

低反射・透過型防波堤の設計と施工

第四港湾建設局 正会員 小蔵 統一郎

” ” 口田 登

” ” 足立 一美

1. まえがき

港湾の整備拡充に伴って防波堤が建設されると航路や泊地の静穏度が向上し、港を利用する大小の船舶の航行・停泊・荷役の安全と効率が改善され、物流や地域経済の発展への寄与が期待される。しかし、港湾の地形や周辺における波、潮流の条件及び水域における生産活動の状況によっては、防波堤の近傍における反射波による海域の擾乱や、外海と港内との海水交換が妨げられることによる港内の水質悪化の問題の発生が懸念されることがある。特に近年、防波堤の建設に際しては、単に波を防ぐことに意を注ぐばかりでなく、反射波を低くおさえ、しかも海水の交換をよくし流れに対する影響をできるだけ小さくするという配慮が必要とされる事例が増加してきている。

したがって防波堤の本来もつべき防波機能を損わないで、海水を透過させ、かつ低反射であるような構造の防波堤を経済的に建設するという命題に^{1) 2)} 応えることが要請されるのである。このような低反射・透過型防波堤については既に理論解析や模型実験についていくつかの報告があるが、本稿では第四港湾建設局管内における最近の事例について模型実験による水理特性の解明にもとづく設計の考え方を中心に紹介し、あわせて現地におけるケーソンの製作と据付け方法にも言及し、参考に供したい。

2. 要請の背景と水理特性の目標値の設定

Y港は古来、天然の良好として漁業基地、離島連絡の要地としても栄えてきており、近年海上輸送の増大に伴って利用船舶が急激に増え、安全な泊地の整備が強く要請され、さらに泊地を中心に静穏域の拡大を図るため防波堤の建設が計画されている。この防波堤の建設予定海域には魚の養殖をはじめ第一種、第二種漁業及び延縄、一本釣り漁業が盛んな好漁場があり、漁場環境の保全にも配慮することが望まれている。そこで周辺海域で操業する漁船への反射波を小さくするとともに、流況の変化と水質の悪化を防止するため、低反射・透過型構造とするものである。

この場合に制御すべき水理特性としては、反射率、伝達率及び透過性があげられ、それぞれの目標値を予めつぎのように設定した。

(1) 反射率

航路のある防波堤開口部周辺及び漁船の操業域となる防波堤前面の海域が、通常時の来襲波による反射波で擾乱されないように防波堤周辺の反射波の様相を数値計算で確認し、反射率は0.5以下とする。

(2) 伝達率

本港の避難泊地計画によると、防波堤背後の水域は小型船舶の避泊水域とされており、波高1m以下の水域を確保することとされている。このため、防波堤開口部からの不規則波の回折波と防波堤からの伝達波（越波及び透過波）との合成波高が防波堤背後の水域において1.0m以下となるように伝達率は0.5以下とする。

(3) 流れの透過率

防波堤の建設に伴う潮流、水質分布の変化をみるために、種々の透過条件を設定し、潮流拡散シミュレーション³⁾を行った結果つぎの諸点が確認できた。

(i) 潮流については不透過堤では防波堤近傍で流れがやや変化するが、透過堤にすればこの変化はなくなる。透過堤でも防波堤の開口部近傍ではやや流速が増大し、港内の防波堤背後では流速が減少する水域がみられるが、漁業活動が行われている水域での流速変化は小さい。

(ii) 水質分布についても、透過堤では不透過堤に比較してやや良好となり、A類型（水産一級）の環境基準COD 2ppm 以下を満足している。

以上を勘案して数値シミュレーションの結果から、防波堤の機能に支障を生じない範囲内で最大の透過性を確保することとした。

3. 設計の手順

低反射・透過型構造は、低反射構造と透過構造の組合せによって、図-1に示すように数種類の構造型式が考えられるが、ここでは施工の容易さ、経済性及び施工実績の観点から各形式について比較検討を行い、縦スリット式透過ケーソンを採用することとした。設計条件の設定から基本断面の決定に至る設計の流れを図-2に示す。このフローチャートの中でポイントとなる反射率、伝達率及び波力については既往の文献及び設計の実績等をもとに実験断面を設定し、模型実験によって詳細な検討又は確認を行うこととした。

