

かごマット水理実験結果報告書

2014 年 12 月 25 日

東海大学 海洋学部

はじめに

この報告書は、かごマット工法技術推進協会から依頼を受け、かごマット模型の安定係数算出実験を行ったものである。

東海大学 海洋学部
環境社会学科

教 授 田中 博通
臨時職員 居波 智也
臨時職員 櫻田 哲生



目次

1. 目的	1
2. ハドソン式による所要質量算定	1
3. 被災率	1
4. 実験施設及び実験器材	2
5. 実験波条件	4
6. 実験断面	5
7. 実験方法	5
8. 結果と K_D 値 (Aタイプ・Bタイプ)	8
9. 結果と K_D 値 (Cタイプ)	20
10. 結言	24

1. 目的

ハドソン式から、かごマット模型（A・B・Cタイプ）の K_D 値を算出する。

2. ハドソン式による所要質量算定

従来、一般によく使用されている所要ブロック質量の算定式は、Hudson が提案した(式 1)であって、この式中の係数 K_D 値が決定されれば、所要ブロック質量が算定できる。

$$M = \frac{\rho_r H_{1/3}^3}{K_D (\rho_r / \rho - 1)^3 \cot \alpha} \quad (\text{式 1})$$

ここで、 M ：ブロックの所要質量(t)、 ρ_r ：ブロックの密度(t/m^3)
 ρ ：海水の密度、 H ：堤体前面波高(m)、 α ：堤体方面角度、
 K_D ：安定係数
である。

3. 被災率

・ブロックの被災率

消波ブロックの散乱は、堤体の安定に関する重要な要素である。そこで、ブロックの散乱の状態を知っておくことが重要である。各模型に、ロッキング（振動）・転倒といった現象が観察された時、それを被災として定義し、(式 2)に従って被災率を求める。

$$D = \frac{a}{M} \times 100 \quad (\text{式 2})$$

- D : 被災率(%)
 M : 観察域での模型総個数(個)
 a : 被災模型個数(個)である。

4. 実験施設及び実験器材

実験は、東海大学海洋学部臨海実験所の写真1に示す2次元造波水路を使用して行った。

実験水路の主な仕様を以下に示す。

①水槽

長 さ：52.0m 幅：1.0m

深 さ：1.5m

鋼製一部片面ガラ張り

②造波機

型 式：ピストン式ACサーボモーター、ボールネジ駆動

発生波：規則波および不規則波（本実験では不規則波を発生）

周 期： $T=0.6\sim 5.0\text{s}$, $T_{1/3}=0.8\sim 3.0\text{s}$

波 高：規則波最大 30 cm, $H_{1/3}=20\text{ cm}$



写真1 東海大学海洋学部臨海実験所の2次元造波水路

パーソナルコンピュータ

日本電気株式会社 PC-9801As/U7

容量式波高計

株式会社ケネック CHT4-100

容量式波高計アンプ

株式会社ケネック K-281

ストップウォッチ

株式会社カシオ HS-5 1/100sec 表示

カメラ

株式会社オリンパス OZ120 ZOOM

ビデオカメラ

株式会社オリンパス OZ120 ZOOM

③かごマット模型仕様

本実験結果を解析する際に、ハドソン式において必要な係数となる比重であるが、コンクリートブロック（コンクリート単体）、袋詰玉石工（袋材の重量は無視して石材単体）とは異なり、今回の水理実験に使った模型においては、金網と石材の複合体としての仮想的な密度、比重を用いて計算を行なう方が適切と考えて試算した。以下表1にその結果を示す。

この計算結果から、Aタイプは3.17、Bタイプは2.96と比重を定めることとした。

表1 かごマット模型諸元

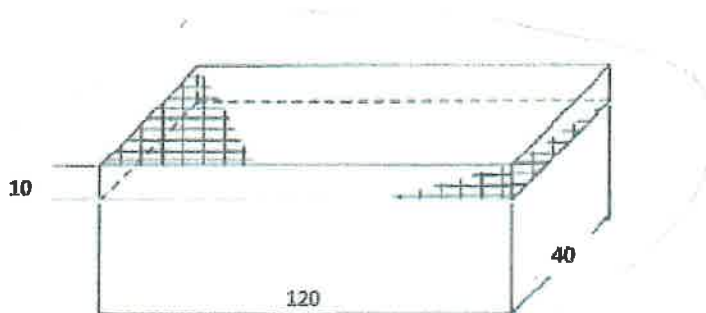
(Aタイプ模型:1ヶ当たり)

