

消波ブロック被覆上部斜面堤の滑動特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SLIDING DISTANCE OVER SLOPING TOP FOR CAISSON BREAKWATER WITH WAVE DISSIPATING BLOCKS

内田吉文 *・小椋 進 *・鬼頭孝明 *・西尾賢二 *・森川高德 **・近藤泰徳 **

Yoshifumi UCHIDA, Susumu OGURA, Takaaki KITOU, Kenji NISHIO, Takanori MORIKAWA and Yasunori KONDOU

The sliding distance over sloping top for caisson breakwater with wave dissipating blocks was measured by hydraulic experiment. The sliding distance of the breakwater with a sliding safety factor by an irregular wave varied with the deformation in mound around the caisson toe as well as the wave period. This study presents the diagram to estimate the sliding distance of the caisson accumulated during a storm event, the rate of the subsided wave dissipating blocks, and the rate of increase in composite wave force for sliding over the caisson, which are applicable to the operation and management of the breakwater.

Keywords : *sloping top caisson breakwater with wave dissipating blocks, wave power, sliding safety factor, sliding distance, hydraulic model experiments*

1. はじめに

平成 19 年 4 月、港湾の施設の技術上の基準が改定され、許容滑動量の考え方が導入された。これを踏まえ、本研究は、近年、外洋に面した海域で採用事例が増えている「消波ブロック被覆上部斜面堤」を対象に、滑動安全率を各種変化させた場合の、ケーソンの滑動への影響を水理模型実験により把握し、設計に資する基礎資料を得ることを目的とした。

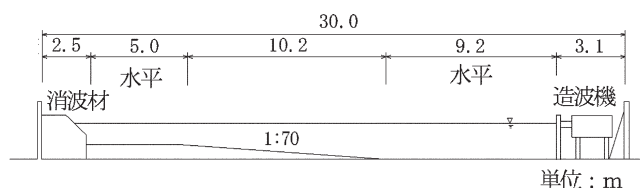
2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所が所有する長さ 30m、幅 1m、深さ 1.2m からなるピストン型単方向不規則波造波装置（吸収制御タイプ）が設置された長水路において実施した（図－1 参照）。

(2) 実験条件

実験縮尺は 1/50、潮位は H.H.W.L.+2.5 m で実施した。



図－1 実験水路

実験に用いた波の諸元は表－1 のとおりで、対象防波堤の設計波相当である $H_{1/3}=4.7\text{m}$ 、 $T_{1/3}=17.2\text{s}$ （以降、代表波と呼ぶ）を中心として、 $H_{1/3}=3.7\sim 5.7\text{m}$ の範囲で変化させた 5 種類の不規則波および代表波の $T_{1/3}$ の 1/1.5 および 1/2 に相当する 2 種類の不規則波、さらに、代表波の $H_{\max}$ に相当する規則波 1 波、計 8 種類の波を対象とした。不規則波の周波数スペクトルは、プレットシュナイダー・光易型を目標とした。

作用波数は、不規則波が 660 波、規則波は造波板からの再反射波の影響が及ばない 8 波程度とした。なお、不規則波は、いずれも波群を 3 種類変化させた。

実験対象とした防波堤は、斜面部がスリット構造（開口率 50%）で後壁を有する消波ブロック被覆上部斜面堤であり、天端高 +6.0m、前面水深 $h=-19.7\text{m}$ 、マウンド水深 $h'=-8.0\text{m}$ である（図－2 参照）。なお、海底勾配は、実験水路が持つ約 1/70 である。

