防波堤を越流する津波の数値解析

三井 順¹・松本 朗²・半沢 稔³

¹正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

E-mail:jun.mitsui@fudotetra.co.jp

²正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

E-mail:akira.matsumoto@fudotetra.co.jp

³正会員 株式会社不動テトラ ブロック環境事業本部 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)

E-mail:minoru.hanzawa@fudotetra.co.jp

津波越流による防波堤港内側の洗掘対策および港内側被覆材の安定性の検討等のための基本的な知見を得ることを目的として、パラペットの形状や津波の水位、消波工の有無を系統的に変化させた条件で防波堤を越流する津波の数値解析を行い、その水理特性を検討した。その結果、パラペット堤は矩形堤と比較して最大1.7倍程度まで流量係数が大きくなること、ケーソン前面に消波工がある場合は流量係数の増加は抑えられることを明らかにした。また数値解析結果に基づき、越流水脈の軌跡等の推定に必要な無次元量の算定図を作成し、パラペットを有する防波堤の津波越流時の流量係数や越流水脈の軌跡を簡易的に推定する方法を提案した。さらに2次元自由噴流の理論を基に、港内側マウンドへの打ち込み流速を推定する方法についても示した。

Key Words : tsunami, overflow, breakwater, parapet, VOF, OpenFOAM

1. はじめに

防波堤の津波対策の一つとして、上部工にパラペットを設置することが挙げられる¹⁾²⁾。これは津波が防波堤を越流する際の港内側水面への打ち込み角度を小さくし、越流水脈を遠くへ飛ばすことで洗掘の影響を低減することをねらったものである。パラペットの効果を予測するためには、越流水脈の軌跡を簡易的に予測する方法の確立が望まれる。矩形堤に関しては、三井ら³⁾は本間⁴⁾の越流公式を用いて流量を算定し、放物線の軌跡を仮定することで水脈の軌跡を簡易的に推定している。パラペット堤に関しては、宮田ら⁵⁾は幅広い条件での実験結果に基づいて水脈の軌跡を予測する方法を提案している。しかし、パラペットの寸法に関しては適用条件が限定されているため、汎用的な手法は確立されていない。また、越流水の打ち込み位置は被覆材の安定性に大きく影響することが指摘されている³⁾ことから、越流水脈の軌跡を簡易的に予測する手法の確立が望まれる。さらに、イスバッシュ式により被覆材の安定性を予測する場合、被覆材近傍流速を求めるためには数値解析によらざるを得ないため、被覆材近傍の流速を簡易的に推定することができれば港内側被覆材の安定性検討を効率良く行えると考えられる。

一方、防波堤の機能として、背後地への津波の流入を低減することが挙げられるが、パラペット堤の場合は矩形ケーソン堤と比べて越流時の流量係数が大きくなることが想定される。矩形堤の場合の越流量は本間⁴⁾の完全越流時の流量公式により予測できるが、パラペット堤の場合の流量係数は不明である。

そこで本研究では、津波越流による防波堤港内側の洗掘対策および港内側被覆材の安定性の検討等のための基本的な知見を得ることを目的として、パラペットの形状や津波の水位、消波工の有無を系統的に変化させた条件で数値解析を行った。パラペットを有する防波堤の津波越流時の流量係数や越流水脈の軌跡を簡易的に推定する手法を提案するとともに、港内側マウンドへの打ち込み流速を推定する手法についても述べる。

2. 数値解析方法

越流水脈の数値解析にはOpenFOAM⁶⁾に含まれる気液二相流モデルのVOF法のソルバーを用いた。解析方法の模式図を図-1に示す。所定の流量を港外側の海底面から与え、防波堤を越流しケーソン後端から放出された水脈は港内側の自由流出境界から流出する条件とした。越流が定常となった状態で、越流水深やケーソン周囲の水位

