

河岸侵食における 地中水流動の影響

THE INFLUENCE OF SUBSURFACE FLOW TO THE RIVERBANK EROSION

常松 直志¹・風間 聡²・沢本 正樹³・仙頭 紀明⁴

Tadashi TSUNEMATSU, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, Noriaki SENTO

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 博士(工学) 東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻 (同上)

³フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

⁴正会員 修士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

The water level of a river in the monsoon region decreases largely in the dry season. It is known that riverbank erosion occurs in the low water level, and it is considered that the subsurface flow influences it. We obtained particle diameters and hydraulic conductivities from some samples by field survey in the Mekong River side. Critical velocity and circular slip surface are used for analysis of riverbank erosion process. It is found that some places have effects on subsurface flow to riverbank erosion according to particle kinds distribution. This distribution is estimated by numerical simulation of subsurface flow. Finally, we defect the influence areas from river mouth.

Key Words : *Phnom Penh, Piping, Circular slip, Particle diameter*

1. はじめに

大河川の河岸侵食は各地で問題になっており、市街地が河川に隣接している地域では深刻である。横倉と須賀はカンボジアの氾濫について、国道が存在する堤防を越流する際の洗掘による侵食に言及している¹⁾。一方、乾季と雨季のあるモンスーン地域の河川では、乾季に河川水位が大きく低下し、低水時に河岸が崩落するという現象がしばしば生じている。

このことはメコン河でも報告されている。メコン河は上流から蛇行しており、絶え間なく侵食と堆積が交互に生じている。カンボジアの首都プノンペン近くのバサック河分流通付近での侵食は激しく、年数mのオーダーで河岸が侵食されている(写真-1)。土木学会が2000年3月に行った調査では、水位低下時に河岸が崩落する現象には、地中流が影響していると疑われている²⁾。日本でも大雨後に地下水面が上昇し、地盤強度が低下して土砂崩れが起きているが、本研究で考えている侵食問題は河川水位の低下に伴って河岸中の動水勾配が急になることで発生する現象を想定している。発生機構は多少異なる

が、ともに地中流が原因で発生する現象と言える。こうした侵食問題は下流域に位置するプノンペンに限らず、中流域、その他の大河川でも同様な現象が報告されている。

この現象を理解するため、熱帯モンスーン地域のメコン河河岸に位置するプノンペンを対象として、地中流の動きを不飽和流解析によって把握し、その結果から土壌内のパイピングとすべり面の計算から河岸崩壊過程の検討を行った。この結果を用いて、粒径の違いによる地中流が影響する場所を、粒径と透水係数、河川水位変動を変えた数値実験から検討した。また、この結果を用いてメコン河の河口からの距離によって地中流が河岸侵食に与える影響を及ぼす地域について調べた。研究のフローチャートを図-1に示す。

2. データセット

本研究の対象としたメコン河はチベットに源を発し南シナ海に注ぐ国際河川である。流域は中国、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナム6カ国にまたがり、



写真-1 プノンペン河岸崩壊

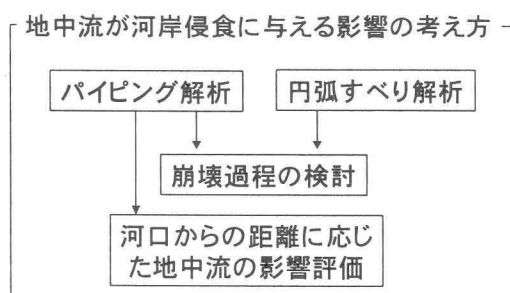


図-1 研究フローチャート

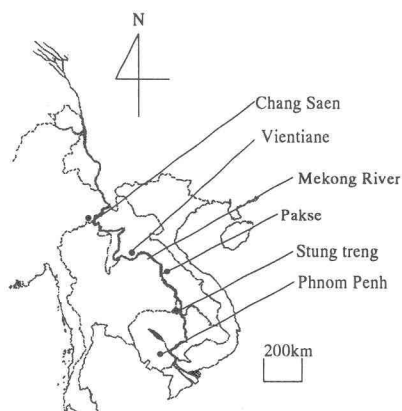


図-2 研究対象地域

面積はおよそ79万5,500km²、延長は4,620kmであり、面積、流長共に世界有数の大河である。計算対象地点は図-2に示すカンボジア首都プノンペンのメコン河岸である。現地で河岸の砂を採取し、大学に持ち帰って粒度分析の他、一軸圧縮試験と変水位透水試験を2度ずつ行った。その結果、地中流、土質力学的解析に用いたパラメータは表-1の通りである。

