## 洪水時に生じる水面勾配を考慮した洗掘対策工の安定性評価について (stability evaluation of scour protection considering the gradient of water surface during flooding)

丹羽俊介<sup>1</sup>,前田健一<sup>2</sup>,渡邉諭<sup>3</sup>,内藤直人<sup>4</sup>,安江絵翔<sup>5</sup>

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address s.niwa.758@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

3 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地盤防災 主任研究員

4 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 助教

5 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻

## 概 要

近年,激甚化する台風・豪雨の外力に起因して橋脚周りに設置されている洗掘対策工に被害が出ている。 現在の問題点として,洗掘対策工の変状が発生する外力が明確に整理されていない。本研究では対策工の 安定性に関して地盤力学的な観点からアプローチを行い,特に地盤内で生じる浸透流が対策工にもたらす 影響について浸透流解析及び開水路模型実験を用いて検討した。浸透流解析の結果,対策工周りの浸透流 について,下流側を向いた均一方向になり,水面勾配の値に比例した力が作用することが分かった。また, 極古典的な式を使用し,対策工が滑動するのを仮定した安定計算をしたところ,0.8 以上の水面勾配が生じ ると滑動する結果となった。阻害物を使用して水面勾配を考慮した実験では,流速と共に水面勾配が増加 させ,実験時滑動した条件と計算結果が概ね一致したことから洗掘対策工の安定性計算に水面勾配による 地盤内浸透流を考慮する必要性が示された。

キーワード:洗掘,浸透,動水勾配

## 1. はじめに

## 1.1 背景·問題提起

近年, 激甚化する台風・豪雨の外力に起因して河川にお ける洗掘被害が頻発している。河川橋脚周辺には洗掘対策 として根固め工(以下,対策工と称す)が設置される事例 が多い。鉄道分野では定期的に実施される目視検査によっ て対策工の変状の程度や河床状況を確認し,必要に応じて 深浅測量や衝撃振動試験などによって橋脚の健全性を評 価している。しかし、この手法は現状の健全性を診断する うえでは有効な手段であるが、将来的な増水による洗掘に 対する防護機能の低下までを反映した指標にはなってい いない。そのため、将来的な増水によって対策工が変状し、 機能が低下した場合に、その機能低下が橋脚基礎の健全度 に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。しかし、現 状,対策工の機能評価にあたっては,変状の有無や過去の 経験に基づく変状程度との比較による定常的な評価にと どまっているのが現状である。以上の点から,対策工自体 の洗掘に対する抵抗性を定量的に明らかにする必要があ る。対策工の洗掘に対する抵抗性を定量的に評価するため には,対策工が安定性を失う根本的な変状プロセスを把握 することが必要であると考えられる。従来,対策工の被災 メカニズムの解明に関しては,主に水理学的な観点で実施 されてきたが,近年,洪水流のような高速流体が地盤表面 に作用する際には地盤内部における応力変化等の影響を 受けることが定性的に明らかになってきている。

#### 1.2 本研究の目的

本研究では、対策工の安定性に関して地盤力学的な観点 からアプローチを行い、特に地盤内で生じる浸透流が対策 工にもたらす影響について開水路模型実験及び浸透流解 析を用いて検討してきた。これまでの研究では、洪水を模 擬した水平な開水路流れに対策工模型を設置した水平地 盤に作用させ、模型周辺の地盤内で発生する浸透流を着色 水によって可視化した。浸透流速を計測し、換算された透 水力による地盤の有効応力低下、さらには対策工の支持力 低下の影響を評価した所、著しい低下は認められなかった <sup>1)</sup>。そこで、本稿では、浸透流が対策工の安定性に及ぼす 影響が比較的大きいと想定される、橋脚や橋桁の存在、流 木等の障害物の影響で橋の上流・下流側に生じる水位差 (水面勾配)に着目し、その条件下における対策工の変状 に関する素過程の把握及び安定性評価を試みた。

