消波ブロック被覆堤の被災事例に基づく滑動要因の検討

Factors of Caisson Sliding Failures Affected by Damage of Armor Concrete Blocks

高山知司1• 辻尾大樹2• 安田誠宏3

Tomotsuka TAKAYAMA, Daiki TSUJIO and Tomohiro YASUDA

Recently, caisson sliding failures affected by large waves have occurred. The damage of the breakwaters in Susami port due to Typhoon 0423 is a typical sliding failure and the caissons were tilted down in the rear of rubble mound. The damage at Fushiki-Toyama port on February 2008 is also another typical sliding failure and concrete blocks were settled down. The present paper describes the factors of their caisson sliding failures affected by damage of armor concrete blocks. It concludes that the caisson sliding failure at Susami port was caused by insufficient weight of the caisson. Even if heavier concrete blocks are placed as armors, the caisson would be slid. The numerical simulation suggests that the caisson sliding failure at Fushiki-Toyama port was caused by the combination of three factors of large wave height, long wave period and duration time.

1. はじめに

近年,地球温暖化に伴う気候変動による海面上昇や台 風の巨大化など,沿岸域における被災リスクが高まって いる.2004年には,史上最多の10個の台風が日本に上陸 した.なかでも,台風0423号の来襲に伴った高波は,高 知県室戸沖で国内の観測史上最高の波高13.55mが観測 され,多くの地域に被害をもたらした.和歌山県すさみ 町の周参見漁港においても,台風0423号来襲に伴い,消 波ブロック被覆堤の滑動・転倒被害が発生した.

また,2008年2月23日から24日にかけて発達した低気 圧の影響によって,北陸沿岸において高波や暴風による 被害が相次いで発生した.特に,伏木富山港においては, 通常より長い周期を持つうねり性波浪の来襲によって, 消波ブロック被覆堤の滑動被害が発生した.

一方,防波堤の滑動量解析については,下迫・高橋 (1994)が,期待滑動量による設計法の確立を目的とし て,混成防波堤の滑動量算定手法を検討した.また,谷 本ら(1996)は、ケーソンに作用する波力の時系列変化 モデルを作成し,滑動量算定モデルを構築した.消波ブ ロック被覆堤の滑動量解析に関しては,下迫ら(2006)が, 水理実験の結果に基づいて,消波ブロック被覆堤に作用 する波力の時系列変化モデルを求め,滑動量を考慮した 設計法を消波ブロック被覆堤に拡張させた.下迫らは, 防波堤の供用期間中に消波ブロックが被災しないものと して滑動量を算出しているが,防波堤が滑動被災する場 合には,消波ブロックも同時に被災していることがほと んどである.そこで著者ら(2007)は,高橋ら(1998)の実 験式から供用期間中における消波ブロックの被災を算出 し,被災した消波ブロックの変状によって生じる波力の 増大を考慮して,消波ブロック被覆堤の期待滑動量を算 定する手法を提案した.

本研究では、周参見漁港および伏木富山港で発生した 防波堤の被災事例を対象に、消波ブロック被覆堤の変状 による波力増大を考慮した滑動量算定手法を用いて、消 波ブロック被覆堤の滑動要因を検討している.

2. 滑動量算定法の概要

著者ら(2007)のモデルでは、1回の異常波浪来襲期間 中の消波ブロックおよびケーソンの被災は考慮していな かったが、本研究では、異常波浪の作用時間をいくつか の期間に分割し、その1期間におけるケーソンの滑動量 と消波ブロックの被災度(長さ1m当たりの移動個数) を算出し、次期間の滑動量計算から、ブロック天端の沈 下による波力増大を考慮することとした。

本研究で用いた滑動量算定手法の計算フローを図-1に 示す.まず,被災時に堤体に作用した波浪諸元(波高, 周期)および異常波浪の作用時間,作用時間を分割する 期間数を設定する.次に,レーリー分布から1波1波の 波浪を抽出し,それぞれの波に対する堤体の滑動量を算 出し,分割した小期間中の波の数だけ繰返し,その期間 中のケーソンの滑動量を算出する.小期間中に滑動した ケーソンと消波ブロックの間に生じた空隙によって,消 波ブロックが変状すると仮定し,ケーソンの滑動による 消波ブロックの沈下量を算出する.