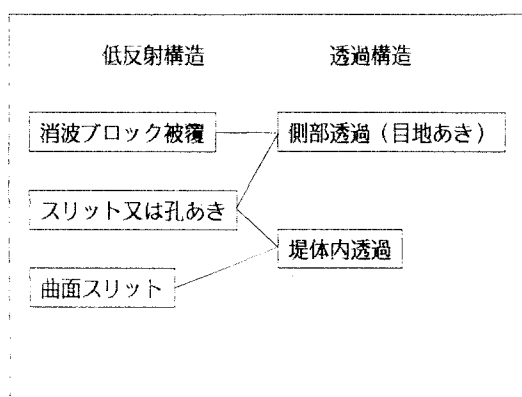


図-1 低反射・透過構造の組み合わせ

4. 模型実験による水理特性の解明

(1) 設計条件の設定

反射率、伝達率の対象となる波は通常の気象条件下で出現する波であり、気象台の風記録からS.M.B.法により推算された年最大程度の $H1/3=1.86m$ 、 $T1/3=7.0sec$ を採用した。つぎに堤体の安定性の対象とする波は、天気図をもとに有義波法で推算した50年確率の波について対象地点まで不規則波の変形計算を行い $H1/3=3.0m$ 、 $T1/3=13.3sec$ を得た。

(2) 実験施設及び方法

(i) 実験水路

長さ50m、幅1.0m、高さ1.0mのフラップ型造波機を有する長水路で、周期0.3～5.0sec、最大波高40cmで不規則波を発生させることができる。

(ii) 堤体模型

堤体模型は図-3に示すように-2.2mの海底面に-1.0mまで捨石マウンドを敷き、その上に木製の堤体本体を設置した。堤体の構造は図-4に示すように、堤体内透過型（D型）と側部透過型（E型（目地あき））の2つに大別でき、それぞれの堤体について開口率（ ε ）を10%、20%、30%、の3種類とした。ここで開口率（ ε ）をつぎのように定義する。すなわち、堤体内透過型に対して

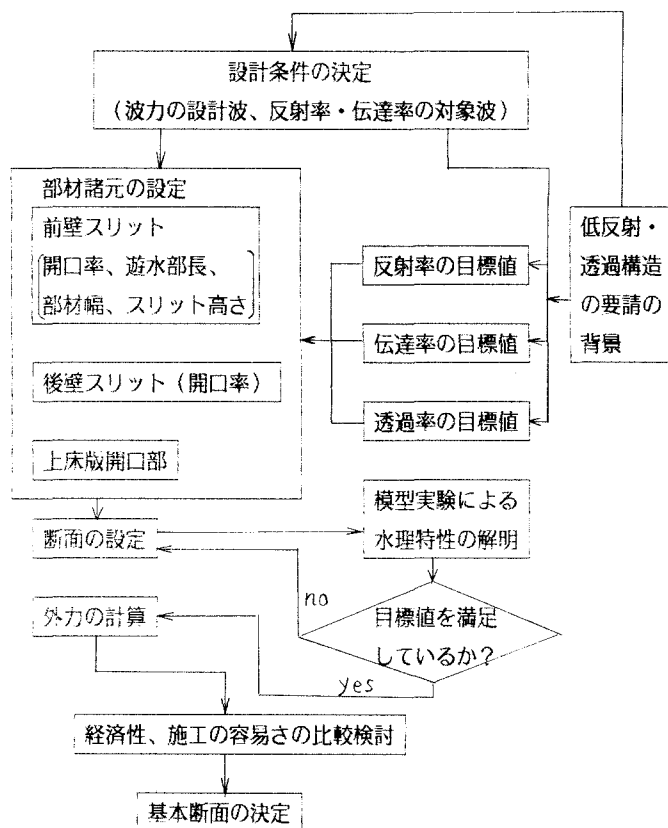


図-2 低反射・透過型防波堤の設計の流れ

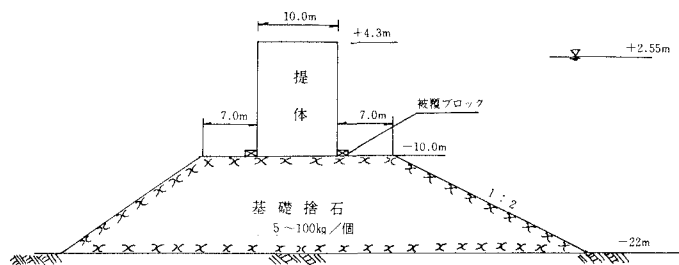


図-3 堤体断面

$$\varepsilon = \frac{\delta \cdot N}{B} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで B : 堤体幅 δ : スリット幅 N : 1堤体当りのスリットの個数