3. 地中流計算

(1) モデル構造

表-1 プノンペンで採取した土の条件

平均粒径(μm)	33.25
透水係数(cm/s)	4.22×10^{-5}
粘着力(kN/m ²)	35.0
せん断抵抗角(度)	0.0

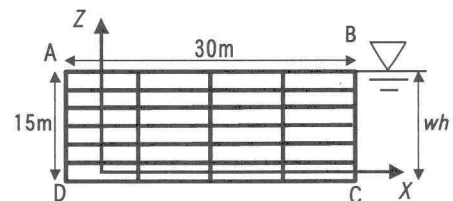


図-3 モデル構造

地中流数値モデルは横尾らのモデルと同様の構造とした⁴⁾。概略を図-3に示す。モデル上流端の底面より斜面方向にx軸を、底面に垂直上向きにz軸を設定した。一つの格子サイズをx方向に Δx 、z方向に Δz とし、その格子をx方向に n_x 個、z方向に n_z 個並べて土壌モデルを構成した。

(2) 浸透流モデル

a) 支配方程式

図-3のような構造を有する浸透流モデルの場合、支配方程式であるRichards式は式(1)のように書かれる。式(1)に示すように、透水係数の異方向性は主方向(K_x, K_z)のみを用いて簡略的に再現した。

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} - K_x(\psi) \sin \alpha \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_z(\psi) \cos \alpha \right) \quad (1)$$

ここに $C(\psi) = \partial \theta / \partial \psi$: 比水分容量(1/cm)

α : 斜面の傾斜

θ : 体積含水率

ψ : 圧力水頭(cm)

K_x, K_z : x, z方向の透水係数(cm/s)

式(1)を解く際に必要となる体積含水率 θ と圧力水頭 ψ の関係には式(2)に示す谷式⁵⁾を、不飽和透水係数 K_x, K_z と体積含水率 θ の関係には式(3)および式(4)に示す一般化Kozeny式⁶⁾を採用した。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi'}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi'}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (2)$$

表-2 モデルパラメータ

Name of parameter	Value of parameter
nx	60
nz	150
$\Delta x(m)$	0.5
$\Delta z(m)$	0.1
α (rad)	0
θ_s	0.7
θ_r	0.3
$\Psi_0(m)$	-0.3
β	3.5

ただし, $\psi' = \begin{cases} \psi (\psi < 0) \\ 0 (\psi \geq 0) \end{cases}$

$$K_x = K_{sx} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (3)$$

$$K_z = K_{sz} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (4)$$

ここに θ_s : 飽和体積含水率
 θ_r : 残留体積含水率
 Ψ_0 : Cが最大となる Ψ (cm)
 β : 定数

K_{sx}, K_{sz} : 飽和透水係数(cm/s)

b) 境界条件

図-3のABは正味の降水・蒸発散を伴う地表面, BCは地中流が流出するメコン河岸の下流端, CDおよびDAはそれぞれ不透水面, 分水界とした。

c) 計算条件

モデルパラメータを表-2に示す。メコン河岸は地表面から深さ15mの位置に不透水層があるので, モデルの高さを15mとし, 幅は計算時間の都合上30mとした。また, 計算開始時の圧力水頭は静水圧分布で与え, 地下水面の位置は土壌が飽和していると仮定し, 地表面と同じ高さに設定した。whは地表面と水位の差に設定し, プノンペン洪水期と乾季の水位差は10m近くになるので10mを与えた。

飽和透水係数は表-1で示した値を K_x, K_z の両方に用いた。実験は, 降水量を与えずに行い, whを1日ごとに30cm下げ, 40日間計算し, 1日おきに土壌中の流速分布, 圧力水頭を求めた。この値は実際観測されたデータに基づいている⁷⁾。

