

強潮流下における大型構造物の建設に当たっての 事前掘削の効果に関する実験的研究

本州四国連絡橋公団 第一建設局 正会員 加島 聡
同 上 高澤 勳
同 上 阿部 明弘
鹿島建設株式会社 正会員 今井 貫爾

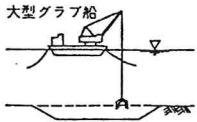
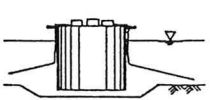
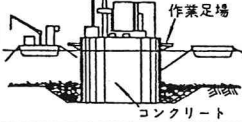
1. はじめに

大水深で強い潮流があり、しかも海底質が厚い堆積層からなる海域に大型の構造物を建設する場合、構造物周辺の局所洗掘防止対策が1つの水理的課題である。^{1),2)} このような条件の場合、平衡洗掘深以深まで十分な根入れを行うのが従来の設計の考え方であろうが、経済性、施工期間中の不安定状態期間の短縮等の要因により、別の対策が要求されることがある。そこで、構造物の設置位置の海底面を事前掘削して、構造物設置底面の平坦性を確保するとともに、曳航・沈設された構造物の初期洗掘を緩和し、併せて構造物周辺の事前掘削孔に捨石被覆工を施工することにより局所洗掘を防止し、構造物の長期安全性を図る工法が考えられる。本報は上述の施工法の可能性について、各施工段階毎に縮尺 1/100の移動床水理模型実験により検討したものである。

2. 検討課題

大水深、強潮流、海底底質が厚い堆積層からなる海域における大型構造物の建設に当たって提案している施工法と各施工段階での水理的検討課題を表-1に示す。工事は、まず大型グラフ船によって海底面を事前掘削し、構造物を曳航して掘削孔底面に沈設する。その後、構造物の周りに捨石を投入して被覆する。最後に構造物内にコンクリートを打設することを想定した。本報では、各施工ステップでの水理的課題を模型実験によって検討した。

表-1 各施工段階ごとの検討課題

施工段階	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4
施工要領	事前掘削 	構造物曳航、沈設 	捨石被覆による洗掘防止工 	コンクリート打設、完成 
検討課題	1. 強潮流下での掘削の可能性 2. 掘削孔の底面および法面の安定性	1. 構造物沈設時の掘削孔の底面および法面の安定性 2. 構造物沈設後の初期洗掘および洗掘の発達過程	1. 捨石の粒径 2. 作業船よりの捨石投入範囲	1. 長期安定性を確保するための洗掘防止工の施工範囲 2. 捨石形状

3. 実験方法

1) 実験装置

図-1に実験に用いた大型潮流水路を示す。本水路は幅5m、長さ35m、深さ0.6mの平面水路で、水路中央部に長さ5m、幅5mの移動床ピットを有している。水路の両端部にはそれぞれ12台ずつの水中ポンプが取り付けられており、その稼働台数を制御することにより、定常流のみならず、現実の潮流のように流速が時間的に変化する往復正弦流を発生させることができるようになっている。

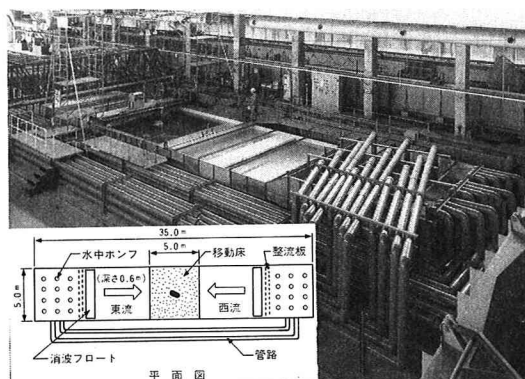


図-1 大型潮流水路

2) 実験手順

実験は図-2に示す手順で行った。まず地形及び構造物の模型を製作・設置後、地形模型の水締めを行い、所定の水位まで給水する。給水後、砂面計による初期地形の計測写真撮影を行い、潮流を通水する。局所洗掘現象等の経時変化を調べるため、途中段階で砂面計による計測、写真撮影等を行う場合は通水を停止する。こうして所定周期通水後、最終地形を計測して実験を終了する。最終地形の計測においては、水を排出し、写真撮影及びVTR撮影も合わせて行った。なお、模型砂として混合粒径の砂を使用したため、実験が終了するごとに模型砂をよくかきまぜ、粒径の偏りが生じないように注意した。

