

既設の堤防を活用した粘り強い海岸堤防の構造について

北島 明 永瀬 恭一
平石 哲也^{*1}

概 要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震における津波による甚大な被害を受けて、海岸構造物の「粘り強い構造」について多様な研究が進められている。今後、わが国全土で進められる海岸堤防の改修に向け、機能だけでなく良好な資材の枯渇や景観保全への対応が求められる。このような背景を踏まえ、耐震性に優れ、浚渫土砂などの不良土を有効利用できることから、フィルダムやため池など多数の耐震改修施工実績を持つ「砕・転圧盛土工法」を用いて、粘り強い海岸堤防の築造技術を提案し適用性を検討した。

Protecting against Future Tsunamis by Strengthening Existing Embankments Using Muddy Soil and Cement

Abstract

The earthquake that occurred three years ago generated huge tsunamis, and it caused serious damage to Japanese coastal areas. As a result, many studies have been undertaken into how create stronger embankments to protect against future tsunamis. In renovating coastal dikes, we must consider not only function, but also landscape conservation and conservation of limited natural resources. Based on these considerations we apply a rehabilitation technique for fill-type dam embankments to strengthen coastal dikes. It uses muddy soil (for example dredged soil from a port) mixed with cement. This provides excellent resistance against earthquakes and tsunamis. In this paper, we detail a new soil-improvement technique for coastal dikes.

キーワード： 津波、粘り強い堤防構造、耐侵食性能、改良土、浚渫土砂

*1 京都大学防災研究所

§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による侵食に非常に弱い。従来では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」津波が発生し、越流したことにより深刻な被害を受けたが、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、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。

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」(2011)^{1,2)}によると、この「粘り強い構造」の基本的な考え方は、津波が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、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。

今後、わが国全土で進められる海岸堤防の改修に向け多様な工法が検討されているが、これらの開発に当たっては機能だけではなく良好な資材の枯渇や景観保全への対応も求められる。このような背景を踏まえ、耐震性に優れ、浚渫土砂などの不良土を有効利用できることから、フィルダムやため池など多数の耐震改修施工実績を持つ「砕・転圧盛土工法」(農業農村整備情報総合センター, 2007, 2009)^{3,4)}を用いた、粘り強い海岸堤防の築造技術を提案し適用性と設計手法を検討した。

§2. 技術の概要

2.1 新しい堤防構造

地震被害の調査から、今回の津波により破壊された海岸堤防には、越流した津波により土構造物である堤防本体が侵食されたことにより破壊に至った例が多数見受けられた。

従来では張りブロック等による三面張り構造で堤体を侵食から保護する方法が一般的ではあるが、堤体自体にも耐侵食性能を付加する方がより安全性は高まると考えられる。そこで、「砕・転圧土」と呼ばれる改良土で堤体を被覆することにより、既設の堤防を「粘り強い構造」に改修できる新しい堤防構造を提案したい。具体的には、図1(a)に示すように津波越流時の侵食の影響が最も大きいと考えられる陸側法面に腹付け盛土を施工する場合や、図1(b)に示すように二線堤としての機能を期待する海岸付近の道路を嵩上げする場合などが考えられる。

2.2 砕・転圧盛土工法の特徴

砕・転圧盛土工法は、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ある。図2に示すように、本工法では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特徴を持つ。

