

外洋波を受ける海域への傾斜板式防波堤の適用について

Application of "Inclined levee body type breakwater" for the sea area that the deep water wave effects in

中山哲蔵* 白石郁生** 木田英之*** 関口太郎*** 大久保寛*** 中泉 昌光****

Tetsugen Nakayama, Ikuo Siraishi, Hideyuki Kida, Taro Sekiguchi, Hiroshi Okubo, Masamitsu Nakaizumi

Abstract

"Inclined levee body type breakwater" is a structure that has inclined reinforced concrete boards supported by steel piles. The principal features are as follows, a) Horizontal wave force and reflection wave are less than curtain wall type breakwater such as caisson. b) Ground improvement for the poor subsoil is not necessary. c) Tidal current is not so much obstructed.

This type breakwaters were constructed in some fishing ports, for example Yobito (Hokkaido Pref.) and Otsushima (Yamaguchi Pref.), where wave conditions were calm, and poor subsoil were layered.

This paper indicates the hydraulic experiments for grasping the characteristics of wave force and the most suitable figure of inclined levee body, to apply for the sea area that the deep water wave effects in, and mentions about the investigation of jacket structure as a support.

Keywords: breakwater, jacket structure, wave, fishing port

1. はじめに

傾斜板式防波堤は①堤体に作用する水平波力が小さい。②軟弱地盤での地盤改良が不要。③海水交換性に優れる。④反射波が小さい。等の特徴を有した新形式の杭式防波堤として開発され、これまでに北海道網走市呼人漁港、山口県徳山市大津島漁港等の内湾、内海で比較的穏やかな海象条件で軟弱層の厚い場所での防波堤として採用されてきた。近年、環境保全の観点から漁港や港湾の整備において港内の水質保全が重要視されており、また漁港においては港内での魚類の中間育成や防波堤背後での養殖等の利用ニーズも高まり、潜堤付きケーソン等海水交換に主眼を置いた試みが各地でなされている。

本稿では優れた海水交換性を有する傾斜板式防波堤をより高波浪、長周期の波を受ける外洋に面した防波堤へ適用するために、傾斜板の最適諸元および波力特性の把握を目的とした一連の水理模型実験および、ジャケットを用いた支持構造の設計検討を実施したので、その内容について報告する。

2. 長崎県高島町南風泊漁港への適用

2-1 計画概要

長崎県西彼杵(にしそのぎ)郡高島町の南風泊(はえどまり)漁港西沖防波堤は全長 250m であり、110m(西側)の傾斜板式防波堤と 140m(東側)のスリットケーソンで構成される。