	重量(g)	密度(g/cm ³)	体積(cm ³)	全体仮想密度(ρ_r)
金網	19.22	7.80	2.46	—
中詰石	57.58	2.65	21.73	—
計	76.80	—	24.19	3.17

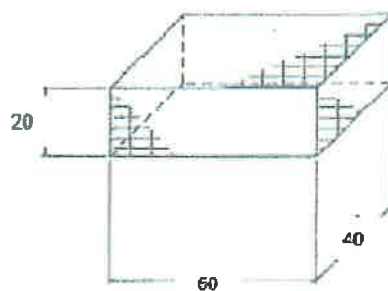
(B・Cタイプ模型:1ヶ当たり)

	重量(g)	密度(g/cm ³)	体積(cm ³)	全体仮想密度(ρ_r)
金網	12.10	7.80	1.55	—
中詰石	64.70	2.65	24.42	—
計	76.80	—	25.97	2.96

Aタイプ



B, Cタイプ



(単位:mm)

図1 かごマット模型寸法

5. 実験波条件

本実験の波条件を以下の表 2、3 に示す。(○: 造波可、×: 造波不可) A・B タイプ全て同様の波浪条件とした。なお、本実験で用いる不規則波のスペクトルは、修正 Bretschneider-光易型のスペクトルである。

表 2 実験波浪条件一覧

		周期(s)				
		1.2	1.6	2.0	2.2	2.4
波高 (cm)	10	○	○	○	○	○
	12	○	○	○	○	○
	14	○	○	○	○	○
	16	×	×	○	○	○
	18	×	×	×	○	○
	20	×	×	×	○	○

表 3 実験波浪条件一覧

造波タイプ	実域		模型(1/50)	
	波高 (m)	周期 (s)	波高 (cm)	周期 (s)
1012	5	8.5	10	1.2
1016	5	11.3	10	1.6
1020	5	14.1	10	2
1022	5	15.6	10	2.2
1024	5	17.0	10	2.4
1216	6	11.3	12	1.6
1220	6	14.1	12	2
1222	6	15.6	12	2.2
1224	6	17.0	12	2.4
1224	6	17.0	12	2.4
1212	6	8.5	12	1.2
1412	7	8.5	14	1.2
1416	7	11.3	14	1.6
1420	7	14.1	14	2
1422	7	15.6	14	2.2
1424	7	17.0	14	2.4
1620	8	14.1	16	2
1622	8	15.6	16	2.2
1624	8	17.0	16	2.4
1822	9	15.6	18	2.2
1824	9	17.0	18	2.4
2022	10	15.6	20	2.2
2024	10	17.0	20	2.4

なお、ファイル名は図 2 に示す形式となっている。模型タイプと断面タイプの組み合わせにより、模型タイプが変化する点に留意した。

波高(10~20)	周期(12~24)	模型タイプ(1, 2)	断面タイプ(1, 2)
10:10cm	12:1.2s	1:A	1:1/3勾配
		2:BかC	2:1/1勾配

例) 101211: 波高10cm、周期1.2s、Aタイプ、1/3勾配

例) 101222: 波高10cm、周期1.2s、Cタイプ、1/1勾配

図 2 実験ファイル名

6. 実験断面

図3に本実験における断面を示す。A、Bタイプ模型の断面は1:3勾配、Cタイプ模型は1:1勾配となる。使用模型個数は、Aタイプ模型138個、Bタイプ模型276個使用した。なお、詳細な実験方法は後述するが、Cタイプ模型は階段の段数を変化させるため、個数は400個～272個となる。