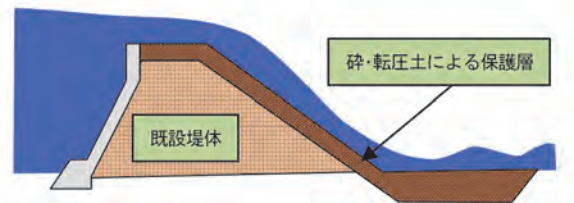


図1(a) FRESH BANK 工法による既設堤体改修例

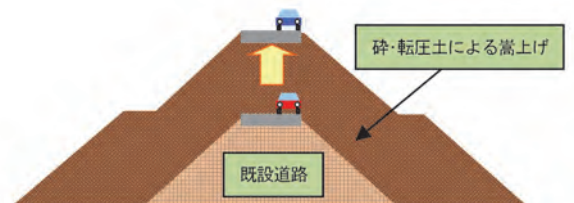


図1(b) FRESH BANK 工法による既設道路嵩上げ例

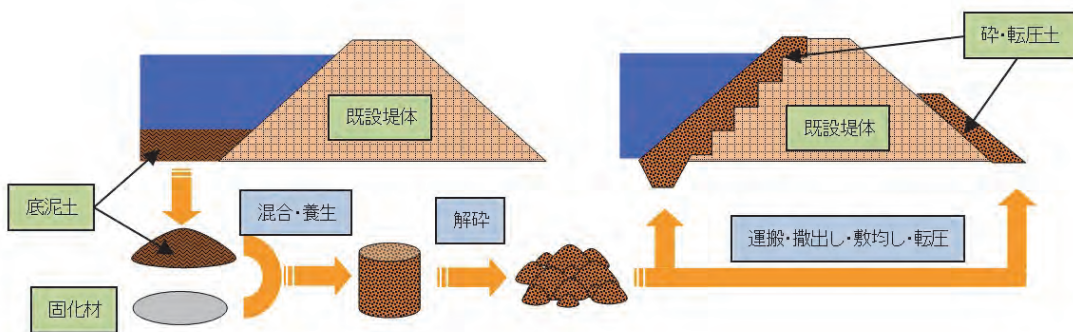


図2 砕・転圧盛土工法の概要

現在までにため池10箇所、フィルダム2箇所での施工実績がある。2007年に当工法により耐震改修工事が竣工した菜切谷池(宮城県加美郡)においては、先の東北地方太平洋沖地震直後に実施した被害調査においても堤体には損傷が全く見られなかったことから、その耐震性の高さを確認している。本工法の最大の特徴は、改良土としての強度を維持しつつ、一般の堤体土と同等の変形性能を有することで耐震性能を向上させることに加え、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ことで、低拘束圧領域においても強度を発揮する為、侵食にも強いことが挙げられる。

§ 3. 耐侵食性能実証試験

土質の相違による侵食への影響を調べるために、堤防模型を使った越流試験および矩形の供試体を使った侵食試験を実施し、それぞれの土質の耐侵食性能を評価した。

3.1 越流試験

今回の津波災害で新たに注目を集めることになった、裏法面(陸側法面)の侵食を調べるために、堤防模型に孤立波を複数回越流させる越流試験を実施して耐侵食性について調査した。

1) 越流試験の概要

小型越流試験は造波水槽を使用して図3に示すような堤防模型に孤立波を複数回越流させて、その越流回数と試料の流失量の関係を求めた。津波はその波高が120mmの孤立波であり、別途実施した計測結果から最大越流速度 $v \approx 115\text{cm/s}$ である。堤防模型の表法面(海側法面)～堤防天端は金属製とし、裏法面を含む陸側堤体を4種類の土質試料で作製した。試験状況を写真1に示す。

2) 供試体の作製

越流試験に使用した試料は海砂(浜岡砂)、粘土(藤森粘土)、混合土(浜岡砂と藤森粘土を乾燥重量比で1:1.0に混合したもの)、砕・転圧土(藤森粘土を原料にセメント系固化材で改良したもの)の4種類とし、それぞれの試料の粒度分布は図4に示す通りである。

試料のうち、海砂は含水比 $w=5\%$ 、粘土は $w=40\%$ 、混合土は $w=20\%$ に含水比調整したものを堤防型モールド内で転圧して供試体を作製した。砕・転圧土は $w=60\%$ に調整した藤森粘土にスラリー状の固化材(セメント系一般軟弱土用)を添加・混合し、3日間養生モールド内で養生した後、最大粒径 D_{max} が約10mm角になるようストレートエッジを用いて砕いてから堤防型モールド内で転圧して作製し、さらに7日間養生してから試験を実施した。固化材添加量に

ついては実施工での適用を考慮して、粘土 1m^3 に添加・混合する固化材の質量として ΔMc を定義し、越流試験時の一軸圧縮強さが $q_u \approx 150\text{kN/m}^2$ になるように、 $\Delta Mc=110\text{kg/m}^3$ (藤森粘土 1m^3 に対し固化材110kgと水110kgを添加して混合)とした。

それぞれの供試体は2.5kgランマーを使用して、標準突き固めエネルギーの50%($E_c \approx 276\text{kJ/m}^3$)で突き固めた後、端面を整形して作製した。

