

# 急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工 の設計法に関する研究

石野和男<sup>1</sup>・大谷英夫<sup>2</sup>・勝井秀博<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大成建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 大成建設(株)技術研究所 研究員 (〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 大成建設(株)技術研究所 チームリーダー (〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

橋脚まわりの捨石洗掘防止工は、古くから使用されてきたにもかかわらず、水理学的考察に基づいて捨石洗掘防止工を取扱った研究は少なく、さらに、これに対する研究のほとんどはTerzaghiの逆フィルター概念を用いた研究である。本研究は、明石海峡大橋の捨石洗掘防止工の検討を契機として、捨石工内に発生する浸透流に着目して、水理学的な根拠が明確で実用的な設計手法を確立することを目的として始めた。本論文では1. 実験、数値計算、現地計測結果に基づいた捨石工内の浸透流速の予測手法 2. 1の結果と捨石下の底質の安定重量とを対比した捨石工の層厚、内層の粒径、敷設範囲の設計手法を検討し、捨石洗掘防止工の実用的な設計手法を提案した。

*Key Words* : riprap scour protection, seepage flow, pier in strait, design method, hydraulic model test, field measurement

## 1. まえがき

海峡部においては急潮流が発生している。このような海峡に橋脚が設置されると、橋脚周辺の最大流速は、橋脚が設置される前の流速 $u_0$ の約2倍程度<sup>1)</sup>となることが知られている。このため、海峡橋脚の設置地点の基盤の地質が砂礫や軟岩のように洗掘抵抗性が小さいと、橋脚周辺の基盤の洗掘が危惧され、基盤を洗掘から守るための洗掘防止工の設置が必要となる。なお、海峡橋脚は海底面を橋脚設置基盤まで事前掘削された基盤上に、鋼製ケーソンで構成される橋脚を設置する工法、すなわち設置ケーソン工法で施工されるのが一般的である<sup>2)</sup> (図-1参照)。

橋脚の洗掘防止工としては、従来から捨石を用いた被覆工法すなわち捨石洗掘防止工が一般に用いられている。この工法は洗掘が予想される範囲を、河床に存在していた底質よりも洗掘抵抗性の大きな捨石で被覆する工法である。渇水期の河川の橋脚周辺では洗掘穴が目視できることから、この洗掘穴に捨石を投入することにより洗掘防止工が施工されている。

このように捨石洗掘防止工は古くから経験的に用いられてきたにもかかわらず、水理学的考察に基づいて捨石洗掘防止工を取扱った研究は少なく、さらに、これに対する研究のほとんどはTerzaghiの逆フィルター概念を用いた研究<sup>3)</sup>である。ここで逆フィルターとは、底質よりも粒径が大きな砂や礫で構成された底質の吸出し防止フィルターのことである。

しかし、海峡のように常に潮流が発生している地点で、基盤が細粒分のみで構成される軟岩の場合、細粒砂から巨礫までの各粒径で構成される逆フィルター層を橋脚の周辺に設置することは不可能である。

本研究は、急潮流が発生し基盤が洗掘抵抗性の弱い軟岩や固結砂礫である明石海峡大橋橋脚の捨石洗掘防止工の検討を契機として始めたものである<sup>4)</sup>。

本論文は、橋脚周辺の事前掘削穴内に設置された捨石洗掘防止工内の捨石間の空隙に発生する浸透流速 $u_p$ に着目し、捨石下の基盤に作用する浸透流速の最大値 $u_{pmax}$ が基盤の移動限界流速 $u_{psc}$ より小さければ基盤が安定を保ち洗掘が防止できるとの方針の下で捨石洗掘防止工の研究を行なったものである。図

# 急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工

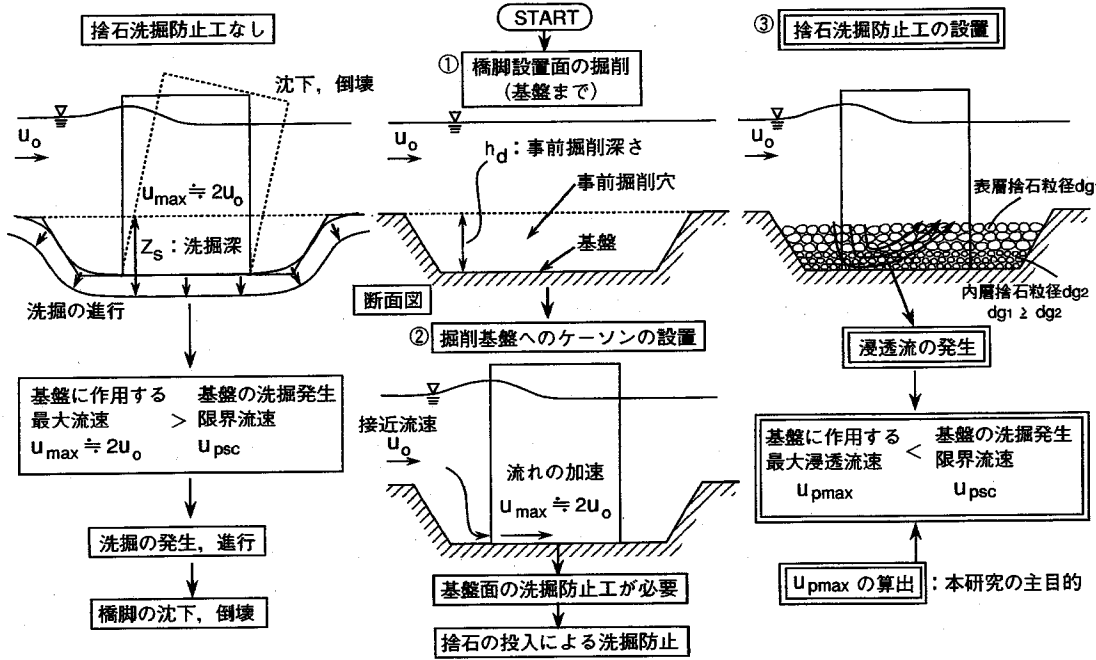


図-1 急潮流下における橋脚の施工法およびその捨石洗掘防止工について

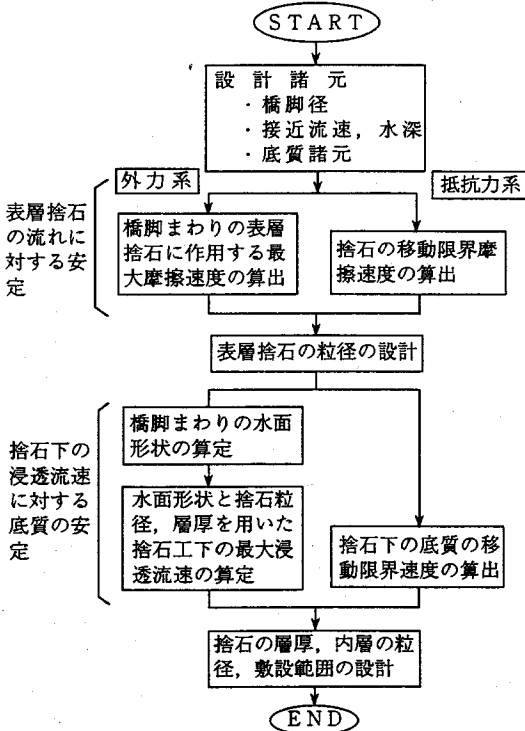


図-2 橋脚の捨石洗掘防止工の設計フロー

-2に本研究が提案する設計フローを示す。本研究で取扱う捨石洗掘防止工は、基盤に作用する浸透流速の低減を目的とする内層捨石と、設計流速時に内層捨石の押え石を目的とする表層捨石で構成される。なお、浸透流の低減が可能であれば表層捨石粒径  $d_{g1}$  と内層捨石粒径  $d_{g2}$  が等しい場合もある。このような橋脚周辺の捨石洗掘防止工における表層捨石の安定、捨石洗掘防止工内の浸透流の発生要因となる水面形状、基盤に作用する浸透流速の低減状況、捨石下の浸透流に対する基盤の安定について、水理模型実験、3次元数値計算、現地計測を用いて系統的に検討を加え、実用的な橋脚周辺の捨石洗掘防止工の設計法を提案するものである(図-3参照)。