4. 河岸崩壊過程の検討

(1) パイピング解析

a) 計算式

パイピング現象とは, 地盤中の土粒子が浸透流によって侵食され, 最終的に破壊にいたる現象を言う。パイピング発生に関する判定基準として, 限界流速あるいは限界動水勾配が用いられる場合が多い。本研究では, Koslova (コスロバ) の実験式を用いて限界流速を求める。Koslovaは混合粒径の試料に対するパイピング試験を実施して, 以下に示す限界流速 V_c (m/s)を求めた⁸⁾。

$$V_c = 0.0026 d^2 (1 + 1000 d^2 / D^2) \quad (5)$$

ここで, d はパイピング対象土粒子径 (mm), D は平均粒径 (mm) である。

b) 計算条件

パイピングの条件として, 土の平均粒径は表-1から平均粒径 $D=28.56 \mu m$ を用いた。一般にパイピング対象土粒子径 d と平均粒径 D との関係は $d/D=0.1$ なので, パイピング対象土粒子径 d は $2.856 \mu m$ が得られる。

よって式(5)から限界流速は

$$V_c = 2.33 \times 10^{-7} \text{ (m/s)}$$

となり, この流速以上の地中流流速の場所はパイピング発生条件下となる。

c) 計算結果および考察

図-4は3. で説明した浸透流モデルを使って, 計算開始時の圧力水頭は静水圧分布で与え, メコン河の水位と考えるwhを1日ごとに30cm下げ, 40日間土壌中の流速を計算し, 土壌中の流速分布を10日おきにプロットした図である。黒線の楕円で囲まれた領域が限界流速を超えている部分である。

計算開始から4日後にパイピング限界流速に達した部分が現れた。河川水位は約30日で10m低下し, 最も速い流速が河岸水深近傍に現れたのも30日前後だった。パイピング限界流速が発生している部分は河岸から約2.0mとなった。つまりこの幅がパイピングによって滑落しやすい土塊の厚さであると考えられる (以後パイピング破壊域と呼ぶ)。2000年と2001年, 2002年とプノンペン河岸調査では, 毎年崩壊が起こりはないが, 崩壊した土塊の厚さは1mから3mほどであり, この計算結果を裏付けるものとなっている。