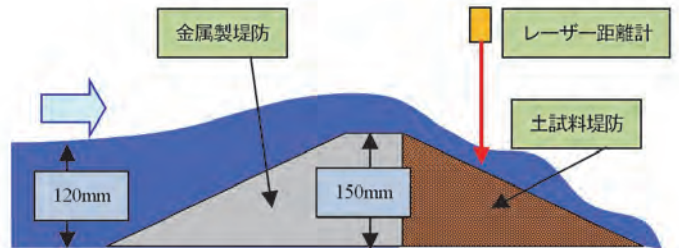


図3 小型越流試験の概要

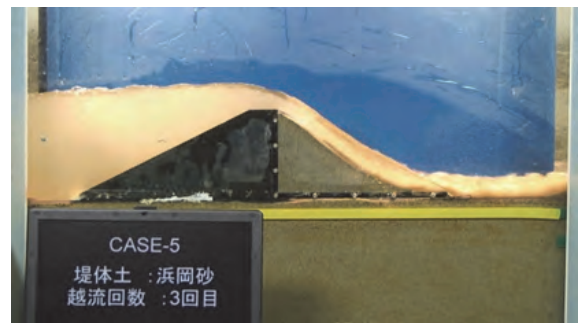


写真1 小型越流試験の状況

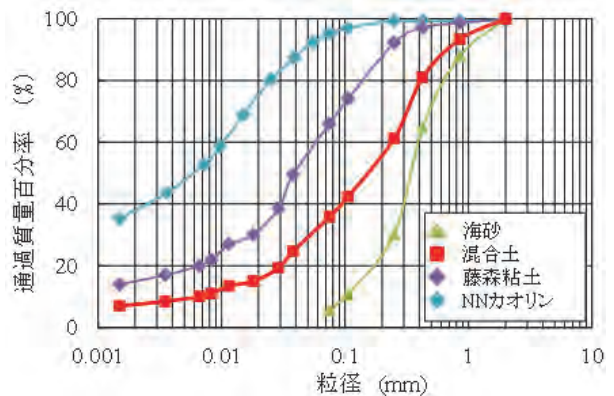


図4 各種土質資料の粒度分布

3) 試験結果

供試体の流失量の測定はレーザー距離計を使用して所定の越流回数ごとに測定した。供試体上部に水平なメッシュ板を設置し、任意の地点から供試体表面までの距離を測定することにより、三次元的に供試体体積を測定し、初期状態との差分を流失量として推定した。試験結果を図 5 に、試験後の供試体を写真 2 に示す。

図 5 から海砂は越流回数 N=3 回で堤体積の 30% 以上が侵食されて流失していることがわかる。また、一般的な堤防土に近い粒度だと思われる混合土については N=20 回で 10% 強の侵食に留まっているが、越流した波浪が流下して剥離する法尻部分の侵食が激しく、基礎部分が今回の実験のように金属でなく普通の地盤だった場合、さらに侵食が進行すると予想される。一方、砕・転圧土はほとんど損傷が見られず、高い耐侵食性能を有することを示している。

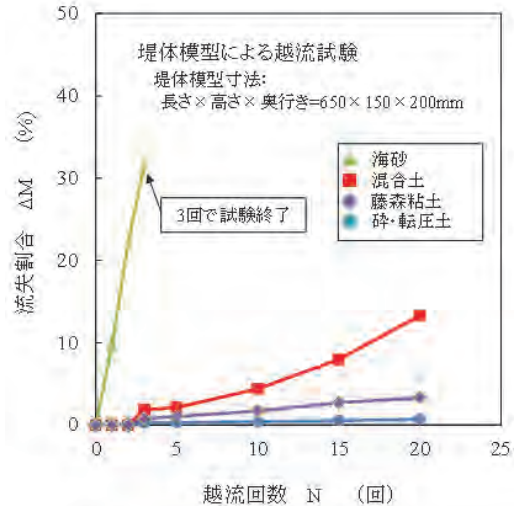


図 5 越流回数～流失割合関係(小型越流試験)

