

防波堤の被災事例を用いた波高と滑動量の 相關に関する一考察

A STUDY ON THE CORRELATION BETWEEN WAVE HEIGHT AND SLIDING DISPLACEMENT OF BREAKWATERS BY USE OF DISASTER CASES

長尾毅¹・辻尾大樹²・熊谷健蔵³

Takashi NAGAO, Daiki TSUJIO, Kenzou KUMAGAI

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

³正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒451-0046 名古屋市西区牛島町2番5号)

Uneven sliding displacement of breakwaters is often observed in disaster cases by typhoon or depression. This study aims at discussing the reason of the uneven displacement observed in field. Authors picked up three disaster cases for the study and conducted wave transformation analyses by using Boussinesq equation model. As the results, it was shown that correlation between sliding displacement of breakwaters and significant wave height in front of breakwaters is low and amount of sliding of breakwaters cannot be explained only by the significant wave height within the scope of this study.

Key Words : Breakwater, sliding displacement, wave height, Boussinesq equation model, wave transformation

1. はじめに

台風や低気圧の来襲が頻発する地理的、気象的条件下にある我が国では、それらに伴って発生する高波浪によって防波堤が滑動する被災がほぼ毎年発生している。そのような異常波浪によって滑動被災が生じた場合、ケーソン毎の滑動量は一樣ではないことがほとんどである。過去に発生した被災事例の中で、ケーソンの滑動の程度が防波堤の法線方向に沿って波状に分布することがあり、それを伊藤・谷本¹⁾は「蛇行被災」と名付けた。しかし、伊藤・谷本¹⁾も指摘しているように、防波堤の区間ごとに法線や構造断面が異なるような場合や、同一条件の区間であっても、来襲波浪自体の不均一性、前面地形などの影響による到達波高の相違、構造強度の偶発的な不同、その他の要因によって滑動量が異なるものと考えられる。

一方、防波堤の滑動量解析においては、代表的なケーソン1函を対象にして、防波堤の断面方向に一律の滑動を仮定して計算している例が多い。しかし、実際の防波堤の被災事例に見られるように、防波堤の滑動量は法線方向に一樣ではないため、実際の現象を反映できていないのが現状である。

そこで、本研究では、防波堤の滑動量解析に関して、平面的な被災を考慮した解析手法の確立を目的とした研究の一環として、ケーソンの滑動量と来襲

波高との相關を議論するため、過去に発生した3つの防波堤の滑動被災事例を対象として、ブシネスク方程式モデルによって被災時波浪の再現計算を実施して堤体に作用する波浪を算出し、その波浪と滑動量の相關関係を考察するものである。

2. 対象被災事例

本研究では、宮田²⁾が収集した1992年～2008年の間に発生した防波堤の滑動事例の中から、滑動被災が大きかったS港、H港、O港の3つの被災事例を対象として来襲波浪と滑動量の関係を調べた。以下に3つの被災概要を示す。

(1) S港の滑動事例

S港では、2004年8月30日に台風0416号の来襲に伴って生じた高波浪によって防波堤のケーソンが滑動あるいは傾斜し、さらに、消波ブロックが沈下する被災を受けた。被災箇所は4区間600m以上に及び、ケーソン1函が転倒、18函が滑動した。S港沖合の波高計では、高波浪来襲期間中に最大有義波高として9.26mを観測した。最も被災が大きかった被災箇所とS港周辺の水深図を図-1に示す。この被災でS港は図-1に示す被災箇所以外に、消波ブロックの被覆端部で不完全被覆となっている箇所や暫定的に防波堤

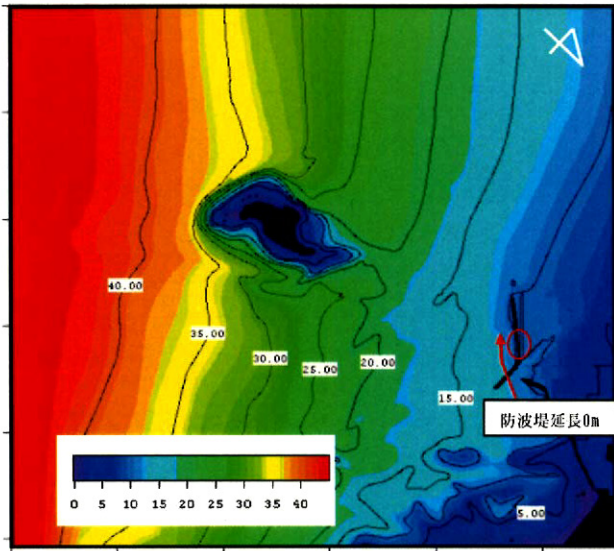


図-1 被災箇所と水深分布図 (S港)

