

蛇かごタイプの消波工の耐波安定性について

Stability for Wave of Compacted Rubble Type Wave Dissipating Block

平石哲也

Tetsuya HIRAISHI

Synopsis

A rectangular net type armor unit(Marine-mat) with rubble in it is proposed to prevent the scouring. The unit is implemented practically in a small space and the construction speed becomes relatively short. In the paper the stability number in stormy waves N_s is derived in a series of hydraulic experiment using 1/50 marine mat models. The experimental results demonstrate the N_s number become about 3 to 4. Secondary Isbash formula is adapted for tsunami flow test to investigate the coefficient y . The coefficient y becomes about 0.8 by analysis of damage ratio test in tsunami action.. In the both experiments the allowable damage ratio is approximated to be 2%.

キーワード: 港湾築堤マット、マリンマット、波に対する安定係数、イスバッシュ数

Keywords: Gabion, Marine-mat, Stability coefficient, Isbash number

1. はじめに

日本の海岸は各地で侵食が進み、その対策が急務となっている。侵食が進むと背後地への波あたりが強くなり、護岸を越波して、住宅地等へ浸水する場合がある。また、護岸の基礎も洗掘等の被害を受ける。海浜の侵食対策としては、離岸堤や突堤あるいは潜堤が各地で用いられている。特に潜堤は岸沖方向の幅がある程度広いとき人工リーフとも言われ、景観にも優れ、さまざまなタイプのものが考案されている。その多くは、コンクリートの厚さが小さめの長方形ブロックで形成されており、設計波が来襲しても転がってしまわないような重量が設定されている。一方、ブロック自体が固いコンクリート製であり、可撓性がないので波によって海底面が洗掘されるとブロックの底面が浮き上がり基部が洗掘されてしまいブロックそのものも海底中に沈み込む事例が報告されている。また、ブロックを製作するためには型枠と材料を持ち込む必要があり運搬コストや建設コストがかかる。

そこで、これまで小型の形式が河口部の護岸などで使われた実績を有する蛇かご型(港湾築堤マット)

の消波工(以下、マリンマットと呼ぶ)を沿岸で用いることを提案し、河川で使われているものより大型の 5t~20t 程度のマリンマットを沿岸域に導入し、離岸堤や人工リーフの材料として活用することを検討した。マリンマットは、型枠は網だけなので大量に一度に輸送が可能である。また、内容物は碎石であり、沿岸で取れるものを用いればいいので材料にも困らない。また、もともと、可撓性、透水性に優れているので洗掘防止工として活用が期待できる。本研究では、マリンマットの実用化を図るため、うねり性の波浪および津波流に対する安定性を実験で検討することを目的とした。

2. 実験の方法

(1) 実験手法

Photo 1 にマリンマットの 1/50 縮尺の模型を示す。実験で用いたマリンマット模型は、長さ 6 cm、高さ 2 cm、幅 4 cm、質量 80 g であり、実機では 10 t タイプに相当する。マリンマットは、もともと、鉄線ワイヤーで製作されたパネル状の金網を四角い籠体にして碎石を詰め、上から蓋を取り付けるシンプルな

