

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

平野 茂*・坂巻 明人**・石野 和男**
遠藤 伸治***・牧田 鈴子**

1. はじめに

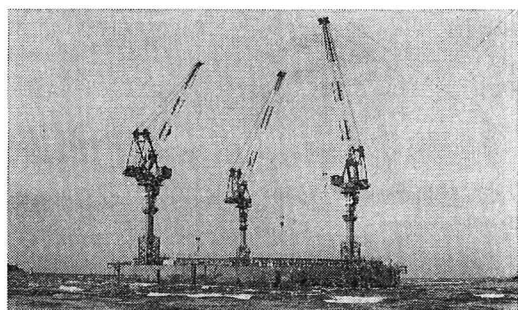
海洋構造物の洗掘防止工としては、施工性、経済性、耐久性の面などから、捨石によるものが最も多く用いられている。捨石洗掘防止工に関する研究のほとんどは、被覆石の安定を検討したものであり、捨石洗掘防止工内の浸透流を検討した研究としては、高沢ら(1988)の模型実験による検討が唯一あげられるのみで、現地計測に基づく検討は見当たらない。したがって、捨石洗掘防止工の有効性を確認し、今後の施工に必要な設計資料を得るためには、施工された捨石工内に発生する浸透流を現地計測し検討することが不可欠である。

本研究では、捨石洗掘防止工を採用した明石海峡大橋の2基の主塔基礎のうち、淡路島側の3P主塔基礎について、洗掘防止工の施工に合わせて捨石工内の浸透流速を3成分電磁流速計により計測した。さらに、浸透流速の低減効果を調べるために、入射潮流速、水面下5mの表層流速、捨石上面1.5mの底層流速を、また浸透流速を予測する上で必要なケーソン側壁の水面形状を同時に計測した。これらの現地計測結果と高沢らの模型実験結果を比較し、捨石工内の浸透流特性を検討した。

2. 明石海峡大橋 3P ケーソンおよびその洗掘防止工

明石海峡大橋は、神戸市垂水区と淡路島を結ぶ中央径間 1990 m、全長 3910 m の吊橋である。3P は、直径 78 m、全高 62 m の鋼製ケーソンを用いた主塔基礎であり、水深 37 m の海底面に 20 m の深さで事前掘削した水深 57 m の海底面上に設置されている。明石海峡では、最大 8 kt に達する潮流が発生するため、主塔基礎の周囲の海底面には洗掘防止工を設置する必要があった。洗掘防止工は、50 mm~150 mm の砕石を網袋の中に入れて一袋の重量を約 1 ton としたフィルターユニット（以下 FU と略す）と呼ぶ網袋式洗掘防止工と、1 ton~2 ton の捨石洗掘防止工で構成している。FU は、掘削海底面

から 2 m の厚さで、ケーソンの外周に 5 m の幅で設置し、捨石は FU の上、厚さ約 8 m とし、掘削孔を約半分程度埋戻す形状に施工した。



写真—1 明石海峡大橋 3P ケーソン

3. 計測項目および計測方法

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關係に着目して、図—1 に示す西流時の入射潮流速、主流の水面下 5 m の表層流速、捨石上面 1.5 m 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。

(1) 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 500 m 離れた水面下 5 m の位置に、自記記録式のプロベラ流速計 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、連続 7 日間連続して取得した。

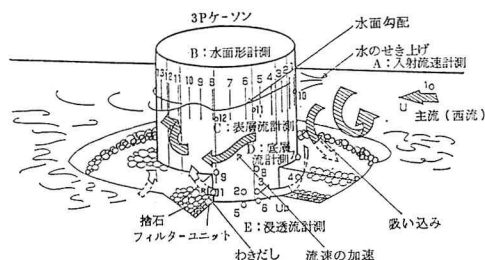
(2) ケーソン側壁の水面形状

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 $\phi 100$ 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 0.25 sec 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。

