

大水深大型設置ケーソン刃口モルタル 洩れ防止材に関する研究

THE SEALING MATERIAL OF THE HUGE STEEL CAISSON FOR DEEPSEA CONCRETE WORKS

小林 辰 夫*

By Tatsuo KOBAYASHI

The laying-down caisson method was adopted to construct the bridge-pier foundation in deepsea such as Honshu-Shikoku connecting bridges.

To secure the quality of under-sea concrete and to prevent contamination of the ocean floor caused by leakage of mortar, it was necessary to seal the clearance between the rock-beds at the sea bottom and cutting edge of the bottom of the caisson without diver work.

Sponge-mat made of special polyurethane foam and special structure was used as the sealing material in constructing the large-scale caisson foundation such as the South Bisan-Seto bridge piers and so forth.

The present paper summarizes the development of the sealing material and its application to construction work.

まえがき

水深 25 m 以上で、しかも潮流 3 m/s に及ぶなど、厳しい施工条件の制約の下で、巨大な海中コンクリート構造物を安全・確実・経済的に施工できる基礎工法の一つに大型設置ケーソン工法があり、南北備讃瀬戸大橋下部工他に適用された¹⁾。

本工法の適用に当って、海中コンクリートの強度と工事の安全性と確実性を確保し、海洋汚染を防止するために、大型ケーソン底部刃口部からのモルタル洩れを防止する必要があった。この目的に沿うモルタル洩れ防止材料に要求される条件は、① 潜水夫の作業に依存しない、② ケーソン据付海底岩盤の不陸を吸収して低反力でシールできる、③ 自然条件に対応してケーソン着底と同時に止水できる、④ 修理作業を要さない信頼性の高い材料・構造である、という厳しいものとなる。

これらの要求条件に対して、従来のモルタル漏れ防止工は潜水夫の作業可能な水域に沈設された小型設置ケーソンに対するものがほとんどであり、潜水夫の作業機能に多くゆだねられていたので、要求条件をすべて満足す

るものではなかった²⁾。

そこで、本州四国連絡橋計画が具体化され始めた昭和 43 年より 59 年までの約 15 年間にわたり、大型海中コンクリート橋脚建設のために必要とされた大型設置ケーソン工法開発プロジェクト³⁾に参画して、前述の条件に見合う材料・構造に関する基礎段階より実用化までの研究を系統的に行った。

その結果、設計手順の提案、妥当な材料の選定、実用効果の確認、そして今後の課題などについての知見が得られた。

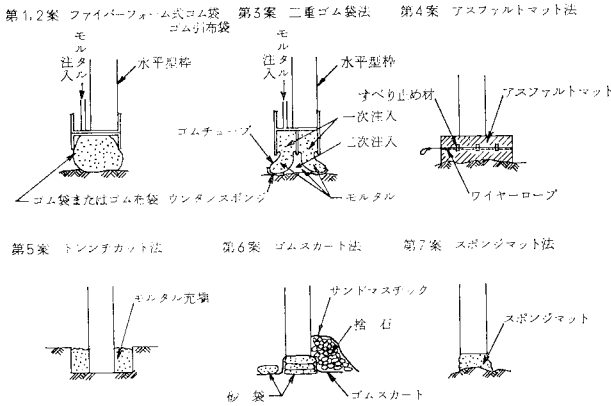
本論文はこれらの成果をとりまとめたものである。

1. モルタル洩れ防止材の材料構造に関する検討

(1) モルタル洩れ防止材の提案

モルタル洩れ防止材に対する主な要求品質を表—1 に示すように設定した。従来のモルタル洩れ防止材²⁾や沈埋トンネルガスケット他の各種土木用シール材⁴⁾の調査の結果から、潜水作業が比較的少なく、海底岩盤の凹凸を吸収しうるモルタル洩れ防止材として、図—1 に示す 7 案を考えた。

* 正会員 横浜ゴム(株) 理事
(〒254/神奈川県平塚市追分 2 番 1 号)



図一 モルタル洩れ防止材（案）

表一 モルタル洩れ防止材に対する要求品質

区分	1次要求品質	2次要求品質
シール性	ケーソンへの水中コンクリート工において、モルタルをシールできる	海底岩盤不陸によくなじむ
		モルタル側圧に耐える
施工性	潜水夫の作業に依存しない	取付完了後、長期応用に耐える
		大規模工事に対応できる
取付後の安全性	施工性、信頼性の高いこと	環境を汚染しない
		海中作業が少ない
取付後の安全性	施工条件、自然条件による外力に耐え、ケーソン工事への影響が少ない	海上作業は工程が少なく単純
		補助作業はほとんど不要である
取付後の安全性	工期が短い	風振、振動等の外力に耐える
		ケーソン沈没に耐える
取付後の安全性	ケーソンの安定に支障しない	粗骨材の投入に耐える

第1案～第6案は従来の設置ケーソンの刃口洩れ防止材およびその改良案である。しかしながら、これらは海上での機械を使用してのモルタル注入作業か、潜水夫の作業を要するもので、大型設置ケーソン刃口のモルタル洩れ防止を行う場合、機械作業の信頼性や潜水作業の安全性、作業時間に問題を残している。第7案は潜水作業の不要なガスケット形式のモルタル洩れ防止材として新たに提案したものである。スポンジマットの材質としては、数10cmの凹凸のある海底岩盤に密着する必要から柔軟性に富み圧縮変形量が大いこと、物性選択の自由度が大いこと、大ブロックの成型が可能であること、水圧の作用下で収縮しないことなどの理由から、連続気泡構造の半硬質ポリウレタンフォームを選定した。

(2) 予備実験としての陸上実験

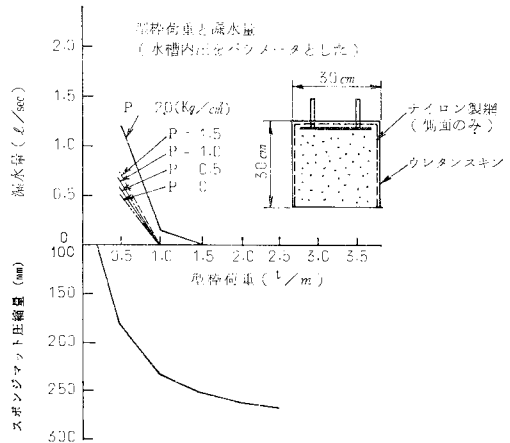
陸上実験は、設置ケーソン工法の実海域での施工性を確認する海中実験の予備実験として、海中実験に供するモルタル洩れ防止材を選定するために行った。

