

共振集波効果を応用した部分消波ケーソンの水理特性

高橋重雄*・木村克俊**・田中 智***

1. ま え が き

直立消波ケーソンは反射波および波力を低減できる優れたケーソン構造である。すでに種々の構造形式が考案され、実際に現地に施工されたものも多い。しかしながら、これまでは直立消波ケーソンの断面形状のみが注目され、その平面形状が検討されたことはあまりない。筆者らは直立消波ケーソンの平面形状に着目して、図-1に示す「部分消波ケーソン」という新しい構造形式を考案した。これは通常の不透過ケーソンの中央に、消波部を後退させて配置したものである。この構造は、平面的な凹部での波の共振現象によって、波のエネルギーを平面的に集め消波するもので、消波性能の向上が期待できる。ここではこれを「共振集波効果」と呼ぶ。

本報告ではまず、共振集波効果の原理を数値計算によって示す。次に消波部が縦スリットと遊水室から成る部分消波ケーソンの反射特性および耐波安定性について、水理模型実験結果に基づいて検討する。

2. 共振集波効果の原理

(1) 平面的な共振現象

外海に対して入口を開いた水域では、侵入波の周期がその水域の水面振動の固有周期に近づくと共振が生じ、水面振動の振幅が大きくなる。たとえば、港内副振動や湾水の振動といった長周期波の共振現象は良く知られている。

長周期波と同様に通常の波浪に対しても、侵入波の周期が凹部水域の固有周期に近づけば共振が生じる。凹部内に波のエネルギーを吸収する装置を設ければ、共振による凹部への入射波高の増大によって波エネルギーの吸収量も増えるため、凹部水域の幅より広い部分から波のエネルギーを集めることができる。こうした共振集波効果の原理について、数値波動解析法による計算結果に基づいて以下に説明する。

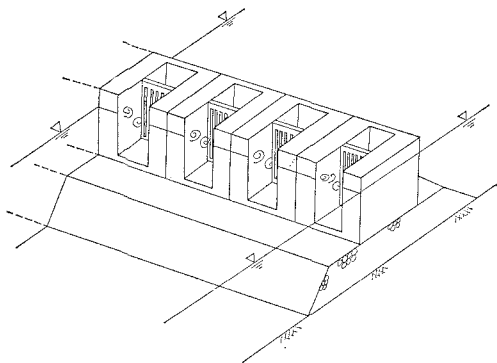


図-1 部分消波ケーソンの例

(2) 数値波動解析法による共振集波効果の計算例

数値波動解析法は、谷本ら(1975)によって開発された緩勾配方程式法の一つである。ここでは、図-2に示すような幅 B_0 の水路において、波高 H_I の規則波が入射する場合を考える。図の右端は両側を完全反射の不透過部とし、これから D^* だけ後退した位置に、長さ B_1 の消波部がある凹型の構造を設置している。なお、消波部の反射率は C_R とする。以下、計算条件として反射率を与える場合には C_R を用い、計算あるいは実験による反射率は K_R を用いて両者を区別する。

図-3は消波部 ($C_R=0.3$) の割合 B_1/B_0 を0.5とし、消波部の長さ B_1 および凹部の奥行き D^* と波長 L の比を0.145とした場合の波高分布である。凹部奥壁の前面上では入射波高 H_I で無次元化した波高比が1.8になっており、線形を仮定した場合の通常の壁前面の波高比 $1.3(=1+C_R)$ に比べて大きい。これは回折により凹部内に波が入り込むためであり、その様子は等波高比線の

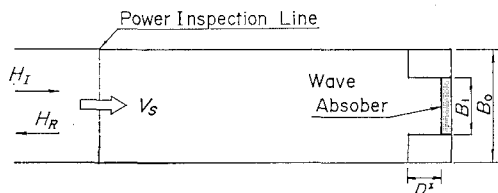


図-2 数値波動解析法による計算条件

* 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
 *** 運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室

