

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*

石野和男**・後藤英一***・中川良隆****・岡田凌太*****

急潮流が作用する明石海峡大橋主塔基礎の捨石洗掘防止工の設計を目的として、捨石洗掘防止工下の基盤に作用する浸透流速を予測するために浸透流模型実験を、基盤の洗掘抵抗性を把握するために現地地質ボーリング資料を用いて洗掘抵抗実験を行った。これらの結果を用いて設計した3P主塔基礎において、捨石洗掘防止工の施工に合わせて、捨石洗掘防止工内の浸透流速等を現地計測した。模型実験および現地計測結果により捨石洗掘防止工の有効性を確認し、主塔基礎回りの水面勾配、捨石の層厚、透水係数と捨石洗掘防止工下の基盤に作用する浸透流速の関係を明らかにした。

Keywords : scour protection work, seepage flow, scour resistance, field measurement, bridge pier.

1. ま え が き

本研究は、水深40~50m、最大潮流速 4.1m/s(8kt)に達する大水深・急潮流下における明石海峡大橋主塔基礎の洗掘防止工の設計に関するものである。主塔基礎の洗掘防止工は、機能性、経済性、潮流作用下での施工性、維持補修の容易さ等の面から捨石洗掘防止工を採用した^{5),6)}。

急潮流下の構造物周辺では、局所的に大きな水面勾配が生じ、この水面勾配に起因し、捨石工内に浸透流が発生する。このため捨石の層厚を大きくとることにより、浸透流速を低減し、かつ捨石の底層部では粒径の細かいフィルター層を設けて底質の吸い出しを防ぐ必要がある。しかし、既往の捨石洗掘防止工の研究としてはBreusersら⁷⁾がまとめた報告があるのみで、これもTerzaghiの逆フィルター概念を用いた研究であり、捨石工内の浸透流速を定量的に評価した研究は見当たらない。

一方、底質の限界掃流力についても、従来の研究は非固結の砂礫を対象としていて、軟岩に関しては砂村ら⁸⁾の海食崖の研究が見当るのみであり、実際の海底に存在する固結砂礫や風化軟岩など比較的洗掘抵抗性が大きいと見られる底質を対象とした研究例は見当たらない。

以上に鑑み、本研究は海洋構造物の実用的な洗掘防止工の設計法を確立するために、明石海峡大橋主塔基礎の内、淡路側の3P主塔基礎を対象構造物として、Fig.1に示すフローにしたがい研究を行った。まず、①捨石

洗掘防止工内の三次元浸透流況に関する模型実験を行い、層厚が浸透流低減に及ぼす効果を把握すると同時に、②3P主塔基礎設置地点における風化軟岩の現地資料を用いた実物の洗掘抵抗特性を把握し、フィルター層設置による洗掘防止効果を検討した。3P主塔基礎の洗掘防止工はこれらの実験結果と、表層の捨石の安定、捨石工外側地盤の洗掘特性に着目した室内移動床実験結果⁶⁾を合わせて設計した。次に③3P主塔基礎の捨石工内外の流れを現地計測し、捨石工による浸透流の低減効果および基盤の安定を確認した。また④3P主塔基礎(以下にケーソンと称する)回りの流れの3次元数値計算を実施し数値計算結果と現地計測結果を比較検討した。

2. 浸透流模型実験

流れ作用下のケーソン回りの捨石工内の3次元的な浸透流況を把握し、捨石工下面の基盤に作用する流速と捨石粒径、層厚および主流の諸元である水面勾配との関係を求める目的で浸透流実験を実施した。なお、本研究が対象とする現地の捨石工内の浸透流は、フィルター粒径 $d=4\text{ cm}$ 、浸透流速 $Up=10\text{ cm/s}$ オーダーとすると、レイノルズ数 $Rep = Up \cdot d / \nu = 4 \times 10^3$ と十分乱流の範囲の流れ⁹⁾(動水勾配Iが浸透流速 Up の2乗に比例する)である。

(1) 実験装置および方法

Fig.2に示すように、幅 0.4m×長さ47mの二次元開水路に透明アクリル製の仮底を設け、その上にケーソンに見立てた直径28cmの半割り円柱を、側壁に接して設置した。仮底の上には、円柱の上・下流 2.5mにわたって碎石を敷き均して捨石洗掘防止工の模型とした。仮底の下には、捨石層底面の流況が観測できるよう鏡を設けてある。浸透流速は染料の動きを高速度VTRで記録し読取った。また、浸透流発生境界条件を把握するため、主流の水面形状・流速分布等も測定した。

* 本論文の内容の一部は既発表^{1),2),3),4)}であるが、本編はその後の研究成果を加えて取りまとめたものである。

** 正会員 大成建設(株)技術研究所 土木構造・水理研究グループ副主任研究員
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

*** 正会員 大成建設(株)技術研究所 副所長

**** 正会員 明石海峡大橋 3P 下部工大成・間・佐藤・東洋・日本国土共同企業体所長

***** 本州四国連絡橋公団垂水工事事務所第三工事長

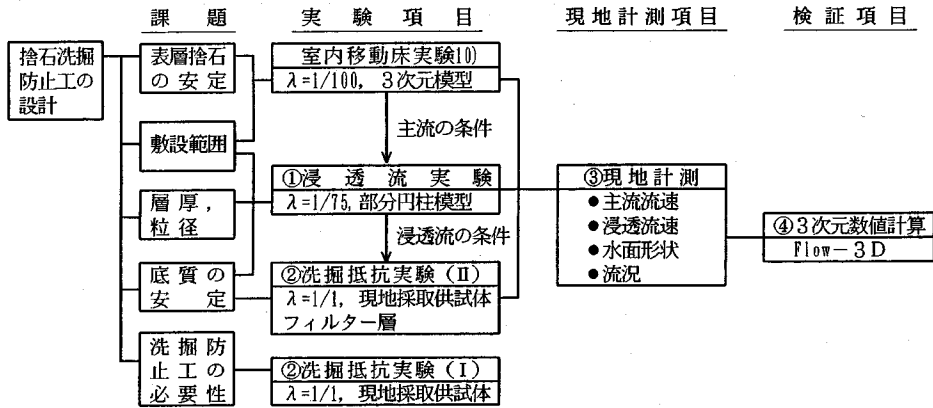


Fig.1 Flow diagram of the study

Table 1 Conditions of seepage flow test

主流			捨石工	
水深 (cm)	平均流速 (cm/s)	最大水面 勾配	粒径 (cm)	層厚(層数) (cm)
49	46	0.1	1.7	6.7 (4) 13.0 (7~8) 26.0 (15~16)

