

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

金 泰民*・安田誠宏**・間瀬 肇***・高山知司****

台風0423号によって日本各地で起こった高波災害のうち、和歌山県すさみ町周参見漁港西防波堤の被災を調査した。沖波波浪の追算、浅海波浪の推算計算による防波堤前面での波高分布、防波堤の滑動量を解析した。Kim・Takayama (2004) の滑動量算定手法を用いて滑動量を求め、実測値と比較してその有用性を検討した。ケーソンの傾き (tilting) によってケーソン後趾に生じる滑動抵抗力を考慮することにより、周参見漁港で生じた防波堤の被災状況を再現し、本解析手法の有用性を確認した。

1. はじめに

下迫ら (1998) が期待滑動量に基づく防波堤の設計法 (Level3) を提唱して以来、海岸施設の信頼性設計法に関して様々な研究がなされている (例えば、池末ら, 1999; Goda・Takagi, 2000; Hanzawa ら, 2003)。期待滑動量による設計法は、確率論による信頼性をベースとしており、さらに防波堤の変形を考慮している点で従来設計法より合理的なものであるといえる。しかしながら、これまでの研究では、ケーソンの滑動量を求める際に、モーメント作用力によってケーソンが傾き振動する現象およびその影響はまったく考慮されていなかった。そこで、Kim・Takayama (2004) は、ケーソンの傾き (tilting) によって生じる滑動抵抗力を考慮した新たな滑動量を求める手法を提案している。

本研究の目的は、和歌山県すさみ町において台風0423号によって被害を受けた防波堤の被災を対象として、Kim・Takayama (2003, 2004) の滑動量算定手法を用いて滑動量を算し、実測値と比較してその有用性を検討するものである。

2. 台風0423号による高波被害

台風0423号による高波では、高知県室戸市室戸岬町菜生海岸の防潮堤のパラベットが崩壊し、3人が死亡した。高知県室戸市沖では、被災時間帯に国内の観測史上最高の波高13.55mが観測された。同県土佐清水市足摺岬の伊佐漁港では、台風に備えて漁船を移動させていた男性5人が高波にさらわれ1人が死亡した。また、同県大月町の桧ノ浦漁港では、2人が漁船の係留中に波にさらわれ1名が行方不明となった。

和歌山県においては、台風0423号の高波による漁港への被害が、県全体の4分の1に当たる25港45カ所で生じ

た。漁船も30隻以上が被災し、漁港施設は突堤や防波堤が倒壊するなど甚大な被害を受けた。田辺市では芳養漁港6カ所、田辺漁港2カ所、内ノ浦漁港で、護岸の消波ブロックが沈んだり突堤の一部が壊れたりした。周参見漁港は、突堤や防波堤が計90mにわたって傾くなど4カ所で大きな被害を受けた。

3. すさみ町における被災状況

図-1は、周参見漁港における防波堤の平面配置を示したものである。西防波堤では先端部が高波によって滑動した。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、西防波堤の先端部が被災したことにより、港内に大きな波浪が進入し、背後の平松防波堤が完全に崩壊した。

写真-1に、平松防波堤側からみた被災の様子を示す。また、写真-2には、西防波堤先端部のケーソンの滑動状況を示す。西防波堤の設計波高は3.8mであり、先端部は隅角部における波高増大が考慮されて4.9mであった。滑動量は約6~10mであった。

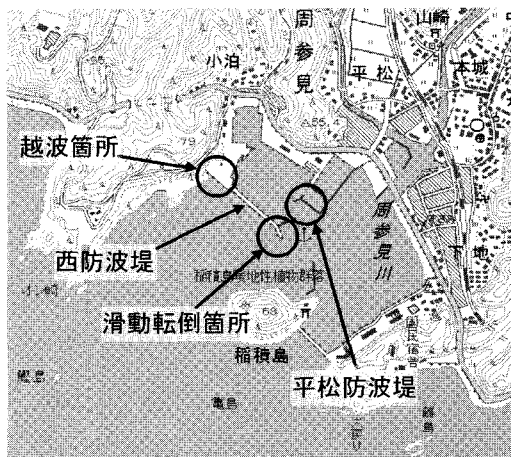


図-1 周参見漁港の平面図

* 正会員 博(工) 大韓民国金北大学校工科大学研究員
** 正会員 博(工) 京都大学助手防災研究所
*** 正会員 工博 京都大学助教授防災研究所
**** フェロー 工博 京都大学教授防災研究所

