

半没水型上部斜面堤に作用する波力特性について

片山 裕之*・関本 恒浩**・川 俣 奨**・植木 一 浩***

1. ま え が き

上部斜面堤は, 斜面部による水平波力の低減効果や斜面に作用する鉛直下向き波力の効果により, 滑動抵抗が増加し, 直立堤に比べ経済的に有利な断面であることが知られている。

現在では森平ら (1979) により提案された波圧公式 (森平式) が標準の設計法として採用されている。さらに細山田ら (1994) は上部斜面堤の作用波力に対する詳細な検討を行い, 森平式の直立部波力の低減と斜面部波力の割増の波圧係数を導入することを提案している (細山田式)。しかしながら, これらの波力公式は衝撃碎波力の作用しない範囲での設計法となっており, いずれも不規則波実験による確認は行われていない。

本研究では, 図-1 に示すような斜面の下端が静水面下となる半没水型上部斜面堤に着目し, 不規則波による滑動実験を実施し, その作用波力の特性を詳細に調べた。さらに各設計法との比較を行い, 現行の設計波圧公式の適用性に対する検討も行った。

2. 実験条件

滑動実験は, 細山田式で算出した設計波力に対して滑動安全率が 1.0 となる断面に対して行った。実験条件は, 現地スケールで設計波高 $H_b=9.8$ (m), 沖波周期 $T=16$ (s) に対して波高 $0.8\sim 1.0H_b$, 周期 $12\sim 16$ (s), 設置水深 -10.0 m, 海底勾配 $1/100$, 潮位 H.W.L., L.W.L.

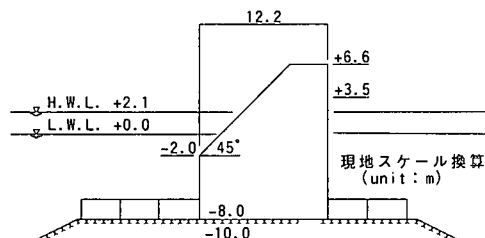


図-1 実験断面

の計 18 ケースとし, 不規則波による滑動実験を行った。実験スケールは $1/50$, サンプルング周波数は 200 (Hz) とし, 波圧および堤体変位量を測定した。波圧計は堤体の周りに 19 ケ所設置し, 変位計は堤体背面に上下 2 ケ所設置した。

また設計波高 $1.0H_b$, H.W.L. のケースについてはサンプルング周波数を $200, 500, 1000, 2000$ (Hz) に変化した実験を行い, サンプルング周波数によるピーク波圧値の違いについても確認した。その結果 200 (Hz) でもピーク波圧の低減がみられなかったため, 200 (Hz) の実験結果を用いることにした。

3. 実験結果

模型実験により得られた波圧および変位量のデータを用い作用波力の検討を行った。作用波力は波圧値に各波圧計の作用分担面積を乗じて評価した。変位についてはロッキング現象が見られなかったため, 上下の変位計の平均値を堤体変位量として評価した。また, すべて現地換算した値で処理を行った。

3.1 水平波力最大時の作用状況

潮位が H.W.L., 波高が設計波高の条件を対象とし, 周期 $12, 14, 16$ (s) の 3 ケースについて堤体に作用した水平波力 (=直立部+斜面部) が最大となった時刻の同時波圧分布を比較したものを図-2 に示す。図中には周期 16 (s) の場合の森平式および細山田式による計算波圧分布も同時に記してある。波力公式では 16 (s) が最大となるのに対して, 実験結果では静水面下の波圧分布で比較すると 12 (s) が最大となり, 周期が短い程波力が大きい結果となった。また 16 (s) のケースのみではあるが, 同一条件の波を連続して作用させ水平波力最大時の同時波圧分布を比較したところ, 図-3 に示したように再現性がみられた。

図-4 には水平波力最大時刻を含む滑動合成波力, 変位量および堤体前面の水位の時系列を示す。波力時系列と VTR からこの 3 ケースの波圧の作用状況を詳細に調べると, 12 (s) のケースは堤体直前での碎波により, 衝撃碎波力が発生していることが分かった。また 14 (s) の水平波力最大の場合は, 直前の越波しなかった波による

* 正会員 工修 横浜国立大学助手(前五洋建設(株))

** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所

*** 正会員 工修 東京電力(株)福島第一原子力調査所

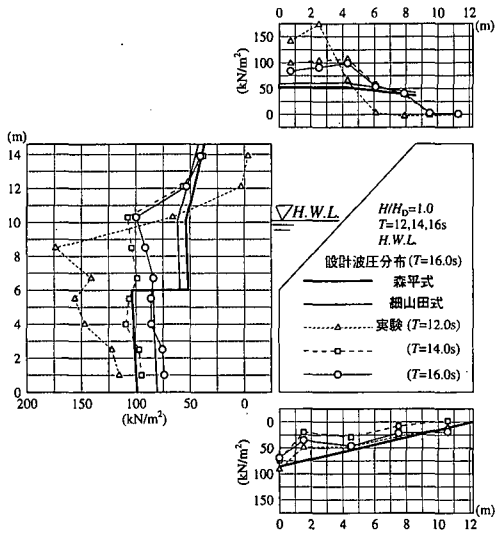


図-2 水平波力最大時の同時波圧分布

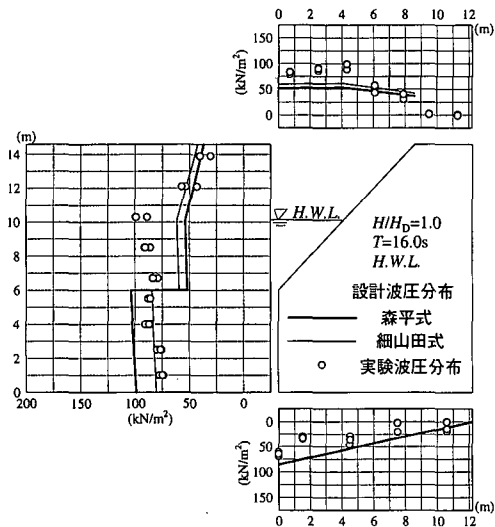


図-3 作用波圧の再現性

水塊の影響で水位の高い状態のまま後続の波が作用し、結果として16(s)より水平波力が大きかった。このときの1波による滑動量も他の周期のケースに比べ最も大きかった。これは規則波実験では説明できない現象であり、波力実験では不規則波による検討が不可欠であるといえる。また、本実験条件では直立部波力と斜面部波力のピーク時刻に有意な位相差はみられず、同時に作用するものと考えてよい。

揚圧力については衝撃力の影響はみられず、計算波圧分布(合田の波力算定公式)で説明できる分布であった。

3.2 衝撃砕波力から有効波力への換算

実験結果から衝撃砕波力が発生しているケースがみら

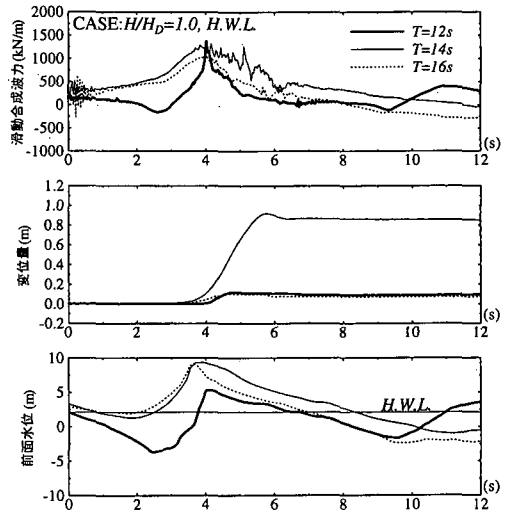


図-4 水平波力最大時の波力・変位・前面水位波形

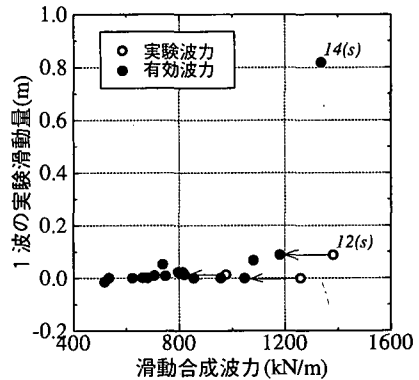


図-5 滑動合成波力と1波の滑動量の関係

れた。従って、作用波力の検討を行うには実際に堤体の滑動に寄与した波力(有効波力)を評価する必要がある。本研究では、衝撃力が作用したケースについて式(1)に示す1自由度の減衰振動ばねモデルを用いて実験波力から有効波力への換算を行った。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad (1)$$