および流速を解析した。越流水脈が流出する自由流出境界では大気圧を与えることで、越流水脈とケーソンとの間の空間を大気圧に保った。また、越流水脈の解析においてはマウンドからの浸透流の影響は無視できることを事前の解析で確認したため、マウンドは不透過の条件とした。ケーソンの形状は矩形堤とパラペット堤とし、パラペットの高さおよび幅を系統的に変化させた。また、各ケースでケーソン前面に消波工がある場合と無い場合について検討した。港外側から流入する流量を変化させることにより、越流水深を様々に変化させた。

今回検討した防波堤断面図と解析条件をそれぞれ図-2および表-1に示す。ケーソンは高さ12.0 m、幅15.0 mであり、マウンド厚さは3.0 mとした。パラペットの高さおよび幅は0.75 m、1.5 m、3.0 m、6.0 mの4種類とした。消波工断面は、テトラポッド50t型の天端2個並びの標準的な断面を想定し、消波工天端幅 B_b を6.3 m、斜面勾配を1:4/3とした。数値解析では以下に示すD-F 則により消波工から受ける抵抗力 R をモデル化した。

$$R = -(\alpha U + \beta |U|U) \quad (1)$$

図-1 解析方法の模式図

図-2 防波堤断面図 (消波工ありの断面)

表-1 解析条件

項目	値
ケーソン高さ H_c (m)	12.0
ケーソン幅 B_c (m)	15.0
パラペット高さ H_p (m)	0.75, 1.5, 3.0, 6.0
パラペット幅 B_p (m)	0.75, 1.5, 3.0, 6.0
マウンド高さ H_m (m)	3.0
マウンド幅 B_m (m)	10.0
消波工の有無	あり・無し
越流水深 h_1 (m)	1.5~10.0 程度 (8段階)

ここに、 U は流速ベクトル、 α, β は抵抗係数である。 α と β は Engelund⁷⁾ による式を用いると次のように表される。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{d^2}, \quad \beta = \beta_0 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{d} \quad (2)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 d は多孔質体を構成する材料の代表径、 n は空隙率、 α_0 および β_0 は材料係数である。テトラポッドの材料係数は、近藤・竹田⁸⁾ を参考にして $\alpha_0 = 2100$ 、 $\beta_0 = 2.2$ とした。また空隙率 n は 0.5、代表径 d はブロック体積の3乗根より 2.71 m とした。

ケーソン付近の計算格子の例を図-3に示す。計算は断面二次元であり、格子間隔は最も小さい箇所では 0.125 m とした。

越流水深 h_1 は港外側の水位が空間的に一定となる位置として、ケーソン前面から沖側 100 m の位置で測定した水位を用いて算出した。また、ケーソン後端位置での水位 h_2 および流速 u_{2x}, u_{2z} を出力した。流速の測定高さはケーソン天端から $h_2/2$ の高さとした。

3. 解析方法の妥当性の確認

本数値解析方法の妥当性を確認するために、別途行ったパラペット堤の水利模型実験において測定した越流水脈の軌跡およびケーソン天端上の流速について比較を行った。ケーソンの寸法は、高さ 28.0 cm、幅 31.8 cm、パラペット高さ 4.0 cm、幅 4.0 cm であり、越流水深は 9.0 cm である。越流水脈の軌跡を比較したものを図-4に示す。実験結果の軌跡は画像から読み取ったものである。また図中には、後述する簡易推定法により算定した水脈の軌跡も併せて示している。実験結果、VOFによる数値解析結果、簡易推定法による結果は概ね一致していることがわかる。次に、ケーソン天端上の流速について比較した結果を図-5に示す。VOF法による水平流速は実測値より全体的にやや小さめの値となっているが、概ね実験結果と一致していることがわかる。

