

鹿児島港防波堤（透過型）の水理模型実験について

運輸省第四港湾建設局 正会員 木原 力

正会員 成瀬 進

正会員 諸石一幸

1. はじめに

近年の港湾構造物の計画、設計に当っては、環境に対する意識の高揚の中で、単に本来の機能を追及するのみでは不十分な情勢となってきた。特に防波堤は水深の深い箇所に設置されることが多く、その本来の機能の発揮と同時に、反射波の発生、潮流の変化、港内と港外の海水交換の阻止を必然的に生じさせる構造物であるため、その設計に際しては周辺環境への影響を極力低減させるべく、十分な考慮を払う必要がある。

第四港湾建設局においては、このような情勢の変化と、これに対応する技術開発の成果で、反射波を低減し、潮流に与える影響を小さくした透過型防波堤を鋭意検討してきており、既に佐賀県呼子港で透過型防波堤の建設を実施したほか、本稿で紹介する鹿児島港においても種々の検討を踏まえ同防波堤の建設を開始している。

本稿は、周辺住民及び漁業関係者の強い要請で透過型を採用した鹿児島港本流地区の防波堤について、その構造断面検討に係わる水理模型実験の内容とその解析結果及び断面決定までの経緯について述べるものである。

（1）鹿児島港の概要

鹿児島港は鹿児島湾口から45 kmの湾中西部に位置し、その港湾区域は南北に長く20 kmにわたっている。年間の港湾取扱貨物量は3,000万トンを超えており、南九州の拠点港として、また、南西諸島への海の玄関口として港勢を発展させてきている。

本稿で対象とする本港地区は、古くから鹿児島港の中心として機能してきた地区であるが、老朽化が進んでおり、新たに、現在分散配置されている離島期船の発着バースを集約する等の目的で大規模な計画が策定された。本港地区計画には東防波堤、南防波堤計画が含まれているが、漁業関係者からは防波堤建設による潮流の変化、港内水質の悪化に対する懸念が示され、また、環境関係者からは沖合約2 kmに位置する桜島の海岸に対する防波堤反射波の影響問題が提起され、これらへの適切な対応が必要となった。

（2）鹿児島港の自然条件

①波浪 鹿児島港での波浪は、港形より判断して港外からの侵入波よりも港内発生波が支配的と考えられる。風資料をもとにSMB法で推算して年間の波高階級別の出現頻度をみると、波高0.5 m以下の発生頻度が極めて高く全体の90%以上を占める。これに対して波高1.0 m以上の波の発生頻度は低く1%以下である。また、台風等の異常時における波浪についても、過去の風記録を用いてSMB法により各風向別の波高を求めると、SE及びSSE方向で波高4 m、周期7 secと推計された。

②潮流 鹿児島湾の潮流は観測結果によると以下のことが言える。

- ・M2分潮が卓越している。
- ・鹿児島港より沖に行くに従い流速が速くなる。
- ・上げ潮時は北流、下げ潮時は南流と反転性の強い往復流である。
- ・流速値は最大50cm/sec～70cm/secで恒流値は2～18cm/sec程度である。

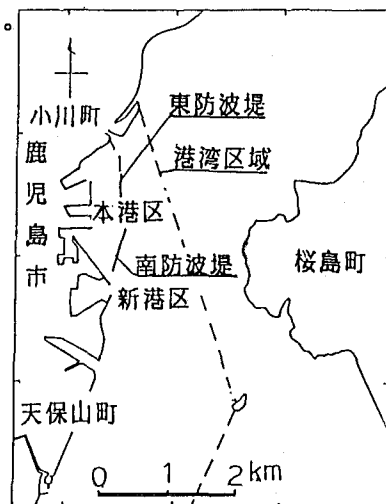


図-1 鹿児島港平面図

（3）水理模型実験の概要

本港地区南防波堤の構造断面を決定するため、以下に示す3種類の水理模型実験を実施した。

- ①潮流実験 透過型防波堤の効果を見るため、4ケースの構造断面を仮定し、3次元の潮流実験を実施した。その結果透過型防波堤の有効性が確認された。
- ②断面実験 4ケースの構造断面について、2次元水路において、反射率、伝達率および波力を測定した。その結果選択すべき構造タイプの絞り込みが可能となった。
- ③斜め入射波実験 ①、②の実験結果で得られた最適な構造タイプについて、その設計諸元を決定するため、主波向に対する反射率等を測定した。

