

災害に強い港湾構造物の考察

山 縣 延 文* ・ 西 原 孝 美** ・ 中 山 政 勝***
上 原 幸 生**** ・ 富 安 良 一***** ・ 半 沢 稔*****

港湾等海洋構造物について、設計外力を超える領域での安定性検討の重要性は広く知られてきている。しかし、設計外力を超えた状態での、構造物の挙動を取りまとめたものはほとんど無い。本研究では、構造物の中でも災害復旧費用が高く、被災した際に港内での二次災害等の影響も大きい防波堤に着目し、通常の設計では検討されない設計外力を超えた領域における、各種構造形式の挙動を現設計法と信頼性設計法を用いて比較し、防波堤構造、あるいは水深等の条件によるねばり強さの違いを検討した。また、従来、考慮されていなかった被災パターンについても消波工被覆混成堤を例にとりその検討を行った。

1. はじめに

従来の防波堤は設計波に対してケーソンが滑動、あるいは転倒しないという前提で設計されてきている。しかし、設計条件を上回るような波高の発生の可能性は以前から議論されてきており、災害の発生や、復旧等を考えるときには、こうした設計条件を超える領域での防波堤の安定性能を把握しておく必要性が認識されつつある。例えば、高橋ら (2000) は、性能設計の観点から、様々な波高ランク (確率波高) に対して、直立混成堤の期待滑動量、および消波ブロックの期待被災度に関して個々に検討を行っている。しかし、こうした設計条件を超える領域での防波堤の安定性について、水深、海底勾配、潮位の各条件や、堤体形状の違いをも含めて系統的に検討した研究はほとんどない。

また、防波堤の被災は、来襲波浪に対するケーソンの重量不足に起因して滑動が生じるといった単純な現象ばかりではない。高橋ら (1999) は、防波堤の被災パターンを系統的に整理しており、例えば直立混成堤において、防波堤前面海底の洗掘が引き金となってマウンドの沈下が生じ、更にそれがケーソンの沈下へと進む場合、消波ブロック被覆堤では、消波工が被災 (転落、沈下) し、それに伴って発生する衝撃波力によって本体が被災する場合などがある。しかしながら、このような被災パターンを取り込んだ防波堤の安定性について解析・検討はほとんど行われていない。

本研究は、港湾における代表的構造物である防波堤を対象に、設計条件を上回る波浪条件に対する安定性能の変化を様々な角度から検討することにより、防波堤の“災

害に対するねばり強さ”の考察を行ったものである。

また、被災パターンの取り込みとして、消波工被覆混成堤については、消波工の被災を考慮したケーソンの安定性の検討も行った。

2. 被災事例の解析

2.1 施設別災害復旧費用の割合

図-1 は、近年 (1996 年～1999 年) の港湾各施設における災害復旧費用を、被災構造物集覧データベースから、全体に占める比率として示したものである。図からわかるとおり、防波堤が全体の半数を占めており、次いで、護岸が 20%、岸壁 (物揚場を含む) が 5% の順となっている。防波堤の被災による港内の他の施設への二次災害を考慮した場合には、その比率は更に大きくなる。このように、防波堤は外郭施設として港湾を波浪から護るという重要な構造物であり、しかも災害復旧金額の点でも大きな位置を占めていることから、防波堤について“災害に対するねばり強さ”を検討しておく意義は大きい。このことから本研究では、防波堤に着目した検討を行った。

2.2 被災時の条件

図-2 は、被災構造物集覧データベースから、被災を受けた防波堤について、その被災要因を知る一助として、横軸に設計波高に対する被災時波高 (それぞれ堤体位置での有義波高) の比率を、縦軸に被災時の潮位をとって示したものである。潮位は L.W.L. を 0.0、H.W.L. を 1.0 として被災時の潮位を無次元値として示している。この図から、防波堤の被災は、予想されたとおり設計波高を超える波高の来襲によって起こる比率が 70% 程度と高く、設計波高の 2 倍にも及ぶ波高の来襲もあったことがわかる。潮位についてみると、通常は H.W.L. (あるいは、

