

親水化に伴う防波堤の耐波安定性に関する実験的研究

間瀬 肇・高山知司・藤木繁男・國富將嗣・大谷 寛*

*(株)銭高組

要 旨

本研究で取り上げる防波堤の親水化は、防波堤の天端上に安全柵として港外側にパラベット、港内側に手すりを設けるとともに、防波堤の天端上に石舗装部、ボードウォークを設け、フットライトだけでなく、スタンドライトを設置して安全で快適な空間を作り出すものである。こうした防波堤の親水化に伴い以下の点について検討する。1) 防波堤天端上に設けるパラベットによって受圧面積が増大することによる堤体の滑動限界重量。2) 堤体内の遊水部における波動運動による揚力および揚圧力。3) 越波水による打ち込み波力。

キーワード：親水防波堤、滑動安定性、波力、揚力

1. はじめに

防波堤は海域に突き出して構築される長大構造物であり、港の安全のシンボルでもある。防波堤の主たる役割は外海からの波浪の侵入を防ぎ、港内を静穏に保ち、安全で円滑な荷役を可能にすることである。近年、海および陸からの景観は防波堤の設計に当たっての重要な要素であり、コンクリートの固まりとしての単なる構造物ではなく、海、港、街を一体化した景観の構成要素として認識されるようになってきた。

防波堤は港を守り静穏化を図るだけでなく、市民の散策路、ジョギング、憩いの場としての開放的な空間を提供する。そのため港内が静穏に保たれる限りにおいては、潮の香りとすんだ海水の維持のため海水交換が容易に行われることが望ましい。海水交換が容易な防波堤の構造形式はスリット式透過ケーソン堤であるが、スリット式透過ケーソン堤に作用する波圧の算定公式は未だ確立されていない。

ここで取り扱う防波堤の親水化は、1) 防波堤の天端上に安全柵として港外側にパラベット、港内側に

手すりを設け、2) 防波堤の天端上に石舗装部、ボードウォークを設け、3) フットライトだけでなく、スタンドライトを設けて安全で快適な空間を作り出すものである。これに伴って、以下の点を検討することが必要になった。

- 1) 防波堤天端上に設けるパラベットによって受圧面積が増大することに伴う堤体の滑動限界重量（堤体の耐波安定性）。
- 2) 堤体内の遊水部における波動運動による揚力および揚圧力（上部工およびPC梁に作用する波力）。
- 3) 越波水による打ち込み波力（石舗装部、ボードウォーク、手すりに作用する波力）。

本研究は、上記の点を実験結果に基づいて検討したものである。

2. 実験条件

Photo.1 は現在施工中の防波堤の天端を写したものであり、Fig.1 はこの防波堤の標準断面を示したものである。港内の海水交換を図るため、また低反射率とするため、スリット式ケーソン防波堤となっている。

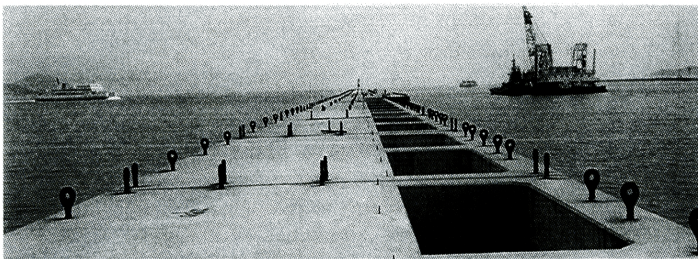


Photo.1 View of breakwater in field

る。港外側の空隙率は 30.1%，港内側の空隙率は 4.3% である。遊水部内の波動運動により，防波堤天端に設置する上部工に波力が作用することとなる。

設計波の諸元は，50 年確率波浪として，有義波高 $H_{1/3}=1.9\text{ m}$ および有義波周期 $T_{1/3}=5.5\text{ s}$ である。実験に当たっては造波機の造波能力，実験水槽の大きさ，波浪条件を勘案して幾何学的縮尺を 1/30 とし，フルードの相似則にしたがって実験条件を決定した。

Fig.2 は，実験に用いた防波堤模型の諸元を示したものである。遊水部内の波の状態が観察しやすいよ

うに，材料はアクリルで作製した。Photo.2 は，前方および後方からみた防波堤模型である。防波堤模型は 3 つの部分からなり，中央部分がケーソン一函分の模型，両側の 2 つはダムーとしての模型である。中央部分のケーソン模型の諸元が，Fig.2 である。

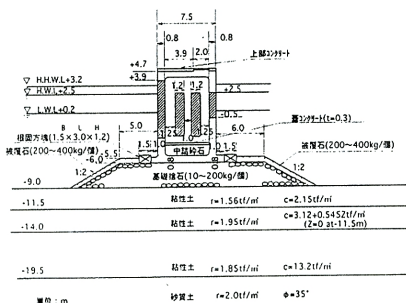
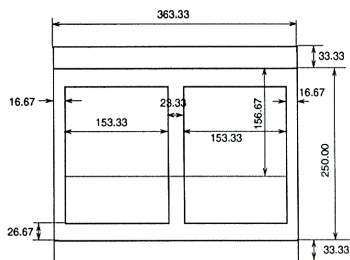


Fig.1 Cross section of breakwater in field

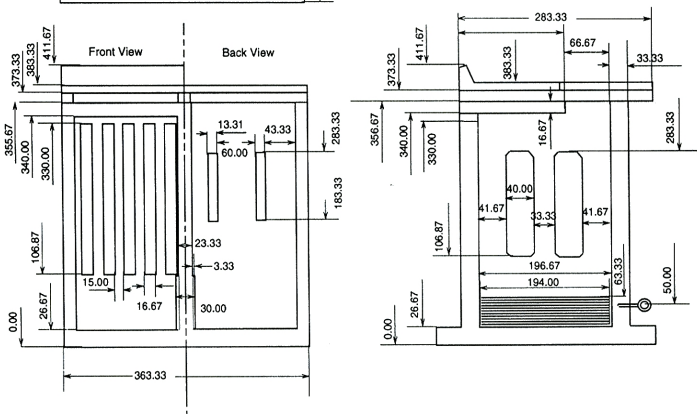


Fig.2 Dimensions of breakwater model (units: mm)