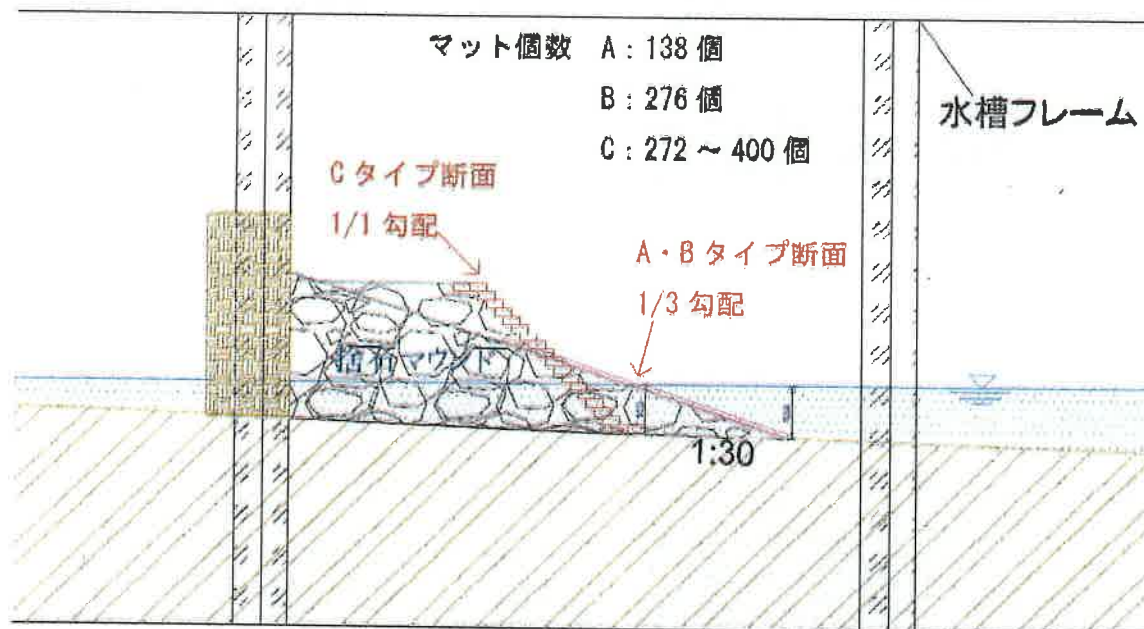


図3 実験断面図

7. 実験方法

- (I) 海岸勾配を1:30とし、模型の法面勾配を図3に示すように地形を整えた。
- (II) 写真2～7に示すように、A、B、Cの模型をマウンド上に配置した。



写真2 模型配置例
(Aタイプ：上面)



写真3 模型配置例
(Aタイプ：側面)



写真 4 模型配置例
(B タイプ : 上面)



写真 5 模型配置例
(B タイプ : 側面)



写真 6 模型配置例
(C タイプ : 上面)



写真 7 模型配置例
(C タイプ : 側面)

- (Ⅲ) 水槽に所定の水深となるように水を入れた。
- (Ⅳ) 波高の計測のため、水槽中央部の位置に容量式波高計を設置し、キャリブレーションを行う。波高は、容量式波高計より得られた電圧をパソコンにより、AD 変換を行い波高に換算して、入射波高及び反射波高を求めた。
- (Ⅵ) 堤体に作用させる波は、堤体模型で反射した波が造波板によって再反射して、かごマット模型に入射しないように反射吸収制御して造波した。また、各実験で各周期・各波高の組み合わせた波を 1000 波作用させるため、周期 1.2sec、1.6sec、2.0sec、2.2sec、2.4sec でそれぞれに対応させて 20 分 00 秒、26 分 40 秒、33 分 20 秒、36 分 40 秒、40 分 00 秒間造波した。反射率は、二点間法による測定法に従い、容量式波高計とパソコンを接続して読み取り反射率を計算した。
- (Ⅶ) かごマット模型の被災状況を側面と上面から目視観察し、その位置と被災状況を記録した。かごマット模型の安定に関しては、消波ブロックの安定性を評価する際と同様に、ロッキングした後安定(A)・ロッキング(B)・激しくロッキング(C)・飛び出し (D) の項目で区分し、測定は目視に

よって行った。

なお、ロッキングした後安定(A)とは、模型が波の影響により動き、その後安定して動かなくなった状態のことであり、ロッキング(B)とは、大きな波高の波などで数波に1回の割合で少しでも動く模型の状態を指し、激しくロッキング(C)とは、毎回波によって模型がその場所を中心に大きく動く状態を指し、飛び出し(D)とは、模型が元の位置からかごマット模型の大きさの1/2以上移動、および模型が45度以上回転した状態を指す。本実験において、被災状況(C)と(D)を被災と判断し考慮した。次ページ表3-4に模型の挙動区分を示す。

