

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1229 March 2011

捨石傾斜堤におけるエネルギー損失量に関する実験的検討

関 克己
有川 太郎
水谷 雅裕
平山 克也

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 序論	4
2. 実験概要	4
2.1 小規模実験	5
2.2 中規模実験	6
2.3 大規模実験	7
2.4 データ処理方法について	8
3. 捨石傾斜堤のエネルギー損失量について	9
3.1 エネルギー損失のモデル化について	9
3.2 反射率・透過率について	10
4. 3次元数値波動水槽による再現計算	11
4.1 計算条件	12
4.2 小規模実験の再現計算結果	12
5. 結論	14
参考文献	15
記号表	15

Experimental Study on Energy Dissipation at Rubble Mound Breakwater

Katsumi SEKI*

Taro ARIKAWA**

Masahiro MIZUTANI***

Katsuya Hirayama****

Synopsis

Rubble mound breakwater is a coastal structure that defends the coastal area by dissipating wave energy when an incident waves passes in the structures. Several studies have been made on reflection and transmission coefficient, there is little agreement on the energy dissipation in rubble mound breakwater. The purpose of this study is to examine the energy dissipation in rubble mound breakwater, the authors carried out the experiment of three different scales. The main conclusion is shown below.

- 1) Energy dissipation has a liner relationship with the wave steepness of incident waves, and the results of the irregular wave experiment can be evaluated by regular wave experimental results.
- 2) The transmission coefficient can be evaluated by the empirical formula by Kondo and Takeda (1983).
- 3) A clear influence did not appear for the energy loss, reflection and transmission coefficient though the experiments on three different scales were compared in this research.

Moreover, the following conclusions were obtained by applying the three dimensional numerical wave tank.

The drag force coefficient is greatly influenced the profile of water surface behind the rubble mound. In this study, when the value in which the recommended value is doubled is used, the experimental data can be reproduced well.

Key Words: Rubble mound breakwater, reflection coefficient, transmission coefficient, energy dissipation, experiment, numerical wave tank

* Researcher, Marine Information Group, Marine Information Division, Marine Environment and Eng. Department

** Senior Researcher, Maritime Structures Division, Marine Environment and Eng. Department

*** Head, Maritime Structures Division, Marine Environment and Eng. Department

**** Head, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5048 Fax : +81-46-842-5246 e-mail:seki-k@pari.go.jp

捨石傾斜堤におけるエネルギー損失量に関する実験的研究

関 克己*・有川 太郎**・水谷 雅裕***・平山 克也****

要 旨

捨石傾斜堤は、入射波が構造物内を通過する際にエネルギーを減衰させることにより沿岸域を防御する構造物である。さらに海水交換が可能な構造物であり、水質改善の面からもメリットのある構造物である。傾斜堤に関する実験は古くからなされてきており、近年では今まで適用が困難であると考えられてきた長周期波に対する検討も行われてきている。しかしながら既往の研究では傾斜堤における反射率と透過率に着目した研究のみであり、傾斜堤によるエネルギー損失量について定量的な評価は行われてきていなかった。

そこで本研究では捨石傾斜堤におけるエネルギー損失量を定量的に評価することを目的とし、3つの異なるスケールの断面水槽を用いて水理模型実験を行った。主要な結論を以下に示す。

- ①傾斜堤によるエネルギー損失量は入射波の波形勾配と相関が強く、線形関係で評価できる。つまり波形勾配が大きくなるほどエネルギー損失量が大きくなる。また、不規則波実験の結果は規則波実験と同様の傾向を示す。
- ②透過率については概ね近藤・竹田(1983)の実験式により評価が可能である。
- ③本研究において3つの異なるスケールによる実験を比較したが、エネルギー損失量、反射率、透過率に関して明確な影響は表れなかった。

また、3次元数値波動水槽による小規模実験の再現計算を行うことにより以下の結論を得た。

- ①透過性構造物をモデル化するパラメータの設定において、特に透過後の波形もしくは透過率に対して抗力係数が大きく影響する。本検討の範囲では、慣性係数 $C_M=2.4$ 、抗力係数 $C_D=2.0$ と推奨値を2倍した値が実験結果を良く再現する結果となった。

キーワード：捨石傾斜堤、反射率、透過率、エネルギー損失、水理模型実験、数値波動水槽

* 海洋・水工部海洋情報研究領域海象情報研究チーム研究官
** 海洋・水工部海洋研究領域耐波研究チーム主任研究官
*** 海洋・水工部海洋研究領域耐波研究チームリーダー
**** 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チームリーダー
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5048 Fax：046-842-5246 e-mail:seki-k@pari.go.jp

1. 序論

捨石傾斜堤は、レキ材を台形などの形状に設置する比較的簡便な構造物であり、沿岸域を波の作用から防御するための基本的な構造物の一つである。その設置目的は入射波のエネルギーを減衰させて、構造物透過後の波高（透過波高）、つまり波のエネルギーを減少させることにあり、所定の透過率になるように構造物の大きさが決定されることになる。また、捨石傾斜堤のメリットとして、透過型の防波堤であることから、港内の水質改善や海水交換が可能であることが挙げられる。

しかしながら、近年の長周期波に関する研究の進展により、長周期波（うねり性波浪）が、港湾構造物の被災や海岸侵食など、海岸工学上の重要な問題の原因として指摘されてきている。さらに、港湾における荷役作業に対しては、長周期波が船体動揺に対して影響が大きく、荷役稼働率の低下の原因となることが指摘されている。

長周期波は、周期が数十秒～数分の周期の長い波動であり、通常の波浪（風波、周期十秒程度）に比べて港外においては波高も小さく、大きな問題になることは少ない。しかしながら、風波成分は水深が浅くなることにより砕波すること、また消波構造物などによりエネルギーを失うのに対して、長周期波は波形勾配が小さく、極浅海域においても砕波しないこと、通常の消波構造物では波長に対して構造物のスケールが小さくほとんど消波機能を発揮できないことから、エネルギーをほとんど失うことなく港内へと侵入することになる。さらに港内においては重複波浪場を形成することになり、岸壁前面において振幅が増大する。

捨石傾斜堤など透過型の構造物では、入射波の波長（周期）の増大に伴い、透過率が増大し、所定の透過率を得るためにはかなり大きな構造物になり、現実的な長周期波対策工法として適切でないと考えられてきていた。しかしながら、平石ら（2007）は今まで検討が行われてこなかった捨石傾斜堤の長周期波への効果を水理模型実験および数値シミュレーションにより検討を行っている。

捨石傾斜堤に関する水理模型実験による研究は古くから行われてきている。しかしながらそのほとんどは、風波成分を対象としたものであり、結果の整理に関しては反射率および透過率に関する整理に留まっている。

近年では数値シミュレーションによる検討も行われてきており、鈴木ら（2003）は、捨石や消波ブロック下部における洗掘現象に着目した研究を行う中で、捨石や消波ブロック内部の流速を算定するために、数値シミュレーションの妥当性を検討している。この論文では風波を

