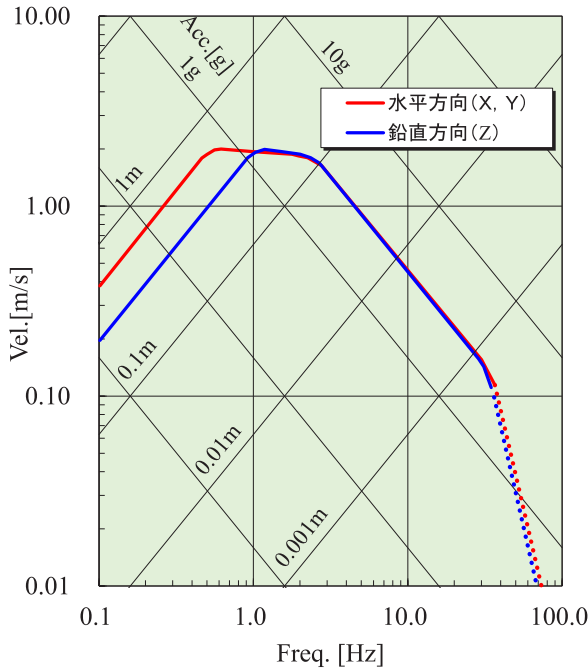
図－2 大型三軸振動台のパス

2.2 要求性能

本振動台の要求性能の仕様を表－1に、また、定格20ton搭載時の性能曲線を図－3に示す。振動台テーブルサイズは5m×5m（実寸で5.1m×5.1m）で、試験体の定格質量は20tonで最大質量は55tonである。加振性能は、近年の主な被害地震による大加速度の強震記録を再現するため、また、今後想定される南海トラフ地震などの長周期地震動に対応するため、加振できる最大加速度（定格20ton搭載時）は、水平方向、上下方向ともに3.0G（1G=980cm/s²）、最大速度200cm/s、最大変位は水平方向60cm、上下方向30cmとした。

表－1 要求性能の仕様

テーブルサイズ 5m×5m		
試験体質量 定格20ton 最大55ton		
動作周波数 0.1～35Hz		
許容転倒モーメント 150ton・m		
	（水平方向）	（上下方向）
変位(単軸)	±60cm	±30cm
速度(単軸)	±200cm/s	±200cm/s
加速度(単軸)		
5ton搭載時	±5.0G	±5.0G
20ton搭載時	±3.0G	±3.0G
55ton搭載時	±1.7G	±1.7G
計測システム	ひずみ 80ch 電圧 20ch 画像 8ch	



図－3 水平軸および鉛直軸の性能曲線
（定格20ton搭載時）

2.3 アクチュエータ

本振動台は、図-2のパースに示すようにV字配置された水平方向4本と、上下方向4本の油圧型のアクチュエータで構成されている。それぞれのアクチュエータが連携して伸縮することで、並進振動の南北（X方向）、東西（Y方向）、上下（Z方向）とそれぞれの軸回転であるローリング、ピッチング、ヨーイングを含めた3軸6自由度の加振が可能である。アクチュエータおよびサーボバルブは、要求性能を満足するよう設計されており、以下の特性を有する。

- ・6自由度の地震波加振でアクチュエータに生じる大きな軸直交方向荷重に対応できるように設計されている。
- ・制御不能または故障の場合に、アクチュエータの減速を助けるため、アクチュエータ内に一体型の油圧クッションを内蔵している。
- ・摩擦低減、性能向上のための非金属製静圧軸受けを有し、これら軸受けは高压シールを必要とせず、金属軸受けに影響を及ぼす可能性のある熱条件変化の影響を最小限に抑えている。
- ・アクチュエータに付属する油圧機械部品は、荷重および加速度に耐えられるように設計され、製品の長寿命化につながるよう堅牢に作られている。