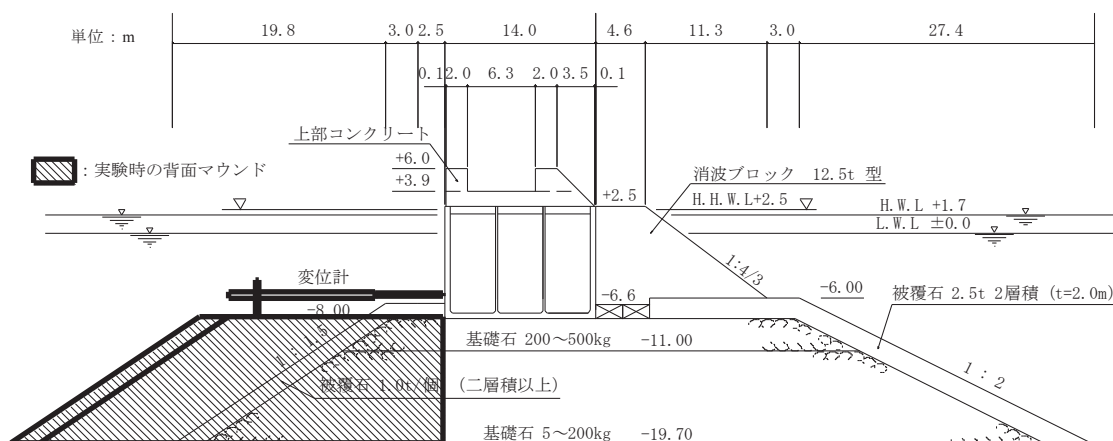
表－1 実験条件

縮尺	潮位 (m)	波の種類	波浪諸元		波数	波群	滑動 安全率
			波高(m)	周期(s)			
1/50	H.H.W.L. +2.5	不規則波	3.7	17.2	660	3	0.4, 0.46, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7, 1.0
			4.2				
			4.7				
			5.2				
			5.7				
			4.7	11.5			
		規則波	4.7	8.6			
			8.6	17.2	8	－	0.4

* 不規則波の波高は $H_{1/3}$ 、規則波の波高は $H_{\max}$ である。

* 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所

** 玉野総合コンサルタント株式会社 流域技術部



図－2 実験対象断面（背面マウンドおよび変位計設置の状況）

(3) 実験方法

実験では、幅 40cm のケーソン模型を、造波板から 20.5m 地点の水路（幅 1.0m）中央部に設置し、両端にダミー模型（幅 30cm 弱）を設置した。なお、ケーソン模型間には、0.5cm 程度の隙間を設けた。

模型は、本体が合板製、上部工がアクリル製であり、底面にモルタルを敷設して、マウンドとの摩擦係数がおおよそ 0.6 となる条件を再現した。

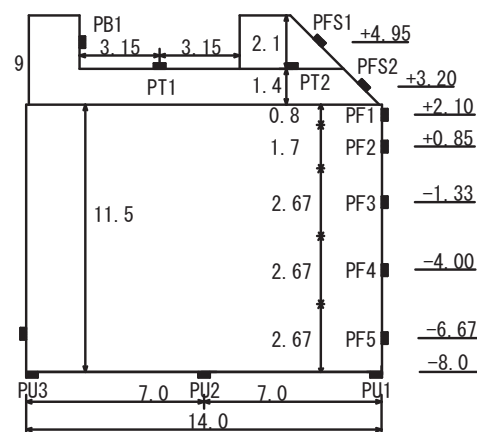
ケーソンの滑動安全率（以降、安全率と呼ぶ）を変化させた場合の滑動特性を把握するため、合田（1973）の式ほか^{1), 2), 3)}を用いて、代表波の最高波高に対する安全率が 0.4、0.46、0.5、0.55、0.6、0.7、1.0 となるケーソン質量を求め、各々、模型スケール上で質量を変化させた。

ここに、質量は、模型内の錘（おもり）の量を変化させることで調節し、重心が現地と近似するよう、模型内には柵を設けた。変位量は、ケーソン模型の背後中央下部（現地 -7.5m 付近）に設置した変位計で測定した（図－2 参照）。

また、滑動を引き起こす波力特性を同時に把握するため、図－3 に示すとおり、ケーソン前面、上面および底面に波圧計を設置して波圧強度を測定した。さらに、変位に伴って消波工が沈下することから、各ケース終了後にスタッフで消波工の高さを測定した。

