

強潮流下における大規模構造物周りの局所洗掘現象 に関する実験的研究

佐伯康二* ・ 北川 信** ・ 山 縣 守***
今井貫爾****・ 利穂吉彦*****・ 小池 司*****

1. ま え が き

河川及び海域に建造される構造物を設計・施工する際の重要な検討項目として、現象の解明並びに対策方法の開発が望まれているものの一つに、構造物周りの局所洗掘現象がある。局所洗掘現象は、構造物を設置することにより流況が変化し（馬蹄形渦、カルマン渦の発生、流れの縮流等）、底質の移動状況が変わるために生じるものであるが¹⁾、そのメカニズムが複雑であるために主に実験的アプローチによる研究がなされてきた。特に、河川における橋脚周辺に生じる洗掘に関する研究は、古くから行われており、最大洗掘深を算定するための種々の実験公式が提案されている^{2),3),4)}。これらの算定式の多くは、根入れのある小規模構造物に一方一定流速の流れが作用する際に生じる洗掘現象を対象としたものである。一方、海域における構造物周辺に生じる洗掘は、流速・流向が時間と共に変化する流れ（潮流、波浪等）に起因するものであり、現象を定量的に把握するには至っていない。特に、大規模構造物に対する洗掘現象に関しては、相似則の関係上、通常、大掛かりな実験装置が必要とされるため、実験データの蓄積が少なく、明らかにされていないことが多い。

本報は、現在計画されている明石海峡大橋の主塔基礎ケーソンを対象とし、施工時において、強潮流により生じると考えられる洗掘現象を取り扱ったものである。本題に関し、中川・鈴木⁵⁾は基礎的洗掘特性を把握するための検討を行い、加島ら^{6),7),8)}は、捨石、コンクリートブロック、整流多孔板等を用いた洗掘防止工に関する実験を実施した。その結果、洗掘防止工が必要であること、及び上記の各洗掘防止工はそれぞれに効果が認められたものの、さらに一段と実際の検討が必要であることが認められた。なお、これらの研究において行われた

実験は、長方形ケーソンを対象とし、一方向一定流あるいはパルス流（一定流速往復流）を用いたものであった。

以上の背景を踏まえ、本報では、強潮流海域における有効な洗掘防止工を開発するために、実際の潮流と同様に正弦的に変動する潮流を作ることのできる大型潮流水路を用いて一連の洗掘実験を行った。ケーソンは、潮流に対して異方性のない円柱形状を基本形とし、海底面上に着底している状態（根入れ無し）を主対象とした。

主たる実験項目は、以下の通りである。

- (1) 基本実験：現地と実験室内の相似則に関する実験、並びに、ケーソン周辺の底面流速及び底面水圧の分布特性に関する実験
- (2) 無対策洗掘実験：洗掘防止工を施さない場合の洗掘特性把握実験
- (3) 洗掘防止工実験：4種類の洗掘防止工（海底面完全被覆、多束マット、変形ジャルラン壁、リングマウンテン）の基本機能把握実験

2. 実験条件及び方法

検討対象とした淡路側の主塔基礎ケーソン設置予定海域は、水深が約 41 m で年間最大流速約 9 ノット (4.5 m/s) の強潮流が来襲する。海底は、中央粒径約 5 cm、最大粒径約 15 cm の砂礫層からなっている。表-1 に現地及び模型実験における自然環境条件を示す。実験縮尺は 1/100 とし、フルード則に従い諸量を定めた。但し、底質粒径に関しては粒径 0.08 mm 以下の細粒分は除いた。主塔基礎としては、異方性のない円形ケーソンを基本形とし、比較検討のため一部楕円形ケーソンに関する実験を加えた。図-1 に実験で用いたケーソン模型を示す。模型は塩化ビニール製で底板は付いていない。

図-2 に実験に用いた大型潮流水路を示す。幅 5 m、長さ 35 m、深さ 0.6 m で中央部 5 m×5 m が移動床用テストセクションとなっている。水路両端のピット部には、それぞれ 12 台ずつの水中ポンプ ($Q=5.6 \text{ m}^3/\text{min}$) 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往復正弦流が起こせるようになっている。