傾斜板式防波堤はさらに 2 基のジャケット(J1ジャケット63.45m、J2ジャケット46.55m)から成る。

ジャケットは海洋石油掘削プラットフォームとして開発された鋼管トラス構造であるが、本格的なものが傾斜板式防波堤に適用されたのはこれが初めてである。

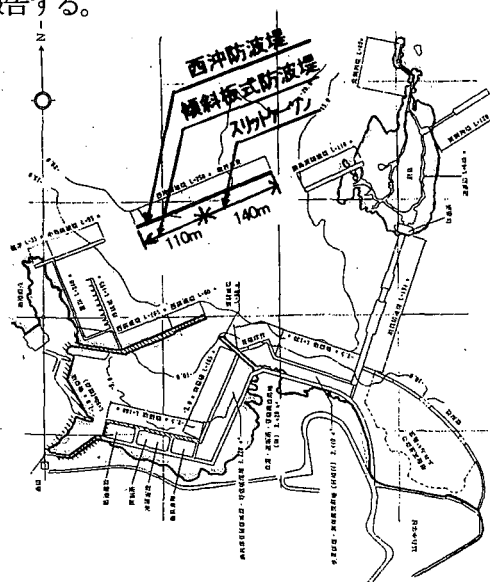


図 2-1: 長崎県高島町南風泊漁港西沖防波堤

* 水産庁水産工学研究所 漁港水理研究室

** 財) 漁港漁村建設技術研究所

*** 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 (229-1131 神奈川県相模原市西橋本 5-9-1 0427-71-6121)

**** 水産庁 漁港部 建設課

本防波堤の設計条件は、水深 20m、潮位差 3.3m、30 年確率波は波高 $H_{1/3}=5.5\text{m}$ 、波周期 $T_{1/3}=15.2$ 秒であり、1 年確率波は波高 $H_{1/3}=2.6\text{m}$ 、波周期 $T_{1/3}=11.2$ 秒である。所要伝達率は 30 年確率波に対して 0.5、1 年確率波に対して 0.4 である。漁港周辺海域は透明度が高く、磯釣り、公園も整備されており、また防波堤建設後はその背後を利用した養殖の計画もあることから、海水変換性を有する防波堤の計画が求められた。

2-2 水理模型実験

(1) 実験目的

傾斜板式防波堤は海面付近に設置された傾斜板で波浪を制御する構造であり、水深と波長の比が $h/L=0.3$ 程度の外湾、内海で従来利用されてきた。本防波堤の海象は水深波長比が 0.15 程度の外洋性の波浪であり、所要の伝達率を得るためには数十メートルにおよぶ傾斜版幅が必要となり構造も巨大となる。このため、海面付近の傾斜板に加え、海中部に直立板を配置する改良を行い、その適用性を水理実験によって検討した。

(2) 方法

縮率 1/20 の模型を用いて 2 次元造波水路（長さ 68m×幅 2.5m×水深 1.0m）において伝達特性実験と波力特性実験を 30 年確率波、1 年確率波に対して行った。

模型の設置状況は図 2-2 に示すように水路床に固定した鋼管製の支持架台にロードセルを介して防波板モデルを固定した。防波板モデルは傾斜部に相当した「傾斜板モデル」と鉛直面と 14 度の傾斜角をなす「直立部モデル」より成る。

伝達特性実験は不規則波を用いて防波堤の沖側、岸側に各 2 台設置した波高計により、伝達率を計測した。

波力特性実験は最大波高相当の規則波を用いて行い、傾斜板モデルの 3 箇所、直立部モデルの 8 箇所に取り付けたロードセルにより波力を計測し、防波板の表裏に取り付けた波圧計により、5 つの水位レベルについて波圧を計測した。計測サンプリングの時間間隔は 30 msec とした。

表2-1：計画条件一覧

水深	19m～20m（設計上は20mとする）		
全長	250m（内傾斜版式防波堤は西側110m）		
耐用年数	30年		
所要伝達率	0.5（30年確率波に対して） 0.4（1年確率波に対して）		
対象波浪		有義波高 $H_{1/3}$ m	有義波周期 $T_{1/3}$ sec.
	30年確率波	5.5	15.2
	1年確率波	2.6	11.2

