

低反射壁を有する動揺式防波堤の波浪制御効果について

Wave Attenuation by a Pendulum-Type Breakwater with Porous Walls

中村孝幸*・レイ フウ クィ**・篠原耕一郎***・辻満明****
Takayuki Nakamura, Quy Huu Le, Koichiro Shinohara and Mitsuaki Tuji

A pendulum-type breakwater partly consisting of perforated walls was used as a model breakwater. By varying the mooring line constants, performance of the breakwater, such as wave transmission and reflection coefficients as well as dynamic displacements, was examined extensively. In order to be able to attenuate long waves, a method of reducing incoming waves through the use of radiation waves was discussed. It was clarified that the pendulum-type breakwater with porous walls is very effective for reducing long waves when the breakwater is moored by comparatively slack tethers.

Keyword; pendulum-type breakwater, perforated wall, wave attenuation, radiation wave

1. まえがき

従来、浮防波堤による波浪制御効果は、特に外洋性の長周期波に対して十分でないことが知られている¹⁾。ここでは、堤体の動揺による発散波を利用して従来型の浮防波堤の欠点となっていた長周期波に対する制御効果を改善しようとするものである。これは原理として、堤体の固定時における透過波と、堤体の動揺による発散波との位相干渉を利用して、動揺時の透過波を低減するもので、特に堤体が共振動揺する場合に効果的であることが知られている。既に著者らの中の一人²⁾は、カーテン壁を有する浮体の場合、付加質量が動揺周期と共に急増する周期帯があり、この周期帯では共振動揺が持続しやすいため、効果的な透過波の制御が可能になることなどを明らかにしている。しかしながら、このような原理を利用する浮防波堤では、エネルギー損失が少なく、反射波高は比較的大きくなる欠点があった。

本研究も、堤体の動揺による発散波を利用して、長周期波の制御を進めようとするもので、堤体としてはやはり付加質量の急増する周期帯が見られる深吃水のカーテン壁構造で、しかも大水深海域での建設に適すると考えられる水底ヒンジ支持の回転動揺型の浮防波堤を採用した。この際、本研究では、波による流体運動が卓越する水面付近のみを有孔壁にして乱れによるエネルギー逸散が生じるようにした。そして、このような動揺式防波堤による透過波および反射波の制御効果を、無孔壁および有孔壁の両者に対して、動揺付加質量の変動特性に伴う共振の持続現象やエネルギー逸散による影響などに着目して、理論および実験の両面から検討するものである。

2. 動揺式防波堤の構造とその解析モデル

動揺式防波堤の構造は、図-1に示すように、上部の箱形の浮力体と、その下部に設けたカーテン壁により構成され、全体的にはヒンジ結合で海底地盤あるいは重力式のアンカーに支持されている。そして、この防波堤は、上部浮力体の浮力により自立し、付加的に係留索により側面支持されている。また、静水面上の波返し部分は、多孔板で構成され、波と防波堤の相対的な運動により、エネルギー損失が生じるようにしてある。ここでは、防波堤を剛体と仮

定し、この剛体が波の作用により水底のヒンジ点まわりに回転振動するものとして、自由度1の回転振動系にモデル化した。既に著者ら³⁾は、線形波浪ポテンシャル理論に基づく解析法により、不透波なカーテン壁で構成される動揺式防波堤を想定して、堤体断面形状と回転動揺に伴う付加慣性モーメントなどの動揺周期による変動特性や過率、反射率の関係をなどを検討してきた。ここでも同様の線形波浪ポテンシャル理論に基づく解析法を用いて、以下の解析を行った。このようなモデル化によると、動揺式防波堤の振動方程式は、式(1)で表される。