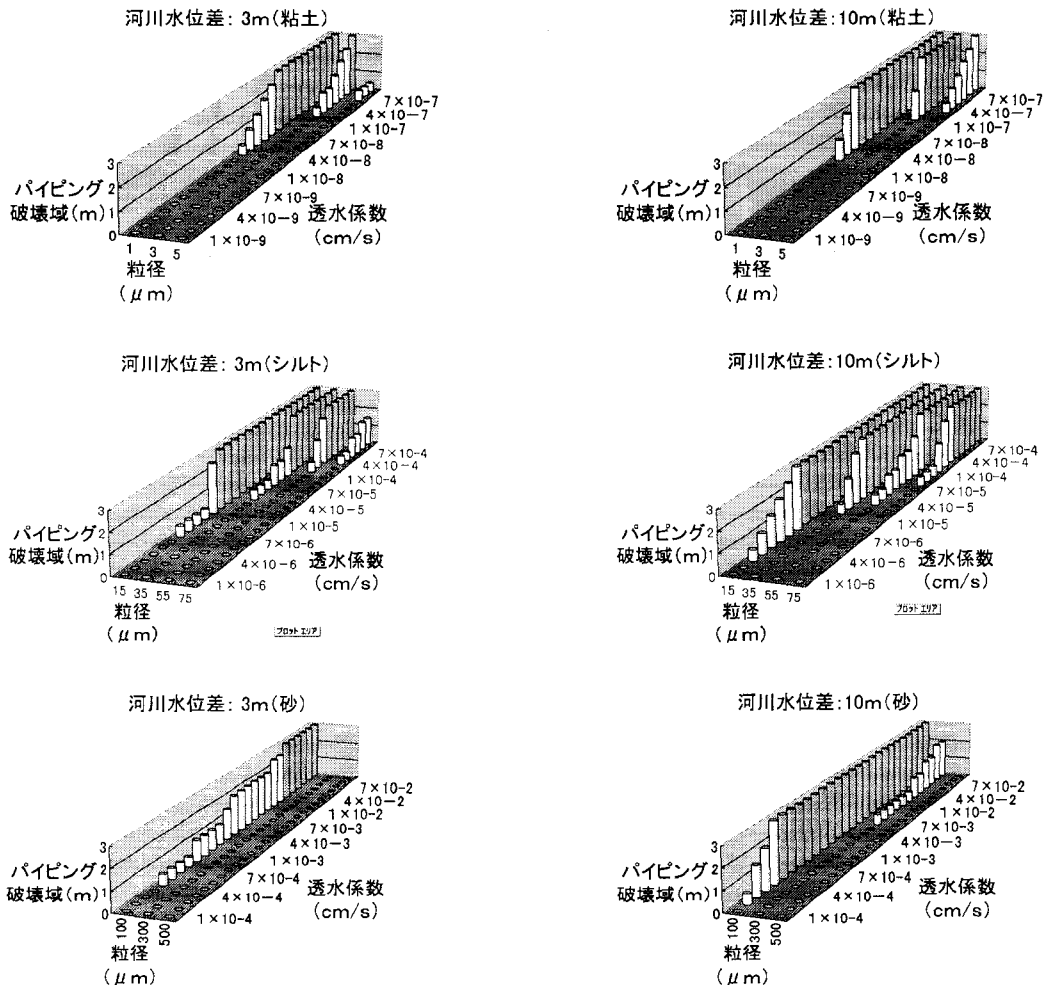


図-7 粒径、透水係数、河川水位差の関係

5. 粒径、透水係数、河川水位の関係

土壌の性質の違いによるパイピング破壊域について調べるため、河川水位差、粒径、透水係数を変えて数値実験を行った。河川水位は1日30cmずつ下げて計算を行った。図-7での粒径と透水係数の値はそれぞれ、土の種類のとおり値の範囲となっている。また、棒グラフの色が灰色になっているものはパイピング破壊域が3m以上のものである。

図-7から、粘土の場合は河川水位差を変化させてもパイピング破壊域の出方があまり変わらなかった。砂の場合は河川水位差によってパイピング破壊域の出方が変わり、粘土よりも砂のほうが河川水位差の影響を強く受けていると言える。一方、砂は粒径が300μmより大きくなるとほとんどパイピング破壊域が出なかった。しかしシルトの場合、シルトの粒径範囲全てでパイピング破壊域が発生した。つまり、シルトは粒径の影響が小さく、砂は大きいと言える。また、シルトは粘土、砂に比べ、河川水位差と粒径に関係なくパイピングが発生する可能性が高いと考えられる。

メコン河の場合、中流から下流にかけてはシルト質

の河岸が多い。このことは、洪水の規模にかかわらず地中流が侵食に影響している。また、上流から中流域には砂の河岸が多く、この地域は大きな水位差をもたらす洪水の場合に地中流が侵食に影響すると考えられる。

6. 河口からの距離に応じた地中流の影響

平均的な洪水と考えられる1994年のメコン河河岸の実測値⁹⁾から河口からの距離、粒径分布、水位変動の関係を求め(図-8)、その関係から得られた河口からの距離に応じた粒径と水位変動の値を用いて計算を行い、河口からの距離と侵食幅の関係を求めた(図-9)。図-8から、メコン河上流域では粒径の荒い礫や砂が多く分布し、河川水位差が下流域に比べると小さい事がわかる。図-7の砂のケースおよび図-9とから、この地域ではパイピングが発生する可能性は低く、地中流があまり河岸侵食に影響してないと考えられる。タイ、ラオス、ミャンマーの国境であるチャンセンから中流域に位置するラオスの首都ビエンチャン以下では、図-8から細かい砂が分布し、