図一に示した7案のうち、第1～第3案は、設置ケーソン刃口のモルタル洩れ防止材の取り付け部を模した水平型枠底部にゴムまたはゴム引布から成る袋を取り付け、袋の内部にモルタルを注入して海底岩盤の不陸になじませるものである。第4案のアスファルトマット法は、水平型枠底面に取り付けたアスファルトマットのた

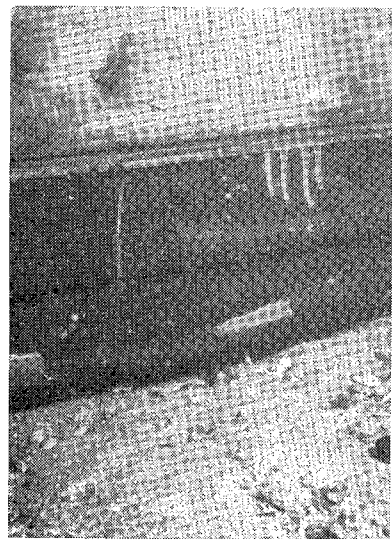
わみを利用して不陸になじませる方法である。また、第5案のトレンチカット法は、水平型枠周囲の掘削溝にモルタルを充填するものである。第6案のゴムスカート法は、水平型枠底部に取り付けたゴムスカートと捨石、サンドマスチック、砂袋を使用して根固めする方法である。第7案のスポンジマット法は、スポンジの柔軟性を利用して不陸になじませるものである。

実験方法および実験の詳細は、文献5)、6)に詳しいのでここでは述べない。

実験の結果、側面にナイロン網を被覆した見掛比重0.27のスポンジマットの水張り試験による型枠荷重（水平型枠の単長当たり作用する一様荷重）と漏水量およびスポンジマット圧縮量との関係を図二に示したように、型枠荷重1.5t/mのとき水圧P=2.0kg/cm²を完全止水でき、型枠沈没と同時にシール効果



図二 スポンジマット（側面ナイロン被覆）水張り試験結果



図三 スポンジマットによるシール状況（水中写真）

を発揮できるスポンジマットが海中実験に供するモルタル洩れ防止材として選定された。

(3) 海中実験

陸上実験の結果適当とされたスポンジマットの海中工事におけるモルタル洩れ防止効果を確認するため、海中実験を実施した。実験の詳細は文献 3)、6) に述べられているとおりであり、図-3 に型枠底部に取り付けたスポンジマットのシール状況を示すように、ダイバーによりスポンジマットのモルタル洩れ防止効果が確認された。

2. 大型設置ケーソン基礎への実用化

(1) 実用化設計

長大橋の大水深設置ケーソン基礎工に適用するために、南備讃瀬戸大橋の施工条件から刃口モルタル洩れ防止材の設計条件を表-2のように設定した。前章において得られた知見を基に、図-4 に示す設計フローに従って実用に供するためのスポンジマットの構造・寸法を検討した。

設計内容はシール機能に関する設計と取付後の安全性に関する設計から成り、設計と併行して実大品の試作と諸特性の確認試験を行い、欠落技術を適宜補填することとした。

a) 基本構造

スポンジマットの基本構造は図-5に示すものとした。すなわち、断面形状は正方形とし、ケーソン刃口部にブラケットを設け、刃口底板よりスポンジマットの高さの1/3だけ上部の位置でスポンジマット上面をボルトと接着剤を併用してブラケット下面に固定することとした。その理由は次のとおりである。

スポンジマットの見掛け比重は概略0.3であり、基材であるポリウレタンの比重は概略1.0であるから、スポンジマット容積の約3割を基材が占め、残りの約7割は空隙部となる。このスポンジマットを圧縮したとき、圧縮率が70%になると、スポンジマットの気泡は目づまりした状態となり、圧縮反力は急激に増し、海底岩盤不陸に密着するための変形量が乏しくなるとともに、破損する危険性も増す。よって過圧縮による破損を防止でき、海底岩盤との密着性にもほとんど支障を及ぼさないことから、スポンジマットの最大圧縮率を多少の安全もみて67%に制限することにした。また継目端面は傾斜面とし、継目接着時の密着の便を図るとともに、ケーソンの沈設によって圧縮されるときに、シールに障害を及ぼす継目部の口

表-2 設計条件

項目	設計条件	備考	
シール条件	海底岩盤の不陸	20 cm(±10cm)	大口径掘削後による仕上掘削
	シール圧	max 16 ton/m ²	海中コンクリートのモルタル圧
	ケーソン沈設後海中コンクリートまでの期間	約3カ月	
	スポンジマット1m長さ当りに作用する鉛直下向荷重	30~50 ton/m	ケーソン水中重量 スポンジマット取付総長
取付後の環境条件	ケーソンの設置水深	max T.P-50m	
	取付後の放置環境と期間	水中 max 3カ月	ケーソン製作ヤード内
	ケーソン曳航速度および仮保留中の流体速度	約4 Kt	対水速度
	ケーソン曳航および仮保留時の水深	10~15 m	

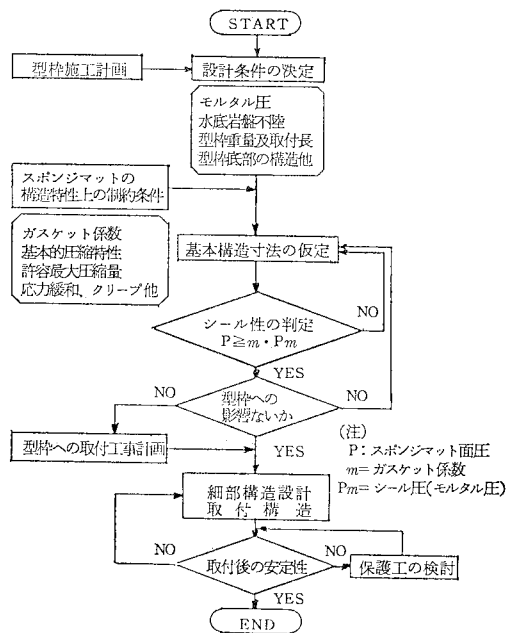


図-4 設計フロー

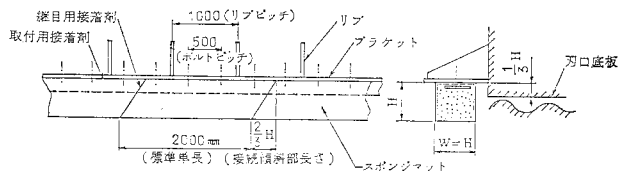


図-5 基本構造

開きの発生を防止する構造にした。

b) シール機能設計

(i) ガスケット係数

スポンジマットはガスケット型式のシール材であり、シール性能の指標として(1)式にて示されるガスケット係数がある⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} m &= \sigma_g / \sigma_i \\ \sigma_g &= F_g / A_g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m ：ガスケット係数