* 正会員 工修 本四公団第二建設局児島工事事務所

** 正会員 工修 本四公団第一建設局垂水工事事務所

*** 正会員 工修 本四公団第一建設局垂水工事事務所

**** 工博 鹿島建設技術研究所

***** 正会員 工修 鹿島建設技術研究所

表-1 現地及び実験条件
(自然環境条件)

項 目	現 地	実 験 (1/100縮尺)
水 深	41 m	41 cm
潮 流	最大流速 4.5 m/s (9ノット) 12時間 周 期 方 向 時間変化 2方向 正弦流	45 cm/s 72 分 2 方向 正弦流 パルス流
底 質 粒 径	d_{max} 150 mm d_{84} 72 d_{50} 50 d_{16} 6	1.5 mm 0.91 0.49 0.18

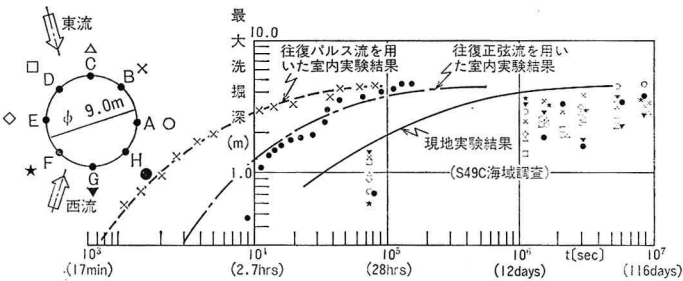


図-3 現地実験と室内実験の対比

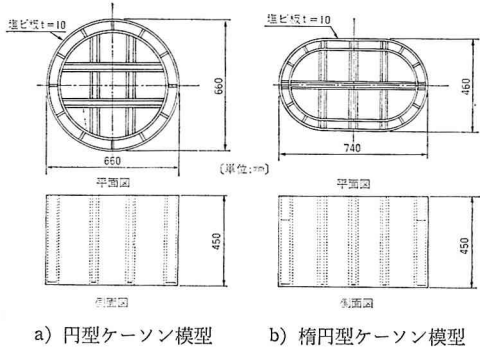


図-1 主塔基礎ケーソン模型

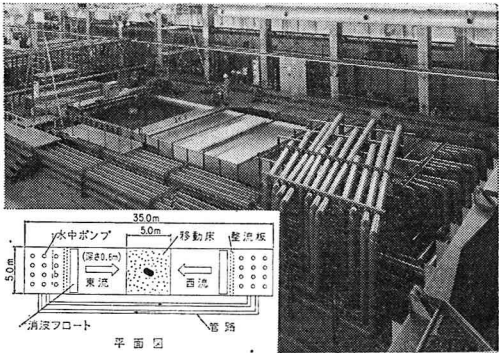


図-2 大型潮流水路

実験は、平坦に敷き均した移動床上にケーソンを設置し、初期地形を計測した後に、流れを作用させ、所定の時間間隔毎に地形を計測した。地形計測は、接触式及び連続式砂面計を用いて行った。得られた地形データは、電算処理され、コンター図及び断面図としてまとめられた。なお、流れが作用している間、プロペラ流速計及び電磁流速計により流速をモニターすると共に、水中VTRを用いて底質移動状況を観察した。

3. 基本実験

(1) 相似則

底質の移動現象には、重力のみならず流体の粘性力が

寄与するために、一般的には、模型実験における縮尺効果を定量的に評価することは難しい。今回の実験では、現地の底質粒径が大きいことから、縮尺効果に及ぼす粘性の影響は比較的小さいと考え、フルード則に従い、底質粒径も幾何縮尺 (1/100) 通りの混合砂を用いた。

まず、ケーソンが設置される以前の現海底面の再現性を調べるために、底質移動限界 (限界 Shields 数) 及び底質移動形態 (底面剪断力と底質沈降速度の比) について検討した。その結果、粒径の小さい底質に関しては室内実験の方が若干移動しにくくなるものの、底質の移動限界としては、室内、現地とも約 6〜7 ノットとなり、また、底質移動形態に関しても両者とも掃流移動が卓越することになった⁹⁾。室内実験に関しては、目視観察により、これらの結果が妥当なものであることが確認された。これらより室内実験におけるケーソン設置以前の現地海底面の再現性はほぼ満足されているものと判断した。

