

マルチセルラー式防波堤の開発について

(運) 第三港湾建設局 正会員 小 島 朗 史
 " 正会員 森 脇 敏 雄
 " 正会員 藤 崎 治 男
 " 岩 田 望
 " 正会員 難 波 喬 司

1. はじめに

近年外海の大水深域での防波堤建設の要請が高まってきている。このような大水深域では、碎波による波高の減衰がないため設計波高が一段と高くなり、ケーソン式混成堤等の従来の構造をそのまま適用すると非常に大断面となり膨大な建設費を要するものとなる。このため、比較的小断面であって厳しい波浪条件に耐え得る新しい構造の防波堤の実用化が期待されている。マルチセルラー式防波堤は、この期待に応える新構造防波堤の一つであり、波力をうまく上部に逃がすことにより、通常のケーソン式混成堤に比べて、堤体に作用する水平力を小さくすることができ、かつ波力の鉛直下向き成分が生じるため、波力に対し高い安定性を有する。この特徴により特に大水深域で波浪条件が厳しいところでは、従来構造に比べて建設費を相当程度低減できる可能性がある。

当局においては、これらのすぐれた特性を有するマルチセルラー式防波堤の実用化のために研究を進めており現在、実用化に向けての最終段階として、設計法・施工法の検証をすべく、和歌山下津港において現地実証試験を行っている。本論文では、この試験堤を例として、マルチセルラー式防波堤の設計・施工法について述べる。

2. 形状及び水理特性

(1) 形状及び原理

マルチセルラーケーソンは、図-1に示すように、ケーソンの上部に多段の曲り斜面壁を持ち、これらの曲り斜面壁の中空部がケーソンの前面及び後半部の天端面に開口している。図-2に示すように前面の開口部に適切な開口比のスリット壁あるいは多孔壁を設けて反射波及び伝達波を小さくすることもできる。原理としては、ケーソンに波が作用すると、波は水流となって多段の曲り斜面をかけ上る。このとき、波力は斜面に垂直に作用するため、波力の水平成分は小さく、かつ鉛直下向きの波力成分が生じる。このため滑动波力・転倒モーメントが小さく、端趾圧もそれほど大きくならない。

本構造のアイデアは、図-3に示す斜面ケーソンに端を発している。

すなわち、単純な斜面ケーソンでは相当程度天端を高くしないと越波が多く背後の静穏度を確保できないこと、斜面長を十分確保するためには相当程度の幅が必要となることなどの欠点がある。そこで、図-3に示すように比較的狭い幅で天端高が確保できるよう直線状の斜面壁を上向きに凹状の曲り斜面壁とし、かつそれを数個に分割して鉛直に積み重ねることにしたものである。このアイデアは、防波堤用異形ケーソンとして、昭和55年11月国有特許の公告決定をみている。

(2) 水理特性

水理特性については、谷本らが、水理模型実験により、作用波力、反射率、伝達率等について研究を行っている。研究結果の概要は次のとおりである。

1) マルチセルラーケーソン基本型の伝達波は通常ケーソンに比べて明らかに高い。しかし、前面開口部にスリット壁を設けて消波型とすることによって、通常ケーソンと同程度の伝達波とすることができ、かつ反射波を著しく軽減することができる。

2) マルチセルラーケーソンの安定性の検討に用いる波力は、図-4に示すように上段曲り斜面壁天端の高さからケーソン下端までの不透過な直立壁を仮想して、それに合田式において波圧係数 α_2 を0とおき、かつ波圧の作用高さ、波圧強度ともに減係数 λ を乗じた波圧が働くものとして算定してよい。このとき、ケーソン底面に働く揚圧力は曲り斜面壁に働く波力の鉛直成分と相殺するものとして考慮する必要はない。てい減係数 λ は基本型の場合0.6、消波型の場合0.8程度が適当である。

3) 曲り斜面壁には前面開口部からの流入、はい上り、上面開口部からの越波による打ち込みによって変動の著しい波力が作用するが、大きさはそれほどではない。中段曲り斜面壁には $0.5 \cdot W_0 \cdot H$ 程度の強度の等分布波力が作用すると考えればよい。消波型の前面スリット壁支柱材に働く波力は上・下段とも $0.75 W_0 \cdot H$ 程度と考えれば十分である。