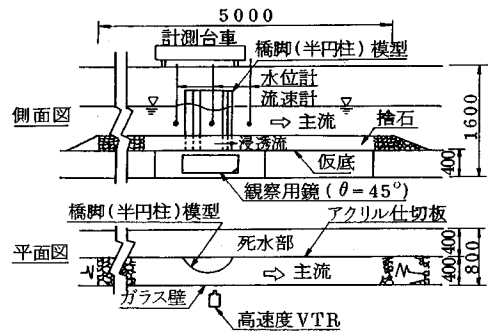


Fig.2 Channel for seepage flow experiment

相似則はフルード則を用い、捨石工内の浸透流を乱流状態 ($Re_p \geq 200$)⁹⁾ とするために、縮尺は $\lambda = 1/75$ とした。実験条件をTable 1に示す。なお、本実験は二次元水槽を使用しているため、円柱は歪模型を用い、半円柱のまわりに $\lambda = 1/100$ の3次元水平床模型実験(室内移動床実験)¹⁰⁾ で求められた最大水面勾配 ($I_{max} = 0.1$) が発生するように流れを調整した。

(2) 実験結果

Fig.3は、円柱周辺の浸透流況を示したものである。図より、円柱の上流側で主流の一部が捨石層内に吸い込まれ、円柱側面付近で湧き出すことが観察される。主流の吸い込みのため、捨石層内の円柱側面付近で流れが集中し、捨石層底面での最大浸透流速は、円柱周辺の水面勾配が最大となる $\theta = 45^\circ$ 付近で発生する。動水勾配が負となる円柱の後流部では浸透流は逆流して円柱の直下流部から湧き出す。湧き出し流速は小さく、また、本実験の条件の下では、流況観察から、円柱の側面より発生するはく離渦は、浸透流に影響を及ぼさないと判断できる。Table 2に、捨石層数、最大水面勾配、捨石層底面の最大浸透流速実験値、および最大水面勾配を浸透流の動水勾配と見なし、この動水勾配と捨石の透水係数の関係(実験に使用した砂利を用いて定水位法により求めた)を用いた計算値(以下浸透流速計算値と略す)の関係を示す。表から捨石層数が4層の場合の底面に作用する浸

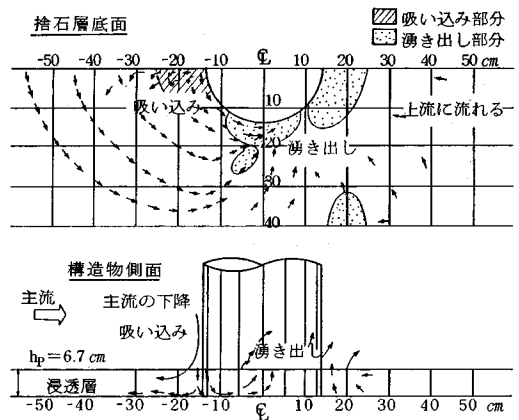


Fig.3 Seepage flow pattern around a pier

透流速は、浸透流速計算値にほぼ等しく、捨石層数7~8層の場合は、層厚が増すことにより圧力分布が緩和され、浸透流速計算値の0.72倍に低減することがわかる。

3. 洗掘抵抗実験(1)

洗掘防止工の必要性およびケーソン設置直後から洗掘防止工が設置されるまでの短期間の基盤の洗掘抵抗性を調べるために実験を行なった。

Table 2 Relationship between seepage flow velocity and depth of rubble stone scour protection work

捨石層数	最大水面勾配 I_{max}	最大浸透流速実測値 U_p (cm/s)	I_{max} と透水係数より求めた浸透流速計算値 U_k (cm/s)	U_p / U_k
4	0.10	6.3	6.1	1.03
7~8	0.11	4.6	6.4	0.72
15~16	0.10	4.0	6.1	0.66

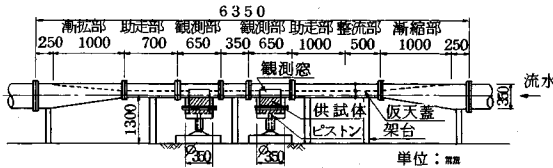


Fig. 4 Test conduit for scour resistance test

(1) 自然条件と海底地質の特性

3P地点は、水深37m、最大潮流速約8ktで、ケーソン設置高さのTP-57m付近から採取した直径8cmのボーリング・コアを試料として採用した。岩質は、採取深度・位置によって性質が異なり、細粒砂岩、粗粒砂岩、泥質砂岩、および泥岩、砂質泥岩で軟岩に属する。砂岩、泥岩含めて一軸圧縮強度は $q_u = 10 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ (1~3 MPa) 程度である。

(2) 実験装置および方法

Fig. 4 に本実験のために製作した試験水槽の概要を示す。試験水槽は幅40cm×高さ20cm×長さ6mの矩形断面鋼製管路で、助走部1.0mの底面はベニヤ板張りとし上述の供試体表面と等価な粗度を取り付けている。底面の2ヵ所に、供試体の表面を流れにさらすための開口部、さらに側面と上面に洗掘状況の観察用ガラス窓を設けてある。開口部には供試体を保持するための内径30cm、高さ40cmの円筒容器（コアホルダー）とピストン・シリンダーが取り付けられ、洗掘の状況に応じて供試体表面が常に水槽底面と一致するように供試体の昇降ができる構造とした。軟岩の供試体は、直径8cmのボーリング・コアを7本束ね、空隙を軟岩と同程度の洗掘抵抗を持つ人工岩で充填して作製した。

実験は、試験水槽に供試体を取り付け、洗掘状況を観察しながら0.1~8m/sの流速で通水して行った。洗掘状況の観察には、高速度VTRを用い、底面剪断力は、マンメータによる管路の動水勾配とピトー管による鉛直流速分布より算出した。**Table 3** に洗掘抵抗実験の実験ケースを掲げる。

a) 底面粗度

底面粗度は、表面の目視状況と手触りが等しくなるよ

Table 3 Experimental case of scour resistance test

コア種類	供試体番号	通水方法	洗掘の測定
軟岩砂岩	B1-1~ -3	1.5~8.0m/sを	観察・表面の凹凸
軟岩泥岩	B2-1~ -3	0.5m/sピッチで上昇	
固結砂礫	B3-1~ -4	0.4~1.7m/sの範囲で一定流速	観察・流砂量・表面粒度分布