また、上下方向のアクチュエータには、振動台テーブルの自重および試験体重量を油圧で調整して支えるため、スタティックサポートアキュムレータが付属している。

2.4 パーキングフレーム

通常の振動台は、完全停止（油圧ポンプを停止）すると上下方向のアクチュエータの油圧が下がり振動台テーブル位置が下降する。しかし、試験体条件によっては、振動台テーブル位置を下降させずに停止位置に保持させることが必要な場合がある。それを実現するのが、振動台テーブルを静的に下から支えるパーキングフレームである（図-2）。パーキングフレームは、振動台テーブルの自重および最大積載荷重55tonを支える能力を有する。なお、インターロック制御により、振動台の加振はパーキングフレームが完全に下がった状態でのみ開始可能となっている。

2.5 油圧供給システム

本振動台の油圧供給ユニットは、メイン圧力用が2台、パイロット圧力供給とアキュムレータバンクへの蓄圧に

1台の合計3台で構成されており、メイン圧力用のポンプユニット2台には、圧力20.7MPaを100L/minで供給可能なポンプモータがそれぞれ6台組み込まれており、各ポンプユニットの吐出流量は600L/min、2台合計で1,200L/minである。

3台目のポンプユニットは、振動台システムのパイロット圧力の供給と、34.5MPaでアキュムレータバンクへ蓄圧する際に使用される。また、振動台運転開始時は最初に起動し、振動台停止時は最後に停止する事で、パイロット圧が常に制御されるよう設計されている。なお、従来のポンプユニットはポンプモータが剥き出しで設置されていたため、稼働中の騒音が大きく操作員は入室時に耳栓着用が必要であったが、本ポンプユニットはポンプモータが内蔵されているため、騒音が小さく室内での会話に支障はない。

また、本振動台の要求性能を満足するため、7台のアキュムレータバンク（1バンクあたり12本×160Lのアキュムレータ）で構成されている。アキュムレータバンクは定格34.5MPaであり、システム運転のため20.7MPaまでのブローダウン制御が可能である。



写真-2 ポンプユニット（3台）



写真-3 アキュムレータバンク（7台）

表－２ 大型三軸振動台の地震波加振試験

No.	大項目	中項目	種類	地名/コード	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)	データ長 (s)	備考
①	大加速度	1995年兵庫県南部地震	観測波	葺合	803	123	45	81	X=-100mmのオフセット加振
②		2004年新潟県中越地震	観測波	JMA川口	1,675	154	39	180	X=+70mm, Z=-135mmのオフセット加振
③		2011年東北地方太平洋沖地震	観測波	K-NET築館	2,700	109	15	300	
④	長周期パルス (永久変位)	2016年熊本地震	観測波	JMA益城町	825	174	105	120	永久変位、0.3Hz以下カット
⑤			観測波	JMA西原村	771	259	192	120	永久変位、0.35Hz以下カット
⑥		上町断層地震 ^{*1}	模擬波	UMTA4_C2EW1	624	128	77	40.95	0.35Hz-35Hzのバンドパス、75%
⑦	長周期長時間	南海トラフ地震 ^{*2}	模擬波	KiK-net此花	133	47	39	655.36	
⑧		相模トラフ地震 ^{*3}	模擬波	# 52397134	461	157	62	400	0.3Hz-35Hzのバンドパス、80%

^{*1}: JSCA関西、大震研2015年
^{*2}: 国土省基盤促進波2016年6月
^{*3}: 地震本部2016年10月にに基づき独自に作成（最大級Gタイプ Ave.+σ の波形）

写真－２にポンプユニットを,写真－３にアキュムレータバンクの設置状況を示す。

2.6 スライドテーブル

本振動台テーブル上へのアクセスは、安全上、スライドテーブル（写真－１の浮き基礎上に固定された白い部分）を張り出して行う。振動台上に試験体を設置する際や、計測機器を設置・配線する際にこれを使用して作業を行う。浮き基礎の東西面に各２カ所（合計４カ所）設置されたスライドテーブルには、それぞれに３種類のインターロックが設けられており、全てのインターロックが解除されない限り振動台の起動は出来ない仕組みとなっている。