本論文では、表層捨石の設計法<sup>5)</sup>に引き続き、内層捨石粒径、捨石層厚、敷設範囲の設計法について明らかにする。

ここで、捨石上の流れのせん断力(スリップ速度)の影響が及ぶ捨石表層部の浸透流速を正確に把握するためには、捨石表面に作用する圧力分布と、せん断力(スリップ速度)分布を十分に検討する必要がある。しかし、橋脚まわりの捨石上には馬蹄渦等の複雑な流れが存在していて、その現象解明と、捨石表面に作用する圧力分布とせん断力(スリップ速度)分布を求めるためには多くの検討が必要であ

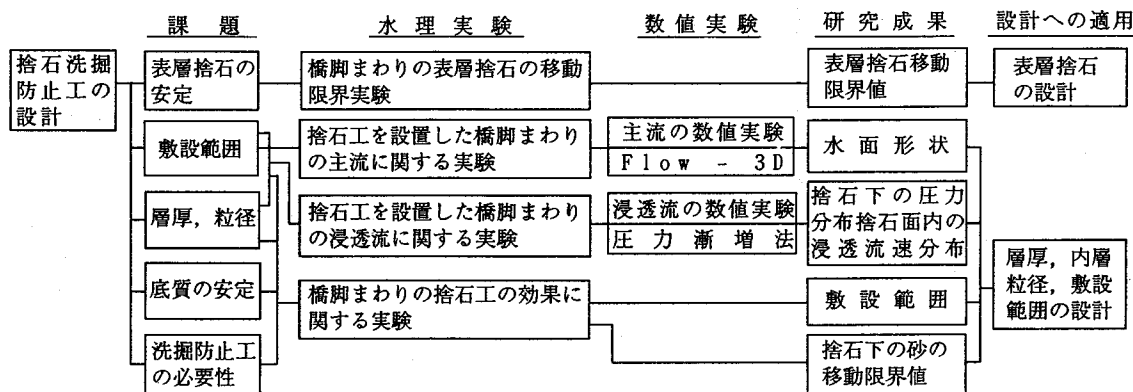


図-3 本研究のフロー

る。

本研究では、捨石洗掘防止工の実用的な設計法を求めることを目的とし、捨石上のスリップ速度の影響が及ばない捨石層数（検討により3層）以上の捨石下面の浸透流場を検討対象としている。

このため、捨石上面の圧力分布のかわりに、捨石表面より上の流れの圧力の中で、目視ができ、計測が容易な水面形状を用いることとし、水面形状と、捨石底面の圧力分布、流速分布の関係を考察した。

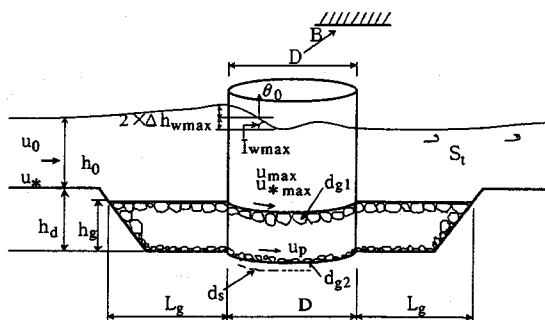


図-4 捨石洗掘防止工の概念図

## 2. 捨石洗掘防止工内の浸透流について

橋脚のまわりでは、局所的に大きな水面勾配が生じ、主にこの水面勾配に起因して捨石工内に乱流浸透流が発生する（図4参照）。

捨石工下の基盤の安定を計るためには、捨石工内の浸透流特性を把握する必要がある。ここでは、まず、水理模型実験を用いて、浸透流の発生状況を把握した。次に石野ら<sup>4)</sup>が明石海峡大橋3P主塔基礎まわりの流れの検証に適用した3次元数値計算プログラムFlow-3Dを用いて、橋脚まわりの流れを解析し、水理実験結果と合わせて流れ諸元と水面形状の関係を考察した。また、山上ら<sup>6)</sup>の提案している圧力漸増法を橋脚まわりの捨石浸透層に適用して、浸透流の発生要因である水面形状と捨石工内に発生する乱流浸透流速の関係を考察した。これらの結果を用いて橋脚まわりの捨石工内に発生する浸透流の予測法を示した。

### (1) 浸透流水理実験

石野ら<sup>4)</sup>は、明石海峡大橋主塔基礎を対象として、接近流のフルード数  $Fr = u_0 / \sqrt{gh} = 0.210$ 、水深・橋脚径比  $h/D = 1.75$  の条件で、捨石層4層～16層 ( $0.239 \leq hg/D \leq 0.929$ ,  $hg$ : 捨石層厚, ここで  $hg = \text{捨石層数} \times \text{捨石平均粒径 } dg$ ) の範囲で、半円柱および浸透流速の測定には染料と高速度VTRを用いて浸透流水理実験を実施している。本研究では、石野ら<sup>4)</sup>の実験範囲を拡張するとともに、全円柱および浸透流速の測定にはオイラー流速が測定可能なレーザー流速計を用いて実験した。

実験は、長さ12m、幅1m、高さ0.4mの変可変型鋼製水路の中央に直径  $D = 16.5\text{cm}$  の透明アクリル製の円柱を設置して行った。流況観察および測定のために、円柱設置部の水路の側壁および底面は、ガラス製とした。水路床の上には、円柱の上流端から8m区間にわたって平均粒径  $dg = 1.7\text{cm}$ 、空隙率  $\lambda = 0.39$  の砂利を敷きつめ、捨石洗掘防止工の模型とした。捨石層底面の浸透流速の測定には、後方散乱型のレーザー流速計を用いた。また捨石層底面のガラス面に垂直に作用する圧力分布を多点微圧計を用いて、橋脚まわりの水面形状をポイントゲージおよびサーボ式水位計を用いて測定した。各ケースとも水路内に等流を発生させ、水深  $h_0$ 、流量  $Q_0$ 、断面平均流速  $u_0$  を設定した。実験条件を表-1に示す。なお測定された浸透流速  $u_p$  は、1.5 cm/sec 以上であり、浸

### a) 実験装置および方法

実験は、長さ12m、幅1m、高さ0.4mの変可変型鋼製水路の中央に直径  $D = 16.5\text{cm}$  の透明アクリル製の円柱を設置して行った。流況観察および測定のために、円柱設置部の水路の側壁および底面は、ガラス製とした。水路床の上には、円柱の上流端から8m区間にわたって平均粒径  $dg = 1.7\text{cm}$ 、空隙率  $\lambda = 0.39$  の砂利を敷きつめ、捨石洗掘防止工の模型とした。捨石層底面の浸透流速の測定には、後方散乱型のレーザー流速計を用いた。また捨石層底面のガラス面に垂直に作用する圧力分布を多点微圧計を用いて、橋脚まわりの水面形状をポイントゲージおよびサーボ式水位計を用いて測定した。各ケースとも水路内に等流を発生させ、水深  $h_0$ 、流量  $Q_0$ 、断面平均流速  $u_0$  を設定した。実験条件を表-1に示す。なお測定された浸透流速  $u_p$  は、1.5 cm/sec 以上であり、浸