次に,分割した小期間中における有義波高と波の数か ら,高橋ら(1998)の式を用いて消波ブロックの被災度 (長さ1m当たりの移動個数)を算出する.この時,高橋 らと同様に累積被災度を算出する.小期間中の消波ブロッ クの被災度から,移動した消波ブロックの体積(空隙も 含む)に対応した量だけ消波ブロックの天端が沈下した として,その沈下量を算出する.

¹ フェロー 工博 (財)沿岸技術研究センター 理事 2 正会員 修(工)パシフィックコンサルタンツ(株)

³ 正会員 博(工)京都大学助教 防災研究所



図-1 計算フロー

そして、ケーソンの滑動と消波ブロックの移動に伴う沈 下量を足して、1期間中の消波ブロックの沈下量を算出 する.また、算出したブロックの沈下量を前の期間まで の沈下量に加えて累積沈下量を求め、次の小期間におけ る消波ブロックの形状を定める.このとき、累積沈下量 に応じて波力を増大させている.これを小期間の数だけ 繰返し、異常波浪期間中のケーソンの滑動量を求める.

3. 周参見漁港防波堤の滑動要因の検討

(1) 滑動被災の概要

金ら(2005)によると、台風0423号の来襲によって、周 参見漁港では、突堤や防波堤が計90mにわたって傾くな ど、4箇所で大きな被害を受けた。特に、西防波堤では、 先端部が高波によって、6~10m滑動し、その基部では、 激しい越波によって表層土が大きく剥ぎ取られた。また、 西防波堤が被災したことによって、港内に大きな波浪が 進入し、背後の防波堤が完全に崩壊した。西防波堤の断 面図は図-2に示すとおりであり、設計波高は3.8m、先 端部の隅角部では4.9mであった。

金らは、被災時の波浪を追算し、その追算沖波波浪を 入力条件として、エネルギー平衡方程式による波浪変形 計算を行い、防波堤前面での被災時の波高を推定した. 推定結果によると、被災した西防波堤の先端部では、6.0 m~6.2mであり、設計波より1m程度大きかった.また、 金らは、消波ブロックの影響を考慮せず、ケーソンの傾



図-2 周参見漁港西防波堤断面図(単位:m)

項目	値
波高	4.0~7.2m (被災時推算波高:6~6.2m)
周期	16s
水深	7m
堤体幅	9.0m
天端高	5.5m
法面勾配	1:4/3
ブロック種別	12.5t,16t(設置は15t)
継続時間	2時間

表-1 計算条件(周参見漁港)

斜による滑動抵抗力を考慮して,ケーソンの滑動解析を 行い,滑動被災状況を再現した.

(2) 滑動要因の検討

周参見漁港西防波堤の滑動状況を再現するために、金 らの推定した被災時の堤前波浪を入力条件として,表-1 に示す計算条件の下,ケーソンの滑動量を本モデルで算 出した.算出結果を図-3に示す.現地に設置していた消 波ブロックは、15tの四方錐ブロックであるが、このブ ロックの安定性については経験式が提案されていない. そこで、15tの四方錐ブロックに対応するものとして、 本モデル(著者ら, 2006および著者ら, 2007)で計算可 能なブロックとしてテトラポッドを対象にし、12.5tと 16tのブロックを用いて, それぞれに対するケーソンの 滑動量を算出した. それぞれ, 図中の白丸と黒丸で示し ている.また,消波ブロックが被災しにくい40tや80tの ブロックの場合や被覆ブロックがない場合、ブロックは 被災しないがケーソンの滑動でブロックが沈下する条件 (図中の×)や沈下しない条件(図中の※)についても計算 している.

図-3中の12.5tと16tのテトラポッドによる被覆堤では 被災時と同程度の滑動量(6~10m)を示す波高としては 5.6~5.8mとなっている。被災時の滑動量に対応する波 高は金らのもの(6~6.2m)よりやや小さくなっているが, これは、本モデルでは消波ブロック被覆堤の変状をすべ てブロック天端の低下とみなしているために、ケーソン に働く波力を大きく見積もっていることに因っていると 考えられる.

