

大規模波動地盤水路の建設とその利用

CONSTRUCTION OF A LARGE HYDRO-GEO CHANNEL AND ITS USE FOR COASTAL ENGINEERING RESEARCH

高橋重雄¹・山崎浩之²・下迫健一郎³・姜 閔求⁴・善 功企⁵・高山知司⁶
S. TAKAHASHI, H. YAMAZAKI, K. SHIMOSAKO, Y.K. KANG, K. ZEN and T. TAKAYAMA

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所特別研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 運輸省港湾技術研究所土質部動土質研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 工博 九州大学大学院教授 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

A large wave flume named 'Large Hydro-Geo Channel' was constructed in March 2000. The flume has a length of 184 m, width of 3.5m and depth of 12m with a sandbed of 4m deep in addition to a piston-type wave-maker generating 3.5m waves and a current generator with 20m³/s. Large-scale experiments can be conducted with a model scale of 1/5 to 1/1, without major scale effect problems. The wave flume is expected to contribute to promote performance design of maritime structures by large-scale experiments including their failure processes: deformation of the structures, breakage of members, scouring and liquefaction of the foundation. The wave flume should also contribute to reveal the mechanism of sea-seabed interactions.

Key Words : Model experiment, scale effect, similitude law, sandbed, wave flume, wave generator, current generator, seepage flow generator, performance design, sea-seabed-structure interactions

1. まえがき

運輸省港湾技術研究所では、ほぼ実規模で波と地盤に関する実験ができる「大規模波動地盤水路（以降、波動地盤水路と称す）」の建設を平成7年から進めており、平成12年3月に完成した。

図-1は波動地盤水路の概要を示すもので、主水

路の長さが184m、幅3.5m、深さ12mであり、長さ67m深さ4mの砂地盤槽を持っている。標準的な水深は5mであり、ピストン型の造波機により最大波高3.5m（周期6～8秒）の造波が可能である。この主水路に平行に環流水路があり、最大流量20m³/sの流れを起こすことができる。また砂地盤槽の下部には、地盤を液状化させる注水装置を有している。

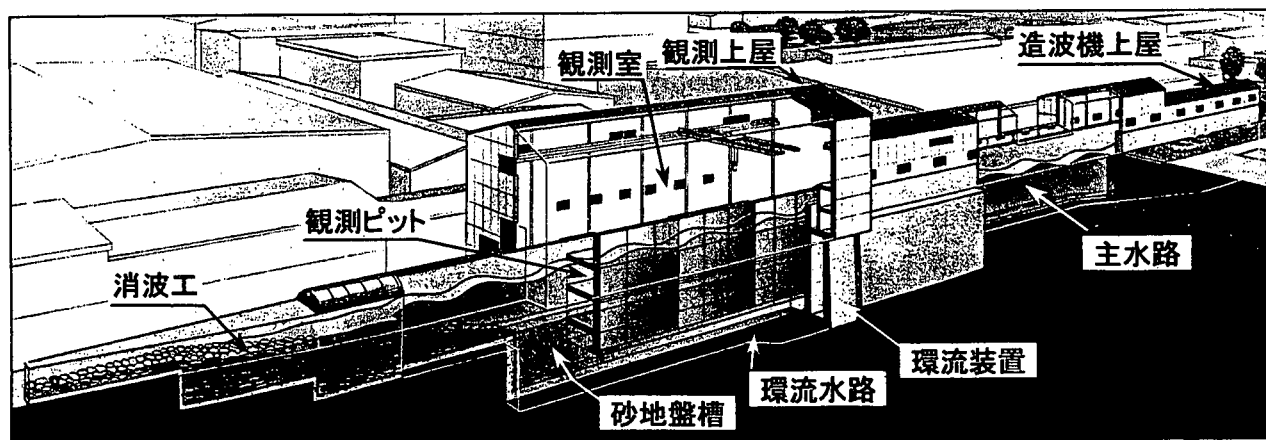


図-1 波動地盤水路全体図

この水路での実験は、模型縮尺が1/5から1/1程度であり、地盤や構造物の相似則の問題がかなり解消できることが大きな特長である。

こうした大規模な造波水路は、ドイツのハノーバー大学のGWK (350m×5m×7m, 最大波高2.5m)、オランダのデルフト水理研究所のDelta Flume¹⁾ (233m×5m×7m, 最大波高2m)、日本の電力中央研究所の大型造波水路²⁾ (205m×3.4m×4m, 最大波高2m) などが有名であるが、波動地盤水路は造波波高が世界最大であるだけでなく、砂地盤槽、環流装置、本格的な観測窓を有することなど、多くの特長を有する水路である。