実験では、はじめに波高の小さい波を 100 波程度作用させ、ケーソンとマウンドをなじませた。

不規則波実験は、波高の小さいケースから大きいケースへ向けて順次行い、原則、一番大きな波高のケースが終了するまで、ケーソンの変位は戻さず、連続して行った。ただし、変位によるケーソン後端部のマウンド変形（盛り上がり）や隣接ケーソンとの接触によって変位が抑制され、結果、当該ケースの前のケース（波高の小さいケース）よりも累計変位量が少ない場合には、ケーソンを据え直して再スタートした。ここに、前者を「連続造波」、後者を「単独造波」と呼んで、以降のデータ整理に際し、「設置条件」の違いとして区別した。なお、「単



図－3 波圧計の設置位置

独造波」には、各安全率ごとに実験をスタートした最初のケーソンも含まれる。

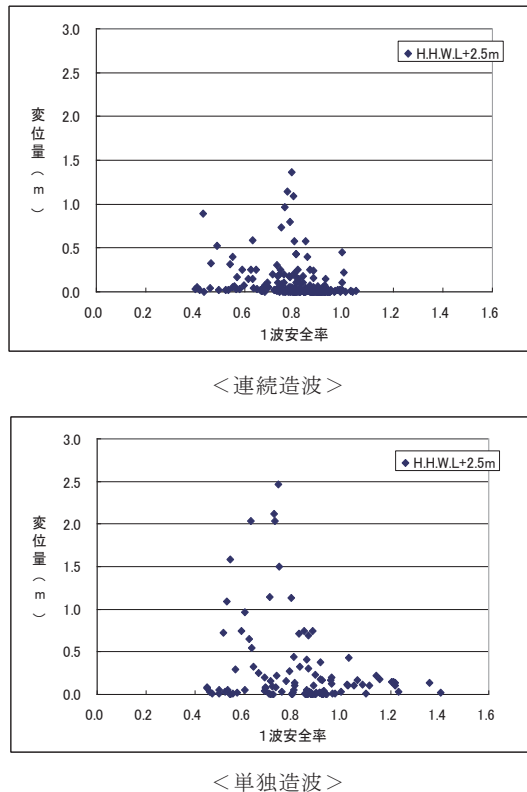
不規則波実験の解析では、660 波中の 1 波ごとの波力と変位量の関係、波力と変位量の時系列特性、周期の違いによる影響を検討した。さらに、660 波の不規則波全体（一つの擾乱）を通じた累計変位量を対象として、任意の波高、ケーソン質量に対し概算変位量を推定できる図を作成した。また、累計変位量と消波工沈下率の関係も把握した。

規則波実験の解析では、変位量と波力増大率との関係を明らかにした。

3. 実験結果および考察

(1) 不規則波 1 波ごとの変位特性

図－4 は、各ケースの 660 波中において、変位が 0.1m 以上の場合および滑動合成波力が限界値を超えた場合を、各々、最大 5 データ程度ピックアップし、その時刻の安全率と変位の関係を造波条件別に示したものである。これをみると、連続造波の場合、単独造波に比べ変位量がかなり小さくなっている。また、同じ安全率でも変位量にバラツキが確認され、安全率と変位量の関係は明瞭となっていない。この主要因は、



