透過型の津波対策防護柵による浸水低減効果と 波力に関する実験的研究

榎田 真也¹・斎藤 武久²・古路 裕子³・中口 彰人⁴・石田 啓⁵

¹正会員 金沢大学准教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:umeda@se.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:saitoh@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 (株)日本パーツセンター 設計部 (〒920-0211 石川県金沢市湊3-12-3)

E-mail:furumichi@n-parts.jp

⁴正会員 (株)日本パーツセンター 設計部 (〒920-0211 石川県金沢市湊3-12-3)

E-mail:nakaguchi@n-parts.jp

⁵フェロー 金沢大学名誉教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:ishida24@gmail.com

本研究で対象とする防護柵は東北地方太平洋沖地震の際に津波漂流物を捕捉したものであるが、その浸水低減効果や津波波力の定量的な評価が不足している。本研究では陸上津波に対する防護柵の浸水低減効果と波力の基本特性を明らかにするために、直立護岸の背後陸上域に単独または二重に配置した防護柵に関する水理実験を行い、浸水流の水深・流速・流量および波力に与える柵の種類や二重化の影響について考察した。その結果、越流限界を超える遡上波に対しても浸水深の低減効果は柵の種類によってはある程度得られるが、浸水流速の低減効果は柵の種類を変えても得にくいこと、柵の越流限界を超えた遡上波では、単独柵によって低減できる浸水流量に比べて控え柵の追加によって低減できる浸水流量の方が大きく、防護柵の二重化による流量低減効果が相対的に高まること等が分かった。

Key Words : *tsunami inundation, tsunami force, porous wave barrier, multiple defense lines, tsunami mitigation*

1. 序論

2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波災害を受けて、想定される津波の規模や地域の海岸利用状況等に応じて、適切な避難行動や土地利用を実現するためのソフト対策とともに、防御施設の多重化や強靱化の重要性が広く認識されるに至っている。以前より、海岸の堤防、樹林、砂丘や内陸の盛土等の組み合わせによる津波遡上抑制効果に着目した研究は幾つか進められてきた。海岸堤防背後の樹林帯や二線堤等による浸水深や流速の低減効果について、加藤ら¹⁾によって現地海岸を対象に数値解析が行われ、堤内地の津波対策による被害軽減効果が検討されている。また、モデル地形における海岸堤防と樹林帯の組み合わせによる遡上高の低減や樹木に作用する流体力の指標を飯村ら²⁾が計算し、堤防と樹林帯の位置関係の重要性を指摘している。震災以後の最近では、松山ら³⁾は大型造波水路による実験を行い、海岸砂丘背

後に設置された不透過型の防波壁に作用する波圧・波力の特性や越流量の低減効果等について考究している。さらに、海岸堤防の背後内陸に設置した盛土による浸水範囲の低減効果について、奥村ら⁴⁾は堤防間の距離や高さや津波の規模との関係を数値解析的に考察している。

本研究で対象とする防護柵は、数cmの孔が多数開いた面材と支柱からなる透過型の壁状構造物である⁵⁾。通常は高波浪時の越波や飛沫拡散の軽減および防風・防塵のために利用されるが、東北地方の幾つかの港湾施設において今回の津波によって漂流した船舶、コンテナ、木材などを捕捉している⁶⁾。このような透過型の防護柵は、波浪と津波の両方に機能し、コンパクトなため、既存施設や他の手法との組み合わせによる多重防御化に適しており、海岸防災・減災に役立つ重要な対策方法の一つとして期待できる。

著者ら⁷⁾は海岸護岸上に設置された防護柵による浸水低減効果を評価するために実験を行い、単独の防護柵に

よる浸水低減効果と柵の作用波力の基本特性を考究した。しかしながら、透過型の防護柵に関する研究は限られており、陸上を遡上する津波に対する浸水低減効果、津波漂流物対策のための柵断面の変更や多重化による影響に関する定量的な評価はほとんどされていない。そこで本研究では、これら未解明な点を明らかにすることを目的として、直立護岸の背後陸域に単独または二重に配置した津波対策防護柵に関する水理模型実験を行い、遡上波の規模の変化による浸水深、流速や波力の変動特性を調べ、柵の種類や二重化が与える影響について考察した。

