

後部パラペット上部斜面ケーソン堤の水理特性に関する研究

関本 恒浩 片山 裕之
 鶴飼 克臣 清水 琢三

要 旨

厳しい海象条件において耐波安定性に優れた後部パラペット上部斜面ケーソン堤を対象に水理模型実験を実施し波力と越波に関する詳細な検討を実施した。その結果、上部斜面堤は堤体各部の波力の作用位相が異なることと鉛直下向きの波力が存在することのため、通常ケーソンに比べ耐波安定性に優れた構造となっていることを明らかにした。また、堤体各部への波力の作用位相が異なることを設計に考慮すべきことを示唆した。一方、越波については同じパラペット天端高を有する直立ケーソン堤よりも越波流量が多く、5～10%程度必要天端高が増加することがわかった。

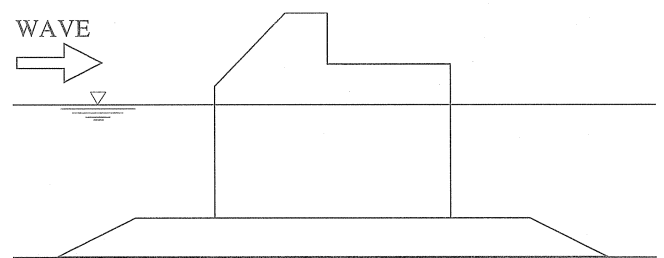
1. まえがき

一般に1/50よりも緩い勾配の海底斜面上では、通常の波力の2倍以上にも達するような衝撃碎波力は発生しないと考えられる。しかしながら、碎波点近傍の非常に厳しい波浪条件下では、波浪の不規則性や長周期の水面変動の存在などのために、衝撃的な波力が作用することがある。これまでは防波堤などの海岸・港湾施設はこのような条件下に計画されることは、技術的な未解決課題が多いことや経済性の問題などの理由から、ある意味では意図的に避けられてきたものと考えられる。しかしながら、近年沿岸域の開発が飽和状態に近くなり、これまで建設が避けられてきた海象条件の厳しい海域に構造物を建設せざるを得ない状況になりつつある。

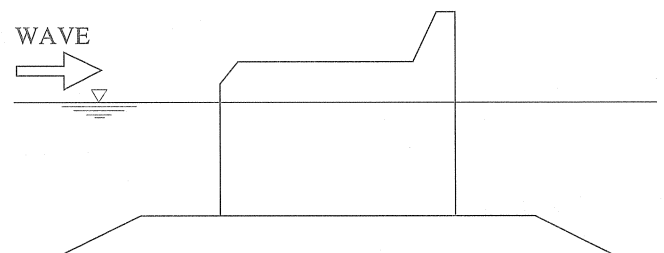
最近、合田 (1973)¹⁾ の波力公式を衝撃碎波力も考慮できるように修正することが高橋ら (1992)²⁾ によって提案されている。強い衝撃碎波力が作用する場合には、修正された合田の波力公式を用いて設計したケーソンであっても、波によって滑動してしまう場合がある。通常のケーソンでこの波に耐えようとするとき堤体幅が極端に広くなり、実質的には経済的にも物理的にも実現不可能な断面となってしまう。このような場合には、耐波安定性の高い異形ケーソンを用いるのが現実的といえよう。異形ケーソン堤は、大きく分けて消波機能を持つものと耐波安定性の高いものに大別される。消波機能を有するものとしては直立スリットケーソン堤、曲面スリットケーソン堤、二重円筒ケーソン堤があり、高い耐波安定性を有するものとしては上部斜面ケーソン堤、台形ケーソン堤、半円形ケーソン堤などがある。これらは、機能的に一長一短があり、設置条件によっては機能面・経済面で問題となることがある。

本研究では、耐波安定性の高い構造物として上部斜面堤に着目した。ただし、上部斜面堤では通常のケーソン

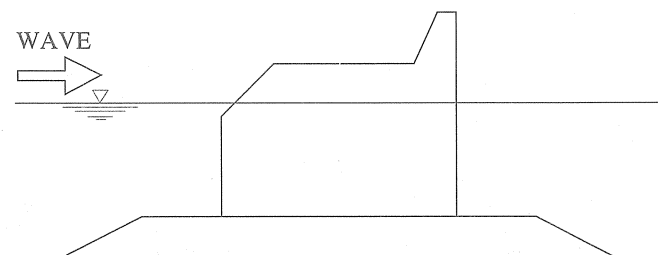
に比べ越波が大きくなり、これを解決するには斜面部を大きくする必要があるなどの問題点があるため、田崎ら (1995)³⁾ によって提案された後部パラペット上部斜面堤



(1) 上部斜面ケーソン堤



(2) 後部パラペットケーソン堤



(3) 後部パラペット上部斜面ケーソン堤

図-1 各種堤体の概念図

きの波の堤体への作用状況は、当然のことながら波の来襲状況に依存する。堤体前面の平均水位が比較的高く、大きな波高が来襲する場合には、まず直立部で波圧が最大となる(図-4 (1))、直立部が最大となったあと水塊は斜面上を滑るようにして斜面に沿う強い流れとなり、このとき斜面部の波力が最大となる(図-4 (2))。斜面に沿った流れは、上部工上を越流してパラペット部に強くぶつかる(図-4 (3))。このとき、波高が非常に大きければ斜面部から上部工にかけて全体的に越流するのに対して、やや小さい場合は斜面部で水塊がジャンプするようにしてパラペット部へ到達する。また、波高がある程度小さくなると、碎波した波が斜面部をたたきつける場合もある(図-4 (4))。このときも水塊は上部工上を越流するが、前述の状態に比べあまり強い流れとはならず、パラペット部への波作用もそれほど強くないものと考えられる。また、作用直前に平均的な水位が低下し、これによって碎波が非常に進んだ波の場合、堤体位置では波の作用高さは比較的低く、直立部に衝撃的に波が作用する(図-4 (5))。この時は斜面上を越流せず、したがってパラペットにも波は作用しない。

