

一重・二重スリットケーソン堤の波力特性の相違について

小竹 康夫* ・ 興野 俊也** ・ 貝沼 憲男***
藤原 隆一**** ・ 石崎 崇志*****

1. はじめに

港湾施設としての護岸・防波堤の設計に際しては、一般的に「合田波圧式」(合田, 1973)により算出される波圧を設計外力として堤体に作用させ、安定性を検討する。しかし、大水深箇所に設置する天端の低いケーソン式護岸・防波堤では、設計波のような高波浪はケーソン上部を越波するため、設計値に比べ低い波圧しか作用しない。また、ケーソン前面にスリット壁のある直立消波構造物の反射率に関する理論的・実験的研究(谷本ら, 1982)が行われており、高橋ら(1991)は部材波力特性を考慮した耐波設計法を提案するとともに、耐波安定性の面からも直立消波ケーソン堤は有利な構造であると結論づけている。

本研究では横スリットケーソン堤を対象とし、スリット壁と不透過壁に挟まれる遊水室を不透過部沖側に1室配置した場合(一重スリット)と2室配置した場合(二重スリット)の堤体に作用する波力の違いを水理模型実験により確認し、その耐波特性を把握するとともに、設計手法について考察することを目的とした。また、横スリットケーソン堤で低天端とした場合の波力低減についても検討を加えた。

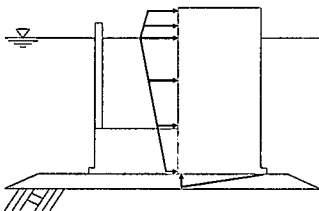


図-1 現行設計法で仮定する波圧分布

2. スリットケーソン堤の波力算定法

図-1は、現行設計法(運輸省港湾局監修, 1989)により消波構造物に作用する波力を算定する際に仮定する波圧分布を模式的に示したものである。この方法では、堤体を不透過部と、スリット壁を含む遊水室部とに分け、不透過部に作用する波力のみを合田波圧式を用いて算出し、これを設計波力とする。遊水室部についてはスリット壁両面や遊水室嵩上げ部の底面と天端面に作用する波力が相殺し合うと仮定し、設計波力としては考慮しない。

一方、高橋ら(1991)は、堤体への波浪の作用状況を押し波時と引き波時に分け、さらにその各々を3つのステージに分類して、各位相の各部材に作用する波圧分布を仮定する設計法を提案している。このうち押し波時の3ステージは図-2に示す通り、スリット壁に最初の衝撃的波力が作用する押し波時I、不透過壁に最初の衝撃

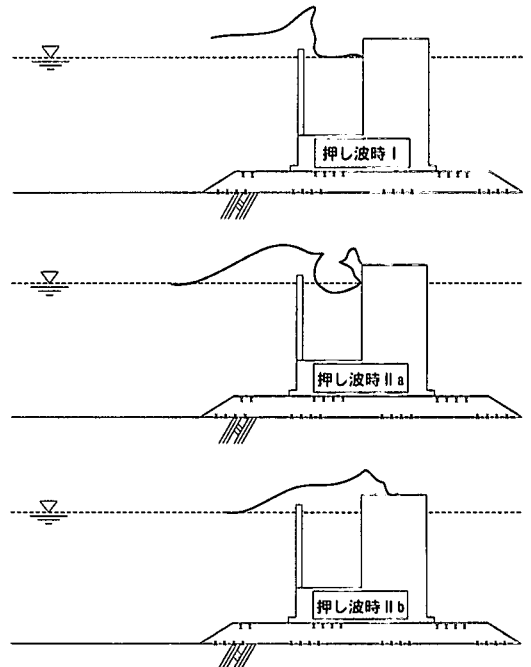


図-2 押し波時の3つのステージ

- * 正会員 工博 東洋建設(株)鳴尾研究所 水工研究室 研究員
- ** 正会員 東京電力(株)電力技術研究所 土木グループ 主任研究員
- *** 正会員 東京電力(株)電力技術研究所 土木グループ グループマネージャー
- **** 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所 水工研究室 主任研究員
- ***** 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所 水工研究室 研究員