* 正会員 工修 本州四国連絡橋公団垂水工事事務所第二工事長

** 正会員 工修 明石海峡大橋 3P 下部工工事共同企業体

*** 正会員 明石海峡大橋 3P 下部工工事共同企業体



図—1 計測概念図

(3) 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° 付近の水面下 5 m の地点に、プロベラ流速計 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。

(4) 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° 付近の捨石上 1.5 m 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 sec とし、15 時間連続計測した。

(5) 浸透流速

浸透流速は、潮流の入射方向に対して、 $\theta=0^\circ$ の FU 上面、 $\theta=40^\circ$ の FU 下面および上面、 $\theta=50^\circ$ の FU 下面および上面、 $\theta=90^\circ$ の FU 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、FU および捨石が載荷されるため、電磁流速計のセンサーは、写真—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、一重鋁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 0.25 sec 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。

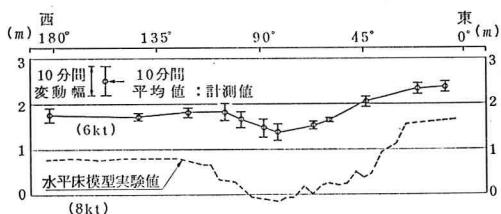


写真—2 浸透流速計測器

4. 計測結果および考察

(1) ケーソン側壁の水面形状

図—2 に、水面形状の一例を示す。図—2 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均値および変動幅を示し、平均値を実線で結んである。また縮尺 1/100、水深 37 m の水平床上で潮流速 8 kt の条件での模型実験結果 (本四公団調査報告書, 1988b) (以下、水平床模型実験結果と略す) を破線で示した。現地のケーソン周辺は水深約 47 m 近しか捨石工が施工されず、周辺の海底地形も複雑であること等により、実測値と実験値の最大水面勾配については一致していないが、水面の上昇下降の傾向は良く一致していることがわかる。すなわち水面は、 $\theta=0^\circ$ 付近で最高水位を示し、 $\theta=20^\circ$ 付近から水位は下降し、 $\theta=80^\circ$ 付近で最低水位になっている。また $\theta=20^\circ \sim 80^\circ$ の区間で最大水面勾配が発生する。 $\theta=80^\circ$ 付近から水位は再び上昇し、 $\theta=110^\circ$ 付近から 180° にかけて、ほぼ水平となる傾向がみられる。



図—2 ケーソン側壁の水面形状

(2) 入射潮流速と最大水面勾配の関係

図—3 に、入射潮流速と最大水面勾配の関係を示す。図—3 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、水平床模型実験結果から導いた値である。一点鎖線は、3P ケーソン周辺の水深が掘削孔により 47 m と深くなっていることを考慮して、実線の値に $0.62 [= (37/47)^2]$ を乗じて補正した値である。また記号の O 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—3 からケーソン側壁の最大水面勾配計測値は、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 6 kt 時には 0.028 (最小自乗中央値) となることが判った。

(3) ケーソン側壁周りの流速分布

図—4 に、ケーソン側壁周りの流速分布を示す。図—4 の表層流速の $\bar{U}_{\max}$ および入射潮流速の $\bar{U}_{0\max}$ は、プロベラ流速計に記録されたデータを時間長 30 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。また、底層流速および浸透流速の $\bar{U}_{\max}$ は、3 成分電磁流速計に記録されたデータを合成し、合成したデータを時間長 30 分の幅で移動平均した結果の、西流時の最大値