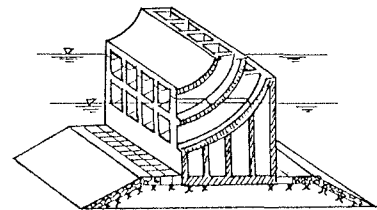


図-1 マルチセルラー式防波堤（基本型）のスケッチ

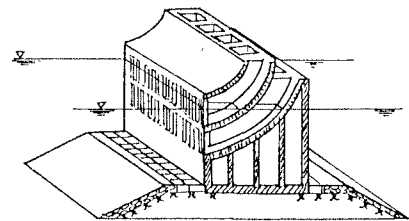


図-2 マルチセルラー式防波堤（消波型）のスケッチ

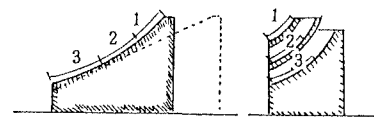


図-3 マルチセルラーケーソンのアイデアへの経緯

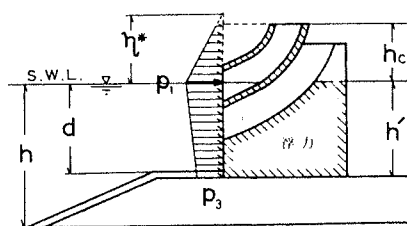


図-4 安定性の検討に用いる仮想波圧分布

ここに、

$$\eta^* = 1.5 \lambda H_{\max}$$

$$p_1 = \alpha_1 \lambda w_0 H_{\max}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$w_0 : \text{海水の単位体積重量 (1.03 tf/m}^3\text{)}$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]$$

$H_{\max}$: 設計計算に用いる最高波高 (m)

L : 設計計算に用いる波長 (m)

3. 現地実証試験の概要

現地実証試験は、①実際に試験堤を製作・据え付けし、施工上生じた問題点、要改良点の工夫・解決によって、5項で提案する施工法の検証を行い、施工法を確立するとともに、②波浪時のケーソン内応力測定等の各種計測によって得られたデータをもとに、4項で提案する設計法の検証を行い、設計法を確立しようとするものである。

試験堤(函長15m)は、現在延伸中の和歌山下津港南防波堤の一部として図-5に示す位置に通常ケーソンの間に挟んで設置する。南防波堤の標準断面は消波ブロック被覆堤(混成堤)であるが、消波ブロックによる影響が試験堤に及ぶことをさけるため、実験堤の両側のケーソン3函ずつについては、消波ブロックを設置しないこととした。マルチセルラーケーソン部の防波堤断面は、図-6示すとおりである。

試験堤は、既に製作完了し、今年台風期前までに現地に据え付け、約2年間の観測に入る予定である。計測目的、計測項目及び計測器設置位置は、表-1、図-7に示すとおりである。