2. 実験方法及び条件

水平床にした開水路（長さ12 m×幅0.4 m×深さ0.4 m）に設けた護岸・背後陸域上に防護柵の模型（縮尺1/50程度）を図-1に示すように設置し、堰板の急開により段波を発生させて実験を行った。防護柵は図-1のように2重配置した場合と柵①地点にのみ配置した場合を比較した。柵①地点に配置した防護柵には図-2に示すように、面材部分の透過性の低い順にB1～B5の5種類を採用した。B1：不透過な壁、B2：上半分は一樣に孔が開いた遮蔽率70%の有孔面材で下半分は不透過な壁面にL字型の波返しがついたもの、B3：B2の波返しが付いていないもの、B4：遮蔽率70%の有孔面材、B5：水平に張ったワイヤーを縦に4本並べたものである。ここで、遮蔽率 σ は面材部分の不透過な面積の割合で定義している。各防護柵の高さ H_B は6 cmに統一した。一方、柵②に配置する防護柵は遮蔽率70%の有孔面材（B4）のみで、柵高 H_B は柵①と同じとした。

容量線式波高計を用いて図1中のW1～W7地点の水面変動を、プロペラ式流速計を用いてV1～V3地点の流速変動を測定した。波力は各種柵の面材を支える2本の丈夫な柱の末端に取り付けた板バネの歪を上下表裏4点でそれぞれ計測した値を用いて求めた。各データの収集はサンプリング周波数500 Hzで行い、同一条件の設定で3回計測を繰り返し、平均値を用いて計測結果を整理した。

護岸前の水深は5 cmに固定して、堰板による貯留水深 h_l を4段階に変化させて、異なる大きさの段波を作用させた。B4の防護柵を2重配置した状態において、 $h_l=17$ cmでは柵①の天端の半分程度まで遡上波が堰上がる状態、 $h_l=21$ cmでは柵①の天端と同程度まで遡上波が堰上がる状態、 $h_l=25$ cmは遡上波が柵①の天端を大きく乗り越えるが柵②は概ね乗り越えない状態、 $h_l=30$ cmは両方の柵の天端を遡上波が乗り越える状態になるようにそれぞれ設定した。防護柵が無い状態における最大浸水深 η_0 の分布は図-3に示すとおり、直立護岸から陸上に乗り上げた遡上波は内陸に進むにつれて、浸水深は徐々

図-1 実験装置の設定と柵模型・計測機器の配置

図-2 実験に用いた津波対策防護柵の断面の形式

図-3 防護柵が無い場合の浸水深の分布 (NB)

に低下する。前述の h_l の条件では、柵①地点の浸水深は柵高の約2～9割、柵②地点では約1～7割であった。

3. 実験結果及び考察

(1) 防護柵周辺の遡上波の挙動と浸水深

陸上を進行する遡上波による防護柵前後の浸水深の時間的な変動状況を確認するために、一例として、 $h_l=25$ cmの段波に対するB4防護柵を単独および二重に配置した場合のW3～W7地点の浸水深の時系列を図-4に示す。同一条件の設定で3度計測した浸水深を図示しているが、いずれの地点においても浸水深の再現性は良好である。段波が護岸に衝突して乗り越える際に、水面が護岸周辺で上昇して、陸上に乗り上げた遡上波の先頭部分は砕波しながら進行する。遡上波がW3地点に到達すると、その浸水深は最初急激に上昇するが、次第に図-3に示した防護柵が無い場合の各地点の浸水深 η_0 に近づき、遡上波が

(a) 単独の防護柵の場合 (柵①地点にB4柵)

(b) 二重柵の防護柵の場合 (柵①と②両方にB4柵)