表-1 浸透流模型実験の条件

case	流量 $Q_0$ ( $\ell/s$ )	水路 勾配 ib	接 近 流		フルード 数 $F_r$	レイノルズ 数 $Re$	捨石 層厚 $h_g$ (cm)	水深/ 橋脚径 $h_0/D$
			平均流速 $u_0$ (cm/s)	水深 $h_0$ (cm)				
Ep-1-1	55.00	1/1400	33.43	16.45	0.263	55167	1.7	0.997
Ep-1-2	55.67	1/1400	33.62	16.56	0.264	55468	3.4	1.00
Ep-1-3	59.17	1/1400	35.86	16.50	0.282	59170	5.1	1.00
Ep-2-3	132.50	1/1400	49.39	26.83	0.305	81485	5.1	1.63
Ep-3-3	19.67	1/1400	23.73	8.29	0.263	39150	5.1	0.502
Ep-4-3	92.08	1/600	55.74	16.52	0.438	91969	5.1	1.00

↑  
後方の添数字は捨石層数Nを示す

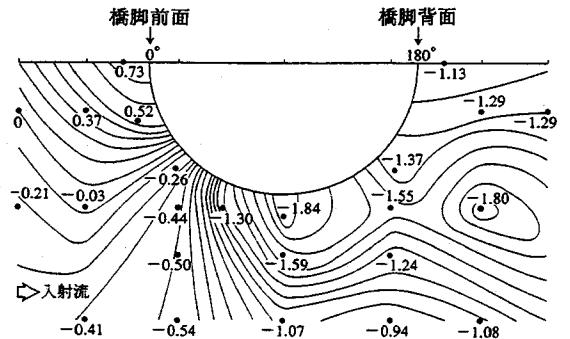
$$F_r = \frac{u_0}{\sqrt{gh_0}}, \quad Re = \frac{u_0 h_0}{\nu}$$

透層内の流れのレイノルズ数 $Res (=u_p \cdot dg/\nu)$ は250以上である。よって本実験の浸透流は乱流域にあると判断される。

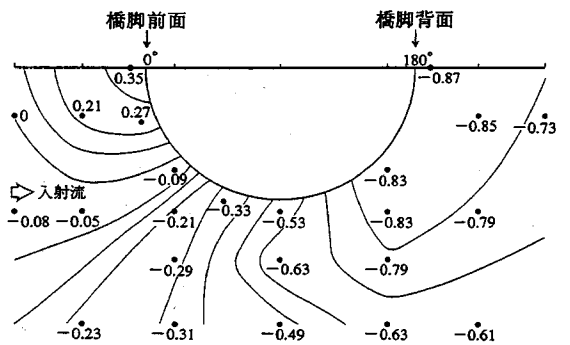
b) 実験結果および考察

図-5に、Case Ep-2-3 (後方の添数字は捨石層数Nを示す)の円柱まわりの水面形状を示す。図から、円柱前面( $\theta=0^\circ$ )でせき上げにより水面が上昇し、 $\theta=90^\circ$ 付近で最低水位が発生し、 $\theta=45^\circ$ 付近の円柱近傍で水面勾配が急になることが示される。図-6にCase Ep-2-3の捨石層底面の圧力分布を示す。図から、最低圧力は $\theta=135^\circ$ で発生するが、最大圧力の位置、最大圧力勾配の位置については、水面形状と同様であり、円柱まわりの局所的な水面形状に起因して浸透流が発生することが示唆された。図-7に、Ep-1-1~1-3の円柱側面での水面形状と、捨石層底面の圧力形状を示す。図から、Ep-1-1~1-3のフルード数が若干異なるので最高水位と最低水位の差は異なるが、捨石層厚が厚くなっても水面形状は、大きな変化を示さないことがわかる。一方層厚が厚くなるにしたがい、圧力勾配が緩和され、層厚の増加による浸透流速の低減効果が示唆される。

図-8に、捨石層底面の浸透流速分布を示す。図中の流速値は、水槽の底面ガラスと捨石最下層の空隙内で測定された実質の浸透流速 $u_p$ を接近流の平均流速 $u_0$ で無次元化した値である。ここで、 $\theta=0^\circ$ 付近のよどみ面渦内の河床面流速 $V_b$ を固定床において測定した鈴木<sup>7)</sup>によると、 $V_{b,max}=0.45\sim 0.55u_0$ である。この値を用いて $\theta=0^\circ$ 付近の河床に作用する洗掘力を比較すると図-8から $\theta=0^\circ$ 付近の浸透流速はCase Ep-1-1で $0.3u_0$ 、Case Ep-1-2、Ep-1-3で $0.1u_0$ であり、捨石を設置することにより $\theta=0^\circ$ 付近の洗掘力が弱まること示された。図-8から捨石層下の最大浸透流速は、 $\theta=45^\circ$ 付近で発生し、Case Ep-1-1 (捨石1層)で $0.4u_0$ 、Case Ep-1-2 (捨石2層)で $0.33u_0$ 、Case Ep-1-3 (捨石3層)で $0.16u_0$ となる。大谷ら<sup>8)</sup>によると $\theta=45^\circ$ における捨石表面のスリップ速度



図中の数値は平均水面を基準とした圧力水頭値 単位: cm  
図-5 橋脚まわりの水面形状 (Case Ep-2-3実験値)



図中の数値は平均水面を基準とした圧力水頭値 単位: cm  
図-6 捨石層底面に垂直に作用する圧力分布 (Case Ep-2-3実験値)

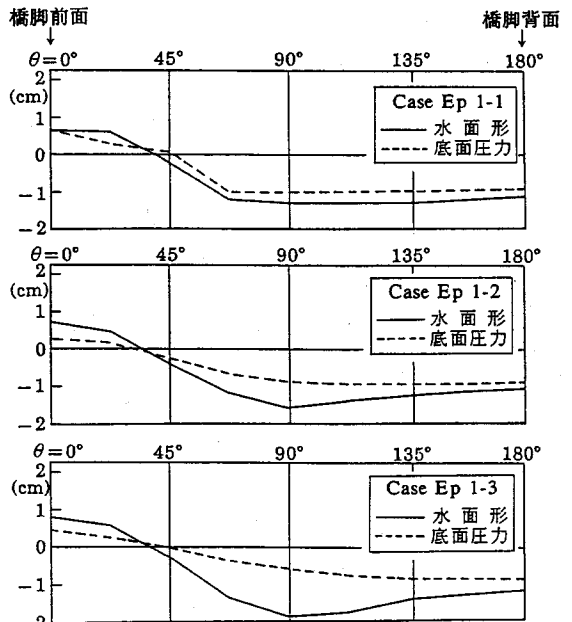


図-7 橋脚側面の水面形状と捨石層底面に垂直に作用する圧力形状(実験値)