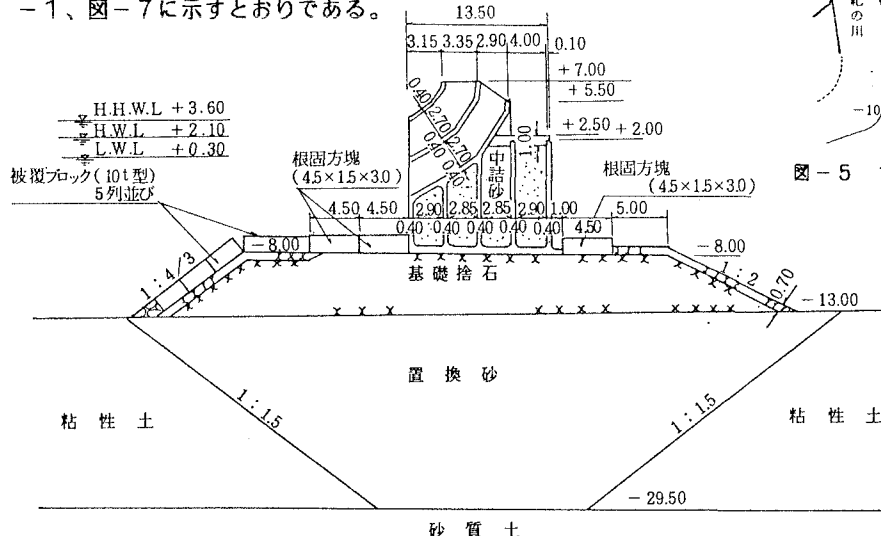


図-6 防波堤断面図

表-1 計測項目

計測項目	計測計器	測点数	容 量	測定方法		計 測 目 的
				動的	静的	
波高周期	波高計	1		○		作用外力の推定
波 圧	波圧計	14	2 kg/cnf (2) 5 " (12)	○		堤体全体の安定性の検証(滑動)
鉄筋応力	鉄筋計	48	3,000 kg/cnf	○		部材の安全性の検証
端 趾 圧	鉄筋計	8	3,000 kg/cnf	○		堤体全体の安定性の検証(転倒)
揚 圧 力	揚圧力計	2	2 kg/cnf	○		" (滑動)
加 速 度	加速度計	1	1 G	○		" (振動特性)
傾 斜	傾斜計	1	± 1 deg		○	" (転倒)

4. 設計方法についての検討

和歌山下津港内に設置する現地実証試験堤(函長15m)の設計を例として設計法について記述する。

(1) 設計の順序及び設計条件

マルチセルラー式防波堤の設計は、通常のケーソン式混成堤の設計と同様に、図-8の順序で行う。また、設計条件は、表-2に示すとおりである。

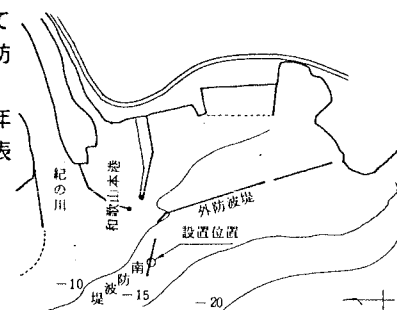
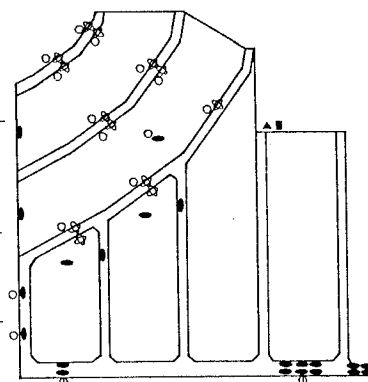


図-5 マルチセルラーケーソン設置位置



凡 例
○ 波圧計 ○ 揚圧力計
◇ 鉄筋計(2方向) ■ 傾斜計
● 鉄筋計(1方向) ▲ 加速度計

図-7 計測器設置位置

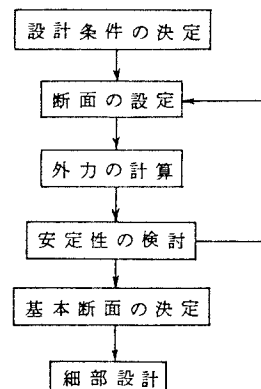


図-8 設計の順序

(2) 断面の決定

マルチセルラーケーソンの断面形状を規定するために決定すべき諸元は、図-9¹⁾に示すとおり非常に多く、それによって多様な形状が考えられる。形状は、これらの諸元の水理特性に及ぼす影響及び施工性(経済性)を検討して、最も合理的なものとするべきである。この観点から、試験堤の形状の決定にあたっては、様々の形状を提案し、検討を行った。水理特性に疑問のあるものは除外し、最終的には、表-3に示す2案について施工性の比較を行った。マルチセルラーケーソン1函当りの製作費に占める型枠組立、組外し及び支保工の費用は一函当りの製作費の約4割を占めるが、Bタイプ(直線型)は、Aタイプ(原形型)と比較して、これらの型枠組立等の費用が約10%少い。よって、試験堤形状としてBタイプを選定した。

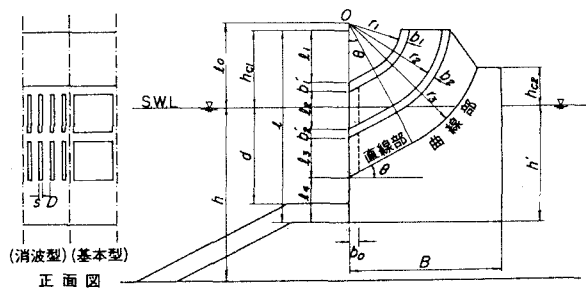


図-9 マルチセルラーケーソンの構造諸元

表-2 基本設計条件

設計波高	$H_{1/3} = 5.0 \text{ m}$ $T_{1/3} = 12.0 \text{ sec}$
設計波向	防波堤法線直角方向
設計潮位	$H.H.W.L + 3.60 \text{ m}$ $H.W.L + 2.10 \text{ m}$ $L.W.L + 0.30 \text{ m}$
設計震度	$k_H = 0.15 (0.15 \times 1.0 \times 1.0)$
現地盤水深	- 13.0 m