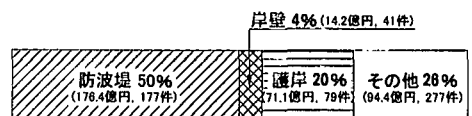


図-1 施設別復旧金額の割合 (1996～1999)

* 正会員 工修 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所所長
** 正会員 同事務所副所長
*** 正会員 国土交通省九州地方整備局博多港湾空港工事事務所工務課長
**** 国土交通省九州地方整備局北九州港湾空港工事事務所工務係長
***** 正会員 (株)日本港湾コンサルタント九州事務所
***** 正会員 工修 (株)テトラ テトラ総合技術研究所

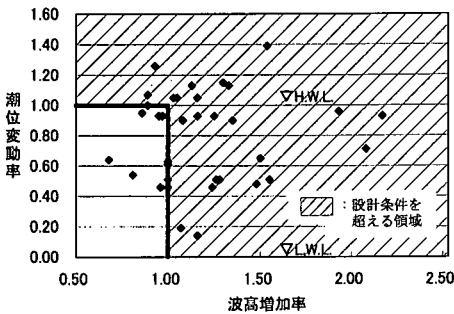


図-2 被災時の波高と潮位の関係

L.W.L.とH.W.L.の間で最も厳しい潮位) に対して設計されているが、それを超える高潮位での被災も25%程度生じていることがわかる。

3. 防波堤の災害に対するねばり強さの検討

3.1 検討対象構造物

災害に対するねばり強さの検討にあたっては、施工実績の多いケーソン式直立混成堤を対象構造とした。ケーソン形状はこれも実績の点からA) 矩形タイプと、近年開発された新形式構造のひとつであるB) 上部斜面堤(細山田ら, 1994) を検討対象とした。また、矩形ケーソンおよび、上部斜面堤それぞれについて、後述する波浪条件に対して①砕波領域、②重複波領域の2つの水深(現地盤水深)条件を設定した。

具体的な断面設定は、以下のように行った。すなわち、設計波(50年確率波)に対し、従来の安全率を用いた手法で防波堤の諸元を決定した。その際、滑動安全率は $F_s \geq 1.2$ 、転倒安全率は $F_t \geq 1.2$ 、端支圧は $p \leq 700 \text{ kN/m}^2$ を満足することを条件とし、必要に応じて摩擦増大マット($\mu=0.8$)を用いて検討した。それ以外の条件、例えば、偏心傾斜荷重等については考慮していない。

また、天端高は、設計高潮位(H.W.L.+2.50 m)上、矩形ケーソンでは有義波高の0.6倍、上部斜面堤では有義波高の1.0倍とし、海底勾配は1/50とした。

以上の条件により設定された検討対象断面を図-3に示す。A-1(矩形ケーソン)、B-1(上部斜面堤)はそれぞれ砕波領域に対応する断面(現地盤水深:-10m)、A-2、B-2は同様に重複波領域に対応する断面(現地盤水深:-25m)である。

