

防波堤の平均滑動量と波高増大に関する研究

A STUDY ON THE CORRELATION BETWEEN WAVE INCREMENT AND SLIDING DISPLACEMENT OF BREAKWATERS

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)

Although sliding disaster of breakwaters occurs almost every year, no treatment is taken against small amount of sliding displacement cases because at present it is difficult to evaluate the degree of performance deterioration for such cases. Small amount of sliding displacement of breakwaters causes wave increase and may lead to severe disaster. Therefore, it may be advantageous to take frequent measures compared with no measures strategy. This study aims at discussing the correlation between wave increment and sliding displacement of breakwaters in order to establish the effective maintenance strategy of breakwaters.

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

1. はじめに

近年, 土木構造物において, 構造物の老朽化や健全な構造物の維持といった観点から資産効用を最大にするアセットマネジメント手法や維持管理計画等が検討されている。2007年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾では, すべての構造物に対して維持管理計画を策定するように定めており, 予防保全あるいは事後保全といった維持管理方針を適切に検討できる手法が求められている。

一方, 防波堤の滑動被災に関して, わが国ではほぼ毎年のように発生しているが, 小規模な滑動被災では, ケーソンの復旧や基礎, 裏込の補強などの対処が施されていないのが現状である。これは小規模な滑動被災によって防波堤の性能がどの程度低下しているかを定量的に評価することが困難であるためと考えられる。社会資本の適切な管理およびライフサイクルコスト最小化という側面からは小規模な被災であっても効率的に補修を行って性能を回復することにより将来の大規模な被災を防ぐことが有効である可能性があると考えられる。

本研究は, 防波堤に関する効果的・効率的な維持管理手法を確立するための研究の一環として, 防波堤が被災した時の滑動量とその滑動後の堤体に作用する波高の増大率の関係を検討することを目的とする。まず, 既存の滑動被災事例を整理して, 滑動特性を把握し, その被災特性を反映して被災ケーソンをモデル化し, プシネスク方程式モデルによって滑

動したケーソンに作用する波浪を算出し, それらの関係を検討した。

2. 被災データの収集, 整理

(1) 対象被災事例

本研究では宮田²⁾が収集した防波堤の被災事例を検討対象とした。宮田²⁾は1992年～2008年に発生した防波堤の被災事例の中から, 大規模被災(1件当たり1億円以上の復旧工費の被災等)の被災事例91件を収集し, 構造物の設計諸元, 被災時の外力条件などを整理した。本研究では, 被災事例の中でも特に被災函数の多い事例を14件抽出し(F港のみ消波工有り), 検討に用いることとした。抽出した14件の平均滑動量と最大滑動量は表-1に示す通りである。港名の後の枝番号は同じ港で被災した地区が異なるものを示している。最大滑動量が最大のものは, 02港-1で24m程度であった。被災延長についても百数十mから千m近いものもあった。

(2) 滑動量の頻度分布

本研究では, 最終的に防波堤の滑動量の平面的な被災特性を考慮することを目的としているため, ケーソンの滑動量が法線方向にどのように分布しているのかを調べる必要がある。収集した被災事例の法線方向分布傾向の一例として, 各港の被災事例毎に滑動量の頻度分布を解析した。滑動量の頻度分布

表-1 被災事例のまとめ

	平均 滑動量	最大 滑動量	被災 函数	被災 延長
K1港-1	0.31m	1.15m	27	270m
K1港-2	0.28m	0.77m	23	230m
K2港	0.17m	0.28m	7	175m
M港	1.26m	3.50m	16	160m
O1港-1	0.25m	0.92m	61	915m
O1港-2	0.63m	1.60m	32	480m
S1港	2.64m	6.04m	9	135m
O2港-1	3.37m	24.00m	40	600m
O2港-2	0.55m	2.62m	21	315m
O2港-3	0.40m	1.13m	27	405m
S2港-1	0.65m	2.84m	27	405m
S2港-2	1.23m	7.81m	25	375m
S2港-3	1.82m	6.30m	15	210m
F港	2.17m	13.44m	58	870m

