

二重円筒ケーソンに関する現地滑動実験とその再現実験

遠 藤 博*・川合紀章*・黒澤 馨**
高橋重雄***・下迫健一郎****・谷本勝利*****

1. はじめに

大水深・大波浪海域における新しい波浪制御構造物として、二重円筒ケーソン式防波堤の開発が進められている。二重円筒ケーソンは、外円筒と内円筒の二つからなる構造であり、外円筒の上方に適度の開口部を設け、来襲波を円筒内のドーナツ状の遊水室に透過させて消波する直立構造である。このため、二重円筒ケーソンは、大水深・大波浪海域において経済的に低反射率・低伝達率を確保するとともに、海水交換機能、景観性にも優れた構造となっている。

筆者らは、これまでに二重円筒ケーソンの反射・伝達波特性や波圧特性などについての研究を進めてきたが(谷本ら, 1987, 1988), 二重円筒ケーソンを条件の厳しい実海域へ適用するため、現地実証試験を行い、これらの水理特性の確認や耐波安定性の検討を行うこととした。鳥取県境港において1989年から二重円筒ケーソン防波堤の建設が進められ、波力等の測定が行われている。特に、この実証試験の中では、世界初の現地におけるケーソンの滑動実験が行われており、1991年に実際にケーソン滑動し、波高、波圧、変位量などの貴重なデータが得られている。こうした現地実験のデータは、ケーソンの滑動状況のメカニズムを明らかにし、設計法の妥当性を確認するだけでなく、模型実験と比較することにより、模型実験の有効性なども知ることができる。

本報告では、今回得られた現地実測データから二重円筒ケーソンの耐波安定性について検討を加えるとともに、現地と同じ条件で行った模型による再現実験結果と比較することにより、現地での滑動状況の検証を行うものとする。

2. 現地滑動実験

(1) 二重円筒ケーソン現地実証試験の概要

実証試験は、鳥取県境港の既設防波堤先端からその延

長線上に約 500 m 離れた水深 -10 m の地点に、実際に二重円筒ケーソンを設置して行っており、あらかじめケーソンに取り付けてある波圧計、ひずみ計などの計器により、二重円筒ケーソンの海上における対外力特性についての観測を行っている。

試験は1989年から実施されているが、現地滑動実験が行われた1990年については、現地に3函の二重円筒ケーソンが設置されており、2函の標準函の間に滑動試験函が置かれている状況であった。

(2) 滑動試験函の設計

滑動試験に用いた二重円筒ケーソンは、図-1に示すとおりで、外円筒の直径が 16.2 m、ケーソン高さが 10.4 m となっている。

設計波については、標準函2函が50年確率波($H_{1/3}=5.0$ m, $T_{1/3}=10.5$ s)で設計されているのに対し、滑動函については早期の滑動を期待するために1年確率波で設計しており、 $H_{1/3}=2.6$ m ($H_{max}=4.7$ m), $T_{1/3}=8.2$ s の設計波となっている。

このため、滑動函は標準函と形状寸法は同じものの、内円筒と外円筒下部に入れられる中詰砂の代わりに海水が充填されているほか、部材の壁厚も FEM 解析の結果、円筒壁部分では標準函の 50 cm に対し 30 cm とするなど、標準函に比べ薄いものになっている。これにより、滑動函の水中重量は、HWL(+0.4 m)で 860 t となり、このときの滑動安定率は設計波に対して 0.98 となっている。

(3) 計測の概要

滑動実験にあたっては、表-1に示す計器を滑動函に取り付け現地観測を行っている。また、波高計、波向計を滑動函から 250 m 離れた地点に設置し、波浪観測を

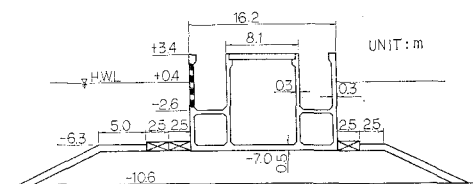


図-1 滑動試験用二重円筒ケーソン断面図

* 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所
** 正会員 工修 元運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長
**** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室
***** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科

実施している。計測されたデータは、海底ケーブルで陸上観測室に送られ、データレコーダー (MT) とパソコン (HD) の2系統で収録を行った。データレコーダーでの収録は観測システムを波高計と連動させ、あらかじめ設定した波高以上の波が来襲した時に自動的にシステムを起動させて収録するもので、1回の起動で20分間連続観測する。パソコンでの収録は、試験函の滑動時に備えたもので、約66時間分のデータをハードディスクにエンドレスに収録し、必要に応じてこれを MT にはき出し保管する方式である。なお、パソコンでの収録は、表-1 のうち部材の安全性に関するものを除いたデータについて行っている。観測周波数は、どちらの観測システムとも 20 Hz である。