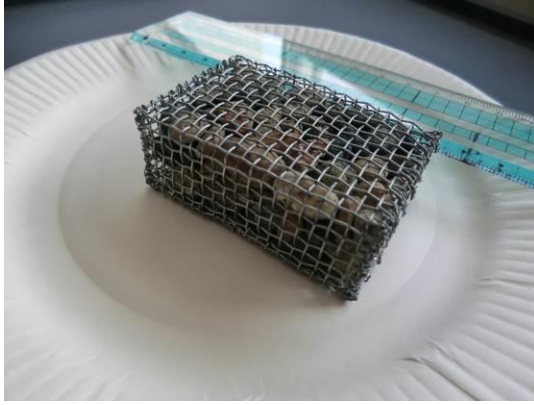


Photo 1 Overview of Marin-mat

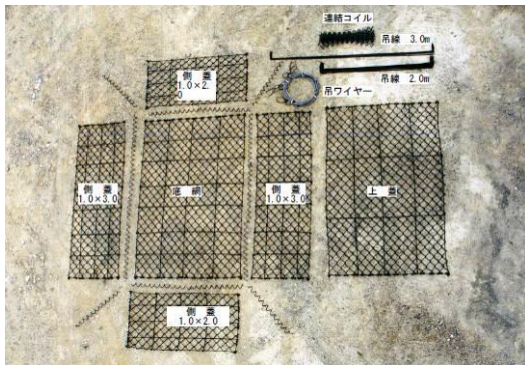


Photo 2 Composition parts of marine-mat

もので、重さについては、目標値の前後にばらつく場合がある。

Photo 2 にマリンマットの外側の網材を示す。現場まで運ぶものはこの網材のみで、網材を組み立てて、砕石を詰めることにより、短時間で簡単にマリンマットを製作できる。

実験は、京大防災研究所宇治川オープンラボラトリー3号棟平面水槽の一部を仕切り壁でくぎった水路でおこなった。水深は20cmおよび24cmとし、水底から高さ10cmの径3~4cmの砕石を用いてマウンドを作成して、その上に、被覆材としてマリンマットを2層で被覆した。用いたマット数は2層合計で100個である。うねり性の波のケースでは実機の有義波周期 $T_{1/3}=14.1s$ および $10.1s$ の2ケース、水深は12m（マウンドが5m分あるのでマリンマットの面は7mになる）とした。このとき、波高を3mから順に大きくしていき1000波作用させたときの被災個数を数えた。被災状況は、複雑で、その場で回転したり、わずかに移動する場合や完全に波で動かされてマウンドから落ちたり、マウンドの他の場所へ移動してしまうものなどがあつた。そこで、移動個数としてカウントする場合に、被災形態を考慮するために以下のように、数値を与えた；元にあ

った位置から完全に移動したもの、回転して跳んだものは1個とカウントし、もとの位置にあるものの、少し移動したり回転したものを、0.5個とカウントする。

津波流の場合も同様のマウンド上に2層にマリンマットを被覆材として並べ津波を模擬した孤立波を作用させて動揺を観察した。孤立波は、ピストン型造波装置を後方に下げて一挙に前方に押すことによって造波するので1度きりの衝撃的な波作用になる

波浪については次式の安定係数を用いてマリンマットの安定性の指標とした。この係数は人工リーフの被覆材の安定性を示す指標として標準的に用いられており、この値から必要な被覆材質量が求まる（土木学会，2000）。

$$M = \frac{\rho_s H_{1/3}^3}{N_s^3 \Delta^3} \quad (1)$$

M : 被覆材の所要質量

ρ_s : 被覆材の単位体積質量

N_s : 安定係数

Δ : $\rho_s / \rho_w - 1$ (ρ_w : 水の密度)

津波流に関しては流れの中での被覆材の安定係数として以下の式が用いられる。式中の y がイッシュ数と呼ばれる安定での指標であり、捨石の場合は0.9~1.2になる（岩崎・真野，1984）。

$$M = \frac{\pi \rho_y U^6}{48 y^6 g^3 (S_y - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (2)$$

M : 被覆材の所要質量 (t)

ρ_y : 被覆材の単位体積質量 (t/m^3)

U : 捨石等の上面における水の流速 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s^2)

S_y : 被覆材の水に対する比重

θ : 水路床の軸方向に対する勾配

(本実験では $\theta=0^\circ$)