このように、波の作用状況は一波一波異なり、設置水深などの条件によって当然変化するものと考えられるが、本実験の条件では波力が最も大きくなるのは一番最初に述べた状況(図-4 (1)~(3))であった。すなわち、この場合波高が大きだけでなく、平均水位も高くなっており、大きな波力の作用の他に平均水位の増加による浮力の増大の効果もあるものと考えられる。一方、直立部のみにしか衝撃力が作用しない場合は、平均水位としては引き波時であり、浮力が減少するとともに波の作用範囲も比較的狭く

なるため堤体の安定性に対しては安全側に作用するものと考えられる。このような現象が生ずる要因は波の周波数に関する不規則性のためであり、長周期の水面変動との相互作用の結果と捉えることができる。この現象は規則波実験では考慮できない現象である。したがって、堤体の安定実験は不規則波で実施することが望ましいと言える。なお、浅海域の長周期水面変動については、現在精力的に研究が進められているところであり、長周期水面変動を陽に設計に取り入れるにはしばらく時間がかかるものと思われる。そこで、ここでは種々の現象が生じた結果としての波圧合力に着目して堤体の安定性の評価

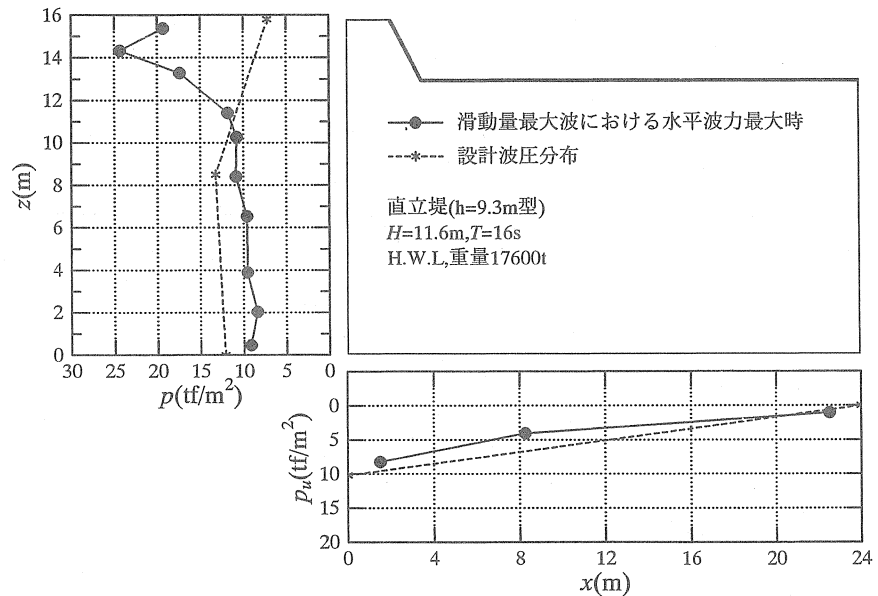


図-5 通常ケーソン堤における滑動量最大時の波圧分布例(天端高 D.L.+9.3m)

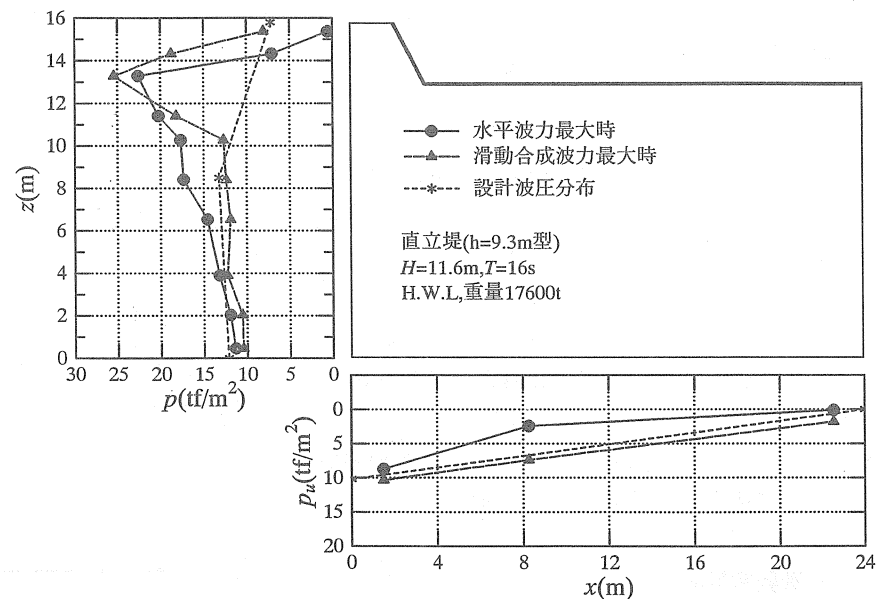


図-6 通常ケーソン堤における水平波力および滑動合成の波圧分布例(天端高 D.L.+9.3m)