σ_g ：平均締付圧力 (kg/cm²)

σ_i ：流体の圧力 (kg/cm²)

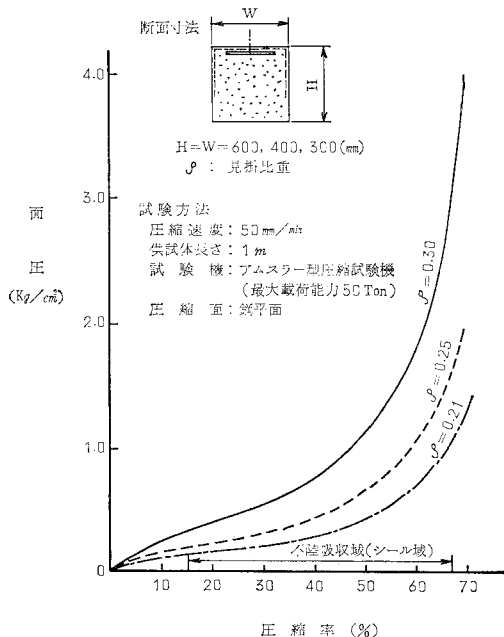
F_g ：ガスケットの締付力 (kg)

A_g ：ガスケットの受圧面積 (cm²)

ガスケット係数の値はガスケットの材質により異なり、接触面の仕上げの程度やシールすべき流体の種類によっても影響される。したがって、個々の使用材料・構造条件に応じた確認試験により、シール性能を把握することが望まれる。スポンジマットのシール性能は 1.(2) で示したように、陸上実験により確認された。すなわち、岩盤の最大不陸 20 cm, 最大傾斜角度 45°, 止水圧 2.0 kg/cm² を、幅 30 cm×高さ 30 cm, 見掛比重 0.27 のスポンジマットに単長当り締付力 1.5 t/m を与えて完全止水することができた。これより、スポンジマットの受圧面積を幅×長さとして仮定し、式 (1) よりガスケット係数を求めると $m=0.25$ となり、この値を以後の設計計算の基礎とした。

(ii) 接地面圧

実際の岩盤条件は実験岩盤のように一定間隔で不陸の山部や谷部が存在するとは限らず、山部や谷部が数mにわたり偏在する場合も考えられる。したがって、実用化設計においては、安全をみて接地面圧の低くなる不陸谷部の接地面圧を式 (1) における平均締付圧力に相当するものとし、かつケーソン沈設後水中コンクリート打設に至る期間のスポンジマットの応力緩和を考慮して、次式により必要とする不陸谷部の面圧の初期値を求めること



図—6 見掛比重と気中圧縮性能の関係

にした。

$$\sigma_{min} = \frac{100}{\alpha} \cdot m \cdot p \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_{min} ：不陸谷部の接地面圧の初期値 (kg/cm²)

α ：一定の期間一定の圧縮率で圧縮放置したあとの面圧保持率 (%)

m ：ガスケット係数 $m=0.25$

p ：シール圧 (kg/cm²)

次に、スポンジマットの圧縮特性と応力緩和を測定し、面圧と面圧保持率を求めた。図—6 は気中圧縮試験の結果より、見掛比重をパラメーターにして圧縮率と面圧の関係を示したものである。

さらに、図—7 に水中および気中で一定の圧縮変形を加え、そのまま放置したときの放置時間と面圧保持率の関係を示す。

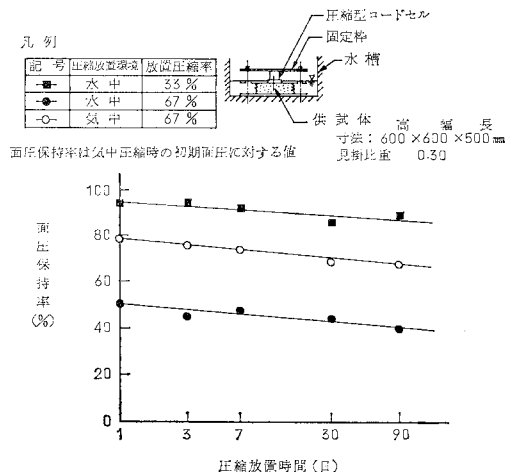
この結果、水中放置の場合の面圧低下が著しいことがわかる。面圧の低下速度は気中放置と水中放置とで大差なく、初期段階から面圧保持率に差がみられた。これは、水中放置の場合、水を張った水槽にサンプルを装着してから直ちに圧縮したのでほとんど吸水していない状態で圧縮したのち一定の圧縮率に保持したものであり、圧縮後短時間でスポンジマットは吸水状態となり、スポンジマット内部の基材相互の摩擦抵抗が減少し、圧縮反力が低下したものと考えられる。

(iii) モルタル圧とシール圧

モルタル圧の算定は鋼設置ケーソン設計要領 (案)⁹⁾ に準じて求めた。スポンジマットのシール圧は、ケーソンの内側から作用する最大側圧とケーソン外側から作用する水圧との差圧として求めた。

(iv) 選定したスポンジマット

面圧が高いので高いシール圧を期待でき、岩盤不陸との密着性を確保しうる柔軟性もほとんど遜色ないことか



図—7 応力緩和試験の結果

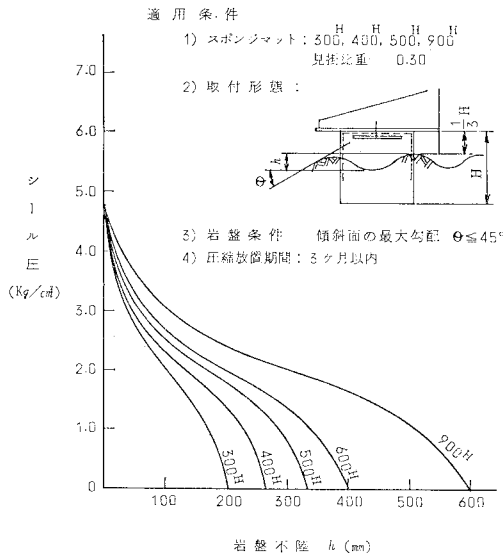


図-8 スポンジマットの高さ、岩盤不陸高さとしール圧の関係

ら、見掛比重 0.3 のスポンジマットを使用し、圧縮放置期間をケーソン沈設から海中コンクリート工までの計画最長期間である 3 ヶ月としたときの岩盤不陸高さとしール可能な流体圧力との関係を式 (2) により求めた。