Fig.1に津波を模擬して造波した波形を示す。実験では、ピストンタイプ造波装置を用いて、孤立波を再現しており、入力値としては、目標孤立波高を入

力する。ただし、イスパッシュ数は、流速を外力とした式であり、孤立波の流速を測っておく必要がある。Fig1 では上段に水位の変化を、下段に流速の変

化を示す。目標入力波高は 10 c m であり、出力された波高は 8 c m とやや小さくなっている。このときの水深 h は 20 c m である。

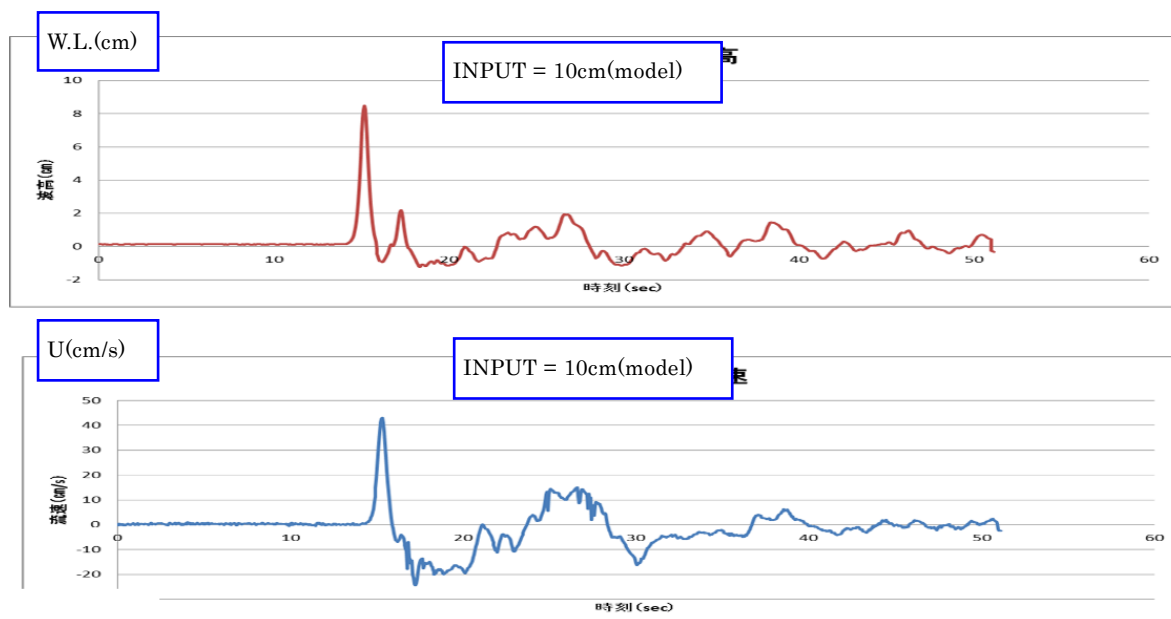


Fig. 1 Variation of water level and current velocity of tsunami in basin
(upper : water level, lower : current velocity)

Water depth $h=20\text{cm}$

INPUT(cm)	OUTPUT	
	$U_{\max}(\text{cm/s})$	$\eta_{\max}(\text{cm})$
4	20.81299	3.428
5	24.70703	4.331
6	31.98853	5.831
7	35.68726	6.892
8	39.74609	7.542
9	41.15601	8.257
10	45.56885	9.297
11	51.08643	10.757
12	55.45044	11.892
13	57.47681	12.698
14	62.44507	13.437
14.9	63.80615	14.4

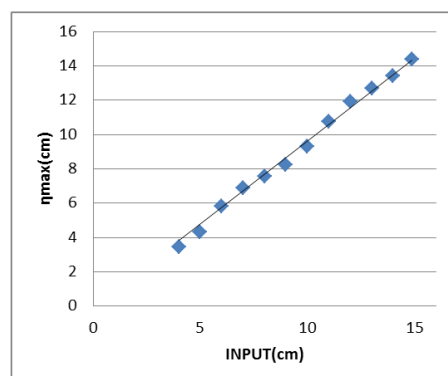
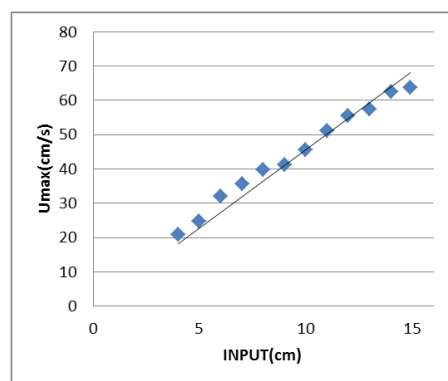
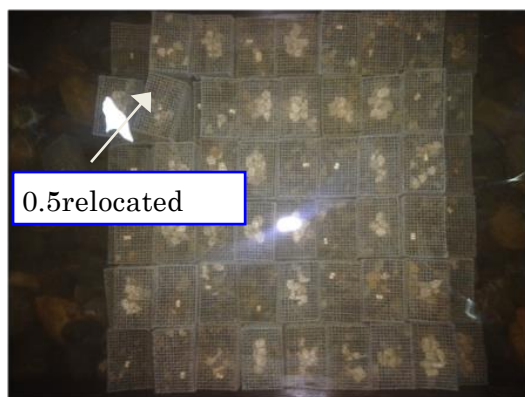