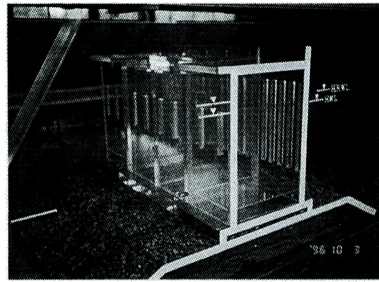
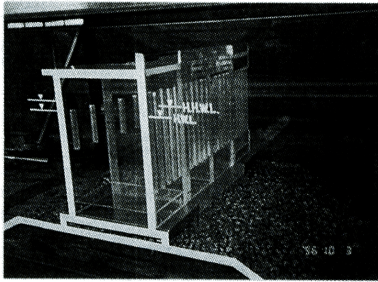


Photo.2 Front and back views of model breakwater

防波堤のマウンドはスチール枠に目の細かい金網を張って現地のマウンド形状を再現し、金網の上に中央粒径 10 mm の採石を張り付けた後、表面が平らになるように削って作製した。防波堤マウンドは、Photo.2 のとおりである。

水理実験で用いる波の諸量は、フルード則に従うと、 $H_{1/3} = 6.3 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.0 \text{ s}$ となるが、 $T_{1/3} = 1.0 \text{ s}$

の波では実験水槽内できれいに造波できなかったため、周期は $T_{1/3} = 1.1 \text{ s}$ と少し長めにした。この周期は現地スケールに直せば $T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ である。周期は設計波のそれに比べ危険側に振ってあるので、実験結果に基づき現地の波力を算定しても安全側になる。

防波堤の港内側の上部工の模型は、次の 3 種類とした。

Table 1 Experimental conditions

(a) Resistance force by caisson weight for waves

防波堤モデル	潮位	波 浪		
		種 類	周 期	波 高
ボードウォーク	H.W.L. + 2.5 m (8.33cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
		規則波	6.0 s (1.1 s)	2.0 m (6.67 cm) 2.5 m (8.33 cm) 3.0 m (10.00 cm) 3.5 m (11.67 cm) 4.0 m (13.33 cm)
	H.H.W.L. + 3.2 m (10.67cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
全面スラブ + ボードウォーク	H.W.L. + 2.5 m (8.33cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
		規則波	6.0 s (1.1 s)	2.0 m (6.67 cm) 2.5 m (8.33 cm) 3.0 m (10.00 cm) 3.5 m (11.67 cm) 4.0 m (13.33 cm)
	H.H.W.L. + 3.2 m (10.67cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
1m 開口スラブ + ボードウォーク	H.W.L. + 2.5 m (8.33cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
		規則波	6.0 s (1.1 s)	2.0 m (6.67 cm) 2.5 m (8.33 cm) 3.0 m (10.00 cm) 3.5 m (11.67 cm) 4.0 m (13.33 cm)
	H.H.W.L. + 3.2 m (10.67cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)

(b) Upward wave force and pressure on upper slab

防波堤モデル	潮位	波 浪		
		種 類	周 期	波 高
ボードウォーク	H.W.L. + 2.5 m (8.33cm)	規則波	6.0 s (1.1 s)	3.0 m (10.00 cm)
	H.H.W.L. + 3.2 m (10.67cm)	規則波	6.0 s (1.1 s)	3.5 m (10.00 cm)
全面スラブ + ボードウォーク	H.W.L. + 2.5 m (8.33cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
		規則波	6.0 s (1.1 s)	2.0 m (6.67 cm) 2.5 m (8.33 cm) 3.0 m (10.00 cm) 3.5 m (11.67 cm) 4.0 m (13.33 cm)
	H.H.W.L. + 3.2 m (10.67cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)

(c) Overtopping wave force on upper slab

防波堤モデル	潮位	波 浪		
		種 類	周 期	波 高
全面スラブ + ボードウォーク	H.W.L. + 2.5 m (8.33cm)	不規則波	$T_{1/3} = 6.0 \text{ s}$ (1.1 s)	$H_{1/3} = 1.9 \text{ m}$ (6.33 cm)
		規則波	6.0 s (1.1 s)	2.0 m (6.67 cm) 2.5 m (8.33 cm) 3.0 m (10.00 cm) 3.5 m (11.67 cm) 4.0 m (13.33 cm)

- 1) 防波堤の横断方向に渡した梁の上にボードウォーク（アクリル板に簀の子状のスリットを入れたもの）を設置したもの（ケース名：Board Walk）
- 2) 防波堤の横断方向に渡した梁の上に全面的にスラブを設置したもの（ボードウォークはこのスラブの上に置かれる）（ケース名：Slab without Slit）
- 3) 防波堤の横断方向に渡した梁の上に横断方向に 3.3 cm（現地で 1 m）開口部を有するスラブを設置したもの（ボードウォークはこのスラブの上に置かれ、開口部を通してボードウォークの下に海面が見える）（ケース名：Slab with Slit）

実験の種類は 3 種類であり、1) 防波堤の滑動安定性実験、2) 上部工に作用する波圧・波力実験、3) 越波による打ち込み波力実験からなる。ただし、3) の越波による打ち込み波力実験は、1) および 2) の実験状況の観察により、パラベットがあるため越波が非常に少なく、ほとんど無視できることが確認できたことと、計測してもほとんど測定不可能と推測されたので、目視観察のみとし、測定器による計測は行わなかった。