数値計算の結果は 図-8 に示すとおりで、表-2 に掲げた海底岩盤不陸 20 cm、シール圧 (モルタル圧) 1.6 kg/cm² なる条件のもとで適用可能なスポンジマットは、見掛比重 0.30 として高さ 50 cm 以上となる。本件では大規模工事であるので安全を見て、高さ 60 cm × 幅 60 cm のスポンジマットを選定した。

c) 取付け後の安全性の検討

ケーソン刃口に取付けた後のスポンジマットの安全性を確保するため、ケーソン浮遊曳航時や仮繫留中に作用する流体力に対する安全性、長期海中浸漬による材料や接着剤の劣化性、および沈設後のケーソンの滑動抵抗に及ぼす影響などについて、実際の生産設備により試作した実大サンプルによる試験を行い検討した。

(i) 流体力に対する安全性

曳航時の動圧力または潮流力による流体力を次式で表わすとする⁹⁾。

$$F_D = C_D \cdot W_0 \cdot A \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (3)$$

- ここに、 F_D ：動圧力または流体力 (t/m)
- V ：曳航速度または潮流速度 (m/s)
- A ：スポンジマットの単位長さ当りの流方向の投影面積 (m²/m)
- C_D ：抗力係数 $C_D=1.2$
- W_0 ：海水の単位体積重量 $W_0=1.03 \text{ t/m}^3$
- g ：重力の加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$

このような流体力に対する安全性を、高さ 60 cm × 幅 60 cm × 長さ 1 m のスポンジマットサンプルを使用した取付け後の側面への等分布荷試験による取付け強度の確認により検討した。その結果、載荷重 0.30 t/m × 18 h または 0.35 t/m × 1 h による載荷試験で載荷面の固定端近くから小亀裂を生じた。補強対策としてスポンジマット底面に当て板をし、約 2% 圧縮した状態で保持すると、試験最大載荷重 0.54 t/m × 1 h まで破損は認められなかった。

高さ 60 cm のスポンジマットへの側圧 0.30 t/m は、 $V=5.47 \text{ kt}$ に、同じく 0.54 t/m は 7.34 kt に相当する。設計条件は $V=4 \text{ kt}$ であるが安全率を確保するために、曳航中や長期間の仮繫留中は、スポンジマット底面に当て板をし、約 2% 圧縮保持して補強することにした。

(ii) 接着剤の耐海水性

スポンジマットはエポキシ系接着剤でブラケットに固定し、ウレタン系接着剤で継目接合した。各接着仕様による試験片を最大 1 年間海水浸漬し、90° 剝離試験や垂直引張り試験により接着剤の耐海水性を評価した。各試験片の破断状態は全てスポンジマットの材料破壊であり、両接着剤共実用上十分な耐海水性を有していると判断した (図-9)。

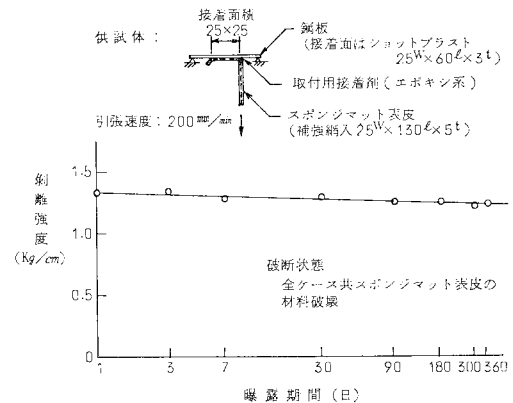


図-9 取付接着力の耐海水性試験結果 (90° 剝離接着力試験)

(iii) 圧縮せん断特性

沈設したケーソンの水平移動に対する適応性を推定すべく、スポンジマットの圧縮せん断特性の測定を行った。試験結果の例は 図-10 に示すようであり、取付面に水平力を与えるとスポンジマットはせん断変形し、水平変位 20 cm 以上で岩盤接触面の端部で開口を生じ、30 cm 以上に達すると局部的に破損した。この結果から沈設後のケーソンの水平移動は 20 cm 以下にとどめ、スポンジマットはケーソンの滑動には寄与しないので、ケーソン水中重量とスポンジマット反力の差である岩盤

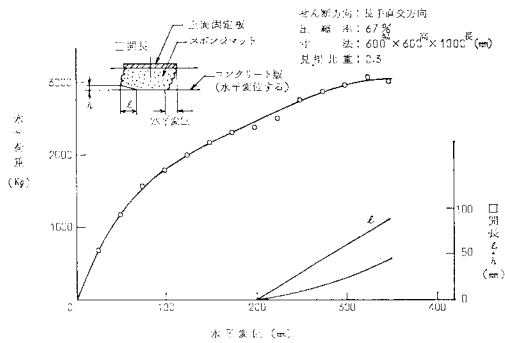


図-10 圧縮せん断試験結果

に直接接する刃口底板反力を滑動抵抗算出の基礎とすることとした。

(iv) その他

海底岩盤の仕上掘削法の特徴から実際に発現する可能性のある不陸岩盤模型を数種作成し、不陸形状と密着性の関係を測定した不陸圧縮試験、スポンジマットの継目部の圧縮性能の測定、ケーソン沈設時に作用する水圧で大きな収縮変形がないことを確認した水圧試験、実海域暴露による海中生物付着性などの諸試験を行い実用に供しうるものと判断した。

(2) 製作工程と製品検査方法

a) 製作工程

図-11 に示すスポンジマットの工場における製造工程に従い、パッチ成型により単長 2m のスポンジマットを 1本ずつ製作した。1本当りの重量は内蔵ボルトを含めると約 250 kg なり、一様な品質を得るために短時間で大容量の原料を混合したあと直ちに注し発泡成型することにした。そこで、容量 150 l の大型混合槽 2基を転倒可能に配した高速ミキサーや瞬時に蓋締めできる

