

網袋式ユニットの耐波および耐久性に関する実験的研究

Experimental Study on Stability against Wave Action and Applicability in Field of Net-type Unit

平石哲也・黒田美里⁽¹⁾・井上和徳⁽¹⁾・土橋和敬⁽¹⁾

Tetsuya HIRAISHI, Misato KURODA, Kazunori INOUE and Kazunori TSUCHIHASHI

(1) 株式会社前田工織

(1) Maeda Kosen Co.Ltd, Japan

Synopsis

A net type unit with rubble in it is proposed to prevent the scouring. The unit is implemented practically in a space. The speed of construction of that is confirmed in the test. A test for exposition is done to investigate the variation of strength for tension. The results demonstrate the strength for tension is kept in about 60% of initial stage. Secondary experiment employs the model unit with 1/50 scale to measure the stability coefficient in wave and tsunami flow actions. The stability is much higher than the rubble used in the breakwaters. Finally the scouring test is carried out comparing the sedimentation volume.

キーワード: 網袋式ユニット, 洗掘対策, 安定係数, イスバッシュ数

Keywords: Net-type unit, Scouring-protection, Stability coefficient, Isbash-number

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波においては、護岸や海岸堤防の破壊が各所で見られ、原因の一つとして堤体前面での侵食や越流した津波による堤体背後面での洗掘と侵食があげられた。2004年台風23号による関西空港や神戸沖管理型廃棄物埋め立て護岸の崩壊も、前面の侵食や洗掘により堤体が主動土圧に耐えられなくなって崩壊している(平石ら, 2008)。このように堤体や堤防周辺の侵食や洗掘を防止することは構造物の粘り強さを向上させるために欠くことができない。

従来は侵食や洗掘を防止するために捨石を利用することが多かったが、波浪に対する安定重量を有する巨石の採取量が減少しており、入手が困難となっている。

そこで、本研究では繊維からなる網袋の中に入手が容易な人頭大程度の石材を詰めることにより、安定重量を満たすことが可能である洗掘防止用網式消波ユニット(以下、網袋式ユニットと呼ぶ)を開発し、その実海域での施工性、耐久性および安定性について検討を行った。

網地の細い網袋式ユニット(袋型根固め工法用袋材)はすでに河川の根固めなどに使用されており、その有用性は確認されている。本研究では主に、海洋に用いるために開発した袋材に対しての検討を行う。施工性については実際に製作工程の確認を行った。

また、耐久性については砂を含んだ水を吹き付ける摩耗促進試験によって評価し、安定性については模型実験により K_D 値およびイスバッシュ数を明らかにした。

2. 現地での試験施工

Fig.1およびFig.2に網袋式ユニットのイメージを示す。Fig.1は中詰め材投入前、Fig.2は中詰め後のイメージ図である。

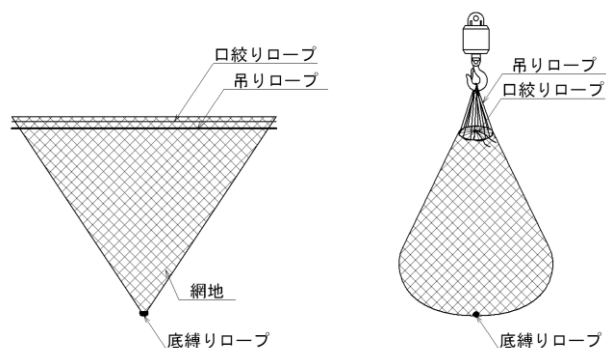


Fig.1 Net before filling rubble in field

Fig.2 Net after filling rubble inside

網袋式ユニットの製作時のフローを示す。

- ① 網地を型枠にセット (Photo 1)
- ② 中詰め材投入 (Photo 2)
- ③ 口絞りロープ結束 (Photo 3)
- ④ 仮置き場へ移動 (Photo 4)



Photo 1 Setting of net inside round flume



Photo 2 Filling of inner rubble



Photo 3 Tightening rope at net-mouth



Photo 4 Relocation of net-type unit

作業に要した人員は2名であり、熟練工および陸上クレーン以外の重機は必要とせず、迅速かつ容易に製作が可能である。したがって、網袋式ユニットは根固めなどはもちろん、緊急を要する応急復旧への使用にも適している。