3) 実験条件

検討はA海域及びB海域の2種類の現地条件を対象とした。A海域は、水深が約37mで年間最大潮流速は、4.5m/secであり、底質は中央粒径約5cm、最大粒径約15cmの砂礫層から成っている。一方、B海域は、水深が約46mで年間最大潮流速3.5m/secであり、底質は中央粒径約2cm、最大粒径約10cmの砂礫層から成っている。

実験縮尺は、1/100としフルードの相似則に従って諸量を定めた。特に底質粒径のモデル化にあたっては、単純な幾何縮尺を採用した。表-2に実験条件を、図-3にB海域に設置する小判型の構造物模型を示す。

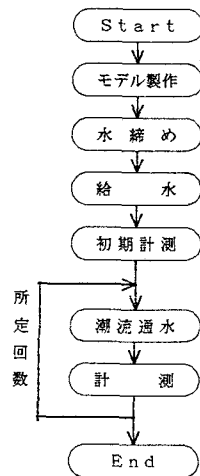


図-2 実験手順

表-2 実験条件

		A 海 域		B 海 域	
		現地	模 型 (1/100縮尺)	現地	模型 (1/100縮尺)
水 深		37m	37cm	46m	46cm
潮 流	最大流速	4.5m/sec	45cm/sec	3.5m/sec	35cm/sec
	周 期	12時間	72分	12時間	72分
	方 向	2方向	2方向	2方向	2方向
	時間変化	正弦流	正弦流 パルス流	正弦流	正弦流 パルス流
底 質 粒 径	d max	150mm	1.5 mm	100mm	1mm
	d 84	72mm	0.72mm	65mm	0.66mm
	d 50	50mm	0.5 mm	22mm	0.23mm
	d 16	6mm	0.15mm	1.1mm	0.11mm

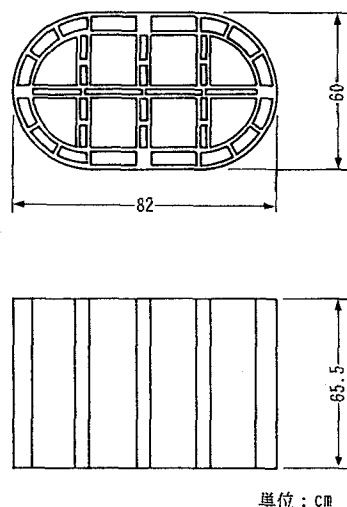


図-3 構造物模型

4) 水理模型実験による現象の再現性

今回の水理模型実験による現象の再現性については、昭和49年に本四公団が実施した「明石海峡の現地洗掘調査」の結果と、同調査の水理模型実験の結果との比較から、時間縮尺の相関性の説明は困難であるものの、洗掘形態（平衡洗掘深、洗掘領域）については、近似解として妥当な結果が得られることを確認している。

4. 実験結果と考察

1) 事前掘削の可能性

強潮流が作用する海域において浚渫船による事前掘削を行う場合、掘削孔が埋戻ることなく、所定の深度まで掘削が可能かどうかをA海域を対象に実験的に確認した。実験はまず平坦移動床に最大流速40cm/secの正弦流を3周期作用させて初期地形を形成し、その後、スポイドを用いて底質を取り除くことによって各事前掘削段階の地形模型を形成し、その各段階毎に最大流速40cm/secの正弦流を3周期作用させた。実験結果は砂面計による測定により求めた。図-4に掘削深が0cm、1cm、及び10cmの3ケースについて、掘削孔中央部の断面形状を初期及び3周期作用後について比較して示す。実験結果から、比較的潮流速の大きな海域であっても、掘削初

期段階に短時間に掘削孔が埋戻ることはなく、事前掘削が可能であること及び掘削深が深くなるに従って底面の砂堆の規模及び数量が減少し、掘削形状が安定することが認められた。

