

消波ブロック被覆堤の消波工被覆状態と波の不規則性の波圧の出現確率分布への影響

Influence of Covering State of Wave-Dissipating Blocks and Waves Randomness on Probability Distribution of Wave Pressure acting on a Breakwater

関 克己¹・有川太郎²

Katsumi SEKI and Taro ARIKAWA

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 in random wave field, 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. The random wave experiment data and the regular wave data correspond well when the impulsive wave pressure is not generated, however when the impulsive wave pressure is generated, the wave pressure on still water level of both experiments are greatly different.

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。筆者らの既往の研究（関ら、2009）において、規則波による実験データを用いてデータ解析することにより、1) 消波工天端が静水面付近にある場合に衝撃波圧

が発生しやすくなり、周期が短いほど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場合は正規分布に近い形状となるが、衝撃波圧発生時は、大きい側に裾野の長い偏った分布形状になること、3) 衝撃砕波発生時の波圧最大値は、平均値としては波高の2乗に比例する傾向を示すが、変動係数は0.3～0.5程度に達する、という結論を得ている。本研究は、さらに不規則波実験データを加えることにより、波の不規則性も考慮に入れて検討を行う。

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

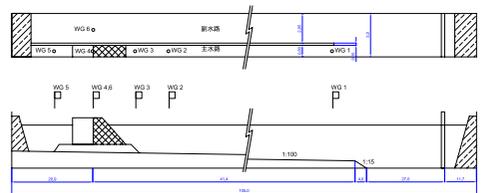


図-1 実験水路（105m水路）概要図

1 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所
2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所

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Bretschneider-光型標準スペクトルに基づく不規則波信号を用いている。周期は、有義波周期で2.0s, 3.0s, 4.0s(現地換算値で10.0s, 15.0s, 20.0s)とし、波高を2種類(有義波高で15cm程度および22cm程度)と設定している。また、不規則波の位相を変えて3ケース計測を行っている。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。なお、規則波の実験概要に関しては関ら(2009)を参照して頂きたい。

計測は水面変動取得用に波高計を6台(図-1中、WG1~WG6)、波圧計を堤体前面に4台、底面部に2台の計6台(図-2中、PG1~PG6)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. 波別解析法による不規則波実験結果と規則波実験データとの比較

この章では、不規則波実験データに対して波別解析法に用い、さらに規則波の実験データと比較することにより波の不規則性の波圧最大値への影響について検討を試みる。

(1) 波圧最大値の挙動に関して

ここでは静水面に設置した波圧計(PG2)により得ら

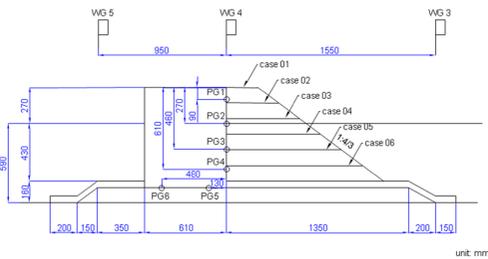


図-2 実験対象断面 (case00: 消波工無し)

表-1 実験断面諸量(天端高を変化させる場合、*case00の消波工天端高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	*1.35	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

有義波			最大波		
波高	周期	K_D 値	波高	周期	K_D 値
H [cm]	T [s]	M=1.8kg	H [cm]	T [s]	M=1.8kg
15.8	2.02	0.91	24.6	1.95	3.41
15.8	2.00	0.90	27.8	1.81	4.94
15.4	2.02	0.83	25.9	1.77	3.98
20.5	2.08	1.96	35.5	2.12	10.28
19.9	2.05	1.80	27.6	2.04	4.83
19.3	2.05	1.65	30.0	2.03	6.20
18.1	2.96	1.37	28.8	2.97	5.48
18.0	3.00	1.34	28.7	3.25	5.43
17.9	2.94	1.31	26.0	3.14	4.02
23.9	2.98	3.14	38.0	2.78	12.57
24.3	3.04	3.30	41.0	3.37	15.73
24.1	3.02	3.21	36.3	3.10	10.98
15.8	4.03	0.90	24.4	3.88	3.31
15.6	4.12	0.87	30.3	4.01	6.38
15.6	3.95	0.87	23.8	3.94	3.11
21.8	3.95	2.36	36.9	3.76	11.51
22.1	3.98	2.48	47.8	3.80	25.00
22.5	3.89	2.59	36.8	4.23	11.42