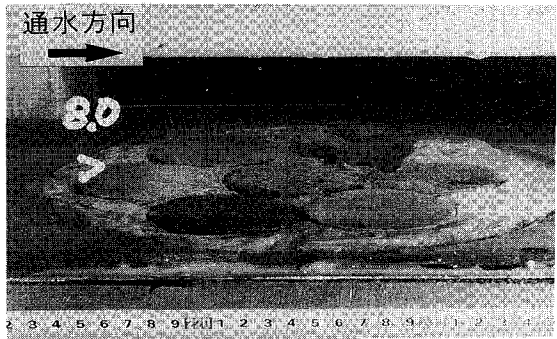


Photo. 1 Surface of sand stone after flow run ($u = 8.0 \text{ m/s}$)

うに、ベニヤ板上に、砂岩では0.29~0.59mmの珪砂を細密に一層張り付け、泥岩ではベニヤの木目が見える程度に薄くペンキ塗装した。

b) 管内流速 u と底面摩擦速度 u_* の関係

流速分布は供試体の30cm上流の人工粗度上で計測し、対数則から底面摩擦速度 u_* を求めた。動水勾配 I から u_* を求める方法では、底面粗度と側壁、上面の粗度が異なることを考慮して、Einsteinの径深補正を行った。計測の結果、流速分布を用いて求めた u_* と動水勾配 I を用いて求めた u_* はほぼ一致し、全データから求めた u_* と管内の平均流速 u との比は次のようであった。

砂岩; $u_* / u = 0.055$

泥岩; $u_* / u = 0.044$

(3) 実験結果

a) 洗掘過程

Photo. 1 は、 $u = 8.0 \text{ m/s}$ で通水後の砂岩の洗掘状況を示す。通水前、滑らかに整形された砂岩の表面は、流れによって全面的に粗くなり、写真の一番奥の下流側では、表面が深く洗掘された様子が分かる。砂岩と泥岩の洗掘過程には明確な違いがある。砂岩の場合、通水開始後、徐々に流速を上げて行く過程で、低流速下では、ごく表面の構成粒子の間隙を埋める膠着物が流失し、表面が粗くなる。次に、流速を上げると、露出した構成粒子またはその小塊が供試体表面から飛び出して行く。流速の上昇に伴って、飛び出しは頻繁になり、表面の洗掘範囲が拡大する。更に高流速では、既に存在していた亀裂

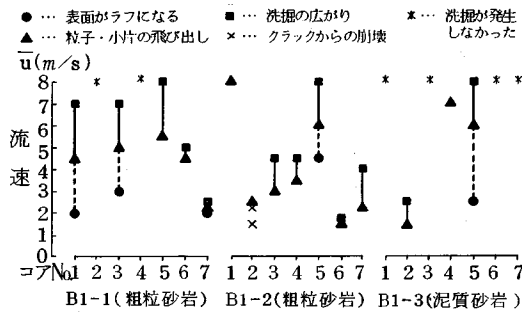


Fig.5 Scouring process of sand stone

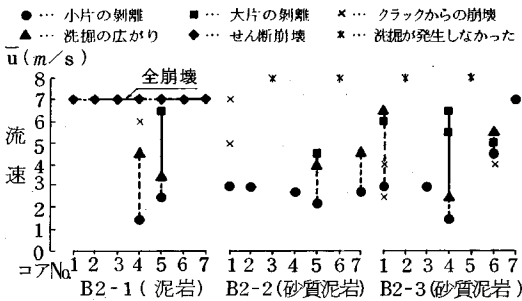


Fig.6 Scouring process of mud stone

Table 4 Critical velocity of soft rock (u = 1.5 to 8.0 m/s)

洗掘特性	砂岩			泥岩		
	洗掘発生率	移動限界流速 (m/s)	σ	洗掘発生率	移動限界流速 (m/s)	σ
掘	粗粒砂岩 100%	$u_c = 3.8$	$\sigma = 3.8$	砂質砂岩 36%	$u_c = 4.6$	$\sigma = 1.5$
特	細粒砂岩 71%	$u_c = 4.4$	$\sigma = 1.2$	泥岩 100%	$u_c = 6.1$	$\sigma = 1.5$
性	泥質砂岩 43%	$u_c = 3.8$	$\sigma = 2.9$			
洗掘過程	洗掘が低流速から発生し、洗掘過程が段階的である。					
	低流速では、洗掘は進行しないが、高流速で一気に崩壊するパターンが多い。					

部分が剥離崩壊する。泥岩の場合、供試体表面は比較的滑らかで、低流速では砂岩の場合より洗掘抵抗は強い。初期の洗掘は小片の剥離から始まり、流速の上昇に伴い小片の剥離が頻繁になり、その上の段階では、供試体表面の数十%に及ぶ大きい面積の薄片が剥離する。崩壊時は、供試体表面下数cmが一挙に剪断破壊することもある。

b) 軟岩の移動限界流速

Fig.5, Fig.6は、軟岩の洗掘過程を定量的に示したもので、縦軸に管内平均流速 u 、横軸には実験に用いた各コア（7本ずつを一纏めにして実験した）の番号を示す。図より、同じ軟岩でも、洗掘状況のばらつきは大きい。泥岩の方が砂岩よりわずかに洗掘抵抗が大きい。Table 4は、Fig.5, Fig.6のデータから、洗掘発生率、移動限界流速をまとめたもので、表中、洗掘発生率は最

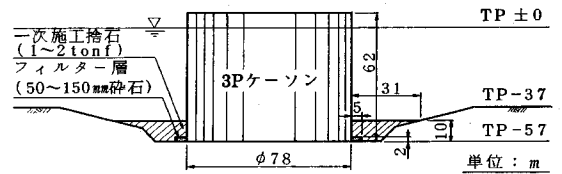


Fig.7 3P pier and rubble stone scour protection works

大流速 8.0 m/s までの段階で、砂岩については、表面粒子・小片の飛び出し、泥岩については洗掘の広がりが生じたコア数を全体の個数 7 本で割った値、 u_c 、 σ は洗掘が発生した時の流速の平均値と標準偏差値である。同表より、限界掃流力は砂岩 $u_c = 4.0 \sim 4.5$ m/s ($u_{*c} = 0.24$ m/s)、泥岩 $u_c = 4.5 \sim 6$ m/s ($u_{*c} = 0.24$ m/s) となり、両者はほぼ同等である。しかし洗掘過程の観察から判断すると泥岩のほうが抵抗はやや大きい。

4. 洗掘抵抗実験 (II)

現地採取した供試体の上に碎石で構成されるフィルター層を設置し、浸透流実験結果から予測された最大の流れすなわち動水勾配 $I = 0.1$ の流れをフィルター層内に発生させフィルター層による洗掘防止の確認実験を行った。

(1) 碎石フィルター粒径：碎石フィルターの粒径は、固結砂礫の粒度分布と、TerzaghiやGraauwらの経験公式¹¹⁾から求めた値に、施工性を加味して 40~80mm とした。

