

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04364

研究課題名（和文）津波による橋台背面盛土の流出機構の解明と効果的な流出対策の提案

研究課題名（英文）Mechanism of tsunami-induced erosion of bridge-abutment backfill and effectiveness of countermeasures

研究代表者

中村 友昭（Nakamura, Tomoaki）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90569328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：津波による橋台背面盛土の流出発生機構と流出対策の有効性を水理実験と数値計算により検討した。水理実験より、橋台周辺の盛土が流出し橋台から少し離れた場所の盛土が残存する現象を確認し、東日本大震災後に確認された被災事例との類似を認めた。水理実験との比較より、水位変動と盛土の地形変化の観点から数値計算モデルFS3Mの妥当性を示した。数値計算より、橋台内部の盛土が岸側ウイングの下から流出し陥没に到る過程を確認し、その機構を掃流砂と浮遊砂の観点から明らかにした。ウイングの土被り圧を大きくする対策を実施した数値実験より、橋台内部の盛土が未対策の場合と比べて多く残存することから効果的な対策であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来あまり着目されてこなかった津波による橋台背面盛土の流出現象を対象とした水理実験と数値計算をともに実施し、橋台背面盛土流出の過程と機構を明らかにした点に学術的な意義がある。また、本研究で取り扱った現象に対する数値計算モデルFS3Mの妥当性が確認でき、橋台の形式、盛土の形状や粒径、立地など橋ごとの特徴を考慮した盛土流出の評価が行えるようになったことから、実務への展開も期待される。

研究成果の概要（英文）：The mechanism of tsunami-induced erosion of bridge-abutment backfill and effectiveness of countermeasures were investigated using hydraulic experiments and numerical simulations. Experimental results showed that the backfill close to the abutment was eroded and the backfill on the far side of the abutment remained relatively intact, which was a similar phenomenon to that observed after the 2011 Tohoku earthquake tsunami. From comparison with experimental data, the computational capability of the numerical model, FS3M, was demonstrated in terms of water surface fluctuation and surface profile change in the backfill. From numerical results, the process in which the backfill inside the abutment flowed out from under the landward wing was observed and the mechanism of the process was revealed in terms of bedload and suspended load transport. From numerical experiments, an increase in the soil-cover depth of the wing would be effective against the erosion of the backfill.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波 橋台 盛土 侵食 洗掘 津波対策 耐津波安定性

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震において、沿岸部の橋梁に桁の流出などの津波による被害が発生した。「東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会」の最終報告書(土木学会, 2015)によれば、点検が実施された直轄国道の1,572橋に限っても、落橋が12橋、橋台周辺の洗掘が22橋、橋脚周辺の洗掘が24橋など、津波の影響を受けて141橋が被災したとされている。このような橋梁の被災は復旧活動の障害となることから、災害時においても橋梁の機能の保持が求められている。そこで、2004年スマトラ島沖地震津波を契機として、これまでに主に桁への作用津波力の観点から検討がなされてきた。しかし、橋台背面盛土の流出を検討した事例は、遠心模型実験を行っている井上ら(2014)と吉崎ら(2015)に限られていたことから、橋台背面の盛土が津波により流出に到る過程とその機構に対する検討は十分とは言えなかった。

2. 研究の目的

本研究では、(1)水理実験による橋台背面盛土の流出現象の把握、(2)3次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデルFS3M(three-dimensional coupled Fluid-Structure-Sediment-Seabed interaction Model; 中村ら, 2019)の水理実験への適用と再現性の検証、(3)橋台背面盛土の流出発生機構の解明、(4)橋台背面盛土の流出対策の効果の評価の4つを柱とした研究を実施した。