れた実験データを基にして、静水面における波圧最大値の挙動およびその変動性の特徴について検討する。

図-3には完全被覆状態であるcase01について波形勾配と波圧最大値についての関係をプロットしたグラフを示す。図中には規則波実験データにおける平均値と、エラーバーにより標準偏差を併せて示している。また、図-4には同様のグラフを、規則波実験データにおいて最も顕著に消波工の不完全被覆状態の影響を受け、衝撃波圧が発生していたcase04について示す。

図-3を見るとわかるように、消波工が完全被覆の状態、その役割を果たしている場合には、不規則波での実

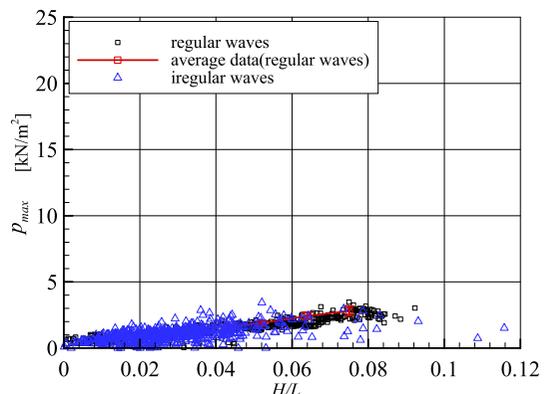


図-3 波形勾配と波圧最大値の関係 (case01: 完全被覆)

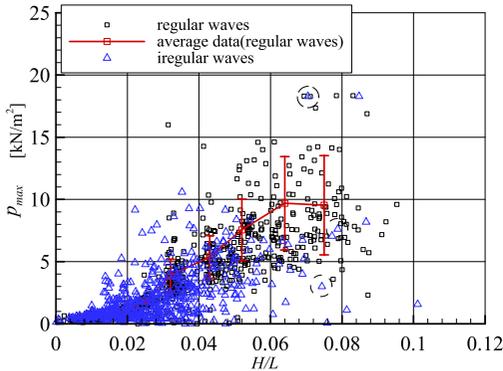


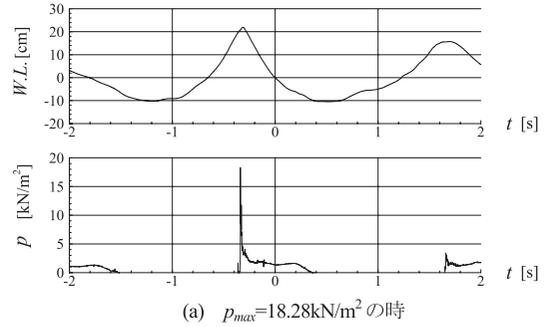
図-4 波形勾配と波圧最大値の関係 (case04:不完全被覆)

験データにおいてもデータのばらつきは小さく、規則波による平均値の近傍にプロットされる。これはつまり、不規則波が作用した際にも、波別解析を行い波高と周期(波長)を定義することにより、規則波と同様に取り扱うことが可能となることを表している。

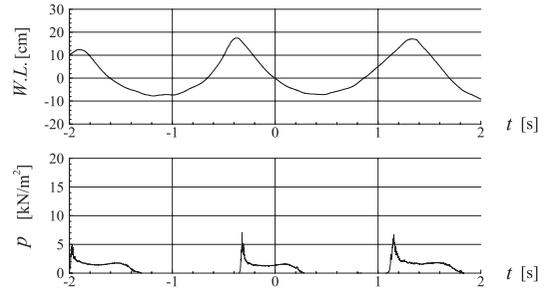
一方で、衝撃波圧が発生している不完全被覆状態であるcase04(図-4)を見ると、平均的には規則波実験データによる平均値周りにあるものの、最大波圧に関しては規則波の平均値の2倍程度まで発生し得ることが分かる。ただし、不規則波におけるデータのバラツキの範囲は規則波におけるデータのバラツキと同程度の範囲内に収まっていることが分かる。