(2) 実験方法：試験水槽底部に供試体を取り付け、さらに、水槽断面を碎石フィルターで充填して、動水勾配 $I = 0.1$ の条件で通水した。フィルター層の空隙率は $\lambda = 47\%$ 、この条件での浸透流速 U_p は断面平均で 8.8 cm/s、空隙内の真の流速は 18.7 cm/s である。通水時間は、長期安定性を確認するため、12日間とした。供試体の洗掘状況は、ファイバースコープによる表面の観察、濁度計による通過粒子のサンプル個数、通水前後の表面の凹凸の変化などから判断した。

(3) 実験結果

フィルター層内の最大流速はたかだか 19 cm/s 程度であり、洗掘現象も、表面の緩んだ粒子の流送のみに限られ、砂岩の有為な洗掘は認められずフィルター層の効果が確認された。

5. 3Pケーソン回りの洗掘防止工の設計

Fig.7に示すように 3Pは、直径78m、全高62mの鋼製ケーソンを用いた主塔基礎であり、水深37mの海底面を20mの深さで事前掘削した水深57mの海底面上に設置した。また、設計流速は 4.1 m/s (8 kt) で、基盤は 3.

Table 5 Design concept of rubble stone scour protection works for 3P pier

項目	実験条件	実験結果	設計方針
洗掘防止工は必要か？	<ul style="list-style-type: none"> ●設計入射流速 $u_0 = 4.1 \text{ m/s}$ (8kt) ●ケーソンによる増速率 $\alpha_1 = 1.7$ ●掘削孔による減速率 $\alpha_2 = 1.0$ ●流砂礫による岩の摩耗⁵⁾ 	●神戸層の限界流速 $4 \sim 4.5 \text{ m/s}$	ケーソン回りの最大流速 ($u_0 \times \alpha_1 \times \alpha_2$) 7.0 m/s > 神戸層の限界流速 4 m/s : 不安定 ●長期間神戸層に流れを作用させると流砂礫による岩の摩耗も加わり洗掘の進行が予想される ↓ 洗掘防止工必要 洗掘防止工 { フィルター層: ケーソンの洗掘防護 捨石: フィルター層の押え石 (1~2ton) }
フィルター層は効果的か？	●設計入射流速時のケーソン回りの最大水面勾配 $I = 0.1$	●フィルター層設置により基盤面の最大浸透流速 18.7 cm/s	●フィルター層下の最大浸透流速 18.7 cm/s << 神戸層の限界流速 4 m/s : 安定

に示したように神戸層と呼ばれる砂岩、泥岩である。

2. および 3. 4. の実験結果と現地条件を対比して決定した洗掘防止工の設計方針を、Table 5 に示す。Table 5 から、洗掘防止工の必要性が示され、洗掘防止工（フィルター層および捨石工）の設置により基盤（神戸層）の安定が確保された。この設計方針と、室内移動床実験結果および施工性を考慮して、以下に示す一次施工としての洗掘防止工を設計した（Fig.7 参照）。洗掘防止工はまず 50~150mm の碎石を網袋の中に入れて 1 袋の重量を約 1 tonf としたフィルターユニットと呼ぶ網袋式洗掘防止工を掘削海底面から 2m の厚さで、ケーソンの外側に 5m の幅で設置し、フィルター層を形成する。次に 1~2 tonf の捨石をフィルター層の上厚さ 8 m で掘削孔を約半分埋戻す形状に設置する。

6. 浸透流の現地計測

3Pケーソンの捨石工の施工に合わせて、捨石工内の浸透流速を計測し、この値から捨石工下の基盤の安定を確認するために現地計測を行った。また計測結果と浸透流実験結果の比較および計測結果を検証するために実施した 3 次元数値計算結果との比較を行った。

(1) 現地計測項目および方法

ケーソン周辺の洗掘現象を支配する要因の中で、①ケーソン回りの主流の加速、減速、②ケーソン側壁の水面勾配、③洗掘防止工による流速の低減効果、④水面勾配と洗掘防止工内の浸透流速の関係に着目して、Fig.8 に示す西流時の入射潮流速、主流の水面下 5m の表層流速、捨石上面 1.5m の底層流速、捨石工内の浸透流速、ケーソン側壁の水面形状を計測した。

a) 入射潮流速

入射潮流速は、ケーソンの影響のないケーソンから東に 500m 離れた水面下 5m の位置に、自記記録式のプロ

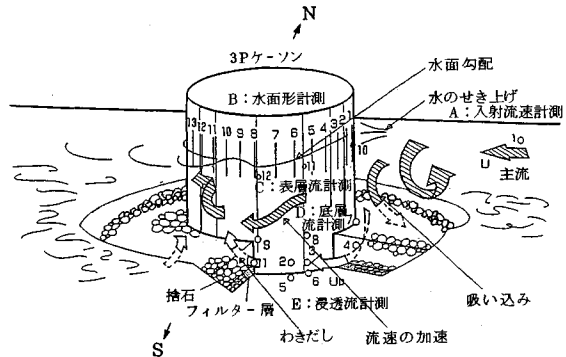


Fig.8 General view of site measurement

ペラ流速計 MTC-II 型を取り付けて計測した。入射潮流速のデータは、計測時間を 1 分、計測間隔を 2 分とし、7 日間連続して取得した。

b) ケーソン側壁の水面形状

ケーソン側壁の水面形状は、ケーソン南側半周の 13 点の計測点において、ケーソン天端から水面下 3 m の間に $\phi 100 \text{ mm}$ の鉛直保護管を取付け、鉛直保護管の中の水面変動を容量式波高計を用いて計測した。水面形状のデータは、サンプリング間隔を 0.25s とし、ケーソン上の計測室内のデジタルデータレコーダーに連続記録した。

c) 表層流速

表層流速は、潮流の入射方向に対して、 $\theta = 0^\circ$ (よどみ点)、 45° 、 90° 付近のケーソン側壁から水平方向に 5m、水面下 5m の地点に、プロペラ流速計 MTC-II 型を取り付けて計測した。表層流速のデータは計測時間を 1 分、計測間隔を 2 分とし 7 日間連続取得した。

d) 底層流速

底層流速は、潮流の入射方向に対して、 $\theta = 0^\circ$ 、 45° 、 60° 、 90° 付近のケーソン側壁から水平方向に 5m、捨石表面から 1.5m 上の位置に、メモリー式の 3 成