Table 1 は、実験条件を示したものである。この表のうち (c) の実験は、上述の理由から実際には行っていない。

実験水槽は長さ 40 m、深さ 70 cm、幅 70 cm の両面ガラス張り水槽である。水槽の一端に造波機が設置されており、任意のスペクトル形を有する不規則波が造波できる。防波堤の模型は造波板から約 27 m 離れた地点に設置した。実験中は防波堤の側面よりビデオ撮影を行い、防波堤の移動の様子、波の打ち上げの様子、防波堤内遊水部の水面変動の様子等を観察した。

3. 滑動安定性実験およびその結果

3.1 実験装置および方法

防波堤の滑動安定性実験を行うに当たって、ケーソンと捨石マウンド間の摩擦係数を知る必要がある。そのため、ケーソンに水平荷重を加えて引っ張る摩擦係数測定装置を厚さ 3 mm および幅 50 mm のアルミのアンクルで制作した。それを万力で水槽に固定した。この摩擦係数測定装置はケーソン上部のフックを鉛直方向に引っ張ることができるようにも作っており、上部工に作用する揚力測定装置の検定にも用いた。

摩擦係数の測定は、以下の手順にて行った。

- 1) 堤体重量をある重量とする。
- 2) ケーソンが動かない荷重から始めて、徐々に重りを増やしていき、滑動限界時付近では重りを 50 gf

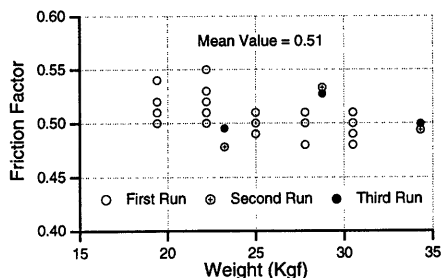


Fig.3 Measured friction factor

単位で変化させて、動き始める重量を求める。

- 3) 滑動限界重量のばらつきを考慮して、2) の測定を数回行う。

- 1) ~ 3) の計測を堤体重量を変化させて繰り返す。

こうした摩擦係数の測定は、a) 防波堤の滑動実験前、b) 滑動実験終了後同じ位置にて、また c) 滑動実験終了後ケーソンの初期位置を 1 cm 後ろにずらして測定した。計測に当たっては、水位はケーソン底部から 5 mm 上にくるように設定し、ケーソン底部は水に浸かっているようにした。

Fig.3 は摩擦係数の測定結果を示したものである。横軸はケーソン重量、縦軸は限界滑動重量をケーソン重量で除した摩擦係数である。図中の First Run 等の凡例は、前に記した a) ~ c) の測定を意味するものである。この図によれば、堤体重量が小さいときに摩擦係数が大きいという傾向が見られるようである。また測定結果にばらつきが見られるが、摩擦係数の平均値は 0.51 である。この値は防波堤の設計で通常用いられる 0.6 より小さいが、これは実験で用いた防波堤マウンドの製作に当たり、採石表面を削り滑らかにしたことによるものと思われる。

摩擦係数の算定に当たっては堤体が動き始めるか否かが問題であり、堤体の詳細な変位計測は必要なかったが、波に対する限界滑動抵抗力の算定に当たっては、堤体の波ごとの変位記録が必要となる。そのため、防波堤の変位を計測するために変位計を用いた。変位計は摩擦係数測定装置のフレームに 2 台設置し、堤体の両端の変位量を計測した。

滑動安定性実験は、以下の手順にて行った。

- 1) 目標の波（規則波および不規則波）の造波ができるように造波信号を作成する。
- 2) 堤体内部の重りを調整し、堤体重量を決定する。堤体重量は最初堤体が移動しない状態から始めて、徐々に軽くしていく。

3) 目標波を防波堤に作用させて、堤体の変位を記録する。同一の目標波に対し、実験を3回繰り返す。測定時間は60s間である。

なお、測定時間は以下のように決めた。造波板から防波堤までの距離は約27mである。造波開始後防波堤には波の先端は群速度(約1.02 m/s)で27/1.02 = 26.5 s後に到達する。防波堤で反射して造波板に達し、その波が防波堤まで到達する時間は距離27 x 2 mを位相速度1.53 m/sで割った35.3 sである。したがって、61.8 s間は造波板からの再反射波はないとし、測定時間を60 sとした。

波はパソコンにより信号が作成され、DA変換ボードを介してアナログ信号が造波機に送られ造波される。その波を目標波と比較し、目標波が造波できるように入力信号を決定した。最終的に造波した波と目標波との誤差は、規則波および不規則波とも5%以内であり、うまく目標波が再現できた。

波高計は容量式である。この容量式波高計を防波堤前面から2 cm離れた地点、ケーソン前面から4.75 m離れた地点とそこから40 cm離れた地点、および防波堤背後の約2 m離れた地点の計4箇所に設置した。

3.2 実験結果および考察

Fig.4は1波当たりの防波堤の変位量を示したものであり、2台の変位量の平均値である。横軸は浮力を差し引いた堤体の単位幅当たりの堤体重量に摩擦係数を乗じた滑動抵抗力、縦軸には造波開始後45 sから55 sのトータルの変位量を用波数で除した一波当たりの堤体の変位量を取り、波高をパラメータとして示してある。(a)図はBoard Walk, (b)図はSlab without Slit, (c)図はSlab with Slitのケースに対するものである。これらの図から、滑動限界抵抗力を求めた。その際、内挿は行わず、一波当たりの変位量がはじめて0となる滑動抵抗力を求めたので、実際には大きめの抵抗力を算定していることになる。したがって、設計に当たっては安全側になる。

Fig.4からは各ケースの差が容易に読みとれないので、Fig.5では横軸に設計波高 H_D で無次元化した波高を取り、縦軸に限界滑動抵抗力の平均値を $w_0 H d$ (d はマウンド上水深)で無次元化した限界滑動抵抗力を取り、3ケースの結果を同時に示した。この図から、Slab without Slitで示した全面スラブの場合が最も無次元限界滑動抵抗力が大きくなることが見て取れる。このことは、上部工に全面スラブを採用するとき、最も堤体重量を大きくしなければならないことを意味する。各ケースの無次元限界滑動抵抗力の差異は、逆水部の空気がどれだけ容易に堤体外部

