防潮堤の津波越流時のエネルギー減衰効果 に関する水路実験と数値解析

多田 毅¹・荒井昭浩²・宮田喜壽³

¹正会員 防衛大学校准教授 建設環境工学科 (〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地)
E-mail:tada@nda.ac.jp

²正会員 防衛省技官 (〒160-0004 東京都新宿区三矢六丁目13-5)
E-mail:hanako@jsce.co.jp

³正会員 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地)
E-mail:miyamiya@nda.ac.jp

防潮堤の形状が津波越流時および越流直後において津波エネルギーを消散させる効果に及ぼす影響を水路実験で調べた。実験の結果について、せきを越流する流れに関する既往の研究をもとに考察した。海側を斜面、陸側を垂直とする構造形式がエネルギー消散効果が最も高いことを明らかにした。解析を通して一連の現象を理解を深めることと、将来的に設計支援で必要になる数値シミュレーション技術を確認することを目的に、数値シミュレーションによる実験結果の再現を試みた。数値解析は概ね実験結果を再現できたが、最もエネルギー減衰効果の高い斜面-垂直型についてはナップ流れの考慮に課題が残った。

Key Words : tsunami, overflow on dike, energy dissipation, flume test, numerical analysis

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震によって発生した津波は、東北地方から関東地方の太平洋沿岸の広い範囲に対して壊滅的な被害を及ぼした。その中で、仙台東部道路の盛土は防潮堤の役割を果たし、津波被害を低減した¹⁾。このような被災事例や被害を最小限にした事例を受けて、土構造物を防潮堤として活用する多重防御の考えが提示されている²⁾。多重防御として減災機能を発揮するためには、それらの構造物が想定を超える津波作用に対して完全に機能を失うことのない「粘り強い構造」であることが要請される^{3), 4)}。そのために、設計津波作用条件に対して構造物が所定の安定性を確保するような構造と断面形状の検討だけでなく、越流に伴う被覆工の剥離や洗掘による破壊を防ぐための研究が数多く実施されている(たとえば加藤ら⁵⁾、常田ら⁶⁾など)。一方、それらの構造物の減災効果を定量的に評価し設計に反映させることまでは、現時点では要請されていない。

東北地方太平洋沖地震における津波調査によれば、津波エネルギーは平野部において遡上に伴い指数関数的に減少する⁷⁾。このことは、平野部を遡上する津波の浸水範囲は凹凸のあるものの周囲あるいはその上部を流れる

際のエネルギー減衰と強く関連していることを示唆している。この事実に基づけば、津波作用高さが防潮堤より高い場合においても、防潮堤は津波エネルギーを反射するだけでなく、減衰させて浸水面積を小さくする効果を有すると考えることができる。防潮堤が越流時および越流直後に津波エネルギーを減少させる効果を実験的に明らかにし、解析技術を確認すれば、より効果的な多重防御の設計が可能になると考えられる。越流を伴う堤防の減災機能を評価する試みとして、田島ら⁸⁾は2011年津波による宮城県および福島県の事例を対象として数値計算により堤防の高さと減災機能との関係性を評価しているが、堤防の断面形状による損失は考慮していない。

そこで著者らはまず模型の形状を大きく4種類設定した水路実験を実施し、どのような形状が津波越流時および越流直後において津波エネルギーを消散させるのに適当であるかを調べた。そして、実験の結果について、せきを越流する流れに関する既往の研究をもとに考察した。さらに、一連の現象を解析を通して理解を深めることと、将来的に設計支援で必要になる数値シミュレーション技術を確認することを目的に、数値シミュレーションによる実験結果の再現を試みた。本文では、以上の結果を報告するものである。

