バングラデシュ・デルタ地帯における 破碎レンガを有効活用した住民参加型農道整備

大東 優馬¹・福林 良典²・木村 亮³

¹ 学生会員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-581)

E-mail: daitou.yuuma.65r@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 特定非営利活動法人 道普請人 (〒600-8213 京都市下京区東塩小路向畑町 20-13)

E-mail: yoshinori.fukubayashi@coreroad.org

³ 正会員 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-581)

E-mail: kimura.makoto.8r@kyoto-u.ac.jp

バングラデシュの国土の大部分はデルタ地帯であり、雨季に未舗装農道は泥濘化し通行性能が低下する。本論文では農道通行性改善を目指し、沿線住民が実施可能な簡便な道路整備手法を検討した。廃棄処分されるレンガを破碎し土の中詰材と表層材に利用する手法を提案し、試験施工と雨季の状況確認から、施工性、単価、有効性を確認した。さらに破碎レンガや粘性土との混合物の、道路材料としての力学的特性を把握した。実践結果を他地域多様な条件下での適用に資するため、追加実験を行い、定量的な根拠に基づく施工手順を確立した。そのマニュアルをもとに、住民が提案手法による道路整備を継続し実施する準備が行われている。住民と NGO 等が連携し提案手法が運用されることで、これまで後回しにされてきた農道整備状況が改善される可能性がある。

Key Words: Bangladesh, delta, unpaved road, crushed brick, Do-nou technology, rural development

1. はじめに

バングラデシュはその国土の大部分がインド亜大陸のベンガル湾沿いに形成されたデルタ地帯で、地盤の 80% が粘性土で構成される。土壌は肥沃で水に恵まれ水耕に適しているが、洪水と旱魃の双方に対して脆弱ともいえる¹⁾。世界7位の人口を抱えその7割以上が農村に住む。1日2ドル未満で暮らす貧困層は国民の75%を超える約1億1800万人と推定されており、国連基準による後開発途上国に位置付けられている。一方で、マイクロクレジットの概念を創出したグラミン銀行の事例のように貧困削減に資する取組が精力的に国内外の NGO によって展開され、NGO の存在が今後の同国の発展に大きな役割を担っている²⁾。

公益財団法人 日本国際協力財団³⁾ (以下、(公財)日本国際協力財団) は、バングラデシュ西部の地方都市ラシャヒ市ゴダガリ郡で「包括的なアプローチによる村落開発事業」を実施している(図-1)。対象村は小作農の人々が借農地の周辺に居住し始めることで形成された。そのため村落としての歴史が浅く、集団活動を行うための自然発生的な組織構造が発展しておらず、地位と役割

が明確なリーダーが不在である。

(公財)日本国際協力財団事業担当者の調査によると、対象村落の平均月間世帯収入は全国平均と比較して低く、2010年統計の月間世帯収入の全国平均は17,827円⁴⁾であるのに対し、事業実施村では6,678円である。また、対象村落の教育水準も低く2011年全国平均識字率は55.1%⁵⁾であるのに対し、村民の識字率は20.8%であった。なお本論文では調査・試験施工実施時点(2014年

図-1 試験施工地点の周辺地図

11月)の為替レートで現地通貨を円に換算し示す。

この村落にて(公財)日本国際協力財団は市場志向型農業を普及し住民の現金収入向上に向けた事業を実施している。市場価値の高い作物を生産し、価格が高く設定される時期に良い品質で出荷することを目指す。はじめに従来は個別に活動していた村組織を束ね、農業組合を結成した。これは集団出荷を行い買手との販売交渉を優位に進め収入向上を図ることを目的としている。しかし、村落一帯は粘性土地盤上にあり、雨季には村落内の道路が通行不能となり、作物買取価格が高騰する時期に出荷できないことが大きな障害となっていた。

そこで(公財)日本国際協力財団より相談を受けた筆者らが、地域住民でも十分実施可能な道路整備技術を改めて提案し、それを農業組合との800mの試験施工を通して技術移転を行った。将来的に農業組合が自助努力により問題解決可能となることを目指す。

本論文では、デルタ地帯で住民グループが実施可能な農道整備手法を提案し、その実施、経過確認結果を示す。道路行政主導で施工業者主体による改修工事ではないので、安価で尚且つ人力中心の現地住民が活用しやすい手法が求められた。そこで道路整備手法は現地調達可能な材料の利用を前提とし提案を行った。次に、今後の提案手法の多様な条件下での適用を想定し、利用材料の強度特性の把握や施工手順の確立を目的とした実験の結果を示す。実践と実験から、開発途上国の村落開発事業で実施可能な、デルタ地帯における未舗装道路整備手法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章で現地道路状況、調達可能材料を調査し、破碎レンガと土のうを利用した道路整備断面を提案する。第3章では検討断面による試験施工結果をまとめる。第4章では施工中および施工後の住民による評価をまとめる。第5章で破碎レンガ単体や粘性土との混合材料の、土のう中詰め材、表層材としての材料特性に関する実験結果を示す。また、第6章では、途上国農村部住民参加による未舗装道路整備事業実施に際し、住民の参加促進、施工方法決定、住民による持続的な道路整備活動に向け工夫した点をまとめる。最後に、第7章にデルタ地帯における未舗装道路整備手法を提案し結論を示す。