Fig.2 Relation between the maximum wave height and current velocity and INPUT value



(1)0.5 relocation



(2)1.0 relocation

Photo 3 Situation of relocation of marine-mat ((1) ; only rotation : (2) ; perfectly relocated))

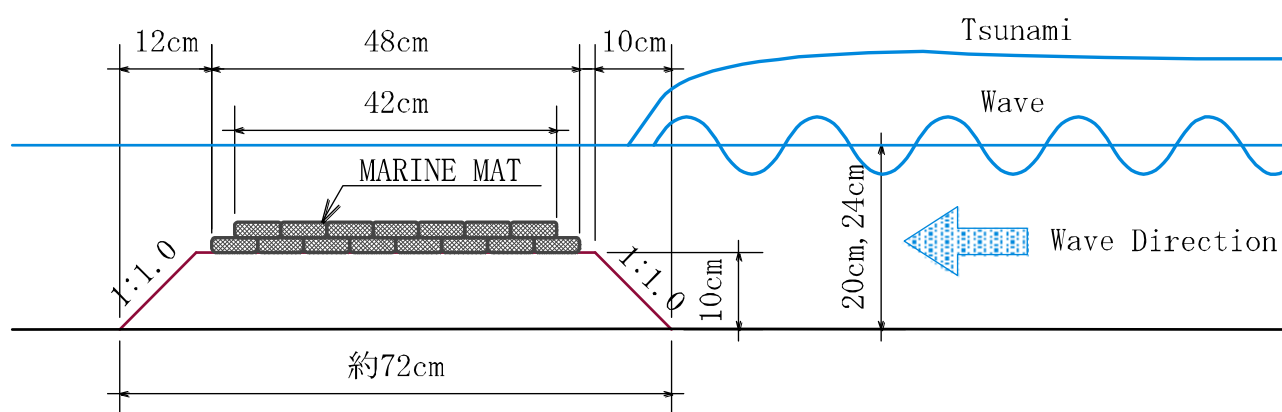


Fig.3 Cross section of submerged breakwater model

流速は、40 cm/s で最大となり、現地では、約 3m/s である。津波の最大流速としてはやや小さいかもしれないが、本造波水槽では、ほぼ最大値に相当するのでこの値を最大として、実験を行った。実験は、最大値になるまで徐々に波高・流速を上げていき、マリンマットの移動個数をその都度、目視で数えた。マリンマットの動きは、前述のように元の位置から完全に動いた場合を“1”，その場で回転した場合を“0.5”とした。Fig.1 の上段の孤立波の波高変化は鋭いピークの後に小さなピークが存在するが、これは壁面からの反射波の影響と考えられる。その高さは、最初のピークの 1/5 程度で小さく、マリンマットの移動にはいい影響しないものと考えられる。下段の図に示された作用流速については、最初に押し波による沖側に向かった流れがあり、そのあと、壁面からの影響もあり引き波が生じる。一方、流速の値としては小さく、押し波時の最大が Fig.1 の場合に約 40 cm/s であるのに対して引き波での最大流速は約 25cm/s であり、押し波時に被災する可能性が高い。本実験で

は、運転終了後に流れが静まったことを確認してから被災個数を確認する手法をとっているので、引き波の影響については検証していない。Fig.2 に他の入力値での最大波高（ピーク値）と最大流速（ピーク値）を整理した。ほぼ線形で近似ができる。

Photo 3 に、蛇かごブロックの移動状況を示す。左の図は“0.5”移動の状態の代表例を示したもので、マリンマットはその場にその場にとどまっているものの、30 度程度回転している。このような事例を移動 0.5 と判断していく。右側の図はマウンド上に明らかに一つのマリンマットが落下しており、移動個数を 1.0 とする。このほかにもマウンド上で移動が 0.5 と認められるマリンマットが数個存在している。

Fig.3 に今回の実験の対象とした潜堤模型の断面図を示す。マリンマットは、沖合潜堤の被覆工として用いられ、小型碎石で形成されたマウンド工の被覆材として用いられる。通常は、コンクリートの平型ブロックが用いられるが、工事費が高

