

二重円筒ケーソン堤の開発について

運輸省	第三港湾建設局神戸調査設計事務所	正会員	片岡真二
	同	正会員	白石修章
	同		豊島照雄
(元)	同	正会員	八尋明彦
(元)	同	正会員	岡 貞行

1. 開発の背景

わが国では、海洋空間の有効利用を促進するため、外洋に面した海域において巨大な波浪を制御し、適度に静穏な海域を経済的に造成するための技術開発が望まれている。そこで、運輸省港湾技術研究所において、大水深・高波浪域に適した新型防波堤の構造に関する研究開発の結果、低反射、低伝達構造ならびに海水交換機能を持った二重円筒ケーソン堤が開発された。

第三港湾建設局では、地元要請を満たす二重円筒ケーソン堤を兵庫県北部に位置する柴山港防波堤に適用することにした。しかし、二重円筒ケーソン堤は実用的な設計が可能な段階になるまで開発が進められていたものの、直ちに柴山港防波堤 ($H_{1/3}=9.7\text{m}$, $T_{1/3}=14.0\text{秒}$, 水深30m) のような条件の極めて厳しいところに適用するには、まだ、確認すべき技術的な課題が残されていた。そこで、柴山港防波堤の建設にさきがけ、比較的条件の緩い境港防波堤 ($H_{1/3}=5.0\text{m}$, $T_{1/3}=8.0\text{秒}$, 水深10m) に適用して、実海域で実証試験を行い、二重円筒ケーソン堤の設計法及び施工法の確立を図ることとした。

以下、大水深・高波浪域への実用化に向け、平成元年度に初めて境港防波堤に設置したRC構造の二重円筒ケーソン堤及び平成2年度製作・据付するPC構造の二重円筒ケーソン堤の実施設設計法及び現地計測の概要を述べる。

2. 二重円筒ケーソン堤の構造及び特徴

二重円筒ケーソン堤は、四角形や八角形等の底版の上に二重の円筒壁を立ち上げた構造である。その外側円筒壁の上方には適当な開口部を設けて来襲波や海水を透過させる。一方の内側円筒壁は不透透構造にしている。

外側と内側円筒壁との空間部の上部を遊水部にし、透過した波がその遊水部を通り、背後で波がお互いに衝突して波のエネルギーを消費させる仕組みになっている。また、堤体重量を確保するために遊水部の下部と内円筒内部に砂等を中詰めする。

構造の主な特徴を以下に示す。

- ① 円筒構造であるため、面内力を利用することによって部材の節約と軽量化が図られる。
- ② 波を曲面でうけるため、波圧に位相差が生じ、全作用波力を低減することができる。
- ③ 外円筒壁の全面及び後面の開口部を適切に選定することによって、消波機能や海水交換機能を付加することができる。
- ④ 多数の窓（開口部）を持った円筒構造であるため、それ自体が美観上優れていることと、防波堤の法線を曲線にすることができる。