2. 津波エネルギー消散効果の高い構造物の形状

(1) 実験の概要

防潮堤などの構造物を津波が越流する際に津波エネルギーを効率的に消散できる形状を調べるために、水路実験を実施した。実験に用いた開水路実験装置を図-1に示す。この水路は長さ16m、幅0.6m、高さ0.5mを有し、任意の流量の流れおよび段波を発生させることができる。本実験では水平に設定された水路の下流端から約5mに防潮堤を模した模型を設置した。今回の実験で用いた4種類の模型の概要を図-2に示す。模型のスケールは1/50を想定した。研究の第1段階として、土構造物を剛体近似可能かつ滑動などの運動を無視できる条件から実験するという基本方針のもと、1週間養生の目標強度が3000kPaになるように配合設計されたセメント改良土を用いて模型を構築し、模型は水路底面にボルトで固定させた。

え 流れは還流ポンプをフィードバック制御することで流量が一定となるよう制御した定常条件とし、単位幅流量 $q=0.056\text{m}^2/\text{s}$ と $q=0.083\text{m}^2/\text{s}$ の2種類の流量条件で実験を行った。フルード相似則に基づき実際のスケールに換算すると、 $q=0.056\text{m}^2/\text{s}$ のケースの場合で、高さ6.0mの構造物に水深8m、流速0.63m/sの津波が定常的に作用した状態を再現する実験となる。

写真-1 実験時の写真の例
(斜面-垂直型, $0.083\text{m}^2/\text{s}$, 左右反転)

実験中には構造物を越流する前後での全水頭 H_0 および H_1 を算定するために、流量と越流前後での水深を計測した。計測および解析に用いた変数の定義を図-3に示す。越流前の上流側水深 h_0 は、構造物の高さの2倍程度上流側において容量式波高計で計測した。越流後の下流側水深 h_1 は、越流直後に水面形が水平になった直後の位置で計測した。しかし、流速が非常に速く水表面が激しく変動しており、2種類の容量式波高計（KENEK製CHT-6型およびCHT4-HR型）の計測値が一致せず、またいずれも目視とも一致しなかった。物理的な接触を伴う計測は困難と思われることから、水路側面から撮影した写真画像解析することで、平均水深と変動幅を算定した。実

験時の写真の例を写真-1に示す。流速 w および v_1 は、還流ポンプ部において電磁流量計で計測された単位幅流量 q を水深 h_0 および h_1 で除すことで算定した。

以上の計測値より、模型前後地点での津波エネルギー（全水頭）を次式で算定した.

図-4 上流側水深の実験値と既往の推定式による推定値

$$H_i = \frac{v_i^2}{2g} + h_i = \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{h_i} \right)^2 + h_i \quad (1)$$

ここで、 v_i は流速、 g は重力加速度、 h_i は水深である。そして、模型背後地点での全水頭 H_i の接近全水頭 H_0 に対する比を構造物背後でのエネルギー透過率 K として算定した。

表-1 台形せきの完全越流係数

下流面勾配	上流面勾配	越流係数 μ
3/5 以下	鉛直～3/4	$0.31 + 0.26(h/W)$
1/1 付近	鉛直～3/2	$0.29 + 0.32(h/W)$
3/2 付近	鉛直～3/1	$0.28 + 0.37(h/W)$
長方形断面		0.35

(2) 実験結果と考察

a) 上流側水深

模型より上流側では、一定流量 q が供給されることにより、模型後端までの平均水面勾配が乗り越え時に堤防から受ける抵抗力とバランスするところまで上流側の水位が上昇する。そのときの水位と流量との関係式は越流公式と呼ばれ、古くから研究されている。図-2に示した4種類の構造物において計測された上流側水深 h_0 を本問⁹⁾の台形せきの越流公式による推定値と比較した結果を図

-4に示す。ここで、本問の公式は以下のとおり。

$$q = \mu h \sqrt{2gh} \quad (2)$$

ここで、 q は台形ぜき上の完全越流の単位幅流量、 h は越流水深、 μ はせきの形状により決まる流量係数である。完全越流の場合の流量係数は表-1で与えられる。垂直-斜面および斜面-斜面型では下流側勾配が3/5以下の場合の係数を、垂直-垂直型では長方形断面の係数を用いた。斜面-垂直型は表中に適合する分類が存在しないが、上下流面勾配がともに著しく不適合とならない下流側勾配が1/1の係数を適用した。図-4において、実験結果は推定値と良く一致している。本問の公式の精度は様々な研究者によって妥当性が検証されており、このことから今回の実験は概ね妥当に実施されたといえよう。

