

越流試験による砕・転圧盛土の耐侵食性能について

北 島 明 永 瀬 恭 一
土 佐 内 優 介

概 要

海岸堤防やフィルダムなどの土を主体とした構造物は水流による侵食に非常に弱いため、従来では越流を許さない設計、言い換えれば想定される波高よりも高い堤高を確保することとしていた。しかし、今回の東北地方太平洋沖地震では「想定を超える」津波が実際に発生し、今後、どのような津波に対しても絶対に越流しない堤高を確保することは経済性や用地の確保等を考慮すると事実上不可能だと言える。そこで今後の海岸堤防には、例え津波等が越流した場合であっても、堤防が破壊あるいは倒壊するまでの時間を少しでも長く確保することによる、減災を目指した構造上の工夫が盛り込まれた「粘り強い構造」の早期開発が望まれている。こうした背景を受けて、フィルダムやため池の堤体改修に多くの実績がある砕・転圧盛土工法を使って既設の海岸堤防を保護する FRESH BANK 工法を新たに開発し、その耐侵食性能を評価するために実施した越流試験の結果を報告する。

Testing the resistance of the cement-mixed muddy soil to erosion by overflow

Abstract

The height of the coastal embankments have traditionally been designed to be higher than expected TSUNAMI wave heights, because banks constructed from soil are not resistant to erosion by water when overtopped. But after the great east Japan earthquake of 2011, it is clear that this approach cannot be relied upon. Thus in future there is a need for embankments which are resistant to erosion when overtopped. We have already developed a method of repairing old dam using cement-mixed muddy soil, and we have applied this technique to many dams and farm-ponds. We will apply to not only dams and farm-ponds but also coastal embankments. This paper shows the overflow test of cement-mixed muddy soil and its result.

キーワード： 海岸堤防、河川堤防、津波対策、
耐震改修、リニューアル

§1. はじめに

海岸堤防やフィルダムなどの土を主体とした構造物は水流による侵食に非常に弱いので、従来では越流を許さない設計、言い換えれば想定される波高よりも高い堤高を確保することとされていた。しかし、今回の東北地方太平洋沖地震では想定を超える津波が実際に発生し、今後どのような津波に対しても絶対に越流しない堤高を確保することは経済性や用地の確保等を考慮すると事実上不可能だと言える。そこで今後の海岸堤防には例えば津波等が越流した場合であっても、堤防が破壊あるいは倒壊するまでの時間を少しでも長く確保することによる減災を目指した構造上の工夫が盛り込まれた『粘り強い構造』の早期開発が望まれている。

本稿は、既設の堤防を『粘り強い構造』に改修するために開発した FRESH BANK 工法について、その耐侵食性能を評価するために京都大学防災研究所において実施した越流試験の結果を報告するものである。

§2. 粘り強い堤防構造の基本概念

震災を受けて開催された中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震・津波対策に関する専門調査会」¹⁾によると、『粘り強い構造』の基本的な考え方は、海岸堤防等の天端高を越流した場合であっても施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くすること、あるいは、施設が完全に流失した状態である全壊に至る可能性を少しでも減らす構造上の工夫を施すこととしている。

堤防の天端を越える津波が発生した場合、堤域内にある程度の浸水があることはやむを得ないが、万が一、一箇所でも堤防が切れた場合、一気に浸水域が拡大し、その被害は甚大になる。そのため、このような粘り強い堤防構造により、浸水までの時間を遅らせることにより避難のためのリードタイムを長くする等の効果や、浸水量を減らすことにより浸水被害を軽減する効果、第2波以降の被害を軽減する効果等が期待できる。また、迅速な復旧が可能となり、二次災害のリスクが減る効果や復旧費用を低減する効果も同時に期待できるとしている。

§3. 新しい堤防構造の提案

3.1 従来の堤防構造

通常の海岸堤防は、図1に示すように購入土などの盛土により築造された台形断面を基本としており、その表面(表法面、天端、裏法面)を被覆した三面張り構造になっている。盛土部分は特にゾーニングはされておらず、近傍から手に入る購入土を使った均一型堤体と言える。このような構造は、高浪や降雨程度では堤体内部の侵食は発生しないが、津波の原因となる地震が発生した際に張りブロックにズレが生じたり、場所打ちのコンクリート面にクラックが発生することが懸念される。このような事態の後、津波が襲来すると、天端を越流した際に張りブロックのかみ合わせが十分に機能していないために強度を保てず、連鎖的に消失する可能性は大いにあり、結果的に土の堤体部分が瞬間に侵食されて破壊あるいは倒壊に至る可能性を示唆している。