4. 流量係数

越流流量 q と越流水深 h_1 の関係は、本間⁴⁾ の越流公式を用いて次のように表される。

図-3 計算格子

図-4 越流水脈の軌跡の比較

図-5 天端上流速の実験値と解析値の比較

 図-6 流量係数 m の算定図 (a)消波工無し, (b)消波工あり

$$q = mh_1 \sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

ここに、 m は流量係数、 g は重力加速度である。入力条件である流入流量（すなわち越流流量）と解析結果から求まる越流水深から、流量係数 m を求めた。消波工無しの場合の流量係数の解析結果を図-6(a)に示す。越流水深 h_1 、パラペット高さ H_p および幅 B_p はケーソン幅 B_c で無次元化して表示している。矩形堤の場合は越流水深の増加とともにやや大きくなる傾向があるものの、概ね $m = 0.35$ となり本間の完全越流時の越流公式が適用できることが確認された。一方パラペット堤の場合は矩形堤と比較して流量係数が大きくなっており、パラペットが高く、幅が狭いほど流量係数が大きくなる傾向が見られた。これは、パラペットがある場合は限界水深付近の流線の曲率が大きくなることで、水脈内に上向きの遠心力が働き、水脈内の圧力が静水圧より小さくなる結果、ベルヌーイの定理により流速が大きくなるためと考えられる。今回の条件で流量係数が最大となったのは $H_p/B_c = 0.4$ 、 $B_p/B_c = 0.05$ 、 $h_1/B_c = 0.21$ の条件であり、 $m = 0.59$ であった。矩形堤の場合は同じ越流水深の条件で $m = 0.34$ であったため、パラペットあり無しで最大1.7倍程度の流量の違

 図-7 消波工の諸元を変えた場合の流量係数 m の比較

いがあることになる。

次に、ケーソン前面に消波工がある場合の流量係数を図-6(b)に示す。消波工を設置することで全体的に流量係数が小さくなっており、特にパラペットによる流量係数の増加が抑えられることがわかる。これは消波工がある場合、パラペットの幅が広がるのと同様の効果により、パラペット天端付近の流線の曲率が小さくなるためと考えられる。消波工の天端幅やブロック質量が流量係数に及ぼす影響を確認するために、テトラポッド5 t 型を想定した解析（代表径 $d = 1.26$ m、天端幅 $B_b = 2.90$ m）を実施した。パラペットの寸法は $H_p/B_c = 0.4$ 、 $B_p/B_c = 0.1$ の条件とした。流量係数を比較した結果、図-7に示すように

消波工の諸元による違いは小さいことがわかる。また、ケーソン後端での水位および流速に関しても消波工の諸元による違いは小さかった。したがって実用的には、消波工の諸元によらず今回示した算定図を用いることで流量や越流水脈の軌跡を算定できると考えられる。

5. 越流水脈の軌跡の推定方法

ケーソンを越流した津波はケーソン後端からは概ね放物線の軌跡で自由落下すると考えられる。したがってケーソン後端での水位と流速が決まれば、越流水脈の軌跡が求められる。ケーソン後端での水位と流速はパラペットの形状等によるため、網羅的な条件での数値解析によ

りこれらを求め、算定図として整理することで、越流水脈の軌跡を正確に予測できると考えた。まず、数値解析結果から無次元のパラメータとして h_2/h_1 と u_2/u_{2x} を算定図として整理した。

図-8は h_2/h_1 を算定図としてまとめたものである。矩形堤の場合、 h_1/B_c が大きくなるにつれて h_2/h_1 は緩やかに増加する傾向が見られる。パラペットの効果としては、越流水深 h_1 が比較的小さく、パラペット高さ H_p が大きい条件で h_2/h_1 が小さくなっていることがわかる。これはパラペットの段落ち部で越流水脈の流速が大きくなり、ケーソン後端部での水脈厚が小さくなったことによる。消波工による影響はそれほど顕著ではないが、消波工あり場合、やや h_2/h_1 が小さくなる傾向が見られる。

図-8 h_2/h_1 の算定図 (a)消波工無し, (b)消波工あり

図-9 u_2/u_{2x} の算定図 (a)消波工無し, (b)消波工あり

図-9は u_{2z}/u_{2x} を算定図としてまとめたものである。矩形堤の場合は越流水深による変化はそれほど大きくなく、 u_{2z}/u_{2x} は-0.2から-0.3程度の範囲である。すなわち、ケーソン後端からの越流水脈の放出角度は下向きに11~17°程度である。パラペット堤の場合、越流水深が小さい場合は矩形堤と比較して放出角度が水平に近くなっている。一方、パラペット高さが高い条件では越流水深が大きくなるにつれて u_{2z}/u_{2x} が急激に減少し、最小で-0.8程度（下向きに40°程度）となっている。これは、パラペットを超えた下向きの越流水脈がケーソン天端で水平に向きを変えることなくそのまま放出されるためである。