2. 農道整備断面の検討

(1) デルタ地帯の対象農道

事業対象道路は村落内の作物集荷場から、アスファルト舗装の国道に接続する800mの未舗装道路である。対象道路は周囲の田畑より最大で1m高く先端幅3mを確保するような盛土構造となっている。地域に分布する粘土は石灰質灰色氾濫原土壌のカオリナイトを主要粘土鉱

図-2 整備対象道路の様子(2014年11月)

図-3 Fixed Chimney Kilnの概観

物とする粘性土⁹⁾であり、住民によれば、道路盛土は周辺の粘性土を道路用地に盛り、通行荷重を受け締め固められ形成された。本盛土は乾燥時には現行交通荷重を支持しうる路体が構築されている(図-2)。しかし、雨季には表層0.1m程度が雨水を吸水し含水比が上昇し、粘性土である表層は塑性または液性状態となり通過交通に乱され通行性能が大幅に低下する。一方で、対象道路の通行車両はトラクター、三輪車、バイク、牛車、自転車であり、三輪車以上の車両の走行は年間を通して1日当たり20台未満と非常に低い交通量である。

(2) デルタ地帯で入手可能な礫質材料

バングラデシュは国土の大部分がデルタ地帯であり、石や砂礫の国内での調達が制限される。建材には、石材の代替としてレンガが一般的に使用されており、首都ダッカの住宅建材の44%はレンガである。同国のレンガ生産量は中国に次ぎ世界第2位であり、年間生産量は約172億個にのぼり、レンガ生産が非常に盛んである。

国内には約5,000窯のレンガ焼成窯があり、その90%は石炭を燃料に用いる伝統的な煙突式の焼成窯(Fixed Chimney Kiln, 以下FCK形式窯)(図-3)である⁸⁾。新形式の天然ガスを燃料とし通気機能を向上させた焼成窯と比較して、FCK形式窯はエネルギー効率が悪く大気汚染の主要因となる。また、焼成の不十分な低強度のレンガ

が生産されやすい。しかし、レンガ生産は主に個人事業主により担われており、少ない投資で施工可能な FCK 形式窯を採用せざるを得ない状況にある。

表-1 に、事業地周辺に位置するレンガ生産工場 4 社からのレンガ生産、製品、流通に関する聞き取り調査結果を示す。4 社はいずれも FCK 形式窯を各々 1 窯所有する。

1 回のレンガ焼成過程につき、十分に酸素が供給されない等が原因で、3 段階に分別される品質のレンガが生産される。色合いおよび重量から品質が良い順にグレード A, B, C と分類される。高品質のレンガほど十分に酸化焼成が行われることで、赤色を示す。低品質になると全体が白色を帯びる、もしくは極端な黒色を示し、重量も低下する。1 回の焼成で生産される各グレードのレンガの出来上り率は、A から順に約 80 %, 10 %, 10 % となる。

焼成されたレンガのうちグレード A は大型建設工事に建設会社に利用され、それ以外は個人により住宅施工などのために購入される。また、輸送過程などでひび

表-1 バングラデシュで普及するレンガ材料の概要

材料		品質		
		高 グレードA	低 グレードB	低 グレードC
材料サンプル
費用 [円/m³]	正規品	4,805	3,812	2,791
	不良品	3,003	1,964	797
	出来上り率 [%]	78.7	11.9	9.5
	不良品率 [%]	5.2	8.4	10.5
主要購入者		建設会社 /行政	個人 (都市部)	個人 (農村部)
主要用途	正規品	公共工事/ 大型建設等	個人住宅等	牛舎等
	不良品	道路路盤材/ コンクリート 骨材	スラブ用 コンクリート 骨材	廃棄

図4 バングラデシュに普及するレンガ破碎機

割れが発生したレンガは不良品として安価で販売される。不良品は破碎され、コンクリート骨材や先述の路盤材料として使用される。図-4 は農村部でも普及するディーゼルエンジン駆動の二軸破碎機である。

しかし、グレード C の不良品については通常買手がつかず、工場内で廃棄されている。入手を希望する場合の売値を確認すると 1 社は無償で、その他 3 社は生産手間費用を少しでも調達したいとし、平均して 797 円/m³ (輸送費を除く) であった。また、輸送費は 2m³ 容量のトラクターによる 30km 圏内への輸送で、1 往復約 900 円であり、輸送費を含めた単価は 1,247 円/m³ となる。一方で、他国から輸入される砂質礫は輸送費を含めて 2,916 円/m³ であり、グレード C レンガと比較して非常に高価で尚且つ事業地においては安定的な供給が見込まれない。

(3) 地方道路整備規格

農道整備断面の検討に際し、まず既存のバングラデシュ国地方道路の施工基準を参照した。地方道路最小規模クラスの標準道路断面を図-5⁹⁾に、材料規定を表-2¹⁰⁾に示す。本基準は幅員 3.0 m で、8 トントラックもしくは 10 人乗り規模の乗合バスの日交通量が 50 台未満の道路に対する規定である。

上層路盤および基層には、破碎レンガに細砂を混合し規定された粒度分布の範囲内に収まるよう粒度調整した材料を使用する。レンガ材は一軸圧縮強度が 14N/mm² 以上の最高品質レンガ (グレード A) のみが利用可能である。また、各層を構成する材料の CBR 値、すりへり減量値基準が設けられている。この基準を満たすよう、上