## 2. 対策工の先行する不安定モードの把握

## 2.1 対策工の安定計算

図1に対策工に作用する力のイメージ図を示す。対策工 の不安定モードとして想定するのは,滑動,回転,浮上と する。それぞれの不安定モードについては,以下の条件を 満たす時に不安定であると判定した。

- a) 滑動:最大摩擦力(対策工一地盤間の摩擦力及びすべ り線上における地盤一地盤間のせん断強度)+受動土 圧<抗力+主働土圧
- b) 回転:重力によるモーメント<揚力・抗力によるモー メント
- c) 浮上:重力<揚力

各作用力及び作用モーメントの算出方法は以下である。 ・流体力(抗力/揚力): F =1/2×流体密度×抗力/揚力係数 ×流体力の作用面積×(河床近傍平均流速)<sup>2</sup>(揚力は摩擦 力及びせん断強度の算出時に有効重力が低減するものと して考慮される)

$$F' = \frac{1}{2}\rho CAv^2 \tag{1}$$

・摩擦力: F=対策工の有効重量×摩擦係数(摩擦係数μ
は,擁壁計算によく用いられる地盤とコンクリート面間の係数0.6を用いた)

$$F = \mu M'g \tag{2}$$

・せん断強度:T=地盤の有効重量(地盤の有効単位体積 重量×対策工直下の土塊体積)×tan(内部摩擦角)+粘着力 ×対策工直下の土塊底面の面積

$$T = \gamma' V tan \Phi + cA_g \tag{3}$$

・主働・受働土圧: P<sub>p</sub>=1/2×地盤の有効単位体積重量×
(対策工の根入れ長 - 下流側洗掘深)<sup>2</sup>×奥行方向の対
策工長さ×tan(π/4±内部摩擦角/2)<sup>2</sup>

$$P_{\rm p,} P_{\rm A} = \frac{1}{2} \gamma' V \tan(\frac{\pi}{4} \pm \frac{\phi}{2})^2$$
 (4)

 ・透水体積力: J=局所動水勾配(後述するが本検討では 水面勾配に近似)×水中単位体積重量×対策工直下の土 塊体積

$$J = i \gamma_{\rm W} V \tag{5}$$

流体力の作用面については,図2に示す面で定義する。 中央に位置する,揚圧力を消散するための空洞部は,揚力 の作用面積には含めないこととした.また抗力については, 根入れ部を作用面積には含めないこととした.回転に関す る計算に際し,回転軸に関しては図中に示す箇所で仮定し た。ちなみに,この回転軸はどの箇所に設定した場合でも, 安定計算による不安定モードが変化しない事を予め確認 している。また,対策工群に関する安定計算の方法として は,連結された対策工群を一体となった剛体として仮定し, 簡易的な力学計算を行った(図3)。

### 2.2 実験概要

実験は図 4,5 に示す開水路模型を用いた。装置内には 河床を模した幅 500mm,高さ 100mm,奥行き 300mmの 土槽区間を設けた。水流は水中ポンプ(流量:*Q*=120L/min)



図1 対策工に作用する力



図2 対策工に作用する流体力の作用面(仮定)



を用いて循環流を発生させた。土槽区間には, 珪砂 2 号, 豊浦砂を水中落下法により相対密度  $D_{r}=40\%$ で堆積させた。 珪砂 2 号の透水係数  $k=1.83 \times 10^{2}$ m/s, 平均粒径  $D_{50}=3.270$ mm,豊浦砂の透水係数は  $k=2.2 \times 10^{4}$ m/s,平均粒 径  $D_{50}=0.173$ mm である。実験に使用した模型対策工は図 6に示す。模型対策工は幅,奥行き方向に 48mm,高さ 29mm である。

### 2.3 地盤材料による変状の違い: case1~2

図7と表1に珪砂2号と豊浦砂を用い、対策工一個に 対して静的に流量が増加する水平流れを作用させた結果 を示す。地盤条件は移動床とし、対策工は7.5mm 地盤に 根入れさせた。結果、豊浦砂では対策工近傍の上流側の地 盤で洗掘が発生し、対策工が流体力に対して想定される不 安定モードになる前に、上流側に傾斜、沈下した。一方、 珪砂2号の場合は、数粒の粒子が動き出したが、防護工の 傾斜や沈下は観察されず、その後対策工が滑動モードで不 安定化する様子が観察された。よって、本検討では、傾斜 や沈下が先行して発生しない珪砂2号を用いて検討を進 める。