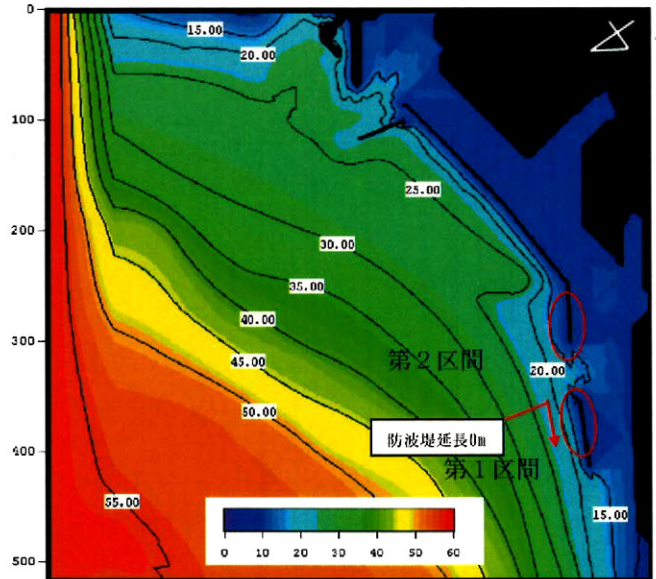


図-3 被災箇所と水深分布図 (O港)

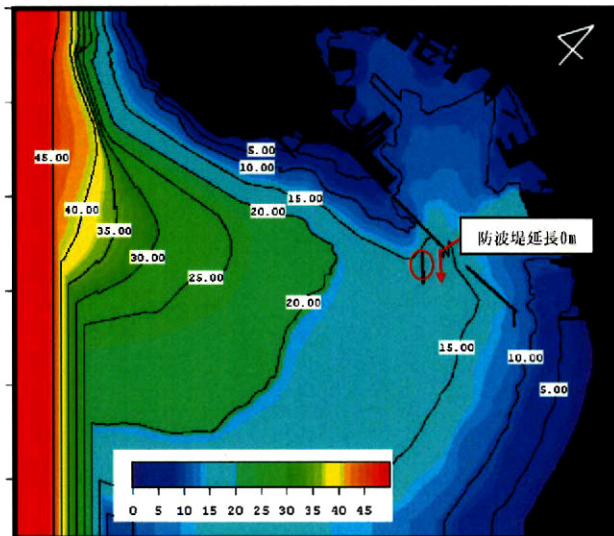


図-2 被災箇所と水深分布図 (H港)

表-1 計算条件

項目	S港	H港	O港
波高	9.26m	6.68m	4.60m
周期	15.20s	10.84s	7.70s
波向	SE	SW	NE
Smax	75	75	75
潮位 (D.L.+)	3.49m	0.49m	2.39m
時間間隔	0.02s	0.013s	0.01s
計算格子	10m	10m	10m

の堤頭部となっている箇所でケーソンの滑動被災が発生している。

(2) H港の滑動事例

H港では、2004年9月8日に台風0418号の来襲に伴って生じた高波浪によって防波堤の全延長約400mにわたり、ケーソンが滑動、転倒あるいは水没し、さらに、根固方塊や基礎マウンドも被災を受けた。ケーソン全27函のうち、22函が転倒、3函が港外側へ転倒し、2函のみが残存した。H港沖合では波高が観測されていなかったため、平山ら³⁾は気象観測データから波浪推算を実施し、最大有義波高で6.68mと推定した。

