陸上遡上波に対する波力低減のための 陸上防波構造物に関する研究

神田 直美¹・鈴木 高二郎²・鶴田 修己³

¹正会員 株式会社神戸製鋼所 社会インフラ本部 鉄構・砂防部
(〒651-8585 神戸市中央区脇浜海岸通2-2-4)

E-mail: kanda.naomi@kobelco.com

²正会員 港湾空港技術研究所 海洋研究領域耐波研究グループ グループ長
(〒239-0086 神奈川県横須賀市長瀬3-3-1)

E-mail: suzuki_k@pari.go.jp

³正会員 港湾空港技術研究所 海洋研究領域耐波研究グループ 研究官
(〒239-0086 神奈川県横須賀市長瀬3-3-1)

E-mail: tsuruta-n@pari.go.jp

防潮堤を越える津波越流により発生する陸上遡上波は、高速流へと発達する可能性が高く、特に海域近くに設置される胸壁などに対しては、衝撃波力などの高い波力を及ぼす危険性がある。陸上遡上波の波力についてはこれまでも、算定式の開発が盛んに取り組まれてきているが、周囲構造物による干渉を考慮した波・流れの検討は未だ十分に進んでいるとは言えず、胸壁単体を対象とする作用波力の取り扱いが一般的である。すなわち、胸壁の設計においては、設計波は付加的な前面構造物などの消波工設置を前提にされていない状況を与えられており、胸壁の安定性向上のポテンシャルを残したままとしている。本研究では、胸壁前面に種々の消波構造物を設置し、ダムブレイクを対象とする水理実験を実施し、各構造物の波力低減特性について検討する。

Key Words : land run-up wave, parapet, wave-dissipating structure, hydraulic experiment

1. はじめに

2011年の東日本大震災では、巨大津波の来襲により多くの胸壁が甚大な被害を受けた。津波に限らず巨大台風の来襲時など海水位の急上昇が生じた際には、防潮堤を超える波・流れが陸上へと一挙に押し寄せるため、射流状態となった高速流が胸壁に対して衝撃波力を与え、胸壁倒壊の主要因となり得る。そのため、胸壁の被災プロセスを検討するにあたっては、被災要因として広く知られる越流洗掘に加え、陸上を遡上する高速流や段波等による衝撃波力についても防護対策の確保が必須課題となる。構造物に作用する段波における衝撃波力の算定式については朝倉¹⁾らを始めとし、近年でも松富²⁾、有川³⁾、榊山⁴⁾、池谷⁵⁾、石本⁶⁾、有光⁷⁾など多くの検討がなされている。また、胸壁に作用する陸上遡上波の波力算定式についても、大村⁸⁾などにより検討が進められている。胸壁は陸上構造物であり、通例、設置箇所の周囲には他の構造物が隣立するため、設計にあたっては入射波の条件設定に周囲の構造物を考慮しつつ、いわゆる多重防護の観点からより広範な検討が必要である。周囲構造物の干渉を考慮した研究は、例えば池谷⁵⁾が防潮堤

を介した陸上構造物に対する津波波力の低減効果を検討しているが、胸壁に対して、高速遡上波に対応する陸上設置を前提とした波力低減のための付加構造物の検討は未だ見当たらず、基本的には設計時において胸壁そのものの強度にのみ依存した対応にとどまるのが現状である。本研究では、陸上を遡上する高速流への効果的な対策工の開発を目標に、胸壁前面の陸上部に設置した種々の付加構造物を対象にダムブレイク型の水理模型実験を実施し、付加構造物設置時における胸壁への津波作用波力の低減効果について検討を実施する。

2. 構造物における波力低減特性検討実験

(1) 実験条件

はじめに、検討対象である胸壁前面の各種付加構造物の定性的な波力低減効果を検証すべく、小型水槽を用いたダムブレイク型の水理模型実験を実施した。実験には、長さ 88.5cm、幅 22.8cm、高さ 32cm の矩形水槽を用いた(図-1 参照)。仕切り板により水槽片側に貯水槽を設け、仕切り板を瞬時に引き上げることで、ダムブレイクを再現した。また、津波による波・流れが胸壁に到