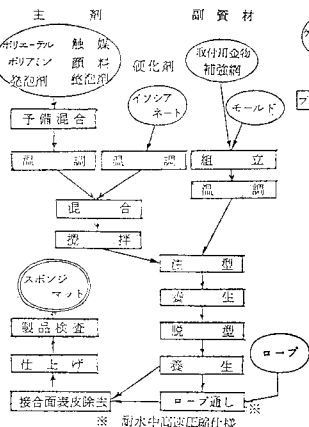


図-11 スポンジマットの製造工程

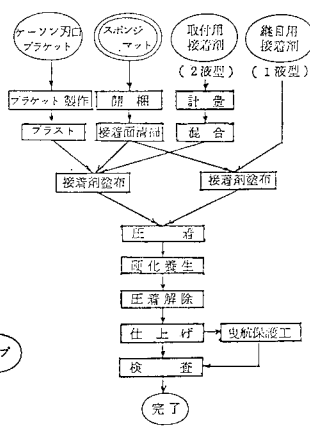


図-12 スポンジマットの標準施工工程

モールド等の生産設備を開発した。

一方、ケーソン刃口への取付けはケーソン製作ヤードにて行い、標準施工工程を 図-12 に示すものとした。フォークリフトやジャッキ等の運搬、圧縮機械を利用し、ボルトと接着剤を併用して、刃口部外周に連接接着した。接着剤の硬化するまでの 1~3 日間は圧着状態で養生する必要があり、スポンジマット底面に鋼板製のパレットをあてがいパイプ支柱で保持した。

b) 製品検査方法

製品検査として、寸法、外観、重量は全数検査した。主要設計品質である圧縮特性は、製品の 1/10 抜取りで実物の圧縮試験を行うと共に、製品と一体成型した高さ 30 cm×幅 30 cm×長さ 25 cm のテストピースによる圧縮性能確認試験を全数行い、バッチ間変動をみた。

各検査の管理限界は、設計上の要求品質を満足することを第一とし、量産試作の結果から得た工程能力や設計品質と検査物性値との相関性に基づいて設定した。

(3) 施工概要と問題点

大型設置ケーソンへの実用化の最初は、南備讃瀬戸大橋 5P であった。スポンジマットを取付けたケーソンは、約 7 ヶ月間の仮繫留を経て、3000 t の大型フローティング・クレーンにて所定の地点に沈設された。しかしながら、このとき着底圧縮されたスポンジマットの外側がほぼ全周にわたって破壊した。破壊部の一部は破片となり海上に浮上したが、幸い大半は海底とブラケット間に圧縮状態で閉じ込められており、ケーソンの刃口漏洩防止の機能にはほとんど支障なかった。

このことから、以後の設置ケーソン基礎へのスポンジマット適用に当たっての対応策を検討すべく、破壊原因の調査を実施した。なお、スポンジマット圧縮時のケーソン沈設条件は次の通りであった。

- ① 設置水深：T.P. -32m
- ② 沈設速度：60~127 mm/min
- ③ 沈設荷重：沈設初期 2800 t、ケーソン浮力室への注水後 4000 t
- ④ スポンジマット水浸期間：7 ヶ月
(昭和 55 年 3 月~10 月)

原因確認試験として、水中高速圧縮試験と回収破片の物性試験を行った。水中圧縮試験は実際の条件に近づけるように、実大サンプルの長手端面を防水し、拘束板にて長手方向の変形をなくし、吸水量 0.5 kg/l に強制含水させ、圧縮速度 60 mm/min と 120 mm/min で行った。その結果、圧縮率 40~50% で幅寸法は原幅の約 1.5 倍となり、中央部付近でクラックを生じた。最大圧縮率 67% では側面の表皮にもクラックを生じ、ほぼ

実際の現象を再現した。

一方、回収破片の物性試験の結果は、耐海水性試験の既得データと大差なく、顕著な劣化は認められなかった。

以上の結果から、破壊原因としては、吸水状態で高速圧縮されたさい、内部の水が表皮から十分排水できず、圧縮率の増大につれて幅方向への変形も増し、破壊に至ったと考えられる。

3. 水中高速圧縮に対応する構造の改善

(1) 研究目標と方針

2.(3) に述べた経験を踏まえ、長期間の海中浸漬や水深下において相当量吸水したスポンジマットを高速で圧縮しても破損することのない構造仕様の検討を行った。研究目標として前記設計条件(表-2)に加えて、ケーソンの沈設速度を 200 mm/min と設定した。なお、取付け後の海中浸漬は、水深 10~15 m で最長 6 ヶ月とし、沈設直前の数日間は設置水深 T.P. -50 m 近傍に位置するものと考えた。水中高速圧縮時の破損原因の確認試験結果から、スポンジマットは表皮が存在すること、内部の連続気泡の泡径が小さいことから、高速圧縮時に必要な排水ができなかったと考えられる。そこで、排水距離を短くすべく、適所に排水穴を設ける等の水抜構造を考案し、水中圧縮試験にて効果を確認することとした。スポンジマットの泡径を大きくしたり、見掛比重を減ずることによって透水性を増す対策、あるいは、スポンジマットの内部にファイバチップ等の補強材を混入したり、外部をネットで被覆して破壊強度を高める対策も考えられる。しかし、これらの対策は圧縮性能やシール性能に及ぼす影響が大きいと予想されるので次善の策とした。

(2) 評価方法

水中圧縮試験にて水中高速圧縮時の破損防止効果を測定し、選定した構造案は気中圧縮試験を行い設計品質を満足しているかを確認することとした。

a) 供試体

水中圧縮試験の供試体寸法は、一次評価では高さ 30 cm×幅 30 cm×長さ 25 cm、二次評価では実大品高さ 60 cm×幅 60 cm×長さ 50 cm とした。供試体の長手方向端面は、実際の沈設時条件に近づけるため、長手方向端面から外部への排水が起らないようにウレタン系の接着剤を塗布して防水した。

