

## II-421

## 海峡橋脚の捨石洗掘防止工の表層捨石の安定について

大成建設(株)技術研究所 正会員○ 石野 和男

同 上 同 上 大谷 英夫

同 上 同 上 勝井 秀博

## 1. はじめに

海洋構造物の洗掘防止工としては、機能性、施工性、経済性、維持管理の容易さの面などから、捨石によるものが多く用いられ、明石海峡大橋の主塔基礎にも採用されている。筆者らは明石海峡大橋の洗掘防止工の検討<sup>1)</sup>を契機として、捨石工内に発生する浸透流に着目した捨石工の実用的な設計手法を検討している。本報では、捨石工内に発生する浸透流の Reynolds 数（以下  $Res$  と略す）に着目した水理実験結果および現地施工例を用いて表層捨石の安定を検討する。

## 2. 従来の提案式およびその比較検討

1) 橋脚まわりの表層捨石の設計公式：表-1に、従来の提案式を示す。なお表には、接近流速  $U_0 = 4.1\text{m/s}$ 、水深  $37\text{m}$  の条件を各公式に代入して求めた捨石の安定粒径および空中重量を並示する。これらの値の最大値と最小値を比較すると、粒径で8倍、空中重量で515倍異なることがわかる。この差の要因としては、○捨石の移動限界公式の評価、○橋脚まわりの捨石に作用する最大掃流力の評価の違いがあげられる。

2) 捨石の移動限界公式：表-2に、従来の提案式を示す。また、図-1に  $U_0 = 8.2\text{m/s}$ 、 $d = 1.65$  の条件を各公式に代入して求めた、水深と捨石の安定粒径の関係を示す。図から、水深が深くなるとDHL建設時公式は、若干の捨石の移動を許容するMaynolds公式に漸近することがわかる。またIsbash公式は、浅水域 ( $h/d < 5$ ) で使用すべきことがわかる。これらを考慮し、以下の検討では、Paintal の詳細な実験結果とDHLの豊富な経験から定められた(5)式を用いて検討する。なお、捨石の抵抗式(6)式の根拠が不明確であり、以下で検討する。

3) 捨石の抵抗公式：図-2にMaynolds<sup>8)</sup>がまとめた捨石の抵抗の実験結果を示す。図には、本実験で求めた値Manning-Stricker公式および、DHL式(6)を示す。図から、本実験で用いた捨石の抵抗は、Manning-Stricker公式で表現できることがわかる。また(6)式は、従来

表-1 橋脚のまわりの表層捨石の安定に関する公式およびその比較

| 提案者                       | 提案公式                                                                           | 試算捨石諸元 |            | 備考                                       |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------|------------|------------------------------------------|
|                           |                                                                                | 粒径(m)  | 空中重量(tonf) |                                          |
| Breusers <sup>2)</sup>    | $U_c = 2U_0 \dots (1)$<br>$U_c = 0.85\sqrt{2g \cdot \Delta \cdot d} \dots (2)$ | 3.03   | 38.6       | (2)式：<br>Isbash公式                        |
| Raudkivi <sup>3)</sup>    | $U_c = 2U_0 \dots (1)$<br>$U_c = 4.8 \Delta^{1/2} d^{1/3} h^{1/6} \dots (3)$   | 0.377  | 0.075      | (3)式：<br>Manning-Stricker<br>式+ Shields式 |
| Bonasoundas <sup>4)</sup> | $d = 6 - 3.3U_0 + 4U_0^2 \dots (4)$                                            | 0.60   | 0.3        | (4)式：実験式<br>(適用範囲不明)                     |

 $U_0$ : 接近流平均流速,  $U_c$ : 捨石に作用する最大流速, $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ ,  $d$ : 捨石粒径,  $h$ : 水深表-2 捨石の移動限界公式  $\psi = u_{*c}^2 / \Delta g d$ 