次に、洗掘現象の相似性に関する検討を、昭和49年に明石海峡で実施された直径 9 mm の鋼管を用いた現地洗掘実験¹⁰⁾に室内実験で再現することにより行った。図-3 は時間経過に伴う最大洗掘深の発達状況を示したものである。図中には、現地実験結果、並びに今回行った往復正弦流を用いた 1/100 縮尺実験及び中川・鈴木⁵⁾の往復パルス流を用いた 1/150 縮尺実験の結果をフルード則に従い現地スケールに換算したものが示されている。この図より、平衡状態における最大洗掘深は、三者ともほぼ同じ値となるが、洗掘現象の進行速度に関しては、パルス流では約 20 倍、正弦流では約 5 倍となることが判った。現地では、洗掘に影響を及ぼさないような弱い潮流も含んでいること、及び潮流の方向が、ある範囲中に分布することにより埋め戻りが生じ最大洗掘深を生じる位置が変化すること等の要因を考慮すれば、本装置を用いて行われる室内実験結果は、概ねフルード則により現地換算できると判断した。

(2) ケーソン周辺の底面流速及び底面水圧分布

洗掘特性の把握及び洗掘防止工の材料決定のための基本的情報として、ケーソン周辺の底面流速及び海底面に

働く水圧の測定を行った(図-4)。

底面流速は、ポテンシャル流で表されるように、ケーソン側面で最大となり、一般部の約1.7倍となった。

底面部に働く水圧(平均値)の分布は、潮流方向から45°付近を境に、前面部(上流側)で静水圧より大きくなり、側面及び背面部で小さくなる。また、水圧が最も小さくなるの

は潮流の来襲方向から約70°の位置となった。なお、実測値は、平均値のまわりに大きく変動しており、ケーソン近傍では、変動成分水圧が平均水圧とほぼ同程度の大きさとなった。

4. 無対策洗掘実験

洗掘防止工を施さずにケーソンを海底面上に設置した後に最大流速45 cm/s(現地換算約9ノット)の正弦流を作用させた場合の洗掘地形コンター図を図-5に示す。

円形ケーソンの場合、流速が約25 cm/s(同5ノット)に達した時点で、潮流方向に対して、流れの剥離位置に対応する約±60°付近に洗掘孔が生じ始めた。この洗掘孔は、流速の増加に伴い、次第に大きくなっていった。最大洗掘深の生じる位置は、半径方向にはケーソン側壁直下付近ではほぼ一定であるが、円周方向には、流速増加に伴い次第に上流側に移動し、45 cm/s 流速時では、潮流方向から約±45°の位置となった。この時、ケーソンは、洗掘孔にずれ込むように上流側に傾斜した。この時点でケーソンを撤去し地形計測を行った結果が、図-5 a)の一番下の図である。洗掘孔は、ケーソンの側壁から、外側とはほぼ同じ程度ケーソン下面にも及んでいることが判る。根入れのない大規模構造物の洗掘特性として、構造物の接地面外縁部から底質が吸い出されるように移動し、洗掘孔が構造物下面に次第に発達することが挙げられる。

図-5 b)は、楕円形ケーソンを、潮流迎角30°で海底面上に設置した場合の洗掘地形コンター図である。この場合の洗掘地形は、潮流方向に対して非対称となるが、円形ケーソンの場合と同様に、約25 cm/sで、流れの剥離位置付近から洗掘が生じ始めた。流速が45 cm/sに達した時点で、楕円形ケーソンは、潮流に対する投影面積が大きくなる方向に回転しつつ上流方向に前傾した。