を対象とした周期帯の規則波により実験を行っている。傾斜堤は砕石およびテトラポッドを用いている。この論文の中では、数値計算プログラム（CADMAS-SURF）内の抵抗力のモデル化にあたり、計算格子サイズに依存せず、また捨石の粒径を考慮可能な Dupuit-Forheimer 式を用いることにより、捨石傾斜堤による反射率および透過率に対して良好な再現性を有することを示している。

合田・松本（2003）では、捨石傾斜堤に作用する波力および傾斜堤内部への波圧伝播に関して検討するために鈴木ら（2003）と同様に CADMAS-SURF を用いて数値的な検討を行っている。ただし、この論文では Dupuit-Forheimer 則ではなく、抵抗係数をパラメータとして入力するモデルを使用している。

平石ら（2007）では、長周期波を対象とした断面水理模型実験を行っており、周期 1.8, 2.7, 6.7, 10.0s（現地換算値 8.0, 12.0, 30.0, 45.0s）の規則波について、傾斜堤の天端幅 2 種類について、捨石傾斜堤による反射率・透過率について検討している。また、MARS（Multi-Advection Reconstruction Solver）法による数値シミュレーション（捨石傾斜堤は Dupuit-Forheimer 則によるモデル化）を実施し、反射率・透過率に関して再現性が良いことを確認している。

本研究では、風波からうねり性波浪（現地周期 10～20 秒程度）に対する捨石傾斜堤の効果を検討するための断面水理模型実験を実施する。その際、実験スケールの効果について検討を加えるために、3 つの異なるスケールでの実験を行う。

また、傾斜堤における既往の研究では、透過率および構造物からの反射率に着目したものが殆どであり、捨石傾斜堤内部のエネルギー損失量について整理された研究はほとんどない。しかしながら、エネルギー保存則を考えれば、捨石傾斜堤内部で失われるエネルギーと傾斜堤からの反射波・透過波の持つエネルギーは密接に関係していることから、本論文では捨石傾斜堤における波のエネルギーの損失量に着目した検討を行う。

この検討は、近年盛んに研究されてきている数値シミュレーションにおける透過性構造物のモデル化および高精度化に対する基礎的データとすることを想定している。

2. 実験概要

本研究では、3つの異なるスケールの断面水路を用いて実験を行う。周期は風波成分から長周期うねり成分を想定し、現地換算値で10, 15, 20sの3種類とする。表-1に前章でレビューを行った論文の実験条件と、本論文におけ

る実験条件に関して、水深 h 、周期 T 、波長 L 、傾斜堤天端幅 B_M 、および相対水深 h/L 、相対天端幅 B_M/L として整理して示す。

表-1 既往文献と本論文の実験条件

	h [m]	T [s]	L [m]	B_M [m]	h/L	B_M/L
鈴木ら(2003)	0.6	2.0	4.36	0.255	0.138	0.058
		3.0	6.95		0.086	0.037
		3.5	8.21		0.073	0.031
合田・松本(2003)	0.5	2.13	4.37	0.3	0.115	0.069
平石ら(2005) 縮尺1/20	0.5	1.8	3.57	0.575	0.140	0.161
		2.7	5.70		0.088	0.101
		6.7	14.72		0.034	0.039
		10.0	22.06		0.023	0.026
		1.8	3.57	1.075	0.140	0.301
		2.7	5.70		0.088	0.189
		6.7	14.72		0.034	0.073
		10.0	22.06		0.023	0.049
小規模実験 縮尺1/50	0.3	1.41	2.17	0.18	0.138	0.083
		2.12	3.47		0.086	0.052
		2.83	4.73		0.063	0.038
		1.41	2.17	0.36	0.138	0.166
		2.12	3.47		0.086	0.104
		2.83	4.73		0.063	0.076
中規模実験 縮尺1/25	0.6	2.00	4.36	0.36	0.138	0.083
		3.00	6.95		0.086	0.052
		4.00	9.46		0.063	0.038
大規模実験 縮尺1/9	1.67	3.33	12.10	1.00	0.138	0.083
		5.00	19.32		0.086	0.052
		6.67	26.30		0.063	0.038

表-1に示すように、本研究では風波成分から長周期うねりの周期帯(10~20s)を想定した実験を実施する。図-1に本論文内で用いる傾斜堤断面の諸量に関する記号を示す。

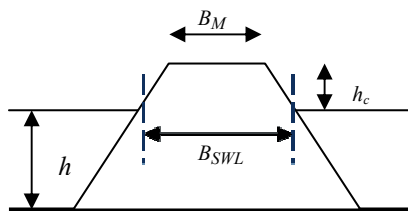


図-1 実験断面の長さの定義

2.1 小規模実験

小型実験は当所所有のパイロット水路を使用して行った。小規模実験の実験縮尺は1/50である。図-2に実験断面図を示すが、傾斜堤の堤体幅(長さ)を変えた2種類の断面において実験を行っている。

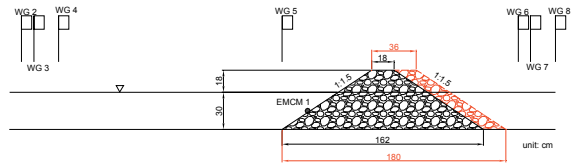


図-2 小規模実験断面概要図

また、捨石傾斜堤に用いる砕石は均一粒径とし、2種類の砂利を用いて、粒径の異なる実験を実施した。実験に用いた砕石は、質量および空隙率を計測している。質量に関しては100個の平均値 \bar{m} 、空隙率に関しては50回の平均値 \bar{V} として算出している。算出結果を表-2に結果をまとめて示す。ここで砂利の代表径は、密度 2.0kg/cm^3 の球体と仮定して算出している。小規模実験では2種類の砂利および2種類の堤体幅で実験しており、ケースの分類を表-3に示す。

また、図-3、図-4に実験に用いた砂利の質量および空隙率の計測結果を平均値で無次元化して頻度分布として示す。図から分かるように、質量からみると均質の材質を使っており、また、空隙率に関しては50回計測した結果はバラツキはないことが分かる。

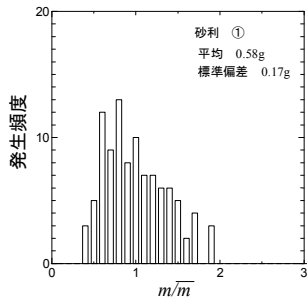
なお、実験時は、波の作用により砂利が移動し台形形状が崩れてしまうことを防ぐために、写真-1に示すように傾斜堤前面部に金網を設けて実験を行った。

表-2 小規模実験に使用した砂利の諸量

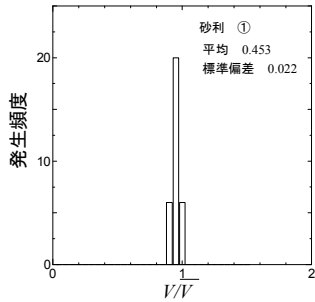
	実験スケール		現地換算値		空隙率
	質量[g]	代表径[cm]	質量[kg]	代表径[cm]	
砂利①	0.58	0.82	72.5	41	0.453
砂利②	6.99	1.88	109.2	47	0.402

表-3 小規模実験ケース表

	代表粒径	天端幅
	d [cm]	B_M [m]
case 1	0.82	0.18
case 2	1.88	0.18
case 3	0.82	0.36
case 4	1.88	0.36

