大型水中振動台の導入

三藤正明　坪崎裕幸
田村保　佐々木武

要　旨

新技術研究所の構造実験棟に世界で初めて３軸６自由度の加振性能を持つ大型水中振動台を導入した。大型水中振動台は15m×15mの大型の水槽の底に振動台テーブルを設置したものであり、水際線や水中に構築される構造物の模型振動実験が実施できるものである。大型水中振動台の導入にあたっては、水中振動台としての特性を生かした海上構造物の大型模型実験が可能であることだけでなく、水を排除することにより通常の大型振動台として陸上土木構造物や建築構造物の振動台実験のための十分な性能を有することを考慮して性能諸元を設定した。また、３軸６自由度の優れた加振性能と水中構造物の模型振動実験が可能である点を最大限に活用できる大型２方向せん断土槽を作成し、より複雑な地盤震動に対する地盤の振動模型実験を可能とした。振動台の加振制御システムもＥＷＳやＰＣの積極的な採用により、可能な限りの省力化と効率化を図った。

１．まえがき

建築部門においては、超高層ビルの建設が進展していることや、インテリジェントビルに代表されるような高付加価値ビルの建設需要が増大していること、さらにはウォーターフロントの開発に伴う軟弱地盤上の高層建築物の需要が増大するなど、これまで以上に信頼性の高い耐震技術の確立が要請されている。そのためには、建築構造物の耐震解析技術の向上を図るとともに、大地震時に建物の損傷を防ぐとともに、居住者の安全性および重要な機器や資産の安全性を守るための免制振構法の開発をすすめるなど、ソフトとハードの両面からのバランスのとれた総合的な技術開発を進める必要がある。大型振動台の導入はこのような耐震工学の分野における総合的な技術の向上のために必要とされるものであり、高性能のコンピュータの導入と質の高い技術者の育成とがバランス良く進められることにより高い効果を発揮することができるものである。

一方、土木技術の分野においては橋梁、ダム、堤防ならびに沈埋トンネルをはじめとする種々の構造物に関する耐震設計上の課題に対して、解析的な研究に加えて大型振動台などの大型の模型実験を通した実験的な面からの技術開発が進められている。これらの分野の研究開発は主として、公的な研究機関や大手建設会社が永年にわたって実施してきた。近年では地盤の液状化による地盤の耐震安全性の検討も、大型振動台上のせん断土槽での実験を通した検討がなされるなど、大型振動台を用いた模型振動実験の必要性はさらに高くなっている。

近年ではウォーターフロントの開発・整備の必要性が高まっており、港湾や海岸、さらには沖合海域に大規模な構造物が建設されようとしている。特に、沖合い人工島に関しては各方面でその実現に向けた検討が盛んに進められている状況にある。このようにさまざまな方面から新しいフロンティアとして注目を集めているこれらの地域は軟弱な地盤が多いことや水中に構造物が建設されることなどのために、構造物と地盤および水との動的相互作用を考慮した高度な耐震設計技術が不可欠となっている。通常の大型振動台を用いた振動台実験では構造物と地盤ならびに水との動的相互作用に関する実験的な取り扱いが困難であるため、実現象とは異った実験しかできないのが実情である。これらの問題を解決するものとして開発されたのが水中振動台であるが、すでに運輸省港湾技術研究所において導入されている。しかしながら、同所の水中振動台では水平１軸、鉛直方向１軸の加振が可能であり、近年耐震工学分野において課題とされているような水平２方向加振による影響等の評価が困難である。そのため、水を排除した場合の通常の大型振動台とした場合にも高性能な加振能力を有する大型水中振動台を導入

