打上げ・越波統合算定モデルの精度検討

間瀬 肇¹・玉田 崇²・安田 誠宏³・川崎 浩司⁴

¹正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

²正会員 アビームコンサルティング(株) 公共ビジネスユニット マネージャー
(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-4-1 丸の内永楽ビルディング)

E-mail: tatamada@abeam.com

³正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: yasuda-t@kansai-u.ac.jp

⁴正会員 (株)ハイドロソフト技術研究所 執行役員兼研究開発センター長
(〒530-6126 大阪市北区中之島3-3-23中之島ダイビル26F)

E-mail: kawasaki@hydro-soft.co.jp

気候変動に伴う沿岸災害リスクの増大と老朽化施設の更新に対応するため、海岸護岸の段階的嵩上げ方法が提案されている。こうした嵩上げ高の算定において、打上げ・越波の融合を図った統一的な越波流量算定法を確立することは急務である。最近では CLASH データに基づいて2種類の越波流量算定式(方法)が提案されている。本研究では、著者らが提案した打上げと越波統合算定モデル(IFORM)による算定値の精度を、他の2つのモデルによる算定値との比較を通して検討した。その結果、IFORM は、他のモデルと同程度の越波流量算定精度を有していることが確認できた。IFORM の適用範囲は、わが国の海岸護岸の設置条件を十分満たしており、直立および傾斜複断面護岸の打上げ高・越波流量を簡易に算定できる。

Key Words : overtopping, runoff, CLASH datasets, vertical and sloping seawalls, prediction formula

1. はじめに

打上げと越波の現象把握および打上げ高や越波流量の算定は、海岸工学の研究が始まって以来の古くからの研究テーマであるが、現在でも精力的に行われている¹⁾。現行の設計基準では、堤防・護岸の設置位置により、越波流量あるいは打上げ高に基づく設計手法を適宜選定し、その必要天端高を算定する²⁾³⁾。これらの技術指針における越波流量の算定図や算定式は、一様な海底勾配の上に直立、直立消波、傾斜および緩傾斜等の種々の堤防・護岸が設置された場合の実験結果によるものであり、波の不規則性は考慮されている。一方、打上げ高の算定図や算定式は、規則波の実験結果に基づいており、実際の打上げ高よりも過小評価する⁴⁾。EurOtop⁵⁾には、種々の打上げ高や越波量の算定式が記載されているが、これらはある程度水深の深いところに設置された防波堤に対するもので、汀線近傍に設置された海岸堤防や護岸に対する打上げ高や越波流量を推定する際には、適用条件が当てはまらないことがほとんどである。

玉田ら⁶⁾および Mase et al.⁵⁾ は、汀線近傍(陸上部を

含む)における複断面の海岸堤防・護岸を対象に、波の打上げ高と越波流量の算定方法を体系化してきた(打上げ・越波統合算定モデル IFORM: Integrated Formula of wave Overtopping and Runup Modeling)。IFORM は、堤脚水深の大きな箇所に設置された傾斜護岸にも適用できるうえ、直立護岸に対しても、2 割勾配護岸の越波流量を約 1/2 とする換算係数を適用することで拡張して適用可能なことが確認されている⁶⁾。

現在、気候変動に伴う沿岸災害リスクの増大と施設の老朽化に対応するため、海岸護岸の段階的嵩上げ方法が検討されている⁷⁾。こうした嵩上げ高の算定においても打上げと越波の融合を図り、適用条件の制約の少ない統一的な越波流量算定法を確立することは急務である。

Goda⁸⁾ は、CLASHデータセットを解析し、直立護岸、傾斜護岸、および消波護岸の越波流量を推定する統一的算定式を提案している。Van del Meer and Bruce⁹⁾ は、傾斜壁および鉛直壁に対する越波流量算定式を提案しその精度を調べている。本研究は、玉田ら⁶⁾の研究に続いて、IFORM による越波流量算定精度を Godaモデルおよび Van der Meer and Bruce モデルによる算定値との比較を通

して検討するものである。また、越波流量算定に必要な打上高を繰返し計算で求めなくてよいように、付録に一樣勾配海浜上の海岸堤防への打上高算定図を載せる。

2. 打上げ・越波統合算定モデル IFORM

Mase et al.⁵⁾ および玉田ら⁶⁾ の打上げ・越波統合算定モデル IFORM は、わが国の多くの海岸保全施設の設置条件に対応する複合断面の海岸堤防・護岸を対象にしたものである。IFORM は、Hedges and Reis¹⁰⁾ の越波流量算定モデルに基づき、天端高より最大打上げ高が小さい場合には越波は生じず、天端高がゼロでは越波量が有限値になるという物理的制約を満足する。