b) 下流側水深

下流側水深 h_1 の実験値を推定値と比較した結果を図-5に示す。垂直-斜面型および斜面-斜面型では、水が模型上部を乗り越えた後、下流側斜面上を滑らかに流下し、斜面下端において大きく乱れることなく水平方向に向きを変え、水路下流側へ流れてゆく。このような流れに対して、公式レベルの推定式が存在しない。そこで、下流側の斜面上を流下する流れが近似的に等流であると仮定し、ダルシー・ワイズバッハの式：式(3)で損失水頭 ΔH

図-5 下流側水深の実験値と既往の推定式による推定値

を推定し、得られた下流側全水頭 H から式(1)を繰り返し計算によって解くことにより h_1 を推定した。

$$\Delta H = f' \frac{\ell}{h_r} \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{h_r} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 f' は下流側下り斜面の摩擦損失係数を、 ℓ は斜面長を、 h_r は斜面上の代表水深を表す。摩擦損失係数は、模型を構成するセメント改良土の中央粒径が0.2mmであることから、比較的粗いモルタル表面に相当するマンシングの粗度係数 $n=0.015$ より換算して与えた。斜面上での実際の水深は、斜面上端ではほぼ限界水深 h_c に等しく、流下するにしたがい斜面下端部での水深 h_1 に近付くと考えられることから、代表水深を h_c とした場合と、 h_1 とした場合の推定結果を図-5に示している。垂直-斜面型と斜面-斜面型における下流側水深の実験値は、代表水深として h_1 を採った場合の推定値にはほぼ一致している。実験結果は既往の研究で明らかになっている基礎的な法則で概ね説明が可能である。

斜面-垂直および垂直-垂直型では、写真-1に見られるように流れが構造物背後から飛び出し、ナップと呼ばれる水流を形成する。ナップは重力によってその向きを徐々に下向きに変え、水路床に激突する。激突した水流の一部は下流側に向かう高速な流れとなり、一部は水路

上流側に逆流する。水路上流向きとなった流れは、模型に衝突し模型背後の水圧を上昇させ、ナップ裏側に形成される空隙内の水面を上昇させる。なお、この空隙内の空気はナップに巻き込まれ徐々に排出され、最終的に消滅する。一般に、このような流れでは現象を安定させるために背後の空間を大気圧に保つよう、実験ではナップの一部を破っておくか、構造物背後に大気と接続された穴を設置するなどの処置がされる。ナップに含まれる流体のエネルギーは、ナップ裏側の水塊に飛び込んだ際に乱れを生じることで減衰し、さらに水路床との衝突により減衰すると考えられる。このような現象に適用される経験式および理論式として、Rand¹⁰⁾は実験より、ナップが落下した直後でかつ跳水が発生する直前での水深 h_1 を次式で表した。

$$\frac{h_1}{W} = 0.54D^{0.425} \quad (4)$$

ここで、 D は落下指数と呼ばれ、次式で表される。

$$D = \frac{q^2}{gW^3} \quad (5)$$

一方White¹¹⁾は、運動量保存則より h_1 を次式で表した。

$$h_1 = \frac{2q}{v_d(1 + \cos \theta)} \quad (6)$$

図-6 エネルギー透過率の実験値と既往の推定式による推定値

ここで、 v_d はナップがナップ背後の水面に突入する直前の流速、 θ はその突入角度である。 v_d と θ はChanson¹²⁾が複数の実験結果を整理して求めた以下の式で計算した。

$$\frac{v_d}{v_c} = 1.455 \left(\frac{h_c}{h} \right)^{-0.483} \quad (7)$$

$$\tan \theta = 0.838 \left(\frac{h_c}{h} \right)^{-0.586} \quad (8)$$

本研究では両式を用いて下流側水深 h_1 を推定した。垂直-垂直型では、実験値はWhiteの式と良い一致がみられるが、斜面-垂直型では実験値は両推定の結果を大きく上回っている。両式は様々な条件で妥当性が検証されている。このように実験結果と推定結果が大きく異なるということは、この流れの条件が両式の適用範囲を超えた条件にあり、既往の研究においても十分に検討がなされてない条件であることを示唆している。

