

京都大学工学部 正員 中川 博次

京都大学工学部 正員 ○鈴木 幸一

1. まえがき

橋脚周辺の局所洗掘は、流れの場と河床境界面との相互作用による非常に複雑な現象であって、従来より次元解析に基づく実験的研究が石原らによって行なわれてきた。また、Laurson²⁾、青藤³⁾らは洗掘形状の相似性を仮定し、流砂の一次元連続式から最大洗掘深を求め、SchneiderとShan⁴⁾、田中⁵⁾らは、橋脚周辺での三次元境界層剥離に起因する馬蹄形渦に注目して洗掘機構を論じている。また、Gradowczyk⁶⁾のように剥離域の外側のみに着目し、そこでの流線方向に沿って流砂の一次元解析を行い、実験的に検証したものと、いろいろなモデルが試みられているが、まだ統一的説明を得るに至っていない。本研究では、これらのモデルの基礎となる洗掘特性を実験により適確に把握しようとしたものである。

2. 実験条件および実験方法

実験条件は、表-1に示すとおりである。

表-1 実験条件

No.	Q (l/sec)	D (cm)	d ₅₀ (cm)	h ₀ (cm)	U ₁₀ (cm/sec)	U ₁₀ (cm/sec)	U ₁₀ (cm/sec)	U ₁₀ (cm/sec)	U ₁₀ (cm/sec)	h ₀ /D	Re (=U ₁₀ D)
1	34.8	14.0	0.193	1706	20.80	1.31	3.28	17.70	0.074	1.22	2.24×10 ⁴
2	*	*	*	1362	26.05	1.75	*	*	0.098	0.97	2.81
3	*	*	*	958	37.04	2.65	*	*	0.150	0.68	3.99
4	*	8.9	*	1706	20.80	1.31	*	*	0.074	1.92	1.42
5	*	*	*	1362	26.05	1.75	*	*	0.098	1.53	1.78
6	*	*	*	958	37.04	2.65	*	*	0.150	1.08	2.53
7	*	*	0.083	1706	20.80	1.18	2.14	11.58	0.102	1.92	1.42
8	*	*	*	1362	26.05	1.57	*	*	0.138	1.53	1.78

Dは円柱径、d₅₀は砂の中央粒径であり、 $V_s = \sqrt{(0.07-1)gd_{50}}$ とU_{bc}は限界掃流力、h₀、U₆、U₁₀はそれぞれ上流側基準断面での水深、平均流速、摩擦速度である。実験水路は長さ、14 m、幅98 cmの木製で水平に設置された。洗掘深の時間変化は先に小円盤のついたポイントゲージで測定し、洗掘形状は徐々に排水したあと系によって等高線をつくり写真によって記録した。

3. 最大洗掘深の時間変化特性

最大洗掘深として後で述べるように、図-4のB点での測定値で代表させ、その時間変化を示せば図-1のようになる。次元解析によって無次元パラメータを検討した結果、この図で明らかなように、U₁₀/V_sによって円柱径で無次元化された最大洗掘深Z/Dがグループ分けできることがわかる。時間を表わす無次元量Ut/Dに対するZ/Dの変化は指数関数的であるが、ある時間を経ると直線なこの配が変化し、洗掘速度が非常に緩慢になる。U₁₀/V_sが大きいほどこの配の変化点の

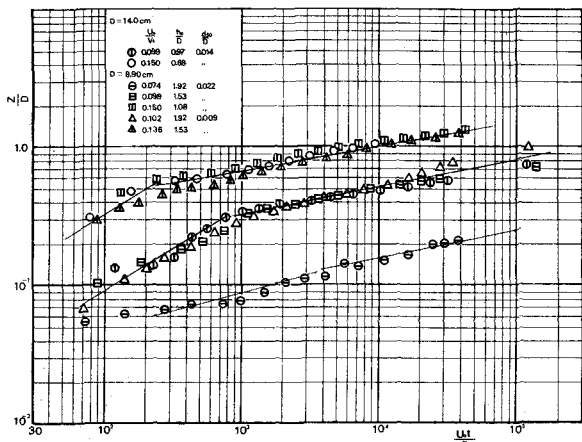


図-1 最大洗掘深の時間変化

U_{bt}/D の値は小さい。 U_{bt} は上流側の摩擦速度であり、内柱のまわりの局所的摩擦速度と線型関係がありというわけではないが、それを支配するものと考えられ、 V_s がある意味で限界掃流力を代表しているので、 U_{bt}/V_s は掃流力と限界掃流力の比を表わしていると考えよう。