ここに、 x は堤体の変位、 m は堤体の質量、 c は減衰定数、 k は水平ばね定数、 $P(t)$ は水平波力である。

有効波力への換算は、衝撃波力の時系列を入力として行った。減衰定数 c およびばね定数 k は、実験結果の変位波形と計算結果の振動波形が合うように設定した。ただし滑動モデルではないので滑動量までは評価できないため、変位波形の振動周期のみ合うように設定して計算を行った。応答計算の結果として、波力と変位が時系列的に算出されるが、有効波力としてはピーク値を採用した。

有効波力への換算結果のうち、滑動合成波力と1波の滑動量の関係を図-5に示す。図中の○は実験波力を用いた場合、●は有効波力を用いた場合であり、衝撃的に作用しなかったケースは等しくなる。この結果より、実験結果の滑動合成波力では12(s)が最大であったが、有効波力に換算すると14(s)が最大となり、14(s)のケースで1波の滑動量が最大であったことから、有効波力算定法の妥当性が確認できた。

4. 各設計波力公式との比較

半没水型上部斜面堤に作用した波力のうち、各ケースの水平波力最大時の実験波力と、森平式および細山田式による計算波力との比較を行った。

実験波力のうち衝撃砕波力が作用したケースについては換算した有効波力値を用いて評価した。また斜面部水平波力については、台形ケーソンの下部傾斜部に作用する波力として考えた場合も同時に比較した。ただし長周期波に伴う平均水位の変動が作用波力に及ぼす影響を調べるため、計算波力を算出する際的水位として設計潮位を用いた場合と、波力波形から定義した1波の作用時間内の平均水位を用いた場合について比較した。ここで、平均水位は堤体前面水位の平均値として評価している。

4.1 直立部波力の検討

直立部に作用した実験波力と森平式(式-(2))、細山田式(式-(3))による計算波力との比較を行ったものを図-6に示す。

$$F_v(\text{森平}) = F_{vc} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_v(\text{細山田}) = \lambda_v \cdot F_{vc} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 F_{vc} は同等の天端高の直立堤に作用する合田波力、 λ_v は細山田式による直立部の波圧低減係数である。

直立部波力については波力が比較的小さい場合は細山田式が、大きい場合森平式の方が実験値との適合性が良かった。設計潮位を用いると計算波力が過大になってしまうケースがみられるが、長周期波による平均水位の変動を考慮すると改良されている。長周期水位を設計に取り込むのは現段階では難しいが、精度良く評価できれば波力算定精度も向上すると考えられ今後の検討課題である。また、図中の実験波力が最大のケースは衝撃力が作用したケースで換算した有効波力を用いて評価したものであるが、この場合どちらの波力公式でも評価は難しく、衝撃力の評価方法は別途検討する必要がある。

4.2 斜面部波力の検討

斜面部に作用した実験波力と森平式(式-(4))、細山田式(式-(5))による計算波力との比較を示したものが図-7である。また斜面部波力については台形ケーソンの下部傾斜部の作用波力(式-(6))として考えた場合も同時に示してある。

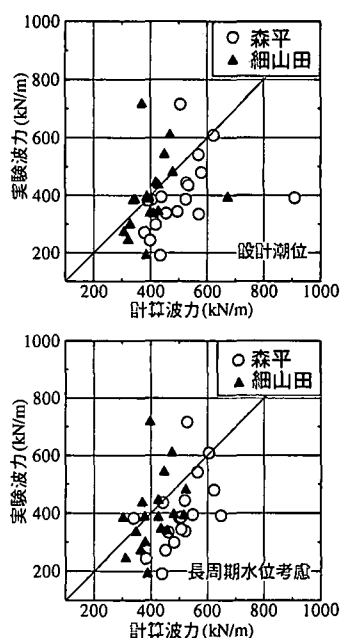


図-6 直立部波力の実験値と計算値の比較

$$F_{st}(\text{森平}) = F_{stc} \cdot \sin^2 \theta \dots\dots\dots (4)$$

$$F_{st}(\text{細山田}) = \lambda_{st}' \cdot F_{stc} \cdot \sin^2 \theta \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{st}(\text{台形}) = F_{stc} \cdot \sin \theta \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 F_{stc} は斜面部に相当する直立堤の合田波力、 θ は斜面の傾斜角、 λ_{st}' は細山田式による斜面部の波圧割増係数である。

その結果、森平式および細山田式では波力の低減が大きすぎる傾向がみられ、むしろ台形ケーソンの下部傾斜部と同様の考え方によって波力を適切に評価できた。また長周期波の影響による平均水位の変動を水深として考慮することによって、波力公式の実験データへの適合性が良くなる。

