

# 海底の地震動を再現する三次元水中振動台

Tatsuo UWABE  
**上部達生**

正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 地震防災研究室室長

3-Dimensional Underwater Shaking Table to Simulate  
 Seabed Earthquake Motion

## 港湾施設の耐震性高度化の必要性

阪神・淡路大震災では写真-1に示すように、神戸港は大きな被害を受けた。わが国は地震多発国で、これまでの大地震で港湾の構造物もたびたび被災している。港湾は地震直後に必要な医薬品、飲料水等の緊急物資、避難する人々の輸送に重要な役割を果たすとともに、被災してもある程度の港湾としての機能を維持して、わが国の経済活動に与える影響ができるだけ少なくなるようにしなければならない。特に、三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）および北部九州の4地域の中核国際港湾および中核国際港湾が地震により被災すると、わが国のみならず国際的な経済活動にも重大な影響を与えることになる。こうしたことから、主に港湾・空港施設の設計・建設技術に関する研

究を行っている港湾技術研究所では、港湾構造物等の地震時の安定性に関する研究が、重要な研究テーマの一つになっている。

## 港湾構造物の耐震性の検討課題

浦島太郎が亀に連れられていった竜宮城は海底にあるようだが、地震の時の水中の竜宮城は陸地にあるよりも安全だろうか。地震の時の海底の衝撃動はどのくらいなのか、海水は地震の時に味方してくれるのか、敵方になるのか。こうした疑問は陸上の構造物と違い、海中あるいは水際に建設される港湾構造物には必ずついてまわる問題である。したがって、地震時に海水が港湾構造物にどのような影響を与えるのかを研究することは、港湾構造物の耐震性の検討の重要な課題の一つになっている。

## 水中振動台とは

地震の時に、構造物が振動で壊れるかどうかを検討する場合に、地震動を再現する振動台装置がよく用いられる。これは構造物の模型を振動台上に設置して、実際の地震動と同じ振動を振動台で再現し、構造物の振動を測定する装置である。水中の構造物を対象とする場合、以前は振動台上に水を満たした箱を載せ、その中に構造物の模型を設置して実験することが行われてきた。ところが、これでは、水を満たした洗面器を揺ると水がポツチャン、ポツチャンと飛び跳ねることからわかるように、振動を与えると箱の中で水が揺れだし、模型に重大な影響を与え、必ずしも正確に海底地盤の地震動を再現することにはならない。この点を解決するものとして水中振動台が開発された。これは大きな水槽の底の中央の一部を振動台としたものである。このようにすれば、水を満たした箱を振動台上に載せた場合のように箱の壁への影響が少なくなり、海底地盤の地震動による構造物の挙動を、ほぼ正確に再現できるようになる。港湾技術研究所では、約9年前にこの大型水中振動台を世界で初めて建設した。この旧水中振動台は二次元振動台（水平1方向、上下方向）であるのに対して、最近では、構造物および地盤の三次元挙動の解析まで研究が進んできていることから、三次元水中振動台の建設が求められていた。また、この旧水中振動台では阪神・淡路大震災の地震動を能力不足か



写真-1 阪神・淡路大震災の神戸港の岸壁の被害



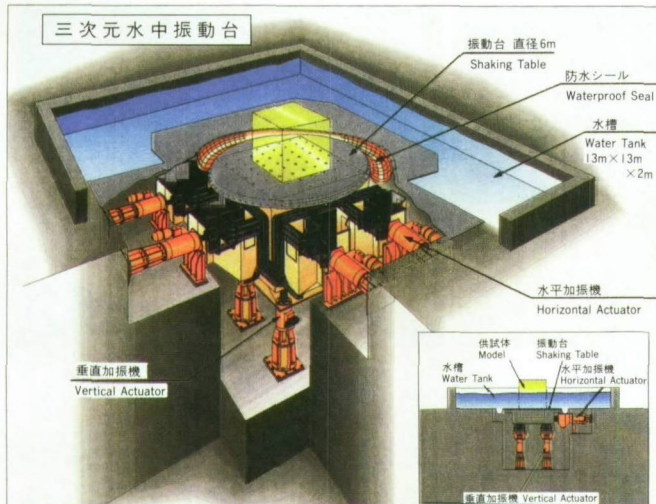


図-1 三次元水中振動台



写真-2 工事中の振動台の基礎の状況

ら再現できないことも判明した。以上の点を踏まえて、旧水中振動台の能力を増加させ、三次元加振が可能な世界最大の三次元水中振動台を新しく建設した。阪神・淡路大震災以後、非常に大きな地震動に対しても、構造物がある程度の機能を維持するような耐震設計が実施されるようになってきている。このため、振動実験においても非常に大きな地震動を与えて、構造物の破壊挙動を把握する実験が必要となってきた。こうしたことから、新しく建設した三次元水中振動台は、水中構造物の破壊振動実験が可能な大きな加振力を持つ装置とした。図-1にこの新しい三次元水中振動台を示す。一般の人はあまり見る機会がないと思われるので、写真-2には工事中の振動台の基礎の状況を示す。中央の底の緑色のシートがかけられているのが、上下方向の4個の加振機である。左側の壁の2個の穴が、水平方向の加振機の取り付け部である。周りの緑の壁が水槽の壁である。