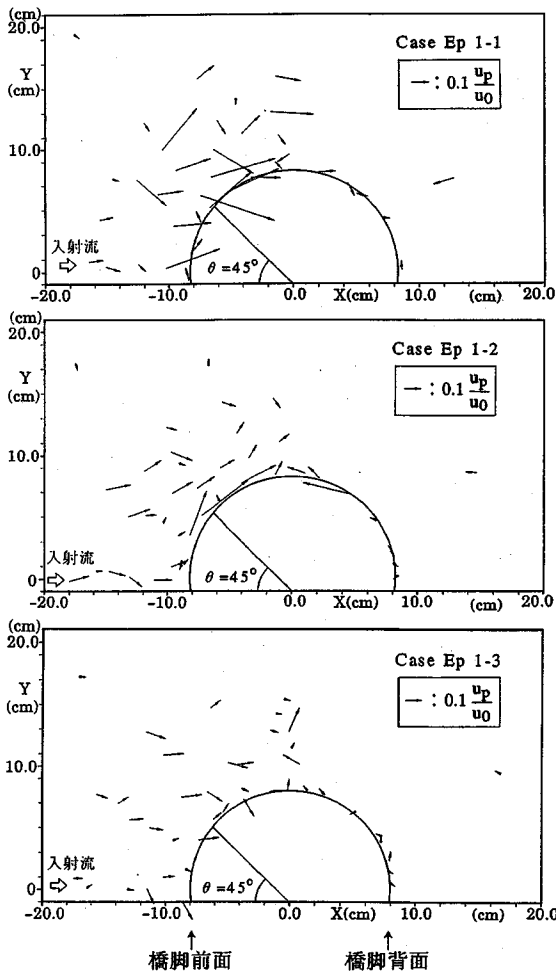


図-8 捨石層底面の浸透流速分布 (実験値)

$U_{slip}$ は $1.0 \sim 1.3u_0$ で、また石野ら<sup>4)</sup>では、捨石層数4層下での最大浸透流速は $0.13u_0$ である。よって捨石を一層設置することにより、主流の流速をかなり減勢することおよび圧力の緩和で示唆されたように、捨石層数が増加するにしたがい、圧力が緩和され、最大浸透流速が低減されることが示された。ここで、本実験では、ガラスの滑面上の浸透流速を測定している。一方、実物の流れは砂等の粗面上の浸透流となる。よって、ここで求めた浸透流速は設計上安全側の流速値と判断される。

(2) 浸透流水理実験結果および3次元数値計算結果を用いた橋脚まわりの水面形状の考察

図-5, 7に浸透流水理実験で求めた水面形状を示した。(3)に示すように、捨石層内の浸透流速に影響を与える水面形の諸元は、最大水面勾配 $I_{wmax}$ と、

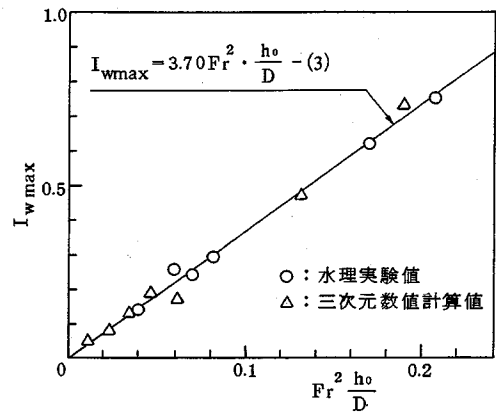


図-9  $I_{wmax}$ と $Fr^2 \cdot h_0/D$ の関係

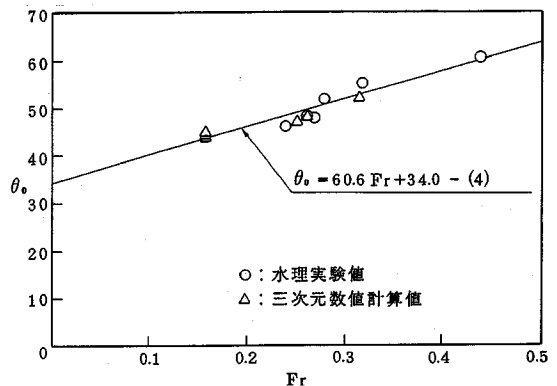


図-10  $\theta_0$ と $Fr$ の関係

橋脚まわりの平均水位の発生場所 $\theta_0$ である。ここで平坦床上の円柱まわりにおいて最高水位が発生する橋脚前面 $\theta=0^\circ$ と最低水位が発生する地点で、ベルヌーイの定理を適用すると、式(1)が与えられる。

$$\Delta h_{wmax} = \frac{(\alpha u_0)^2}{2g} \quad (1)$$

$\Delta h_{wmax}$ : 橋脚周辺の水位差,  $u_0$ : 接近流平均流速  
 $\alpha u_0$ : 最低水位発生地点の平均流速,  $g$ : 重力加速度  
 ここで、最高水位点と最低水位点の2点間の円周上の長さ $\beta D$ で $\Delta h_{wmax}$ を除し、2点間の勾配すなわち $I_{wmax}$ を求めると、式(2)の関係が求まる。

$$I_{wmax} = \frac{\Delta h_{wmax}}{\beta D} = \frac{\alpha^2}{2\beta} \cdot \frac{u_0^2}{gD} = \frac{\alpha^2}{2\beta} \cdot \frac{u_0^2}{gh_0} \cdot \frac{h_0}{D}$$

$$= \frac{\alpha^2}{2\beta} \cdot Fr^2 \cdot \frac{h_0}{D} \quad (2)$$

浸透流水理実験と3次元数値計算により求めた水面形状の特性値 $I_{wmax}$ ,  $\theta_0$  ( $= \frac{1}{2} h_{wmax}$  発生位置) と $Fr$ ,  $h_0/D$ の関係を、それぞれ図-9, 10に示す。図-9, 10から、捨石層内の浸透流速の予測に必要な $I_{wmax}$ ,  $\theta_0$ と $Fr$ ,  $h_0/D$ の関係式として、式(3), (4)が求まる。

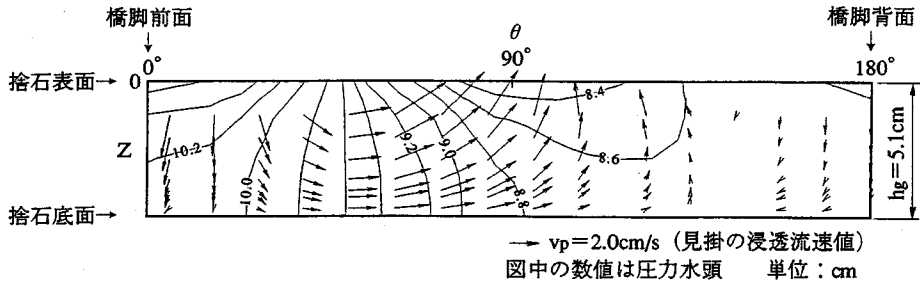


図-11 橋脚壁面まわりの浸透流速および圧力分布数値計算値

$$I_{wmax} = 3.70Fr^2 \frac{h_0}{D} \quad (3)$$

$$\theta_0 = 60.6Fr + 34.0 \quad (4)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{適用範囲: } 0.502 \leq \frac{h_0}{D} \leq 1.63 \\ 0.263 \leq Fr \leq 0.438 \end{array} \right)$$

なお、図-9,10および式(3), (4)に示す水面形の特  
性値は、捨石工の天端と河床面が同一の平坦床の結  
果である。捨石工の天端が河床面と異なる場合には、  
水面形状を水理実験又は数値計算により求める必要  
がある。

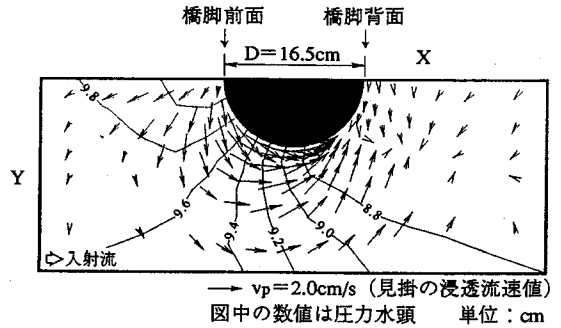


図-12 捨石層底面の浸透流速および圧力分布数値計算  
値(実験値 Case Ep-2-3との比較)