また、後述するように重複波領域は、消波工被覆混成堤についても検討を行っているが、断面設定の手法は直立堤の場合と同様である。

3.2 検討方法

a) 検討手法

以上で設定された個々の断面について、設計条件を超

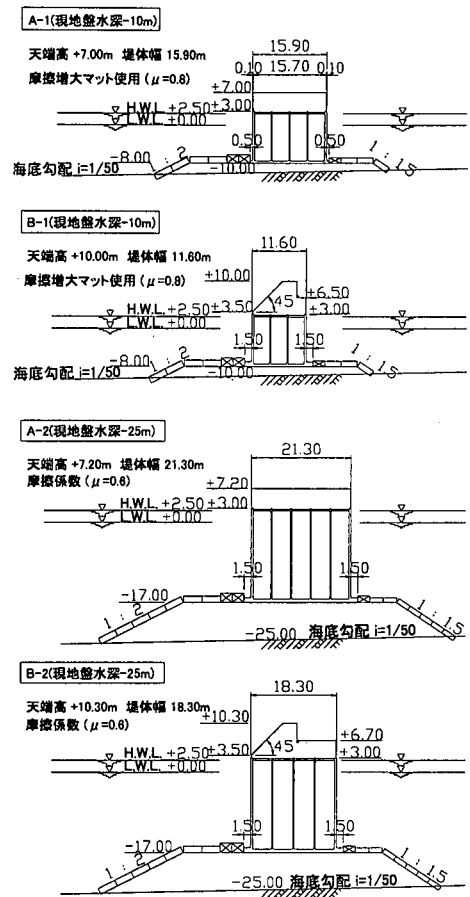


図-3 検討対象断面図

える波浪(後述)に対して、

① 今回の断面設定に用いた、従来型の設計用パラメータである滑動安全率 F_s 、転倒安全率 F_t 、端支圧 p の値の変化。

② ケーソンの期待滑動量 S の変化。

の大きく2つの観点から安定性能を詳細に検討した。

ケーソンの期待滑動量 S の算定にあたっては、下迫ら(1998, 1997)の滑動モデルを利用した。また、期待滑動量としては、耐用期間内での累積期待滑動量ではなく、個々の波高ランクの一時化(継続時間: 2時間)による期待滑動量を計算した。

消波工被覆混成堤においては、消波ブロックの被災による波力増大の効果を次の方法で考慮に入れた。すなわち、消波ブロックの被災度を高橋ら(1998)の方法に従ってケーソンの滑動量と同様に一時化による期待被災度として計算し、それを消波工天端の沈下に変換する。

次に、消波工が沈下したことによる衝撃波圧の発生を考慮した高橋ら(2000)の波圧モデルを適用し直立堤と同様に上記の①および②の検討を行った。

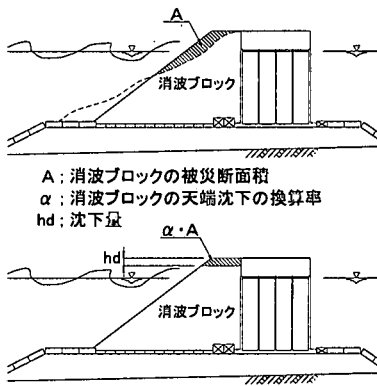


図-4 消波工天端沈下量の換算方法

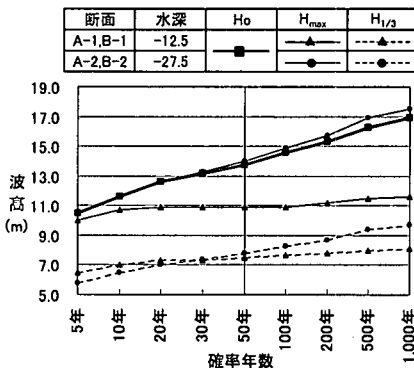


図-5 確率年による波高の変化

図-4は、消波工の被災を天端高の沈下に換算する概念図を示す。よく知られているように消波工は静水面を中心に被災(動揺・転落)が生じ始め、それが徐々に進行していく。従って、消波ブロックの被災が直ちに消波工天端の沈下に結びつくわけではなく、また、消波工の被災の程度と波力減殺効果低減との関係も明らかではない。そこで、簡略化するために被災のある部分を天端部分に換算し、天端高の沈下を見積もるものとした。

ケーソンの期待滑動量、および消波ブロックの期待被災度 N_0 の計算では、モンテカルロ法(星谷ら, 1986)を用いているが、その試行回数は5000回とした。

b) 波浪条件

本検討に用いた波浪条件を沖波、および先に設定した2つの水深条件に対する堤体位置での有義波高、および最大波高について、図-5に示す。今回のモデル条件では、沖波は50年確率波で13.8m(周期:14.1s)、1,000年確率波で16.9m(周期:15.6s)である。