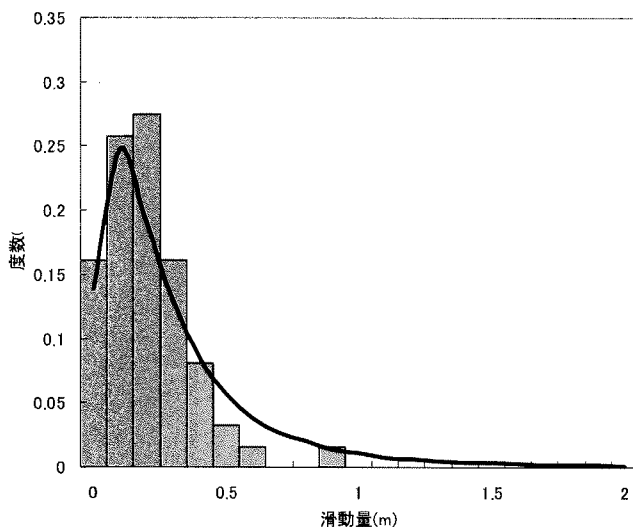


図-1 滑動量の頻度分布 (O1港-1)

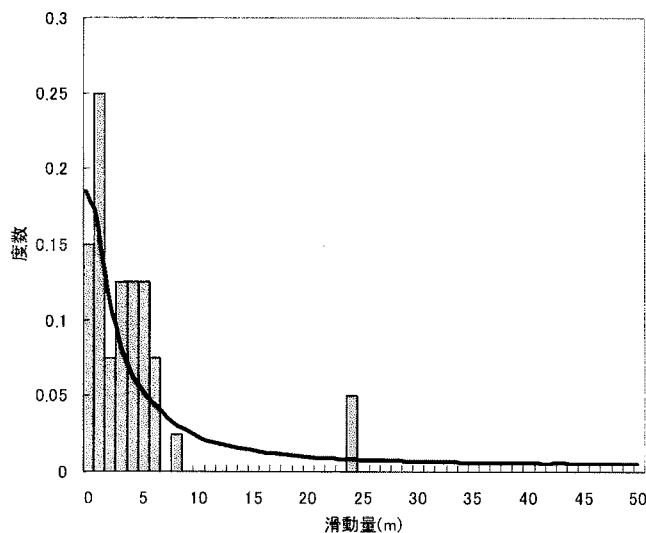


図-2 滑動量の頻度分布 (O2港-1)

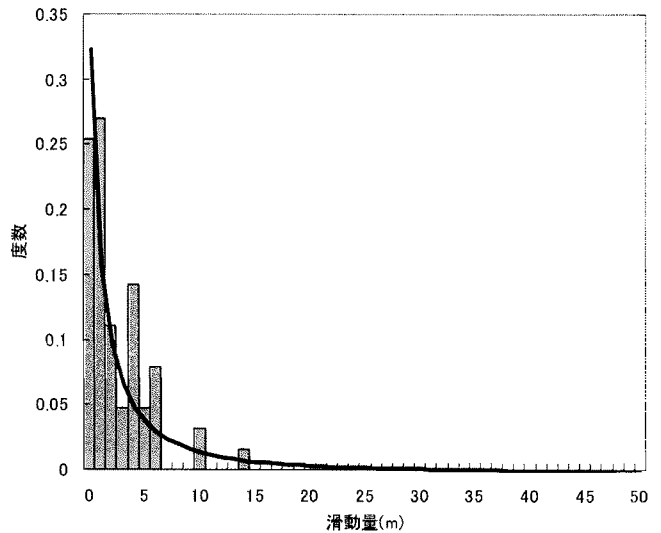


図-3 滑動量の頻度分布 (F港)