2. 潮流実験

(1) 実験内容

現地に防波堤を建設することによる潮流の変化を把握するため、潮流実験を実施した。潮流実験での潮の流れは実験施設の制約上定常流とし、現地大潮期の北流及び南流時の最大流速を模型に再現した。流速測定点の位置を図-2に、実験対象防波堤の構造を図-3に示す。実験はケーソンの目地部を開いて設置した目地開け堤、堤体の下部に通水開口部をもつ開口堤、およびスリット堤の透過型防波堤3種類と、これと比較するため不透過型の不透過堤を対象とした。透過型の3タイプの開口率は共に20%とした。なお、開口率はマウンド水深(-20m)よりH、W、L、(-2.8m)までのケーソン本体投影面積に対する開口部の比で表わしている。

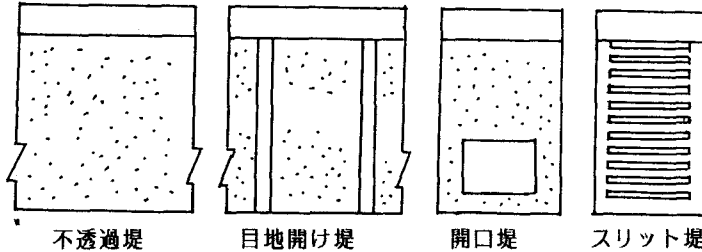


図-3 防波堤構造

(2) 実験結果および考察

a) 北流時 現況は、防波堤位置付近が本流と本流から派生した流れの境界にあたり、港内側で反時計回りの環流が発生している。透過型及び不透過型防波堤を設置すると、南防波堤港内側に時計回り、東防波堤港内側に反時計回りの環流が発生するが、この環流は、不透過堤では顕著に現れ、透過堤では小さい場合や不安定になる場合がある。図-4で流速値比較すると、現況に対して堤体設置後は港内側で2~5割小さくなった。

構造形式による流速の変化は開港部付近の測点13ではほとんど差はないが、南防波堤背後の測点14、15では不透過堤よりも透過型の目地開け堤、通水開口堤の方が現況に近い値を示した。港外側については現況に対してほとんど流速の変化は見られなかった。

b) 南流時 現況は、防波堤位置付近より港奥側に本流と本流から派生した流れの境界があり、派生した流れの領域では時計回りの環流が見られる。防波堤を設置することにより、港内における環流が各ケースで見られるものの不明瞭となった。図-5より、流速値を比較すると、防波堤構造の違いによる開港部付近の測点9以外では不透過堤より透過型の方が現況に近い値を示した。

以上、港内流速は、防

波堤を設置することにより北流及び南流時とも小さくなるが、なんらかの形で透過型にした構造の方が不透過堤よりも潮流に与える影響が小さいことが判明した。さらに、本稿では紹介していないが、港内と港外の海水交換、反射波等についても透過堤が有利と判断されたため、透過型防波堤についてさらに検討を進めることとなった。