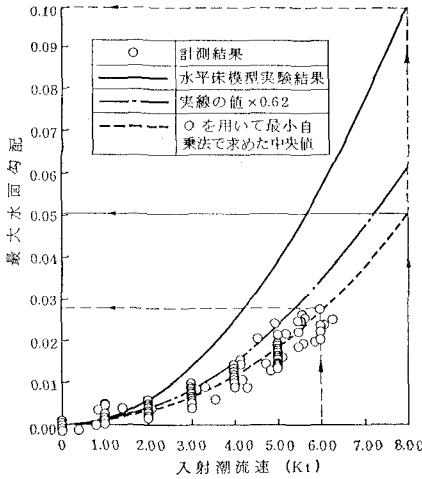


図-3 入射潮流速と最大水面勾配の関係

を示している。また、図-4 中の実線は、水平床模型実験における 60% 水深の流速分布である。

a) 表層流速分布について

$\theta = -10^\circ, 90^\circ$ における表層流速の計測値は、水平床模型実験の実験値に比べて多少小さく、 $\theta = 45^\circ$ における計測値は、実験値の周辺に分布するものの全計測値の平均値は、実験値よりやや小さくなる。これらの要因としては、4. (2) の入射潮流速と最大水面勾配の関係で考察したと同様に、水平床模型実験の結果は、水深 37 m の水平床上で得られた値であるのに対し、3P ケーソン近傍の水深は 47 m と水平床模型実験に比べ深いこと、さらに 3P 周辺の海底地形が複雑であり、入射潮流向が平面的に変動していることなどが推測される。

b) 底層流速分布について

捨石工は大型グラブ船と底開バージを使用して施工しているが、捨石の寸法が大きいととも、水深が深く、さらに潮流が厳しいため捨石施工面には 1~2 m 程度の凹凸が生じている。図-5 にケーソン周辺の捨石施工面の展開図を示す。図-5 から、 $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 60^\circ$ 付近は凸状に、 $\theta = 50^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ 付近は凹状に捨石が施工されていることがわかる。

$\theta = 60^\circ$ 付近の底層流速の計測値は、他地点の計測値より大きく、水平床模型実験結果にほぼ等しくなっている。この理由としては、 $\theta = 60^\circ$ 付近における底層流速は、捨石施工面の山により加速されたためと推測される。一方、 $\theta = 50^\circ$ および 90° 付近における底層流速は、水平床模型実験結果に比べ小さくなっている。この理由としては、 $\theta = 50^\circ$ および 90° 付近での底層流速は、捨石施工面の谷より減速されたためと推察される。

高沢らの浸透流実験では、 $\theta = 0^\circ$ 付近の捨石表面で、主流が捨石工内に吸込まれ浸透流となることが示されて

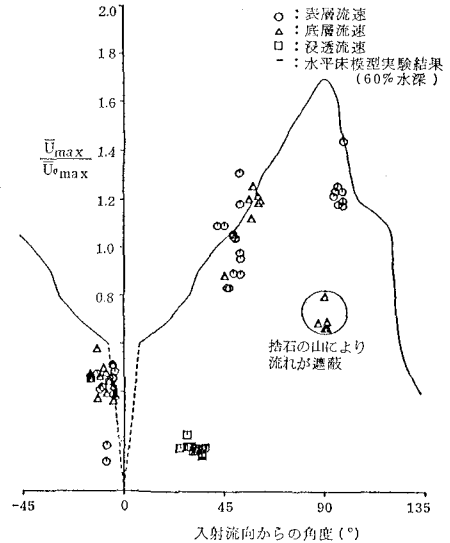


図-4 ケーソン壁周りの流速分布

いる。図-6 は、 $\theta = -10^\circ$ 付近における底層流速の計測値である。図-6 から、 $\theta = -10^\circ$ 付近では $\bar{U}_{\theta_{max}} = 1.15 \text{ m/s}$ に対し、 $\bar{U}_{z_{max}} = -0.30 \text{ m/s}$ の下降流すなわち、捨石工内へ吸込む流れが発生していることがわかる。

c) 浸透流速について

高沢らは、浸透流模型実験により、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確認している。図-7 に捨石工下の掘削海底面の $\theta = 40^\circ$ に設置した電磁流速計 No. 5 の計測データを示す。図-7 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潮流速最大値は 6.3 kt、加速域となる西流の潮流速最大値は 6.1 kt である。図-7 から、浸透流速は、潮流の方向にしたがって転流し、 U_θ は潮流の方向を示していることがわかる。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実証された。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。さらに、西流時には U_θ が U_r, U_z に比べ卓越するのに対し、東流時には、 U_θ, U_r, U_z がほぼ等しいことが判かった。図-4 には、電磁流速計 No. 5 の計測データを示してある。図-4 から、 $\theta = 60^\circ$ 付近における捨石施工面の底層流速は、入射潮流速の 1.2 倍に加速され

