

付属資料 4

洗堀の推計法

水流の収縮による洗堀を含む洗堀量推定は国内ではあまり行われな
いと思われるので FHWA（米国連邦道路
庁）のガイドブックの手法を紹介する。詳
細は参考文献を参照のこと。

河床の変動は第一に長期的な河床低
下、第二に橋梁による水流の収縮によ
る洗堀、第三に橋脚などの局所的洗堀の3種類から構成される。

河床の変動は過去の河床の記録など河相の分析などによって行うが、本欄では取り上げない。

FHWA の推奨する洗堀推計手順では、上記2種の変動を合計して推計洗堀とする（図1）。以下順に概要を述べる。

- ① 水流収縮による洗堀（contraction scour）¹に関する基本式は以下の通りである²（図2）。

$$y_2 = y_1 \cdot (Q_2/Q_1)^{6/7} \cdot (W_1/W_2)^{k_1} \cdot \dots \quad (3-1)$$

$$y_s = y_2 - y_0 = (\text{収縮流による河床低下の平均値}) \quad \dots \quad (3-2)$$

ここに； y_1 = 上流の平均水深

y_2 = 収縮部の平均水深

y_0 = 洗堀前の収縮部の平均水深

y_s = 平均洗堀深

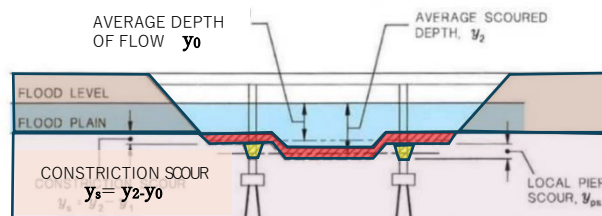
Q_1 = 上流側で土砂を搬送する水流量

Q_2 = 収縮部の水流量

W_1 = 上流部主流（main channel）の河床幅

W_2 = 収縮部の河床幅

k_1 = 沈降速度(fall velocity)と上流での剪断速度(shear velocity)からきまる定数, 0.59-0.69. 粘着性(cohesive)があるほど値は小さくなる。



出典: AUSTROADS, Guide to Bridge Technology Part 8: Hydraulic Design of Waterway Structures

図1 水流収縮による洗堀と局所洗堀を別途計算し合成する推定法概念図

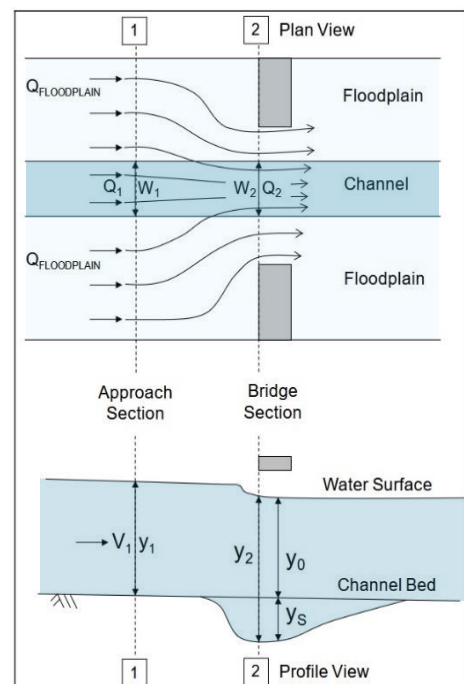


Figure 8.2 Live-bed contraction scour variables.
出典: US.DOT: Hydraulic Design of Safe Bridges

図2 橋梁による水流収縮洗堀の変数

式(3-1)の適用には W や Q の決定方法など曖昧さが残る。Evaluating Scour at Bridges においても触れられていて³、テキサス州 DOT の洗堀分析ガイドにおいても

¹ 一般的な収縮の現象を表すときは contraction を特定の事象を表すときは constriction が好まれる傾向がある。

² US. DOT: Evaluating Scour at Bridges Fifth Edition, 2012, p.6.13.