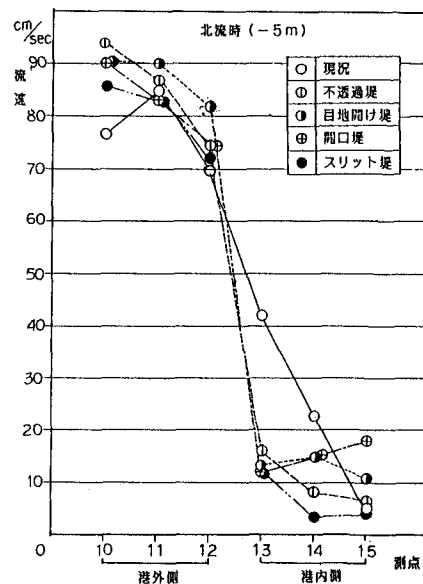


図-4 構造別の南防波堤における流速分布

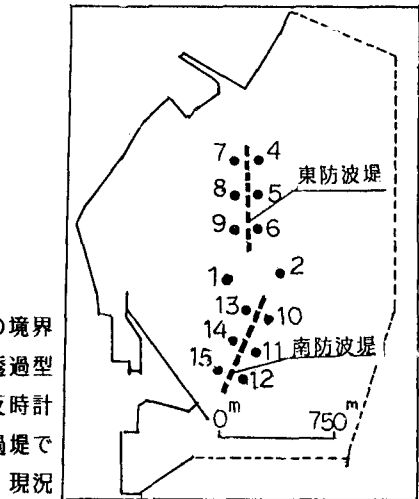


図-2 流測定点位置

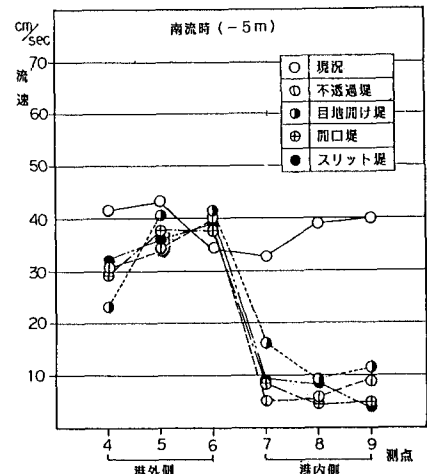


図-5 構造別の東防波堤における流速分布

3. 断面実験

(1) 実験内容

a) 施設

当所、所有の長さ50m、幅1m、高さ1.5m、鋼製片側一部ガラス面の二次元水路を使用した。造波機は、フラップ型で、不規則波の発生が可能である。

b) 堤体

前章で述べたように、透過タイプとして目地開け堤、開口堤、スリットケーソン堤とし、開口率を変化させた。堤体断面を図-6に示す。また、これら透過堤との比較の意味で、通常の不透過堤の実験も実施した。

c) 実験条件

潮位はH. W. L. の一定とした。作用波は計測項目により以下のように区分した。

反射率、伝達率：ブレットシュナイダー・光易型のスペクトルを有する不規則波（ $H=4\text{m}$ 、 $T=7\text{sec}$ ）

波圧、波力合力：規則波（ $H=4\text{m}$ 、 $T=7\text{sec}$ と $H=4\text{m}$ 、 $T=10\text{sec}$ ）