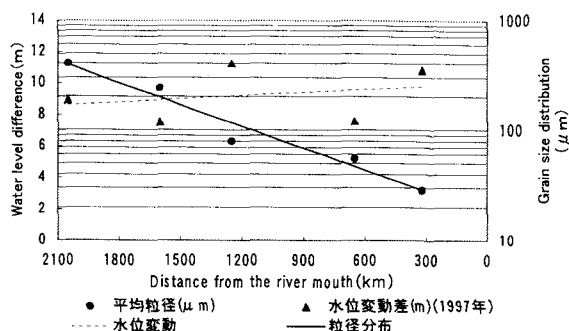


図-8 粒径分布と最大水位差

河川水位差は約6mとなっている。図-9からピエンチャンではパイピング破壊域が出ていない。土木学会の調査では、ピエンチャンの河岸崩壊の理由に地中流が疑われたが¹⁰⁾、それと反する結果となった。しかし、ピエンチャン付近では年によって河川水位差が変わり、最大で河川水位差が10mになるときもあり、今回の結果だけでは結論付けることはできない。図-7の砂のケースから河川水位差が大きいときにはパイピング破壊域が出ていることから、パイピングが原因で河岸侵食が発生する可能性はある。下流域に位置するプノンペン河岸付近ではシルトが分布している。プノンペン付近の河岸では乾季の時期に水みちが数多く見える。現地の状況と今回の計算結果から、下流域では、パイピングが原因で河岸侵食が発生している可能性は十分高いと考えられ、河岸侵食が地中流の影響を受けていると言える。つまり、図-9からメコン河に近い性質の大陸河川の場合、河口から1500mの地点まではパイピングが原因で河岸侵食が発生していると考えられる。

7. まとめ

本研究では河岸侵食を地中流の観点から調査し、以下のような結論を得た。

1. パイピング限界流速を超える領域上の土塊の厚さは2.0mとなり、円弧すべり面の計算からは、すべり面上の土塊厚さは2.0mとなり、これらの値は実地調査で見られた値とほぼ一致していることから妥当と考えられる。
2. このことから河岸侵食に地中流の影響があることが考えられる。
3. 砂地盤中の地中流は河川水位差と粒径の影響を強く受ける。一方シルト地盤は河川水位差と粒径に関係なくパイピングが発生する可能性が高い。
4. 下流域に行くほど侵食に対して地中流の影響を強く受けている。

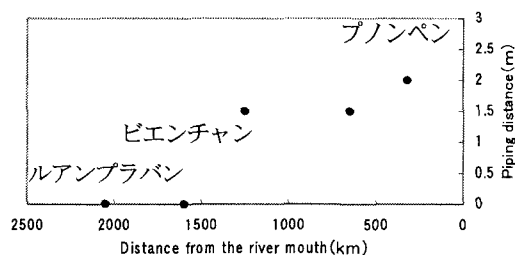


図-9 河口からの距離と侵食幅

侵食は河川全体の動きの影響が大きく、洪水時水面下の掃流作用がもっとも効いていることは間違いない。しかし、メコン河のような乾季と雨季の水位差が大きい熱帯モンスーン地域では岸側の地中流の作用も無視できないと言える。

謝辞：すべり面の計算では株式会社ダイヤコンサルタント東北支社の高坂敏明氏と山田満秀氏に解析の助力を得た。東北大学土木工学専攻水環境システム学研究室の鈴木健司氏と萩原照通氏には砂の採取を、同地盤工学研究室内の松谷明洋氏、同数理システム設計研究室の須藤良清氏には砂の分析を行って頂いた。また、本研究は科学研究費萌芽研究（代表者：風間基樹）の補助を受けた。ここに併せて謝意を表す。

参考文献

- 1) 横倉順治・須賀堯三：開発途上国の氾濫原道路とその橋梁計画のありかた 河川防災の視点から、水工学論文集，第44巻，pp.337-342，2000。
- 2) 土木学会：メコン川中・下流域の現地調査と研究課題の抽出，2000年3月調査報告書，2000。
- 3) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，1985。
- 4) 横尾善之，風間聡，沢本正樹：流域土壌の透水性と基底流量の長期的変動特性に関する数値実験，水工学論文集，第45巻，pp.331-336，2001。
- 5) 谷誠：一次元鉛直浸透によって生じる水面上昇の特性，日本林学会誌，64(11)，pp.409-418，1982。
- 6) Brutsaert, W.: The permeability of a porous medium determined from certain probability laws for pore size distribution, Water Resources Research, pp.425-434, 1968。
- 7) MRC: Lowe Mekong Hydrologic Year Book, 1994。
- 8) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，第2編，1999。
- 9) Span Company Limited, Netherlands Engineering Consultants, Water Development Consultants Co: MEKONG RIVER BANK EROSION STUDY, Final Report Volume III, March 1995。
- 10) 土木学会水理委員会・国際建設技術協会：メコン河調査団報告，2000年3月，pp.109，2000。

(2003. 9. 30受付)