津波越流時の砂丘・盛土の侵食機構に関する研究

二階堂 竜司¹・青木 伸一²・加藤 茂³・岡辺 拓巳⁴

¹正会員 (株)建設技術研究所 東京本社河川部海岸海洋室 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

E-mail : nikaidou@ctie.co.jp

²正会員 大阪大学大学院教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail : aoki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail : s-kato@ace.tut.ac.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学助教 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail : okabe@ace.tut.ac.jp

本研究は、水理模型実験および航空レーザ測量による震災前後の現地地形から、津波越流時の砂丘・盛土の侵食実態を検討したものである。

水理模型実験では、堤体の天端幅が長ければ天端高さが低下する速度を抑制できることが確認できた。加えて、津波越流時のせん断応力と天端高さの侵食速度を対応させることにより、天端高さの侵食速度予測式を提案した。また、宮城県名取市における東日本大震災の津波による地形変化状況から、天端幅が長い堤体は津波越流後も堤体の一部が残存している場合が確認され、現地データからも堤体の天端幅が耐侵食に寄与した可能性が示唆された。

Key Words : tsunami, overflow, dune, fill, topographic change

1. はじめに

2011年の東日本大震災の津波により、東北地方を中心に甚大な津波浸水被害を被ったなかで、沿岸に砂丘・盛土が存在する背後地域では、津波による減災効果が確認された。例えば、比較的津波高が低かった青森県・茨城県・千葉県では、砂丘・盛土が津波の背後への侵入を阻止したと考えられる事例が確認できている¹⁾。また、前川ら²⁾は、宮城県名取市および千葉県旭市において、砂丘・盛土背後の家屋被害、浸水深等の現地調査を行い、砂丘背後の浸水深の低下、家屋被害の軽減状況を明らかにした。

砂丘・盛土は津波越流時に背後地への越流量低減が期待できるものの、越流の経過に伴い堤体の侵食および破堤の生じる恐れがあり、定量的な侵食量の予測に関して課題がある。各自治体で実施されている津波浸水被害シミュレーションの砂丘・盛土の取り扱いにおいても、津波が砂丘・盛土を越流しても残存する場合、越流時に全て破堤する場合、あらかじめ破堤した状況を想定する場合のいずれかが多く、時系列の砂丘・盛土の侵食状況が評価されていない場合がほとんどである。

砂丘・盛土の有する減災効果を津波減災地域づくりに役立てるためには、津波越流時の砂丘・盛土の侵食実態

を把握するとともに侵食量の評価方法の確立が必要である。

本研究は、水理模型実験より津波が砂丘・盛土を越流した際の堤体の侵食実態を把握するとともに、堤体背後への越流量に大きく起因する天端高さの低下速度の予測式を提案するものである。

2. 既往研究のレビューと本研究の位置付け

本研究の位置付けを整理するため、津波による地形変化に関する既往研究を整理する。

津波による地形変化は、例えば、高橋ら³⁾や藤井ら⁴⁾により、非定常流を対象に掃流力から流砂量を算定し地形変化を予測する手法が提案されているものの、主に水中部を対象としているため、水上部で起伏のある地形に適用するには課題が残る。水上部の地形を対象とした既往研究および本研究について、それらの研究概要を表-1に整理した。

本研究は、津波が越流した際に特に堤体背後への越流量に大きく起因するパラメータである天端高さについて、その低下速度を算定することに注目している。

表-1 既往研究と本研究の比較

項目	本研究	邵ら	藤井ら	長坂ら
研究方法	模型実験	模型実験	模型実験	現地調査 (岩手県釜石市 鵜住居)
対象の流れ	準定常流	準定常流	準定常流	非定常流 (東日本大震災 の津波)
堤体の土質	砂質土	砂質土	粘性土	粘性土
地形変化の対象	堤体の天端高さ	堤体全体	堤体全体	堤体の最大・平均の侵食深
地形変化算定方法	せん断応力・掃流 力から天端高さの 低下速度を算定	掃流力に圧力勾配 を考慮して流砂量 を算定	せん断応力から侵 食速度を算定	流速に過剰間 隙水圧を考慮 して侵食深を 算定
参考文献	—	5	6	7, 8