3. 研究の方法

(1) 橋台背面盛土の流出現象の把握

① 水理実験の概要

名古屋大学の亚克力製循環式水平開水路(長さ6.0m, 幅0.30m, 高さ0.29m)を用いて、Froudeの相似則に基づいて縮尺1/100の水理実験を行った。

図-1に実験装置の概略図を、図-2に沼田跨線橋をモデル化した橋台模型の概略図を示す。図-1に示すように、図-2の橋台模型を6本の杭模型(直径10mm, 長さ75mm)を使って水路の底面に固定し、その周囲に長さ2.90m, 厚さ0.10mの砂地盤を、背面に天端幅150mm, 高さ77mm, 法面勾配1/1.46の盛土を設置した。ここで、砂地盤と盛土には中央粒径0.2mmの珪砂6号を用いた。また、実験ケース間で砂地盤と盛土の状態をできる限り同じにするため、砂地盤は約20mmごとに締め固めをし、締め固め後に1時間以上水没させた。盛土は含水率10~13%とした珪砂を何層かに分けて締め固めて形成した。そして、津波をモデル化した単位幅当たり0.0260 m³/s/mの流量の流れを作用させた。このとき、図-1のW2とW3での水位を超音波センサ(Omron製)により計測した。また、津波作用前後には、レーザー変位計(Keyence製)を使ってy=0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25mの測線での地形を計測した。表-1に実験条件を示す。同表に示すように、通水時間 t_{pump} を15, 30, 50sの3通り変化させた。また、(2)において数値計算モデルFS3Mの妥当性を検証するため、橋台模型を設置せず、水路幅方向に一樣な形状の盛土のみ設置したCase4~6も実施した。再現性を確認するため、各ケース2回(Run 1, 2)実験を行った。

② 実験結果および考察

写真-1と写真-2に津波作用後の橋台背面盛土の様子を例示する。写真-1に示すように、津波の作用により橋台背面の盛土が流出し、橋台周辺には洗掘が生じた。また、写真-2に示すよう

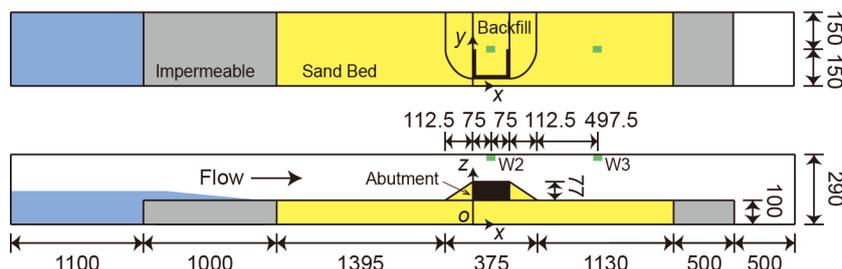


図-1 実験装置の概略図 (W2, W3: 水位計測位置)

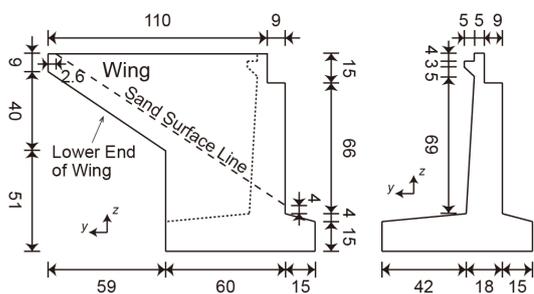


図-2 橋台模型の概略図

表-1 実験条件

Case	t_{pump} [s]	橋台	盛土	Run
1	15	○	○	1, 2
2	30	○	○	1, 2
3	50	○	○	1, 2
4	15	×	○	1, 2
5	30	×	○	1, 2
6	50	×	○	1, 2

