

曲面スリットケーソンに働く波力について

谷本勝利*・原中祐人**・富田英治***・和泉田芳和****

1. ま え が き

曲面スリットケーソンは前面透過壁を曲面縦スリット壁とし、1/4 円形状の遊水室を設けるところに構造的特徴を有した消波ケーソンであり、前回の講演会において報告したように、反射波軽減効果の高い構造であるといえる¹⁾。

しかしながら、これを現地に適用するためには、設計において重要な波力特性を明らかにしなければならない。そのため本研究は、曲面スリットケーソンに働く波力について実験を行い、基本設計および部材設計における設計波力の与え方を検討したものである。

2. 部材に働く波力

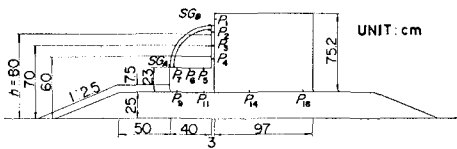
(1) 実験の方法

部材波力の実験に用いた水路は長さ105 m、幅 3.0 m (途中から隔壁により幅 0.8 m)、深さ 2.5 m (水路床勾配 1/100) の大型造波水路である。図—1、2 に基本型および複合型の模型の断面図を示した。曲面スリット壁の外半径

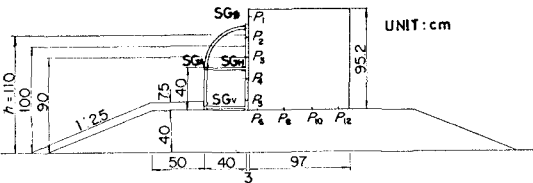
R は 40 cm、スリット部材幅 D は 6.0 cm、厚 b は 3.0 cm、間隙比 ϵ は 0.25 である。ただし、複合型の水平スリット部材は幅 4.0 cm、厚 2.0 cm、間隙比 0.50 とした。図中、 $P_1, P_2, \dots$ 等は波圧計取り付け位置を示しており、 $SG_A, SG_B, \dots$ 等はストレンゲージの貼付位置を示している。ここに、測定用のスリット部材は歪み測定を容易とするため、一端を切り離した片持梁とし、固定端付近の両縁にゲージを貼付している。このうち、曲面スリット部材については、下端固定の部材と上端固定の部材の 2 本を一对の測定部材とし、それぞれの曲げ歪みから曲面スリット部材に働く合力と作用角を求めることができるようにした。

表—1 部材波力の実験条件 ($R=40$ cm)

型 式	h (cm)	l_0 (cm)	$\frac{l_0}{R}$	R/L				$\frac{d}{h}$	$\frac{H}{h}$
				$T=2.0$ s	$T=2.5$ s	$T=3.0$ s	$T=3.5$ s		
基本型	60	20	0.70	0.092	0.071	0.058	0.049	0.458	0.30~0.75
	70	18	0.45	0.087	0.066	0.054	0.045	0.536	0.33~0.76
	80	8	0.20	0.083	0.063	0.051	0.043	0.594	0.34~0.70
複合型	90	30	0.75	0.079	0.060	0.048	0.041	0.472	0.17~0.74
	100	20	0.50	0.077	0.057	0.046	0.039	0.525	0.23~0.73
	110	10	0.25	0.075	0.055	0.044	0.037	0.568	0.29~0.70



図—1 部材波力実験基本型模型



図—2 部材波力実験複合型模型

実験波等の条件は表—1 に示したとおりである。表中の h は堤体位置での水深、 l_0 は曲面スリット壁先端の静水面上の高さ、 d はマウンド被覆工先端上の水深、 T は波の周期、 L は波長、 H は波高である。