波動地盤水路は、港湾技術研究所水工部耐波研究室と土質部動土質研究室の長年の念願が実現したものであり、その最初の要求は昭和63年(1988年)にさかのぼる。平成6年に平成7年から5ヶ年の運輸省の研究施設整備として予算が認められ、多くの方々のご協力を得て建設が進められた。平成7年および8年度に水路本体、平成9年度に上屋が建設され、そして平成10年度に造波装置、平成11年度に環流装置、注水装置、観測窓等が完成している。

本施設の今後の利用にあたっては、多くの研究機関との共同利用が考えられている。本報告は、この

施設の概要や特長、さらには今後の利用の方向について述べるものである。

2. 施設の目的と実験

(1) 主要な目的と予想される実験

波動地盤水路は、実規模で地盤を含む実験ができる施設として整備されている。図-2は、波動地盤水路で予想されている実験のいくつかを示したものであるが、このほかにも環流装置を用いた実験など数多く予想されている。なお、この施設による実験の主たる目的は、

- ① 海域施設の性能設計の推進
 - ② 海岸・港湾工学上の困難な問題のブレイクスルー
 - ③ 新たな技術開発
- であり、特に①と②について以下に説明を加える。

(2) 性能設計のための実験

性能設計は、構造物の性能を具体的に示すことができる設計法であり、21世紀の海域施設の耐波設計に適用することが考えられている³⁾。性能設計においては、変形量の把握が重要であり、特に設計波を上回るような波が作用した場合の破壊(変形)特性を把握した設計が必要となっている。波動地盤水路は、実規模に近い実験ができるため相似則の問題がほとんどなく、破壊の状況(変形)を定量的に検討する有力な手段となる。特に、地盤の変形や構造物部材の破壊などを評価でき、種々の破壊が連鎖的に発生することを検証できることが重要である。性能設計は、より高度な設計であり、また結果的に構造物をより経済的に建設できると考えられている。

(3) 波・地盤・構造物の相互作用の解明

この施設は、地盤槽を有することが大きな特長であり、地盤を含めて、波と構造物の相互作用が検討できる。特に地盤の液状化や吸出、洗掘などこれまで解明が困難であった基本的問題を解決することが期待される。また、海浜の岸沖漂砂など海浜変形に関連する問題についても実験的な解明が期待されており、さらに、波によるマウンドや地盤の破壊など土質力学的な問題についても検討する予定である。