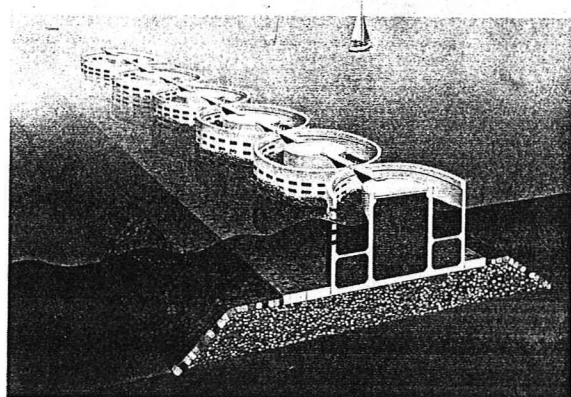


図-1 二重円筒ケーソン鳥瞰図

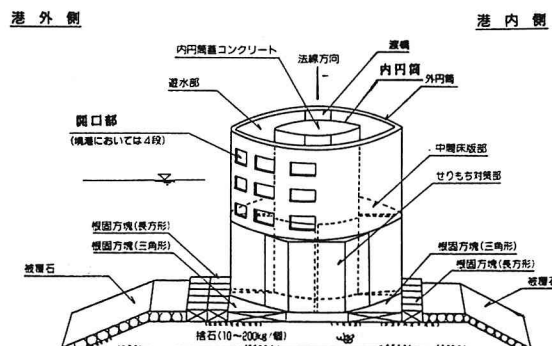


図-2 二重円筒ケーソン堤概念図

3. 水理特性

3-1 機能特性

図-3に開口率とエネルギー消費率の関係を示す。それによると不透型 ($\varepsilon_r=0$, $\varepsilon_t=0$) のエネルギー消費率は20%と低い。これに対して消波型 ($\varepsilon_r=0$) と透過型のエネルギー消費率は開口率によって大きく変化している。また、消波型のエネルギー消費率は、周期の長い ($B/L_{1/3}$ が小さい) ときは開口率の大きいほうが、周期の短いときは開口率の小さいほうが高い傾向にある。

次に、透過型 ($\varepsilon_r=0.25$, $\varepsilon_t=0.10$) の反射率及び伝達率を図-4、図-5に示す。この図から周期が短くなると反射率が小さくなり、伝達率がやや大きくなる傾向にある。

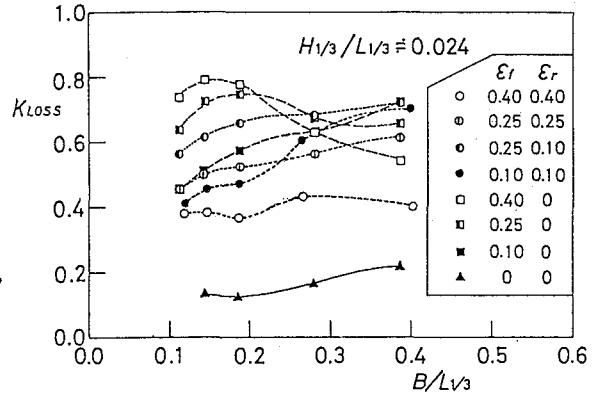


図-3 各種構造 (開口率) のエネルギー消費率

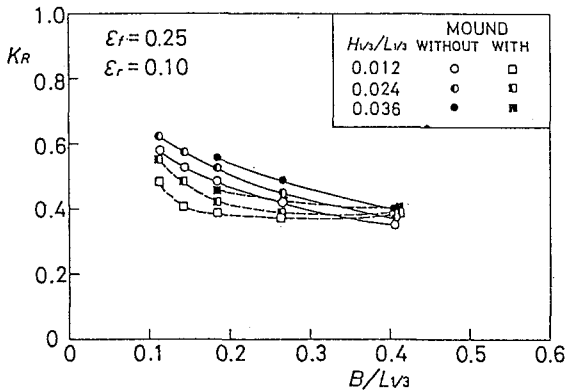


図-4 透過型の反射率

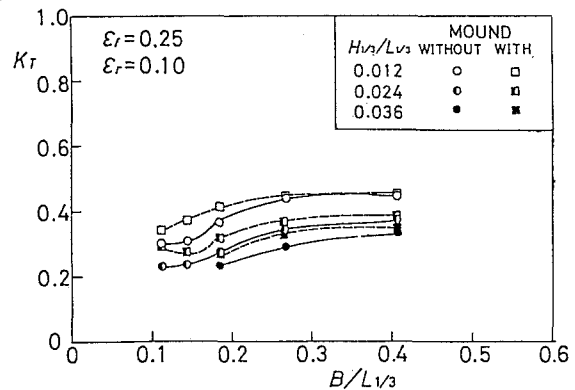


図-5 透過型の伝達率

3-2 波力特性

二重円筒ケーソンに作用する波力は、外円筒壁の前面に波の峰が到達した時を押波Ⅰ、そして、外円筒壁前面の開口部から進入してきた波が遊水部を通り、後面の外円筒壁に波の峰が到達した時を押波Ⅱ、また、外円筒壁前面に波の谷がきたときを引波という。以上のように波の位相によって分類される。