表-1 滑動実験における現地計測内容

調査分類	計測項目	計測部材	計測器	台数
①水理特性に関するもの	水平波圧	外円筒壁, 内円筒壁	波圧計	24
	鉛直波圧	中間床版, 蓋コンクリート	〃	4
	揚圧力	底版	〃	6
②部材の安全性に関するもの	鉄筋応力	外円筒壁	鉄筋計	10
	コンクリート応力	外円筒壁	ひずみ計	2
③堤体の安全性に関するもの	水平変位	外円筒壁上面	ワイヤー式変位計	4
		底版	〃	2
		蓋コンクリート上部	速度計	1
	鉛直変位	外円筒壁頂部	〃	2
	傾斜	蓋コンクリート上部	傾斜計	2

(4) 二重円筒ケーソンの滑動状況

滑動試験函の観測は1990年11月から開始されている。1991年2月16日から17日にかけて冬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968ミリバール), 強い季節風により周辺地域においてシケが発生した。これにより試験函は2月17日2時50分に港内側に1.06m滑動した。試験函は、その後も5回にわたって滑動を繰り返し、最終的には5時10分頃に基礎マウンドから滑り落ち、転倒している。表-2には滑動時の波浪状況を示したが、初期滑動時の波浪($H_{1/3}=2.05\text{m}$, $T_{1/3}=14.1\text{s}$)は、設計波に比べて波高は小さいものの、周期はかなり大きいものとなっている。また、潮位も+0.31mと満潮時期にあたっていた。

最初の滑動時の観測データを図-2に示したが、周期が長いので、波圧については外円筒内側背面でやや衝撃的な波形がみられる以外は重複波的なゆるやかな波形となっている。滑動現象については、小さい変位の繰り返しによる滑動ではなく、重複波における滑動の特徴である

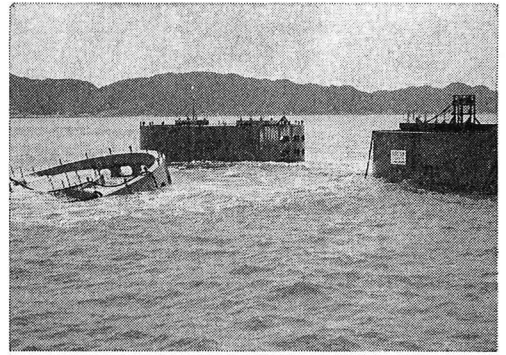


写真-1 滑動試験函滑動状況 (港内側より撮影)

表-2 滑動時波浪状況 (1991. 2. 17)

測定時間	$H_{\max}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	累積滑動量 (m)
2:45~3:00	3.15	2.05	14.1	1.06(1)
3:00~3:15	2.77	1.72	13.1	1.06(0)
3:15~3:30	3.19	2.03	12.7	4.32(2)
3:30~3:45	2.92	2.05	12.6	4.87(1)
3:45~4:00	3.17	2.23	13.4	5m以上(1)

(注) 累積滑動量欄の括弧数字は測定時間内に生じた滑動回数を示す。

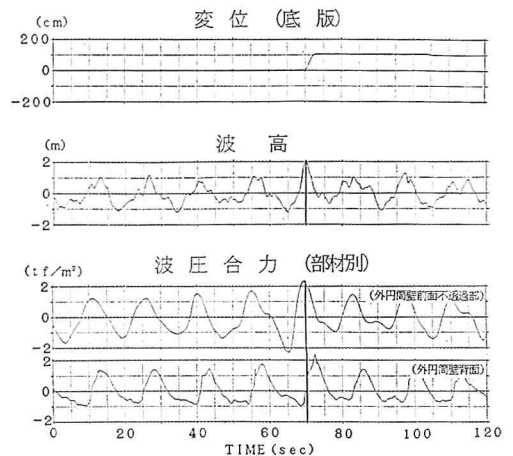


図-2 滑動時観測データ

1波による大きな変位の状況がみられる。

また、図-3には滑動試験函により測定された波高と波圧の関係の一例を示した。波圧の測定点は、外円筒壁前面透過部(WP 2)、不透部(WP 3)と外円筒壁背面(WP 16)である。図中において、滑動時データは滑動時の波高とそれに対応する波圧の値を、非滑動時データは $H_{\max}$, $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ とそれに対応する波圧の値をとっている。全体として、0.5~1.0 w_0H 程度であり、これからの衝撃的な波圧は作用していないことがわかる。