3. 摩耗促進試験による耐久性の評価

海岸に設置された網袋式ユニットは、砂により摩耗し、強度が低下していくと考える。海岸砂の作用を疑似するため、砂を含んだ水を試験体に吹き付け、強度の変化を確認していく。

Table 1 Test condition for wearing

Index		Content
Water jet test device	Water speed	10~12ℓ/min
	Sand volume generated by water jet	1.7kg/min
Sand		Silica-No.5
Wearing time(min)		8, 24, 56, 120, 300

Table 2 Dimension of net-type unit for wearing test

Type	FPU-10(1 t)	FPU-20(2t)	FPU-30(3t)	FPU-40(4t)	FPU60(6t)	FPU80(8t)
Formation	Net(single layer)					
Net	1670dtex×80strings				1670dtex×128strings	
Density	75mm/per one unit		50mm/per one unit		50mm 目	
Strength for tension	2700N/string				4000N/string	
expansion	30%～50%					

dtex : weight(g)/10000string



Photo 5 Test material for wearing by
Water jet



Photo 6 Water jet experiment

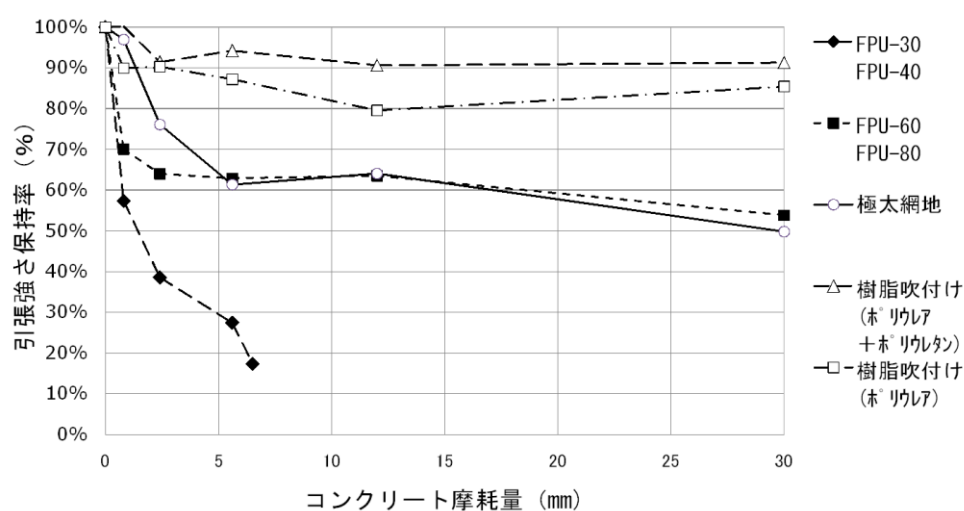


Fig.3 Wearing of concrete (mm) and variation of tension of net-unit material(%)

ただし、定量的な試験はできないため、まず、コンクリート単体での試験を行い噴射時間とコンクリート摩耗量の関係を求める。次に網地の試験を行い、コンクリート摩耗量と比較することで網地の摩耗に対する強度を相対的に確認する。Table 1に試験条件を示す。

Photo 5に摩耗促進試験体を示す。コンクリート片に網地を取り付け、これに珪砂5号を混ぜた水をウォ

ータージェットで吹き付ける。Photo 6に摩耗促進試験の状況を示す。この試験では60分の吹き付けで6.0 mmの平均摩耗量となることが確認できた。そこで、コンクリートが摩耗する時間と同等の時間を摩耗させた網地の引張強さを確認することで、網袋式ユニットの強度を相対的に調べた。また、網地としては比較のために、Table 2に示したタイプに加えて、(i) 直径20mmの極太網地、(ii) 外装にポリウレアとポリ

ウレタンを吹き付けた網地についても同様の試験を行った。試験結果をFig. 3に示す。Fig.3の横軸はコンクリート表面の摩耗量(mm)であり、縦軸にそれに相当する摩耗を受けた網地の引張強さ保持率を示した。

