津波・高潮と高波の複合作用による 低基混成堤への波力特性の検討

喜多 司¹・鈴木 高二郎²・鶴田 修己³

¹非会員 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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail:kita-t@pari.go.jp

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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

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

想定を超える津波や高潮が防波堤を越流する際に高波が同時に作用する現象、いわゆる越流と高波の重畳現象についての検討例は少なく、想定外の被害を招き得る危険性がある。そこで、本研究では低基混成堤における越流条件下での高波の重畳現象を対象に水理模型実験を実施し、越流・越波複合現象下での堤体に作用する波力および港内側被覆工の被災過程について検討を実施する。実験計測結果から、越流・越波複合現象下における堤体前後面の波力特性について、堤体周囲の越流・越波の浅水変形に着目した算定方法の検討を実施するとともに、堤体背後マウンドの被覆工に作用する越流水塊の落水範囲とその波力についても従来の越流を対象とする算定方法との比較からその特性を検討する。

Key Words : complex disaster, overflow, overtopping wave, breakwater, 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防波堤を始めとした多くの港湾構造物が甚大な被害を受けた。近年では、気象変動の影響から台風の大型化による想定外の高潮被害（レベル2 高潮・高波）の可能性も示唆されており、港湾構造物の耐波性能を確実に保持させるにはこうした設計要求の変化に合わせて、従来よりも複雑かつ多様な波流れを設計条件として導入する必要がある。例えば、酒田港における各波高¹⁾の年間発生確率を見ると（図-1参照）、波高2m以上の波は2014年時点観測で21%程度を記録しており、津波と高波が同時発生する可能性は十分に高いことが示される。高潮位と高波が同時発生する場合には、越流と高波の重畳効果から現象が想定外の様相を呈する可能性があり、そうした状況に対応すべく、複合現象による被災メカニズムの解明は目下喫緊の課題であると言える。

津波が構造物を越流する現象については、これまでも幾つかの検討がなされている。たとえば、宮田²⁾ら、有川³⁾らは防波堤に作用する越流下の波力特性を水理模型実験と数値シミュレーションから検討しており、波圧補正係数の検討を進めている。堤体の周囲構造物への

影響については、たとえば、佐藤ら⁵⁾は防波堤港内側のマウンドの洗掘を水理模型実験、数値シミュレーションの両面から検討し、津波越流の港内側水面への突入位置の算定方法を提案している。また、三井ら^{6), 7)}は水理模型実験と数値シミュレーションの両面から越流水塊に対する防波堤港内側のマウンド被覆材の安定性について検討を実施している。これらの研究ではいずれも共通し、越流水塊の打ち込み位置が評価精度に関わる重要な

図-1 高波の発生確率(酒田港)

ファクターとして取り扱われ、その算定法についても別途検討が進められている。ただし、堤体幅が小さい場合や上部工が付属する場合などの広範な状況に対応する算定式の構築は未だなされておらず、今後も詳細な検討が必要である。高波による越波発生時の防波堤に作用する波力特性は、より複雑なメカニズムをとる。設計式において、波力や越波量の算定には合田⁸⁾の波圧公式および越波量公式が広く用いられているが、これら設計公式は堤体天端以下の水位が前提とされるため、越流・越波の複合現象についての対応はなされていない。越流・越波の複合現象の取り扱い事例としては、鈴木ら⁹⁾による護岸の越流・越波複合作用時の期待通過水量の数値シミュレーションを通じた検討が挙げられるが、水理実験計測を介した構造物、特に防波堤に対する越流・越波の重畳効果に関する詳細な検討は未だ十分とは言えない。

本研究では、高潮位・高波複合現象下での低基混成堤の被災特性を明らかにするため、低基混成堤を対象とした越流・越波の同時作用条件下における水理模型実験を実施し、堤体に作用する水平方向波力および堤体背後の被覆工の被災過程を検討する。

2. 水理模型実験

(1) 実験条件

水理模型実験は、長さ105m、幅0.8m、高さ2.5mの造波水路を用いた(図-2参照)。越流状況を再現するため、防波堤模型の岸側に全幅堰を介した貯留槽を設け、ポンプを介して副水路を経由する一様循環流を発生させた。越流状況が十分安定した後、水路沖側端の造波機を稼働させて越流・越波の複合現象を再現し、計測を実施した(図-3)。低基混成堤模型の堤体部には、高さ0.32m、長さ0.264mの亚克力製模型を用いた。本研究では、防波堤の破壊状況は検討対象外であるため、堤体内部に鉛を詰め、滑動・転倒が生じないよう十分な重量を確保した。