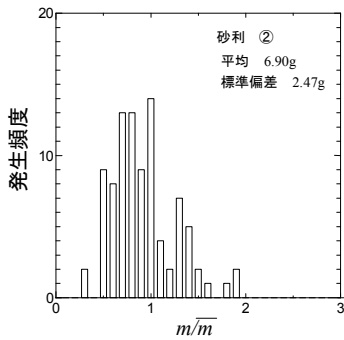


(a) 質量

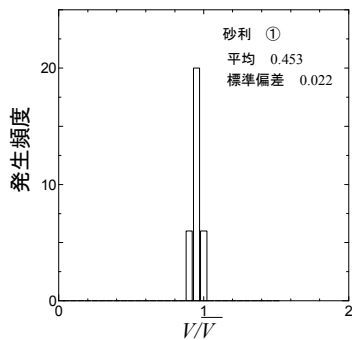


(b) 空隙率

図-3 実験に用いた砂利の質量と空隙率の頻度分布 (砂利①)



(a) 質量



(b) 空隙率

図-4 実験に用いた砂利の質量と空隙率の頻度分布 (砂利②)

写真-1 小規模実験傾斜堤前面部



表-4 には入射波諸元を示す。実験は規則波で行い、周期3種類、波高はそれぞれの周期で4種類の計12ケースで計測を行っている。

表-4 小規模実験波浪条件 (規則波)

実験スケール		現地換算値	
波高[cm]	周期[s]	波高[m]	周期[s]
2.53	1.41	1.27	10.0
4.70	1.41	2.35	10.0
6.18	1.41	3.09	10.0
7.49	1.41	3.74	10.0
3.15	2.12	1.58	15.0
5.65	2.12	2.82	15.0
7.57	2.12	3.79	15.0
9.48	2.12	4.74	15.0
2.92	2.83	1.46	20.0
6.20	2.83	3.10	20.0
8.26	2.83	4.14	20.0
10.20	2.83	5.10	20.0

2.2 中規模実験

中規模実験は当所所有の105m水路を用いて行った。実験の縮尺は1/25である。図-5に水路図面を示すが、この水路は水路途中から水路幅0.8mの主水路と幅2.0mの副水路に分岐している。本実験では側壁にガラス面を有する主水路側を用いて実験を行った。

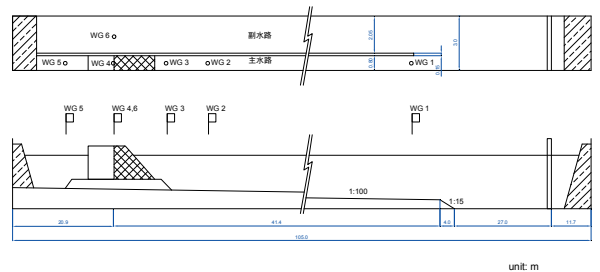


図-5 中規模実験水路

中規模実験においては、捨石の大きさならびに捨石傾斜堤の堤体幅を1種類とした。捨石材料は小規模実験にお

ける砂利②を用いて実験を行った。表-5には規則波の入射波条件を、表-6には不規則波の入射波条件についてまとめて示す。実験に用いた入射波は現地スケールにおいて小規模実験と同等のものであり、ケース数は同数である。中規模実験においても傾斜堤の崩壊を防ぐため、傾斜堤前面部に金網を設置して実験を行っている（写真-2参照）。

写真-2 中規模実験断面の様子



表-5 入射波条件（中規模実験，規則波）

実験スケール		現地換算値	
波高[cm]	周期[s]	波高[m]	周期[s]
5.07	2.00	1.27	10.0
10.60	2.00	2.65	10.0
14.21	2.00	3.55	10.0
19.93	2.00	4.98	10.0
7.46	3.00	1.87	15.0
11.69	3.00	2.92	15.0
15.47	3.00	3.87	15.0
19.62	3.00	4.91	15.0
4.75	4.00	1.19	20.0
10.60	4.00	2.65	20.0
14.00	4.00	3.50	20.0
18.77	4.00	4.69	20.0

表-6 入射波条件（中規模実験，不規則波，値は有義波）

初期乱数 (波群)	実験スケール		現地換算値	
	波高[cm]	周期[s]	波高[m]	周期[s]
5	8.83	2.47	2.21	12.34
55	8.94	2.42	2.24	12.11
555	8.77	2.53	2.19	12.67
5	15.26	2.55	3.81	12.74
55	15.56	2.46	3.89	12.32
555	15.65	2.55	3.91	12.77
5	8.73	3.76	2.18	18.81
55	8.48	3.71	2.12	18.56
555	8.87	3.71	2.22	18.56
5	14.96	3.84	3.74	19.20
55	15.19	3.70	3.80	18.48
555	15.72	3.80	3.93	19.01
5	8.40	4.55	2.10	22.75
55	8.27	4.53	2.07	22.64
555	8.20	4.53	2.05	22.64
5	15.32	4.60	3.83	23.01
55	15.19	4.49	3.80	22.47
555	14.96	4.52	3.74	22.59

2.3 大規模実験

大規模実験は、大規模波動地盤総合水路において実施した。大規模実験に用いた砕石の諸量について表-7に示し、また入射波条件は表-8に示す。なお、大規模実験においては砂利を固定せずに実験を行っている。図-6には大規模実験で用いた砕石の質量に関する頻度分布を示す。図から分かるように大規模で使用した砂利はばらつきが大きいものである。なお、大規模実験に使用した砕石の空隙率に関しては10回計測したのみであるので頻度分布表は割愛する。

表-7 砕石の諸量（大規模実験）

	実験スケール		現地換算値		空隙率
	質量[g]	代表径[cm]	質量[kg]	代表径[cm]	
砂利	1033.92	9.96	753.7	901	0.461

表-8 入射波条件

(大規模実験，不規則波の波高と周期は有義波)

	実験スケール		現地換算値	
	波高[cm]	周期[s]	波高[m]	周期[s]
規則波	11.0	3.33	1.0	10.0
	28.0	3.33	2.5	10.0
	11.0	4.17	1.0	12.5
	28.0	4.17	2.5	12.5
	11.0	5.00	1.0	15.0
	28.0	5.00	2.5	15.0
	56.0	5.00	5.0	15.0
	11.0	5.83	1.0	17.5
	28.0	5.83	2.5	17.5
	11.0	6.17	1.0	18.5
	28.0	6.17	2.5	18.5
	11.0	6.67	1.0	20.0
不規則波	28.0	5.00	2.5	15.0
	28.0	6.17	2.5	18.5