(d) 測定方法

反射率、伝達率：堤体の前後に設置した波高計により波高を計測し、FFT法による入反射波の分離計算により反射率を、透過波高より伝達率を求めた。

波圧：波圧計を設置した

波力合力：堤体を吊るし予め後方に引張力を作用させた状態で、堤体背後に設置したロードセル（3個）により測定した。

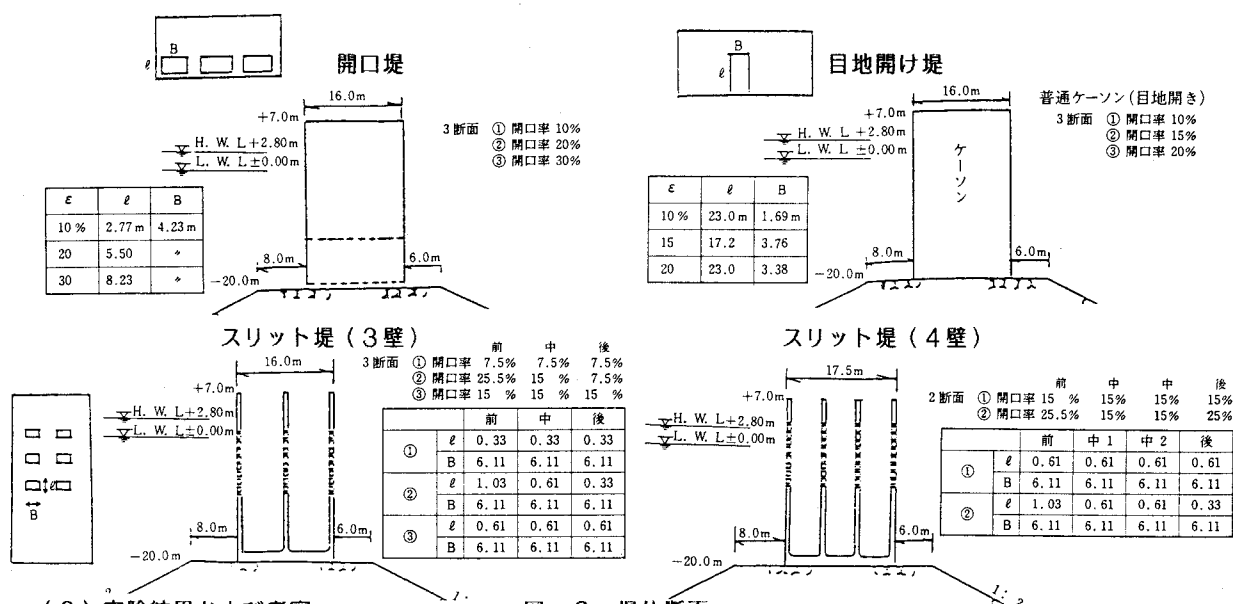


図-6 堤体断面

(2) 実験結果および考察

(a) 反射率と伝達率

図-7は、目地開けおよび開口堤の開口率に対する反射・伝達率の関係を示したものである。図-8は、スリットケーソン堤の反射・伝達率を各ケース別に示している。これから、以下のような事が結論づけられよう。

- ① 目地開け、開口堤ともに、スリットケーソンに比し反射率は0.8~0.9と大きく、伝達率は0.1~0.2と少ない。スリットケーソンはいずれの場合も反射率が0.3~0.5、伝達率は、0.2~0.4の間にある。
- ② 目地開け、開口堤とも、開口率を上げれば反射率は下がり、逆に伝達率は上るが、開口率の差は開口率20%のケースの伝達率以外はさほど顕著でない。
- ③ スリットケーソン堤では、3重壁、4重壁ケーソンのどちらが有利か定めがたい。ただし、構造タイプについては、いずれのケースとも壁の開口率が同一開口型よりは段階縮小開口型の方が有利と言える。

(b) 波圧および水平波力

各堤体毎に測定した結果から波圧の特徴を述べると以下のようにたると。

目地開け堤： 前面の波圧および底面の揚圧力は合田の理論値に近い。目地上部に作用する揚圧力は底面の揚圧力より大きく、堤体中央部でかなり大きい値を取る。開口率の相違による波圧の相違は、前面および底面についてはほとんど無く、目地部揚圧力に差がでている。

開口堤： 前面壁への波圧は、ほぼ理論値と合致する。開口部揚圧力は目地開け堤の目地部揚圧力より小さく、ほぼ底面へ作用する揚圧力と同程度である。開口率の相違による波圧の相違は明確でない。

スリット（3壁）： 前面壁への波圧はほぼ理論値と一致。中壁にも、前面壁と同じ程度の波圧が作用する。後壁の波圧は前・中壁よりかなり小さい。開口率の違いによる波圧の違いは、後壁の場合幾らか見られるが前・中壁については、ほぼ同じである。

スリット（4壁）： 前面壁および中壁①については3壁と同様なことが言える。中壁②、後壁に付いては、ほぼ同じような値を取り、前面および中壁①よりやや小さい。

最後に、各堤の全水平力を、通常堤のそれとの比で現すと図-9、図-10が得られる。この図より、波力に関し、以下の事が結論づけられよう

- ① いずれのケースを採っても、透過堤の全水平力は通常堤のそれより小さくなる。この傾向は特に周期の短い波に対し顕著である。
- ② 開口堤については開口率が大きい程有利となる。
- ③ スリットケーソンでは、特に $T=7\text{ sec}$ の波に対し3壁段階縮小開口率の波力が小さいことから最も有利と思われる。

(c) 結論

以上、反射・伝達および波力の面から見て、望ましい構造タイプを選定すると、反射率を減らす為には、スリットを設けるべきであり、波力の面からは、20%以上の開口率を有しておれば開口およびスリットケーソンにさほど大きな相違を生じないと言えよう。