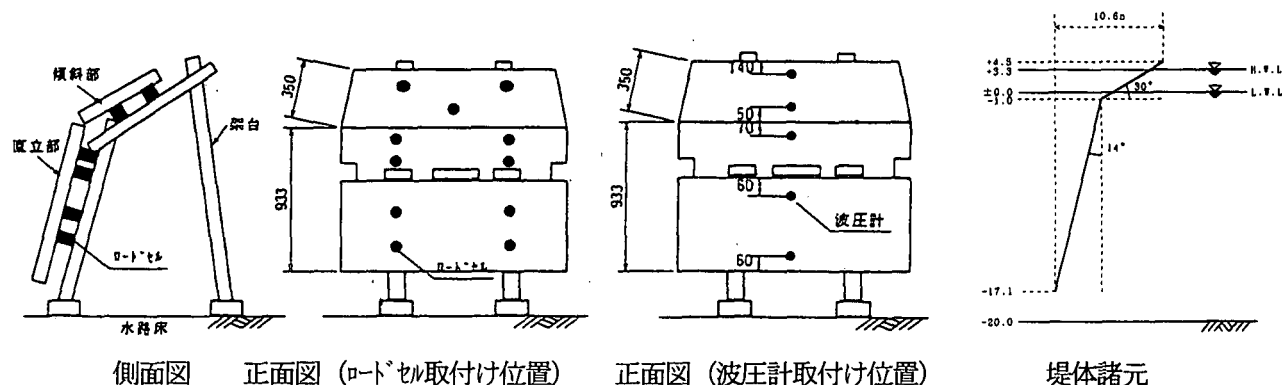


図 2-2：模型及び設置状況

(3) 結果

① 伝達特性

図 2-3 は、鉛直板による改良を加えない、つまり、傾斜板単独の場合の伝達特性を示したものであり、傾斜板の幅 B と波長 L の比 B/L を横軸に、実験で得られた伝達率を縦軸に示したものである。所要伝達率 0.4 を満たすには B/L が 0.28、幅 B は 4.0 m 程度の巨大なものとなる。一方、今回得られた防波板の諸元は図 2-2 に示すように堤体幅は 10.6 m となり、経済的な構造となる。

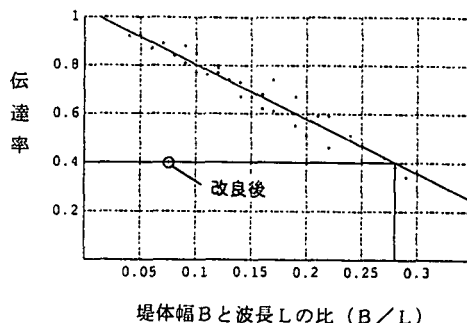


図 2-3：伝達特性（傾斜板単独）

②波力特性

図 2-4 は実験によって得られた波周期に対する波力特性の変化をLWL時の押波時について示したものである。横軸に波周期、縦軸に波力係数として「法線単位長さあたりに作用する波力の水平方向成分（以下、水平波力と言う。）を波高と防波版の水平方向への投影面積の積で除した値」を求め、ロードセルによる計測値に基づく値を実線で、また、波圧計による計測値に基づく値を破線で示し、併せて伝達率を图中に示している。

図 2-5 は 30 年確率波の最大波高に相当する規則波（波高 8.12m、波周期 15.2 秒）を用いた実験より得られた水平波力の時刻歴を示したものであり、横軸に計測時間を、縦軸に水平波力を共に実スケールに換算した値を用いており、ロードセルで計測された水平波力を実線で示し、計測波圧を基に得られた水平波力を破線で示している。時刻歴波形を見ると、引波時にやや衝撃的な成分はあるが、押波時には衝撃的成分はないことがわかる。また、ロードセルによる計測値（実線）と波圧計による計測値（破線）が一致していることから、衝撃的波圧が生じなかったことがわかる。このように当初、心配したような全体の安定性に影響を及ぼす傾斜板上での衝撃的碎波は生じていないことが確認できた。