| 提案者                                       | 設定レベル       | 提案公式                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Delft Hydraulics Laboratory <sup>5)</sup> | 構造物完成時      | $h/d > 5$<br>$\psi = 0.0275 \dots (5)$<br>$u_b/u_* = 6.0 (h/d)^{1/6} \dots (6)$<br>$h/d \leq 5$<br>$u_{*c} = 0.85\sqrt{2g \cdot \Delta \cdot d} \dots (2)$<br>(Isbash公式)        |
|                                           | 構造物建設時      | $h/d > 5$<br>$\psi = 0.035 \dots (7)$<br>$u_b/u_* = 6.0 (h/d)^{1/6} \dots (6)$<br>$u_{*c} = 1.2\sqrt{2g \cdot \Delta \cdot d} \dots (8)$<br>( $d_{from(8)} = 0.5 d_{from(2)}$ ) |
|                                           | 若干の捨石の移動を許容 | $\psi = 0.06 \dots (9)$ : Shields公式<br>$u_b/u_* = 6.0 (h/d)^{1/6} \dots (6)$                                                                                                    |
| Maynold <sup>7)</sup>                     | 若干の捨石の移動を許容 | $3.2 < h/d < 40$<br>$d/h = 0.36 \left( \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \frac{u_0}{\sqrt{gh}} \right)^{2.5} \dots (10)$<br>$d = 7.6\text{mm} \sim 76\text{mm}$ を用いた実験公式                  |

表-3 橋脚の捨石洗掘防止工の表層捨石の安定に関する実験値および現地施工例の比較

|                       | 捨石粒径<br>$d(\text{cm})$ | 橋脚径<br>$D(\text{cm})$ | 水路幅<br>$B(\text{cm})$ | 平均流速<br>$u_0(\text{cm/s})$ | 水深<br>$h(\text{cm})$ | $K=D/B$           | 捨石内 $Res = u_* \cdot d / \lambda \cdot \nu$ | $\frac{u_{*c}}{u_*}$ | $\frac{u_{*c}'}{u_*}$ | $\frac{u_{*c}''}{u_{*c}}$ |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 本実験                   | 1.7                    | 16.5                  | 100                   | 55.7                       | 16.5                 | 0.165             | 2,300                                       | 1.73                 | 1.43                  | 1.21                      |
| Wörman <sup>10)</sup> | 1.13                   | 28                    | 350                   | 53.0                       | 29.0                 | 0.08*             | 1,290                                       | 1.82                 | 1.48*                 | 1.23                      |
| Posey <sup>11)</sup>  | 0.5                    | 27.4                  | 200                   | 33.0                       | 26.0                 | 0.137             | 380                                         | 2.03                 | 1.87                  | 1.09                      |
| 栗津 <sup>9)</sup>      | 0.15,<br>0.25<br>0.35  | 2,4,5                 | 40                    | —                          | —                    | 0.05<br>~<br>0.25 | 60~200                                      | —                    | —                     | 1.0                       |
| 明石3P <sup>1)</sup>    | 100                    | 7800                  | $4 \times 10^5$       | 410                        | 4700                 | 0.02*             | $1.6 \times 10^6$                           | 2.13                 | 1.63*                 | 1.42                      |

\*栗津公式の適用範囲は、 $0.1 \leq K \leq 0.25$  であるので  $K=0.1$  として  $u_*'$  を算出した。 $\approx 1.2^2$

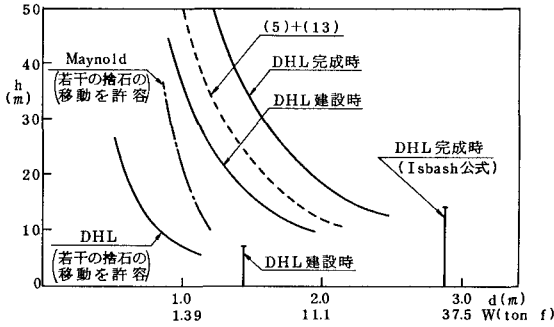


図-1 捨石の移動限界公式の比較 ( $u_o = 8.2 \text{ m/s}$ ,  $d = 1.65$ )

の実験値の下限値に近い。(6)式は、水面付近からの捨石の投入による捨石表面の凹凸や、捨石粒径が大きくなるにしたがい  $u_o/u_*$  が小さくなる傾向を考慮して設定されたと推察される。

4) 橋脚まわりの捨石に作用する最大掃流力：捨石に作用する最大掃流力は、栗津<sup>9)</sup>の洗掘発生限界の概念を用いて、水理実験において捨石の移動限界時の流れを測定することにより間接的に評価できる。

