

[討議・回答]

村本嘉雄

Md. Munsur RAHMAN

共著

「突堤状河川構造物周辺における最大洗掘深の簡易予測法」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 642/II-50 2000年2月号掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

勝井秀博 (大成建設㈱)

Hidehiro KATSUI

1. はじめに

洗掘防止工に関する研究は非常に古くからなされており、教科書や実務書にも多くの記述がある。しかし、いざ個別の実構造物への当てはめになると、それらの書物から設計に必要な情報がすべて得られる訳ではない。とりわけわが国では、河川側岸に設けられる張り出し護岸 (spur dike) や橋台 (abutment) を対象としたとき、最終洗掘深 (平衡洗掘深) や、施工時に重要となる時間スケールに関する設計資料はほとんどないといつてよい。

局所洗掘のメカニズム解明のプロセスは、洗掘孔内の流れ、孔内の洗掘過程、砂粒の輸送過程の評価に分けられるが、高度な計算プログラムをもってしても、実用的な評価方法が確立されたとはいえない。

著者らは、clear water scour の条件下で、簡易なモデルを用いて洗掘孔の流れの集中度合いを評価し、これに基づいた平衡洗掘深の計算式を導き、著者の実験値や既往の計算式により検証している。また、これを発展させ、洗掘に要する時間を求める計算式も導いている。大胆な仮定に基づく簡易モデルの割に、底面せん断力比 τ_*/τ_{*c} の大きい領域で平衡洗掘深 d_s の実験値をうまく説明できていることに、まず、敬意を表したい。

しかし、モデルの理論的な妥当性と得られた結論を実用面でどのように用いるかについて、幾つかの懸念があるので、以下に質問したい。

2. 流量の集中度合いを表す定数 β について

β の定義は式(4)で示され、流速分布より直接的に、また d_s の実験結果より間接的に $\beta \sim 0.2$ の結論を得ている。しかし、まず、 $\beta \sim 0.2$ であることを示す直接的な実証データの例が少なく、説明も感覚的で

ある。また、 d_s の実験値による間接的な検証では、洗掘力、洗掘抵抗、砂の輸送過程のすべてがこの β にしわ寄せされ、これをもって「流量の集中度合い」といえるであろうか？

さらに、図-7の台形断面モデルでは、流れがEGFBの領域に集中する仮定に対して、図-13の三角形断面モデルでは、流れが洗掘孔全体に広がる仮定となっており、モデルの一貫性が無いように思われ、理解に苦しむ。流れの集中に関しては、連続式だけでなく、もう少し流体力学的な説明が欲しい。

3. 平衡洗掘深に達する時間 t_e について

構造物の設計では、平衡洗掘深のみを求められることが多いが、施工期間中の安全性の検討では時間ファクターも求められる。平衡洗掘深に到達する時間 t_e は安全性の検討にとって重要なパラメータであるが、残念ながら陽形式での表示がなされていない。実務者にとっては何らかの形で t_e が手軽に求められると有り難いが、定式化かグラフ化の方策についてご教示願えないか。たとえば、Nakagawa & Suzuki¹⁾ は橋脚の洗掘深が橋脚径 b と同等となる時間 t_1 を以下の式で示している；

$$t_1 = 29.2 \left[\frac{b}{(\sqrt{2} U_0)} \right] \left[\frac{(\Delta g d_{50})^{1/2}}{(\sqrt{2} U_0 - U_c)} \right]^3 \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{1.9}$$

ただし、 Δ : 砂の水中比重、 U_0 : 接近流速 (断面平均値)、 U_c : 砂の移動限界流速。

そのほか、オランダのデルタ計画の研究を基にした実務書²⁾ にも類似の形式の時間が示されている。

また、洗掘深の時間発展は $d_s \sim t^\gamma$ の形式で表現されることが多い。clear water scour の条件下では特に、 τ_*/τ_{*c} または U_0/U_c が洗掘孔の時間発展に重要な働きをする。著者の図-17から γ の値を読み取ると、概ね0.1程度となる。一方、文献1)、2)ではそれぞれ、 $\gamma = 0.22, 0.4$ が示されており、洗掘の速度が速

い。討議者は4. に述べる実験のスケールの違いが気になるところであるが、著者はどのように説明されるであろうか？

4. 模型実験の縮尺効果

著者の実験の水深のスケールが1~2 cm と非常に小さく、使っている砂の粒径 ($d_{50}=0.142$ cm) との h/d_{50} が10程度とかなり小さいことが気になる。レイノルズ数も層流条件と見做せるほど小さい。Raudkivi⁹⁾ は、橋脚の径 b と砂粒径 d_{50} との比が $b/d_{50}<10$ での洗掘深は $b/d_{50}>100$ の場合の2/3程度であることを示す実験データを示している。さて、このような実験条件の制限下にあっても、著者らの最終洗掘深 d_s は、10数 cm 以上の水深で得られたと推察される既往の実験値と大差ない結果となっている。この理由

