

京都大学工学部 正員 中川博次
国立公害研究所 正員 大坪国順
広島 島 正員 中川道弘

1. まえがき 本報告は本四架橋明石大橋の主塔橋脚を対象として、潮流による局所洗掘特性に及ぼす底質砂れきの粒度分布の影響を実験的に明らかにし、粗粒化を考慮したモデルによって洗掘過程の予測を試みたものである。

2. 洗掘特性 橋脚本体は20^{cm}×35^{cm}の長方形断面を有する角柱で、中央粒径 d_{50} が0.5, 1.0, 1.5 mm, それぞれについて標準偏差 $\sigma = \sqrt{d_n/d_n}$ が1.5, 2, 3, 4である対数正規分布を示す12種類の混合砂および同じ粒径の均一砂を使用した。図-1は断面平均流速 u_0 と d_{50} が同じ場合の σ による洗掘深の時間変化の一例を示したもので、図から洗掘初期には均一砂と同じ洗掘速度を示すが、ある時刻より急減じ、 σ が大きいほどその変化点が早期に現われ、洗掘速度の低減率を大きくすることがわかる。また、 σ と一定に、 d_{50} や u_0 を変化させた実験から中央粒径や水理条件に無関係に洗掘速度が σ のみに支配されることが認められた。図-2には $\sigma = 2$ および3の場合の混合砂での洗掘深 z_{mix} とその中央粒径の均一砂での洗掘深 z_{uni} との比の時間変化を示すが、共にほぼ一本の直線で表われ、その勾配は σ が小さい程緩やかになることがわかる。この図に既を得られた均一砂での推定洗掘深から明石大橋建設予定地点での海底砂れきの平均特性($d_{50} = 5\text{ cm}$, $\sigma = 3.46$)に対して最強潮流時の半周期での最大洗掘深が8~10 mであると予測され、1/100縮尺模型でもその妥当性が確かめられた。

3. 限界掃流力と洗掘量特性に及ぼす σ の効果 上述の砂粒の標準偏差による洗掘特性の著しい相違は、洗掘孔内での粗粒化現象の発生に起因しており、洗掘過程の予測に先立つて粗粒化の基本特性量である粒径別限界掃流力に及ぼす σ の効果を検討する。まず、洗掘孔での掃流力が最大粒径相当の限界掃流力 τ_{cmax} より十分大きい間は混合効果は現れないから、混合砂れきの粗粒化には τ_{cmax} が支配的役割を果たすものと考えられる。いま、最大粒径 d_{max} を d_{95} で代表させ、Egiazaroffによる無次元限界掃流力 $T_{c95} = \tau_{c95} / \tau_{c50} \{ \log_{10} 19 / \log_{10} 9 (d_i/d_m) \}^2 \dots\dots (1)$ にもついて検討する。ここで、 d_m : 平均粒径, $\tau_{c50} = 0.06$ である。いま、 τ_{c95} と均一砂の場合の τ_{c50} とを σ に対して図示すると、図-3のようであり、 $\sigma = 4.0$ の場合 d_{95} が動き始めるのに均一砂の場合の4.6倍の掃流力を必要とすることになり、 σ の大きい方が大きい掃流力で粗粒化が始まることを表わしている。

流砂量に関しては、clear water scourの場合の洗掘深の時間変化は各粒径ごとの砂粒の飛び出し率と密接に関係しており、洗掘過程の模式化や粗粒化の取扱いは容易であるから、先に着目を与えた粒径別飛び出し率 p_{ci} を用い、単位時間、単位面積当りの d_i の砂粒の移動量を次式で与えた。 $Q_i = (A_2/A_1) p_{ci} d_i p_{ci} = 3.0 \times 10^{-2} \sqrt{(g/\sigma - 1) g d_i} \cdot T_{c95} \{ 1 - (T_{c95}/T_{ci}) \}^3 \dots\dots (2)$