の例として、O1港-1、O2港-1、F港の頻度分布を図-1～図-3に示す。図中の実線は、滑動量データから対数正規分布をあてはめたものである。図に示すとおり、断面方向の滑動量は概ね対数正規分布で表せることがわかった。

(3) 平均滑動量と分散の関係

対数正規分布においては、平均値と分散の関係を設定できれば、任意の平均値に対して分布を特定することが出来る。本研究では、抽出した14件の被災事例から平均値と分散の関係を求めた。平均滑動量と分散の関係を図-4に示すが、平均滑動量を1m未満の小規模な被災事例に限った場合、平均値と分散の関係を次式の累乗関数の近似関数で表すことができた。

$$\sigma^2 = 1.6 \times \mu^3 \quad (1)$$

ここに、 σ^2 : 分散 (m^2)、 μ : 平均滑動量 (m) である。既往の防波堤の滑動量解析手法を用いて、対象となる防波堤の平均滑動量を算出すると、式(1)を用いることで、乱数を用いて任意関数の平面的なケーソンの滑動量を推定することができる。

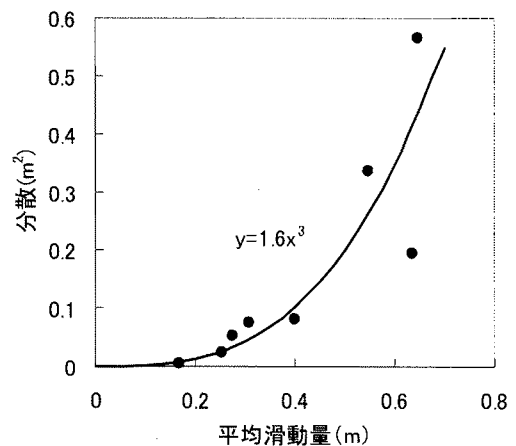


図-4 平均滑動量と分散の関係

3. 滑動量の空間自己相関と被災ケーソンのモデル化

(1) 滑動量の空間自己相関

滑動量の法線方向の分布特性を把握するために、隣接するケーソンの滑動量で相関性のある距離を算出する。被災事例の滑動量とその位置関係から式(2)を用いて自己相関係数を算出し、式(3)で求める自己相関係数： r が被災事例の自己相関係数に整合するように相関距離： b を求める。

$$r(\Delta x) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\{f(x_i) - \overline{f(x)}\} * \{f(x_i + \Delta x) - \overline{f(x)}\}}{N} \right] \quad (2)$$

$$r = \exp\left(-\frac{\Delta x}{b}\right) \quad (3)$$

ここに、 r ：自己相関係数、 Δx ：空間距離、 σ^2 ：分散、 $f(x)$ ：位置 x での滑動量、 N ：データ数である。

算出した自己相関係数の例として、F港とO1港-1の結果をそれぞれ図-5、図-6に示す。

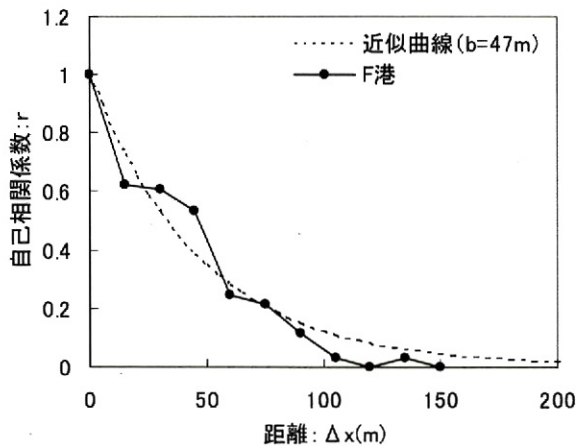


図-5 自己相関係数 (F港)