Mase et al.⁵⁾ の打上げ高算定式は、1/10～1/30 勾配の海底上に 0.5 割および 3 割の法面勾配の傾斜面を対象とし、surf similarity parameter の範囲は $0 < \tan\beta (H_0'/L_0)^{-0.5} < 6.0$ 、沖波波形勾配および法先水深波高比は、それぞれ $0.009 < H_0'/L_0 < 0.06$ 、 $-0.37 < h_t/H_0' < 0.53$ の範囲で定式化された。一方、対象とした越波実験データ¹¹⁾ は、1/10 および 1/30 の海底勾配上に設置された 3 割、5 割および 7 割の法面勾配を有する緩傾斜護岸で、沖波波形勾配は $H_0'/L_0 = 0.017$ および 0.036 、法先水深波高比は $-0.27 < h_t/H_0' < 0.71$ 、相対護岸天端高は $0.5 < R_c/H_0' < 1.5$ の範囲であった。これらより、打上げ高算定式には直立護岸が含まれているが、越波流量算定式には直立護岸や急勾配の傾斜護岸は含まれていなかったため、玉田ら⁶⁾ は IFORM の直立護岸への拡張を図った。

直立護岸と傾斜護岸では、打上げおよび越波形態が異なり、直立護岸では打上げ高は大きくなるものの、陸側への運動量が小さくなるので越波量は小さくなる。一方、傾斜護岸では打ち上がった水塊が越流形態で護岸を越えていくため、越波流量は大きくなる。すなわち、直立護岸は 2 割勾配護岸に比べて打上げ高は大きくなるが、越波流量は小さくなる¹²⁾。このような越波特性は、Goda⁸⁾ の越波流量算定式にも考慮されている。

IFORM をまとめると、以下のとおりである。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_0'^3}} = \begin{cases} C \left[0.018 \left(\frac{R_{\max}}{H_0'} \right)^{\frac{3}{2}} \left\{ 1 - \left(\frac{R_c}{H_0'} \right) / \left(\frac{R_{\max}}{H_0'} \right) \right\}^{6.240} \right] & ; \text{ for } 0 \leq R_c \leq R_{\max} \\ 0 & ; \text{ for } R_{\max} \leq R_c \end{cases} \quad (1)$$

$$C = 0.25 \cot \alpha + 0.5 \quad ; \text{ for } 0 \leq \cot \alpha < 2 \quad (2)$$

$$C = 1 \quad ; \text{ for } \cot \alpha \geq 2 \quad (3)$$

ここに、 q は単位時間・単位幅当たりの越波流量、 g は重力加速度、 H_0' は換算沖波波高、 $R_{\max}$ は最大打上げ高、 R_c は天端高である。また、 $\cot \alpha$ は法面勾配であり $\cot \alpha$

$=0$ は直立護岸を意味する。 $R_{\max}$ は以下に示す式 (4) で算定され、2% 最大打上げ高 $R_{2\%}$ は式 (5) および式 (6) で与えられる。

$$(R_{\max})_{99\%,100} = 2.15 R_s = 1.54 R_{2\%} \quad (4)$$

$$R_{2\%}/H_0' = 2.99 - 2.73 \exp(-0.57 \tan \beta / \sqrt{H_0'/L_0}) \quad (5)$$

$$\tan \beta = \frac{(h_b + R_{2\%})^2}{2A} \quad (6)$$

ここに、 $\tan \beta$ は波の打上げ高 $R_{2\%}$ と碎波水深 h_b の 2 点間の実断面の面積 A から求まる仮想勾配であり、 L_0 は沖波波長である。法面勾配が 2 割よりも緩い場合には、打上げ高および越波流量算定式は Mase et al.⁵⁾ と同じであり、式 (3) のように $C=1$ を用いる。一方、2 割勾配より急勾配 (例えば、直立護岸や 1 割勾配護岸) の場合には、まず、式 (5) において、計算断面 (実断面は直立護岸や 1 割勾配護岸) を便宜的に一律 2 割勾配として $R_{2\%}$ を計算し、式 (4) で $R_{\max}$ を推定し、式 (2) において対象とする護岸の法面勾配に応じた係数 C を乗じて、越波流量を算定する。