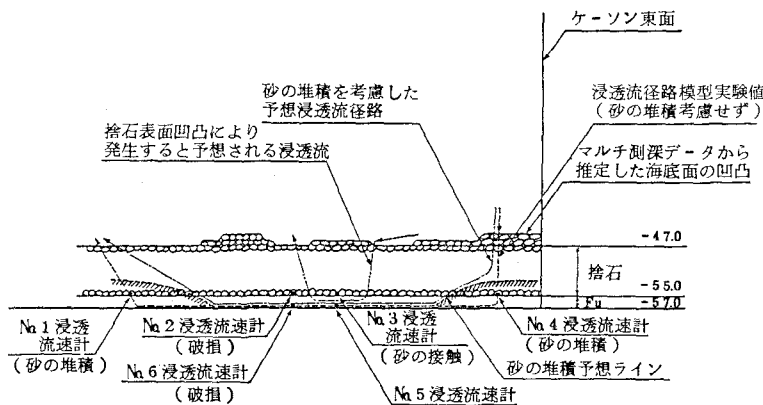
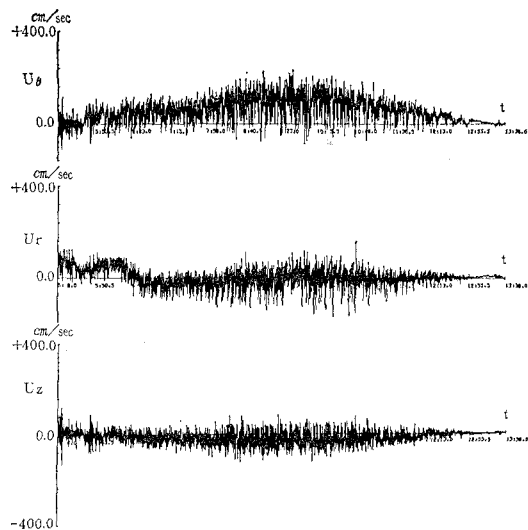


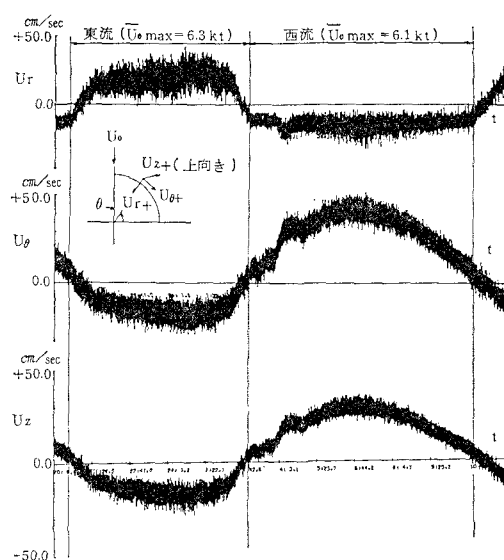
図-5 捨石表面形状および浸透流速計測器の作動状況

図-6 $\theta = -10^\circ$ における底層流速計測値

ているのに対し、 $\theta = 40^\circ$ 付近における捨石工下の浸透流速は、入射潮流速の 0.15~0.22 倍に減速されていることから、捨石工は、洗掘防止工として十分効果があると判断できる。なお、図-5 に示す様に、フィルターユニット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（本四公団調査報告書，1988a）で観察された砂の堆積状況と一致した。

