

橋脚の局所洗掘に関する実験的考察 Local Scour Around Pier

建設省土木研究所 正員 須賀 堯 三
建設省土木研究所 正員 高橋 晃
建設省土木研究所 正員 坂野 章

1. はじめに

橋脚の水理的側面からみた安全性は、周辺に生じる局所洗掘現象が大きな比重を占める。橋脚周辺の局所洗掘機構に関しては、従来から数多くの調査・研究が行われているが、現象を支配する多くの要素が複雑に影響し合うため、十分な精度をもって知ることは困難である。したがって、種々の条件に対応しうる洗掘深の予測法は確立されておらず、洗掘範囲や防止工法等は経験的に処理されているものも多く、洗掘の予測や対策工法を明確にすることが重要となっている。

ここではこれまでの円柱橋脚実験の研究成果の資料も含め、不足する領域の大規模橋脚実験によって、より広範囲な水理的検討を行うとともに、これらの結果に基づいた洗掘深推定法について考察する。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した水路は、長さ30m、幅60cm、深さ50cmの両面ガラス張りの鋼製可傾水路、長さ30m、幅2.0m、深さ1.5mのコンクリート製構造物水路、および長さ100m、幅6.0m、深さ2.4mの大型水路である。構造物水路は中央部の長さ10m間にわたって、両側ともガラス張りの観測部となっており、最大600ℓ/sを通水することが可能である。大型水路は図-1に示すように原寸大に近い規模の実験を目的としたものであり、水路中央部10m間は水路底より下4.5mの深さのピットが設けられている。給水設備は最大4.5m³/sまで可能となっている。

河床材料としては図-2に示すような粒径加積曲線をもつ中央粒径 $d_{50} = 0.22\text{ mm}$ 、 0.47 mm 、および 1.5 mm の3種類を用い、可傾水路で20cm、他の水路は50cm厚に敷き移動床とした。ピアのモデルは、可傾水路で2.6～9.0cm、構造物水路で2.0～32.0cm、大型水路で9～100cmの塩化ビニール製および鋼製の円柱を用いた。実験方法は通水初期の流れのために砂粒が異常な動きをしないよう下流端を堰上げておき、徐々に水路に水を張って所定の流量を通水しながらゲート在所定の水位になるまで降下させ、流れが定常になった時点で実験開始とした。したがっ

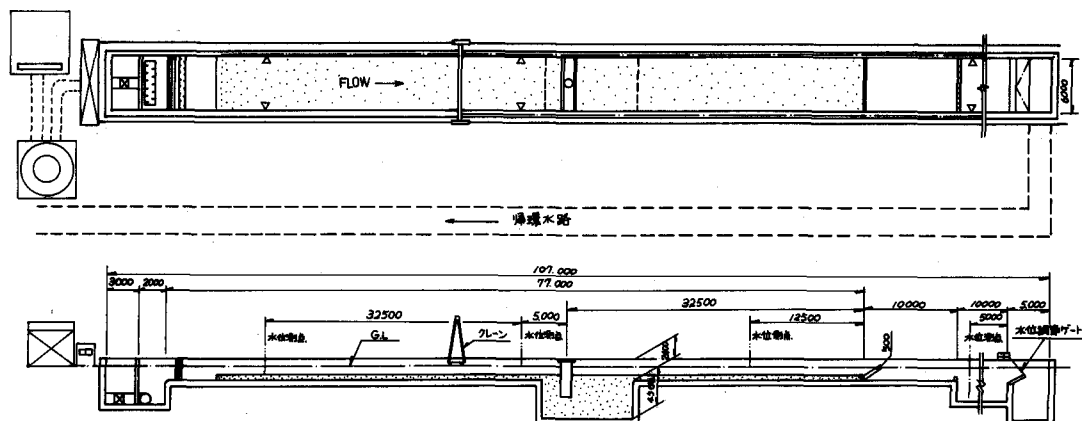


図-1 実験水路概要図 (大型水路)

て、洗掘は開始以前に若干進行するため、洗掘開始時間やその変化特性は必ずしも正確には測定されていない。なお、実験条件によっては、水面勾配にほぼ一致するような河床勾配を与え、また平均河床高が低下しないように給砂を行った。河床面の高さは砂漣などにより著しく変化するため、円柱の上流側 1.0 ～ 5.0 m 間断面の平均河床高を求め、この平均河床からの低下量を洗掘深とした。