2.7 性能確認試験

大型三軸振動台の性能確認試験は、図－３の性能曲線（定格質量 20ton 搭載時）に基づき、正弦波加振（加振振動数 f (Hz) : 0.1, 0.2, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30 の８ポイント）で実施し、各振動数ポイントで加速度、速度、変位が性能曲線を上回っていることを確認した。なお、正弦波 1Hz 加振は、浮き基礎の防振装置である空気ばねを稼働させた時の共振点（1.1Hz）に近いため、浮き基礎を着床させた状態で試験を行った。また、図－３には示していないが、定格負荷の小さい 5ton 搭載時（最大加速度± 5G）の性能曲線に基づく性能確認試験も実施し、加振能力を確認した。

次に、振動台の地震波加振のテストとして、近年の強震記録で大加速度の記録や長周期パルスで永久変位を伴う特徴的な記録について加振を試みた。

表－２にテスト加振を行った地震波について、対象地震と観測地名、最大振幅値、データ長（継続時間）を示す。また、地震波によっては低振動数成分（長周期成分）をカットしないと加振できない地震波や、オフセット加

振（加振開始時に振動台テーブルを原点からずらした加振）が必要な地震波もあり、備考欄にその点を記載している。

テスト加振の結果、1995 年兵庫県南部地震の葺合波や 2004 年新潟県中越地震の JMA 川口の記録は、地動変位が大きいものの、振動台テーブル位置をオフセットさせれば加振可能であること、2016 年熊本地震の JMA 益城や JMA 西原村の記録は、0.3 ～ 0.35Hz 以下の成分をカットしないと加振できないことなどを確認した。また、長周期地震動を考慮した設計用地震動について、南海トラフ地震を対象とした KiK-net 此花地点の波形（OS 1 波）³⁾ はフィルターを掛けずに加振できること、相模トラフ地震を想定して作成した模擬地震波（平均+σ）については、80% にレベルを調整し、かつフィルター処理が必要であることを確認した。

3. 浮き基礎の振動特性

今回、周辺施設への振動伝搬を低減するために、既存の浮き基礎を新しい振動台の形状に合わせて改修し、さらに振動台の加振性能に合わせて空気ばねと粘性ダン

表－３ 振動台加振条件*

加振方向	目標加速度	加振振動数	加振時間
Y	1.35G	1.1Hz	10 周期
	2.11G	2.0Hz	10 周期
	2.50G	3.0Hz	10 秒
	2.90G	5.0Hz	10 秒
	3.00G	10.0Hz	20 秒
	3.00G	20.0Hz	20 秒
Z	1.40G	1.1Hz	10 周期
	2.11G	2.0Hz	10 周期
	2.90G	3.0Hz	10 秒
	3.00G	5.0Hz	10 秒
	3.00G	10.0Hz	20 秒
	3.00G	20.0Hz	20 秒

