

可動式複列カーテン防波堤による波浪制御

Attenuation of Waves by Doubly Arranged Oscillating Breakwater

森田知志*・中村孝幸**

Satoshi.MORITA, Takayuki.NAKAMURA

Doubly arranged semi-floating breakwater is proposed. Two bodies are hanged from water bottom with hinged rod, and connected each other by a resilient rod for interaction of wave forces.

Transmission of waves, motion of bodies and forces on bottom are examined on theoretical model and experimental study. It is shown that coefficient of wave transmission and wave forces are much less than these of fixed body.

Keywords: Floating Body, Breakwater, Wave Attenuation

1. はじめに

単列型のカーテン防波堤による波浪制御効果については、既存の研究成果から長周期波に対する効果が不十分であることが判明しており^{1) 2)}、実施工例をみても適用海域は短周期波が卓越する内湾や港内に限定されていることがわかる。そしてそれらの基礎は片持ち梁形式の杭構造が基本となっているため耐荷力の限界が低く、波浪の比較的穏やかな海域であるにも関わらず斜杭を採用した上で打設間隔を密にするなど重装備なものとなる場合が多い。また、長周期波に対する波浪制御効果を改善する方策として前後に堤体を配置した複列カーテン防波堤も提案されているが³⁾、この場合の作用波力は単列型のそれを上回るように出現するため、基礎構造の設計がさらに厳しくなり実現化は困難であるものと言えよう。

ここで対象とする可動式複列カーテン防波堤は、①波の透過率が周期条件の広い範囲で低く抑えられること、②海底基礎への伝達波力が少ないこと、の2点を目的に考案したものであり、図-1に示すように複列に配置した浮体型カーテン堤体の支持脚にヒンジを挿入して回転自在にすると共に、前後の堤体の頂部を回転ヒンジを介したロッドによって連結した構造を有する。海底部のヒンジによって基礎杭に作用する強大な波力モーメントを遮断し、連結ロッドによって前後の堤体に位相差をもって作用する波力を相殺することで波動運動に対する抵抗性を確保したものである。本研究は可動式複列カーテン防波堤を対象に模型実験と理論解析を実施し、波浪制御効果や動揺変位、ならびに水底基礎への伝達波力などの特性について明らかにする。そして完全固定型の複列カーテン防波堤の特性量との比較などから本防波堤構造の有効性を検証するものである。

2. 実験および理論解析の方法

2.1 実験装置および実験方法

a) 実験装置： 実験は、長さ15m、幅0.3m、高さ0.45mの造波水路を用いて行った。水路の一端には反射波吸収装置付のピストン型造波機が、他端には砕石よりなる消波斜面が設けてある。模型堤体は高さ13cm、幅29cm、厚さ4cmの中空直方体であり、アクリル板を用いて2基製作した。連結ロッドおよび支持脚はアルミアングルで製作し本体に取り付けた。なお詳細は省略するが、連結ロッドは伸縮自在の構造とし挿入するコイルばねを選定することによって伸縮変形に対する剛性が調整できるものとした。各部の回転ヒンジには小型の蝶番を使用した。模型堤体の設置は、図-1に示すように、水路中央部に敷設した鋼板に蝶番をビス止めして行った。水深 h は20cm、堤体のきつ水 d は9.5cmと一定とした。模型堤体の諸元を表-1に示す。

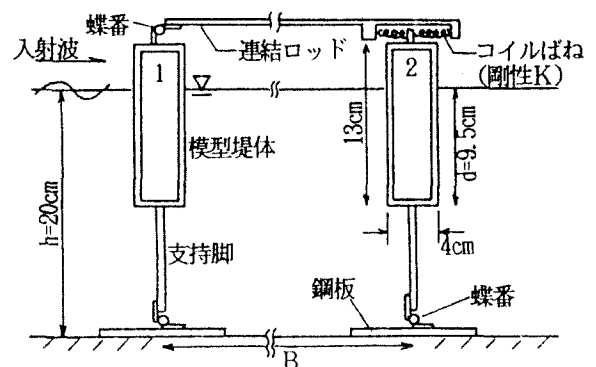


図-1 模型堤体の設置状況

* 正会員 (株)熊谷組 技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪下山1043)
 ** 正会員 愛媛大学 工学部