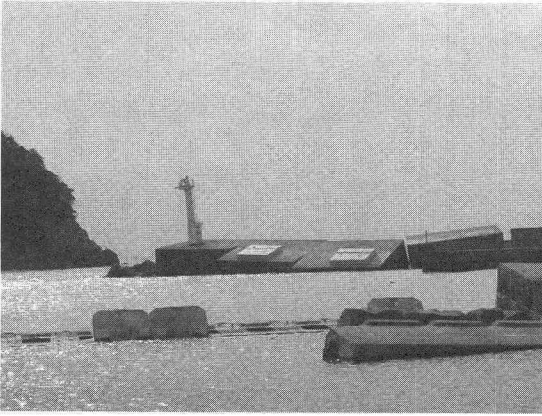


写真-1 防波堤の被災状況 (奥：西防波堤, 手前：平松防波堤)

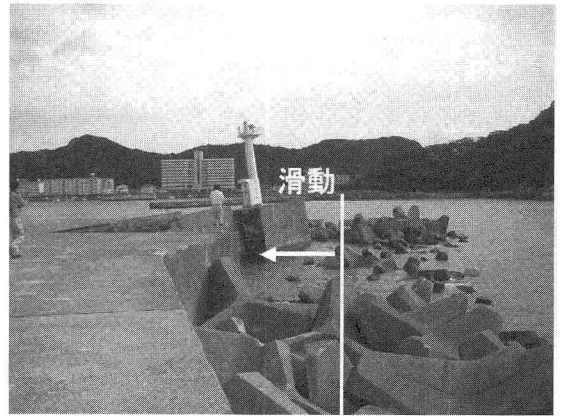


写真-2 西防波堤先端部の滑動状況

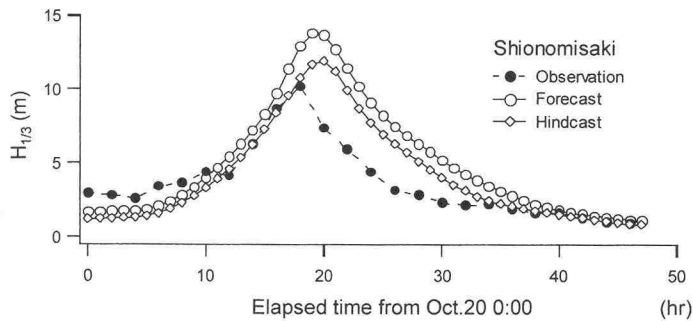


図-2 潮岬における波浪推算および追算結果

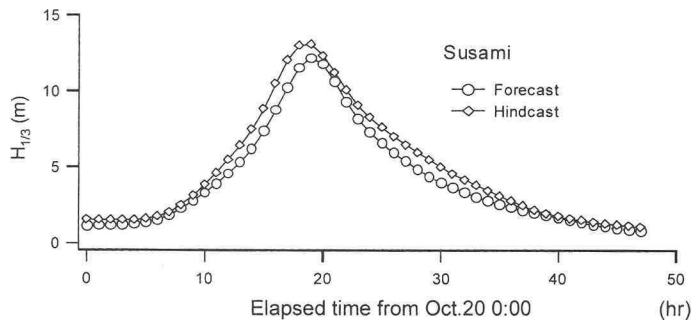


図-3 すさみにおける波浪推算および追算結果

4. 波浪推算

気象モデル GFS (Global Forecasting System) と波浪モデル SWAN (Simulating Waves Nearshore) を用いて、すさみ沖合における波浪を推算した (間瀬ら, 2005). GFS は, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) によって構築された全球気象予報モデルであり, 気象予測データが 1 日 4 回, 経度・緯度方向に 1 度間隔で公開されている。

図-2 は, 潮岬において観測された有義波高とその推算値を比較したものである。それぞれ, ●が観測値, ○が予報値, ◇が追算値である。また, 縦軸は有義波高 $H_{1/3}$, 横軸は波浪推算を開始した 2004 年 10 月 20 日 0 時からの経過時間である。この図より, 波浪推算値に比べて, 観測値は 2 割程小さくなっていることがわかる。

図-3 は, すさみ沖の波高の推算値を図-2 と同様に示したものである。すさみ沖での推算結果は 14 m であったが, 図-2 の傾向を考慮して, すさみ沖での有義波高