図-4 防護柵周辺の浸水深の時間変化 ($h_i=25\text{cm}$)

柵に衝突する前の入射波の浸水深は柵が無い場合の同じ地点の浸水深 η_0 と対応することが分かる。遡上波が防護柵に衝突すると、柵前面で水位が堰上げられて、反射波が形成されるため、W4地点の浸水深は入射波の浸水深 η_0 に比べて約2倍近くまで1秒程度で一気に上昇する。柵前面の重複波の浸水深 η に比べて、単独柵の背後のW5～W7の浸水深は約1/3、二重柵の背後のW7の浸水深は約1/5になる。二重柵の間には浸水流の一部が貯留されるため、W5とW6地点の浸水深は柵高 H_B と同程度まで増加する。二重柵の背後W7地点の浸水開始時刻は単独柵の場合と比べて約0.2～0.3秒遅れることが分かる。図-4の条件の場合、遡上波が単独柵を通過してW7に到達するのに約1.8秒かかっていることから、柵の二重化による浸水到達時間の遅れはその時間の約1/9～1/6にあたる。

(2) 柵前面での浸水深の増幅率

防護柵による遡上波の堰上げが柵の種類や遡上波の大きさによってどの程度変化するのかを把握するために、柵が設置されていない状態における浸水深 η_0 に対するB1～B5の各種柵がある場合の柵前方のW4地点における浸水深 η の比 (増幅率) を図-5に示す。実験条件の範囲では、遡上波の浸水深はB1～B4の防護柵の衝突前後で約2～2.5倍に増幅され、入射波の相対浸水深 η_0/H_B や柵断面の違いによって増幅率は変動する。面材部分の遮蔽面積が大

図-5 柵前面の浸水深の増幅率 (W4地点)

図-6 B4柵前面の浸水深と入射波の比エネルギーとの関係

きい防護柵ほど浸水深の増幅率は高い。ワイヤー柵B5の場合、遡上波はワイヤー部分と支柱部分で僅かに阻害される程度であるため、浸水深の増幅率はその他の柵に比べてかなり低い。ワイヤー柵B5以外の防護柵の場合、入射波の浸水深 η_0 が柵高の概ね半分以上になると、堰上げ後の浸水深は柵高を超え、柵天端から越流が生じる。この場合、柵による堰上げが相対的に緩和されるため、入射波の相対浸水深が大きくなるにつれて重複波の増幅率は減少する。

次に、面材部分の遮蔽率が70%の防護柵B4によって堰上げられた浸水深 η を、柵が無い状態における浸水深 η_0 と波速 C_0 を用いて定義した入射波の水頭 $E_0=\eta_0+C_0^2/2g$ (以下、便宜的に比エネルギーと呼ぶ) で基準化した値と相対浸水深との関係を図-6に示す。同図の重複波の浸水深 η は柵①地点に配置したB4柵前方のW4地点および柵②地点に配置したB4柵前方のW6地点で計測された値である。なお、基準化に用いた浸水深や波速はそれぞれ対応する地点での値であり、W6地点の浸水深の基準化には柵①地点は図-1に示したB1～NBの状態、柵②地点には柵がない状態における比エネルギー E_0 を用いた。同図より、入射波の比エネルギーに対する重複波の浸水深の増幅率は、防護柵の位置 (柵①と柵②) および遡上波が受けた障害度合い (柵①のB1～NB) の影響をあまり受けないよ

うである。入射波の浸水深が柵高の半分程度以下の場合、B4柵によって堰上げられた浸水深 η は入射波の相対浸水深にほとんど寄らないで、入射波の比エネルギーと同程度の値になる。一方、遡上波が柵の天端を越流するようになると、入射波が大きくなるにつれて柵による浸水深の増幅率は徐々に減少する傾向を示す。