津波越流時の外力から天端高さの時系列の低下速度が算定できれば砂丘・盛土の侵食を考慮した時間発展的な浸水予測が可能となる。天端高さの侵食速度の算定方法は後述するが、一般的な土の侵食速度の算定に用いられているように、せん断応力や掃流力から求める方法を用いている。

3. 水理模型実験による侵食実態

水理模型実験を実施し、津波が砂丘・盛土を越流した際の侵食実態の把握を行う。

(1) 実験概要

砂丘・盛土の侵食実態を把握するため、図-1に示す循環水槽（株式会社日本流体技研のパーソナルタンク）内に、砂丘・盛土を模擬した台形上の堤体を設置し、水槽内の水を循環させることにより堤体を侵食させる実験を実施した。砂丘・盛土は本来ドライな状態で津波越流が生じることとなるが、本実験では水槽の都合上、堤体が水没した状態を初期として、水槽の水を循環させ越流させることとした。

水位および堤体の時間的な変化状況は、水槽の透明な観測面をビデオカメラで撮影し、数秒間隔でデジタイズすることで把握した。実験の様子は図-2のとおりである。

堤体の作成に用いた砂の粒径は、図-3に示す2種類の三河珪砂であり、中央粒径 d_{50} は、5号が0.34mm、56号が0.20mmであり、いずれの粒径もシルト・粘土分をほとんど含まない砂質土であり粘着力を持たない。

水槽内の流量は、水槽内の初期水位、水槽内の堤体形状、水槽内のモーターの回転数によって決定される。本実験における堤体の越流量は、堤体堤頂部で限界水深 h_c が生じるものとして算定した。堤長部で限界水深 h_c の発

図-1 循環水槽の模式図

図-2 実験の状況

図-3 使用した三河珪砂の粒径加積曲線

生を仮定して越流量を算定する方法は、邵ら⁵⁾により妥当な流量が算定できることが確認されている。また、平均流速は越流量を水深で除して算定した。この際の水深はビデオカメラで撮影した水位と堤体形状から把握した。

なお、この越流量の算定手法は、射流を想定したものであるため、以降における検討もビデオカメラの画像等から射流と判断できた時間を対象とした。

(2) 実験ケース

実験ケース一覧を表-2に示す。堤体の天端幅、裏法勾配、粒径および越流量を変化させた計10ケースの実験を実施した。

本実験の堤体の高さは全ケースで9.5cmとしており、対象とする実物スケールの砂丘・盛土を設定していないものの、実物スケールの堤体の天端高さが4.75mであれば模型の縮尺はフルードの相似則で1/50相当となる。実験での越流開始時の越流水深は2.9~6.5cm(表-2)のため1/50縮尺とすれば実物スケールで1.5~3.3m程度であり、「5.東日本大震災津波の砂丘・盛土の侵食実態」示した宮城県名取市の事例の越流水深5~6mと比べれば比較的小さな越流水深である。

なお、フルードの相似則では、時間および流速は長さの縮尺の1/2乗となるため、長さが1/50縮尺であれば時

間と流速は $1/50^{1/2}=1/7.1$ となる。

(3) 実験結果

実験による堤体断面の時系列の侵食状況について、ケース4を例として図-4に示す。

越流開始とともに堤体の裏法面から侵食が進行、天端幅の減少が生じ、一定量の天端幅が減少した後に天端高さの顕著な低下が生じている。

また、堤体の断面形状が堤体の侵食にどのような影響をあたえるかを把握するため、堤体の天端幅および裏法勾配を変化させた場合の侵食実験から、越流に伴う時系列の天端高さの低下状況と越流量の変化状況を図-5に示す。裏法勾配が天端高さ低下を抑制する効果は見られないものの、天端幅が20cmの堤体は天端幅10cmの堤体と比べ、天端高さの低下を抑制できた。このことから、津波越流時に堤体天端高さの低下を抑制させ背後への越流量を低減させるには、天端幅を長くすることが有効だと確認できた。

