## 消波工の変形過程が波力低減効果の変化に及ぼす影響

Effects of Deformation of Wave-Dissipating Works on Wave Forces Acting on Caisson Breakwaters

# 久保田真一<sup>1</sup>・山本方人<sup>2</sup>・松本 朗<sup>1</sup>・半沢 稔<sup>3</sup>・荒木進歩<sup>4</sup>・出口一郎<sup>5</sup> Shin-ichi KUBOTA, Masato YAMAMOTO, Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA Susumu ARAKI and Ichiro DEGUCHI

The evaluation of wave forces acting on caisson breakwaters with deformed wave-dissipating works is important from the view point of caisson sliding. Wave pressures and wave forces acting on caisson breakwaters were measured to investigate the effect of the deformation of the wave-dissipating works on wave pressures and wave forces. Several cross sections of wave-dissipating works defined based on the previous study. When the crown of wave-dissipating work settles near the still water level, the impulsive wave pressure occurs and leads to increase in wave force. This wave force increases with progress of wave-dissipating works deformation indicated with a settlement of crown and decrease in the width of wave-dissipating works.

## 1. はじめに

構造物の設計は、性能設計体系への移行が進められて いる. 混成堤についてはケーソンの滑動量を考慮した設 計法(例えば下追ら, 1998)が確立されてきているが、 消波ブロック被覆堤に関しては検討の余地が残されてい る. すなわち, 消波工の変形過程を予測し、消波工の変 形に応じたケーソン作用波力を評価する必要があるが、 既往の研究では、消波ブロックの被災を全て天端の沈下 で置き換えるモデル化(例えば山縣ら,2002)が行われ いる.しかしながら,著者らの研究(久保田ら,2009) によれば, 消波工の被害は I 天端に集中する場合, Ⅱ法 面に集中する場合、Ⅲ天端と法面で発生する場合に分類 され、Ⅱ・Ⅲのケースでは既存のモデル化に基づく波力 は適切な値を与えない恐れがある.よって、実際の被災 断面に基づき,ケーソン作用波力の検討を行う必要があ る.既に筆者らは、消波ブロック被覆堤を対象とした安 定実験により消波工被災断面の高精度な測定を行い、そ の変形過程を天端の沈下と水平方向の消波工厚さの変化 で示している. そこで, 消波工の変形過程に基づき決定 した被災断面形状を対象として、断面形状とケーソンに 作用する波圧・波力の関係についての知見を得ることを 目的として,波圧・波力測定実験を実施した.

1 正会員         工修         (株)不動テトラ         総合技術研究所           2         工博         (株)不動テトラ         総合技術研究所長           3 正会員         工修         (株)不動テトラ         ブロック環境事業者           4 正会員         博(工)         大阪大学         准教授         大学院工学研究科           5 正会員         工博         大阪大学         教授         大学院工学研究科
---

## 2. 波圧・波力測定実験

## (1) 検討断面

久保田ら (2009) で得た, 消波工の水平減少率 ( $l' / l_o$ ) と天端沈下率 ( $\eta' / h_c$ ) に基づいて被災断面を模擬した. ここで,水平減少率 ( $l' / l_o$ ) とは被災断面における静水 面での水平方向の消波工厚さの減少量 (l') と被災前の 消波工厚さ ( $l_o$ ) の比であり,天端沈下率 ( $\eta' / h_c$ ) とは 被災断面における天端中央での鉛直方向の沈下量 ( $\eta'$ ) と被災前の静水面から消波工天端までの高さ ( $h_c$ ) の比 である (図-1参照). 図-2に相対天端高 $h_c / H_0$ =0.6 ( $h_c$ :



図-1 水平減少率および天端沈下率



œ.



