

駆けて、比較的設置条件が緩やかな境港に二重円筒ケーソン堤を設置し、設計法及び施工法に関する現地実証試験を行うこととなった。本報告では、このうち特に二重円筒ケーソン堤の水理特性をはじめとする設計法に関連する実証試験を中心に報告する。

2. 二重円筒ケーソン堤の設計法

港湾技術研究所および第三港湾建設局で実施した水理模型実験等によって検討された二重円筒ケーソン堤の設計法の最も主要な部分となる波力と機能特性の考え方については次のとおりである。

(1) 設計に用いる波力の考え方

まず、二重円筒ケーソンに作用する波については、波の峰が外円筒壁前面に到達したときを「押波Ⅰ」、そして外円筒の開口部から進入した波が遊水部を通過して外円筒壁内側背後部に波の峰が到達したときを「押波Ⅱ」、さらに外円筒壁の前面に波の谷がきたときを「引波」と呼んで区別している。二重円筒ケーソン堤の設計においては、堤体の安定を検討する基本設計は押波Ⅰ、主要部材の安全性を検討する細部設計は押波Ⅱを外力として作用させたときに決まる傾向がある。

① 堤体の安定性の検討に用いる設計波力

基本設計において二重円筒ケーソン堤の安定性の検討を行う際に用いる作用波力（P）は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の「直立壁に作用する重複波および砕波の波力」で規定されている合田式による波力強度（ P_0 ）に図-3に示す波圧低減係数（ λ ）を乗じて、 $P = \lambda \cdot P_0$ によって算定する。なお、このときの波圧分布は、円周方向で同じ波圧が作用する等分布波圧を用いている。

また、引波の設計水平波力は有限振幅重複波理論により求めた値と設計波高（ $H_{1/3}$ または H_{max} ）の1/2の水位差圧から求めた値との、いずれか危険側となる値を使用している。一般的な水深においては後者の方が大きくなる傾向が強く、大水深の場合は前者の有限振幅重複波として得られる引波力の方が大きくなることが多い。

② 部材の安全性の検討に用いる設計波力

細部設計における部材の安全性の検討を行う際に用いる波力についても、合田式による波力強度（ P_0 ）に図-3に示す波圧低減係数（ λ ）を乗じて算定する偏分布波圧をケーソン正面からの入射波として作用させる。

また、蓋コンクリート等への打込み波力（押波Ⅱ）は二重円筒ケーソン堤（頂版あり）の水理模型実験等を参考に、 $P = 1.0 W_0 \cdot H_{max}$ （ W_0 ：海水単位体積重量）が蓋コンクリート全面に一樣に作用するものとしている。

(2) 機能特性の考え方

① 開口率とエネルギー消費率

二重円筒ケーソンは、外円筒壁透過円筒部の前半分（波の入射側）の開口率 ε_r または後半分の開口率 ε_r を変えることにより反射率・伝達率を制御することができる。（ここに、開口率 ε_r および ε_r は、透過円筒部の展開面積に対する開口部（スリット）の面積比である。）図-4は港湾技術研究所での実験によって得られた開口率とエネルギー消費率の関係を示したものである。ここに、エネルギー消費率 K_{LOSS} は、有義波高の反射率 K_R と伝達率 K_T から、 $K_{LOSS} = 1 - K_R^2 - K_T^2$ によって定義される値である。また、横軸の $B/L_{1/3}$ は、堤体幅と有義波波長の比である。この図-4より、開口率を適切に選定することによって、エネルギー消費率を高めることが可能であることが分かる。エネルギー消費率が高くなるのは、外円筒壁透過円筒部の後半分に開口部がある透過型では $\varepsilon_r = 0.25$ 、 $\varepsilon_r = 0.10$ の場合、外円筒壁透過円筒部の後半分に開口部を持たない消波型では、 $\varepsilon_r = 0.25$ とした場合であるといえる。

② 反射率と伝達率

図-5及び図-6は、境港での実証試験に用いた消波型（外円筒壁透過円筒部の後半分に開口部を持たないタイプ）についての波の反射率と伝達波の低減効果を示す伝達率に関する実験結果である。図-5より反射率 K_R は堤体幅と有義波波長の比 $B/L_{1/3}$ が0.15前後のときに最小になり、 $K_R = 0.4$ 程度となることが分かる。また、図-6は有義波高の伝達率 K_T と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ （天端高と入射有義波高の比）の関係を示す実験結