写真1 津波により破壊された海岸堤防

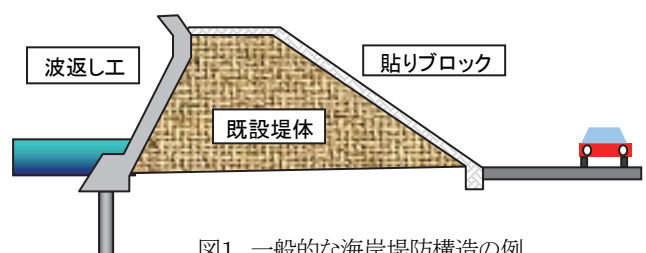


図1 一般的な海岸堤防構造の例

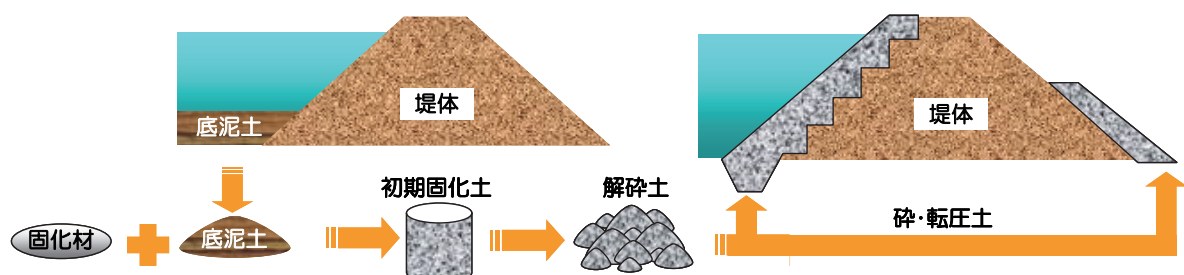


図2 砕・転圧盛土工法の概要

3.2 砕・転圧盛土の特徴

砕・転圧盛土工法²⁾は、本来、ため池やフィルダムの改修を目的として開発した工法で、図2に示すようにため池やフィルダムに堆積した底泥土などの超軟弱土をセメント系固化材により改良し、築堤土として活用することにより底泥土の廃棄処分と良質な築堤土の入手を同時に達成することが出来ることがその大きな特長と言える。本工法は既に特許（特許第 3241339 号「ため池の底泥を用いた盛土材の作製方法およびため池の堤体の補修、補強方法ならびに破碎機」）、社団法人農業農村整備情報総合センター新技術候補 N0.194、および国土交通省新技術情報システム NETIS CB-050042 に登録がされており、現在までにため池 9 箇所、フィルダム 3 箇所での施工実績がある。この中には宮城県加美郡に所在する東山池も含まれており、先の東北地方太平洋沖地震直後に調査を実施した際においても、損傷が全く見られなかったことを確認しており、その耐震性の高さを証明している。

本工法の最大の特長は、改良土としての強度を維持しつつ、通常の築堤土と同等の変形性能を有することで、固化材のセメンテーションにより粘着力成分が付加される為、侵食にも強く、低拘束圧領域においてより効果を発揮することが挙げられる。

3.3 新しい堤防構造

砕・転圧盛土は、地震時にも既設の堤体と一体となって抵抗し、破壊ひずみが大きいためにクラックが生じにくく、また侵食にも強い特性を持っているため、フィルダムの改修だけでなく、図3(a)(b)に示すように海岸堤防（一線堤）や内陸部の幹線道路（二線堤）の嵩上げを含む津波対策を目的とした耐震改修への適用が考えられる。砕・転圧盛土の表面には乾湿繰返しによる劣化を防止するために一般的な購入土による覆土を施工することになるが、これにより草や低木などの植生も可能であるため、コンクリート構造物に特有の圧迫感が緩和し、景観の保全にも効果があると思われる。

このように、砕・転圧盛土を海岸堤防に適用する工法を新たに FRESH BANK 工法と呼ぶが、断面構造としては海側法面や天端部分は高浪や台風時に波に洗われる可能性があるため、従来どおり張りブロックによる構造とし、陸側法面のみを砕・転圧盛土＋覆土で施工することを基本とする。また、原料となる底泥土は近傍の港湾で発生する浚渫土砂を想定しているため、浚渫土砂の処分場の確保が困難になりつつある近年においては、このような建設発生土の有効利用法としても優れた工法であると思われる。