図-5 最小規模の地方道路の施工断面⁹⁾

表-2 施工基準における材料基準¹⁰⁾

	材料	基準 CBR値	基準 締固め度	すりへり 減量
表層	アスファルト舗装	-	-	-
基盤	破碎グレードAレンガ+細砂	80%	98%	30%
上層路盤	破碎グレードAレンガ+細砂+がれき類(リサイクル材)	30%	98%	32%
下層路盤	細砂	8%	98%	-
路床	現地の粘土材料	4%	98%	-

層地盤には破碎レンガに加えてコンクリートガラなどの配合が認められている。

下層路盤から基層までの施工単価は 1,993 円/m² (人工代を含めた総額) , 設計耐用年数は 10 年である⁹⁾¹⁰⁾。

(4) 対象道路整備断面の提案

対象道路は施工基準に定められる最低規格の道路より交通荷重、交通量ともに極めて小さい。将来的に住民自身が整備していくためには、安価で人力施工が可能で尚且つ維持管理を行いやすい簡便な手法を新たに提案する必要がある。

そこで筆者らは、最も安価で現地で入手可能な礫質材料であるグレードC破碎レンガを、表層や路盤材に利用することを検討した。交通荷重作用下で、礫質材料の粘性土の路床への埋込みによる消失を防ぐこと、人力施工を可能にすることを目的として図-6に示す土のうを用いた道路断面を提案した。

土のうを利用した未舗装道路路盤構築手法は開発途上国の未舗装生活道路を沿線住民自らが整備することを目指し開発され、普及が進められている¹¹⁾¹²⁾。土のう袋には現地で普及しているポリエステル材質繊維の編まれた作物、肥料、砂糖等を入れる袋が利用可能である。本事業地でも調達可能であった。

断面決定に際し考慮した点は以下の通りである。

- 粘性土を中詰めした土のうを、図-6に示すように現況道路面上に敷設する。締固めは土のう袋の拘束効果により人力で十分実施可能である。この土のう層が不透水層となり、以深の粘性土地盤の含水比の増大を防ぐ。また、土のう層を路体の一部として、路体表面を道路中心が凸になるよう整形する。
- グレードC破碎レンガを中詰め材とした土のう1層を路盤とし、路盤は土のうのジオテキスタイルとしての中詰め材せん断力補強による耐荷力増強効果を期待し¹³⁾、交通荷重を支持すると考えた。現行の交通は軽車両が主でその交通量も少ないこと、経済性を勘案し1層とする。
- 表層にはグレードC破碎レンガを厚さ 50mm で撒き出す。最も簡便な施工方法を提案するため試験的に粒度調整はしない。破碎機械で得られる粒径が 10～30mm に集中した粒度分布のまま利用する。

3. 試験施工の実施

(1) 資機材の調達

土のう袋は施工現場から約 25 km 離れた最寄りの町(郡庁所在地)で購入した。また、グレードCレンガ不良品を現場から 30 km 圏内にある 4 社のレンガ工場(図-1)から購入した。レンガ工場と整備対象道路起点まで

図-6 土のうを利用した道路断面

図-7 作業グループの概要

は、アスファルト舗装された国道を経る。試験施工時に図-4の破碎機を施工現場から約 50 km 離れた最寄りの都市(市庁所在地)にて購入し、整備対象道路わきに設置し、道路整備作業と並行して事業参加者によって破碎作業を行った。また、破碎作業は地域住民のみで十分実施可能であった。

(2) 作業実施体制

雨季の農繁期を避けかつ施工性を考慮し、2014 年 11 月～12 月の乾季に、試験施工は行われた。事業予算から施工対象道路区間と期間を設定し、筆者らは日最大 60 人を動員し 1 日 8 時間作業とすることを組合に提案した。組合は、作業期間が 24 日間と長期にわたり農作業を一部中断することになるため、労賃の支払いを要請した。協議の結果、法定最低労働賃金と同等の約 300 円の日当支払うことで合意を得た。

作業人員の配置を図-7に示す。全参加者 60 人の内、6 人を破碎作業に当てた。残りの 54 人を 2 グループに分け、対象道路整備区間中間点より各々道路起点と終点に向かい施工を進めた(図-8)。また、レンガ破碎機は対象道路整備区間中間点に設置し、破碎レンガを連続的に供給できるようにした。道路整備作業を連続して行うために、一時は夜勤で破碎作業を行った。参加者全員が全ての作業を経験できるよう作業ローテーションを行った。また、筆者らおよび(公財)日本国際協力財団の現地スタッフの計 4 名が常時施工監理、施工指導を行った。

図-8 作業状況 (2014年12月)

図-9 施工後の様子 (2014年12月)

(3) 施工費用

幅員 3.20m, 延長 800mの道路整備 (施工面積 2,560m²) は24日間で完了した (図-9)。累積参加者数は道路整備作業で 1,113 人, レンガ破碎作業で 276 人の計 1,389 人となった。表-3 に施工諸費用一覧を示す。全費用は 1,897,820 円となり, 道路面積 2,560m²から施工単価は 741 円/m²と算出された。