ただし、天端幅20cmの場合でも、天端高さの低下が抑制できたのは図-5より2秒程度である。対象とする外力にも影響するが、現地へ適用した場合の概略値を把握するため本実験の実物スケールを仮に1/50として試算した場合、実物スケールにおいて越流初期の越流水深が1.5m程度、天端幅が10mの場合において、天端高さの低下が14秒程度抑制できることとなる。これらは本実験

表-2 実験ケース一覧

ケース	天端高	天端幅	表法勾配	裏法勾配	中央粒径 d50	初期水深	循環水槽の回転数	越流開始時の越流水深
1	10cm	10cm	1:2	1:2	0.34mm	10cm	10Hz	2.9cm
2	10cm	10cm	1:2	1:2	0.34mm	10cm	13Hz	4.3cm
3	10cm	10cm	1:2	1:2	0.34mm	13cm	15Hz	6.5cm
4	20cm	10cm	1:2	1:2	0.34mm	10cm	10Hz	3.1cm
5	10cm	20cm	1:2	1:3	0.20mm	10cm	10Hz	3.5cm
6	10cm	10cm	1:2	1:2	0.20mm	10cm	10Hz	3.2cm
7	10cm	10cm	1:2	1:2	0.20mm	10cm	13Hz	4.3cm
8	10cm	10cm	1:2	1:2	0.20mm	13cm	15Hz	5.8cm
9	20cm	10cm	1:2	1:2	0.20mm	10cm	10Hz	3.5cm
10	10cm	10cm	1:2	1:3	0.20mm	10cm	10Hz	3.7cm

結果を単純に実スケールに適用した場合の試算である。本実験結果を実スケールに適用するには、スケールエフェクト、非線形性による乱れの影響（本実験は準定常流であり乱れの影響が小さい）などの課題がある。

また、本実験は、植生などの堤体を保護するものを考慮していないこともあり、津波の周期に対して短時間の天端高さの抑制時間となる。耐侵食性を向上させるためには、特に裏肩部の補強が重要であり、補強方法は堤体の幅や高さの増加に加え、植生や人工物を用いる方法が考えられる。これらの補強にあたって粘り強さを持たせる目安となる強度、各対策とコストの最適化の検討が課題といえる。

なお、一定時間が経過すると天端高さの低下速度が緩やかになるのは、時間の経過につれて天端高さが低下し越流水深が大きくなるため、流れが斜流から常流に近づく（フルード数 Fr が1に近づく）、結果として底面のせん断応力が小さくなるためである。

図-5 裏法勾配・天端幅の違いによる天端高さおよび越流量の時系列変化

図-4 越流に伴う堤体と水位の時系列変化（ケース4の例）

4. 天端高さ低下速度の予測式の提案

先述の水理模型実験から把握した数秒間隔の堤体の形状変化から毎秒あたりの天端高さの侵食速度の予測式を算定する。

(1) 天端高さの低下速度の設定

「3. 水理模型実験による侵食実態」の水理模型実験から把握した数秒間隔の堤体の形状変化から、毎秒あたりの天端高さの侵食速度を算定した。ここで算定した侵食速度は、以降の外力と対応させる。

(2) 外力の算定

天端高さの侵食速度の予測式に用いるせん断応力 τ および限界せん断応力 τ_c は、式(1a), (1b)より算出した。

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (1a)$$

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 \quad (1b)$$

ここに、 τ : 底面せん断応力(N/m²)、 τ_c : 限界せん断応力(N/m²)、 ρ : 水の密度(=1,000 kg/m³)、 u_* : 摩擦速度(m/s)、 u_{*c} : 移動限界摩擦速度(m/s)である。

