

親水性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**・國富將嗣***
大谷 寛****・久米秀俊*****

1. はじめに

防波堤の主たる役割は、外海からの波浪の侵入を防ぎ、港内を静穏に保つことである。近年では、こうした機能に加えて高付加価値機能が求められるようになってきた。すなわち、防波堤は港を守り静穏化を図るだけでなく、市民の散策路や憩いの場としての開放的な空間が求められている。そのため港内が静穏に保たれる限りにおいては、潮の香りと港内水質の維持のため、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としてはスリット式透過ケーソン堤があるが、こうした防波堤に作用する波圧の算定公式は未だ確立されていない。

本研究においては、既存の防波堤の天端上に安全柵として港外側にパラペット、港内側に手すり、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けて安全で快適な空間を提供しようとする防波堤を取り扱う。本研究では防波堤を親水化するに当たり、1)防波堤天端上に設けるパラペットによって受圧面積が増大することに伴う堤体の限界滑動重量、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を検討する。

2. 実験条件

対象とする防波堤形式は、港内の海水交換および低反射率を目的としたスリット式透過ケーソン防波堤である。港外側の空隙率は30.1%、港内側の空隙率は4.3%である。堤体内に遊水部を有し、この遊水部における波動運動によって、上部工に波力が作用することになる。

設計波は、50年確率波浪として、有義波高1.9mおよび有義波周期5.5s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。

実験にあたり、高さ37.3cm、長さ36.3cm、幅25cmのケーソン1函分の防波堤模型(図-1参照)と、その両側に固定するケーソン模型を製作した。模型は遊水部内の波の状態が観察しやすいように、アクリルで作製した。実験は、深さ70cm、幅70cm、長さ40mの二次元造波水槽で行い、防波堤模型は造波板から約27m離れた地点に設置した。波高計は堤体前面における水位計測用に2cm離して1台、堤体の背後2mの地点に1台、造波板から22m離れた地点に2台設置した。

水理実験で用いる波の諸量は、フルード則にしたがうと、 $H_{1/3}=6.33$ cm、 $T_{1/3}=1.0$ sとなるが、1.0sの波は実験水槽内できれいに造波できなかったため、周期は1.1sと少し長めにした。この周期は現地スケールに直せば6.0sである。周期は設計波のそれに比べ危険側に振ったので、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。

防波堤港内側の上部工の模型は、次の3種類とした。

- 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
- 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)
- 3) 防波堤の横断方向に渡した梁の上に、横断方向に

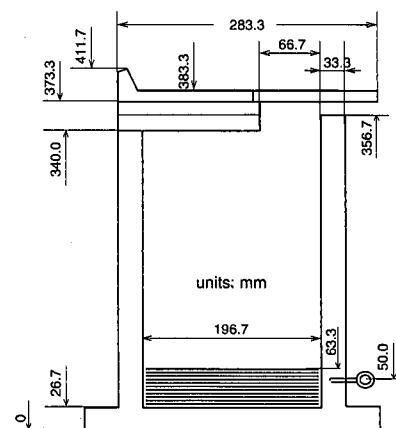


図-1 模型防波堤の諸元

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科修士課程
**** 正会員 (株)銭高組
***** 正会員 工修 高松港湾空港工事事務所 運輸省第三港湾建設局

3.3 cm 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)

実施した実験の種類は次の3種類である。1)入射波と防波堤の滑動の関係調べる滑動安定実験、2)堤体の上部工に作用する波力を調べる波力・波圧実験、3)越波の上部工への影響を調べる打ち込み波力実験である。ただし、3)の実験は、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。

なお、現地防波堤の天端外観、模型防波堤外観および諸元は間瀬ら(1997)に詳しいので参照されたい。

3. 滑動安定実験およびその結果

3.1 実験装置および方法

防波堤の滑動安定実験結果を解析するに当たり、ケーソンと捨石マウンド間の摩擦係数が必要となる。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製作した。詳細な実験の測定結果から摩擦係数の平均値は0.51であった。

波に対する限界滑動抵抗力の算定に当たっては、堤体の変位状況が必要となる。そのため、変位計を用いて防波堤の変位を測定した。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。

3.2 実験結果および考察

堤体前面に設置した波高計と変位計の記録を解析し、1波当たりの防波堤の変位量(2台の変位量の平均値)を求めた結果が図-2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45sから55sのトータルの変位量を作用波数で除した一波当たりの堤体の変位量ととり、波高をパラメータとした。(a)図はボードウォーク、(b)図は全面スラブの実験結果である。これらの図から限界滑動抵抗力を求めた。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。