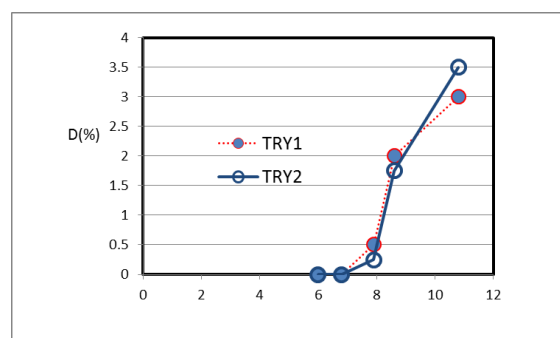
いことと、洗掘は被害が受けやすいことが欠点となっている。これに対して、マリンマット工事費が廉価であることと、透過性を有しており、洗掘被害を受けにくいことが期待できる。基本的に 2 段積みで砕石部を被覆することを想定している。

1 段だけの実験も行い、2 段以上の安定性が確保できることを確認しており、2 段のうち一部が被災しても、問題なく機能が果たせることが保障できている。

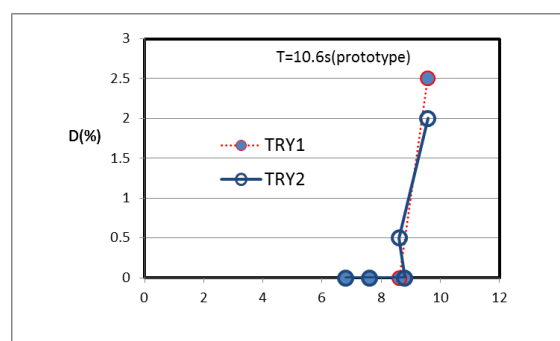
(2) 許容被災率

実験にあたって、許容被災率の値を設定する必要がある。通常、2～5%の値が用いられるので、本研究においても、波高を変えて波に対する被災状況を調べた。

Fig.4 に波浪に対する作用波高と被災率の関係を示す。波高がある段階を超えると、被災率は急激に増加し、すぐに 2%に到達し、その後は、急激に大きくなる傾向を有しているようである。そこで、被災限界として、許容率を 2%と定め、波浪と津波に対する実験を行うことにした。



(1) $T_{1/3} = 14.1s$ (prototype)



(2) $T_{1/3} = 10.6s$ (prototype)

Fig.4 Relation between wave height and damage ratio

3. 実験の結果

(1) 波浪

ピストン型造波機で起こした波は、あらかじめ検定をしておいたが、模型からの反射波等で変化するので実験中は、模型の岸側と沖側で波高を観測しその平均を作用波高として整理した。Table 1 に実験の結果として造波板への INPUT 値と観測波高、1 回目の試行で動いた模型個数、2 回目の試行で動いた個数とそれらの平均値を整理する Table 1. は $T_{1/3}=14.1s$, Table 2 は $T_{1/3}=10.6s$ の結果である。

Table 1 Results of stability for stormy waves ($T_{1/3}=14.1s$ (prototype $h=12m$))

Input $T=2s$	Try1 $H_{1/3}$	Dmn (%)	Try2 $H_{1/3}$	Dmn (%)	Ave Dmn%
H=7	6.0cm	0	6.0	0	0
H=8	6.8	0	6.8	0	0
H=9	7.9	0.5	7.9	0	0.25
H=10	8.6	2	8.6	1.5	1.75
H=11	10.8	3	10.8	4	3.5

Table 2 Results of stability for stormy waves ($T_{1/3}=10.6s$ (prototype $h=12m$))

Input $T=1.5s$	Try1 $H_{1/3}$	Dmn	Try2 $H_{1/3}$	Dmn	Ave. Dmn%
H=7	6.8cm	0	6.8	0	0
H=8	7.6	0	7.6	0	0
H=9	8.8	0	8.8	0	0
H=10	9.8	0	8.6	0.5	0.25
H=11	9.57	2.5	9.57	2	2.25