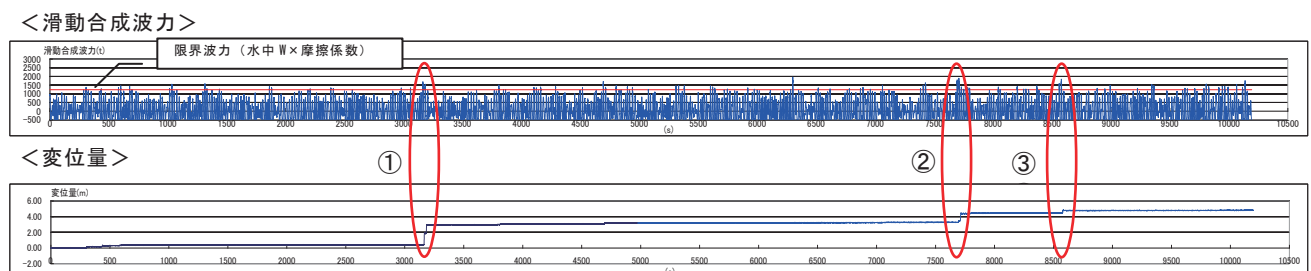
図－4 不規則波 1 波ごとの安全率と変位量の関係

連続造波ではケーソンの据え直しを行わないため、ケーソン後端のマウンドが徐々に変形し、かつ、その変形度合いがケースによって異なるためである。ただし、同じ安全率におけるバラツキは、連続造波に比べ単独造波の方が明瞭に確認される。

(2) 滑動合成波力と変位の時系列特性

1) 全体特性

図－5 は、単独造波のケースにおける滑動合成波力と変位量の時系列変化を示したものである。これをみると、主な変位は、滑動合成波力が限界値（赤線：水中ケーソン質量×摩擦係数）を大きく超えたタイミングで発生していることがわかる（図－5 ①～③）。その変位量をみると、時間の経過とともに小さくなっている。この主な要因は、変位するたびに、マウンドの変形が進むためと考えられる。これが、先述した単独造波での「同じ安全率における変位量のバラツキ」の一つの要因である。



図－5 滑動合成波力と変位の時系列（安全率 0.4）

また、1 波ごとの周期の違い（＝波力の作用時間）でも変位量が異なることを確認しているほか、波の作用により時々刻々変化するわずかなマウンド状態の変化も変位量に影響していると考えられる。よって、1 擾乱におけるケーソンの滑動特性を評価するためには、不規則波全体の累計変位量を把握する必要がある。

2) 詳細特性

ここでは、波力と変位の時系列特性をもう少し詳細に検討する。図－6 は、先のケースにおいて有意な変位が発生した時刻（図－5 中の①のタイミング）における各種波力、変位の時系列をピックアップしたものである。

これをみると、滑動合成波力と水平波力のピークがわずかに異なっている。これは、水平波力がピークとなった時刻に、鉛直上向き波力が急減して滑動合成波力が下降に転じてしまうためである。その結果、ピーク値は滑動合成波力＜水平波力の関係になっている。ここに、水平波力ピーク時に、鉛直上向き波力が急減した要因は、上部工天端から下向き波力が有意に働いたためである。

この波力は、押し波時に波の先端がスリットを通じて上部工天端に入り込み、波の峰がケーソン前壁に到達（＝水平波力ピーク時）したときには、上部工上に水塊が溢れかえることで発生するもので（図－6 赤囲み）、今回のように、スリットと後壁がある構造で有意に発生する波力といえる（スリットがなければ、水平波力がピークになる前に水塊が入り込めない。また、後壁がなければ水塊は溜まらない）。なお、本波力は比較的長時間作用しているが、これは、溜まった水塊がスリットを通じて流出するのに時間を要するためである。