次に、越流水脈の軌跡の簡易計算方法を以下に示す。寸法の定義を図-10に示す。ケーソン寸法および津波水位はわかっているものとする。まず、 h_1/B_c 、 H_p/B_c 、 B_p/B_c を算出し、図-6、図-8、図-9から m 、 h_2/h_1 、 u_{2z}/u_{2x} を読み取る。ケーソン後端部での水脈厚 h_2 は読み取った h_2/h_1 から直ちに求め、流速 u_{2x} および u_{2z} も以下の式から算出できる。

$$u_{2x} = q/h_2 \quad (4)$$

越流水脈の軌跡は、港内側水面までは、ケーソン後端で上記の初速を持った水粒子が放物線の軌跡で自由落下すると仮定すると、 x 方向、 z 方向の水粒子の位置は以下のように表すことができる。

$$x = u_{2x}t, \quad z = -\frac{1}{2}gt^2 + u_{2z}t + d_1 + \frac{h_2}{2} \quad (5)$$

ここに、 d_1 は港内側水面からケーソン天端までの高さである。式(5)から t を消去すると、 x と z の関係式すなわち水脈の軌跡が次のように求められる。

$$z = -\frac{g}{2u_{2x}^2}x^2 + \frac{u_{2z}}{u_{2x}}x + d_1 + \frac{h_2}{2} \quad (6)$$

次に、港内側水面（ $z=0$ ）における流速 u_{3x} 、 u_{3z} および着水位置 x_3 を求めると、それぞれ以下のように求まる。

$$u_{3x} = u_{2x}, \quad u_{3z} = -\sqrt{u_{2z}^2 + 2g(d_1 + h_2/2)} \quad (7)$$

$$x_3 = u_{2x} \frac{u_{2z} + \sqrt{u_{2z}^2 + 2g(d_1 + h_2/2)}}{g} \quad (8)$$

また着水位置における水脈厚を h_3 とすると、 h_3 は、

$$h_3 = q / \sqrt{u_{3x}^2 + u_{3z}^2} \quad (9)$$

となる。港内側水面下の軌跡は直線と仮定すると、

$$z = (x - x_3)u_{3z}/u_{3x} \quad (10)$$

となる。

以上の方法により矩形堤とパラペット堤の水脈の軌跡を試算した例を図-11に示す。どちらも消波工無しの断面であり、パラペット堤はパラペットの天端を矩形堤の

図-10 寸法の定義

図-11 越流水脈の軌跡の試算例 (a)矩形堤, (b)パラペット堤

天端高に合わせた断面とした。矩形堤の場合は越流水深が大きくなるにつれて打ち込み位置が遠ざかっているが、パラペット堤の場合は越流水深が小さい段階から遠くに打ち込んでいることがわかる。また越流水深が大きくなると東山⁹⁾らが指摘しているように、打ち込み角度が矩形堤の場合に近づき、パラペットの効果が弱まっていることがわかる。

6. 港内側マウンドへの打ち込み流速の推定方法

越流水脈の港内側水面における流速 u_3 から、港内側マウンドへの打ち込み流速の推定を試みる。Rajaratnam¹⁰⁾はノズルから吹き出す2次元自由噴流の中心軸上の流速に関して、理論解や既往の実験結果を基に、以下の式を示している。

$$u_m/U_0 = C_1/\sqrt{\bar{x}/b_0}, \quad C_1 = 3.5 \quad (11)$$

ここに、 U_0 は噴出口における流速、 u_m は中心軸上の流速、 b_0 は噴出口幅の1/2、 $\bar{x}$ は噴出口からの距離、 C_1 は実験定数である。これを越流水脈にあてはめて考えると、図-10に示すように U_0 は港内側水面位置での流速の絶対値（ $=\sqrt{u_{3x}^2 + u_{3z}^2}$ ）、 $2b_0$ は水面における水脈厚（ $=h_3$ ）、 $\bar{x}$ は着水位置からマウンド打ち込み位置までの距離と