以上の結果からいずれのケーソン形状に対しても、しかるべき洗掘防止工が必要であることが再確認された。

5. 洗掘防止工実験

(1) 洗掘防止工

従来より用いられて来た洗掘防止工としては、碎石、

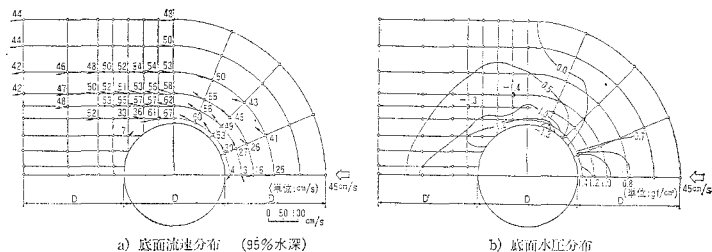
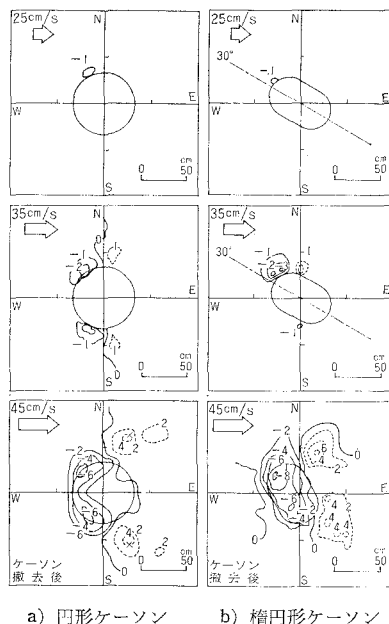


図-4 ケーソン周辺部の底面流速及び底面水圧分布(固定床実験)



a) 円形ケーソン b) 楕円形ケーソン

図-5 無対策洗掘実験結果(単位: cm)

コンクリートブロック、砂袋、古タイヤ、コンクリートマット、アスファルトマット、ナイロンメッシュマット、人工海草、ジャラン壁等が挙げられる。Maidl・Schiller¹¹⁾、Heerten¹²⁾は、北海に建設された試設計用プラットフォームを用いて各種洗掘防止工の現地実験を行った。Angus・Moor¹³⁾、Dahlberg¹⁴⁾は、北海における海底石油開発関係の各種構造物に用いられている洗掘防止工に関する調査結果をまとめており、Wilson・Abel¹⁵⁾は、カナダの大西洋側で行われた石油掘削セミサブリンの洗掘防止工施工例を紹介している。

前述した各種防止工の中では、経済的で修理が容易であるという理由により、碎石並びにコンクリートブロックが用いられることが多かった。しかしながら、今回対象とするような強潮流海域では、これらの洗掘防止工自身の周囲に生じる洗掘のために防止工が不安定となること、及び洗掘工の間隙から吸い出し洗掘が生じることが問題となる。Chesley¹⁶⁾は、これらの現象に対し、碎石

の積み重ね方に関する検討を行っている。

これらの過去の研究例を踏まえ、各種洗掘防止工に対する強潮流環境下への適用性の検討並びに予備実験を行い、表-2に示す4種類の洗掘防止工を選定した。

a) 海底面完全被覆案：海底面に働く剪断力を遮断する手法であり、各種防止工の基本と考えられるものである。必要被覆範囲に関する検討を行った。実験では、被覆材として硬質のアスファルトマット（厚さ3mm）を用いた。

b) 多束マット案：可撓性のマット小片で、ケーソン周辺の海底面を被覆するもので、洗掘孔が生じた場合、可撓性マットが追従することにより洗掘の発達を抑制しようとするものである。実験では厚さ3mmのたわみ易いアスファルトマット片32枚を用いた。

c) 変形ジャルラン壁案：消波用として開発され、洗掘防止工としての使用実績あるジャルラン壁に、穴あき上蓋を付けたもので、主に馬蹄形渦による下降流を弱めようとするものである。開口率30%の鋼製板を用いた。

d) リングマウンテン案：ケーソンの周辺の海底面上に、ケーソンから一定間隔離して三角形断面状の突起物を設置するもので、突起物により起こされる湧昇流により馬蹄形渦の強度を弱めようとするものである。実験では、塩化ビニール製の突起物を用いた。