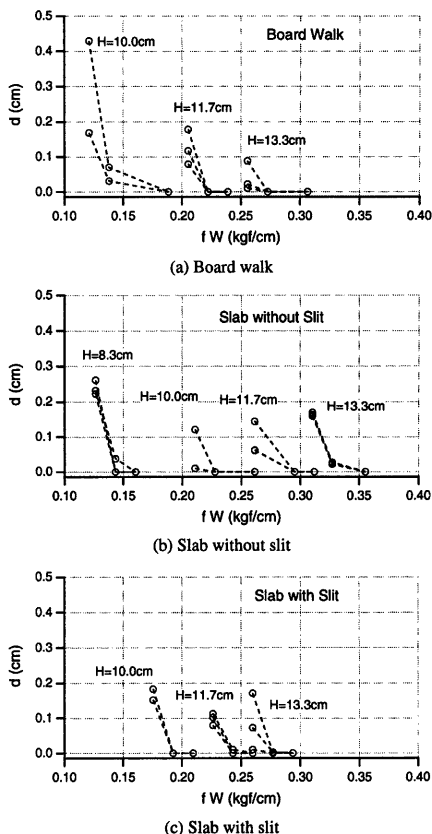


Fig.4 Displacement against resistance force by weight

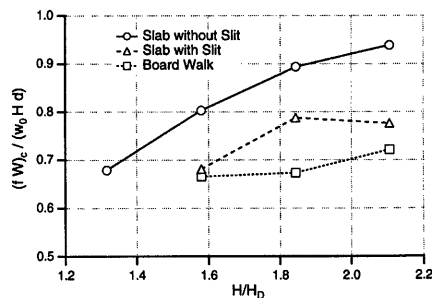


Fig.5 Normalized critical resistant force

に排出できるかに依存する。空気の排出がしにくいと考えられる順にしたがって、無次元限界滑動抵抗

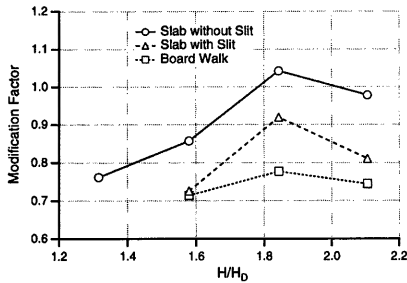


Fig.6 Modification factor for calculated wave force

力が大きくなっている。

Fig.6は3ケースの波力低減係数を示したものである。横軸は無次元波高である。波力低減係数は実測滑動限界抵抗力を合田(1977)の波圧算定式による滑動限界抵抗力で除したものである。すなわち、実測波力が合田式で算定される波力の何倍であるかを表すものと考えればよい。最高波高を有義波高の1.8倍とするなら、全面スラブの実験ケースでは、Fig.6から波力低減係数は約1.0となって、合田の波圧算定式で求められる波力と同等の力が作用したことになる。

滑動実験は入射の作用波力に対する堤体の滑動そのものを直接測定し、堤体の滑動安定性を検討するものである。堤体の滑動抵抗力は、堤体の水中重量に摩擦係数を乗じた力である。本堤体の場合、堤体底面には揚圧力が作用するとともに、堤体内部の遊水室では上版に揚圧力が作用し、底板には鉛直下方の力が作用する。そのため、これらの力の合力として上方に力が働く場合には堤体はそれだけ軽くなり、滑動抵抗力は減少する。しかしながら、堤体に作用する揚圧力についてはこれら3成分の力を実験で測定しているわけではないので、これらの力を見積もることはできない。

本実験では、堤体が動き始める限界の水中重量を求め、この重量に堤体模型の摩擦係数を乗じて限界摩擦抵抗力とした。この限界抵抗力は入射する波の条件によって変化する。しかし、実物の堤体に設計で用いる摩擦係数を用いて求めた滑動抵抗力が実験で求めた限界抵抗力より大きければ、実物の堤体は滑動しないことになって、滑動に対して安定であると判断することができる。本滑動実験は、既設の防波堤に対して親水性機能を付加すること、つまり、堤体前面にパラベットを設けることとボードウォーク用の上版を設置することによって堤体の安定性が保たれるかどうかを検討することであるために、現状の

堤体を親水性に改造したとしても堤体の滑動抵抗力が実験で求めた限界滑動抵抗力より大きければ安定していることになる。

そこで、これを判断する方法として、合田公式による波力を用いた。合田の波力公式は本実験で用いた堤体のように内部に遊水室を存在する堤体には適用できない。適用できるのは、遊水室のない直立防波堤である。そこで、堤体を遊水室のない直立防波堤と仮定し、入射波の条件のもとで合田公式から算定される波力から滑動しない堤体の滑動抵抗力を求める。実験から求めた限界滑動抵抗力と合田公式から求めた滑動抵抗力との比を波力低減係数とし、この値が1より大きくなった場合には、合田公式で算定した滑動抵抗力より大きな滑動抵抗力を堤体に与えないと、堤体は滑動に対して不安定になることを意味している。本実験で用いたようなスリット式透過ケーソン堤の場合、作用する波力の分布がわからなくても、この波力低減係数を用いれば、堤体の安定性が検討できる。