側部透過型に対して、

$$\varepsilon = \frac{S \cdot H_s}{B \cdot H_B} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここで B : 堤体幅 H_B : 堤体の高さ S : 側部の開口部の幅 H_s : 側部の開口部の高さ

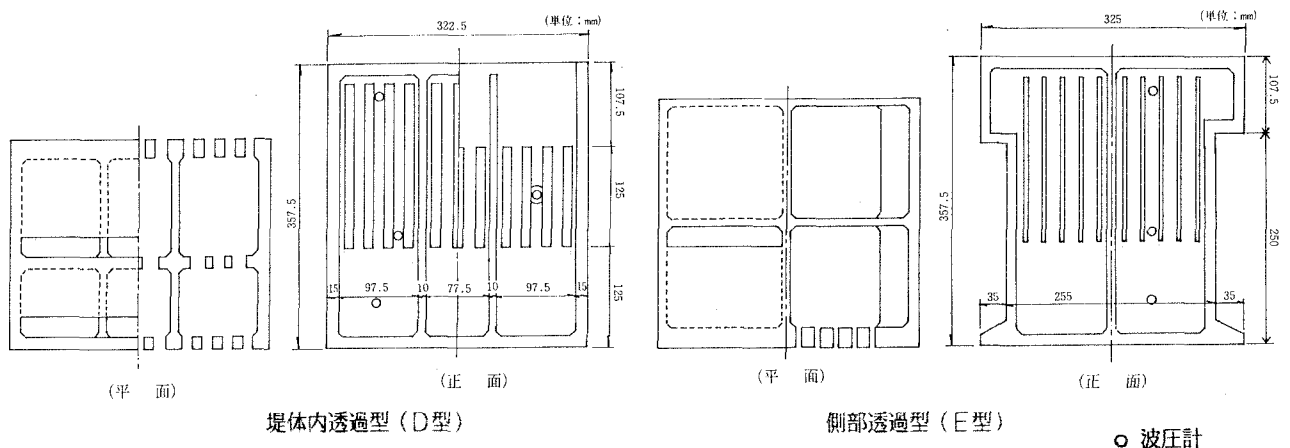


図-4 堤体構造

模型の縮尺は1/40とし、フルードの相似則によった。

(iii) 実験方法

まず反射率、伝達率の測定方法について述べる。Bretschneider- 光易型周波数スペクトルを有する不規則波を発生させ、堤体の設置位置での通過波としての入射波が所定の有義波高及び有義波周期となるように制御し、堤体設置後、水路内で十分多重反射系が形成された後に250波以上の波を容量式波高計で計測し、FFTにより入射波と反射波の分離計算を行った。伝達率についても堤体の背後に2本の波高計を設置し、水路端の消波装置からの反射波を分離した。つぎに波力実験については、所定の波高と周期を有する規則波を堤体に作用させ、予め堤体前面に埋め込まれた波圧計で波圧分布を測定するとともに、三分力計で堤体に作用する全水平力及び揚圧力を測定した。波圧計の取り付け位置は図-4に示してある。

(iv) 実験結果と考察

図-5、図-6に反射率と伝達率の実験結果を示す(○印及び□印)。これらの図で横軸は(1)式、(2)式で定義される開口率(ε)であり、堤体内透過型と側部透過型とでその定義はやや異なるが基本的特性を比較するためにこの相違を無視して同じ図にプロットしてある。まず反射率についてみると、側部透過型では $\varepsilon=30\%$ のときに $K_R=0.47$ でやや大きくなる。堤体内透過型では開口率が大きくなるほど消波効果が顕著となり反射率が低減する。つぎに伝達率についてみると、側部透過型では伝達率が非常に小さく0.1~0.2程度である。一方堤体内透過型では開口率が大きくなると通水しやすくなって20%、30%では許容値0.5をオーバーしてしまう。

これらの図の●印及び■印はN港における同様の実験結果を参考に示したもので、実験条件は水深-4.0m、マウンド天端高-2.5m、 $H1/3=1.6m$ 、 $T1/3=5.1sec$ である。この場合にも、反射率、伝達率ともY港と同様の傾向を示していることがわかる。