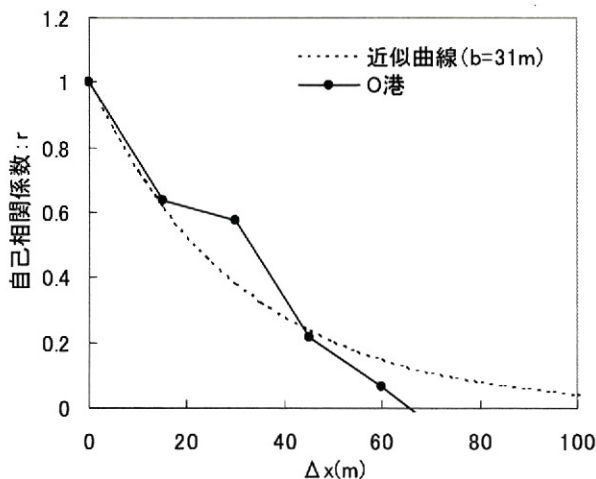


図-6 自己相関係数 (O1港-1)

表-2 各港の相関距離

	相関距離	1函の延長
K1港-1	5m	10m
K1港-2	6m	10m
K2港	2m	25m
M港	9m	10m
O1港-1	31m	15m
O1港-2	25m	15m
S1港	11m	15m
O2港-1	19m	15m
O2港-2	12m	15m
O2港-3	14m	15m
S2港-1	6m	15m
S2港-2	15m	15m
S2港-3	6m	14m
F港	47m	15m
平均値	14.9m	-

表-2に14件の被災事例を用いて算出した各港の相関距離を示す。表から滑動量の相関距離は数m～50m程度まで様々であったが、平均値としては約15mでケーソン1函分相当であることがわかった。

(2) 被災ケーソンのモデル

(1)で求めた相関距離を考慮して対数正規分布に基づいた被災ケーソンのモデル化を試みた。被災ケーソンのモデル化のフローを図-7に示す。

まず、求めたい滑動被災の平均滑動量を設定し、式(1)を用いて平均滑動量から分散を求める。次に、相関距離(15m)を考慮した対数正規乱数を発生させ、ケーソン毎の滑動量を推定する。平均滑動量0.3m、ケーソン1函あたりの延長15m、防波堤の延長100函として各ケーソンの滑動量を算出した場合の1例を図-8に示す。

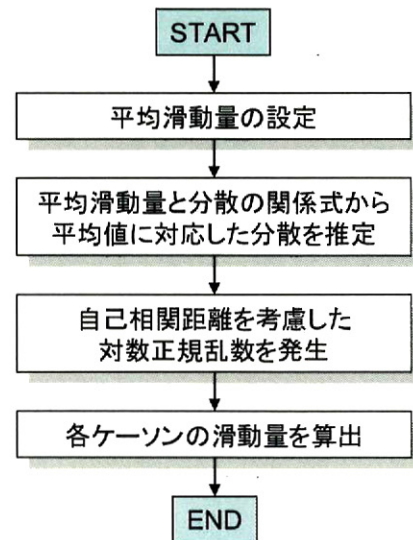


図-7 被災ケーソンのモデル化のフロー

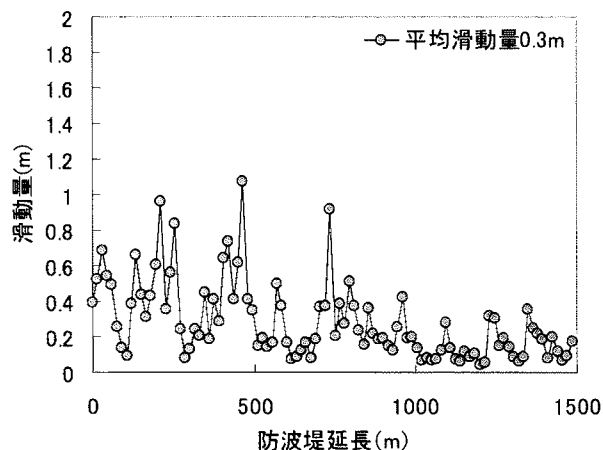


図-8 被災ケーソンのモデル化の1例(平均滑動量0.3m)