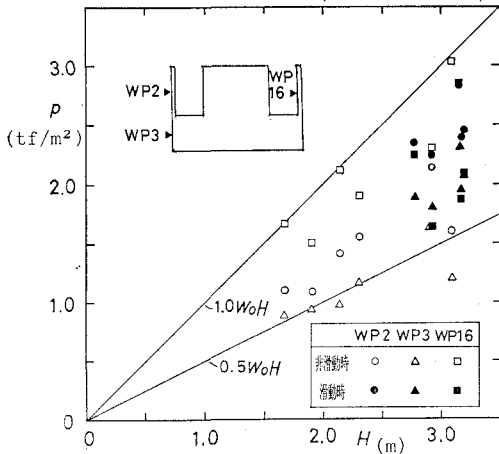


図-3 滑動試験函の波高と波圧の関係

3. 模型実験

模型実験は、図-4 に示す運輸省港湾技術研究所の大型平面水槽（幅 20 m、長さ 50 m）に、海底勾配 1/50 の斜面を設置し、縮尺 1/21 の模型による行った。模型の二重円筒ケーソンは、底版のみモルタル製とし、それ以外はすべてアクリル製である。滑動函には現地と同様に波圧計と変位計を取り付け、波圧と滑動量を測定した。実験波は現地で計測された波と同じ有義波高、周期の波を 5 波群用いており、波のスペクトル形状も現地ととできるだけ近くなるようにしている。なお、滑動の再現実験については、それぞれ 2～3 回繰り返し実験を行っている。

滑動の再現実験のほかに、ケーソンの滑動安全率の検証のため、ケーソンの背後の水位と前面の水位の測定実験と、ケーソンとマウンドの摩擦係数の確認実験も別途実施している。

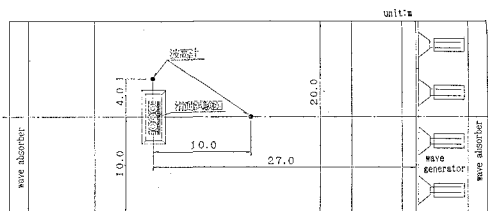


図-4 実験装置

4. 模型実験結果と現地実験との比較

(1) 波 圧

二重円筒ケーソンの設計における作用波圧は、これまでの研究から、合田式による波圧に対して波の位相ごと、部材ごとに適当な低減係数 λ を乗じて得られる波

圧分布を用いて計算を行っている。ここでいう波の位相とは、二重円筒ケーソンの前半分の外側に働く波圧が卓越する瞬間（押波Ⅰ時）と、外円筒前面の開口部から進入した波が遊水部を通過して外円筒背面部内側に波圧を与える瞬間（押波Ⅱ時）をいう。

図-5 は外円筒前面透過部に作用する波圧について、現地観測データと模型実験結果を比較したもので、縦軸に実測値を、横軸に計算値をとっている。全体的に現地データのほうが模型よりもわずかに小さい傾向にあるが、それぞれ計算値と比較的よく一致している。

また、現地における最初の滑動時の外円筒透過部前面の同時波圧分布と、これに対応する模型実験の押波Ⅰ時における同時波圧分布を比較したものを図-6 に示した。これについても、現地データと模型実験結果の分布形はよく一致しており、正面直角方向の点を除いて、ほぼ等分布の波圧分布となっている。

以上のことから、滑動時の波圧については、模型実験はほぼ現地の状況を再現しているとともに、計算による波圧強度とも近いものになっていると考えられる。

(2) 滑 動 量

図-7 は、模型実験における波高と滑動量の関係を示したものである。縦軸には滑動量を、横軸には最高波高

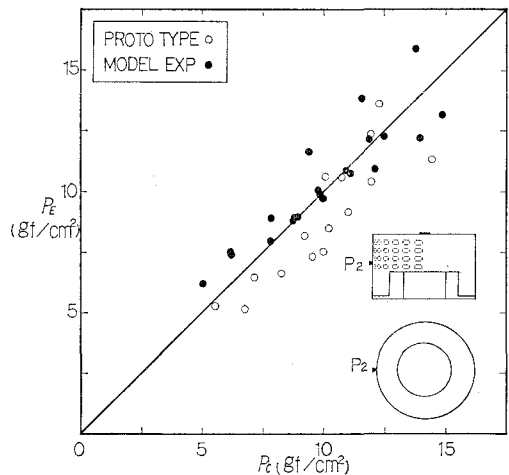


図-5 波圧の比較

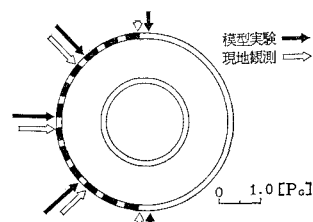


図-6 同時波圧分布図

H_{max} をとっており、ともに現地換算値で示してある。実験では、現地設置滑動函と同じ重量 ($W1$) のものと、ケーソンの中詰め水の低下による重量の減少の可能性を考えて中詰め水位が HWL まで抜けたと仮定した重量 ($W2$) のものの2ケースについて実験を行っている。