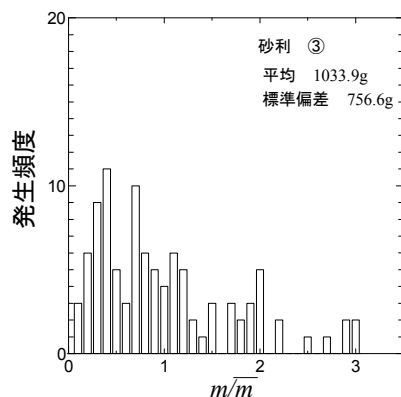


図-6 砂利の質量の頻度分布（大規模）

2.4 データ処理方法について

(1) 入射波・反射波の分離方法

計測データは傾斜堤沖側および傾斜堤背面に波高計および流速計を設置し、擬似非線形長波理論（水口，1991）より、入射波・反射波を時系列的に分離する。この手法では同一地点において取得される水面変動 η および水平流速 u の時系列データを用いて、岸向き成分 η_i および沖向き成分 η_r を以下の式で分離する。この時岸向きを正としている。

$$\eta_i = \frac{1}{2} \left[\eta + u \sqrt{\frac{h}{g}} \frac{h}{h-\eta} \right] \quad (1)$$

$$\eta_r = \frac{1}{2} \left[\eta - u \sqrt{\frac{h}{g}} \frac{h}{h-\eta} \right] \quad (2)$$

ここで、 g ：重力加速度、 h ：水深である。図-7には小規模実験時のデータに関して、入・反射波を分離した例を示す。最上段が計測された水面変動データ、中段が入・反射波分離後の岸向き成分（入射波）、最下段のグラフが沖向き成分（反射波）となっている。図から分かるように、沖向き成分が5秒程度遅れて到達しており良好に分離されていることが分かる。なお、入・反射波分離後のデータの中にノイズが見られるのは計測された水平流速データ（電磁流速計）のノイズが原因である。

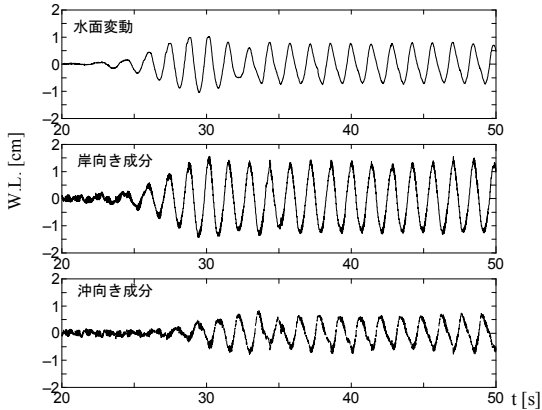


図-7 入・反射波分離結果の例

（上段：計測された水面変動，中段：入射波成分
下段：反射波成分）

データ処理に当たっては、規則波の場合は入射波および反射波の時系列データに波別解析法を施すことにより、個々波を定義し、波高が安定してからの10波の平均値を入射波および反射波の波高とし計算している。不規則波の場合にはFFTによるフーリエ解析を行うため 2^{15} 個(サ

ンプリング間隔 0.005s で約 164s 分) のデータを用いている。

(2) エネルギー損失量算定方法

傾斜堤でのエネルギー保存則は以下のように示される。

$$E_i = E_r + E_t + E_{Loss} \quad (3)$$

ここで E_i ：入射波の持っているエネルギー、 E_r ：反射波のエネルギー、 E_t ：透過波のエネルギー、 E_{Loss} ：傾斜堤により失われるエネルギー損失量である。なお、本実験では、波高水深比で 0.4 程度までの実験であり、傾斜堤前面での砕波をさせない条件の実験であることから、傾斜堤前面部での砕波によるエネルギー損失は考慮しない。

入射波、反射波および透過波の持つエネルギーに関して、ここでは微小振幅波理論に基づき、エネルギー損失量を計算する。

微小振幅波理論では波のエネルギー E は

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L B \quad (4)$$

で表される。ここで ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 H ：波高、 L ：波長、 B ：水路幅である。エネルギー保存則である式(3)に、各波浪成分のエネルギーを微小振幅波理論に基づき代入し、エネルギー損失量を導くと以下の式で表される。

入射してくるエネルギーは、入射波高 H_i 、反射波高 H_r 、透過波高 H_t 、およびエネルギー減衰率 E_{Loss} を用いてエネルギー保存則を表すと、

$$\begin{aligned} E_{Loss} &= \frac{1}{8} \rho g L B (H_i^2 - H_r^2 - H_t^2) \\ &= \frac{1}{8} \rho g L H_i^2 B (1 - K_r^2 - K_t^2) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで H_i ：入射波の波高、 H_r ：反射波の波高、 H_t ：透過波の波高であり、 K_r ：反射率、 K_t ：透過率である。

また、不規則波の場合については、波のエネルギーを示す、スペクトルの0次モーメントと振幅（波高）の関係式

$$m_0 = \sum \frac{1}{2} a^2 \approx \sum \frac{1}{8} H^2 \quad (6)$$

を用いてエネルギー損失量を以下の式のように算定する。

$$E_{Loss} = \rho g L_{1/3} B (m_{0,i} - m_{0,r} - m_{0,t}) \quad (7)$$

ここで、 $L_{1/3}$ ：有義波周期に対応する波長、 $m_{0,i}$ ：入射波成分の0次モーメント、 $m_{0,r}$ ：反射波の0次モーメント、 $m_{0,t}$ ：透過波成分の0次モーメントである。

3. 捨石傾斜堤のエネルギー損失量について

3.1 エネルギー損失のモデル化について

捨石傾斜堤など透過性構造物内を波動が通過する際は、抵抗を受けることにより、エネルギーを失うことになる。

本研究で行った3種類のスケールの規則波実験において得られた全てのデータについて、波高およびエネルギー損失量について整理したグラフを図-8に示す。エネルギー損失量は前章で示した式(5)により求めている。物理量での比較であるため、実験スケールにより大きく範囲が異なるため両対数グラフにより示してある。

図から分かるように各スケールの実験でみるとエネルギー損失量は波高に比例している傾向が見て取れる。3つのスケールで比較すると、スケールが大きいほど同一の波高ではエネルギー減衰が大きいことになるが、このグラフにおいては構造物の大きさ、波長などで無次元化していないために、単純にスケールが大きいほどエネルギー減衰が大きいとは言えない点に注意が必要である。

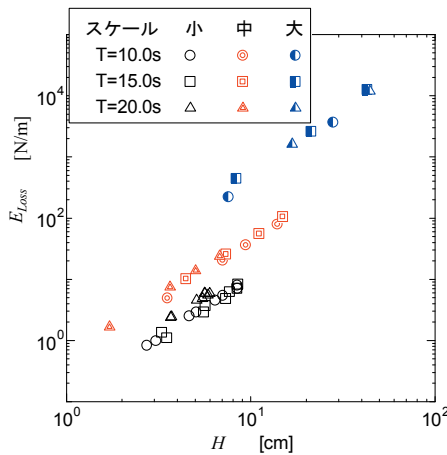


図-8 波高とエネルギー損失量の関係

ここでエネルギー損失量を無次元化するため、エネルギー損失量のモデル化を行う。エネルギー損失量をモデル化するに当たり、エネルギー損失 F_1 を図-9、および以下の式で示すように、断面積と区間長および速度の2乗の積として仮定する。

$$F_1 = \alpha A' L U^2 \quad (8)$$

ここで、各パラメータを以下のように定義をすると、エネルギー損失量のモデルとして式(9)に示すパラメータ F_1 を得る。なお、 α ：比例係数である。

$$A' : \text{断面積} : (\text{水深} + \text{波高}) \times \text{水路幅} \left(\frac{H_s}{h} + 1 \right) h B$$

$$L' : \text{区間長} : \text{静水面における構造物の長さ } B_{SWL}$$

$$U' : \text{速度} : \text{波速} \left(\frac{L}{T} \right)$$

$$F_1 = \rho \left(\frac{H_s}{h} + 1 \right) h B B_{SWL} \left(\frac{L}{T} \right)^2 \quad (9)$$