(2) 実験結果

上記の4種類の洗掘防止工の基本的な機能特性を把握するために行った実験結果を図-6に示す。潮流は、図中、左側から流し始め、ピーク潮流45cm/s（現地換算9ノット）の往復正弦流とした。

a) 海底面完全被覆案：無対策では、ケーソンの上流側海底面が洗掘されたが、被覆案では、下流 $\pm 45^\circ$ 方向の被覆工の端部から洗掘が生じた。これは、ケーソン近傍で生じた渦が被覆工上を滑るように流下し、この地点で海底面上に出ているためと考えられる。生じた洗掘孔は、流れが反転しても埋戻されることは少なかった。その結果、図-6a)に示すように、潮流方向ケーソン中心軸上で堆積し、 $\pm 45^\circ$ 付近を中心に4箇所洗掘孔が生じる地形となった。図-6a)の左図は、無対策の場合を念頭に置いて、ケーソンから0.4D（Dはケーソン直径）の範囲を被覆したものである。この場合、被覆材端部からの顕著な吸い出し洗掘が生じた。実験では、ケーソン自身は移動しなかったが、被覆材によっては、被覆工並びにケーソン本体の安定性にも問題があると考えられた。

実験は、0.4D, 0.6D, 0.8D, 1.0D 被覆案について行った。被覆範囲が大きくなるに従い、渦の流下距離は長くなり、海底面に働く剪断力は小さくなるために、吸

表-2 洗掘防止工

分類	海底面被覆案		流通低感案	
	完全被覆	多束マット	変形ジャルラン	リングマウンテン
形状				
防止工材料及び機能	剛な材料によりケーソン周辺の海底面を完全に被覆し、底面剪断力をカットする。	可撓性のある帯状小片(32枚)をケーソン下部に取り付け、海底面を被覆する。	多孔壁でケーソン下部を囲み、ケーソン周辺の湧による流れを抑制する。	ケーソンから一定間隔離した所に、三角形の突起物を設置し、湧昇流を作ると共に、渦による流れを抑制する。

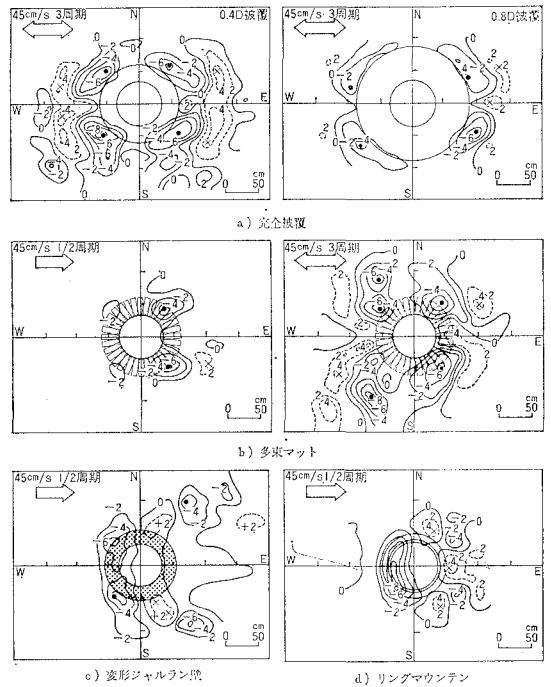


図-6 洗掘防止工実験結果 (単位: cm)

い出し洗掘も少なくなった。これらの結果から、被覆材特性にもよるが、完全被覆案を用いる場合、0.8D 程度の被覆範囲を考える必要があると判断された。

b) 多束マット案：多束マットにおける洗掘状況は、完全被覆案の場合とほぼ同様となる。但し、0.4D 被覆の両者を比較すると、多束マット案の方が、洗掘初期段階にはマット片のすき間からの吸い出し洗掘があるために、洗掘がより早く進むようであるが、洗掘孔にマットが追従するために、次第に洗掘は緩慢となり、完全被覆案よりもより安定した状態となった。45cm/s 3 周期に対し、多束マット案を用いた場合、ケーソンは安定に保たれた。

但し、ケーソン側方部や上流側（図-4b）で水圧が最も小さくなる付近）に布設されたマット片が、ねじれ

るように捲れ上がる現象が観察された。実構造物に多束マットを適用する場合には、マットの安定性を考慮した材料選定を行う必要があると考えられる。

c) 変形ジャルラン壁案: 変形ジャルラン壁案では洗掘は、ケーソンの上流側でジャルラン壁の側壁の下部から生じた。この洗掘孔は、流速増加に伴い次第に発達し、最初の 45 cm/s ピーク (1/4 周期後) には、ケーソン下面に達し、わずかながらもケーソンが傾いた。これより、変形ジャルラン壁案は、ケーソンの見かけの径を大きくするという性質のもので、今回対象とするような強潮流に対しては、洗掘防止効果は小さいと考えられた。