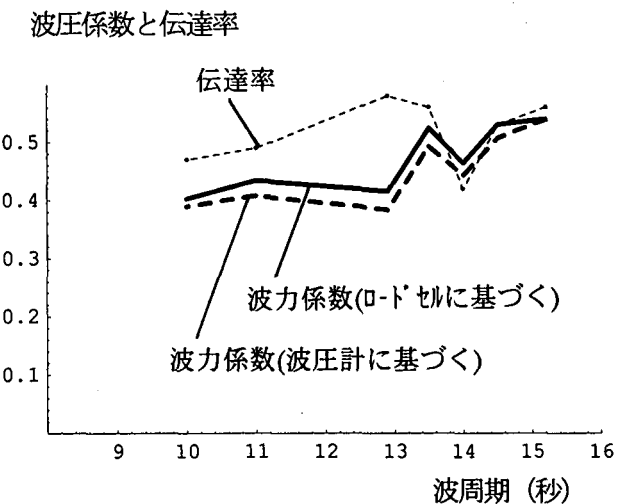


図 2-4：波力特性（実機換算 LWL 時）

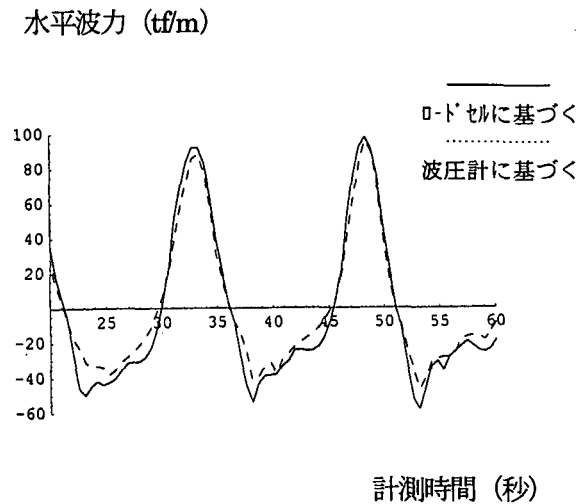


図 2-5：水平波力の時刻歴（実機換算）

図 2-6 は実験で得られた波圧の水深方向分布を示したもので、縦軸に海底面からの高さを、横軸に波圧を示している。ここで波圧は各水位レベルにおける防波版の両面での計測波圧の差を示している。参照値として直立壁に作用する波圧分布を破線で示した。図に示す計測波圧を水深方向に沿って積分した値、つまり、水平波力は 93tf/m、直立壁に作用する波圧を積分した結果は 179tf/m であり、52%となっている。水深方向の波圧分布から傾斜部での波圧が小さいことがわかる。このように水平波力を大幅に低減できた理由として設計波に対する伝達率が 0.5 であるため、天端が低く波圧が低減できたこと、また、水面付近に傾斜部を設けたため、波圧の水平成分が小さくなったことが挙げられる。

③まとめ

以上のように、直立壁を付けることにより伝達特性を向上し堤体幅を小さくでき、また、波力特性として、

- ・傾斜板上での碎波は生じず、衝撃的な波圧が発生しなかったこと
- ・傾斜部を設けることにより直立壁に比べ波圧強度をかなり低くすることができること

を確認し、結果として経済的断面を得ることができ、外洋性の波浪に対して、有効であることが確認できた。

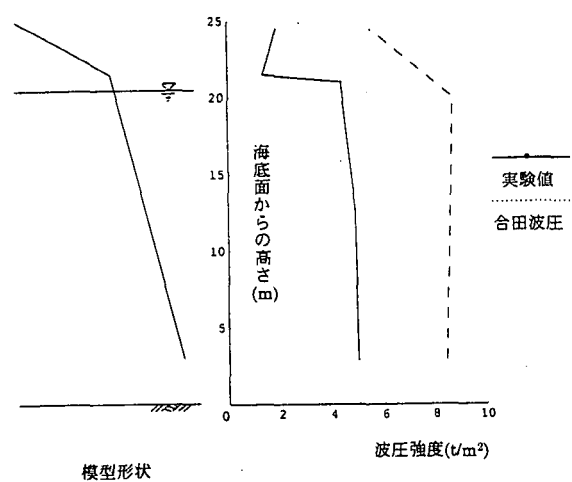


図 2-6：波圧の水深方向分布

2-3 構造概要

水理模型実験により、防波板は傾斜角度 30 度の傾斜板と、鉛直面と 14 度の傾斜角をなす直立板を併用することで所要の伝達率を確保できることが判明した。傾斜板は厚さ 35cm、長さ 7.0m、幅 12.4m の鉄筋コンクリート板、直立板は厚さ 40cm、長さ 18.15 m の鉄筋コンクリート板である。

ジャケットは傾斜角が 1:4 のレグ (φ 1320.8) とそれらを繋ぐ鋼管トラスで構成され、重量は合計で 1509tf (J1 ジャケット 844tf、J2 ジャケット 665tf) である。レグ とスリーブパイル (φ 1200)、スリーブパイルとピンパイル (φ 900) 防波版とジャケット本体はそれぞれシキ-接合により現場で一体化される (図 2-7 参照)。シキ-接合は二重管の間隙に、セメントグラウトを充填し、その付着力およびシキ- (ずれ止め) により一体化する接合法で、その許容付着力は API (米国石油協会) の RP-2A (20 版) 等で規定している。