表 - 1 模型堤体の諸量

	前列堤	後列堤
重 量	616 g	628 g
排水重量 W	1102 g	1102 g
慣性モーメント I	$1.65 \times 10^5 \text{ gcm}^2$	$1.67 \times 10^5 \text{ gcm}^2$
重心位置 (水底ヒンジ上)	15.5 cm	15.8 cm

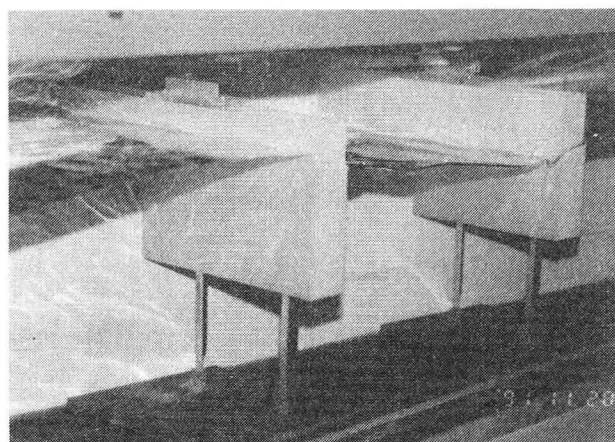


写真 - 1 実験状況

b) 実験方法: 実験は、入射波の周期 T 、堤体間隔 B および連結ロッドの剛性 K の各条件を変化せしめて行い、堤体の反射波側 2 点と透過波側 1 点に設置した波高計による水位変動記録から波の反射率 CR 、透過率 CT の測定を行った。また前後堤体の動揺振幅 X_1, X_2 は VTR による映像記録から読み取った。実験の状況を写真 - 1 に示す。実験条件を以下に示す。入射波の波高 H は 2 cm と一定にした。 $T = 0.55 \sim 1.20 \text{ sec}$ の 9 種類。 $B = 10 \sim 110 \text{ cm}$ の 18 種類。 $K = 130, 174, \infty \text{ gf/cm}$ の 3 種類。

2.2 理論解析方法

用いた解析法は、任意断面形状の浮体を取り扱うことができる 2 次元波浪場の Green 関数を核関数とするわきだし分布法¹⁾であり、波浪ポテンシャル理論に基づいた波浪場の解析を精度よく迅速に処理することができる。境界値問題の定式化、Green 関数の誘導、速度ポテンシャルの表示ならびに浮体へ作用する流体力の算定方法などといった本解析法の主要部分については、既に報告済⁵⁾であるので省略し、以下では本防波堤構造への適用に当たって定式化した振動方程式についてのみ示すこととする。

図 - 2 において、 X 軸の負方向から角周波数 ω の微小振幅波が作用すると、各堤体は水底のヒンジを中心とした回転方向に入射波と同一の周波数で微小な調和振動を行うものとする。前後の堤体の回転角変位の複素振幅 $\xi_n (n=1, 2)$ に対する運動方程式は式(1)、式(2)のようになる。

$$I_1 \ddot{\xi}_1 + \rho R_B^4 \sum_{n=1}^2 C_M(1, n) \ddot{\xi}_n + \rho \omega R_B^4 \sum_{n=1}^2 C_D(1, n) \dot{\xi}_n + K \ell^2 (\xi_1 - \xi_2) - R_1 \xi_1 = M_1(t) \quad (1)$$

$$I_2 \ddot{\xi}_2 + \rho R_B^4 \sum_{n=1}^2 C_M(2, n) \ddot{\xi}_n + \rho \omega R_B^4 \sum_{n=1}^2 C_D(2, n) \dot{\xi}_n + K \ell^2 (\xi_2 - \xi_1) - R_2 \xi_2 = M_2(t) \quad (2)$$

