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 Experimental Study for Wave Pressure of the Covering State of Wave-Dissipating Blocks

関 克己¹·有川太郎²·水谷雅裕³

Katsumi SEKI, Tarou ARIKAWA and Masahiro MIZUTANI

Reliability design of maritime structures based on the deformation level will be one of the most important future design tools. However, it has not been fully applied to actual design since it is very difficult to take the various design condition into account. The present paper points out on the basis of the experimental results, the influences of the state of wave-dissipating blocks on the wave pressures at several cross sections of a breakwater, and the stochastic characteristics of obtained data was examined. 1) The covering condition of wave-dissipating blocks makes a significant influence of the wave pressure acting on the block layer. 2) When the impulsive wave breaking is generated, wave pressure p_1 on the still water level becomes proportional to the square of the wave height. Then the numerical wave flume (CADMAS-SURF/2D) was applied for the covering state of wave-dissipating blocks.

1. はじめに

消波ブロック被覆堤など,消波工により被覆された海 岸構造物は数多く存在する.消波工は,完成断面の状態 を保っていれば波圧低減に大きく寄与するが,消波工の 沈下や飛散に伴い,不完全被覆状態になった場合には衝 撃波圧が発生し,消波工を施工しない場合に比べても大 きな波圧が作用することが知られている.これがケーソ ン本体の滑動,破損などの被災の原因となる(例えば五 明ら,1995,1997).また,消波工の不完全被覆状態は 消波工の施工途中,平面不連続部などにも起こる.

消波工の不完全被覆状態に関する既往の研究として は、施工途中を対象としたものとして鴻上・時川(1970) が、平面不連続部を対象としたものとして塩見ら(1994)、 消波工の沈下・飛散に伴う天端高が低下した状態を対象 としたものとして高橋ら(2000)がある.これらの研究 において、消波工不完全被覆状態における波圧・波力増 大の影響を調べており、また塩見ら(1994)、高橋ら (2000)では不完全被覆状態における波圧算定方法を提 案している.

本研究では、塩見ら(1994),高橋ら(2000)に倣い、 消波ブロック被覆堤を対象とし、その消波工の断面を変 化させた場合(不完全被覆状態)の断面水理模型実験を 行い、その被覆状態が波圧に及ぼす影響について検討を 行う.また、今後の構造物の耐波性能設計において重要 なツールとして考えられる数値波動水槽の、消波工の不 完全被覆状態への適用性について併せて検討する.

1	正会員	博(工)	(独)港湾空港技術研究所耐波研究チーム
2	正会員	博(工)	特別研究員 (独)港湾空港技術研究所耐波研究チーム
	7.4.4	$hr(\tau)$	主任研究官
3	止会貝	修(上)	(独)港湾空港技術研究所



2. 実験概要

実験は当所所有の105m水路(長さ105m,幅3m,高さ 2.5m)において行った(図-1参照).この水路は途中から幅0.8mで,側面に観測窓を有する主水路と,幅2mの 副水路に分割されており,今回の実験では主水路を使用 している.

実験を行った消波ブロック被覆堤の基本となる完成断 面は、天端2層積みの消波ブロック被覆堤(図-2の case01)であり、この完成断面を基準として、ブロック 一段分ずつ天端高を下げていきながら実験を行った.こ のとき、実験の縮尺は1/25を想定しており、使用した消 波工は1.8kgのテトラポッド(現地換算約30t)である. 表-1には実験断面の諸量を示す.

実験には規則波を用いる. 周期は2.0s, 3.0s, 4.0s(現

表-1	実験断面諸量	
(*case00の消波工天端水	、深および天端幅はマウンドの	値)

断面	水深	ケーソン 天端高	消波工 天端水深	天端幅	ブロック 個数
case	h [m]	h _c [m]	d [m]	B _M [m]	個
00	0.59	0.27	*0.43	*1.22	0
01	0.59	0.27	-0.27	0.29	232
02	0.59	0.27	-0.15	0.44	216
03	0.59	0.27	-0.04	0.59	191
04	0.59	0.27	0.08	0.75	157
05	0.59	0.27	0.19	0.90	107
06	0.59	0.27	0.29	1.03	72

表-2 入射波条件

水深	波高	周期	波高水深比	KD值
h [m]	H [m]	T [s]	H/h	M=1.8kg
	0.077	2.0	0.13	0.10
	0.108	2.0	0.18	0.29
	0.140	2.0	0.24	0.63
	0.185	2.0	0.31	1.45
	0.224	2.0	0.38	2.57
	0.278	2.0	0.47	4.94
	0.324	2.0	0.55	7.82
	0.125	3.0	0.21	0.45
0.50	0.188	3.0	0.32	1.53
0.59	0.240	3.0	0.41	3.17
	0.301	3.0	0.51	6.27
	0.363	3.0	0.62	10.99
	0.045	4.0	0.08	0.02
	0.083	4.0	0.14	0.13
	0.131	4.0	0.22	0.52
	0.200	4.0	0.34	1.84
	0.262	4.0	0.44	4.13
	0.364	4.0	0.62	11.03

地換算で10.0s, 15.0s, 20.0s)とし,波高は周期毎に設 定している.表-2に入射波条件およびハドソン公式にお ける安定数K_D値を示す.作用波数は各周期で200波とし ており,以下で示すデータの波別解析および平均値等の 計算にはその中の100波のデータを用いて計算している. なお,波高が0.20mを超えるケースでは主水路と副水路 での反射率の違いによる影響が大きく,水路幅方向の変 動が顕著になるため,作用波数100波で2回計測しデー タを取得している.