3. 実験結果とその考察

3-1 橋脚周辺の洗掘特性

実験は表-1 に示すように後述する静的平

衡から動的平衡状態までの範囲で連続的に行なった。橋脚周辺の流れの特性は、橋脚前面で左右に分かれる流れと、前面で鉛直下方に橋脚に沿う下降流とに大別される。左右に分かれる流れは、橋脚壁面に沿った湾曲流となり、橋脚側面で局所的な流れの集中を呈する。橋脚前面での下降流は河床に衝突し、河床砂礫を巻き上げる回転渦を発生する。この渦によって巻き上げられた土砂は左右に分かれる流れによって橋脚後方に運ばれる。一般に同一水量ならば橋脚幅の厚いほど流れが集中、すなわち流速が大きくなり、橋脚最前縁から側部にかけての河床材料を掃流する。これらの現象や最大洗掘深は橋脚の規模および形状・水量ならびに河床材料等の特性に支配される。洗掘機構の異なる二つの作用によって生じた洗掘口は、洗掘深の増加に伴い橋脚の平面形状に近似した形状となる、平衡状態に達した洗掘口法面勾配は河床材料の水中安息角に見合い、最深部が帯状に橋脚側面に沿って伸び、その深さはしだいに浅くなる。掃流力の低下する橋脚下流部では一般に洗掘されることはまれで、上流で洗掘された土砂を後流領域では堆積する。

いっぽう、この橋脚周辺部の局所洗掘現象は、中川・鈴木¹⁾が述べているように洗掘される領域からの流出土砂量 Q_{so} とその領域への流入土砂量 Q_{si} のアンバランスから生ずる現象であって、 $Q_{so} = Q_{si}$ となるように洗掘深形状が変化して行く。 Q_{so} と Q_{si} との関係から局所洗掘は、a) 固定床 ($Q_{so} = Q_{si} = 0$: No Scour), b) 静的平衡 ($Q_{so} > Q_{si} \approx 0$: Clear Water Scour), c) 動的平衡 ($Q_{so} \geq Q_{si} > 0$: Scour With Continuous Sediment Motion), の領域に分類される。a) は洗掘のおこらない場合である。b) は限界掃流力以下の流れで河床が移動していない場合におこる洗掘で、c) は限界掃流力を超える流れの場合におこる洗掘をさしている。静的平衡状態では最終洗掘深に達するのに長時間を要するが、動的平衡状態では短時間に平衡洗掘深に達し、河床波の影響を受けて洗掘深は変動する。

3-2 最大洗掘深の時間変化特性

Clear Water Scour の場合、従来の研究によって知られているように、上流から洗掘口への土砂の供給がないために、図-3 に示される通り、かなりの長時間を経過しても洗掘深は大きくなり続け、ほぼ20時間を経過して洗掘深は一定値に近づいているように見える。しかし本実験では少量ではあるが大きな粒径のものも含んでいたため、アーミングによって洗掘がほぼ収束してきた可能性もある。Clear Waterの場合に、このように最終洗掘深と認められ

