網式消波材の開発と 高波・津波対策としての効果

IMPROVEMENT OF NET-TYPE WAVE ENERGY DISIPATING UNIT AND ITS APPLICABILITY TO MITIGATION OF ACCIDENTAL WAVE AND TSUNAMI HAZARD

平石哲也¹・黒田美里²・土橋和敬²

Tetsuya HIRAISHI, Misato KURODA and Kazunori TSUCHIHASHI

¹正会員 博（工） 京都大学防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノロ 京都大学防災研究所附属宇治川オープンラボラトリー）

² 前田工織株式会社 水環境保全推進部（〒919-0422 福井県坂井市春江町沖布目38-3）

A net-type unit which composes about 30cm rubbles in it is developed. The unit is intended to reduce the wave energy and tsunami pressure generated in accidental condition beyond the design. The rubble layer overlapped in the polyester nets can reduce the impulsive forces due to the huge wave and tsunami. Several stability coefficients have to be revealed to make a design of seawalls and breakwaters. A water channel experiment is carried out to estimate the stability coefficients using the scaled unit model of 1/50 related with 6 and 8ton in prototype. The stability in tsunami flows is moreover investigated in order to obtain the other stability function determining the applicability of the unit as counterweights.

Key Words : *Accidental wave, net type wave dissipating instrument, stability in tsunami, KD number, Isbash coefficient*

1. はじめに

2011年3月11日の東北太平洋沖地震による津波では多くの海岸堤防が破堤している。その原因として、津波波力による胸壁の破壊、引き波時の局所的な流圧力による堤体破壊等が指摘されている。これらの要素に加えて、堤体前面の法先洗堀による構造物の安定性低下も大きな要素となっている。近年、河川堤防の法先洗堀防止工として網状のネットに200～500kg砕石を詰め、袋状にした柔軟性を有する網式（あみしき）材が用いられるようになっている。ただし、網を成型し、吊り下げることができるよう4t型までが製作され、一部の河川堤で用いられているだけである。下迫ほか¹⁾は2つの絞り口を有する比較的剛性の強い網式消波ユニットの基礎マウンド上での安定性を調べているが、消波材としての安定性は検討していない。本研究では、この網式材を海岸および港湾構造物の消波ならびに法先洗堀防止工（網式消波材）として活用するために、大型の6tおよび8tに相当する実機の試験製作ならびに耐久性試験を実施し、洗堀に強い海岸堤防および防波堤の消波被覆工の開発を目的とした。

また今回の津波による被害を受け、津波規模をレベル1およびレベル2の2段階に分けて海岸と港湾を防御することが提案されている。レベル1津波は、設計対象となる歴史上繰り返された津波であり、これに対しては護岸と防波堤は十分安定でなければならない。レベル2津波は、将来想定される最大規模の津波であり、防波堤や護岸だけでは防御できず、総合的な警報・避難システムの確立が目指されている。ただし、防波堤と護岸は倒壊してしまわないように‘粘り強い’構造を持つことが要求されるので、堤体工法に砂礫層によるマウンド（カウンターウェイト）を構築し、その抵抗で堤体の滑動やわずかな転倒を許すが、大きな転倒や倒壊を防ぐ。この時越流した津波によって砕石層が動かされないように十分安全な被覆層を必要としており、本網式消波材の活用が期待できる。そこで、津波流作用下での安定係数を求め、設計ができるようにした。

2. 網式消波材の開発

ポリエステル製の網材の形状を写真-1に示す。これは

写真-1 網材の状況

図-1 8t型網式消波材の形状図

右側の細かい網地が従来河川で使われている2トン型の網材である。左側が今回開発した網材である。網材の特徴は工場内で袋状に編まれて、ひとつの開口部しか持たず、現場で碎石を袋内に入れると1か所を縛るだけでユニットが完成でき短時間で施工できることである。図-1に8トン型の網式消波材の袋体の形状図を示す。なお、6トンおよび8トンは碎石を充填した時のユニットの総重量を表す。

現地試験では、以下の項目について確認を行った。

- (a) 網式消波材 6 トン(6tと記述)用および 8 トン(8tと記述)用の施工時の円形フレームの施工性
- (b) 消波材の袋部分の結束方法と製作時間

中詰め材としては割栗碎石（150～200 mm）を用いる。

写真-2 に製作過程を示す。また、結束後の吊り上げ時において、袋形状を確認し、以下の結論を得た。

6t タイプについて、中詰め材を充填後にしっかり口が閉まることを確認できた。また、4 回転置後の網地の状態を確認したところ、毛羽立ちはあるものの破断しないことが確認できた。8t タイプについても、規程の網地内に充填できることが確認でき、4 回転置後の網地の状態を確認したところ、1 回目に製作した 8t タイプについては毛羽立ちがあるものの破断箇所はなかった。写真-3 に 8t タイプの転置後の写真を示す。2 回目に製作した 8t タイプについては 4 回転置後に 1 箇所破断していた。さらに 4 回転置後（全 8 回転置後）に網地を確認