4. 上部工に作用する波力・波圧実験およびその結果

4.1 実験装置および方法

Fig.7は、上部工に作用する波力および波圧を計測するための装置の図面を示したものである。斜線で示したスラブ模型を中央の鋼板に2カ所で固定し、その鋼板を港外側の上部工に固定した片持ち梁になっている。鋼板には表裏両面に3枚ずつの歪みゲージが張り付けてある。中央部分の表裏1枚ずつの歪みゲージによりモーメントを、残りの4ゲージにより全波力を測定できるようにしてある。また、スラブの裏面に取り付けた圧力センサーで波圧分布を測定する。鋼板の端についているフック部に鋼線を掛け、鉛直荷重を加えることで波力計の検定を

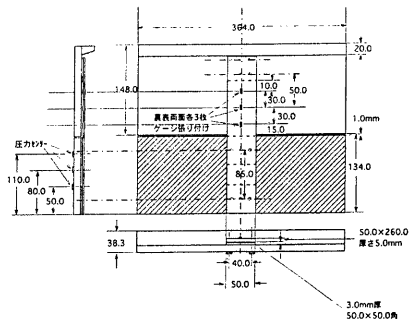


Fig.7 Wave force meter

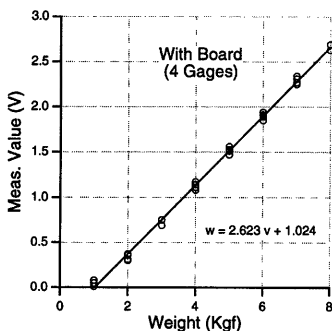


Fig.8 Calibration of wave force meter

行った。その際前述の摩擦係数測定装置を利用した。

Fig.8 は、波力計の検定結果である。実験に当たっては 1 kgf ごとに鉛直荷重を加えて出力電圧値を測定し (4 回繰り返す)、荷重およびモーメントと出力電圧を比較した。この図から、上版スラブが堤体に接触しないように製作したつもりであったが、実際には上版スラブが堤体上部に接触していたため、波力が 1 kgf までは測定できないことがわかった

波圧計の検定は、波圧計を 10 cm (10 gf/cm²) ごとに水中に沈めていき、出力電圧との関係を調べた。その結果、波圧計は非常に線形性が良いことがわかった。

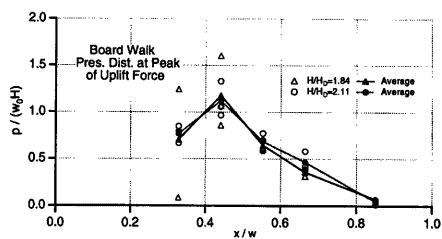
上部工に作用する波力・波圧実験の手順は、以下の通りである。

- 1) 堤体が動かないように堤体の後ろに重しをおく。
- 2) 波を作用させ、最初の波が作用してから 20 s 間、500 Hz でデータを収録する。同一の波に対して、3 回繰り返す。
- 3) 堤体内部の遊水部の波の様子を観察する。

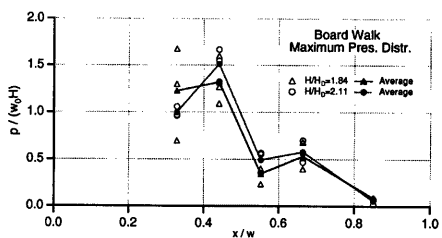
防波堤前面における水位変動、波力変動および波圧変動を調べたところ、波力が単一のピークを有する場合にも、波圧変動には数個のピークが現れるのがわかった。また、波力および波圧の出現は波の周期に比べてきわめて短いのがわかった。

4.2 実験結果および考察

Fig.9 (a) および (b) は、ボードウォークに作用する揚圧力分布を示したものであり、(a) 図は揚力計で測定した揚力が最大となる時刻における揚圧力分布、(b) 図は各地点における波圧の最大値の分布を示したものであり、横軸は上部工端からの位置をその幅で除して無次元化し、縦軸は波圧を代表波圧 (密度 $\times$ 波高) で無次元化してある。ここでは、1 ケースにつ

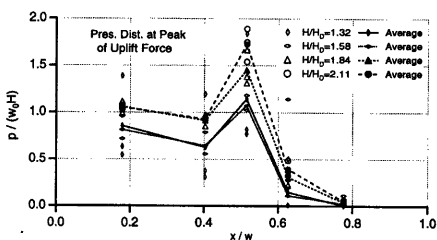


(a) Uplift pressure at occurrence time of max. uplift force

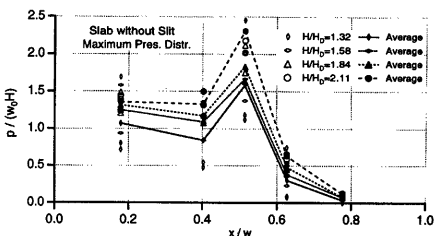


(b) Max. uplift pressure

Fig.9 Wave pressure distribution on board walk



(a) Uplift pressure at occurrence time of max. uplift force



(b) Max. uplift pressure

Fig.10 Wave pressure distribution on slab without slit

き 10 波分の波圧を計測し、10 波分の平均値を求める実験を 3 回繰り返す (図中では白抜きの記号でプロットしてある)、その 3 回分の平均値の平均を図中

では黒色の記号でプロットしてある。

(a) 図によれば、揚圧力分布は $x/w = 0.45$ (後壁付近) で最大値を持つ三角形分布をなし、そのピーク値は平均値で 1.2 程度である。(b) 図によると、揚圧力分布は三角形分布とは多少異なる。ピークの出現位置は (a) 図の場合とほぼ同じであるが、その最大値は約 1.5 である。このことは、全揚力が最大になる時刻と各測点での最大の揚圧力が発生する時刻とがずれていることを意味している。なお、(a) および (b) 図とも、2 種類の作用波高の相違による揚圧力分布の違いはわずかである。