図-2のような図からは上部工の差異による限界滑動抵抗力の相違がわかりにくいので、図-3に横軸に設計波高 H_0 で無次元化した波高、縦軸に限界滑動抵抗力を $w_0 H d$ (d はマウンド上水深)で無次元化した値をとり、上部工が異なる3ケースの実験結果を示した。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わかる。このことは、上部工に全面スラブを採用すると、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。各実験

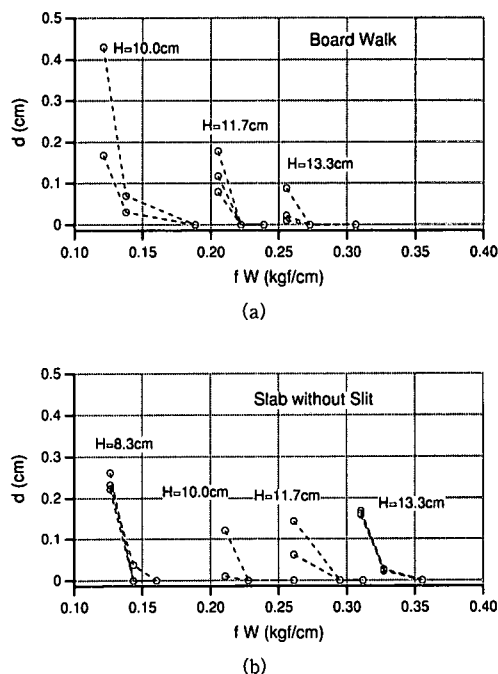


図-2 滑動抵抗力と1波当たりの防波堤の変位量

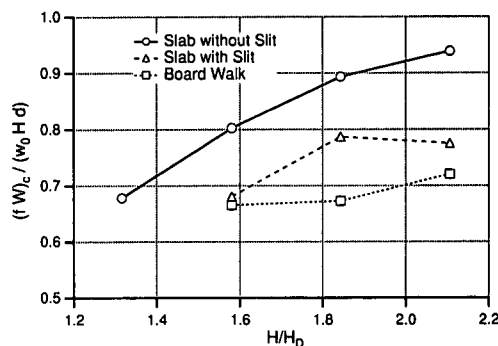


図-3 上部工が異なる3ケーソンの無次元限界滑動抵抗力

ケースの限界滑動抵抗力の差異は、遊水部の空気がどれだけ容易に堤体外部に排出できるかに依存すると考えられ、空気の排出がしにくいと考えられる順にしたがって、限界滑動抵抗力が大きくなっている。

図-4は波力低減係数を示したものであり、横軸は無次元波高である。波力低減係数は実測限界滑動抵抗力を合田(1977)の波圧算定式で算定した限界滑動抵抗力で除したものである。

最高波高を有義波高の1.8倍とすると、全面スラブの実験ケースでは、図-4から波力低減係数は約1.0となつて、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。

本研究で取り上げた堤体の場合、堤体底面には揚圧力

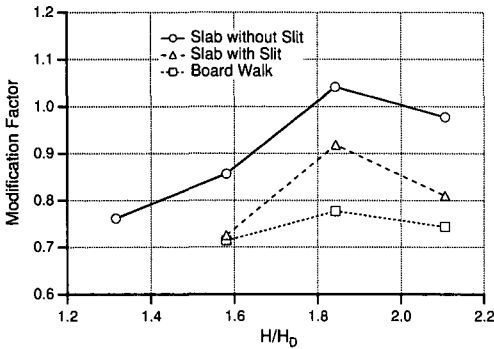


図-4 波力低減係数

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する。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。ここでは、堤体に作用する揚圧力についてこれら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。そこで、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。

合田の波力公式は、内部に遊水室が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、入射波の条件の下で合田公式から算定される波力から限界滑動抵抗力を求めた。実験から求めた限界滑動抵抗力と算定限界滑動抵抗力との比を波力低減係数とした。本実験におけるスリット式透過ケーソン堤の場合、上部工を全面スラブとすると最も大きな堤体重量が必要となるが、合田式を用いてほぼ算定できるがわかった。

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

上部工に作用する揚力（波力）および揚圧力（波圧）を計測するため、上部工の模型を鋼板に固定し、それを片持ち梁になるように設置した。その鋼板には表裏面に3枚ずつの歪みゲージを張り付け、そのうち4つの歪みゲージにより全波力を測定できるようにした。また、上部工の裏面に取り付けた5台の小型圧力センサーで波圧分布を測定した。