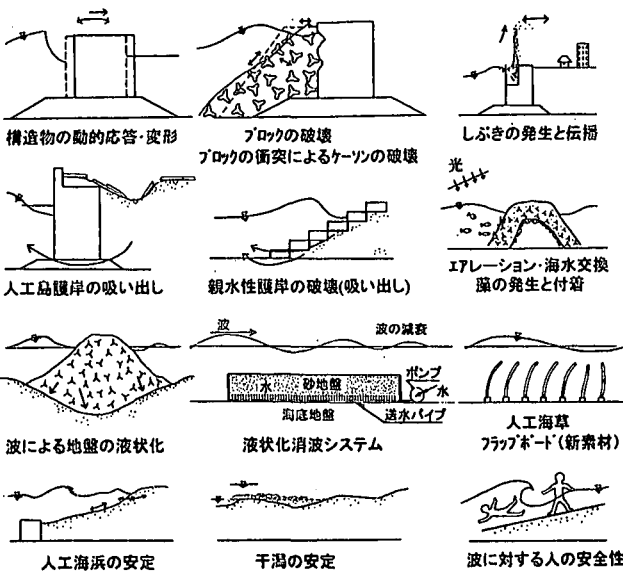


図-2 波動地盤水路での実験

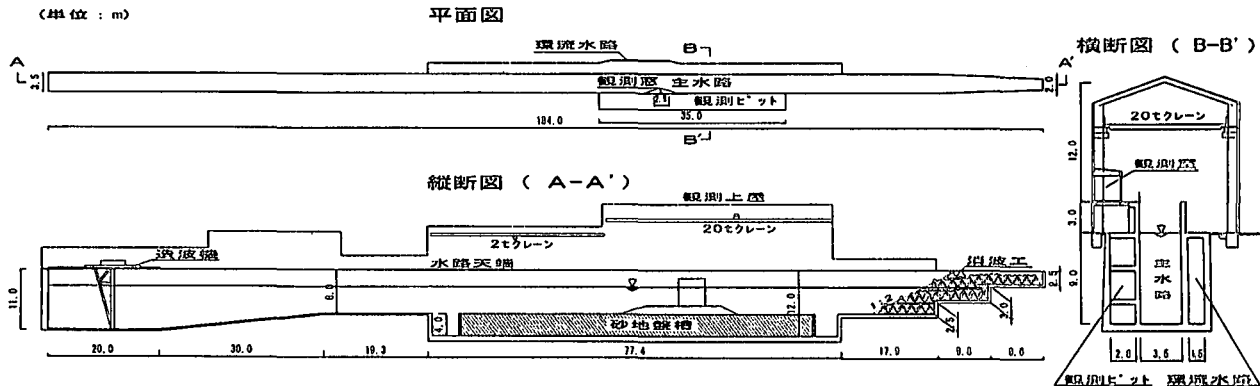


図-3 水路の平面・断面図

3. 施設の概要

(1) 水路

a) 概要

図-3は、水路の平面・断面図を示すものであり、長さが184m、幅3.5mである。観測ピットと環流水路が主水路に平行に設けられている。水路全体に上屋があり、特に観測ピット(35m×2.8m)付近は地上からの高さが15mある観測上屋(40m×15m)となっており、観測室(30m×3m)も設けられている。水路の深さは12mであり、底面から4mまでが砂地盤槽であり、水深が標準的となる5mでは静水面から水路天端まで3mとなる。水路は半地下式で、地上部の高さは3mである。

なお、波動地盤水路での実験は、現地の1/5～1/1程度の縮尺を想定しており、それによって水路の諸元が決められている。例えば、外洋で水深15m、波高10.5mの場所を対象にし、縮尺を1/3とすると、水路では水深5m、波高3.5mとなる。この場合、水路幅は現地で10.5mに相当する。なお、通常は真水を使うが、1週間程度の期間であれば、海水を用いた実験も可能なように、防食対策をとっている。

水路の設計では、水路に水がない場合の外側からの土圧と、水路に水がある場合の水圧(水路天端まで満水時の水圧)や波作用時の碎波圧、模型設置時の土圧などを考慮している。水路壁の設計では単に強度だけでなく、水路天端の変位も重要であり、造波装置や観測台車を水路天端上に設けるために、変位を小さくする必要があった。なお、水路の建設においては、建設位置が土丹層であるためその掘削強度が問題となり、また海に接しているため、水の処理が課題となったが、適切に施工することができた。

また、消波工は図-3に示したように勾配1:2の断面にしており、315個のテトラポッド(1ton/個)を用いている。このテトラポッドは、防波堤の消波工としての実験にも使う予定である。