防食は、干満帯以下の範囲 (DL-1.0m 以下) では電気防食、干満帯以上の範囲については塗覆装、およびステンスライジングによる重防食を施す。

2-4 設計手法

ジャケット、杭を一体化した 3 次元の骨組構造でモデル化し、水理模型実験にによる波力 (押波、引波) を集中荷重として載荷し、ジャケット、杭の部材断面を決定した。波力は、その値が最大となる暴風時の条件を用いた (表 2-2 参照)。防波板は直接モデル化せず、雄管先端に自重を集中荷重として載荷した。防波板の設計は別途、コンクリート標準示方書に従って行った。土中部の横方向地盤ばねは、全国漁港協会の漁港構造物標準設計法 (1990 年) に従い、線形ばね (横方向地盤反力係数 $kh=0.15N$) とした。また、先端はピン支持とした。鋼管トラス格点部は、API (米国石油協会) の RP-2A (20th edition) の押抜きせん断耐力の照査を行った。

地盤支持力および安全率は漁港構造物標準設計法 (1990 年) によった。但し、DL-29.6~39.0m 以下の岩盤については、一軸圧縮強度 $qu \geq 1000tf/m^2$ では、白島セバース、上五島セバースでの設計例を参考に、杭-グラウト間、グラウト-岩盤間共に $12.5tf/m^2$ を許容、 $qu < 1000tf/m^2$ では道路橋示方書下部構造編の場所打ち杭に適用される極限值 $20tf/m^2$ を用いて許容付着力を求めた。他に施工時の検討として、ジャケット吊り時、ジャケット仮受け時、輸送時の検討を行った。

表2-2：設計条件																											
潮位	H. W. L. ... DL+3. 3m L. W. L. ... DL+0. 0m																										
暴風時波浪	水理実験で押波時波力、引波時波力がそれぞれ最大となる以下の条件とする。																										
	<table><tr><th></th><th>H_d m</th><th>T sec.</th><th>潮位</th></tr><tr><td>押波時</td><td>9.9</td><td>15.2</td><td>L.W.L.</td></tr><tr><td>引波時</td><td>10.0</td><td>13.5</td><td>H.W.L.</td></tr></table>		H _d m	T sec.	潮位	押波時	9.9	15.2	L.W.L.	引波時	10.0	13.5	H.W.L.														
	H _d m	T sec.	潮位																								
押波時	9.9	15.2	L.W.L.																								
引波時	10.0	13.5	H.W.L.																								
土質条件	土質はJ1、J2ジャケットそれぞれ設置位置に近いボーリングデータより以下とする。																										
	<table><tr><th colspan="2">J1ジャケット</th><th colspan="2">J2ジャケット</th></tr><tr><th>標高</th><th>土質</th><th>標高</th><th>土質</th></tr><tr><td>DL-20.0 ~DL-21.5</td><td>洗掘</td><td>DL-20.0 ~DL-21.5</td><td>洗掘</td></tr><tr><td>DL-21.5 ~DL-32.5</td><td>砂層 N=13.55</td><td>DL-21.5 ~DL-27.5</td><td>砂層 N=8.34</td></tr><tr><td>DL-32.5 ~DL-39.0</td><td>砂層 N=18.24</td><td>DL-27.5 ~DL-29.6</td><td>砂層 N=12</td></tr><tr><td>DL-39.0~</td><td>風化砂岩 N>50</td><td>DL-29.6~</td><td>風化砂岩 N>60</td></tr></table>	J1ジャケット		J2ジャケット		標高	土質	標高	土質	DL-20.0 ~DL-21.5	洗掘	DL-20.0 ~DL-21.5	洗掘	DL-21.5 ~DL-32.5	砂層 N=13.55	DL-21.5 ~DL-27.5	砂層 N=8.34	DL-32.5 ~DL-39.0	砂層 N=18.24	DL-27.5 ~DL-29.6	砂層 N=12	DL-39.0~	風化砂岩 N>50	DL-29.6~	風化砂岩 N>60		
J1ジャケット		J2ジャケット																									
標高	土質	標高	土質																								
DL-20.0 ~DL-21.5	洗掘	DL-20.0 ~DL-21.5	洗掘																								
DL-21.5 ~DL-32.5	砂層 N=13.55	DL-21.5 ~DL-27.5	砂層 N=8.34																								
DL-32.5 ~DL-39.0	砂層 N=18.24	DL-27.5 ~DL-29.6	砂層 N=12																								
DL-39.0~	風化砂岩 N>50	DL-29.6~	風化砂岩 N>60																								

