

二次元噴流による洗掘進行過程の特性について

京都大学工学部 正員 中川 博 次
 京都大学工学部 正員 辻 本 哲 郎
 日本水道コンサルタント 正員 ○蔵 重 俊 夫
 京都大学大学院 学生員 中 野 晋

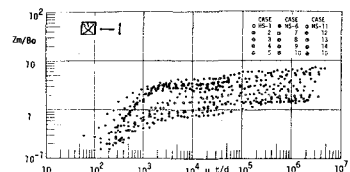
1. まえがき 局所洗掘現象は、河川構造物の被害に関連した重要な研究課題の一つであるがそれらは三次元的な局所流況に支配され、さらに流砂、河床形状の変化が複雑に絡み合っておりそれらを独立に扱えないため機構的説明が困難である。本研究では、こうした複雑な現象の中で比較的二次元化が保たれ、しかも局所洗掘に見られる基本的な特性を充分備えていると考えられる二次元水平及び鉛直噴流による洗掘について実験的に検討した。とくに、洗掘の進行過程における形状の相似性、斜面の崩落現象等に注目し、これらの洗掘進行に及ぼす影響を考察した。

2. 水平噴流による洗掘 (1) 実験：実験は長さ2.4m、幅20.2cm、深さ65cmのアクリル製側壁を有する鋼製水平水路で行った。なお水路上游端には噴流厚を自由に調節できる噴出口が設置されており、噴出口直下流の位置から水路中央付近までを移動床部とした。実験条件は噴出口幅(b_0)が1.4, 2.5 cm, 砂粒径(d) 0.046, 0.066, 0.276 mm, 噴出流速(U_0)は約40~120 cm/sec の範囲で、系統的な実験を行った。なお水深はその影響が無視できる程度に充分深くしている。流速は最初の60秒間は水路側方からの16mm鏡影により、それ以後は電気抵抗式測深器を用いて洗掘孔形状を記録した。

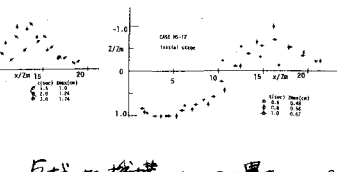
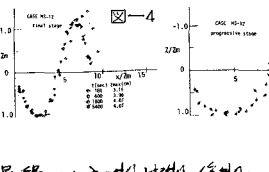
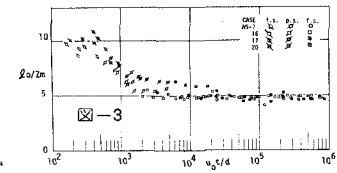
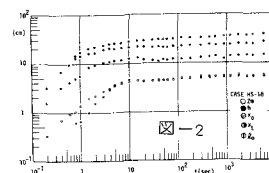
(2) 実験結果とその考察：まず最大洗掘深(Z_m)及びその位置(x_0)、洗掘孔の長さ(L_0)、堆積部の高さ(L_1)及び頂点の位置(x_1)の各洗掘孔特性量の時間的変化に着目した。図-1は最大洗掘深の時間的変化を無次元表示したものである。

これによると、洗掘深は初期には時間に比例し、その後時間の平方根に比例して増加し、さらに時間が経過するとかたじけなく増加傾向を示している。

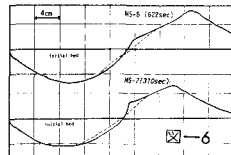
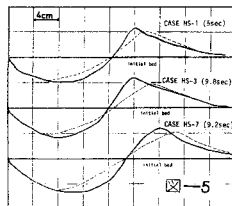
一方、図-2は他の特性量の時間的変化と比較した一例であるが、水平方向のスケール L_0 , x_0 , x_1 と鉛直スケール Z_m , L_1 とでは異なる発達傾向を示すことが認められる。すなわち水平スケールは時間の平方根に比例して増加する過程がない。このことから従来の洗掘過程の解析でしばしば仮定した洗掘孔形状の時間的相似性は必ずしも全過程では成立しないことが推定される。実際、水平方向及び鉛直方向のスケールの比として L_0/Z_m の時間的変化を示した図-3によると、初期($U_0 t/d < 4 \times 10^2$)にはほぼ一定値をとり、中期($4 \times 10^2 < U_0 t/d < 2 \times 10^3$)において急激に減少し、後期に至っては再び一定値に落ち着く。このことは洗掘孔形状の時間的変化を示した図-4で



確認される。こうした検討から水平噴流による洗掘過程では初期・中期・後期によって卓越する機構がかなり異なっていることが予想され、この三段階に分けて解析することが単に便利であるだけでなく合理的である。図-4によると初期においては鉛直方向の洗掘孔幅が顕著である。この過程では河床変化の規模も大きくなく流砂の剥離はほとんど無視できるものと考えられ、流れ及び流砂の挙動は初期平坦河床におけるものとほぼ同じ取り扱いができればよい。一方中期においてはすりばち状の形状となり、最大洗掘深の位置は洗掘孔の中央となる。またこの過程は洗掘孔の成熟期として扱えられ、流れの非定常性の効果が卓越しており、洗掘孔形状の相似性も認められない。次に、後期に遷移すると、洗掘