碎波水深 h_b を求める式は、以下のようである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_b}{H_0'} &= a_0 + a_1 \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ (H_0'/L_0)/a_2 \}}{a_3} \right)^2 \right] \\ a_0 &= 30.2470 - 27.3440 \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(22.9130i)}{5.4509} \right\}^2 \right] \\ a_1 &= -9.9467 + 8.9213 \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(29.3880i)}{3.1264} \right\}^2 \right] \\ a_2 &= 0.0302 - 0.0023 \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(25.9160i)}{1.7065} \right\}^2 \right] \\ a_3 &= 6.1291 - 3.5001 \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(36.3660i)}{1.3457} \right\}^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、 i は海底勾配 ($= \tan \theta$)、適用範囲は、 $0.02 < H_0'/L_0 < 0.07$ 、 $1/100 < i < 1/10$ である。

玉田ら⁶⁾ は、CLASH データセット¹³⁾ を用いて IFORM の適用性を検証した結果、IFORM における越波流量の推定精度が担保されるのは、傾斜護岸および直立護岸に対して、法先水深波高比が $h_t/H_0' < 3.0$ かつ海底勾配が $1/100$ よりも急な範囲であり、わが国の多くの海岸護岸の設置条件を網羅していることを報告している。

3. 算定結果と実験結果との比較・検討

(1) 用いる越波流量算定モデルおよびデータ

Van der Meer and Bruce⁹⁾ (以後 VDM&TB モデルと略す) は、鉛直壁の越波に対して、1) 前面での碎波の有無によって越波量算定方法を区別すること、2) 衝撃的な現象が

(a) 越波量算定量と実測値の1対1比較

(b) 越波算定量の精度

図-1 直立護岸に対する越波算定量と実測値の比較

発生しない場合の2つの算定式による越波流量算定値が顕著に異なること、3) 混成堤鉛直壁に対する越波量算定をマウンドの影響を考慮できるように再構築すること、を念頭に置いて越波流量算定のフローと算定式を示している。本研究では、IFORM, Godaモデルおよび VDM&TB モデルを用い、越波流量算定モデルの精度を調べる。

CLASHデータの直立護岸の越波流量データには、壁面が不透過・滑面のデータが 11 シリーズ、計 644 セットがあるが、そこから波返し工が付いた複雑な条件の実験データと信頼度ファクター RF が 4 の信頼度の低いデータを除き、また、法先水深波高比が $h_t/H_0 < 3.0$ で、海底勾配が 1/100 よりも急な範囲のものだけを用いる。

精度を表す指標としては、以下に示す幾何学平均 x_{GM} と幾何学標準偏差 $\sigma(x_{GM})$ を用いる。

$$\begin{aligned} x_{GM} &= \exp \left\{ \ln \left([x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_N]^{1/N} \right) \right\} \\ &= \exp \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

(a) 越波量算定量と実測値の1対1比較

(b) 越波算定量の精度

図-2 傾斜護岸に対する越波算定量と実測値の比較

$$\sigma(x_{GM}) = \exp \left\{ \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((\ln x_i)^2 - (\ln x_{GM})^2 \right) \right]^{0.5} \right\} \quad (9)$$

$$x_i = q_{i,pred.}^* / q_{i,meas.}^* \quad (10)$$

ここで、 q^* は無次元越波流量(式(1)の左辺)である。

(2) 越波流量算定モデルの推定精度

図-1に、直立護岸における越波流量の実験値に対するIFORM, Godaモデルおよび VDM&TB モデルによる算定値の1対1比較図および算定値と実験値の比を示した。横軸は無次元越波流量の算定値 $q_{pred.}^*$ である。図-1によると、IFORM は $q_{pred.}^* < 10^{-4}$ で算定結果は実験結果を過小評価する。Godaモデルはこの領域で過大評価の傾向にある。 $q_{pred.}^* > 10^{-6}$ のデータに対して幾何学平均および標準偏差を、図中にそれぞれ GM と GSD として示してある。GMによればVDM&TB, Goda, IFORMの順に、GSDではGoda, IFORM, VDM&TBの順に精度が良い。

傾斜護岸における越波流量を同様に比較した結果を、図-2 に示す。越波流量が小さくなるにつれて、IFORM とVDM&TB の算定モデルは実験結果を過小評価する傾向にある。GM によればGoda, IFORM, VDM&TB の順に、GSD ではGoda, IFORM, VDM&TB の順に精度が良い。

Goda モデルも VDM&TB モデルも CLASH データを用いて構築されている。一方、IFORM はCLASH データを用いずに開発されているが、CLASH データに対する精度 (GM と GSD の良い順序) をみると他の2つのモデルと同程度である。IFORM を用いて越波流量を算定する際には、まず改良仮想勾配法による打上げ高を算定しなければならない。この計算をしなくてよいように、付録に、一様勾配 $i = 1/10, 1/20, 1/30, 1/50$ の海底上に設置された無次元堤脚水深が $h_t/H_0 = -2.0 \sim 3.0$ 、法面勾配が $\cot\alpha = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ の護岸に対して、式(5)を図化した結果を載せる。