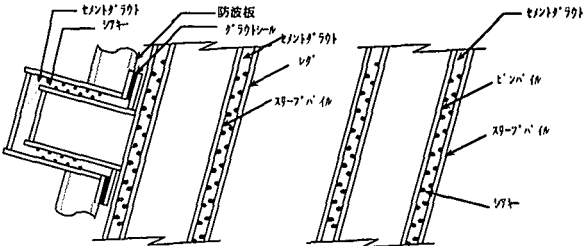


図2-7：シキ-接合概念図

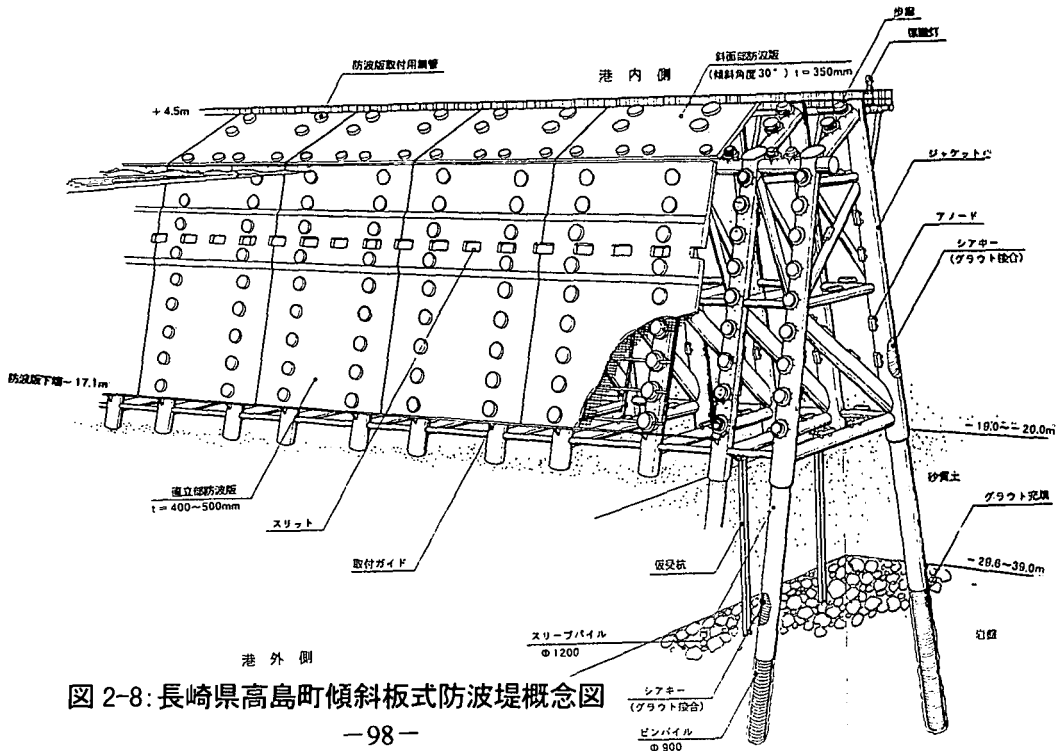


図 2-8：長崎県高島町傾斜板式防波堤概念図

3. 沖縄県糸満漁港への適用

3-1 計画概要

沖縄県糸満市の糸満漁港第一沖防波堤は全長 500m であり、そのうち中央部 50m と両端部（北側及び南側）33m が傾斜板式防波堤、その他は混成堤である。防波堤背後を利用した養殖の利用ニーズもあり、海水交換性がある傾斜板式防波堤が採用された。所要伝達率は 0.5 である。