そこで、次に図-4中に○印で示したデータに関して波圧時系列を図-5に示す。図-5は波圧最大値の大きい順に、(a)は $p_{max} = 18.28\text{kN/m}^2$ のデータ、(b)は $p_{max} = 7.05\text{kN/m}^2$ のデータ、(c)は $p_{max} = 3.00\text{kN/m}^2$ のデータとなっている。また、それぞれのグラフにおいて、上段は水面変動(W.L.)を、下段は波圧(p)の時系列を示している。時間軸は通過波データ(WG6)に対してゼロダウクロス法により個々波を定義した際の、ゼロクロス時間を0として前後2秒ずつ描いている。なお、それぞれの波高及び周期は、 $p_{max} = 18.28\text{kN/m}^2$ のデータが $32.3\text{cm} \cdot 1.80\text{s}$ 、 $p_{max} = 7.05\text{kN/m}^2$ のデータは $28.9\text{cm} \cdot 1.83\text{s}$ 、 $p_{max} = 3.00\text{kN/m}^2$ のデータは $25.2\text{cm} \cdot 1.61\text{s}$ である。ここで示した例では、周期はほぼ同じ個々波になっている。データから波圧最大値が最大のケースは波高が最も大きいのが、波圧最大値が最も小さいケースと比較して、波高では1.3倍程度であるのに対して、波圧最大値としては6倍程度に達していることが分かる。波形を比較すると、通過波形が尖っているほど波圧最大値が大きい傾向になっていることが分かる。

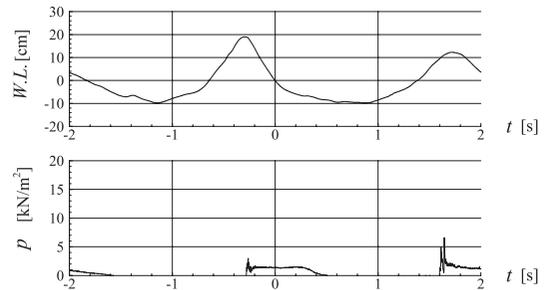
図-6、図-7には $T_{1/3} = 4.0\text{s}$ のデータに関して図-3、図-4と同様に整理した結果を示す。完全被覆(case01)と不完全被覆状態(case04)でのデータのバラツキの様子な



(a) $p_{max}=18.28\text{kN/m}^2$ の時



(b) $p_{max}=7.05\text{kN/m}^2$ の時



(c) $p_{max}=3.00\text{kN/m}^2$ の時

図-5 波圧時系列の例

どは周期によらず同様の傾向を示しているが、規則波の結果と比較すると $T_{1/3} = 2.0\text{s}$ のデータに比べて、有義波周期が長くなると規則波のデータに比べて大きくなること分かる。

(2) 最大波高と最大波圧について

ここでは、通過波高の最大波データと、実験により計測された静水面における最大波圧について検討を行う。図-8には横軸に、不規則波群中の最大波から合田の波圧公式(不完全被覆状態の場合は塩見ら(1994)を使用)により算定される静水面における波圧強度を、縦軸には不規則波実験で得られた最大波圧をプロットしている。また、図には衝撃波圧が発生しないケースとしてcase01, case02を衝撃波圧が発生するケースとしてcase03, case04を示している。