は何であろうか？したがって、最終洗掘深において、大差ない結果が得られているとしても、時間スケールに対する保証はどのようになるであろう。

このような問題は、水深が浅い河川での洗掘を扱う研究者にとっては自明のことと思うが、海洋構造物の洗掘を扱ってきた討議者には理解不足の面があり、この機を借りてご教示いただければ幸いである。

参考文献

- 1) Nakagawa, H. and Suzuki, K.: Local scour around bridge pier in tidal current, Coastal Engineering in Japan, 19, pp. 89-100, 1976.
- 2) Hoffmans, G. J. C. M. and Verheij, H. J.: Scour Manual, A. A. Baklema, Rotterdam, Brookfield, 205 p., 1997.
- 3) Bruesers, H. N. C. and Raudkivi, A. J.: Scouring, A. A. Baklema, Rotterdam, Brookfield, 143 p., 1991

(2000.8.8 受付)

▶ 回答者 (Closure)

—————村本嘉雄 (大阪工業技術専門学校)・Md. Munsur RAHMAN (バングラデシュ工科大学)
Yoshio MURAMOTO and Md. Munsur RAHMAN

1. はじめに

著者らの論文に対して討議を頂き感謝いたします。本論文の主旨は、概説に記したように、突堤状構造物の静的洗掘状態での最大洗掘深に対する支配要素を明らかにすることにあり、突堤斜面勾配の影響にも注目しております。したがって、現象を単純化したマクロな解析的モデルから最大洗掘深の簡易予測式を誘導することに重点を置いています。こうした予測式は河川構造物の概略設計に有用ですが、経済面も考慮した正確な設計に要求される構造物周辺の洗掘形状や洗掘過程を予測するにはそれぞれの事例ごとに数値モデルを用いる必要があります、両者の使い分けが重要と思いません。

以上は自明のことですが、討議者の「はじめに」の中に「局所洗掘の解明のプロセスは、洗掘孔内の流れ、孔内の洗掘過程、砂粒の流送過程の評価に分けられる」とあり、質問の中でも論文の主旨が十分理解されていない点もあるようですので最初に確認しておきます。以下、討議者の質問項目の順に回答します。

2. 流量の集中度合いを表す定数 β について

質問-1

$\beta \sim 0.2$ であることを示す直接的な実証データの例が少なく、説明も感覚的である。また、 d_s の実験値による間接的な検証では、洗掘力、洗掘抵抗、砂の輸送過程のすべてがこの β にしわ寄せされ、これをもって「流量の集中度合い」といえるであろうか？

質問-1への回答

まず、この質問に対する論文中の説明箇所を再掲すると以下のようです。

「 β は、本来、最大洗掘断面内での流速分布から決定する必要があるが、本モデルでは洗掘形状を台形断面に単純化して、底辺からの鉛直線で流量集中域を区分している。したがって、式(9)の \bar{d}_s と \bar{b} の関係と実験値を比較して、 β を間接的に決定する方法をとる。なお、洗掘孔の形状から求めた β の値は、台形断面の決め方に任意性が入るので正確ではないが、 $\beta = 0.11 \sim 0.33$ の範囲にあって、その平均値は次節で示す $\beta = 0.2$ に近い値であった。」

すなわち、 β には最大洗掘深近傍の流速と洗掘形状を平均化、単純化した影響が含まれています。したがって、討議者のいう「直接的な検証データ」を得ることは困難ですので、 β を実験値から決定するととも

に、3.(4)でそれが突堤長・水深比に依存しないこと、掃流力の大きい範囲ではほぼ一定値になることを、 β の逆算値およびモデル式から説明しております。本論文のようなマクロな解析モデルでは、モデル定数が変化しないことが重要で、それは平均流の粗度係数、拡散係数、透水係数などに対して「直接的な検証データ」が得られないのと類似しています。また、「洗掘力、洗掘抵抗、砂の輸送過程のしわ寄せ」の指摘については質問の意味が不明確で理解できないのですが、静的洗掘状態での最大洗掘深は掃流力（流速）と限界掃流力（限界流速）の比に支配され、それは別のパラメータで表されているので β には含まれないと考えます。

質問-2

図-7の台形断面モデルでは、流れがEGFBの領域に集中する仮定に対して、図-13の三角形断面モデルでは、流れが洗掘孔全体に広がる仮定となっており、モデルの一貫性がないように思われ、理解に苦しむ。流れの集中に関しては、連続式だけでなくもう少し流体力学的な説明が欲しい。