的波力が作用する押し波時 IIa, 波頂が不透透壁に到達し, 堤体に作用する波力がなだらかに極大値を示す押し波時 IIb である。この方法では波力の位相差を考慮するため, 現行設計法に比べて詳細な設計となり, 直立消波ケーソンに作用する波力を適切に算定できる。

3. 実験条件と方法

3.1 実験条件

実験条件を表-1 に示す。実験は長さ 60 m, 幅 1 m, 深さ 2 m の 2 次元不規則波造波水路を用いて行った。縮尺はフルード相似則に従い幾何縮尺を 1/50 とし, 1:100 勾配の海底固定床上で水深 40 cm の地点にマウンドと堤体を設置した。波浪は規則波及び不規則波を対象とし, 周期は 1.27 s, 1.70 s, 2.26 s の 3 種類, 堤前波高を 16.6 cm~32.5 cm に変化させた。堤体断面は図-3 に示す通

表-1 実験条件

縮尺		1/50
水深		40 cm
海底勾配		1 : 100
波浪条件	周期	1.27 s・1.70 s・2.26 s
	波高(堤前)	16.6 cm〜32.5 cm
相対天端高	低天端	0.09〜0.18
	通常天端	0.28〜0.54
スリット開口率		0.25

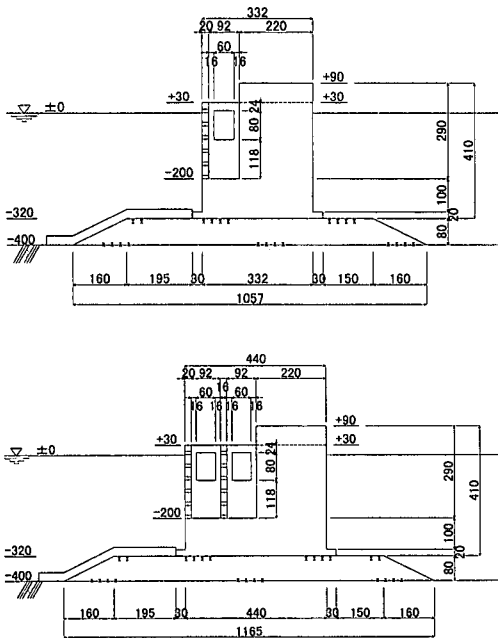


図-3 模型断面 (単位: mm)

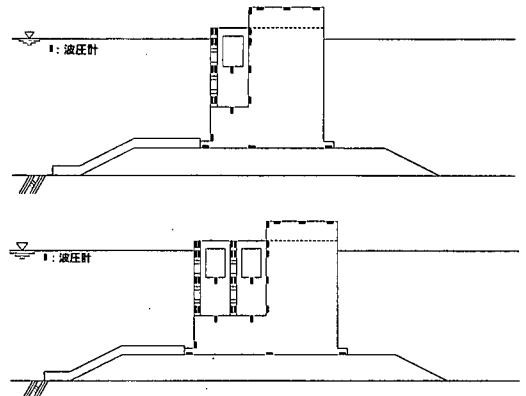


図-4 波圧計の配置

り一重スリットと二重スリットの各々について, 相対天端高が 0.28~0.54 (通常天端) と, 0.09~0.18 (低天端) の 4 断面を対象とした。スリット壁は一重スリット, 二重スリットの全てにおいて同じ立面形状を持つものとし, 開口率は 0.25 とした。

3.2 実験方法

実験では堤体を水路の幅方向に 3 分割し, 両端の模型は水路床に固定された架台に固定した。固定された片方の堤体には図-4 に示す位置に波圧計 (最大 32 個) を取り付け, 時系列の波圧を測定した。固定されていない中央部分は滑動量測定用の模型とし, 堤体内部に挿入する鉛板の枚数で重量を調整した。