c) エネルギー透過率

実験で測定した結果より式(1)を用いて接近全水頭 H_0 と模型背後地点での全水頭 H_1 を計算し、次式でエネルギー透過率 K を算定し、既存の推定式で計算される K と比較した結果を図-6に示す。

$$K = \frac{H_1}{H_0} \quad (9)$$

今回の実験において、越流前では速度水頭は全水頭の

1%以下、越流後は速度水頭が全水頭の90%程度となった。そこで全水頭の比のみを考察の対象にした。既存の式を用いた解析において、垂直-斜面型と斜面-斜面型では式(3)より、垂直-斜面型と垂直-垂直型では図-5で推定された h_1 と式(1)より H_1 を推定することで K を算定した。

エネルギー透過率 K は斜面-斜面型で最も大きく、斜面-垂直型で最も小さい。斜面-垂直型と垂直-垂直型の差は既往の推定式で説明することはできず、既往の推定式同士にも大きな差が存在する。このことから、構造物背後のナップが落下する際のエネルギー消散のメカニズムは、構造物の高さ W 、流量 q 、越流水深 h および限界水深 h_c だけでは説明できず、他の要因も影響していると考えられる。以上をまとめると、古典的な知見で説明することは難しいが、防潮堤の越流条件時の津波エネルギー減衰効果は斜面-垂直型が最も高いことが明らかになった。

3. 数値解析

(1) 解析法の概要

前章に示した構造物の形状が越流条件での津波エネルギー

図-7 計算領域

図-8 計算で得られた水面形の例（斜面-垂直および垂直-垂直の図中の微小な白い部分は気泡）

ギー減衰効果に及ぼす影響について、解析を通して理解を深めることと、将来的に設計支援で必要になる数値シミュレーション技術を確認することを目的に、数値計算による水路実験の再現を試みた。計算には、数値波動水路CADMAS-SURF 3D¹³⁾を利用した。CADMAS-SURFはSMAC法によるナビエ・ストークス方程式の計算に、Volume of fluid (VOF) 法による自由表面計算と、 $k-\epsilon$ モデルによる乱流計算を加え、波の水理実験を数値計算で代用できることを目標として開発されている。さらに、砕波時の飛沫や気泡の運動を表現するモデルも導入されており、砕波現象もある程度再現可能であることが確認されている。CADMAS-SURFは液相のみで運動方程式を解く1相モデルであるが、周囲を流体で囲まれた領域（気泡に相当する）の圧力を領域の体積変化から計算し、その内圧を流体表面の圧力の境界条件とすることにより、模擬的に気泡の振る舞いを再現している。

計算領域は流下方向5m×鉛直方向50cm×横断方向10cmの3次元とした。計算領域の概要を図-7に示す。この領域に $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1\text{cm}$ の構造格子を設定し、 Δt はクーラン数が0.2を超えないよう自動調整される。実験で観察された下流側水深 h が2~3cmであったのに比べて Δz が粗いように思われるかもしれないが、越流後の流れは格子に対しほぼ平行であるため、VOF法で格子サイズ以下の任意体積の流体塊を用いて表現される水面は現実の水面形状と良く一致することから、実質的に任意の水深が計算可能であるといえる。また、格子内で構造物が占める体積占有率を与えることで、格子間隔より細か

い斜面形状を再現している。側壁はスリップ条件、下流端は流出条件とした。初期条件は、堤防前は天端まで静水で満たし、堤防背後はドライベッドとした。流量ゼロから計算を開始し、徐々に流量を増やし、規定の流量に達した後は定常とした。