ここに、 I_n : n 堤体の慣性モーメント、 ρ : 流体密度、 R_B : 代表長さ、 $i = \sqrt{-1}$

$C_M(m, n)$ $C_D(m, n)$: n 堤体の振動によって m 堤体に寄与する付加質量係数および線型流体力係数

ℓ : 水底ヒンジから連結ロッドまでの高さ、 $M_n(t)$: n 堤体に作用する波力モーメント

R_n : n 堤体の静水力学的な復元力係数、 ξ の上付きドット・は時間微分を表す。

そして、さらに前後堤体の形状と質量分布が等しいものと仮定して、 ξ_1, ξ_2 の和成分 $\xi_+ (= \xi_1 + \xi_2)$ および差成分 $\xi_- (= \xi_2 - \xi_1)$ に対する運動方程式は、式(1)と(2)の和と差をとり次のようになる。

$$[-\omega^2(I + \rho R_B^4 C_M^+) - i \rho R_B^4 \omega^2 C_D^+ - R] \xi_+ = \bar{M}_+ \quad (3)$$

$$[-\omega^2(I + \rho R_B^4 C_M^-) - i \rho R_B^4 \omega^2 C_D^- - R + 2\ell^2 K] \xi_- = \bar{M}_- \quad (4)$$

ここに、 $C_M^\pm = C_M(1, 1) \pm C_M(1, 2)$, $C_D^\pm = C_D(1, 1) \pm C_D(1, 2)$ (複号同順)

ξ_+, ξ_- : $\xi_1 + \xi_2, \xi_2 - \xi_1$ の複素振幅、 $\bar{M}_+, \bar{M}_-$: $M_1 + M_2, M_2 - M_1$ の複素振幅

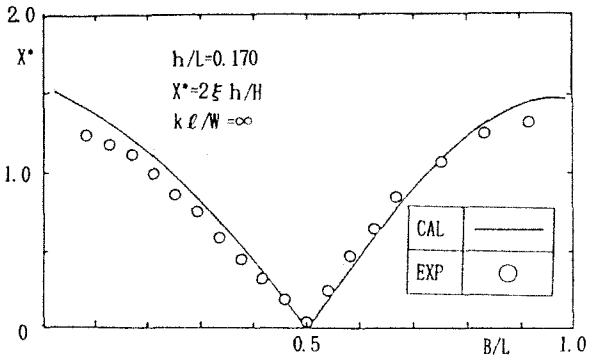
これらの式は各々が 1 自由度の振動方程式であり、式(3)は前後堤体の変位が同位相の状態、式(4)は逆位相の状態運動するような振動モードを表している。以下ではこれらのモードを各々 1 次モード、2 次モードと表現する。連結ロッドの剛性 K は式(4)にのみ現れており、1 次モードの振動には寄与しないことがわか

る。また、 $K=\infty$ の場合には2次モードの振動変位は0となり、系の振動は式(3)のみによって決定されることになる。以上の振動方程式から求められる振動変位を用いて、振動時の速度ポテンシャルが決定される。