この例では、平均滑動量が0.3mであっても1m～1.2m程度の滑動が発生しており、実際の被災事例で見られるような局所的な滑動量の増大を反映している。このモデル化を用いて、被災後のケーソンに作用する波浪を算出することとする。

4. 平均滑動量と波高増大

モデル化した被災防波堤に作用する波浪を把握するために、ブシネスク方程式モデルによって波浪変形計算を実施した。

(1) 計算手法

本研究では、ブシネスク方程式モデルとして、平山³⁾が開発したNOWT-PARI (Ver. 4. 6c. 7a) を用いた。

計算領域としては、簡単なモデル化のため、実際の海域ではなく、図-9に示すような平面水槽を想定し、防波堤位置にケーソンの被災形状を変えて数値実験を実施した。

(2) 計算条件

計算条件については、表-3に示すとおりである。計算の制約上、1函の延長15m×幅10mのケーソンを1mの正方格子でケーソン10函分の領域をモデル化して計算を実施した。ケーソンの被災形状としては、3. (2) で示した方法によって、平均滑動量を0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5mとして滑動量毎にモデル化した。それぞれの計算モデル数は、表-4に示す通りである。モデル化の例を図-10に示す。10函で平均滑動量を0.1mとする場合は、格子サイズが1mであるため、1函のケーソンを1m滑動させている。同様に平均滑動量0.3mの場合では、滑動量1mのケーソンが3函あるケースと滑動量1mと2mのケーソン1函ずつを組み合わせたケースを設定している。計算の制約上、滑動量が1m刻みとなっているため、隣接函同士の関係が滑らかにならないことに留意する必要がある。

計算結果の例として、全く滑動していないケース

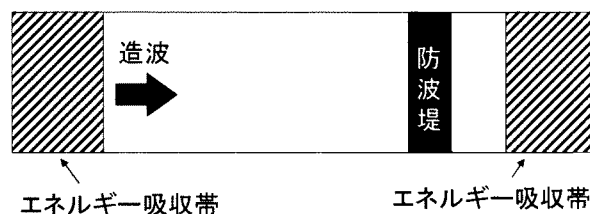


図-9 計算領域模式図

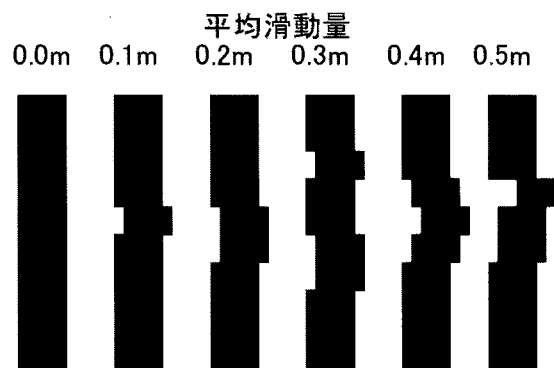


図-10 波浪変形計算時のケーソンのモデル化例

表-3 計算条件

項目	値
波高	0.1m
周期	10s
波向	直入射 一方向波
水深	10m
計算時間間隔	0.02s
計算格子	1.0m
ケーソン諸元	L15m×B10m
ケーソン函数	10函
平均滑動量	0.1～0.5m (0.1m刻み)

表-4 計算モデル数

平均滑動量	モデル数	想定した1函の滑動量
0.1m	1	1m
0.2m	4	1m, 2m
0.3m	6	1m, 2m, 3m
0.4m	8	1m, 2m, 3m, 4m
0.5m	10	1m, 2m, 3m, 4m, 5m