H港の被災箇所とH港周辺の水深図を図-2に示す。

(3) O港の滑動事例

O港では2004年10月20日に台風0423号の来襲に伴

って生じた高波浪によって防波堤のケーソンが滑動、転倒し、さらに、被覆石や基礎マウンドも被災を受けた。被災延長は1km以上となり、第1区間では、34函が滑動、3函が転倒し、第2区間では18函が滑動した。O港では波高が観測されていなかったため、海上風からの波浪推算で最大有義波高は4.60mと推定した。

O港の被災箇所とO港周辺の水深図を図-3に示す。

3. 被災時波浪の算出

被災資料から各港の被災時の観測波浪あるいは追算波浪を収集し、その波浪を入力条件として(表-1)、平山⁴⁾によるブシネスク方程式モデル(NOWT-PARI Ver. 4.6c.7a)を用いて波浪変形計算を実施し、

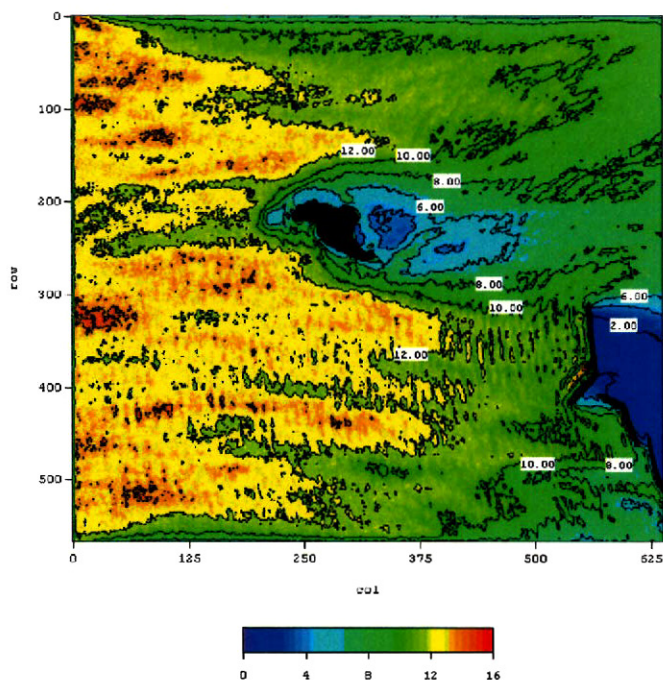


図-4 有義波高分布 (防波堤有り, S港)

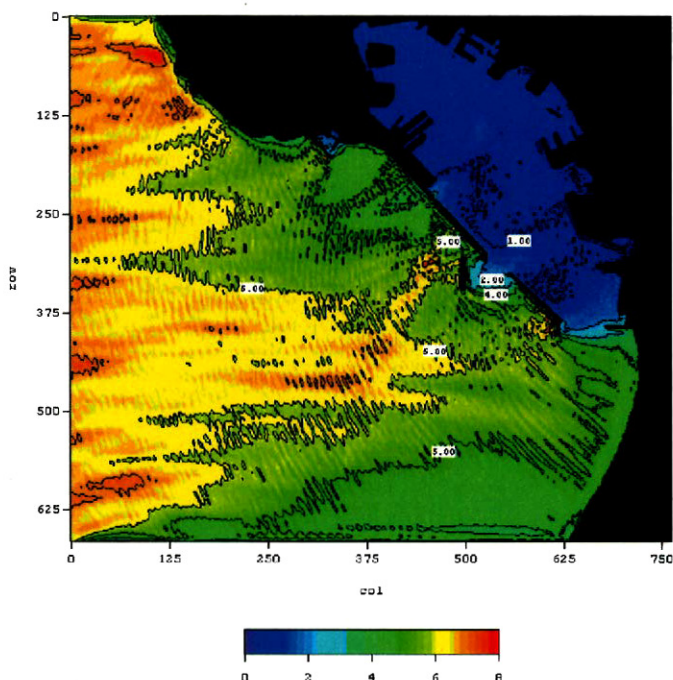


図-6 有義波高分布 (防波堤有り, H港)

