

バングラデシュにおける河川堤防の被災メカニズムに関する研究

山口大学 学生会員 ○村岡 和満
山口大学 正会員 朝位 孝二

1. はじめに

バングラデシュは、ガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川（3大河川）の国際河川最下流域に位置している。国土の約8割が洪水氾濫原であり、その洪水氾濫原の5割が標高5m以下の低平地で毎年国土の約2割が浸水する。そのため、バングラデシュ水開発庁（BWDB）により2016年末までに延べ延長11,436kmの堤防の建設、維持管理が行われてきた¹⁾が、河川侵食に起因する堤防の決壊が多発している他、維持管理予算と能力不足により被災したまま放置されている堤防が多数存在している²⁾。

本研究では、バングラデシュの河川堤防の被災要因及び被災メカニズムを明らかにすることを目的として、現地踏査によりバングラデシュ全国の河川堤防被災状況を調査し、河川特性、土質特性、地域特性から河川堤防を4類型に分類し、それぞれの代表堤防被災箇所について測量・土質調査を行い、浸透流・円弧すべり解析による堤防安定性検討を行った。

2. 調査および解析手法

2.1 洪水の特徴と河川堤防の土質特性

バングラデシュの洪水は図-1に示す4つの形態、(a)3大河川の大規模洪水、(c)ベンガル湾沿いの地域のサイクロンによる高潮、(c)ハオール地域の洪水、(d)支川流域のフラッシュ洪水があり¹⁾、それぞれの形態における河川堤防が存在する。先行調査³⁾によると、それぞれの堤防の土質特性は図-2に示すとおりである。ほとんどの堤防は主にシルト質の土で築堤されているが、ベンガル湾沿いの高潮堤防とハオール地域の堤防は粘土を含む材料が使用され、3大河川の堤防は砂を含む材料が使用されていることがわかる。これらはバングラデシュの堤防が河川の浚渫土を材料としていることを意味している。