達するまでには、護岸や海岸堤防に始まり、陸上での種々の構造物によって、砕波などのエネルギー減衰や波形の崩壊が発生し得る。本実験では、胸壁から前方30cmの範囲に、歩道境界ブロックを想定した高さ2.4cmの底上げを施すことで、試験的に波形崩壊を再現した。なお、底上げによる砕波過程の無い実験条件については、次章を参照されたい。胸壁については、水路と同じ幅22.8cmの合板を用いた直立壁を設置して模擬した。模型への作用波圧は、胸壁模型中央部に底面からの高さ3.7cm、10.7cm、17.7cmの位置に取り付けた各波圧計（サンプリング周波数1,000 Hz）を用いて計測した（図-1 参照）。また、胸壁模型に到達した高速流の上部方向への打ち上げ高 R_w を画像解析から計測した。画像解析にあたっては、実験時の流体を赤色に着色することで背景色とのコントラストが明瞭になるよう配慮し、砕波を含む大変形を伴う水表面についても高精度に追跡を行っている（図-2 参照）。なお、本実験結果の解析には、計測精度への配慮から各ケース毎に実験を複数回実施し、その中央値を採用した。付加構造物模型は、角柱、円柱、植栽模型、碎石、網状構造体、スポンジマットを対象とした（図-3 参照）。各種構造物の仕様は表-1 を参照されたい。入射波の条件については、各種構造物ごとに貯水槽における初期水位 h を $h = 20, 25, 30\text{cm}$ の3ケースで設定して与えた。

(2) 実験結果

胸壁模型前面での上部方向への打ち上げ高 R_w の実験結果を図-4に、各最大波圧の計測値を図-5に示す。図-4からは、付加構造物を設置したいずれのケースも、付加構造物を設置しないケース（model 1）と比較して打ち上げ高 R_w が低くなる傾向が見られる。一方、図-5の各実験ケースにおける下段（底面近傍）波圧計測値からは、貯水槽初期水位 $h = 20\text{cm}$ において、4本建てで設置された円柱、角柱、45度配置角柱のいずれ（model 3, 4, 5, 7, 8, 9）についても、前面構造物なしの条件（model 1）と比較してより高い波圧となることが確認できる。実験のビデオ映像からは、柱状構造物により分断された流れが波圧計の設置ライン上において合流し、波圧計近傍で波高・流速を増大させる様子が確認されており、これがより大きな衝撃波力を与える要因になったと考えられる。これについては、次章で類似の状況をスナップショット付きで記す。なお、3本建てによる柱状構造（model 2, 6）では、波圧計の正面に中央の柱が位置するため、前面構造物なしの場合（model 1）と比較して計測波圧は低下するが、同様にビデオ映像（次章参照）からは、胸壁の柱間正面部において波高・流速の局所的な増加が確認された。スリット構造であるところのこれら柱状構造は、柱の連立によりある種のポーラス構造体として見る事ができるが、

図-1 実験条件概要

※色調が閾値以上となる位置より打ち上げ高を算定

図-2 画像解析例

図-3 付加構造物一部例

本実験の通り、柱同士の間隙幅が大きい場合には、構造物正面の流れ場の速度減少や乱流拡散によるエネルギー減衰などの消波機能は比較的小さく、分断流の柱間での合流による波高・流速の増大化がより支配的になる場合があることが示唆された。一方で、胸壁模型全体に作用する波力総量については、付加構造物の効果から低減をしている可能性がある。これについては、今後、より詳細な検討が必要である。ところで、これら柱状構造と比較して空隙率がより小さなポーラス構造体に碎石の設置ケース（model 10）が該当する。図-5からは、碎石を用いた実験ケースでは底面近傍における波圧の減少が著しく、碎石が消波構造物として十分な機能を有することが確認できる。ところで、消波性能を決定づける要素としては、構造体単位体積当たりの通過流体に対する波力低減効率に加えて、流体の消波構造体への通過流量が重要となる。本実験では、空隙率が比較的大きい柱状以外の構造物としては網状構造体（ネット）とスポンジマットが該当するが、これらは胸壁前面底部面に敷設することで流体が胸壁に衝突するまでのポーラス構造体の総通過時間を増加させてある（図-3参照）。実験結果では、これらの構造物は打ち上げ高 R_w （図-4）および胸壁上段の計測波圧（図-5）がともに増大するものの、胸壁下段においては波圧が減少する傾向が示された。この胸壁下段の波圧減少分は上段波圧の増大分と比較して大きく、胸壁への作用合力においては高い減少効果が得られた。これら構造体は柱状構造とは異なり、空隙構造の均一性から局所的な波圧増大も生じないものと考えられる。図-6に、前面構造物なし（model 1）、碎石（model 10）および網状構造体（model 12）の貯留槽初期水位 $h_0 = 20\text{cm}$ 、 30cm における、胸壁下段の計測波圧の各時系列を示す。図からは、碎石設置時には衝撃波力が効果的に抑制されていることが確認できる。また、網状構造体を設置した