(2) 実験結果

図—3 は基本型への波の作用状況を示したものであるが、曲面スリット壁外側波面の先端がケーソン上部工に達した瞬間に、遊水室内に衝撃圧が発生し、曲面スリット部材に働く波力はそれまでの内向きへの力から外向きへの力に急変する。この衝撃圧の発生機構については、直後に著しい気泡の放出が認められることから、遊水室に空気が閉じ込められ、それが圧縮されることによると推測される。衝撃圧がこうした空気層の圧縮を介して発現する場合には、大気圧をも縮尺しなければ相似則が成り立たないが²⁾、一般に縮尺実験の結果は安全側の値を与えるので、本研究においてはこれをそのまま用いることにした。また、スリット部材の曲げ歪みは衝撃応答の

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長
** 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
*** 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室
**** 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水汚染研究室 (元水工部防波堤研究室)

結果であり、真の波力を求めるためには部材の衝撃応答の影響を補正しなければならない。そのため、衝撃力の時間波形を遊水室内壁において測定した波圧波形記録から、作用時間が $0.03 \sim 0.06$ s 程度の二等辺三角形とすると、曲面スリット部材の固有振動周期は 0.06 s、減衰定数は 0.05 程度であるので、衝撃応答係数 φ は $1.1 \sim 1.4$ 程度となる³⁾。すなわち、補正係数 $1/\varphi$ は $0.7 \sim 0.9$ 程度である。したがって、作用波力は記録された値の静的換算値より小さくなるが、時間波形など不明な点があるので、とりあえずこの補正は行わず記録の値そのものを用いて整理することにする。

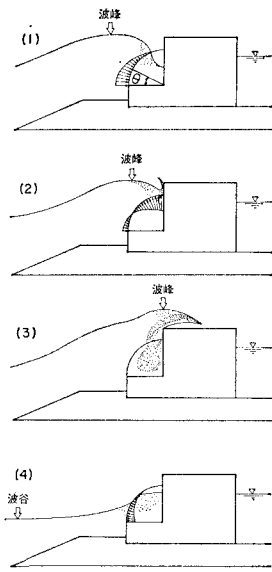


図-3 波の作用状況

く無視できるので、結果を示していない。データはばらついているが、 p_A^+ は $0.75w_0H$ 以下となっている。ここに、 w_0 は流体の単位体積重量である。一方、 p_B^- は曲面スリット壁の静水面上の高さ l_0 によって異なり、これが大きいほど大きくなる傾向を示す。また、必ずしも波高に比例しているわけではなく、ある程度以上の波高になると波力はそれほど変化しなくなるようであるが、一応波高に比例するかたちで表わすと $p_B = -1.5w_0H$ 程度を考えておけばよいといえる。

複合型の場合には、このほか鉛直および水平スリット部材に働く波力を考えなければならない。これについては波力が部材に等分布で作用するものとして整理した。結果の図示は省略するが、鉛直スリット部材には外から内側へ $0.75w_0H$ 、内から外側へ $0.25w_0H$ の波力強度が働くと考えれば十分である。また、水平スリット部材に働く波力強度はこの場合比較的小さく、 $\pm 0.25w_0H$ 程度と考えておけばよい。

曲面スリット部材に内から外向きに衝撃圧が働くとき、同時に遊水室内壁にも衝撃圧が働く。図-5 はこの

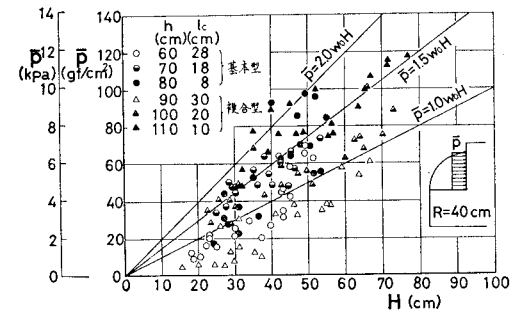


図-5 遊水室後壁に働く平均波圧強度

ときの遊水室後壁に働く平均波圧強度を示したものである。曲面スリット部材に働く p_B^- と同様 l_0 が小さくなるにつれて大きな波圧強度となる傾向が認められる。また、必ずしも波高に比例して大きくなるわけではないが、周期や潮位の影響を包含したかたちでは $\bar{p} = 2.0w_0H$ 程度の衝撃圧が働くと考えておくのが安全であろう。