4. 洗掘形状

洗掘形状の時間的变化については各実験とも同じ特性を示したもので、ここでは、実験 No. 7 を代表例として説明することとする。図-2 は洗掘形状の時間変化を示したものであり、通水後 10 分、30 分、1 時間、3 時間、13 時間における洗掘および堆積の等高線図である。①は 10 分後のもので、明らかに内柱側面での洗掘が最も進んでいる。側面に比して前面がまだあまり掘られていない。横断方向の洗掘範囲は流下方向のそれに比して時間的变化が緩慢である。よく巨視的にみれば、洗掘の初期を除いては、洗掘孔はほぼ相似性を保っているといえる。このことをもう少し検討するため、 $Y=0$ と $X=0$ の 2 つの断面内での洗掘形状の時間変化を図-3 に示した。任意点での原河床から洗掘（または堆積）深さとその時の最大洗掘深さで無次元化されている。図-3 ①は内柱前面での変化を示したものであるが、各時間ごとの洗掘形状の差異は認められず、ほぼ時間的に相似性を保ちながら洗掘が進行していくものといえよう。この場合は傾斜角はほぼ 45° で水中安息角に近い。②図は後流域の状態を示しており時間毎にかなりおぼろつきがあるが堆積部において相似性が認められ、内柱の後端から $3.5D \sim 4.0D$ の下流で堆積域が広がっている。③図は内柱側面での横断方向変化を示したものであるが、時間とともに、洗掘孔側面の傾斜は徐々に増す傾向があることを示している。また、必ずしも形が直線で表わされるものではなく複雑な時間的变化を示している。これは後流域の堆積の影響が微妙にさいているためと思われる。