規則波を堤体に作用させる場合, 入射波が模型に到達した後, 造波板からの再反射波が到達するまでの間に測定を行い, ほぼ同じような波形を繰り返す時間帯の連続 5 波を対象として, 0.002 s 間隔でデータを読み取り, 解析を行った。実験は繰り返し 2 回行い, 波力についてはその平均値を実験値とした。不規則波に対しては, 造波開始後, 造波板と模型の間を有義波周期を持つ波が 3 往復する時間が経過した後, 水路内で生じる波の特性が定常とみなされるようになってから, 0.05 s 間隔で 4096 個のデータを読み取り, 解析を行った。

滑動量測定実験に先立っては, 模型底面とマウンド間の摩擦係数を測定し, 実験時の堤体重量と波力の関係から実験精度の確認を行った。そして堤体に作用する波力と滑動量との関係から滑動限界波力を求めた。

4. 実験結果と考察

4.1 堤体に作用する波圧分布

堤体に作用する波力は測定された波圧を面方向に積分することにより, 水平方向波力 F_H および鉛直方向波力 F_V として求め, さらに次式を用いて滑動合成波力 F_S (谷本ら, 1988) を求めた。

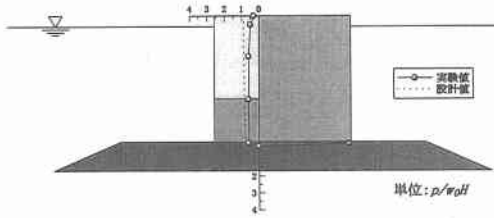
$$F_s = F_H + \mu F_V$$

ここで μ は堤体とマウンド間の摩擦係数であり、摩擦係数測定実験から $\mu=0.5$ とした。

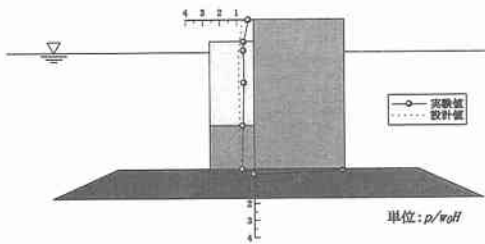
図一5に滑動合成波力最大時の波圧分布の一例を示す。各断面ごとに不透過部及びスリット壁（二重の場合には沖側）両面の波圧分布を示しており、不透過部については現行設計法による値も示した。現行設計法の適用に際しては、直立消波ケーソンの構造等による波圧の補正係数 λ_1 および λ_2 をともに 1.0 とした。また、不透過部の沖側壁面底部の波圧実測値は、遊水室嵩上げ部の沖側

壁面底部の波圧とした。

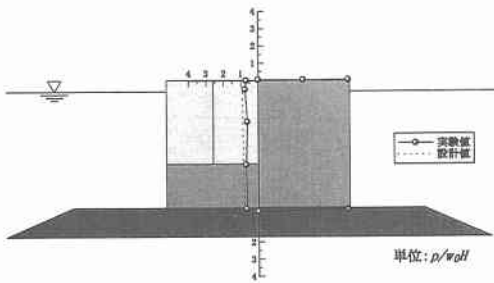
一重スリットの場合、不透過部の波圧分布は実験値が設計値よりやや小さい。一方、二重スリットの場合には不透過壁上部やスリット壁面に衝撃波力の作用する場合があり、不透過部で実験値が設計値より大きな値を示すことがある。このため現行設計法では、波力を過小評価する恐れのあることが分かった。また一重スリット・二重スリットともに、滑動合成波力最大時における底面沖側の波圧は、設計値の約 4 割以下となっていることが分かった。



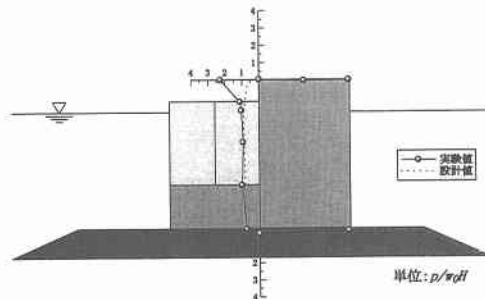
単位: p/w_0H
(一重低天端堤)



単位: p/w_0H
(一重通常天端堤)



単位: p/w_0H
(二重低天端堤)



単位: p/w_0H
(二重通常天端堤)