移動限界摩擦速度 u_{*c} は式(2)に示す岩垣公式⁹⁾より算出した。

$$u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32} \quad (0.0065 \text{ cm} \leq d \leq 0.0565 \text{ cm}) \quad (2)$$

ここに、 d : 粒径であり、単位はcm-sである。

また、摩擦速度 u_* は、平均流速 u を用いて、式(3)の粗面乱流に対する抵抗則¹⁰⁾より算出した。

$$\frac{u_*}{u} = \frac{\kappa}{\ln(h/z_0) - 1} \quad (3)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度(m/s)、 κ : カルマン定数(=0.4)、 u : 平均流速(m/s)、 h : 水深(m)、 z_0 : 粗度高さ(=ks/30)、 ks : 相当粗度(=粒径 d (m))である。

平均流速 u は、式(4a)のように単位幅の越流量 q を水深 h (堤長部から法面の平均水深) で除して算定した。単位幅の越流量 q は、堤体の堤頂部で限界水深 h_c が発生することを想定し、式(4b)より算定した。

$$u = q/h \quad (4a)$$

$$q = \sqrt{gh_c^3} \quad (4b)$$

ここに、 u : 平均流速(m/s)、 q : 単位幅の越流量(m²/s)、 h_c : 限界水深(m)、 g : 重力加速度(m/s²)である。

(3) 天端高さ低下速度の予測式

以上より算定した天端高さの侵食速度と底面せん断応力を対応させ、天端高さ侵食速度の予測式を算定する。

本研究で提案する天端高さの低下速度の予測式は、土

の侵食速度モデルで多く用いられているようにせん断応力の累乗によるものとし式(5)で表現した。

$$E = \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma \cdot f(b, q, d) \quad (5)$$

ここに、 E : 天端高さの低下速度(cm/s)、 α 、 γ : 定数、 τ : 底面せん断応力(N/m²)、 τ_c : 限界せん断応力(N/m²)、 $f(b, q, d)$: 堤体幅による天端高さの侵食抑制を表すパラメータであり堤体幅 b と単位幅の越流量 q と堤体の粒径 d による関数である。

本研究では堤体幅による侵食にくさを表す関数 f を算出するには至っていないため、堤体幅が 10 cm と短く越流直後に天端高さの低下が生じる実験ケースを対象として天端高さの低下速度 E を検討した。

天端高さの低下速度 E と「せん断応力 τ —限界せん断応力 τ_c 」の関係について、中央粒径 $d_{50}=0.34 \text{ mm}$ の場合を図-6、 $d_{50}=0.20 \text{ mm}$ の場合を図-7に示す。式(5)の定数 α 、 γ は図-6、図-7の最小二乗法より決定できる。

どちらの粒径の場合も、津波越流時の天端高さの低下速度 E は、「せん断応力 τ —限界せん断応力 τ_c 」の累乗で評価できることが明らかとなった。ただし、粒径 $d_{50}=0.20 \text{ mm}$ の場合(図-7)は $d_{50}=0.34 \text{ mm}$ の場合と比べ相関が劣っている。この要因は、本手法が底面のせん断応力により掃流砂の移動を検討した方法であり、浮遊砂の影響を詳細に考慮できていないためと考えられる。

図-6 天端高さの侵食速度の予測式 ($d_{50}=0.34 \text{ mm}$)

図-7 天端高さの侵食速度の予測式 ($d_{50}=0.20 \text{ mm}$)

つまり、 $d_{50}=0.20$ mmの砂は $d_{50}=0.34$ mmの砂よりも浮遊砂を比較的多く含んでいると考えられ、本検討手法では浮遊砂の影響を詳細に考慮できないため、 $d_{50}=0.20$ mmの場合の天端高さの侵食速度と「せん断応力 τ —限界せん断応力 τ_c 」の相関が比較的劣っていた可能性がある。