上部工に作用する波力・波圧実験に際しては、堤体が動かないように堤体の後ろに重りをおき、波を作用させて最初の波が作用してから20s間、500 Hzでデータを収録した。同一の波に対しては測定を3回繰り返した。

4.2 実験結果および考察

図-5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、全揚力が最大となる時刻における波圧分布

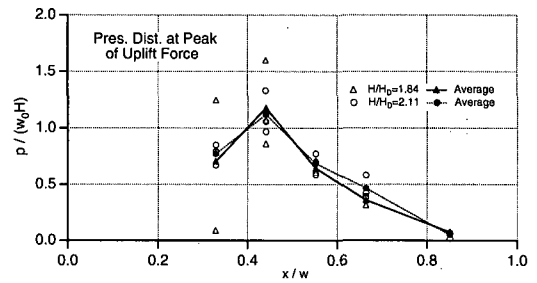


図-5 ボードウォークに作用する無次元波圧分布

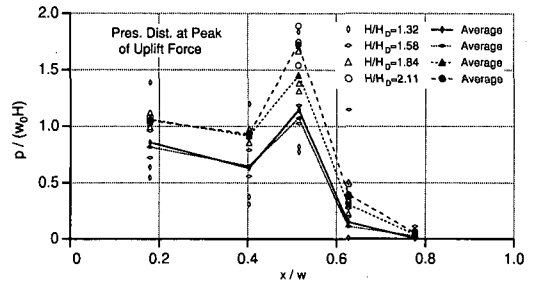


図-6 全面スラブに作用する無次元波圧分布

である。横軸は上部工の端からの距離をその幅で除して無次元化しており、縦軸は波圧を代表波圧で無次元化してある。ここでは、1ケースにつき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回繰り返した。それぞれの結果を図中では白抜きの記号で、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。この図によれば、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1.5以下となる。

図-6は、全面スラブに作用する揚圧力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。この図から $x/w=0.5$ (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は、ボードウォークの場合のそれ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。

図-7は、上部工に作用する全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である。また、

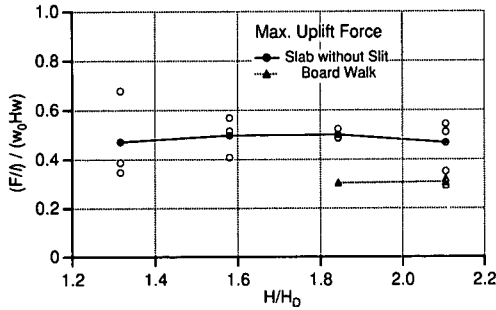


図-7 上部工に作用する無次元揚力

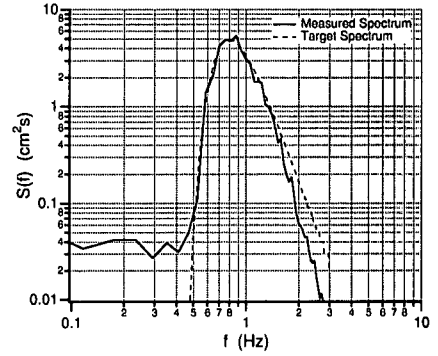


図-8 造波したスペクトルと目標波のスペクトル

ボードウォークの場合、その値は約0.3である。

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(現地換算)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。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する必要がある。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と考えられる。

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

図-8は、水深を38.33 cm (H.W.L.)とし、防波堤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。この図から、低周波領域を除いて両者の一致の程度はよく、現地の波浪条件を十分再現できることが確認できた。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6.23 cm および1.12 s であり、目標波のそれとほぼ同じであった。

5.2 不規則波に対する限界滑動抵抗力

規則波の実験と同様に滑動実験を行った。全変位量は造波開始後の約100波を除いた後の700波分に対するもので評価した。この結果から限界滑動抵抗力を読みとったものが表-1である。この表によると、H.H.W.L.の場合の限界滑動抵抗力はH.W.L.の場合のその約2倍となる。H.W.L.の場合、表-1で表される限界滑動抵抗力はどのくらいの波高の規則波に対応するものであるか調べてみる。図-1において、横軸が表-1の値に近い場合の波高の値を見れば、ボードウォーク、全面スラブとも

表-1 不規則波の限界滑動抵抗力

上部工の構造形式	水 位	
	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

表-2 不規則波の波力低減係数 (H.H.W.L.)