§4. 砕・転圧土の耐越流性能の実証試験

4.1 比較対象試料

砕・転圧土は本来、ため池やフィルダムの耐震補強あるいは漏水対策として開発した工法である。そのため、破壊ひずみや透水係数に関する調査結果は、室内試験や現場の品質管理試験からデータは豊富にあるが、ため池やフィルダムもやはり越流を想定した設計をしていないため、耐侵食性能については今まで調査したことがなかった。今回、その耐侵食性の調査にあたり、比較対象試料を浜岡砂、藤森粘土、一般的な堤防土（浜岡砂と藤森粘土の混合土、以下混合土に統一）、砕・転圧土（原料：藤森粘土）とした。代表的な物理試験値を表1に示す。

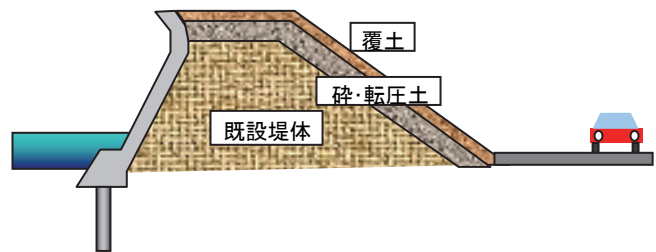


図 3(a) 砕・転圧盛土を利用した海岸堤防の例

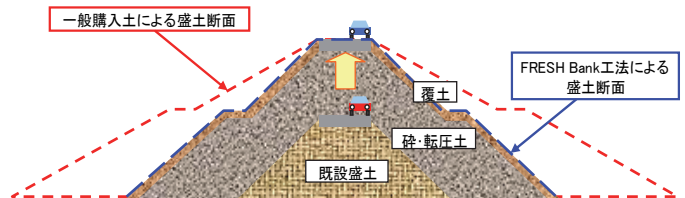


図 3(b) 砕・転圧盛土を利用した道路盛土の例

表 1 試料の物理特性

	浜岡砂	藤森粘土	砕・転圧土
d_{50} (mm)	0.68	0.0095	—
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.610	—	—
w_{opt} (%)	15.0	—	—
w_L (%)	—	46.0	—
w_p (%)	—	26.8%	—
q_u (kN/m ²)	—	—	120
含水比 (%)	5	25	15.0

4.2 小型越流試験

1) 試験の概要

小型越流試験は造波装置を備えた長さ約 50m の造波水路を使った試験で、2012 年 7 月 5 日に京都大学防災研究所において、同研究所平石哲也教授の指導の下で実施した。この試験では海岸堤防の下流側(陸側、以下下流側で統一)法面の越流による侵食状況を把握するのが目的のため、上流側(海側、以下上流側で統一)法面部分および堤頂部分は鋼製とし、下流側法面のみを砂、混合土、粘土、砕・転圧土の供試体とした。試験は図4の概要図に示すように、造波装置により波高 120mm の孤立波を発生させて実施した。

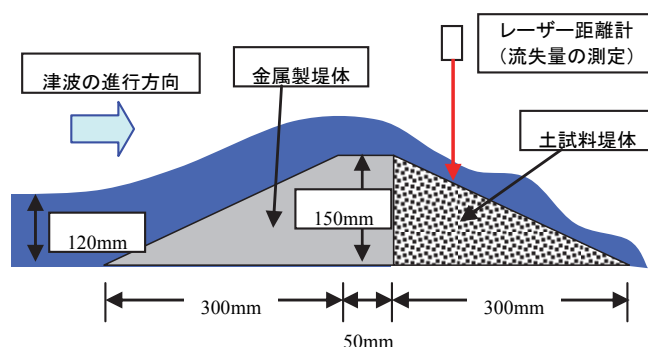


図4 小型越流試験の概要

2) 供試体の作製方法

供試体は砂、混合土、粘土、砕・転圧土の4種類とした。砂は最も侵食に弱いと考えられる例として浜岡砂(海砂)を含水比 $w=5\%$ に調整したものを、粘土は侵食に強いと考えられる例として乾燥状態の藤森粘土を $w=25\%$ に調整したものを、混合土は一般的な堤防土として浜岡砂と藤森粘土を乾燥重量比 1:1 で混合した混合土を $w=12.5\%$ に調整したものを準備した。また、砕・転圧土は $w=50\%$ に調整した藤森粘土に一般軟弱土用セメント系固化材(GS225:太平洋セメント)を固化材添加量 $\Delta Mc=110\text{kg/m}^3$ を混合し、初期養生期間 $t=3$ 日として解砕して準備した。