被災の許容値は、一般に 2%から 5%が用いられている。ここでは、マットは連結されておらず 1 個の被災が隣のマットへ影響すると考え、許容被災率を前述のように 2%とした。上記の表から $T_{1/3}=2s$ のときは $H_{1/3}=8.6cm$ 程度、 $T_{1/3}=1.5s$ のときは $H_{1/3}=11cm$ 程度で許容値となった。式(1)に被災率 2%に相当する波高を挿入すると、以下の Table 3 の結果が導ける。

Table 3 Analyzed stability coefficient N_s

	$T_{1/3}=10.6s$	14.1s
N_s	3.90	3.53

現地水深 10m については、 $T_{1/3}=14.1s$ のみの検討を行った。その結果、 N_s は 3.12 となった。

したがって、以上の計算値から波に対する N_s 値はおよそ 3 から 4 と推定できる。

(2) 津波流

津波流に対しては、流速に対して、波浪に対する実験と同様に移動したものを被災 1 個、その場で微動したり、回転したものを 0.5 個と数えた。前述したように INPUT 値と出力値は異なるので、マウンド上に設置した流速計を用いて、作用流速を測定しイสบッシュ数を適用して安定数 y を算出した。結果の例として水深 20 cm の結果を Table 4 に示す。

被災率 2% 相当の流速を 62.4 cm/s とする。実機で 4.41 m/s で、前述のイสบッシュ数を用いると $y=0.8$ と計算できる。

Table 4 Result for tsunami current

Input	Umax cm/s	TRY1	TRY2	TRY3	AVE.
11	51.1	0	0	0	0
12	55.5	0.5	0	1	0.5
13	57.4	0.5	0	3	1.17
14	62.4	2	0.5	3	1.83
14.9	63.8	2.5	2	3.5	2.67

4. あとがき

新しい被覆ブロックとして蛇かご型ユニット（マリンマット）を開発した。1/50 模型実験でこのブロックの波浪中での安定性と津波流中での安定性を数値的に評価した。許容被災率を 2% と仮定すると波浪中での安定係数は 3~4 程度となり、津波流中での安定数 y は、0.8 と計算できた。ただし、これらの値は、許容値を 2% と仮定したものであり、今後総合的に許容被災率を検討する過程で安定数も変化していくものと考えられる。

本研究の機会を与え、ご支援をいただいた、富士金網製造㈱ならびに近畿建設協会の関係者の皆様に深く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 岩崎敏夫・真野明・中村武弘・堀越伸幸（1984）：潜堤のマウンド材およびブレパクト堤に作用する定常流体力に関する実験的研究，海岸工学論文集，Vol.31, pp.527-531.
- 土木学会海岸工学委員会（2000）：海岸施設設計便覧，土木学会，pp.01-309.

（論文受理日：2015年5月20日）

付録

スラグ充填型マリンマット模型を用いた波浪による安定性実験

追加実験として、スラグを用いた重量の重いマットを用いた安定性実験を行った。従来のマリンマット模型重量は 80 g である。スラグ材を入れた模型重量は 81g である。他の主な数値は以下のとおりである；

