

研究展望

波—地盤系水路における大型水理模型実験の役割

THE ROLE OF LARGE SCALE HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS IN HYDRO-GEO FLUME

下迫健一郎¹

Kenichiro SHIMOSAKO

¹ 正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部耐波研究室長 (〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1) shimosako@pari.go.jp**Key Words** : model experiment, scale effect, similitude law, wave flume, sea-seabed-structure interactions

水理模型実験は、自然現象の解明や構造物の設計・施工における問題解決のための、きわめて重要で有効な手段である。ただし、小縮尺の模型実験では縮尺の影響により実際の現象を再現できない場合もあり、こうした問題を克服するには、実規模に近い大型実験施設を用いることが、最も有効な解決策である。本報告は、水理模型実験における縮尺の影響に関する既往の研究例および大型実験施設を用いた実験結果の例を紹介し、大型水理模型実験の重要性と今後の展望について述べたものである。

1. はじめに

港湾工学・海岸工学の分野において、自然界のさまざまな現象を解明する主な手段としては、現地観測、数値計算、模型実験が考えられる。現地観測は、最も直接的な方法であるが、一般に大掛かりな準備が必要となることや、自然条件に左右されるため、希望するデータが得られない場合もあることなどの問題点がある。数値計算においては、現象をモデル化することによって方程式を構築し、その方程式を解くことによって、外力から結果を導く。近年、電子計算機のめざましい発達によって、以前はほとんど不可能と考えられていた複雑な数値計算も、比較的短い時間で計算できるようになっている。ただし、必ずしもすべての現象について方程式が明らかになっているわけではなく、メカニズムが明らかになっていない現象も多い。このような場合に外力から結果を求めるためには、経験的な知識に頼るか、水理模型実験を行うことによって結論を導く必要がある。また、現在確立されている数値計算手法も、ほとんどが水理模型実験によってその妥当性が検証されている。このように、水理模型実験は、自然現象の解明や、構造物の設計・施工における問題解決のための、きわめて重要で有効な手段である。

波を外力とする水理模型実験の場合、一般に粘性力に比べて重力が卓越するので、重力と慣性力を相似させるフルード則にしたがって実験を行うことにより、波の特性を再現することができる。ただし、従来の実

験施設では模型の縮尺が小さく、実際の現象を再現できない場合もあった。たとえば砂の移動に関する現象では、砂の粒径を小さくすると、その現象を支配している力学機構の相似性が失われるため、現象を正確に再現することはできない。また、波の打ち上げによって生じるしぶきについては、基本的に現地と模型実験とで飛沫の大きさは同じであり、相似則は成立しない。さらに、材料の強度についても、模型実験で現地と同じ材質を用いた場合、作用する外力が小さいため相対的に強度の高い材料を用いることになり、破壊現象を再現できない。こうした模型実験の限界を克服するには、実規模に近いスケールでの実験が可能な大型実験施設を用いることが、最も有効な解決策である。

本報告では、まず水理模型実験における縮尺の影響に関する既往の研究例を示す。次に、大型実験施設の例として、独立行政法人港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路（以降、波動地盤水路と呼ぶ）を例にとり、その概要およびこれまでに実施した実験の例を紹介する。さらに、大型水理模型実験の重要性と今後の展望について述べる。

2. 水理模型実験における縮尺の影響に関する既往の研究例

(1) 海浜変形に関する研究

海浜変形に関する水理模型実験の実施に当たっては、底質の粒径をどのように設定するかが最も大きな課題

である。すなわち、波に関する模型縮尺に合わせて底質の粒径を小さくすると、縮尺が小さい場合には底質の粒径が非常に小さくなってしまい、たとえば砂のように粒子同士の摩擦力が卓越し、主として密度が力学的特性を左右するものから、粘土のように粘着力が卓越し、含水量が力学的特性を支配するものになってしまう、実際の現象を再現できなくなる。したがって、底質の力学的特性が変化しないような適切な粒径を用いなければならない。なお、実際の海浜変形は沿岸方向も含む3次元的な現象であり、より複雑な問題を含んでいるが、ここでは岸沖方向の2次元的な変形に関する研究に限定して紹介する。

岩垣ら¹⁾は、縮尺の異なる2種類の模型実験をもとに、波および底質粒径の縮尺効果について、底質粒径と沖波波高との比が汀線の移動量や平衡断面形状などに及ぼす影響を明らかにした。また、土屋ら²⁾は、岩垣らと同様に縮尺の異なる2種類の模型実験を行い、実験結果が相似となる条件について、底質粒径の縮尺と波の縮尺との関係において示した。さらに、清水³⁾は、海浜変形パターンと変形限界水深が同時に相似となる底質粒径の縮尺を現地での沖波波高から求める方法を提案し、小縮尺の実験では、粒径の縮尺は波の縮尺に関係なく一定となること、縮尺1/150程度までであれば、現地と相似な実験結果が得られることを示している。これらは、いずれも実験手法を工夫することによって、縮尺の影響を除去しようとするものである。

一方、近年では大型造波水路を用いて、縮尺の影響を考慮する必要のない実験を行っている例も多い。たとえば、鹿島ら^{4),5)}は、電力中央研究所の大型水路⁶⁾ (幅3.4m、深さ6m、長さ205m、最大波高2m)において岸沖漂砂に関する大規模実験を行い、岸沖地形変化予測に関するモデルを提案した。また、張ら⁷⁾は、建設省土木研究所(現・国土交通省国土技術政策総合研究所)の大型2次元水路(幅2m、深さ5m、長さ135m)において、混合砂を用いた2次元海浜変形に関する実験を行い、海浜砂の分級機構についての検討を行った。また、張ら⁸⁾、山本ら⁹⁾は、可逆的な海浜変形を対象とした不規則波による大規模実験を行い、バーやバームの形成過程を明らかにした。さらに、田中ら¹⁰⁾、池野ら¹¹⁾は、混合砂を用いた2次元海浜変形に関する大規模実験を行い、粒径別の漂砂量や浮遊砂フラックスについて検討している。

海外においても、同様な大規模実験による研究が行われている。たとえば、S.-Arcillaら¹²⁾は、デルフト水理研究所(オランダ)のDelta Flume¹³⁾(幅5m、深さ7m、長さ225m、最大波高2m)において、碎波帯近傍における海浜変形に関する検討を行っており、Petersら¹⁴⁾は、ハノーバー大学(ドイツ)のGWK(幅5m、