3.2 侵食試験

越流試験結果から海砂や混合土と比較して、砕・転圧土が侵食に対して強いことが定性的には評価できたが、孤立波による越流時間は 1 秒程度であり、侵食量の計測等を実施した場合、最大で 5 分程度の時間が開くことになる。このような場合、海砂のような透水係数の大きな試料では一度不飽和状態に戻るため強度が回復し、連続的に数分～数十分の越流状態が継続する実際の津波と比較した場合、耐侵食性能を過大に評価する可能性がある。また、侵食に及ぼす影響が大きいとされる引張り強度と侵食速度の関係も越流試験だけでは評価できない。そのため、一定流速の水流を連続的に供試体に供給できる侵食試験装置を新たに作製し、土質や強度を変えた砕・転圧土を対象に侵食試験を実施し、流速～侵食速度の関係を調査した。

1) 侵食試験の概要

侵食試験は鈴木ら(1984)^{5,7)}を参考に図 6 に模式的に示すように、矩形断面のパイプ底面に供試体格納箱を設置した後、パイプ内に所定の流速の水を流すことにより実施した。侵食量に応じて格納箱下部の底板をジャッキアップすることにより上方へ押し上げ底板の押し上げ速度=侵食速度として、それぞれの供試体における流速と侵食速度の関係を調査した。

なお、底板の押し上げ速度の制御については侵食面が水平かつ滑らかとは限らないのでレーザー変位計等での自動制御は困難と判断し、目視により押し上げ速度を制御した。供試体をセットし所定の流速に達した後、供試体の押し上げ速度を調節しながら目視で押し上げ量と侵食量が平衡していることを確認し、約 2 分間その状態を保持することにより侵食速度を測定した。試験の状況を写真 3 に示す。

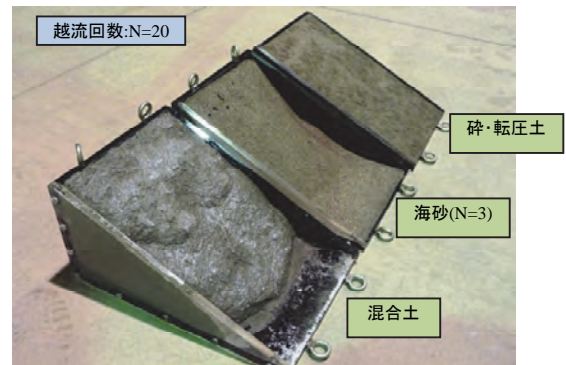


写真 2 小型越流試験後の供試体

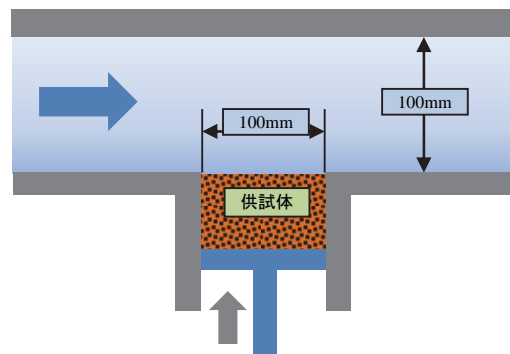


図 6 侵食試験装置の概要



写真 3 侵食試験の状況

2) 供試体の作製

侵食試験に使用した試料は越流試験と同様の混合土と NN カオリン粘土を原料とした砕・転圧土の 2 種類とした。砕・転圧土は $w=100\%$ に調整した NN カオリン粘土にスラリー状のセメント系固化材を添加・混合し、3 日間養生モールド内で養生した後、最大粒径 D_{max} が約 10mm 角になるようストレートエッジを用いて砕いてから供試体格納箱 (L100mm×W100mm×H100mm) と後述の強度試験用供試体モールド ($\phi 50\text{mm}\times H100\text{mm}$) 内で転圧して作製し、さらに 7 日間養生してから侵食試験および強度試験を実施した。今回の実験では侵食速度に及ぼす強度の影響を調査するために、 $\Delta Mc=75, 100, 125, 150\text{kg/m}^3$ の 4 種類を作製した。それぞれの試料は越流試験と同様に、標準突き固めエネルギーの 50% ($E_c \approx 276\text{kJ/m}^3$) で突き固めた後、端面を整形して作製した。