(a) 不透過部

(b) スリット壁 (沖側)

図一5 滑動合成波力最大時波圧分布図の一例 ($T=2.26$ s, $H=20.8$ cm のケース)

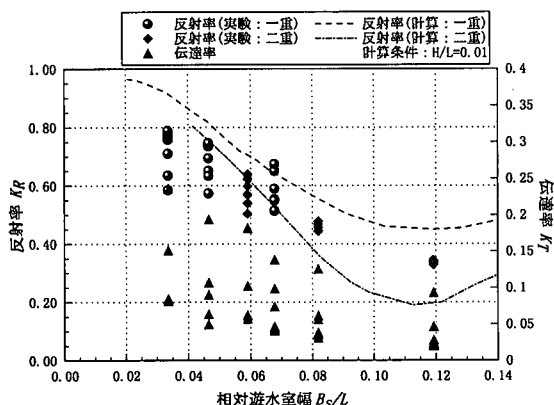


図-6 スリットケーソン堤の反射率と伝達率

4.2 反射率と伝達率

スリットケーソン堤の特長の一つは、直立堤と比較して反射率や波高伝達率を小さく押さえることができることにある。そこで、反射率および波高伝達率を相対遊水室幅 B_s/L (本研究では周期とスリット枚数の関数となる) の関数として示したのが図-6 である。この図より今回対象とした断面形状は、反射率や伝達率の減少に効果があることが分かった。特に今回の実験条件の範囲内では、 $B_s/L=0.12$ 付近で反射率、伝達率ともに小さくなっている。なお、図中に示した2本の曲線は、安ら(1996)が縦スリットケーソンを対象として、一重スリットの場合と二重スリットの場合について各々の反射率を理論的に求めた結果である。今回の実験結果と理論値との一致度は良好である。また、伝達率については、相対天端高の関数として混成堤の波高伝達率(土木学会編, 1985)の推定値と比較したところ、若干小さな値を示した。

4.3 堤体に作用する波力

滑動合成波力について、実験値と設計値の比を波力の低減と定義することができる。測定波圧から得られる波力および滑動量測定実験による滑動限界波力と、現行設計法による設計波力から求まる波力の低減から、一重スリットでは概ね80%に波力が低減しているが、二重スリットの場合、実験値が設計値を大幅に上回り、約2倍程度になる領域があることが分かった。これは波圧分布図にも見られた通り、二重スリットの場合に不透過部やスリット壁に衝撃波力が作用する影響と考えられる。図-7 は同じアーセル数を持つ実験条件に対して一重スリットと二重スリットにおける波力を比較したものである。この図に示す通り、一重スリットの方が二重スリットに比較して堤体に作用する波力は小さい。また、低天端と通常天端の比較では、波力の低減は低天端の場合により大きな効果が得られた。

このように、スリットケーソン堤はその断面形状によ

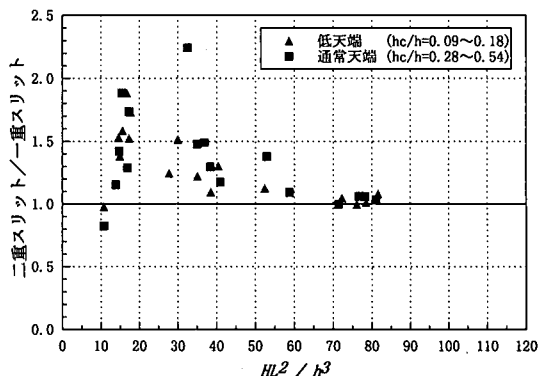


図-7 一重スリットと二重スリットの波力比較

り波力の低減に効果がある場合と、現行設計法では波力を過小評価する場合のあることが分かった。一方、滑動合成波力最大時の位相に着目すると、今回の実験条件では高橋らの分類における押し波時Iから押し波時IIaに相当し、その多くの場合が最初の衝撃波力が不透過壁に作用する押し波時IIaに当たることが分かった。また実験の目視結果から、押し波時IIaにおいては、遊水室からの反射波と入射波がスリット壁近傍で干渉し、砕波した波が不透過壁に衝撃的に作用する状況が確認された。