重複波領域(水深:27.5m)では沖波波高の増大に追従する形で波高が増大するが、砕波領域(水深:12.5m)では水深により波高が制限されるため波高の増大の程度

は小さい。ケーソンの滑動に直接的な影響のある最大波高についてみると、重複波領域では、1,000年で50年の1.25倍に増加するのに対して、砕波領域では1.06倍となっている。

4. 検討結果および考察

4.1 直立混成堤

図-6は、直立堤に関して滑動安全率 F_s の変化をみたものである。図中には50年確率波における値を1.00として、各再現期間での値の比率も併せて示している。これは、断面設定でのクリティカルな安全率が、矩形ケーソンでは滑動安全率 F_s 、上部斜面堤では端趾圧力であり、結果として断面設定時の F_s の初期値に差があったため、比率としての比較を意図したものである。

図から明らかなように、水深についてみると重複波領域の方が砕波領域に比べて安全率の低減が大きいことがわかる。例えば、矩形ケーソンの重複波領域では再現期間200年で F_s が1.00となるのに対し、砕波領域では1,000年確率波に対しても F_s は1.06である。これは、先に波浪条件でもみたとおり、砕波領域では沖波が大きくなっても堤体位置波高は水深に規定されるのに対し、重複波領域では、沖波の増大がそのまま堤体位置波高の増大となって現れ、実際に F_s の変化にも影響しているためである。また、矩形ケーソンに比べて上部斜面堤の方が F_s の減少程度は小さい。

図-7は、ケーソンの期待滑動量 S について比較したものである。 F_s と呼応しており水深条件では重複波領域の方が砕波領域に比べて滑動量は極端に大きい。これは、下迫ら(1998, 1997)が指摘するように、同じ安全率であっても重複波では砕波に比べて1波毎の滑動量が大きいことが影響しているためである。また、滑動量についても矩形ケーソンに比べ上部斜面堤の方が期待滑動量は小さい。例えば、重複波領域で同程度の滑動安全率で見ると、矩形ケーソンの200年確率波($F_s=1.00$)で $S=$

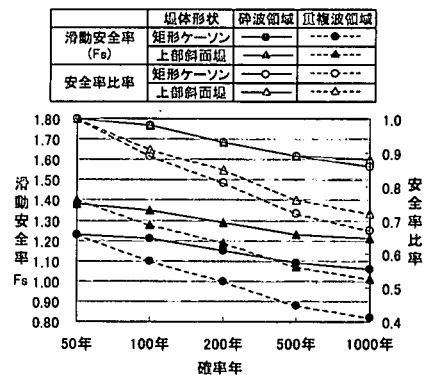
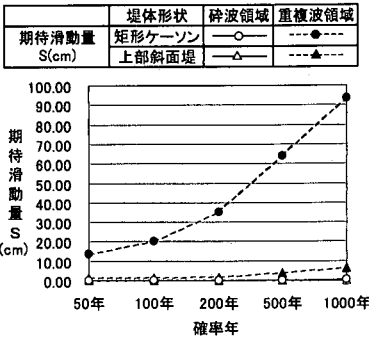


図-6 滑動安全率の変化(直立混成堤)



図一七 期待滑動量の変化（直立混成堤）

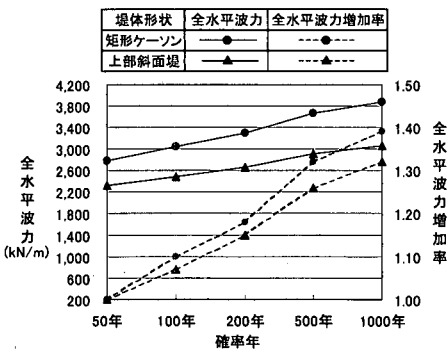
35.16 cmであるのに対し、上部斜面堤では、1,000 年確率波 ($F_s=1.01$) に対し $S=6.58$ cm と約 1/5 になる。