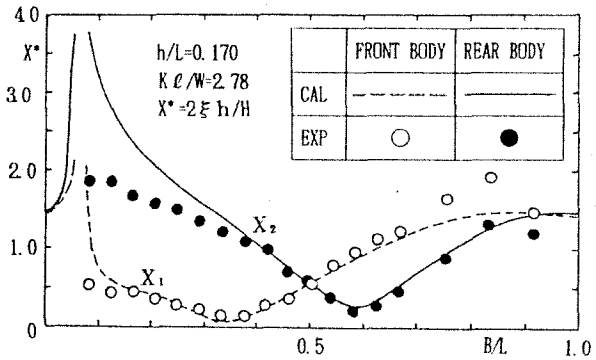
3. 波浪制御特性

3.1 堤体の動揺変位

a) 堤体間隔の影響： 図-3(a)(b)は入射波の条件を h/L (相対水深) $=0.17$ に固定し、堤体間の距離 B を変化させた場合の動揺振幅の実験値と解析値について、横軸に B/L (L : 波長) をとり示すものである。縦軸にとった X^* は、 $X^*=2\xi h/H$ によって算定した無次元動揺振幅であり、堤体の吃水位置における水平変位の最大値と入射波の振幅との比を表す。(a)図は $K=\infty$ 、すなわち連結ロッドを完全な剛体として、前後の堤体が等しく動揺する場合の結果を示す。この図をみると X^* は B の変化に伴って周期的に変動し、 B/L の値がほぼ 1.0 おきに変動が繰り返されていることなどが認められる。また、 $B/L=0.5$ の条件下では動揺量は0となり堤体間隔を波長の $\frac{1}{2}$ に設定することによって特別な係留をすることなく堤体を静止できることがわかる。これは前後の堤体に作用する波力が逆位相関係になるためであり、連結ロッドによって合力が打ち消された状態である。(b)図は K の値を有意にとり、連結ロッドの伸縮を許した場合の結果である。 X^* の下添字1,2 は各々前後の堤体での値を表す。この場合には、1次モードに加えて2次モードの寄与を受けるため $B/L=0.5$ での X^* は有意な値をとるが、 B/L による X^* の周期的な変動特性は同様に認められる。この周期性はここに示さなかった他の条件下においても認められることから、この種の構造物に固有の特性であるものと言える。 X_1 と X_2 の大小関係に着目してみると、 $X_1^*=X_2^*$ となる $B/L=0.5$ を境界として、 $0 < B/L < 0.5$ の条件下では $X_1^* < X_2^*$ 、 $0.5 < B/L < 1.0$ の条件下では $X_1^* > X_2^*$ の関係にあるなど、動揺変位に与える堤体間隔の影響は B/L の値によって特徴づけられることが明らかである。



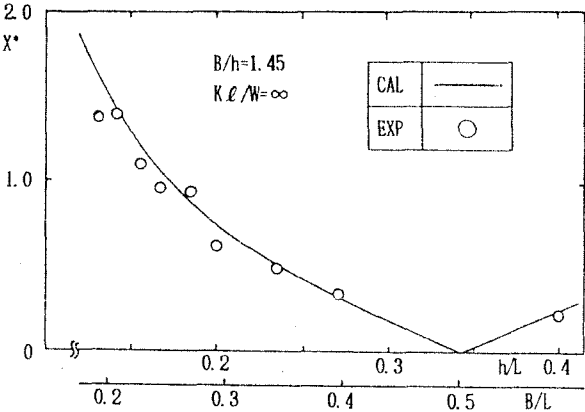
(a) $K = \infty$ の場合



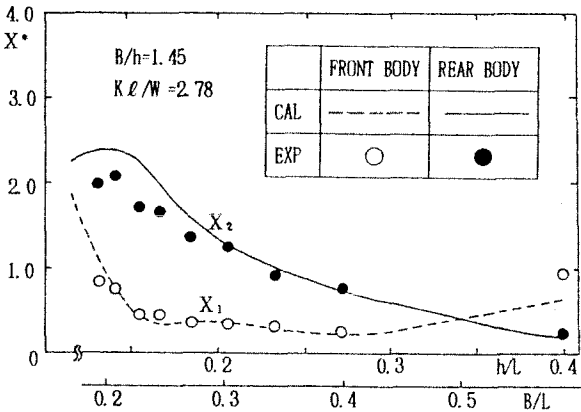
(b) K が有意な値をもつ場合

図-3 堤体間隔による動揺変位の変動特性

b) 波周期の影響： 前後堤体の間隔 B を $B/h=1.45$ の条件に固定し、入射波の周期を変化させた場合の結果を図-4(a)(b)に示す。横軸は相対水深 h/L を表し、この値が小さくなるほどより長周期側の波条件であることを示す。図中には図-3との対応を図るため、第2の横軸として B/L (B は一定値) を併記した。



(a) $K = \infty$ の場合



(b) K が有意な値をもつ場合

図-4 波周期による動揺変位の変動特性

また、図-4の(a)と(b)は伸縮ロッドの剛性を变化させたもので、各々図-3(a)、(b)に対応した条件となっている。これらの図から、堤体の動揺変位は波周期の変化に対しても大きく影響を受けることなどがわかる。 B/L を示した第2横軸に着目して図-3との比較をしてみると、(a)図において動揺変位が0となる点、あるいは(b)図において前後の変位が等しくなる点は、図-3において $B/L=0.5$ の条件に相当するものであり、 B/L の減少とともに動揺変位が大きくなる傾向にあることや、後列堤の動揺変位は前列堤のそれを上回るように出現していることなど、変動に共通の特性があることがわかる。このことから、堤体の動揺量を概略的に推測しようとする場合、無次元量 B/L を用いることによって堤体間隔と波周期の両者の影響を考慮できるものと言える。そして、 B/L が0.5以下となる条件に限定するならば、堤体の動揺変位は B/L が小さいほど増加すること、および K が有意な場合には後列堤の動揺の方が前列堤よりも常に大きいこと、の2点を特性として挙げるができる。