したところ、追加の破断は見受けられなかった。しかし、中詰め材の鋭利な角により破断しそうな箇所が 1 箇所あった。すなわち、波浪の作用によって激しく動く場合は 1 部破断する可能性はあるものの、その数は 1 か所のみで全体への影響は小さいと思われる。

(1) 円形型枠に網をかぶせる

(2) 碎石の投入

(3) 円形枠の抜き取り

(4) 網式消波材の成型

写真-2 網式消波材の試験製作

写真-3 網式消波材の破損箇所

製作に要した時間は、作業員2名で以下のとおりであり、現場で10分程度で製作が可能であることが判る。

・6tタイプ

① 網地セット	約 2分20秒
② 中詰め材投入	約 4分20秒
③ 地切り	約 1分40秒
④ 口絞り	約 2分30秒
⑤ 脱型	約 1分20秒

計 約 12分

・8tタイプ

① 網地セット	約 2分00秒
② 中詰め材投入	約 4分10秒
③ 地切り	約 1分10秒
④ 口絞り	約 3分00秒
⑤ 脱型	約 1分20秒

計 約 12分

3. 消波材としての安定性

(1) 実験の方法

波力を受ける構造物の所要質量は、次式で示される N_s 値によるハドソン式を用いて算出することができる。(土木学会)²⁾

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (1)$$

ここに、

- M : 構造物の所要質量 (t)
 ρ_r : 構造物の密度 (t/m^3)
 H : 安定計算に用いる波高 (m)
 N_s : 安定定数. 主として被覆材の形状、勾配、被災率等によって決まる.

S_r : 構造物の水に対する比重 (砕石は2.6)

今回は水理模型実験により、網式消波材の偶発波浪(平石ほか)³⁾や津波に対して安定な質量(所要質量)を求めるために必要な K_D 値を算出する。

実験施設は、長さ 50m、幅 1m、深さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いる。ただし、今回の実験では模型の縮尺や設備の造波能力を考慮し、実験対象部分を幅 50cm に縮小して実験を行う。6t および 8t タイプの 2 種類の袋体を用いる。模型縮尺は 1/50 とし、下記にそれぞれのタイプの現地での模型規格を示す。模型では 99 個の模型を用いて消波層を製作した。それぞれの模型空中質量は、48 および 64g である。例として表-1 に 8t タイプの模型規格を示す。

図-2 は左側から偶発波浪や津波が来襲すると想定して設置した実験模型として用いる護岸断面である。

表-1 8t タイプ規格

	質量	体積	出来高直 径 D	出来高 高さ H
実物大規格	8t	5m ³	3m	0.7m
1/50 模型規格	64g	40cm ³	6cm	1.4cm

図-2 実験イメージ

作用波は不規則波とし、1000 波以上造波して元の位置から動いたものを被災とみなす。周期は4種類程度、波高は随時変化させる。なお、計測では、元の位置から移動したり滑落したものを 1.0 個と数え、位置を変えずにその場で回転しただけのものを 0.5 個と数えた。

許容被災率(波で移動した構造物の個数の全体個数に対する割合)2%とし、実験により被災率 2%になる条件(質量 M 、波高 H)を求めた。模型水路では、入力信号通りの波形が必ずしも再現できないので、あらかじめ模型のない状態で波高解析を行い、造波信号と造波波高及び周期の関係を求めている。以下の記述では、実際に造波された波の波高・周期を用いて結果を示した。

水理模型実験によって求められた被災率 2%となる質量 M および波高 H から N_s 値を算出する。次式は N_s 値と K_D 値の関係を表した式である。 K_D 値はハドソン式における斜面上の安定係数であり、護岸上の消波工の安定係数として通常用いられるものであり、 N_s 値と以下の関係にある。

$$N_s^3 = K_D \cot \alpha \quad (2)$$

ここに、

α : 斜面が水平面となす角 (°)

K_D : 主として構造物の形状および被災率等によって決まる定数
式(1)に式(2)を代入すると式(3)となる。

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

式(3)に実験により求められた質量 M および波高 H を入力し、 K_D 値を以下のように算出する。

$$K_D = \frac{\rho_r H^3}{M (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (4)$$