深さ7m、長さ350m、最大波高2.5m)において、碎波帯における浮遊砂の移動について検討している。

(2) 衝撃碎波力に関する研究

波力については、一般にフルード則が成立するケースが多い。しかしながら、碎波する波が空気を巻き込んで壁面に衝突するような空気圧縮型の衝撃碎波力が発生する場合には、小型実験では波力を過大評価することがある。これは、現地と模型とで大気圧が同じであることが原因であり、空気圧縮力に関しては、空気に関するマッハの相似則に基づいたバグノルド則と呼ばれる相似則が存在する。ただし、実際の空気圧縮型の衝撃碎波力においては、空気の漏出が発生することなどからバグノルド則を単純に適用することはできないことが多い。樫木ら¹⁵⁾は、栈橋に作用する衝撃的な揚圧力の縮尺効果に関する理論的検討を行い、バグノルド則を適用できる縮尺の下限値を求めている。また、谷本ら^{16),17)}、高橋ら¹⁸⁾は、水面付近の水平板や直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力について、模型実験、理論解析および現地観測により、衝撃力に関する縮尺の影響を検討している。

(3) ブロックの安定性に関する研究

波に対する消波ブロック等の安定性を検討する場合、ブロック自体が破壊しないという前提においては、ブロックの比重を合わせることににより、基本的にフルード則が適用できる。ただし、縮尺があまりにも小さいと、粘性力の影響が無視できなくなると考えられる。島田ら¹⁹⁾は、ブロックの耐波安定性に関する縮尺効果について大規模実験を実施し、ブロック形状と波に関するレイノルズ数が 4×10^5 以上であれば縮尺の影響は無視できるが、それ以下だと安定性を過小評価することを示した。また、Thomsenら²⁰⁾や榊山ら²¹⁾は、ブロックに作用する波力に関する縮尺効果について大規模実験を実施し、実験スケールが大きくなりレイノルズ数が大きくなると、ブロックの抗力係数が減少して、相対的に波力が小さくなることを明らかにした。

一方、ブロック自体の強度を考えると、現地と同じ強度のコンクリートを用いて模型のブロックを製作した場合、模型実験では作用する外力が小さいため相対的な強度が非常に大きくなってしまい、現地での破壊現象を再現できない。Timcoら²²⁾や岡本ら²³⁾は、コンクリート強度を低下させた強度縮尺模型を用い、ブロックの破壊現象を再現する実験を行っている。

(4) 波の打ち上げおよび越波に関する研究

波の打ち上げにおける縮尺の影響を考える場合、波の実質部分である連続した水塊に関しては、基本的にフルード則が適用可能と考えられるが、打ち上げによ

て生じるしぶき（飛沫）を対象とする場合、飛沫の大きさは現地も模型も同じであり相似則は成り立たない。木村ら²⁴⁾は、前面に円柱スリットを有する消波型高基混成堤の越波および波の打ち上げに関して縮尺1/4程度の大規模実験を行い、飛沫の打ち上げ高さ和水塊の打ち上げ高さの比が大規模実験では3倍程度であるのに対して、縮尺1/25程度の小型実験では2倍程度となり、スケール効果により打ち上げ高さを過小評価する危険性を指摘している。

一方、越波量に関する縮尺の影響について、岩垣ら²⁵⁾は、海岸堤防の越波に関して縮尺の異なる模型実験を行い、波の周期が2sより短いと越波量を過大評価する危険性があるが、2s以上だと縮尺の影響はほとんど見られないことを示している。また、Schüttrumpfら²⁶⁾は、海岸堤防の越流に関して小型および大型の水理模型実験を行い、縮尺の影響がほとんどないことを示している。

3. 波動地盤水路の概要

(1) 水路本体の概要

図-1は、平成12年3月に完成した波動地盤水路の概要を示したものである。図-2に示すように、主水路は長さ184m、幅3.5mであり、水路底面から上端までの高さは、造波機側で11m、途中に1/10勾配の斜面があり、その後は消波工のある端部を除いて8mで

ある。ただし、途中で77.4mにわたって深さ4mの掘り込みがあり、そのうち67mの区間は厚さ4mの砂地盤槽となっている。したがって、砂地盤底面から水路上端までの高さは12mになる。水路は半地下式で、地上部の高さは3mである。水路端部の消波工は、図に示すように勾配1:2の断面となっており、1tのテトラポッド315個を用いている。

水路全体に上屋があり、そのうち一部は観測上屋（長さ40m、幅15m、高さ24m）として、実験準備等に必要なスペースを確保しており、観測室（長さ30m、幅3m）と観測ピット（長さ35m、幅2.8m）も設けられている。観測室は、主水路脇の天端上にあり、造波装置等の制御盤や、計測したデータを収集・解析するためのパソコン等が設置されている。観測ピットは主水路と平行して設けられており、地下3階まであって地上から階段で下りることができる。主水路側面の観測ピット中央付近には、図-3に示すように延長方向約10mにわたって大きな観測窓が設けられており、水路天端から砂地盤底面まで内部の様子を直接観測できる。窓は水族館等で用いられているものと同じアクリル製であり、水圧や波圧に耐えられるよう、最も厚い部分では約20cmの厚さとなっている。水路上には、写真-1に示すように観測台車が設置されており、水路天端のレール上を移動可能で、模型や計測装置の設置、実験時の観測等に利用できる。観測台車内には、水路底面まで降りるための昇降台（ゴンドラ）も付属している。