図-3、4から実験値と解析値の比較を行ってみると、両者の対応は良好であり、本解析法によって動揺変位の予測が高精度で行えるものと言えよう。

3.2 透過率および反射率

a) 堤体間隔の影響： 入射波の条件を $h/L=0.17$ に固定して B を変化させた場合の、波の透過率 C_T および反射率 C_R に関する結果を図-5(a)(b)(c)に示す。これらのうち、(a)図は堤体を完全に固定して動揺を許さない場合のもので、 B の変化によって C_T, C_R は共に波状的な増減を示すことや、その変動周期は B/L の値にしてはほぼ0.5であることなど、固定型の複列カーテン防波堤の特性に共通したものとなっている。次に、(b)図は K を ∞ に設定して堤体の自由動揺を許した場合の結果を示すもので、 C_T, C_R の変動特性は(a)図と同様であるものの、変動の周期は B/L 値にしてはほぼ1.0と増加していることなどがわかる。そして変動周期が倍増したのに伴って、 C_T の極小値は減少しており、堤体の動揺を許すことによって波浪制御効果が向上するものと言える。これは堤体の動揺に伴って発生する発散波と堤体下部の開口部を通過する透過波との干渉に起因する⁶⁾もので、両者の振幅が同程度でかつ逆位相関係に近づくほど C_T の低減効果は大きくなる。発散波の特性は、3.1で述べた堤体の動揺変位の特性に従うものと考えられ、その振幅と位相は B/L 値で1.0の周期で再現的に変動するものと推測される。一方で堤体固定時の透過波の変動周期が0.5であることは上述のとおりであり、これらの波が干渉し合った結果、(b)図に示すような特性、すなわち B/L の変化に伴って C_T の減少する場合と逆に増加する場合が交互に現れるものと考えられる。また、 B/L の増加に伴って最初にあらわれる C_T の極小点は $B/L<0.5$ の条件下となっている。このことは实际的にみると B の値は小さい方が海域の占有面積が少なく済むことなど、好都合な特性であるものと言えよう。(c)図は連結ロッドの剛性を有意値に設定した場合を示す。(b)図との比較を行ってみると、連結ロッドの伸縮を許し2次モードの振動を取り入れることによって、 C_T を低減できる範囲が広がっていることなどロッドの伸縮変形に対して適度の剛性を付加することは波浪制御効果の向上に有効な方策であるものと言えよう。