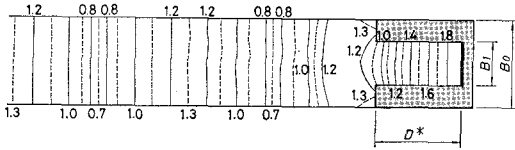


図-3 計算による波高分布の例

コンターにも現れている。凹部からある程度離れたところでは、波の進行方向に節と腹が交互に現れている。Healy の方法によると反射率 K_R はおよそ 0.3 となる。すなわち、凹部の共振集波効果によって、凹部の幅より広い部分の波のエネルギーが吸収されるため、消波部が部分的であっても全体にある場合と同程度の反射率となる。

図-2 に示した凹型の構造に対して、水路全体の反射率を定量的に求めるために、凹部から十分離れたところに検査面を設ける。検査面を通過する一周分きの波パワー V_S は、数値波動解析法による計算結果を用いて求められる。水路全体の反射率 K_R^* は V_S を用いて次式で計算できる。

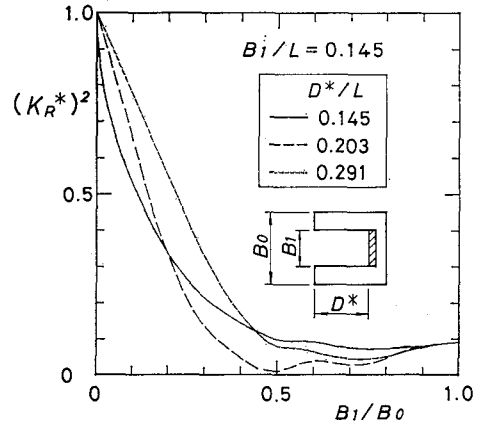
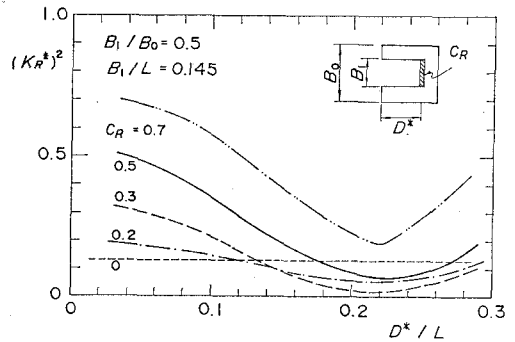
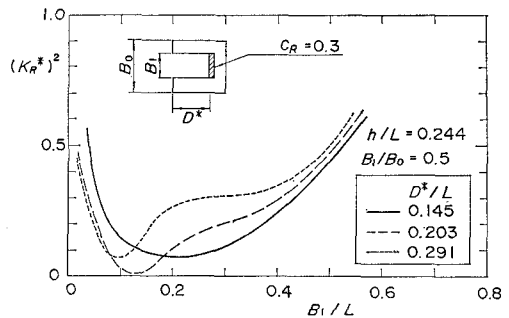
$$K_R^* = \sqrt{1 - \frac{V_S}{(1/8)w_0 H_I^2 C_g B_0}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 w_0 は水の単位体積重量、 C_g は群速度である。前出の図-3 の例では波パワーから求めた反射率 K_R^* は 0.33 となり、Healy の方法による反射率とほぼ一致する。

(3) 凹型構造の各部の諸元と反射率

図-4 は、消波部の割合 B_1/B_0 と水路全体の反射率 K_R^* の関係を示している。なお、計算では波パワー V_S を求めているので、これにあわせて $(K_R^*)^2$ の形で表すことにする。ここで、入射波の波長 L に対する消波部の長さ $B_1/L = 0.145$ とし、凹部内の反射率 C_R は 0.3 で一定とした。また、凹部の奥行きと波長の比 D^*/L を、0.145, 0.203 および 0.291 の 3 種類に変化させた。 D^*/L が 0.203 の場合には、 K_R^* は $B_1/B_0 = 0.5$ 付近で極小となる。それ以外の場合には、 B_1/B_0 が 0.5 よりやや大きいところで K_R^* は極小となるが、これ以上消波部の割合を大きくしても K_R^* の変化は小さい。したがって、以下においては法線方向のケーソンの長さに対する消波部の長さを 50% とした場合について検討する。