工事開始期の初期費用は 60 人が効率よく作業するために十分な数量の工具と道具, レンガ破碎機を計上し合計 383,288 円となる。したがって, 今後組合が本試験施工で購入した機材を利用し新たに道路改修をする場合には, 資材費と人件費のみを計上し施工単価 592 円/m²となる。これは, 地方道路施工基準に規定の最小規模クラス道路標準断面での施工単価 (1,993 円/m²)⁹⁾の約三分の一になる。

破碎レンガ調達費用は, グレードCレンガの購入と輸送で 1,679 円/m³, そして破碎作業を行う労務費と破碎機維持管理費から成る破碎手間を含めると 1,739 円/m³となった。一方, 砂礫の路盤材を購入した場合は, 輸送費を含め 2,916 円/m³である。破碎手間を含めても破碎レンガ単価が砂礫単価の約二分の一程度となった。

施工歩掛は, 道路整備作業の累積参加者数 1,113 人により 800mの整備が実施されたことから, 0.719 m/人・日となる。

なお, 道路整備作業人員数の決定には, 破碎機の作業効率を基準にする必要がある。試験施工結果より得られた破碎機の作業効率と維持管理実績を表-4 に示す。破碎機 1 台 1 日当たりのレンガ破碎可能量は 16.72 m³であり, 延長 26.8mの道路施工に必要な破碎レンガ分量に当たる。試験施工では 1 日当たり 54 人で道路整備作業を行っており, 延長 38.8mの施工が可能でその分の破碎レンガが必要であった。そこで, 破碎レンガを必要量供給するため, 22 日間夜間作業 (1 日 4 時間) で破碎作業を実施した。

表-3 施工諸費用一覧

項目	単価[円]	数量	費用 [円]	比率[%]
直接費用			1,089,352	57.4
土のう袋	8.7	25,000 袋	216,954	11.4
紐 50m組	128.1	40 組	5,125	0.3
レンガ	1679.4	459.6 m ³	771,841	40.7
破碎機維持費	-	-	27,538	1.5
道具修理費等	-	-	67,894	3.6
初期費用			383,288	20.2
工具, 道具類	-	1 式	150,338	7.9
レンガ破碎機	232,950	1 機	232,950	12.3
人件費			425,180	22.4
日当	306.2	1,389 人	425,180	22.4
合計			1,897,820	100.0

表-4 破碎機の作業効率等実績

内容	値
破碎作業性	2.09 m ³ /h
歩掛り	2.5 m ³ /人・日
燃費効率(ディーゼル)	0.68 L/時間
オイル交換頻度1回 1kg	14 時間/回
ベルト交換頻度	110 時間/回

4. 試験施工に対する住民の意見と行動

(1) 施工中, 直後の住民意識

本事業では参加者が将来的に主体となることを踏まえて満足度が高いように配慮し, 住民の意見を取り入れながら作業を進めた。完了後には参加動機や持続性に向けた意識調査を行った。

表層の施工に関し, 粒度の偏った破碎レンガに砂質礫を購入し撒き出すことで粒度調整をしたいという住民からの提案があった。購入による施工費用増を避けるため周辺の粘性土との混合が最適と考えられた。しかし, 住民は少量の粘性土であっても表層に使用することで雨季に泥濘化を引き起こす恐れがあると心配し, 理解は得られなかった。そのため破碎機で生産される粒度分布が偏った破碎レンガをそのまま表層に撒き出すのみとした。

表-5 参加動機に関する聞き取り調査結果

参加理由	割合 [%]	
	組合員 (n=29)	非組合員 (n=39)
お金のため	39	42
道路状況を良くしたい	45	39
道路工事の方法を知りたい	16	17
家族の勧め	0	2

竣工時に作業従事者に対し、参加理由に関して聞き取りでのアンケート調査を行った。表-5 に結果を示す。

「その他」を含む 5 つの参加理由の選択肢を設け、複数回答方式とした。組合員と非組合員を区別し結果をまとめた。主要な理由として双方共に「お金のため」、「道路状況を良くしたい」が挙げられた。

参加者全員に試験施工の工事費や内訳、資機材の調達方法を報告した上で、同様の工事実施の要望調査を行った結果、全員が実施したいと回答した。一方、組合による工事実施の可能性に対する自由回答では、「手法は簡便で組合により十分実施可能である。しかし、土のう袋レンガの調達が経済的に難しい。組合としては労働力を提供することができる。身近な材料でも必要量を自力で調達することが困難で、外部組織との連携で資金協力を得ることが不可欠である」との内容の回答が大半を占める結果となった。

竣工後、維持管理に関する住民会議が行われた。1 ヶ月に 1 回の頻度で組合員が中心となり、道路を点検することが決定された。破碎レンガが飛散し消失した箇所には破碎レンガを補充することや、露出し損傷の生じた土のうは交換する方針が確認された。

(2) 雨季の道路状況

施工完了から 9 ヶ月後の雨季に、再度現場を訪問し道路状況の確認を行った(図-10)。経過後も施工道路は損傷を受けず通行性能を維持していた。また、粒度の偏った破碎レンガに粘性土が撒き出され、通行車両の荷重により締固められた路面を形成していた。

竣工直後は単粒状の破碎レンガのみをを表層に使用したため表層が締固めらず、自転車等の通行ではタイヤがとられ安定しないことに加えて、裸足で農作業をする習慣がある地域住民にとっては歩行が困難であるなどの不満があった。