消波工天端高,  $H_D$ :消波ブロックの安定限界波高)にお ける水平減少率と天端沈下率の関係を示す. 白丸(〇) は安定実験時の実測断面より得られた値であり,その近 似線を実線で示している. 被災断面は,実測断面の近似 線を用いて模擬することとし,黒丸( $\oplus$ )で示すように, 水平減少率が0.25毎 ( $l'/l_0=0.25$ , 0.50, 0.75, 1.00)に4断 面を設定した. 表-1に検討断面を示す. 久保田ら(2009) で実測した消波工の変形形状は,ほぼ直線的であった. そこで,消波工の法面形状は直線で模擬することとした. 鹿島ら(1992,1993a, 1993b)は、消波工( $h_c/H_D=1.41,2.19$ ) の変形形状について、「天端が低い」場合や「作用波高 が大きく変形が著しい」場合は、変形形状が直線的にな ることを報告している。久保田ら(2009)の実験条件は, 鹿島らの実験と比較して相対的に「天端が低く」「作用 波高が大きく変形が著しい」場合に相当している.

#### (2) 実験方法

実験は、(株)不動テトラ所有の二次元造波水路(長 さ55m,幅1.2m,高さ1.5m)を用いて行った.実験断面を 図-3に示す.水路内の勾配1/30のモルタル床上に,消波 ブロック被覆堤模型を設置し,ケーソン(アクリル製)





表-2 実験条件

設計相対天端高 hc/Ho	0.60		
水深 h	36.5cm		
天端高 hc	6.8cm		
天端幅 B'	8.7cm		
使用ブロック 質量 M 密度 P <sub>r</sub> 代表径 D <sub>n</sub> (=(M/P <sub>r</sub> ) <sup>1/3</sup> ) 安定限界波高 H <sub>D</sub>	テトラポッド 124.3g 2.352g/cm <sup>3</sup> 3.75cm 11.3cm		
波浪種別	規則波	不規則波	
周期	<i>T</i> =1.87s	T <sub>1/3</sub> =1.87s	
波高	$H=8 \text{cm} \sim 28 \text{cm}$ (H/h=0.21 $\sim 0.77$ )	$H_{1/3}=10 { m cm} \sim 20 { m cm} \ (H_{ m max}/h=0.52 \sim 0.91)$	

に作用する波圧を波圧計(PG1~PG8)で,波力を3分 力計で計測した.なお、ケーソンと消波工の間に0.5cm のクリアランスを設け,消波工として用いたテトラポッ ドが直接波圧計に接触するのを防いでいる.ケーソンは, 波圧計測用と波力計測用に分かれており(図-4参照), 波圧計,3分力計をそれぞれ取り付けた.表-2に実験条 件を示す.実験は,規則波および不規則波で行い, 1000Hzでデータをサンプリングした.規則波実験で,波 圧および波力の基本的な特性を把握した後に,不規則波 実験において,消波工の断面形状と作用波力の変化につ いて検討することとした.不規則波実験では,修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する実験波を約1000 波作用させている.

## 3. 規則波実験における波圧・波力の特性

#### (1) 波圧の時系列

既往の波力算定法においては、静水面位置における波





圧が波力算定の基準とされている.図-5に静水面位置 (PG6) で測定された波圧の時系列の一例を断面形状毎に 示す. 消波工の変形が進むと、波形のピークが鋭くなり、 波圧の最大値も大きくなることが分かる. 初期断面から 被災断面②では,波圧波形に大きな変化は見受けられな い.しかしながら、被災断面③以降では、波形が急激に 立ち上がり、衝撃的な波圧が発生していることが分かる. 被災断面③は、消波工天端がほぼ静水面に位置しており、 これまで指摘されているように、衝撃的な波圧が発生し やすい条件といえる.図-6に被災断面③の波圧時系列 (PG1~PG8)の一例を示す.縦軸は,波圧pをρgH (ρ:水の密度, g:重力加速度, H:波高)で無次化した 値を示しており、横軸は時刻tを周期Tで無次元化してい る. 図中には初期断面での波圧も点線で示した. 被災断 面③では初期断面と比較して静水面位置での波圧(PG6) が増大しているのみでなく、静水面下の消波工で被覆さ れている箇所(PG1~PG5)においても波圧の増大が生 じていることが分かる. 関ら(2009)の指摘にもあるよ うに、衝撃波圧発生時は、局所的な衝撃力だけでなくケ ーソン全体の作用波力の増大を引き起こすといえる.