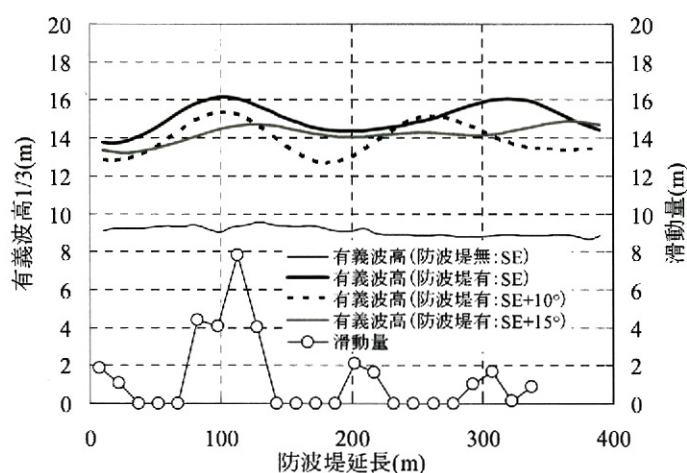


図-5 防波堤延長方向の有義波高分布 (S港)

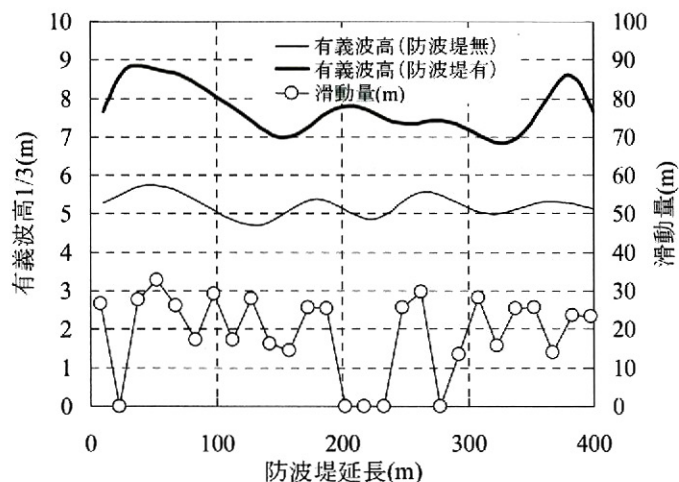


図-7 防波堤延長方向の有義波高分布 (H港)

被災したケーソン毎の堤前波を算出した。防波堤を設置して反射波を考慮した場合と、防波堤を取り除いて進行波とした場合を実施した。

(1) S港の計算結果

S港における波高分布の計算結果を図-4に示す。また、被災した区間における防波堤法線方向の波高分布を図-5に示す。図-5には進行波の計算結果も併記しているが、反射波を考慮した場合の波高分布を見ると、防波堤延長100m及び300m付近で波高が増大している箇所が存在していることがわかる。また、ケーソンの滑動量の分布とケーソン前面の波高分布を比較すると、防波堤延長100m付近では波高の増大に伴って滑動量が大きくなっている傾向がみられるが、300m付近では波高が増大しているにもかかわらず、滑動量は比較的小さい。図-5にはSE方向以外に

10°及び15°波向を変化させた波高分布を併記しているが、300m付近では波向の違いによって波高が増大する箇所が変化し、その変化が100m地点に比べて大きいことから、高波浪の来襲時間が長かったことも影響し、来襲波浪の波向の変化によって滑動量の違いが生じているものと考えられる。

(2) H港の計算結果

H港における波高分布の計算結果を図-6に示す。また、被災した区間における防波堤法線方向の波高分布を図-7に示す。H港においては防波堤の両端部付近で波高が増大している箇所が存在しているものの、設置されていたほとんどのケーソンが転倒しており、波高分布と滑動量の関係は明瞭ではない。防波堤延長200m付近など、一部のケーソンでは堤体前

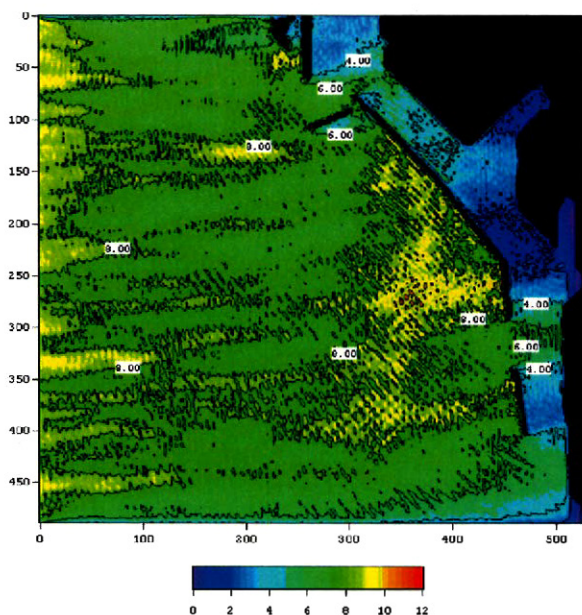


図-8 有義波高分布 (防波堤有り, 0港)