が望まれている。

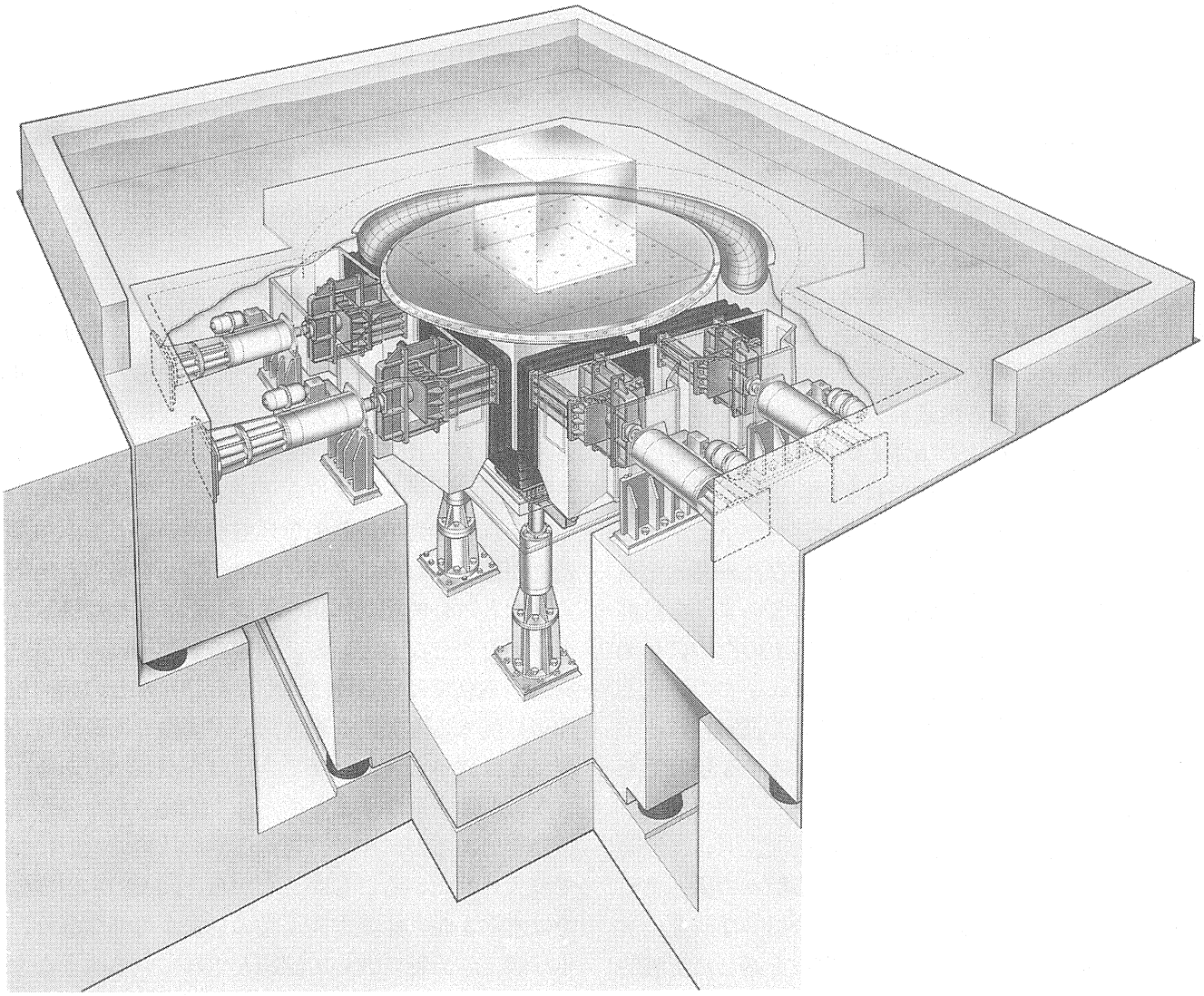
このような情勢を受けて、新技術研究所の構造実験棟に世界で初めての３軸６自由度の加振性能を持つ大型水中振動台を導入した（図－１）。大型水中振動台は15m×15mの大型の水槽の底に振動台テーブルを設置したものであり、水際線や水中に構築される構造物の模型振動実験が実施できるものであるだけでなく、水を排除することにより通常の大型振動台として陸上土木構造物や建築構造物の振動台実験も可能である。

本報告では大型水中振動台の性能を紹介するとともに、振動計測システムについても触れる。

２．大型水中振動台の性能諸元

大型水中振動台は港湾技術研究所に１台あるのみであり、導入にあたっては種々の点での検討課題が残されていた。特に、港湾技術研究所の振動台が２軸の加振性能を有するものであるため、３軸６自由度の加振性能を持つ当社の振動台とは防水構造として同様の構造を採用し難く、加振性能は確保しつつ振動台テーブルと水槽の底との防水を保つ構造とする工夫が必要であった。そのため、小型の実規模模型を製作し、防水構造の実証試験を実施するなどの万全の対策を施した。その他、導入にあたって考慮した事項は以下の通りである。