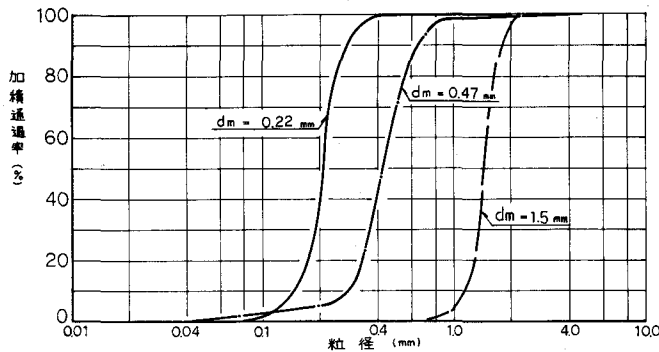


図-2 粒径加積曲線

表-1 実験範囲

実験水路	橋脚径 (cm)	水深 (cm)	流速 (cm/s)	フルード数	河床材料
可傾水路 (1)	5.0	3.9 ～ 25.3	9.3 ～ 88.5	0.11 ～ 0.87	$d_m \approx 1.5 \text{ mm}, 0.22 \text{ mm}$
" (2)	2.6 ～ 8.9	5.0	30.1 ～ 56.7	0.43 ～ 0.81	$d_m \approx 0.47 \text{ mm}$
構造物水路	1.8 ～ 32	5.0 ～ 100.0	9.8 ～ 104.6	0.14 ～ 0.86	$d_m \approx 0.22 \text{ mm}$
大型水路	8.9 ～ 100	10.0 ～ 150.0	26.9 ～ 124.0	0.11 ～ 0.74	$d_m \approx 0.22 \text{ mm}$

る洗掘深に達するのに長時間を用いるのは、洗掘によって生じた洗掘口に応じた渦の発達とその変動がさらに洗掘を引き起こすといったメカニズムが存在していると考えられる。したがって、最終洗掘深もしくは平衡洗掘深は、何等かの定義を必要とする。本研究では便宜的に通水後2時間を最終洗掘深と定義し実験を行った。

いっぽう、動的平衡状態の場合、RippleもしくはDuneの影響を受け、図-3のように洗掘深が変動しつつ短時間に平衡状態に達する。また粒径が0.22mmの場合は、円柱周辺の強い乱れにより洗掘口への埋めもどしは大きくなく、Ripple、Duneの波高より小さな変動しか生じない。これに対し河床粒径の大きい1.5mmの場合、洗掘深は河床波の影響を顕著に受ける。これは粒径の小さい場合、流砂形態が浮遊状態になり易いことに原因していると考えられる。

3-3 最大洗掘深と水理量の関係

橋脚周辺の局所洗掘に影響をおよぼすと考えられる物理量について考察し、その関係を次元解析するとともに、従来の研究を考慮して最大洗掘深を次式のように表現した。

$$\frac{z}{D} = f\left(\frac{h_0}{D}, \frac{h_0}{dm}, Fr\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここにZ：最大洗掘深，D：橋脚幅，dm：河床材料平均粒径， h_0 ：橋脚の影響を受けない断面における平均水深，Fr：フルード数（ $= U_0/\sqrt{gh_0}$ ）， U_0 ：平均水深断面での平均流速である。

図-4は水深の違いによる最大洗掘深とフルード数の関係を示したものである。この図より水深が大きいほど洗掘深も大きくなっており、また水深の影響だけを示しているわけではないが、この場合 h_0/dm よりも h_0/D そのものの影響の方が大きいことを示しているように思われる。さらにこの図ではフルード数とともに洗掘深も増加するが、限界掃流力を越えた付近で上流からの補給砂によって若干洗掘深は減少し、再び増加する傾向を示す。

ただし、水深粒径比の小さい場合では、減少後の増加量は少ない傾向となっている。反対に水深粒径比の大きい場合は、限界掃流力を越えた付近での減少傾向は小さく、水深粒径比のより大きい場合は減少傾向がなくなり、フルード数とともに洗掘深は増加する。河床材料が小さく水深粒径比が大きい場合のフルード数に対する洗掘深の増加傾向は、Rippleができ始めると、流砂の輸送形式が浮遊形態となるため、洗掘口を埋めもどす流砂量の増加分が洗掘量の増加分より少なくなることに関因していると考えられる。