図7 実験結果(左図:豊浦砂,右図:珪砂2号)表1 実験結果:地盤材料による変状の違い

地盤材料	硅砂2号	豊浦砂
平均粒径(mm)	3.27	0.17
先行した事象	対策工の不安定が先行	洗掘による対策工の 傾斜・沈下が先行

#### 2.4 対策工の不安定モードの把握

対策工の基本的な不安定モードの把握をするため,実験 及び安定計算を実施した。また,本検討で実施する力学計 算の方法が模型実験の結果を予測可能であるかの確認も 目的に挙げられる。模型スケールで実施した実験について, 装置は図5に示す開水路を用い,地盤及び予め地盤に設置 した模型に対して静的に流量が増加する水平な開水路流 れを作用した。地盤条件は固定床条件(図8),移動床条件 の2種類で実施した。固定床については薬剤を用いて地盤 を固定した.また,安定計算方法の信頼性を確かめるため, 別途簡易的な平板型模型と箱型模型を作成し,実験及び計 算を実施した(図9)。これら2種類の模型の寸法につい て,幅,奥行き方向は模型防護工と同じ長さの48mmである。高さについて,平板型模型では模型対策工の突起部と 同じ 7.5mm,箱型模型では,模型対策工と同じ高さの 29mmである。



図8 固定床(薬剤固定)



図9 平板型模型及び箱型模型

## (1)固定床条件: case3~5

固定床実験における実験結果を図 10 に示す。不安定モードは平板型模型では回転、箱型模型と対策工模型では滑



図 10 各模型モデルにおける不安定モードの実験結果 (珪砂2号,固定床,上から case3, 4, 5)



図 11 各模型モデルにおける不安定モードの計算結果 (珪砂2号,固定床,上から case3, 4, 5) 動になった。また図 11 に計算結果を示す。安全率 1 以下 になると浮上,滑動,回転それぞれの運動が開始すること を示している。結果,実験結果と計算結果が一致したため、 本計算方法が実験結果をある程度予測できることが分か った。

#### (2)移動床実験: case6~8

移動床における実験結果と計算結果を図 12,13 に示す。 結果,実験結果と計算結果が凡そ一致すること確かめられ た。なお、箱型模型では洗掘の進展に伴う沈下・傾斜の進 行後に滑動が発生したが、今回の実験は計算方法の確認の ために実施したため、沈下・傾斜については特に言及しな い。



図 12 各模型モデルにおける不安定モードの実験結果 (珪砂 2 号,移動床,上から case6,7,8)



図 11 各模型モデルにおける不安定モードの計算結果 (珪砂2号,移動床,上から case6,7,8)

# 水面勾配(水位差)により生じる地盤内浸透流の算定

#### 3.1 水位差が生じ得る条件

洪水時に橋脚の存在に伴う水位の堰上げや,橋桁自体や 流れ着いた漂流物によって橋の上流側と下流側で水位差 が生じる。水位の堰上げは d'Aubuisson 公式等を用いて算 出する試みがある<sup>2)</sup>(図 14)。また,水位が上昇し,橋桁 に水面が接触する程度になると,橋桁の影響により橋の上 流側と下流側で水位差が一層拡大する可能性が考えられ る。特に橋桁に流木などの障害物が堆積すると上流側で高 い水位,下流側で低い水位となり,より大きな水位差が発 生することが報告されている。障害物が橋桁に衝突,堆積 した時に発生する水面勾配に換算するとおよそ 1 となる ケースも見られた<sup>3</sup>。