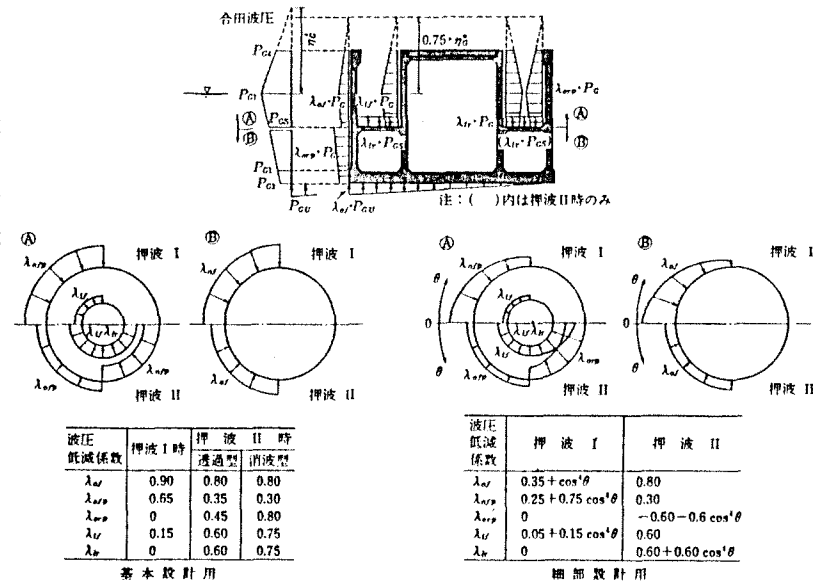


図-3 二重円筒ケーソンの設計用波圧分布

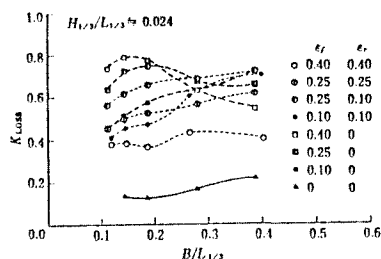


図-4 開口率とエネルギー消費率

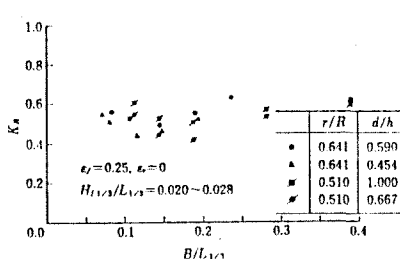


図-5 消波型の反射率

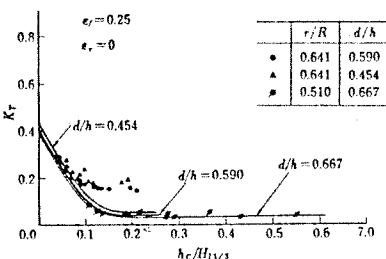


図-6 消波型の伝達率

果である。同図には合田による混成堤の伝達率算定式による計算値も実線で記入してある。この図より、消波型の場合の伝達率は越波によるものが主体であることから、伝達率は相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ によって変化し、相対天端高が大きくなると通常の混成堤と同程度になることが分かる。

3. 境港における現地実証試験の概要

(1) 現地実証試験による検証項目

今回、境港で行った現地実証試験における検証項目は図-7に示したとおりである。これらの各項目を検討するために計4雨(RC雨2雨、PC雨1雨、滑動試験雨1雨)の二重円筒ケーソンを製作し、現地に据え付けた。検討項目のうち、施工法に関するものについては、これら4雨の二重円筒ケーソンの製作・据え付け過程を通じて課題の検討を行った。また、設計法に関連する項目については、二重円筒ケーソンの対波特性(水理模型実験特性、堤体の安定性、部材の安全性)を把握すべく、RC雨の堤体にあらかじめ計器を設置してデータを測得するとともに、特に堤体の安定性を検証するために滑動試験雨を製作・据え付けて、実際の滑動時の状況を確認するためのデータを測得することとした。

(2) 現地実証試験で用いた二重円筒ケーソン

境港における現地実証試験で用いた二重円筒ケーソンの設計条件を表-1に示す。ここで用いた二重円筒ケーソンは、外円筒壁の前面のみに開口部(スリット)を設けた「消波型」を採用している。このような条件で設計された二重円筒ケーソン堤の断面図を代表例としてRC雨のケースを図-8に示す。