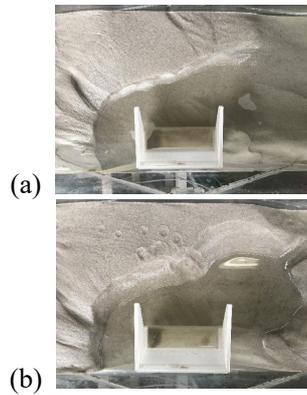


写真-1 上部から見た津波作用後の盛土の様子 (Run 1) : (a) $t_{pump} = 30$ s, $t_{pump} = 50$ s

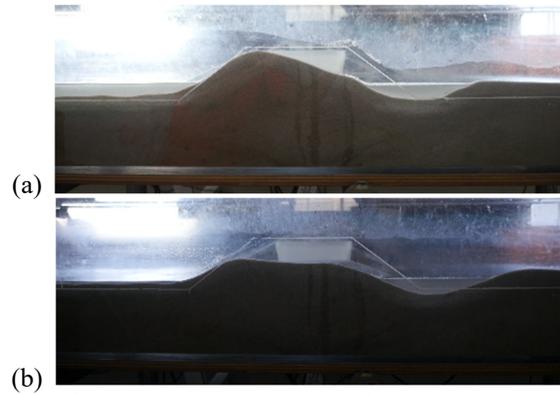


写真-2 盛土側から見た津波作用後の盛土の様子 (Run 1) : (a) $t_{pump} = 15$ s, $t_{pump} = 30$ s

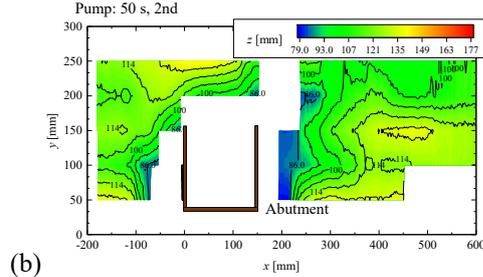
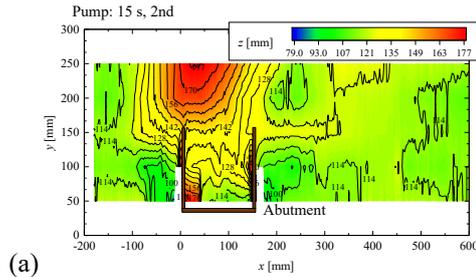


図-3 津波作用後の橋台周辺の地形 (Run 2) : (a) $t_{pump} = 15$ s, $t_{pump} = 50$ s

に、 $t_{pump} = 15$ s のときは、盛土の岸側が流出し、橋台の岸側上部が盛土の奥に見えるようになったものの、盛土の沖側は残存し、天端も大きくは下がらなかった。一方、 $t_{pump} = 30$ s のときは、盛土上部が流出して天端が下がり、橋台の上部が奥に見える状態となった。また、 $t_{pump} = 50$ s のときは天端高の低下が $t_{pump} = 30$ s のときよりも若干大きくなることを確認した。

図-3 に津波作用後の橋台背面盛土周辺の地形を例示する。なお、予備実験において洗掘穴に溜まった水のために $z < 83$ mm は計測できないことが分かったため、同図では $z < 83$ mm は空白として示した。図-3(a)に示すように、 $t_{pump} = 15$ s のとき、橋台と離れた側の盛土は残存しているものの、橋台の沖側と岸側は $z < 83$ mm を表す空白となっており洗掘が生じた。一方、 $t_{pump} = 30$ s のときは、橋台から離れた側の盛土は沖側部分がわずかに残存しているものの、それ以外の場所の盛土の流出は $z < 83$ mm を表す空白部分が広がるなど $t_{pump} = 15$ s と比べて大きくなった。図-3(b)に示す $t_{pump} = 50$ s のときは、盛土の流出の規模はさらに大きくなった。

以上より、橋台周辺の盛土が失われ、橋台から少し離れた場所の盛土が残存する現象はモデルにした沼田跨線橋でも確認されていることから (佐々木ら, 2011)、現地と類似する現象を水理実験で再現できた。また、橋台周辺の背面盛土は橋台から離れた側よりも津波の影響を受けやすいことから、橋台の存在が背面盛土の流出を助長していることが判明した。