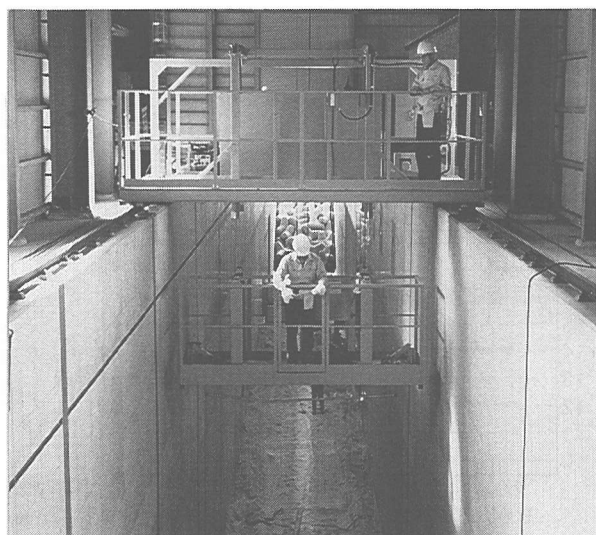


写真-1 観測台車

b) 付帯設備

写真-1は観測台車であり、本体は水路天端のレール上を移動でき、水路底面まで降りられる昇降台を持っている。観測台車は、模型や計測装置の設置、実験の観測等に重要な役割が期待されている。実験の観測には、観測ピットも重要であり、長さ30mにわたって主水路に平行に設けられているが、特に中央部の10mの範囲にはアクリル製の観測窓があり、砂地盤底面から水路天端の水の動きまでが直接観測できるようになっている。

水路には、このほかの付帯設備として観測上屋に取り付けられた20tonのクレーンなどがある。

(2) 砂地盤槽と注水装置

a) 概要

注水装置は、現在開発している液状化した砂地盤を用いた液状化消波システム⁴⁾の実規模実験用の注水装置として設けたものである。ただし、注水装置は、砂地盤を均一に形成するための装置としても利用することができる。

注水装置は、砂地盤槽の底面に設けた240本の注水パイプとそれに供給するポンプと配管からなっており、写真-2は設置された注水パイプを示している。1本の注水パイプは直径4cm、長さ3.4mの塩ビパイプからなり、その両側面に4cm間隔で直径4mmの孔(84個×2列)を有しており、全体が防砂シートで覆われている。水は、全揚程40m、吐出し流量6m³/minの能力をもつ水中ポンプ(75kW)によって供給しており、その調整は、配管の途中にある電動バルブによって制御している。

砂地盤槽の砂(総量1,500ton)はフラタリーサンドと呼ばれる工業用の砂で、同じ粒径の砂が常時補給可能な砂である。その中央粒径は0.2mm程度(均等係数1.5, 比重2.64, 透水係数0.05cm/s)であり、相似則等から比較的細かい砂としている。また、水中の地盤表面が見やすい白色の砂である。

b) 設計上の留意点

①注水量と圧力：最大注水流量は砂の透水係数の

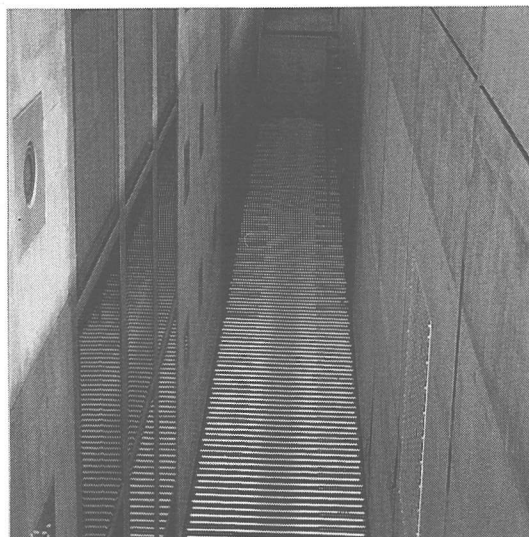


写真-2 設置された注水パイプ

1.2倍に相当する流量にしており、そのとき注水パイプ入り口における圧力は、地盤厚さの3.5倍の水頭に相当する。

②注水パイプ諸元：注水装置としては、地盤をより均一に液状化させることが重要である。従って、注水パイプ間隔は地盤厚さの1割以下にしている。また、パイプの長さや管径については、最大流速時のパイプ内の圧力のばらつきが0.5%程度と小さくなるように決めている。また、防砂シートは、流速が大きくなるほど透水係数が小さくなる傾向を持ったものとして、織布T-500（厚さ0.09cm、透水係数0.03cm/s）を採用し、これを4重に巻いている。また、注水時の高水圧によるシートの膨らみを防ぐため、孔1個ごとの間隔（4cm）でシートを固定した。

c) 試験運転結果

①均一な液状化地盤形成：写真-3は砂の投入の様子を示すもので、バックホウで水路内の1ヶ所に直接投入しているが、注水装置を用いて地盤を液状化させることによって、長さ67m全体にわたり均一かつ水平な地盤を形成することができた。写真-4は観測窓から見た水平になっている地盤である。