押波Ⅰ、Ⅱの波力は、「直立壁に作用する重複波および砕波の波力」に規定された合田式の波圧 (P_0) に低減係数 (λ) を乗じて算定する。

なお、この低減係数 (図-6) は水理模型実験の結果から求めたものである。

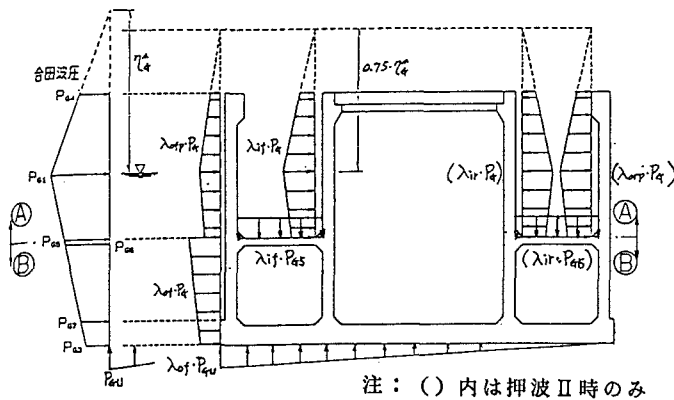
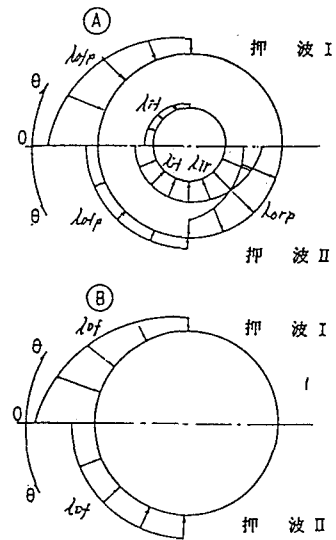


図-6 波圧分布形状と波圧低減係数



波圧低減係数	押波時Ⅰ	押波時Ⅱ
λ_{of}	$0.35 + \cos^4 \theta$	0.80
λ_{ofp}	$0.25 + 0.75 \cos^4 \theta$	0.30
λ_{orp}	0	$-0.60 - 0.60 \cos^4 \theta$
λ_{if}	$0.05 + 0.15 \cos^4 \theta$	0.60
λ_{ir}	0	$0.60 + 0.60 \cos^4 \theta$

次に、引波の波力は、有限振幅重複波理論による波力と慣用的に用いられている水位差圧 ($1/2 H_0$) を算定して、設計上安全となる値を使用する。それから、蓋コンクリート等へ打込み波力 P (押波Ⅱ) は、二重円筒ケーソン堤 (頂版付き) の水理模型実験の結果等を参考に、 $P = 1.0 W_0 H_0$ が蓋コンクリートの全面に作用するものとして算定する。しかし、二重円筒ケーソンが大型になると、この打込み波力が堤体の安定性や蓋コンクリートの部材厚さに大きく影響するため、水理模型実験や現地実証試験によって確認する必要がある。その他の波力としては、底版に作用する揚圧力及び地震時に堤体に作用する動水圧等を考慮する。

4. 二重円筒ケーソン堤の設計

4-1 設計条件及び部材厚さの設定方法

設計条件及び二重円筒ケーソンの形状の諸元等を表-1に示す。次に、堤体の部材厚さの設定方法について述べる。

二重円筒ケーソンの主要部材は、ケーソンの形状が円筒形で、しかも、底版や中間床版で固定されている構造であることから、断面力を簡便的に求めることができない。したがって、基本設計の段階において堤体の各部材厚さをとりあえず仮定して、二重円筒ケーソン全体をモデル化した三次元の解析（FEM解析）によって断面力を求める。次に、仮定した部材厚さがその断面力に対して満足されているかどうかをトライアルによって確認する。それから、堤体の安定計算を行って所定の安全性を確認する。なお、境港における堤体の各部材の厚さを表-2に示す。