Fig.10 は、スラブに作用する揚圧力分布を示したものである。(a) 図および (b) 図は、それぞれ揚力が最大となる時刻における揚圧力分布および波圧の最大値の分布を示したものである。横軸は無次元距離、縦軸は無次元波圧である。(a) 図および (b) 図から $x/w = 0.5$ (後壁付近) で波圧がピークとなり、港内側に向かってその値は 0 に近づく。全面スラブに作用する波圧値は、ボードウォークの場合に比べて大きくなっている。また、ボードウォークの場合に比べて特徴的な点は、波高の増加に伴い波圧が大きくなることである。

最大波圧分布を示した (b) 図のほぼ最大波に対応する $H/H_D = 1.84$ の結果を見ると、無次元波圧分布の最大値は約 1.8 である。ピークの出現位置は (a) 図の場合とほぼ同じである。

Fig.11 は、上部工に作用する無次元揚力を整理したものである。横軸は無次元波高、縦軸は無次元揚力 (F は揚力、 l は防波堤法線方向の上部工の長さ、 w は上部工の幅、 w_0 は水の単位体積重量、 H は波高) である。実験は、1 ケースにつき 10 波分の揚力を計測して 10 波分の平均値を求める実験を 3 回繰り返した (図中では白抜きの記号でプロットしてある)。その 3 回分の平均値の平均を図中では黒色の記号でプロットした。この図によると、全面スラブを用いた場合の無次元揚力は約 0.5 とほぼ一定である。また、ボードウォークの場合、その値は約 0.3 である。このことは、断面平均揚力が波高に比例して大きくなることを示している。

本実験はボードウォーク部分の構造を検討する際の外力として用いることになる。この部分に直接ボードウォークを張る場合は、ボードウォークが構造的に 1 枚 10 cm 幅のボードの集合体であることから、外力の設定では全揚力より部分的な波圧強度が問題となる。Fig.9 (b) から最大で $p = 1.5w_0H$ となるが、このような波力に対してボードウォークの耐波設計が可能か否かは別途検討の余地がある。実験においては、この部分に波浪が激しくぶつかる様子が

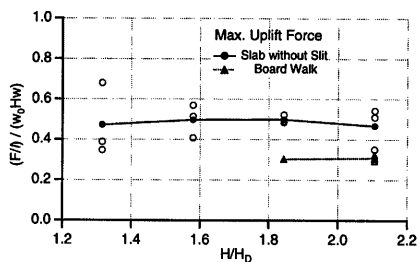


Fig.11 Wave uplift force on upper structure

観察されることから、木材やその固定部分の耐久性等を考えると、ボードウォークを直接張り付けることは現実的ではないと考えられる。したがって、この部分の現実的な構造としては、まずコンクリートスラブを設置して大きな揚力を受けて、その上にボードウォークを張るのがよい。コンクリートスラブの耐波設計に用いる外力としては、Fig.10 (b) の $H/H_D = 1.84$ の波圧分布を考えておけばよい。この波圧分布の積分値は測定した揚力とほぼ一致し、揚力の作用位置についても波圧分布の図心と考えて実用上は問題ない。なお、実測結果の波圧分布は、コンクリートスラブを配筋設計するためのモデルとしては少し複雑であると思われるので、等分布荷重に変換するとすれば、ボードウォークと違いコンクリートスラブは一枚の剛な板として過重に抵抗することから $p = 1.0w_0H$ なる等分布荷重を考えればよい。

5. 不規則波に対する耐波安定性

5.1 発生不規則波の特性

Fig.12 は、水深を 38.3 cm (H.W.L.) とし、防波堤

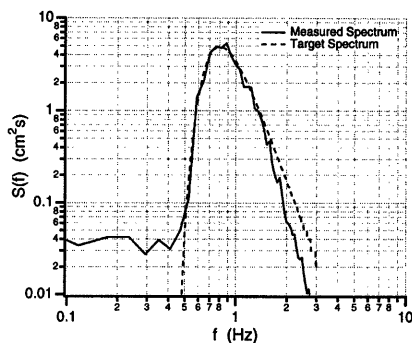


Fig.12 Comparison of wave spectra

を設置しない状態で造波した不規則波のスペクトルと目標波のスペクトル (Bretschneider-光易型スペクトル) を比較したものである。低周波領域を除いて両者の一致の程度はよく、現地の波浪条件が十分再現できている。また、実験で用いた不規則波の有義波高および周期はそれぞれ 6.2 cm および 1.12 s であり、目標波の 6.3 cm および 1.1 s とほぼ同じである。なお、不規則波実験の測定時間は、造波開始後 20 分間である。スペクトル解析に当たっては、0.05 s 間隔のデータを 16,384 個用いた。

5.2 防波堤を設置したときの不規則波の特性

上部工としてボードウォークを用いた防波堤を設置し、水深を 38.3 cm (H.W.L.) とした場合に測定した不規則波の入射分離を行った。反射率は当然のことながら低周波ほどその値が大きくなっていた。入射波のスペクトルは目標波のそれに近いことが確認できた。得られた入射波の有義波高は 5.7 cm、周期は 1.12 s であり、波高は目標波より若干小さいが、その差は無視できるほど小さい。

上部工としてボードウォークを用いた防波堤を設置し、水深を 40.7 cm (H.H.W.L.) とした場合にも不規則波の入射分離を行った結果は、入射波のスペクトルが目標波のそれに近いことを示していた。この場合、入射波の有義波高は 6.2 cm、周期は 1.13 s であり、目標波とはほぼ同じであった。

上部工として全面スラブを用いた防波堤を設置し、水深をそれぞれ 38.3 cm (H.W.L.) および 40.7 cm (H.H.W.L.) とした場合の入射分離結果から、入射波のスペクトルは目標波のそれに近いことが確認できた。ここで H.W.L. の場合、入射有義波高は 5.9 cm、周期は 1.13 s であり、H.H.W.L. の場合、波高は 6.1 cm、周期は 1.12 s となっており、目標波とはほぼ同であった。