図から分かるように、衝撃波圧が発生していないケース(case01, case02)においては、観測される波圧最大

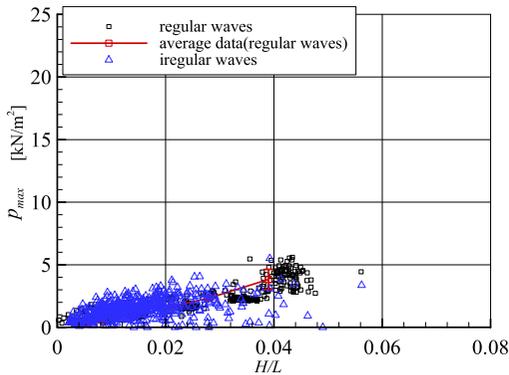


図-6 波形勾配と波圧最大値の関係
($T_{1/3} = 4.0s$, case01 : 完全被覆)

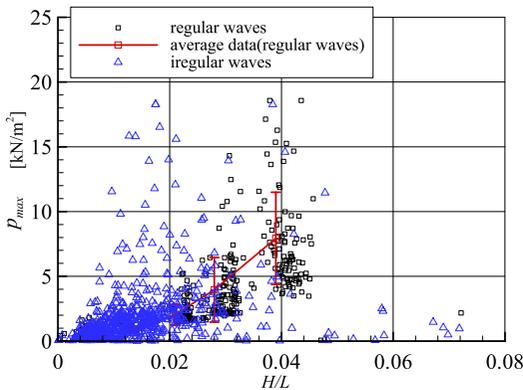


図-7 波形勾配と波圧最大値の関係
($T_{1/3}=4.0s$, case04 : 不完全被覆)

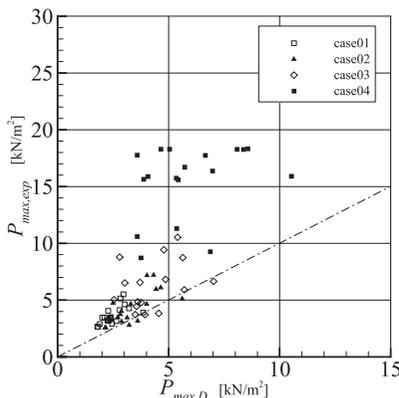


図-8 波圧公式と波圧最大値の関係

値は、最大波から算定される波圧の1.5倍程度の大きさになるが、大きなばらつきは発生しておらず、最大波を用いて、波圧公式により算定された波圧強度と直線関係があることが分かる。これは、衝撃波圧が発生しないケースにおいては、波圧最大値が波高に比例することに対応する。一方で衝撃波圧の発生する消波工不完全被覆状

態の場合 (case03, case04) では、当然のことながら全体的に波圧最大値は増大し、さらに、波圧公式からの乖離が大きくなる。これは波圧公式が波高と比例関係にあるのに対して、衝撃波圧発生時は波高の2乗に比例する波圧最大値が観測されることによることが考えられる。

(3) 波圧最大値出現確率

ここでは、波圧最大値の出現確率に着目した解析を行う。図-9には不規則波実験における波高の出現確率分布を示す。また、図-10および図-11には静水面における波圧最大値の出現確率分布を示す。図-10 (a) が完全被覆状態であるcase01, (b) が衝撃波圧の発生する不完全被覆状態における実験データ (case04) である。図-11は比較のために、同様の整理を行った規則波の結果について示す。図中の縦に示した破線は塩見ら (1994) による算定結果である。

まず、図-10 (a) に示す完全被覆状態における波圧最大値の出現確率分布をみると、波高の出現確率はレイリー分布の形状に近いのに対して、波圧最大値の出現頻度確率はより左右対称で正規分布に近い形状となっていることが分かる。一方で、衝撃波圧発生時は、値の大きい側に裾野の長い偏った分布形状へと変化していることが分かる。これは図-11に示すように規則波の実験データも同様の傾向である。

4. 結論

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不規則波を用いた実験を行い検討した。得られた結論を以下に示す。

- ①消波工の天端が高く、衝撃波圧の発生しない場合には、不規則波による実験結果は、波別解析後の個々波を用いると、規則波に実験データの平均値によく一致する。
- ②一方で、消波工が不完全被覆状態で、衝撃波圧が発生しやすい状態においては、規則波のデータと同様の挙