表4 かごマット模型の挙動区分

評価	挙動の区分	記号	被覆かごマット模型の挙動
安定	ロッキング後安定	A	・クリアランス内で動揺している ・片側が僅かに浮き上がる ・基礎マウンドの不陸により頻繁に揺れる
	ロッキング	B	・かなり激しく動揺しても、ほぼ元の位置にとどまる ・かごマット模型高の1/2程度浮き上がっても、元の位置に戻る
被災	激しくロッキング	C	・かごマット模型が元の位置から浮き上がり、その一部が隣接のかごマット模型に乗り上げる
	飛び出し	D	・元の位置から、完全に離脱する

※ただし、本実験における被災領域が断面の最上段近傍であったため、目視による観察でもAやBといった挙動はとらえきれなかった。

(Ⅷ) 実験開始前、実験中、及び実験終了後に写真または動画撮影(3分間)をした。

8. 結果と K_D 値 (A タイプ・B タイプ)

C タイプ模型における実験断面は階段状になっており、既存のハドソン式で考えられる A・B タイプとは本質的に異なると考え、以降に示す表 5~15 は A・B タイプの結果となる。

表 5 模型タイプ別の実験結果一覧

ケース名	実測波浪			ブロック種類	被災個数	被災率
	波高	周期	反射率			
101211	10.47	1.28	0.216	A	0	0.00
101611	11.03	1.6	0.235	A	0	0.00
102011	10.8	1.9	0.262	A	0	0.00
102211	10.21	2.02	0.285	A	0	0.00
102411	11.36	2.44	0.285	A	0	0.00
121611	12.94	1.58	0.231	A	0	0.00
122011	13.12	1.98	0.25	A	0	0.00
122211	12.82	2.11	0.271	A	0	0.00
122411	13.48	2.36	0.264	A	0	0.00
121211	13.14	1.24	0.187	A	0	0.00
141211	15.11	1.26	0.185	A	0	0.00
141611	15.29	1.58	0.216	A	0	0.00
142011	14.99	2.02	0.231	A	0	0.00
142211	14.71	2.15	0.257	A	0	0.00
142411	13.45	2.39	0.267	A	0	0.00
162011	16.74	2	0.223	A	0	0.00
162211	16.83	2.09	0.208	A	2	1.45
162411	17.59	2.44	0.208	A	1	0.72
182211	18.59	2.19	0.201	A	3	2.17
182411	18.84	2.41	0.195	A	4	2.90
202211	20.63	2.24	0.2	A	5	3.62
202411	20.78	2.50	0.185	A	7	5.07
101221	10.3	1.26	0.221	B	0	0.00
101621	11.16	1.61	0.236	B	0	0.00
102021	10.74	1.88	0.261	B	0	0.00
102221	10.18	2.05	0.283	B	0	0.00
102421	11.5	2.45	0.286	B	0	0.00
121221	12.92	1.23	0.194	B	0	0.00
121621	13.05	1.57	0.222	B	0	0.00
122021	13.12	2.02	0.243	B	0	0.00
122221	12.73	2.09	0.264	B	0	0.00
122421	13.64	2.4	0.269	B	0	0.00
141221	15.01	1.24	0.192	B	0	0.00
141621	15.3	1.61	0.222	B	0	0.00
142021	15.22	2.02	0.247	B	0	0.00
142221	14.74	2.17	0.258	B	0	0.00
142421	14.78	2.48	0.265	B	0	0.00
162021	17.21	2.02	0.224	B	0	0.00
162221	16.85	2.09	0.207	B	3	1.09
162421	17.47	2.46	0.203	B	3	1.09
182221	18.82	2.20	0.193	B	5	1.81
182421	19.21	2.42	0.192	B	6	2.17
202221	20.93	2.38	0.187	B	7	2.54
202421	20.88	2.49	0.177	B	7	2.54

表 6 A タイプ実験結果 (周期: 1.2s)