現地においては、図中にも示すように $H_{max}=3.15\text{ m}$ で最初の滑動 (1.06 m) が生じたが、模型実験においても $W1$ についてはおおよそ H_{max} が 3.0 m 以上で滑動が生じていることがわかる。現地における最初の滑動時の波浪条件と同じ有義波高のケースのみに着目してみると、模型実験11ケース中、 $W1$ で6ケース、 $W2$ で11ケースが滑動しており、 $W1$ が滑動限界重量に近いものであると考えられる。

但し、滑動量については $W1$ の場合はかなり小さいのに対し、 $W2$ の方は滑動量が大きく生じているケースが多く、現地の滑動量に近いものもある。

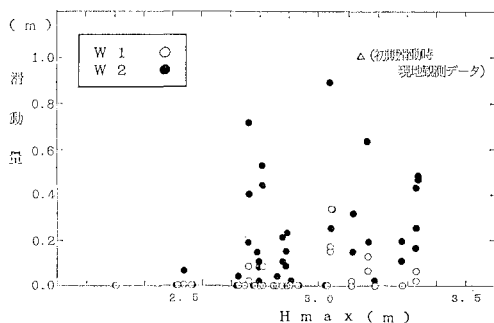


図-7 H_{max} と滑動量の関係

(3) ケーソン背後の水位

今回の現地実験では、ケーソンが3函だけ孤立した状態にあり、特に周期が長い波が作用する場合には回折波によるケーソン背後の水位変動を無視できない。現地データからもケーソンが滑動し始める時は背後の水位が低下している現象が観測されており、このことにより滑動抵抗が減少したことが考えられる。こうした現象を模型実験でも確認することとした。

二重円筒ケーソン堤の両側に側壁を設置し回折波の効果を低減して実験を行うと、背面の水位に顕著な低下現象はみられないが、この側壁を取り除いて実験を行うと図-8に示すような結果が生じた。図-8は、外円筒前面での波圧のピーク時におけるケーソン前面と背面の水位 η を、通過波高 H_I で無次元化して示したもので、横軸にはケーソン3函分の長さ B を波長 L で無次元化した値をとっている。これによると、現地における滑動時の波長に近いところで背面水位の低下が見られており、回折波の影響で背面の水位が変化することが確認さ

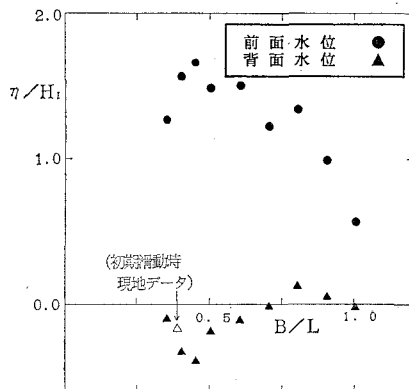


図-8 二重円筒ケーソンの前面および背面の水位

れた。

(4) 摩擦係数

模型実験において、捨石マウンドとケーソン底面（モルタル製）との摩擦係数の確認試験を行った。その結果、摩擦係数はマウンドの締め固め状態によって異なり、十分に締め固めた場合の摩擦係数の平均値は $\mu=0.61$ 、軽く締め固めた場合では $\mu=0.57$ 、締め固めをしないで実験した場合では $\mu=0.50$ となっており、締め固めが不十分な場合には摩擦係数がやや小さくなっている。今回の模型による滑動実験では、現地と同じ条件とするために締め固めをあまり行っておらず、模型実験における滑動時の摩擦係数は $\mu=0.55$ 程度であったものと思われる。

既往の研究（森平ら、1978、1979、運輸省第二港湾建設局、1986）によれば、現地における摩擦係数は、ケーソンの設置直後は小さく、波の作用を受けるにつれてマウンドが締め固められ摩擦係数が増大するとされている。今回の現地滑動函は、滑動実験という性格上、堤体水中重量が非常に軽く、基礎マウンドに軟着底したままの状態でも3ヶ月足らずの早い時期に滑動していることから、締め固めが十分でなく基礎マウンドとのかみ合わせも悪くなっていたものと想定され、摩擦係数は設計時に考えていた0.6よりも小さくなっていたと思われる。