Fig.3を考察すると、1tから4tタイプに使われるFPU-30およびFPU-40の耐久性は、他の網地に比べて弱いと考えられる。外装にポリウレアとポリウレタンを吹き付けた網地は吹き付け等の作業が加わるので、コストは高くなるが強度は最も高く、コンクリートが30mm摩耗を受けている状態でも、初期の引張強度の10%程度しか低下しない。

次に極太網地とFPU-60ならびにFPU-80は同様な結果を示し、初期の吹付時には、引張強度の低下が生じるが、60%程度で安定し、その後はコンクリートの摩耗が進むような時間をかけても引張強度は急激には低下せず、コンクリートの摩耗量30mm相当の摩耗を受けても50%以上の引張強度を有していることが分かった。

4. 波浪および津波作用時の安定性

(1) 波浪に対する安定性

海洋での使用において波浪作用時の安定性は重要な課題である。そこで、2次元水路において安定係数 K_D 値を求める水理実験を行った。Table 3に試験条件を示す。表内()数値は現地換算値である。

Table 3 Test condition for experiment on K_D

Item	Content
Flume	2D-Irregular wave flume
Scale	1/50
Water depth	10cm(5m)
Wave period	1.0(7.1)s, 1.2(8.5)s, 1.4(9.9)s, 1.6(11.3)s, 1.8(12.7)s, 2.0(14.1)s
Wave	Irregular wave > 1000wave
Model weight	64g (8t) /unit

Fig.4に模型実験のイメージ図を示す。写真-7は実験の状況である。Fig.4およびPhoto 7において不規則波を1000波、向かって左側から作用させる。被災個数はその場で回転した模型を0.5個、元の場所から移動した模型を1個とカウントした。模型は砕石層（砕石の大きさ10mm程度）の上に2層、100個設置した。移動した総数を初期の総数100で除した値が被災率となり、ここでは2%の被災率を許容値とした。そして、2%被災時の波高から次式を用いて安定係数 K_D 値を求めた。

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

ここで、 M : ユニットの質量(t)

ρ_r : ユニットの密度 (t/m^3)

$H_{1/3}$: 波高(m)

S_r : ユニットの密度(中詰砕石の密度を用いて、2.6とする。

$\cot \alpha$: 斜面が水平面となす角

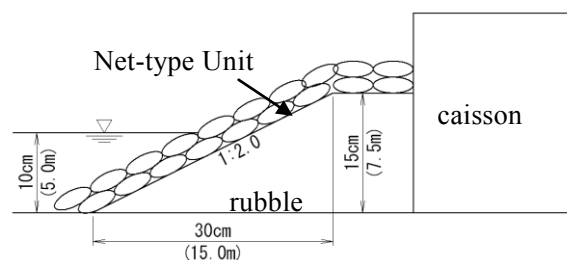


Fig.4 Experimental image to derive K_D value



Photo 7 Experiment for stability of net-unit in waves

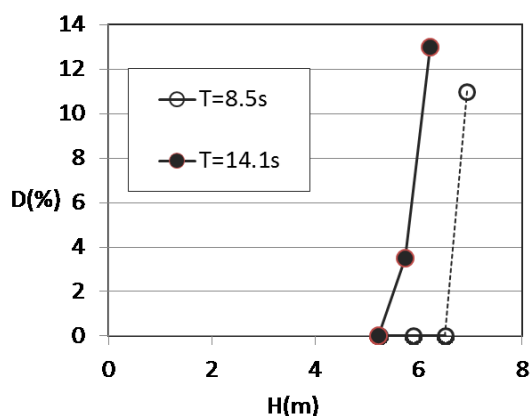


Fig.5 Relation of damage ratio(%) and wave height H(m)

Fig.5は被災率(D(%))と作用波高H(m)の関係の一例を示したもので、被災はある波高において急激に大きくなる。図より2%被災率相当波高を読み取り、前述のように K_D 値を求めた。

Table 4 Stability coefficient of Net-type unit in real scale

$T_{1/3}(\text{sec})$		7.1	8.5	9.9	11.3	12.7	14.1
K_D	Case-1	7	11	8	10	7	6
	Case-2	10	13	13	--	10	8