### (3) 3次元乱流浸透流数値計算

(1)において、橋脚まわりの捨石工内には、水面  
形状に起因した乱流(非ダルシー)浸透流が発生す  
ることを実験結果から示した。

一方、ロックフィルダム内の流れは乱流(非ダル  
シー流れ)となることから、乱流状態の浸透流場を  
解析する手法の開発が行われている。この中で山上  
ら<sup>6)</sup>は、非線形力学で用いられる荷重漸増法の概念  
を乱流の浸透流場に適用した簡易解析手法を提案し  
ている。ここでは、山上ら<sup>6)</sup>が提案している「有限  
要素法による非ダルシー浸透流解析手法」を橋脚ま  
わりの捨石工内の浸透流に適用して、捨石上面の圧  
力の境界条件として、橋脚まわりの水面形状を入力  
した数値計算結果と、水理模型実験結果および現地  
計測結果を比較検討した。有限要素法は、重み付き  
残差法の1つであるガラーキン法を用いた。またメ  
ッシュ数は、108個/層×10層=1,080個程度とした。

#### a) 解析結果および考察

浸透流水理実験Case Ep-2-3の水面形状(図-5)(3  
次元数値計算で求めた水面形状と同等値)を入力し  
た解析結果の内、橋脚壁面まわりの浸透流速および  
圧力分布を図-11に、捨石底面の浸透流速および圧  
力分布を図-12に示す。また表-2に浸透流水理実験  
結果と数値計算の比較表を示す。図-12と図-6およ

び表-2の右端の覧からCase Ep-1-1, Ep-1-2すなわち  
捨石層数が、1, 2層の条件下を除き水理実験と数値  
計算結果の浸透流況および浸透流速はほぼ一致して  
おり、数値計算方法の妥当性が示された。なお、表  
-2の右端の覧から、Case Ep-1-1, Ep-1-2すなわち捨  
石層数が、1, 2層の条件下では、数値計算で求めら  
れた最大圧力勾配から求める  $v_{pmax-cal}/\lambda$  よりも大き  
な  $u_{pmax-exp}$  が計測されている。この要因としては、  
捨石工が1~2層の場合は捨石上のスリップ速度が浸  
透流に影響を与えていることが指摘される。

次に石野ら<sup>4)</sup>が明石海峡大橋3Pで実施した浸透  
流現地計測の条件をプログラムに入力し、数値計算  
を行った。図-13に3Pケースンおよび捨石洗掘防止  
工を示す。捨石洗掘防止工は、表層捨石および内層  
捨石から構成されている。それぞれの捨石の入力条  
件を以下に示す。

表層捨石(捨石層) :  $d_{s1}=100\text{cm}$ ,  $\lambda=0.5$   
内層捨石(フィルター層) :  $d_{s2}=11\text{cm}$ ,  $\lambda=0.465$

なお、捨石内の浸透流の抵抗式は、捨石粒径が40  
~150mmの碎石等を用いた本実験値とDHL<sup>9)</sup>および  
富永ら<sup>10)</sup>の実験結果から求めた式(5)を用いた。図-  
14にこれらの関係を示す。また、図-15に入力した  
3Pまわりの水面形状を示す。

表-2 浸透流速の実験結果と数値計算結果の比較

数値計算 Case	実験 Case	Fr	$\frac{h_0}{D}$	$\frac{hg}{D}$	$\left(\frac{I_{pmax}}{I_{wmax}}\right)_{exp}$	$\left(\frac{I_{pmax}}{I_{wmax}}\right)_{cal}$	$\frac{V_{pmax-exp}}{V_{pmax-cal}}$	$\frac{u_{pmax-exp}}{\left(\frac{V_{pmax-cal}}{\lambda}\right)}$
Np-1-1	Ep-1-1	0.240	1.00	0.103	1.19	0.719	1.29	1.57
Np-1-2	Ep-1-2	0.261	1.01	0.206	0.490	0.470	1.02	1.70
Np-1-3	Ep-1-3	0.279	1.00	0.309	0.326	0.339	0.981	0.955
Np-2-3	Ep-2-3	0.318	1.62	0.309	0.402	0.459	0.936	0.935
Np-3-3	Ep-3-3	0.269	0.502	0.309	0.299	0.275	0.959	0.952
Np-4-3	Ep-4-3	0.438	1.00	0.309	0.513	0.470	1.04	0.917

Fr =  $\frac{u_0}{\sqrt{gh_0}}$  : フルード数  
 $u_0$ : 接近流速  
 $h_0$ : 接近流水深  
 $g$ : 重力加速度  
 $D$ : 橋脚径

$I_{wmax}$ : 橋脚周辺の最大水面勾配  
 $I_{pmax}$ : 捨石層底面の最大圧力勾配  
 $V_{pmax}$ : 見掛の浸透流速  
 $u_{pmax}$ : 捨石空隙内の真の浸透流速

$\lambda$ : 捨石の空隙率  
 添字  
 exp: 実験値  
 cal: 数値計算値

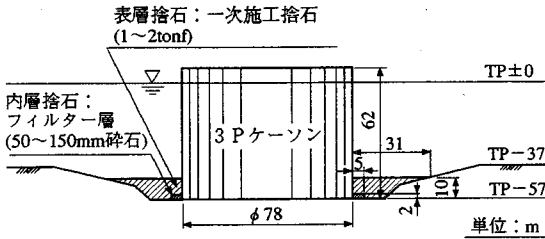


図-13 3Pケーソンおよび捨石洗掘防止工

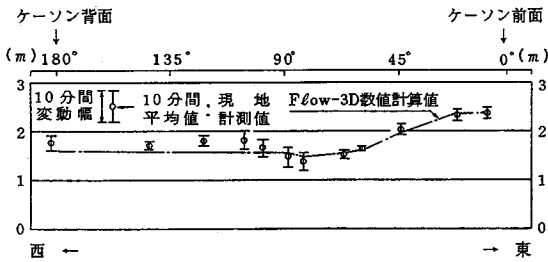


図-15 ケーソン側壁の水面形状の計測値と3次元数値計算値の比較

研究者	捨石平均粒径 $d_g$ (cm)	捨石空隙率 $\lambda$	形状
□ DHL <sup>9)</sup>	24.7, 43.3, 172	0.45	碎石, コンクリートブロック
▲ 富永ら <sup>10)</sup>	2.3~10.93	0.32~0.433	碎石
● 本研究	15	0.457~0.511	碎石で構成した球体(ボラコン)
△ 本研究	5, 11	0.386~0.469	碎石(明石海峡大橋用)

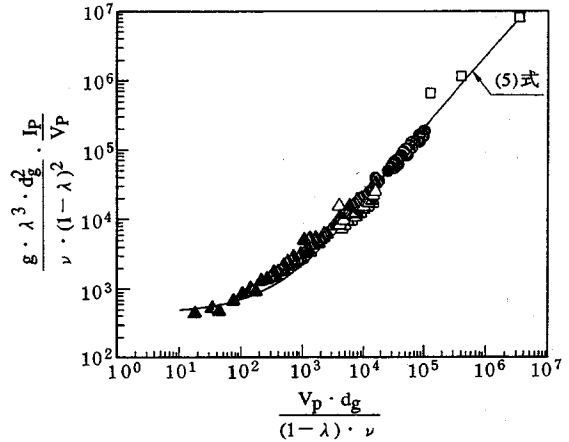


図-14 捨石内の浸透流の抵抗則

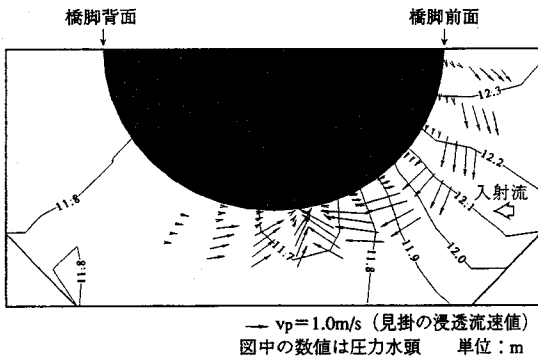


図-16 捨石層底面の浸透流速および圧力分布 (現地計測結果との比較)