これに対し水深粒径比が小さく、河床波ができて流砂形式が掃流形態である場合の結果が図-5である。

この実験は粒径1.5mm，水深10cm程度としたから、水

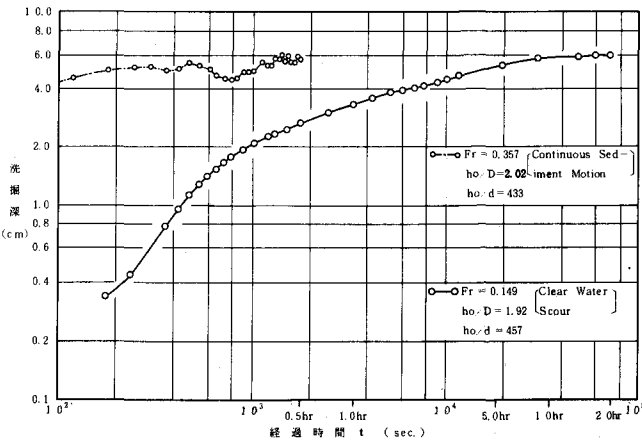


図-3 洗掘深の時間変化

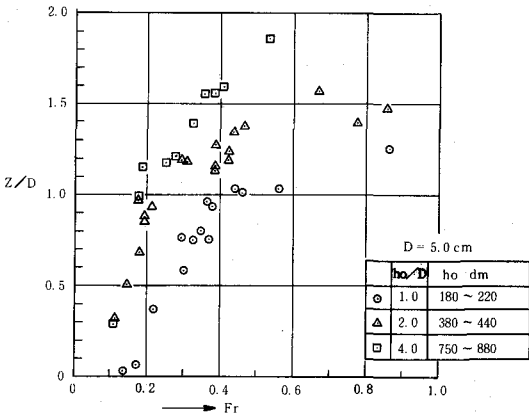


図-4 $z/D \sim Fr$ の関係

深粒径比は約67である。この場合は限界掃流力を若干超えた所で最大の洗掘深となり、フルード数の増加に伴い洗掘深は減少し、その後一定値となる傾向を示している。

したがって、この場合は掃流砂による埋めもどしの増加の割合が円柱前面の渦による洗掘量より大きいことを示している。なお図-5で h_0/D を同一とした場合を比較すると、水深粒径比の小さい方が、大きな洗掘深となる結果が得られている。

以上のように水深粒径比が大きい場合と小さい場合では $Fr \sim Z/D$ 曲線の定性的な違いが明らかである。また限界掃流力を与える流れ付近で最大の洗掘深を持つ場合は、水深粒径比の小さい場合と考えられる。

4. 最大洗掘深の推定

実験での洗掘特性に関してもまだ不明の点も多く、洗掘深を推定することは難しい。ここでは著者らの次元解析により最大洗掘深を(1式で表わし、これまでの研究成果のデータも含め、実験結果より h_0/D を一定の範囲に分割して、他の3要素を同一紙面上で表わした洗掘深推測図を作成するとともに、不足領域の補足と範囲拡大を行った。 h_0/D の範囲は、0.7以下、0.75~1.25、1.75~2.25、2.75~3.50の4分割にし、この結果を図-6~9に示した。同図中で $\tau_* = 0.05$ の線は $Fr = \phi \cdot S^{1/2} \cdot \tau_*^{1/2} (h_0/dm)^{-1/2}$ より計算された限界掃流力を与える曲線を描いたものでClear Waterの場合とContinuous Sediment Motionの場合をわけるものであり、 $\tau_* = 0.0125$ は円柱側面における流れで限界掃流力を与える線で、近似的にNo ScourとClear Water Scourをわける線である。なお流速係数 ϕ および図中の河床形態分類は山本²⁾の資料を用いて示した。

Z/D の実験値は h_0/D 変化や実験によるバラツキ等もあり、かなり大胆に Z/D 曲線を描いた推測図であるが、この結果によると、水深粒径比が大きいほど低フルード数で洗掘が起り、この場合前述のように Z/D にピークを持たない。

いっぽう、 h_0/dm が小さい場合は、フルード数が大きくなって洗掘が起り、その増加は急激で Z/D はピークを持つ。 h_0/D の違いによる洗掘深は、同一の h_0/dm および Fr に対し、 h_0/D の大なる方が Z/D も大きい。

このことはピーア幅に対する相対洗掘深が大きくなることで、洗掘深そのものが大きいことではない。さらにこれらの結果より h_0/dm 別による $Z/D \sim Fr$ の関係を示したのが図-10~13である。この場合、実験で得られた結果と同様、水深粒径比の小さい範囲では、洗掘深は掃流力