図-3 実験写真

表-1 実験ケース

実験ケース	越流前面水位 h_f [cm]	入射波	
		周期 T [s]	波高 H [cm]
case 1 ~ 6	38	1.3	8
case 7 ~ 12	43	1.3	3
case 13 ~ 18	43	1.3	8
case 19 ~ 24	43	1.3	14
case 25 ~ 30	43	2.5	8
case 31 ~ 36	49	1.3	8

※背面水位 h_r は18~40cmで変更

また、堤体下部には5号採石を用いて高さ0.056mのマウンドを形成してある。マウンドの洗掘を防ぐため、マウンドの法面・天端は金網で被覆し、透水性を確保しつつ養生を施した。計測器の設置条件については図-2を参照されたい。越流水塊の落水位置については、水路側面より撮影したビデオカメラ映像より画像解析を介して計測を実施した。水理条件については表-1に示す通り、ポンプ稼働前の初期水位(堤体前面水位に該当)、貯留槽の全幅堰高さ、風波の周期 T 、波高 H を変動パラメータとして実験ケースごとに設定した。なお、造波機により発生させる波については、循環流を発生させない条件下で通過波検定を実施して定義してある。

(2) 実験結果

a) 堤体への作用波力

堤体に設置した波圧計の計測結果より、堤体の前面・背面に作用する各波力を算定した。波力の定義には、波圧の各計測値から堤体側面の圧力鉛直分布を線形近似し、積分操作を施して算定した。ここで、越流・越波の複合作用によって堤体への被害が最大化する状況すなわち水平作用波力合力が最大となる瞬間を対象とした代表的な実験ケースでの堤体前面・背面波力およびその合力を図-4に示す。比較のため、図中には、別途実施した越流のみが作用する実験条件下での堤体への作用波力を併せて示す（case B, C）。なお、case Cでは入射波による片側波高分の水位上昇を考慮した堤体前面水深を設定した。周期が比較的長いケース（図-4a）を見ると、case Aではcase Bおよびcase Cと比較して、より大きな波力が堤体に作用しており、入射波による波力増大が顕著であることが分かる。背面波力はいずれのケースもほぼ同じ値を示すのに対し、堤体前面では各実験ケースでの波力差が著しい。越波の影響によって、堤体背後には周期性を持つ水面変動が生じるため、堤体背面波力は一定の範囲で変動を繰り返すが、堤体前面と比較するとその変動量は小さく、最大合力の定義においては堤体前面波力の変動が支配的である。堤体前面波力について図-4aおよびbを比較すると、周期が長い場合すなわち波長が長い条件下では、堤体前面での波力がより増大していることが確認できる。ただし、本実験では堤体前面水位がいずれのケースも堤体天端より高く、case Aでの入射波が堤体天端を通過するため、合田の波圧公式を代表とする従来の防波堤の波力式は適用の範囲外となる。また、case Aとcase Cとの比較から、こうした越流・越波の複合現象を入射波高分の足し合わせから導かれる単純な流れとして取り扱うことが、波力算定においては不適切であるのは明らかであり、入射波の堤体通過時に生じる波形変形や動圧成分を考慮した何らかの波力算定法が必須となる。

ここで、入射波により増大した堤体前面波圧 Δp_f が波高相当の静水圧に比例するものと仮定する。

$$\Delta p_f \propto \rho g H_f \quad (1)$$

ここに、 H_f ：堤体前面波高である。堤体前面の水深急変部における波の変形に対して、一般的な浅水変形¹⁰⁾を適用すると、堤体前面波高 H_f と入射波高 H の関係は浅水係数 K_s で以下のように表される。

$$\frac{H_f}{H} \equiv K_s = \left\{ \tanh kh \cdot \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、 $k=2\pi/L$ である。ここで、 kh を微小とみなせば、 $\tanh kh \approx kh$ 、 $\sinh 2kh \approx 2kh$ と近似でき、式(2)は式(3)のように書き換えられる。

図-4 越流のみと高波複合時の最大波力 F の比較

図-5 越流のみから高波が複合作用したときの波圧増加 Δp の変化

$$K_S = 1/\sqrt{2kh} \approx 0.282\sqrt{L/h} \quad (3)$$

また、式(1)、(3)より以下の式が得られる。

$$\Delta p_f \propto \rho g H_f = \rho g K_S H = 0.282 \rho g \sqrt{L/h} H \quad (4)$$