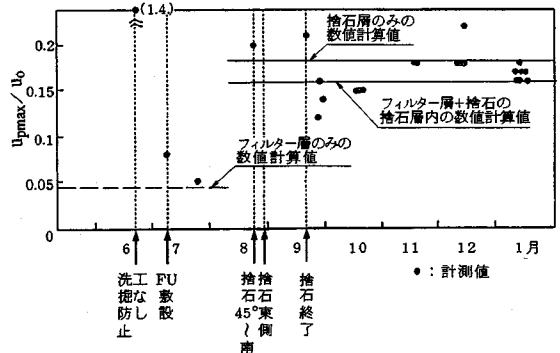


図-17 浸透流現地計測結果と数値計算結果の比較

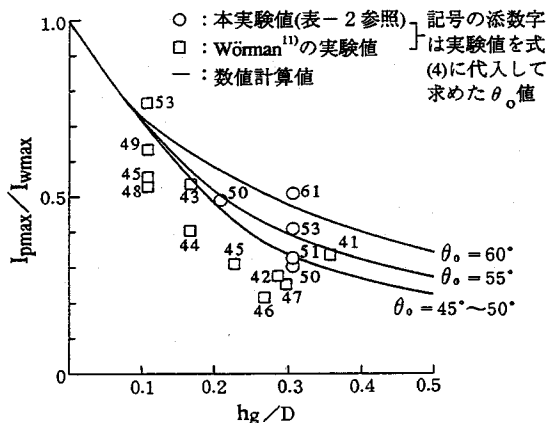


図-18  $I_{pmax}/I_{wmax}$ ,  $h_g/D$ ,  $\theta_0$ の関係  
(数値計算値と実験値の比較)

$$I_p = 500 \cdot \frac{\nu(1-\lambda)^2}{g\lambda^3 d_g^2} V_p + 2 \frac{1-\lambda}{g\lambda^3 d_g^2} V_p^2 \quad (5)$$

$I_p$ : 圧力勾配,  $\nu$ : 動粘性係数

図-16に数値計算結果を示す。ケーソン側壁まわりで浸透流のベクトルが小さくなっているのは、この地点に粒径の細かい内層捨石が存在しているからである。図-17に現地計測結果と数値計算結果の比較を示す。

図から数値計算の妥当性が示された。

#### (4) 三次元乱流浸透流数値計算を用いたパラメータスタディー

(3)により、捨石工が3層以上の条件下で、山上らの荷重漸増法を橋脚まわりの捨石工内に応用した三次元乱流浸透流数値計算法の妥当性を示した。

ここでは、この数値計算法を用いて捨石層底面の最大圧力勾配 $I_{pmax}$  (出力値)と最大水面勾配 $I_{wmax}$  (入力値)の関係についてパラメータスタディーを行った。用いた入力パラメータは、橋脚径 $D$ , 捨石層厚 $h_g$ , 水面形特性値 $I_{wmax}$ ,  $\theta_0$ である。パラメータスタディーの結果を図-18に示す。

なお図には、本実験結果とWörman<sup>11)</sup>の実験結果を並示する。

#### (5) 捨石工下の最大浸透流速の算定法

(1)~(4)の検討により、捨石層数が3層以上の捨石工下の最大浸透流速を算定できることを示した。以下にその方法をまとめる。

・接近流諸元 $u_0$ ,  $h_0$ と橋脚径 $D$ から求まる $Fr$ ,  $h_0/D$ を図-9, 10に適用して、橋脚まわりの水面形の特性値である $I_{wmax}$ ,  $\theta_0$ を求める。

・ $I_{wmax}$ ,  $\theta_0$ および $h_g/D$ を図-18に適用して、橋脚ま

表-3 捨石工の効果に関する水理実験の条件

Case	水路勾配 ib	接近流		フルード数 $F_r$	レイノルズ数 Re	$\frac{\tau_0}{\tau_{*c}}$	$\frac{h_0}{D}$	捨石層数 N
		平均流速 $u_0$ (cm/s)	水深 $h_0$ (cm)					
Es-1	1/1400	34.12	16.51	0.268	56333	1.6	1.00	3
Es-2	1/1400	48.14	26.83	0.297	129167	2.5	1.64	3
Es-3	1/1400	16.47	8.30	0.183	13667	1.0	0.50	3
Es-4	1/600	47.74	16.51	0.375	78833	3.5	1.00	3

$$F_r = u_0/\sqrt{gh_0}, \quad Re = u_0 \cdot h_0/\nu$$

D: 橋脚径

$$\tau_0 = \rho u_*^2, \quad \tau_{*c} = u_{*c}^2 / ( \frac{\sigma}{\rho} - 1 ) g d_g$$

わりの捨石下の最大圧力勾配 $I_{pmax}$ を求める。

・ $I_{pmax}$ と捨石平均粒径 $d_g$ , 空隙率 $\lambda$ を式(5)に代入することにより橋脚まわりの捨石下の最大浸透流速 $v_{pmax}$  (見掛けの浸透流速) および $u_{pmax} = v_{pmax}/\lambda$  (真の浸透流速)が求まる。

### 3. 橋脚の捨石洗掘防止工の効果に関する水理実験

本章では、初期状態で捨石の間隙に砂を敷き詰め、通水後、捨石は動かずに、捨石の間隙の砂が洗掘され、残留している砂面の状態(洗掘面と定義)から捨石工の必要厚さ、施工範囲を判断する実験結果を示す。また、砂の移動限界状態での浸透流速をレーザー流速計で測定し、その値と従来の2次元実験値を比較検討する。

#### (1) 実験装置および方法

実験は、2.(1)に示した水槽を用いて実施した。水路床の上には、円柱を中心として上・下流とも4mにわたって平均粒径 $d_g=1.7$ cm, 空隙率 $\lambda=0.39$ の砂利を敷き詰め、捨石洗掘防止工の模型とした。また、捨石の間隙には平均粒径 $d_g=0.65$ mmの砂を敷き詰めこれを初期状態とした。洗掘状況は、洗掘が安定となるまで目視およびビデオで観察した。砂が洗掘された後の捨石の空隙に発生する浸透流速の測定には、後方散乱型のレーザー流速計を用いた。また橋脚まわりの水面形状をポイントゲージを用いて測定した。各ケースとも水路内に等流を発生させ、水深 $h_0$ , 流量 $Q_0$ , 断面平均流速 $u_0$ を設定した。実験条件を表-3に示す。なお、Case Es-3の捨石上の流れの掃流力 $\tau_0$ に対する砂の限界掃流力 $\tau_{*c}$ の比は $\tau_0/\tau_{*c}=1.0$ であり、橋脚の上下流の砂はほとんど動いていない。一方Case Es-1, 2, 4の $\tau_0/\tau_{*c}>1$ で、現象の単純化のため上流側からの給砂は行なわなかった。これら



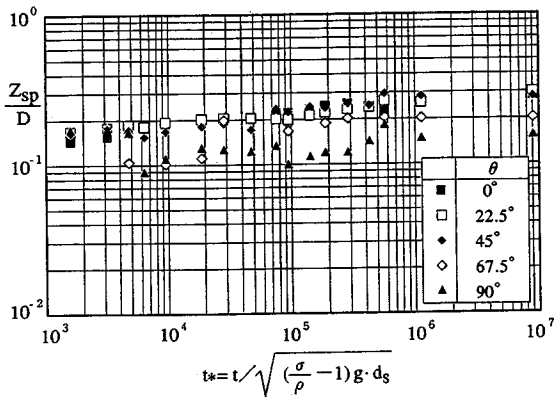


図-19 橋脚まわりの洗掘深の時間変化 (Case Es-1)