* 振動台テーブルに定格 20ton 搭載で実施

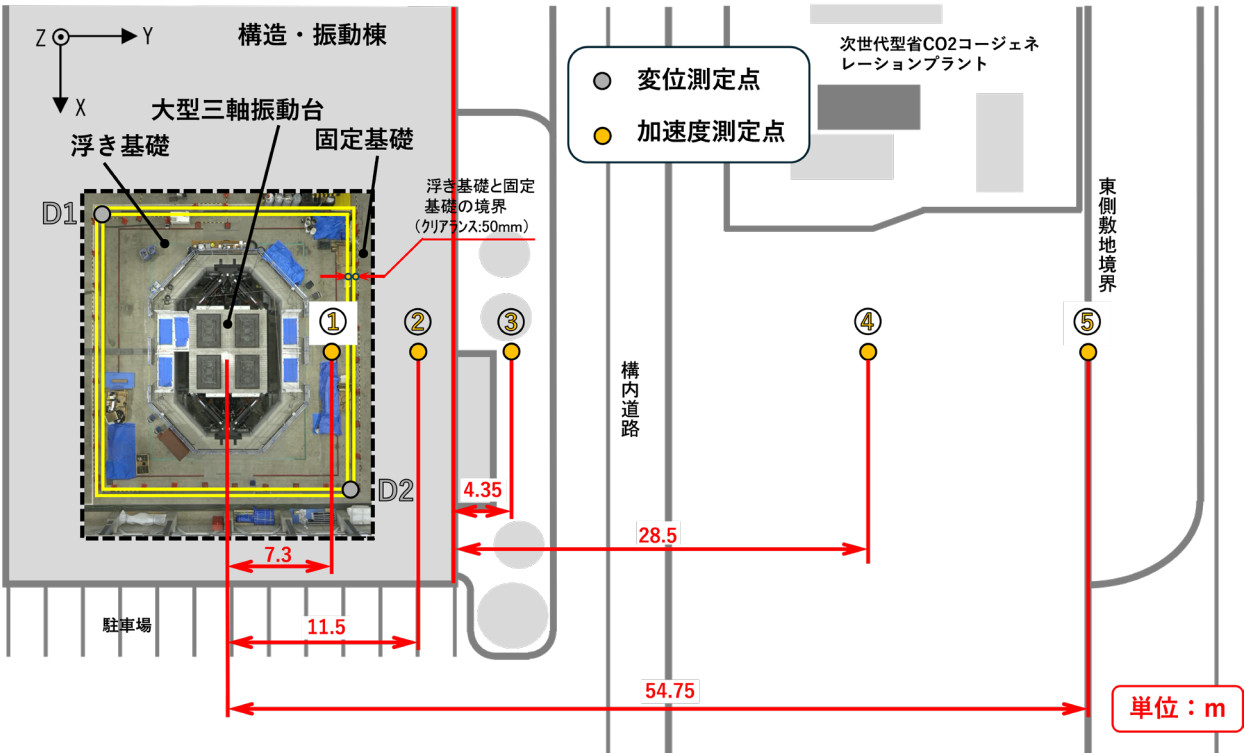


図-4 振動測定点

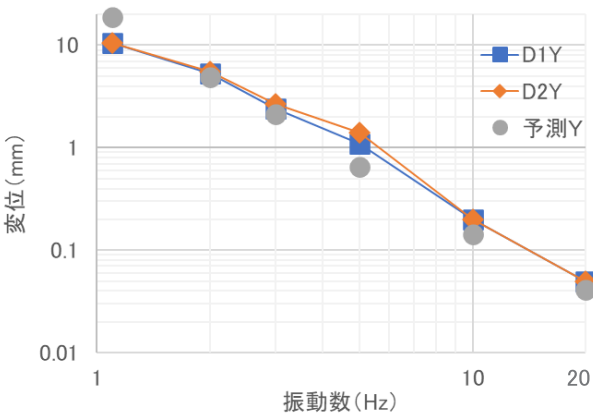


図-5 Y方向加振時の変位応答

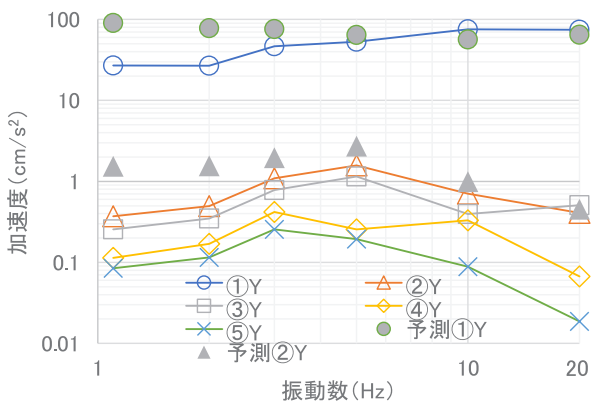


図-7 Y方向加振時の加速度応答

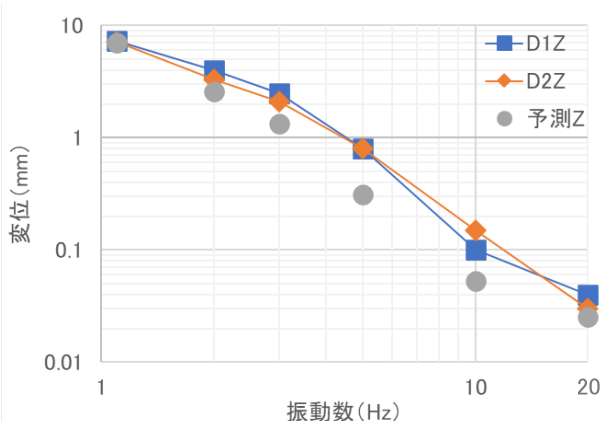


図-6 Z方向加振時の変位応答

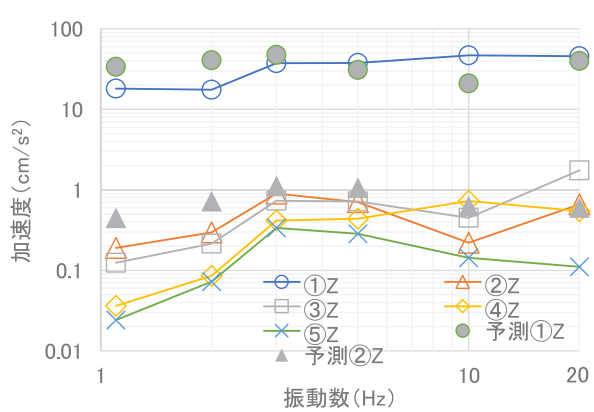
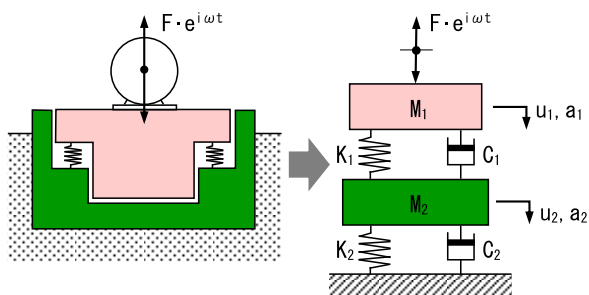


図-8 Z方向加振時の加速度応答



図－9 大型振動台の2自由度系モデル

パーの増設を行った。浮き基礎の振動特性については、以下の事前検討と検証を行い、浮き基礎のクリアランスと敷地境界の振動管理基準の観点で問題がないことを確認している。

振動台の性能曲線に基づき、表－3の条件で振動台加振を行った際の図－4に示す各点における振動変位、振動加速度の測定結果を図－5～図－8に示す。図－4の変位測定点では浮き基礎と固定基礎の相対変位を測定しているが、両基礎の応答には桁違いの差があるため、測定結果を浮き基礎の絶対変位として扱う。図－3の加速度測定点①は浮き基礎上、②は固定基礎上、③～⑤は周辺地盤上の測定点であり、⑤は敷地境界上の点である。