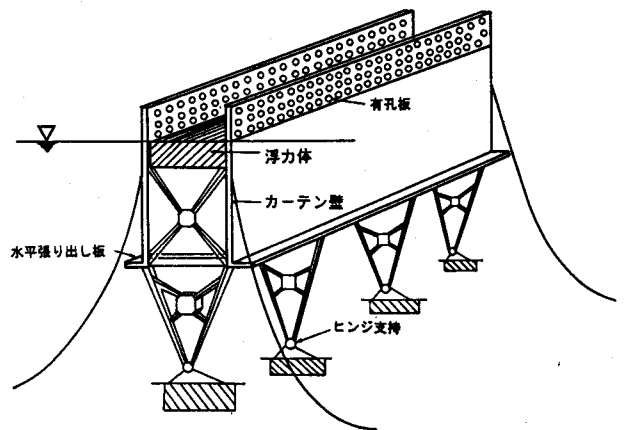


図-1 回転動揺式防波堤

* 正会員 愛媛大学工学部土木海洋工学科 (790 松山市文京町3番)

** 愛媛大学大学院 土木海洋工学専攻

*** 篠原金網(株)

**** (株) トーニチコンサルタント

$$(I_m + C_A \rho R_B^5) \ddot{\theta} + C_D \rho \omega R_B^5 \dot{\theta} + C \dot{\theta} + K \theta = M_E \quad (1)$$

ここに、 I_m ：防波堤のヒンジ点まわりの質量慣性モーメント、 C_A ：付加慣性モーメント係数、 C_D ：造波減衰モーメント係数、 θ ：ヒンジ点まわりの角変位、 K ：浮体の静水力学的な復元力モーメント、係留索による復元力モーメントならびに自重による転倒モーメントを含めた回転方向のばね定数、 M_E ：平衡位置の堤体に作用する波力によるヒンジ点まわりのモーメント、 R_B ：浮体の代表長さで堤体幅 B の $1/2$ に相当する量、 ρ ：流体密度、 C ：構造減衰として知られているもので、ここでは多孔板近傍での流れの乱れによる抗力を近似的に表現するために付加した。また、 ω ：作用波の角振動数で、周期 T との間に $\omega = 2\pi/T$ の関係がある。

いま、堤体が規則波の作用を受けて、単調振動する場合を仮定すると、式 (1) の解は次式で示される。

$$\theta(t) = \theta_s / \sqrt{1 - \frac{(I_m + C_A \rho R_B^5) \omega^2}{K}} + [(C_D \rho R_B^5 \omega + C) \omega / K]^2 \cos(\omega t - \delta_D) \quad (2)$$

ここに、 θ_s は波力モーメント M_E を静的に作用させたときの回転変位角、 δ_D は M_E を基準にした回転動揺の遅れの位相角で次式で与えられる。

$$\delta_D = \tan^{-1} \left[\frac{(C_D \rho R_B^5 \omega + C) \omega}{K - (I_m + C_A \rho R_B^5) \omega^2} \right] \quad (3)$$

3. 不透過壁の場合に対する理論的検討

3. 1 透過波低減のための位相関係

既に著者ら³⁾は、堤体の固定時における透過波と動揺発散波との位相干渉を利用して、動揺時透過波の低減法について明らかにした。これによると、次式で示すような応答遅れの位相角 $(\delta_D)_{opt}$ が実現するように係留ライン等のばね常数を選択すると、堤体の固定時における透過波と、堤体の動揺による発散波との位相関係は逆位相になり、効果的に動揺時の透過波が低減できる。

$$(\delta_D)_{opt} = -\delta_E - \Delta \quad \text{or} \quad (\delta_D)_{opt} + \delta_E = -\Delta \quad (4)$$

ここに、 δ_E ：入射波を基準にした波力モーメントの遅れの位相角、 Δ ：堤体の中心から透過側壁面までの空間的な距離による位相差である。ただし、式 (4) は、ポテンシャル流れの理論に基づき導かれたもので、本研究のように多孔板によるエネルギー損失がある場合への適用性は明確にされていない。