斜面-垂直型および垂直-垂直型の構造物背後ではナップが形成されるが、そのままでは背後の空洞内の空気が水流に連行されることで徐々に吸い込まれ、最終的にはナップが堤防に密着してしまう。数値計算においても同様の現象が発生することから、本計算では、ナップ背後の空隙部分にあたる側壁のある1メッシュに、圧力が大気圧となる境界条件を与えることで、ナップ背後の空隙を安定的に維持させた。

(2) 解析ケース

前節で述べた計算手法を用いて、水路実験で用いた4種の構造物に対し、単位幅流量 $q = 0.056\text{ m}^2/\text{s}$ の実験ケースの再現計算を基本ケースとして実施した。また、気体の圧力計算の効果を確認するために、基本ケースから気体の圧力計算を除いた4ケースを実施した。さらに、3次元計算の効果を確認するために、基本ケースの横断方向の格子数を1とし、実質的に2次元とした4ケースを実施した。

(3) 解析結果と考察

基本4ケースの計算で得られた水面形の例を図-8に示す。いずれのケースにおいても実験時の水面形を定性的

図-9 上流側水深の計算値と実験値

に再現することができた．特に，斜面-垂直型および垂直-垂直型におけるナップの形状，ナップ背後の水面上昇，ナップ落下部での気泡の巻き込みと連行などの流況が良好に再現できていることが確認された．

a) 上流側水深

上流側水深 h_0 の実験値と計算値との比較を図-9 に示す．上流側水深 h_0 はいずれのケースでも良好に再現されているが，実験に比べ最大で 1cm 程度の過大評価となった．このことは，上流側全水頭 H_0 を 1.2%～2.5% 程度過大評価することに相当するが，今回の実験におけるエネルギー減衰率は 20%～70% 程度であったことから，最終的に計算されるエネルギー透過率に与える影響は大きくない．

b) 下流側水深

下流側水深 h_1 の実験値と計算値との比較を図-10 に示す．斜面-斜面型と垂直-斜面型では，平均水深も変動幅も実験値と計算値との間に大きな乖離はない．斜面-垂直型では，計算値の変動幅は実験と同程度であるが，平均値は実験値を大きく下回っている．垂直-斜面型では実験値は計算値の変動幅の中に収まっているが，やはり計算値が実験値を下回っている．図-5 を見ると，計算値はむしろ既往の推定式による推定値に近い．既往の推定式による推定値同士にも大きな差が存在することから，ナップが形成されるような完全越流におけるエネルギー減衰のメカニズムには，構造物の高さ，流量，越流水深といった基本的なパラメータ以外の様々な要因が関連していることが予想される．

c) エネルギー透過率

上流側の境界条件として与えた単位幅流量 q と計算の結果得られた最大水深から算定したエネルギー透過率 K と，実験で得られた透過率との比較を図-11 に示す．実験でエネルギー透過率が大きかった垂直-斜面型と斜面-斜面型は，計算でも大きな透過率を示し，両者に良好な一致がみられた．また，実験で透過率の小さかった斜面-垂直型と垂直-垂直型は，計算でも同様に小さな透

図-10 下流側水深の計算値と実験値

図-11 エネルギー透過率の計算値と実験値

過率を示した．しかし，実験では垂直-垂直型よりも斜面-垂直型の方がエネルギー減衰が大きかったが，計算ではその傾向の再現には至らなかった．実験において両形式の上流側水深にほとんど差が無いことから，エネルギー透過率に差が生じる原因として，流れが堤防に接近する際に流れの内部に生じる渦の違いが落下後の乱れによるエネルギー消散に違いを生じさせていることが推

測される。この現象は非等方性が強く、非定常性も無視できないと思われることから、本計算で用いた $k-\epsilon$ モデルでは十分に現象を再現できなかったと推測される。この現象は乱流モデルに大きく依存すると考えられ、再現性を向上させるためには LES 等のより高度な乱流モデルの適用を検討する必要がある。