ここで H_s ：通過波高、 B_{SWL} ：静水面での傾斜堤の長さ、 L ：波長、 T ：周期である。これ以降は式(9)によるパラメータ F_1 を用いてエネルギー損失量を無次元化して議論を進めていく。

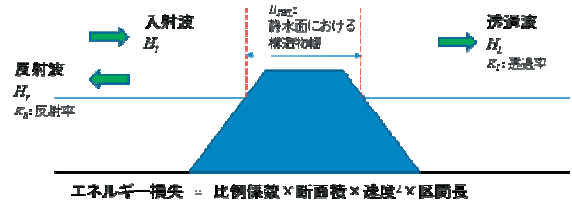


図-9 エネルギー損失量のモデル化

まず、無次元化したエネルギー損失量について、傾斜堤の実験結果を整理する際によく用いられる堤体幅を波長で無次元化したパラメータ（相対堤体幅）との関係性を図-10に示す。横軸に堤体幅と波長の比を採用した場合、エネルギー損失量との対応関係が不明瞭である事が分かる。

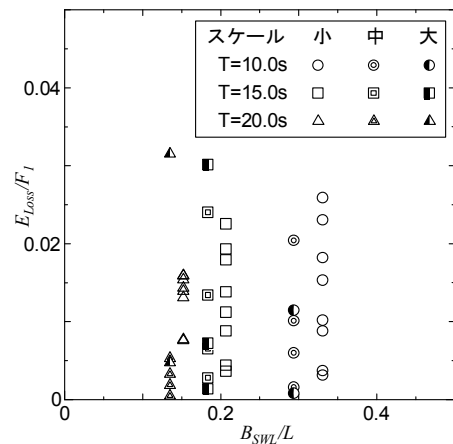


図-10 相対堤体幅とエネルギー損失量の関係

次に、波形勾配と無次元化したエネルギー損失量の関係について図-11に示す。なお図中の直線は、原点を通る直線を最小二乗法により決定した場合の直線であり、直線式を以下のように示すと、比例係数 $\alpha=0.511$ 、相関係数 0.695 となる。

$$\frac{E_{Loss}}{F_1} = \alpha \frac{H}{L} \quad (10)$$

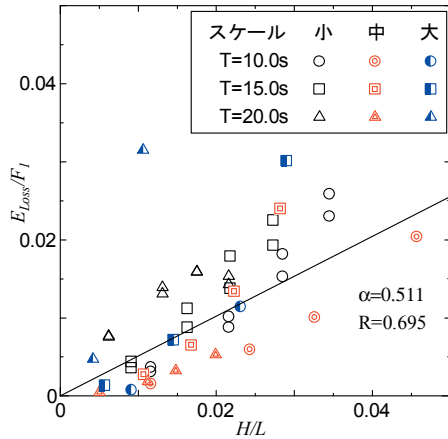


図-11 波形勾配とエネルギー損失量の関係
(規則波)

図から分かるように、大規模スケールの周期 20s のケースを除けば、波形勾配とエネルギー損失量とは線形関係にあることが分かる。つまり、波形勾配が大きい（波高が大きく、周期（波長）が短い）ほど、エネルギー損失量が増大していく傾向である。また、その比例係数は 0.5 程度になることが分かる。

図-12 には、図-11 に中規模および大規模スケールで行った不規則波の実験データについて、図-11 と同様の整理を行った結果を示す。不規則波の実験データは、規則波のデータと比較するとエネルギー損失量が小さくなる傾向にあり、エネルギー損失量と波形勾配との比例係数は 0.3 程度に低下している。しかしながら波形勾配の増大に伴いエネルギー損失量が増大するという傾向は規則波と同様である事が分かる。

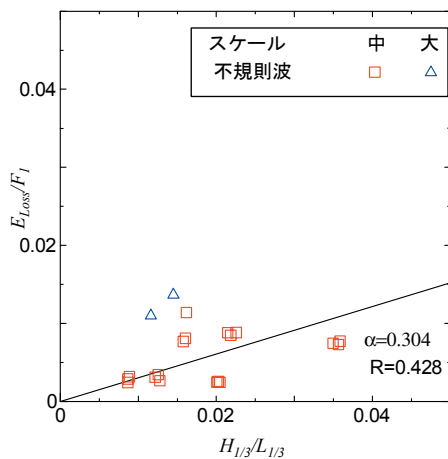


図-12 波形勾配とエネルギー損失量の関係
(不規則波)

3.2 反射率・透過率について

この節では、中規模および大規模実験の結果を踏まえて捨石傾斜堤における反射率・透過率について、エネルギー損失量と対応させるために波形勾配で整理する。

図-13 には波形勾配と反射率の関係についてグラフに示す。図から分かるように、反射率に関しては波形勾配のみの関数として表すことが困難であることが分かる。また、捨石傾斜堤の反射率として一般的に用いられる値としては 0.3~0.6 であるが、周期が長くなるにつれて反射率は 0.7 程度に増大することになる。

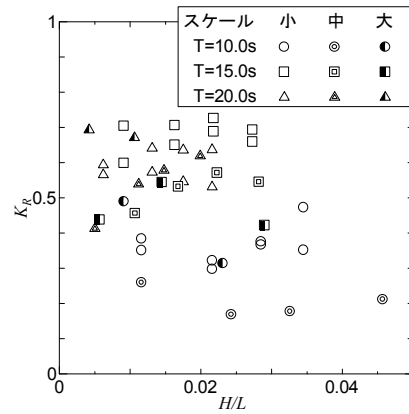


図-13 波形勾配と反射率の関係

捨石堤の透過率については、港湾の技術基準に採用されている実験式（近藤・竹田，1983）

$$K_T = \frac{1}{1 + k_t \sqrt{H/L}} \quad (11)$$

$$k_t = 1.26 \left(\frac{B_{SWL}}{d} \right)^{0.67}$$

がある。図-14 は透過率に関する実験値と式 (11) の計算値との比較したものである。今回の実験結果との比較では、中規模スケールの周期 20s のケースを除き、式 (11) による計算値は、実験値を過大評価している。特に大規模スケールでは過大評価の傾向が強いが、小規模スケールおよび中規模スケールでは概ね評価可能であることが分かる。

図-15 は波形勾配と透過率の関係についてグラフに示したものである。波形勾配と透過率との関係を見ると波形勾配が増大するほど透過率は低下することが分かる。図中に示した線は、式 (11) 中の堤体幅と砂利粒径の比のパラメータ B_{SWL}/d を今回の実験範囲と対応する 25 および 50 とした場合の線である。図-14 と併せて近藤・竹田(1983)の式により概ね評価できていることが分かる。