なり、マウンドへの打ち込み流速 u_m は、式(11)の関係により求めることができる。

三井ら¹¹⁾が実施した港内側の流動場の数値解析結果を用いて、この方法の妥当性を確認した。数値解析ではマウンド面に沿って流速を求めており、流速の絶対値の最大値をマウンド打ち込み流速 u_m とした。流速の測定位置は現地量で被覆材の天端上75 cmである。港内側マウンド天端幅や腹付工の有無、港内側水位を変えて幅広い条件で解析をしている。 $\bar{x}/b_0$ と u_m/U_0 の関係を図-12に示す。式(11)により推定した流速は数値解析結果と比較するとやや過大となる傾向があり、今回の結果からは実験定数を $C_1 = 3.0$ とすると概ね良好な推定結果を与えることがわかる。

7. まとめ

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 各種パラペット堤の津波越流時の流量係数を数値解析により明らかにし、算定図を作成した。
- (2) パラペット堤は矩形堤と比較して流量係数が大きくなる。今回の条件ではパラペットあり無しによる比は最大1.7倍であった。ケーソン前面に消波工がある場合は流量係数の増加は抑えられる。
- (3) 数値解析結果に基づき、ケーソン後端部における水位と流速に関する無次元量の算定図を作成した。これらの算定図を用いて、パラペットを有する防波堤の津波越流時の越流水脈の軌跡や港内側水面への打ち込み流速等を簡易的に推定する方法を提案した。
- (4) 2次元自由噴流の理論を基に、港内側マウンドへの打ち込み流速を推定する方法を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 平成 25 年 9 月, 2013.

図-12 マウンド打ち込み流速の推定式と数値解析結果の比較

- 2) 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.
- 3) 三井順, 松本朗, 半沢稔, 灘岡和夫: 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.
- 4) 本間仁: 低溢流堰堤の流量係数 (第二編), 土木学会誌, 第 26 卷, 第 9 号, pp.849-862, 1940.
- 5) 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.
- 6) OpenFOAM, <http://www.openfoam.com/>
- 7) Englund, F.: On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand, *Trans. Danish Academy of Technical Sciences*, Vol.3, No.4, 1953.
- 8) 近藤一郎, 竹田英章: 消波構造物, 森北出版, 275p., 1983.
- 9) 東山和博, 長谷川巖, 稲垣茂樹: 防波堤港内側マウンドの津波による越流洗掘に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No.2, pp.I_377-I_382, 2013.
- 10) Rajaratnam, N.: *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam, 304p., 1976.
- 11) 三井順, 松本朗, 半沢稔, 灘岡和夫: 数値解析に基づくケーソン背後の津波越流の再現と被覆材の安定性の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_921-I_925, 2014.

(2015.3.18 受付)

NUNERICAL ANALYSIS ON TSUNAMI OVERTOPPING BREAKWATER

Jun MITSUI, Akira MATSUMOTO and Minoru HANZAWA

Hydraulic characteristics of tsunami overtopping breakwater was analyzed using a numerical model to obtain fundamental knowledge for investigating the measures against scouring of the rubble foundation and subsoil at the harbor-side of breakwater due to overflow. Shape of the parapet, tsunami height, and the presence or absence of wave-dissipating blocks in front of the caisson were systematically varied. The results show that the discharge coefficients of caissons with parapet are up to about 1.7 times in comparison with a case of rectangular caisson. Wave-dissipating works suppresses increase in discharge coefficient of the caissons with parapet. An estimation method for the discharge coefficient and the trajectory of the overflow nappe is proposed. Dimensionless parameters used for the estimation are obtained from numerical analysis, and they are summarized in calculation diagrams. An estimation method for the velocity impinging to the harbor-side mound based on the theory of the plane turbulent free jet is also presented.