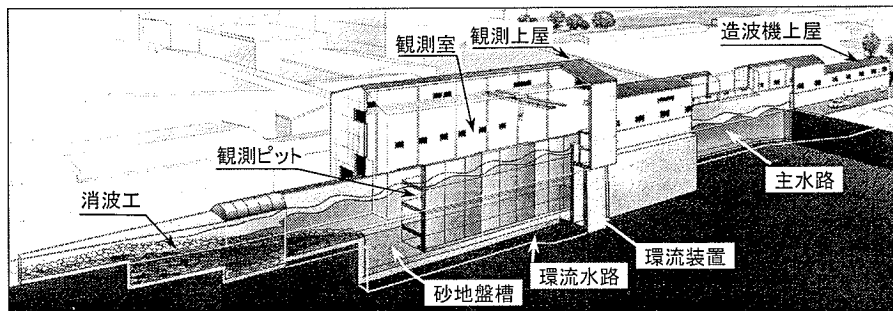


図-1 大規模波動地盤総合水路全体図

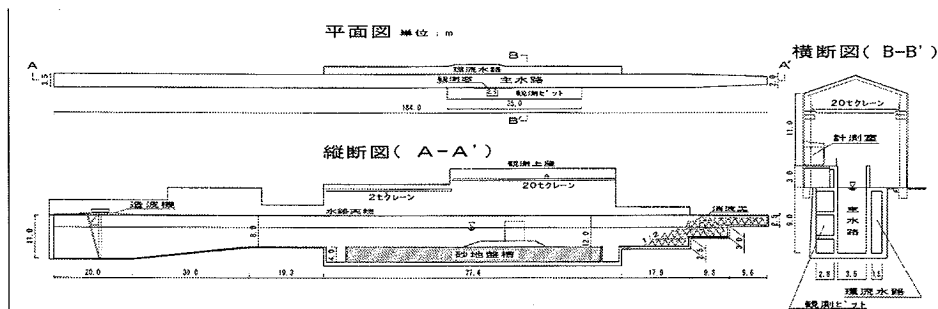


図-2 水路の平面および断面図

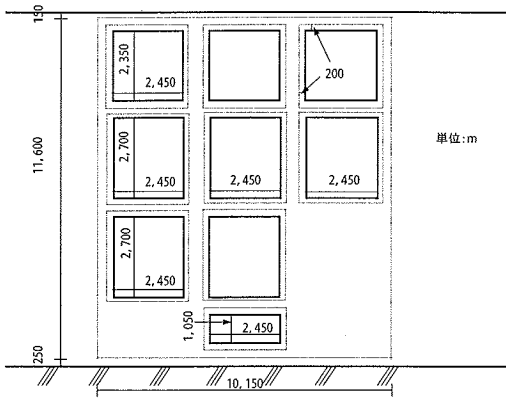


図-3 観測窓の配置

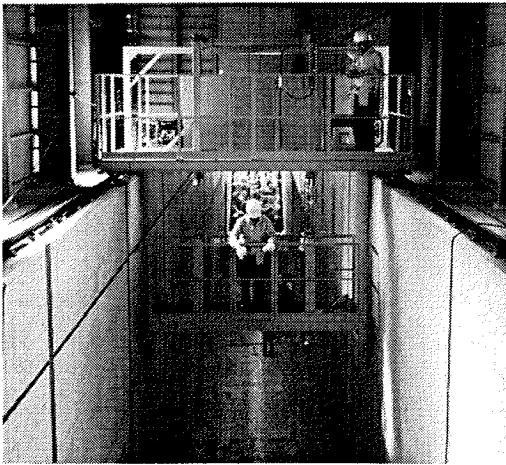


写真-1 観測台車

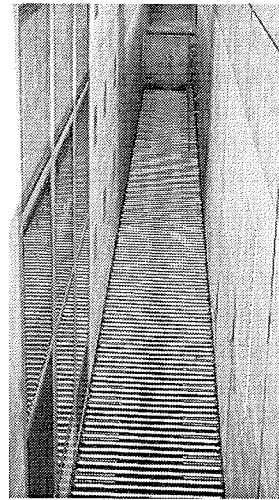


写真-2 設置された注水パイプ

るだけ小さくする必要があった。そのため、掘削後の埋め戻し土の地盤改良を行うとともに、造波機設置場所の近くでは水路天端に補強材を設けて変位を小さくした。

波動地盤水路以外の大規模な造波水路の例としては、2章で紹介した電力中央研究所の大型造波水路、デルフト水理研究所のDelta Flume、ハノーバー大学のGWKや、オレゴン州立大学のSupertank²⁷⁾(幅3.7m、深さ4.6m、長さ104m)などがあるが、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、大規模な観測窓を有することなどの点において、他に類のない実験施設である。

また、模型搬入等のために、20tおよび2tのクレーンが設けられている。なお実験においては通常は真水を使用しているが、1週間程度の期間であれば、海水を用いた実験も可能な防食仕様となっている。

実験時における標準的な水深は、砂地盤上で4~5mであり、水深5mの場合、最大波高3.5m(周期6~8s)の造波が可能である。また、主水路と平行して環流水路(長さ76m、幅1.5~2.0m、高さ8.5m)があり、主水路内に最大流量20m³/sの流れを起こすことができる。さらに、砂地盤槽の下部には注水装置が敷設されており、地盤を強制的に液化化させることができる。これらの装置の詳細については後述する。

水路の設計においては、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)、波作用時の波圧、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は、変位をでき

(2) 砂地盤槽と注水装置

砂地盤槽の砂は、フラタリーサンドと呼ばれるオーストラリア産の硅砂で、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である。工業用のため同じ粒径の砂が常時補給可能であること、現地との縮尺の関係上比較的粒径が細かいほうが適していること、白色で観察しやすいことなどが選択の理由である。砂地盤槽の容積は938m³であり、投入した砂は約1500tであった。

注水装置は、後述する液状化消波システム²⁸⁾の実規模実験用の注水装置としての利用とともに、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を目的として設けたものである。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、注水パイプに水を供給するためのポンプおよび配管からなっており、**写真-2**は、砂を投入する前の注水パイプを示している。注水パイプは直径4cmの塩化ビニール管であり、1本の長さは3.4mで、両側面に4cm間隔で直径4mmの

穴を有しており、砂による目詰まりを防止するため、管全体を防砂シートで覆っている。水は揚程 33 m、最大流量 $8.5 \text{ m}^3/\text{min}$ の能力をもつ 75 kW 級の水中ポンプによって供給しており、配管の途中にある電動バルブによって流量を制御している。最大流量は砂の透水係数の 1.2 倍に相当しており、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。

注水装置は地盤をできるだけ均一に液状化させることが重要であり、注水パイプの間隔を狭くするのが望ましい。パイプ間隔は 27.8 cm であり、パイプ上の地盤厚さ 3.7 m に対して約 7.5% である。また、パイプの長さや管径については、小型実験の結果に基づいて、最大流速時におけるパイプ内の圧力のばらつきが 0.5% 程度となるように決めている。防砂シートについては、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（厚さ 0.09 cm、透水係数 0.03 cm/s ）を 4 重に巻いて使用し、注水時の高水圧によるシートの膨らみを防ぐため、ビニール製のバンドを用いて、注水穴と同じく 4 cm 間隔でシートを固定した。

写真-3 は、砂地盤槽内への砂の投入の様子を示すものである。施設の制約上、バックホウで水路内の 1 か所のみ投入しているが、注水装置を用いて地盤を液状化させることによって、均一かつ水平な地盤が形成された。写真-4 は、形成された水平な砂地盤を観測窓