(2) 数値計算モデル FS3M の水理実験への適用と再現性の検証

数値計算モデル FS3M を(1)で実施した水理実験に適用した。試行計算において、橋台を設置した Case 1~3 は計算開始 100 s 以降の地形の変化が十分小さいことが確認できたことから、Case 1~3 は 100 s まで計算を行うこととした。一方、橋台を設置しなかった Case 4~6 では、地形の変化が長く続くことが確認できたことから、Case 4~6 は 1000 s まで計算を行った。

① 橋台を設置せず盛土のみ設置したとき (Case 4~6)

水位変動の比較を図-4 に例示する。図-4(b)に示す $t_{pump} = 30$ s のとき、水理実験結果、数値計算結果ともに、津波の到達とともに水位が上昇した後、後述する盛土天端高の低下とともに盛土天端の W2 (図-1 参照) での水位がゼロ以下に低下する傾向を示した。一方、図-4(a)に示す $t_{pump} = 15$ s のときは、後述するように数値計算での盛土の侵食が水理実験に比べて遅く、そのために W2 での水位の低下が遅くなっているものの、最終的な水位は同程度となった。

地形変化の比較を図-5 に例示する。図-5(b)に示す $t_{pump} = 30$ s のとき、数値計算結果は水理実験結果よりも越流開始 10 s 後の侵食が若干遅く、20 s 後の侵食が若干早いものの、水理実験結果と概ね一致する結果が得られた。一方、図-5(a)に示す $t_{pump} = 15$ s のとき、越流開始 15 s 後までの侵食は水理実験よりも数値計算の方が遅い傾向を示した。このとき、盛土上の越流水は非常に薄く、この薄い越流水によって侵食が生じたこと、このような状況下では侵食の進展が遅くなる傾向があることが判明した。ただし、最終的な地形は水理実験と概ね一致した。

② 橋台と背面盛土の両者を設置したとき (Case 1~3)

図-6 に水位変動の比較を例示する。後述する盛土の地形変化の差の影響を受けて、W2 での水位の低下を $t_{pump} = 15$ s の Run 1 のときは過小評価、 $t_{pump} = 30, 50$ s のときは過大評価する傾向があるものの、水位変動の傾向を数値計算で概ね捉えられることを確認した。