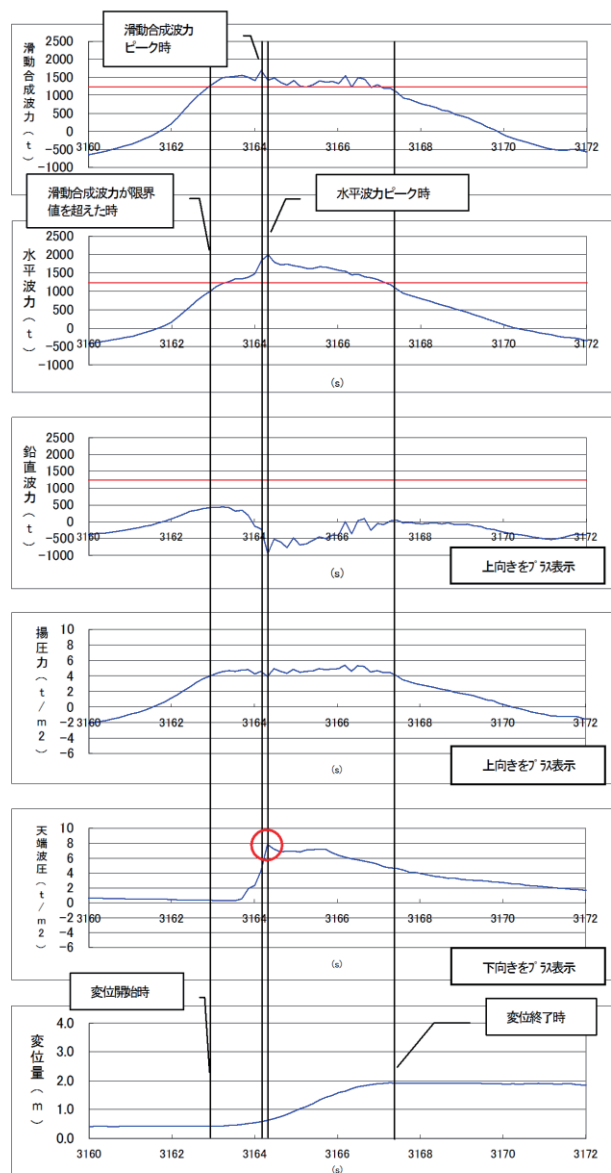
上記の鉛直下向き波力が作用した結果、滑動合成波力は水平波力を 15% 程度下回っており、後壁を有する本構造は、滑動に対し非常に有利なものと判断される。

3) 周期の影響

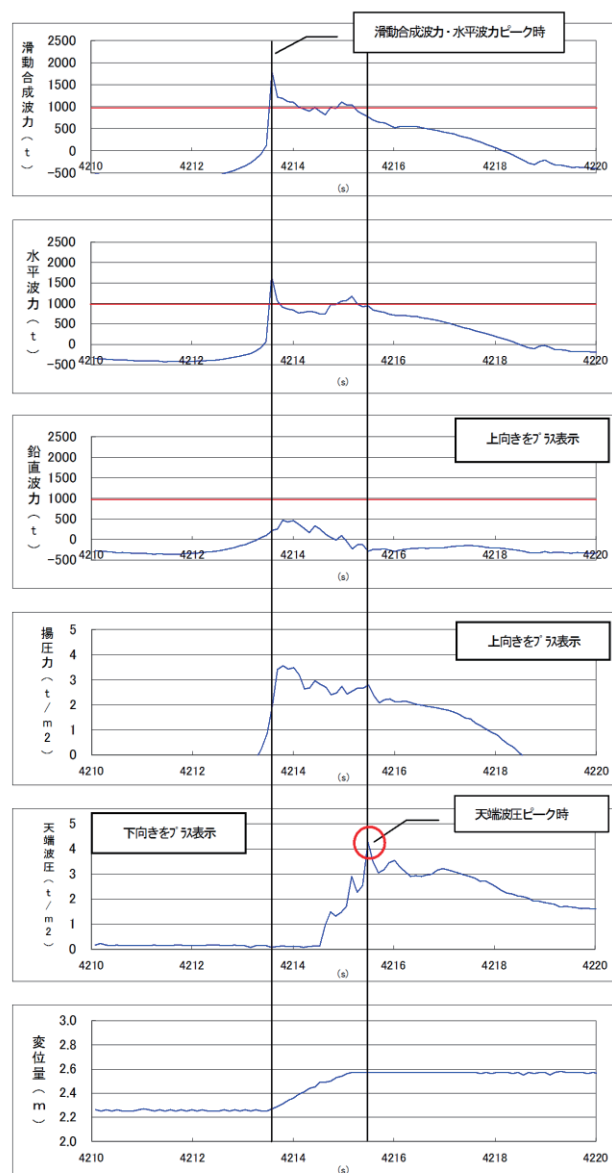
図－7 は、先の図－6 と同様、有意な変位が発生した時刻の各種波力、変位時系列を代表波の 1/1.5 周期（11.5s）についてピックアップしたものである。