実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: A 周期: 1.2(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 近似式: $y = 0$ 被災率1%時 波高:		被災率(%) 波高(cm) $y = 0$	
被災状況 101211		被災状況 121211	
被災状況 141211		被災状況	
被災状況		被災状況	

表 7 A タイプ実験結果 (周期: 1.6s)

実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: A 周期: 1.6(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 近似式: $y = 0$ 被災率1%時 波高:		$y = 0$	
被災状況 101611		被災状況 121611	
被災状況 141611		被災状況	
被災状況		被災状況	

表 8 Aタイプ実験結果 (周期: 2.0s)

実験条件		被災率(%)	
波面タイプ: A 周期: 2.0(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 近似式: $y = 0$ 被災率1%時 波高:		被災率(%) 波高(cm) $y = 0$	
被災状況 102011		被災状況 122011	
被災状況 142011		被災状況 162011	
被災状況		被災状況	

表9 Aタイプ実験結果（周期：2.2s）

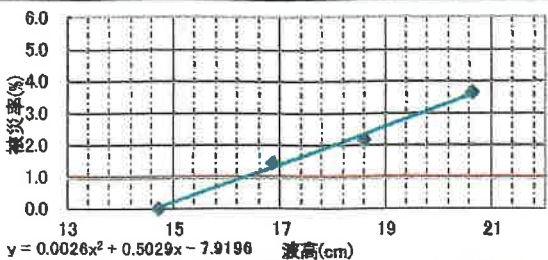
実験条件		被災率(%)	
波面タイプ: A 周期: 2.2(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm, 20cm, 近似式: $y = 0.0026x^2 + 0.5029x - 7.9196$ 被災率1%時 波高: 16.35 cm		 $y = 0.0026x^2 + 0.5029x - 7.9196$ 波高(cm)	
被災状況 102211		被災状況 122211	
被災状況 142211		被災状況 162211	
被災状況 182211		被災状況 202211	

表 10 Aタイプ実験結果 (周期: 2.4s)

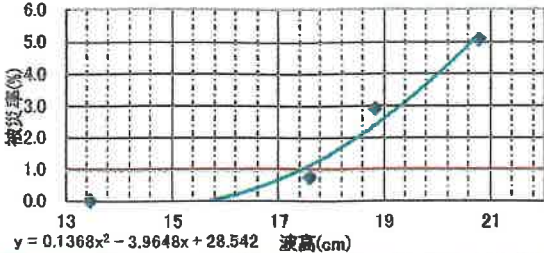
実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: A 周期: 2.4(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm, 20cm, 近似式: $y = 0.1368x^2 - 3.9648x + 28.542$ 被災率1%時 波高: 17.43 cm		 $y = 0.1368x^2 - 3.9648x + 28.542$	
被災状況 102411		被災状況 122411	
被災状況 142411		被災状況 162411	
被災状況 182411		被災状況 202411	

表 11 Bタイプ実験結果 (周期: 1.2s)

実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: B 周期: 1.2(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 近似式: $y = 0$ 被災率1%時 波高:			
被災状況 101221		被災状況 121221	
被災状況 141221		被災状況	
被災状況		被災状況	

表 12 B タイプ実験結果 (周期: 1.6s)

実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: B 周期: 1.6(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 近似式: $y = 0$ 被災率1%時 波高:			
被災状況 101621		被災状況 121621	
被災状況 141621		被災状況	
被災状況		被災状況	

表 13 B タイプ実験結果 (周期: 2.0s)

実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: B 周期: 2.0(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 近似式: $y = 0$ 被災率1%時 波高:			
被災状況 102021		被災状況 122021	
被災状況 142021		被災状況 162021	
被災状況		被災状況	

表 14 B タイプ実験結果 (周期: 2.2s)