(3) 柵背後での浸水流の低減効果

防護柵による背後陸域への津波浸水流の低減効果を評価するため、本節では柵の有無や種類および入射波の大きさの違いによる柵背後域の浸水深、流速および流量の変化について検討する。まず、柵が無い場合のW5～W7地点の平均の浸水深 $\bar{\eta}_0$ に対する柵①に各種の防護柵を単独で設置した場合の同3地点の平均の浸水深 $\bar{\eta}$ の比（浸水深の低減比）を図-7に示す。浸水深の低減比は面材の遮蔽率が大きい柵ほど小さくなり、柵による浸水深の低減効果が高まる。同じ種類の柵では、入射波の相対浸水深 η_0/H_B が大きくなるにつれて浸水深の低減効果は下がる傾向を示す。遮蔽率70%のB4柵の場合、柵高の7割程度までの遡上波に対しては浸水深の低減比を0.7程度以下に抑えられるが、柵高と同程度の遡上波に対しては浸水深の低減効果は下がる。B1の不透過壁による浸水深の低減効果が最も高いものの、それに近い浸水深低減効果をB2やB3のような面材の上半分は透過、下半分は不透過の防護柵に期待できる。一方、B5のワイヤー柵は遮蔽面積がその他の柵に比べてかなり小さく、浸水を殆ど阻害しないため、浸水深低減効果は見込めない。

次に、浸水深の低減比と同様に定義した単独柵背後にあるV2とV3地点の最大浸水流速の平均値 $\bar{V}$ の低減比 $\bar{V}/\bar{V}_0$ を図-8に示す。 $\bar{V}_0$ は柵が無い状態でのV2とV3地点の最大浸水流速を平均化した値である。前述の浸水深の低減比とほぼ同様な傾向を示すが、浸水流速の低減比は浸水深の低減比と同程度か大き目で、相対浸水深の変化による流速低減比の変動幅が大きい。遡上波が柵の天端を大きく乗り越える場合（ $\eta_0/H_B=0.69, 1.01$ ）でも、浸水深の低減比は柵の種類によってある程度変えられるが、浸水流速の低減比は柵の種類にほとんど関係無くなる。

最も陸側の計測地点W7とV3における浸水深と流速の積から求めた浸水流量 q について、柵が無い場合の浸水流量 q_0 を基準にして、遮蔽率70%のB4柵が単独および二重に配置された場合の同じ地点の流量の低減比 q/q_0 を図-9に示す。海側に設置した柵①への入射波の浸水深が柵高の約半分以下の場合、B1柵単独での浸水流量の低減比は約0.6以下、二重柵の流量低減比は約0.4以下である。両者の低減比の差が控え柵②の追加（柵の二重化）による流量低減の割合を表すと考えると、単独柵による流量低減割合に比べて柵の二重化による流量低減割合は小さい。

図-7 各種の防護柵による浸水深の低減比 (W5～W7)

図-8 浸水流速の低減比と相対浸水深との関係 (V2とV3)

図-9 単独・二重の防護柵による浸水流量の低減比 (B4)

しかし、柵①の頂部を越流するような高い遡上波に対しては、単独柵によって低減できる浸水流量に比べて控え柵②の追加によって低減できる浸水流量の方が大きく、防護柵の二重化による流量低減効果が相対的に高まることが分かる。

(4) 防護柵に作用する波力の基本特性

単独および二重に配置された防護柵に作用する波力の基本的な変動特性を把握するために、本節では柵の種類・配置や入射波の条件の違いによる波力の変化を考察する。まず、柵①に設置した遮蔽率70%のB4柵に作用す

る波力の時間変化を図-10に示す。図-4と同様に、同一条件の設定で3度計測した波力を図示しているが、いずれの入射波条件においても波力変動の再現性は概ね良好である。入射波の浸水深が柵高以下の条件では、遡上波が柵に衝突して1秒ほどの間に波力は急増して、一定の値に近づく。遡上波がより高くなると、衝突後0.5秒ほどで波力が急増し、最大値に到達して、その後の波力はいくらか減少して、一定の値に近づく。