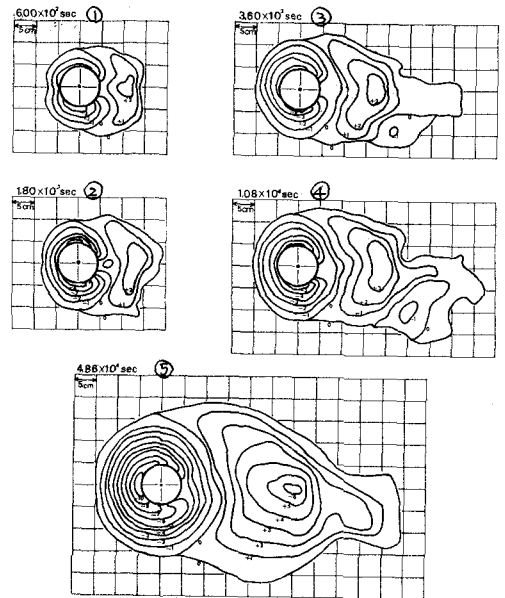


図-2 洗掘形状の時間変化

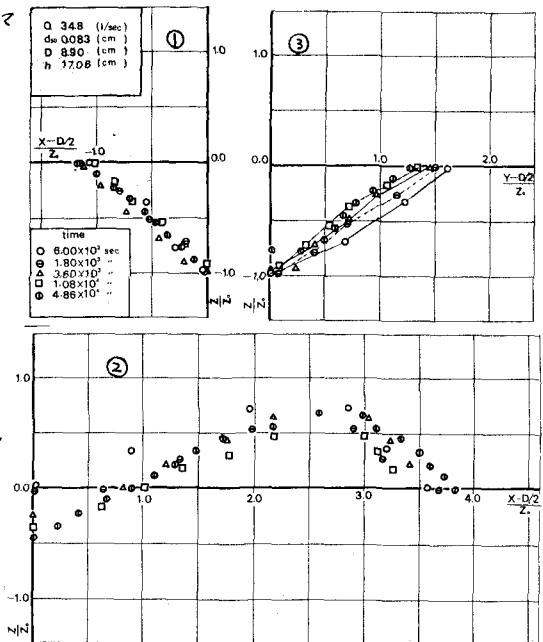


図-3 洗掘形状

5. 場所的洗掘特性

図-4 は実験 No.7 についての内柱の前面、斜め前面、側面各点における洗掘深の時間的变化を示したものである。この図によると、洗掘初期においては側面の C 点および B 点では前面の A 点におけるよりも早く洗掘されるが、次第にその差が縮まり、最終的には C 点が最も浅くなることとが示されてゐる。また、洗掘特性も点 A, B, C が異なっており、C 点では初期に大きく洗掘され、ある時間を経るやうになる。また、A 点では逆に初期に C 点に比してあまり洗掘が進行しないが、時間がたつにつれて徐々に大きくなることとがわかる。

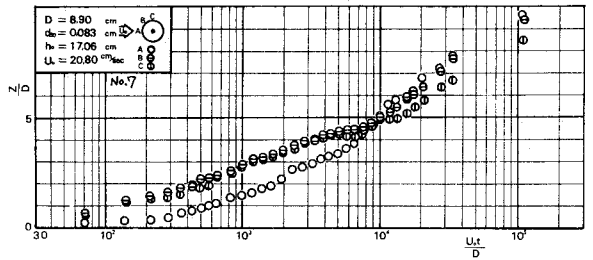


図-4 洗掘深の時間変化

なることとが示されてゐる。また、洗掘特性も点 A, B, C が異なっており、C 点では初期に大きく洗掘され、ある時間を経るやうになる。また、A 点では逆に初期に C 点に比してあまり洗掘が進行しないが、時間がたつにつれて徐々に大きくなることとがわかる。

6. 洗掘機構に関する考察

実験結果および観察に基づいて洗掘機構に関して若干の考察を加へる。洗掘過程は主流、馬蹄形渦の運動とそれに伴う流砂との相関関係において論じられ、ほぼ次の4つの段階に分けられる。

- A) 主流による掃流過程
- B) 馬蹄形渦の洗掘孔内で発達過程
- C) 安定渦による洗掘過程
- D) 堆積による流れの変化過程

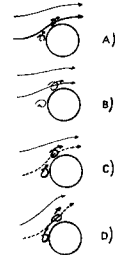


図-5 は各過程での主流と渦の強さの関係を概念的に示してゐる。A) 過程では馬蹄形渦は弱く、洗掘は主に流速の内柱側面での卓越によって増加した掃流力によってなされ、

ある程度一次的な掃流公式を適用できると考えられる。B), C) 過程と馬蹄形渦の作用が強くなり、洗掘特性が異なってきたり、渦によって砂が巻き上げられ主流によって運ばれる。D) 過程は、C) 過程の後で起こるというのではなく堆積が進むにつれて徐々に進行する。流れの変化がまた洗掘特性に影響して最終安定状態は得られない。

7. あとがき

内柱周りの局所洗掘機構は非常に複雑であり、ごく巨視的に洗掘の時間変化過程を示したが、各過程における洗掘特性が異なっており、今後、特に三次元境界層剥離による馬蹄形渦の特性を把握していく必要がある。

参考文献

1. 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的研究，土木学会誌 24 巻 1 号 (昭 33.1)
2. Laursen, E.M.: An analysis of relief bridge scour, Trans. A.S.C.E., Vol. 89, 1963, pp 93~118
3. 青藤隆，他：内柱周囲の洗掘について，山口大学工学部研究報告，第 20 巻 1 号 (昭 44.9)
4. Roper, A., Schneider, V.R. & Shen, H.W.: Analytical approach to local scour, Proc. of I.A.H.R. 1967 vol. 3
5. S. Tanaka, M. Yano: Local scour around a circular cylinder, Proc. of I.A.H.R. 1967 vol. 3.
6. Gradowczyk, W.: Localized scour in erodible-bed channels, Journ. of Hydraulic Research, Vol. 6, No. 4, 1968