を試みるものとする。すなわち、長周期などの影響は入射波高と波圧合力の関係中に陰に考慮されているものと考えられる。

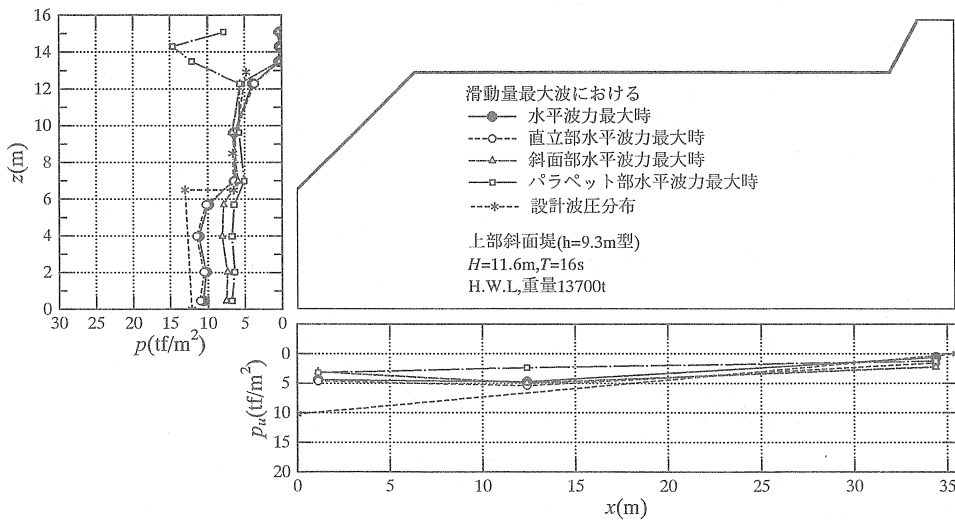
3. 2 堤体の作用波圧分布

波圧の作用状況や堤体の滑動などの諸現象を詳細に説明しようとするには、堤体に作用する波圧分布すべてを詳細に検討する必要がある。しかしながら、我々が必要としている情報は設計条件における波圧の分布状況であることから、ここでは水平波力最大時および滑動量最大時について波圧分布を検討する。

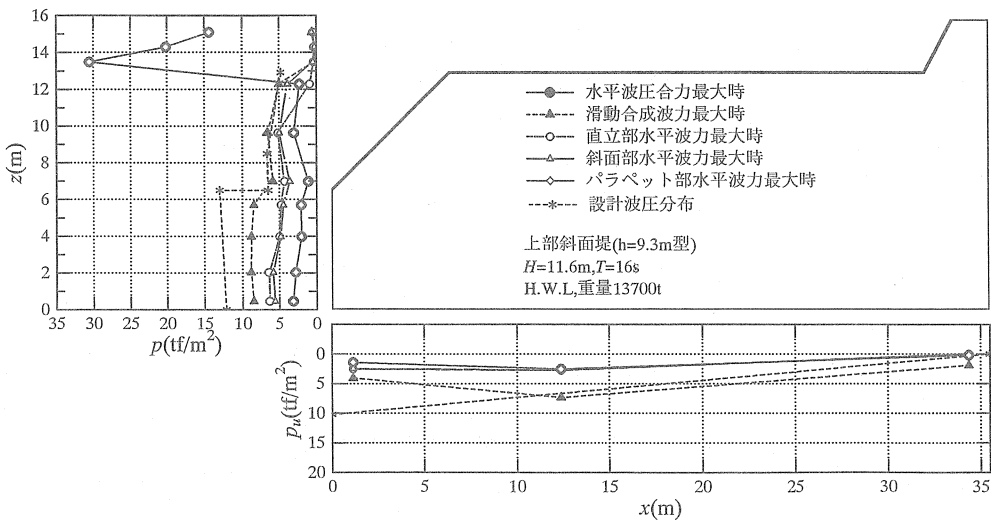
図一5は天端高D.L.+9.3mの通常ケーソン堤における滑動量最大時の波圧分布の例を示したものであり、図一6は天端高D.L.+9.3mの通常ケーソン堤における水平波力最大時および滑動合成波力最大時の波圧分布を示したものである。ここで、滑動合成波力とは水平波力と鉛直波力の水平方向寄与分を加えあわせたものである。なお、図中には現行設計法における設計波力である合田の波圧公式による計算結果(以下合田波力)も同時に示している。これらの図によると、先に述べたように波圧の分布は合田波力に比べ堤体上部で大きくなっていることがわかる。これは平均水位が上昇し、そこに衝撃的な波力が作用しているためと考えられる。波圧合力としての波力も当然合田波力よりも大きくなっている。この傾向は水平波力最大時および滑動合成波力最大時でも同様である。なお、鉛直波力の一部である揚圧力については、ほぼ合田波力と一致する。

図一7は後部パラペット上部斜面ケーソン堤について天端高D.L.+9.3mのときの滑動量最大時の波圧分布を、図一8は同様に天端高D.L.+9.3mのときの水平波力最大および滑動合成波力最大時の波圧分布を示したものである。また、この図は後部パラペット上部斜面堤を前面直立部、斜面部およびパラペット部の各部分に分けて、1波中の作用モードとしてそれぞれの部分における1波中の最大波力発生時の同時波圧分布を示している。なお、この図でも合田波力を同時に示した。

1. で述べたように、通常ケーソンでみられた波力の大きい部分をうまく逃がしてやれば、堤体の安定性は格段に向上するものと考えられることから、本研究



図一7 後部パラペット上部斜面ケーソン堤における滑動量最大時の波圧分布例 (天端高D.L.+9.3m)



図一8 後部パラペット上部斜面ケーソン堤における水平波力および滑動合成の波圧分布例 (天端高D.L.+9.3m)