①水平方向Ｘ軸は短周期型として加速度の最大性能を発揮すること。



図－１　大型水中振動台鳥瞰図

②水平方向Y軸は長周期型として速度の最大性能を発揮すること。
③大水深構造物および大規模浮体構造物を対象とした実験を考慮し、上下方向は加速度の性能が最大限に発揮できること。
④各軸の最大性能は各軸単独で加振する場合に発揮すること。
⑤各軸の最大性能は必ずしも連続加振時の条件とはしないこととし、特に最大速度の性能を確保するためにアキュームレーターを設置することとし、加振時間には制限を設けるものとした。
⑥大型せん断土槽による実験が可能となる載荷重量を確保することとし、最大積載荷重として60tonを確保することとした。
⑦テーブルサイズは4m×4mとし定格載荷重量は20tonとする。
⑧水中振動台としての性能の発揮に支障のない水槽の諸元を確保すること。
⑨振動台の導入により周辺の工場や民家に振動の悪影響が及ばないこと。
⑩使用電気容量を1200KW程度に抑えること。

などを優先項目として挙げた。そのうち、最大加速度と最大速度に関する性能では、実際の構造物の設計の際に考慮される最大値を考慮して決定するものとした。最大加速度では、原子力建屋等の既往の実験事例を考慮し、2Gを確保するものとした。また、最大速度の性能としては、高層建築物の設計では50kineを考慮するのが標準であり場合によっては75kineが考慮される場合が有ることや、建築物の破壊状態までの加振が必要とされることから150kineが必要とされることなどを考慮するとともに、⑤の条件を加味して性能を決定した。水中振動台としての性能を十分に発揮するためには、水槽の大きさもできるかぎり大きいものが必要とされるが、最大水深を2mとし、加振方向について振動台中心より水槽の壁までの距離として7.5mを確保することとした．表－1に振動台の主要性能諸元を示している。

振動台の加振時の振動伝播の影響を低減するために、水槽を含めた振動台全体を写真－1に示すような100個の空気バネによって支持された浮き基礎構造を採用した。このような構造を採用することにより、敷地境界での振動台加振時の影響を防止できることを振動性能試験により確認している。