計測は水面変動取得用に波高計を6台,波圧計を堤体 前面に4台,底面部に2台の計6台(図-2参照)設置して データを計測している.データサンプリングは1000Hzで ある.なお,波高計のうち1台(図-1中のWG6)は,副 水路側の堤体前面位置に対応する位置に設置しており, 通過波データとして使用する.

3. 実験データに基づく被覆状態の波圧に及ぼす 影響

ここでは実験データに基づき, 消波工の被覆状態が波



圧に及ぼす影響について,波圧時系列および静水面にお ける波圧最大値に関して検討する.また,併せて規則波 実験における波圧最大値の出現確率および変動係数につ いて示す.

(1) 波圧時系列データによる比較

図-3に波高0.278m,周期2.0sでの静水面位置に設置した波圧計の時系列を示す。各ケースのデータは同期をとって図化している。図は最上段から消波工無しのcase00,2段目は完全被覆状態であるcase01であり,以下天端を一段ずつ下げて行った場合(case02~06)が示してある。今回の実験は水深0.59mで行っており,case03の状態がほぼ静水面と消波工天端位置が一致するケースになる。

図から分かるように、天端を下げるにつれて波圧波形 の前面の立ち上がりが鋭くなり、この入射波条件では case04からそれ以上天端を下げた場合に衝撃的な波圧が 発生している.この時消波工無しの状態と比較して3倍 程度の最大値となる.

図-4には衝撃波圧発生時のケースとしてcase04での堤 体前面における波圧時系列データを示す.併せて衝撃波



圧が発生していないケースとして case02 による波圧波形 も示している.一番高い位置に設置した波圧計(PG1) を除き, case02, case04 どちらのケースでも消波工に被 覆されている波圧計(PG3, PG4)においても衝撃波圧 発生時には波圧増大が見られる.つまり,局所的な衝撃 力だけでなくケーソン全体に作用する波力が増大するこ とになる.

図-5には波高がほぼ同じ場合で周期が異なるケースと して波高0.262m,周期4.0sのケースを示す.周期2.0sの ケースと比較すると,天端を下げた場合に波形前面が切 り立ってくる傾向は同様であるが,その変化は周期2.0s のデータと比較して緩やかであり,周期が長くなると相 対的に被覆状態の影響を受けにくいことが分かる.

(2) 静水面における波圧最大値の出現確率

ここでは,波圧最大値の出現確率に着目した検討を行う.なお,以下に示すデータは静水面に対応する位置に 設置した波圧計(PG2)のデータである.静水面におけ る波圧最大値は,設計公式における静水面での波圧強度 p₁であり,波圧の鉛直分布の基準となる波圧強度で ある.

図-6 (a) ~ (c) にそれぞれ完全被覆状態のcase01, および天端を下げた場合のcase02, 衝撃波圧発生時の case04の3つのケースについて波圧最大値の出現確率分 布を示す. 横軸はそれぞれ平均値で無次元化して示して いる.

完全被覆状態および不完全被覆状態でも衝撃波圧の発 生していないcase02では波圧最大値の出現確率はほぼ正 規分布で近似可能な形状となっている.図中には塩見ら (1994)と同様に、天端が下がった状態の消波工を高マ ウンド状態と見なし設計公式から算定した結果を併せて 示しているが、その算定結果は平均値に対して0.8程度 の結果となっている.これは設計公式がケーソンの滑動



図-6 波圧最大值出現確率分布

に寄与する成分を対象としていることから,波圧最大値 と比較して過小評価となるのは妥当な結果であると考え られる.

一方で、衝撃波圧の発生しているcase04では標準偏差 が大きくなり、平均値の0.8倍程度にピークを持つ形状 へと変化していることが分かる.これは、出現確率は 10%程度であるが平均値の1.5倍を超えるような大きな波 圧最大値が発生しているためであり、このような衝撃波



図-7 天端高を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係 について:周期2.0s

圧の最大値そのものを既存の公式では評価しきれない.

このとき波圧最大値の変動係数はcase01, case02では 0.1程度であり,既往の波力の変動係数の参照値(下迫ら, 2006)と対応している.しかしながら衝撃波圧が発生し, 後述するように,平均値が波高の2乗に比例する状態に なると急激に変動係数が増加し,0.5以上の値となる場合 もあり得る.

(3) 波圧最大値の平均値について

図-7には周期2.0sに関して,入射波高*H_iと*波圧最大値 の関係を示したものである.入射波高は副水路に設置し た波高計により得られた100波平均の波高であり,縦軸 は静水面における波圧最大値の平均値であり,波高 (*w₀H_i*, *w₀*:水の単位体積重量)により無次元化してい る.