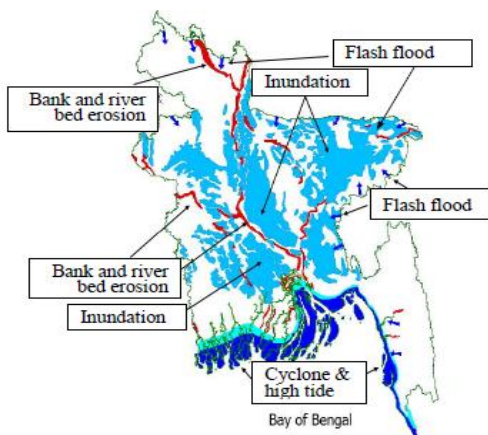


図-1 洪水の特徴

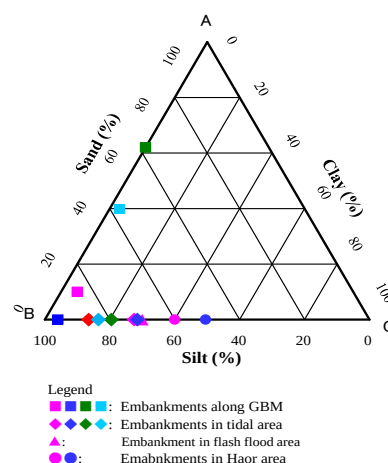


図-2 堤防の土質特性

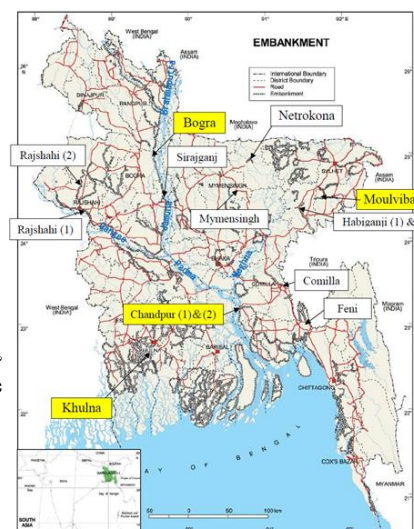


図-3 現地踏査箇所

キーワード バングラデシュ, 河川堤防, 決壊, 浸透流解析, 円弧すべり解析

連絡先 〒755 -8611 宇部市常盤台 2-16-1

TEL: 0836-85-9318 E-mail: t008wc@yamaguchi-u.ac.jp

2.2 被災堤防の現地踏査と河川堤防の分類

BWDB より入手した過去の堤防被災データを基に，被災原因の解析を検討するため，図-3 に示した 14 箇所の堤防被災箇所の現地調査を行い，その調査結果からバングラデシュの河川堤防を 2.1 で得た河川特性（洪水継続時間，潮汐の影響等）や土質特性（砂，粘土の含有比率等），地域特性（地盤標高等）から図-4 と表-1 に示す 4 類型に分類した．図-3 で示した 14 箇所のうち，黄色で着色した 4 箇所の代表堤防を解析することとした．A 類型の 3 大河川堤防は，砂の含有率が多いもの，シルトの含有率が多いものの 2 種類が存在しているため，それぞれの堤防を解析することとした．C 類型のハオール地域の堤防は，堤体の粘土含有率が非常に高いものの，越水による決壊が生じており，なおかつ雨季に水没する潜水堤防で，さらに人為的に堤防を破壊する「パブリックカット」が行われるという特殊な性格を持った堤防であることから解析対象から除外した．

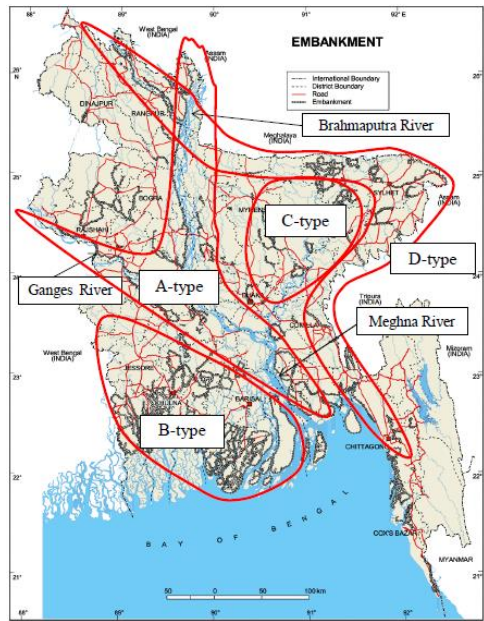


図-4 河川堤防の 4 類型

表-1 河川堤防の 4 類型

CATEGORY	AREA	EMBANKMENT LOCATION
A-TYPE	Along major rivers	Ganges, Brahmaputra, Meghna (three mighty rivers)
B-TYPE	High tidal waves area	Coastal polders
C-TYPE	Haor area	Low land paddy field in north-eastern region
D-TYPE	Flash flood area	Tributary rivers in east and north-eastern region

2.3 堤防の安定解析

2.2 で抽出した 4 箇所の代表堤防について，堤防の浸透流・円弧すべり解析を行った．解析には，洪水時の浸透流と円弧すべりを同時に解析できる「非定常有限要素解析」ソフトの SAUSE Ver3.1 を使用した．外水位に与える外力には過去 20 年で最も水位の高い洪水のハイドロを与えた．解析における透水係数は，室内透水試験において信頼できるデータが得られなかったことから，粒度分布から Creager の式により推定した．解析に利用した定数を表-2 に示す．

表-2 浸透流解析に用いた土質定数

SITE NAME	PART	PRITCLE DISTRIBUTION (%)			SHARE STRENGTH		PERMEABILITY COEFFICIENT (cm/s)
		SAND	SILT	CLAY	ϕ (°)	C (kN/m ²)	
BOGRA (A-Category)	Embankment	52	43	5	28.50	27.36	* 4.53E-05
	Foundation	77	20	3	33.13	23.88	* 6.93E-04
CHANDPUR (A-category)	Embankment	8	73	19	0.00	14.33	* 2.50E-06
	Foundation	66	29	5	29.65	26.87	* 7.50E-04
KHULNA (B-category)	Embankment	6	64	30	0.00	11.65	9.76E-07
	Foundation	16	53	31	0.00	19.64	* 3.00E-07
MOULVIBAZAR (D-category)	Embankment	30	51	19	0.00	29.39	5.30E-06
	Foundation	7	64	29	0.00	26.07	x; 6.52E-06 y; 9.25E-05

Note, *; Estimate value obtained from Creager formula based on particle size distribution.