使用したブロック・・・105 個

層別のブロック数・・・1 層目：7 × 8 = 56 個

2 層目：7 × 7 = 49 個

以下に模型配置断面図を示す。(Fig.1A) Photo 1A は、初期に設置したマリンマットの配置を示す。

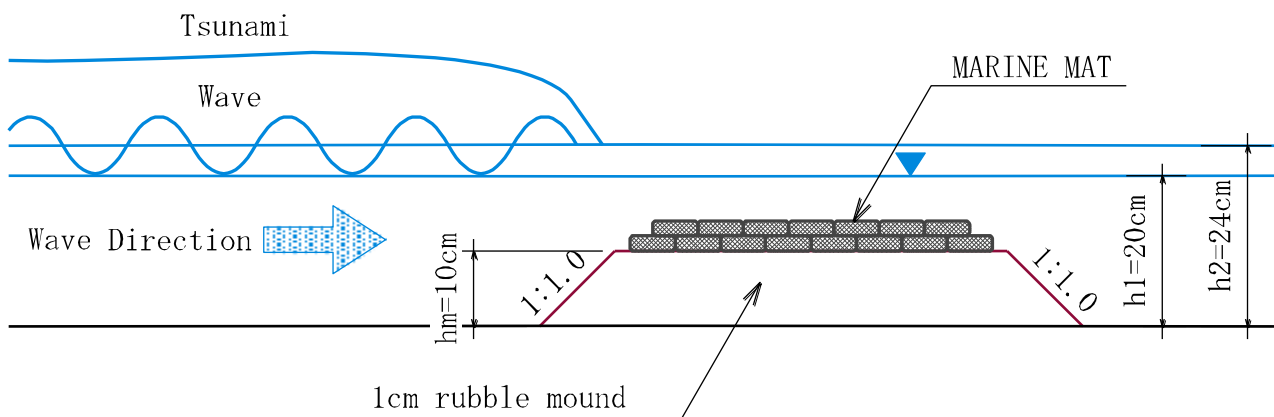


Fig. 1A Cross section for underwater breakwater model



Photo1A Inicial position of armor unit

波高は模型を置かない状態でのマウンド前面および背面での測定値の平均を用いる。津波流速は、模型を置かない状態でのマウンド前面での流速値を用いる。安定係数 N_s 値は前述の以下の式より算定できる。

$$M = \frac{\rho_s H_{1/3}^3}{N_s^3 \Delta^3} \quad (A1)$$

M : マット質量

ρ_s : マットの単位体積質量

Δ : $\rho_s/\rho_w - 1$ (ρ_w : 水の密度)

本実験における被災例を Photo 2A に示す。なお、被災個数は、その場でずれたものを 0.5、元の位置から移動したり、マウンド上から落下したものを 1 個とカウントした。実験の結果、2% を被災限界とすると、安定係数は約 3 程度となった。



Photo 2A Relocated marine mat due to wave action
(waves are acting from left side)

Table 1A Relocated number and Stability coefficient(water depth=20cm)

T2.0s	TRY1				TRY2				AVE	Relocated number	Hazard ratio	Ns
	in	out	AVE	relocated	in	out	AVE	relocated				
7	6.021	5.708	5.8645	0.5	6.612	5.943	6.2775	0	6.071	0.25	0.24	2.43
8	7.272	6.514	6.893	0.5	7.533	6.746	7.1395	1	7.01625	0.75	0.71	2.81
9	8.497	7.24	7.8685	0.5	7.91	6.784	7.347	2.5	7.60775	1.5	1.43	3.04
10	8.68	7.371	8.0255	2	8.582	7.289	7.9355	4.5	7.9805	3.25	3.10	3.19
11	9.053	7.506	8.2795	2	10.006	7.501	8.7535	5	8.5165	3.5	3.33	3.41

Ns は周期 2 s のケースから測定でき、Table 1A および 2A のように整理できる。おおよそ、3 であり、前回の通常型とほぼ同じである。次に津波について検討を行った。Photo 3A および 4A に示すように水槽で起こせる最大津波でも全く動かずイスバッシュ数の推定はできなかった。動かなかった理由は、わずかであるが、マリンマット単体重量が重くなっていることが原因であるかもしれない。しかしながら、津波に対する限界を知っておくことは重要であり、別の水槽での実験等の手法を検討しておかねばならない。

Table2A Relocated number and Stability coefficient (water depth =24cm)

T2.0s	TRY1				TRY2				H1/3	Relocated number	Hazard ratio	Ns
	in	out	AVE	relocated	in	out	AVE	relocated				
7	6.65	6.633	6.6415	0	7.219	6.962	7.0905	0	6.866	0	0	2.75
8	7.718	7.59	7.654	0	8.528	8.059	8.2935	0	7.97375	0	0	3.19
9	8.706	8.363	8.5345	0	9.375	8.966	9.1705	2	8.8525	1	0.95	3.54
10	9.639	8.996	9.3175	0	9.674	9.509	9.5915	3.5	9.4545	1.75	1.67	3.78
11	10.455	9.885	10.17	0	10.427	10.015	10.221	6.5	10.1955	3.25	3.10	4.08
12	11.503	10.043	10.773	1	11.475	10.777	11.126	6.5	10.9495	3.75	3.57	4.38
13	12.232	10.071	11.1515	1.5	12.364	10.69	11.527	7	11.33925	4.25	4.05	4.54



Photo 3A Effect by tsunami action (no damage, tsunami height=13.7cm, water depth=20cm)



Photo 4A Effect by tsunami action (no damage, tsunami height=13.7cm,water depth=24cm)