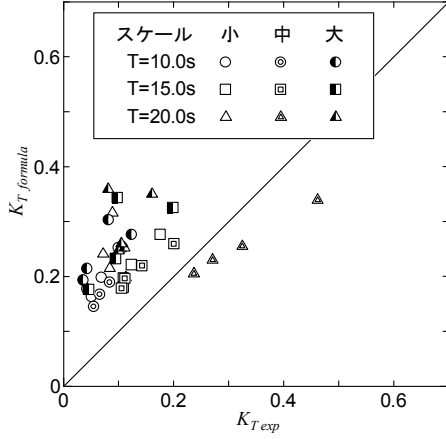


図-14 透過率に関する実験値と実験公式の比較
(横軸：実験値 縦軸：式 (11))

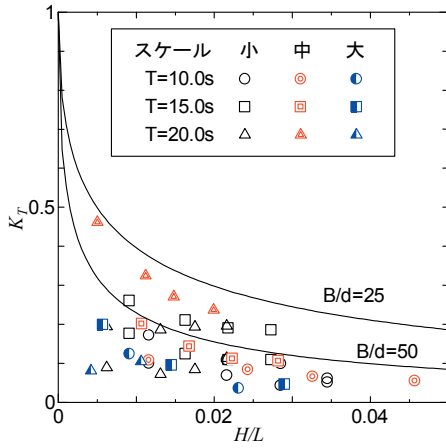


図-15 波形勾配と透過率の関係

なお、本検討の範囲内では、3つの異なるスケールによる明確な違いは見られなかった。

4. 3次元数値波動水槽による再現計算

数値波動水槽の海岸構造物の適用に関しては、近年のコンピュータの発達とともに精力的に研究が為されてきている。その中で重要な検討項目として透過性構造物のモデル化が挙げられる。本研究で用いる数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) は実務で用いられている数値波動水路 (CADMAS-SURF) の3次元版である。本モデルは砕波・越波などの複雑な水面変形計算が可能である。また、スリット構造物など複雑な形状のケーソンや護岸に作用する波力や、ブロックおよびマウンド内部の流速等を算定することが可能である。

CADMAS-SURF/3Dは自由表面解析モデルにVOF法を採用したモデルであり、基礎方程式は以下に示す3次元非圧縮性流体を対象とした連続式とNavier-Stokes方程式を

ポアソモデルについて拡張した式である。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \gamma_v g \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 t : 時間、 x, y : 水平方向座標、 z : 鉛直方向座標、 u, v, w : x, y, w 方向の流速成分、 ρ : 水の密度、 p : 圧力、 ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g : 重力加速度、 γ : 空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: 各方向の面積透過率、 D_x, D_y, D_z : エネルギー減衰帯のための係数、 S_p, S_u, S_v, S_w : 造波ソースに関する係数である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ は構造物から受ける慣性力の効果を示すパラメータであり、以下の式で求める。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで C_M : 慣性力係数である。また、 R_x, R_y, R_z は抵抗力を示す項であり、以下のように計算される。

$$\begin{aligned}
 R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\
 R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\
 R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

ここで C_D : 抗力係数, Δx , Δy , Δz : 各空間方向の格子間隔である。

しかしながら, 消波ブロックや捨石など空隙を有する透過性構造物の計算を行う場合には透過性構造物の領域に対して空隙率以外に, 慣性係数および抗力係数を設定する必要がある。既往の研究により, 慣性係数 $C_M=1.2$, 抗力係数 $C_D=1.0$ が推奨値とされているが, 風波による実験データと2次元計算結果から導かれた推奨値であり, 周期の長い波に対しては検討はなされていない。そこで本章において, 水理模型実験結果と計算結果を比較することにより検討を行う。

4.1 計算条件

ここでの再現計算は3章において示した小規模実験水路における実験データの再現計算を行う。計算領域および格子間隔は表-9に示すとおりである。出力させる物理量は実験データと対応するように出力させている。また, 入射波条件を表-10に示すように, 周期3種類とし, 波高は9cm程度のケースに対応する計算を行っている。

表-9 計算領域および格子間隔

	領域 [m]	格子幅 [m]	格子数
x方向	20.00	0.02	1001
y方向	0.48	0.01	49
z方向	0.60	0.01	61

総格子数 2,991,989

表-10 計算入射波条件

波高 [cm]	周期 [s]
7.49	1.41
9.48	2.12
10.2	2.83

また, 慣性係数および抗力係数に関しては, 推奨値を用いた場合を基準値として, それぞれ2倍した値およびともに2倍した場合とし, 表-11に示す。

表-11 透過性構造物設定条件

case	空隙率	慣性係数	抗力係数
	V_1	C_M	C_D
1	0.4	1.2	1.0
2	0.4	2.4	1.0
3	0.4	1.2	2.0
4	0.4	2.4	2.0

4.2 小規模実験の再現計算結果

図-16~図-18は水理実験結果と数値シミュレーション結果との時系列の比較を示したものである。(a)は堤体法先位置であり, (b)は堤体通過後の透過波である。各図は数値計算のケース毎(表-11参照)に分けて比較しており, 上段からcase1~case4となっている。

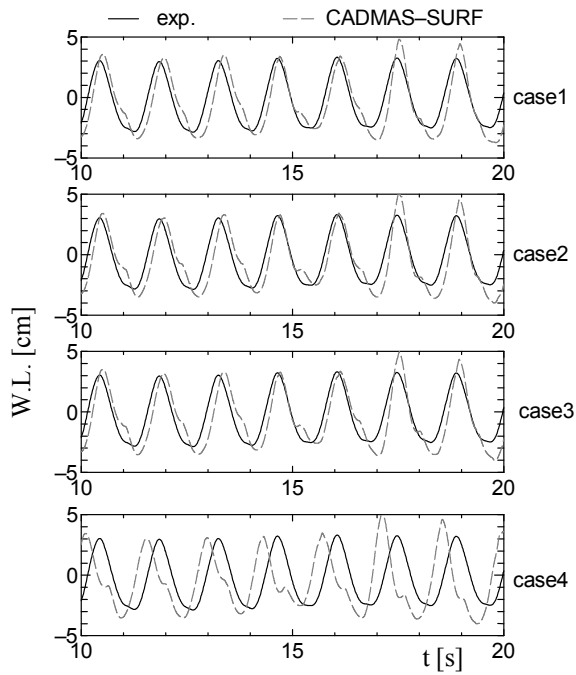
堤体法先位置での実験結果と数値計算結果の時系列は, 全入射波条件において, 数値計算結果でピーク値が過大評価となる傾向にあるが, 入射波と反射波の重複波浪場を波形も含めて良く再現できていることが分かる。また, 透過性構造物の設定の違いはほとんど影響していないことが分かる。

一方で, 傾斜堤透過後では透過性構造物の設定により波高, つまり透過波高が大きく異なることが分かる。特に抗力係数 C_D 値の影響が大きく, C_D 値を推奨値の2倍とすると, 透過波高としては半分程度まで小さくなることが分かる。