②波による液状化現象：試験運転時にも波（水深5m、周期6秒、波高2.7m）によって地盤が液状化することが確認されている。砂地盤が地盤表層で幅50cmほど大きく動いたことや、波作用によって上昇した地盤内の過剰間隙水圧による水の流出がしばら

く続くなど、小型模型実験では観測できなかった現象が生じており、今後さらに実験を行う予定である。また、液状化消波システムの実験も予定している。

(3) 造波装置

a) 概要

造波装置はピストン型で、電動モータによるラック&ピニオン駆動方式であり、電動機はACサーボモータ（220kW×4台）を用いている。図-4は造波装置の概要を示したものである。

本造波装置の大きな特長は、造波板の背面にも水を満たす背面水バランス方式を採用していることである。通常は背面側にも造波することになり、2倍のパワーが必要となるが、この方式では、背面側に造波しないよう工夫している。すなわち、造波板の位置を動かすことによって、造波板背面の距離を波長に比べて常に小さくし、背後の水面は上下動のみとして背面での造波パワーをほぼゼロとしている⁵⁾。ただし、短い周期では、造波パワーが小さいため、背面にも造波することを許しており、消波装置も設けている。図-5は、造波周期と背面距離の関係および背面造波の関係を示したものである。造波

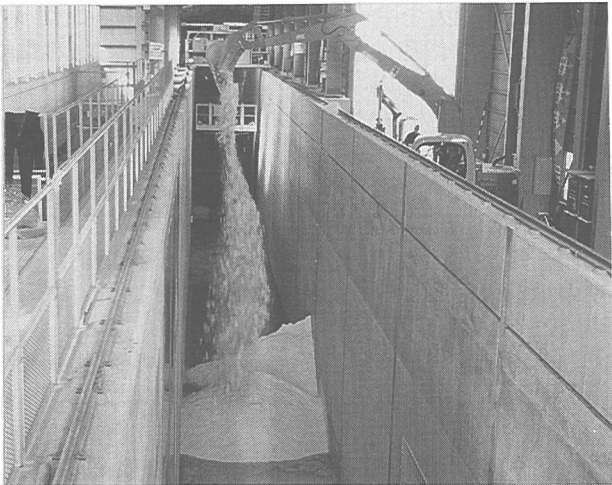


写真-3 砂の投入

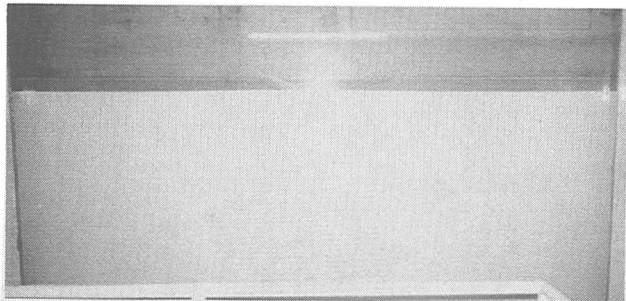


写真-4 液状化によって水平になった砂地盤

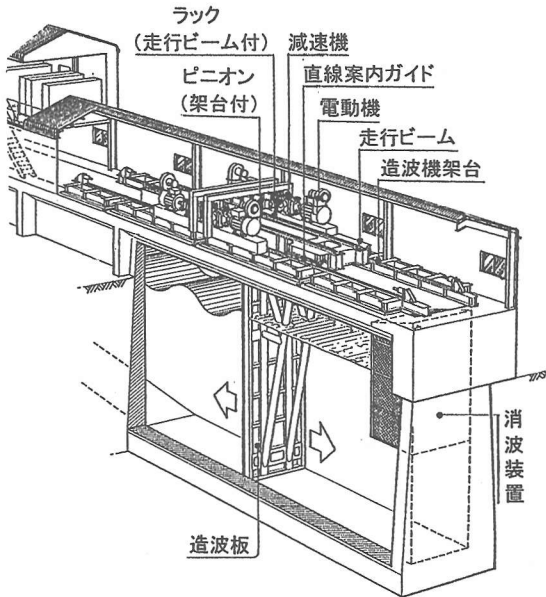


図-4 造波装置の概要 (イラスト)