上部工の構造形式	低減係数
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

10 cm, すなわち, $H/H_0=1.58$ となり, 最大波($H/H_0=1.8$)に比べて小さめの値となる。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。

表-2は、H.H.W.L.の場合の波力低減係数を求めたものである。合田式による単位幅当たりの限界滑動抵抗力は0.257 kgf/cm である。このような波力低減係数の増大は、水位が増大したことによる揚圧力の増大に伴うものであると考えることができる。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、最近こうし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。

5.3 不規則波による上部工に作用する波圧と波力

図-9は、H.W.L.の場合の、各波圧計設置点(Ch. 1~Ch. 5)における全面スラブに作用する波圧の出現率を示

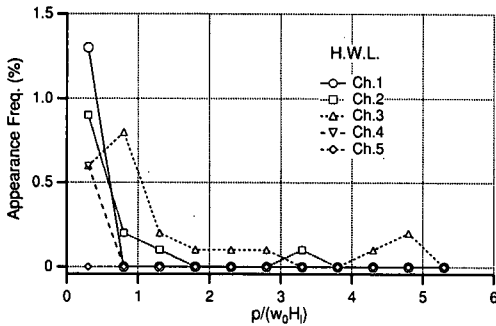


図-9 上部工に作用する波圧の出現頻度 (H.W.L.)

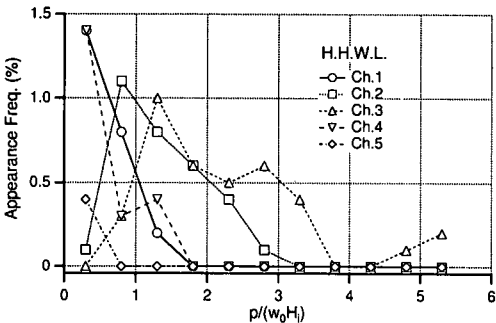


図-10 上部工に作用する波圧の出現頻度 (H.H.W.L.)

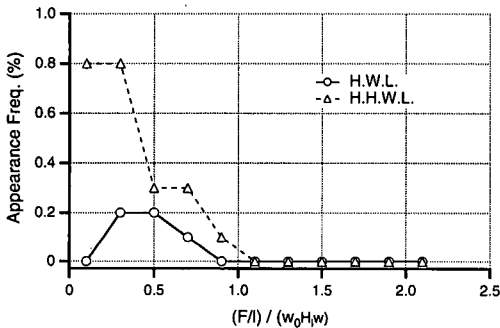


図-11 上部工に働く波圧の出現頻度 (H.W.L. と H.H.W.L.)

したものである。Ch. 1 が最も沖側、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 は入反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する波の数で除した出現率である。この図によると、Ch. 3 で最も波圧の出現が大きく、その個数は 30 波程度で作用波数は約 1200 波であった。また、この点で最も波圧が大きくなることがわかる。これは、規則波の場合の結果である図-5 と同様の結果である。

図-10 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。Ch. 5 はこの場合波圧が少し作用している。波圧の場所的变化に関する傾向は 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、値が大きなものの出現が多くなっている。

図-11 は、H.W.L. と H.H.W.L. の場合の、上部工に作用する全揚力の出現頻度を示したものである。横軸は全揚力を無次元化したものであり、 l と w はそれぞれ上部工の長さや幅である。この図によると、H.H.W.L. の場合、H.W.L. に比較して揚力の出現回数が多く、値の大きい揚力が出現しやすいことがわかる。これは、波圧の場合と同様である。また、図-6 と比較すると、出現した波力の値は規則波の場合とほぼ同じ値を示していることがわかった。

6. 結 論

本研究は、親水性防波堤の耐波安定性を検討したものであり、主要な結果は以下の通りである。

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) 規則波の作用下での上部工に作用する波力・波圧

ボードウォークの場合、揚圧力の空間分布は後壁付近で最大値を持つ三角形分布をなし、作用波高の相違による揚圧力分布の相違はわずかである。一方、全面スラブの場合、後壁付近で無次元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。また、波高の増加に伴い波圧が大きくなる。

3) 不規則波の作用下における滑動安定性と波圧・波力

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 $H/H_0=1.58$ に対する限界滑動抵抗力に対応する。H.H.W.L. の場合の限界滑動抵抗力は H.W.L. の場合の約 2 倍となる。上部工に作用する波圧、波力の出現頻度は少ないが、波圧分布形は規則波のそれと同様であった。

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.
- 間瀬 肇・高山知司・藤木繁男・國富將嗣・大谷 寛 (1997): 親水性に伴う防波堤の耐波安定性に関する実験的研究, 京大防災年報, 第 40 巻, B-2 (印刷中)。