表-1 付加構造物模型種類

model	前面構造物	仕様	胸壁からの距離 $L_0(\text{cm})$
1	なし	—	—
2	角柱	$2 \times 2\text{cm}$, 3本, 9.4cm 間隔	10
3	角柱	$2 \times 2\text{cm}$, 4本, 6.2cm 間隔	10
4	角柱	$2 \times 2\text{cm}$, 4本, 6.2cm 間隔	15
5	角柱	$2 \times 2\text{cm}$, 4本, 6.2cm 間隔 (配置角 45°)	10
6	円柱	2cm 径, 3本, 9.4cm 間隔	10
7	円柱	2cm 径, 4本, 6.2cm 間隔	10
8	円柱+角柱	円柱: 2cm 径, 4本, 6.2cm 間隔 角柱: $2 \times 2\text{cm}$, 4本, 6.2cm 間隔	円柱: 5 角柱: 15
9	植栽模型	4本, 6.2cm 間隔	15
10	碎石	$d=1.3 \sim 2.0\text{cm}$ (5号碎石)	—
11	碎石+角柱	碎石: $d=1.3 \sim 2.0\text{cm}$ (5号碎石) 角柱: $2 \times 2\text{cm}$, 4本, 6.2cm 間隔	角柱: 15
12	網状構造体	30cm 長, 編目幅 $B=1.0\text{cm}$ 2層, 1.0cm 厚	—
13	スポンジ	30cm 長, 1.2cm 厚	—
14	庇(90°)	5.5cm 長, 設置高さ 22.3cm	—

図-4 胸壁前面の打ち上げ高

図-5 胸壁に作用する波圧

場合には、衝撃波圧の発現が見られるものの、圧力値は胸壁のみの場合と比較して低減されていることが分かる。

3. 構造物の波力低減効果の検証実験

前章の水理模型実験において波力低減に高い効果が得られた砕石および網状構造体をより詳細に検討すべく、中型断面水路を用いてダムブレイク実験を実施した。なお、比較検討のため、4本建ての角柱から成る柱状構造を用いた実験も併せて実施した（表-2参照）。

(1) 実験条件

実験条件の概要および付加構造物の設置状況の写真を図-7に示す。実験水路は水路部が長さ $L_c = 5.0\text{m}$ 、幅 $W = 0.5\text{m}$ 、高さ $H_c = 0.6\text{m}$ であり、水路端にはダムブレイク発生のための真空ポンプ式タンクが接続されている。タンク天端に取り付けた大気開放用電磁弁を一挙に開放することで水路・タンク両水位のヘッド差を有効化させ、タンク内の水を水路へ流入させて波を発生させる。なお、図-7の通り、副水路では実験ケース毎で同時に通過波を測定している。波圧計は先の実験と同様に胸壁模型中央部の底面からの高さ 3.7cm、10.7cm、17.7cm の位置に設置した（サンプリング周波数 1,000 Hz）。なお、計測にあたっては同条件の実験を3ケース毎実施し、その中央値を抽出した。胸壁前面の付加構造物の種別は、前面構造物なし、柱状構造、砕石、網状構造体とし、網状構造体は2面重ね（厚み 1.0cm）および4面重ね（厚み 3.0cm）の2種を対象とした（詳細は表-2を参照）。

(2) 実験結果

図-8に、実験ケースごとの最大波圧と貯水槽初期水位 h_0 の関係図を示す。図-8の、柱状構造（model 2）における波圧計測値の結果からは、上段波圧については波力低減効果が弱く、下段・上段では波圧の低減効果はほぼ見られず、増大する傾向がより顕著であることが分かる。

図-9に、柱状構造を用いた実験ケースにおける接近流先端部が付加構造物に衝突する瞬間の実験映像のスナップショットを示す。図-9(A,B)では、胸壁模型前面の付加

図-6 胸壁の作用波圧の時系列

表-2 付加構造物模型種類

model	前面構造物	仕様	胸壁からの距離 L_0 (cm)
1	なし	—	—
2	柱状構造	角柱 $2 \times 2\text{cm}$, 4本, 6.2cm間隔	10
3	砕石	1.3~2.0cm(5号砕石)	10
4	網状構造体	30cm長, 編目幅 $B = 1.0\text{cm}$ 2層, 1.0cm厚	15
5	網状構造体	30cm長, 編目幅 $B = 1.0\text{cm}$ 4層, 3.0cm厚	15