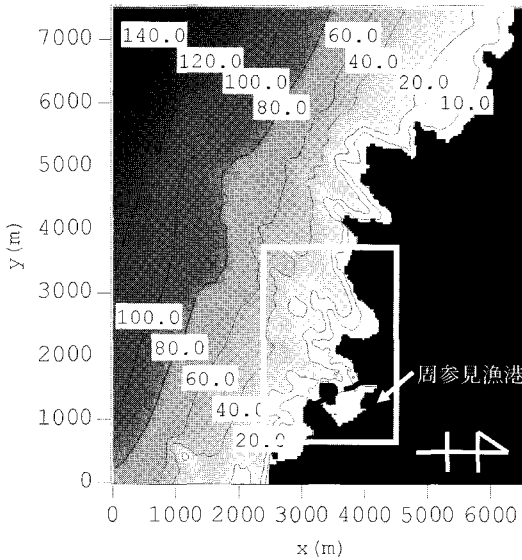


図-4 周参見漁港周辺の水深データ

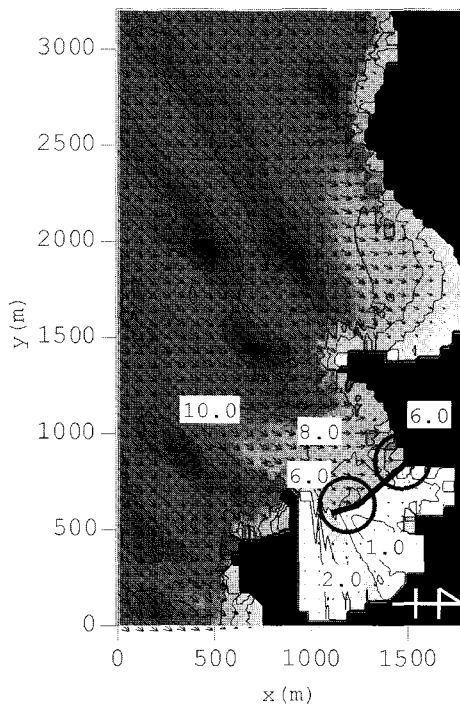


図-5 有義波高の空間分布

を12mと小さめに設定した。また、周期については、潮岬における観測値を参考に、波浪推算結果の時系列データから14sとした。この沖波条件と、主波向きSWの条件を用いて、周参見漁港周辺での波浪変形計算を行う。

沖波推算結果を入力条件として、EBED (Energy Balance Equation model with Diffraction effect) (Mase,

2001)を用いて、周参見漁港の周辺海域の波浪変形解析を行った。入射波浪条件は $H_{1/3}=12\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=14\text{ s}$ とした。計算格子間隔は10mとした。解析対象領域の水深分布を図-4に示す。水深40m位まではほぼ一様の深さであるが、周参見漁港の港口部において、水深10~20mの水深の深い等深線が入り込んでいることがわかる。

図-5は、図-4の□で囲んだ領域について、有義波高の計算結果の空間分布を示したものである。図中、○で囲んだ防波堤の先端部と根元部における有義波高は6.0~6.2mで、設計波より約1m大きく、それ以外の部分よりも波高が大きくなる結果が得られた。先端部はケーソンが滑動したところであり、根元部は激しい越波によって表層土が剥ぎ取られた箇所であり、被災箇所を説明できる波高の計算結果が得られた。

5. ケーソンの滑動解析

周参見漁港においては、西防波堤先端部のケーソンが滑動、転倒した。この滑動被災について解析を試みる。現地調査によると、ケーソンの滑動量は6~10mであった。

滑動量の計算にはKim・Takayama (2003, 2004)の2つの滑動量算定手法を用いた。ひとつは底面摩擦による抵抗力のみを考慮して滑動量を求めるもの、もうひとつはケーソンの傾斜 (tilting) によってケーソン後趾とマウンド間に生じる抵抗力を底面摩擦抵抗力に加えて滑動量を求めるものである。

ケーソンの滑動モデルには、以下の運動方程式が用いられる (下迫ら, 1998)。

$$\left(\frac{W}{g} + M_a\right) \frac{d^2 x_G}{dt^2} = P(t) - F_R(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x_G 、 g 、 t 、 W 、 M_a はケーソンの重心の水平変位、重力加速度、時間、ケーソンの重量および付加質量である。 $P(t)$ および $F_R(t)$ はケーソンに働く水平力ならびに抵抗力 (ケーソンとマウンド間の摩擦力) であり、これらは谷本ら (1996) によって定式化されている。

Kim・Takayama (2003) は、上のモデルを拡張し、滑動のタイプによって波力の時系列を使い分けて防波堤の滑動量を算定し、実験結果と比較した。その結果、防波堤の傾き (tilting) の影響が重要であることを明らかにし、式 (1) の代わりに、tilting による抵抗力の増加を考慮した次式を提案した。

$$\left(\frac{W}{g} + M_a\right) \frac{d^2 x_G}{dt^2} = P(t) - F_R(t) - R\{\theta(t)\} \dots\dots\dots (2)$$