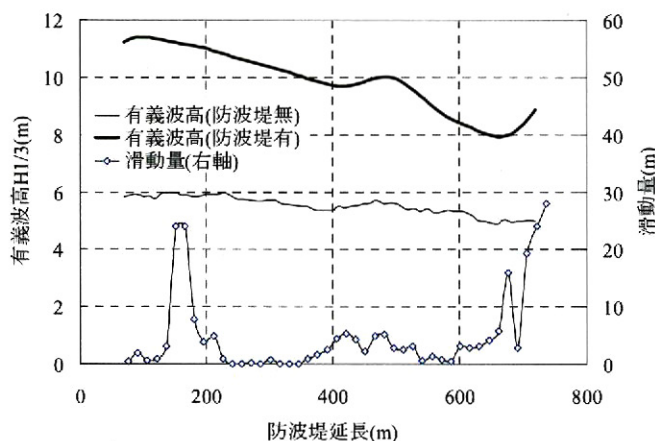


図-9 防波堤延長方向の有義波高分布 (0港)

面の波高が大きいにもかかわらず、ほとんど滑動せず被災を受けていない。平山ら³⁾はこのことに対する説明として、港内側に位置している防波堤からの反射波(港内側に波力が作用)と来襲波(港外側に波力が作用)の最大波力がほぼ同時に作用したことによって、港外側と港内側の水位差がほとんど生じなかったという可能性を示唆している。

港内側からの反射波の影響が考えられるような大規模被災では、堤体前面における波高分布のみで滑動量の違いが説明できないことを示している。

(3) 0港の計算結果

0港における波高分布の計算結果を図-8に示す。また、被災した区間における防波堤法線方向の波高分布を図-9に示す。波高分布をみると、防波堤の基点側から法線方向に向かって波高が小さくなっていく傾向がみられるが、500m付近の地点では、来襲波浪の波向や周期によって水深地形変化や堤頭部からの影響を受けて波高が集中して増大する箇所があり、

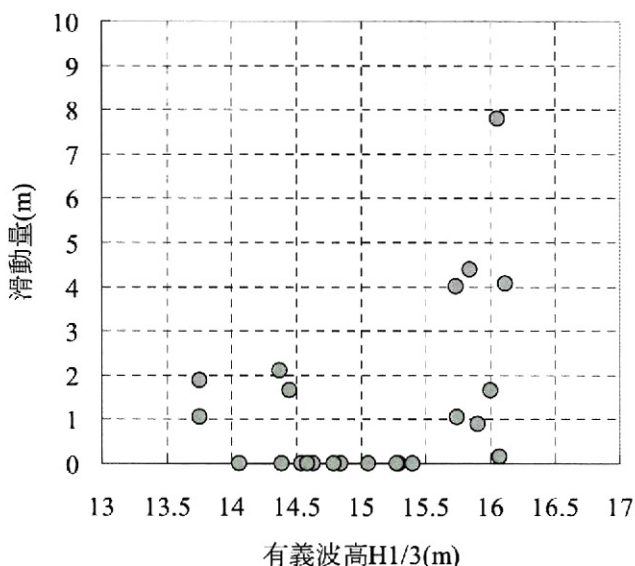


図-10 有義波高と滑動量の関係 (S港)

直線状の防波堤であっても作用する外力が異なっていることが伺える。

滑動量については約180m地点と終点部の700m付近で大きな値となっており、明瞭な関係はみられないが、500m地点での波高が増大している区間についてみると、同様に滑動量も大きくなっており、波高の増大に対応して滑動量も大きくなっている傾向が伺える。