図-7 に津波作用後の地形の比較を例示する。橋台が存在するとき、津波が開口部を通過し盛

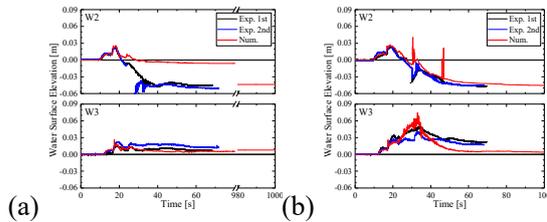


図-4 水位変動の比較（盛土のみ）：
(a) $t_{pump} = 15$ s, (b) $t_{pump} = 30$ s

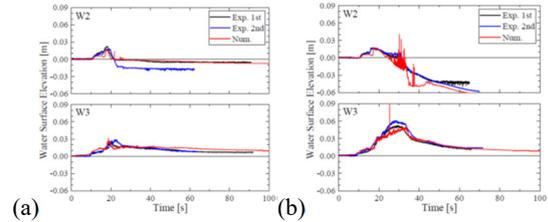


図-6 水位変動の比較（橋台あり）：
(a) $t_{pump} = 15$ s, (b) $t_{pump} = 30$ s

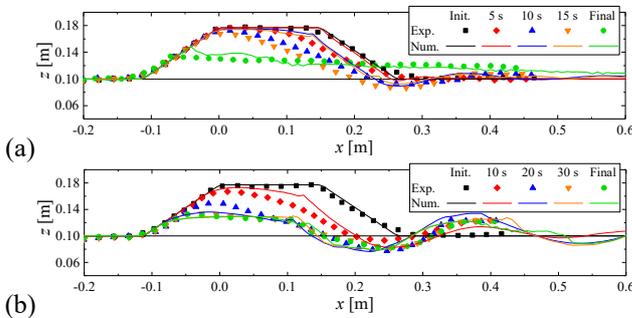


図-5 地形変化の比較（盛土のみ, Run 2）：
(a) $t_{pump} = 15$ s, (b) $t_{pump} = 50$ s

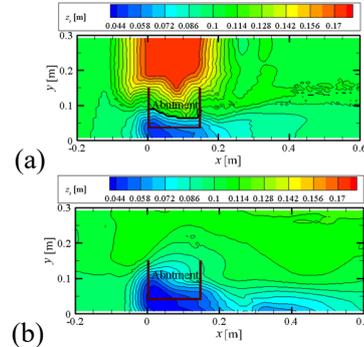


図-7 最終地形の計算結果（橋台あり, Run 2）：
(a) $t_{pump} = 15$ s, (b) $t_{pump} = 50$ s

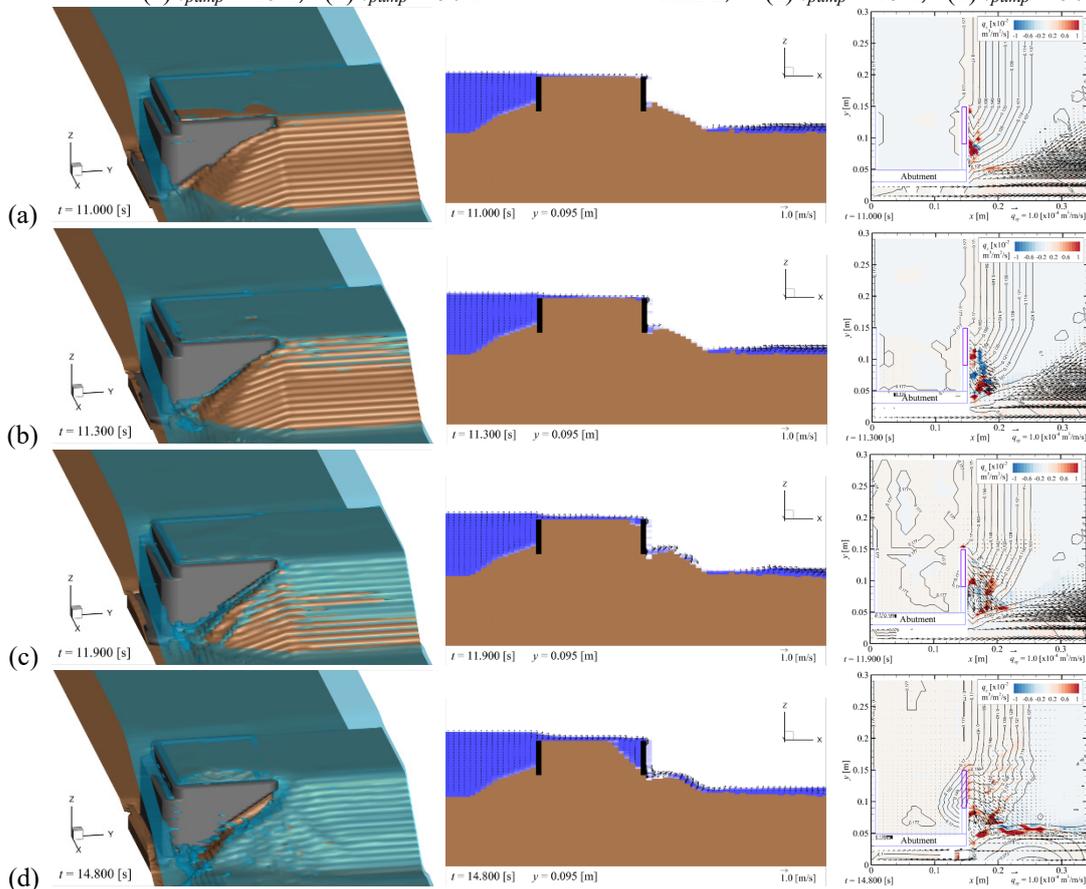


図-8 橋台背面盛土の流出発生機構 ($t_{pump} = 30$ s)