では後部パラペット上部斜面堤を検討の対象とした。これらの図では、直立部および斜面部とも各波力作用モードで合田波力を上回るものはみられない。したがって、上述の予想通り上部斜面堤にすることによって堤体前面における衝撃波力の発生を回避することができた。ただし、パラペット部については、波圧の作用状況で述べたように、斜面に沿った流れが上部工上を越流してパラペット部に強くぶつかるため、衝撃的な力が作用する。しかしながら、パラペット部の受圧面積が比較的小さいことと、波力のパラペット部作用時には直立部、斜面部とも波力が小さくなっているため全体的な波力としては比較的小さかった。

3. 3 波圧の作用モード

次に、後部パラペット上部斜面ケーソン堤の堤体各部に作用する波力の全体波力への寄与率について検討した。図-9は波圧合力と直立部、斜面部パラペット部の堤体各部における波圧合力を比較したものである。前述のように各部の波圧合力はそれぞれ位相差があり、その大きさもそれぞれ異なっている。各部別にみると今回の実験では、直立部と斜面部が絶対値ではほぼ同じであり、パラペット部は直立部や斜面部の1/3~1/2程度となっている。ただし、直立部の波力はピークが比較的是っきりしており、ピーク波力発生後の波力の減少は比較的ゆっくりとしている。斜面部の波力のピークは直立部の波力のピークとほぼ同時に発生した後比較的長い時間継続し、パラペット部の波力作用開始時刻近くまでピークが続いている。一方、パラペット部は波力の絶対値は低く、ピーク発生の際も他の部位にくらべ遅くなっている。ただし、波圧合力における寄与としては、直立部と斜面部における波力の減少が緩慢なためパラペット作用時でも、直立部と斜面部には比較的大きな波力が残っており、これにパラペット部の波力が付加されるため、波のパラペット部作用時に全波力としては比較的大きな波力が認められる。パラペットの位置や大きさ