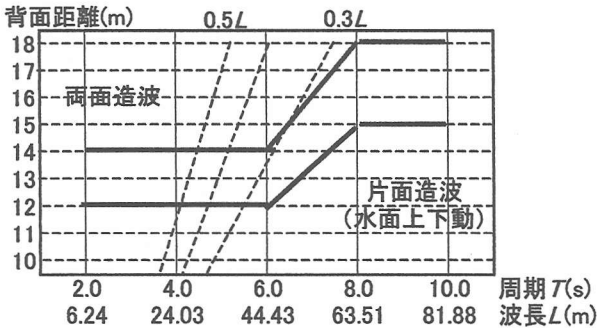


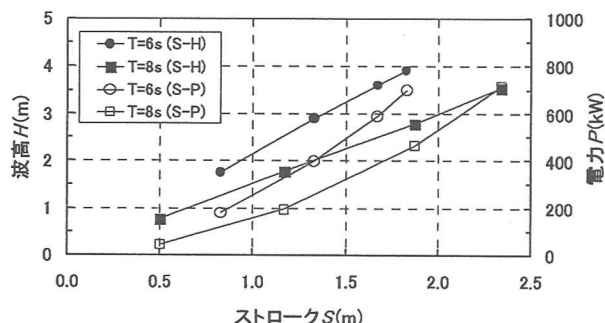
図-5 造波周期と背面距離の関係

装置は、最大ストロークが±4 mであり、造波板前面での水深が7.6mのとき、最大波高3.5m（周期6～8秒）の造波が可能である。造波機の制御方法としては、変位制御だけでなく、造波板前面の水位計のデータを用いて、反射波を吸収する吸収制御による造波も可能である。なお、将来的には不規則波における長周期成分についても吸収できるよう、制御システムの改良を予定しており、そのため、十分なストロークを確保できるように駆動部の全長は28m（駆動部の稼動範囲は16m）と長くなっている。

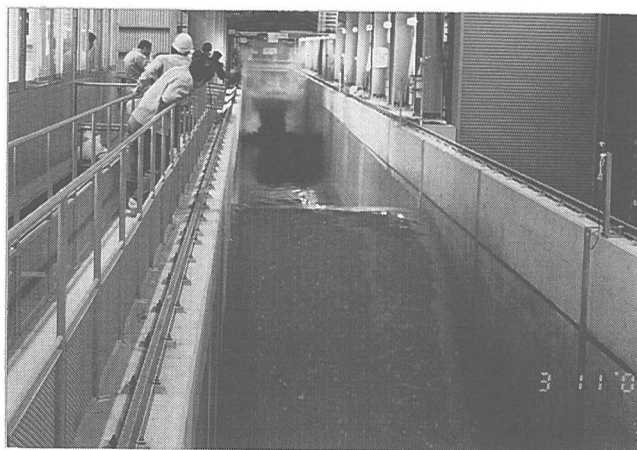
b) 性能試験結果

図－6は、造波装置の性能試験時における造波板のストロークと造波版前面での発生波高およびパワー（電力）の関係を示したもので、試験時の水深は造波板前面で7.6mである。造波板位置では設計値の波高3.5mの造波が確認されており、そのとき背面には造波しておらず、パワーも設計値よりかなり小さい590kW（2乗平均値）となっている。また、造波能力には余裕があり、設計値の110%（波高3.8m）の造波も確認しており、そのときのパワーは700kWであった。こうした余裕は不規則波を発生する場合に必要となる。なお、不規則波の造波試験も行っており、造波する位置において有義波高1.4m（周期5.49s）の波が確認されている。

写真－5は、実際の波の作用状況を示したものである。波は水路の斜面で波高が増大し碎波しており、その碎波波高は4mにも達している。水路内に構造物を設置していないため、波は水路端部の消波工に