図－5～図－8には図－9のように大型振動台、浮き基礎、固定基礎を2自由度系モデルで表現⁶⁾した場合の浮き基礎等の振動予測結果も併せて示す。水平(Y)方向、鉛直(Z)方向ともに、浮き基礎等の変位、加速度の測定結果と予測結果は概ね整合している。図－5、図－6から浮き基礎の変位は10mm程度以下であり、固定基礎と浮き基礎間のクリアランス50mmに十分収まっている。

図－7および図－8の加速度応答をみると、固定基礎や周辺地盤上の加速度は浮き基礎の加速度よりも一桁から二桁以上小さく、基本的に振動台からの距離が離れるほど小さくなっている。別途、測定点②近傍（固定基礎上）、測定点⑤（敷地境界上）では表－3の振動台加振時の振動レベルも測定し、それぞれY方向の最大値が63.5、50.3dB、Z方向の最大値が59.7、52.4dBであった。いずれも3Hz加振時の値である。この結果は敷地境界における振動レベルの自主管理基準60dB（昼間、Z方向）を満足しており、固定基礎上においても60dB程度と小さな値になっている。

4. 計測システム

4.1 システム概要

本計測システムは、振動実験から得られるカメラ、ひずみ値、電圧値など各種センサーの信号を振動台からの開始・停止の合図とともに収録の開始・停止を行い、決められた手順に基づき自動でデータ処理が行われ、表示および印刷するシステムである。本計測システムのコンセプトは、データ収集から処理までを自動化して、人為的ミスを極力抑えることに配慮したシステムである。また、データ収録装置という観点から以下3項目に重点を置いた設計を行った。