形状には相似性を保ちながら緩慢な増大を続ける。またこの時期には流れも孔底に再付着するまでにかなり拡散しており、中期に比べ最大洗掘深付近はかなり平坦になされ、碗状の洗掘孔となっている。さらに流れは堆積域損失の予備が累積しているため、その付着に微妙な突進がみられている。なお、中期・後期のように洗掘孔下流側斜面が急になると、斜面崩壊による埋め戻しが間歇的に生じる。中期については図-5に示されるような埋め戻しが数回生じ、洗掘深、堆積高は瞬間的に一旦減少する。



この崩壊により最大洗掘深の位置は上流側へ、堆積部頂点は下流側へ移行し、洗掘孔の拡大が助長される。一方、後期にみられるものは図-6に示されるような下流側斜面の突進部の崩壊で、これは規模も大きく洗掘進行過程に及ぼす影響も大きい。こうした崩壊現象は砂粒運動の結果として生じる河床変形が摩擦角の制約を越えておこさることを示しており、その限界傾斜角を知ることは洗掘機構解明に重要と考えられる。これについては16mmスルム解析より、図-7が得られた。

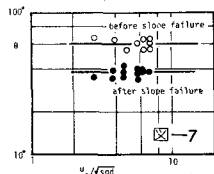
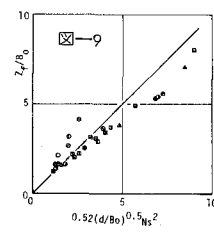
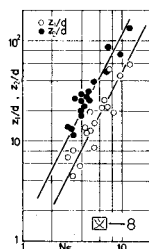
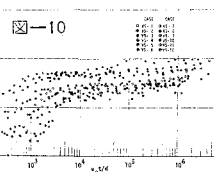


図-7が得られた。また、この洗掘過程を三段階に分けてみると、その遷移点を知ることが機構解明に重要な鍵となる。図-8には初期から中期及び中期から後期への遷移洗掘深 z_1, z_2 と Carstens に基づき導入された sediment number $N_s = u_b/(0.1-1)gd$ の関係を示すものである。この図から、ほぼ次のような関係式が得られる。 $z_1/d = N_s/2$, $z_2/d = 5N_s/4$ (1) したがって、洗掘過程の遷移は N_s と d で決り、 B_o に関係があると推定される。このような過程を経て洗掘孔は最終平衡状態に達するものと考えられる。

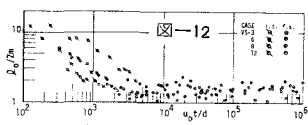
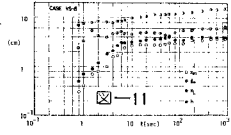


過程を経て洗掘孔は最終平衡状態に達するものと考えられる。洗掘の進行速度、遷移洗掘深等と比べ、最終洗掘深はより大きな水のスローを曳き出す噴出口嘴、水球に支配されると考えられる。実際最終洗掘深には B_o が支配量となり、次の実験式(図-9参照)が得られた。 $z_f/B_o = 0.52(d/B_o)^{1/2} N_s^{1/2}$ (2) これによると N_s , d が一定でも B_o が大きければ最終洗掘深は大きくなるが、これは洗掘深というよりもむしろ堆積域を含めた洗掘孔全体の大きさの指標であるためと理解される。

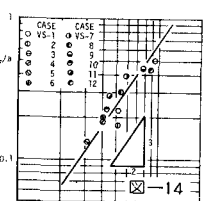
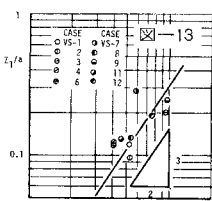
3. 鉛直噴流による洗掘 (1) 実験: 長さ1m、幅10cm、深さ70cmのアクリル製水槽に1cm×10mmの鋼製矩形断面ノズルを設置した実験装置を用いた。 d は0.146, 0.276cm, u_o は65~120cmである。またノズルから移動床表面までの距離を Q とし、これを変えて系統的に実験を行った。



(2) 実験結果とその考察: 最大洗掘深の時間的変化(図-10)から、鉛直噴流による洗掘過程は2段階に大別できる。また図-11に示す各洗掘孔特性長の時間的変化から、水平スケールと鉛直スケールの特性が著しく異なることが知られる。前者は全過程を通じて緩やかに変化するのに対し、後者では初期に時間に対して顕著な増加過程が認められる。



この比の時間的変化は図-12に示され、初期においては洗掘孔形状の時間的相似性は認められたい。なお、鉛直噴流による洗掘過程でも斜面崩壊現象が遷移期、後期に数回観察された。



次に、遷移洗掘深については図-13に示される通り、最終洗掘深については図-14に示されるような実験式(3), (4)を得た。

$$z_1/Q = 1.0 \times 10^{-2} \cdot N_s^{3/2} \dots (3) \quad z_f/Q = 2.25 \times 10^{-2} \cdot N_s^{3/2} \dots (4)$$

4. あとがき 今後洗掘孔内の流れの挙動とともに砂粒運動性状を把握し、洗掘機構を明らかにしていきたいと考える。
参考文献 1) Carstens: Proc. ASCE, HY, 1966.