さらに、図-6 は基本型の遊水室底版、図-7 は複合型の下段遊水室後壁に働く波圧強度を示したものであ

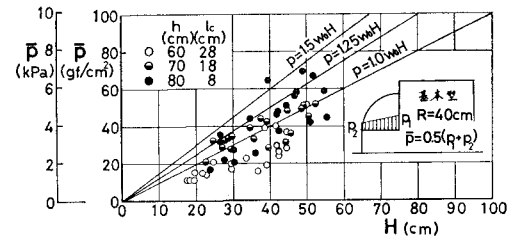


図-6 遊水室底版に働く平均波圧強度 (基本型)

まず、曲面スリット部材については、部材軸に沿って次式で表わされる波力強度 p が働くものとする。

$$p = p_A \cos^2 \theta + p_B \sin^2 \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 θ は前出の図-3 に示しているように部材軸上各位置の曲率の中心からの方向と水平面とのなす角度であり、 p_A は $\theta = 0^\circ$ すなわち下端での波力強度、 p_B は $\theta = 90^\circ$ すなわち上端での波力強度である。波力強度は遊水室の外から内側へ向かうとき正、内から外側へ向かうとき負と定義する。

図-4 は前出の図-3 の (1) に対応するときの p_A (右肩に + を付す)、および (2) に対応するときの p_B (右肩に - を付す) の実験値を示したものである。ただし、(1) のときの p_B^+ 、(2) のときの p_A^- は値が小さ

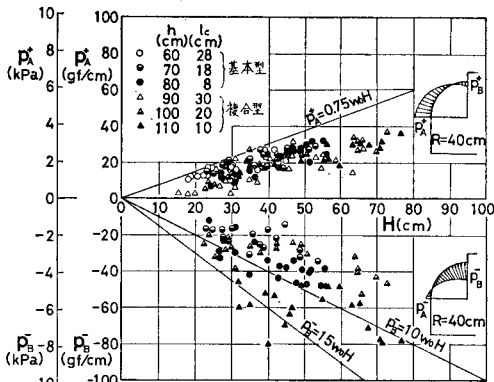


図-4 曲面スリット部材に働く波力強度

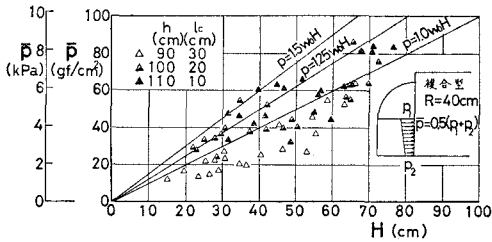


図-7 下段遊水室後壁に働く平均波圧強度 (複合型)

る。ともに平均波圧強度で示しているが、前者は外側に向かって、後者は下方に向かって減少する分布特性を有している。

(3) 部材設計波力

以上、曲面スリットケーソンの部材に働く波力実験の結果を示したが、波力は潮位や波の条件によって複雑に変化し、これを精密に定式化することはむづかしい。また、衝撃圧の発生機構については不明点があり、設計にあたってはある程度安全側を考えておくのがよいと思われる。図-8 はこれを考慮して当面曲面スリットケー

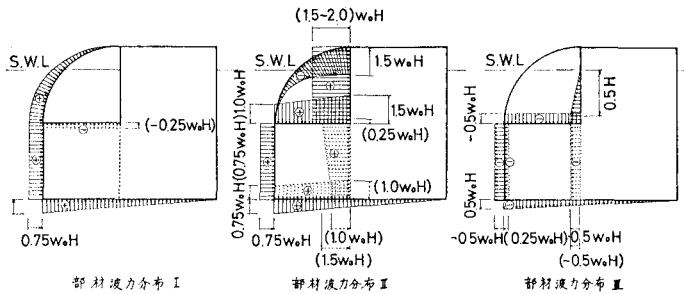


図-8 部材設計波力分布

ソンの部材の設計に用いるのに適当と思われる波力の分布を示したものである。部材波力分布Ⅰは前出図-3の(1)、分布Ⅱは(2)に対応し、曲面スリット部材に働く波力は式(1)において、分布Ⅰのとき $p_A=0.75w_0H$, $p_B=0$, 分布Ⅱのとき $p_A=0$, $p_B=-1.5w_0H$ で与える。分布Ⅲは波面の下降時および波の谷のときに対応する波力である。