3. 2 理論的検討

ここでは、後述する回転動揺式防波堤の透過・反射特性を概略的に知るため、模型防波堤を対象にして理論計算を予備的に行ってみた。ただし、多孔壁によるエネルギー損失は実験的にしか検討できないため、水面付近の壁は不透過板として取り扱った。

a) 模型堤体：図-2 は、後述する実験で用いた模型堤体の断面を示す。断面形状は、波周期による付加質量の増加が著しく、上記したような動揺発散波を利用した透過波制御に好都合な π 字型断面である。堤体の重量等は、表-1 に示すものである。

b) 算定結果：図-3、4 は、堤体の付加慣性モーメント係数 C_A および造波減衰モーメント係数 C_D の周期 T による変動特性を示す。図中には第2横軸として、対応する波長 L と堤体幅 B の比も明記してある。これらの図より、模型堤体の C_A 、 C_D は、上限の周期があるものの、長周期側で増加する傾向が認められる。既に著者ら³⁾が明らかにしているように、 C_A 、 C_D が ω^2 に逆比例、すなわち周期と共に急増するならば式 (4) で示すような最適位相が実現しやすく、動揺発散波を利用した制御が容易になる。図-5 は、式 (3) による動揺変位の波力モーメントよりの遅れの位相角 δ_D の周期 T に

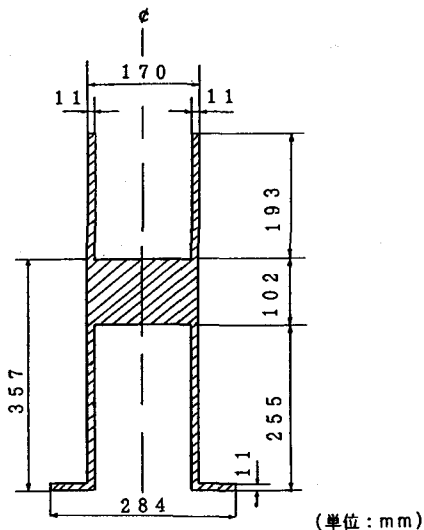


図-2 模型堤体の断面

表-1 算定に用いた堤体の諸量

形状	π字型堤体
カーテン壁吃水 d	35.7 cm
上部浮力体吃水 d'	10.2 cm
堤体幅 B	17.0 cm
水平板の張り出し長 B'	5.7 cm
重量 W	12.7 Kgf
排水重量 W_s	24.0 Kgf
余剰浮力 W_B	11.3 Kgf
慣性半径 R_I	50.3 cm
重心位置 (水底より)	62.9 cm

よる変動を各ばね定数について示すもので、図中には、式(4)で求められる透過波低減のための最適位相 $(\delta_D)_{opt}$ についてもプロットしてある。なお、ばね定数 K は無次元量 K^* ($K^* = K / \rho g R_B^4$) で表示した。また、図-6は、このときの透過率 C_T の周期による変動を示すもので、図中のFixedは固定状態の透過率を示す。これらの図より、 C_T は、位相差 $|\delta_D - (\delta_D)_{opt}|$ が小さくなるほど減少する傾向が認められ、式(4)の妥当性がうかがえる。また、透過率が50%以下になる位相条件を調べてみると、ほぼ $|\delta_D - (\delta_D)_{opt}| \leq 30^\circ$ の範囲にあり、最適位相の $(\delta_D)_{opt}$ より 30° 程度の誤差の範囲内で式(3)の δ_D をセットすれば、透過率は50%以下にできることがわかる。そして、 $C_T < 50\%$ すなわち $|\delta_D - (\delta_D)_{opt}| < 30^\circ$ となる周期帯を各ばね定数でみてみると、 $K^* = 8000$ のときが最も広く、ばね定数が小さくなるほどその帯域幅は長周期側に移行すると共に狭くなる傾向が認められる。これは、図-3、4に示す C_M 、 C_D の周期による増加特性と関係しているようである。すなわち、 $K^* = 3500$ や 8000 の場合、 C_T の極小点は、 C_M 、 C_D の周期による増加率が大きい周期帯にあり、この C_T の極小点が後述するように回転動揺の共振点に相当することから、より広い周期帯で共振動揺が持続することによる。言い換えれば、既に著者ら³⁾が見いだしている関