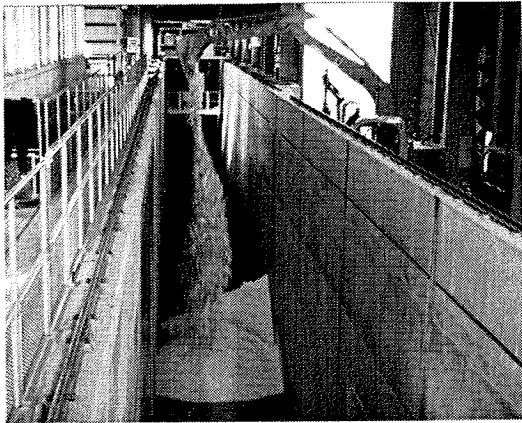


写真-3 砂の投入状況

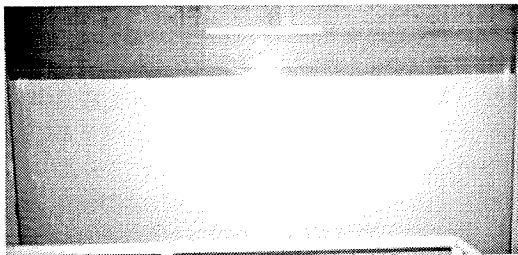


写真-4 注水装置によって形成された水平な砂地盤

から見たところである。なお、注水装置を用いて形成された砂地盤は、緩く堆積した状態である。この状態で周期 6 s、波高 2.7 m の波を作用させると、地盤表面近くでは波によって砂地盤が左右に幅 50 cm ほど大きく動く様子が観察された。これは、砂地盤の有効応力が小さくせん断剛性も小さいので、波による圧力変動によって砂地盤が大きく変形するためである。また、緩く堆積した状態の砂地盤では、波作用によって地盤内の過剰間隙水圧が上昇するため、造波を停止させると地盤表面と地盤内部の圧力差によって、地盤内から水が噴出する現象が見られた。

(3) 造波装置

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 ($220 \text{ kW} \times 4$ 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点である。造波板の両側に水があると、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ため、従来の大型造波装置では背面には水を入れない背面ドライ方式が多い。ただし、その場合は前面側からの静水圧に耐えるだけの反力が必要であり、本施設の場合、静水時における造波板前面での水深が最大で 8 m になるため、反力を確保するためには複雑な構造が必要であった。そのため、背面水バランス方式を採用し、なおかつ背面側には造波しない工夫をしている。すなわち、造波板の中立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

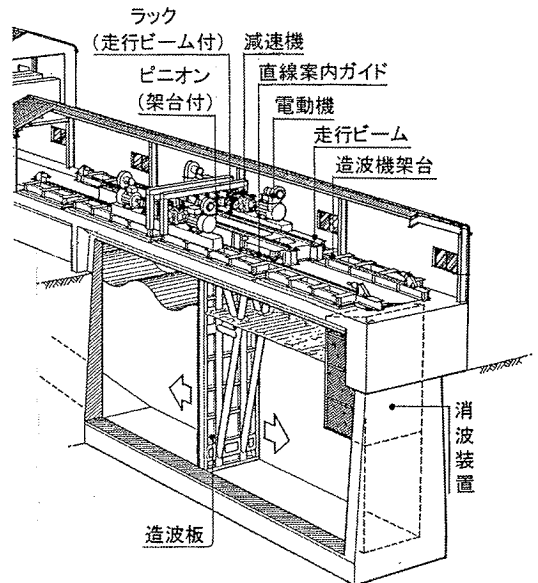


図-4 造波装置の概要

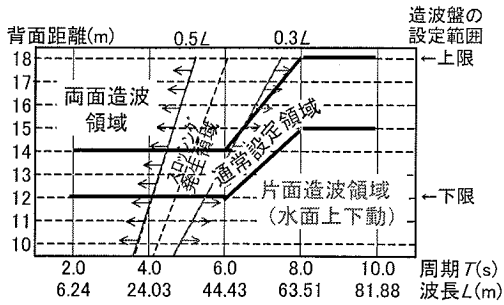


図-5 造波周期と背面距離の関係

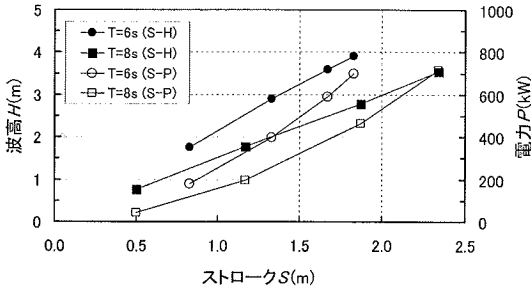


図-6 ストロークと発生波高、造波電力

くし、背後の水面は上下動のみとなるよう調整し、背面での造波パワーをほぼゼロとしている²⁹⁾。ただし、短い周期では、造波パワーが大きくないため、背面にも造波することを許しており、背面側にも消波装置を設けている。

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。造波装置は、最大ストロークが $\pm 4\text{m}$ であり、造波板前面での水深が 8m のとき、最大波高 3.5m （周期 $6\sim 8\text{s}$ ）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 と長くなっている。

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板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 8m 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、このとき背面には造波しておらず、パワーも定格値 880kW よりもかなり小さい 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、設計値を超える波高 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。

写真-5は、実際の波の作用状況を示したものである。

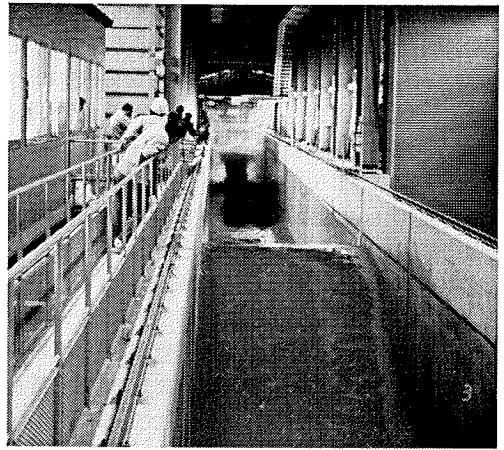


写真-5 造波された波

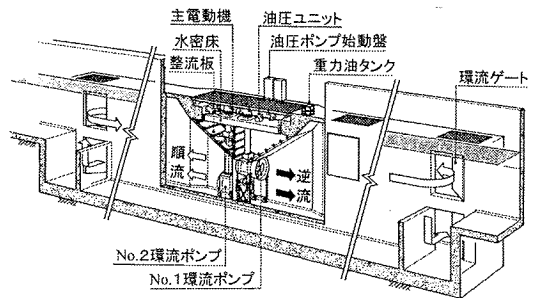


図-7 環流装置の概要

波は水路の斜面で波高が増大して砕波しており、砕波位置における波高は 4m にも達している。なお、水路内に構造物を設置していない場合、波は水路端部の消波工に衝突し、波高が大きいつきにはかなり大きな音と振動が発生する。条件によっては、砕波位置や水路端部において水路天端を越えて水しぶきが水路外へあふれる場合もある。また、水路内に構造物を設置した場合、構造物壁面に作用した波が高く打ち上げられ、静水面から約 15m の高さにある観測上屋の天井まで達したこともあった。

(4) 環流装置

環流装置は水路内に流れを発生させるためのもので、図-7は環流装置の概要を示したものである。環流水路は前述のとおり主水路と平行に設置されており、長さ 76m 、幅 1.5m （ポンプ設置部では 2m ）、高さ 8.5m で、水路のほぼ中央に 200kW 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 $20\text{m}^3/\text{s}$ （水深 5m のとき、平均流速が 1.1m/s 程度）である。