次に,滑動要因を検討するために,設置していた15t のブロックよりも重いブロック(40t型と80t型)を用いた 場合について,図-3からケーソンの滑動量は16tブロッ



図-3 来襲波浪と滑動量の関係(周参見漁港)

クで被覆した場合より2~3m低減することができるが, 5.6~5.8mの波高に対しては、5m以上の滑動が発生して いる.また,ブロックは被災しないが,ケーソンの滑動 に伴ってブロックが沈下する場合であっても、5~8m程 度滑動しており,ブロックをいくら大きくしても,被災 したときのような大きな波浪が作用する場合には,大規 模な滑動破壊が発生することがわかる.このことから, 被災時のような大波浪に対しては,被覆ブロックによっ て被災を防ぐことはできず,ケーソン自体を大きく(重 く)しなくてはならないことがわかる.つまり,周参見 漁港西防波堤の被災要因は,来襲波浪の大きさに比して 堤体本体の重量が軽いことに起因した滑動破壊であるこ とがわかった.

4. 伏木富山港防波堤の滑動要因の検討

(1) 滑動被災の概要

2008年2月23日から24日にかけて発達した低気圧の影響によって,富山湾沿岸でも漁港・港湾施設に甚大な被害が生じた.特に伏木富山港においては,伏木地区北防波堤が写真-1に示すように150m以上にわたり,堤体の滑動,消波工の沈下が発生し,堤体本体の滑動は最大で12mにも及んだ.

富山湾沿岸に被害をもたらした波浪は,通常より長い 周期を持つうねり性波浪であり,地元で「寄り回り波」 と呼ばれているものである.この寄り回り波は,日本海 北部の暴風域で発生し成長した波浪が長い距離を伝播し てうねりとなって富山湾へ到達するものであることがわ かってきている.伏木富山に設置されているナウファス 海象計では,2008年2月24日14時に最大有義波高4.24m, 周期14.4sを観測している.

(2) 来襲波浪の推定

間瀬ら(1999)による波浪変形計算モデルを用いて,防 波堤が滑動被災を受けた伏木富山港周辺の波浪変形計算 を行った.計算格子間隔は10mとし,北防波堤の反射率 は0.5とした.波向きはNNEとNEの2ケースで計算した.



写真-1 伏木富山港北防波堤の滑動被災状況(国土交通省ほか,2008より抜粋)







図-5 エネルギー平衡方程式による堤前波浪の算定結果

図-4に伏木富山港周辺の深浅図を示す.伏木富山港の東 側は「あいがめ」と呼ばれる海底谷が海岸近くまで迫っ た地形となっている.伏木富山のナウファス観測値(被 災時の代表波浪:有義波高4.2m,周期14s)に整合するよ うに,エネルギー平衡方程式による波浪変形計算を行い, 伏木富山港周辺の波浪変形計算結果を図-5に示す.あい がめで屈折した波浪が,西側の伏木富山港および東側の 奈呉の浦に収斂している様子が再現できた.滑動被災し た北防波堤前面の波浪を再現計算した結果,波浪が集中 しているところで Hu=5.0~5.5mであった.

(3) 滑動要因の検討

伏木富山港伏木地区北防波堤の滑動状況を再現するために、(2)で求めた堤前波浪を入力条件として、表-2に示す条件の下、ケーソンの滑動量を算定した.解析対象としては、滑動が最も大きかったB区間の防波堤とし、断面図を図-6に示す.B区間は、16tのホール6ブロックで被覆された消波工被覆混成堤であるが、テトラポッド16tとほぼ同等と見なして計算を行った.

伏木富山のナウファス観測データでは、約4mの波高 が12時間程度継続して来襲していたため、継続時間を2 ~12時間まで変化させて計算を行った結果を図-7に示す. 図から、4mの波高が12時間継続しても、堤体はほとん ど滑動しないが、5~5.5mの波高が8~12時間来襲した 場合、ケーソンが1~11m程度滑動しており、本モデル によって滑動被災状況(1~12m)が概ね再現できた.

消波ブロックの被災による影響を検討するために,設置していた16tブロックよりも重いブロック(20t, 25t, 32 t)を用いた場合について,ケーソンの滑動量を算定した 結果を図-8に示す.消波ブロックの被災は考慮しないが, ケーソンの滑動に伴ったブロックの沈下は考慮する場合 についてもケーソンの滑動量を算出し,薄墨の記号で示 している.図から,32tブロックを用いた場合,16tブロッ クで被覆した場合に比べて,滑動量は波高5mでは2m程 度,波高5.5mでは4m程度,12時間の波浪継続後におい て低減することがわかった.しかし,5.5mの波高が12 時間継続すると、ブロックが被災しないとした場合でも 5m程度滑動することがわかった.