3. 全波力

(1) 実験の方法

曲面スリットケーソンに働く全波力を部材波力とは別に測定した。図-9 はこの実験の断面図を示したもので

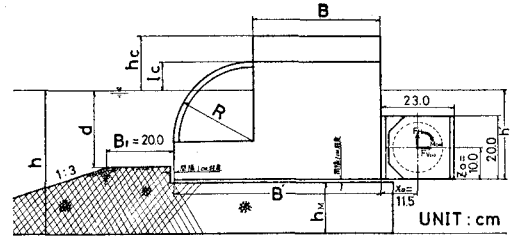


図-9 三分力実験模型

ある。本実験に用いた水路は長さ 30 m, 幅約 5 m, 深さ 1.0 m の仮設水槽中央に途中から隔壁を設けた幅 50 cm の水路であり、堤体設置位置の水路床は 1/100 勾配としてある。

全波力の測定は図中に示しているように三分力検出器に模型ケーソンを固定し、これによって水路幅方向単位長さあたりの波力の水平成分 F_H , 鉛直成分 F_V , モーメント M_0 を記録する方法によった。ただし、モーメント M_0 は検出器の中心のまわりのモーメントであり、ケーソン後趾のまわりのモーメントを求めるためには補正が必要である。三成分の符号はそれぞれケーソンを押す方向、持ち上げる方向および後方へ転倒させる方向を正とする。

三分力検出器は架台に固定した昇降装置に取り付けており、ケーソン模型を付けたまま上下に移動できるようにしてある。今回の実験においては金網棒に詰めた捨石マウンド上面とケーソン底面の間に 1 cm 程度の間隔を設け、ケーソンがマウンドに接触しないようにした。

実験条件は表-2 および表-3 に示したとおりである。ここに、 h_c はケーソン上部の静水面上の天端高、

表-2 三分力測定実験条件 (1)

型式	R (cm)	D (cm)	b (cm)	ϵ	l_c (cm)	h_c (cm)	h' (cm)	l (cm)	d (cm)	B (cm)	B' (cm)
基本型	25.0	4.0	1.5	0.25	9.0	17.0	28.0	45.0	25.0	40.0	65.0
複合型	16.0	3.0	2.0	0.25	9.0	14.0	28.0	42.0	25.0	40.0	57.0

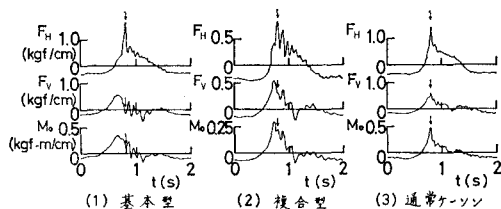
表-3 三分力測定実験条件 (2)

h (cm)	d/h	T (s)	h/L	H (cm)	H/h
35.0	0.714	1.54, 2.00, 2.50	0.136, 0.100, 0.0786	10.0~26.2	0.286~0.749
45.0	0.556	1.54, 2.00, 2.50	0.160, 0.116, 0.0901	9.0~31.4	0.200~0.698
55.0	0.455	1.54, 2.00, 2.50	0.182, 0.131, 0.101	16.0~36.0	0.291~0.655

h' はケーソンの基面水深, l は上部を含めたケーソン全高, B はケーソン本体部の幅, B' は消波部を含めた全幅である.