(1) Rubble layer formatted at random



(2) Smooth rubble layer with smaller rubbles

Photo 8 Comparison of two type rubble layer

Table 4に2回のケースそれぞれで求められた安定数を示す。表中に値がないものは2個以上の被災がなかったケースである。Table 4から網袋式ユニットの安定係数は6～13と変化していることがわかる。しかし、ユニットの積み方や試験のばらつきを考慮して、設計では最低値である $K_D=6$ を採用する。通常の消波ブロックでは10以上の安定係数が与えられているが、捨石に関しては $K_D=2$ であり、捨石層の保護材としても活用ができる(日本港湾協会,1999)。

通常の被覆材においては、中詰の碎石の表面を均して平型ブロックを設置するケースが多いため、本実験においても中詰材を均した場合の K_D 値を調べた。Photo 8は、(1)碎石を乱雑に置いた場合と、(2)目詰石を詰めて滑らかに均した場合の比較を示す。均した場合でも網袋式ユニットの K_D 値は大きく変化せず、精密に均さなくても網袋式ユニットが有効に機能することが分かった。

(2) 津波に対する安定性の評価

実験は2次元水路において、離岸堤上に模型を設置し、造波装置から孤立波を造波することで、離岸堤上に設置した網袋式ユニットの安定性をイスパッシュ数で表した。Table 5に試験条件を示す。Table内()数値は現地換算値である。

Table 5 Test condition for Isbash number

Contents	
Implement	2D Wave channel
Scale	1/50
Water depth	10cm(5m)
Weigh	64g (8t) /unit

Fig.6に実験のイメージを示す。模型は碎石層（碎石の大きさ10mm程度）の上に2層、100個設置し、入力値を変化させ、模型の移動状況を確認した。

Fig.7は水路での入力津波高と測定通過津波高および最大流速を示している。津波を模擬した孤立波の流速は網袋式ユニットの無い状態で測定している。

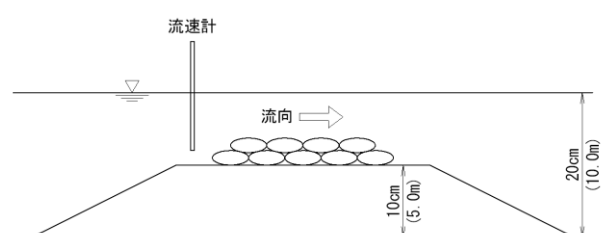


Fig. 6 Image of stability test for tsunami flow

イスパッシュ数は次式で計算し、許容限界移動率3%を越えるケースでの流速からイスパッシュ数を津波流速内での安定数として計算した。次式に計算式を示す。

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

ここで、 U : 捨て石層の上面における流速 (m/s)

θ : 水路床の軸方向の斜面勾配

y : イスパッシュ数 (岩崎ら³⁾)

である。

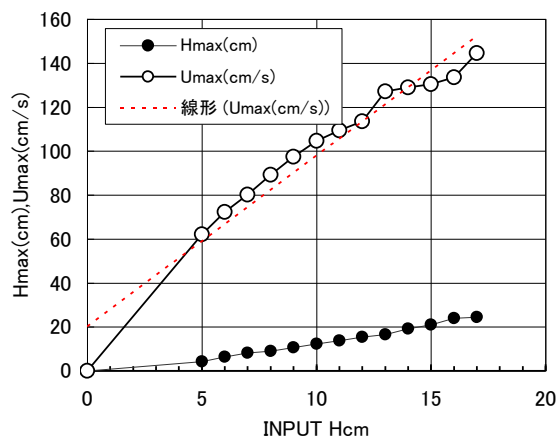


Fig.7 Maximum flow velocity in wave basin
(broken line shows approximated linear line)

Table 6 Drifted unit in two trial

Input Tsunami Height	Number of drifted unit in Case-1	Number of drifted unit in Case-2
5	0	0
6	0	0
7	1	0
8	1	0
9	1	1
10	1	1
11	2	1
12	2	3
13	2	4
14	18	13

Table 6から波高入力値13を許容限界とし、この時の流速値127cm/sから y を求めた。計算の結果 $y=1.19$ となり、砕石層の値(0.86~1.2) (岩崎ら,1984)と同等となる。

(3) 洗掘防止材としての機能

洗掘防止材としての機能を定性的に調べるために、離岸堤の材料として網袋式ユニットを用いた場合の砂の洗掘量や堆積量を測定して、総量として移動する砂の量で砕石による離岸堤の場合とを比較した。Photo 9は、厚さ10cmの砂層(珪砂6号)上の高さ15cmの離岸堤を示す。水深は10cmで、初期の砂層面は平坦である。