### 三次元水中振動台の性能および特徴

図-1に示した水中振動台の性能を表-1に示す。表に示すように、最大速度が150cm/sと大きく、破壊振動実験が可能な加振能力を有していること(速度を大きくした方が大きな破壊力を与えられるので、可能な限

り速度を大きくした)、加振周波数は100Hzまでを目標としている(これまでは50~70Hzまでが一般的であった)ことが、水中で動作する振動台という特徴以外の主な特徴である。加振入力波形には正弦波・地震波等が入力可能であり、最新のデジタル制御技術を利用して、入力波形を精度よく振動台上で再現可能である。油圧システムの作動油としては、水グリコール系を用いており、火災に対する安全性が図られている。水槽への注水は、地下の貯水槽から水を汲み上げることにより実現する。計測システムでは、最大128chまでの計測が可能で、計測されたデータは中継ボックスを通して、建屋2階の制御室のデータ収録解析装置に送られる。さらに、高速度カラービデオカメラ(200コマ/秒)およびデジタルレコーディングプロセッサも導入され、実験の画像解析も可能となっている。

### 地震時に海水が港湾構造物に与える影響

海水浴のときに、海の中で歩くのは、水の抵抗を受けるのでなかなか大変である。このことから、水中の構造物は地震振動してもすぐ振動が減衰するような気になる。ところが、水中振動台で、模型振動実験を実施して、空気中と水中とで構造物の振動状況を比較す

表-1 三次元水中振動台の主要諸元

水槽寸法	13m×13m×2.0m(水深)
振動台(円形)寸法	直径6m
搭載重量	定格30tf 最大40tf
駆動方式	電気・油圧サーボ式
加振方向	水平2軸(X,Y)、上下(Z) 回転( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )
加振周波数	DC~100Hz
最大回転加振角度	X軸まわり $\theta_x \pm 1^\circ$ Y軸まわり $\theta_y \pm 1^\circ$ Z軸まわり $\theta_z \pm 1^\circ$
最大変位	水平(X) $\pm 20$ cm 水平(Y) $\pm 30$ cm 上下(Z) $\pm 10$ cm
最大速度	水平(X) $\pm 75$ cm/s 水平(Y) $\pm 150$ cm/s 上下(Z) $\pm 50$ cm/s
最大加速度	水平(X) $\pm 2.0$ G 水平(Y) $\pm 1.0$ G 上下(Z) $\pm 1.5$ G

ると、構造物の振動の減衰状況にはほとんど大きな差はない。また、海の中では水圧を受けるが、地震時には静水圧のほかに動的な水圧(動水圧)が、地震力に加えて、構造物に作用する。しかも、この動水圧は水深のほぼ二乗に比例して増加する(水深が2倍となると、動水圧は4倍と急速に大きくなる)ので、大水深の構造物の地震時の安定を検討する場合には、この動水圧は重要な地震外力となる。このように、水が構造物の振動の減衰に大きくは関与しないと思われるうえ、地震時には構造物に動水圧が作用する。このことを考えると、地震時に水は構造物に対して味方ではなく、敵方になっていると考えられる。このように水を敵にした水中の構造物の耐震設計は、陸上の構造物と異なった困難さを伴うことに