(2) 実験結果

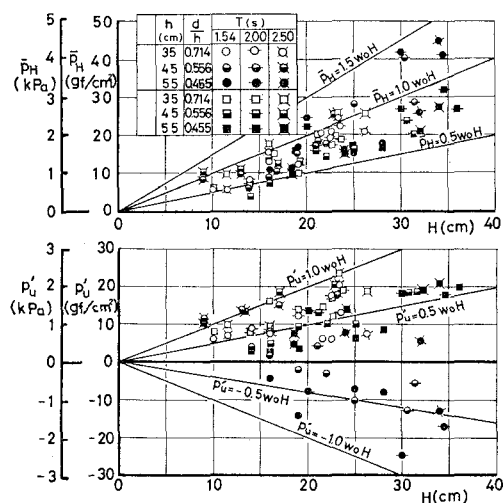
図—10 は三分力記録の例であり, 基本型の消波部を取



図—10 三分力記録の例 ($h=45$ cm, $T=2.0$ s, $H=31.4$ cm)

り除いた通常のケーソンに対する測定記録も合わせて示してある. 図中矢印は水平成分が最大となった瞬間を指示しているが, 通常ケーソンの場合鉛直成分, モーメントが水平成分と同時に最大値を示すのに対し, 曲面スリットケーソンでは必ずしも同時に最大とならない. 特に, 基本型の例に認められるように, 水平力が最大するとき鉛直力は負すなわち下向きの力を示すことがある. これは 2. で述べたように, 遊水室内で衝撃圧が発生したとき, 遊水室底版に下向きの力が働き, これが卓越するためと考えられる. なお, 複合型の F_H に典型的例が認められるように, 衝撃圧が作用したあと顕著な減衰振動が現われているが, これはケーソンを取り付けた状態での測定系の固有振動と推定される. この振動数は 20 Hz 程度で衝撃応答が問題となるが, とりあえずこれを考慮しないで結果を整理する.

図—11 は水平力の最大値とそのときの鉛直力を波高に対してプロットしたものである. ただし, 水平力はケーソンの全高で割った平均波力強度 $\bar{p}_H$ で, また鉛直力



図—11 水平力の最大値とよときの鉛直力

はケーソン本体の幅 B に三角形分布で働くとしたときの前端での揚圧力強度 p_u' で表わしている. つまり, これらと F_H , F_V とはそれぞれ次の関係にある.

$$\bar{p}_H = F_H / l, \quad p_u' = 2F_V / B \quad \dots\dots\dots (2)$$

結果は著しくばらついているが, $\bar{p}_H$ は $1.5w_0H$ 以下, p_u' はほぼ $1.0w_0H$ 以下である. 前出の記録で述べたように p_u' が負の値となる例もあり, 基本型全データの 38% に達している. 複合型の場合, 鉛直力が負とならないのは底版が基本型と比較して相対的に遠く, 衝撃圧が減衰しているためと推測される. そのときの水平スリット部材に働く下向きの衝撃圧が小さいことは 2. で述べたとおりである.

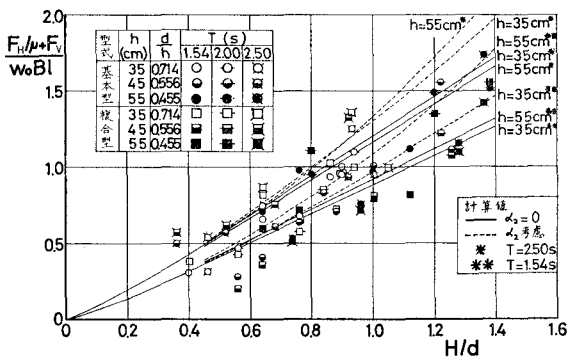
(3) 安定性の検討に用いる設計波力

ケーソンの安定性を検討するうえで最も重要なのは滑動である. 一般に, 滑動限界状態においては次の関係が成り立つと考える.