表-1 設計条件・ケーソン形状の諸元

現 地 盤 水 深		10.6 m
潮 位	H.H.W.L +	1.0 m
	H.W.L +	0.4 m
	L.W.L -	0.1 m
波 浪	H _{max}	7.9 m
	H _{1/3}	5.0 m
	T _{1/3}	10.5 m
	入射角	8.0
設 計 震 度	K _H	0.1
ケーソン天端高さ	(H.W.L + 0.6 H _{1/3})	+ 3.4 m
遊水部下端高さ	(H.W.L + 1/2 H _{1/3})	- 2.6 m
外円筒壁の開口率	(前面開口率 ε _r)	25%
	(後面開口率 ε _r)	0%
内・外円筒径比		1:2
開口部の縦・横寸法		1:2

表-2 二重円筒ケーソンの各部材厚さ

部 材 名 称	部 材 厚 (cm)	
	R C 構造	P C 構造
外 円 筒 部	50	40
内 円 筒 部	50	40
底 版	80	80
中 間 版	30	30
隔 壁	30	30
蓋コンクリート	70	70

4-2 構造細目

底版の形状は、実用的な正方形、八角形、円形の3種類について、堤体の安定性、フーチングの張出し部のせん断力、端趾圧、経済性等を比較検討して八角形底版を採用することにした。

また、円筒部の蓋コンクリートの構造は、落し蓋方式、はめ込み蓋方式及び内円筒壁一体化方式を選定して、蓋コンクリート版の沈下の有無、施工性の難易度、蓋コンクリート版の支持条件の明確さ、中詰砂の吸い出し防止等を比較して、はめ込み方式を採用することにした。

それから、堤体が不等沈下したとき隣接ケーソンとのせりあいによる外円筒壁の破損やケーソン据付けのとき既設ケーソンとの衝突による破損を防止するため、外円筒壁の下部に拡幅部を設けた。その拡幅部の幅は既設の矩形ケーソンの沈下量等を参考にして決めた。

4-3 基本設計

堤体の安定性の検討は、3. 水理特性で述べた波力を用いて計算を行った。その結果、外円筒壁の前面に作用する波力が卓越する押波Ⅱ（H.H.W.時）のときが、堤体の滑動の安全性に対して最も厳しくなり、二重円筒ケーソンの形状を決める要因となった。また、底版に作用する端趾圧は、押波Ⅱ（L.W.時）のときが最大となった。

RC構造の基本断面を図-7に示す。なお、PC構造の基本断面は表-2に示した部材厚さ以外、RC構造と同一の外形寸法にした。

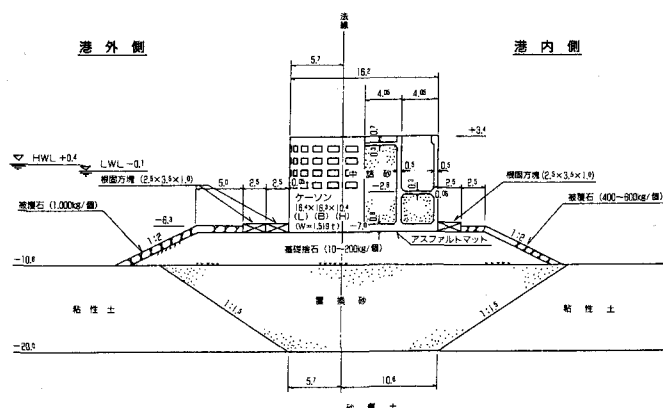


図-7 二重円筒ケーソン堤断面図(RC構造)

4-4 細部設計

昭和61コンクリート標準示方書の改定に伴ない、RC構造物においても限界状態設計法を適用することが基本とされた。そこで、従来の許容応力度法との比較検討を兼ねて、その両者が満足できるように二重円筒ケーソンを設計した。なお、PC構造の二重円筒ケーソンは、限界状態設計法のみで行った。