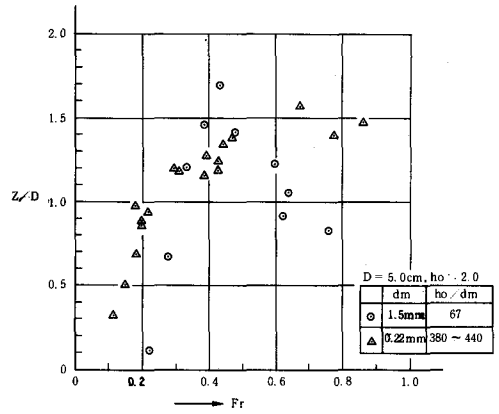


図-5 $Z/D \sim Fr$ の関係

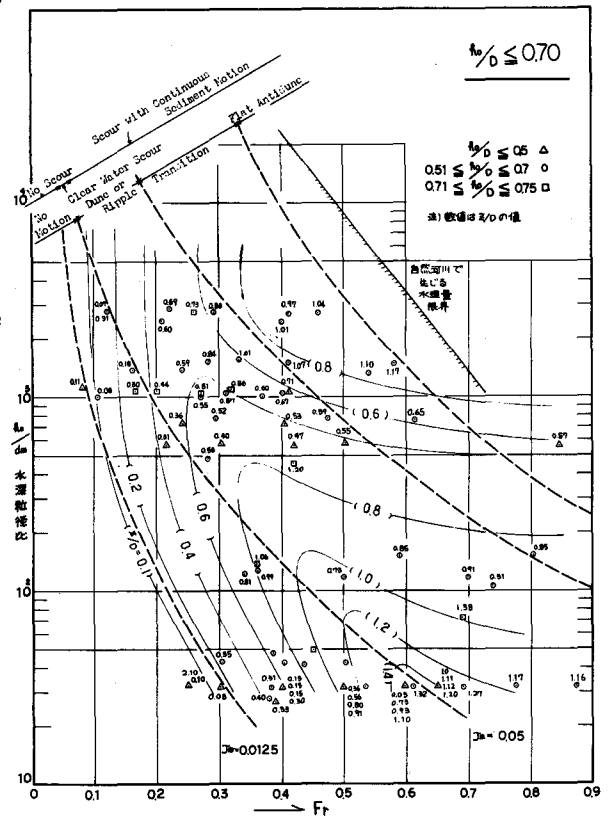
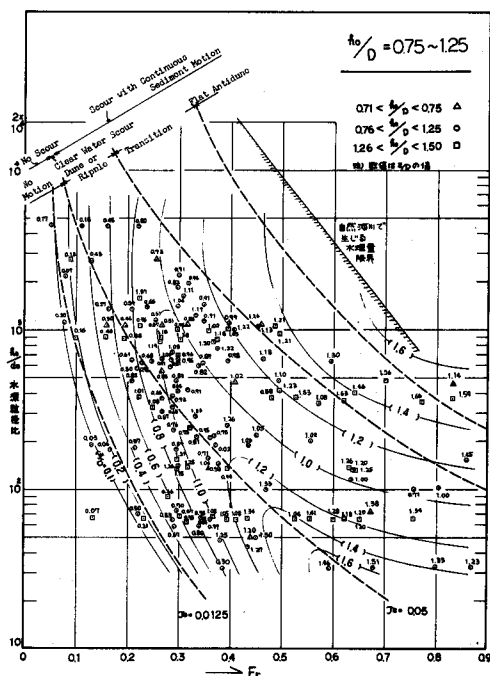


図-6 洗掘深推測図

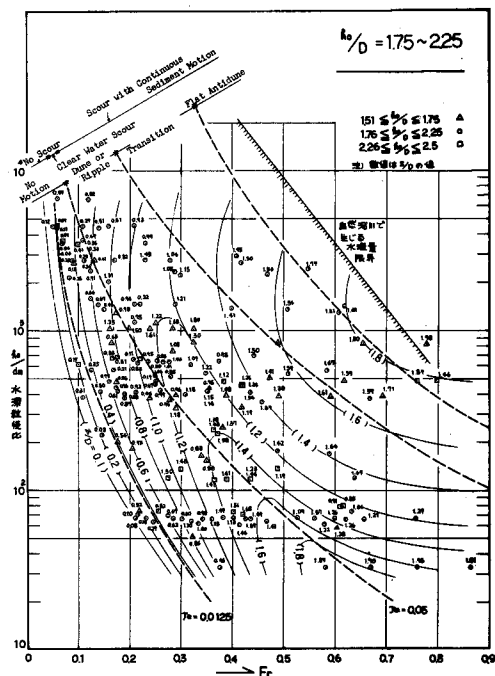
さてこれらの推定図より最大洗掘深を推定する場合、 h_0/dm が小さい範囲では、限界掃流力となる付近で最大洗掘深を与えるが、 h_0/dm が大きい場合にはフルード数の実在し得る限界を考え、最大洗掘深を与える必要があろう。