#### (2) 衝撃波圧成分と重複波圧成分の発生状況

静水面位置の波圧に着目し,波圧時系列で確認された 衝撃波圧成分や重複波圧成分(図-7参照)が被災断面形 状に応じてどのように変化するかを検討した.図-8に波 圧時系列より得られた衝撃波圧成分および重複波圧成分 の値を示す.縦軸は,波圧pをpgHで無次化した値を示 しており,横軸は波高水深比H/hである.各波圧成分の 値は,規則波において解析対象とした5波の平均値であ る.衝撃波圧成分は,H/hに比例して増加していること が分かる.このことは,関ら(2009)が指摘しているよ









うに、衝撃波圧を考慮した設計公式における衝撃波圧係 数のα<sub>m</sub>が波高に比例することに対応するものと考えられ る.消波工断面毎の増加の割合に着目すると、被災の進 行に伴い増加の割合が大きくなり、断面天端がほぼ静水 面に位置する被災断面③および天端が没水した被災断面 ④においては著しい増加が確認できる.すなわち、消波 工の断面形状が衝撃波圧成分の変化に及ぼす影響は大き いといえる.一方、重複波圧成分は*H/h*の増加に伴い減 少するが、被災断面毎の変化はほとんど無く、消波工の 断面形状が重複波圧成分の変化に及ぼす影響は小さい.

#### (3) 波力の発生状況

図-9にケーソンに作用する水平波力F<sub>H</sub>を断面形状毎に 示す.縦軸は,各断面の無次元水平波力(F<sub>H</sub>/pgHA,A: 波力作用面積)を初期断面の無次元水平波力で除した水 平波力比F<sub>H</sub>,であり、横軸は波高水深比(H/h)である. H/hが0.4にいたるまでは、各断面の差はほとんどない. H/hが0.4以上では、各断面毎のF<sub>H</sub>'の差異が顕著となる. 被災断面①から被災断面④へと被災の規模が大きくなる につれF<sub>H</sub>'も増加しており,被災断面④では初期断面に 対して最大で2.3倍程度の波力が作用している.図-10に、 波力波形の時系列の一例(H/h=0.77)を示す。初期断面 に作用する波力を実線で、被災断面①から被災断面④に 作用する波力を点線で示している. 被災が進行するにつ れて衝撃波力成分は大きくなる. 重複波力成分は、衝撃 波力成分と比較して大きな変化はなく,いずれの被災断 面においても初期断面とほぼ同様の波形となっている. すなわち、波力でも波圧と同様に、消波工の断面形状が 衝撃的な成分の変化に影響を及ぼすといえる.図-11に 各断面の衝撃波力成分の波力比と重複波力成分の波力比



図-12 波力全成分および重複波力成分の力積 (H/h=0.77)

を示す. 被災断面に作用する衝撃波力成分はH/h=0.4を 越えると増加しており,図-9に示した断面毎の波力比の 差異がH/h=0.4を越えると顕著となる傾向と一致する.

#### (4) 衝撃波力成分と重複波力成分の力積値

以上において、衝撃波力成分が、断面形状に応じて変 化すること示した.しかしながら、その作用時間は短く、 波力作用の結果として生じるケーソンの挙動は、衝撃波 力成分により変化する波力のピーク値ではなく力積の大 きさに支配されると考えられる.図-12に、波力時系列よ り算出した力積の一例を示す.波力の力積に占める割合 として、重複波成分の割合が大きいが、重複波成分の波 形は断面形状による変化がほとんどないため(図-10参 照)、力積も断面形状によらずほぼ一定となっている.全 成分と重複波成分との差が衝撃波力成分である.重複波 成分と比較して、全体に占める割合は小さいものの、衝 撃波力成分の変化が全体の変化を引き起こすとともに、 被災断面④においては力積の衝撃波力成分が全成分の約3 割に達しており、ケーソン挙動の観点からも、断面変形 に応じた衝撃波力成分の見積もりが重要といえる.