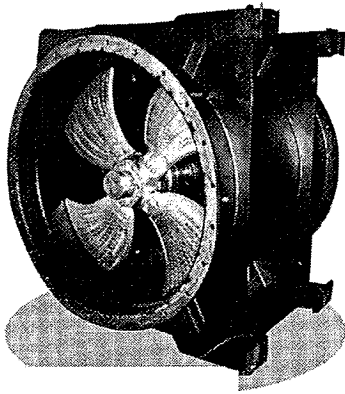


写真-6 環流装置用ポンプ本体

写真-6は、ポンプ本体を示したものである。

主水路と環流水路の水の出入りを制御するゲート設備は、沖側と岸側のそれぞれに上下2か所、中間に1か所で計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。

環流装置の性能試験として、水深3mおよび5mにおいて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た。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）と逆流それぞれの結果を示している。水深3mでポンプを2台連動させて順流にした場合、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である。消費電力は2台連動させたとき最大でほぼ500kWであった。なお、図-8の試験結果は平均流速で整理しているが、流速計で計測された値の時系列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である。

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、その上に重錘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、

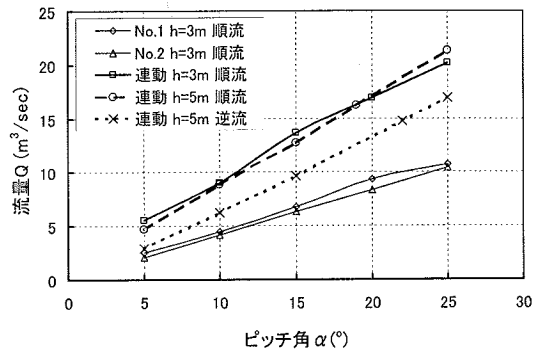


図-8 ピッチ角と流量の関係

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、流れを用いた実験を行う場合には、洗掘が生じないように砂地盤の安定性を確保する工夫も必要である。

(5) その他

a) 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各種計測器用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によって観測室内の制御・解析用パソコンと結ばれている。データの収集は、観測室内のパソコンからの遠隔操作によって行われる。

b) 水の管理

波動地盤水路では、基本的に水を再利用している。すなわち、管路で連結された別の実験施設の貯留水槽との間で給排水を行っており、波動地盤水路および貯留水槽にそれぞれ出力30kW級の水中ポンプ（揚程10m、流量10m³/min）を1台ずつ設置している。貯留水槽から波動地盤水路へ水深5m分の給水を行うのに約6時間、同じく5m分排水するのに10時間ほどかかる。ただし、再利用を繰り返すうちに水にかなりの濁りが生じるため、年間数回、部分的な水の入れ換えを行っている。なお、砂地盤槽内の注水装置への給水については、配管の目詰まりを防ぐため、原則として実験ごとに新しい水を使用している。

4. 波動地盤水路における研究例

本章では、従来の研究において縮尺の影響により十

分に解明されていなかった問題を中心に、波動地盤水路において実施した実験の概要について、既往の研究成果も併せて紹介する。

(1) 消波ブロック被覆堤におけるブロックの沈下

現地においては、消波ブロック被覆堤のブロックが波の作用を受けて数 m 沈下する事例が見られる。こうした沈下について、木原³⁰⁾は、現地に対する模型縮尺 1/60 程度の移動床水理模型実験を行い、防波堤前面の法先洗掘および消波ブロックの沈下について検討している。この実験により、消波工下部の洗掘対策工が不十分な場合、消波工の法先を中心に洗掘が生じることを明らかにした。ただし、2 章でも述べたように砂の粒径に関する縮尺の影響もあり、実験において生じた洗掘に伴うブロックの沈下量は現地に比べてかなり小さく、法先部の洗掘がブロック沈下の原因かどうかについては解明されなかった。

防波堤の法先洗掘のメカニズムについて、入江³¹⁾は、洗掘が重複波の節の部分で起こることを明らかにし、L-type 洗掘と呼んでいる。入江³²⁾はまた、防波堤の前面に消波ブロックを設置することによって反射率が低下し、沖に運ばれる法先の底質の量が減少し、法先洗掘に効果があると指摘している。ただし、消波ブロックの沈下と洗掘の関連については検討されていない。

五明^{33),34)}は、現地における消波ブロック被覆堤の被災事例について解析を行い、主要な被災原因はブロックの質量不足と法先部の沈下の 2 つであるとし、特に、堤体の主要部分である堤幹部については、法先部の沈下が原因であることが多いと指摘した。ただし、法先部の沈下そのものがどのようなメカニズムで発生するのかは明確でなく、法先部の砂地盤の洗掘か、あるいは善ら³⁵⁾が指摘している波浪による海底地盤の液状化が原因ではないかと推定していた。

鈴木³⁶⁾はこのような消波ブロック沈下現象を再現し、そのメカニズムを明らかにすることを目的として、縮尺を変えて小型、中型、大型の 3 種類の水理模型実験を実施した。

まず、小型水路において地盤層下部に波動地盤水路と同様の注水装置を設けて、地盤内に上向き浸透流を作用させ、液状化が発生しやすい軟らかい地盤を作成し、その上に縮尺 1/40 程度で消波ブロック被覆堤の断面を作成して、波を作用させる実験を行った。写真-7 は、実験の状況を示したものである。浸透流を作用させた状態で波を作用させると、消波ブロック法先部で地盤の円弧すべりが発生し、ブロックは法先部で地盤内に沈み込み、消波ブロックが沈下した。このことから、波による地盤の液状化が発生すれば、ブロックが



写真-7 地盤の強制的な液状化による消波ブロックの沈下再現実験（小型実験）

沈下する可能性があることが示された。ただし、この実験では強制的に液状化を発生させており、実際に現地で波による液状化が発生するかどうかは不明であり、波による地盤の液状化がブロック沈下の原因かどうかは解明されなかった。

次に、縮尺 1/16 の程度の中型実験を実施した。2 章で述べたように、砂を用いる実験においては実験の規模に応じて適切な粒径を選択することが重要である。この実験では、砂が動きにくくなることを防ぐため、粒径の小さい砂（中央粒径 0.08 mm）を用いた。模型縮尺にしたがって現地換算すると中央粒径 1.28 mm であり、粗粒砂に相当する。また、消波ブロックを砂地盤に直置きした断面と、砂が波によって吸い出されるのを防止する各種の対策を行った断面について実験を行った。実験の結果、消波ブロック下部での砂の吸い出しがブロック沈下の原因である可能性が高いことが明らかになった。ただし、実験で用いた細砂は粒径 0.08 mm の砂とシルトの混合したものであるため、純粋な砂とは挙動が異なる可能性があることなどから、中型実験の結果が現地の現象を再現しているとは断定できなかった。