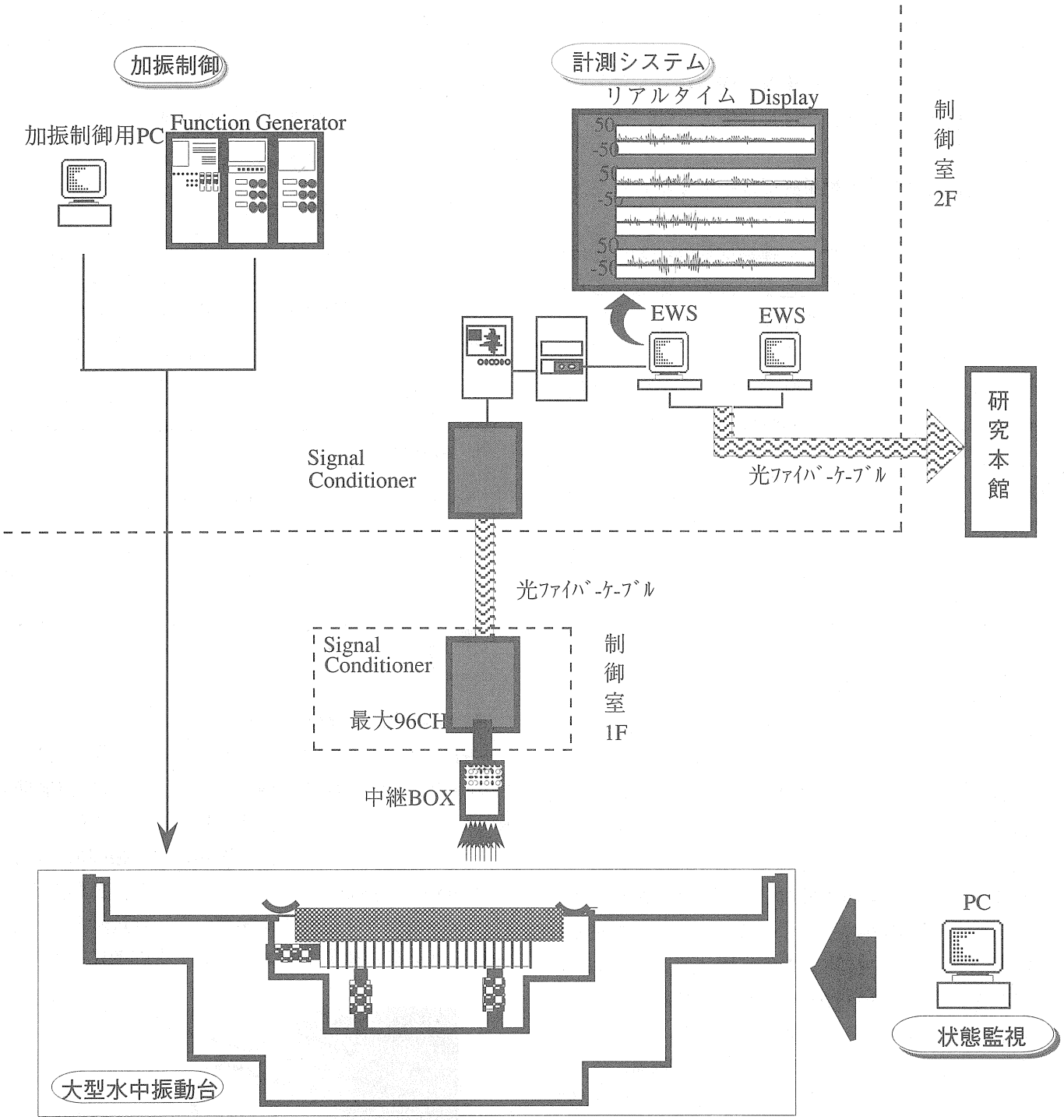
表－1　大型水中振動台の主要諸元

主　要　諸　元				
ﾃｰﾌﾞﾙｻｲｽﾞ		5.65m円形（4m×4m）		
積載重量		定格20ton　最大60ton		
加振方向		3軸6自由度		
加振能力		X軸	Y軸	Z軸
	ｽﾄﾛｰｸ	200mm	300mm	100mm
	速度	75cm/s	150cm/s	50cm/s
	加速度	2G	1G	1.5G
加振周波数		DC～70Hz		
加振方式		電気・油圧サーボ方式		
入力波形		正弦波、矩形波、地震波		
水槽	平面形	15m × 15m		
	水深	2m		

3．振動計測・解析システム

加振および計測・解析システムの概要は図－2に示す通りであるが、構造実験棟2階に設けられた制御観測室において大型水中振動台の制御および実験データの計測・解析を行っている。振動台の加振制御にはPCとFunction Generatorを用いて、正弦波、矩形波やスイープ加振などの規則的な振動から、地震動のような任意のランダム波までをコンピュータ制御により精度

写真－1　浮き基礎構造の空気バネ



図－2　大型振動台加振および振動計測システム

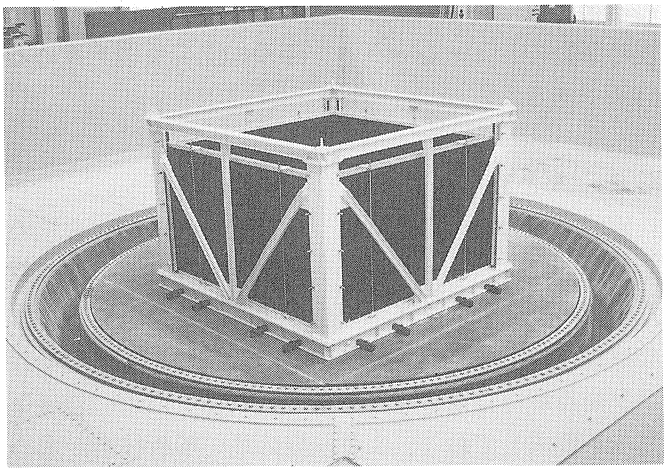
良く再現することが可能である。また、空気バネによる浮き基礎構造を含めた全体システムの作動状況の監視も制御観測室内の監視用ＰＣから行われており、振動台の加振にあたって自動化が進められており、実験時においても最小限の人員で実験の実施が可能となっている。

振動台上では最大96chまでのデータの計測が可能となっており、これらの計測データは１階実験場に設けられた中継BoxとSignal Conditioner通して２階制御観測室まで光ファイバーケーブルで送られている。２階制御観測室内には専用の２台のワークステーションを設置して、データ収録および解析を行っている。データ収録はオンラインで行われており、計測結果はＥＷＳのディスプレイ上にオンライン表示される。もちろん構造実験棟と研究本館とは光ファイバーによる技術研究所内ＬＡＮが構築されており、一旦ＥＷＳに収録さ