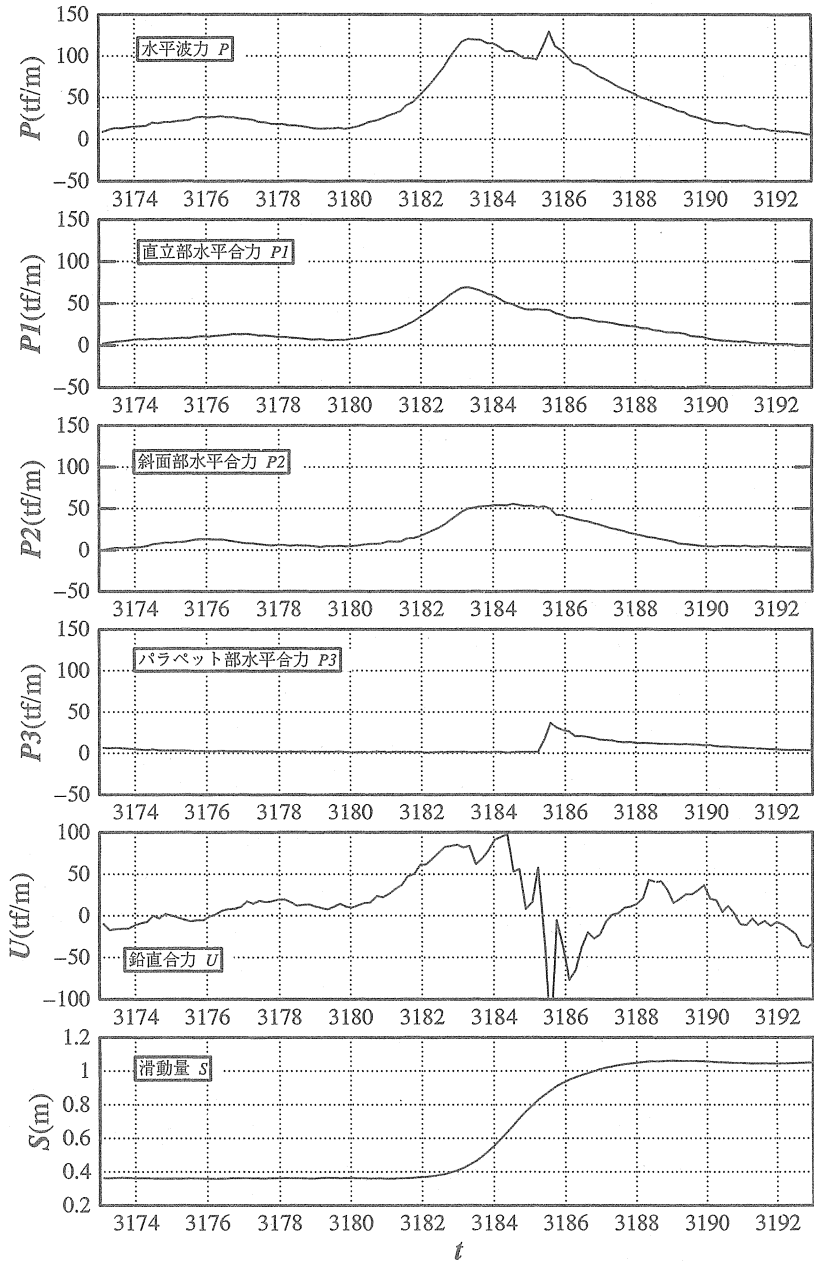


図-9 堤体各部に作用する波圧合力の時系列の例

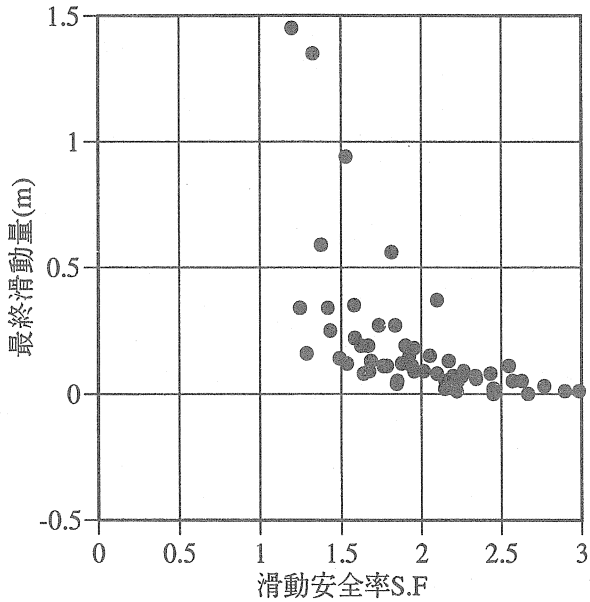
などによっては、パラペット部の波力は大きくなりかつ直立部と斜面部の波力のピーク値からの減衰の割合が小さくなることも考えられるため、設計波力の算定モードとしては、直立部最大時あるいは直立部+斜面部最大時とパラペット部最大時の2時点について波力の照査を行う必要があるものと考えられる。

3. 4 堤体の滑動と滑動安全率

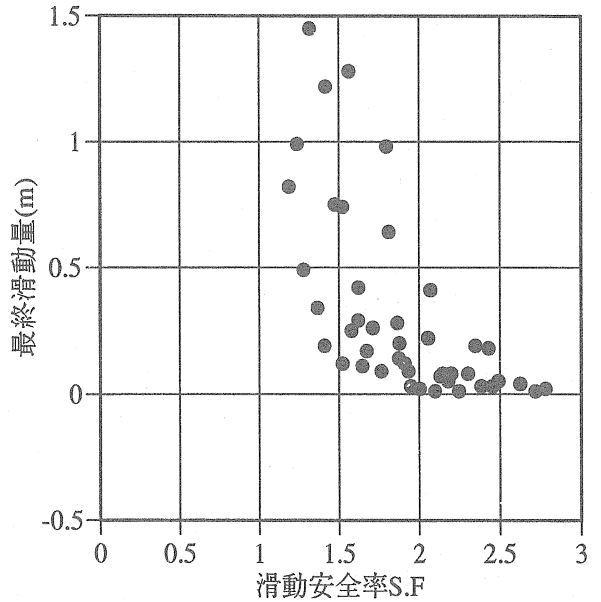
滑動実験は、通常ケーソン堤および後部パラペット上部斜面ケーソン堤のそれぞれについて、現行設計法によって得られる滑動安全率が1.0となるいわゆる机上で計算される滑動限界重量を基本とし、これに対して堤体

が安定であれば重量を減らし、不安定であれば重量を増やすことによって実際の滑動限界重量を求めた。ここでは、最終的に現地で10cm以上の堤体の変位があった場合に、滑動したものと判断した。図-10は滑動実験結果をまとめたものである。この図は、実験で得られた最終滑動量と実験波の最高波高より衝撃碎波力係数を考慮した合田の波力算定公式を用いて算出した滑動安全率の関

係を示したものである。これらの図より、本実験における滑動限界状態時の滑動安全率は、合田の波力公式に基づいて算出される安全率を考えた場合、直立堤で2.0~2.5程度、後部パラペット上部斜面堤で1.0程度となり、後部パラペット上部斜面堤の耐波安定性が高いことがわかった。なお、滑動する際の波の作用状況は、通常ケーソン堤、後部パラペット上部斜面ケーソン堤とも、ほと