しかし、供用開始後約 1 ヶ月程度で施工区間終点境界付近で、表層に粘性土が混合しさらに走行荷重による締固め効果で、部分的に平滑な表層に仕上げられる様子が確認された。未施工区間の粘性土路面を走行しタイヤに粘性土を付着させた車両が施工区間に進入することで、その付着した粘性土がレンガ屑単粒状の路面に撒きだされた。この様子を確認した組合員や沿線住民が、維持管

図-10 施工 9 ヶ月後の初回雨季時の道路状況 (2015 年 9 月)

理作業の一環として粘土を撒き出すことを決定した。組合は竣工後雨季の視察時までの 9 ヶ月間に 3 回に渡り、全施工区間に粘性土を撒出し、表層の締固め不良の問題を独自に解決した。

(3) 組合による継続した道路整備活動

事業終了後には、今後も組合の自助努力により道路整備活動が展開されるように、これまでに実施した施工方法に関するマニュアルを作成し共有した。マニュアルでは施工方法を体系的に理解できるよう、施工方法の流れについてを中心に説明している。作成に当たっては、可能な限り図や写真を用いることで、視覚を通して理解が得られるように努めた。

2016 年 9 月現在までに、道路の試験施工に参加した組合員と地域住民は(公財)日本国際協力財団の支援を受けて、新たに村落内で 750 m の道路整備を計画した。現在、マニュアルを活用しながら現地の人々のみで整備活動を進めている。

5. 破碎レンガの路盤、表層材としての材料特性

(1) 検討する材料特性

バングラデシュ村落開発事業の要請に応え、安価で現地調達可能材料を用い現地住民が実施可能な道路整備方法として、図-6 の道路断面を提案し試験施工を行った。雨季の通行性は大きく改善され、組合による維持管理活動も実施されている様子を確認した。今後同様事業で提案手法を適用するためには、本試験施工で利用した破碎レンガの道路材料としての力学的特性を把握し、定量的な根拠に基づく施工手順を確立しておく必要がある。そこで、現場から持ち帰ったそれぞれ 2 個ずつのグレード A~C のレンガと 25 kg の破碎グレード C レンガを用いて、a)レンガの一軸圧縮強度、b)破碎レンガを中詰めした土のうの圧縮強度特性、c)粘性土を配合した破碎レンガの締固め特性および支持力特性、について検討を行った。ただし、現場から持ち帰った材料量が不十分であっ

たため、日本で流通するレンガ材料を模擬材料（以下、日本産模擬レンガ）として一部使用した。

(2) 一軸圧縮強度

バングラデシュのグレード A から C までのレンガおよび、模擬材料として使用した日本のレンガ材料の強度特性を表-6 に示す。JIS M 0302 の岩石の圧縮強さ試験を実施し得られた一軸圧縮強度および弾性係数を示す。また、レンガ材料を砕いて 0.075 mm ふりを通過した試料に対して土粒子密度試験を行い、土粒子密度と一軸圧縮試験供試体の密度の比から求めた空隙率を示す。

グレード A レンガはバングラデシュ産レンガの中で最大の一軸圧縮強度と弾性係数を示すが、日本産模擬レンガの各値の約 28 % と約 37 % である。ただし、少なくとも道路整備基準で破碎レンガ利用時に規定されている一軸圧縮強度 14 N/mm² は満たしている。

試験施工で使用したグレード C レンガの一軸圧縮強度は 4.4 N/mm²、弾性係数は 1.8 kN/mm² と、とりわけ強度が低く脆い材料であった。

(3) 破碎レンガ中詰め土のうの圧縮特性

a) 圧縮試験方法

容量 250 kN、最大変位量 100 mm の万能圧縮試験器を用い、土のうの圧縮試験を行った。試験機サイズに合わせて、土のう供試体作成には、通常の 1/2 サイズにあたる縦 240 mm×横 400 mm のポリエステル材質の土のう袋を用いた。袋材の引張強度は 6.6 kN/m² であった。0.002 m³ の絶乾状態の試料を中詰めし、開口部をビニロンテープで土のう内部に余裕を残さずに縛り作成した。この時、土のう供試体は縦横共に 152 mm、高さ 87 mm となる。各土のう供試体を 3 段直に積み、土のう全面に 5 mm/min の変位制御で載荷を行い、荷重および全体変位量の計測を行った（図-11）。

b) 土のう中詰め材料

現地で使用した破碎グレード C レンガ、日本産模擬レンガを現地で使用した破碎レンガと同じ粒度分布となるよう調整したもの、粒度分布が破碎レンガに近いが粒子破碎が生じにくい 5 号砕石を用意し、それぞれが中詰めされた土のうに対し、圧縮試験を実施した。図-12 に各中詰め材料の粒径加積曲線を示す。

一軸圧縮強度 54.4 N/mm² の日本産模擬レンガと 4.4 N/mm² のグレード C レンガを中詰めした土のうの圧縮試験から、いずれも粒子破碎が発生する材料であるが一軸圧縮強度の違いによる土のう圧縮特性の違いを検証した。また、日本産模擬レンガと粒子破碎がほとんど発生しない 5 号砕石と比較することで、粒子破碎の有無による圧縮特性の違いに焦点を当てて考察を行った。