そこで遊水室嵩上げ部を高マウンドと仮定することで、合田波圧式を高橋ら(1992)の衝撃波力係数で補正する方法の適用を試みた。計算に際して、マウンド天端水深には遊水室嵩上げ部天端水深を、マウンド肩幅には遊水室幅を代入した。その結果、一重スリットに $T=2.26$ s の波浪を作用させた場合の一部を除き、衝撃波力係数での補正が必要となった。

図-8 は、ここで求めた設計波力と実験値により求まる波力の低減をアーセル数の関数として整理したものである。図中の枠は、藤原ら(1996)が示した直立堤 ($h_c/H < 0.6$) の波力低減領域である。この図より衝撃波力の影響の少ない一重スリットでは補正の効果が少なく、概ね80%に波力が低減されていることが分かる。一方、二重スリットの場合には補正の効果が大きく、計算値に比較して最大で1.25倍程度に収まっており、遊水室嵩上げ部を高マウンドと仮定し、衝撃波力を考慮する計算方法は妥当であると言える。

通常天端と低天端の比較では、低天端での波力の低減効果が大きく、直立堤の波力低減領域に相当する条件で、低天端の効果が顕著である。従って、この設計法を用いると、スリットケーソン堤の波力低減を直立堤の場合と同様に考慮することが可能となる。

これから、本研究で対象とした4つの断面形状のうち、今回の実験条件では衝撃波力の影響が少なく、波力の低減の大きな一重スリット低天端堤が合理的な断面形

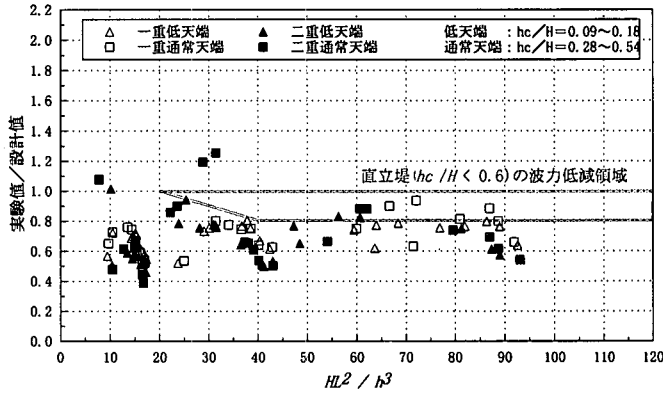


図-8 実験値と衝撃波力を考慮した設計値の比較

状であることが分かった。

5. おわりに

本研究で得られた結果は以下の通りである。

本研究で対象とした4つの断面形状について、①一重スリットと二重スリットを比較すると、一重スリットの場合には現行の設計値に対して概ね8割に波力が低減されるが、二重スリットの場合には衝撃波力が作用することがある。②衝撃波力が作用する場合には、遊水室嵩上げ部を高マウンドと仮定し、合田波圧式を高橋らの衝撃波力係数で補正する方法が有効である。③この方法を用いた設計値との比較を行うことにより、直立堤の場合と同様に80～90%の波力低減を期待できる。④以上の結果、今回の実験条件では波力低減の大きな一重スリット低天端が合理的な断面形状であることが分かった。

参 考 文 献

安 成模・藤原隆一・倉田克彦・角野昇八 (1996): ステップスリットケーソンの実用化に向けた一検討(第1報), 海洋開発

論文集, VOL. 12, pp. 85-90.
運輸省港湾局監修 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp. 119-132.
合田良実(1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp. 31-69.
高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均 (1991): 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第4号, pp. 3-34.
高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻(2), pp. 676-680.
谷本勝利・吉本靖俊 (1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論的研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第3号, pp. 43-77.
谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988): 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究(第1報) 一台形直立部に働く波力および滑動安定性, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第1号, pp. 3-29.
土木学会編 (1985): 水理公式集, pp. 535-536.
藤原隆一・貝沼憲男・興野俊也・石崎崇志・小竹康夫・津田宗男 (1996): 低天端ケーソン堤に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第43巻(2), pp. 761-765.