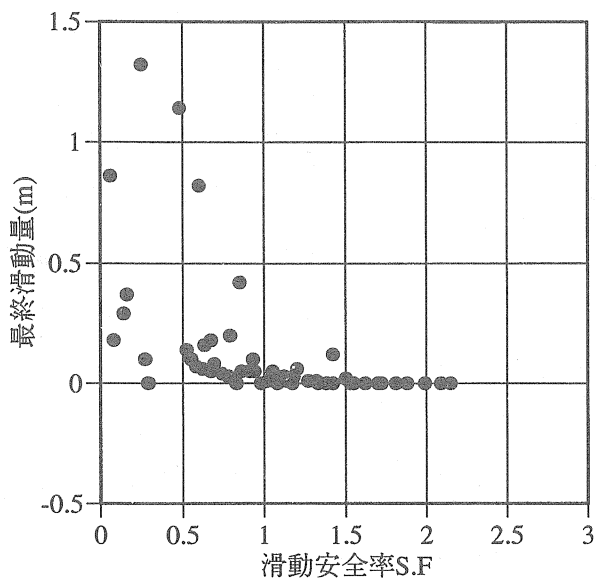


(a) パラペット天端高 D.L.+9.3 m

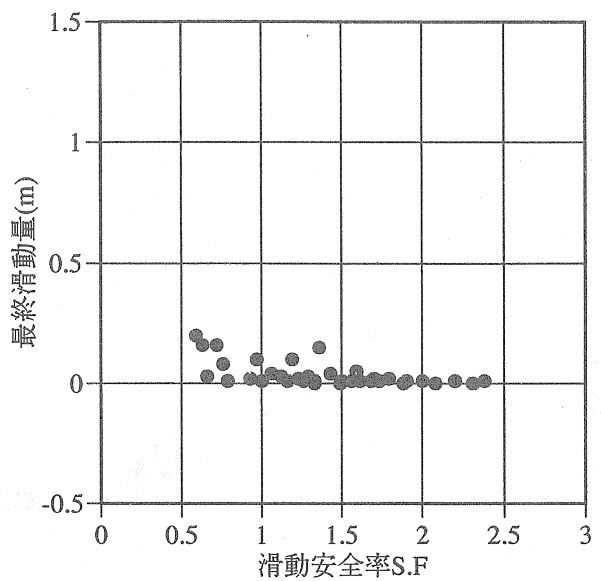


(b) パラペット天端高 D.L.+11.2 m

(1) 直立ケーソン堤



(a) パラペット天端高 D.L.+9.3 m



(b) パラペット天端高 D.L.+11.2 m

(2) 後部パラペット上部斜面ケーソン堤

図-10 波高伝達率と相対天端高の関係

んどのケースで平均水位が上昇しその上に大きな波高が来襲する場合に滑動が見られた。

これらの結果より、通常の直立ケーソンの場合、衝撃波力の作用により堤体には合田の波力公式で算出される水平波力の約2倍の力が実効波力として働いていることがわかる。また、今回の実験条件では後部パラペット上部斜面ケーソンに作用する波力は、合田の波力公式で算出される波力をそのまま用いてよいことがわかる。したがって、必要堤体幅は通常のケーソン堤では48mであるのに対し、後部パラペット上部斜面ケーソン堤では16.5mで良い結果となった。

4. 越波実験結果

4.1 波高伝達率

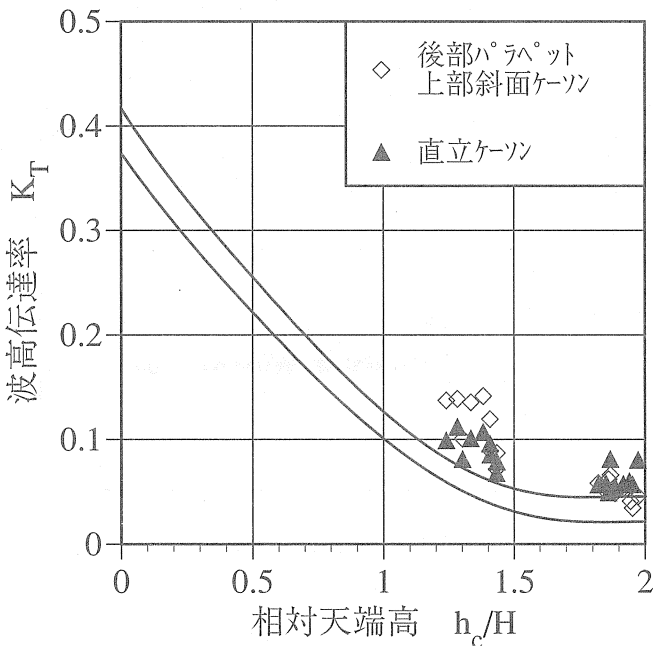
図一11は波高伝達率と相対天端高の関係を示したものである。図中にはGoda (1969)⁷⁾の混成堤に対する波高伝達率の実験式を同時に示した。この場合の波高伝達率には、越波による背後水域への打ち込みによって発生する波とマウンドを透過して伝達する波の両方が含まれており、実験においても同様である。なお、本実験においてマウンド深さと水深の比 d/h はH.W.L.で0.71、L.W.L.で0.65であった。通常のケーソンの場合、実験値は合田の実験式に比して若干大きめの値を取っているようで、相対天端高 h_c/H が1.5よりも大きい場合は、波高伝達率は0.06~0.07程度、相対天端高が1.5よりも小さい場合で波高伝達率は0.07~0.1程度であった。しかしながら、本実験で対象とした条件は伝達波高の比較的小さ

い領域であり、計測器の精度や実験データのばらつき、さらには合田の実験式自体が波高伝達率で±0.1程度のデータのばらつきを包含していることを考慮すれば、実験値と合田による実験式は比較的良好に対応しているものと考えられる。

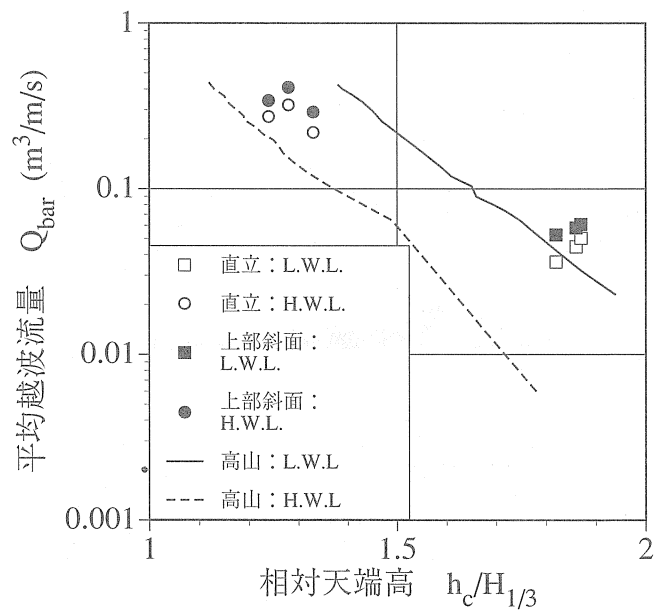
一方、後部パラペット上部斜面ケーソン堤では、相対天端高が1.5よりも大きい場合には通常のケーソン堤とほぼ同程度の波高伝達率となっている。これは、天端が相対的に高いため越波流量が比較的小さく、越波による堤体背後への伝達波の割合が、マウンドの透過による伝達波に対して小さくなるためと考えられる。また、相対天端高が1.5よりも小さい場合には、通常のケーソン堤にくらべ波高伝達率が0.05程度大きく、0.09~0.15程度の波高伝達率であった。これは、逆に天端高が相対的に低くなっているため越波の打ち込みによって発生する伝達波がやや顕著なりはじめたことによるものと考えられる。しかしながら、森平・国田(1979)⁴⁾が実施した上部斜面ケーソンでは、越波による波高伝達率は通常のケーソン堤の約2倍となると報告されていることを考えれば、後部パラペットの効果非常大的ことがわかる。