4. おわりに

本研究では、これまで開発してきた打上げ・越波統合算定モデル IFORM を、CLASH データの海底勾配が1/100 より急で、法先水深波高比が 3.0 以下の条件のデータに対して適用し、CLASH データセットを用いて構築された他の2種類の越波流量算定モデルとの比較を通して、IFORM の適用性を検討した。なお、IFORM はCLASH データセットを用いずに構築されている。精度 (幾何学平均および標準偏差) を調べると、Goda モデル、VDM&TB モデル、IFORM と同程度であった。IFORM は、現地に設置されている複断面堤防・護岸に容易に適用できるので、詳細な数値計算を用いずに打上げ高や越波流量を簡易に算定できるモデルとして有用である。

謝辞：データ整理および図面作成にあたり京都大学大学院工学研究科博士課程の梁 靖雅氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) EurOtop: European manual for the assessment of wave overtopping, T. Pullen, N. W. H. Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schuttrumpf and J. W. Van der Meer eds., HR Wallingford, Wallingford, U.K., 2007.
- 2) 土木学会海岸工学委員会編：海岸施設設計便覧, pp. 98-104, 2000.
- 3) 海岸保全施設技術委員会編：海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp. 2-57 - 2-70, 3-28 p., 2004.
- 4) 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏：複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 936-940, 2009.
- 5) Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. and Reis, M.: Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 139, No. 5, pp. 346-357, 2013.
- 6) 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏：CLASH データセットに基づく打上げ・越波統合算定モデルの直立護岸への拡張, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I 847-I 852, 2015.
- 7) 野口賢二, 諏訪義雄：海岸保全施設の気候変動適応策の始動に向けて, 土木技術資料, Vol. 56, No. 12, pp. 30-33, 2014.
- 8) Goda, Y.: Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected CLASH datasets, *Coastal Eng.*, Vol. 56, No. 4, pp.385-399, 2009.
- 9) Van der Meer J. and Bruce, T.: New physical insights and design formulas on wave overtopping at sloping and vertical structures, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, Vol. 140, pp. 04014025-1 - 04014025-18, 2014.
- 10) Hedges, T. S. and Reis, M. T.: Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression model, *Proc. Inst. of Civil Engrs., Wat. Marit. & Energy Jour.*, Vol. 130, pp. 1-10, 1998.
- 11) 玉田崇, 井上雅夫, 手塚崇雄：緩傾斜護岸の越波流量算定図とその越波低減効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 641-645, 2002.
- 12) 富永正照：海岸堤防の水理に関する実験的研究, 土木研究所資料, 第 766 号, pp. 6-15, 1972.
- 13) CLASH project: <http://www.clash.ugent.be/>, presented by De Rouck, J., H. Verhaeghe and J. Geeraets, Crest level assessment of coastal structures – General overview, *J. Coastal Eng.*, Vol. 56, Issue 2, pp. 99-107, 2009.

(2016. 8. 18 受付)

INTEGRATED FORMULA OF WAVE OVERTOPPING AND RUNUP MODELING FOR SEAWALLS

Hajime MASE, Takashi TAMADA, Tomohiro YASUDA and Koji KAWASAKI

Crest heights of storm surge barriers and seawalls in Japan are determined based on either wave runup or overtopping discharge. Authors have proposed integrated formula of wave runup and overtopping for seawalls constructed on land or in very shallow water. This study verified the applicability of Integrated Formula of Wave Overtopping and Runup Modeling for Seawalls (IFORM) for CLASH datasets as well as using other two prediction models of Goda (2009) and Van der Meer and Bruce (2014). The comparison of predictions with measurements of CLASH data showed that IFORM is enough to employ as the overtopping prediction. IFORM almost covers installation condition of Japanese seawalls and is capable to estimate runup and wave overtopping discharge of compound cross-sectional vertical and slope seawalls. For convenience and ease of use, this study summarised calculation diagrams for wave runup on seawalls with various kinds of slope gradient and toe depth installed on a uniform slope seabed.

付録：一様勾配海浜に設置された海岸堤防への打上げ高算定図

付図-1 一様海底勾配 1/10 の打上げ高算定図

付図-2 一様海底勾配 1/20 の打上げ高算定図

付図-3 一様海底勾配 1/30 の打上げ高算定図

付図-4 一様海底勾配 1/50 の打上げ高算定図