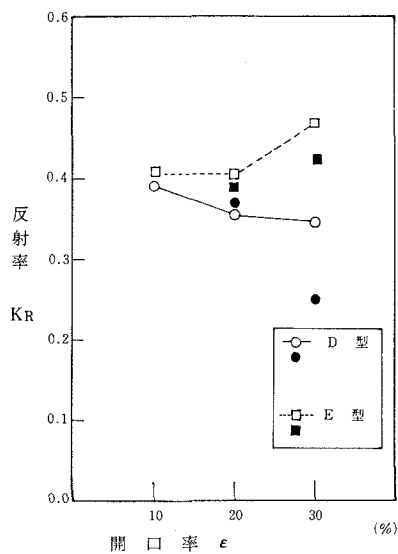


図-5 反射率

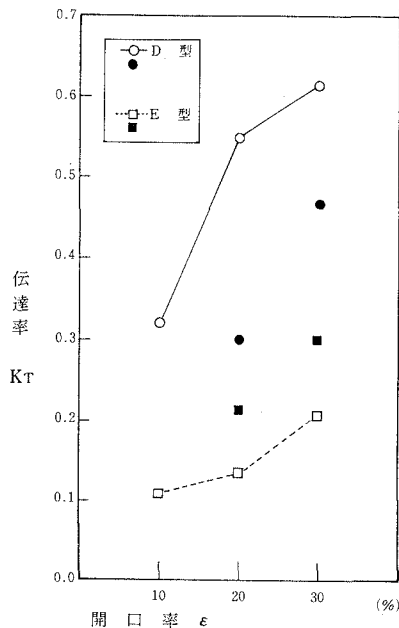


図-6 伝達率

消波機能を波のエネルギーの損失率 (K_L) として捉え、次式の K_L をプロットすれば図-7の通りである。

$$K_L \equiv E_L / E_I = 1 - (E_R / E_I + E_T / E_I)$$

$$= 1 - (K_R^2 + K_T^2) \quad (3)$$

ここで E_I : 入射波のエネルギー E_L : 損失エネルギー
 E_R : 反射波のエネルギー K_R : 反射率
 E_T : 伝達波のエネルギー K_T : 伝達率

これを見れば、側部透過型がエネルギー減殺効果が大いことがわかる。また、開口率に着目すれば両型とも10%が最も大きく、開口率とともに効果が低減する。図-8～図-9及び表-1に波力実験の結果を示す。表-1で全波力は三分力計による実験値であり、直立壁の場合の合田式との比を示してある。堤体内透過型で開口率10%を、またE-3とは側部透過型で開口率30%であることを示し、他も同様の意味である。合田式の値は堤体内透過型ではスリットの効果をみるために、受圧面にスリットがないものとして波力を計算し、一方側部透過型では、通水部がかなり大きいので、この部分は受圧面から除いて計算してある。この表により三分力計による実験値と合田式による波力の比を波圧低減率と呼ぶことにすれば、この値は堤体内透過型では開口率とともに大きくなり、一方側部透過型でも低減効果があることがわかる。図-9は堤体前壁に取り付けた波圧計による実験値と合田式による波圧とを比較したもので、両者はかなりよく一致しているが、() 書きの実験値のほうがいずれの堤体においても小さい値を示している。

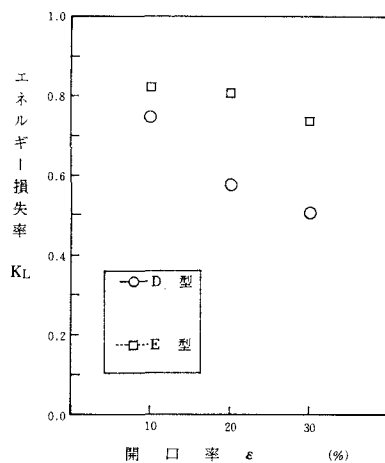


図-7 エネルギー損失率

以上の実験結果から判断すれば、側部透過型ではいずれの開口率でも反射率、伝達率の許容値を満足することができるが、堤体内透過型では開口率が10% (D-1) に限られる。防波堤の機能としては、とくに伝達率が小さいことが最も重要で加えて反射率が小さく、しかも透過性がよいことが望ましい。したがって、ここではD-1とE-2が有利であると判断される。