土上の越流水が薄くなることから侵食を過小評価し、図-7(a)に示す $t_{pump} = 15$ s のときは、水理実験結果と比較して盛土の流出が小さかった。ただし、橋台周辺に洗掘が生じる一方で、橋台から離れた側の盛土は残存しており、水理実験と概ね一致する傾向の結果が得られた。

以上より、越流水が薄いときの侵食の再現性に課題を残しているものの、水位変動と地形変化の観点から本現象に対する数値計算モデル FS3M の再現性を確認した。

(3) 橋台背面盛土の流出発生機構の解明

図-8 に、盛土岸側の様子、 $y = 0.095$ m 断面の様子、掃流砂量 q_{xy} (単位幅, 単位時間当たり) と浮遊砂の巻き上げ量と沈降量の差 q_z (単位面積, 単位時間当たり) の分布を例示する。

図-8(a)に示すように、橋台上を越流し岸側ウイングの岸側面を流れ落ちた流れと、盛土上を越流し盛土の勾配に沿って流れ下った流れが重なり、この流れによって岸側ウイングの付け根付

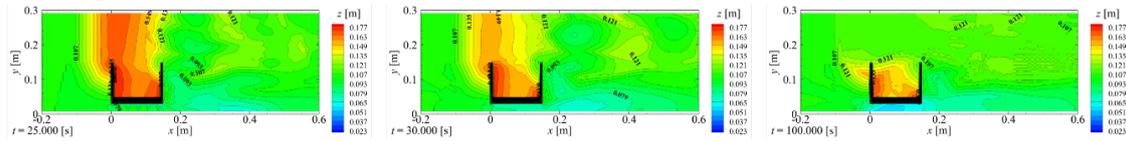


図-9 ウイングの土被り圧を大きくする対策実施時の地形変化 ($t_{\text{pump}} = 30 \text{ s}$)

近では図-8(a)右図の右下方向に向く掃流砂 q_{xy} が生じるとともに、 q_z が正となり浮遊砂の巻き上げが生じ、盛土の侵食が生じ始めた。そして、その侵食が図-8(b)に示すように岸側ウイングの下端に達することで岸側ウイングの下から橋台内部の盛土が流出し始め、図-8(c)に示すように橋台内部の盛土が沈下した。その後、橋台内部からの盛土の流出が続き、図-8(d)に示すように岸側ウイングの下端がすべて露出した。このとき、橋台から離れた側の盛土には顕著な侵食が生じていないことから、橋台の存在が盛土の侵食を助長していることを(1)の水理実験に加えて数値計算の観点からも確認した。その後、橋台から離れた側の盛土の侵食も徐々に進んだ。以上のような過程を経て、橋台背面盛土の流出が進むことを明らかにした。

(4) 橋台背面盛土の流出対策の効果の評価

(3)で明らかにした盛土流出の発生機構を踏まえて、①岸側ウイングの岸側面を流れ落ちる流れを低減するために、岸側ウイングの上に壁を立てた対策の効果、②岸側ウイングの岸側面を流れ落ちた流れによる侵食を抑制するために、岸側ウイングの岸側の盛土上に根固工を設置した対策の効果、③侵食が岸側ウイングの下端に達することで橋台内部の盛土の流出が生じることから、それを低減するためにウイングの土被り圧を大きくした対策の効果、④海岸堤防の液化化対策として盛土内部に設置される二重矢板の効果の数値実験により評価した。

