

多列配置された堤体群まわりの波高分布と作用波力の算定法

中村 孝幸*・小野 正順**・長田 和久***

1. ま え が き

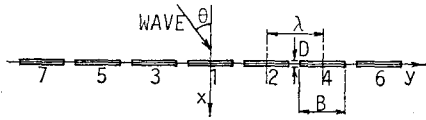
堤体構造物が規則的に無限配列されている場合の波浪境界値問題は、従来鏡像原理を利用して隣接する堤体の中心間距離に等しい水路内に1つの堤体が設置されている場合の問題に置換して解析されている(吉田ら, 1986; 中村ら, 1988)。このような解析法は、堤体群全体を対象にして解析を行う必要がある鉛直線 Green 関数法(Issacson, 1978; 中村ら, 1985)などに比較すると、単に堤体群中の1堤体のみを取り扱えばよいことから、非常に効率のよい実用的な算定法と考えられる。しかしながら、実際場における堤体列の基数は有限基であり、どの程度の規模の堤体群に対してこのような無限配列を想定した解析法が適用できるのかを明確にしておく必要がある。また、有限基で構成される堤体群の場合、堤体群の両端部に位置する堤体では、端部よりの回折波の影響を強く受けることが予想され、無限配列を想定した場合との差異についても把握する必要がある。

本研究は、このような堤体の無限配列を想定した解析法の有限配列された場合に対する適用性やその適用限界などについて、堤体まわりの遡上高や波高分布および各堤体に作用する波力に着目して明らかにする。この際、有限配列された堤体群の配列方向における波力分布の特性等についても検討するものである。

2. 解析法の概略

堤体が規則的に無限配列されている場合の波浪ポテンシャル問題の解析法としては、斜め入射波の条件をも考慮できる著者ら(1988)の Green 関数法によるものを用いた。この解析法は、堤体の無限配列の条件が Green 関数の中に考慮されており、単に堤体列中の任意の1堤体のみを取り扱って堤体列まわりの波浪ポテンシャル問題が解析できる。一方、堤体が有限配列されている場合の解析法としては、Issacson(1978)や著者らの中の一人

(1985)による鉛直線 Green 関数法を用いた。



図一1 矩形堤体列の配置と堤体番号

3. 矩形堤体列に対する解析的検討

3.1 解析モデルおよび算定条件

a) 堤体形状および堤体列; 配列する堤体構造物は、直立型の不透過な矩形堤とした。この際、堤体長 B と堤体厚さ D との比は、従来の離岸堤などの例を参照して $B/D=8$ のものを採用した。矩形堤は、図一1に示すように隣接する堤体の中心間距離 λ が一定となるように直線的に配列した。 λ には、堤体列の開口率 $\alpha=(\lambda-B)/\lambda$ が20%および50%となる2種類のものを採用したが、ここでは $\alpha=20\%$ のものに限定して述べることにしたい。また、有限堤体列の配列基数は、表一1に示す5種類のものに変化せしめた(一部17基のものを含む)。なお、各堤体には、後の説明のため図一1中に示すように番号を付けた。

b) 波条件; 堤体列への波の入射角 θ (図一1の定義を参照) は、後述する各周期の波に対して 0° と 45° の2種類に変化せしめた。そして作用波の周期 T は、堤体の配列方向における最低次の波浪共振の出現条件 ($\theta=0^\circ$ の時 $\lambda/L=1.0$, $\theta=45^\circ$ の時 $\lambda/L=0.59$, L : 波長) を考慮して設定した。これは堤体列まわりの波変形が、無限配列を想定する場合、上述したような最低次の横波共振の出現を境にして1次元的なものから2次元

表一1 算定条件

堤体基数	$\lambda/L=1.5$	$\lambda/L=1.0$	$\lambda/L=0.9$	$\lambda/L=0.5$
1	$I^*=1.20$	$I^*=0.80$	$I^*=0.72$	$I^*=0.40$
3	4.20	2.80	2.52	1.40
5	7.20	4.80	4.32	2.40
7	10.20	6.80	6.12	3.40
9	13.20	8.80	7.92	4.40

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科
** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科
*** 学生員 愛媛大学大学院 海洋工学専攻

(平面) 的なものへと変化することに着目したものである。これら設定波を、周期に関する無次元量 λ/L で表すと表-1 のようである。なお、表-1 中には、採用した有限堤体列の列長 l と波長 L との比 l^* についても併せ示した。