4.3 揚圧力の検討

揚圧力について森平式(合田式)との比較を行ったものを図-8に示す。前面には衝撃力の作用したケースがみられたが、底版部には衝撃力の影響はみられず、ほとんどのケースで実験波力は計算波力を下回っていた。従って、本研究の条件では揚圧力は現行の波力公式で評価できるものと考えられる。

4.4 細山田ら(1994)の波圧係数との比較

細山田ら(1994)は、上部工天端高や斜面下端的没水深の異なる断面形状の上部斜面堤(Type 1~Type 6)に対する水理実験結果から、直立部および斜面部の波圧係数を定式化しており、提案式は全体のばらつきの平均的な評価となっていると考えられる。本研究では、半没水型タイプで斜面傾斜角が同じ45°であるType 3, Type 4, Type 5に着目して波圧係数の比較を行った。図-9に各

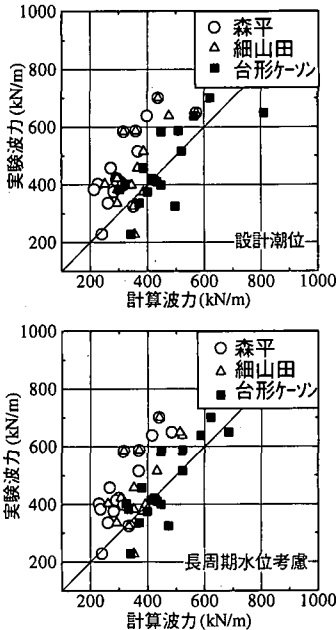


図-7 斜面部波力の実験値と計算値の比較

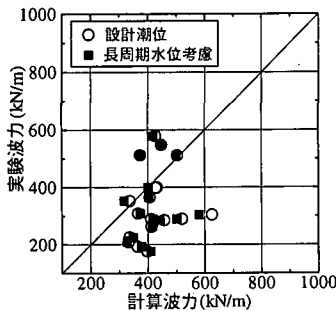


図-8 揚圧力の実験値と計算値の比較

Type の断面形状を示す。Type 3 は高天端、Type 4 と Type 5 は低天端であり、Type 5 のみ斜面下端の没水深がやや深くなっている。また波圧係数の比較の際には衝撃力が作用したケースは除いている。

図-10 は直立部の波圧係数 λ_v について比較したものである。図中●が本実験結果、各 Type の結果は細山田ら (1994) から読みとったもので、実線は細山田式、点線が森平式によるものである。本実験結果は若干のばらつきはみられるものの、全体的に波形勾配が大きくなると低減が大きくなる傾向を示しており、森平式では過大評価になるケースの方が多い。従って細山田式を用いて直立部波力を算定できると考えられる。

斜面部波圧係数 λ_{si}' について比較したものが図-11 である。図中には台形ケーソンの下部傾斜部として考えた場合の波圧係数も同時に示してある。細山田らの実験結

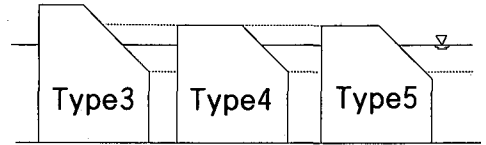
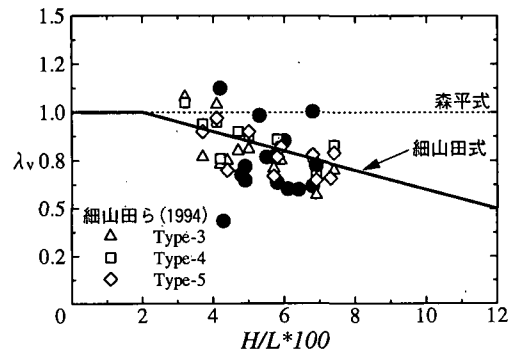


図-9 細山田ら (1994) の実験断面

図-10 直立部波圧係数 λ_v の比較

果では低天端の Type 4 と Type 5 は提案式に比較的合っているが、高天端の Type 3 については波圧係数を過小評価している。これは、低天端堤では本来斜面部に作用するはずの波が越波により逃げる効果があるのに対して、高天端になると波が逃げるができずに斜面に作用することが考えられる。一方、本実験結果は波力を比較した際には台形ケーソンの下部傾斜部と同様の考え方で適切に評価できるとしたが、この図から台形ケーソンの波圧係数はばらつきの平均的な評価となっていることがわかる。断面形状としては高天端の Type 3 に近いのであるが、Type 3 のばらつきに近いケースと、Type 4 や Type 5 に近いケースが存在する。これは断面形状だけでなく、波力作用時の越波の程度、長周期波に伴う平均水位の変動などによる影響が考えられる。全体的には細山田らの実験結果のばらつきの範囲内にあり、波圧係数 λ_{si}' を適切に評価することで、斜面部波力の算定が可能であるといえる。