なお、圧縮試験結果の解析のためには、各材料の地盤

表-6 レンガ材料の強度特性

材料	グレード A	グレード B	グレード C	模擬レンガ
土粒子密度 [g/cm ³]	2.69	2.71	2.70	2.41
供試体密度 [g/cm ³]	2.14	1.64	1.60	1.97
空隙率 [%]	20.4	39.5	40.7	18.1
一軸圧縮強度 [N/mm ²]	15.2	8.3	4.4	54.4
弾性係数 [kN/mm ²]	5.0	4.3	1.8	13.5

図-11 圧縮試験概要

図-12 粒径加積曲線

図-13 圧縮試験結果

定数を把握する必要がある。本稿ではグレード C レンガ破碎材料の小規模道路路盤への利用性を検証することを

目的としており、地盤定数把握のための実験は実施していない。

c) 圧縮試験結果

図-13 に土のうの圧縮試験結果を示す。破碎グレーCレンガ中詰土のうに対する圧縮試験は、材料量の都合 1 回のみ実施しその結果を、他の 2 ケースは各 3 回実施しておりその平均値を示す。圧縮量を鉛直ひずみに換算し荷重との関係を示した。ここで、ひずみの増加にもかかわらず荷重が明らかに増加しなくなる時の荷重を土のうの耐荷力とした。グレードCレンガでは試験機の最大変位量の変位を与えた段階においても荷重は増加し続けた。このため、グレードCの耐荷力を 15 kN 以上であるとした。また、図中には、対象施工道路の最大規模の通行車両である 2 軸式の 2 トントラックの輪荷重 255 kN/m^2 が土のう全面に作用した場合¹²⁾の荷重 5.9 kN における、圧縮ひずみを示している

図-14 には圧縮試験から得た土のうの耐荷力と、試験前後の中詰め材の粒子破碎の進行具合を示す。ここで、土のうの耐荷力は箱ひげ図により示した。ただし、グレードCレンガの場合では破壊点を確認されていないため、図中に記載していない。また、粒子破碎の進行具合は図-12 に圧縮試験後の破碎グレードCレンガ中詰材の粒度分布が示されており、圧縮試験を通して破碎が進む様子が確認される。粒子破碎の進行具合は圧縮試験前後の 2 本の粒径加積曲線の積分値である破碎量 $br^{13)}$ により評価した。

土のう中詰め材が 5 号碎石の場合、圧縮を受け変形が生じる初期段階から正のダイレイタンシーにより体積膨張を引き起こし土のう袋に張力が発生し、有意な圧縮抵抗性を示す¹⁴⁾。しかし、載荷が進むと張力が増加し袋材の破断強度に至り袋材は破断する(図-11 (c))。拘束効果を失い、土のうの圧縮抵抗力は増大しない。そのため、3 試料の荷重ひずみ曲線の中で最も大きい初期勾配を示すが、耐荷力は一番低い。

レンガ材の中詰めした場合、図-14 より大きい破碎量が確認され、圧縮試験の過程でその破碎が進むことがわかる。そのため圧縮に伴う変形量が大きくなる。しかし、袋材は破断せず拘束効果は載荷終了時まで維持され、大きな耐荷力を示した。

破碎した日本産模擬レンガ中詰土のうと破碎グレードCレンガ中詰土のうの圧縮特性を、載荷重 5.9 kN 時の鉛直ひずみ量で比較する。模擬破碎レンガ中詰土のうの場合 0.16、破碎グレードCレンガ中詰土のうの場合 0.23 と、両者の差は 0.07 である。実物大土のうの厚さは 100 mm で、圧縮量の差は 7 mm となる。二種類のレンガには、10 倍以上の一軸圧縮強度の違いがあるが、土のうに中詰めされた時の圧縮特性の差異は小さいと考えられる。

図-14 圧縮試験結果と破碎量 br

現地で入手可能な最上級品質のグレードAレンガの一軸圧縮強度は日本産模擬レンガの 28%、グレードCレンガの 3.5 倍である。破碎グレードAレンガと破碎グレードCレンガを中詰めしたそれぞれの土のうの圧縮特性の差は、本圧縮試験で観測された 2 種の破碎レンガ材中詰土のうの場合よりさらに小さくなると推察される。従って、グレードCレンガを破碎しこれを土のう中詰め材として適用することで、現地通行荷重に対して必要耐荷力を確保でき、経済的な方法であると考えられる。

(4) 粘性土混合破碎レンガの表層材としての利用検討

図-12 中に示す、施工完了から 9 カ月後の試験施工対象道路表層の粒度分布をみると、細粒分を 8.8 %含むことがわかる。これは、供用開始後の維持管理活動および車両の通行により粘性土が混合されたためである。そこで、施工時から表層材として粘性土混合破碎レンガを撒き出すことができるようにするため、最適混合比を検討する。農村部での施工管理上、体積比で配合を管理することが実用的であると考えられるため、体積比 0 %～25 %の間で粘性土の混合割合を変化させたときの、締固め特性と CBR 値を把握する。

a) 粘性土と破碎レンガの混合試料

現地材料を必要量確保できなかったため、代替材料により検討を行う。グレードCレンガの代替材料として日本産レンガを現場で使用したレンガ屑と同じ粒度分布に整した材料を代替材料として使用した。また、現地粘性土の代わりに、シルト分と粘土分の含有量と同じになるように、カオリン粘土および珪砂 6 号をそれぞれ重量比で 78.1 %と 21.9 %で配合したものを使用した(図-15)。