ここで、波峰が堤体前面直上にあるときの水深 h と波高が同程度であるとして $h \propto H$ と仮定すると、式(4)から次式が得られる。

$$\Delta p_f \propto 0.282 \rho g \sqrt{L/h} H \propto 0.282 \rho g \sqrt{LH} = \rho g \beta \alpha; \quad \alpha = \sqrt{LH} \quad (5)$$

ここに、 β : 定数である。図-5に、縦軸に増大した堤体前面波圧 Δp_f 、横軸に入射波条件 α をとり、その相関を示す。図中には、各プロットの回帰線を併せて示す。図からは、暫定的ではあるものの、回帰線から得られた算定式 $\Delta p_f = 0.22 \rho g \alpha$ ($\beta = 0.22$) が実験結果へ良好に適合することが分かる。

b) 港内側被覆工への作用波力

越流による被覆工の被災過程においては、波力の大きさに加えて、波力の作用位置も被災状況を決定する重要なファクターである。越流水脈は、ケーソン天端から放

出後に自由落下するため、越流水脈の堤体後端からマウンド被覆面への打ち込み位置までの距離 L は、ケーソン後端から放出される水平方向速度 u が支配的要素となる。三井らは、放出速度 u の算定について本間¹¹⁾、¹²⁾の越流公式を基礎に以下の式を提案している。

$$u = q/h_2; \quad q = 0.35 h_1 \sqrt{2gh_1}, \quad h_2 = 0.45 h_1 \quad (6)$$

ここに、 q : 越流流量、 g : 重力加速度、 h_1 : 越流水深、 h_2 : ケーソン後端における越流水脈厚である。ただし、上式の適用範囲は $h_1/B < 1/2$ (B : 沖岸方向堤体幅) である。上式は、越流状況をのみ対象とする算定式であり、越波・越流の複合現象については対応しない。そこで、本研究では、越流・越波の複合作用化における越流水塊のマウンド被覆面への打ち込み位置を、撮影した実験映像から抽出し、越流前面水深、波の波高、周期ごとに整理した(図-6)。図中には参考値として、式(6)から導かれる越流水塊の打ち込み位置の算定値も併せて示す。なお、縦軸は堤体前面・背面間の水位差 Δh である。越流のみ作用する場合でのケーソン天端前端での水脈厚 ($h_1 = 0.4\text{cm}$) が小さいケースである(図-6D)を見ると、波が作用することで、防波堤背面直下から岸側まで広い範囲に渡って越流水塊の打ち込みの影響が生じることが確認できる。

図-6 高波の複合作用による堤体前後水位差 Δh と打ち込み位置 L の関係

一方、越流単体によるケーソン天端での水脈厚がある程度確保できる場合（図-6A,B,C,E）には、 Δh が大きいほど越流水塊の打ち込み範囲は狭まる傾向が見られる。越流水脈は、ケーソン天端からの放出後に重力加速度による鉛直下向きの加速が付与されるが、 Δh が大きい、すなわち背面水位が低いほど、ケーソン天端放出後の重力による加速時間が長く確保され、堤体背後水面への突入時点での越流水塊の下向き速度が大きくなる。その結果、マウンド天端までの到達時間 Δt が短くなり、打ち込み位置までの距離 $L (=u\Delta t)$ が小さくなるため、被災範囲の縮小化に繋がったと考えられる。一方で、堤体背後の水深が低い場合には、ケーソン天端放出後の重力による加速時間がより長く確保されるため、水面突入時の越流水塊の下向き速度が大きくなる。そのため、マウンドへの局所的な作用波力は対照的に増大することが予想される。

図中の各算定値を見ると、実験計測値との乖離が顕著であることが分かる。式(6)では、波による流体の接近流速の影響が導入されておらず、また、堤体天端上での入射波の浅水変形が考慮されていないため、堤体天端での放出速度 u に誤差が生じたと考えられる。

次に堤体背後マウンド被覆工への作用波圧を検討するため、代表的なケースを対象に、マウンド天端上に設置した波圧計の計測結果を図-7A, Bに示す。また、参考として図-7Cに防波堤模型前背後の水位の時系列データを示す。なお、P12, P13はそれぞれ堤体背面から12cm, 18cm 港内側のマウンド天端に設置した。越流水塊の落水地点直下にあるP13（図-7A）では、越流単体作用時における水位が安定した状況においても、越流水塊の打ち込みの影響によって大きな圧力の揺動（変動）が継続して生じている。入射波の堤体への到達後には、図-7A, Bともに波による圧力の振動が確認できるが、P13（図-7B）は、1500Pa程度の特により高い圧力振幅が計測されている。図-7Cから、堤体背後の水位変動は8cm程度であることが確認できるが、P13の圧力振幅は、この水位変動による静水圧分よりも遙かに大きく、打ち込まれる越流水塊の動圧成分が大きいことが示唆される。