①壁を設置する対策と②根固工を設置する対策を実施した場合、津波作用後の地形は対策なしの場合と大きくは変わらなかった。ただし、岸側ウイングの下端がすべて露出するまでの時間は対策なしの場合と比べて若干長くなったことから、津波の規模が小さければ効果がある可能性が示唆された。③土被り圧を大きくする対策を実施した場合、図-9の地形変化に示すように、橋台周辺の盛土と橋台から離れた側の盛土で侵食の進展が同程度になり、さらに橋台から離れた側の盛土の侵食の方が早くなり、津波作用後は橋台内部の盛土が対策なしの場合と比べて多く残存することが判明した。そのため、橋台の存在が盛土の侵食を助長する現象は見られず、効果的な対策であることが示唆された。④盛土内部に二重矢板を設置した場合、岸側の矢板があるだけでも盛土の流出がかなり低減できることが判明した。その一方で、矢板の外側の盛土はすべて流出してしまうことから、矢板の安定性には留意する必要があることを確認した。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ・ 橋台周辺の盛土が失われて橋台から少し離れた場所の盛土が残存する現地と類似する現象を水理実験で再現した。また、橋台周辺の背面盛土は橋台から離れた側よりも津波の影響を受けやすいことを確認し、橋台の存在が背面盛土の流出を助長していることが判明した。
- ・ 水位変動と地形変化の観点から本現象に対する数値計算モデル FS3M の再現性を確認した。ただし、薄い越流水によって生じる侵食の進展が水理実験と比べて遅い現象が見られたことから、越流水が薄いとときの侵食の再現性に課題を残している。
- ・ ①橋台上を越流し岸側ウイングの岸側面を流れ落ちた流れと、盛土上を越流し盛土の勾配に沿って流れ下った流れが重なり、この流れによって岸側ウイングの付け根付近で侵食が生じ始める、②その侵食が岸側ウイングの下端に達し、岸側ウイングの下から橋台内部の盛土が流出し始め、橋台内部の盛土が沈下する、③橋台内部からの盛土の流出が続き、岸側ウイングの下端がすべて露出する、④橋台内部の盛土の流出が進むとともに、橋台から離れた側の盛土の流出も徐々に進むという橋台背面盛土の流出過程を確認するとともに、その機構を掃流砂と浮遊砂の発生観点から明らかにした。
- ・ ウイングの土被り圧を大きくする対策を実施した場合、橋台内部の盛土が対策なしの場合と比べて多く残存することから、橋台の存在が盛土の侵食を助長する現象は見られず、効果的な対策であることが示唆された。海岸堤防の液化化対策として盛土内部に設置される二重矢板には、盛土の流出を抑える効果があることが判明した。

<引用文献> ①公益社団法人土木学会 (2015)：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書。②井上貴大，宮本圭，吉崎文明，永瀬英生，廣岡明彦 (2014)：異なる形状の橋台背面盛土が津波を受けた際の被災メカニズムに関する遠心模型実験，第 49 回地盤工学研究発表会，pp.1897-1898。③吉崎文朗，藤岡大千，廣岡明彦，永瀬英生 (2015)：橋台背面盛土の被災状況に擬似津波の流況が及ぼす影響に関する遠心模型実験，第 50 回地盤工学研究発表会，pp.1177-1178。④中村友昭，趙容桓，水谷法美 (2019)：不飽和地盤へ適用可能な VOF 法に基づく数値計算モデルの開発と不飽和地盤の浸透，侵食現象への適用，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.75, No.2, pp.I_229-I_234。⑤佐々木達生，幸左賢二，付李，木下和香 (2011)：東日本大震災による津波の影響を受けた沼田跨線橋の損傷判定，第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，5-135, 11 p.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakamura Tomoaki, Nakai Yuto, Cho Yong-Hwan, Mizutani Norimi	4. 巻 8
2. 論文標題 Modeling Tsunami-Induced Erosion of Bridge-Abutment Backfill	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 922 ~ 922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse8110922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉山知里, 中村友昭, 趙 容桓, 水谷法美
2. 発表標題 津波による橋台背面盛土の侵食機構と侵食対策の有効性に関する一考察
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井祐斗, 中村友昭, 趙 容桓, 水谷法美
2. 発表標題 陸上遡上津波による橋台背面盛土の侵食と舗装の影響に関する一考察
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水谷 法美 (Mizutani Norimi) (10209760)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	趙 容桓 (Cho Yonghwan) (00761082)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関