### 3.2 浸透流解析

#### (1) 解析ソフト概要

解析計算には地層科学研究所 GEOSCIENCE の 3D-Flow 三次元飽和-不飽和浸透流解析ソフトを使用した。3D-Flow は西垣らによって開発され,地下水流動問題対象の 数値解析ソルバーとして高い評価を受けている 「UNSAF3D」を搭載した3次元飽和-不飽和浸透流解析 ソフトウェアで,飽和/不飽和浸透問題,定常/非定常解析, 不圧/被圧地下水問題,透水係数の異方性考慮に対応可能 である。適用事例としては降雨浸透解析,止水壁の効果検 討,揚水による地下水低下シミュレーション,フィルダム 内の浸透シミュレーション,掘削/切土面からの湧水量の 評価があげられる。

## (2) 解析モデル・解析条件

解析モデルとしては、橋脚は設けず、模型スケールの対 策工が根入れしている地盤を再現した(図15)。地盤材料 のパラメータとしては、珪砂2号を想定し、透水係数は  $k=2.20\times10^{-2}$ m/s、飽和体積含水率は0.453とした.解析条 件(図16)としては、定常の飽和状態を想定しており、ま ず極単純な条件における浸透特性を把握するため、境界条 件として開水路流れで生じる一定の水面勾配を静水圧分 布と仮定し、静水位を入力した。

## (3) 解析結果

浸透流速ベクトルの結果を図 17 に示す。結果,対策工周 辺の浸透流は,下流側に向かう概ね均一な水平流れとなっ ていることが明らかになった。局所動水勾配の大きさ(浸 透流速を透水係数で除した値)については図 18 に示すよ うに,例えば水面勾配 *i* が 1 の場合には 1,水面勾配 *i* が 0.5 の場合には 0.5 のように,局所動水勾配と水面勾配の 値の大きさが概ね一致する事を確認した(図 18)。よって, 透水力の大きさ(透水力の算定式は式(5)に示した)は,水 面勾配に土の単位体積重量,対象とする土塊の体積を乗じ ることで求まることとした。



図 15 解析モデル(対策工中央の空洞部分は排水条件)



図 16 解析条件:静水位(全水頭)



図18 局所動水勾配の3次元コンターの解析結果

## 水面勾配による地盤内透水力を考慮した対策 エの滑動に対する安定計算

3章の結果を踏まえて、水面勾配による透水力を考慮した 対策工の滑動モードに対する安定計算を実施する。対策工 下の地盤に透水力が作用すると仮定して、2.2節に示す滑 動させようとする力に足し合わせて計算を行った。図 19 の結果は、滑動に対する対策工(0.5トン)の安定計算の 例である。横軸を水面勾配 i, 縦軸は滑りに対する安全率 Fs で1以下になると不安定化(滑動)になることを示し ている。結果,河床低下が全体的に発生した場合(対策工 近傍に発生する,局所洗掘は除く)には,対策工は水面勾 配が 0.8 以上生じる場合に不安定となる(滑動する)判定 となった。また、河床低下量などの条件が異なる場合であ っても、水面勾配が凡そ 0.5<i<1.0 の間で不安定になる結 果となり,水面勾配を対策工の安定計算(滑動モードの計 算)に考慮する必要があると思われる。ここで、対策工の 滑動に対する安定計算の妥当性を確認するための実験を 実施した(case9)。実験装置に橋桁を想定した構造物を設 置し,静的に流量が増加する開水路流れを発生させた。結 果(図 20), 流速の増加と同時に構造物の上流側と下流側 で水面勾配が発生、増加し、流速が 0.56m/s、水面勾配が 0.3 になった時刻に防護工が滑動する様子が観察された。 なお、流速は、流量を流積で除した断面平均流速である。 実験結果と計算結果を比較する(表 3)。安定計算の結果 は、横軸を水面勾配 i、縦軸を流量から算出した断面平均 流速 v(m/s)とし、滑動に関する安全率 Fs を求めた。紫の ラインは、内部摩擦角が35°と40°間の範囲で、Fsが1 に近づくため,対策工が不安定化(滑動)し始める。結果, 実験では流体が阻害物にあたると i が発生するため, 流量 が増加すると v, i ともに増加する軌跡をたどる。紫のラ イン上で対策工の滑動が観測されたことからiを考慮した 安全率計算の結果と概ね一致した。ちなみに, iを考慮し ない場合は単純に v のみ増加となって図中の白い× (v=0.67m/s)の箇所で不安定の予想となっている。したが って,対策工の安定計算においては,流速に加え水面勾配 によって生じる地盤内浸透流を考慮する必要性が示され たと考える。