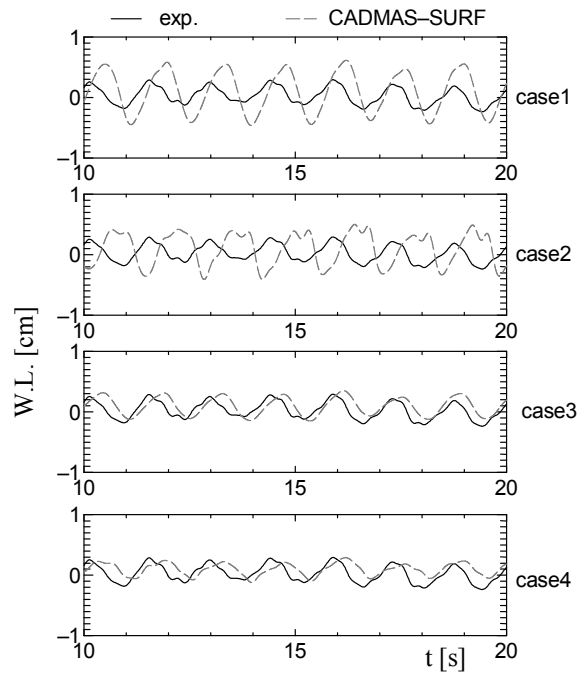
図-19~図-21はそれぞれ反射率, 透過率および無次元化したエネルギー損失量について, 実験値とCADMAS-SURF/3Dによる計算値について比較したものである。横軸は実験値, 縦軸は計算値である。まず, 反射率に関しては, 時系列の比較の際にも記したが, 反射率に対しては透過性構造物の設定の影響は小さく, 実験値の再現性も高いことが分かる。しかし, 詳細にみると抗力係数が1.0としたcase1, case2は抗力係数2.0のケースに比べて反射率は小さくなる。

一方で透過率に関しては, 抗力係数を1.0としたケースと2.0としたケースで比較すると約2倍程度過大評価となる。全体的な傾向としては抗力係数1.0のケースは実験値に対して過大評価となる。

無次元化したエネルギー損失量に関する実験値と計算結果との比較では, 今回計算で用いた透過性構造物設定パラメータでは, どの条件においても概ね実験値を再現している。反射率・透過率およびエネルギー損失量に関して総合的に再現性が高いのは, 慣性係数2.4, 抗力係数2.0としたcase4であった。