供試体の吸水量は、スポンジマット内の空気が水圧で圧縮された容積分に吸水すると仮定して求めた式(4)を

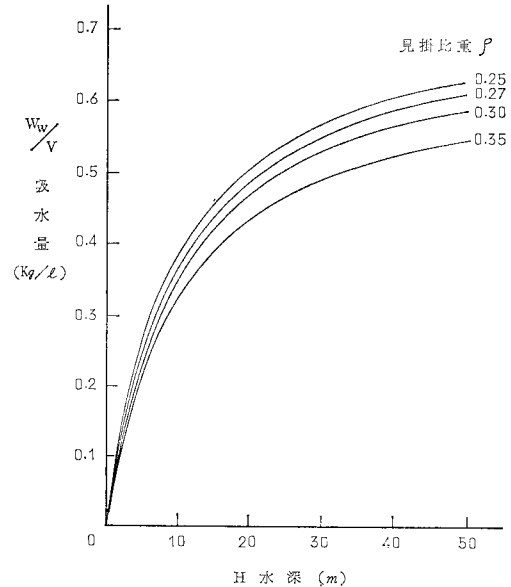


図-13 水没時水深と吸水量の関係

用いて試算した 図-13 を参考とし、 $0.5 \pm 0.1 \text{ kg/l}$ に設定した。供試体への吸水は、非加圧水槽内にて 60% 圧縮した状態から水中で復元させて行った。

$$\frac{W_w}{V} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_r}\right) \left(1 - \frac{1}{1+H/10}\right) \rho_w \dots\dots (4)$$

ここに、 V : スポンジマットの容積 (l)

W_w : スポンジマット内に浸入した水の重量 (kgf)

ρ : スポンジマットの見掛比重

ρ_r : スポンジマットの基材の比重 ($\rho_r=1.0$)

ρ_w : 水の比重 ($\rho_w=1.0$)

H : 水深 (m)

b) 試験方法

スポンジマットの圧縮は最大荷重 50 tf のアムスラー型圧縮試験機を用いて行った。圧縮速度は南備讃瀬戸大橋 5P ケーソンの沈設速度の実測値 127 mm/min の値を参考にして、試験機最大能力の 180 mm/min とし、圧縮率は基本構造として設定した値 67% に基づき最大

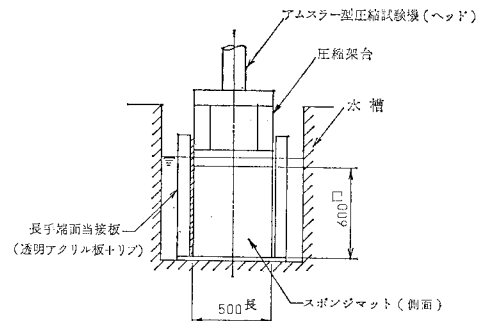


図-14 水中圧縮試験装置

70%とした。

実際の使用状態に近づけるため、供試体の長手方向端面は透明アクリル板に当接させ、長手方向の変形を拘束した試験装置(図-14)を用いた。

(3) 耐水中高速圧縮仕様の検討

a) 排水構造の検討

圧縮時の排水を促進するための水抜構造の比較案として、表皮や幅方向に貫通する穴をあけたもの、表皮を除去したもの、切断して切断面にロック材シートや低比重の軟質フォームを積層したもの、幅方向貫通穴にロープを中通したものを等をとりあげ、これらを水中圧縮試験にて評価した。

高さ 60 cm×幅 60 cm×長さ 50 cm の実大品サンプルの試験結果は、表-3 に示すように、従来仕様に比してクラックの発生が少なくなるかクラックの発生がなくなっており、いずれの方法も改善効果が認められた。以上の結果から、実大品サンプルで破損を防止できた構造は次の3形態であった。

- ① 側面の表皮を除去し、3層に切断して切断面にロック材または軟質ウレタンフォームのシートを介在させ、外面をネットで被覆したもの(サンプル No. 4)。
- ② 側面の表皮を除去し、幅方向に貫通する穴をあけ、穴にロープを中通したものを(サンプル No. 5)。
- ③ 幅方向に貫通する穴をあけ、穴にロープを中通したものを(サンプル No. 7)。

これらを比較して、性能におよぼす影響がほとんどないこと。製作性に優れていることから、③の構造が最も実用的と判断した。なお、③の構造にて製作性を向上しうるものとして、ロープ等の補強材を型を組み込ん

で一体成型したものについて試験したが、側面近傍で補強材とスポンジマットが剥離し、大半は破損した(サンプル No. 6)。

一連の試験結果より、水中高速圧縮に耐えるスポンジマットの構造要件として下記の知見が得られた。

- ① 透水性の高い排水路を内部に設けること。
- ② 排水距離(排水路の間隔)は短いこと。
- ③ 圧縮することによって排水路がつぶれたり、ふさがったりして、透水性を著しく低下させないこと。
- ④ 圧縮時にスポンジマットの幅方向への変形拡大を抑制するために、上記の排水性向上の他に、物理的な拘束効果や補強の得られること。

b) 取付構造の検討

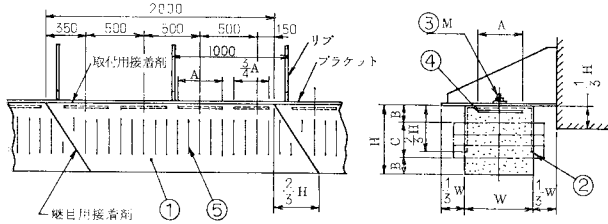
実用的と判断したロープ中通し構造のサンプルを用い、取付部の形状と水中圧縮時の変形性を観測した。その結果、スポンジマットは平板間で 67% 圧縮したときは最大部の幅寸法が約 90 cm と原寸法の約 1.5 倍に拡張したが破損はなかった。上部取付平板の幅をスポンジマットの幅寸法と同程度とすると、67% 圧縮したときにスポンジマットの側面部が上部取付平板よりはみ出し、さらに高い圧縮率で使用されると平板の外縁で圧断されると考えられた。よって、スポンジマットが圧縮されたとき、取付用ブラケットのエッジで圧断されたり、ケーソン刃口で噛み切られるのを防ぐために、取付用ブラケットの幅寸法はスポンジマットの原幅の 1.5 倍以上とすることが望まれる。