これをみると、1/1.5 周期の場合、代表波と異なって水平波力と滑動合成波力のピーク時刻は一致し、かつ、滑動合成波力＞水平波力の関係となっている。

これは、1/1.5 周期の場合、波長が短く、かつ、波形が前傾となることで、上部工への水塊の進入時刻が遅くなり、結果、



図－6 各種波力と変位の時系列 ($T1/3=17.2$ s)



図－7 各種波力と変位の時系列 ($T1/3=11.5$ s)

鉛直下向き波力のピーク時刻が水平波力のそれから大幅に遅れるためである（図－7 赤囲み）。

なお、周期が短い場合、1波ごとの変位量が代表波に比べ小さい代わりに、ケーソン後端のマウンド変形も少なく、1/2周期では、660波の累計変位量が代表波のそれを上回る場合があることが確認されている。

以上を総括すると、本防波堤のように、上部工にスリットと後壁を有する構造の場合、周期が長い条件では、波力低減効果が有意に働くとともに、1波による変位量が多い分、ケーソン後端のマウンド変形も進むため、一擾乱としての累計変位量は抑制されやすいといえる。

(3) 概算累計変位量推定図

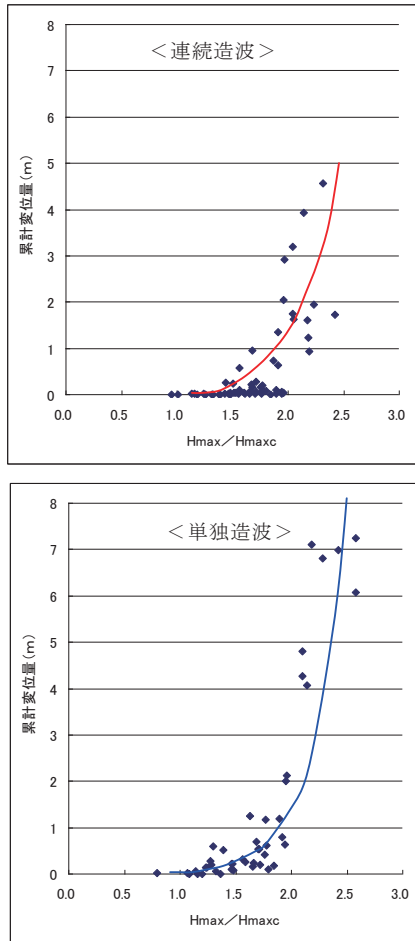
図－8 は、実験結果をもとに作成した H_{max}/H_{maxc} 比と

累計変位量の関係である。ここに、 H_{maxc} は、任意のケーソン質量に対し、安全率 1.0 となる最高波高である。本図より、設置条件別（連続造波：既に変位のある防波堤に適用、単独造波：新設または変位の無い防波堤に適用）に、一擾乱における任意の最高波高、任意のケーソン質量に対する概算累計変位量を推定することが可能となる。