図-7Dに、図-7Aにおける赤点線で囲われた圧力振動区間の詳細（拡大図）を示す。なお、参考として図中には、越流単体作用時に計測された波圧計測値も併せて示す。図からは、波の打ち込みに合わせ、水面変動に対応した静水圧変動分程度の規則的な圧力変動が確認できる。各周期における圧力のピークに着目すると、作用波圧の変動振幅に対して、一定の異相ずれが確認できる。

3. まとめ

本研究では、これまで検討例の少ない越流・越波の複合現象を対象に水理模型実験を実施し、構造物に与える

図-7 水位、マウンド天端波圧の時系列データ
(case27: $h_f = 43\text{cm}$, $h_r = 28.4\text{cm}$, $H = 8\text{cm}$, $T = 2.5\text{s}$)

被災特性の検討を実施した。堤体への波力については、合田の波力算定式の適用範囲外である越流・越波複合現象下において、越流水深に対して波高分の単純な足し合

わせによる静水圧を基礎とする評価方式では、過小評価となることが明らかとなった。本研究では、入射波の堤体通過時における浅水変形に着目し、越流条件下における入射波の影響による波力変動の特性を整理した。また、堤体背後の被覆項の被災過程についても検討を実施し、実験映像の解析から、被災範囲やその波力特性について検討を実施した。

今後は、上部工や堤体幅の変更など、より広範な条件下で水理実験を実施し、波力特性の検討を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>, 参照 2016-02-03
- 2) 宮田 正史, 小竹 康夫, 竹信 正寛, 中村 友昭, 水谷 法美, 浅井 茂樹, : 防波堤を越流する津波の水理特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_504-I_509, 2014.
- 3) 有川 太郎, 佐藤 昌治, 下迫 健一郎, 巖 駿:津波越流時における防波堤の安定性に関する研究,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_916-I_920, 2013
- 4) 有川 太郎, 林 達也, 鈴木 崇之, 下迫 健一郎:数値波動水槽を用いた津波越流時における防波堤の安定性の検討,土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_366-I_371, 2014
- 5) 佐藤 正勝, 米山 治男, 長谷川 巖, 稲垣 茂樹:一般防波堤の津波越流による港内側マウンドの洗掘と対策, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_252-I_257, 2012
- 6) 三井 順, 丸山 草平, 松本 朗, 半沢 稔:防波堤を越流する津波に対する港内側マウンド被覆材の安定性に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_881-I_885, 2012
- 7) 三井 順, 丸山 草平, 松本 朗, 半沢 稔:防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_956-I_960, 2013
- 8) 合田良実:防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第12巻, 第03号, pp.31-70, 1973.
- 9) 鈴木 武, 柴木秀之:越波・越流共存時の護岸通過流量のモデル化と三大湾高潮浸水被害の地球温暖化による感度の推定, 国土技術政策総合研究所研究報告, 第46号, 2011
- 10) 服部 昌太郎:海岸工学, コロナ社, 38p., 1987
- 11) 本間 仁:低溢流堰堤の流量係数(第1編), 土木学会誌, 第26巻, 第6号, pp.635-645, 1940
- 12) 本間 仁:低溢流堰堤の流量係数(第2編), 土木学会誌, 第26巻, 第9号, pp.849-862, 1940

(2016. 3. 16 受付)

STUDY ON WAVE FORCE ACTING ON BREAKWATER AGAINST OVERFLOW WITH HIGH WAVES

Tsukasa Kita, Kojiro Suzuki and Naoki Tsuruta

Due to the climate change, big storms increasing occur with significant disasters, which are possibly caused by high tide compounded with big waves. Despite that such a complex disaster may cause unexpected damage to coastal structures, the detail of the mechanism has not been studied sufficiently. Therefore, in this study, we implemented hydraulic experiments targeting on a breakwater suffered the by mixture phenomenon with overflows and overtopping waves. This study focuses on the wave power exerted on the caisson and the mechanism of suffering processes of armor units, which cover the mound behind breakwater. The experiments show that mixture phenomenon gives increment of wave force comparing with an overflow boundary, which has a similar overflowing depth to that of the mixture phenomenon. Through the experimental results, it is found that the tendency of the increment quantity of the wave force depends on states of wave shoaling on the breakwater. In addition, the suffering process of the armor process is examined focusing on suffering area and pressure force.