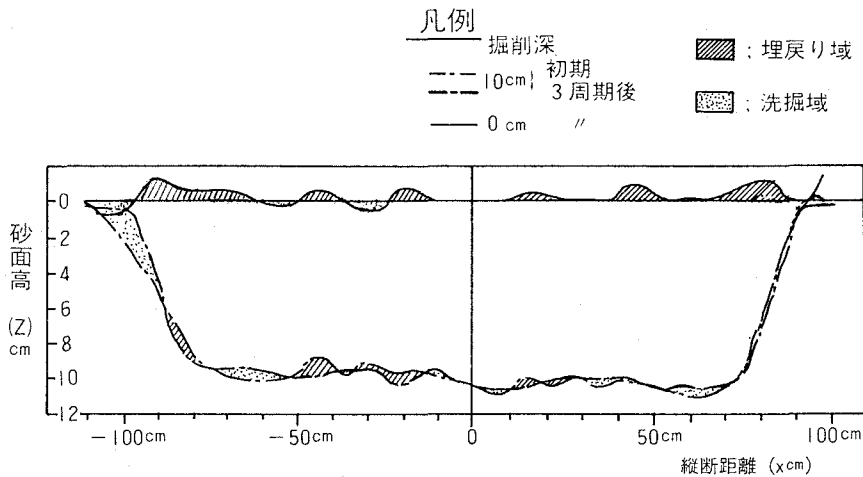


図-4 事前掘削深の変化による洗掘深および埋戻量の違い

2) 事前掘削による流速低減効果

事前掘削によって掘削孔内部の底面流速が低減する効果を把握するために、図-5のように18cm掘削孔に対応する粗度付固定床を製作し、長軸方向に45cm/secのパルス流を与え、流速分布を電磁流速計を用いて測定した。この結果を図-6に示す。図-6は上図に流下方向、下図に横断方向の各測定点の平均流速分布を表している。まず、初期流れは、一様水深部で示されるようなほぼ水深方向に一様な平均流速分布を有する。この流れが掘削孔外縁にさしかかると剥離を生じ、上流側法面付近の流速分布は大きくゆがめられ、底面近傍の速度欠損が著しいものとなっている。この分布形状のゆがみは下流に行くに従って回復するが、掘削底面中央付近の流速は周辺と比較して小さい。さらに流れが下流側法面にさしかかると底面付近の流速が回復し始め、下流側法肩においては、むしろ掘削孔にさしかかる前の底面近傍の流速よりも大きくなっている。

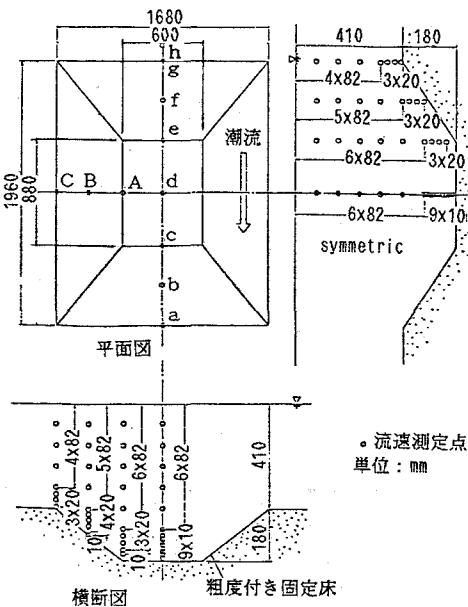


図-5 事前掘削孔の流速分布測定

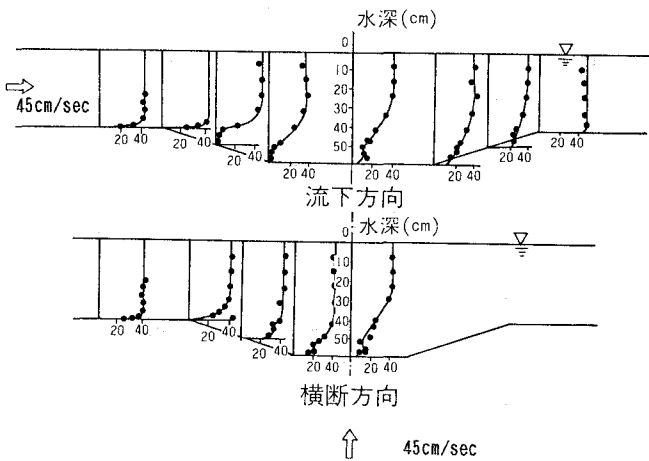


図-6 掘削孔内部の流速分布 (18cm掘削孔)

以上の流速分布データを基にして算出した掘削孔底面の摩擦速度を図-7に示す。縦軸の摩擦速度は、一般海底部の摩擦速度 ($U_{*0}=2.25$ cm/sec) で無次元化されている。なお、図中には限界摩擦速度 U_{*c} (1.77 cm/sec) の値 ($U_{*c}/U_{*0}=0.79$) も破線で示している。この図より、事前掘削の流速低減効果及びそれに伴う掘削底面底質の移動に対する安定効果が確認できる。