そこで、さらに波動地盤水路を用いて縮尺 1/4 程度的大型模型実験を実施した。その結果、波の作用によって、現地と同様なブロックの沈下が再現された。図-9 は、実験の状況を示したもので、左側の写真が波作用前、右側が波作用後のブロックの様子である。実験に

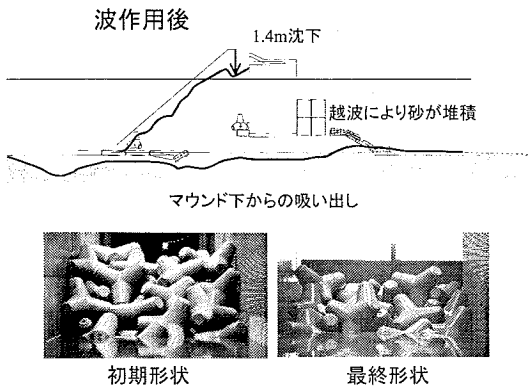


図-9 砂の吸い出しと消波ブロックの沈下状況の例 (大型実験)

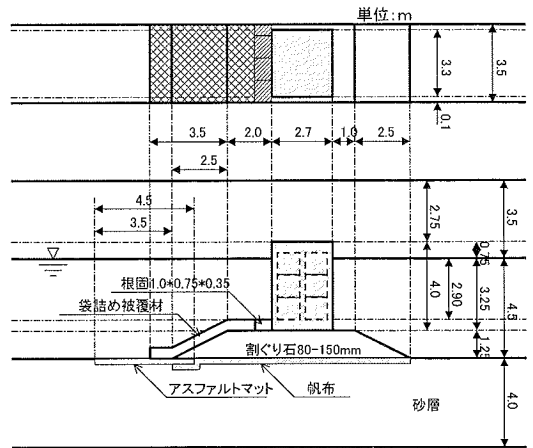


図-10 マウンド支持力実験断面

よって、ブロック沈下の主な原因が、ブロック下部での砂の吸い出しであることが明らかとなった。また、ブロック沈下対策として、吸い出しを防ぐために帆布、遮水性マット等の吸い出し防止工を堤体下部全体に敷設する必要があること、砂の上に細粒碎石を敷くことによっても吸い出しを防ぐことが可能であることが確認された。

(2) 混成防波堤におけるマウンドの支持力破壊

防波堤の大水深化や、摩擦増大マットの使用による堤体幅の減少などによって、直立部ケーソンの滑動だけでなく、ケーソン底版の設計やマウンド支持力の検討が重要となっている。捨石マウンドによるケーソンの支持構造に関して、宮田ら^{37),38)}は、実際の現地で行われる捨石とケーソンの一部分を模擬したブロックを用いた大型載荷実験により、マウンドの均し精度がケーソン底版断面面に及ぼす影響や、マウンド上に設置したアスファルトマットの集中荷重分散効果について検討を行っている。

一方、波作用時においてケーソン後趾に作用する端趾圧によるマウンドの支持力破壊を、模型実験によって再現することはきわめて困難である。すなわち、波の大きさに応じてフルード則にしたがって石や基礎地盤の粒径を小さくした場合、石の強度が相対的に非常に大きくなるだけでなく、マウンド全体や基礎地盤の強度についても相似則が成立しなくなる。そのため、支持力破壊のメカニズムについてはあまり明らかになっていない。そこで、著者ら³⁹⁾は、波動地盤水路内にマウンド支持力が支配的となる防波堤断面を設置し、実際に波を作用させる大規模模型実験を実施した。図-10は実験断面を示したもので、縮尺は現地の1/4~1/5程度を想定している。今回の実験では、マウンド支持力に関して現行の設計で用いられるビショップ法による安全率が0.8程度で、計算上は支持力破壊が生じるよ

うなケースでも、明確なマウンドの破壊は生じなかった。実際の現地においても支持力破壊による被災例はほとんど見られないことから、ビショップ法は実際の現象に比べて安全側の設定になっていると考えられる。なお、安全率がさらに小さくなるように波高を大きくしても、マウンドの急激な沈下は発生せず徐々に進行し、一方でケーソンが大きく水平変位して、最終的にはケーソンの滑動が生じたような結果となった。しかしながら、このときの滑動安全率は1.2以上であることから通常の滑動現象とは考えられず、マウンドが沈下した瞬間にケーソン底面の港内側でのマウンド面との接地圧が低下して摩擦抵抗力が減少し、滑動が生じたものと思われる。

(3) 防波堤ケーソン壁の破壊

防波堤の被災の一つとして、ケーソン壁面の破壊がある。壁面の破壊は、単に穴があくということだけでなく、中詰め砂の流出が生じてケーソン重量が減少し、結果的にケーソンの滑動を引き起こす原因にもなり得る。このような壁面の破壊の主要な原因としては、衝撃碎波力と、消波ブロック被覆堤におけるブロックの衝突力が考えられる。

衝撃碎波力に関する既往の研究については2章でも述べているが、ケーソン壁の破壊については、谷本ら⁴⁰⁾は水理模型実験により波力特性の検討および被災事例におけるケーソン壁の静的応力計算を行っている。また、高橋ら^{41),42)}は、現地被災事例の調査、水理模型実験、3次元FEMによる動的応答計算を行っており、ケーソン壁に作用する衝撃碎波力の算定方法はほぼ確立されている。

一方、消波ブロックの衝突力に関して、山口ら⁴³⁾は、縮尺1/36程度を想定した水理模型実験により、ブロック衝突力の計測を行っている。しかしながら、フルー

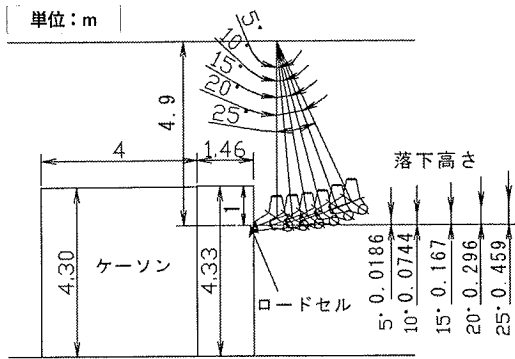


図-11 消波ブロックつり下げ衝突実験断面

ド則にしたがった模型実験の場合、縮尺が小さいとブロックの慣性力係数や抗力係数が現地と異なることなどの影響があり、衝突力に関する定量的な評価には至っていない。そこで、有川ら⁴⁴⁾は、ブロック衝突のメカニズム、衝突力の算定方法、衝突力緩和対策工法等について検討するため、縮尺1/4程度を想定した大規模模型実験を行い、ブロックの挙動および衝突力を計測した。実験では、まずつり下げたブロックを振り子のように一定の角度まで持ち上げてから衝突させ、衝突速度と衝突力の関係を明らかにした。図-11は、つり下げ衝突実験の実験断面を示したものである。さらに、実際の波の作用による衝突として、ロッキング・転落・水平移動という3つのパターンによる衝突力を測定し、速度ならびに質量との関係を調べた。実験結果をもとに現地における衝突力を試算した結果、転落・水平移動が生じれば、ブロックによって穴があく可能性があることを示した。