平均反射率は上部工の種類に関わらずほぼ同じで、その値は約 0.29 であった。これは従来型の防波堤に比べて比較的小さな反射率である。

5.3 不規則波に対する境界滑動抵抗力

ボードウォーク、全面スラブ、開口部付きスラブを上部工として用いた場合の防波堤の設計波に対する境界滑動抵抗力は、Table 2 のようになった。

Table 2 によると、H.H.W.L. の場合の境界滑動抵抗力は H.W.L. の場合の約 2 倍となっている。H.W.L. の場合、Table 2 で表される境界滑動抵抗力はどの程度の規則波に対応するものであるか調べてみる。Fig. 4 において、横軸が Table 2 の値に近い場合の波高の値を見れば、ボードウォーク、全面スラブ、開口部付きスラブのいずれも 10 cm、すなわち $H/H_D = 1.58$ とな

Table 2 Critical resistance force for design random waves

水位 上部工の構造形式	H.W.L.	H.H.W.L.
ボードウォーク	0.21	0.34
全面スラブ	0.25	0.45
開口部付きスラブ	0.21	0.43

unit: kgf/cm

り、最大波 ($H/H_D = 1.8$) に比べて小さめの値となっている。これは、今回の防波堤形式では、設計有義波高の 1.58 倍の波高を有する波に対して滑動限界重量を決定すれば良いということであり、防波堤に作用する波力を算定する場合に有義波高の 1.8 倍で定義される最大波よりは小さな波高を用いればよいということである。今回の実験ではその倍率は 1.58 であった。

H.H.W.L. の場合の波力低減係数を求めると Table 3 のようである。合田式による単位幅当たりの境界滑動抵抗力は 0.257 kgf/cm である。

設計において、過去最高の水位である H.H.W.L. と設計波浪の組み合わせは現実的にはその出現が極めて希なものであり、こういった場合の設計においても滑動安全率は 1.2 が用いられているが、最近こういった極めて希な条件に対しては安全率は 1.0 でもよいのではないかという議論があることを付記しておく。

Table 3 Modification factor for calculated wave force against design random waves

上部工の構造形式	
ボードウォーク	1.32
全面スラブ	1.75
開口部付きスラブ	1.67

5.4 不規則波による上部工に作用する波圧および波力

Fig. 13 は、H.W.L. の場合の、各波圧計設置点における上部工に作用する波圧の出現頻度を示したものである。図中の CH. は各波圧計の設置番号を示しており、CH. 5 が最も港内側の地点である。横軸は波圧を無次元化したものであり、 H_I は入射分離して得られた入射波の有義波高である。縦軸は、波圧が出現した個数を作用した波の数で無次元化したものである。CH. 5 には何も表示されていないが、これは波圧の出現がなかったことを意味している。CH. 3 で最も波圧の出現数が大きく、その個数は 30 波程度で、作用波数は約 1200 波であった。Fig. 13 から、最も

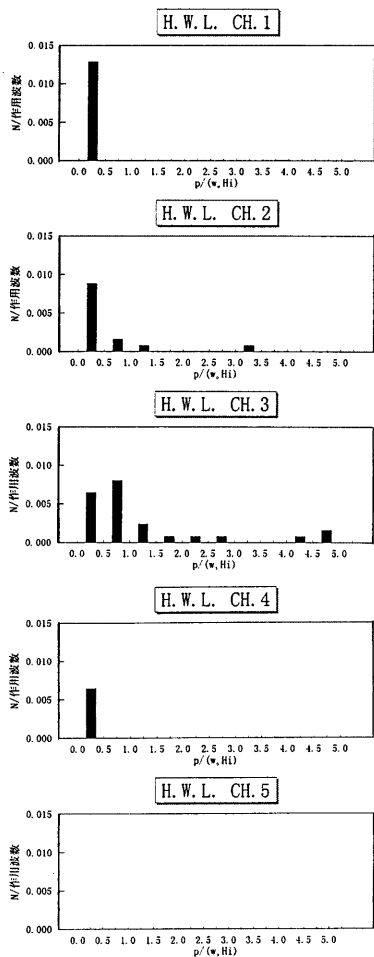


Fig.13 Occurrence frequency of wave pressure on upper board in the case of H.W.L.

波圧が大きくなるのは CH.3 であることがわかる。これは、規則波の場合の結果である Fig.10 と同様の結果である。

Fig.14 は、H.H.W.L. の場合の、各波圧計設置点における上部工に作用する波圧の出現頻度を示したものである。CH.5 にはこの場合波圧が少し作用していることがわかる。波圧の場所的変化に関する傾向は H.W.L. の場合と同様であるが、波圧の出現個数は増大しており、値が大きなもの出現が多くなってい

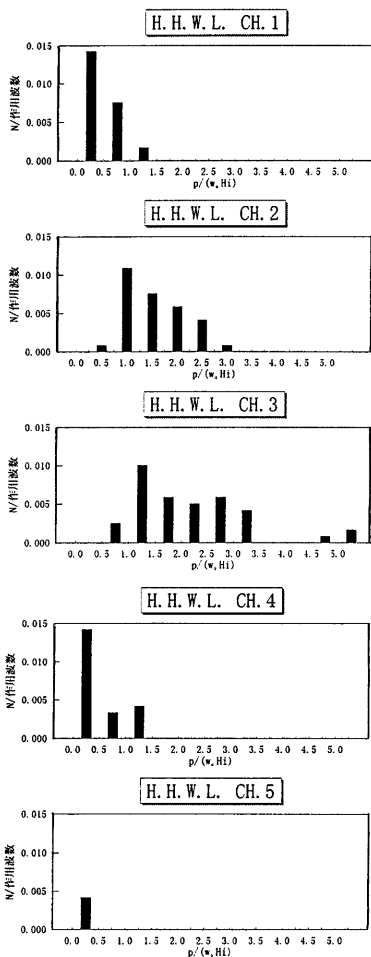


Fig.14 Occurrence frequency of wave pressure on upper board in the case of H.H.W.L.