表-1 設計条件

	RC雨	PC雨	滑動雨
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	4.7 m	
$H_{1/3}$	5.0 m	2.6 m	
$T_{1/3}$	10.5 s	8.2 s	
入射角	8.0°	8.0°	
設計波度	$K_{ff}=0.1$		
ケーソン天端高	+3.4 m		
遊水部の下端高	-2.6 m		
外円筒の開口率	$e_f=25\%$ $e_r=0\%$		
内外円筒比	1:2		

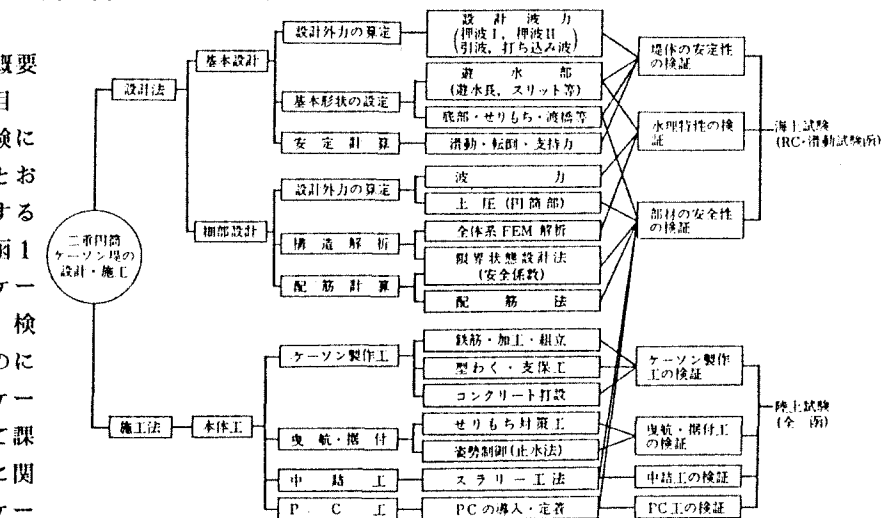


図-7 現地実証試験による検証項目

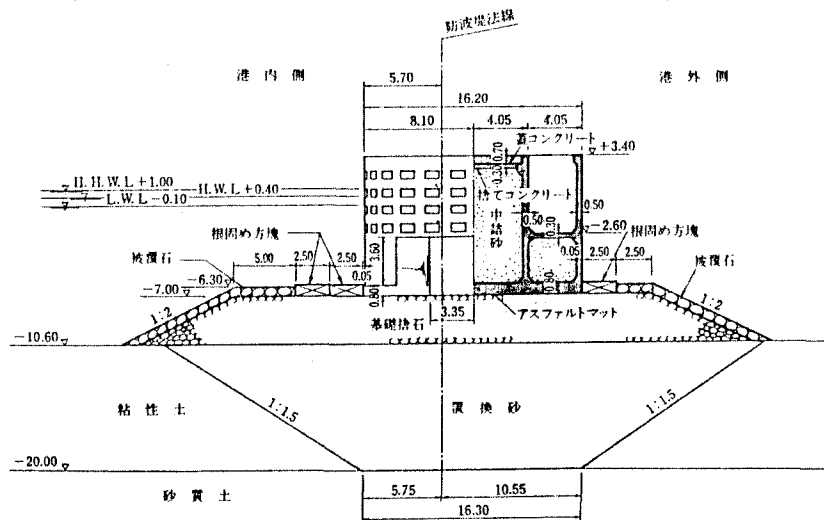


図-8 実証試験用二重円筒ケーソン堤断面図(RC雨)

(3) 現地実証試験の実施方法

海上での現地実証試験では、RC両、滑動試験両の計2両に図-9及び図-10に示す波圧計や応力計などの計測器を設置し対波特性（水理特性、堤体の安定性、部材の安全性）を検証するためのデータ測得を行うこととし、ある一定以上の値（RC両計測に対しては波高、滑動試験両に対しては波高と滑動量）を記録した時間帯（1単位20分間）のデータを境港に設けられた陸上観測室に設置してあるデータレコーダでテープに記録することとした。