準備した試料を堤防模型の下流側ユニット内に、締固めエネルギーを地盤工学会の標準エネルギーの 50% ($E_c \approx 275\text{kJ/m}^3$) として 3 層に分けて突固め、ストレートエッジで整形して作製した。作製した供試体は振動を与えないように造波水路内に設置し、試験が終了すると下流側ユニットごと交換しながら繰り返し越流試験を実施した。

3) 流失量の測定方法

越流試験は造波装置による孤立波を使用して実施しているため、特定回数ごとに供試体の流失量を測定し、越流回数～流失量の関係を求めた。流失量の測定は、図5に示すように、造波水路上端部に設置した 3 本のスリットを有する平面から供試体面までの鉛直距離をレーザー変位計で測定することによって平均断面を求め、計算から推定した。スリットは堤防模型の堤頂から下流側法尻方向に向けて、堤防軸と直角に 3 本入っており、供試体の中央、左端から 3cm、右端から 3cm の 3 本の断面の形状を測定することができる。今回の試験のように測定距離が 50～100cm 程度の場合、レーザー変位計の測定誤差はおおよそ 1mm 程度であることが予備試験からわかっていたので、流失量の測定においては十分な精度を有していると言える。



写真2 小型越流試験の状況

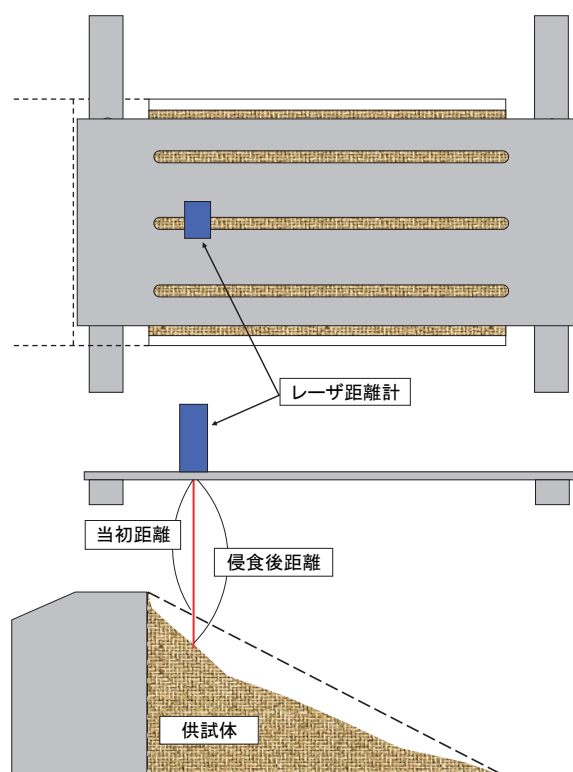


図5 流失量の測定方法

4) 試験結果

越流試験は砂、混合土、粘土、砕・転圧土と各 2 供試体ずつ実施した。越流回数について、砂は 3 回でほぼ原型をとどめなくなったので中止したが、それ以外は 20 回まで測定を続けた。それぞれの供試体のレーザー変位計による数値化された断面および流失量の例を図6に、試験後の状況を写真3に示す。図からレーザー変位計による数値化された断面は実際の断面を精度よく表現していると言える。また図7には越流回数～流失割合の関係を示す。この図からは侵食の程度は砂>>混合土>粘土≧砕・転圧土となっている。

今回の実験から砂は津波が越流して張りブロックが消失すると瞬間に侵食が進み機能を損なうことが明らかになった。また、混合土も法尻部分が激しく侵食されており、堤防の安定性を損ないつつあるのが明らかである。また、粘土は侵食には強いことが証明されたがせん断強度が小さいため、堤防の築堤土としては不向きであろうと思われる。一方、砕・転圧土は越流による損傷はほとんど見られず、また強度も自由にコントロールできることから、既設堤防の保護工法としては十分な機能を有していると考えられる。