質問-2への回答

最大洗掘位置での河床横断形状（図-3）および突堤周辺の流速分布（図-4～図-6）と実験の現象観察からこのようなモデル化を行ったわけで、その根拠は論文の34～35頁に記しておりますがつぎのようです。すなわち、 τ_*/τ_{*c} が小さい場合、あるいは τ_*/τ_{*c} が大きい場合でも洗掘初期においては、三角形断面の洗掘孔全体に流れが収束して、洗掘孔の河床全面で流砂があります。一方、 τ_*/τ_{*c} が大きく洗掘孔が発達した状態では、洗掘孔の断面形状は台形に近くなり、最大洗掘深付近の流速は接近流の流速を上回りますが、洗掘孔斜面では接近流より小さい流速になりますので、流砂は最大洗掘深付近に限定され、洗掘孔斜面の流砂は水中安息角を維持するように斜面を滑り落ちて洗掘孔を拡大させていきます。このように洗掘孔の形状によって流速分布と流砂の特性が変わりますので、三角形と台形断面のモデルを分けて定式化し、両者を結合して最大洗掘の時間変化の予測を行っていますが、洗掘過程を一貫して取り扱うには数値モデルによる以外に方法はないと思います。

流れの集中の基礎式に関しては、平坦河床の条件では突堤の上下流で水面勾配が急変し、圧力水頭と速度水頭の流下方向変化が急激ですので、その影響を考慮する必要があります。しかし、洗掘孔が発達しますと水面勾配の変化が緩慢になりますので、洗掘深に対応した流下方向の流速変化と横断方向の流速分布の変化が重要となり、流れの連続式によって洗掘孔の掃流力

が説明できるのもと考えています。このような水理機構から、従来の解析モデル（Laursen⁹⁾、Lim⁹⁾、椿・斎藤⁹⁾）においても、洗掘の進行に対応した流速変化は連続式のみによって解析されており、本論文ではそれに横断方向の流速分布の変化を考慮したものといえます。なお、フルード数が大きい場合についても少し実験を行いました。洗掘初期では水面勾配の変化がさらに急激になりますが、洗掘孔が発達しますと常流の場合と同様の取り扱いができるものと考えております。

3. 平衡洗掘深に達する時間 t_e について

討議者の質問は、1)平衡洗掘深に到達する時間 t_e の簡単な求め方と、2)洗掘深の時間変化を $d_s \sim t^\gamma$ の関数形で表したときの指数 γ の値について、の2点です。

1)の質問については、著者らの解析では無次元平衡時間 \bar{t}_e を無次元洗掘深 \bar{d}_s が3.の解析で得られる最大洗掘深に達する時間より決定しており、 t_e については系統的な検討は行っておりません。それは、結語で述べているように、洗掘初期では突堤で遮断された流量が洗掘孔の外にも流出するため、前述の三角形断面モデルでは \bar{d}_s の計算結果が過大評価になっており、 t_e を正確に評価することができないと考えたからです。また、静的洗掘条件では、従来の実験でも指摘されているように、洗掘孔の斜面が間歇的に滑落するために d_s の微小な段階状の増加傾向が長時間継続し、 t_e の確定値を実証することが難しいことにもよっています。

2)の質問については、 γ の値は時間的に変化するので一義的な値を決めるのは難しいと思います。討議者は、本論文の図-17から概ね $\gamma=0.1$ 程度で従来の研究の値より小さいと述べられていますが、洗掘初期ではそれより大きく、平衡状態付近では小さい値になっており、実験条件による差も大きいといえます。いずれにしても洗掘深の時間変化を $d_s \sim t^\gamma$ の関数形で定式化することには無理があり、上述のように洗掘過程を数値モデルによって解析する以外に洗掘深の時間発展を求める方法はないと考えます。

4. 模型実験の縮尺効果

ここでは、著者らの実験の水深が小さく、 h/d_{50} が10程度で、レイノルズ数も層流条件に近いことによる d_s と時間スケールに対する影響について質問され

ています。

著者らの実験条件を接近流で見ますと、レイノルズ数は4200～5300、粒子レイノルズ数は30～40、 $h/d_{50} = 10 \sim 15$ ですので、粗度要素によるバッファ領域が十分小さい粗面乱流の条件になり、流速分布の測定結果からも対数則に従うことを確認しております。したがって、著者らの実験は討議者の指摘するような特殊な条件にはないと考えます。

なお、討議者は、3.、4.の質問の中で、橋脚周辺の洗掘に関する従来の知見を引用し、著者らの論文と比較されていますが、突堤周辺の流れでは、橋脚の洗掘要因である馬蹄形渦の実体が不明確ですので、橋脚の最大洗掘深およびその時間変化との直接的な比較はできないと思います。

(2001.1.16 受付)