写真-4 に実験模型の設置状況を示す。

(2) 実験の結果

使用模型は、タイプ 6 t, 8 t 型であり、水槽水深 : 88cm, 模型天端高 : 93cm した。模型床高は水路床より 78 cm である。水路幅 : 100cm より徐々に縮流させる。対象模型幅は 50cm 護岸前面の勾配は 1/2 にしている。模型設置位置前面波高は模型を設置しない状態であらかじめ解析をした値を用いる。模型実験では、水路の両端は水路壁面との間に波消しブロック 20t 型および 15t 碎石 (現地換算) を積んで緩衝材とした。実験で用いた波高および周期をまとめる (() が現地換算値) ;

実験ケース

- 1) 対象周期 $T_{1/3}=1.0(7.1)s, 1.2(8.5)s, 1.4(9.9)s, 1.6(11.3)s, 1.8(12.7)s, 2.0(14.1)s$
- 2) 波高レベル : 7~12cm (3.5m) ~ (6m)
- 3) 被災個数
移動個数を被災とみなし N_r は 20 分間で取得した。
(時化のピーク継続時間は 2 時間とされている)

4) 実験の配置

各網式消波材ユニットは 99 個を使用した。天端に 3 個の網式消波材ユニットが設置できるように碎石 (2cm) でマウンドを製作し、膜体ブロックは 6t 型および 8 t 型を同時に設置し、同一波を使用した。網式消波材及び緩衝材用ブロックはすべて 2 層積みとした。網式消波材ユニットの幅は 5 列で、千鳥に配置している。なお、本実験の最大周期は 2s (現地 14.1s), 波高 8.4 cm (4.2m) であり、被災率も最大となる。写真の右図は、模型断面を示し、ガラス面との摩擦による影響を避けるために、壁面と網式消波材ユニット模型の間に緩衝材として波消しブロックを設置している。

網式消波材ユニットの模型は 99 個用いているので、観測された移動個数が被災率と等しい。計測結果を表-2 に示す。表中の $T_{1/3}$ は作用波の有義波周期で現地換算値である。実験では、模型のない状態で測定した実験水路内の模型設置位置での波高測定結果を用い、周期については入力値と測定値は一致していたので修正はしていない。実験では 20 分間 2 種類の波群を造波して、それぞれについて 2 回の平均値を代表値とした。

写真-4 網式消波材模型の設置
(左側 8t 型, 右側 6t 型. 天端 3 列で 2 層積み)。

表-2 K_D 値の評価に用いる被災率

$T_{1/3}$ 現地 (s)	7.1	8.5	9.9	11.3	12.8	14	*
6t	1%	◎	◎	10%	1%	5%	5
8t	◎	◎	◎	9%	7%	3%	6

◎ : 全く動かない

* : 周期 10s 以上の偶発波浪についての平均値

実験結果から、それぞれの周期で被災率が 2% となる波高レベルを逆算して、安定係数を求めた。周期 2s の場合、計算例は以下ようになる。

$$K_D = \frac{2.6 \times 4.5^3}{8(2.6 - 1)^3 (2)} = 4 \quad (5)$$

ただし、実験で求めた安定係数は 2 次元で観察した場合であり、波向や積み方にもよっても差が出ると考えられる。また、転がって飛んでいったものはない。一般に長周期の波にブロックは弱いのが、本実験で対象とした繊維索を用いて碎石を活用した網式消波材の安定度は、ユニットが動いても落ちずに斜面上にとどまっているので、より高いものとなる。多少の変形を許容するならば、Resiliency (粘り強さ) が発揮できる構造物になり得る。

4. 津波に対する安定性

津波に対する K_D 値の評価は難しく、作用する波が流れのようになるので、適切な数値による安定性の指標は得られていない。ここでは、孤立波を実験水路内で作用させて、おおよそ被災率が 2% となる津波遡上高を安定性指標とした。

(1) 実験ケース

実験に用いた孤立波 (津波を模擬した正だけの水位上昇を有する単一波) は、1/50 の縮尺模型で 3.5~4m であり、護岸本体は越流する。ただし、本網式消波材は洗

掘防止用として開発されているので、越流してもその場で動かなければ洗掘防止工として活用できる。

実験では 3 回以上の同一津波を作用させて、計測値のばらつきが 1 個以内であることを確認して平均値を代表値とした。写真-5 に実験後の状況を示す。

写真-5 実験室内での最大津波による移動状況
(堤体への乗り上げが一部見える)

(2) 実験結果

図-3 に津波波高（遡上高（陸表面を基準とした高さ））と被災率の関係を示す。ユニットの形状による被災率の変化はなく、津波高が 4m になると被災率が急激に大きくなり、護岸としての機能が失われる可能性が高くなる。本堤体の条件では、3m の津波高に対して被災率が 2%以下となり、現地において汀線での津波高が 3m 以下であれば十分な安定性を有していることが分かった。