ここに、本図の適用範囲は表－2 のとおりである。

表－2 変位量推定図の適用範囲

波形勾配 $H'_0/L_0=0.010$ 程度
水深帯：重複波領域
防波堤タイプ：消波ブロック被覆上部斜面堤



図－8 任意の最高波高、ケーソン質量における累計変位量推定図

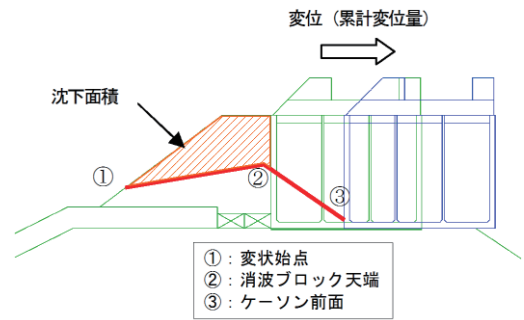
(4) 維持管理に資する消波工の沈下特性および波力の増大特性

1) 変位に伴う消波工の沈下特性

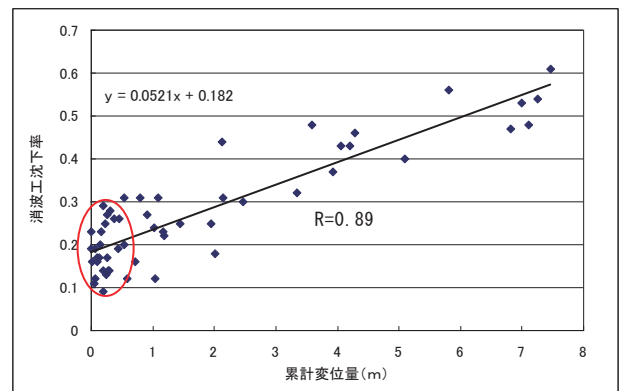
本防波堤は、消波ブロック被覆構造のため、ケーソンの変位に伴って徐々に消波工の天端が沈下する。実験では、1 ケース（660 波）終了ごとに消波工形状をスタッフにて測定し、概略の沈下面積を把握した。ここに、消波工形状の測定は、原則、図－9 に示す①～③の位置で行い、沈下面積は初期形状からの差分として図－9 のオレンジ部分とした。

図－10 は、「単独造波」で実施したすべてのケースを対象に、累計変位量と消波工沈下率の関係を示したものである。ここに、消波工沈下率とは、初期面積と沈下面積の比を表したものである。これをみると、累計変位量と消波工沈下面積は概ね比例関係にあり、相関係数も約 0.9 と高い値を示している。なお、累計変位量が概ね 1m 未満では、消波工沈下率のバラツキが大きくなっている。また、変位量がほとんどないケースでも沈下が発生している。この要因は、波の作用により法肩付近の消波ブロックが移動する場合があるためである（図－10 赤丸）。