d) リングマウンテン案: リングマウンテンを施した場合の洗掘状況は、他のケースと異なった。即ち、洗掘は、ケーソン上流側で、ケーソンとリングマウンテンの間に集中して起こり、リングマウンテンより外側では洗掘孔は生じず海底面は安定していた。結果的にはケーソン下面に洗掘孔が発達したために、ケーソンは、無対策の場合と同様に、流速が 45 cm/s に達した時点で上流側に傾斜したが、ケーソンとリングマウンテンの間に適当な処置を施す等の改良を加えることにより、有効な洗掘防止工となり得る可能性があると考えられた。

6. ま と め

明石海峡大橋主塔基礎ケーソンの施工時に、強潮流により生じると考えられる局所洗掘に対する洗掘防止工を開発するために、大型潮流水路を用いて 1/100 縮尺の模型実験を行った。

今回考案した 4 種類の洗掘防止工に対し、(1) 可撓性の材料を用いた多束マット案の場合、比較的狭い範囲 ($0.4D$, D ; ケーソン径) を被覆することによって、洗掘防止効果が期待できる。(2) 海底面を剛な材料で完全に被覆する場合の被覆範囲として $0.8D$ 程度が必要と考えられる。(3) 変形ジャルラン壁は、強潮流に対する洗掘防止工として適当でない。(4) リングマウンテンを用いる場合、ケーソンとリングマウンテンの間に生じる洗掘に対する対策を考える必要があること等が明らかになった。

現在、著者らは、本報に紹介した洗掘防止工の実用化

のための詳細検討を行うと共に、これらの方法とは別に海底面を先行掘削した後にケーソンを沈設する工法等に関する一連の洗掘実験を実施している。これらの結果については、後日改めて報告したい。

参 考 文 献

- 1) Niedroroda, A. W., C. Dalton and R. G. Bea: The Descriptive physics of scour in the ocean environment, OTC 4145, pp.297~304, 1981.
- 2) 中川博次: 水理構造物による局所洗掘, 水工学に関する夏期研修会講義集, 第 10 回, A コース, pp. A-1-1~15, 1974.
- 3) Jain, S. C.: Maximum clear-water scour around circular piers, Proc. ASCE, Vol. 107, HY 5, pp. 611~626, 1981.
- 4) Raudkivi, A. and R. Ettem: Clear-water scour at circular piers, Proc. ASCE, Vol. 109, HY 3, pp. 338~350, 1983.
- 5) 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.
- 6) 加島 聡・田中宗博: 明石海峡大橋主塔基礎洗掘防護工実験, 本四技報 No. 7, pp. 00~00, 1979.
- 7) 加島 聡・古屋信明: 明石海峡大橋主塔基礎洗掘防護工実験(その 2), 本四技報 No. 14, pp. 2~7, 1980.
- 8) 奈良平俊彦・加島 聡: 強潮流下の洗掘防止工模型実験, 橋梁と基礎 80-5, pp. 32~37, 1980.
- 9) 北川 信・今井貫爾・小池 司: 強潮流下における構造物周辺の局所洗掘に関する実験的研究—水理模型実験の現地再現性—, 第 40 回年次学術講演会, pp. 453~454, 1985.
- 10) 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.
- 11) Maidl, B. and W. Schiller: Testing and experiences of different scour protection technologies in the North Sea, OTC 3470, pp. 981~987, 1979.
- 12) Heerten, G.: Experience of different protection techniques at offshore-structures in the North Sea, Fifth Australian Coastal and Ocean Eng., pp. 22~28, 1981.
- 13) Angus, M. and R. L. Moor: Scour repair methods in the southern North Sea, OTC 4410, pp. 385~399, 1982.
- 14) Dahlberg, R.: Observations of scour around offshore structures, Jour. Can. Geotech., Vol. 20, pp. 617~628, 1983.
- 15) Wilson, N. D. and W. Abel: Seafloor scour protection for a semi-submersible drilling rig on the Nova Scotian Shelf, OTC 1891, pp. 631~646, 1973.
- 16) Chesley, J. P.: Tests of scour protection for bridge piers, Proc. ASCE, Vol. 103, HY 4, pp. 1773~1783, 1974.