図-3 津波高と被災率の関係

5. イスバッシュ定数の推定に関する模型実験

使用水槽は、これまでの安定性実験と同一の長水路である。作用波は孤立波を用いて、孤立波の頂点の高さを津波高とした。本実験では、護岸を越流した津波流が陸地側の背後のカウンターウェイト層に作用して浸食を

起こす現象を防ぐために、表層を保護できる網式消波材の安定状況を調べた。強い流れの中での砂礫材などの安定はイスバッシュ数によって表され、津波流速に対応して安定性を有する網式消波材の重量が決定される。

イスバッシュ数に対しては、岩崎ら⁴⁾の測定結果があり、これまでは岩崎ら⁴⁾の実験で用いられた定数のみが採用されているが、津波は衝撃的に作用して、流速の変化も大きいので最大流速に相当するイスバッシュ定数 y を新たに考察しておく必要がある。

(1) 実験方法

測定は津波流速、津波波形、網式消波ユニットの動揺を観測することから、被災率 1%に相当する流速(津波波高)を逆算して、イスバッシュ定数 y を求めた。実験の、水深は 30cm、マウンド高は 10cm し、試験ユニット高は 10cm を目標として 2 段の整積みを行った。流速測定水深は 20cm とした。実験では水路内の最大流速は 50~60cm/s が再現できる。写真-6 は津波作用前の整積み状態を示す。図-4 は実験イメージである。

写真-6 網式消波部材(8トンタイプ)の整積み

図-4 津波流中の網式消波材の安定性実験イメージ

(2) 実験の結果

造波装置に与える津波信号入力値 Input（孤立波の波高値）を変化させて上層移動個数（下層最後端の移動は無視）を数えたところ、移動限界（1%~2%）は、造波機に与える津波信号 Input(cm)で 7.2~7.8 程度の時に相当した。

図-5 は Input 値が 7.2 のときの測定津波流速 U_0 (cm/s) の波形の例を、図-6 に津波高(入力値)に対する移動個数を示す。津浪高と最大津波流速は、あらかじめ模型ユニットを設置しない時に相関を測っており、図-7 のよ

図-5 津波流速波形の例

図-6 津波高と被災率（Displacement）の相関

図-7 作用流速(cm/s)(縦軸)と津波高入力値(横軸)の関係

うになる。これは網式消波材の無い状態で測定した最大流速の変化である。図から示されるように、限界流速は63cm/s から68cm/s と読み取ることができる。

イスバッシュ定数 y の計算は次式で行った。

$$W = \frac{\pi w U_o^6}{48 y^6 g^3 (w/w_o - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (6)$$

ここで、

ユニット重量 $W=8000\text{kg}$
 津波流速 $U_o=4.45\text{m/s} \sim 4.81\text{m/s}$
 ユニットの単位体積重量 $w=2.6\text{t/m}^3$
 水の単位体積重量 $w_o=1.0\text{t/m}^3$
 マウンド勾配 $\theta=0$

である。

以上を用いると、イスバッシュ定数 y の計算結果は大よそ、 $y=0.592 \sim 0.639$ となる。この値は、岩崎ほか⁵⁾が定常流速で行った実験値 0.9 に比べて小さいが、非定常の津波流速を与えているので、その影響が現れ、津波流に関するイスバッシュ定数 y は約 0.6 程度で表されるものと考えられる。

6. まとめ

本実験において 6t および 8t 型の網式消波材の耐波安定性と津波安定性について検討を行った。その結果、以下のことが判明した；

- 1) 網式消波材は被覆ブロックとして柔軟性を有しており、変形しても移動する割合が少ない。
- 2) 安定係数 K_D で耐波安定性を評価すると 6t および 8t で、それぞれ約 $K_D=5$ および 6 が得られた。
- 3) 津波に対しては、遡上高 3m の津波までは十分な安定性を有する。
- 4) 津波流に対するイスバッシュ定数 y は 0.6 程度になる。

なお、本実験結果は限られたケースでの検討であり、現地における適用に当たっては、マウンド材の条件、設置場所の地形、施工性等に留意する必要があり、諸条件を変更した実験等も必要である。

参考文献

- 1) 下迫健一郎、久保田真一、松本朗、半沢稔、篠村幸廣、尾池宣佳、池谷毅、秋山真吾袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の耐波安定性と耐久性港湾空港技術研究所報告Vol.43, No.1, pp.49-83, 2003.
- 2) 土木学会：海岸施設設計便覧，土木学会，pp.301-309, 2000.
- 3) 平石哲也・平山克也・加島寛章・春男和人・宮里一郎：偶発波浪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, 2008.
- 4) 岩崎敏夫・真野明・中村武弘・堀越伸幸：潜堤定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, 1984.

(2012.9.30受付)