³ US. DOT: Evaluating Scour at Bridges Fifth Edition, 2012, p.6.10 Notes:1

推奨されているのは、実際の流速分布を考慮して、右岸氾濫原流、主流域、左岸氾濫原流の3グループに分けて別々に推計する方法である⁴。ただし、洪水流が一気に狭い開口部（橋梁）に収縮するような小規模な橋梁の事例では、 $W1 \equiv$ 上流側洪水流の幅、 $W2 \equiv$ 橋長とみなして簡略計算できるであろうし、河川横断図を得て、2次元流解析も容易なので必ず計算しておくべきものである。Evaluating Scour at Bridges の計算事例では y_2/y_1 の値として2.0が示されていて、相当大的な洗堀が想定されている。このような推計結果に関しては専門家の判断を待つべきものである。しかし数多く遭遇する海外の事例から類推しても、水流収縮による洗堀が重大であるという計算は納得できるものである。実務者としてはこのような収縮水流による影響に配慮した設計と対策に意を用いるべきであろう。

- ① 橋脚周囲の洗堀量は、国内においても従来から研究がなされているので例えば、（参考文献・資料）の10. 建設省土木研究所：治水上から見た橋脚問題に関する検討，土木研究所資料第3225号，及び11. （財）国土技術研究センター：河川を横過する橋梁に関する計画の手引き（案）を参照するのが良い。

一方 FHWA では比較的明確に一般化した推定式を使用している。環境の類似した大陸河川への適用は問題ないと思われる。これは日本でも引用されている。

洗堀深は次式であらわされる(図 4)。

$$y_s/a = 2.0K_1K_2K_3(y_1/a)^{0.35}Fr_1^{0.43} \cdots (3-3)$$

ここに： y_s = 洗堀深

y_1 = 橋脚前面の水深

K_1 = 橋脚形状の補正係数(図5，表1)

K_2 = 橋脚の流向との傾き補正係数(表2)

K_3 = 河床条件の補正係数(表3)

a = 橋脚断面の幅

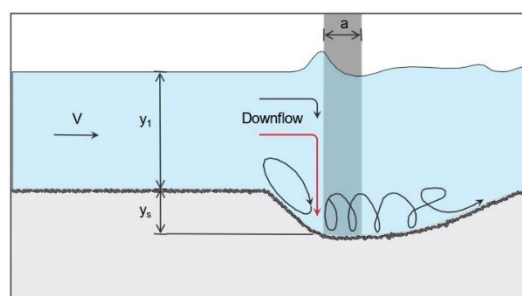
L = 橋脚断面の長さ

Fr_1 = 橋脚直前での Froude 数

$$= V_1 / (g y_1)^{1/2}$$

V_1 = 橋脚直前での流速

g = 重力加速度 (9.81m/s²)



出典：US. DOT: Evaluating Scour at Bridges Fifth Edition(図3-13とも)

図 4 橋脚洗堀の変数

⁴ Texas DOT: Scour Analysis Guide, 2023, p.8

式3-3を展開すると洗堀深の絶対値は $y_s = 2.0K_1K_2K_3y_1^{-0.15}a^{0.65}V_1^{0.43}g^{-0.07}$ で表される。従って橋脚の洗堀深は橋脚幅 a と流速 V_1 それぞれのほぼ2分の1乗に比例する。あるいはむしろその影響程度は鈍感であるともいえる。

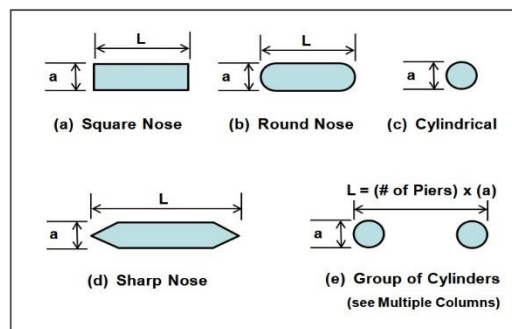


図5 橋脚形状の分類（断面図）

表 1 橋脚先端補正係数

Table 7.1. Correction Factor, K_1 , for Pier Nose Shape.	
Shape of Pier Nose	K_1
(a) Square nose	1.1
(b) Round nose	1.0
(c) Circular cylinder	1.0
(d) Group of cylinders	1.0
(e) Sharp nose	0.9