(4) 洗掘防止工内浸透流速の計測値と実験値との比較

高沢らは、浸透流模型実験により、円筒ケーソン周辺の捨石工下において海底面に平行に作用する最大浸透流速は、 $\theta = 45^\circ$ 付近で発生し、捨石層数 4 層程度の場合の浸透流速は、ケーソン側壁の最大水面勾配を浸透流の動水勾配に代入し、この動水勾配と捨石の透水係数を用

図-7 $\theta = -40^\circ$ の捨石工下の海底面での浸透流速計測値

いて求めた計算値にほぼ等しく、捨石層数 7~8 層の場合は、計算値の 0.72 倍程度になることを確認している。図-8 に洗掘防止工内の浸透流速（電磁流速計 No. 5）の計測値と実験値の比較を示す。図-8 の $\bar{U}_{\max}$ および $\bar{U}_{0\max}$ は、図-4 の説明と同じ方法により求めた。また、計算値は、FU および捨石の空隙率、粒径と最大水面勾配を山田・川端(1982)の透水係数式に代入して求めた。図-8 から以下の事項が判明した。電磁流速計 No. 5 の上に約 2m の厚さの FU のみを設置した 7 月の計測値から、 $\theta = 40^\circ$ 付近の FU 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 倍に低減していることがわかる。この計測値は、計算値よりやや大きな値となった。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、

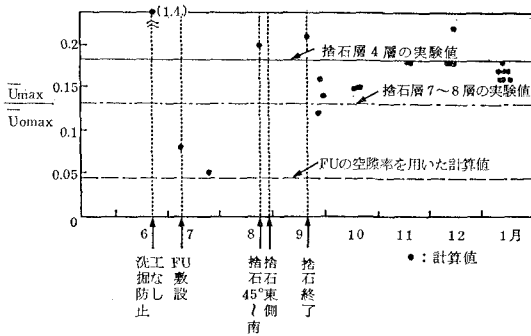


図-8 洗掘防止工内浸透流速の計測値と実験値の比較

さらに電磁流速計周囲の空隙は保護カゴにより局所的にFUの空隙に比べ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FU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、FU設置直後はFU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FU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。捨石施工後の浸透流速の計測値は、浸透流模型実験値すなわち、捨石粒径1.5m、空隙率50%、捨石層厚5m(4層)を用いた値(図-8の実線)と捨石粒径1.5m、空隙率50%、捨石層厚10m(7~8層)の条件を用いた値(図-8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10mの実験値に比べ大きくなった原因としては、図-5に示した様に、捨石施工面の凹凸による浸透流が発生したこと、 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 付近に砂が堆積し浸透流経路が短くなったこと、浸透流模型実験では2次元流速である

のに対し、計測値は3次元流速であること等が推測された。

5. まとめ

急潮流下大型海洋構造物の洗掘防止工内の浸透流に関する現地計測を実施し、以下の事項が明らかとなった。

- ①ケーソン側壁の最大水面勾配および水面下5mの表層流速は、掘削孔の影響を考慮した実験値とはほぼ一致した。
- ②入射流向に対して $\theta=60^\circ$ 付近の捨石施工面の山の位置での底層流速は、入射潮流速の1.2倍と大きな値を示した。
- ③ $\theta=40^\circ$ の海底面における浸透流速は、FUのみ施工した段階で、入射潮流速の0.05~0.08倍、捨石施工後で0.12~0.22倍となっており捨石洗掘防止工の効果を確認することができた。ただし、これらの値は、浸透流模型実験値より若干大きくなった。この原因としては、模型実験では2次元流速を測定したのに対し、現地計測では3次元流速を測定したこと、および捨石施工面の凹凸、砂の堆積等が考えられた。

参考文献

- 高沢 勤・鈴木幹啓・八重田義博・勝井秀博(1988): 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.
- 本州四国連絡橋公団第一建設局垂水工事事務所(1988a): 明石海峡大橋主塔基礎施工調査報告書(1/4), pp. 4-423.
- 本州四国連絡橋公団第一建設局垂水工事事務所(1988b): 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.
- 山田 正・川端規之(1982): 浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第325号, pp. 69~80.