次に、柵①に設置した各種防護柵に作用する最大波力 F を柵①付近のW4地点における入射波の浸水深 η_0 の静水圧に対応する全圧力で基準化した波力を図-11に示す。遮蔽面積の大きな柵ほど大きな波力が作用するが、入射波の相対浸水深によって柵の種類による基準化波力の差が異なる。相対浸水深が本実験条件の範囲では、B4柵の最大波力は浸水深の全圧力の3倍前後であるが、より遮蔽率の高いB1～B3の柵には全圧力の約3～6倍の波力になる。不透過壁B1の最大波力に比べて、遮蔽率70%のB4柵に作用する最大波力は約60～75%であり、入射波の相対浸水深が増すにつれて両者の波力の差は減少する。透過性の柵B4は不透過壁B1に比べて堰上げ浸水深を1割程度下げられるため(図-4参照)、遡上波が柵の天端を越流しない範囲において、両者の波力の比はB4柵の遮蔽率よりも小さな値に抑えることができる。

図-12は二重配置した柵①と柵②に作用する波力の比 F_2/F_1 と相対浸水深、柵の種類との関係を示す。B4柵が二重配置された場合、柵①頂部からの越流がない状態では控え柵の波力 F_2 は一番柵の波力 F_1 の約3割であるが、越流が生じると控え柵の波力は一番柵の波力の5～6割まで増大する。一番柵にB1～B3の遮蔽率の高い柵を用いると、控え柵に作用する波力を非越流時はかなり抑えられるものの、柵①で越流状態になると控え柵の波力は一番柵の波力の4割前後まで増加する。

最後に、B4柵に作用する最大波力と入射波の浸水深・流速および柵高 H_B との関係を図-13に示す。図中の波力是一番柵の背後に控え柵として設置したB4柵の波力 F_2 および一番柵として柵①地点に設置したB4柵の波力 F_1 である。なお、 F_1 は入射波のW4地点の浸水深とV1地点の流速から求めた比力 M_1 、 F_2 はW6の浸水深とV2の流速から求めた比力 M_2 を用いてそれぞれ基準化した。 ρg は水の単位体積重量である。柵の位置や遡上波の柵による減衰度合が異なるにも関わらず、基準化した波力は入射波の相対浸水深の関数で良く表されることが分かる。入射波の相対浸水深が0.5付近を境に、基準化波力の変化傾向が異なる。遡上波が柵の天端を乗り越えない場合、基準化波力は相対浸水深の増加につれてかなり減少する。一方、越流時の基準化波力は相対浸水深の増加につれて若干減少傾向を示すものの、本実験条件の範囲では0.4前後である。

図-10 柵①に設置したB4柵に作用する波力の時間変化

図-11 柵①の各種柵に作用する最大波力と相対浸水深の関係

図-12 柵①の各種柵の波力と控え柵(柵②)の波力の関係

図-13 B4柵の最大波力と入射波諸元との関係

4. 結論

本研究は、直立護岸の背後陸域に単独または二重に配置した防護柵による津波浸水流の低減効果と柵にかかる波力の基本特性を明らかにするために実験を行い、柵による浸水深の増幅率、浸水深・流速・流量の低減比及び波力と入射波の相対浸水深や柵の種類との関係を調べた。本実験条件の範囲で得た結果をまとめて結論とする。

遮蔽率70%以上の防護柵の堰上げによる浸水深は入射波の浸水深の約2～2.5倍で、柵天端から越流が生じる限界付近の条件で増幅率が最も高く、入射波の浸水深によって変化する。越流限界以下の遡上波の場合、遮蔽率70%の柵による堰上げ後の浸水深は入射波の比エネルギーと同程度である。

単独設置した防護柵による背後域の浸水深の低減効果は遮蔽率の高い柵ほど、柵高に対して低い遡上波ほど高まる傾向にあり、柵の越流限界以下の遡上波に対し遮蔽率70%以上の防護柵によって3割以上浸水深が抑えられる。越流限界を超える遡上波に対しても浸水深の低減効果は柵の種類によってある程度変わるが、浸水流速の低減効果は柵の種類にほとんど無関係になる。