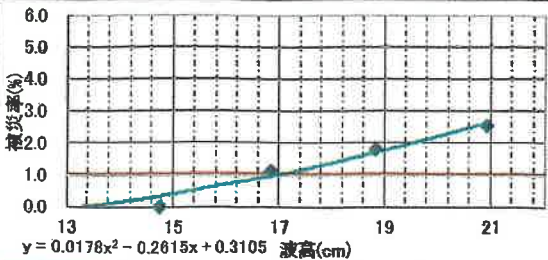
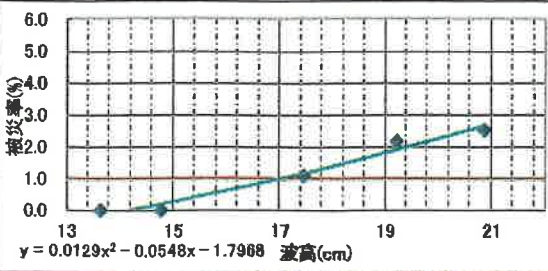
実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: B 周期: 2.2(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm, 20cm, 近似式: $y = 0.0178x^2 - 0.2615x + 0.3105$ 被災率1%時 波高: 16.97 cm		 $y = 0.0178x^2 - 0.2615x + 0.3105$ 波高(cm)	
被災状況 102221		被災状況 122221	
被災状況 142221		被災状況 162221	
被災状況 182221		被災状況 202221	

表 15 B タイプ実験結果 (周期: 2.4s)

実験条件		被災率(%)	
波面タイプ: B 周期: 2.4(s) 波高: 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm, 20cm, 近似式: $y = 0.0129x^2 - 0.0548x - 1.7968$ 被災率1%時 波高: 17.00 cm		 $y = 0.0129x^2 - 0.0548x - 1.7968$ 波高(cm)	
被災状況 102421		被災状況 122421	
被災状況 142421		被災状況 162421	
被災状況 182421		被災状況 202421	

当初、被災のメカニズムは図 4 に示す通り、遡上した波がかごマット背後の砂利を洗掘し、形成された窪地にかごマットが落下することによって起きると考えられた。しかし、実際には、時間経過と共に背後の砂利は徐々に洗掘されるものの、それよりも早くかごマットが被災する事がわかった。加えて、背後の砂利を洗掘するほど勢いのついた大きな波頭は、かごマット上端部から少し距離をおいた部分に到達し（図 5 中の赤丸付近）洗掘部を形成するため、図 4 に示す、かごマットが落下する被災挙動は見受けられなかった。

実際に起きた被災挙動は、同一不規則波スペクトルの中でも、特に大きな最大波近傍の波が襲来する際に、最上段の一行が波の遡上と同方向に抜ける挙動であった。この挙動は、マウンド内部の間隙水が、襲来する波の影響を受け、かごマットに揚圧力を働かせた結果、かごマットが浮き、遡上波とともに動いたのではないかと考えられる。（図 5）



図 4 当初の被災予想

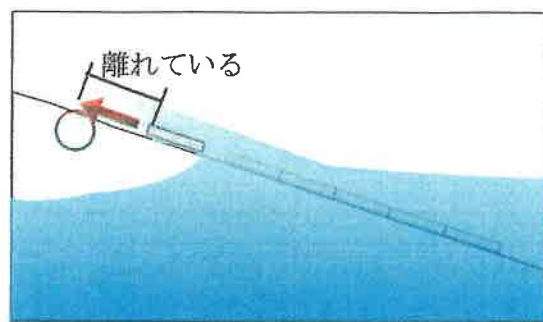


図 5 実際の現象

表 6～15 に示す被災 1%時の波高から、周期 2.2s、2.4s における K_D 値を算出した。また、それらの結果から、模型タイプ別の平均 K_D 値を以下の表に示す。A タイプ模型は K_D 値 7.0、B タイプ模型は K_D 値 8.7 となった。

表 16 模型タイプ別・周期別 K_D 値と平均 K_D 値

模型タイプ	各周期 K_D 値		平均 K_D 値
	2.2s	2.4s	
A	6.2	7.8	7.0
B	8.6	8.9	8.7

9. 結果と K_D 値 (C タイプ)

図 1 に示す C タイプの標準断面 (11 段 (水面上は 4 段)) では、越波した波の影響を受け、かごマット天端背後の碎石が洗掘され一定時間後に被災した。この現象は波高 12cm から見受けられた。(2014 年 10 月 14 日の見学時に確認)

○実験方法の再考

C タイプの被災形態は、越波による洗掘が主な被災原因と考えられるため以下に示す 2 つの方法を試した。

①現在東海大学にある B タイプのかごマット全てを使用し、可能な限り積み上げ (標準断面+7 段: 計 18 段)、徐々に段数を減らしながら、途中、被災した段数で K_D 値を試算する。被災段数を探す波条件が一番厳しい条件となる波高 20cm、周期 2.4s とした。従来の消波ブロックに対する K_D 値とは考え方が異なるため、 K_{DO} (Overtopping: 越波) とする。なお、天端は被覆しない。