4. まとめ

本文の主要な成果は以下のとおりにとまとめられる。

- 1) 現状の防潮堤を模した斜面－斜面型、片側を垂直にした斜面－垂直型、垂直－斜面型、両側を垂直にした垂直－垂直型の4つの模型に対し、津波越流条件を模した流れを作用させた結果、斜面－垂直型を除く3つの形状については、模型の上流側・下流側の水位は既存のせきの流れに関する公式で推定される結果となり、垂直－垂直型がもっともエネルギー減衰効果が高くなることが明らかになった。
- 2) 斜面－垂直型の場合の堤防背後の水深は、せきの公式で推定される値の1/2から2/3の値になった。このときのエネルギー減衰率は、上記の垂直－垂直型よりさらに小さい値となり、斜面－垂直型は今回の比較した4つの形状のうち最もエネルギー減衰効果が高い結果となった。ただし、その効果は構造物背後のナップが落下する際のエネルギー消散のメカニズムを、構造物の高さ、流量、越流水深および限界水深で説明する古典的な式で説明できなかった。
- 3) 4 ケースの水路実験を数値波動水路CADMAS-SURF 3D で再現することを試みた。斜面－斜面型、垂直－斜面型については良い再現結果が得られたが、最もエネルギー減衰効果の高い斜面－垂直型については、実験結果とシミュレーション結果の差異が無視できないほど大きい結果となった。ナップ流れにおけるエネルギー減衰を数値解析でシミュレートするためには、LES等のより高度な乱流モデルの適用などを検討する必要がある。

謝辞：本研究は文部科学省科研費補助金基盤研究(B) 24360195（研究代表者 宮田喜壽）の助成を受けた。

参考文献

- 1) 国土交通省: 国土交通白書〈2011〉平成 22 年度年次報告 コラム多くの命を救った盛土構造の仙台東部道路, pp.25, 日経印刷, 2012.
- 2) 地盤工学会: 地震時における地盤災害の課題と対策—2011 年東日本大震災の教訓と提言 (第二次) —, 395p, 2012.
- 3) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 35p. 2013.
- 4) 国土交通省港湾局: 港湾における防潮堤 (胸壁) の耐津波設計ガイドライン, 18p. 2013.
- 5) 加藤史訓, 諏訪義雄, 鳩貝聡, 藤田光一: 津波の越流に対して粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.1, pp.31-49, 2014.
- 6) 常田賢, 竜田尚希, 谷本隆介, 鈴木啓祐: 津波防潮堤の評価および防潮盛土の耐侵食性の確保・向上, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1016-I_1020, 2013.
- 7) Mori, N., Takahashi, T. Yasuda, T. and Yanagisawa, H.: Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up, Geophysical Research Letters, Vol.38, L00G14, 2012.
- 8) 田島芳満, 舟竹祥太郎, 佐藤慎司: 越流を伴う巨大津波に対する海岸堤防の減災機能の検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.1, pp.23-33, 2013.
- 9) 本間仁: 低溢流堰堤の流量係数, 土木学会誌 26(6), pp.635-645, 1940.
- 10) Rand W. : Flow geometry at straight drop spillways, *Proc. ASCE*, 81, pp.1-13, 1955.
- 11) White P. M. : Discussion to "Energy loss at the base of free overfall" by Moore, *Trans. ASCE*, pp.1361-1392, 1943.
- 12) Chanson H. : Hydraulic of nappe flow regime above stepped chutes and spillway, *Australian Civil Engineering Transactions*, pp.69-76, 1994.
- 13) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No.12, p.368, 2001.

(2015. 6. 23 受付)

HYDRAULIC EXPERIMENTS AND NUMERICAL ANALYSES ON TSUNAMI ENERGY DISSIPATION DUE TO FLOW OVER DIFFERENT SHAPES OF DIKE

Tsuyoshi TADA, Akihiro ARAI and Yoshihisa MIYATA

This paper examines dissipation of tsunami due to overflow over different shapes of dike by hydraulic experiments. The experimental results were compared and validated against the classical theory of weir. Experimental results showed that a dike with slope on upstream side and vertical back side is the most effective to reduce the tsunami energy. A numerical model was used to simulate a series of experimental results. Most of test results were successfully simulated; however, for the condition that nappe flow appears, the numerical model should be improved for the accurate estimation of energy dissipation.