る。

Fig.15 は、H.W.L. の場合の上部工に作用する波力の出現頻度を示したものである。波力の出現個数は 6 波で、作用した波の数は約 1200 波であり、ほとんど上部工には波力が作用していない。この波力の出現は、Fig.13 の波圧の出現率に示した CH.3 の $p/(w_0 H_1) > 2$ の出現個数にほぼ等しい。

Fig.16 は、H.H.W.L. の場合の上部工に作用する波力の出現頻度を示したものである。H.W.L. の場合の

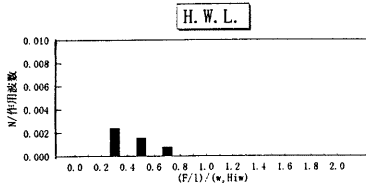


Fig.15 Occurrence frequency of wave force on upper board in the case of H.W.L.

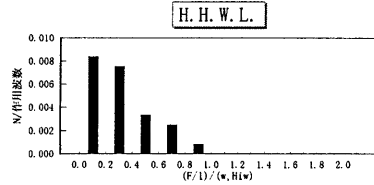


Fig.16 Occurrence frequency of wave force on upper board in the case of H.H.W.L.

それと比べて、波力の値そのものおよび出現頻度が大きくなっているのがわかる。これらは波圧の出現分布とも対応するものである。

こうした波圧および波力の大きさを規則波実験のそれと直接比較するのは難しい。なぜなら、ここで示した波圧および波力の出現個数は高々 50 波であり、作用している波は 1000 波以上であり、波力の代表値としてどのような値を用いればいいのか定かでないからである。

6. 結 論

本研究は、防波堤の親水化に伴う耐波安定性に関して、実験的に堤体の滑動安定性、上部工に作用する波力、越波水による打ち込み波力を検討したものである。本研究で得られた主要な結論は以下のようである。

1) 規則波の作用下における防波堤の滑動安定性

限界滑動抵抗力は、同一の波高の波に対して、上部工の構造形式により異なり、全面スラブ形式、開口部付きスラブ形式、ボードウォーク形式の順に小さくなる。

2) 規則波の作用下における上部工に作用する波力および波圧

a) ボードウォークの場合、揚力が最大となる時刻における無次元揚圧力の空間分布は、上部工の端からの無次元距離 $x/w = 0.45$ （後壁付近）で最大値を持つ三角形分布をなし、そのピーク値の平均値は 1.2 以下であり、作用波の相違による揚圧力分布形状の相違はわずかである。

b) 全面スラブの場合、 $x/w = 0.50$ （後壁付近）で無次元揚圧力がピークとなり、港内側に向かってその値は 0 に近づく。最大波に対応する波の条件での無次元最大波圧分布の最大値は約 1.5 である。

c) 上部工に作用する無次元揚力は、全面スラブを用いた場合約 0.5 であり、ボードウォークの場合約 0.3 である。

3) 不規則波による滑動安定性および波圧・波力

a) H.W.L. の場合の不規則波に対する限界滑動抵抗力は、規則波の $H/H_D = 1.58$ に対する限界滑動抵抗力に対応する。これは、今回の防波堤形式では、有義波高の 1.8 倍で定義される最大波よりは小さな波高を用いればよいということを意味する。

b) 今回の防波堤形式では、H.H.W.L. の場合における堤体に作用する波力の算定に当たっては、1) 合田式で波力を算定する際に用いる波高は設計有義波の 1.6 ~ 1.7 倍の値を用いることとし、2) その算定された波力に波力低減係数 1.75 をかけるという方法で波力が算定できると考えられる。

c) 作用している波は 1000 波以上にもかかわらず、上部工に作用する波圧および波力の出現個数は高々 50 波である。

4) 本実験結果に基づく上部工の基本構造

a) 堤体の安定性については、本実験において求めた滑動限界重量、あるいは波圧低減係数を用いた別途安定計算によって結論づけることになるが、規則波による滑動実験状況を見る限りにおいては、現在施工中の防波堤の上部工の重量をうまく設定することで、十分に安定な堤体を設計できる。

b) 上部工の構造はボードウォーク単体、全面スラブとの組み合わせ、スラブにスリットを施したものの 3 種類を実験したが、ボードウォーク単体では、直接作用する大きな波圧に対する耐波設計が難しいことから、ボードウォーク部分は、波力を直接受けるためのコンクリートスラブの上にボードウォークを張る構造とする必要がある。

c) このスラブにスリットを施すと、実験の状況を見る限り、スリット部から港内側へ波浪が噴き出すため、構造としては好ましくないと考えられる。

5) 越波による打ち込み波力

越波の状況については、ボードウォーク時を含めて注意深く目視観察を行ったが、設計波浪を作用させたケースにおいても越波量は非常に少なく、ほと

んど無視できることを確認した。舗装などの設計をする際には、まず外力として考慮する必要はないと考えられる。

方々には、実験補助ならびに研究討議を頂き、ここに謝意を表します。

謝 辞

本研究を行うに当たり、運輸省第三港湾建設局高松港工事事務所長 久米秀俊氏をはじめ関係者の

参考文献

合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 第4章, 鹿島出版会, 1977.

Experimental Study on Stability of Amenity Oriented Breakwater against Sea Waves

Hajime MASE, Tomotsuka TAKAYAMA, Shigeo FUJIKI,
Shoji KUNITOMI and Hiroshi OTANI*

* Zenidakagumi, Ltd., Japan

Synopsis

This paper examines the stability of a slit-type caisson breakwater, served as not only protection of port against waves but also public recreation space, to clarify the resistant sliding forces, uplift wave pressures and forces on the upper slab due to wave motion inside the breakwater, and overtopping wave pressures.

Keywords: amenity oriented breakwater; slit-type caisson breakwater; stability of breakwater; wave forc; wave pressure