図-5 は凹部の奥行きに対する波長の比 D^*/L と水路全体の反射率 K_R^* の関係を示したものである。ここでは B_1/L を 0.145 とし、結果は凹部内の反射率 C_R ごとに線種を違えて示している。計算結果では、 C_R が 0 のケースを除いて、全体的に D^*/L が 0.2 付近で反射率が最も小さくなっている。 C_R が 0 のケースは凹部奥から波が透過する場合を意味する。この場合 K_R^* は D^*/L

図-4 B_1/B_0 の効果図-5 D^*/L の効果図-6 B_1/L の効果

の値にかかわらず一定で、反射率としてはおよそ $K_R^* = 0.5$ である。 C_R の値による反射率の違いをみると、 C_R が 0.7 から 0.3 まではその値とともに K_R^* が小さくなる傾向が認められる。また、 C_R が 0.3 より小さい場合には、徐々に $C_R = 0$ の結果に近づく傾向がある。

図-6 は消波部の長さで波長の比 B_1/L が反射率に及ぼす影響を示している。ここでは $C_R = 0.3$ とし、 D^*/L を 0.145, 0.203 および 0.291 の 3 種類に変化させた。まず B_1/L が 0.1 以下、および 0.4 以上の場合には水路全

体の反射率が高くなり、共振集波効果が生かされないことがわかる。また、 D^*/L が大きいほど、 K_R^* が最小となる B_1/L が小さくなっており、共振が発生する条件では凹部内の水域の面積がほぼ一定になる傾向がある。

3. 部分消ケーソンの反射特性

(1) 実験水路および模型

反射実験は、幅 50 cm の水路において不規則波により実施した。模型堤体は図-7 に示す低マウンド型の混成堤とし、ケーソンは部分消波ケーソンと通常の直立消波ケーソン（以下、全消波と呼ぶ）の 2 種類とした。両者の遊水室の幅 D_1 は等しく、透過壁とともに開口率 ε_s が 24.5% の縦スリット構造とした。部分消波ケーソンは $B_1/B_0 = 0.5$ とし、透過壁の下げ幅 D_2 は遊水室幅 D_1 と同じにした。ここで部分消波ケーソンの凹部全体の容積は、全消波ケーソンの遊水室の容積にほぼ等しい。実験波の周期は、 $T_{1/3} = 0.86 \sim 2.10$ s の 5 種類とし、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.03~0.04 の場合について実験を行った。なお、部分消波ケーソンについては、凹部の形状が異なる構造についても検討している。

(2) 部分消波と全消波の反射特性の比較

図-8 は部分消波と全消波の反射特性を比較したものである。部分消波の場合には、 $h/L = 0.2$ のときに反射率が 0.25 まで下がり、全消波の場合に比べて反射率が小さくなっている。同図の上側には、横軸に波長に対する B_1 の比を示してあるが、実験範囲は $B_1/L = 0.05 \sim 0.22$ であり、2. で示した共振集波の必要条件をほぼ満たしており、これによって反射率が小さくなっていると考えられる。

図中の実線は実験条件に対して数値波動解析法を用いた計算結果である。計算では凹部内での損失に相当する奥壁の反射率 C_R を 0.3 で一定とし、凹部の奥行きを $D^*(=D_1+D_2)$ としている。図の下側には横軸に D^*/L をとった場合を示してある。計算曲線では D^*/L が 0.2 付近で K_R^* は極小となり、この傾向は実験値と一致している。部分消波ケーソンの場合には、ケーソン前面

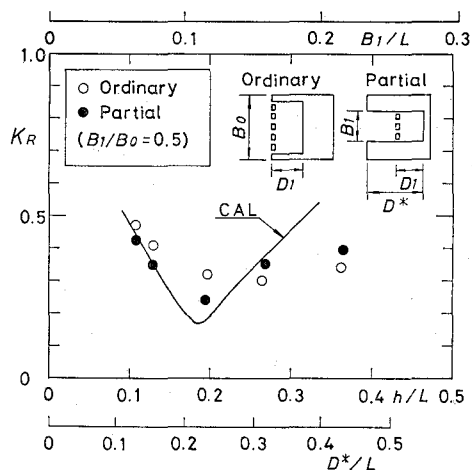


図-8 全消波と部分消波の反射率

の急拡大・急縮部およびスリット部の 2 箇所において損失が生じている。その効果を凹部奥の反射率で与えた簡易的な計算法によっても、部分消波ケーソンの反射特性をある程度把握できることが示された。ただし、 h/L がやや大きいところでは、実験値と計算値に差が認められる。