c) 選定構造と水中圧縮特性

最終的に選定したスポンジマットとその取付構造は、図-15 の Type 600 H として示すものである。これは、

表-3 耐水中高速圧縮構造の検討結果

サンプルNo.		1	2	3	4	5	6	7
試験項目	構造	従来仕様	側面スポンジ除去	側面スポンジ除去 側面に貫通穴 ロープも中通し	側面スポンジ除去 水平方向に切断 貫通にロック材を はさむ 外面ネット被覆	側面スポンジ除去 側面に貫通穴 ロープ中通し	ロープを埋込んで反照 側面スポンジ除去	側面に貫通穴 ロープ中通し スポンジ埋め
	仕様	50×100ピッチ X200深穴	側面スポンジ除去	側面スポンジ除去 + 100×(高さ) 長さ100ピッチ貫通穴 + 厚み幅寸法も40× 3層穴中通し	側面スポンジ除去 + 水平方向3層に切断 + 層間にロック材シート をはさむ 外面スポンジ設置	側面スポンジ除去 100×100ピッチ貫通穴 + クッション + 60×40穴を 5段中通し	ロープロープ40× 40×100ピッチ X4層をばらばら + 100×100×150ピ ッチX200深(ロープ 埋め時に) 側面スポンジ除去	100×100ピッチ貫通 穴(4枚) + ポリウレタンロープ40 ×40×穴中通し (4枚)
600 × 300	変形率	0.33 %/Z	0.503 %/Z	0.491 %/Z	0.568 %/Z	0.616 %/Z	0.534 %/Z	0.550 %/Z
	圧縮速度	1.00 mm/min	1.00 mm/min	1.80 mm/min	1.80 mm/min	1.80 mm/min	1.80 mm/min	1.80 mm/min
	クラック発生時の圧縮率	40 %	65 %	50~60 %	60~70 %	60~70 %	67 %	-
	最大圧縮時の寸法			1050 mm	780 mm	590 mm	835 mm	965 mm
クラックの有無 及び 破損状況								
備考		外面被覆すると高 圧時の変形を抑制		不連続変位が低下する スポンジの保持が困難		ロープの幅が不足	外面被覆込みの平坦面 を嵌め込んだもの	式図で規定

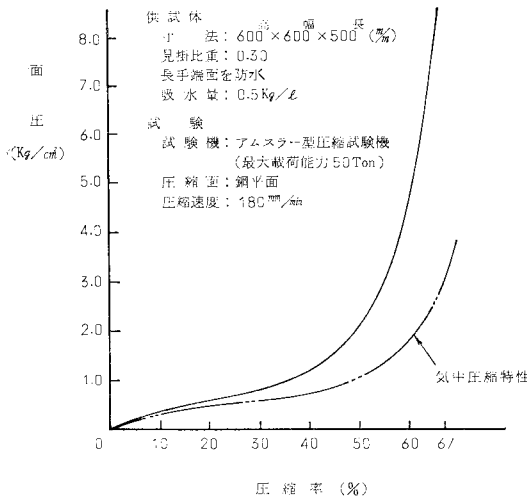


構成材料

記号	部品名	材質	仕様	備考
①	スポンジマット本体	特殊ウレタンスポンジ	セル径5mm	連続気泡型
②	補強板	ビニロン	5mm×5mmメッシュ	
③	取付ボルト	スチール	M20 - M24	ボルトピッチ500mm
④	内蔵鉄板	スチール	S S 41	ボルト付
⑤	中流しロープ	ポリエチレン	4mmφ×4本/穴 ピッチ130	洋田製鋼

主要寸法							
Type	高さ(H)	幅(W)	鉄板幅(A)	ロープ間隔(B)	ロープ径(C)	ボルト(M)	備考
300H	300±10	500±10	200	-	-	M-20	ロープなし
400H	400±10	400±10	300	100	200	M-20	ロープ3本
600H	600±10	600±15	400	150	530	M 24	ロープ4本

図一15 スポンジマットの標準構造



図一16 水中圧縮特性

従来のスポンジマットに幅方向に貫通する穴(10mmφ×100mmピッチ)をあけ、各穴に3つ打ちのポリエチレンロープ(4mmφ×4本/穴)を中通しし、ロープの端部はスポンジマットの側面より100mm突出させて、鉛直方向の各端部を連結したものである。

上記スポンジマットの水中圧縮特性は、図一16に示す通りであり、同図に破線で示した気中圧縮特性は、図一6との比較に見られる通り従来品と同等であった。面圧は気中圧縮に比し水中圧縮の方が大きく、圧縮率の増加に伴ってその差も増した。また、面圧が急激に上昇し始める圧縮率は、気中圧縮の約60%に対して水中圧縮の場合は約50%と小さくなった。これらの差は次のように考えられる。

吸水していない状態のスポンジマットはウレタンと気泡内の空気とで構成されており、その低反力性および高

圧縮性はこの空気存在に起因している。このスポンジマットが水中で保持されると、水圧により連続気泡内に水が浸入して吸水し、水圧と内部に閉じ込められた空気の圧力とウレタンのバネ反力とが釣り合った状態で平衡すると考えられる。この吸水したスポンジマットを圧縮すると、気中圧縮の場合に比して内部の水の排水抵抗および水の非圧縮性による有効圧縮容積の減少のため面圧が大きくなり、圧縮率が大きくなるほど排水路が狭くなって水が排出されにくくなるため面圧の差も大きくなる。さらに圧縮率が大きくなると、吸水した場合は気中圧縮の場合よりも吸水量だけが有効圧縮容積が小さいため、圧縮率の小さいところで面圧が急激に上昇すると考えられる。

南備讃瀬戸大橋 7A ケーソンに選定した耐水中高速圧縮仕様のスポンジマットを適用するに当たり、予想される圧縮速度条件での水中圧縮試験、加圧水槽内での水中圧縮試験、応力緩和試験を行い、各試験共実用に供しようとの結果を得た。

4. 実施例とその結果

昭和 45 年の海中実験以後、現在までにスポンジマットを刃口部のモルタル洩れ防止材として使用した本州四国連絡橋の設置ケーソン基礎の実施例は表一4に示すとおりである。

海中実験で実用性が確認された後のフィールド施工の最初は4基のコンクリートケーソンを沈設して行われたドック拡張工事であり、高さ30cmのスポンジマットによって水深18mに沈設したケーソンの底室を無気圧でドライアップし、工期の大幅な短縮を実現した¹⁰⁾。

ついで昭和47年には、同じく高さ30cmのスポンジマットが黒之瀬戸大橋下部工の設置ケーソン基礎のプレパックドコンクリートによる水中コンクリートの漏洩防止材として使用された。潮流は8ktの急潮流下における工事であり、スポンジマットは潜水夫に依存しないモルタル洩れ防止材として非常に効果的との評価を得た¹¹⁾。