(4) 天端高さ低下速度の予測式の無次元化

式(5)の天端高さの低下速度とせん断応力の関係は、定数 α と γ が単位を持つため本実験条件に限定されることとなる。そのため、本実験結果を一般化するため、天端高さの低下速度およびせん断応力を式(6)に示すように無次元化した。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (6a)$$

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd} \quad (6b)$$

$$E_* = \frac{E}{\sqrt{sgd}} \quad (6c)$$

ここに、 τ_* ：無次元せん断応力、 τ_{*c} ：無次元限界せん断応力、 E_* ：無次元侵食速度、 s ：砂の水中比重($(\rho_s - \rho)/\rho$)、 ρ_s ：砂の密度(2.7 g/cm³と想定)である。

無次元化した侵食速度とせん断応力を式(5)を無次元化した式(7)で表現し、対応づけたものを図-8に示す。ここでは、無次元化して表現するため、 $d_{50}=0.34$ mmと $d_{50}=0.20$ mmの両方を合わせて示した。ここでの定数 α_* 、 γ_* は図-8の最小二乗法より決定できる。

$$E_* = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\gamma_*} \cdot f_*(b, q, d) \quad (7)$$

ここに、 α_* 、 γ_* ：無次元化した定数、 $f_*(b, q, d)$ ：無次元化した堤体幅による天端高さの侵食抑制を表すパラメータである。

これより、無次元化した侵食速度とせん断応力の関係は、粒径によるバラつきを含むことがわかる。本研究では $d_{50}=0.34$ mmと $d_{50}=0.20$ mmの場合における定数を示したが、粒径ごとにパラメータの同定が必要な可能性が示唆された。

図-8 無次元化した天端高さの侵食速度の予測式

5. 東日本大震災津波の砂丘・盛土の侵食実態

2011年の東日本大震災の津波が砂丘・盛土を越流した際の侵食実態を把握するとともに、水理模型実験結果との侵食状況の比較を行うため、航空レーザ測量から東日本大震災前後の地形を比較する。

(1) 対象地域

対象地域は、砂丘・盛土が存在し、東日本大震災の津波で越流が生じた地域として、宮城県名取市を選定した。対象位置は図-9のとおりであり、閑上漁港の南側である。

(2) 東日本大震災の津波外力

対象地域付近の東日本大震災の津波外力は、図-9に示す砂丘・盛土背後の地点で最大浸水高TP+10.6 m¹¹⁾が確認されている。砂丘・盛土の高さ(図-10よりTP+4.5～5.0 m程度)を5～6 m程度も上回るものであった。

(3) 震災前後の断面比較による侵食実態

宮城県名取市の2断面(図-9のA-A'、B-B')について、震災前後の航空レーザ測量を図-10のとおり比較した。

【震災前の空中写真(2006年)】 【震災後の空中写真¹²⁾(2011年)】

図-9 宮城県名取市の砂丘・盛土の位置

図-10 震災前後の砂丘・盛土断面(A-A'断面、B-B'断面)

震災前は2006年2月計測(仙台河川国道事務所)、震災後は2011年5月計測(国土地理院¹³⁾)で、どちらも5mメッシュデータを用いた。また、地震による広域地盤変動の影響を除外するため、震災後の断面に東日本大震災の鉛直方向の地盤変動量¹⁴⁾として「名取」の電子基準点の変動量-0.28mを差し引いた。

当地域は津波外力が大きいことから砂丘・盛土の大部分が侵食しているが、A-A'断面のように一部の堤体が残存している区間があった。このA-A'断面とB-B'断面を比較すると、A-A'断面の天端幅が広いため堤体の一部が残存していた可能性がある。「3.水理模型実験による侵食実態」で示したように天端幅が広いほど堤体が侵食されにくいことが現地データからも確認できた。

また、水理模型実験(図-4)では表法の侵食がほとんどしていないのに対し、現地の地形では表法も大きく侵食が生じている。現地地形は引き波による影響で表法の侵食も生じたと考えられる。