4.2 越波流量

図一12は通常のケーソン堤および後部パラペット上部斜面ケーソン堤について相対天端高と越波流量の関係を示したものである。図中には直立護岸に対する合田ら(1975)⁸⁾の平均越波流量算定図表を数式化した高山ら



図一11 波高伝達率と相対天端高の関係



図一12 相対天端高と平均越波流量の関係

(1982)⁹⁾による平均越波流量算定式に基づく計算結果を同時に示している。通常のケーソン堤ではL.W.L.では平均越波流量の理論値と実測値がほぼ一致しているのに対し、H.W.L.では実測値が理論値を若干上回っている。H.W.L.では堤体設置位置における来襲波は碎波限界波高に近く、碎波点付近のばらつきによるものと考えられる。一方、後部パラペット上部斜面ケーソン堤では、通常のケーソン堤に対する理論値よりも実測値の方がやや大きくなった。すわわち、本実験では同じ天端高を有する通常のケーソン堤と後部パラペット上部斜面ケーソン堤では、後部パラペット上部斜面堤の方が平均越波流量が若干大きくなった。しかしながら、上部斜面堤で報告されているような越波流量における通常ケーソン堤との大きな差は見られなかった。

図-13は、波高伝達率と平均越波流量の関係を示したものである、この図には通常のケーソン堤に対する高山らによる平均越波流量算定式の理論計算結果と波高伝達率に関しては直立堤に対する合田の算定図による波高伝達率の読み取り値を折れ線でそれぞれ示した。越波流量が大きくなれば、波高伝達率も大きくなるのがわかる。計測ケース数の制約上定量的な評価は難しいが、越波流量が増加するにつれて後部パラペット上部斜面ケーソン堤の方が波高伝達率が大きくなる傾向を示している。このことは、通常のケーソン堤ではケーソン前面の直立部に作用した直後越波水は上方に打ち上げられ、飛沫が分散するのに対し、後部パラペット上部斜面ケーソン堤ではパラペット部まで、越波水が越流状態で伝播す

るため、越流水がパラペットを比較的まとまって越えることによるものと考えられる。

4. 3 換算天端高係数

各種の護岸において平均越波流量を推定する際には、対象としている堤体においてある越波流量が生ずるのに必要な天端高とそれと同じ越波流量となる直立護岸の天端高の比、いわゆる換算天端高係数を実験的に求め、直立護岸の計算結果からより各種護岸の平均越波流量を求める方法が一般的である(高山ら、1982)⁹⁾。そこで、ここでも換算天端高係数について検討した。

図-14は通常ケーソン堤および後部パラペット上部斜面ケーソン堤の無次元越波流量の関係を調べたものである。なお、上述のように換算天端高係数は通常は直立護岸に対する比率として求めるものであるが、ここでは通常ケーソンを基準として検討した。図-12で示したように後部パラペット上部斜面ケーソン堤の方が越波流量は大きくなっている。

図-15は図-14で示した関係をもとに、通常ケーソン堤(直立護岸)の天端高に対する後部パラペット上部斜面ケーソン堤の越波流量と同流量となる通常ケーソンの天端高の関係を示したものである。実験値は45°の線より上にきており、通常ケーソンよりも必要天端高が増加することを示している。この図における両者の比が換算天端高係数となる。換算天端高係数を求めた結果が図-16である。これによれば、本実験の条件の範囲内では換算天端高係数は1.05~1.10の間にあり、後部パラペッ