表3-1：設計条件一覧

計画条件	水深	1m
	全長	500m(内、傾斜板式防波堤は北側:33m、中央部:50m、南側:33m)
	耐用年数	30年
	所要伝達率	0.5
自然条件	潮位	H. W. L. ... DL+3. 3m L. W. L. ... DL+0. 0m
	暴風時波浪	北側 $H_{1/3}=2. 0\text{m}$ 、 $T=13. 0\text{sec}$.
		中央部 $H_{1/3}=1. 8\text{m}$ 、 $T=13. 9\text{sec}$.
		南側 $H_{1/3}=2. 2\text{m}$ 、 $T=13. 9\text{sec}$.
土質条件	土質	DL-1. 0~-10. 0m 粘性土 (N=1~3)
		DL-10. 0~-20. 0m 砂礫粘性土互層 (N=5~15)
		DL-20. 0m以深 石灰岩 (N=50)

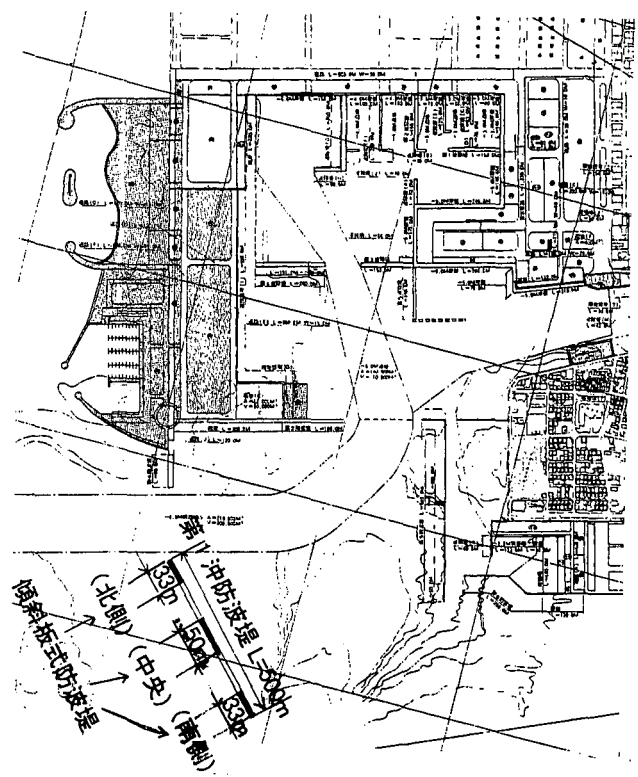


図 3-1：沖縄県糸満漁港第一沖防波堤

3-2 水理模型実験

(1) 目的

本防波堤の建設地点は珊瑚礁のリーフ上であり、設計水深は 1m と浅く、防波堤に到達する波は周期 14 秒の沖波がリーフ上で砕波した波である。同条件に於いて伝達率 0.5 となる傾斜板角度、形状を水理模型実験により検討した。

(2) 方法

実験は 2 次元造波水路（長さ 20m×幅 0.5m×水深 0.4m）において縮率 1/40 の模型を用いて伝達特性、波力特性についての実験を行った。水平面とのなす角度が 30 度をなすように傾斜板を設置し、海底地盤高さを DL-1.0m、設計潮位 DL+3.0m とし不規則波を用いて伝達率を計測し、所要の伝達率を満たすように傾斜板の喫水深さ、天端高さを設定した。得られた形状に対して規則波を用いて波力実験を行い、設計波圧を設定した。また、傾斜板には通水性に配慮しスリットを設けた。波浪条件は水深 4 m に対して設計波高 $H_{1/3}=1.8\sim 2.2\text{m}$ 、有義周期 13.9 秒である。