3.2 無限配列を想定した場合の透過率

無限配列された堤体場合には、無限の堤体長を想定した場合と同様に1次元的な波変形の指標である透過率などを求めることができる。図-2 は、上記の矩形堤体列による透過率 C_T の算定結果を λ/L による変化で表すもので、波の入射角 θ による差異についても検討できるようにしてある。この図より、 C_T は、全般的に λ/L が小さく長周期波になるほど増加することや斜波中の方が直角入射の場合より大きくなることなどがわかる。また、 C_T は特定の λ/L において急変する傾向を示すが(図中の R.P.), これは堤体の配列方向における波浪共振(横波共振)の出現によるものである。

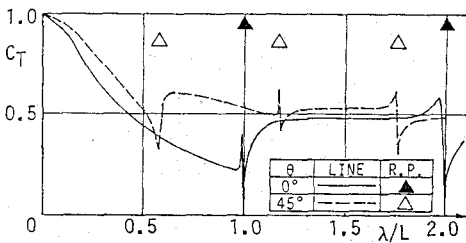


図-2 矩形堤体列(無限列)の透過率の変動特性

3.3 堤体まわりの遡上高に関する比較

図-3(a)~(d) は、配列基数を変化させた場合の中央堤まわりの遡上高 R_p の空間分布に関する比較の代表例を示すもので、直角入射を受ける場合のものである。そして図(a)~(d)へは第一次共振点を含み λ/L が減少する場合の変化を表す。なお、各図の上下段は、各々堤体の反射波側および透過波側の R_p で、入射波高 H で除した無次元量で表示してある。これらの図より、第一次の横波共振点に相当する図(b)の場合を除けば、無限堤体列の R_p は、 λ/L の値によって異なるがほぼ3基から9基で構成される有限堤体列のそれと概略的に一致していることがわかる。すなわち、横波共振点より短周期波側の図(a)の場合では3基程度以上、またそれより長周期波側で共振点に比較的近い図(c)および共振点より離れた図(d)の場合では、各々5基および9基程度以上になれば、有限堤体列に対して無限堤体列を想定した算定結果が適用できるものと言えよう。そして、無限配列を想定した結果の適用に当り問題となるのは、特に横波共振点に一致する場合だけと結論される。なお、このような適用限界を堤体列長と波長との比に着目して検討してみると、表-1 からわかるように、上記のどの場合についても $l^*(=l/L)$ で4~5程度以上となっていることが認められる。

一方、図-4 は入射角 θ が 45° と斜波条件にした場合の結果の一例を示すが、上記の直角入射の条件の場合(図-3(d))に比較すると無限配列を想定した算定結果の有限堤体列への適用性は劣るようになることなどがわかる。

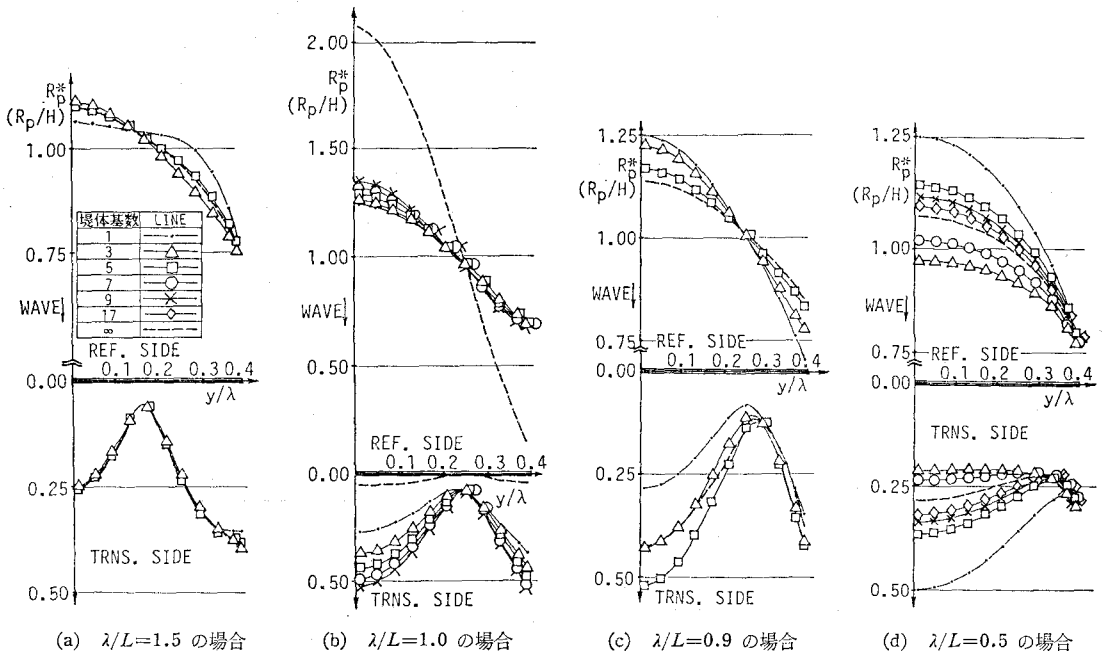
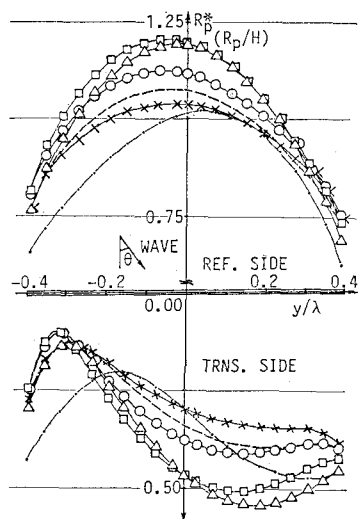