	常時	地震時
滑動に対する安全率	1.2 以上	1.0 以上
転倒 "	1.2 "	1.1 "
基礎の支持力 "	2.5 "	2.0 "
偏心傾斜荷重 "	-	1.0 "
円形すべり "	1.2 "	-

表-3 形状タイプ

	①タイプ(原形型)	②タイプ(直線型)
概略図	断面図 	断面図
特徴	(1) マルチセルラー部の形状は、「模型実験から提案されている断面諸元」に従うものである。 (2) マルチセルラー部の曲り斜面壁は、直線部と曲線部とで構成される。 (3) 模型実験より得られた水理特性を再現することを目的としたものである。	(1) 曲り斜面壁の曲線部を、さらに大きな直線で近似化したものである。 (2) 直線化することにより、さらに施工性の向上を目的とする。

(3) 外力計算

外力は、2.(2)で述べた谷本らが提案している方法を用いて計算した。すなわち、安定計算に用いる水平波力は、通常のケーソン式混成堤に比べて6割に減じ、揚圧力は無視した。また、部材の設計に用いる波力は、セルラー部内では、 $0.5 \sim 0.75 W_0 \cdot H_{\max}$ の値で等分布荷重として働くものとした。施工時に作用する荷重を考慮して、部材設計に用いる荷重条件は、図-10に示すとおりとした。