(3) その他の構造の反射特性

部分消波ケーソンについては、すでに示した基本的な構造（以下、これを基本型と呼ぶ）の他に、凹部奥壁を有孔壁とした透過型と、透過壁背後の遊水室の形状を変えた構造についても検討した。図-9 には、凹部奥壁の開口率 ε_T を 5% とした場合の反射率を Δ で、基本型の結果を $\bullet$ で示している。両者を比較すると、周期の短い場合には透過型の反射率がやや小さくなる傾向がある。部分消波ケーソンの場合は凹部奥壁を透過性にすることは比較的容易であり、海水交換機能を有する防波堤に利用できる。一方、図の口印は遊水室の幅を 1/2 として、波向き直角方向の長さを 2 倍にした場合の実験結果である。この場合は周期が長い場合に反射率が若干大きくなっているが、基本型と遊水室の容積が等しいため両者の差は小さい。したがって、ケーソン幅の制約で最適な遊水室幅が確保できない場合には、このように遊水室の形状を法線方向に長くすることで対処できる。

4. 波力および滑動安定性

(1) 波力特性

波力の測定は、部分消波ケーソンと、高さおよび幅がこれと等しい不透波ケーソンの 2 種類について実施した。堤体模型は反射実験と同じものを使用した。実験はすべて規則波で行っている。実験波の周期は 4 種類とし、波高は $H = 5 \sim 12$ cm の重複波条件に限った。

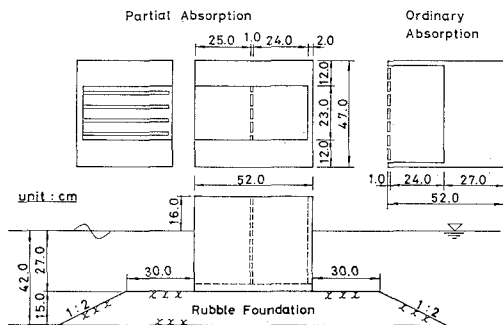


図-7 実験模型

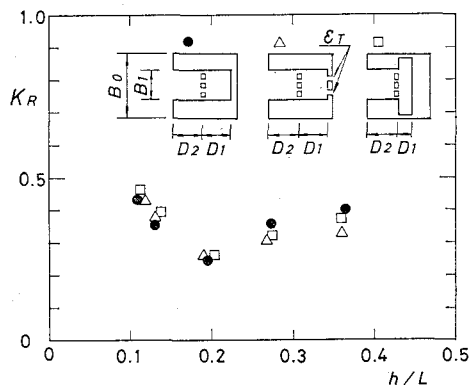


図-9 その他の構造の反射率

部分消波ケーソンの場合、各面での波力がピークが達する時刻に位相差が生じ、全体として波力が小さくなると考えられる。ここでは、スリット前面の波力がピークとなるとき (Phase I), および遊水室後壁での波力がピークとなるとき (Phase II) の2種類について検討している。図-10は前面壁での波力の低減率 λ_{Ft} (Phase I あるいは Phase II) における前面壁での波圧を前面壁の波圧のピーク値で除した値の実験結果である。横軸は波力のピークが生じている位置 (スリット前壁あるいは遊水室後壁) から前面壁までの距離 D_P を入射波の波長 L で除したものである。 $D_P/L=0.20 \sim 0.25$ で λ_{Ft} が 0 となり、それ以上では負となっている。破線は $\cos(2\pi D_P/L)$ で示す曲線であるが、おおむね実験値の傾向と一致する。