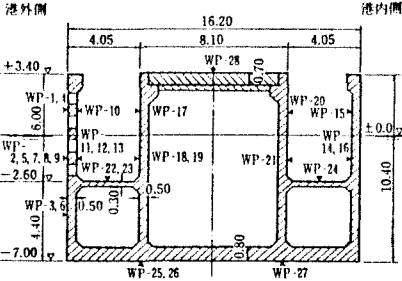


図-9 RC両波圧計位置図

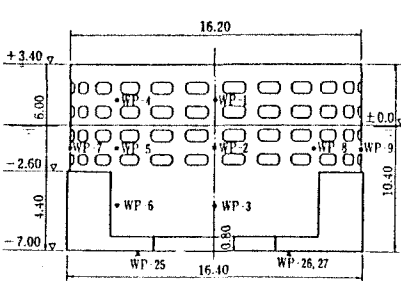


図-10 RC両鉄筋応力計位置図

現地実証試験の全体工程は、図-11のとおりである。ただし、ケーソンが単両で設置された状況（単両計測）と、ケーソンが連続して設置された状況（連続両計測）での対波特性を比較するためにRC両においては両者の状況でデータを測得することとした。

4. 現地実証試験解析結果

現時点までの主な解析状況は以下で述べる。解析したRC両データの測得時の波浪諸元は表-1のとおりである。ここでは、RC両については単両計測、滑動試験両については連続両計測に基づく解析結果について述べる。

(1) RC両の単両状態での波圧計測結果

単両状態において測得した各波圧と波高Hmの関係から同帰式を求め、計算値のものと比較したものを表-3~6に示す。これより、ケーソン各部に作用した波力の特性については以下のように読みとることができる。

① 外円筒壁（外側）に作用する水平波圧は波高Hmに対して0.5~0.9H(tf/m²)、内円筒壁（外側）に対して0.3~0.6H(tf/m²)となっている。

② 中間床版に作用する鉛直波力は前面および側面において両者とも0.25~0.28H(tf/m²)程度であるが、背後部では0.63H(tf/m²)と大きな波圧が測得されている。これは、前面の開口部から流入した波が遊水部を通り背後部で互いにつぶかっているためであると考えられる。

表-3 外円筒壁に作用する水平波圧

計測器番号	取付高さ	方向 ^{*)}	同帰式 ^{**)}	計算値 ^{**)}
WP-1	+1.4 m	0°	0.83 H - 1.66	1.08 H - 1.72
-4	"	45	0.52 H - 0.70	0.47 H 0.76
-15	"	180	0.90 H 1.09	1.29 H 2.06
-3	-4.6 m	0	0.50 H	1.37 H
-6	"	45	0.52 H	0.61 H

注) *1 正面から右回りの角度 *2 単位: tf/m², H: 波高 (m) *3 CASE 4 *4 CASE 3~5

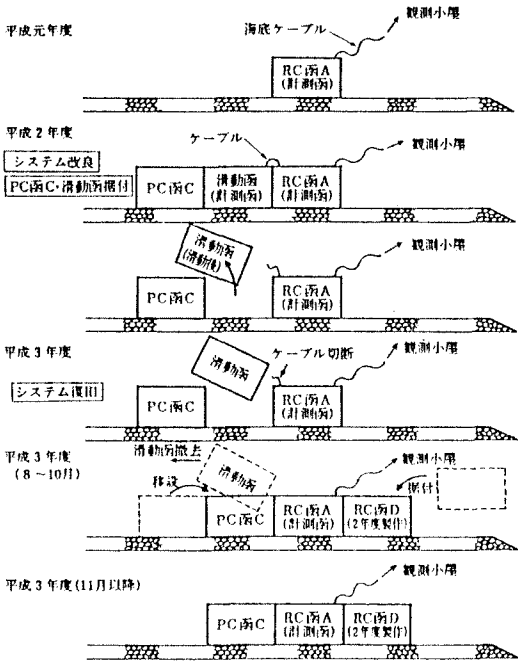


図-11 実証試験両の据え付け工程

表-2 解析データの選定

Case No.	計測番号	測得日時	Hmax	H1/3	T1/3	気象条件
1	22	1/31 9:12	1.96 m	1.31 m	4.7 s	北高型
2	38	3/1 20:58	2.78	2.12	6.1	気圧配置
3	78	9/19 16:20	4.47	3.12	8.0	台風19号
4	84	" 19:06	6.30	4.53	9.1	"
5	86	" 19:49	4.96	3.75	9.5	"