分電磁流速計 ACM-16M を設置し計測した。底層流速のデータは、サンプリング間隔を 0.5 s とし、15 時間連続計測した。

e) 浸透流速

浸透流速は、潮流の入射方向に対して、 $\theta = 0^\circ$ のフィルター層上面、 $\theta = 40^\circ$ のフィルター層下面および上面、 $\theta = 50^\circ$ のフィルター層下面および上面、 $\theta = 90^\circ$ のフィルター層上面の位置に計 6 台の 3 成分電磁流速計 ACM-300S を設置し計測した。電磁流速計の上には、フィルター層および捨石が載荷されるため、電磁流速計のセンサーは、Photo.2 に示す様にチャンネルとエキスパンドメタルから構成されるカゴで保護した。また電磁流速計の計測信号は、一重鎧装ケーブルによりケーソン上の計測室へ導いた。なお、捨石内では、ケーブルを鋼管により保護した。浸透流速のデータは、サンプリング間隔を 0.25s とし、ケーソン上の計測室内のデジタルデータレコーダーに連続記録した。Fig.9 にデータ取得システム図を示す。

(2) 3次元数値計算方法

3P ケーソン回りの流況を数値計算により検討した。用いたプログラムは Flow Science 社¹²⁾ の三次元汎用流体解析プログラム Flow-3D で自由水面を有する流れを計算することができる。この数値計算結果と 3P ケーソン回りの現地流況とを比較検討した。

a) 計算条件

計算範囲は、ケーソン中心から、上流側に 250 m、下流側に 550 m、南北方向に 250 m づつとした。またケーソン周りには、Fig.7 の捨石工上面を底面と仮定した深さが 10m の掘削孔を考慮し、掘削孔の外側は 37m の一様水深とした。なお、流れは捨石上の主流のみを対象とし、浸透流は取扱わない。メッシュ分割は X 方向（主流方向）に 69セル、Y 方向（南北方向）に 56セル、そして Z 方向（水深方向）に 19セル分割とし、合計セル数 $N = 69 \times 56 \times 19 = 73416$ である。

ケーソン近傍の流況の計算精度を高めるために、ケーソン周りのメッシュ分割を細かくした。最小セルは $\delta_x = 6m$ 、 $\delta_y = 6m$ 、 $\delta_z = 1.8m$ である。

境界条件は、上流側で流速指定、南北面は Free-Slip 壁、下流側で静水圧指定とし、底面およびケーソン側壁は No-Slip 壁とした。また差分スキームは 3 次精度の風上差分を用いた。

初期流速は 0 とし 500s で上流側の流速を 3 m/sec にするように設定し、800s まで計算した。

(3) 現地計測結果および考察

a) ケーソン側壁の水面形状の計測値と水平床模型実験値および 3次元数値計算値の比較

Fig.10 に、水面形状の一例を示す。図には各計測点において、波高計により計測した 10 分間の水面変動の平

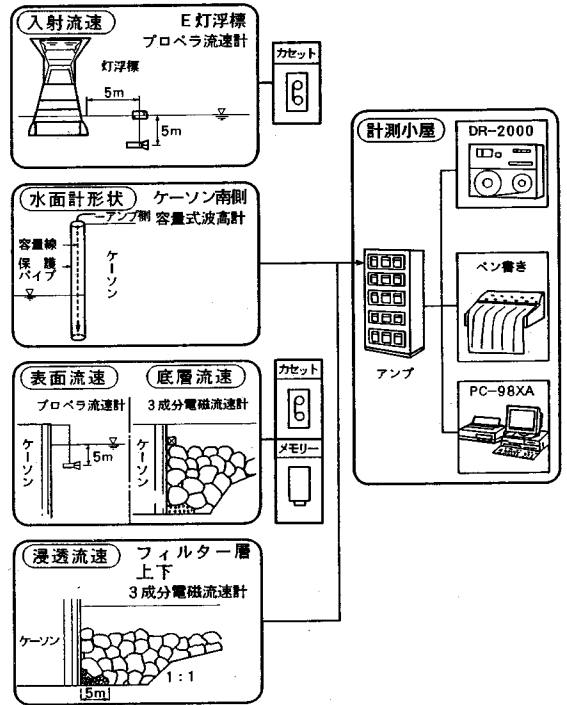


Fig.9 Site data acquisition system



Photo.2 In-site seepage flow meter

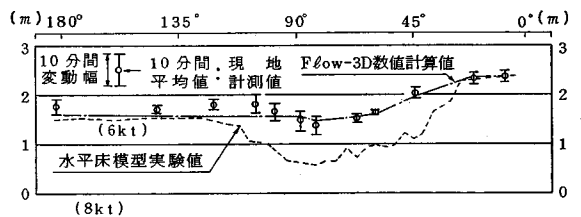


Fig.10 Water surface profile around a pier

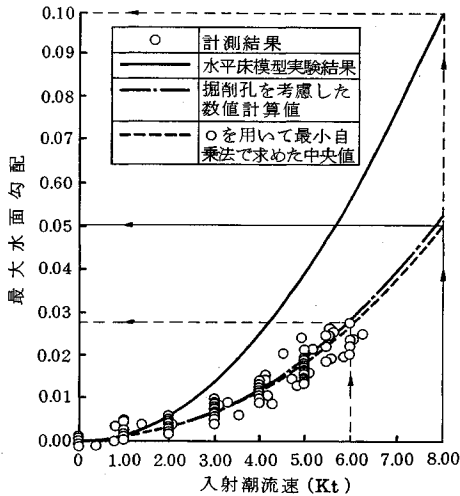


Fig.11 Relationship of maximum water surface versus incident current velocity

均値および変動幅を記号のΦで、掘削孔を考慮した3次元数値計算値を一点鎖線で、また縮尺1/100、水深37mの水平床上で潮流速8ktの条件での水平床模型実験結果(室内移動床実験)¹⁰⁾を破線で示した。Fig.10から現地の水面形状は、水平床模型実験値で予想された傾向を示すことがわかる。すなわち水面はθ=0°で最高水位を示し、θ=20°~80°で最大水面勾配が発生する。θ=80°付近から水位は上昇しθ=110°付近から180°にかけてほぼ水平になる。また掘削孔を考慮した数値計算により現地の水面形状をほぼシミュレーションできることが示された。

Fig. 11に、入射潮流速と最大水面勾配の関係を示す。図中の実線は最大水面勾配が入射潮流速の2乗に比例すると仮定し、Fig.10に示した水平床模型実験結果から導いた値である。一点鎖線は掘削孔を考慮した数値計算値から導いた値である。また記号の○は計測値で、破線は計測値を最小自乗法で処理した中央値である。図からケーソン側壁の最大水面勾配現地計測値は、掘削孔の影響を受け水平床模型実験結果より小さく、入射潮流速6kt時には0.028(最小自乗法中央値)となることが判った。

b) ケーソン側壁回りの表層流速の計測値と3次元数値計算値の比較

Fig. 12に、ケーソン側壁回りの表層(水面下5m)流速分布を示す。図中の表層流速の \bar{U}_{max} および入射潮流速の \bar{U}_{0max} は、プロペラ流速計に記録されたデータを時間長10分の幅で移動平均した結果の、西流時の最大値を示している。Fig. 13は、掘削孔を考慮した数値計算結果の中で、平均水面より5m下の表層の平面流速分布を示す。表層流速の現地データはケーソン側壁から5m