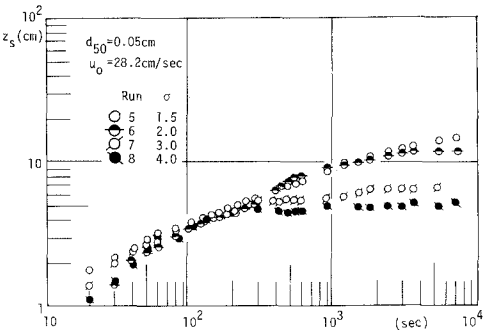


図-1 最大洗掘深の時間変化

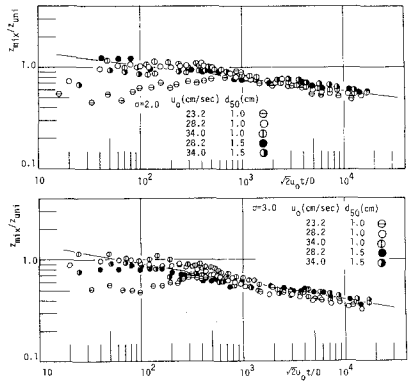


図-2 混合砂と均一砂の洗掘深比の時間変化

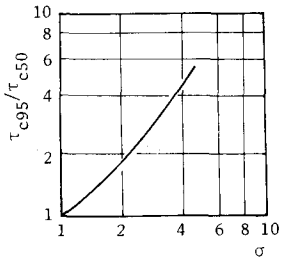


図-3 最大粒径の移動限界

ここで、 A_2, A_3 : 砂粒の面積および体積に関する形状係数、 p_i : d_i の砂の重量百分率、 σ, ρ : 砂および水の密度である。洗掘総量 $Q_T = \sum Q_i$ とし Q_i との関係は σ をパラメータとして図-4 に示すが、 Q_i が大きいと σ の効果は現われない、均一砂の場合と同じであり、 Q_i が小さくなる d の場合同じでも σ が大きい混合砂ほど均一砂に比して洗掘量が小さくなるこがわかる。

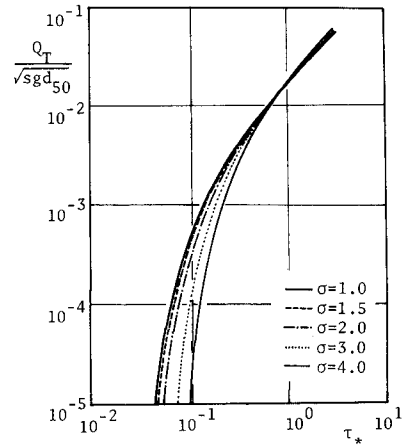


図-4 σ による洗掘量の比較

4. 洗掘過程のモデル化 これまでの考察にもつづいて混合砂れきの局所洗掘過程を $\tau > \tau_{cr}$ では d_{50} の均一砂と同じ特性を、 $\tau > \tau_{gr}$ で粗粒化が始まり、粒度分布を反映した時間変化を示すものとして取扱う。したがって、粗粒化の開始時刻 $t = t_p$ およびそのときの洗掘深 Z_p は均一砂に関して着者がすでに示した式³⁾

$$\frac{Z_p}{D} = \left[\frac{1}{29.2} \left\{ \frac{\sqrt{2} u_* - u_{*c}}{(\sigma - 1) g d} \right\}^3 \left(\frac{D}{d} \right)^{1.9} \frac{\sqrt{2} u_*}{D} t_p \right]^{0.22} \dots \dots \dots (3)$$

から求められた。ここで、 u_* : 一様流速、 d : 砂粒径、 D : 橋脚幅、 u_c : d の移動限界に相当した一様流速である。最大洗掘深が発生する橋脚隅角部の底面せん断力 τ と洗掘深 Z_m との関係は均一砂について (3) 式による洗掘深の時間増分 ΔZ_m 、砂粒の飛出し率を考慮した (2) 式の Q_i と ΔZ_m の関係から求め、 $\tau = \tau_{cr}$ となる時刻を t_p 、洗掘深を Z_p とした。