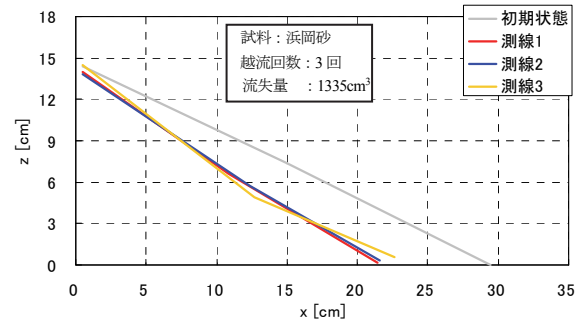


図6 流失量の測定結果

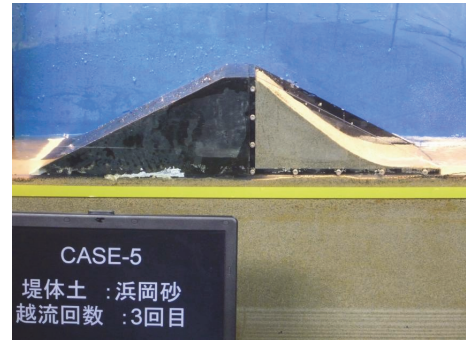


写真3 試験後の供試体の状況

4.3 中型平面越流試験

1) 試験の概要

中型平面越流試験は造波装置を備えた 50m×50m の平面水槽を使った試験で2012年12月18日に京都大学防災研究所において、同研究所平石哲也教授の指導の下で実施した。この試験では先に実施した小型越流試験で使用した試料のうち、砂、混合土、砕・転圧土を使って写真に示すように平面的に配置して、小型越流試験と同様の孤立波を発生させた。

この試験における供試体の断面は、津波により張りブロックがすべて流失した場合を想定して、上流～天端～下流に至るまですべて同一の試料により作製した。なお、供試体作製方法は小型越流試験と同様の方法とした。

2) 試験結果

この中型平面越流試験は新聞発表用の画像を撮影することを目的としていたので流失量などの計測は実施していない。しかし、写真からも分かるように、耐侵食性は明らかに砕・転圧土>一般的な堤防土>砂であることがわかる。また、孤立波であるがゆえ、砂で作製した模型堤防は1回ごとに堤防内部の水が抜け、不飽和状態になることで強度を回復しているため、30回の越流試験後もある程度の試料が残っているが、実際の津波のように越流時間が数分も続く条件下では飽和状態となり、瞬間に消失すると思われる。

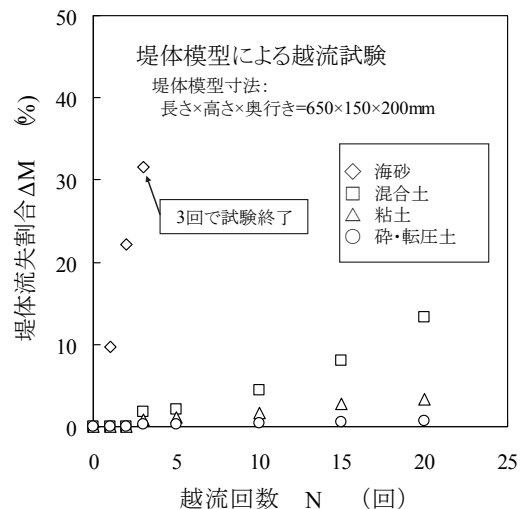


図7 各試料の越流回数～流失割合関係

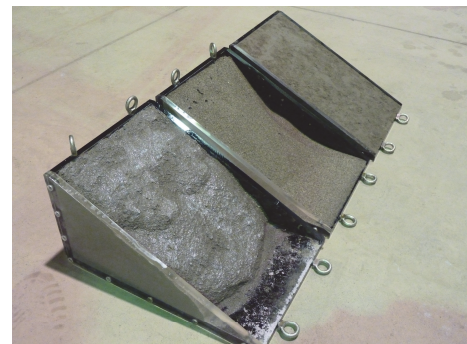


写真4 試験後の供試体(手前から混合土、砂、砕・転圧土)

§5. おわりに

小型越流試験において、越流回数 $N=3$ 回にして堤体の大部分を消失した砂は論外として、両試験を通して堤体機能の損傷が認められなかった砕・転圧土に比較して、混合土は越流回数後は法尻部分の侵食が激しいことが分かる。今回の実験では法尻部分の基盤面は金属製で侵食されない構造になっているが本来であれば基盤面以下も同様あるいはさらに弱い土質で構成されていると考えられるので、侵食が進行すると堤体自体の安定性を損なう可能性を示唆している。また、粘土は侵食には強いことが分かったが、他の3試料と比較して強度が低く、築堤土としては使用できないと考えられる。