以上より滑動安全率、および期待滑動量ともに、上部斜面堤の方が有利であることがわかる。これは、波高の増大による水平波力の増大はあるものの、鉛直下向きの波力成分も大きくなるという上部斜面堤の特徴が現れたものである。

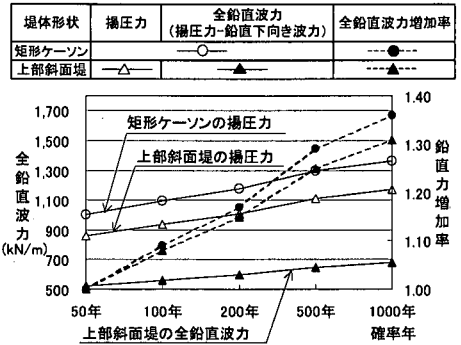
図一八～図一十は、矩形ケーソンと上部斜面堤に作用する波力の変化を示したものである。実際、水平波力・鉛直波力・滑動合成波力の全てにおいて、矩形ケーソンに比べ上部斜面堤の増加率は少なく、波高増大に対して有利な構造特性を示している。特に鉛直波力に対しては形状効果が大きく影響しており、堤体底面に作用する上向きの揚圧力に対して 30～40% 程度の下向きの波力が斜面部を介して作用しており、これが上部斜面堤の大きな特徴であることが確認された。

4.2 消波ブロック被覆堤

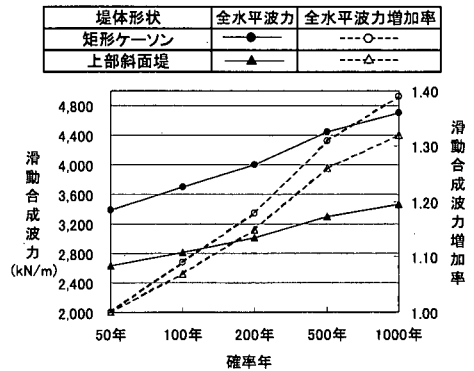
図一十一は、消波ブロック被覆堤（消波工設置による波圧低減率は 0.8 程度としている）の検討の一例として、重複波領域に対する結果を消波工天端の沈下換算率 $\alpha=0.2$ として示したものである。図中には、消波工の沈下を考慮しない場合と考慮した場合を比較している。



図一八 波高増大と水平波力の変化（直立混成堤）



図一九 波高増大と鉛直波力の変化（直立混成堤）

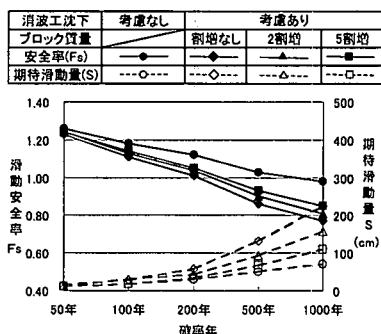


図一十 波高増大と滑動合成波力の変化（直立混成堤）

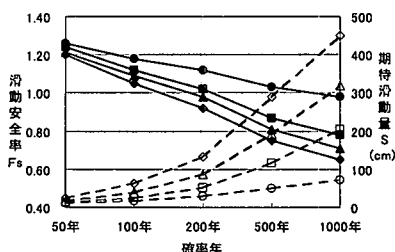
消波工の沈下を考慮しない場合は、波高増大に伴う波力増大に従って滑動安全率 F_s は低下し、期待滑動量 S は増加していく。前述した直立混成堤の矩形ケーソンの場合（図一六、七）と比べると消波被覆堤の方が F_s の低減程度、 S の大きさともにわずかに小さいことがわかる。これは、消波工の波力減殺効果により波力の増大が軽減されるためと考えられる。