のケースでは橋脚の上下流の砂は移動するが、捨石のアーミング効果により橋脚上下流の砂の移動は捨石の1~2層以内で停止した。

一例として、図-19に Case Es-1の洗掘深の時間変化図を示す。図に示すように、最大洗掘深 $Z_{sp}$ は $45^\circ$ 付近で、通水開始後 $t=1$ 時間 ( $t_* = 5.7 \times 10^5$ ) で発生しているが、洗掘が安定したことを確認するために $t=16$ 時間 ( $t_* = 9.0 \times 10^6$ ) 通水した。

## (2) 実験結果および考察

### a) 捨石洗掘防止工の有効性について

図-20に、Case Es-1の洗掘コンター図を示す。図から、最大洗掘深 $Z_{sp}$ は、 $\theta = 45^\circ$ 付近で発生し、 $Z_{sp} = 0.29D$ で、捨石一層程度の洗掘は、円柱外壁から1Dの範囲に収まっていることがわかる。既往の研究<sup>12)</sup>を参考にすると、Case Es-1の条件で捨石工が設置されない場合、洗掘深 $Z_s$ は、 $Z_s = 1.8D$ と算出される。よって、捨石洗掘防止工の有効性が理解できる。

図-21に、Case Es-3の洗掘コンター図を示す。図から、最大洗掘深は $\theta = 45^\circ$ 付近で発生していることが判る。このことから、捨石工内では、 $\theta = 0^\circ$ 付近の下降流速よりも、 $\theta = 45^\circ$ 付近の浸透流速の方が卓越することが示された。また、図から、最大洗掘深 $Z_{sp}$ は $0.18D$ 、洗掘範囲 $L_{sp}$ は、円柱外壁から1Dの範囲に収まっていることがわかる。橋脚の洗掘に関する既往の研究<sup>12)</sup>を参考にすると、Case Es-3の条件で捨石工が設置されない場合、洗掘深 $Z_s$ は $Z_s \cong 1.0D$ と算出される。使用砂の水中安息角が $\theta_s = 28^\circ$ であり、洗掘孔の幅 $L_s$ を、 $L_s = Z_s \cdot \cot \theta_s$ と仮定すると $L_s = 1.88D$ と算出される。以上の検討から、捨石洗掘防止工の有効性が改めて理解できる。

### b) 橋脚まわりの捨石工内の洗掘境界付近に作用する浸透流速について

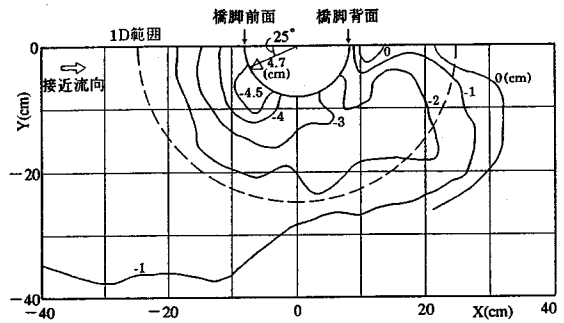


図-20 橋脚まわりの洗掘コンター図 (Case Es-1)

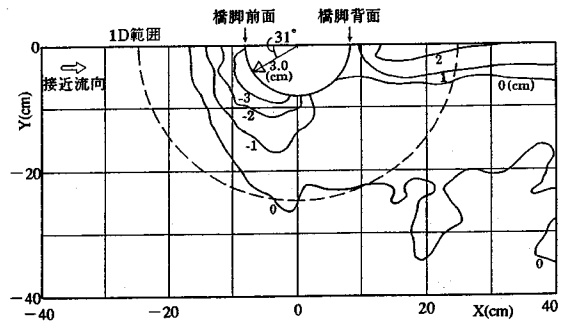


図-21 橋脚まわりの洗掘コンター図 (Case Es-3)

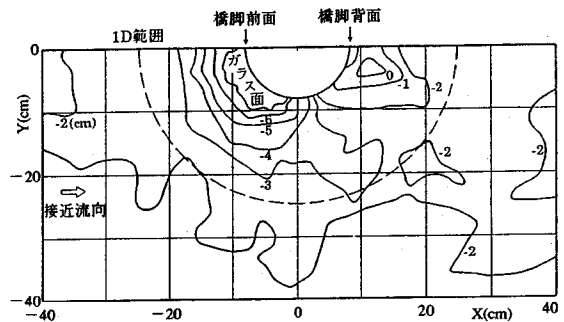


図-22 橋脚まわりの洗掘コンター図 (Case Es-2)

Case Es-1, Es-3の捨石工内の最大洗掘深を捨石の層厚で評価すると、それぞれ2.76層、1.76層となる。一方2.(1)では、レーザー流速計を用いて測定した捨石一層での底面最大浸透流速は $0.4u_0$ 、2層では $0.33u_0$ 、3層では $0.16u_0$ であることを示した。この関係を用いてCase Es-1, Es-3の砂面に作用する最大浸透流速を推定すると、それぞれ5.78cm/s、6.8cm/sとなる。次に、図-22にCase Es-2の洗掘コンター図を示す。このケースでは、洗掘孔内の砂面に作用する浸透流速を測定するために、洗掘が捨石3層以上に進行し、円柱前面側のガラス底面が露出するよう条件を設定してある。ガラス面の下側からレーザー流

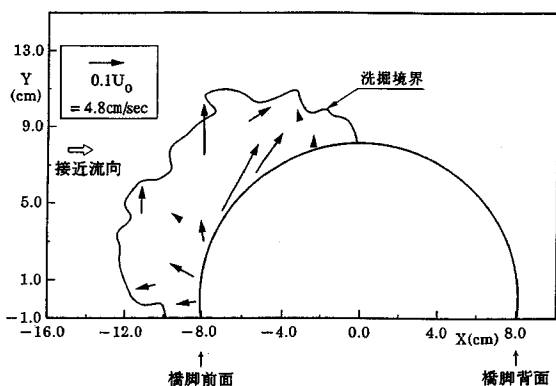


図-23 捨石層底面の浸透流速分布 (Case Es-2 実験値)

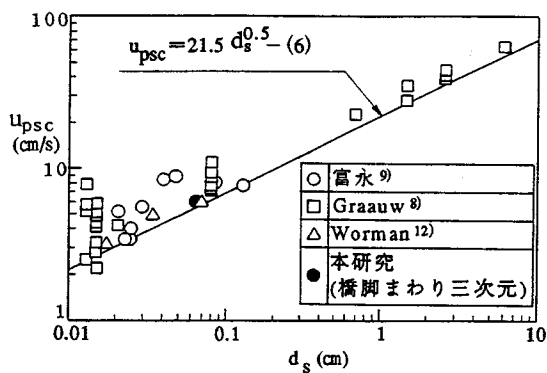


図-24 捨石下の砂粒径と移動限界浸透流速の関係

速計を用いて計測した浸透流速を図-23に示す。図から、洗掘境界付近の浸透流速は、6cm/s前後であることが示される。ここで図-24に、富永<sup>9)</sup> Graauw<sup>8)</sup> Worman<sup>12)</sup>の二次元浸透流下の砂の移動限界実験値を整理した結果を示す。