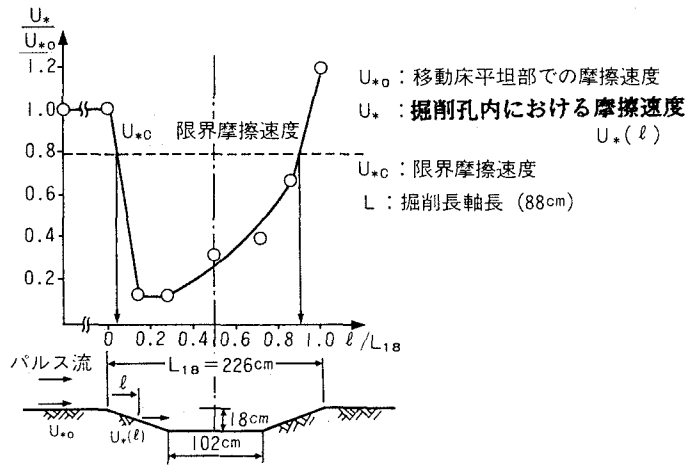


図-7 掘削孔内部における摩擦速度 (流下方向断面)

3) 強潮流が作用した時の事前掘削孔の安定性
掘削孔の潮流に対する長期的な安定性を評価するために、A海域を対象として図-8に示す3種類の掘削孔地形を整形し、限界摩擦速度を越える45 cm/secをピークとする往復正弦流をそれぞれ5周期作用させて実験を行った。

掘削孔が安定であるための要件としては①法面形状の保持、②掘削底面の平坦性の確保の2点が挙げられるが、特に後者に着目して検討を進めた。

掘削底面の平坦性を見るため、図-9に掘削底面内に発生する砂堆の平均高さ、平均長、個数の経時変化を各掘削深別に示す。これより事前掘削を十分深くすることによって、強潮流下においても比較的長期間、底面の平坦性が確保できることがわかった。

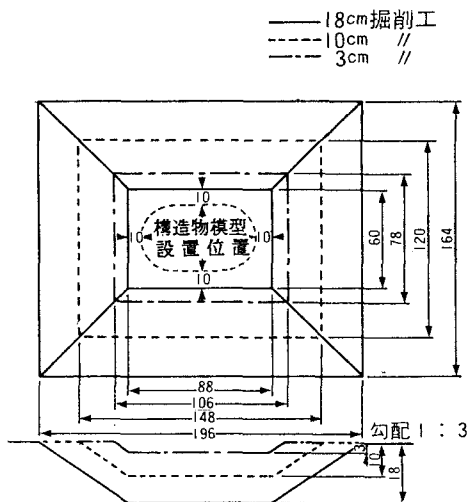


図-8 掘削孔形状

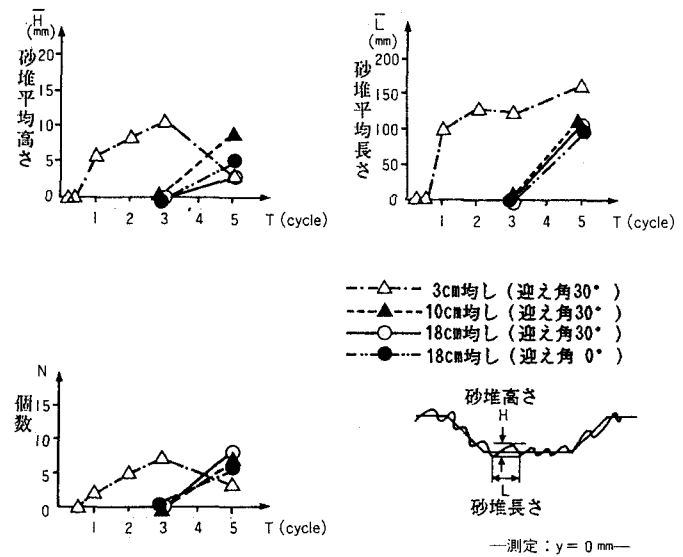


図-9 掘削孔底面内に発生する砂堆諸特性値の経時変化

4) 構造物沈設時の事前掘削孔の安定性

掘削工完了後、構造物を海上曳航し、小潮時に沈設する場合を考える。構造物は掘削底面からわずかに浮かした状態で最終の位置決めを行う。実験は構造物をB海域の掘削孔底面から1 cmだけ上方に固定し、潮流はこの状態で想定される20 cm/secパルス流を1波のみ作用させた。図-10に実験結果を示す。これによると、構造物前面部刃口直下に0.6 cm程度の洗掘孔が発生するものの、構造物下面への土砂の巻き込みは生じず、また法面もほぼ安定に保たれており、構造物は安全に沈設できることが確認された。