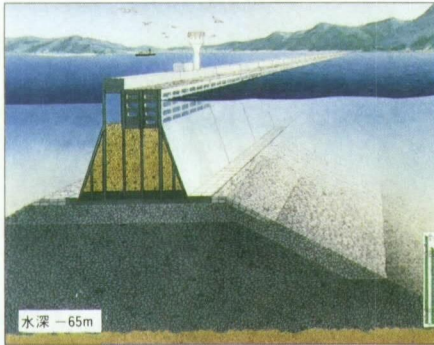


図-2 釜石湾口防波堤



写真-3 防波堤模型振動実験の状況

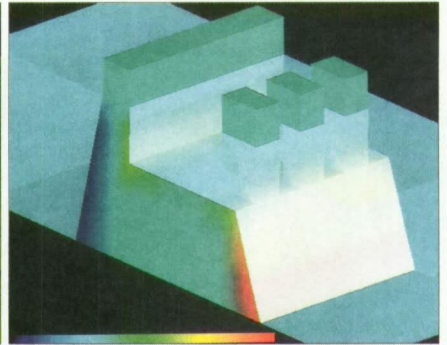


図-4 動水圧計算値のカラー面コンタ図

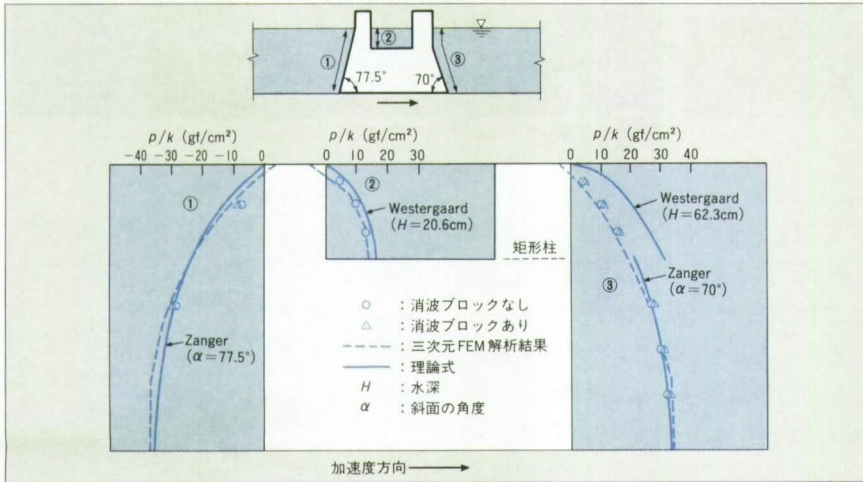


図-3 動水圧の測定結果

なる。この動水圧は水際に建設される岸壁等に作用し、これが写真-1に示したような地震による被害を引き起こすことになる。港湾施設の被害に関していえば、岸壁の背後は埋立地盤になることが多いので、この埋立地盤の液化も岸壁等の地震時の安定に大きな影響を及ぼす。岸壁背後あるいは岸壁の基礎地盤で液化が発生すると、岸壁が海側に押し出され、写真-1に示したような大きな被害となることが多い。

### 水中振動台による模型振動実験

近年、船舶の大型化とともに大水深の岸壁が建設されている。また、津波による被害を防ぐことを主要な目的として、湾口の大水深域に津波防波堤が建設されている。図-2には現在、建設中の釜石湾口防波堤の断面図を示す。この釜石湾口防波堤の建設地点の最大水深は約-65mであり、釜石湾口防波堤は、わが国ではあまり例のない大水深海洋構造物である。防波堤は水中

に建設されているので、われわれはその大きさを実感できないが、図-2の右側には新幹線の車両を示しているので、その大きさを想像してもらいたい。こうした大水深域の防波堤の地震時の安定性の検討のために、水中振動台は活用される。写真-3は、静岡県の下田に建設中の大水深防波堤の水中振動台による振動実験の状況である。防波堤のコンクリートケーソンのアクリル製模型の加振中の様子を示している。この実験より得られた防波堤ケーソン模型に作用する動水圧の測定結果を図-3に示す。図の上を示す防波堤ケーソン模型断面の壁面①、②、③に作用する動水圧が示されている。○、△印が動水圧の測定結果で、それぞれ②の位置に消波ブロックがある場合と、ない場合の測定値を示している。実線は鉛直な壁に作用する動水圧を算定するWestergaard式、あるいは斜面に作用する動水圧を算定するZanger式の計算結果を示している。点線は有限要素

法による三次元水-構造物連成系の地震応答計算結果であり、測定値と一致しているのがわかる。こうした実験結果の解析とは別に、振動実験の測定値の可視化についても検討している。図-4は測定値ではないが、前述した三次元地震応答計算結果の動水圧を可視化した例である。この図は動水圧のカラー面コンタであり、図中にカラーレジェンドが示されているが、赤色が最大値、青色が最小値である。こうした可視化技術を踏まえて、振動実験の測定値の可視化を目指している。

一方、わが国では海上空港が建設されることが多く、今後も関西国際空港の二期工事、中部国際空港等の海上空港の建設が予定されている。このような海上空港等を地震時においてより安全に、かつ経済的に建設するために、三次元水中振動台を用いた各種検討が実施予定となっている。また、最近、大型浮体式構造物の実証的な検討が実施されているが、こうした浮体式構造物の地震時の安定に関する各種検討（上下動が浮体式構造物に与える影響、浮体の係留施設等の耐震性の検討）にも、三次元水中振動台は利用可能である。

すでに述べたように、水中の構造物の地震時の安定に対して、水は敵に回っているが、港湾構造物の場合は水とは縁が切れないので、少しは水と仲良くしたい。こうした観点から水を味方にして、地震時に水による制震効果を期待できるような構造物の検討を、三次元水中振動台により実施する予定となっている。