破碎模擬レンガに対して模擬粘性土を体積比で 0 %、10 %、15 %、20 %、25 %で混合し、さらに模擬粘性土のみの場合について締固め試験と CBR 試験を実施した。

b) 締固め試験、CBR 試験とその結果

締固め試験は、JIS A 1210 の突固めによる土の締固め試験の E-b 法に従い実施した。CBR 試験では JIS A 1211

図-15 現地の粘土と模擬粘土の粒径加積曲線

図-16 各配合率における粘性土混合破碎レンガと粘性土の CBR 値, 最大乾燥密度と最適含水比

に定める手順に従うが, 92 回締固め時の CBR 値から定性的な比較を行った. 図-16 に各ケースにおける CBR 値, 最大乾燥密度, 最適含水比を示す.

破碎レンガのみの場合では, 曲率係数は 0.1 と粒度分布が悪く締固め試験の実施は不可で最適含水比が得られない. そこで, 破碎レンガのみの場合の CBR 試験においては乾燥状態の試料に対して 92 回の締固めを行い 4 日間水浸後に貫入試験を実施した. 10 %の粘土を配合することで締固めが可能となり, 20 %配合時で最大乾燥密度は 1.83 g/cm³ を示し実験ケース内で最大値を示した. しかし 25 %配合時には最大乾燥密度は大幅に低下する.

また, CBR 試験結果によると, 10 %配合時 CBR 値 269.9 %を示し, 15 %配合時に CBR 値 290.8 %と実験ケース内で最大値を示し, 続く 20 %配合時では CBR 値は 141.8 %と半減する結果となった.

以上より表層材に利用する破碎レンガへの最適粘性土配合率は, 体積比で 10~15 %の範囲である. 実施工では, レンガ破碎機にレンガと粘土を同時に投入し破碎,

混合を行う. 上記配合比を維持するために 1 分間で約 3.0 リットルの自然含水比の粘土を投入させる. 生産される粘性土混合破碎レンガは, 撒き出し後に散水を行い転圧を行うとする.

6. バングラデシュ農村部の住民参加による未舗装道路整備事業実施上の留意点と対策

バングラデシュに農村部住民参加による未舗装道路整備事業実施に際し, 住民の参加促進, 施工方法決定, 住民による持続的な道路整備活動に向け留意点と工夫した点をまとめる.

事業開始前には, 入念な地域住民との話し合いを通して, 事業実施体制を構築する必要がある. これを怠ると, 事業実施途中に参加者が激減する, 賃金交渉が難航するなど支援者側と住民側での信頼関係が成り立たなくなる.

本事業の場合では, 現地に活動拠点を有し地元住民との信頼関係を構築していた (公財) 日本国際協力財団と共同で事業を行った. 地域に根差した協力者がいることで, 筆者らの現地渡航は現場調査 2 週間, 市場調査を目的とした事前調査 2 週間, 施工のための渡航 1 ヶ月間, 施工後の状況確認のための渡航 2 週間の 4 回のみの渡航であった.

採用する施工方法については, 小規模なデモを通して地域住民の理解と納得を得て決定することが有効である. 粒度の偏った表層材に粘性土を撒き出し締固め特性を改善する案は, 当初地域住民に受け入れられなかった. その後, 粘性土を撒き出し表層が締固まる様子を確認した住民は, 自発的に粘性土を表層に撒き出した.

施工を終え日本人が引き上げた後, 地域住民が持続的に道路の維持管理活動を行うことは, いつも大きな課題となる. 本事業を通して, 施工方法および維持管理方法をまとめたマニュアルを作成し, 地域住民および (公財) 日本国際協力財団へ共有した. 駐在する (公財) 日本国際協力財団の日本人, 現地人スタッフの働きかけがあり, 維持管理活動が継続されている. 技能は身につけたものの, 必要な資機材の調達に外部者の支援が必要であることが多い. 期限を区切るのは難しいが, 継続した支援を通して地域住民の技能の成熟化や資機材調達能力を醸成し, その後支援の規模を縮小することが考えられる.

事業終了後に, 同地域で新たに地域住民および (公財) 日本国際協力財団によってマニュアルを用いた同様の工事が独自に計画された. しかし, 2016 年 7 月 1 日に首都ダッカで発生したテロ事件発生以降治安が悪化し, 筆者ら日本人の渡航や駐在は不可能となった.