3. 結果と考察

3.1 洪水時の浸透流解析

洪水時の浸透流解析により得られた堤防裏法尻付近の局所導水勾配（水平/鉛直）を表-3 に示す。Bogra と Chandpur では鉛直方向の局所導水勾配が 0.5 に達しており、パイピングが発生することを示している。Khulna でも水平方向の局所導水勾配が 0.5 に達しているが、堤体は粘土の含有率が多く、砂の含有率が少なく、透水係数が $9.76\text{E-}07(\text{cm/s})$ と小さいため、パイピングは発生しにくいと考えられる。

表-3 堤防裏法尻付近の最大局所導水勾配

LOCATION	LOCAL HYDRAULIC GRADIENT i (Landside slope) Horizontal / Vertical
BOGRA	0.492 / 0.510
CHANDPUR	0.348 / 0.911
KHULNA	0.562 / 0.222
MOULVIBAZAR	0.496 / 0.291

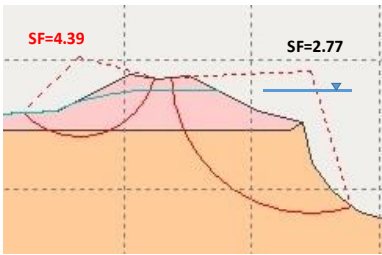
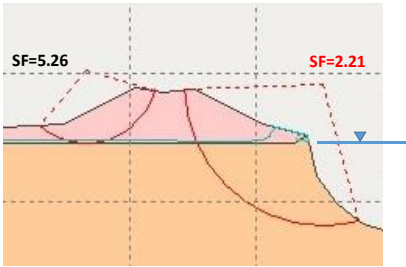
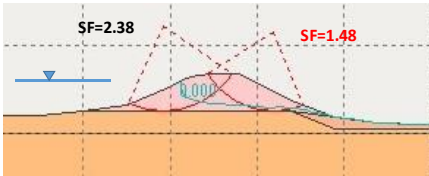
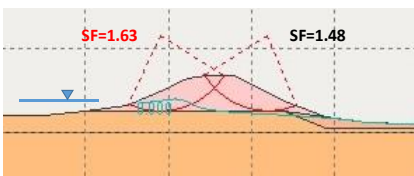
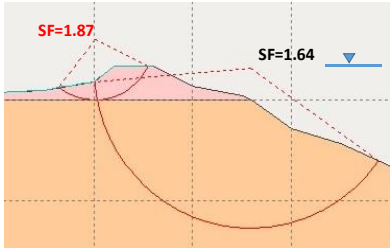
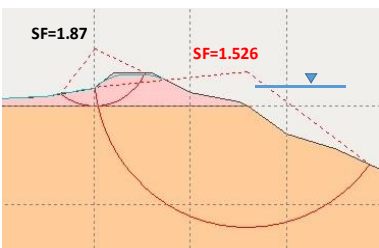
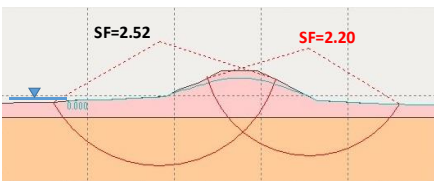
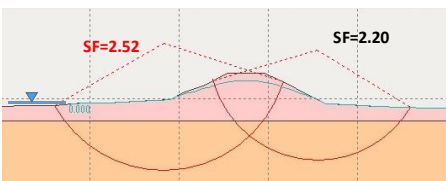
Location	SF(Safety Factor of Slope Stability)	
	Minimum	
	Back Slope	Front Slope
Bogra	 SF=4.388 (600時間)	 SF=2.214 (1400時間)
Chandpur	 SF=1.476 (600時間)	 SF=1.634 (1100時間)
Khulna	 SF=1.874(600時間)	 SF=1.526(900時間)
Moulvibazar	 SF=1.204(700時間)	 SF=2.521(700時間)