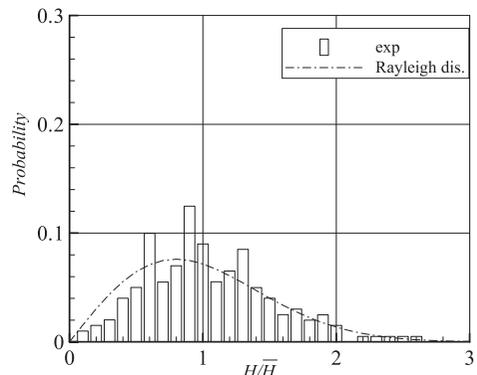
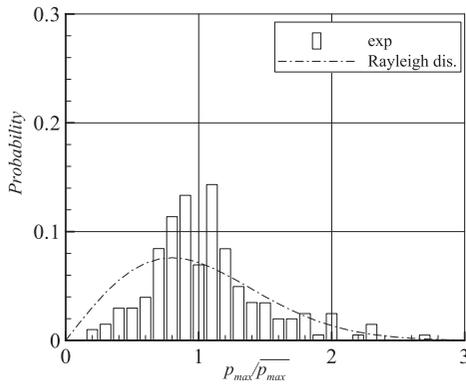
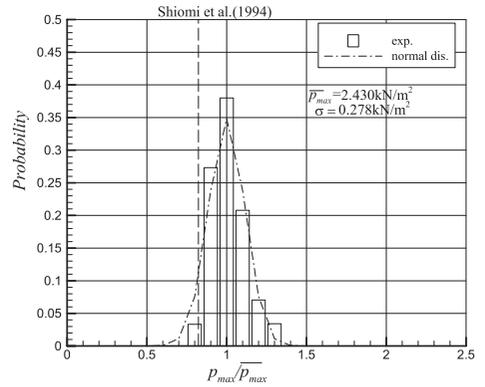


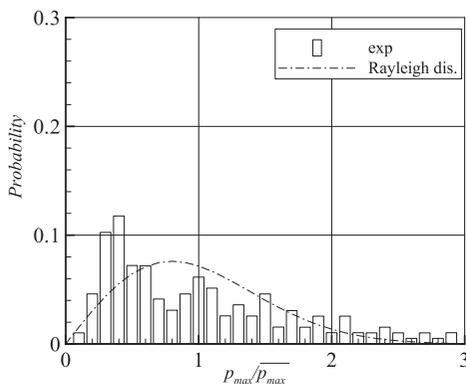
図-9 不規則波実験における波高の出現確率分布



(a) 完全被覆時 (case01)

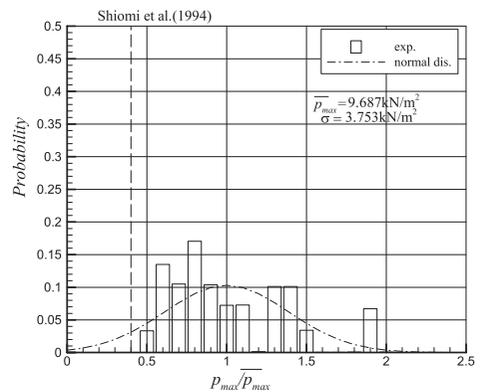


(a) 完全被覆時 (case01)



(b) 不完全被覆時 (case04)

図-10 波圧最大値の出現確率分布 (不規則波データ)



(b) 不完全被覆時 (case04)

図-11 波圧最大値の出現確率分布 (規則波データ)

動であるが、ほぼ同程度の波形勾配においても、波形の尖り具合などの影響を受けることにより、波圧最大値は3倍程度の変動がありうる。

- ③ また、有義波周期が長く場合、不規則波による最大波圧は規則波の傾向に比べて大きくなる。
- ④ 波圧最大値の出現確率に関しては、完全被覆時はほぼ波高に比例し、レイリー分布に近い形状となるが、不完全被覆時は規則波と同様に大きい側に裾野の長い分布形状へと変化する。

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・姜閔求 (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.

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, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 816-820.

高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・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.