図から分かるように衝撃波圧の発生していない完全被 覆状態である case01 および case02 では波高が0.30m を超 えても(*H/h*>0.5)一定値となっていることが分かる.こ れは消波工が十分に機能しており波高に比例する波圧が 作用している.

一方で,天端を下げていくと (case03~case06),波圧 最大値の平均値は波高の2乗に比例する傾向になること が分かる.これは,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_{0} が波高に比例することに対応してい ると考えられる.

4. 数値波動水槽による消波工不完全被覆状態の 再現計算

ここでは, CADMAS-SURF/2Dを用いて, 消波工の不 完全被覆状態に関して再現計算を行い, その適用性を検 討する.

(1) 計算概要

計算領域は,水路長を48mとして造波ソース法により, 規則波造波する.計算格子サイズは水平方向0.05m,鉛



図-8 実験値と数値計算結果の波圧最大値鉛直分布の比較 (case01 H=0.223m T=2.0s)

直方向0.01mとしている.なお今回の計算においては, 消波工部分のみ空隙(空隙率0.50,慣性力係数1.2,抵抗 係数1.0)を設定し,マウンド,被覆材およびケーソン本 体は空隙率0(障害物)としている.また,計算結果と サンプリング間隔を合わせるため,実験データには0.01s の移動平均処理を施してある.

(2) 計算結果と実験値との比較

図-8,図-9にはそれぞれcase01およびcase04における 波圧最大値の鉛直分布に関する比較を示す.実験データ の示してあるエラーバーは標準偏差である.case04の静 水面に対応する波圧計PG2において実験値に対して過小 評価となるが鉛直分布の形状は良く対応していることが 分かる.

図-10には計算結果に基づく被覆状態の波圧最大値鉛 直分布に及ぼす影響を示している.衝撃波圧の発生しな いcase01およびcase02では線形的な波圧鉛直分布形状と なっているのに対して,不完全被覆になると静水面近傍 のみ波圧最大値が大きくなる分布形状へと変化する.さ らに天端高を下げたcase06では堤体前面において全体的 に波圧最大値が増大することになる.

最後に,計算値と実験値の直接的な比較を示す.図-11 は横軸に波形勾配を,縦軸に波圧最大値に関する計算結 果と実験値の比率を示す.

図から分かるように今回の計算条件においては、最も 上部に設置した波圧計データ(PG1)を除けば、波形勾 配が小さくなると過大評価となり、波形勾配が大きくな るにつれて1.0へと収束していく.なお、最上部の波圧 計のデータが過小評価となるのは、実験に対して堤体前 面水位が小さいためであり、今後、格子サイズ、慣性力 係数および抵抗係数などを変えた計算による検討が必要 である.



図-9 実験値と数値計算結果の波圧最大値鉛直分布の比較 (case04 H=0.223m T=2.0s)



図-10 数値計算結果に基づくの波圧最大値鉛直分布に対する 被覆状態の影響(H=0.223m T=2.0s)

5. まとめと今後の課題

本研究は,消波ブロック被覆堤の被覆工の被覆状態の 波圧に及ぼす影響について実験的に検討を行った.得ら れた結論を以下に示す.

①消波工の被覆状態が,静水面近傍に消波工天端が来る場合に衝撃波圧の発生が起こりやすい.また,周期(波長)が短いほど被覆状態の影響を受けやすくなる。
②波圧最大値の出現確率は,衝撃波圧が発生しない時は

正規分布となるが、突発的に大きな波圧が発生する衝



撃波圧発生時は、平均値に対して偏った形状となる. ③衝撃波圧発生時の波圧最大値は波高の2乗に比例する

傾向を示し、変動係数は0.3~0.5程度まで大きくなる. 実験に関する今後の課題としては、構造物の形状、水 深などの条件を変えての検討、平面的不連続の検討が挙 げられる.

また,数値波動水槽の消波工不完全被覆状態の適用性 に関しては,概ね適用可能であるが,衝撃波圧の発生の 再現に関しては,格子サイズを変えた計算による検討が 課題である.

参考文献

- 鴻上雄三・時川和夫(1970):施工段階における消波工の波 圧減殺効果に関する実験的研究,第17回海岸工学講演会 論文集,pp.205-210.
- 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄 (1995) :消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関す る現地調査,海岸工学論文集,第42巻, pp.901-905.
- 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 関求(1997):消 波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現地調査 (第2報) - 消波ブロックの法尻沈下災害-,海岸工学論 文集,第44巻, pp.961-965.
- 塩見雅樹・山本 浩・津川昭博・黒沢忠男・永松宏一 (1994) :消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤 の被災とその対策に関する研究,海岸工学論文集,第41 巻,pp.791-795.
- 下追健一郎・大嵜菜々子・中野史丈(2006):滑動量を要求 性能に設定した混成堤の信頼性設計法,港湾空港技術研 究所報告,第45巻,第3号,pp.1-23.
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諌山貞雄・石貫国朗 (2000) :台風9918号による護岸の被災とその対策に関す る水理模型実験,港湾技研資料, No.973.