- ①装置の信頼性と収録データの保全
- ②異なる計測機器間の同期性
- ③ユーザーインターフェースの使いやすさ

4.2 システム構成

本計測システムの機器構成とデータの流れを図－10に、各計測機器設備の機能と配置台数を表－4に示す。

本計測システムには、国内で実績のあるナショナル・インスツルメンツ（NI）製のコンピューター・ベース計測装置（cRIO）を採用した。合計9台のcRIOを導入し、その内サンプリングクロックの基準となる1台をマスターcRIO（cRIO-Mと記す）と称し、他の8台のcRIOと区別している。なお、振動台テーブル側面2カ所に計測BOXを設置（図－2参照）し、この中に9台のcRIOを収納しているため、振動台テーブルと浮き基礎を跨いだ配線は不要である。また、計測ソフトウェアは操作者が画面設定を自由に更新しやすいNI製のLabVIEWを採用した。

統括PCは収録操作の制御を行い、cRIO、動画収録PC、モーションキャプチャーPCでデータの計測を行う。収録中、計測データをモニターPCでリアルタイムに監視することが可能で、収録後、計測データはデータサーバーに転送される。解析PCではデータサーバーから収録データを回収し、解析結果を出力することが可能である。収録されるデータは下記に記す3種類である。

- ①cRIOで収録される各種センサーからの計測データ
- ②動画収録PCで収録されるHD/PTZカメラからの動画データ
- ③モーションキャプチャーPCで収録されるモーションキャプチャーデータ

また、統括PCはタブレットを用いて制御室外（例えば振動台テーブル近く）からの操作が可能で、収録操作

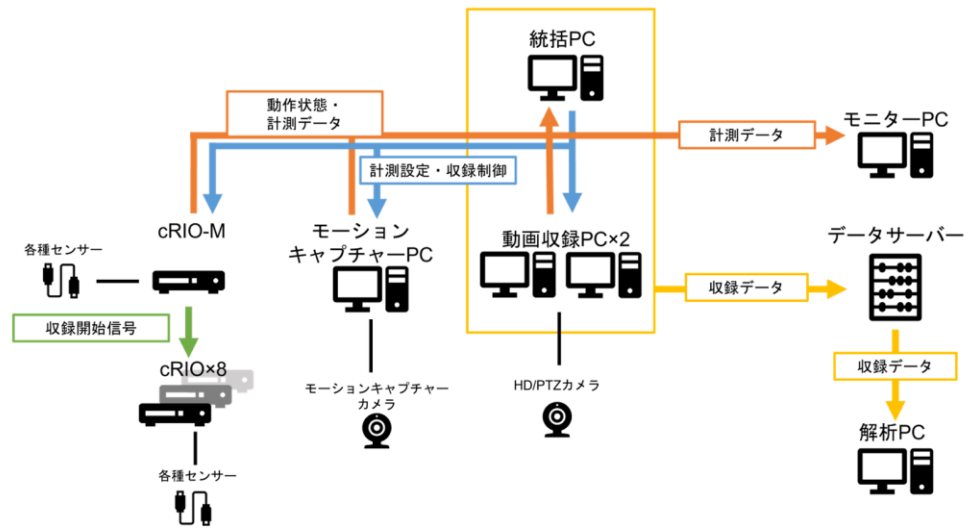


図-10 振動台計測システムの構成

表-4 計測機器設備の一覧（機能と配置台数）

計測機器設備 PC制御	機器性能・機能	配置台数
アナログ計測 インターフェース	・A/D変換器(24bit) ・最大サンプリング周波数：1000Hz ・デジタルフィルター ・加振制御システムとの同期自動計測	・振動台上 ひずみセンサー入力：80ch ・振動台上 電圧センサー入力：20ch ・振動台外 電圧センサー入力：16ch ※振動台制御信号電圧入力：12ch
HD/PTZカメラ映像 インターフェース	・フルHD画像映像(1920×1024) ・59.96fps映像録画 ・連続撮影時間：60min ・音声録音用マイク	・構造振動棟柱(東、西、南、北西、天井)：5ch ・振動台上 8ch ・振動台外 カメラ接続BOX 4ch ・音声入力 1ch
モーションキャプチャー計測 インターフェース	・モーションキャプチャーカメラ(2048×2048) ・最大180Hzサンプリング(180fps) ・10m空間分解能1mm ・反射マーカ―(多点)による絶対変位計測	・カメラ12台まで設置可能(LAN接続)