完成時の設計外力は、二重円筒ケーソンの特殊性を考慮して、波力、静水圧、内部水圧・土圧等を対象とした。また、施工時については、施工方法、荷重影響度を考慮してケーソン吊上げ時と据付け時の外力を対象とした。

使用限界状態での荷重特性値の波高（ H_D ）は、1年確率波（ $H_{1/3}=2.1\text{m}$ ， $H_{\text{max}}=3.8\text{m}$ ， $T_{1/3}=7.4\text{秒}$ ）を使用した。この検討対象波高（ $H_D=3.8\text{m}$ ）を越える波の波数を概算すると耐用年数50年間に26,000波程度となる。

したがって、耐用期間中に 10^4 オーダーの作用回数の波数になることから、検討対象波を1年確率波で設定した。

また、疲労限界状態での疲労荷重の大きさとその回数は、過去13年間の波浪観測記録より防波堤の耐用期間中に襲撃する総波数を想定し、レイリーの分布より、波高階級別の発生回数を推定した。

次に、構造解析の方法は、二重円筒ケーソン構造の特殊性から三次元のFEM解析を行って断面力を求めた。その解析モデルは、平板要素とパネ要素を用いてケーソン全体を対象とした構造解析と外円筒壁の透過部を対象とした部材単位の部分構造解析を行った。表-3にFEM解析の検討ケースを示す。

限界状態設計法に用いた安全係数は、「プレストレストコンクリート港湾構造物設計マニュアル」（運輸省港湾局）等を参考にした。

FEM解析結果で得られた各部材の断面力に対して、軸方向の取扱いは表-4に示すように軸力と曲げモーメントを各部材ごとに組み合わせた。また、使用限界状態のひびわれ幅は腐食環境を考慮し、プレストレストの導入量は引張応力発生限界状態で検討した。

円筒部の配筋方法は、円周方向のフープ筋と鉛直方向の鉛直筋を直交させた格子状の配筋にした。また、底版の配筋は同心円状の配力筋と放射状の主筋を半径方向に配筋した。そして、内円筒下部は主筋が集中するのを避けて格子状の配筋にした。それから、境港に設置するPC構造のケーソンには、外円筒壁と内円筒壁のみにPCを導入することにした。そのPC鋼材の配置は、円周方向にPC鋼線、鉛直方向にはPC鋼棒を用いた。

表-3 FEM解析、断面力検討ケース

		完 成 時			施 工 時	
		押波Ⅰ	押波Ⅱ	引 波	吊上げ時	据付時
許容応力度法		○ ●	○ ●	(○ ●)	○	○
限 界 設 計 状 態 法	終局限界	○ △	○ △	○ △	△	△
	使用限界	○ △	○ △	○ △	△	△
	疲労限界	—	△	—	—	—
	プレストレス力	△				

注) ○印はRC構造・△印はPC構造の解析検討ケースを示す。
●印は部分構造解析を実施したケース。(但し、引波時は、押波から引波への推移時を対象。)

表-4 軸方向力に対する組み合わせ

部 材 名 称	軸 力		曲げモーメント
	引張力	圧縮力	
円筒部（円周方向）	○	○	○
円筒部（鉛直方向）	○	×	○
底 版	○	×	○
中 間 版	○	×	○
隔 壁	○	×	×

注) ○；考慮する ×；考慮しない

5. 現地計測

5-1 計測の目的

二重円筒ケーソンを実海域に設置して複雑な海象条件の下で、現地の波浪特性、波圧分布、堤体の部材応力、振動特性等を把握して現行設計法の妥当性を検証することにした。さらに、大水深・高波浪域への適用に向けての技術的な課題に対するデータを得ることも目的としている。表-5に当局が取り組みをしている二重円筒ケーソン堤の現地実証試験の全体計画を示す。また、図-8、表-6には現地実証試験の位置及び二重円筒ケーソン堤の設計・施工に必要な検討課題と現地実証試験による確認項目を示す。