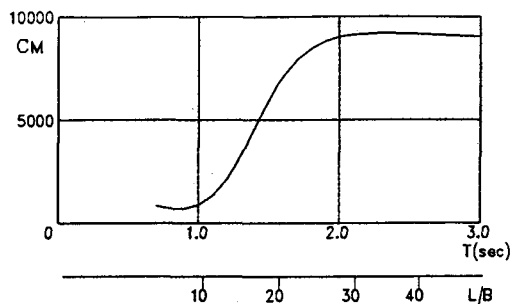


図-3 付加慣性モーメント係数 C_M

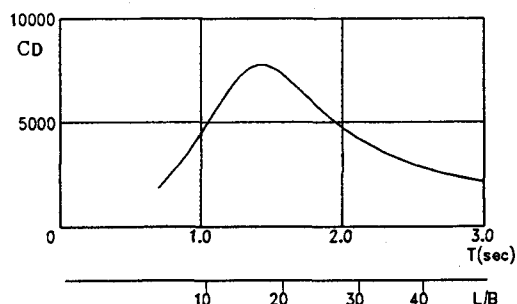


図-4 造波減衰モーメント係数 C_D

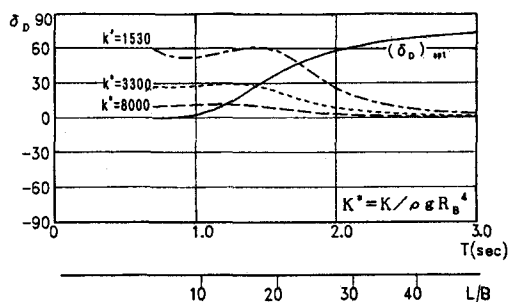


図-5 ばね定数による動揺の遅れの位相角の変化

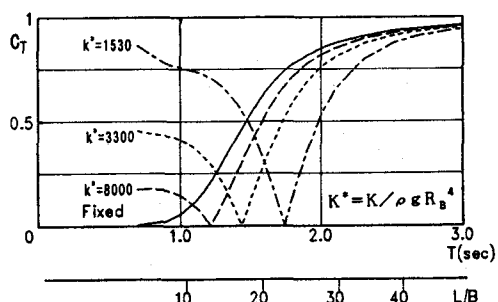


図-6 ばね定数による透過率の変化

係、「共振点を C_M 、 C_D の周期による増加率が著しい周期位置となるように係留条件等を設定すると広い周期帯で効果的に透過率が低減できる」ことと一致する。

4. 実験結果と考察

4. 1 実験装置と実験方法

a) 実験装置： 実験に使用した模型堤体の断面は、図-2に示す理論的検討の際に用いたものと同一である。実験では、図-7に示すように、この模型堤体をトラス構造の連結部材を介して水底に設けたヒンジに結合した。この際、堤体は自由浮遊状態からほぼ6cm程度沈めてヒンジに接合してあり、その余剰浮力により自立できるものとした。また、堤体は側面より鋼製ケーブル（直径3mm）を用いて係留支持した。係留ラインは、容易にばね定数が変化できるように、その一方を片持ちばり形式で支持した弾性鋼棒の先端に固定し、この片持ちばりのスパンを変えることで、回転ばね定数を変化させた。なお、この片持ちばりには、歪ゲージをはりつけ、係留ラインに作用する張力も測定できるようにした。実験時の模型堤体の諸量および採用した係留装置によるばね定数を一括して表-2に示す。

堤体の前後壁は、図-1に示すように水面上の部分のみを多孔壁構造とした。この際、円孔の直径は10mmで、有孔板部分の開口率は26%である。また、実験では、有孔壁による反射波の低減の可否が検討できるように、無孔板の堤体も用いた。

b) 波条件： 模型に作用せしめた波の周期Tの範囲は、0.8~2.5（sec）の範囲で10種類程度を選定した。また入射波の波高Hは、5cmと一定にした。なお実験での作用波の周期範囲を無次元量L/Bで表すと5~40の範囲にあることを付記しておく。