また、図-24に示した実験値の下限と $u_{psc}$ が $d_s^{0.5}$ に比例することを考慮して、捨石洗掘防止工内の浸透流下砂の平均粒径 $d_s$  (cm) と砂の移動限界浸透流速 $u_{psc}$  (cm/s) の関係式として、式(6)が得られる。

$$u_{psc} = 21.5d_s^{0.5} \quad (6)$$

( 単位：CGS系 )  
( 適用範囲：0.015cm ≤  $d_s$  ≤ 6cm )

図から本実験で使用した捨石下の砂の移動限界流速 $u_{psc}$ を求めると6cm/sとなり、本実験結果とほぼ一致する。よって式(6)および、本実験で測定した捨石工内の浸透流速の妥当性が示された。

#### 4. 橋脚の捨石洗掘防止工の内層捨石粒径、層厚の設計法

2.(5)では、捨石工下の最大浸透流速 $u_{pmax}$ の算定法を示した。また、3.(2)において、捨石下の砂の移動限界流速は、図-24および式(6)に示した二次元浸透流下の砂の移動限界値 $u_{psc}$ を用いて判断できることを示した。よって、設計対象の底質砂の $u_{psc}$ を求め、 $u_{pmax}$ が $u_{psc}$ を上回らないように捨石工の内層の粒径 $d_g$ と層厚 $h_g$ を求めることによって捨石洗掘防止工を設計することができる。なお、2.(1)では、捨石工が1~2層の場合は、捨石上のスリップ速度が、表層の浸透流に影響を与え、捨石内に局所的に大きな流速が発生することを示した。また明石海峡大橋の主塔基礎の捨石洗掘防止工<sup>4)</sup>・<sup>14)</sup>では、潮流下の捨石の施工条件も考慮して、洗掘防止工の端部の捨石は

3~4層を用いている。これらを考慮して捨石層厚は3層以上が必要である。

#### 5. 橋脚の捨石洗掘防止工の敷設範囲の設計法

Posey<sup>3)</sup>は、 $0.107 \leq Fr \leq 0.210$ 、 $0.852 \leq h_0/D \leq 5.44$ の条件下で捨石洗掘防止工の敷設範囲 $L_g$ を判断する実験を行ない、 $0.37 \leq L_g/D \leq 1.63$ であれば捨石工が安定であることを求めている。Posey<sup>3)</sup>は河川橋脚を対象として、メンテナンスフリーの設計条件下では、 $1.5 \leq L_g/D \leq 2.5$ を推奨している。一方、明石海峡大橋の主塔基礎(2P:  $Fr=0.17$ ,  $h_0/D=0.575$ , 3P:  $Fr=0.215$ ,  $h_0/D=0.474$ )では、水理模型実験<sup>14)</sup>により、 $L_g/D=1.0$ で端部の若干の洗掘は予想されるが基礎の安定は保たれると判断している。この結果と経済性を考慮し、主塔基礎では $L_g/D=1.0$ の範囲<sup>15)</sup>に捨石工を施工し、水理実験とほぼ同様の結果が現地観測<sup>16)</sup>されている。また、3.(2)に示したように、本研究の実験範囲( $0.187 \leq Fr \leq 0.375$ ,  $0.50 \leq h_0/D \leq 1.63$ )では、捨石2層以上の洗掘は、 $L_g/D \leq 1.0$ 以内に入っている。これらの研究成果と、海峡橋脚は大口径であり、敷設範囲と基礎の安定度および経済性を比較し、また潮流は河川の洪水に比べ予測が容易なこと等を考慮して、敷設範囲( $L_g/D \geq 1.0$ )を設計する必要がある。

#### 6. おわりに

本研究では、水理模型実験、現地計測、3次元数値計算(捨石上の流れ、および捨石内の乱流浸透流)の結果を用いて、橋脚まわりの捨石洗掘防止工下の基礎の安定評価法を提案した。この結果、捨石洗掘防止工の内層捨石粒径、敷設範囲、層厚を設計する

ことができるようになった。

謝辞：本研究は、明石海峡大橋3P主塔基礎の捨石洗掘防止工の検討を契機として、その後実施した水理模型実験及び3次元数値計算結果を用いてまとめたものである。また、3次元数値計算の検証に用いた現地計測値は、本州四国連絡橋公団第1建設局発注の下で求めたものである。ここに、本州四国連絡橋公団第1建設局をはじめ、関係者の方々に謹んで感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Carstens, M. R. : Similarity laws for localized scour ; *Proc. ASCE Journal of the Hydraulic Division*, Vol.92, HY 3, pp.13-36, 1966.
- 2) 加島 聡, 高澤 勤, 樋口康三, 今井貫爾 : 強潮流下における大規模橋梁基礎の洗掘特性に関する研究, 土木学会論文集, No.438/II-17, pp.51-60, 1991.
- 3) Posey, C. J. : Tests of Scour protection for Bridge Piers, *Proc. ASCE Journal of the Hydraulic Division*, Vol.100, HY 12, pp.1773-1783, 1974.
- 4) 石野和男, 後藤 英一, 中川良隆, 岡田凌太 : 急潮流下海洋構造物周辺の捨石洗掘防止工に関する研究, 土木学会論文集, No.462/VI-18, pp.33-42, 1993.
- 5) 石野和男, 大谷 英夫, 勝井秀博 : 海峡橋脚の捨石洗掘防止工の表層捨石の安定について, 土木学会第48回年次学術講演会, II-421, pp.938-939, 1993.

- 6) 山上拓男, 小田英一 : 有限要素法による非ダルシー浸透流の一解法, 土木学会論文報告集, 第234号, pp.111-120, 1975.
- 7) 鈴木幸一 : 橋脚周辺の局所河床変動に関する研究, 京都大学学位論文, 1977.
- 8) 大谷英夫, 石野和男, 勝井秀博 : 捨石洗掘防止工を設置した橋脚周辺の流れ構造に関する実験的研究, 土木学会第46回年次学術講演会, II-302, pp.646-645, 1991.
- 9) A.F.d.Grauw et al : Granular Filters Design Criteria, *Journal of W.W. ASCE*, Vol.110, No.1, 1984.
- 10) 富永正照, 坂本忠彦 : 海岸堤防の根固め工について, 第16回海岸工学講演会論文集, pp.269-275, 1969.
- 11) Wörman, A. : Riprap protection without filter layer, *Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.12, pp.1615-1630, 1989.
- 12) Raudkivi : Scouring, A. A. Balkema, pp.91-94, 1991.
- 13) Wörman, A., and Olafsdottir, R. : Erosion in a granular medium interface, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.30, No.5, pp.639-655, 1992.
- 14) 北川信, 今井貫爾, 伊藤進一郎, 土谷政治 : 強潮流下における大規模橋梁基礎の洗掘防止工に関する研究, 土木学会論文集, No.438/II-17, pp.61-70, 1991.
- 15) 中込國喜 : 主塔基礎洗掘防止工, 基礎工, Vol.21, No.5, pp.74-81, 1993.
- 16) 岡田凌太, 今井貫爾, 小池司, 池谷毅, 中込國喜 : 大規模海洋構造物の洗掘特性に関する研究, テクノ・オーシャン'92国際シンポジウム論文集, pp.64-70, 1992.

(1994.11.2 受付)

## DESIGN METHOD OF RIP RAP SCOUR PROTECTION WORKS FOR PIER IN FAST TIDAL CURRENT

Kazuo ISHINO, Hideo OTANI and Hidehiro KATSUI

Riprap scour protection has been commonly used for piers. But the method of the design is rather empirical. In order to establish the practical and reasonable methods of design, the mechanism of the seepage flow in the scour protection should be carefully examined. The seepage flow is measured both in a hydraulic model test and in a field measurement at Akashi Strait Bridge. A design method of grain size of the inner and surface layer rubble mounds, thickness of rubble mound layer and construction area is proposed.