現在、海岸堤防を主とする津波対策施設は盛土の表面を張りブロック等で三面張りしている構造が大部分を占めている。コンクリート二次製品による張りブロックは堤体自体の変形性にもある程度追従するため、侵食性能と合わせて優れた構造であると言えるが、地震による損傷を受けた後、長期間あるいは繰返しの越流作用を受けた場合、一箇所のブロックの剥がれから周辺のブロックが連鎖的に消失する可能性がある。

今回紹介した砕・転圧盛土工法による堤防堤体改修工法では、堤体自体に耐侵食性能を付加するため、上記のように、一気に破壊に至る可能性を低減できるものと考えられる。また、既設の堤体の耐震性能も向上するため、地震発生直後の損傷も軽微で済むことから、津波到来時にも被害を最小限に抑えることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 海岸における津波対策検討委員会：平成23年東北地方太平洋沖地震および津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方、国土交通省報道発表資料、2011.11.17.
- 2) 例えば、(社)農業農村整備情報総合センター：砕・転圧盛土工法によるフィルダム堤体改修、一堆積土・発生土を有効利用したフィルダムのリニューアル技術－、設計・施工・積算指針(案)、2009.

ひとこと

今期は砕・転圧盛土工法の適用範囲を拡大した FRESH BANK 工法の開発・PR に心血を注ぐとともに、2 匹目のドジョウを狙って桐光学園の松井君がケガなく縦縞のユニフォームに袖を通すことを願いたいと思います。



北島 明

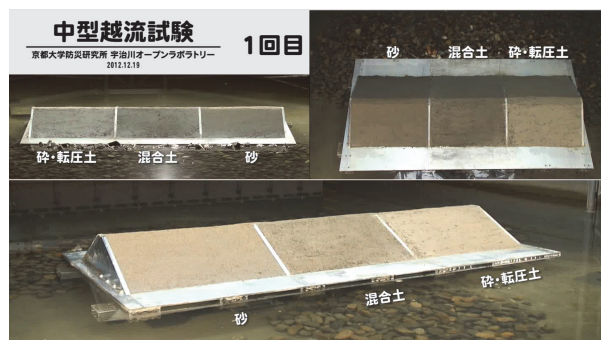


写真 5(a) 中型平面越流試験(試験前)

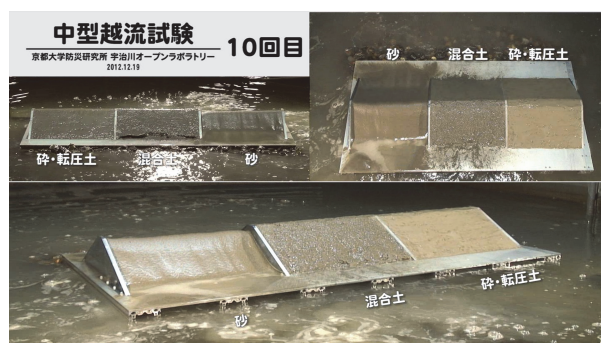


写真 5(b) 中型平面越流試験(10 回越流後)

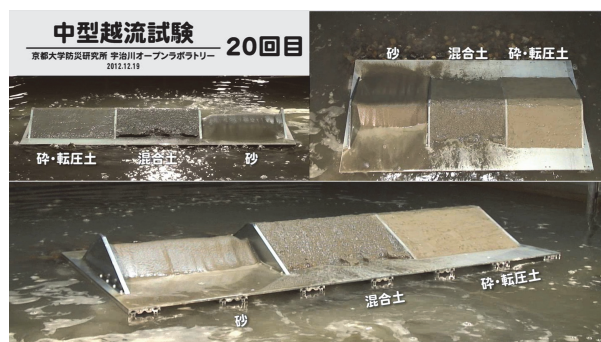


写真 5(c) 中型平面越流試験(20 回越流後)

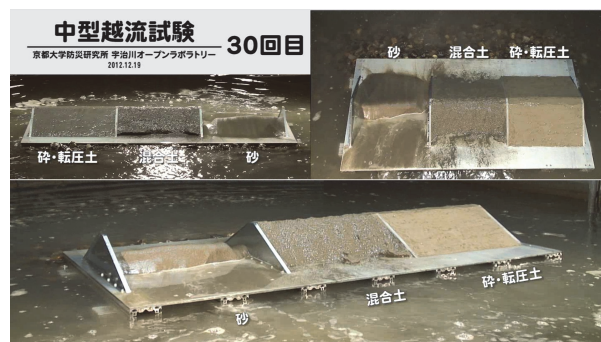


写真 5(d) 中型平面越流試験(30 回越流後)