表-2 模型堤体の諸量および支持条件

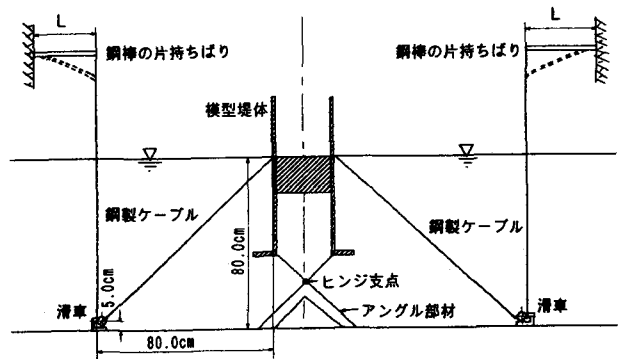


図-7 模型堤体の設置状況

形状	π字型堤体（無孔壁）	π字型堤体（有孔壁）
堤体長 l_s	99.0cm	99.0cm
カーテン壁吃水 d	35.7cm	35.7cm
上部浮力体吃水 d'	10.2cm	10.2cm
堤体幅 B	17.0cm	17.0cm
水平板の張り出し長 B'	5.7cm	5.7cm
重量 W	13.3Kgf	12.7Kgf
排水重量 W_s	24.0Kgf	24.0Kgf
余剰浮力 W_B	10.7Kgf	11.3Kgf
慣性半径 R_I	50.3cm	50.3cm
重心位置（水底より）	64.2cm	62.9cm
係留索による回転ばね定数 K	$1.723 \cdot 10^7$ gf・cm	0.8~4.17 $\cdot 10^7$ gf・cm の範囲の3種類

4. 2 実験結果

a) 有孔壁と無孔壁の場合の比較：図-8、9の（a）、（b）、（c）の各図は、無孔壁および有孔壁の条件下でのそれぞれ回転変位角Xと透過率および反射率 C_R に関する実験結果と算定結果の比較を示す。ここで回転変位角は、次式による無次元量で表示してある。

$$X = \theta R_B / (H/2) \tag{5}$$

なお、算定結果としては、エネルギー損失を無視した無孔壁のときの結果がプロットしてある。

これらの図の（a）、（b）の算定結果の比較から、透過率 C_T は、動揺変位が大きくなる共振点付近で極小値を示すことが分かる。同様の傾向は実験結果においても概略的に認められるが、算定結果ほどシャープな変化は示さない。無孔壁のケースでは、回転変位については実験結果と算定結果はほぼ一致しているが、 C_T や C_R については実験結果が全体的に算定結果を下回る傾向が見られる。このような相違は、解析で考慮されていない堤体下端部付近での渦流れ等の発生によるものと推測される。次に、無孔壁と有孔壁の場合の比較を行うと、有孔壁とすることにより、回転変位はほぼ半減することや C_T は共振点より短周期側で有意に低下する傾向が認められる。また、 C_R についても全体的に若干低下する傾向が見られる。このような回転変位や透過・反射率の低下は、有孔壁近傍での流体の乱れによる影響と考えられる。

また透過率は、有孔壁、無孔壁にかかわらず、かなり広い周期帯で小さくなっており、本研究で採用した π 字型の動揺式防波堤は有効なものと言えよう。

b) 係留条件による変化： 図-10は、有孔壁の条件で、図-9の場合に比較して、係留ばね常数を小さくしたときの結果を示す。図-9、10の比較から、係留ばね常数を小さくすると当然のことながら回転変位は増大することや透過率も短周期側で若干増加する傾向が認められる。また、反射率については、特に短周期側で低下することもわかる。実験結果と無孔壁の条件に対する算定結果を比較すると、係留ばね常数の小さなきの方が両者により大きな差が見られ、特

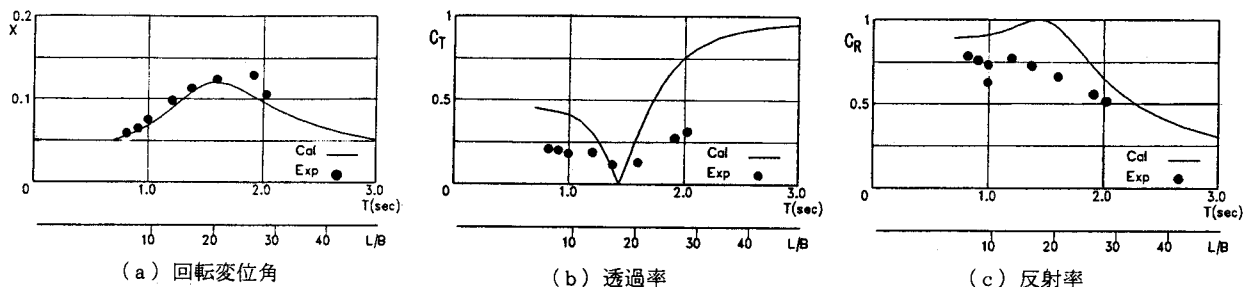


図-8 無孔壁のときの回転変位と波変形 ($H=5\text{ cm}$, $K^*=3300$)