と平均滑動量0.2m（滑動量2mのケーソン1函）のケースについて、有義波高の計算結果を図-11に示す。滑動していないケースでは、防波堤全面で有義波高が0.179m程度であり、平均滑動量0.2mの結果では滑動しているケーソン付近で有義波高0.191mとなり、約7%の波高増大となっていることがわかる。

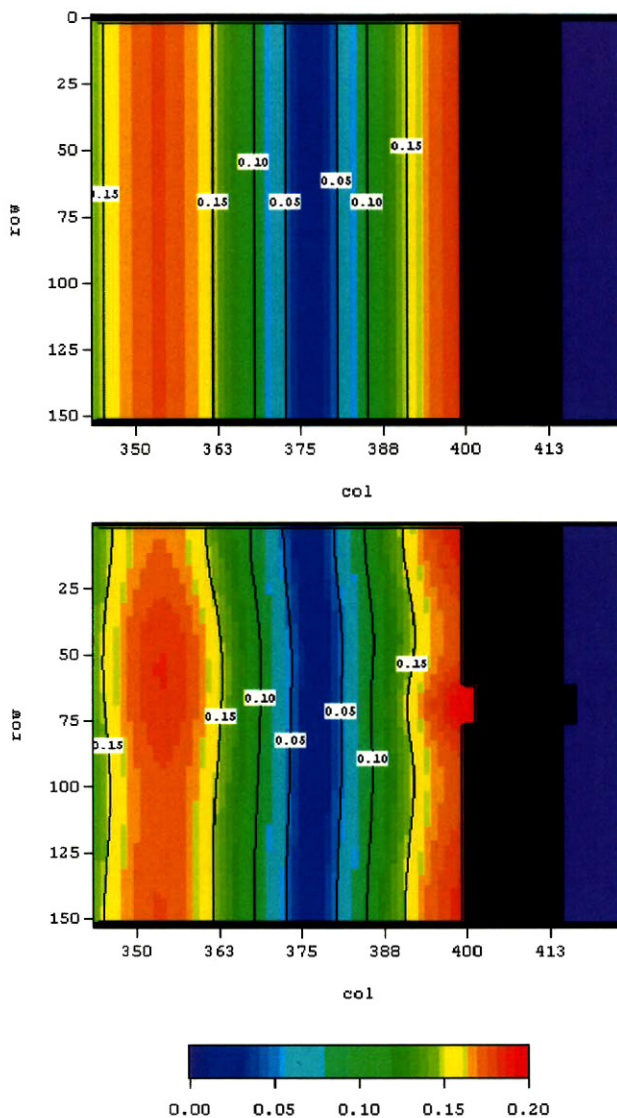


図-11 滑動後のケーソンに作用する波高分布図

表-5 波高増大率のまとめ

平均滑動量	平均値	最大値	最小値
0m	0.0%	0.0%	0.0%
0.1m	3.1%	3.1%	3.1%
0.2m	3.6%	6.8%	2.4%
0.3m	4.3%	11.1%	1.4%
0.4m	4.7%	16.3%	0.5%
0.5m	5.5%	22.4%	0.2%

(3) 滑動量と波高増大の関係

平均滑動量の違いによるケーソン前面波高の波高増大率の関係を調べ、表-5にまとめを示す。波高増大率は、各ケースの滑動しているケーソン前面の有義波高の平均値を滑動していないケーソン前面の有義波高で除して求めた。また、平均滑動量と波高増大率の関係を図-12に図示した。平均滑動量が大きくなると波高増大率(平均値)は高くなり、最大値では平均滑動量0.5mで2割以上の波高増大となる場合がある。図中にも示しているが、平均滑動量と増大