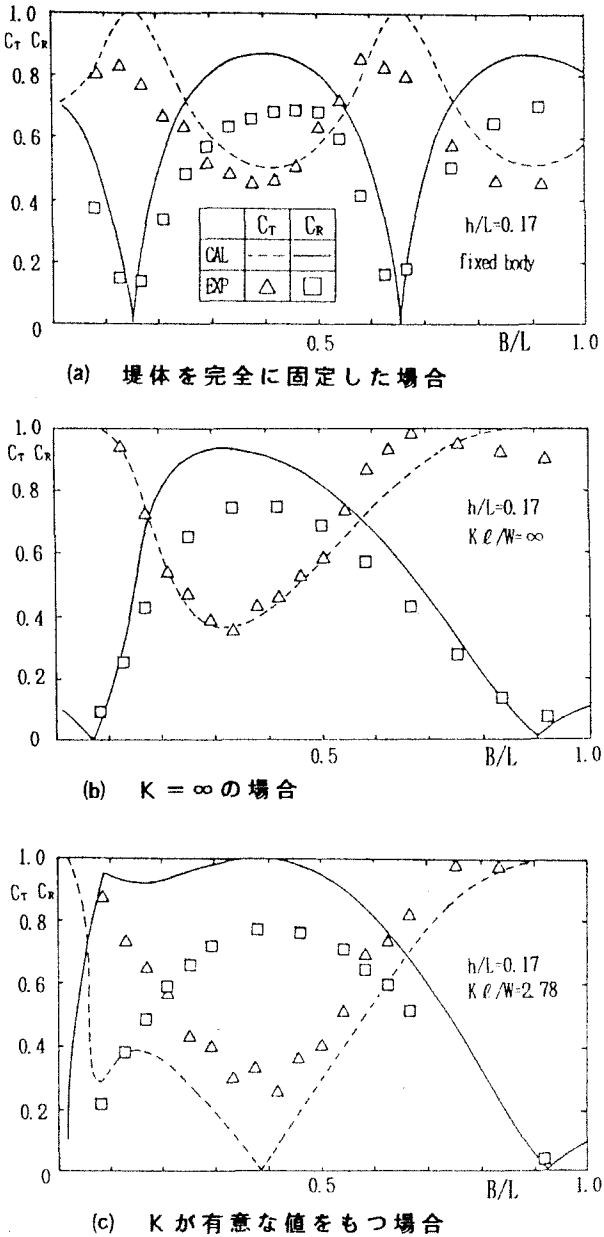


図-5 堤体間隔による透過・反射率の変動特性

b) 波周期の影響： 図-6(a)(b)(c)は、図-4の場合と同様に堤体間隔を $B/h=1.45$ と固定した場合において CT 、 CR と相対水深 h/L の関係を示すものである。

堤体を完全に固定した場合に相当する(a)図においては h/L が減少して入射波の波長が長周期側へと増大するに伴って CT は減少、 CR は増加といった単調な変動を示している。そして、剛な連結ロッドを採用して堤体を可動式とした場合を示す(b)図においては、定性的には(a)図と同様な結果となっているものの、たとえば $CT=CR$ となる点に着目して比較してみると、(a)図に比べより小さい h/L 値を示しており、波浪制御効果は固定型よりも優れていることがわかる。続いて連結ロッドの伸縮変形を許した(c)図に着目すると、この傾向はさらに進行し、より長周期側の条件にわたって CT の増加が抑えられていることがわかる。一方、堤体の動揺を許したことによって $h/L>0.2$ の条件における CT は増加する傾向にあり、特に(c)図では CT が0.5 近くまで増加した範囲が広く現れてきている。堤体の動揺を許して K を有意値に設定することは長周期側での CT を低減化することに有効である反面、副作用として h/L の比較的大きな条件において CT が増加する傾向にあることに注意する必要がある。

実験値と解析値の比較を行ってみると、解析値は CR に関して過大な予測となる傾向にあるものの、全体的な一致度は良好である。

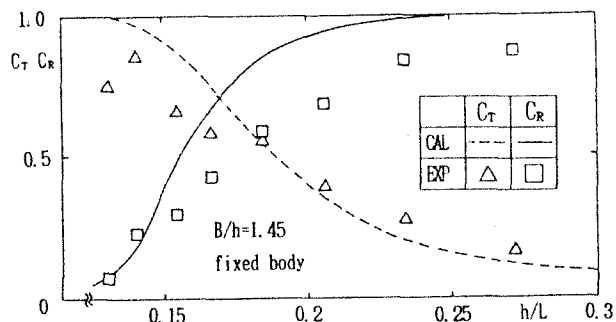
4. 作用波力の特性

堤体間隔 B を $B/h=1.45$ に固定した場合を対象に、前後堤体の海底ヒンジに作用する水平力 F_1 , F_2 、および連結ロッドの軸力 FT に関する解析結果と相対水深の関係を図-7(a)(b)(c)に示す。なお、各々の作用力は式(5)で定義される無次元量で表示したものである。