しかし、消波工の沈下を考慮した場合には、滑動安全率の低減、および期待滑動量も大きくなっている。これは、消波工沈下による波力の増大を的確に反映できた結果である。また、図中には消波ブロックの質量を計算上の必要質量から割増しした場合の結果も示している。ブロック質量を 2 割増しすると期待滑動量は割増ししない場合の 2/3 程度、5 割増しすると 1/2 程度となることがわかる。

図一十二は、参考までに消波工の沈下が極端に大きなケースを想定して、沈下換算率を $\alpha=0.5$ とした場合の結果を示す。 $\alpha=0.2$ に比べて期待滑動量は当然大きくなり、約 2 倍となる。しかしながら、ブロック質量を 5 割増しすることで $\alpha=0.2$ の質量割増なしの場合と同程度の期待滑動量となることがわかる。消波工天端の沈下の程度は未だ明確ではなく、今後の研究を待つ必要がある。



図一11 滑動安全率と期待滑動量の変化 (消波ブロック被覆堤 $\alpha=0.2$)



図一12 滑動安全率と期待滑動量の変化 (消波ブロック被覆堤 $\alpha=0.5$)

以前から消波ブロックの質量割増の効果については、ブロック自体の安定性向上に効果があることが指摘されていた (例えば、高橋ら、2000) が、以上のようにケーソンの滑動に対しても消波ブロックの効果を定量的に検討することが可能となった。

5. おわりに

設計波高を超える領域での安全率の低下の度合いはこれまでほとんど把握されていなかったが、今回の研究によって次のことが明らかになった。

- ① 同一構造タイプであれば、重複波領域では碎波領域に比べ、安全率の低下が大きいことがわかった。
- ② 矩形ケーソンに比べ、上部斜面堤が、災害に対して「ねばり強い」という傾向が示された。
- ③ 消波ブロック被覆堤については、消波工の天端沈下 (期待被災度 N_0) を考慮した場合、消波ブロックのランクアップ (現状でも経済比較から実際に行われている) が、ケーソンの安定性に大きく寄与することが定量的に示された。

このような解析方法により、構造タイプ毎の波高レベルに対する滑動安全率 F_s あるいは、期待滑動量 S といったパラメータによる安全性能の評価が可能となる。

新規構造物の設計では、高橋ら (2000) が提案する設計レベルと構造物の重要度に応じた設計が可能となる。

また、既存施設についても維持管理の面から、外力レベルと安全率・期待滑動量の関係を定量的に把握でき、例えば、被災を未然に防ぐための補強の必要性を判断することが可能となる。ただし、今回検討対象外とした偏心傾斜荷重による被災等の様々な観点からも検討が必要であると考えられる。

また、矩形ケーソンに比べて、上部斜面堤は歴史が浅いこともあり、こういう新しい構造物については多くのデータを蓄積するとともに、海底勾配や、潮位の変化による影響等も考慮して、より総合的な観点からの「ねばり強さの検討」を行っていきたい。

最後に、本研究実施にあたり、京都大学防災研究所・高山知司教授、独立行政法人港湾空港技術研究所・高橋重雄海洋・水工部長、国土交通省国土技術政策総合研究所・山本修司港湾研究部長をはじめ、「災害に強い構造物調査委員会」の関係各位から貴重なご意見、ご指導を賜った。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 下迫健一郎・高橋重雄 (1997): モンテカルロ法を用いた混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 831-835.
- 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利 (1998): 変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案—期待滑動量を用いた信頼性設計法—, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 801-805.
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・鎌山貞雄・石貫国朗 (2000): 台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技術資料, No. 973, 50 p.
- 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二郎・五明美智男 (1999): ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 816-820.
- 高橋重雄・下迫健一郎・半沢 稔・杉浦 淳 (2000): 防波堤の性能照査と性能設計—海域施設の新しい耐波設計—, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 415-420.
- 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利 (1998): 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第1報—, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第1号, pp. 3-32.
- 星谷 勝・石井 清 (1986): 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 208 p.
- 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.