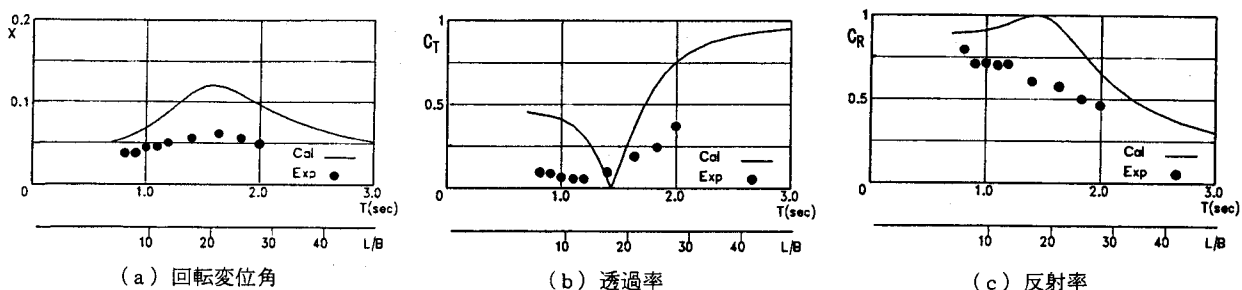


図-9 有孔壁のときの回転変位と波変形 ($H=5\text{ cm}$, $K^*=3300$)

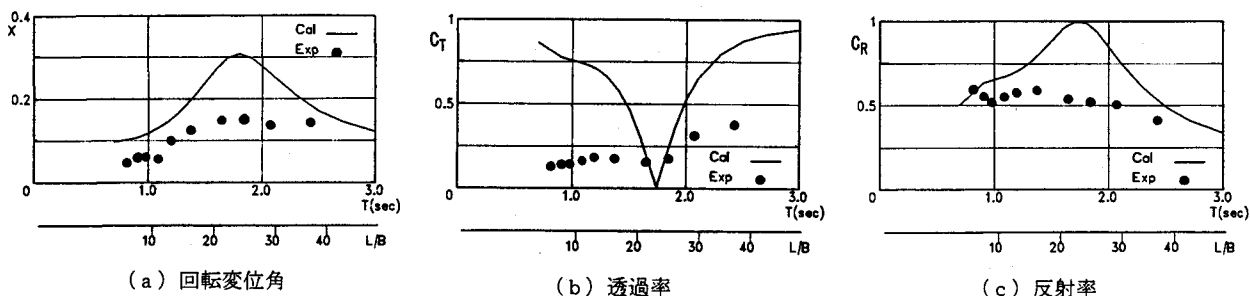


図-10 有孔壁のときの回転変位と波変形 ($H=5\text{ cm}$, $K^*=1530$)

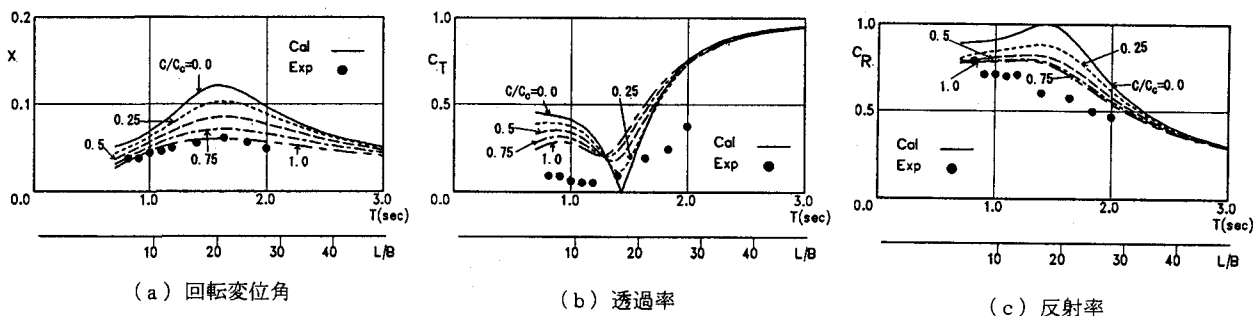


図-11 相対減衰による回転変位と波変形の変化 ($H=5\text{ cm}$, $K^*=3300$)