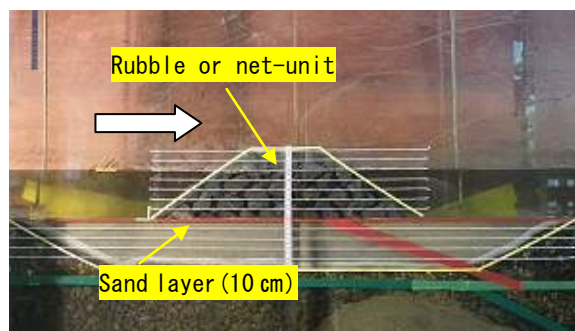
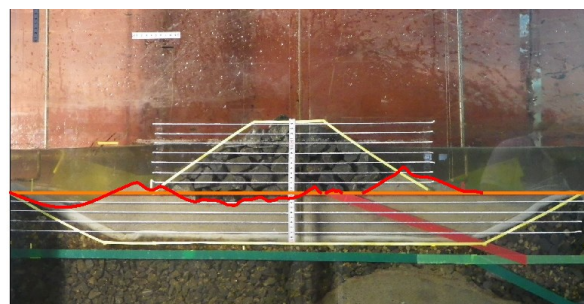
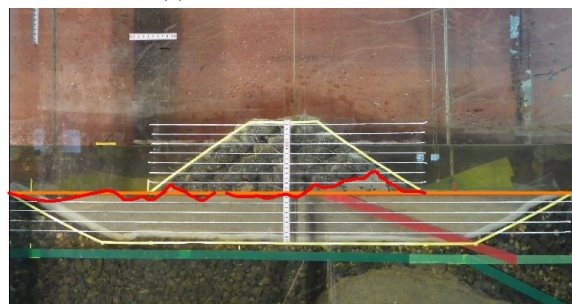


Photo 9 Experiment of scouring and accumulation of detached breakwater



(a) Breakwater of rubbles



(b) Breakwater of Net-type unit

Photo 10 Comparison of scouring depth

Photo 9での砂層の位置を初期値として波浪作用後における吸出しおよび堆積量の双方を合計した量を測定する。波高は実験値で4cmならびに6cmとして、それぞれ周期を1.2~2.0sまで変化させて1000波作用させた。Photo 10は代表的なケースにおける2次元の洗掘および堆積の様子を示す。Photo 10(a)の砕石層の場合は、前面に洗掘が顕著に生じており、背面には砂の吹き出しがみられる。したがって、前面の洗掘した量が背後堆積となって砂移動が生じた。

Table 7 Scoured and accumulated total sand volume

T(s)		1.2	1.6	2.0
Volume (cm ²)	Net-type	48.6	69.5	92.0
	Rubble	71.4	89.8	143.1
ratio	unit/rubble	0.68	0.77	0.64

一方、Photo 10(b)の網袋式ユニットでは前面にわずかに洗掘が生じるが、背面での吹き出しはなく、離岸堤と砂層の境界面もほぼ初期値と等しく、網袋式消波ユニットは捨石によるマウンドよりも洗掘に対して強い。Table 7 は解析結果のうち波高 6 cm のケースについて面積解析の結果を示す。網袋式ユニットと砕石層の比率は約 0.6～0.7 程度で、数値的にも網袋式ユニットは吸出し防止に有用である。

5. まとめ

本研究では、網袋式ユニットを開発し、その施工性や耐久性および耐波安定性を調べ、下記の通り実用化を図るための基礎データが取得できた。

- (1)施工は比較的迅速かつ容易である。
- (2)砂による摩耗に対する耐久性を有する。
- (3) K_D 値は6である。
- (4)イスバッシュ数は1.19である。
- (5)捨石と比較し吸出し防止効果が高い。

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プレパックド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.
- 日本港湾協会（1999）：港湾の技術上の基準・同解説（上巻），157pp.
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春男和人・宮里一郎（2008）：偶発荷重による被害例とその特性，海岸工学論文集，Vol.55, pp. 981-985.

（論文受理日：2014年6月7日）