図－6 ストロークと発生波高，造波電力



写真－5 造波された波

衝突し、大きな波高のときにはやや大きな音と振動が発生した。また、条件によっては、多少ではあるが、飛沫が水路壁を越える場合もあった。

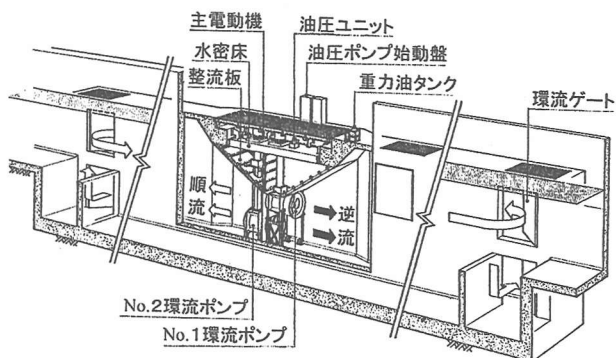
(4) 環流装置

a) 概要

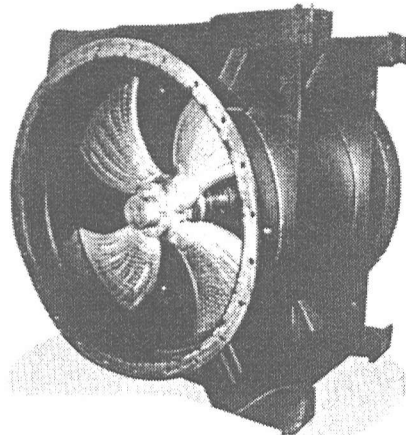
環流装置は水路内に流れを発生させるためのもので、ポンプ設備、ゲート設備および制御装置により構成されている。図－7は環流装置の概要を示したものである。環流水路は主水路と平行に設置されており、長さ76m、幅1.5m、高さ8.5mで、ポンプ部においては幅2mである。

環流水路のほぼ中央に、220kWの軸流可動翼式ポンプが上下に1台ずつ配置されている。インペラの回転数は240rpmで常に一定であり、インペラブレードのピッチ角を変化させることによって、流速および流れの向きを制御する。ポンプの最大流量は2台あたり20m³/s（水深5mのとき、平均流速が1.1m/s程度）である。写真－6は、ポンプ本体を示したものである。

ゲート設備は、沖側と岸側のそれぞれに上下2ヶ所、中間に1ヶ所計5門あり、目的に応じて各ゲートを開閉し、所定の流れを発生させる。各ゲートの大きさは幅2.5m、高さ3.5mであり、ゲートの開閉は油圧式である。



図－7 環流装置概要



写真－6 環流装置本体

b) 性能試験結果

性能試験では、水深3mと5mの条件で、ポンプのピッチ角を変化させて運転を行い、流速計で水路内の流速分布を測定している。流速の測点は、水路幅方向に3点、鉛直方向には、水深3mのとき3点、5mのとき5点とした。

図-8は、ピッチ角と流量の関係を示したもので、水深3mと5mの場合において、順流（造波機側から消波工側への流れ）と逆流の例である。水深3mでポンプを2台連動させ順流にした場合、ピッチ角を最大の25°にすると約20m³/sの流量が得られており、水深5mの場合もほぼ同様の流量となっている。また、逆流の場合、やや流量が少なく、水深5mの場合、ピッチ角25°のときの流量は約17m³/sであった。なお、消費電力は2台連動させたとき最大でほぼ430kWであった。

図-8の試験結果は平均流速で整理しているが、流速計で得られた波形には周期的な変動が見られ、特に流速が大きい場合にその傾向が顕著であった。これは、ゲートが水路の途中にあるため、環流水路から主水路へ出た水や、主水路から環流水路へ入るべき水の一部が造波機側や消波工側へ流れ、主水路内で長周期の振動が発生したためと考えられる。したがって、変動の小さい安定した流れを発生させるためには、ゲート付近に整流板を設けるなどの対策が必要と思われる。

また、流れ発生時に砂地盤内の砂が移動することを避けるため、砂地盤上に硬質ゴム製の高比重マット（比重3.9）を敷設し、その上におもりとして鋼製のアングルを設置したが、流速が1m/s前後になると、水路側壁とのわずかな隙間から砂の吸い出しが生じた。さらに、流速が2m/s近くなると、ゲート近くで発生する大きな渦によってマット全体がめくれ上がり、砂地盤が大きく洗掘された。したがって、こうした速い流れに対して砂地盤の安定性を確保する工夫も必要である。