(4) 液状化消波システム

液状化消波システムとは、図-12に示すように、海底の砂地盤の中にポンプで水を送り、地盤を人工的に液状化させることによって消波するシステムであり、液状化した地盤上を波が通過する際に、波のエネルギーによって砂が動き、砂粒子の摩擦によって波のエネルギーが消費され、進行する波が小さくなる。この液状化消波システムは、構造物を必要とせず、しかも消波の必要な時にだけ稼働させることができるという特長があり、防波堤の開口部や重要な船舶のための波除堤としての利用が期待できる。

姜ら²⁸⁾は、まず小型実験および数値計算によってその有効性を確認した。小型実験は、現地の水深として10m前後を想定し、縮尺1/20程度で行った。その結果、液状化させる砂地盤の長さが波の1波長程度で、水深に近い程度の厚さがあれば、波高伝達率を最小で0.2程度まで小さくできることが確認された。こうした消

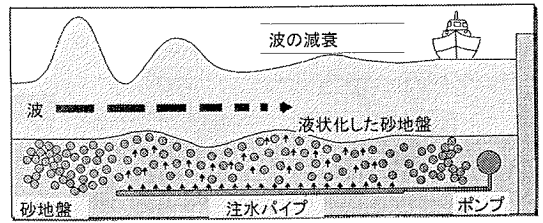


図-12 液状化消波システムの概要

波効果について、数値計算によって小型実験の現象を再現するとともに、さらに現地スケールの条件でも計算を行った。その結果、現地においても模型実験とほぼ同様の消波効果が期待できることが明らかになった。

また、消波機能を発揮するためには砂地盤を均等に液状化させる必要があり、そのためには注水パイプの間隔を砂地盤厚さの10%以下にする必要があることなどが明らかになった。ただし、現地の場合には注水パイプの間隔が広いと、模型実験に比べて局所的な締め固まりが発生しやすく、いったん液状化した地盤が再び締め固まる現象が起りやすと考えられる。そのため、実スケールに近い大型実験による確認が必要である。

そこで、姜ら⁴⁵⁾は、波動地盤水路において縮尺1/3程度を想定した大型実験を行った。実験の結果、波高伝達率に関しては小型実験とほぼ同様で、最小で0.25程度まで減衰し、消波システムとしての十分な効果が確認された。また、注水パイプの間隔や注水量など、小型実験結果をもとに提案した液状化システムの設計法がほぼ妥当であることが確認された。

5. 今後の研究に関する展望

波動地盤水路を始めとする大型造波水路を用いた実験により、これまで縮尺の影響のため模型実験による再現が困難であった様々な現象に関する検討が行われ、それらのメカニズムが徐々に明らかにされつつある。今後さらに検討が必要な問題としては、たとえば波と流れが共存する場における砕波現象や底質の移動、構造物に波力が作用する際に構造物が基礎地盤に及ぼす影響も考慮した波・地盤・構造物の相互作用などが挙げられる。また、新形式の構造物や新しい工法などを開発した場合、従来は実用化に先立って現地試験による検証を行うことが多かったが、大型水路における模型実験を行うことにより、実証試験を行うのと同様の検証が可能となる場合も考えられる。

また、近年、電子計算機の性能の著しい向上に伴い、これまでは膨大な計算時間を必要とするために実用的でなかった複雑な数値シミュレーションを行うことも、

かなり現実的な検討方法となりつつある。このような数値計算におけるパラメータ設定や計算結果の妥当性の検証においても、大型実験の結果との比較がきわめて重要である。特に、波・地盤・構造物の相互作用を対象とした計算については、これまで述べたような縮尺の影響についての検証を行うためにも大型実験による検証が不可欠であり、波-地盤系水路における大型水理模型実験の果たすべき役割は大きいと考えられる。

ただし、当然のことながら大型実験は小型実験と比べて実験期間が長く、費用も膨大なものとなる。たとえば、実験に必要な構造物の模型製作も、その工程は小型実験用の模型とは全く異なり、むしろ現地の実物を作るのに近いため、コストもかなり高くなる。また、実験断面の製作も、ほとんどの作業が人力ではなくクレーン等の施設を利用して行うことになるため、たとえば小型実験なら1日でできる作業でも1週間以上かかることも多い。したがって、大型実験の実施に当たっては、事前に小型の予備実験等による十分な検討を行い、実験ケースを最小限にとどめることが重要である。小型実験を実施することは、実験ケースを絞り込むだけでなく、大型実験で起こりうる現象を把握し、想定外の事態による実験の手戻り等を未然に防ぐためにもきわめて重要である。また、大型実験と数値計算を併用することにより、ある程度のケースについて実験結果と計算結果の整合性を確認した後は、数値計算により類似のケースを数多くこなすという方法も有効である。このような観点から、今後の研究においては、小型実験、大型実験、数値計算、現地観測のそれぞれの特性を適切に使分け、より効率的に研究を実施することが望まれる。

なお、現状においては大型実験の可能な施設は限られており、優秀な人材の集結を図るとともに、施設の有効利用や研究費用の効率的な使用の観点からも、様々な研究機関との連携による共同研究を積極的に進めることが必要であると考えられる。