表-4 内円筒壁に作用する水平波圧

計測器番号	取付高さ	方向 ^{*)}	同帰式 ^{**)}	計算値 ^{**)}
WP-17	+1.4 m	0°	0.62 H - 1.16	0.65 H 1.04
-20	"	180	0.44 H 0.45	1.27 H 2.01
-18	-1.2 m	0	0.39 H	0.66 H
-21	"	180	0.33 H	1.32 H

表-5 中間床版に作用する鉛直波圧

計測器番号	取付高さ	方向 ^{*)}	同帰式 ^{**)}	計算値 ^{**)}
WP-22	-2.6 m	0°	0.28 H	0.64 H
-23	"	90	0.25 H	0.64 H
-24	"	180	0.63 H	1.28 H

③ 底版の揚圧力は前面部においては $0.21 \sim 0.23 H$ (tf/m^2)、また背後部では $0.18 H$ (tf/m^2)となっている。この値は計算値と比較して非常に小さなものとなっている。原因は、単面状態での計測であったため、堤体背後に波が回り込み、それによって堤体背後で水位低下が生じたためと考えられる。

④ 押波Ⅰ、押波Ⅱのそれぞれにおける同時波圧分布を各計測値をもとに作成すると図-12のような分布形状となった。これによると押波Ⅰでは外円筒壁(外側)について法線直角方向正面より 45° 方向の波圧が予想よりも大きく、 90° 方向では逆に小さく計測された。また、押波Ⅱの場合についてはほとんどの測点において予想よりも小さい値が得られている。

(2) 部材力の計測結果

データケース4(台風19号時)において外円筒壁の水平鉄筋に作用した応力の解析結果を図-13と図-14に示す。図-13は、波が入射してくる港外侧外円筒壁内に配筋された内側および外側水平鉄筋での計測結果で、波圧が作用するのとはほぼ同時に全断面圧縮応力がこの部材に発生していることがわかる。また、図-14は港内側の外円筒壁における同様の計測データであるが、この部分では逆に波圧が作用すると同時に全断面引張応力が発生していることが分かる。

表-6 底版に作用する揚圧力

計測器番号	取付位置	方向 ¹⁾	回 帰 式 ²⁾		計算値 ³⁾
			押 波 時	引 波 時	押 波 時
WP-25	-7.0 m	45°	$0.21 H$	$-0.33 H$	$0.96 H$
-26	"	-45°	$0.23 H$	$-0.35 H$	$0.96 H$
-27	"	-135°	$0.18 H$	$-0.22 H$	$0.32 H$