このように構造物沈設過程で有意な洗掘が認められなかったのは、構造物設置時の潮流を弱潮流としているとともに構造物前面に生じる馬蹄型渦が、構造物と掘削底面との間のクリアランスのために十分な発達に至らなかったためと考えられる。

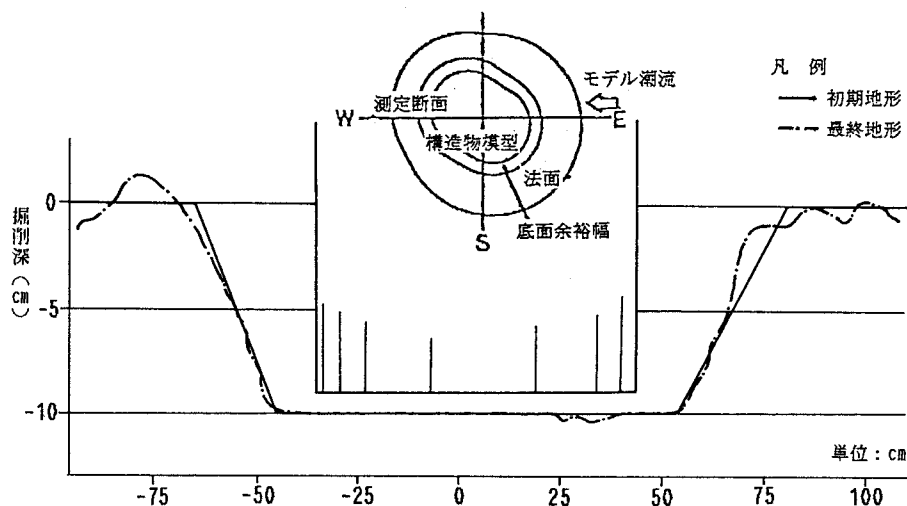


図-10 構造物沈設時の掘削孔の安定性

5) 構造物沈設後の初期洗掘

上記一連の実験により、強潮流下においても事前掘削は可能であり、これによって強潮流下においても掘削孔底面の砂堆の発生を抑え、平坦性が確保される。また、この掘削孔内に弱潮流時に構造物を沈設する際にも掘削孔の擾乱は軽微であり、作業の支障にならないことがわかった。しかし、この掘削孔に構造物を設置した瞬間から構造物周辺に生じる複雑な流れの乱れによって、構造物周辺に局所洗掘現象が発生する可能性がある。

そこで、事前掘削孔への構造物沈設後の局所洗掘現象の進行状況を見るため、B海域を対象として事前掘削深が10cm及び20cmの2ケースに対し、表-3に示すステップで潮流を与え、局所洗掘の発達を調べた実験結果を図-11に示す。図-11から事前掘削深を深くすることによって底面での掃流力を低減し、局所洗掘現象の進行速度を緩和できることがわかる。しかし、最初の強潮流によって流れの剥離点近傍に洗掘孔が発生し、その後の流速の増加によって洗掘領域が上流側へ拡大するとともに、最大洗掘深が大きくなる傾向は同様であり、この程度の事前掘削のみでは局所洗掘の発生を抑制することは困難であることがわかった。

表-3 潮流の载荷ステップ

STEP	与えた潮流	1波当りの作用時間
(a)	28cm/secパルス流(西向き)2波 32cm/secパルス流(西向き)2波	72分
(b)	28cm/secパルス流(東向き)4波	72分
(c)	32cm/secパルス流(西向き)1波 28cm/secパルス流(東向き)1波 36cm/secパルス流(西向き)10波	72分