図-11は、部分消波ケーソンの各部に働く波力のピーク値を、不透過ケーソンの前面における波力のピーク値で除して無次元化し、低減係数 λ_{Fp} , λ_{Sp} , λ_{Bp} で表した。横軸は比水深 h/L であり、 $(D_1+D_2)/L$ も示している。前面壁の波力低減率 λ_{Fp} は短期周期波に対しては 1.0 付近の値であり、波力の低減効果が現れないが、長周期側では波力が低減する傾向がある。これは周期の短い場合は凹部への波の回り込みが生じにくいことが理由と考えられる。スリット部の波力については全体的に低減係数 λ_{Sp} が 1.0 以上となり、特に短周期の場合には 1.5 以上となる。一方、遊水室後壁の波力については、データのばらつきが大きい短周期の波ほど λ_{Bp} が若干大きくなる傾向が認められる。これはスリット前面の波力低減係数 λ_{Sp} の傾向にある程度似ている。

部分消波ケーソンの設計波力は、技術基準(1989)に示された通常の直立消波ケーソンの設計法にならって、合田式の波圧係数 α_1 , α_2 に対する低減率 λ_1 , λ_2 を与えることによって計算できる。各壁に対する Phase I および Phase II における低減率 λ_1 , λ_2 は表-1 のように与えられる。前面壁については、 λ_1 を λ_{Ft} と λ_{Fp} の積で求め、 $\lambda_2=1.0$ とした。スリット部の波力低減率 λ_1 は、

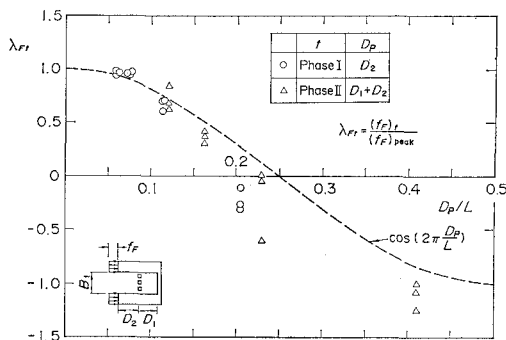


図-10 位相差の効果

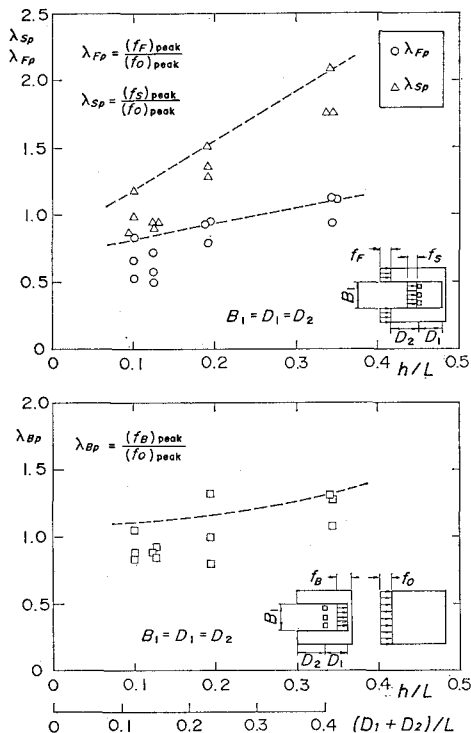


図-11 各部に働く波力

表-1 波力低減率

	Phase I		Phase II	
	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
前面壁	$\lambda_{Fp} \cdot \lambda_{Ft}$	1.0	$\lambda_{Fp} \cdot \lambda_{Ft}$	1.0
スリット壁	$\lambda_{Sp} (1 - \epsilon_S/100)$	0	0	0
後壁	0	0	λ_{Bp}	0

Phase I では λ_{Sp} にスリット部の空隙による受圧面積の減少を考慮し、Phase II では前後からの波力が互いに打ち消し合うとしたものである。凹部後壁の波力低減率 λ_1 は、Phase I では波面が到達していないので $\lambda_1=0$ とし、Phase II では $\lambda_1=\lambda_{Bp}$ とした。また、スリット部

および凹部後壁の波力低減率 λ_2 は、通常の直立消波ケーソンと同様に $\lambda_2=0$ とした。なお、今回の実験条件に対しては、図-10 に示した λ_{Fe} および図-11 に示した λ_{Fp} , λ_{Sp} , λ_{Bp} を用いることができる。