柵の越流限界を超えた遡上波では、単独柵によって低減できる浸水流量に比べて控え柵②の追加によって低減できる浸水流量の方が大きく、防護柵の二重化による流量低減効果が相対的に高まる。

越流限界以下の遡上波に対して遮蔽率70%の透過性の防波柵に作用する波力は不透過壁の波力の6～7割程度で、透過型の防護柵の波力低減機能は高い。同じ種類の柵が二重配置された場合、柵①頂部からの越流がない状態では控え柵の波力は一番柵の波力の約3割であるが、越流が生じると5～6割まで増大する。

以上の結果を踏まえて、透過型の津波対策防護柵の利用条件について考える。柵高が津波高に比べて十分高ければ、面材の遮蔽率を変えて浸水低減効果と作用波力の

バランスを調整して単独で利用できる。柵高を大きく超える巨大津波に対しては、非常に大きな津波力に耐え、また浸水低減機能のある程度確保するために、柵の多重化や他の施設との組み合わせが必要と考えられる。

透過型の津波対策防護柵には、様々な漂流物が作用する場合が多いため、柵周辺での漂流物の挙動、漂流物の衝突力、付着した漂流物による堰上げやそれに伴う波力の増加などについて、今後研究する必要がある。

謝辞：実験の際には、(株)日本パーツセンターの松本光徳さん、金沢大学水工学研究室の元大学院生の五十嵐美咲さん、当時学部4年生の千葉泰志さん、和田卓磨さんのご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤史訓, 福濱方哉, 藤井裕之, 高木利光, 児玉敏雄: 堤内地におけるハード対策の津波被害軽減効果, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1346-1350, 2007.
- 2) 飯村耕介, 田中規夫, 原田賢治, 谷本勝利: 海岸堤防と海岸樹林の組み合わせによる津波減災効果に関する数値計算, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.69-74, 2009.
- 3) 松山昌史, 内野大介, 橋和正, 田中良仁, 榊山勉, 仲村治朗, 稲葉大介: 盛土を越流する津波に対する防潮壁の効果に関する実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.236-240, 2012.
- 4) 奥村与志弘, 手代木啓佑, 清野純史: 内陸盛土を利用した津波多重防御に関する一考察, 第33回地震工学研究発表会講演論文集, CD-ROM, 5-542, 5p, 2013.
- 5) 榎田真也, 齋藤武久, 古路裕子, 中口彰人, 石田啓: 直立護岸上に設置された防波柵に作用する波力及び越波の基本特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第68巻, 2号, p.786-790, 2012.
- 6) (株)日本パーツセンター: 有孔折板の津波漂流物の捕捉状況報告 (オンライン), <http://www.n-parts.jp/>, 参照 2014-04-01.
- 7) 榎田真也, 齋藤武久, 古路裕子, 中口彰人, 石田啓: 防波柵による津波浸水流の低減効果及び波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69(2), p.1323-1328, 2013.

REDUCTION OF TSUNAMI INUNDATION AND TSUNAMI FORCE BY SINGLE AND DOUBLE POROUS-BARRIERS IN ONSHORE AREA

Shinya UMEDA, Takehisa SAITOH, Hiroko FURUMICHI, Akito NAKAGUCHI
and Hajime ISHIDA

This paper presents experimental data for the reduction of a tsunami inundation and wave force provided by porous wave-barriers installed in onshore area. The model experiments of single and double barriers were conducted to give a better understanding of influences of the types, size and number of barriers for tsunami mitigation. It turns out that the porous barriers can effectively reduce the wave forces acting on the barrier and the inundation flow behind the barrier. The reduction effects on the inundation flow and wave force are mainly governed by the types of barrier and the relative incident wave height to barrier height. When the incident wave height is larger than about half the height of the barrier, the reduction of inundation flow provided by the second barriers is larger than that provided by the first barrier.