### 3. 水理実験を用いた橋脚まわりの表層捨石の安定評価

実物の捨石工内の浸透流は十分発達した乱流である。ここでは、捨石工内の浸透流の  $Res$  数に着目して、捨石の移動限界が求められている従来の実験値および本研究で実施した実験値を用いて、橋脚まわりの表層捨石に作用する最大摩擦速度  $u_{*c}$  を算出する。図-3に評価フローを示す。また表-3に、各実験結果を用いて求めた  $u_{*c}$  の比較を示す。表から、 $Res$  が層流と乱流の遷移領域である栗津の実験公式から求める  $u_{*c}'$  と各実験から求める  $u_{*c}$  を比較すると、 $Res$  が大きくなるにしたがい  $u_{*c}/u_{*c}'$  が増加し、 $Res$  が乱流域では  $\alpha_1 = u_{*c}/u_{*c}' \approx 1.2$  となることがわかる。

### 4. 現地施工例を用いた橋脚まわりの表層捨石の安定評価

明石海峡大橋3P下部工に施工されている捨石の安定を、図-3のフローにしたがい評価する。評価結果を表-3に並示する。なお、3P下部工まわりの捨石は、施工後の現地計測により安定が確認されている。

表から、3P下部工の捨石は、捨石工内の浸透流が乱流状態の実験条件で評価された  $u_{*c}$  の約1.2倍の値を用いて設計されていることになる。この  $\alpha_2 = 1.2$  倍を捨石の抵抗式で評価すると、 $u_o/u_* = 6.4(h/d)^{1/6} - (13)$  となる。図-1には、(5)+(13)式から求まる値を、また、図-2には、(13)式を並示してある。施工後の捨石の安定状態および図-1、2から(13)式は妥当と考えられる。

### 5. まとめ、および表層捨石の設計法の提案

海峡橋脚まわりの捨石洗掘防止工の表層捨石の安定を、捨石工内に発生する  $Res$  数に着目した水理実験結果および現地施工例を用いて検討した。その結果、以下の設計法を提案する。

○橋脚まわりの捨石に作用する最大摩擦速度は、広範囲な実験結果に基づいた栗津公式(12)から求まる値に  $\alpha_1 = 1.2$ 、および  $\alpha_2 = 1.2$  を乗じた値とする。

ここで、 $\alpha_1$ ：捨石工内に発生する浸透流の乱流効果を考慮した実験値より求めた値

$\alpha_2$ ：捨石の抵抗の実験式(13)を考慮して求めた値

○捨石の移動限界公式は、DHLが提案している(5)式を用いる。

参考文献

- 1) 石野他、土木学会論文集No.482 VI-18、1998
- 2) Breusers, J. Hydr. Res. 1977
- 3) Raudkivi Scouring, 1991
- 4) Piliarczyk, The Closure of Tidal Basins, 1984
- 5) Paintal, J. Hydr. Res. 1971
- 6) Maynold, ASCE HY 115-7, 1989
- 7) Maynold, ASCE HY 117-8, 1991
- 8) 栗津他、第25回年報1970
- 9) Worman, ASCE HY 115-12, 1989
- 10) Posey, ASCE HY 100-12, 1974

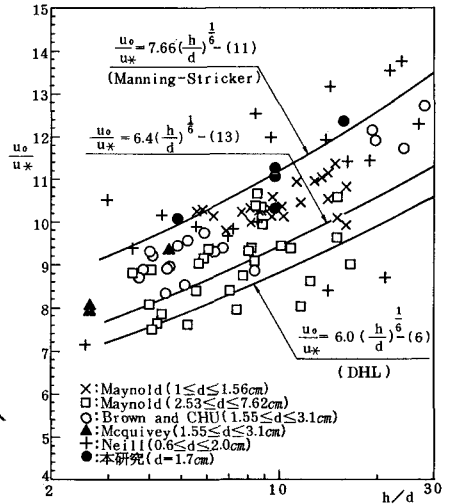


図-2 捨石の抵抗式の比較

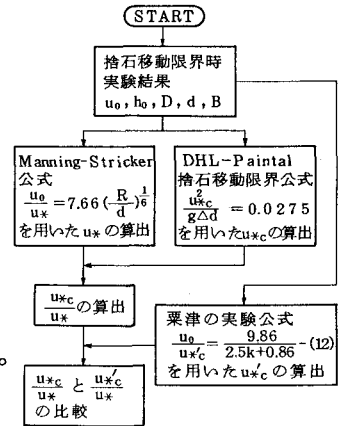


図-3 橋脚の捨石工の表層捨石の安定評価フロー