図-7 実験装置概要

図-8 ダムブレイク実験における各付加構造物設置条件での計測波圧

構造物に接近流先端部が衝突後、上方へと打ち上げられる様子が確認できる。こうした傾向は他の付加構造物のケースでも同様で、先端流の流速が構造物によって急速に減衰させられることで、後続流によって跳水が起こるか或いは構造物に衝突することで、運動の自由度が確保される上方へ打ち上げられて生じる。しかし、図-9 (C, D)に示す通り、柱状構造の場合には、構造物によって堰き止められ、或いは分断された流れが柱間に集中して流れ込むため、より強い衝撃波となって胸壁模型へ局所的に作用する場合がある。これらを防ぐためには、前面の付加構造物の空隙構造が均一であることが肝要である。図-8の碎石 (model 3) の計測波圧からは、全ケースにおいて波圧が効果的に減衰される様子が確認できる。一方、2枚重ねた網状構造体 (model 4) のケースでは、下段波圧において、一定の波圧減衰効果が確認できるものの、中段波圧の一部ケースおよび上段波圧の全ケースにおいて計測値の増大が示されている。しかし、網状構造体を4枚に嵩上げたケース (model 5) では、上段波圧の増大は解消され、また、上段・中段波圧においては碎石と同等かそれ以上の波圧減衰効果が得られた。

5. まとめ

本研究では、胸壁に作用する陸上遡上流への対策工として、胸壁前面の付加構造物を対象にダムブレイク型の水理模型実験を実施し、付加構造物設置時における胸壁への津波作用波力の低減効果について検討を実施した。水理実験結果からは、スリット (柱状) 構造は一部ケースにおいて局所的な波力増大の傾向が示された。碎石を用いた実験ケースでは、概ね波力を効果的に低減させる結果が得られ、また、網状構造体を用いたケースでは、一定以上の高さを確保することで、効果的に波力を低減させることが明らかとなった。実務への適用を考慮すると、施工

図-9 柱状構造に対する先端流衝突のスナップショット

の効率性を考慮する必要があるが、こうした網状構造体は体積・質量ともに波力低減効率が高く、波の影響による設置不安定性が問題とならない陸上において、有効な選択肢の一つとなりうる。今後は、より大規模な水理模型実験を実施し、胸壁前面の作用波圧分布など付加構造物による波力低減効果をより詳細に検討したい。

謝辞：本研究の遂行にあたって，シバタ工業株式会社 武部悠一郎氏，株式会社神戸製鋼所 安藤圭氏，豊橋技術科学大学大学院修士課程 飯吉勇己君に実験の協力を頂いたことを記して，ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.911-915, 2000.
- 2) 松富英夫，決得元基，齋藤雅大：開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 69, No.2, pp.I_326-I_330, 2013.
- 3) 有川太郎：水理模型実験による防潮壁に作用する孤立波の波圧特性に関する検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 71, No.2, pp.I_889-I_894, 2015.
- 4) 榊山勉：陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68, No.2, pp.I_771-I_775, 2012.
- 5) 池谷毅，末長清也，福山貴子，秋山義信，舘野公一，鈴木紀雄：遮蔽物による陸上構造物に作用する津波波力の低減効果，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 71, No.2, pp.I_569-I_574, 2015.
- 6) 石本健治，坂本佳子，野中哲也，浅野敏之，柴木秀之：防潮堤の倒壊を考慮した津波越流に対する数値解析，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 71, No.2, pp.I_527-I_532, 2015.
- 7) 有光剛，大江一也，川崎浩司：構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68, No.2, pp.I_776-I_780, 2012.
- 8) 大村智宏，八木宏，中山哲嚴，米山正樹，成田賢仁，加藤広之，門安曇，滑川順：胸壁に作用する津波波力に関する実験劇研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 71, No.2, pp.I_991-I_996, 2015.

(2016. 3. 16 受付)

STUDY ON REDUCTION EFFECT OF WAVE FORCE BY OPTIONAL STRUCTURE FOR PARAPET

Naomi KANDA, Kojiro SUZUKI and Naoki TSURUTA

Land run-up waves caused and accelerated by overflowing sea-walls may give crucial damages on land structures. In particular, since parapets are set in front of the sea, they have a risk that they could suffer a huge impact by a direct attack of such a high-speed flow. Despite the fact that many studies focus on prediction of wave forces acting on the parapets, in addition, it is general to suppose setting of some optional structures such as wave-dissipating blocks for in-water structures, e.g. breakwaters and seawalls, insufficient studies consider possibility of the optional structures. For efficient design of resilient parapets, optional structures should be effective to reduce wave forces. In this study, targeting some optional structures, e.g. slit, porous, and net set in front of the parapet, their reduction effects of wave force acting on the parapet is verified by implementing hydraulic experiments targeting dam break problems. From the results of experiments, their characteristics as a dissipating structures are shown.