をはじめ過去の実験データや動画データを、その場で閲覧することができる。

5. まとめ

既存の大型三軸振動台を改修し、内陸直下型地震による大振幅地震動や南海トラフ地震等で発生が懸念される長周期長時間地震動を考慮した、加振性能の高い振動台が完成した。加振性能は最大加速度±3G（定格20ton搭載時）、最大速度±200cm/s、最大変位水平±60cm・上下±30cmである。

また、周辺への振動を低減するため、既存の浮き基礎を改修し空気ばねと粘性ダンパーを増設した。浮き基礎の振動特性を検証し、固定基礎とのクリアランスや敷地境界における振動レベルについて問題がないことを確認した。

今後、本振動台を活用して、耐震・免震・制振の技術開発における実証試験をはじめ、企業者の各種耐震試験やBCP対策支援に活用していく予定である。

謝辞

本報告では、防災科学技術研究所のK-NETおよび気象庁により観測・収集された加速度時刻歴波形を使用しています。また、大阪ガスから日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会に提供された1995年兵庫県南部地震の加速度時刻歴波形、日本建築構造技術者協会関西支部（JSCA 関西）に設置された大震研委員会（大阪府内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針）（2015年5月）で作成された設計用地震動を使用しています。

大型三軸振動台の改修工事にあたっては、本社建築設計統括部の意匠・構造・設備の設計関係者、建設監理部、関東支店工事部などの工事関係者の協力を得ました。また、本報告をまとめるにあたり、エイ・イー・エス株式会社の山口雄輔氏の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：強震観測網
https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin_index.html (2024 年 10 月確認)
- 2) 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への対策について,
https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html (2024 年 10 月確認)
- 3) 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> (2024 年 10 月確認)
- 4) 日本建築学会：AIJ 兵庫県南部地震デジタル強震記録 1996.12.3 改訂版, 1996.
- 5) 日本建築構造技術者協会関西支部：大阪府内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015.
- 6) 田中靖彦, 加藤貴司：大型振動台加振時の浮き基礎振動と環境振動の評価事例 その 2 2 自由度系モデルによる簡易予測結果, 簡易予測結果, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 483 ~ 484, 2022.

Performance of high-performance large triaxial shaking table and vibration characteristics of floating foundations

Shigeki SAKAI, Atsushi MIURA, Takahito NAKAMURA, Takashi KATO, Yasuhiko TANAKA and Kenichi NAKANO

Due to the aging mechanical equipment of the existing large triaxial shaking table and the need to improve the table's vibration excitation capability against large-amplitude and long-period seismic motions, a plan to renovate the existing large triaxial shaking table was started in June 2021, and construction was completed in August 2024. The new table is 5m x 5m in size and has a maximum acceleration of $\pm 3G$ both horizontally and vertically (when 20 tons is loaded), a maximum velocity of $\pm 200\text{cm/s}$ both horizontally and vertically, and a maximum displacement of $\pm 60\text{cm}$ horizontally and $\pm 30\text{cm}$ vertically.

To reduce vibration propagation to surrounding facilities, the existing floating foundation was modified to match the shape of the new shaking table; furthermore, air springs and viscous dampers were added to match the shaking table's excitation performance. The vibration characteristics of the floating foundation were studied and verified in advance to ensure that there were no problems. The measurement system was equipped with synchronized recording of camera images and motion capture as well as strain and voltage sensors. For the purpose of saving labor and reducing the operator's burden during measurement, the system was designed so that the primary processing and analysis of measurement results can be performed by automatic measurement using a start signal from the control system.