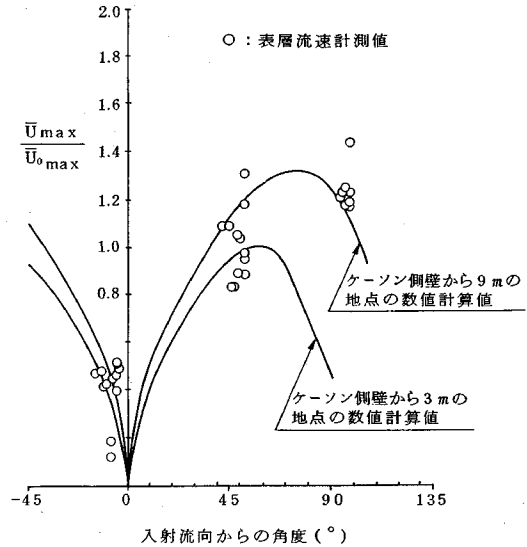


Fig.12 Current velocity around a pier (on the water surface)

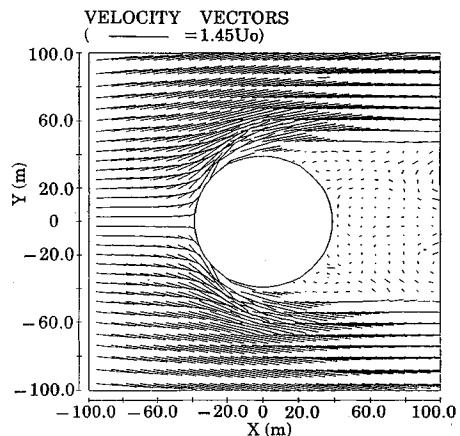


Fig.13 Current velocity by numerical calculation (on the water surface)

離れた位置で計測されたので、この現地の状況を考慮して、Fig. 12の実線はFig. 13のケーソン側壁から水平方向に3m~9m離れた地点の表層流速計算値を示す。Fig. 12から現地の表層流速も、掘削孔を考慮した数値計算によりほぼシミュレーションできることが示された。

c) ケーソン側壁回りの底層流速の計測値と3次元数値計算値の比較

Fig. 14にケーソン側壁回りの底層流速分布を示す。図の底層流速の \bar{U}_{max} は、電磁流速計に記録された3成分データをベクトル合成し、さらに合成したデータを時間長10分の幅で平均した結果の西流時の最大値を示して

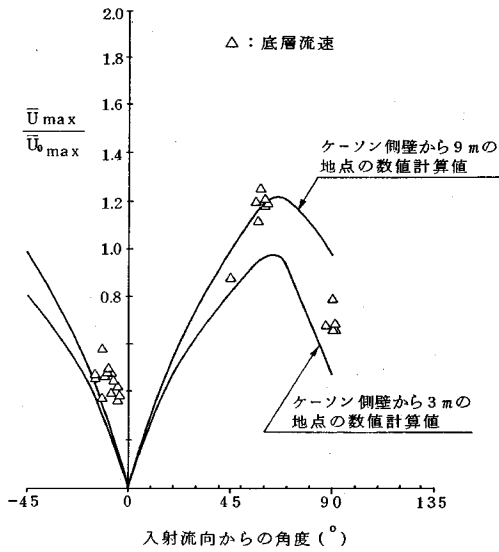


Fig.14 Current velocity around a pier (above the bottom)

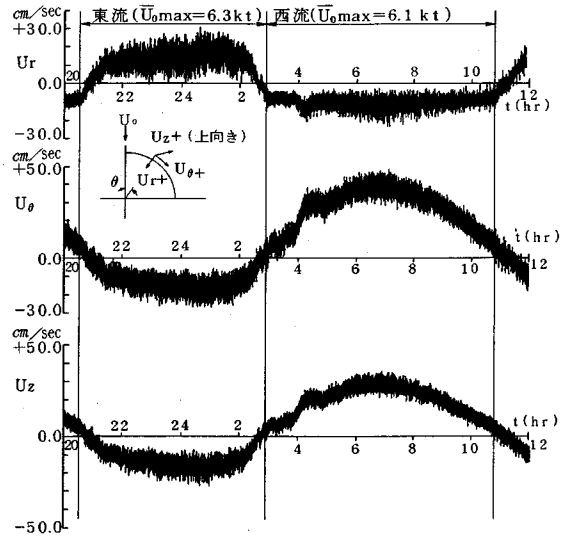


Fig.16 Time history of seepage flow velocity under rubble stone scour protection at $\theta = 40^\circ$

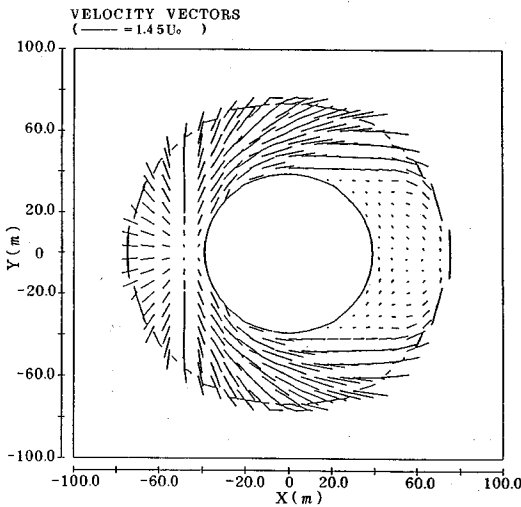


Fig.15 Current velocity by numerical calculation (above the bottom)