にこの傾向は回転変位が増大する共振点付近で顕著になっている。このように、有孔板の効果は、係留ばね定数の小さなケースでより強く現れることが指摘できる。この理由としては有孔部での動揺変位による相対的な流体運動が増加して結果的にエネルギー逸散が増大したことによるものと推定される。そして、現地を想定した場合、2. の理論的考察の所で示したような無孔壁堤体を緊張係留するよりも、有孔壁堤体を弛緩係留する方が、係留ラインに対する負担を小さくして、ほぼ同様な波浪制御効果を発揮できることから、より安全で経済的な工法と考えられる。

c) 有孔壁の効果の近似的な取り扱い：ここでは、有孔壁によるエネルギー逸散を近似的に取り扱う方法として、式(1)に含まれるような回転変位速度に比例する減衰項を考慮した方法の適用性を検討してみた。既に、このような減衰項は、変位速度の2乗に比例することが知られているが、一般には等価仕事の原理に基づき線形化する手法が採られ、結果的には式(1)と同形の方程式へと導かれる。

以下では、概略的に線形減衰項で近似する手法の適用性を検討するため、式(1)中に含まれる減衰Cを各種に変化させて実験結果との比較を行ってみた。比較の対象にしたケースは図-9の場合であり、その結果を図-11に示す。図中で C_c は、臨界減衰に相当する量で次式の定義による。

$$C_c = 2\sqrt{(I_m + C_A \rho R_B^5)K} \quad (6)$$

この図より、相対減衰 C/C_c を大きくすると、回転変位および反射率は全体的に減少することがわかる。しかし、透過率は複雑な変化を示し、その極小点より長周期側では増大、短周期側では減少する傾向が認められ、しかもその極小点は短周期側へ移行している。実験結果と算定結果を比較すると、線形減衰を考えることにより、回転変位と反射率については、多少の差違は見られるが、概略的には推定可能になることがわかる。しかし、透過率は、減衰を大きくしても、かなり大き目の推定値を与えるようであり、十分なものとはいえない。これは、透過波に対するエネルギー損失が主に堤体下部付近での渦流れ等の発生により生じるためと推測される。

4. 結語

(1) 2枚カーテン壁とその下部に設けた水平板で構成される π 字型断面の動揺式防波堤は、動揺周期の広い範囲で付加慣性モーメントが増大することから、発散波を利用する波浪制御に適する。

(2) 動揺式防波堤では、適切な係留ばね定数の選択や堤体の前後壁を有孔壁にすることで、制御できる波周期を比較的長周期の条件まで拡大できる。

(2) 堤体の前後壁を有孔壁にすると、乱れによるエネルギー逸散により、特に動揺変位を低減することができる。このとき、係留系のばね定数を比較的緩く設定すると、透過・反射率の両者を広い周期帯で小さくすることができる。

(3) 線形減衰項を付加した算定モデルは、有孔壁の場合の動揺変位および反射率を推定するには有効と言えるが、透過率の推定には十分でない。

<参考文献>

- 1) 神瀬哲：漁港における浮防波堤の現状と課題、浮防波堤の現状と課題、社団法人国際海洋科学技術協会、pp.3-8, 1987.
- 2) 中村孝幸：浮遊式防波堤の動特性と消波効果について、海洋開発論文集、第4巻、pp.165-170, 1988.
- 3) 中村孝幸・レイ フウ キー・篠原耕一郎：浮防波堤による動揺発散波の特性を利用した波浪制御法について、海洋開発論文集、第9巻、pp.235-240, 1993.