## 不規則波実験における消波工断面形状と作用 波力の関係

## (1) 波力の発生状況

図-13に波力の発生状況を断面形状毎に示す.縦軸は, 各断面の無次元水平波力(F<sub>H</sub>/(ρgH<sub>max</sub>A))を初期断面の 無次元水平波力で除した水平波力比(F<sub>H</sub>')であり,横 軸は波高水深比(H<sub>max</sub>/h)である.図中には,規則波実 験で得られた水平波力比の値も細線で示している.不規 則波実験と規則波実験では対象とした波高水深比の範囲 が異なるが、 $F_{H}$ 、の傾向は合致しており、被災断面①か ら被災断面④へと変化するにつれ $F_{H}$ 、は増大している. 別途計測した堤体反射率の変化は、2~5%程度であった. 断面形状によらずほぼ同様の波が来襲しており、 $F_{H}$ 、の 変化は消波工断面形状の変化によるといえる. $F_{H}$ 、と  $H_{max}/h$ の関係を見ると、 $H_{max}/h$ が0.7付近で被災断面③お よび被災断面④の $F_{H}$ 、が急激に増加している.図-14に衝 撃波力成分および重複波力成分を無次元化した値を示 す. $H_{max}/h$ が0.7付近で衝撃波力成分が増加しており、規 則波と同様に、波力の変化は衝撃波力成分の変化に起因 することが分かる.

#### (2) 消波工断面形状の変化と波力変化の関係

不規則波におけるF<sub>H</sub>'とH<sub>max</sub>/hの関係(図-13参照)を



図-13 ケーソンに作用する水平波力(不規則波,規則波)







踏まえ, 消波工の変形の程度を表す天端沈下率および水 平減少率に着目して $F_H$ 'を整理した.図-15は水平減少率  $l'/l_0$ および天端沈下率 $\eta'/hc \ge F_H$ 'の関係を示している.  $H_{max}/hが0.6$ 以下と0.7以上の場合で,水平減少率および 天端沈下率が波力比に与える影響が異なることが分か る.またこの傾向は,被災断面③に相当する水平減少率 が0.75,天端沈下率が0.98(静水面における消波工幅が初 期断面の3/4まで減少し,消波工天端が静水面付近まで 沈下)にいたると顕著となり, $H_{max}/hが0.7$ 以上の場合, 初期断面に対して最大で1.9倍程度の波力が作用するこ とを示している.さらに被害が進行して消波工天端が没 水すると,初期断面に対して2.3倍程度にまで波力が増 大する.

### 5.おわりに

本研究では,消波工の断面形状とケーソンに作用する 波圧・波力の関係についての知見を得ることを目的とし て,消波工の被災断面を模擬し,波圧・波力測定実験を 行った.主要な結論は以下のとおりである.

- ①消波工の変形が進むと波圧波形のピークが鋭くなり、 消波工天端が静水面近傍に位置する場合には、衝撃的 な波圧が発生する。
- ②衝撃波圧・波力成分の大きさは消波工の断面形状に依存する.重複波圧・波力成分は,消波工の断面形状の影響を受けにくい.
- ③初期断面に対する被災断面の波力増大の割合を把握した.波高水深比に応じて、断面形状が波力に及ぼす影響が異なる.このことは、衝撃波力成分の変化に起因する.

#### 参考文献

- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1992) :安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機 能の変化について,海工論文集,第39巻, pp.671-675.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1993a):安定限界を越える人工島防波護岸の耐波安定性 と越波特性,海工論文集,第40巻, pp.686-690.
- 鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷 修(1993b):不規則波に対する消波ブロック被覆工の変 形量評価式について,海工論文集,第40巻, pp. 795-799.
- 久保田真一・山本方人・松本 朗・半沢 稔 (2009): 消波ブ ロック被覆堤における消波工の変形過程に関する研究, 海工論文集,第56巻, pp.906-910.
- 関 克己・有川太郎・水谷雅裕(2009): 消波ブロック被覆堤 における消波工被覆状態の波圧に及ぼす影響,海工論文 集,第56巻, pp. 816-820.
- 下追健一郎・高橋重雄(1998):期待滑動量を用いた混成防波 堤直立部の信頼性設計法,港研報告, Vol.37, No.3, pp. 3-30.
- 山縣延文・西原考美・中山政勝・上原幸生・富安良一・半沢 稔 (2002):災害に強い港湾構造物の考察,海工論文集, 第49巻, pp.916-920.