(2) 滑動安定性

滑動実験はすべて不規則波で実施した。有義波周期は $T_{1/3}=2.1$ s の 1 種類とし、3 種類の波群による実験を行って得られた滑動量の平均値を用いた。対象とした構造は、前出の図-7 に示した部分消波ケーソンと通常の直立消波ケーソンの 2 種類である。

部分消波ケーソンの場合は、スリット前壁での波力がピークとなる Phase I において滑動が始まり、後壁での波力が最大となる Phase II ではケーソンの滑動速度が小さくなる。Phase II のタイミングでは、スリット壁には前後から波圧が作用するため波力が相殺されるとともに、遊水部はすべて水で満たされるため、滑動を止めようとする力が働く。このため部分消波ケーソンの滑動安定性が高い。

一般に滑動限界状態においては、水平合波力 F_H 、鉛直合波力 F_V 、ケーソンの水中重量 W' として、滑動合成波力は $F_H + \mu F_V (= \mu W')$ で表される。部分消波ケーソンの滑動限界重量 W' の関係を求めたのが図-12 である。ここでは、部分消波ケーソンに対する Phase I, Phase II の計算曲線とともに、現行の設計法で求めた通常の直立消波ケーソンの計算曲線も合わせて示している。まず部分消波ケーソンの場合は、Phase I よりも Phase II の方が波力が大きくなり、実験での滑動のタイミングと一致している。また、部分消波ケーソンは、通常の直立消波ケーソンよりも耐波安定性が高いことがわかる。図には滑動実験結果をプロットしてあるが、計算結果とほぼ一致している。以上の検討の結果、今回の条件に対して部分消波ケーソンは、通常の直立消波ケーソンに比べて、必要重量を10~15%低減することが可能であり、ほぼその程度ケーソンの幅を低減できると考えられる。

5. 結 論

主要な結果は以下のとおりである。

①数値波動解析法による計算によって、平面的な共振集波という現象が、消波部を部分的に後退させて配置することによって発生することが確かめられた。また、その効果が顕著になる条件が明らかになった。

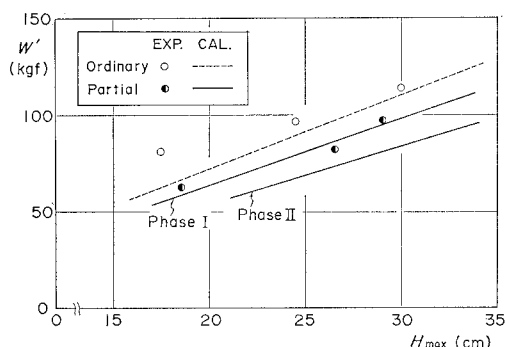


図-12 滑動限界重量の計算値と実験値

②部分消波ケーソンは、通常の直立消波ケーソンと比較しても消波性能は低下せず、かえって向上する。また、凹部の奥壁を有孔壁とした透過型、および遊水室の形状が異なる部分消波ケーソンの反射特性を示した。

③部分消波ケーソンの波力特性を明らかにし、設計での波力の算定法の考え方を示した。また、部分消波ケーソンが通常の直立消波ケーソンよりも滑動安定性が高いことを滑動実験によって確認した。部分消波ケーソンの滑動安定性が高いのは、ケーソン各面での波力のピーク値に位相差があるからである。また、部分消波ケーソンは重量のバランスが良く、端趾圧が軽減できる構造である。

以上の検討は、すべて直角入射波を想定したものである。今後は斜め入射波の場合についても検討する必要がある。また、部分消波ケーソンでは凹部へ波が集中するため、この部分の部材波力算定法を確立する必要がある。さらに共振集波の理論については、スリット壁による消波機構を含んだモデルによって理論的に検討する必要がある。なお、スリット壁だけでなく他の透過壁をもつ消波ケーソンにも共振集波の効果は期待でき、種々の応用が考えられる。

本論文のとりまとめに際しては、当所の谷本勝利水工部長に多くの助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦(1975): 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港研報告, 14巻, 3号, pp. 35~58.
運輸省港湾局監修(1989): 港湾施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 上巻 pp. 130~132.