②標準断面の条件下において、被災の原因と考えられる天端の洗掘を防ぐために、天端全てを B タイプかごマットで被覆する。

なお、実験方法や条件が変わったため、図 6 に新たなファイル名の定義を示す。「天端形状および段数」と「実験方法①②」は、実験方法の再考に際して発生した変更点である。

波高(10~20)	周期(12~24)	天端形状および段数(0, 7, 5, 4)	実験方法(3, 4)
10: 10cm	12: 1.2s	0: 天端にかごマットを敷き詰める 7~4: Cタイプの標準断面に加えた段数	3: 実験方法① 4: 実験方法②
例) 122473: 波高12cm、周期2.4s、7段追加断面、実験方法①			
例) 122404: 波高12cm、周期2.4s、天端敷き詰め、実験方法②			

図 6 実験ファイル名

○結果

①+7段、+5段と高さを変えた結果、+4段（計15段：水面上8段）で被災した。以下に示す写真は+7段、+5段の結果となる。



写真8 造波前（+7段（水面上11段））



写真9 造波後（+7段（水面上11段））



写真10 造波前（+5段（水面上9段））



写真11 造波後（+5段（水面上9段））

+4段の被災状況を以下表17に示す。造波条件は設定波高を18cm、19cm、20cmとし、周期は最も厳しい条件となる2.4sとした。出力された波と被災個数はそれぞれ、20.09cm、2.37s：0個、20.72cm、2.44s：3個、21.41cm、2.47s：7個となった。

表17 模型タイプ別・周期別 K_D 値と平均 K_D 値

ケース名	実測波浪			ブロック種類	被災個数	被災率
	波高	周期	反射率			
122404	13.76	2.32	0.273	C	0	0
162404	17.92	2.40	0.248	C	0	0
202404	21.72	2.47	0.209	C	0	0
122473	13.94	2.31	0.299	C	0	0
202473	21.96	2.51	0.232	C	0	0
202453	21.72	2.50	0.237	C	0	0
202443	21.41	2.47	0.238	C	7	2.573529
182443	20.09	2.37	0.253	C	0	0
192443	20.72	2.44	0.232	C	3	1.102941

表 18 『+4段（全 15 段：水面上 8 段），周期 2.4s』の結果

実験条件		被災率(%)	
法面タイプ: C 全面被覆: なし 追加段数: 周期: 2.4(s) 波高: 12cm, 20cm, 20cm, 20cm, 19cm, 18cm 近似式: $y = 0.2883x^2 - 10.016x + 84.847$ 被災率1%時 波高: 20.60 cm			
被災状況 182443		被災状況 192443	
被災状況 202443			

この結果から、1%被災時の波高が 20.60cm と判明した。この波高から求まる K_{DO} 値は、51.21 となる。

②標準断面かつ天端を全て被覆した結果、どの条件においても被災は見られなかった。以下に結果の写真を示す。



写真 12 造波前 (波高 12cm、周期 2.4s)



写真 13 造波後 (波高 12cm、周期 2.4s)



写真 14 造波前 (波高 16cm、周期 2.4s)



写真 15 造波後 (波高 16cm、周期 2.4s)



写真 16 造波前 (波高 20cm、周期 2.4s)



写真 17 造波後 (波高 20cm、周期 2.4s)

10. 結言

- (1) Aタイプ模型の K_D 値は、2.2s の場合 6.2、2.4s の場合 7.8 となり、平均 K_D 値は 7.0 となった。
- (2) Bタイプ模型の K_D 値は、2.2s の場合 8.6、2.4s の場合 8.9 となり、平均 K_D 値は 8.7 となった。
- (3) Cタイプ模型の K_{DO} 値は、+4 段（全 15 段：水面上 8 段）、周期 2.4s の場合 51.21 となった。天端をかごマットで覆った場合、被災は見受けられなかった。
- (4) コンクリート護岸ブロックと比較し、打ちあがった波は消波されることから反射率が小さくなる利点がある。