5. あとがき

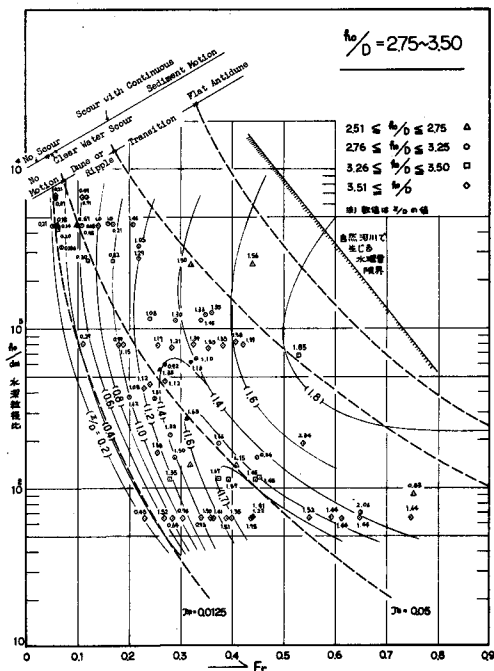
円柱橋脚の大規模実験を行い、水深粒径比のより大きい領域での洗掘特性を明らかにするとともに、広範囲な実験結果を基に洗掘深推測図を提案した。しかし実際河川下流部ではさらに大きい領域での推測も必要であり、これらについては実測による範囲拡大が今後必要である。また実在する橋脚は種々の



图一7 洗掘深推测图



图—8 洗掘深推测图



图一9 洗掘深推测图

形状を持っており、形状による影響等の検討がさらに必要である。なお本研究を遂行するにあたり、当時河川研究室山本晃一主任研究員（現総合治水研究室長）の有益な助言と、研究の初期の段階では当時実修生であった有田正光氏の多大な貢献があった。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中川博次，鈴木幸一：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究，京都大学防災研究所年報 17-B，1974
- 2) 山本晃一：河道特性論ノート (I)，一護岸論のために，土木研究所資料1625号，1981

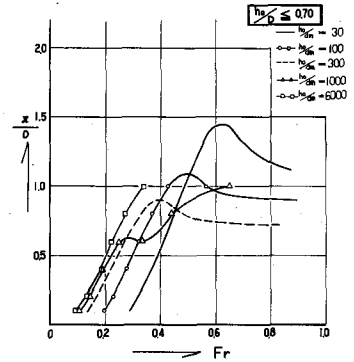


図-10 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm 関係図

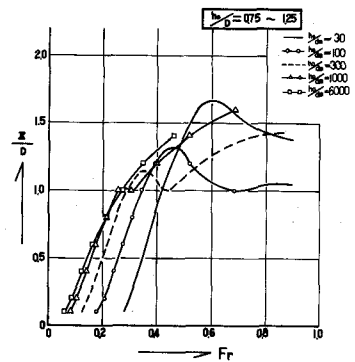


図-11 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm 関係図

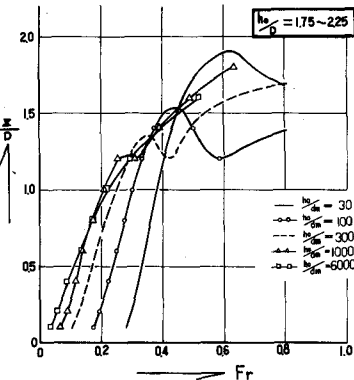


図-12 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm 関係図

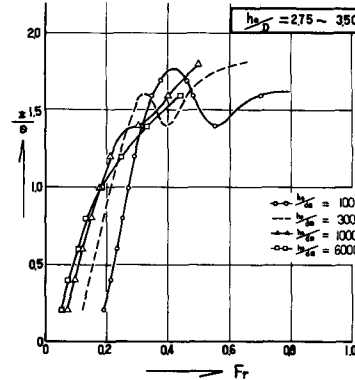


図-13 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm 関係図