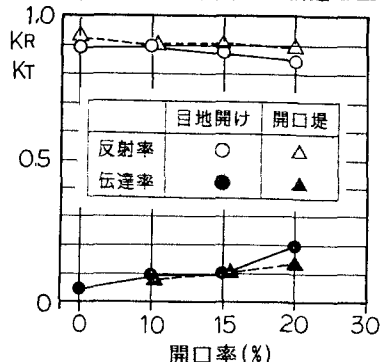


図-7 目地開け堤、開口堤の反射・伝達率

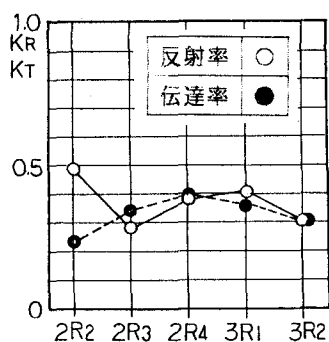


図-8 スリット堤の反射・伝達率

	有水室	空隙率
2R2	2	各壁 7.5%
2R3	2	前25.5% 中15% 後 7.5%
2R4	2	各壁15%
3R1	3	各壁15%
3R2	3	前25.5% 中15% 後 7.5%

表-1 スリット堤実験ケース

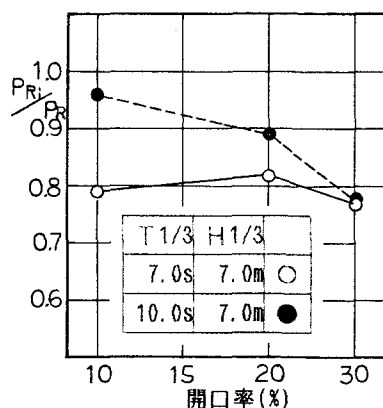


図-9 目地開け堤、開口堤の最大波圧合力比

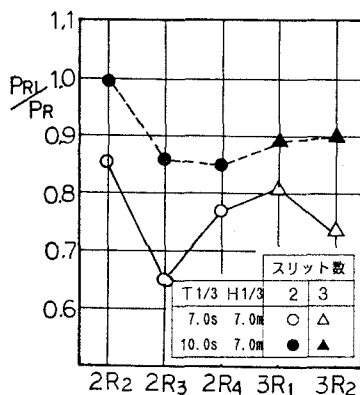


図-10 スリット堤の最大波圧合力比

(1) 実験内容

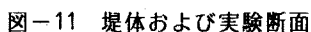
実験に用いた水槽は当所所有大型平面水槽 (60m × 50m × 1.5m) であり、ピストン型造波機が6台設置されている。水槽側壁前面にはステンレス屑を中詰めした消波装置を設置し、周辺からの再反射を出来るかぎり低減させた。

前述した平面水槽による潮流実験、2次元水路による反射伝達、波力実験等の実験結果を踏まえつつ、現地の要請および現地工事の施工性、経済性等を検討の結果、構造タイプを、前面上段スリット、下段穴あきとしたケーソン型とした。

実験断面は図-11に示すように、高さ18m、天端幅26.3m、法面勾配1:2のマウンド上に堤体幅14.3m、全高24.5mの堤体を設置した。通水部の開口率は20%を標準に、適宜濾水板で通水開口部を塞ぐ事により0%（非通水性）、10%、15%程度の4種類とした。一方、消波部は縦スリット、横スリットの2種類とし、空隙率はともに30%である。なお、空隙率が0%に相当する直立壁の条件も比較のため行っている。

縮尺は1/50とした。潮位はH. W. L. (+ 2.8m), M. H. W. L. (+ 2.1m), M. W. L. (+ 1.4m) およびL. W. L. (± 0.0m)の4種類とした。波浪はブレッドシュナイダー光易型の周波数スペクトルを持つ不規則波を用い通常波(T1/3=4.9s, H1/3=1.0m)と50年確率波(T1/3=7.4s, H1/3=4.5m)の2種類を作用させた。波の入射角 θ は46°である。