また,既往最大波高を記録した台風0423号時(有義波高6.53m,周期8.4s,2時間継続)を入力条件として,ケー ソンの滑動量,ブロックの沈下量,ブロックの被災度を 算出した結果を図-9に示す.今回の被災した波浪(有義 波高4.2m,周期14s,12時間継続)と比較すると,台風 0423号時の方が波高は2m以上大きいが,ほとんど滑動 していないことがわかる.一方,ブロックの被災度について比較すると,今回の被災時の継続時間が長いため, 被災度がやや大きくなっているが,1~2個/m程度であ まり変わらないことがわかる.ブロックの沈下量を比較





表-2 計算条件(伏木富山港)

項目	値
波高	4.0~5.5m (被災時推算波高:5~5.5m)
周期	14s
水深	11.5m
堤体幅	12m
天端高	4.0m
法面勾配	1:1.5
ブロック種別	テトラポッド, 16t
継続時間	2~12時間(2時間毎)



図-8 ブロック質量と滑動量の関係(伏木富山港)

すると、今回の被災の方が大きい. このことはブロック の被災によるブロック沈下よりも、ケーソンの滑動に伴 うブロック沈下の方が大きいことを示している. 今回の



図-9 2008年2月被災時とT0423時の滑動量、ブロック沈下量 ブロック被災度との比較(伏木富山港)

滑動要因は,来襲した波浪の波高は5~5.5m程度で既往 最大波高に比べると小さいが,周期が14s程度と長く, また,12時間程度,継続して来襲したことに起因してい る.周期の長い波浪が来襲して,ケーソンに大きな波力 が作用し,ケーソンが滑動したことに伴い,ブロックが 変状し,さらにケーソンに作用する波力が増大したと考 えられる.来襲波浪の波高だけでなく,周期や継続時間 の違いで滑動量が大きく変わることがわかった.

5. おわりに

本研究によって得られた主要な知見を以下にまとめる.

- 1) 消波ブロック被覆堤の滑動被災事例を対象に,著者 ら(2007)の滑動量算定手法を改良して被災状況を再現 し,その適用性を確認した.
- 2) 台風0423号来襲時の周参見漁港防波堤の滑動要因は、 来襲波浪に対して堤体質量が小さ過ぎるためであり、 ブロック質量を増大させても大きな滑動が発生することがわかった。
- 3) 2008年2月冬季風浪時の伏木富山港防波堤の滑動要 因は,複雑な地形の影響で波高が5.0~5.5m程度に増 大した周期14sのうねり性波浪が約12時間継続して来

襲したためである.波高だけでなく,周期や波浪の継 続時間も滑動要因に重要であることがわかった.

現在の防波堤設計法では、波浪の継続時間については、 考慮されておらず、今後は、防波堤設計時に波浪の継続 時間の影響を取り入れる必要があると考える。例えば、 著者ら(2007)のような期待滑動量による設計法に継続時 間を変化させることが考えられる。

最後に,被災防波堤の情報については国土交通省北陸 地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所から提供してい ただいた。また、波浪変形計算に用いた富山湾の水深デー タは,(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 波浪研 究チームからご提供いただいた.ここに謝意を表します.

参考文献

- 金 泰民・安田誠宏・間瀬 肇・高山知司(2005):台風0423号 による和歌山県すさみ町における防波堤の滑動被災解析, 海岸工学論文集,第52巻, pp.791-795.
- 国土交通省北陸地方整備局伏木富山港湾事務所・富山県(2008): 富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会, http://www.pa.hrr.mlit.go.jp/uneriiinkai/uneriHP.htm
- 下迫健一郎・高橋重雄(1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算 法,海岸工学論文集,第41巻, pp.756-760.
- 下迫健一郎・大嵜菜々子・中野史丈(2006):滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法,港空研報告, No. 45, 第3号, pp. 1-20.
- 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,港研報告,第37巻,第1号, pp. 3-32.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏(2006):ライフサイクルコスト を考慮した護岸被覆材の最適設計,海岸工学論文集,第53 巻, pp. 856-860.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2007): 消波ブロック被覆堤の 変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集,第54巻, pp.756-760.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭(1996): 混成堤直立部の滑動時 の流体抵抗力と滑動量算定モデル,海岸工学論文集,第43 巻, pp.846-850.
- 間瀬 肇・高山知司・国富將嗣・三島豊秋(1999): 波の回折を 考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.628, II-48, pp.177-187.