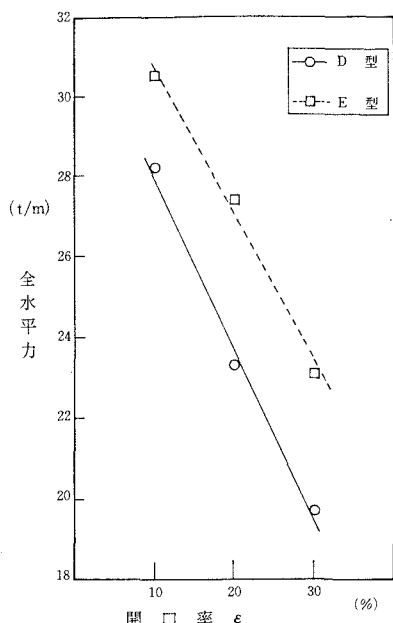


図-8 堤体に作用する全水平力

表-1 波圧低減率

堤体	合田式 (t/m)	全波力 (t/m)	全波力 合田式
D-1	28.2	35.8	0.79
D-2	23.3	35.8	0.65
D-3	19.7	35.8	0.55
E-1	30.5	33.1	0.92
E-2	27.4	30.7	0.89
E-3	23.1	28.0	0.83

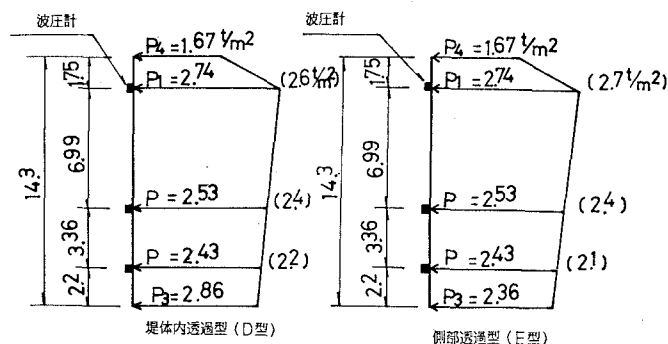


図-9 波圧分布の合田式との比較

5. 実験結果に基づく設計の考え方

4で述べた実験結果に基づき、D-1とE-2の2つの堤体について比較設計を行い、経済的に有利な構造型式を設定することとし、以下の基本的考え方によった。

(1) 堤体の安定性(滑動、転倒、端し圧)の検討に用いる波圧は合田式に波圧低減率(λ)を乗じた値によることとし、 λ の値は既往の設計事例及び実験結果より、D-1について $\lambda=0.8$ 、E-2について $\lambda=0.9$ とした。

(2) E-2に作用する波圧は図-10のとおりとした。

このようにして設計された堤体の断面形状について、コンクリート、中詰砂等の材料の数量を算定し、施工現場における材料単価による堤体延長1m当りの工費を算定したところE-2がD-1に比較して安価であると見積られ、E-2型式を採用することとした。

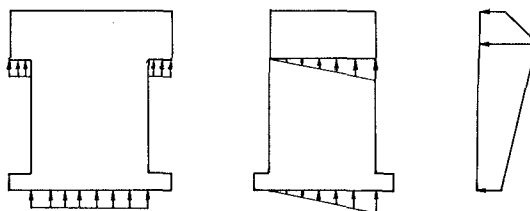


図-10 堤体の安定の検討に用いた波圧

6. ケーソンの製作と据付け

低反射・透過型防波堤は在来タイプに比較して形状が複雑であり、ケーソンの製作と据付けに特別な配慮を要求され、施工を容易にするために設計の際に予め考慮すべき点も生じてくる。特にここで採用した縦スリット壁を有する側部透過堤は初めての試みであり、施工現場における種々の条件を勘案し安全・確実で経済的な施工法を選択しなければならない。このような観点から、ケーソンの製作方法として現地で採用可能なフローティング・ドック方式と陸上方式の2つについて比較し、表-2のとおり、陸上方式が経済性と安全性で優れることが認められた。

表-2 製作方法の比較

製作方法	経 済 性	安 全 性
フローティング・ドック方式	製作後の海中での仮置きのためにスリット部分に止水板の設置が必要となり、また据付け時にはフローティングクレーンを要し不経済。	前室の上床板が水中施工となるほか、止水板の取り外し作業に危険を伴う。
陸上方式	製作後そのまま仮置きでき止水板が不要でフローティングクレーンで、そのまま曳航できるので経済的。	水中作業の必要がなく安全性が高い。