5-2 計 測

表-6に示した設計法に関する実証項目を確認するため、RC構造の二重円筒ケーソンに波圧計、鉄筋計等の計測機器を設置し、平成2年1月から観測を行っている。計測システムは、収録した磁気テープを直接電算処理することができ、システム自体がシンプルで安価なデジタル方式を採用した。そして、計測器の観測方式は、一定時間内の経時変化を観測する方法（動的観測）と一定時間間隔ごとに定期観測する方法（静的観測）とを組み合わせた。

表-5 現地実証実験全体計画

	昭和63年度	平成元年度	平成2年度	平成3年度
境港 〔外港地区〕 防波堤	基本設計 (RC・PC函)	基本設計 (滑動用)	細部設計 (滑動用)	
	細部設計 (RC函)	細部設計 (PC函)		
	計測計画策定 (RC函)	計測機器設置・計測	計測・解析	計測・解析・撤去
		計測計画策定 (PC・滑動用)	計測機器設置・計測	計測・解析・撤去
			設計法のとりまとめ・マニュアル化	
	施工計画策定 (RC・PC函)	施工計画策定 (PC・滑動用)	試験堤製作・据付 (PC2函)	
		試験堤製作・据付 (RC1函)	試験堤製作・据付 (滑動用函1)	試験堤撤去 (滑動用)
		施工実績の分析 (RC函)	施工実績の分析 (PC・滑動用)	施工法の確立