この $R\{\theta(t)\}$ のモデル化については、図-6に示した仮想面における抵抗力であるが、その詳細はKim・Takayama (2004) を参照されたい。

図-7は、西防波堤の断面図を示したものである。ケ

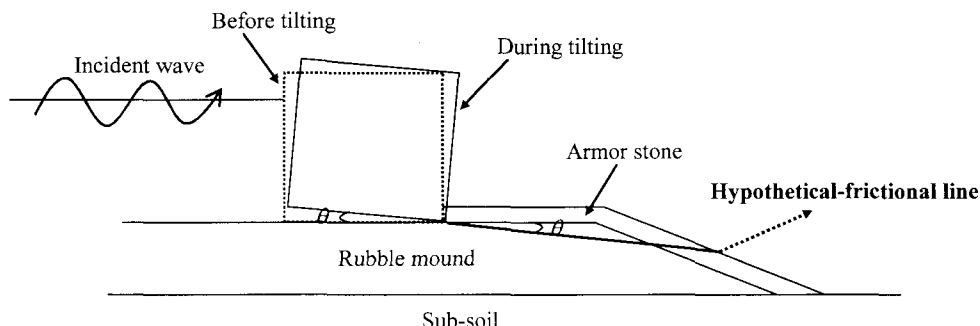


図-6 仮想面における抵抗力

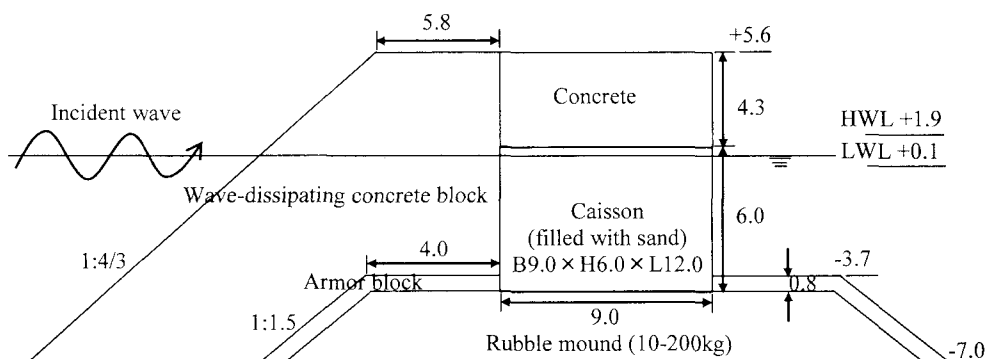


図-7 被災防波堤の断面図

表-1 計算条件

水深	7.0	m
潮位	1.5	m
ケーソンの空中重量	180.0	t/m
高波の継続時間	2.0	hr
海水の単位体積重量	1.0	t/m ³
波向	0	°
摩擦係数	0.6	

ケーソン前面には消波コンクリートブロックが設置されている。通常、この消波ブロックによりケーソンに働く波力は軽減される。一方で、高波浪時にケーソンの滑動が生じ、それに伴って消波ブロックが沈下すると、不完全消波となり、衝撃波力が助長される。こうした波力増減については、未だしっかりとした評価がなされておらず、今後検討を要するところである。そのため、今回は消波ブロックが波力に及ぼす詳細な影響を考慮しないこととした。

表-1 および 2 は、ケーソンの滑動計算における波浪条件およびケーソンの諸条件を示したものである。

滑動解析では、波浪推算結果とは別途に、作用する波

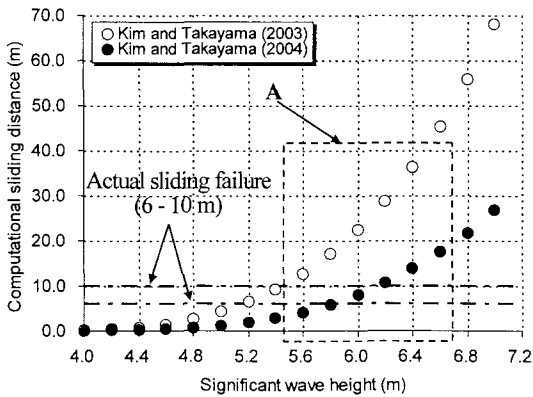
表-2 ケーソン特性

摩擦係数, f_r	0.5	
捨石の空隙率, n_r	0.35	
被覆石の空隙率, n_a	0.35	
捨石の単位重量, ρ_r	2.0	t/m ³
被覆石の単位重量, ρ_a	2.0	t/m ³