4. 堤前波と滑動量の相関関係

3. で算出した来襲波高とケーソンの滑動量の相関関係を調べる。来襲波高の代表値として、有義波高と滑動量の関係を調べた。なお、H港については有義波高と合わせて、最高波高と滑動量の関係についても同様に調べた。

(1) 有義波高と滑動量の関係

a) S港

S港における有義波高と滑動量の関係を図-10に示す。なお、図中のケーソン諸元は同一である。相関係数をみると0.33であり、相関関係が低い。有義波高16m付近で滑動量が0~8m³とばらついている。

これは100m付近での被災がほとんどであり、同程度の波高が出現している300m付近の滑動量が2m³程度と小さいことから、有義波高の違いのみで滑動量の違いを説明できないことがわかる。

b) H港

H港における有義波高と滑動量の関係を図-11に示す。相関係数をみると0.09であり、相関関係が低い。

有義波高は7m~9mの間で変動しているが、滑動量については一部のケーソンを除いて15m以上と大きく、このような転倒を伴う大規模な被災事例では、

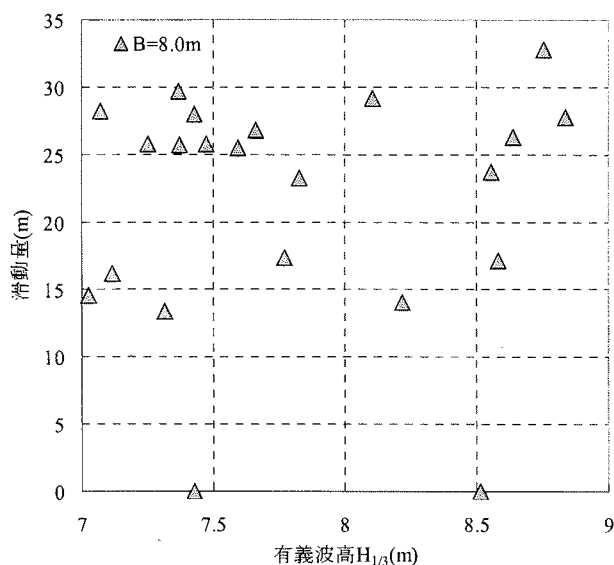


図-11 有義波高と滑動量の関係 (I港)

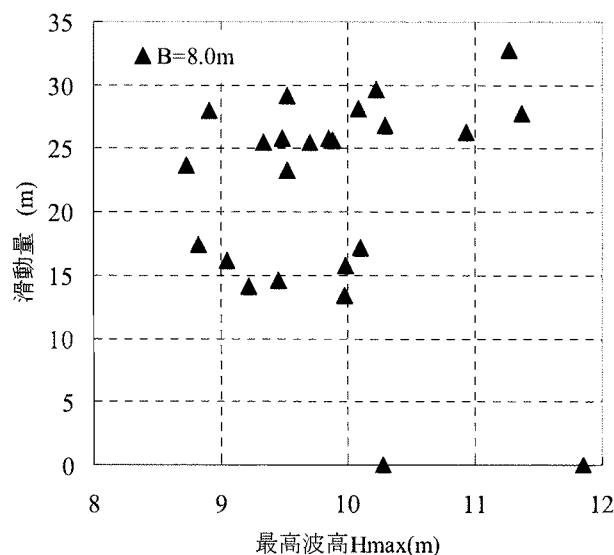


図-13 最高波高と滑動量の関係 (I港)

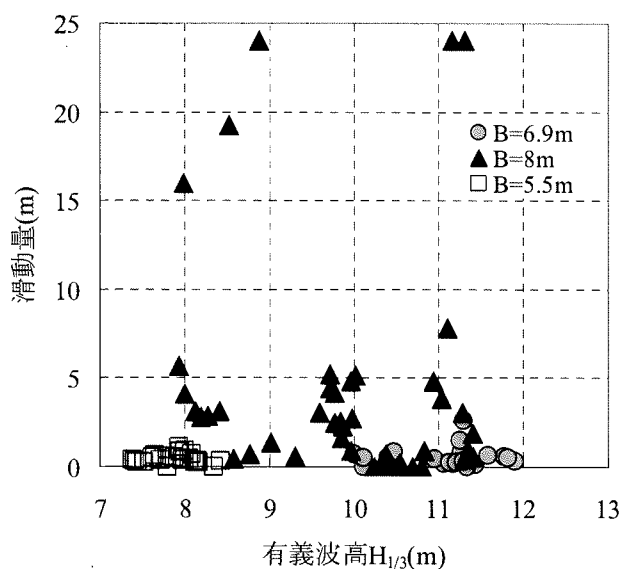


図-12 有義波高と滑動量の関係 (O港)