伝達率の計測は堤体の沖側、岸側のそれぞれ 2 台、合計 4 台の波高計を用いて波高を計測した。

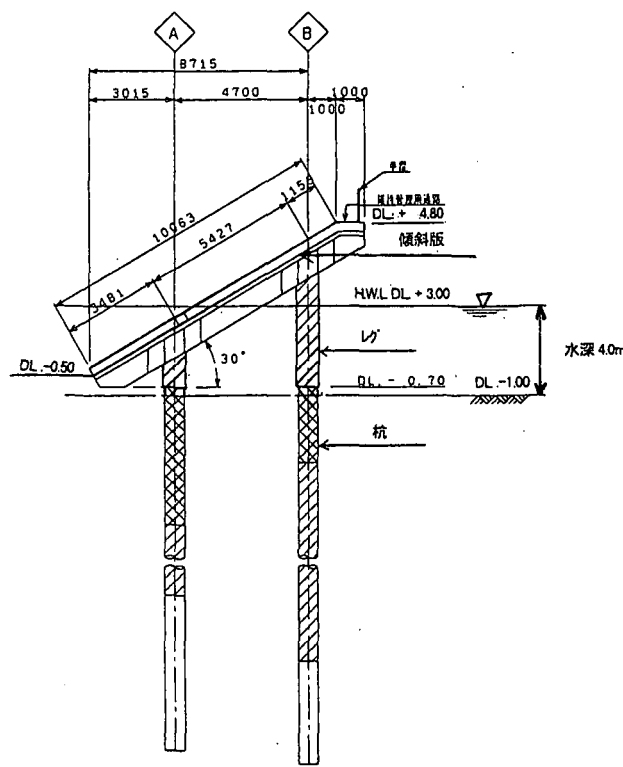


図 3-2：堤体諸元

模型の設置状況は、水路床に固定した鋼管製の架台に傾斜板モデルをロードセルを介して固定した。4つのロードセルにより得られた計測値を足し合わせることによって傾斜板に作用する波力を算定した。

(3) 結果

伝達特性実験によって得られた形状は図 3-1 に示すように、天端高さ DL+4.8m とし、防波板下端は、DL-0.5m となった。ロードセルを用いて計測値より換算した防波堤法線単位長さあたりに作用する波力は、押波時、16.4tf/m、引波時 6.1tf/m である。

3-3 構造概要

水理模型実験の結果、傾斜角度 30 度の板で、海底部付近で 50cm 程度のスリットを設け、海水交換性を確保した状態で、所要伝達率 0.5 を確保できることがわかった。構造は、水深が浅く、また実験で得られた波力も小さいことから鉄骨鉄筋コンクリート製の傾斜板を鋼管杭（φ 700）のみで支持する構造で対応可能となった。

傾斜板は厚さ 0.3m の鉄筋コンクリート製のスラブと幅 0.8m、高さ 1.2m の鉄骨鉄筋コンクリート製の梁からなり、傾斜板 1 枚の寸法は幅 8.1m、長さ 11m、重量 130tf である。本傾斜板式防波堤は 1 枚の傾斜板を 4 本の鋼管杭で支持する構造であり、鋼管杭は φ 700、傾斜板の付く鞘管（レグ）は φ 812.8 である。

全施工数量は、傾斜板 14 枚（北側 4 枚、中央部 6 枚、南側 4 枚）、鋼管杭 56 本（北側 16 本、中央部 24 本、南側 16 本）である。

杭と傾斜板との接合は、傾斜板にさや管（レグ）（鋼管 φ 812.8）を取り付けておき、現地にて杭とさや管（レグ）とをセメントグラウトによるシキ接合とした。

防食は、水深が 1 m と浅いため、電気防食は行わず、海底面より上を重防食塗装とし、土中部の杭は腐食代で対応した。

3-4 設計手法

傾斜板と鋼管杭とを一体とした 2 次元の骨組でモデル化し、水理模型実験による波力を傾斜板に作用させた。地盤は線形バネにモデル化し、上部の傾斜板と土中部の杭とを一体で解析した。

4. おわりに

傾斜板式防波堤は直立板との併用により長周期の波浪にも経済的断面で波浪を制御できることがわかった。また、支持構造にジャケットを利用することにより、大水深、高波高海域にも信頼性の高い構造を設計することが可能となった。内湾、内海のみならず、外洋波を受ける防波堤、あるいは砕波後の波を受ける防波堤に対しても傾斜板式防波堤の適用が可能であることが判明した。傾斜板式防波堤は、港内水質保全、低反射、軟弱地盤対策等、漁港建設の多様な要望に幅広く応える構造形式と考えられ、今後のさらなる広範な利用が期待できる。