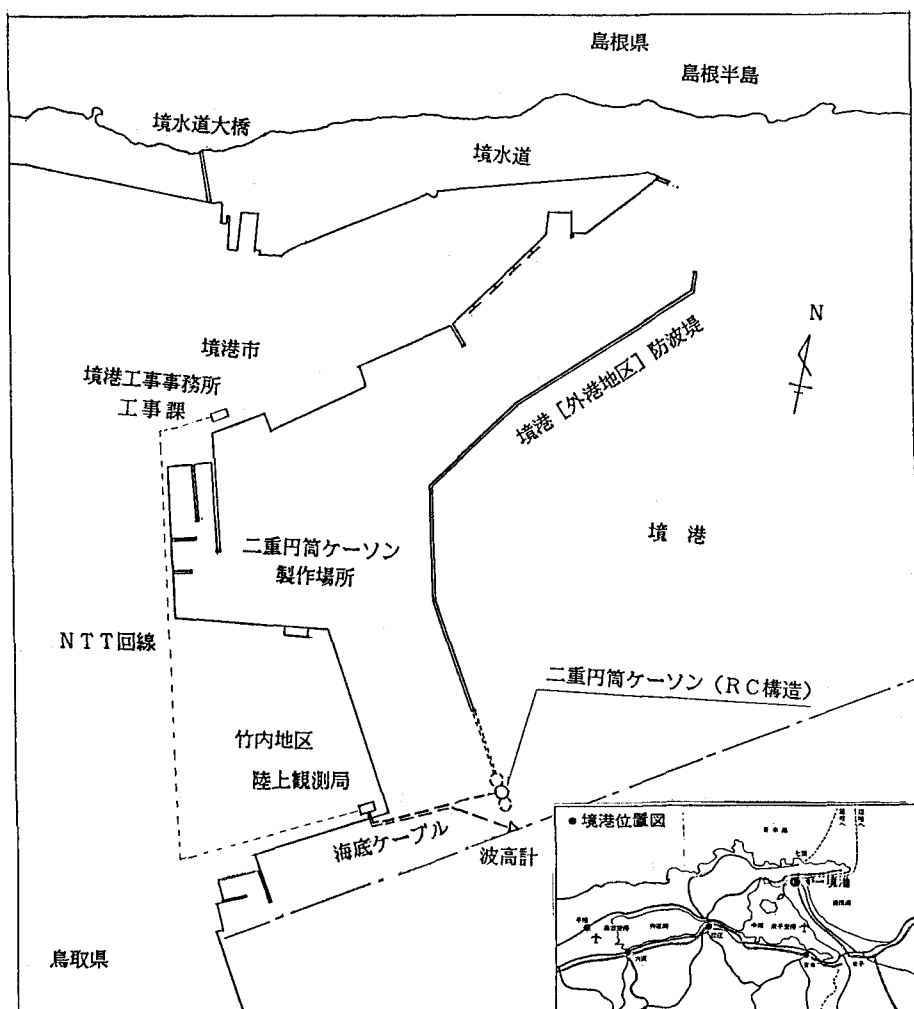
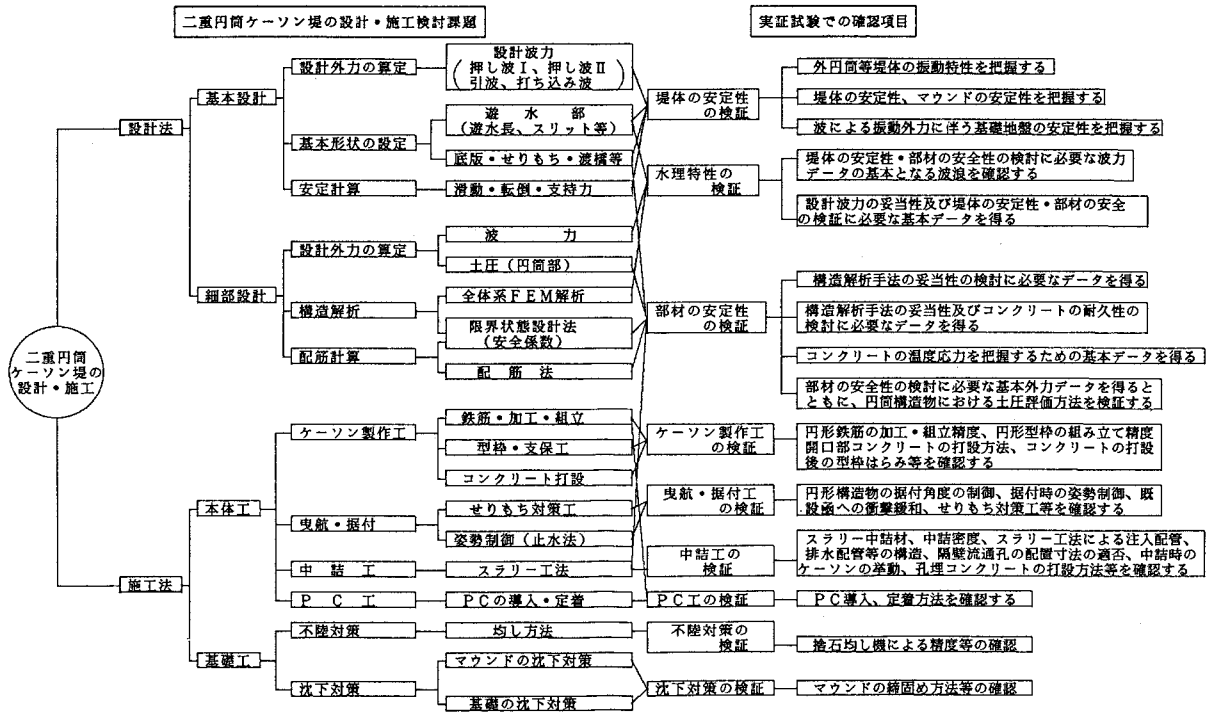


図-8 現地実証試験位置図

表 - 6 現地試験における検証項目と確認項目



6. あとがき

平成元年10月、わが国で初めてRC構造の二重円筒ケーソンを現地に設置し、平成2年1月から観測を開始した。平成2年度は、観測によって得られたデータの解析、二重円筒ケーソン(P C 構造)の製作及び据付けを行う。

また、実証試験費を用いて実海域で滑動実験を行うため、滑動用の二重円筒ケーソン(R C 構造)を1函製作・据付けを行う。この滑動実験のケーソンは、既設RC及び新設P C ケーソンを両側に配置した状態で滑動実験を行うことにしている。