注) 1 正面から右回りの角度
2 単位: tf/m^2 , H : 波高 (m)
3 CASE 3~5

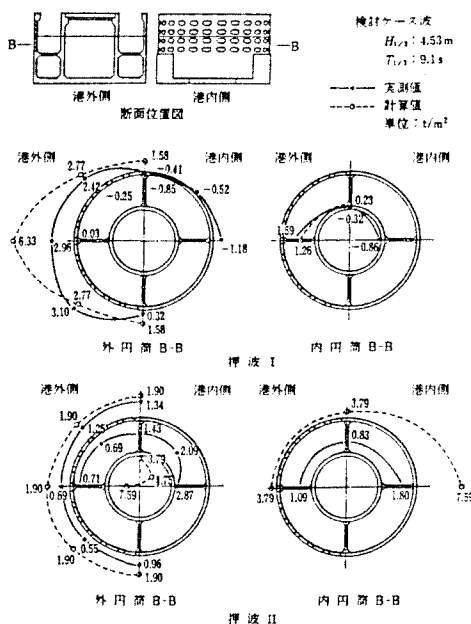


図-12 同時波圧分布の比較

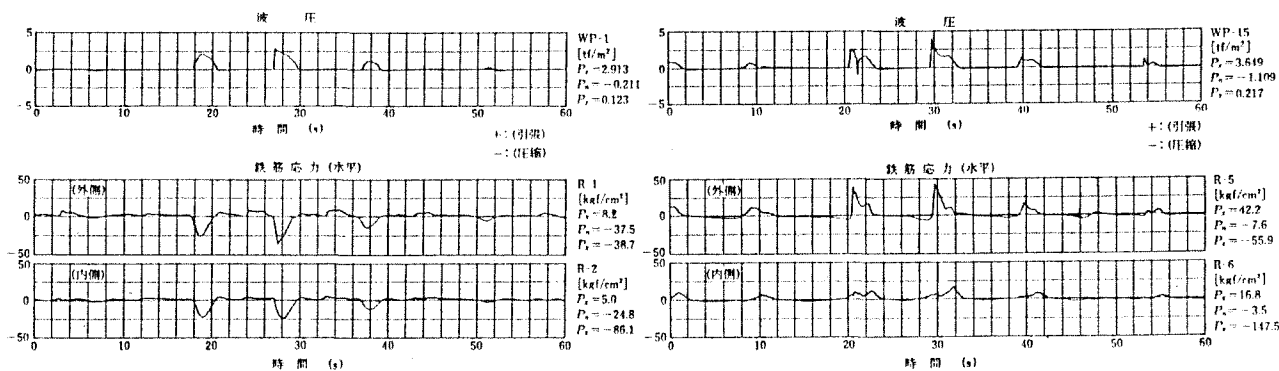


図-13 外円筒壁前面(+1.4m)水平鉄筋応力(Case-4) 図-14 外円筒壁背面(+1.4m)水平鉄筋応力(Case-4)

(3) 滑動試験時の滑動状況

平成2年11月より観測が開始されたが、平成3年2月16日から17日にかけて冬型の気圧配置となり三陸沖に低気圧が発達したため(16日21時968mb)、強い季節風が発生して境港周辺海域においてシケが生じた。これにより2月17日2時50分、滑動試験雨が港内側へ滑動した。滑動をはじめてからケーソンが転倒して観測不能となるに至る一連の状況は表-7にとりまとめたとおりであるが、この滑動時の波浪の状況は表中にも記したとおり $H_{1/3}=2.05 \text{ m}$ 、 $T_{1/3}=14.1 \text{ s}$ であった。この滑動時の波高は

表-7 滑動時変位量

滑動回数	滑動開始時刻	滑動変位(絶対変位)	観測状態	海象(波浪)状態
第1段階	2時50分40秒	1060 mm	全点観測良好	① 波向 約 70° (真北 0°)
第2段階	3時28分14秒	2100 mm	変位計 D-4 (2 M) 切断 観測良好	② 波高 2.05 m ($H_{1/3}$)
第3段階	3時29分56秒	4320 mm	変位計 D-2 (2 M) 切断 観測良好	③ 周期 14.1 s ($T_{1/3}$)
第4段階	3時35分04秒	4870 mm	変位計 D-3 (5 M) 切断 観測良好	④ 潮位 0.31 m
第5段階	3時53分17秒	5010 mm	変位計 D-1, 5 (5 M) 切断 観測良好	
最終段階 (ケーソン転倒)	5時10分10秒	---	全点観測不能	

設計波高 ($H_{1/3}=2.6\text{ m}$) よりも小さかったが、周期が設計波 ($T_{1/3}=8.2\text{ 秒}$) に比べて長いものであった。この滑動時の状況については、ケーソンが3両しか並んでいないような不完全な連続両状態においては回折波の影響でケーソン背後の水位が低下することが考えられ、また捨石マウンドの締め固め状態によっては捨石マウンドとケーソン底面の摩擦係数が低下することもあり、さらに内円筒内の中詰め砂における水位低下の可能性もあり、このようないくつかの要因の影響も考慮した水理模型実験が港湾技術研究所において行われている。



写真-1 滑動試験両の滑動状況

5. おわりに

海上における現地実証試験はRC両による単両状態での計測、滑動試験両での試験を終え、これまでの実証試験を通じて二重円筒ケーソン堤の設計法ならびに施工法に関する貴重なデータ・解析結果を得ることができた。現在、ケーソン4両の連続両状態で引き続き計測を実施しているところであるが、二重円筒ケーソン堤の設計法の確立に向けて、今後ともこのような計測・解析によって対波特性を検討していく予定である。

<参考文献>

- 1) 第三港湾建設局神戸調査設計事務所、新形式防波堤水理模型実験(その2)報告書、1986年8月。
- 2) 谷本ほか、大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その4)―二重円筒ケーソン(海底設置型)の水理特性と試設計―、港湾技研資料、1987年9月。
- 3) 谷本ほか、大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その5)―二重円筒ケーソン(マウンド設置型)の水理特性と設計波力―、港湾技研資料、1988年12月。
- 4) 第三港湾建設局、二重円筒ケーソン堤の設計・施工に関する技術調査、1991年3月。
- 5) 遠藤・川合・黒澤、二重円筒ケーソン堤の現地実証試験、コンクリート工学 Vol. 30、No. 3、1992年3月。