波高分布のみで滑動量の相違を説明するのは困難であることがわかる。

c) O港

O港における有義波高と滑動量の関係を図-12に示す。相関係数をみると-0.26であり、相関関係は他港と同様に低い。有義波高が8~9m, 11m付近で20mを超えるような大規模な滑動が発生しており、波高と滑動量の間に明瞭な相関は見られない。被災区間毎に堤体幅Bが異なるため、図には堤体幅毎に凡例を変えて示している。図から同じ8mの波高が来襲しても滑動量は0~16m程度まで様々あり、必ずしも来襲波高と滑動量には相関関係がないということがわかる。また、同じ波高が来襲した場合、堤体幅が大きい方がケーソンの耐力が大きいため、滑動量は小さくなることが考えられるが、図の有義波高11m付

近でも見られるように、堤体幅8mの方が堤体幅6.9mよりも滑動量が多い場合がある。これは局所的な波高の増大や1波の大きな波浪の出現、摩擦係数の低下などさまざまな要因が関係していると推察される。

(2) 最高波高と滑動量の関係

図-13にI港における100波中の最高波高と滑動量の関係を示す。相関係数をみると、0.15とやや有義波に比べて大きくなっている。防波堤の設計においては最高波高を用いて堤体断面を決定していることから、滑動量の違いを説明する場合は、有義波高よりも最高波高の大小によって説明をする方が望ましいことが示唆される。

5. おわりに

本研究では、過去の滑動事例を用いて、来襲波浪と滑動量の相関関係を調べた。主要な結論は以下の通りである。

- ・ 2004~2008年に発生した滑動事例の中から、大規模な3件の滑動被災事例を抽出して来襲波浪と滑動量の関係を調べた。
- ・ 被災時の来襲波浪に関して、観測波浪や推算波浪を入力条件として、ブシネスク方程式モデルによって、堤前の有義波高と最大波高を算出した。
- ・ 今回の事例の範囲では、堤前有義波高と滑動量の相関係数は-0.26~0.33であり、明確な相関はみられなかった。
- ・ 最高波高と滑動量の関係では、相関係数が有義波高と滑動量の関係と比較して大きいこと、また防波堤設計は最高波高により堤体断面が決定

していることから、滑動量の違いは最高波高の大小による説明が望ましい。

- ・ 防波堤の滑動被災は来襲波浪が主要因であると考えられるが、滑動量の程度には、堤前に作用する個別波の波高が大きく影響していると考えられる。この他に摩擦係数のばらつき等、他の要因も考えられ、必ずしも有義波高の大小だけでは滑動量の大小を議論できない可能性がある。

今後、防波堤の設計においては、現行設計のような確定波に対する安定性照査に加えて、設計供用期間中に発生すると想定される全ての波浪に対して、滑動に影響を及ぼす要因（摩擦係数、潮位など）のばらつきを考慮して、耐波安定性を照査することが望ましいと考える。また、著者ら⁵⁾が検討しているように、滑動したケーソンに作用する波浪が増大し、さらに滑動が大きくなることも考えられるため、被災後のケーソンに作用する波浪についてもさらに研

究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 伊藤喜行，谷本勝利：混成防波堤の蛇行災害，港湾技術研究所資料，No.112，20p，1971.
- 2) 宮田正史：消波ブロック被覆堤の累積補修費を考慮した維持管理手法に関する基礎的研究，国総研資料，No.552，2010.
- 3) 平山克也，南靖彦，奥野光洋，峯村浩治，河合弘泰，平石哲也：2004 年に来襲した台風による波浪災害事例，港湾空港研究所資料，No.1101，2005.
- 4) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，P.162，2002.
- 5) 長尾毅，辻尾大樹，熊谷健蔵：防波堤の平均滑動量と波高増大に関する研究，海洋開発論文集，第 26 巻，2010（印刷中）。