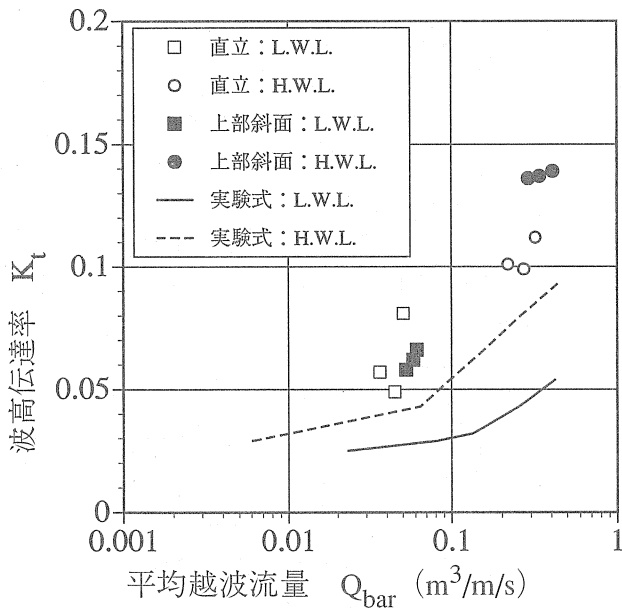


図-13 波高伝達率と平均越波流量の関係

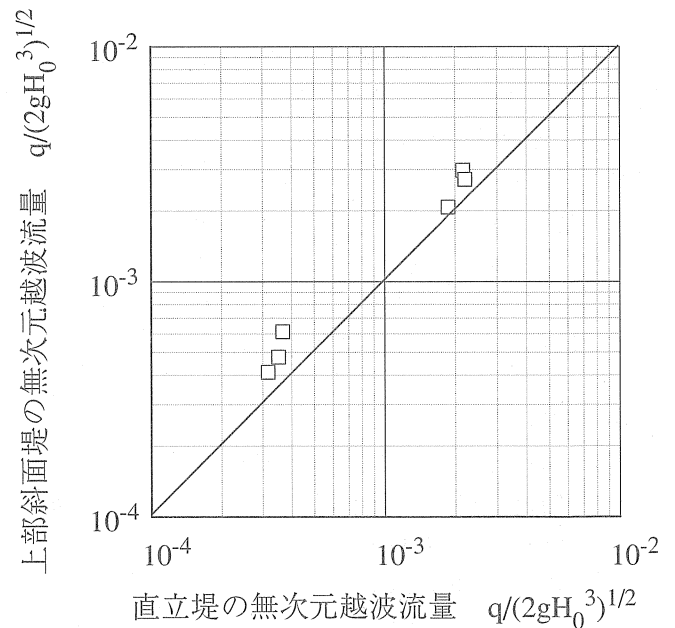


図-14 通常のケーソン堤と後部パラペット上部斜面ケーソン堤との平均越波流量の比較

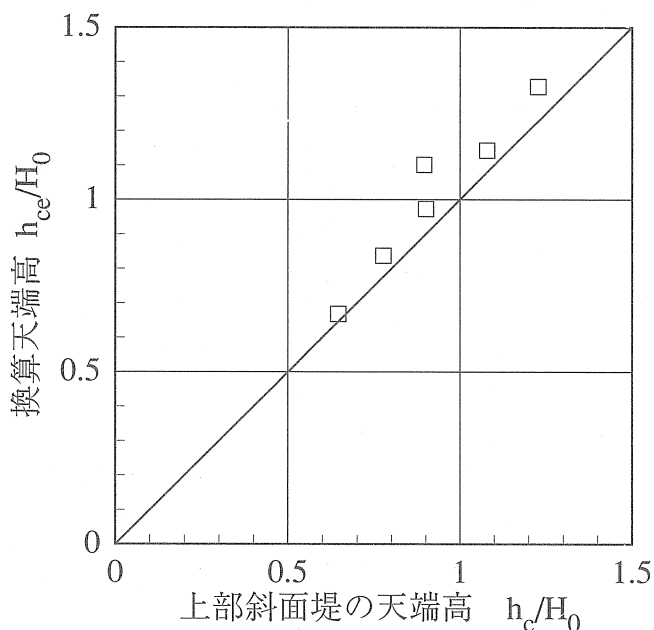


図-15 後部パラペット上部斜面ケーソン堤の平越波流量と等価な越波流量となるための通常ケーソン堤の天端高

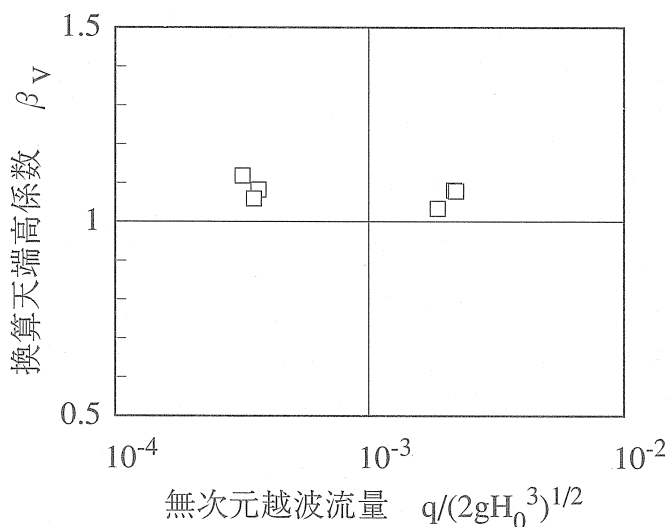


図-16 後部パラペット上部斜面ケーソン堤の換算天端高係数 β_v

ト上部斜面ケーソン堤は直立堤に対して5~10%程度高い天端高を必要とする結果となった。

5. まとめ

非常に厳しい波浪条件下でも滑動安定性に優れた構造物として、後部パラペット上部斜面ケーソン堤に着目し、堤体の安定性および越波特性について詳細に検討した。その結果、本堤体は厳しい波浪条件下でも滑動安定性に優れ、通常のケーソン堤では物理的に建設不可能な地点においても、適用が可能であることがわかった。また、越波・伝達波特性は上部斜面ケーソン堤にみられた波高伝達率が同じ天端高の通常ケーソン堤に対し約2倍の波高伝達率になるという欠点は、パラペットを後部によって解決できた。

設計波力の考え方については、さらに詳細な検討を行って別の機会に発表したいと考えている。

参考文献

- 1) 合田良實 (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。
- 2) 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碎波力係数の提案、海岸工学論文集、第39巻、

pp.676-680。

- 3) 田崎敏・岡部成光・池田浩一・藤田浩二・榊山勉 (1995): 衝撃碎波力低減のための後部パラペット上部斜面堤の開発、海岸工学論文集、第42巻、pp.911-915。
- 4) 森平倫生・国田治 (1979): 斜面壁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。
- 5) 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田隆 (1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験、第30回海岸工学講演会論文集、pp.313-312。
- 6) 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について、海岸工学論文集、第39巻、pp.581-585。
- 7) Goda, Y. (1969): Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.8, No.3, pp.3-18。
- 8) 合田良實・岸良安治・神山豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第14巻、第4号、pp.3-44。
- 9) 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果、港湾技術研究所報告、第21巻、第2号、pp.151-205。