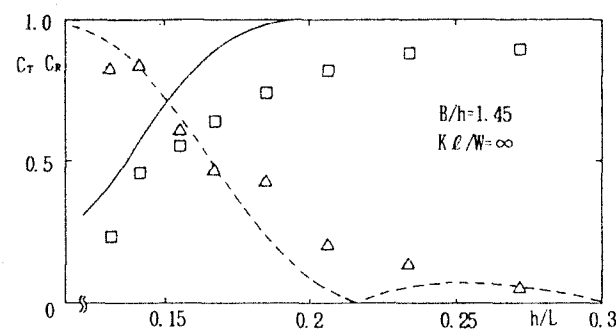
$$F^* = \frac{F}{\rho g \frac{H}{2} DW_B} \quad (5) \quad \begin{array}{l} \text{ここに、} W_B : \text{堤体幅} \\ g : \text{重力加速度} \end{array}$$

まず、堤体を固定した場合の結果を示す(a)図をみる

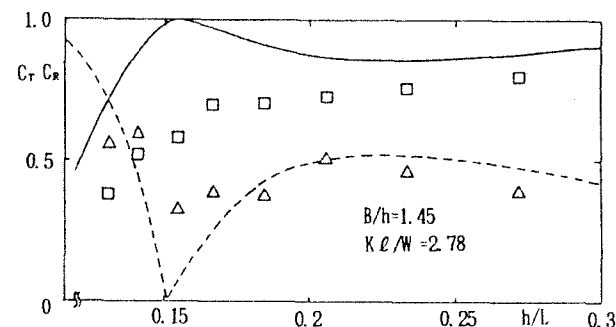
と、 F_1 や F_2 は h/L の変化によって増減し $h/L=0.18$ 付近の条件下で極大となっていることや、 $h/L<0.35$ の範囲では F_1 は F_2 を常に上回っていることなどがわかる。 $h/L=0.37$ 付近で発散する傾向にあるのは前後の堤体にはさまれた堤内水域で波浪の共振現象が生じたためであり、線型理論に基づく本解析法では水粒子運動に対する非線型的な減衰効果が考慮できないため、共振による増幅効果が極端に大きくなったものである。次に剛な連結ロッドを採用して動揺を許した場合を示す(b)図に目を移し(a)図との比較を行ってみると、堤体の動揺を許したことによって水平力の絶対値は著しく減少していることや、 F_1 と F_2 はほぼ等しくなっていることなどがわかる。そして、(a)図に見られたような波の共振に伴う不連続な変動も認められず、 h/L の増減に対する変動傾向はより穏やかなものとなっている。この傾向は連結ロッドの伸縮を許した場合を示す(c)図においても同様であり、堤体の動揺を許すことによって水底基礎へ作用する水平力を大幅に減少できるものと言える。可動式複列カーテン防波堤は支持脚の水底部にヒンジを介した構造であるため、上部構造から水底基礎へのモーメントの伝達もなく、水底に設置する基礎構造の設計条件が大幅に緩和できるものと考えられる。次に(b)、(c)図中に示した FT に着目してみると、 FT の変動傾向は F_1 や F_2 のそれと同様であるものの、その絶対値は F_1 や F_2 の値を常に上回るように出現しているのがわかる。連結ロッドは本防波堤構造に特有の部材でありここで明らかにした軸力 FT に持ち堪えられる設計の可否が今後の重要な検討項目であるものと言える。