5. 滑動安全率の検討

(1) 模型実験における滑動安全率

図-9は、模型実験における実測波圧から計算した滑動安全率と滑動量の関係を示したものである。ここでの滑動安全率は、実測波圧により計算される全水平波圧合力 P とケーソン重量、揚圧力などから計算される全鉛直合力 V 、摩擦係数 μ を用いて、 $SF=\mu V/P$ により求められたものである。摩擦係数は確認実験結果に基づき0.55を用いている。また、ケーソン背後の水位の影響についても考慮した結果となっている。

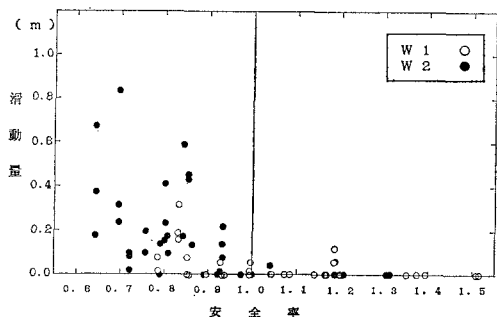


図-9 模型実験における滑動安全率と滑動量

図-9を見ると、W1（設計重量）、W2（中詰め水が抜けたと仮定した重量）ともに安全率1.0がほぼ滑動限界となっており、測定波力によって滑動限界があらわることがわかる。

(2) 現地滑動実験における滑動安全率の検討

現地における最初の滑動は、設計波よりも周期は大きいものの波高は小さい波 ($H=3.15\text{m}$, $T=12.6\text{s}$) により生じている。このときの滑動安全率を当初設計法により求めると1.0を超えており、計算結果と実現象が一致しない。その原因としては、波圧算定法の不確実性、ケーソン背後の水位の影響、摩擦係数の違い、堤体重量の変化などが考えられるが、これらについて、これまで述べてきた模型実験結果等をもとに検討を加えてみる。

ケーソンに作用する波圧については、既に述べたように、現地観測データおよび模型実験データともに計算値とはほぼ等しくなっており、合田波圧に部材ごとの低減率を乗じて求める波圧算定式による計算の誤差はあまりないものと考えられる。

ケーソン背後の水位の影響については、模型実験でもその現象が確認されているが、現地滑動時にも背後水位の低下が観測されており、この水位低下の影響も含まれている現地実測波圧データにより滑動安全率を算出すると $SF=1.19$ となる。

摩擦係数については、当初設計法ではコンクリートと基礎捨石面の値として通常用いられている0.6を使って計算しているが、既に述べたように現地の状況、模型実験結果からみて、滑動函の特殊性として実際の摩擦係数は0.6よりは小さかったことが推定される。また、堤体重量の変化については、内円筒の中詰め水の漏出による

影響が考えられるが、これについては現場での確認はなされていないものの、模型実験における滑動量の検討結果を考慮すると、滑動函は当初設計重量よりも軽かった可能性も考えられる。仮に、摩擦係数が0.55で、中詰め水位が滑動時静水面 $+0.31\text{m}$ まで低下していたと仮定すると、滑動安全率は0.93と計算される。

以上の検討結果より、ケーソン堤体背後の水位低下の影響があったことを前提として考えると、摩擦係数のわずかな変化、あるいは中詰め水の漏出などを仮定することにより、試験函の滑動現象を十分説明できるものと考えられる。

6. おわりに

二重円筒ケーソンの耐波安定性について、現地滑動試験から貴重なデータが得られ、また、その再現模型実験結果から、現地での滑動状況の検証を行うことができた。これらの検討から、二重円筒ケーソンを実用化していく上での耐波安定性および設計法の妥当性について確認できたものとする。現地実証試験における二重円筒ケーソン（標準函）の計測は1992年まで続けられており、今後は部材設計等に用いるより詳細な水理特性の把握を行うこととしている。

なお、この実証実験は、合田良実横浜国大教授を委員長とする委員会の指導のもとに実施している。また、現地実験にあたった中野前運輸省境港工事事務所長をはじめとして、試験の計画から現在までには非常に多くの方々の協力を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 谷本勝利・下迫健一郎・宮崎啓司 (1987): 二重円筒型波浪制御構造物に働く不規則波力, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 571-575.
- 谷本勝利・下迫健一郎 (1988): 二重円筒ケーソンに働く滑動波力に対するマウンドの影響, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 642-646.
- 森平倫生・木原 力・堀川 洋 (1978): 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.
- 森平倫生・足立一美 (1979): 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について (第2報), 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 446-450.
- 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所 (1986): 捨石マウンドの不陸について.