そこで, 地域住民および (公財) 日本国際協力財団のローカルスタッフと筆者が電話会議で打合せをし, 道路

整備事業が遂行された。日本人を除いて実施され、2017年3月に竣工との連絡を受けた。

工学的でかつ住民目線での実現可能性を重視し提案された道路整備手法が、地域住民に根付き、これまで開発から取り残されてきた農道の整備が進みつつある。

7. 結論

本論文では、バングラデシュ・デルタ地帯で、沿線住民の社会経済活動を支える農道の整備手法を新たに提案し、その実践を通して効果を検証した。以下に結論をまとめる。

- 1) 従来の地方道路整備基準内の最小規模道路用の規定でも、事業対象農道整備には過大な設計である。地域行政が基準に従い農道整備を行うことは予算上不可能で、放置されてきた。そこで、新たに現地材料を利用し簡便な手法を提案した。沿線住民による道路維持管理を可能にする実践的な手法であることが、数多くある農道の通行性改善に向けた有効策と考えられる。
- 2) バングラデシュでは砂礫材料の調達が困難であることから、破碎レンガを道路材料に利用した整備手法を提案した(図-6)。試験施工と雨季での状況調査を通して、施工性、施工単価、効果を確認した。施工性は、破碎機の日当たりの破碎容量に左右される。また、従来の行政により規定される道路整備の三分の一の単価で施工が可能であり、雨季でも通行性が確保されている。
- 3) 廃棄処分される最も品質の悪いレンガを破碎後そのまま土のうに中詰めし、路盤を構築した。一軸圧縮強度の大きい高品質のレンガ材を中詰めした場合と、対象道路交通荷重作用時の土のう圧縮特性に大きな差がないことが確認された。これまで廃棄処分されてきた安価な低品質レンガの適用は可能である。
- 4) 破碎レンガを表層材に利用する場合、現地粘性土を体積比で10%~15%混合し撒きだすことで、締固めが可能な粒度分布となり最大の耐荷力を示す。
- 5) 試験施工後に、組合が助成機関から資金支援を得て、自分たちで提案手法を利用し継続して道路整備を実施する準備が整えられている。提案手法のマニュアルが活用されている。安価で簡便な道路整備手法を提案したが、現地住民間のみで必要資機材を購入し、長距離を整備していくことは難しい。しかし、農村開発に寄与しているNGOや行政等と住民グループが連携すれば、提案手法を運用し農道問題解決に取り組むことが可能である。

現在バングラデシュでは昨今の治安悪化を受けて日本人の渡航が困難な状況にある。現在同地で自発的に展開される道路整備活動については遠隔で会議に参加し遠方からの工事の支援を行っている。今後は遠隔で新たに工事監督を行う上で必要とされる知見を集積させマニュアルの改善を進めていく方針にある。

謝辞: 本論文の実施事業は(公益)日本国際協力財団より助成を受け実施した。現地での活動では同財団 深山信嗣氏, NPO 法人道普請人ケニア事務所のキプエゴン氏よりご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Shardul, A., Tomoko, O., Ahsan, U., Joel, S. and Maarten, V.: Development and climate change in Bangladesh: Focus on coastal flooding and the sundarbans, pp.15-23, OECD, 2013.
- 2) Azizul, H. and Ahmed, F.: The role of NGO's in the sustainable development in Bangladesh, *Present Environment and Sustainable Development*, Vol.7, No.2, pp.59-72, 2013.
- 3) 公益財団法人 日本国際協力財団: 事業概要, <http://jicfnpo.wix.com/jicfnpo#!blank-2/n6q8x> (2016年8月24日アクセス)
- 4) Bangladesh Bureau of Statistics: Report of the household income & expenditure, pp.27-43, 2010.
- 5) Bangladesh Bureau of Statistics: Report of the Bangladesh literacy survey, pp.2-6, 2011.
- 6) Imamul, S. M. and Shoaib, J. U.: *The Soils of Bangladesh*, pp. 41-49, Springer Science & Business Media, 2013.
- 7) Rajib, S., Fuad, M. and Aminul, I.: *Climate Change Adaptation Actions in Bangladesh*, pp.229-236, Springer Science & Business Media, 2013.
- 8) Energy Sector Management Assistance Program: Introducing Energy-efficient Clean Technologies in the Brick Sector of Bangladesh, pp. 15-20, The World Bank, 2011.
- 9) Government of the people's Republic of Bangladesh Planning Commission: Road design standard, standard designs and costing for Zila, Upazila and Union roads, bridges and culverts, pp. 17-19, 2004.
- 10) Government of the people's Republic of Bangladesh Planning Commission: Road design standard Rural Road, pp.28-51, 2005.
- 11) 福林良典, 本庄由紀, 木村亮: 土のう工法の普及活動を通じた未舗装道路整備のBOPビジネス化, 土木学会論文集F5, Vol. 71, No.1, pp.13-23, 2015.
- 12) 福林良典, 木村亮: 開発途上国農村部における貧困削減に向けた未舗装道路改修方法, 土木学会論文集C, Vol.63, No.8, pp.783-795, 2007.
- 13) 松岡元: 地盤工学の新しいアプローチ-構成式・試験法・補強法, 京都大学学術出版会, 2003.
- 14) Hardin, B.: Crushing of soil particles, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, pp.1177-1192, 1985.

(2016. 10. 27 受付)

PARTICIPATORY RURAL ROAD REPAIR METHOD APPLIED BY THE WASTE BRICK IN THE DELTA OF BANGLADESH

Yuma DAITO, Yoshinori FUKUBAYASHI and Makoto KIMURA

Most of the country of Bangladesh is dominated by the delta and a rural unpaved road becomes unpassable in the rainy season. This paper aims to propose a low technique road repair method by using waste brick materials to improve the rural road situation by local people. The workability, cost and applicability of proposed method are discussed through the result of participatory rural road construction project. Additionally, the mechanical properties of applied material are examined through the laboratory tests. A manual of proposed method has provided from the result of project and experiments and it has shared to participated local association. Actually, local association has been starting the new construction by their effort.