図 19 水面勾配が滑動に影響する安全率の計算結果 (珪砂 2 号,移動床, case9)



図 20 計算結果の確認実験 (case9)

表 2 実験条件(case9, 珪砂 2 号, 移動床)



表3 構造物の存在により発生した水面勾配を考慮した対策 工の実験結果(case9)と安定計算結果の比較



5. 対策工の連結数が安定性に及ぼす影響

対策工の抵抗性を向上させるのを目的に,対策工を流下 方向に連結さる場合の水面勾配の影響を調べる。この章に おける連結とは、図5に示すように流下方向に防護工を並 べ剛結を仮定して、連結された対策工が一体となって滑動 する条件を想定している。図 21 に珪砂 2 号,移動床条件 時の計算結果を示す。横軸を流速方向の防護工の連結数, 縦軸を防護工のすべりに関する安全率 Fs とする。結果、 水面勾配がない場合では連結数を 2 個以上とすることで 滑動せず安定するのに対し、水面勾配が1の場合において は、複数連結させても Fs に大きな向上が見られず、安定 しない結果となった。続いてこの要因を考察する。図 22 の左のグラフでは滑動を促す力,右のグラフでは滑動を妨 げる力を示しており、横軸は防護工の連結数である。 なお 水面勾配がない場合には、緑色で示す透水力は発生しない。 水面勾配がない場合には,連結数が増えることで特に対策 工下の摩擦力が大きくなり安定する。一方,水面勾配があ る場合には,連結数が増えても地盤体積,及び透水力も大 きくなるため、安定性が上がらない事が読み取れる。した がって、水面勾配がない場合には連結数を増加させること で安定するが,水面勾配がある場合は,連結数を多くする ことに加えて対策工単体の重量を重くするなど各対策工 の抵抗力を確保する必要性があるといえる。

## 6. 結論

本研究では、洗掘対策工の定量的な安定性評価の手法の 開発を目的に、地盤内浸透に着目し、特にその影響が大き いと考えられる橋脚や橋桁などの存在により生じる水面 勾配が対策工の不安定化プロセスに及ぼす影響とその評 価手法について検討した。得られた主な結果は以下の通り



図 22 対策工の連結数-滑動を促す力及び妨げる力の関係

である。

- 対策工は、洪水発生前に河床低下や局所洗掘などによる変状がない場合、滑動モードで不安定化する可能性が高いことが分かった。
- 2) 対策工の安定性評価には、橋脚や橋桁などの存在により生じる橋の水面勾配に伴う透水力を考慮する必要性が示された。
- 3) 水面勾配による地盤内透水力を考慮した対策工の滑動に対する安定計算を実施した結果,開水路実験において部分的な根入れを有する対策工が滑動する水面勾配を判定できる可能性が示された。
- 4) 水面勾配の増加に対しては対策工の連結の効果が小 さい条件があり,連結に加えて対策工自体の重量増加 などの対策が有効な可能性があることが分かった。

今後の検討として,対策工が河床低下や局所洗掘等による 変状した際の安定性評価や,洪水時の高水位化,また,そ の継続時間の長期化に対抗できる粘り強さに関する検討 を行う。

#### 参考文献

- 丹羽俊介ら、水平流体の作用時に防護工下で生じる 地盤内浸透流が洗掘に及ぼす影響、土木学会学術講 演会 Vol.75、pp.Ⅲ-279、2020
- 川合亭,松本良男:橋脚によるセキ上げ背水について,農業土木学会誌,第47巻,第7号, pp.473-478, 1979.
- 国土交通省福井河川国道事務所,【福井豪雨映像アー カイブス 学術編】Online video, youtube, 2017/07/13, https://www.youtube.com/watch?v=pI-J7ycAqck , 2021/06/25