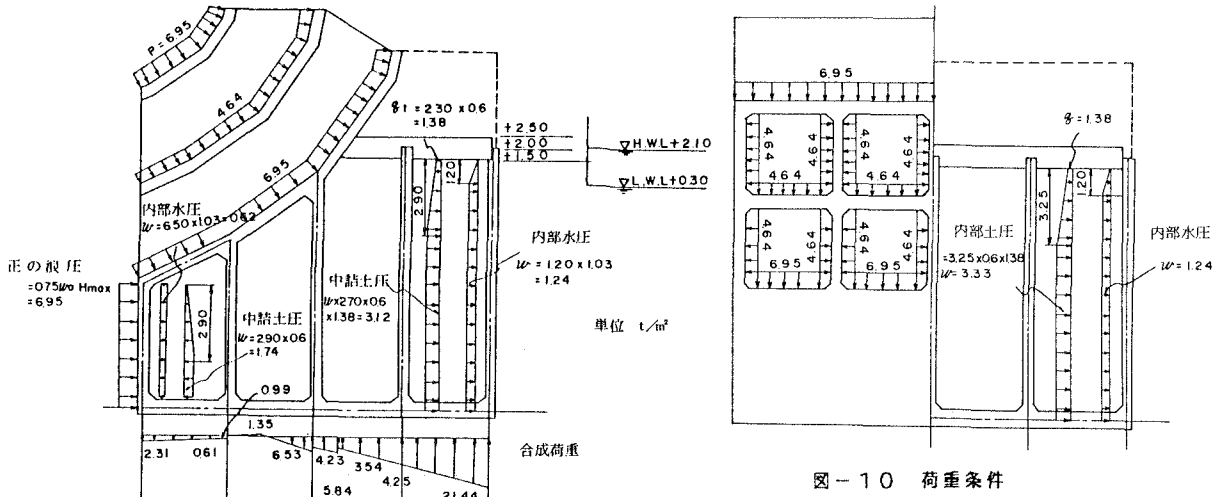
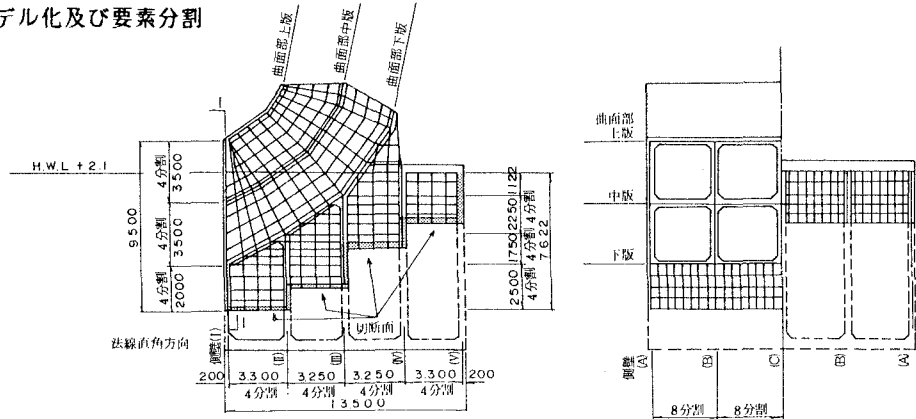
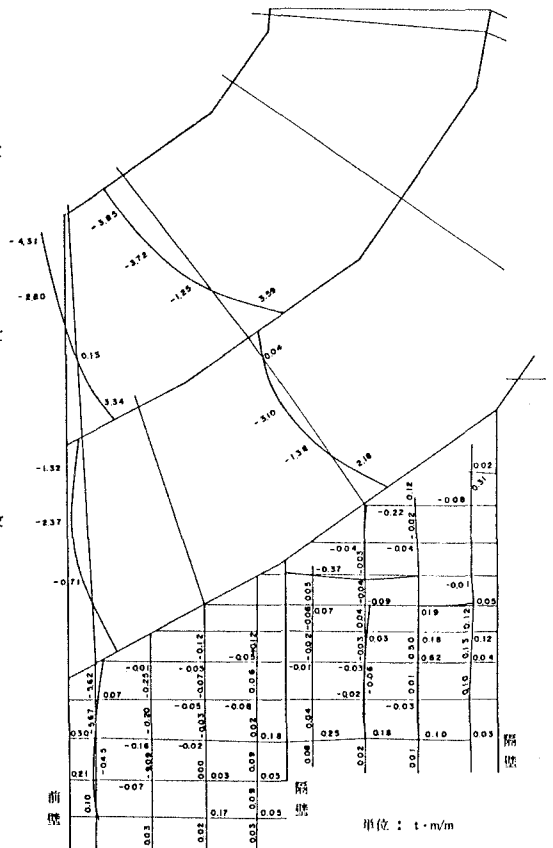
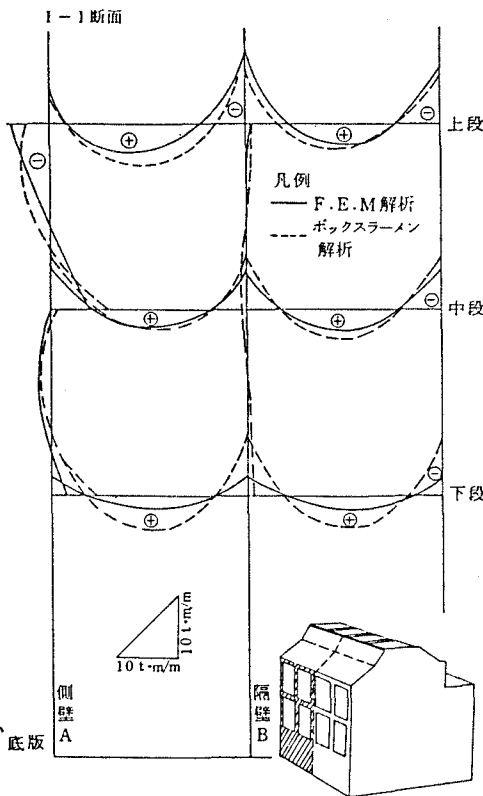


図-10 荷重条件



图



の計算手法（固定版としての解析）を用いて設計すればよいことがわかった。

なお、マルチセルラーケーソンは、複雑な構造であることから、ケーソン吊り上げ時に予期せぬ応力集中が生じる恐れがあるため、吊り上げ時についても、FEM解析を行い、ケーソン内発生応力を検討した。この結果、特に応力集中は生じないことがわかった。

ウ) 部材設計

ア)、イ) の設計方法により計算された応力を用い部材の設計を行った。計算の結果、配筋は、D13～D25鉄筋10～40cmピッチとした。コンクリート1㎡当りの鉄筋量は、約90kgであり、これは、同じ設計条件の通常のケーソンに比べてやや多い鉄筋量である。