謝辞：当所の高橋重雄統括研究官には、波動地盤水路の計画段階から多大なご尽力をいただいております。本論文の執筆に当たっても適切なご助言を頂いている。また、鈴木高二朗主任研究官には、波動地盤水路の管理運営において多大なご助力を頂くとともに、本論文の執筆に当たっても貴重なご意見を頂いている。さらに、波動地盤水路における実験の実施に当たっては、耐波研究室の関係者をはじめとする多くの方々のご協力を得ている。ここに記して、深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 岩垣雄一, 野田英明: 海岸変形の実験における縮尺効果の研究, 海岸工学論文集, 第8巻, pp.139-143, 1961.
- 2) 土屋義人, 伊藤政博: 海浜変形の相似則に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第28巻, pp.315-319, 1981.
- 3) 清水隆夫: 縮尺効果を考慮した海浜変形実験手法とその現地適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.621-625, 1995.
- 4) 鹿島遼一, 清水隆夫, 丸山康樹, 斉藤昭三: 大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究, 海岸工学論文集, 第28巻, pp.197-201, 1981.
- 5) 鹿島遼一, 清水隆夫, 丸山康樹, 斉藤昭三: 大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究(2)—粗砂海浜($D_{50} = 0.47\text{ mm}$)の岸沖漂砂のモデル化—, 海岸工学論文集, 第29巻, pp.228-232, 1982.
- 6) 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.
- 7) 張 達平, 田中茂信, 山本幸次: 大型2次元水路による海浜砂の分級機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.361-365, 1994.
- 8) 張 達平, 佐藤慎司, 山本幸次, 田中茂信: 不規則波による浮遊砂輸送とバー地形の発達に関する大型実験, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.481-485, 1997.
- 9) 山本幸次, 佐藤慎司: 大型2次元不規則波実験によるバーとバームの形成過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.526-530, 1998.
- 10) 田中正博, 井上 亮, 佐藤慎司, 磯部雅彦, 渡辺 晃, 池野正明, 清水隆夫: 2粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.551-555, 2000.
- 11) 池野正明, 宇野喜之, 後藤宏志, 田中正博, 森 信人, 片山裕之, 岡安章夫: 混合粒径砂を用いた大型海浜実験による粒径別浮遊砂フラックスとモデル化, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.556-560, 2000.
- 12) S.-Arcilla, A., Roelvink, J. A., O'Connor, B. A., Reniers, A. and Jimenez, J. A.: The Delta Flume '93 Experiment, *Proc. Coastal Dynamics '94*, ASCE, pp.488-502, 1994.
- 13) Delta Flume: *Hydro Delft*, No.73, Delft Hydraulics Laboratory, 27p, 1986.
- 14) Peters, K. and Dette, H. H.: Sediment Suspension in the Surf Zone, *Proc. Coastal Sediments '99*, ASCE, pp.195-208, 1999.
- 15) 榎木 亨, 後野正雄: 棧橋床版に作用する揚圧力の水理模型実験における相似則に関する一考察, 海岸工学論文集, 第35巻, pp.677-681, 1988.
- 16) 谷本勝利, 高橋重雄, 和泉田芳和: 水平床版に働く揚圧力に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第17巻, 第2号, pp.3-47, 1978.
- 17) 谷本勝利, 高橋重雄, 村永 努: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力—空気圧縮モデルによる検討—, 港湾空港技術研究所報告, 第19巻, 第1号, pp.3-31, 1980.
- 18) 高橋重雄, 谷本勝利: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)—現地観測波圧データの解析—, 港湾空港技術研究所報告, 第23巻, 第2号, pp.3-25, 1984.
- 19) 島田真行, 藤本稔美, 斉藤昭三, 榊山 勉, 平口博丸: 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について, 海岸工学論文集, 第33巻, pp.442-445, 1986.
- 20) Thomsen, A. L., Wohnt, P. E. and Harrison, A. S.: Rip-Rap Stability on Earth Embankment Tested in Large and Small Scale Wave Tanks, *CERC Technical Memorandum*, No.37, 1972.

- 21) 榊山 勉, 鹿島遼一: 消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.653-657, 1989.
- 22) Timco, G. W. and Mansard, E. P. D. : Improvements in Modeling Rubble Mound Breakwaters, *Proc. 18th Coastal Engineering Conf.*, ASCE, pp.2047-2061, 1982.
- 23) 岡本 博, 山田和男: 消波ブロックの強度縮尺模型を用いた水理実験, 海岸工学論文集, 第 31 巻, pp.557-561, 1984.
- 24) 木村克俊, 早川哲也, 高橋重雄, 下迫健一郎, Oumeraci, H. : 消波型高基混成堤の越波特性に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.756-760, 1999.
- 25) 岩垣雄一, 井上雅夫, 金田孝之: 海岸堤防の越波実験における縮尺効果について, 海岸工学論文集, 第 15 巻, pp.282-287, 1968.
- 26) Schüttrumpf, H., Möller, J. and Oumeraci, H. : Overtopping Flow Parameters on the Inner Slope of Seadikes, *Proc. 28th Coastal Engineering Conf.*, ASCE, pp.2116-2127, 2002.
- 27) Kraus, N. C., Smith, J. M. and Sollitt, C. K. : Supertank Laboratory Data Collection Project, *Proc. 23rd Coastal Engineering Conf.*, ASCE, pp.2116-2204, 1992.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) 木原 力, 甲斐正義, 鳥居雅孝, 望月規行: 防波堤前面の洗掘対策について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp.402-406, 1988.
- 31) 入江 功, 灘岡和夫, 近藤隆道, 寺崎賢治: 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘, 港湾技術研究所報告, 第 23 巻, 第 1 号, pp.3-52, 1984.
- 32) 入江 功, 栗山善昭, 浅倉弘敏: 重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 25 巻, 第 1 号, pp.3-86, 1986.
- 33) 五明美智男, 境 和彦, 高山知司, 寺内 潔, 高橋重雄: 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.901-905, 1995.
- 34) 五明美智男, 高橋重雄, 鈴木高二朗, 姜 閔求: 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査 (第 2 報), 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.961-965, 1997.
- 35) 善 功企, 山崎浩之, 渡辺 篤: 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp.125-180, 1987.
- 36) 鈴木高二朗, 高橋重雄, 高野忠志, 下迫健一郎: 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について, 港湾空港技術研究所報告, 第 41 巻, 第 1 号, pp.1-39, 2002.
- 37) 宮田正史, 菅野高弘, 長尾 毅, 篠原勝次, 近藤隆道: 均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響, 港湾技術資料, No.945, 49p., 1999.
- 38) 宮田正史, 長尾 毅, 釣 哲之, 清水庸介, 田崎邦男: 防波堤アスファルトマットの集中荷重分散効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.781-785, 2002.
- 39) 下迫健一郎, 土田 孝, 増田慎太郎, 渡部要一, 藤井 敦: 混成防波堤におけるマウンドの支持力破壊に関する大規模水理模型実験, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp.499-504, 2003.
- 40) 谷本勝利, 小舟浩治, 大里睦男: ケーソン壁に作用する波力と応力計算, 港湾技術資料, No.224, 39p., 1975.
- 41) 高橋重雄, 鈴木高二朗, 油谷進介: 衝撃碎波力によるケーソン壁の土圧とひずみに関する実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.906-910, 1995.
- 42) 高橋重雄, 津田宗男, 下迫健一郎, 横田 弘, 清宮 理: 防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃碎波力について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.751-755, 1998.
- 43) 山口貴之, 上野紗代, 林建二郎, 大野友則: 消波ブロック被覆堤におけるブロックの動揺・衝突現象の解明のための水理模型実験, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.407-412, 2002.
- 44) 有川太郎, 織田朋哉, 黒田豊和, 下迫健一郎: 消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.716-720, 2003.
- 45) Kang, Y. and Takahashi, S. : Wave Damping due to Liquefied Sandbed and Wave-Induced Compaction - Study on the Development of a Liquefied Sandbed Wave Barrier -, *Proc. 27th Coastal Engineering Conf.*, ASCE, pp.692-705, 2000.

(2003.6.18 受付)