表 2 橋脚の流向補正係数

Table 7.2. Correction Factor, K_2 , for Angle of Attack, α , of the Flow.			
Angle	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
L = length of pier

表 3 河床条件の補正係数

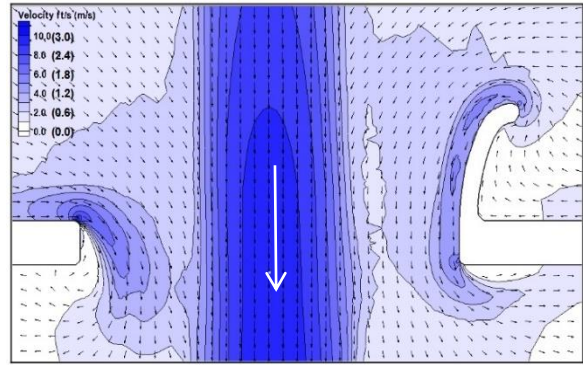
Table 7.3. Increase in Equilibrium Pier Scour Depths, K_3 , for Bed Condition.		
Bed Condition	Dune Height ft	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

②橋台周辺の洗堀問題は実際の構造や河床断面形状を反映しなければならず複雑であるが、NCHRP（National Cooperative Highway Research Program：FHWAの支援で運営される研究計画の一つ）が開発した推計式が良いとされてきた⁵。しかしその後の検証で、過大に計算されることが判明し、現在各州は橋台周辺の洗堀推計は行わず、橋台周辺に捨て石（riprap）等で洗堀防止工を行うことで対処するように変更している⁶。実際の被災実態に鑑みると①の収縮洗堀を想定し対策を講じることが優先される。

⁵ US. DOT: Evaluating Scour at Bridges Fifth Edition, 2012, の Chapter 8 による計算法。

⁶ インディアナ州では Chapter 203 of the Indiana Design Manual, Hydraulics and Drainage Design(p.50)で橋台洗堀は riprap で防護するので計算は不要であるとしている。

このような洗堀に対しては捨て石、ふとん籠、根固めブロックなどの対策の他にガイドバンクが使われることがある。その効果を2次元流解析で示したものが図6である。左側の橋台上流側の最大流速が2.7m/s であるのに対して、右側のガイドバンク周辺の最大流速は1.8m/s と3分の2となっている。これを防護工としての捨て石の必要な径に当てはめると、必要径は流速の二乗に比例するので、約0.44倍と半分以下の径で良いことになる。また、流速の速い箇所がバンクの近くであるので対策や管理が容易であろう。一方左側の橋台では先端の上流側の流速が極端に上昇していて橋台の近くで洗堀が進展するのはリスクが大きく、また洗堀の範囲も広くなり橋脚の洗堀との競合が発生しそうである。ただしこの事例の流速2.7m/s であれば、US. Army Corps 式の big turbulence flow の場合の $d_{50} > 1/23.9 \cdot V^2$ で計算すると中央値 d_{50} で30cmであり⁷、対策実施可能な範囲である。ちなみに流速1.8 m/s の場合は $d_{50} > 13\text{cm}$ である。



出典：US.DOT: Hydraulic Design of Safe Bridges

図6 架橋部築堤先端にガイドバンクを設けた場合（右側）とない場合の流速分布の違い。

③ 本文の図3-7における⑤の、洗堀量による渡河施設設計の適否検討の際の主要な項目は以下の通りである。

- ・洗堀孔の範囲は隣接構造物のそれと連動することは無いかな？
- ・洗堀設計洪水に対して、洗堀の深さは当初の想定以下か？推定される洗堀深で橋脚設計時の支持力は保持できるかな？
- ・洗堀設計チェック洪水の洗堀に対して、一定の安全が確保できるかな？（例えば通行止めにより点検するのは良いが、いきなり落橋したりしてはならない）。

⁷ 建設省土木研究所：治水上から見た橋脚問題に関する検討，土木研究所資料第3225号，P.40