6. まとめ

本検討より得た主な結論を以下に示す。

- ・津波越流による砂丘・盛土の天端高さの侵食速度を予測する方法として、「せん断応力-限界せん断応力」および「無次元化したせん断応力-無次元化した限界せん断応力」の累乗で評価できた。
- ・宮城県名取市における東日本大震災の津波前後の地形変化では、砂丘・盛土の大部分が侵食されていたものの、堤体幅の広い区間では、津波越流後も堤体が一部残存している場合が確認できた。

謝辞：東日本大震災前の空中写真および航空レーザ測量のデータは、仙台河川国道事務所のものを使用させていただいた。また、本研究の水理模型実験を行うにあたり、豊橋技術科学大学の藤田祥平君に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 諏訪義雄：自然・地域インフラとは何か，RIVER FRONT, Vol.79, pp.11-15, 2014.
- 2) 前川俊明，二瓶泰雄，中田遥香：海岸砂丘・盛土による津波減災効果の検討，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69, No.4, I_1453-I_1458, 2013.
- 3) 高橋智幸，首藤伸夫，今村文彦，浅井大輔：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海岸工学論文集，第46巻，pp.606-610, 1999.
- 4) 藤井直樹，大森政則，高尾誠，金山進，大谷英夫：津波による海底地形変化に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.376-380, 1998.
- 5) 邵小敏，田中仁，首藤伸夫：越流による砂州崩壊に関する研究，土木学会論文集，No.479, II-25, pp.31-40, 1993.
- 6) 藤井裕之，首藤伸夫，堀田新太郎，高木利光：津波越流による沿岸道路の破壊に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol. 66, No.1, pp.246-250, 2010.
- 7) 長坂陽介，Harry YEH, 中尾秀之，佐藤慎司，田島芳満，山中悠資：津波による堤防及び盛土の侵食機構に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学) ,Vol. 68, No. 2, I_1331-I_1335, 2012.
- 8) 長坂陽介，佐藤慎司：地盤の間隙水圧を考慮した津波による盛土侵食に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 69, No. 2, I_566-I_570, 2013.
- 9) 土木学会水理委員会：水理公式集 [平成 11 年版]，pp.158-159, 社团法人土木学会，1999.
- 10) 田中仁，Aung THU：全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則，土木学会論文集，No.469, II-23, pp.93-102, 1993.
- 11) 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター，ユネスコ・政府間海洋学委員会国際津波調査団：東日本大震災による津波浸水域における学術調査報告書，pp.5-6, 2011.
http://geoinfo.amu.edu.pl/wngig/IG/szczucinski/news/report_japanese.pdf
- 12) 国土地理院：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震正射画像。(2015 年 4 月 29 日閲覧)
<http://saigai.gsi.go.jp/h23taiheiyo-zort/index.html>
- 13) 国土地理院：基盤地図情報(数値標高モデル)。(2015 年 4 月 29 日閲覧) <http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>
- 14) 国土地理院：3 月 11 日の本震(M9.0)に伴う地殻変動。(2015 年 4 月 29 日閲覧)
<http://www.gsi.go.jp/common/000059961.pdf>

STUDY ON EROSION MECHANISMS OF COASTAL DUNE AND FILL BY TSUNAMI OVERFLOW

Ryuji NIKAIDO, Shin-ichi AOKI, Shigeru KATO and Takumi OKABE

This study investigated topographic change of coastal dune and fill by tsunami overflow using hydraulic model test and aerial survey data.

In case of hydraulic model test, wide crown width of body was restrained to decline speed of crown height. In addition, this study suggested prediction formula about speed of crown height decline by connecting shear flow of tsunami over flow and speed of crown height decline.

Topographic change in Natori City before and after the Great East Japan Earthquake Tsunami suggested that wide crown width of body has erosion resistance by tsunami overflow.