堤前および堤背後のそれぞれ2点で波高を測定した。解析の対象とする波数は約500波であり、反射率、伝達率は断面実験と同様にして求めた。



通水部開口率に対する反射率・伝達率および縦スリット堤の潮位に対する反射率・伝達率をそれぞれ図-12、図-13に示す。本実験で得られた主要な結果は以下のとおりである。

a) 通水部開口率の影響

図-12は50年確率波が作用した場合であり、縦スリット 横スリット 直立壁とも通水部開口率が増すにつれ反射率は低減し、伝達率は増加していることが分る。反射率は、縦スリットと横スリットとも、ほとんど同じであり、直立壁より約0.3程度低くなっている。伝達率については直立壁、縦スリット、横スリットともほとんど同じであり、消波部の構造の違いが伝達率にほとんど影響しないことがわかる。なお、伝達率を0.3程度に収めるためには、通水部開口率を12%程度にしておく必要があることがわかる。

b) 潮位の影響

図-13は、通常波が作用したときの反射率、伝達率の変化を示したものであり、潮位が増すにつれ反射率は増加している。通常、遊水室を有するケーソンでは、正面から波が入射する場合、遊水室内の水深における波長に対する遊水室幅の比が反射率にたいして最も支配的であり、これが0.2~0.25のとき、最もよく消波されることが報告されている。このように、潮位が増すにつれ反射率が高くなっているのは上にのべた消波の条件からはなれていくためである。伝達率に関しては通水部開口率の違いによる差はあるものの潮位による違いほとんどない。また、通水部開口率の違いは、50年確率波に対しては反射、伝達率とも比較的顕著であったが通常波が作用したときの反射率では潮位が低いときにほとんど見られなくなっている。

以上より、斜め入射波($\theta = 46^\circ$)に対する反射は、透過壁の構造形状すなわち縦スリット、横スリットによる差はほとんどなく、直立壁の場合より0.3程度低くなることが示された。また伝達率については、消波部の影響はほとんどなく通水開口率が支配的であることが示された。

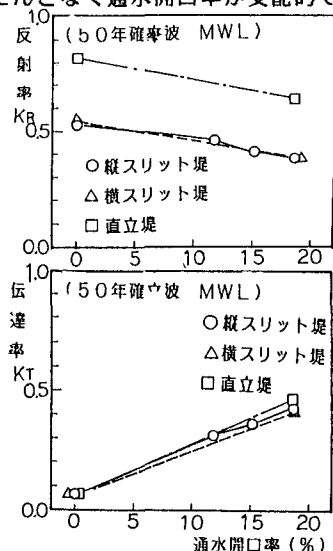


図-12 各堤体における通水開口率と

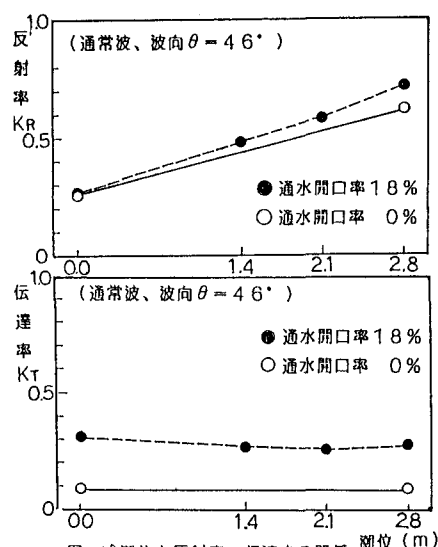


図-13 潮位と反射率・伝達率の関係

(縦スリット堤)

5. あとがき

反射率・伝達率の関係

以上の実験結果を基礎資料として実際の施工断面を検討した。断面の検討に当たっては、上記してきた消波性能、伝達性ほか、防波堤自体の安定性を確保するための重量確保、経済性、施工性等を総合的に判断した。その結果施工性の観点から縦スリット型を採用し、反射率を極力押える意味から空隙率を30%とし、通水性と伝達性の観点から通水部の開口率を12%に決定した。

現在、鹿児島港においてこのよう過程で決定された低反射型防波堤の施工が実施されている。本稿で紹介してきた透過式の防波堤の要請は、将来ともますます高まることが予想されることから、本報告が今後の透過型防波堤建設に際して参考となれば幸いである。

参考文献

- (1) 合田良実；港湾構造物の耐波設計 鹿島出版会
- (2) 谷本勝利，古本靖俊，高橋重雄；大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その1）
透過性構造（海底設置型）の反射，伝達特性に関する不規則波実験
港湾技研資料No. 516 1985年
- (3) 金子他；ADI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、No. 248、1976