次に、 $\tau < \tau_{cr}$ となった状態での洗掘深と粒度分布の変化を定式化するために、橋脚隅角部の粒度分布の変化は表層砂れきの飛び出しと下層砂れきが新たに露出することによって考え、一定の厚さ H_0 の交換層を仮定する。時刻 t での交換層内の第 i クラスの砂粒の個数を $N_i(t)$ 、 Δt 時間内に飛び出した個数を $N_{oi}(t)$ 、新たに下層から交換層にくり込む個数を $N_{ri}(t)$ とすると、時刻 $(t + \Delta t)$ での交換層内の第 i クラスの砂粒個数 $N_i(t + \Delta t)$ は、 $N_i(t + \Delta t) = N_i(t) - N_{oi}(t) + N_{ri}(t) \dots \dots \dots (4)$

粒度分布 $p_i(t)$ と個数との関係は、 $N_i(t) = S H_0 (1 - \lambda) p_i(t) / A_3 d_i^3 \dots \dots \dots (5)$ ここで、 S : 考えている隅角部の面積、 λ : 空隙率である。また、 $N_{oi}(t) = S p_i(t) \beta_i(t) \Delta t / A_3 d_i^2 \dots \dots \dots (6)$ Δt 時間内の洗掘深の変化を ΔZ_s とすると、 $N_{ri}(t)$ と ΔZ_s との関係は、 $N_{ri}(t) = \Delta Z_s(t) S (1 - \lambda) p_i(0) / A_3 d_i^3 \dots \dots \dots (7)$ ここで、 $p_i(0)$ は混合砂の初期の粒度分布。

また、 $\Delta Z_s(t) = \{ A_2 / (1 - \lambda) A_3 \} \sum_{i=1}^N p_i(t) \cdot p_i(t) \cdot d_i \cdot \Delta t \dots \dots \dots (8)$

これらの関係式を (4) 式に代入すると、時刻 $(t + \Delta t)$ での i クラスの砂粒の粒度分布は

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) \left[1 - \{ A_3 p_i(t) \cdot d_i \Delta t / A_3 (1 - \lambda) H_0 \} \right] + p_i(0) \Delta Z_s(t) / H_0 \dots \dots \dots (9)$$

このときの洗掘深は $Z_s(t + \Delta t) = Z_s(t) + \Delta Z_s(t) \dots \dots \dots (10)$

で与えられる。砂粒の飛出し率 β_i は時刻 t での $Q_i(t)$ と $Q_{cr}(t)$ がわかれば (2) 式より求められる。 Z_s と $Q_i(t)$ との関係は上述の

均一砂に関する結果をそのまま混合砂にも適用した。

5. 数値計算結果 数値解析により求められた最大洗掘深の時間変化の一例を実験結果と比較して図-5 に示すが、両者一致は良好であり、 σ の効果をよく表わしている。また、図-6 には粒度分布の時間変化の数値計算例が示されているが、時間とともに中央粒径が大きくなり、 σ が小さくなる傾向が認められ、粗粒化の進行が説明される。また、粗粒化は初期に急速に進行している時刻から急に鈍化することが認められ、この時点で洗掘速度も鈍化する。

図-5 洗掘深の時間変化の数値計算例

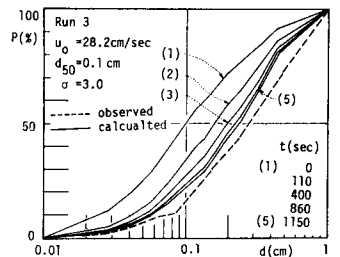


図-6 粒度分布の時間変化

6. あとがき 混合砂れきの特性値の一つである標準偏差が局所洗掘特性に及ぼす影響を実験的に明らかにし、粗粒化を考慮した洗掘過程の予測も行ない、現象も良好に説明できた。これを現地調査により検証するとともに、各種保護工の効果も今後検討する予定である。

参考文献: 1) 中川: 本四公団委託報告(その1), 1975, 2) 中川, 辻本, 原: 京大防災研年報 20号B-2, 1977, 3) 中川, 鈴木: 第22回海講, 1975.