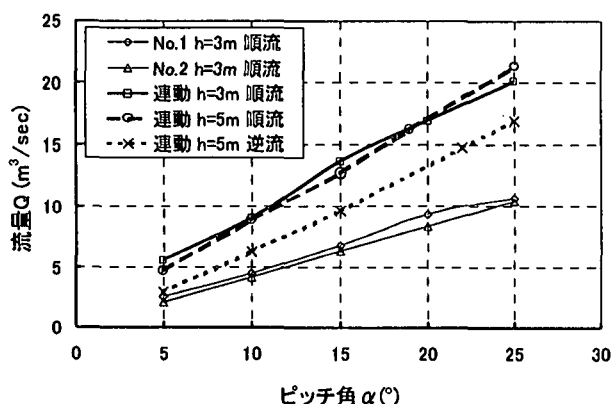


図-8 ピッチ角と流量の関係

(5) 計測装置

水路には波を測るための容量式波高計が6台、砂地盤内の水圧を測るための間隙水圧計が30個すでに設置されており、さらに、実験によっては圧力計、

変位計、流速計などの各種計測器を使用することになる。これらのセンサーの出力ケーブルはすべて、水路脇に設置されたシステムラック内のアンプに接続される。ラック内には、アンプの他にデータ収集用パソコンも組み込まれており、LANによって計測室内の制御・解析用パソコンと結ばれている。データの収集は、計測室内のパソコンからの遠隔操作によって行われる。また、観測室内には、造波装置、環流装置、注水装置の制御盤も設置されている。

(6) その他

波動地盤水路の設計及び建設に伴って、その他以下の点について留意している。

- ①水の管理：波動地盤水路で使う水は、当所の大水深海洋構造物実験水槽の貯留水槽（最大貯水量：2,800m³）に常に貯水しており、波動地盤水路から排水する時もこの貯留水槽に貯め、水の有効利用を図っている。
- ②給排水装置：貯留水槽と波動地盤水路間の給排水のため、出力30kWの水中ポンプ（揚程10m、流量10m³/min）を1台ずつ設置しており、水深5m分の給・排水時間はそれぞれ6時間と10時間程度である。
- ③安全対策：水路上に手すり、環流水路内への吸い込み対策、救命器具の設置、見学者通路の設定等を行っている。

謝辞

波動地盤水路の建設にあたっては、多くの方々のご助言、ご指導を得ている。特に渡辺元所長、野田元所長、戸嶋元所長、井上元所長、小林前所長、小和田所長のご指導のもと、港研企画部、管理部、水工部、土質部の方々に多大のご協力を得ており、鈴木主任研究官をはじめ水工部耐波研究室の研究員の熱心なご協力も得ている。また、工事にあたられた五洋建設、東亜建設工業、石川島播磨重工業、三井造船、東亜鉄工、日本海洋コンサルタントほか各社の熱心なご協力を得ている。ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Delft Hydraulics Laboratory: Delta Flume, *Hydro Delft*, No. 73, 27p, 1986.
- 2) 中村 広・鹿島遼一・斎藤昭三・丸山康樹・清水隆夫：海浜変形実験用大型造波水路の建設と計測システム、第28回海岸工学講演会論文集, pp.193-196, 1981.
- 3) 高橋重雄・下迫健一郎・半沢 稔・杉浦 淳：防波堤の安定性能照査と性能設計—海域施設の新しい耐波設計について、海洋開発論文集, 第16巻, 2000. (投稿中)
- 4) 姜 閔求・高橋重雄・山本 悟・三浦裕信・高野忠志・下迫健一郎・鈴木高二朗：液状化した砂地盤による消波システムの開発、港湾技術研究所報告, 第38巻, 第3号, pp.29-89, 1999.
- 5) 元良誠三・小山健夫・藤野正隆・伊田 力・小柳雅志郎：東京大学船舶航海性能試験水槽について（第1報）、造船学会論文集, 第128号, pp.213-219, 1970.