昭和55年からは、本州四国連絡橋の備讃瀬戸大橋、櫃石島橋の水深25m以上の大水深に設置した大型設置ケーソンのモルタル漏れ防止材として、高さ60cm、40cmの大型スポンジマットが使用された。

大型スポンジマットの実用化フィールド施工の最初であった南備讃瀬戸大橋5Pでは水中高速圧縮から一部破損したが、必要なシール機能は得ることができた。それ以後のケーソンには、排水性を向上したロープ中通し構造のスポンジマットが使用された。南備讃瀬戸大橋7A

表4 スポンジマットの本四橋設置ケーソン基礎への施工実績

工 事 名 (基礎 No.)	南備讃瀬戸大橋下部工			礪石島橋下部工		
	(5P)	(7A)	(6P)	(3P)	(2P)	
場 所	香川県～岡山県瀬戸内海					
施 主	本州四国連絡橋公団					
工 工 (ケーソン製作)	大成建設JV (日本鋼管)	鹿島建設JV (三井造船JV)	鹿島建設JV (三菱重工JV)	西松建設JV (日本鋼管)	同 左 (住友重機)	
工 期	1980	1981~1982	1982	1983	1984	
使 用 条 件	自來水 深 (m)	3.2	5.0	5.0	2.5	2.8
	潮 流 (Kt)	6	4	4	4	4
	ケー 寸 法 (m)	27×5.9×3.8	5.9×7.5×5.5	3.8×5.9×5.5	2.9×4.5×30.5	2.5×4.6×32.5
	イン 重 量 (t)	5000	19500	9700	5000	2800
シ ー ル 条 件	シ ー ル 条 件	プレバッドコンクリート完全シール			トレミーコンクリート 完全シール	横間め モルタルシール
	シール圧 (t/m)	1.4	1.6	1.3	1.5	3.4
スポンジ マ ッ ト	底地盤不陸率	200 ~ 300				
	Type	600H	600H	600H	600H	400H
マ ッ ト 長 (m)	167	400	189	148	136	
結 果	プレバッドコンクリートを完全シールできた。	同 左	同 左	同 左	横間めモルタルを完全シールしケーソン内流入を防止	

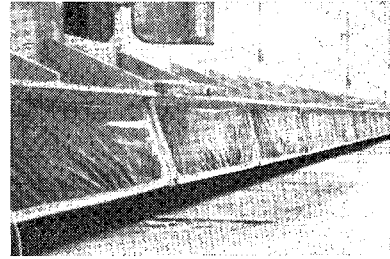


図-17 ケーソン底部の刃口周囲に取付完了したスポンジマット
(幅 60 cm×高さ 60 cm×総長 400 m)

とができた。

本研究成果を基に、今後ますます大型化かつ大水深化することにより施工環境がきびしくなると予想される海中大型構造物の建設計画に合わせ

ケーソンへの取付状態を 図-17 に示す。

これらの実施工を通じて確認されてきた事項を以下に列記し、スポンジマットをケーソン刃口部等の漏洩防止材として適用する場合の留意点としたい。

- ① 潜水作業上の制約の大きい、大水深や強潮流海域における刃口シール材として特に有効である。
- ② 海底岩盤の不陸の大きさは、シール性能を左右するので、仕上掘削の精度はできる限り高めることが望まれる。
- ③ 沈設したケーソンの滑動抵抗を求めるに当たっては、ケーソン水中重量とスポンジマット反力の差に刃口底面ととの摩擦係数を乗じて求める刃口底面における水平抵抗で考える。
- ④ ケーソンの沈設はやり直しがきかないと考えるべきである。位置修正のために沈設したケーソンを再び吊り上げる場合は、ケーソンの水平方向の振れを 20 cm 以内に制御できないと、スポンジマットが破損する危険がある。

あとがき

本論文は、海洋土木工事の大型化と大水深化に対応して、大型設置ケーソン工法を使用する場合のケーソン刃口と凹凸のある海底岩盤との間隙のシール、並びにモルタル洩れの防止のための高分子土木材料の開発と適用に関する研究をとりまとめたものである。その研究の主体は、本州四国連絡橋の建設計画に沿って具体化された基礎研究から実用化研究に至る過程に従って系統的に行われた。

その結果、ケーソン重量 2 万 tf、取付全長 400 m、水深 50 m、海底不陸 20~30 cm までの施工条件に対応できる大型設置ケーソン刃口モルタル洩れ防止材を得るこ

て、施工中の安全性を高め、さらに大きな海底不陸にも対応できるケーソン刃口モルタル洩れ防止材の開発を土木技術と高分子技術との境界技術によって進めていく必要がある。

最後に、本研究を行うにあたり、長きにわたり土木技術面においてご援助、ご指導をいただいた本四公団の浅間敏雄元理事、杉田秀夫元設計部長、桜井紀朗今治工事事務所長、他本四公団の方々、土木工事関係の方々および本論文をまとめるに当り直接ご指導いただいた東京大学土木工学科伊藤学教授に深く感謝の意を表したい。

また、本論文作成に当たって、ご助力を願った太田 亘、長谷川恵一両君に対しお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会土木施工研究委員会：海上工事の施工技術、1985年5月。
- 2) 桜井・壺阪・宮坂：特殊コンクリートの施工、pp. 88~90、共立出版、1978年。
- 3) 日本鉄道建設公団：本州四国連絡橋基礎工調査実験報告書、1970年3月。
- 4) 小林：ゴム材料、土木材料ハンドブック、Vol. 26, No. 4、1985年。
- 5) 小林：大型水中コンクリート構造物建設に使用される型枠止水材料について、コンストラクション、第8巻、12号、1970年12月。
- 6) 浅間・桜井・原田：海中型枠工法に関する施工実験、橋梁と基礎 5-9、1971年9月。
- 7) 岩波・近森・藤島：パッキンとシールの設計、オーム社、pp. 21~30、1971年。
- 8) 本四公団：鋼設置ケーソン設計要領(案)、1972年2月。
- 9) 土木学会：海洋鋼構造物設計指針(案)解説、p. 57、1976年。
- 10) 清水建設(株)：佐世保重工ドック工事、土木クォータリー、No. 21, pp. 39~45、1972年。
- 11) 鹿島建設(株)：黒之瀬戸大橋下部、鹿島建設技報、pp. 16, 17, 36、1973年3月。

(1985.11.6・受付)