図-5 洪水時の堤防安定解析結果（洪水時の最小安全率）

3.2 洪水時の堤防安定解析

洪水時における堤防の円弧すべりに対する最小安全率を示した安定解析結果を図-5 に示す。Chandpur の堤防裏を除き、安全率が 1.5 以上の結果であることから、河岸侵食対策が施されていれば、洪水時の円弧すべりに対して堤防は安定といえる。また、高水敷が十分に確保されていない Bogra や Khulna のケースでは、河川水位が堤内地盤高より低い時に、安全率は堤防裏より堤防表でより小さくなっている。

3.3 河岸侵食に対する安全率の変化

Khulna と Moulvibazar のケースにおいて、河岸侵食の進行度合いによる堤防安定性の検討を行った。図-6 は Moulvibazar のケースにおいて、設計断面に対して堤防法尻の侵食幅が 31m 進行したときの安全率を示している。このときの安全率は 1.01 まで低下し、解析結果は、侵食幅が 31m 以上となったときに、堤防表において円弧すべりが発生することを意味している。実際に円弧すべりの被災が確認されている Moulvibazar の堤防断面（図-7）は、解析断面とほぼ一致しており、解析結果の妥当性も確認できた。現地踏査によるとバングラデシュの被災堤防のほとんどは円弧すべりによるものであり、堤防表では河岸侵食の進行が確認できている。

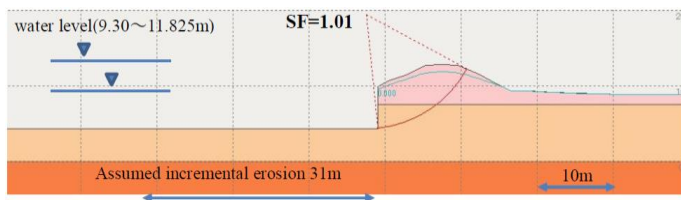


図-6 Moulvibazar の円弧すべり解析結果

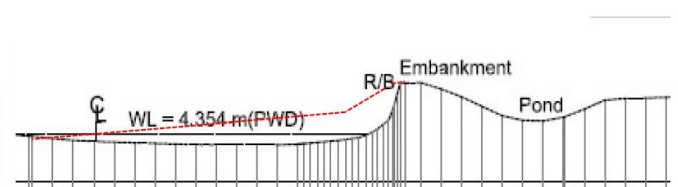


図-7 Moulvibazar の堤防被災断面

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 大部分の代表堤防は、高水敷が確保されている場合には、洪水時の円弧すべりに対して安定である。
- (2) 代表堤防の幾つかでは、堤体材料の粘土分が少ない場合には堤防法尻でパイピングの可能性がある。
- (3) 河岸侵食の進捗に伴い、基礎地盤を含む堤防の円弧すべりに対する安定性が低下する。バングラデシュの堤防被災メカニズムは、大部分が河岸侵食の進行による堤防安定性低下から発生する円弧すべりによるものであるということが、現地踏査と堤防安定解析結果から確認できた。

謝辞

本研究の実施にあたりバングラデシュ水開発庁と国際協力機構のご協力を頂きました。また、本研究は平成 25 年から 4 年間にわたり実施された「バングラデシュ国・持続的な水関連インフラ整備に係る能力向上プロジェクト」で得た貴重なデータも提供いただきました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Bangladesh Water Development Board. (2016). BWDB Annual Report 2015/2016
- 2) Bangladesh Water Development Board and Japan International Cooperation Agency. (2016). Progress Report (2) on Project for Capacity Development of Management for Sustainable Water Related Infrastructure
- 3) Japan International Cooperation Agency. (2012). Report on the Feasibility Study for Capacity-Building Project for Sustainable Development of Water-Related Infrastructure [Part-1], January 2012
- 4) Muraoka K. and Khalequzzaman K. (2016). Challenges to Achieve Water-Related Disaster Risk Reduction Through Proper Development of The Infrastructures in Bangladesh, Proceedings of the International Seminar on "Water Resilience in a Changing World" - HATHI 2016, Bali, Indonesia, 2016.7.