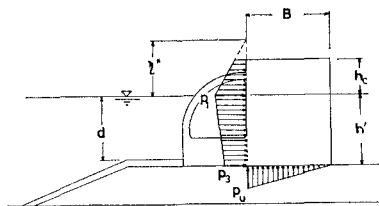
$$F_H = \mu(W_0 - F_V) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, μ は摩擦係数, W_0 はケースの静水中重量であり, W_0 が $(F_H/\mu + F_V)$ より大きければ滑動しない.

図—12 はこの $(F_H/\mu + F_V)$ を w_0Bl で割って無次元化して, H/d に対し実験値をプロットしたものである. 図中に合わせ示してある計算値は通常のケーソン堤に用いられる合田式⁷⁾を基本型の諸元に対し適用したものである. ただし, 図—13 に示しているように消波部を無視してケーソン本体に波圧が作用するとしている. この計算値のうち実線で表わした値は合田式における波圧係数 α_2 を 0 としたときの値である. 波圧係数 α_2 はマウンドの高さ等の影響を表わす係数であり, これを考慮す



図—12 滑動安定性に対し等価全波力



図—13 安定性の検討に用いる仮想波圧分布

ると図中破線で示しているように、マウンドが高く、 H/d が大きくなるにつれて大きな波力が作用することになる。

一方、曲面スリットケーソンの実験値は、著しくばらついているが、 d/h , H/d が大きくなっても特に波力の異常な増大傾向は認められない。これは多孔壁などの通常の直立消波ケーソンにおいても認められるところである⁹⁾。別に実施した不規則波を用いた滑動実験の結果では、図-13 に示したように曲面スリットケーソンの消波部を無視したケーソン本体に合田式において $\alpha_2=0$ とした波圧が働くものとして設計すれば滑動に対して安全であることが確かめられている⁹⁾。したがって、安定性に対する設計波力は便宜的に合田式を準用する方法で求めればよいと考える。

4. あとがき

本研究の主要な結論をまとめると次のとおりである。

① 曲面スリット壁外側の波面先端がケーソン上部に達した瞬間に遊水室内に衝撃圧が発生し、曲面スリット部材に働く波力は内向きから外向きへ急変する。部材設計に用いる波力はこれを考慮して、当面 図-8 に示した 3 種の分布を考えるのがよい。ただし、周期や潮位による変化を包含したものであり、現象の解明が進めばこれよりさらに小さくできる可能性を有する。

② 曲面スリットケーソンに働く水平力と鉛直力は、一般に同時に最大とはならない。特に、基本型の場合、水平力が最大となるときの鉛直力が下向きとなることがあ

る。

③ 曲面スリットケーソンの安定性の検討に用いる波力は、部材波力とは別に消波部を無視したケーソン本体に合田式において $\alpha_2=0$ とした波圧が働くものとして求めてよい。

以上、曲面スリットケーソンの一応の設計を可能とするため、かなり大胆な考え方で基本設計および部材設計における波力条件の与え方を示した。しかしながら、現象的にみれば必ずしも適切な方法とはいえない面もあり、また実用的にも斜め入射波に対する波力の与え方などの問題点を残している。これらについて、今後さらに検討を進めていきたい。

なお、本研究を進めるにあたっては運輸省港湾局、建設局ならびに港湾技術研究所の多数の方の御支援を頂いた。関係各位に対しここに深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・原中祐人・大里睦男：曲面スリット堤の反射特性について，第 26 回海講論文集，pp. 323~327, 1979.
- 2) 谷本勝利・高橋重雄・村永 努：直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力——空気圧縮モデルによる検討——，港研報告，第 19 巻第 1 号，pp. 3~31, 1980.
- 3) たとえば，合田良実：衝撃荷重の測定について——減衰振動系の衝撃応答特性——，港研資料，No. 33, 41 p., 1967.
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，pp. 2-106~2-118, 1979.
- 5) 谷本勝利：混成防波堤に働く波力について，昭和 51 年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 1~26, 1976.
- 6) 谷本勝利：曲面スリット堤の水理特性について，昭和 54 年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 1~27, 1979.