水平波力最大時の斜面部水平波力と天端部鉛直波力を比較したものが図-12 である。これによると、斜面部水平波力が大きいと天端部鉛直波力は小さくなる傾向がみられる。また図-13 に示した同時刻の斜面部水平波力と天端部鉛直波力の比 α と実験結果の λ_{si}' をみると、 α が小さい、すなわち天端部鉛直波力が小さい方が λ_{si}' は大きくなる傾向がみられる。本実験では越波量は測定していないため直接評価できないが、天端波力から越波量の大小を概略評価できると考えると、越波量が多いほど斜面部の波力が低減する傾向があるといえる。従って、波

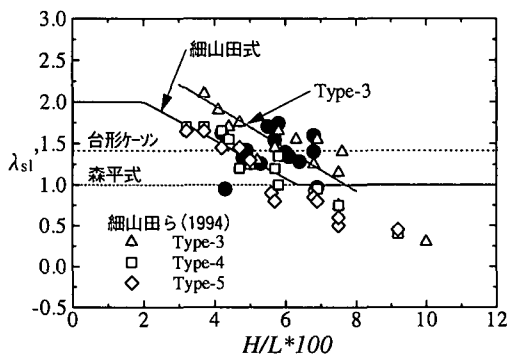
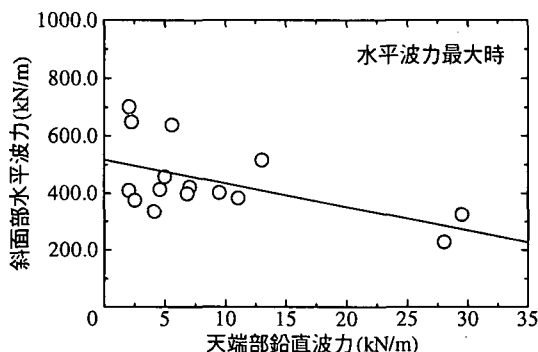
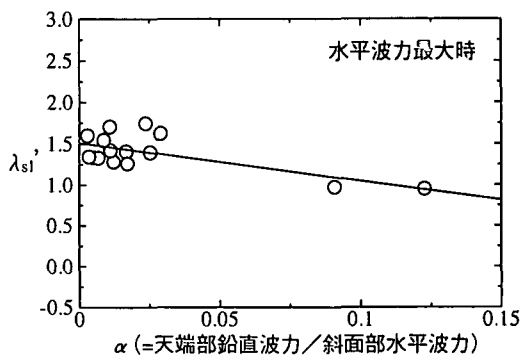
図-11 斜面部波圧係数 λ_{sl} の比較

図-12 斜面部水平波力と天端部鉛直波力の比較

図-13 斜面部水平波力と天端部鉛直波力の比 α と λ_{sl} の比較

の波圧係数を適切に評価することで算定できる。ただし越波の効果を取り込んだ整理を行うことにより更に精度が向上する。

2) 滑動実験を不規則波で実施した結果、規則波実験では説明できない周期特性がみられた。これより波力実験では不規則波による検討が必要であるといえる。

3) 長周期波に伴う平均水位の変動分を、波力算出の際の水深に考慮することによって波力算定の精度が向上する。ただし長周期水位の評価については今後の課題である。

参考文献

- 合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 88-94.
 谷本勝利・木村克俊・錦織誠司・田中典明(1985): 台形ケーソンの設計における波力の算定法, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 550-554.
 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利(1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 706-710.
 森平倫生・国田 治(1979): 斜面堤の水理特性に関する模型実験, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 295-298.

力算定の際に、波形勾配だけでなく越波の効果を取り込むようなパラメータを加えた検討を行うのが望ましい。

6. おわりに

半没水型上部斜面堤の波力特性を、不規則波による滑動実験の結果を用いて詳細に検討した。その結果以下のことがわかった。

- 1) 半没水型上部斜面堤に作用する波力は、細山田式