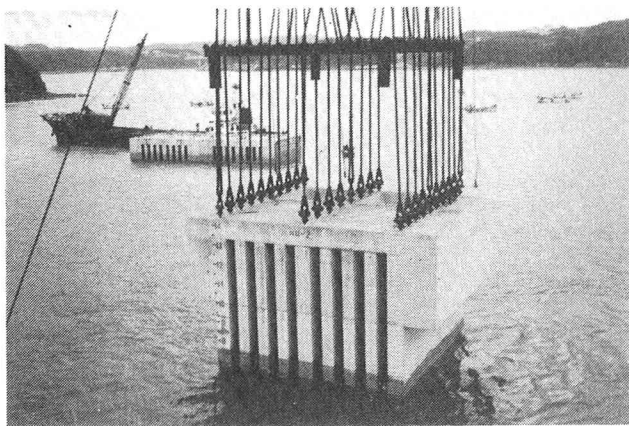


写真-1 フローティングクレーンによるケーソンの曳航

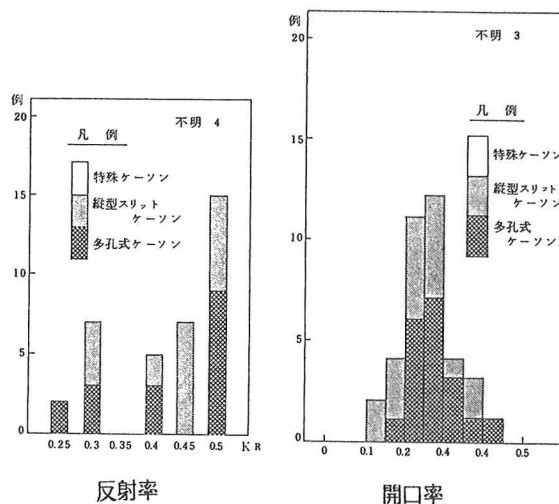


図-11 全国の事例

ここで採用した側部透過型ケーソンの陸上製作からフローティングクレーンによる曳航・据付けに至る一連の施工工程において、在来型式のケーソンの場合と異なる方法又は特別な配慮を要した点について述べればつぎのとおりである。

(1) 型枠の組立て、組外し

型枠は袖付近はメタルフォームに代えて合板を使用した。この型枠の組立て、組外しにはクローラクレーンを使用した。袖部及び上床版部は形状が複雑でしかもクレーンの作業範囲が制限されるので人力によった。

(2) 支保工

袖部については外足場と内足場の2組の足場により支保工を施工するので、複雑となる。

(3) 据付け

フローティングクレーンで施工現場まで曳航し、据付けることとし、据付け時の衝撃によって袖部が破損するのを防止するため袖部に予め角材をいれておいた。

7. あとがき

堤体内透過型と側部透過型の2つについて水理特性を模型実験で調べ、所要の反射率、伝達率及び透過性が得られる形状寸法について比較設計を行い、側部透過型が経済的であることを確認し、現地へ施工した。

低反射・透過型防波堤の構造型式としては縦スリット式、横スリット式、多孔式、その他の型式があるが、現在までところ個々の条件に対する水理特性が発表されているに過ぎず、各型式の特徴を明確に把握できないために、実際の設計に当ってはどの型式を選択するか迷うことが多い。反射率や透過率に関する理論解析も、単純な堤体形状について規則波を対象としたものがほとんどで、まだ研究途上にあると言える。このような現状にあっては当面他の事例を参考にしつつ、模型実験を中心に個別的に検討を進めざるを得ない。

図-11はそのための一助として、反射率の低減のみを目的としたいいわゆる直立消波型式の反射率と開口率について全国の事例を調査した結果で、反射率は0.4～0.5、開口率は0.2～0.3が中心となっている。

今後施工事例の増大とともに理論解析法の進展が期待されることから、設計法の体系化すなわち、波浪条件、施工条件等に応じた最適な構造型式及び形状寸法が決定できる設計法の確立が望まれるところである。

最後に、ここで報告した成果は模型実験、設計、施工の全般にわたる多数の関係各位の各段のご尽力によるものであることを付記し、深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば松本他：直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性に関する実験的研究、第23回海講論文集、1976、PP112～116
- 2) 例えば村上他：漸変型縦スリット式防波堤の消波および海水交流特性、第32回海講論文集、1985、PP 535～539
- 3) 金子他：AID1法による潮流と汚染拡散の数値計算、港研報告14-1、1975、PP3～61
- 4) 合田他：不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港研資料、N0248、1976