いる。また、Fig. 15 に掘削孔を考慮した数値計算結果の中で、掘削孔底面より 1.5m上の底層の平面流速分布を示す。底層流速計もケーソン側壁から5m離れた位置にあるので、Fig. 12と同様にケーソン外壁から水平方向に3m~9m離れた地点の底層の流速計算値をFig. 14に実線で示す。Fig. 14, Fig. 15 から捨石工の表面には入射流速の1.2倍(計測値)~1.45倍(数値計算最大値)程度の流速が作用していることが示された。また、Fig. 14 から現地底層流速は、掘削孔を考慮した数値計算によりほぼシミュレーションできることが示された。

d) 洗掘防止工内の浸透流特性

浸透流模型実験では、海底面における浸透流速の最大値は、ケーソン側壁の水面勾配が最大となる $\theta = 45^\circ$ 付近で発生することを示した。Fig. 16 に捨石工施工後掘削海底面の $\theta = 40^\circ$ の浸透流速(電磁流速計No.5)の計測データを示す。図の縦軸は実流速、横軸は時刻である。また電磁流速計の位置が後流域となる東流の入射潮流速最大値は 6.3kt、加速域となる西流の入射潮流速最大値は 6.1ktである。図から、電磁流速計 No.5 の位置が後流域となる東流時の U_θ の最大値は、 $\bar{U}_{\theta max} = -15\text{cm/s}$ となるのに対し、主流の加速域となる西流時の U_θ の最大値は $\bar{U}_{\theta max} = 40\text{cm/s}$ となっており、主流の加速域の下で大きな浸透流速が発生することが示されている。西流時の U_r の最大値は $\bar{U}_{r max} = -11\text{cm/s}$ で流向はケーソンから離れる方向へ、東流時の U_r の最大値は、 $\bar{U}_{r max} = 15\text{cm/s}$ で、流向はケーソンへ向う方向である。西流時の U_z の最大値は $\bar{U}_{z max} = 28\text{cm/s}$ で流向は上向きで、東流時の U_z の最大値は、 $\bar{U}_{z max} = -17\text{cm/s}$ で流向は下向きである。ここで、 U_θ 、 U_r 、 U_z の流速変動の中で 1Hzの変動はノイズであるが、1Hz以下の低周波の変動は、大規模渦等による水面変動に起因している⁴⁾。なお、Fig. 17 に示す様に、フィルター層の上に設置した電磁流速計のうち、No.1 ($\theta = 90^\circ$ に設置)、No.4 ($\theta = 0^\circ$ に設置)には、砂の堆積傾向が見られた。この現象は、明石海峡において模擬ケーソンを用いて行なわれた現地観測¹³⁾で観察された砂の堆積状況と一致した。

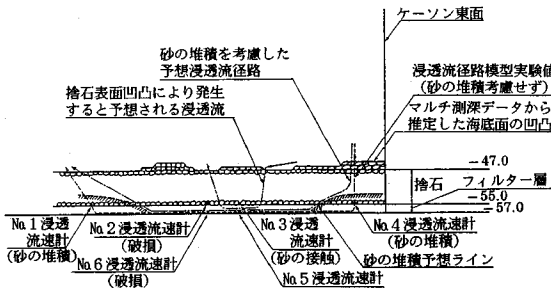


Fig.17 Sketch of rubble stone scour protection and operation history of seepage flow meters

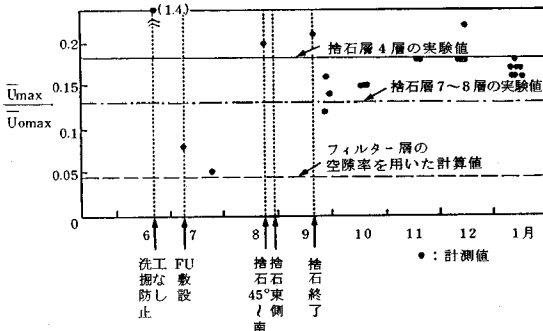


Fig.18 Comparison between site data and experiment data for seepage flow velocity

e) 洗掘防止工内浸透流速の計測値と実験値との比較

Fig. 18 に掘削海底面の $\theta = 40^\circ$ の浸透流速 (電磁流速計 No.5) の計測値と実験値の比較を示す。図の \bar{U}_{max} および \bar{U}_{0max} は、Fig. 12 の説明と同じ方法により求めた。また、計算値は、フィルター層および捨石の空隙率、粒径と Fig. 11 に示した最大水面勾配を動水勾配と見なし、Ward¹⁴⁾ の透水係数式に代入して求めた。Fig. 18 から以下の事項が判明した。電磁流速計 No.5 の上に約 2 m の厚さのフィルター層のみを設置した 7 月の計測値から、 $\theta = 40^\circ$ 付近のフィルター層下の掘削海底面に作用する浸透流速は、入射潮流速の 0.05~0.08 倍に低減した。この計測値は、フィルター層の粒径、空隙率を用いて求めた計算値にほぼ等しいか、やや大き目の値となった。この要因としては、計測値は 3 次元流速の合成値であるのに対し、浸透流模型実験で測定した浸透流速は、底層に平行に作用する 2 次元流速であること、さらに電磁流速計周囲の空隙が保護カゴの存在でフィルター層の一般部より大きくなっていることが考えられる。捨石が施工されると、浸透流速はフィルター層設置時に比べ速くなり、入射潮流速の 0.12~0.21 倍となった。この現象は、電磁流速計 No.5 は、フィルター層設置直後はフィルター層によって囲まれていたのに対し、捨石を施工す

ることによりフィルター層が捨石に置き換わり、捨石によって囲まれたことが原因と考えられる。重量 1~2 tonf、層厚 10m の捨石施工後の浸透流速計測値は、浸透流模型型実験結果に、捨石粒径 1.5m、空隙率 50%、捨石層厚 6m (4 層) を用いた値 (Fig. 18 の実線)、捨石層厚 11m (7~8 層) の条件を用いた値 (Fig. 18 の一点鎖線) の間に分布することがわかった。捨石施工後の浸透流の計測値が捨石層厚 11m の実験値に比べ大きくなった原因としては、Fig. 17 に示した様に、捨石施工面の凹凸による浸透流¹⁵⁾ が発生したこと、 $\theta = 0^\circ$ 、 90° 付近に砂が堆積し浸透流経路が短くなったこと、等が推測された。

7. 現地計測結果を用いた設計潮流時の 3P 捨石洗掘防止工の定量的評価

(1) 捨石洗掘防止工の現状の意義について

Fig. 18 から洗掘防止工なしの 6 月の基盤に作用する流速は入射潮流速の 1.4 倍程度であることが判る。このことより設計流速 4.1m/s 時に、洗掘防止工がない場合には、基盤面 (神戸層) に 5.7m/s 程度の流速が作用することが予想される。この値は神戸層の移動限界流速 4 m/s より大きく、現地計測結果から、洗掘防止工の意義があらためて確認された。なお、これらの値から推定すると、Table 5 内の掘削孔による減速率 α_2 は $\alpha_2 = 1.4/\alpha_1 = 1.4/1.7 = 0.82$ 程度となる。