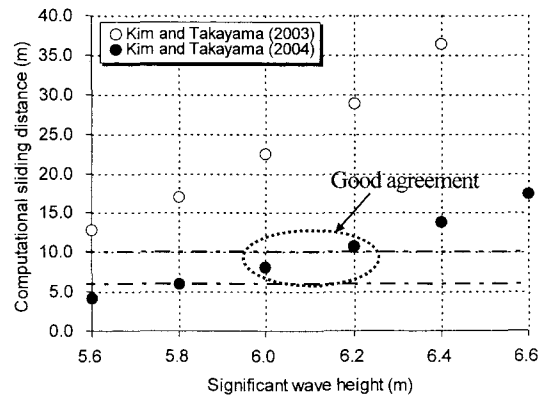
の周期 $T_{1/3}$ を 14 s, 有義波高 $H_{1/3}$ を 4.0~7.2 m と変化させて、それぞれの波浪に対する滑動量を求めた。なお、波の作用時間はヒアリング調査結果から 2 時間とした。その間の不規則波の個々波の波高は Rayleigh 分布に従うと仮定した。すなわち、2 時間における一波ごとの滑動量を加え合わせて、トータルの滑動量を算定した。

設定した有義波高に対する滑動量の計算結果を図-8 に示す。横軸を有義波高にとり、縦軸に滑動量をプロットしている。tilting を考慮しない場合は、○で示した結果のように、滑動量が過大に評価される。tilting を考慮すると、●で示されるように、滑動量が小さくなる。

図-8(b)に、図-8(a)に示している領域 A を拡大してプロットした。この図によれば、有義波高が 5.8~6.2 m でケーソンの滑動量が 6~10 m になる。滑動量が 6



(a) 計算結果



(b) 詳細図

図-8 滑動量計算結果

～10 m となる場合の作用波浪は、別途求めた波浪推算結果の $H_{1/3} = 6.0 \sim 6.2$ m とほぼ同じ値である。なお、このケーソンの設計波高は先端部で4.9 mである。この波高に対しては、図-8(a)を見ると滑動量は0で、安全であることがわかる。

以上の解析結果より、西防波堤の滑動は、設計波以上、すなわち、有義波高が6 mを超える高波により生じたことが明らかになった。また、tiltingによってケーソン後趾に生じる滑動抵抗力を考慮することにより、周参見漁港で生じた防波堤の被災状況を再現することができ、滑動解析手法の有用性を確認できた。

6. おわりに

和歌山県周参見漁港における防波堤の滑動被災について、解析を実施した。沖波波浪の追算、浅海波浪の推算計算を行って、防波堤前面での波高分布を算定した。この結果によると、現地での被災が顕著であった防波堤先端部と基部で波高が6 mを超えたと推測された。また、防波堤の滑動量算定モデルにより滑動量を算定した。tiltingを考慮した滑動量算定値は、波高を約6 mとすると、現地調査で得られた滑動量を再現することができた。

和歌山県漁港課および田辺漁港事務所関係各位には、現地調査にご協力いただき、被害状況に関する貴重な資料を提供していただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 池末俊一、高山知司、下迫健一郎(1999)：混成防波堤の滑動信頼性に及ぼす波浪の波向変化特性の影響、海岸工学論文集、第46巻、pp. 926-930。
- 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。
- 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。
- 周瀬 肇・木村雄一郎・Tracey H. Tom・小川和幸(2005)：GFS-WRF-SWAN 援用波浪推算システムの構築と検証、海岸工学論文集、第52巻、pp. 181-185。
- Goda, Y. and Takagi, H. (2000). A reliability design method of caisson breakwaters with optimal wave heights, Coastal Eng. Jour., JSCE, Vol.42, No.4, pp. 357-387。
- Hanzawa, M., Yamagata, N., Nishihara, T., Takahashi, S., Takayama, T. and Tomiyasu, R. (2003)：Performance of composite breakwaters from the view point of expected sliding distance of caisson, Coastal Structures 2003, ASCE, pp. 283-294。
- Kim, T.-M. and Takayama, T. (2003)：Computational improvement for expected sliding distance of a caisson-type breakwater by introduction of a doubly-truncated normal distribution, Coastal Eng. Jour., JSCE, Vol.45, No.3, pp. 387-419。
- Kim, T.-M. and Takayama, T. (2004)：Effect of caisson tilting on the sliding distance of a caisson, Annual Jour. of Civil Eng. in the Ocean, JSCE, Vol.20, pp. 89-94。
- Mase, H. (2001)：Multi-directional random wave transformation model based on energy balance equation, Coastal Eng. Jour., JSCE, Vol.43, No.4, pp. 317-337。