以上の検討により、マルチセルラー式防波堤の設計方法は、通常のケーソン式混成堤に用いられている設計法を準用することによって簡便に計算できるようになった。なお、設計したマルチセルラーケーソンの諸元は、重量約2,000 ㌧、コンクリート量約800 ㎡、高さH=15m、幅B=13.5m、長さL=15mであった。

5. 施工方法についての検討

マルチセルラーケーソンは、優れた水理特性を有しているため、通常ケーソンに比べて堤体幅を小さくできるものの、その形状が複雑であるためコンクリート1㎡当りの施工単位が高い。このため、合理的な施工法の開発が、マルチセルラー式防波堤の適用範囲を大水深・大波浪域に限らず、より広い範囲とするためにきわめて重要である。この観点から、ケーソン製作工、運搬・据付工、中詰工等について、施工法の検討を行った。ここでは、試験堤の施工方法を例として、マルチセルラー式防波堤の特徴的施工法について、検討結果を記述する。

(1) 製作工

① 製作方法

ケーソンの形状は、4. (2) の検討により、斜面壁部直線近似型とした。製作方法については、表-4に示すように、一体製作案とプレキャスト製作案（大プレキャスト案、中プレキャスト案、小プレキャスト案）に分類し、それぞれ施工の難易、経済性等について検討を行った。

大プレキャスト案による接合の場合、陸上クレーンでは能力が不足するため海上クレーンを使用せざるを得なくなり、施工費が高む。また、プレキャスト部材とケーソン下部との接合は一度に施工するPC鋼材等の数も多く、解決すべき問題点が多い。中プレキャスト案、小プレキャスト案による接合の場合、陸上クレーンで施工できるが、接合方法が複雑になり、またケーソンとしての一体性に欠けるおそれがある。一体製作案は、セルラー部の場所打ち方法について十分な検討が必要であるが従来の施工技術で施工可能である。

以上の検討から、製作方法としては、一体製作方式が適当であると思われる。ただし、ここでの選定理由は、主として、プレキャスト方式の場合、プレキャスト部材とケーソン下部との接合性に解決すべき問題があることによるものであり、経済性の面においては、どんな断面形状のケーソンであっても常に一体製作方式が有利であるとは限らない。今後プレキャスト部材とケーソン下部との接合性の問題についても十分検討を行う必要がある。

表-4 製作方法の分類

製作方法	一 体 製 作 案	プ レ ー ス ト 製 作 案		
		大プレキャスト案	中プレキャスト案	小プレキャスト案
説 明 図	場所打ち製作 	プレキャスト製作 	プレキャスト製作 	プレキャスト製作
	場所打ち製作 	場所打ち製作 	場所打ち製作 	場所打ち製作
製作方法の概要	(1) マルチセルラー部とケーソン部を、場所打ちコンクリートにより一体製作する。 (2) コンクリートの打設ロット割りに、 (a) 水平ロット割り案 (b) 斜めロット割り案がある。	(1) ケーソン部は 場所打ち製作し、マルチセルラー部は、プレキャスト方式で製作し、両部を連結する。 (2) マルチセルラー部のプレキャスト製作方法には、次の3案が提案される。 	(1) ケーソン部は場所打ち製作し、マルチセルラー部は、所定のブロックに分割してプレキャスト方式で製作し連結する。 (2) マルチセルラー部の製作方法は、ブロック同志の接合性を良くするために、マッチキャスト方式で行う。 	(1) ケーソン部は場所打ち製作する。マルチセルラー部の側壁と陸壁も場所打ち製作する。曲り斜面壁の上段、中段、下段は、それぞれ所定のブロックに分割して、プレキャスト方式で製作し連結する。 (2) 曲り斜面壁の上段、中段、下段の製作方法は、ブロック同志の接合性を良くするために、マッチキャスト方式で行う。 (3) プレキャスト部材を取り付けた後に、マルチセルラー部の側壁と隔壁を現場打ちコンクリートで施工する方法もある。
				上 段 中 段 下 段

②コンクリート打設ロット割り等

コンクリート打設ロット割りは、図-14に示すように、斜めロット割り14ロット打設とした。これは、打設ロット数が多く、施工方法が複雑であるという欠点はあるものの、構造上重大な欠陥となるコンクリートのクラックの発生を少なくすることができるロット割りであるとして選定したものである。