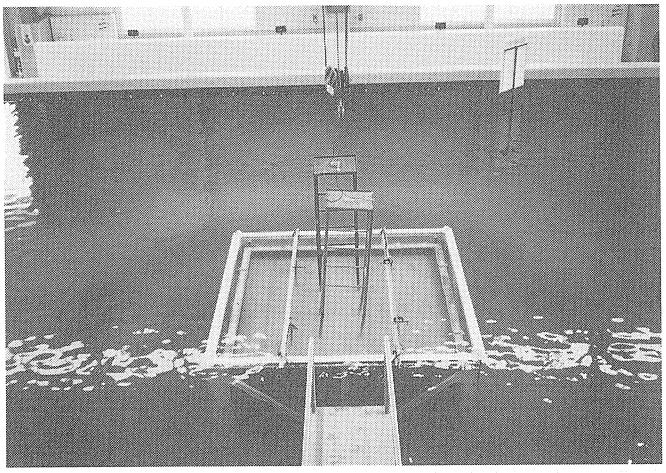
れたデータの詳細な解析は、ネットワーク上のどのＰＣやＥＷＳからも行うことが可能となっており、通常は本館デスク上で行う体制となっている。

4．大型２方向せん断土槽

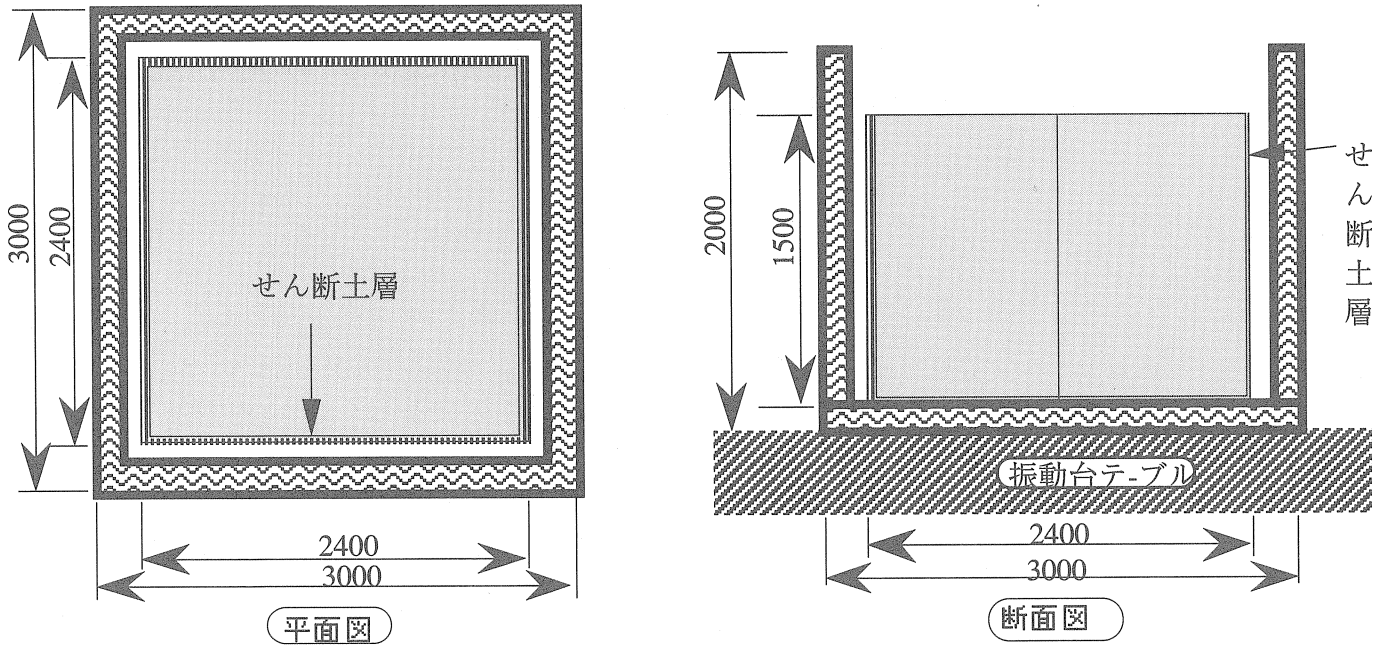
３軸６自由度の加振性能を有する世界では初めての大型水中振動台を導入し、水中構造物のより複雑な地盤震動に対する振動台模型実験を可能とした。しかしながら、地盤の振動模型実験を行なうためには、土槽の側壁のせん断変形が地盤の変形に追随することができるいわゆるせん断土層を導入する必要がある。そこで、大型振動台の持つ２つの大きな特徴である３軸６自由度の加振性能と水中構造物の模型振動実験が可能である点を最大限に活用できる大型２方向せん断土槽を作成した（写真－２）。せん断土槽は図－３に示すように内法が2.4m×2.4mで高さが1.5mの矩形の土槽であり、水平２方向の地盤のせん断変形に追随することができる。水中に没した形での実験も可能であり、海上に立地する構造物の支持地盤である海底地盤を模擬することも可能であり、図－４に示すような海底地盤上に設けられた有脚式海上構造物の模型実験も可能である（写真－３）。大型２方向せん断土槽の導入にあたって、せん断土槽単体の振動実験と砂地盤を作成して模型振動実験を実施し、その性能評価を行ったが、その詳細については別の機会に報告する予定である。