(a) 堤体を完全に固定した場合

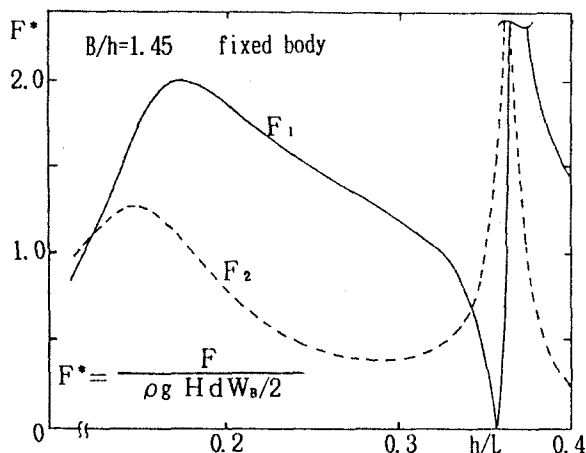


(b) $K = \infty$ の場合

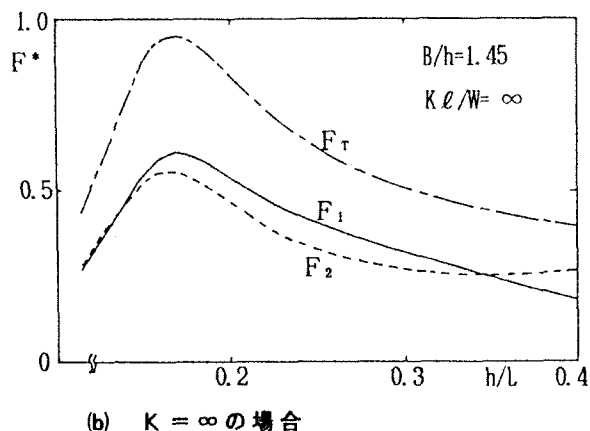


(c) K が有意な値をもつ場合

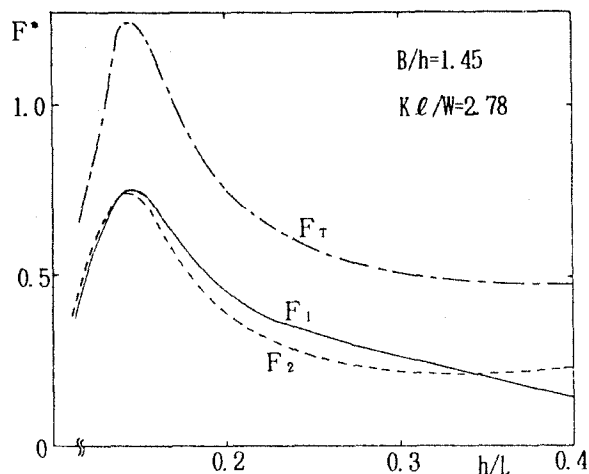
図-6 波周期による透過・反射率の変動特性



(a) 堤体を完全に固定した場合



(b) $K = \infty$ の場合



(c) K が有意な値をもつ場合

図-7 波周期による作用波力の変動特性

5. 結 語

主要な結論をまとめると次のようになる。

- (1) 可動式複列カーテン防波堤の動揺量は、堤体間隔 B や入射波の波長 L の影響によって大きく変動するがその特性は無次元量 B/L の値によって特性づけられる。 $B/L < 0.5$ の条件下では、動揺変位は B/L が小さいほど増加することや連結ロッドの剛性が有意な場合には後列堤の方が前列堤よりも大きな動揺を示す。
- (2) 堤体の動揺を許し発生する発散波と透過波の位相干渉効果を利用することによって、固定時に比較して長周期側における波の透過率を大幅に低減させることが可能である。この場合、副作用として短周期側において透過率が増加する傾向にあるものの、その増加量は少なく、結果として周期条件の広い範囲で波浪制御効果の改善が達成できる。
- (3) 水底ヒンジに伝達される水平波力は固定型の堤体のそれを大幅に下回っており、基礎構造の設計条件の緩和が可能である。なお、連結ロッドに作用する軸力は水平波力よりも大きくなり、具体的な設計の可否は本防波堤の実現化に際して重要な課題である。

(参考文献)

- 1) Wiegel, R.L.: Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier, Proc. of ASCE, J. of Waterways and Harbors Division, Vol. 86, No. WW1, pp. 1 ~ 13, 1960.
- 2) 中村孝幸: カーテンウォール型防波堤まわりの波変形と作用波力に関する研究、31回海講論文集、pp. 512 ~ 516、1984.
- 3) 中村孝幸、森田知志: 複列カーテン防波堤の堤内共振を利用した波浪制御効果について、32回海講論文集、pp. 525 ~ 529、1985.
- 4) 中村孝幸: 薄肉物体まわりの波浪境界値問題に関する解析法、30回海講論文集、pp. 410 ~ 414、1983.
- 5) 中村孝幸、森田知志、小野正順: 斜波中における任意断面浮体まわりの波浪変形の算定法、海洋開発論文集、Vol. 3、1987.
- 6) 井島武士、田淵幹修、湯村やす: 有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形、土木学会論文報告集、第202号、pp. 33 ~ 48、1972.