3) 試験結果

混合土の流速～侵食量関係を図 7 に、強度を変えた砕・転圧土の流速～侵食量関係を図 8 に示す。全体にばらつきが大きいのは、供試体作製時に 6 層に分けて突き固めを実施したために、深さ方向に完全に均一な供試体を作製するのが困難だったこと、侵食形状により管内の乱流が増長され、供試体表面の流速が不均一であったこと等が要因として考えられる。しかしながら流速が大きくなると侵食速度が大きくなる傾向は明らかで、それぞれの強度の供試体に対して流速～侵食量関係は曲線で近似できると考えられる。この図から近似曲線が x 軸と交わる点、すなわち侵食速度 $E=0$ (侵食限界流速) が存在することがわかり、その値は固化材添加量 (=強度) に依存すると考えられる。

3.3 一軸圧縮試験と単純引張り試験

実施時の品質管理では、引張り強度による確認は困難で、一般に用いられる一軸圧縮強さとの関係を明らかにする必要があると思われる。上記の供試体作製方法で作製した砕・転圧土の強度試験用供試体を使用して、一軸圧縮試験および単純引張り試験を実施した。両試験とも $\phi 50\text{mm}\times H100\text{mm}$ の供試体を使用し、一軸圧縮試験はひずみ速度 $0.5\%/\text{min}$ で圧縮ひずみを与えてせん断した。また、単純引張り試験は供試体の上下端部約 2cm を引張り試験器具に石膏を使用して固定し、ひずみ速度 $0.05\%/\text{min}$ で引張りひずみを与えてせん断した。

これらの試験結果を圧縮強さ～引張り強さグラフ上にプロットしたものが図 9 である。この図からも分かるように圧縮強さと引張り強さの間に一次関数の関係が認められることが分かる。

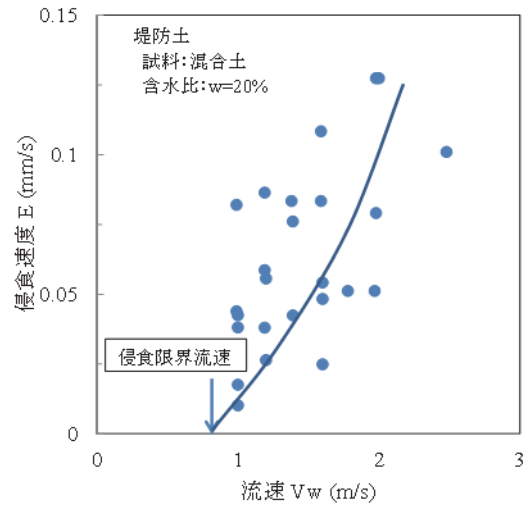


図 7 侵食試験結果(混合土)

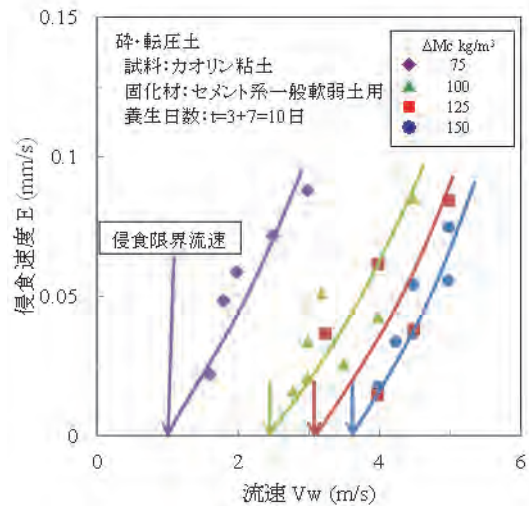


図 8 侵食試験結果(砕・転圧土)

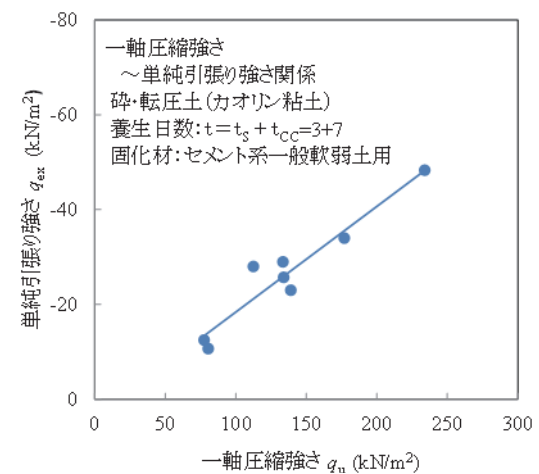


図 9 一軸圧縮強さ～単純引張り強さ関係

§4. 目標強度の設定方法

4.1 砕・転圧土の強度制御について

砕・転圧土の強度は固化材による化学的なセメンテーションによる場所が大きいため、固化材の添加量により制御が可能である。また、砕・転圧土は養生日数の増加に伴って発現する強度が増加する性質を示す。この増加傾向は固化材を添加してから 7～10 日程度で最終強度の 80%程度に達し、以後の増加傾向は緩やかになるため、目標強度の設定には固化材を添加してから 10 日目(砕いて転圧してから 7 日目)の強度を使用する。

4.2 目標強度の設定方法

砕・転圧土の目標強度の設定方法については、まず津波による堤防越流の危険性のある地点において、レベルⅡ地震により想定される津波に対して、既設の堤高(嵩上げ計画がある場合は嵩上げ後の堤高)と予想津波波高から堤防天端における流速および越流水深を予測する。次に堤防の断面形状から津波が堤防を越流する際の最大流速を予測し、この予測最大流速に対して侵食限界流速が大きくなるように砕・転圧土の目標強度を設定する。砕・転圧土は締固め機械で 1 層ずつ転圧して仕上げるため、一般的には堤高 5m の堤防の場合、保護層あるいは盛土層は水平幅で 2m 以上、堤高 10m では 4m 以上は必要であり、垂直厚さではそれぞれ 1～2m 程度は確保される。このため、想定を超える水流速が発生して侵食が始まっても直ちに決壊に至る可能性は低いと考えられる。

このように既設の堤防に耐侵食性能の付加を目的とした改修を実施することで、例えば津波が堤防を越流しても侵食に耐え、直ちに決壊に至らない堤防構造へと改良することができる。

§5. おわりに

一連の試験の結果、砕・転圧土は一般的な堤防土に比較して耐侵食能力が高いことがわかった。また、侵食速度～引張り強度～圧縮強度の間には明確な関係が認められた。このような性質を持つ砕・転圧盛土を使用することで、既設の堤体に耐侵食性能を付加でき、一気に破壊に至る可能性を低減することができる。また、近年ではその廃棄場所の確保が困難になりつつある港湾の浚渫土砂等の超軟弱土を原料とできるため、資源の有効利用が可能である。

一方、先に指摘したように孤立波による越流試験と

連続的水流による侵食試験では供試体の飽和条件の相違に加え、侵食試験では一定に保てる流速が越流試験では変化することなど、試験条件の相違が挙げられる。このため、侵食を支配するパラメータについて同等に比較はできないが、飽和状態での引張り強度と流速が大きく影響を及ぼしているのではないかと推察できる。また、今回の一連の試験では各種の築堤材料の適用性を比較したものであり、相似則を用いた厳密な越流回数の検証はしておらず、今後はこのような点も踏まえて研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 海岸における津波対策検討委員会 (2011): 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, 9p.
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 (2012): 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (第 2 報), 国総研技術速報 No.3, 21p.
- 3) 農業農村整備情報総合センター (2007): ため池改修工事の効率化 設計・施工指針 (案), 農業農村整備情報総合センター, 125p.
- 4) 農業農村整備情報総合センター (2009): 砕・転圧盛土工法によるフィルダム堤体改修 設計・施工・積算指針 (案), 農業農村整備情報総合センター, 234p.
- 5) 鈴木幸一・檜谷治 (1986): 洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究, 文部省科学研究費自然災害科学総合研究班 No.A-61-5, pp.75-77.
- 6) 関根正人・藤尾健太・片桐康博・西森研一郎 (2002): 粘性土の侵食速度に及ぼす粘着力の影響, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.641-646.
- 7) 藤井裕之・首藤伸夫・堀田新太郎・高木利光 (2010): 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.

ひとこと

当 FRESH BANK 工法が国土強化の施策の一つとして寄与できるのであれば土木技術者冥利に尽きる幸甚ではあるが、一方、4 人の助っ人がそれぞれ個人タイトルを獲れるほど活躍しているにも関わらず 9/17 現在で 3 位に甘んじている事実は受け入れがたい不幸である。



北島 明