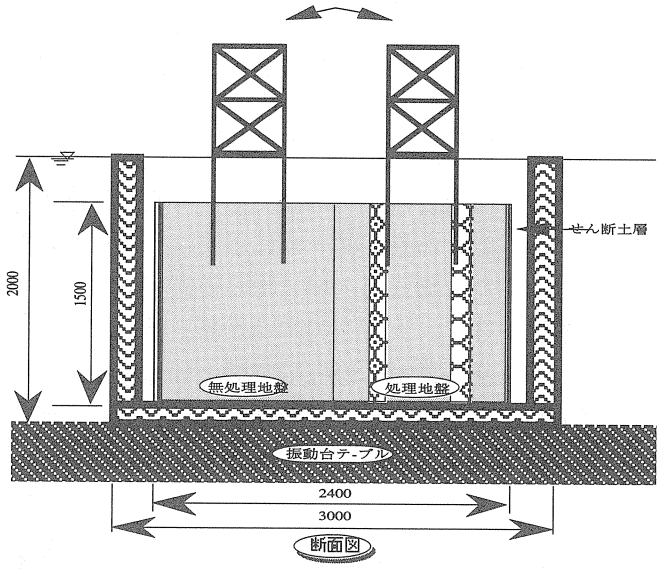
写真－２　大型２方向せん断土槽



写真－３　有脚式海洋構造物の模型振動実験状況



図－３　大型２方向せん断土槽の構造図



図－4　有脚式海洋構造物の模型振動実験

5．当面の研究課題

このような大型水中振動台を導入し、今後建築・土木技術の開発に努めて行く必要があるが、当面の研究課題としては以下のようなものを考えている。

まず、建築技術の開発としては、免・制振技術の開発に利用する計画である。すでに、免震建物は技術研究所の展示実験棟の一部に採用され、地震観測による継続的な調査研究が進められている。また、制振技術開発のための実大実験棟も建設され、制振ビル建設のための準備が進められている。このように、研究開発環境は整いつつあるとはいうものの、大型振動台を利用した研究開発の必要性は依然高く、精度の良い地震動波形を再現できる大型振動台による振動実験の重要性は高い。

一方、土木関連の技術開発課題としては沖合人工島の外郭施設の耐震安全性の検討手法の開発を挙げている。沖合人工島の耐震安全性の検討にあたっては、①地震動特性の評価・設定手法の開発、②地震時挙動のシミュレーション手法の開発、③地震時安全性の高い新構造システムの開発、などが必要である。技術研究所においてもこれらの課題に対してこれまでに、さまざな取り組みを行っているが、水～構造物～地盤系の動的相互作用を再現できる大型水中振動台は研究開発の推進にあたって極めて有効な手段を提供するものとなる。このような大型模型実験による現象の再現を進めるとともに、このような複雑な条件下の構造物の地震時挙動のシミュレーション手法の開発も鋭意進める計画である。

6．まとめ

建設技術の大幅な進歩は、構造物の大規模化を進めるとともに、ニューフロンティアと呼ばれる空間の新たな都市開発のスタイルを生み出してきた。このような建設技術を取り巻く社会情勢の変化は、構造解析および耐震解析技術に対しても、これまで以上の急速な進歩を要求しており、より精度の高い解析技術が求められている。五洋建設では構造実験棟に設けられた大型実験施設を利用した模型振動実験とスーパーコンピュータを駆使した高度な数値解析技術の開発とのバランスのとれた技術開発を推進することにより、これらの社会的な要請に応えるための研究開発を鋭意進めている。