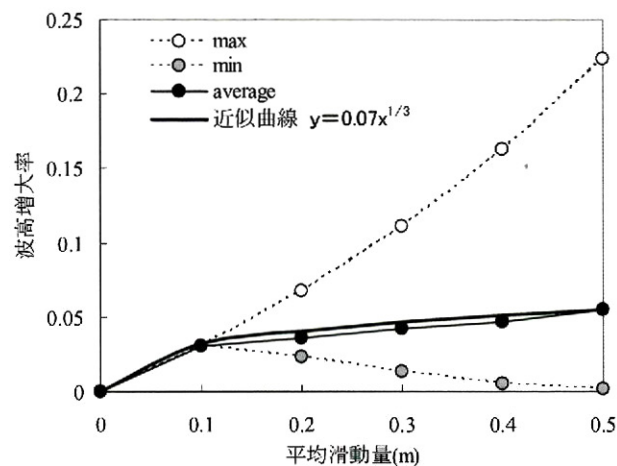


図-12 平均滑動量と波高増大率

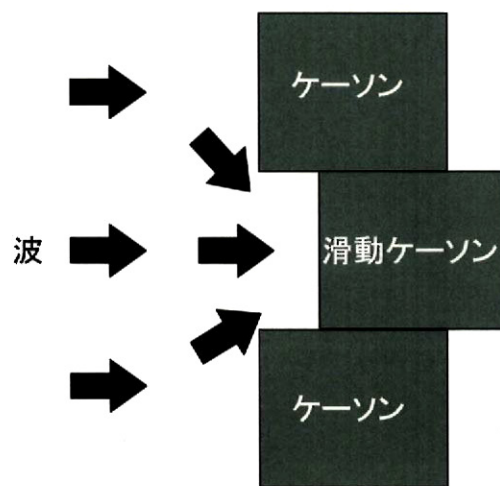


図-13 波高増大の模式図

率の関係の近似曲線を求め、次式に示す。

$$d = 0.07 \times \mu^{1/3} \times 100 \quad (4)$$

ここに、 d : 波高増大率(%), μ : 平均滑動量(m)である。

(4) 考察

このように滑動したケーソンに作用する波高が増大する要因としては、図-13のような現象が考えられる。滑動したケーソンの近傍の滑動していないケーソンに作用した波浪は、ケーソン前面で反射波を含み重複波となるため、入射波高より水位が高くなる。それと同時に滑動したケーソンの前面には波浪は到達しておらず水位は隣接面よりも低くなるため、水位の高くなった隣接面から水位の低い滑動したケーソン前面に波浪が回りこみ、滑動したケーソン前で波高が大きくなると考えられる。

しかし、今回の検討結果は、1つの波浪条件に対して実施し、また、格子幅を1mとして実施したも

のであるため、周期、波向、格子幅等によって計算結果は変わるものと思われ、今後、検証する必要がある。また、本研究で用いた波浪変形計算モデルは、越波を考慮していないモデルであるため、数%の波高増大を詳細に検討する際には、越波を考慮できるNOWT-PARI (Ver. 5) 等を用いて検討する必要があると考える。

5. おわりに

本研究での主要な知見は以下に示す通りである。

- ・ 過去 17 年程度の防波堤滑動被災事例を整理した結果、法線方向の滑動量の頻度分布は対数正規分布で近似できる。
- ・ 滑動量の空間自己相関解析の結果、相関距離は平均値としてはケーソン 1 函分程度であった
- ・ 上記の知見をもとにブシネスク方程式モデルを用いて波浪変形計算を実施し、平均滑動量と波高増大率の関係を示した。
- ・ 平均滑動量 0.1~0.5m の範囲での波高増大率は、平均的には 3%~5%程度の増大率であるが、最

大値では 3%~20%程度となる。

- ・ 波高増大の要因は、滑動していないケーソンに到達した波浪が滑動したケーソンの前面に回り込んで起こるものと考えられる。

一度の高波浪で大規模に滑動した被災事例に関しても、高波浪の来襲期間中に小規模に滑動し、滑動したケーソンによって増大した波浪が作用することで、さらに滑動が増大した可能性があるため、被災後のケーソンに作用する波高増大に関して、引き続き、詳細な検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 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：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.