この他に型枠、支保工、足場、鉄筋の加工・組立、コンクリートの品質等についても検討を行った。施工の合理化のためには、これらについての適切な方法の開発がきわめて重要であるが、記述がやや詳細となるので、ここでは省略する。

(2) 曳航・据付

マルチセルラーケーソンは、非対象で重心も高く、また、そのままでは浮上しないことから、運搬・据付方法は通常ケーソンとは違った方法をとる必要がある。検討の結果、経済性、施工性とも有利な全吊り上げ式（陸上製作ヤードで製作したケーソンを、3,000トンの吊フローティングクレーンで吊り上げ、そのまま据付け場所まで運搬、据え付ける方法）を採用することとした。

(3) 中詰め

マルチセルラーケーソンは、上部にセルラー部を有するため、通常ケーソンのような中詰め方法をとることができず、特別な工夫を要する。中詰め方法としては、大きく分けて、直投式とスラリー式の2方法が考えられる。図-15に、それぞれについて代表的な方法を示す。直投式は、シュート又はトレミー管を用いて直接函内に中詰め砂を投入する方法である。また、スラリー式は、中詰め砂をスラリー状にしてに函内に充填する方法である。この方法としては、低揚程ポンプ船を用いる方法、水中ポンプを用いる方法等様々なものが考えられる。検討の結果、経済性、工程、安全性等から、ケーソンの隔壁内で中詰め砂をスラリー化し、サンドポンプを用いて函内に圧送、充填する方式を採用することとした。

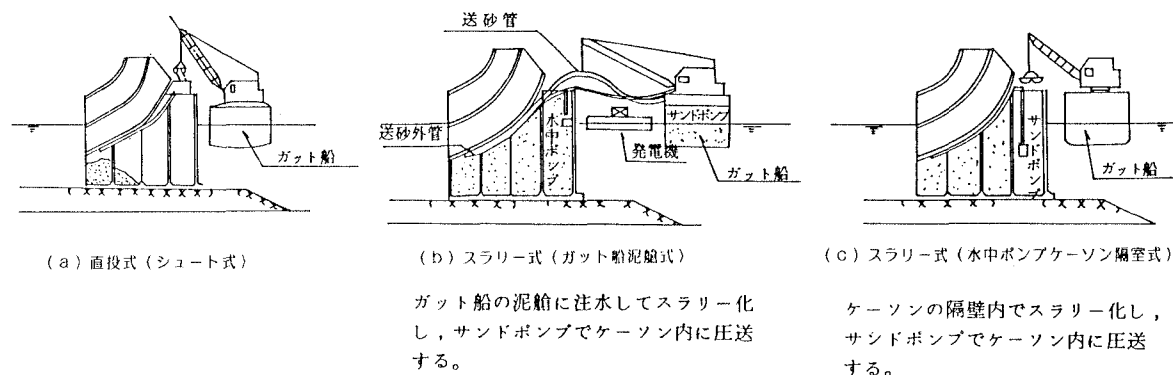


図-15 中詰め方法

以上の検討により、マルチセルラー式防波堤の施工方法の指針となるものが提案された。ただし、ここでの検討は、試験堤の施工方法を例としているものであり、設計条件、施工条件が異なる場合には、必ずしも本検討で採用した方法が最適であるとは限らない。しかし、その場合でも、本検討過程で例示した様々な施工方法を、その設計条件等において再検討することにより、最適な工法を選択することができると思われる。

なお、試験堤は、昭和59年度、60年度に製作、完成しており、RC構造・一体製作・斜め打継方式で施工可能なことがわかった。また、予想されていたことではあるが、型枠・鉄筋工の繁雑さ、斜め打継面の処理、斜面部表面の空気アバタの発生などの課題も認識された。さらに、全製作工程14ロット、工期180日の短縮も課題となる。

6. おわりに

以上の検討により、マルチセルラーケーソンの設計・施工方法が提案された。今後、現地観測を実施し、取得データの解析により設計法を確立するとともに、施工上生じた要改良点、問題点の工夫・解決によって施工法を確立することとしたい。

本報告は、関 博早稲田大学教授を委員長とする調査委員会での詳細な検討結果の一部をとりまとめたものであり、調査委員会の委員各位並びに検討に参加していただいた関係各位に、深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 谷本勝利・原中祐人・富田英次・村永 努・鈴村論司：マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、20巻2号、1981.6