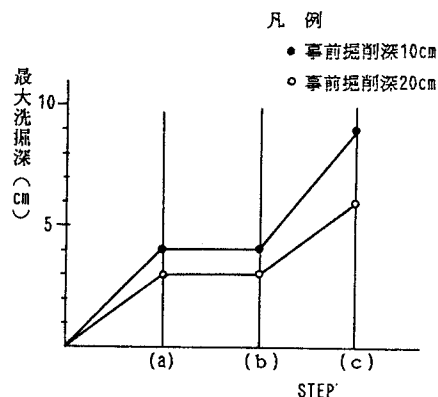


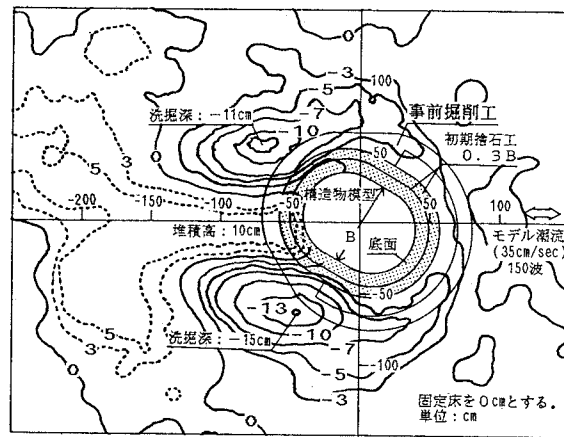
図-11 事前掘削深の相違による局所洗掘の進行状況の違い

6) 構造物の長期安定性確保のための捨石被覆工

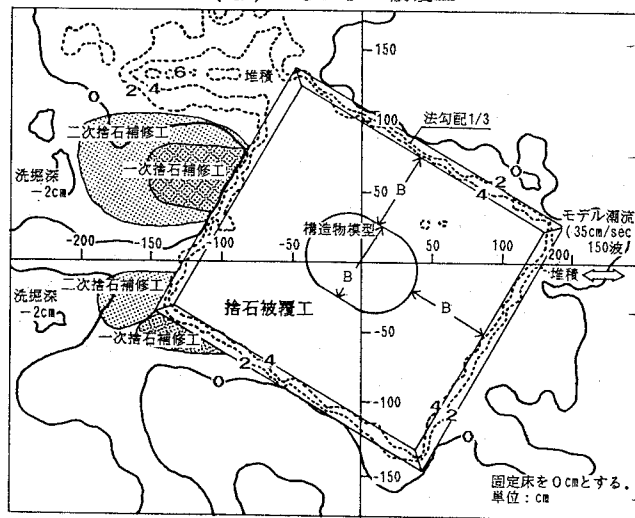
構造物沈設後の長期的な洗掘防止対策として捨石被覆工を考え、構造物周辺の被覆範囲に関する実験を行った。実験はB海域を対象とし、別途実験的に求めた所要の寸法(現地換算で1%)を有する捨石を構造物周辺に0.3B及び1.0B(Bは構造物の短軸長)の範囲に敷設し、長時間、潮流を作用させ続けた。

図-12にそれぞれ0.3B被覆工および1.0B被覆工の実験終了後の状況を示す。これより0.3B被覆工の場合、地形変化はほぼ平衡に達し、構造物は安定に保たれていたが、馬蹄型渦の流下経路上の捨石工外縁に構造物をささみ込むような深い2つの洗掘孔が発生し、構造物後方に高い堆積地形が形成されるなど周辺の地形変化が大きく、また、支持力の低下等構造上の問題が指摘された。一方1.0B被覆工の場合は構造物が安定であ

るばかりでなく、捨石工も十分安定であり、また周辺海底地形の大きな変化もみられず長期的な安全性が確認された。



(a) 0.3B被覆工



(b) 1.0B被覆工

図-12 捨石被覆工の長期安定性実験結果

5. まとめ

縮尺1/100の水理模型実験により、構造物設置位置の海底を事前掘削して海底面の平坦性を確保するとともに、曳航・沈設された構造物の初期洗掘を緩和し、併せて構造物周辺の事前掘削孔に捨石被覆工による洗掘防止対策を施して構造物の長期的安定性を図る一連の工法が実現可能であることが確認された。今回の水理実験は、主として、工法が成立するかどうかの基本的確認を行うことを目的としたので、作用させた潮流強度が、理想化されているうらみがある。実際にあたっては、施工段取りに応じ、作用潮流速が今回の実験で想定したものより、もっと複雑に変化することが考えられ、より現実に即した潮流を与える必要がある。今回述べたような実験を再度実施し、同様な結果がでるのかどうかを確認もしているが、今回はその結果の報告を省略させていただく。今後捨石の間隙からの吸い出し防止対策等を検討することにより、上述した工法はさらに実現性の高いものとなると考えられる。

おわりに、本研究の実施にあたっては、京都大学工学部 中川博次教授、大阪大学工学部 樫木亨教授、出口一郎助教授より多くの御指導、御助言をいただいた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 岡田哲夫, 山田勝彦: 明石海峡の現地洗掘調査, 橋梁と基礎76-1, pp.18 ~23, 1976
- 2) 中川博次, 鈴木幸一: 潮流による橋脚周辺部の洗掘特性に関する研究, 第22回海岸工学論文集, pp.21 ~27, 1975