本図を用いることで、防波堤の変位に伴う消波工の沈下量が推定でき、滑動変位にかかる復旧の数量や工費の試算が可能となる。



図－9 消波工形状の測定位置および消波工沈下面積の考え方



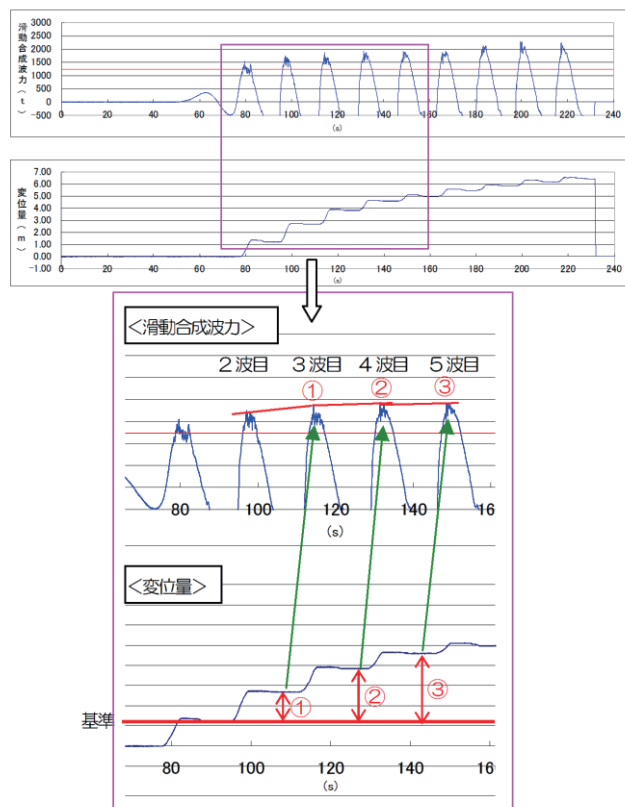
図－10 累計変位量と消波工沈下率の関係

2) 変位に伴う波力の増大特性

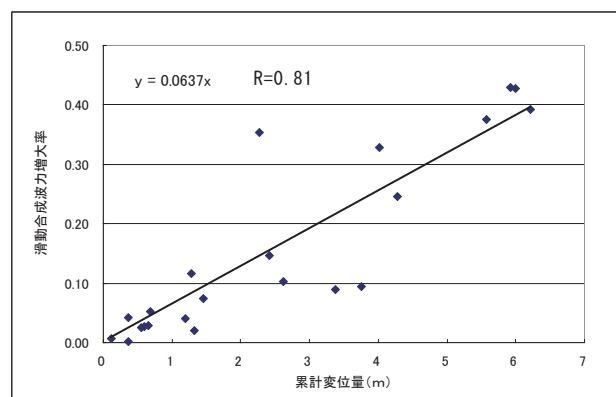
図－11 は、安全率 0.4 での規則波による滑動合成波力と変位量の時系列を示したものである。これをみると、波力は時間の経過とともに漸増している。これは、主にケーソンの変位によって前面の消波ブロックが徐々に沈下したためである。なお、変位量はマウンド変形によって 1 波ごとに小さくなっていることが確認できる。

次いで、本時系列のうち、波高が目標値に達し、かつ、優位な変位がある 2 波目から 5 波目をピックアップし、累計変位量と波力増大率の関係を整理した。具体的には、「ケーソンの変位⇒消波ブロック沈下⇒波力増大」という考えのもと、波力と変位量の関係は図－11 下段のとおり、①－①、②－②、③－③のペアとした。波力増大率は、「(各波力－2 波目波力) / 2 波目波力」として求めた。

図－12 は、同様の考え方で作成した累計変位量と滑動合成波力増大率の関係図である。これをみると、累計変位量と波力増大率は比例関係にあり、相関係数は 0.8 と高い値を示している。本図を用いることで、防波堤の変位に伴う滑動合成波力の増大率が推定でき、今後の滑動の可能性を判定できるばかりでなく、前項に示した連続設置版の累計変位量推定図と組み合わせることで、次の擾乱による累計変位量の試算も可能となる。



図一 11 規則波における滑動合成波力と変位の時系列 (安全率 0.4)



図一 12 累計変位量と滑動合成波力増大率の関係

4. 主要な結論

本研究で対象とした後壁とスリットを有する消波ブロック被覆上部斜面堤の滑動特性に関する主要な結論は、以下のとおりである。

- ①不規則波 1 波ごとの変位量は、そのときの波力 (=安全率) が同じでも異なり、その要因は二つある。一つめは、変位が生じるごとにケーソン後端のマウンド変形が進展し徐々に動きにくくなること、二つめは 1 波ごとに周期が異なることである。
- ②周期 (=波長) が長い条件では、水平波力のピーク時刻に上部工スリット部を通じて天端上へ進入した水塊によって鉛直下向き波力が有意に作用するため、滑動合成波力は減少に転じることが確認され、本防波堤は滑動に対し有利な構造となる。
- ③短周期の場合は水塊の進入が遅れるため、ピーク滑動合成波力は低減しない。また、1 波ごとの変位が小さい分、マウンド変形も少ないため、累計変位量は長周期時に比べ大きくなる可能性がある。
- ④実験結果をもとに、1 擾乱における任意の波高、ケーソン質量に対する概算累計変位量推定図および維持管理に資する累計変位量と消波工沈下率、波力増大率の関係図を作成した。

参考文献

- 1) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究、港湾技研報告、第 12 巻 第 3 号、pp.31~69、1973.
- 2) 佐藤孝夫ら：消波ブロック被覆上部斜面堤の水理特性・那覇港大水深域における新構造防波堤の開発、海岸工学論文集、第 39 巻、pp.556~560、1992.
- 3) 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎：消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重、港湾技研報告、第 29 巻 第 1 号、pp.53~75、1990.