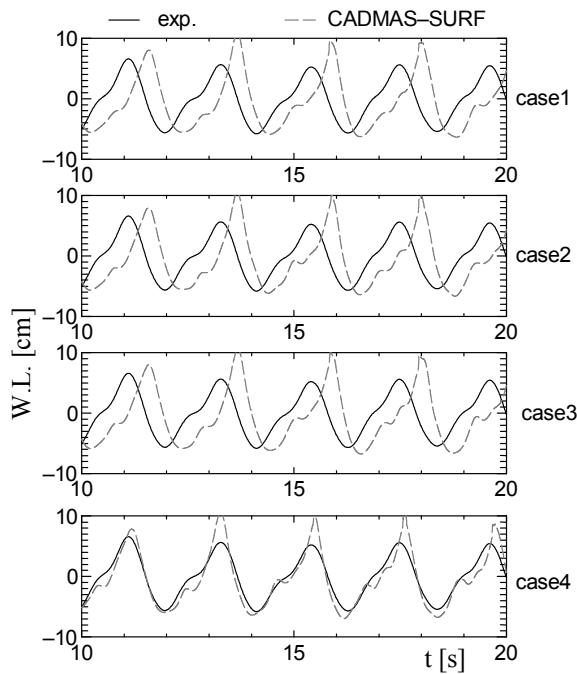


(a) 堤体法先位置

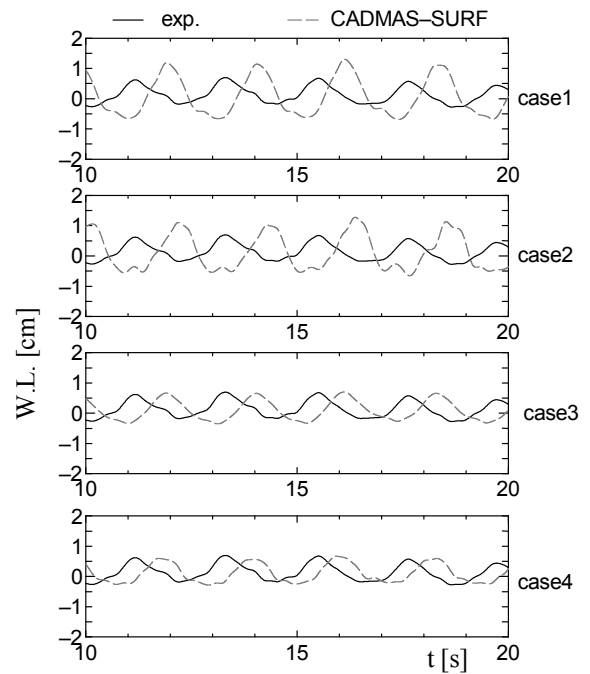


(b) 堤体通過後

図-16 実験と計算結果の時系列の比較 $H=7.49\text{cm}$, $T=1.41\text{s}$



(a) 堤体法先位置



(b) 堤体通過後

図-17 実験と計算結果の時系列の比較 $H=9.48\text{cm}$, $T=2.12\text{s}$

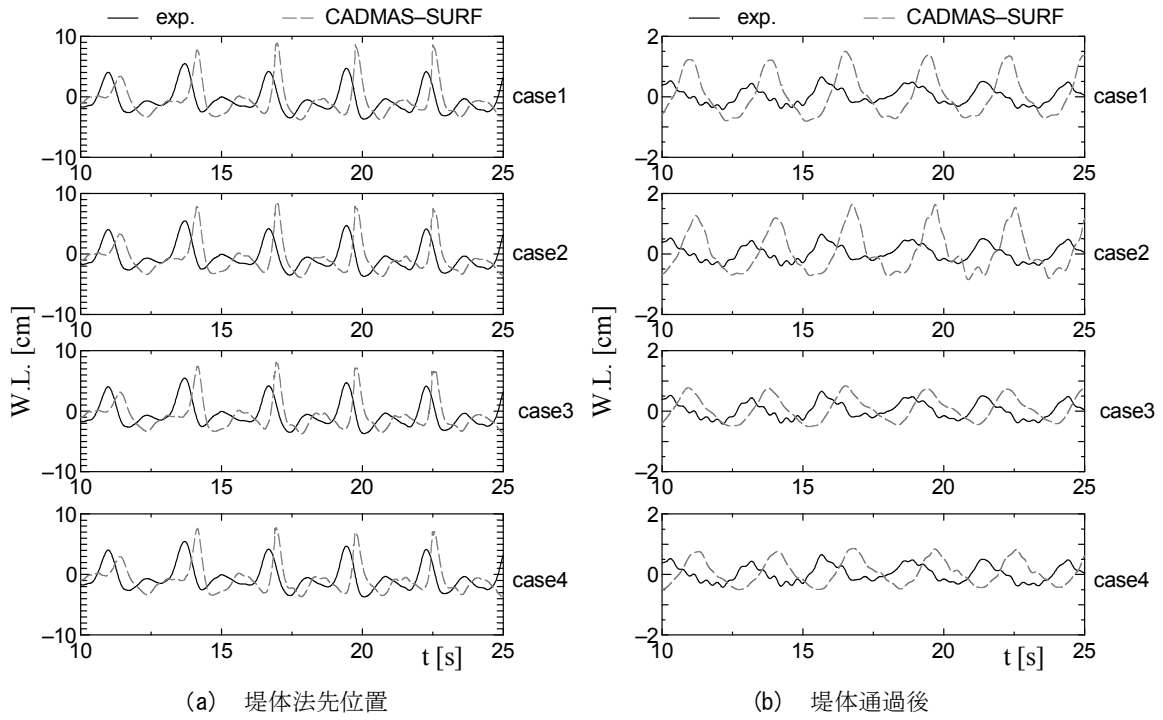


図-18 実験と計算結果の時系列の比較 $H=10.20\text{cm}$, $T=2.83\text{s}$

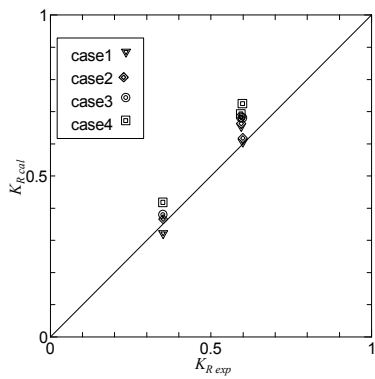


図-19 反射率に関する実験値（横軸）と計算値（縦軸）の比較

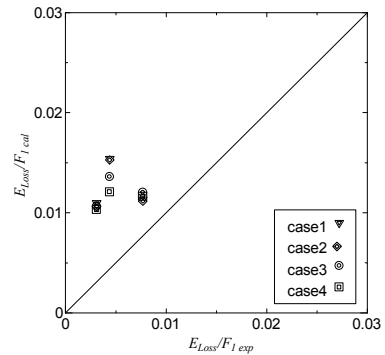


図-21 エネルギー損失量に関する実験値（横軸）と計算値（縦軸）の比較

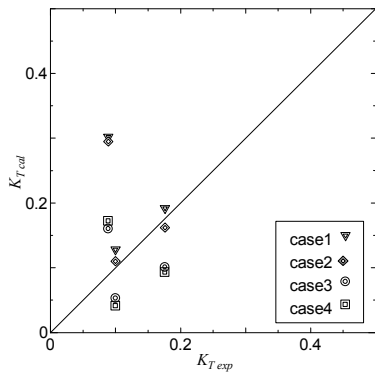


図-20 透過率に関する実験値（横軸）と計算値（縦軸）の比較

5. 結論

本研究では、捨石傾斜堤によるエネルギー損失量に着目した水理模型実験を行い、以下に示す結論を得た。

①傾斜堤によるエネルギー損失量は入射波の波形勾配と相関が強く、線形関係で評価できる。つまり波形勾配が大きくなるほどエネルギー損失量が大きくなる。波形勾配と無次元化したエネルギー損失量との間の比例係数は0.5程度である。

②不規則波実験におけるエネルギー損失量については、入射波・反射波および透過波のパワースペクトルの0次モーメントとしてエネルギーを評価した場合、規則波の実験結果と同様の傾向を示し、波形勾配の増大に伴いエ

エネルギー損失量は増大する。ただし、比例係数は 0.3 程度と規則波に比べて低下する。

③透過率については概ね近藤・竹田(1983)の実験式により評価が可能である。

④本研究において3つの異なるスケールによる実験を比較したが、エネルギー損失量、反射率、透過率に関して明確な影響は表れなかった。

また、3次元数値波動水槽による小規模実験の再現計算を行うことにより以下の結論を得た。

⑤透過性構造物をモデル化するパラメータの設定において、特に透過後の波形もしくは透過率に対して抗力係数が大きく影響する。本検討の範囲では、通常の推奨値とされている $C_M=1.2$, $C_D=1.0$ を用いた場合、透過率が実験結果の2倍程度過大評価となり、 $C_M=2.4$, $C_D=2.0$ と推奨値を2倍した値が実験結果を良く再現する結果となった。

今後の課題としては、断面実験に関しては、砕波を伴うような実験ケース、さらに堤体幅を変化させたケースの追加実験が挙げられる。本検討は断面現象を対象に行ってきたが、平面波浪場、特に斜め入射などに対する検討も重要であると考えている。

数値シミュレーションに関しては、Dupuit-Forheimer 則の適用性の検討が挙げられる。

(2010年8月13日受付)

参考文献

- 有川太郎・山田文則・秋山 実 (2005) : 3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.46-50.
- 合田良実・松本 朗 (2003) : 捨石防波堤全体に作用する波力ならびに堤体内部への波圧伝播の数値計算, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.529-534.
- 近藤一郎・竹田英章 (1983) : 消波構造物, 森北出版, 275p.
- (財)沿岸技術研究センター (2004) : 港内長周期波影響評価マニュアル.
- 鈴木高二朗・大寄菜々子・山本泰司 (2003) : 防波堤基礎での洗掘量の推定について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.886-890.
- 中嶋さやか・大島香織・安野浩一郎・水流正人・杉田繁樹・西畑 剛・関本恒浩・平石哲也 (2009) : 長周期波対策構造物の高度化に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.236-240.
- 平石哲也・平山克也・南 靖彦 (2007) : 現地港湾の長周期波対策における透過堤の適用性, 港湾空港技術研究所報告, 第46巻, 第3号, pp.3-19.

堀川清司(1991):新編 海岸工学, 東京大学出版会, pp.53.

水口 優 (1991) : 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.31-35.

山田晶子・国栖広志・爲廣哲也・小平田浩司・平石哲也 (2005) : 石巻港における長周期波の消波対策に関する検討, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.785-790.

記号表

A'	: 断面積
B_M	: 天端幅
B_{SWL}	: 静水面における堤体幅
C_D	: 抗力係数
C_M	: 慣性力係数
d	: 粒径代表値
D_x, D_y, D_z	: エネルギー減衰帯の係数
E_{LOSS}	: エネルギー損失量
F_I	: エネルギー損失量無次元化パラメータ
g	: 重力加速度
h	: 水深
H	: 波高
H_s	: 通過波高
K_R	: 反射率
K_T	: 透過率
L	: 波長
L'	: エネルギー損失を受ける区間長
m	: 砕石質量
p	: 圧力
R_x, R_y, R_z	: 抗力項
S_p, S_w, S_v, S_w	: 造波ソースに関する係数
T	: 周期
t	: 時間
u	: x 方向水平流速
U'	: 速度
v	: y 方向水平流速
V, γ	: 空隙率
w	: z 方向水平流速
x, y	: 水平座標
z	: 鉛直座標
α	: 比例係数
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 計算格子サイズ
$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: 各方向の面透過率
η	: 水面変動
η_i	: 水面変動岸向き成分
η_r	: 水面変動沖向き成分
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: 慣性力を表すパラメータ
ν_e	: 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和
ρ	: 水の密度

港湾空港技術研究所資料 No.1229

2011.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています