

技術報文

Bangladeshにおける農村道路の 波浪侵食対策に関するパイロット試験

(独) 農業食品産業技術研究機構 農村工学研究所 松島健一 毛利栄征 堀 俊和 有吉 充
 農林水産省 中澤克彦 山田耕士

1. はじめに

世界最大のデルタ地帯を有する Bangladesh は、国土の 70% が海拔 7m 以下であり、洪水による波浪侵食が極めて深刻な問題となっている。写真-1 に示すように脆弱な農村インフラ施設（農村道路、橋梁、居住区、水門等）は、人命・財産を守れないばかりか、経済活動の停滞、施設改修費の増大を生み、貧困の悪循環を招いている。2007 年の大洪水では 1,300 万人以上が家屋を失っている。さらに、地球規模の気候変動に伴う渇水と洪水の極端現象、地球温暖化に伴う海面上昇はますます状況を悪化させている。将来、起こりうる最悪のシナリオを回避し、貧困問題を解決するには、持続的な社会の構築が不可欠であり、災害に強い農村インフラ整備を早急に推進する必要がある。現在、農村インフラの質的強化は、Bangladesh 政府と開発援助国の共通の課題となっている^{1),2)}。

この一環の取組みとして、筆者らは波浪侵食による農村インフラの被害防止・軽減を図ることを目的に、①現地で入手可能な材料と、②人力を主体とする施工技術を組み合わせた波浪侵食対策工の開発に着手した。本報では、湛水により激しい波浪作用を受ける農村道路を対象として、写真-2 に示す扁平状の大型土嚢を法面に傾斜して積層する工法（以下、土嚢積層工法^{3),4)}と呼ぶ）を適用したパイロット試験について報告する。なお、本成果は Bangladesh 政府の要請に基づき JICA を通じた技術協力により得られたものである。

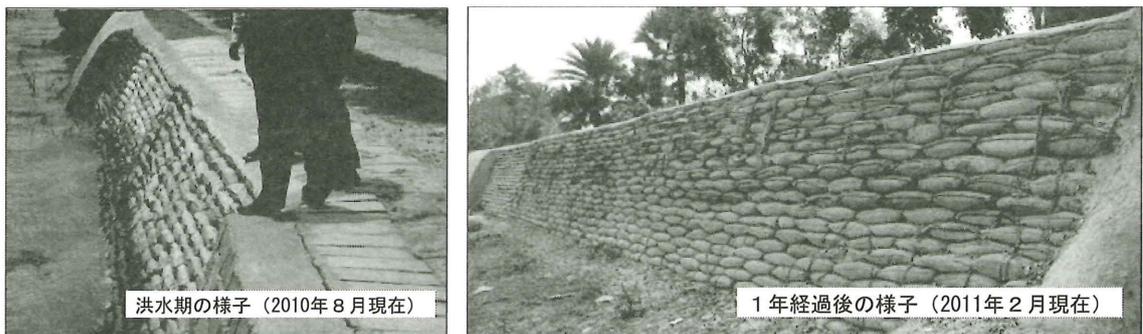


(a) 農村道路

(b) 橋梁アバットのアプローチ部

(c) 陸上での移動手段を奪われた住民たち

写真-1 波浪侵食による深刻な被害事例



洪水期の様子 (2010年8月現在)

1年経過後の様子 (2011年2月現在)

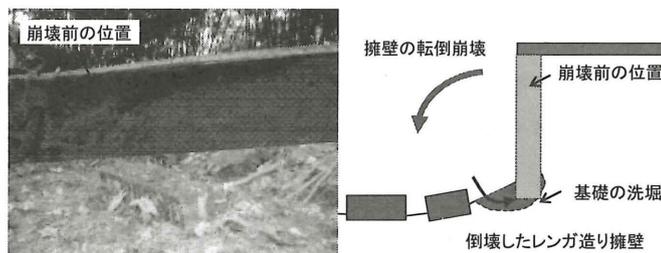
写真-2 土嚢積層工法による農村道路の波浪侵食対策

(1) 厳しい自然環境

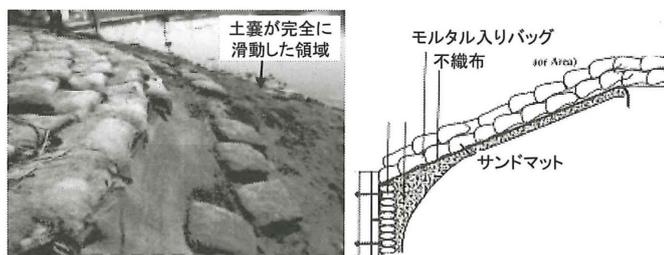
広大なデルタ地帯には網の目のように無数の河川が流れ込み、繰り返しの氾濫により土砂が堆積した自然堤防と低地の後背湿地が入り組んだ地形が形成されている。人々は僅かな土地の高低を利用し、自然堤防に居住区を築き、後背湿地に水田を開拓してきた。平年並みの洪水は肥沃な土壌を水田に運び込み、豊かな農地を育むが、10年に1度発生する大洪水では、国土の1/3以上が水没し、あらゆる施設が侵食される⁵⁾。洪水期間は2～3ヶ月間に及ぶため、絶え間なく波浪による侵食作用を受ける。特に、風走距離が長く、風速が強い地域では、土質的に侵食に弱い氾濫堆積土（シルト質砂）で構成される道路盛土、橋梁アバットのアプローチ、自然堤防などに顕著な被害が発生し、繰り返しの補修が必要となっている⁶⁾。

(2) 従来波浪侵食対策

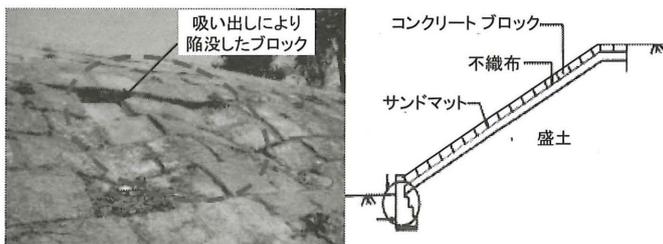
バングラデシュの道路設計基準⁷⁾にはいくつかの波浪侵食対策工が提示されているが、それぞれの対策工の耐久性が評価されておらず、波浪強さに応じた適切な設計が実施できない。その結果、厳しい波浪条件では1～3年も経たないうちに崩壊を引き起こされる。図-1に波浪侵食による典型的な崩壊事例を示す。図-1(a)は、レンガ造りの擁壁が転倒崩壊した事例である。擁壁のつま先部の洗堀や擁壁背面の排水対策が不十分であったことが原因と考えられる。図-1(b)は法面に沿って敷き並べた土嚢が完全に滑動した事例である。土嚢と法面の間に敷設された不織布との間の摩擦抵抗力は低く、波浪による掃流力に対して十分な滑動抵抗力が確保されていない。図-1(c)は、張りブロック背面の裏込め材が吸い出された事例である。張りブロックは盛土を構築した後に設置されるため、法面表層付近は転圧が困難で、締固め不足の問題を抱える。このため、浸水時に盛土が沈下し、張りブロックと法面の間に隙間が生じやすい。また、張りブロック背面に排水性が十分に確保されていなおらず、盛土内に過剰間隙水圧が残留しやすい。このため、張りブロック背面の裏込め材が繰り返しの波浪により流動化し、吸い出されたものと推察される。このような被害は全国各地で見られ、損傷を受ける施設数が膨大なため、補修が追い付いていない。また、損傷した道路が手付かずのまま取り残されているため、地域経済に深刻な影響を及ぼしている。農業関連では、農産物を出荷できない、傷んだ路面のため運搬時に荷傷みがひどく、商品価値が著しく低下するなどの問題が起きている。これらの問題は、新聞やTVでも大きく取り上げられているが、本質的な解決策を見出せていない。



(a) 擁壁の基礎底部の洗堀により転倒崩壊した事例



(b) 法面上に設置した土嚢が滑動崩壊した事例



(c) 張りブロック背面の裏込め材が吸い出された事例

図-1 バングラデシュにおける典型的な侵食崩壊事例

2. ジュート繊維によるセメント固化処理土の脆性の改善効果

現地資材を有効活用する観点から、世界第2位の生産量を誇るジュートの利用方法を日本国内で検討した。本節では、伸度が少なく強度が最も高い天然繊維であるジュートの特長に着目し、ジュート繊維によるセメント固化処理土の改良効果について調べた。なお、繊維補強による改良効果には、①変形に対する追従性、②強度増大効果、③耐侵食性の向上効果などが挙げられる。

(1) 実験方法

ジュート繊維の形態や混入率の違いによるセメント固化処理土の改良効果を把握するため、一軸圧縮試験 ($\phi=100\text{mm}$ 、 $h=200\text{mm}$) を実施した。母材には、バングラデシュの試験工区の現地発生土（シルト質砂、 $D_{50}=9.0\times 10^{-4}\text{mm}$ ）の粒度分布に近いクレイサンド ($D_{50}=8.7\times 10^{-4}\text{mm}$) を使用した。固化材にはセメント系固化材（タフロック 3：住友大阪セメント社製）を使用した。セメント添加率は母材の乾燥重量に対して 6.0%、10.0%とした。混合したジュート繊維は、長さ・撻り方が異なる紐状のタイプと綿状のタイプの計5種類を用いた。ジュート繊維の混入率は母材の乾燥重量に対して 1.0%から 6.0%の範囲である。供試体の作製は図-2に示すように、①初期含水比35%のクレイサンドを5cm程度敷き均し、その上にジュート繊維を敷く。

これを3回繰り返してクレイサンドとジュートをサンドイッチ状に積層する。②人力（足踏み）で混ぜ合わせる。③所定のセメント量を添加する。④攪拌した後、⑤のジュート繊維を混入したセメント固化処理土を、⑥モールドに充填する。その後、20°Cの恒温室で10日間湿潤養生する。

(2) 実験結果

図-3にジュート繊維を混入したセメント固化処理土の典型的な試験結果を示す。ジュート繊維を混入した供試体は、繊維補強していない供試体に比べて、いずれも脆性的な挙動が改善されていることがわかる。このうち、紐状タイプは、ジュート繊維の混入率1.0%を上回らないと、強度が増加しないことがわかる。また、強度増加は圧縮ひずみが大きくなった段階で現れており、セメント固化処理土のピーク強度発揮時の圧縮ひずみに比べて、引っ張り補強効果が卓越して発揮されるひずみレベルはかなり大きい。一方、綿状タイプは、圧縮ひずみが小さい段階で高い引っ張り補強効果が発揮でき、セメント固化処理土がひずみ軟化以前に高い強度が得られる。また、紐状タイプに比べてジュート混入率1.0%で高い強度が得られている。これらのジュート繊維による改良効果の相違は、供試体内のジュート繊維は、供試体が圧縮される過程で、固化処理土の引



図-2 ジュート繊維を混入した供試体の作成方法

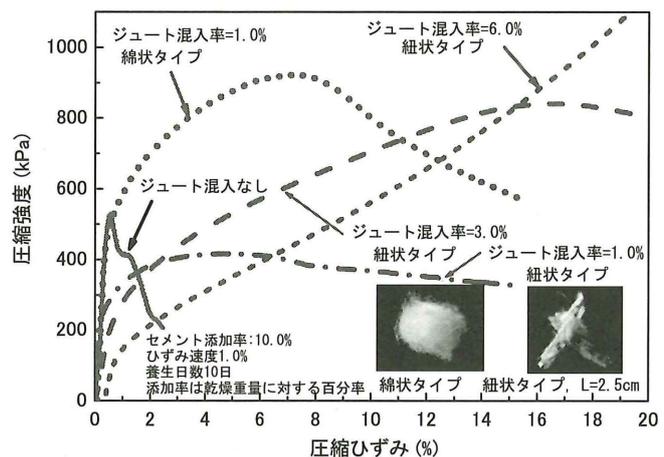


図-3 ジュート繊維を混入した供試体の試験結果

張ひずみ（主に水平方向に卓越）の発生をジュート繊維の引っ張り抵抗力によって抑制するが、この働きがジュート繊維の混入形態によって異なることが原因であると考えられる。

(3) セメント固化処理土に適したジュート繊維

図-4 にジュート繊維により引張り補強したセメント固化処理土の強度変形特性の概念図を示す。ジュート繊維を混入したセメント固化処理土は粘り強くなるが、セメント固化処理土のピーク強度時の圧縮ひずみは 1.0%前後に存在するため、これ以降を超えて發揮される強度増加は、ジュート繊維の引っ張り補強効果が主因であり、セメントで固化した部分は強度低下を引き起こし始める。

したがって、見かけ上、脆性的な挙動が消失するが、圧縮ひずみが大きくなると、局所的にせん断破壊が進行し、供試体には多数のクラックが発生する（図-4(d)の状態）。このようなクラックはセメント改良部分の中性化を早め、バクテリアによってジュート繊維が分解されやすくなる。この問題を改善するには、図-4(c)に示すように圧縮ひずみが小さい段階で高い引っ張り補強効果を發揮させることが重要であり、綿状タイプのように長繊維で、土との接触面積が大きいものを選定することが有効である。

なお、ジュート繊維は容易に生分解されるが、セメント固化処理土内では還元状態にあり、水分の移動が少ないため、バクテリアが発生にくい。このため、土壌にある場合に比べて分解速度が遅いと考えられる。現在、長期耐久性実験をスタートさせており、試験結果について別途報告したい。

3. パイロット試験

バングラデシュ国内での本パイロット試験は、農工研、JICA および農村インフラ整備を所掌する地方自治農村開発協同組合省地方行政技術局により計画が策定され、2009年12月～2010年2月の約2ヶ月間で施工を行った。技術移転に関する現地研修会には60名の現地政府関係者（主として、県及び郡の技術者）の参加があった。本パイロット試験では途上国における普及の可能性を見出すため、以下の項目について検討を行っている。

- ① 厳しい波浪条件で有効な対策技術であること。
- ② 現地で入手可能な資材を用い、人力施工を主体とした技術であること。
- ③ 技術移転が容易なこと。
- ④ 経済的に適用し得ること。

上記のうち、①については長期的なモニタリングが必要なため、本報告では主に②～④に関する事項について報告する。

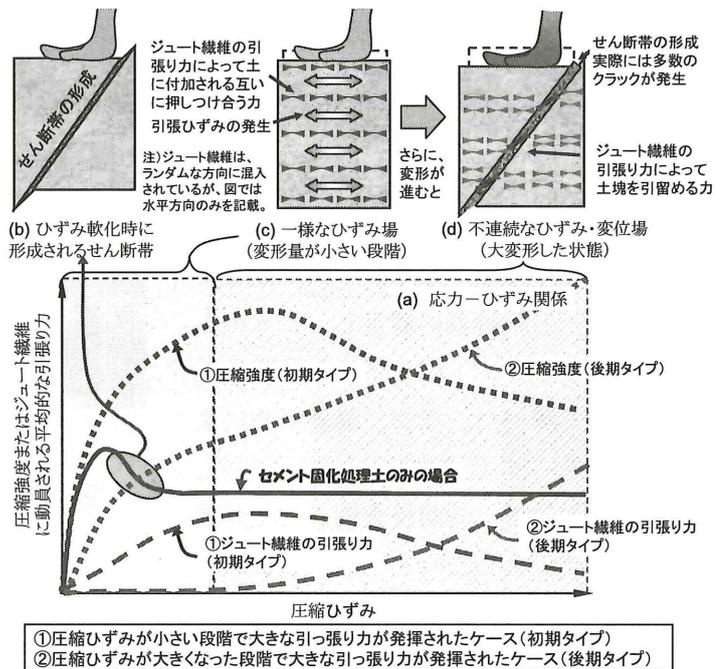


図-4 ジュート繊維により引張り補強されたセメント固化処理土の強度変形特性の概念図

(1) 試験工区の概要

パイロット試験は、図-5 に示すようにポッダ河（インド領ではガンジス川）とジャムナ河（インド領ではプラマプトラ河）の2大国際河川の合流地点からおよそ 2km 離れた Harirumpur 郡の農村道路を対象とした。同郡は洪水被害が極めて深刻で、1987 年の大洪水では13集落のうち3集落が壊滅し、5 集落の家屋や農村インフラのうち60%以上が損害を受けた。図-6 はパイロット試験工区付近の道路盛土の損傷状況である。毎年のモンスーン（西風）の発達により盛土法面に風波が衝突し、盛土断面の50%が波浪侵食により欠損している。盛土材には氾濫堆積物であるシルト質砂が用いられている。シルト質砂はデルタ地帯の典型的な現地土であるが、浸潤すると見かけ上の粘着力が著しく低下するため、極めて侵食を受けやすい土質材料である。



図-5 パイロット試験の位置



図-6 パイロット試験工区付近の損傷状況

図-7 に本パイロット試験における断面図および正面図を示す。盛土高 2.9m、勾配 1.0V: 0.6H であり、盛土法面には 26 段の土嚢が積層されている。施工区間は全長およそ 28.0m であり、総計 1,776 袋の土嚢を使用した。ジュートバック 980 袋を使用した区間 15.0m と、ジオシンセティックスバック 796 袋を使用した区間 13.0m（内すり付け区間 3.0m を含む）で構成されている。

(2) 設計上のポイント

1. (2) で説明した崩壊要因を踏まえて、本パイロット試験では次のような点に配慮した。
 - i) 基礎下部の洗堀を防止するため、3.3m の幅広な基礎を設け、木杭を打ち込み、コンクリートでキャッピングした断面構造を採用した（図-7(a)参照）。
 - ii) 法面部は、図-7(b)に示すように奥行き 850mm の長い土嚢を背面側に傾斜積層することで、擁壁としての安定性を確保し、摩耗や風化に対して余裕代を持たせた。
 - iii) 写真-3 に示すように土嚢間の隙間が盛土内の水抜き穴として機能する。排水経路は背面側に傾斜しているため、盛土内の水抜きは行われるが、盛土材が吸い出されにくい構造となっている（図-7(b)）。
 - iv) さらに、盛土材の吸い出しを防止するため、土嚢壁体の背面にはフィルター材（破碎レンガと砂の混合材）を配置した。

(3) 使用した土木資材

土嚢材はジュートおよびポリプロピレン製の織布（ジオシンセティックス）を用いた。写真-4 にパイロット試験で使用したジュートバックおよびジオシンセティックスバックを示す。ジュートバックはライスバック（穀物用麻袋、長さ 860mm、幅 560mm）で代替でき、大量に入手可能で安価な材料である。一方、ジオシンセティックスバックは高価な資材であるが、土中での耐久

性に優れるだけでなく、テールとウィングが連結した特殊な形状を採用することにより、盛土補強する効果が高い。そのため、大規模な盛土構築にも対応可能である。

a) バックの役割

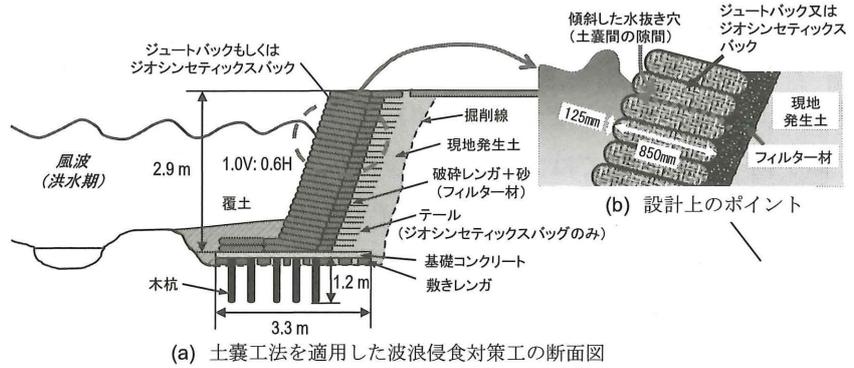
ジュートバックは天然素材のため、暴露状態では1年程度で生分解されるが、土質材料を主体とする壁体を構築する場合、本質的に締固めが重要であることから、型枠代わりに限定して使用した。一方、ジオシステティックスバックは、型枠としての機能に加えて、侵食防止および盛土補強としての役割が期待できる。

ただし、日光が照射する法面表層部分は紫外線による劣化が避けられないため、長期的に土嚢材が破けて中詰め材が露出する。そのため、ジュートバック、ジオシステティックスバックとも中詰め材にはセメント固化処理土を使用した（ジュート繊維入りセメント固化処理土の使用区間を一部含む）。母材には礫材の入手が困難なため、購入砂もしくは現地発生土（シルト質砂）を使用した。セメント添加量は波浪強さに応じて実験的に求める必要があるが、本報では現地の経済性を加味し、表-1に示す配合で実施した。なお、同一強度を得るために必要なセメント添加量は、同表の一軸圧縮試験結果に示すように購入砂の方が現地発生土よりも少ないため、トータルコストで安価であった。

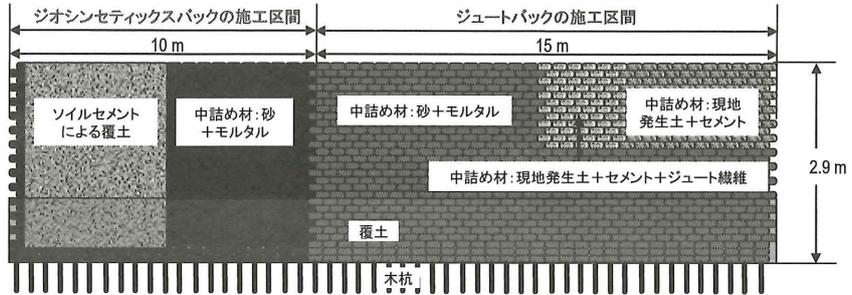
b) その他の資材（写真-5参照）

上記以外に使用した資材としては、木杭（φ=80mm、L=1.2m、計290本）、ジュート繊維（L=5.0cm）、敷きレンガおよびフィルター材（破碎レンガと購入砂を体積比2:1で混合したもの）である。

いずれも現地で入手可能な材料である。破碎レンガとはレンガを人工的に破碎したもので、礫材



(a) 土嚢工法を適用した波浪侵食対策工の断面図



(c) 正面図（すり付け部3m区間を含まず）

図-7 土嚢積層工法を適用した道路盛土の波浪侵食対策

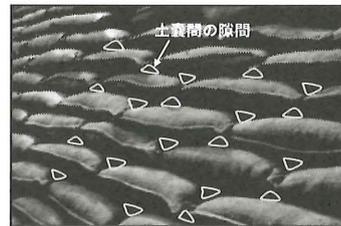
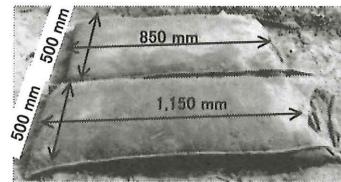
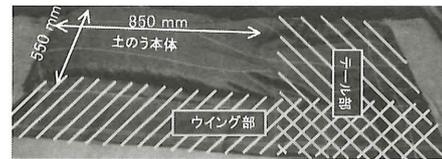


写真-3 土嚢間の隙間（水抜き穴）



(a) ジュートバック



(b) ジオシステティックスバック

写真-4 パイロット試験に使用した土嚢袋

表-1 土嚢の中詰め材のセメント添加量と圧縮強度

中詰め材の種類	単位セメント量 (kg/m³)	20日室内養生後の一軸圧縮強度
購入砂+セメント 体積比(6:1)	283	2,800kPa
シルト質砂+セメント 体積比(4:1)	395	1,500kPa

の代替材として一般的に使用されている。施工時の主な機材は、土砂運搬用のバスケット（頭部に乗せて運ぶ籠）、突固め具（タコ突きに類似した道具）、モルタルミキサー、人力車およびショベルであり、これらも現地調達可能である。

(4) 土嚢積層工法の施工手順

図-8 に土嚢積層工法の施工手順を示す。①侵食により緩んだ盛土部分を人力で掘削する。②竹で櫓を組み、質量 100kg の重錘を落下させて木杭を基礎地盤に打ち込む。杭頭は、基礎コンクリートとの一体化を図るため、基盤から高さ 160mm を残す。③木杭間にレンガを敷き、基礎コンクリートを打設する。④ベースの土嚢を設置する。⑤法面部は土嚢を背面側に 18 度以上傾斜させて積層し、突固め具で十分に締固めを行う。背面にはフィルター材と盛土材を撒き出し、転圧を行う。⑥土嚢法面を構築した後、法先部を覆土する。上記の施工手順で特筆すべき点は、写真-6(a)に示すように土嚢を十分に転圧することで、セメント固化処理土が密実化し、改良効果が高まること。さらに、土嚢の壁体を構築してから裏込め材を転圧するので、法面前方に裏込め材が崩れることがなく、効果的な締固めが行える（写真-6(b)）。また同時に、土嚢高さ（125mm）ごとに転圧を行うので、確実な締固めが実施できることである。これにより、従来工法の課題であった法面表層の締固め不足の問題を解消することができる。

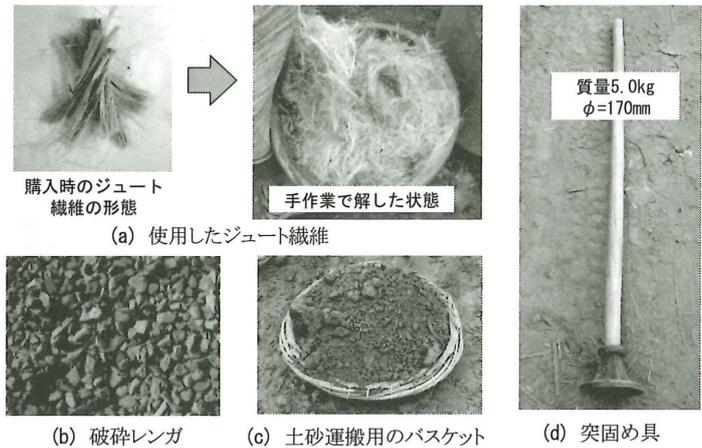


写真-5 現地で使用した主な資材および機具

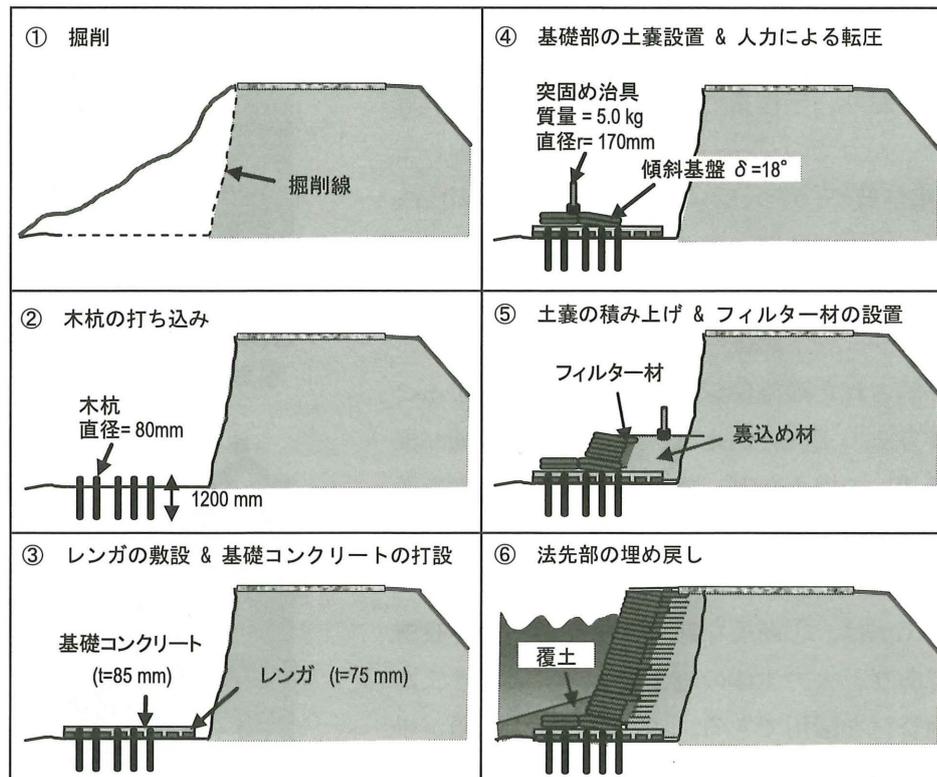


図-8 土嚢積層工法の施工手順

a) 施工・品質管理

本パイロット試験では、盛土の品質を確保するため、以下のような施工・品質管理を実施した。

① 裏込め材の締固め管理（写真-7 参照）

現地の突固め具を用いて現場転圧試験を実施し、裏込め材の締固め管理基準（落下高さ 30cm で 5 回とした）を定めた。

② セメントと母材の配合管理

土砂運搬用のバスケットの利用し、モルタルミキサーへの投入回数を規定することで、セメント配合量を管理した。

③ セメント固化処理土の養生方法

セメントの固結力を発揮させるため、セメント固化処理土を作成後、中詰め、運搬、設置、転圧の一連の作業を 40 分以内に終わるよう施工管理を行った。また、水分の蒸発散によって土嚢内のセメント固化反応が阻害されないよう、定期的に水打ちを行い、湿潤状態を保った。

④ 現地発生土の品質管理

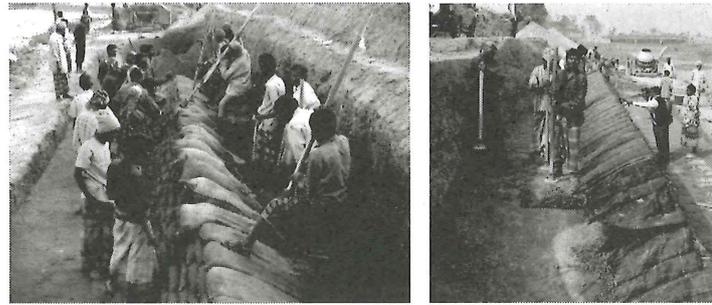
セメントとの攪拌精度を向上させるため、現地発生土に残存するブロック状の土塊を 1~2cm 以下になるように解して使用した。

b) ジュート繊維の利用に当たっての留意点

購入したジュート繊維は、写真-5(a)のように繊維が束状になっており、手作業での解し作業を要した（写真-8）。また、人力でのジュート繊維と母材の攪拌作業は、作業効率が低く、かつ、ジュート繊維の混入率 1.0% を超えると、多大な時間と労力を要した。そのため、現地試験ではジュート繊維混入率を 0.75% に低く設定した。今後、ジュート繊維を使用するに当たっては、①繊維束が解された形態のジュート繊維を選定すること、②攪拌方法の工夫、例えば、レンガ工場の練り混ぜ機（写真-9）の導入など、施工方法等の作業性を改善していく必要がある。

(5) 土嚢積層工法のメリット

土嚢積層工法は、①高度な施工技術や特殊な建設機械が不要であり、人力主体の施工技術で実施でき、かつ、②現地資材を活用できる。また、③施工手順が単純なため、技術移転が容易であり、④良く締固めた盛



(a) 土嚢の締固め状況 (b) 裏込め材の締固め状況
写真-6 盛土の締固め作業



写真-7 現場転圧試験の様子



写真-8 ジュート繊維束の解し作業



写真-9 レンガ工場の練り混ぜ機

土を構築することができる。さらに、⑤土嚢積層工法は、急勾配盛土を構築できるため、建設用地を大幅に節約できる。仮に、バングラデシュ国内の道路延長 25 万 km に適用した場合、平均盛土高 2.5m として、法面勾配 1.0V: 2.0H から 1.0V: 0.6H に変更した条件で、25 万 ha の農地が創出できる。このことは人口過密と栄養不足の問題を抱えるバングラデシュでは、極めて重要な意味を持つ (写真-10)。

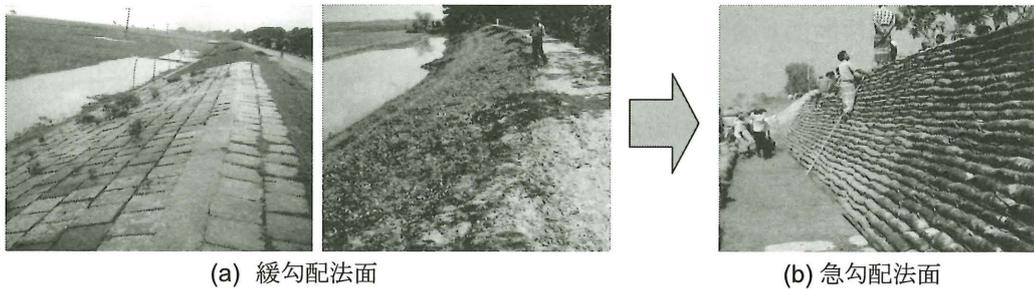


写真-10 農地創出のイメージ

(6) 経済性の検討 (パイロット試験を実施した 2009 年 12 月時点の単価を用いた試算)

土嚢積層工法 (穀物用麻袋 (いわゆるライスバック)) と従来工法のコスト比較を行った。ここで述べる従来工法は低配合なモルタルを土嚢に詰めて、法面に沿って敷き並べる単純な工法であり、バングラデシュでは標準的に採用されているものである。図-9 に幅 1.0m、鉛直方向 1.0m に占める建設資材費の内訳を示す。従来工法は、低配合なモルタルを使用しているため、セメント資材費が低く抑えられている。一方、土嚢積層工法は擁壁としての控え長を確保し、かつ、従来工法のセメント配合率 1:8 (セメント:購入砂) よりも、セメント配合率 1:6 (セメント:購入砂) を高く設定しているため、セメント資材費が高くなっている。また、フィルター材 (破碎レンガと購入砂の混合材) は、吸い出し防止シート (不織布) よりも高価であった。そのため、総建設

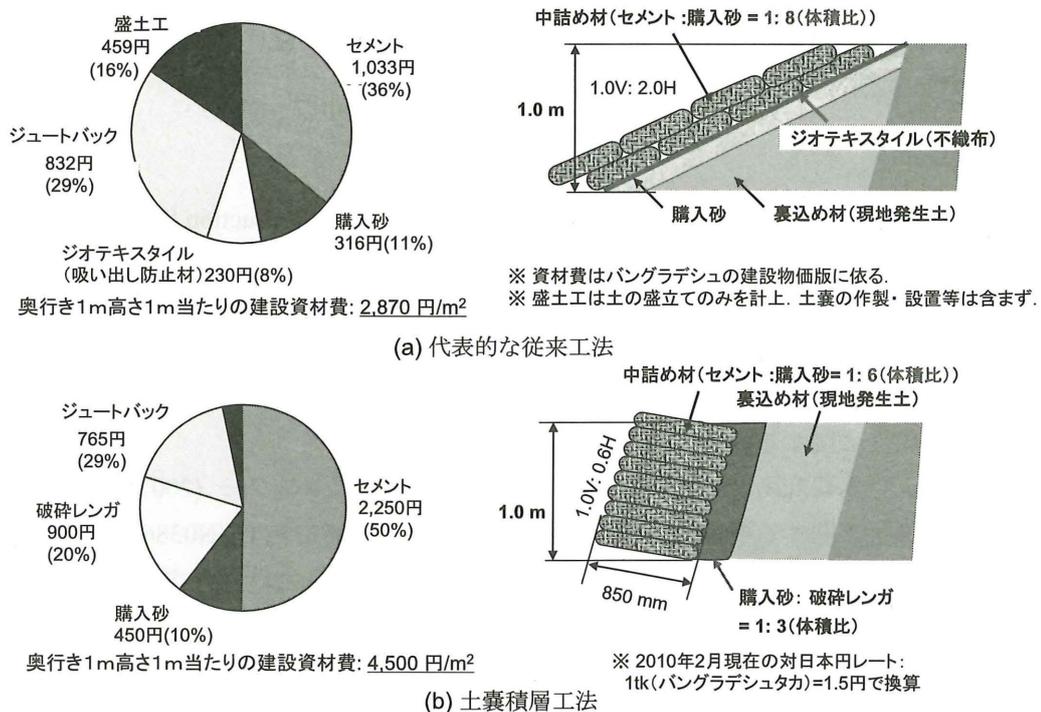


図-9 土嚢積層工法と代表的な従来工法のコスト比較結果 (建設資材費ベース)

資材費は従来工法の約6割増となった。なお、ジオシンセティックスバックを使用した場合、ジュートバックよりも高い耐久性が期待できるが、穀物用麻袋と比べて袋代が10倍程度の差があり（日本国での製造コストで試算（輸送費・関税を除く）、現時点ではコスト面の課題が残された。しかし、将来的に現地生産が可能になり、大幅なコストダウンが出来れば、有望な資材として期待できると考えられる。

次に、再建設費を含めたトータルコストで考えると、従来工法に比べて1.6倍以上の耐用年数が確保できれば、経済的に見合うことになる。現地技術者の聞き取りによると、厳しい波浪条件では、従来工法の耐用年数1～3年であったことから、1.6倍の耐用年数、目安として最大約5年が確保できれば、土嚢積層工法の方がトータルコストで有利になると判断される。

4. おわりに

バングラデシュでは波浪侵食による農村インフラの被害が極めて深刻であり、崩壊のたびに同じ方法で補修されるため、膨大な補修費が掛かっている。この問題を解決するには、各種対策工の有効性を調査分析し、構造的な欠点を改良することが重要となる。本報告では、いくつかの波浪侵食による崩壊事例から構造的ウィークポイントを抽出し、基礎の洗堀、壁体の滑動、裏込め材の吸い出しなどの抵抗力向上を図った土嚢積層工法を提示し、厳しい波浪条件にある農村道路の適用事例を紹介した。現地試験では、現地で入手可能な土嚢を型枠代わりに利用することで、盛土構築の本質である土質材料の締固め作業を、人力主体の施工で効果的に実施でき、従来工法に比べて急勾配な盛土を構築できることを明らかにした。さらに、ジュート繊維によるセメント固化処理土の改良効果を明らかにし、新材料としての利用の可能性を示した。今後、波浪侵食に対しては多くの検証が必要であるが、穀物用麻袋（いわゆるライスバック）を用いた場合、途上国での受け入れられる条件、①「現地で入手できる資材」、②「人力を主体とした施工技術」を満たしており、現地での③「高い耐久性」が確認されれば、道路盛土だけでなく、橋梁アバット部のアプローチ、輪中堤の建設などに普及が進められ、脆弱な農村インフラの強化策として活用を期待することができる。

参考文献

- 1) Government of the people's Republic Bangladesh (2005); "Poverty Reduction Strategy Papers PRSP"
- 2) 外務省 (2005); "バングラデシュ国別援助計画"
- 3) 毛利栄征, 松島健一, 堀俊和, 有吉充, 山崎真司, 龍岡文夫 (2008); "地震・洪水による堤体の災害と補強土工法による減災技術の開発", ジオシンセティックス技術情報, Vol.24 3, p.9-25
- 4) 松島健一 (2010); "ジオシンセティックスを用いた土質材料の補強メカニズムの解明と水利構造物への適用性に関する研究", 農工研所報 49, p.49-199.
- 5) 独立行政法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (2007); "バングラデシュにおける水災害に関する要因分析", 土木研究所資料 第4052号, ISSN0386-5878
- 6) 谷茂 (2007); "バングラデシュ国農村開発技術センター機能強化計画レポート 事前評価調査報告書", JICA バングラデシュ事務所
- 7) Government of the people's Republic Bangladesh (2005); "Road Design Standards-Rural Road-", Local Government Engineering Department (LGED) & Japan International Cooperation Agency (JICA).