(2) 捨石洗掘防止工下の基盤の安定について

模型実験では捨石工下の基盤面に作用する浸透流速が最大となる位置は $\theta = 45^\circ$ 付近であった。それと近傍の $\theta = 40^\circ$ に設置した浸透流速計の計測値は、フィルター層のみ施工した段階で、入射潮流速の 0.05~0.08 倍、捨石施工後の捨石工下で 0.12~0.21 倍となった。したがって設計潮流時の基盤に作用する浸透流速は、 $0.21 \times 4.1 = 0.86$ m/s と予測される。この値は神戸層の移動限界流速 (Table 4) より小さく、8kt に及ぶ設計潮流作用時にも捨石洗掘防止工により基盤の安定が保たれることを確認した。

8. まとめ

急潮流が作用する明石海峡大橋主塔基礎の捨石洗掘防止工の設計データを求めることを目的に、捨石洗掘防止工内の浸透流況を把握し、捨石工下の基盤に作用する浸透流速を予測する実験、基盤 (神戸層) の洗掘抵抗特性を実測する実験を行なった。その結果に施工性を考慮して設計した 3P 主塔基礎捨石洗掘防止工の施工に合わせて、捨石工内の浸透流速を現地計測し基盤の安定を確認するとともに、3 次元数値計算を実施した。これらの実験、現地計測、数値計算により以下の結論を得た。

~捨石洗掘防止工内の浸透流について~

- ① ケーソン周辺の捨石工内の浸透流は三次元的であり、円柱の上流側で主流の一部が捨石工内に吸い込まれ、円柱側面付近で湧き出す。
- ② 捨石工底面での基盤に作用する最大浸透流速はケーソン回りの水面勾配が最大となる $\theta = 45^\circ$ 付近で発生する。
- ③ 粒径50mm～150mmの砕石を袋詰にしたフィルターユニットを2mの厚さで積み上げたフィルター層下の掘削海底面に作用する浸透流速の計測値は、ケーソン側壁の最大水面勾配を浸透流の動水勾配とみなし、この動水勾配と砕石の透水係数を用いて求めた計算値にほぼ等しいか、やや大き目の値となった。
- ④ 重量1～2 tonf、層厚10mの捨石工下の基面に作用する浸透流速実測値は、浸透流模型実験（捨石粒径1.5 m、空隙率50%、捨石層厚5 m（4層）及び、捨石層厚11m（7～8層））の条件を用いた値の間に分布した。捨石施工後の浸透流計測値が捨石層厚11mの実験値に比べ大きくなった原因としては、捨石施工面の凹凸、砂の堆積等が考えられる。
～基盤の洗掘抵抗特性について～
- ⑤ 3P ケーソンの基盤である神戸層の移動限界流速は $U_c = 4 \sim 6 \text{ m/s}$ ($U_{*c} = 0.24 \text{ m/s}$) である。
～捨石洗掘防止工の定量的評価について～
- ⑥ 現地計測結果から、設計流速 4.1m/s 時洗掘防止工なしの基盤に作用する流速は 5.7m/s と予想される。この値は神戸層の移動限界流速 4 m/s より大きく洗掘防止工の意義を確認した。
- ⑦ 現地計測結果から、設計流速時の捨石工下の基盤に作用する浸透流速は 0.86m/s と予想される。この値は神戸層の移動限界流速より小さく、捨石洗掘防止工により基盤の安定が保たれることを確認した。
～3P ケーソンの捨石工上の主流況について～
- ⑧ 掘削孔内に設置された3P ケーソン回りの捨石工上の主流の流れは、Flow-3Dを用いた3次元数値計算で精度よくシミュレーションできることが判った。

参考文献

- 1) 高沢 勤, 鈴木幹啓, 中川良隆, 勝井秀博: 橋脚の洗掘防止工内の浸透流況, 土木学会第43回年次学術講演会講演集 P S II - 12 pp.24~25, 1988.10.
- 2) 高沢 勤, 鈴木幹啓, 八重田義博, 勝井秀博: 急潮流下における海洋構造物の洗掘防止工の設計, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.412~416 1988.
- 3) 平野 茂, 坂巻明人, 石野和男, 遠藤伸治, 牧田鈴子: 急潮流下海洋構造物の洗掘防止工内の浸透流に関する現地計測, 海岸工学論文集第37巻 pp.494~498 1990.
- 4) 石野和男, 大谷英夫, 坂巻明人, 遠藤伸治, 那須清吾: 急潮流下海洋構造物周辺の洗掘防止工内の浸透流特性, 海岸工学論文集第38巻 pp.191~195 1991.
- 5) 加島 聡・今井貫爾・高澤 勤・樋口康三: 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.
- 6) 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.
- 7) Breusers, H.N.C. et al.: Local scour around cylindrical piers, J. of Hydraulic Research, Vol.15, No.3, pp.211~252, IAHR, 1977.
- 8) 砂村継夫・松倉公憲・辻本英和: 水中における岩石のせん断摩擦に関する室内実験, 地形第6巻, 第1号, pp.65~68, 1985.
- 9) 山田正・中沢均・吉川秀夫: 浸透流に関する水理学的研究 (I), 東工大土木工学科研究報告, No.25, pp.25 ~ 38, 1979
- 10) 本州四国連絡橋公団第一建設局垂水工事事務所: 明石海峡大橋主塔基礎施工調査報告書(3/4), pp.11-A2.2~11-A2-6, 1988.
- 11) K. W. Pilarczyk : The Closure of Tidal Basins, Delft University Press, pp.467~489, 1984.
- 12) Flow Science: Flow-3D Computational Modeling Power for Scientists and Engineers, 1986.
- 13) 本州四国連絡橋公団第一建設局垂水工事事務所: 明石海峡大橋主塔基礎施工調査報告書(1/4), pp.4-423, 1988.
- 14) Ward, J.C., "Turbulent Flow in Porous Media," Journal of the Hydraulic Division ASCE, Vol.90 HY5, Proc. Paper 4019, Sept., 1964, pp.1-12
- 15) 勝井秀博: 海洋構造物周辺の洗掘と洗掘防止工に関する研究, 東京大学博士論文, pp.358~375 1991.

(1992.4.10 受付)

STUDY OF RUBBLE STONE SCOUR PROTECTION WORKS FOR PIER IN FAST CURRENT

Kazuo ISHINO, Eiichi GOTO, Yoshitaka NAKAGAWA and Ryota OKADA

Rubble stone scour protection works for the Ahashi Kaikyo Bridge pier under fast tidal currents are studied with a seepage model experiment and an experiment of the scour resistance of seabed materials. Flow in and on a rubble mound and water surface profile around the Akashi Kaikyo bridge pier are also measured. The rubble stone scour protection work is proved to be effective to reduce the seepage flow.