図-3 矩形堤体列の中央堤における遡上高の堤体基数による変化 ($\theta=0^\circ$)



図—4 斜波中の中央堤における遡上高
($\lambda/L=0.5$, $\theta=45^\circ$)

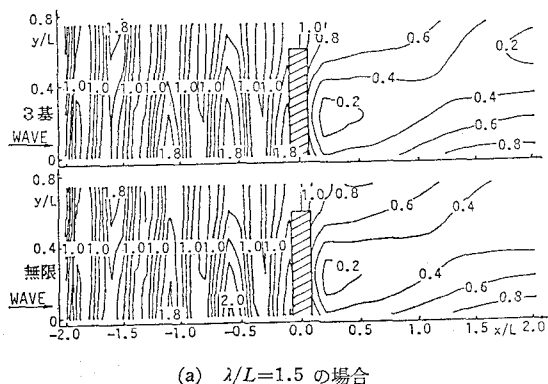
3.4 堤体まわりの波高分布に関する比較

この比較の代表例を示すのが 図—5 (a), (b) である。これらの図は、上記の R_p の場合と同様に堤体列の中央堤まわりに着目して、堤体前後の2波長にわたる波高分布を回折係数 K_D のコンターで表すもので、各図の上下段は、各々有限および無限堤体列の場合の結果である。なお、有限堤体列の構成基数としては、上記した R_p に関する適用限界領域のものとした。これらの図の上下段の比較から、堤体まわりの波高分布に対しても、堤体前後の2波長程度の領域に限るならば、3.3 で述べたような無限堤体列を想定した解析法の適用性に関する結果がほぼ妥当であることが再確認できる。

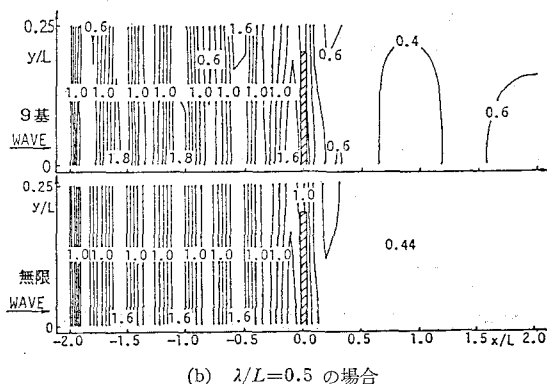
3.5 堤体波力に関する比較

ここでは、上述してきたような有限堤体列の中央堤に対する無限配列を想定した解析法の適用性のみならず、堤体列全体の耐波安定性の検討が行えるように堤体間にわたる空間的な堤体波力変動およびその最大値が現れる堤体位置などについても明らかにする。なお、堤体波力としては、各堤体に作用する全水平波力の堤体列の法線方向における波力成分 F_x に着目し、堤体が単独配置された場合のそれ F_s で除して無次元表示してある。

直角入射波を受ける条件下で、配列基数に伴う堤体波力の空間変動を各種の λ/L に対して示すのが 図—6 (a) ~ (c) である。図中には、無限配列を想定した場合の堤体波力 $F_{x\infty}$ についても比較のため併せ示してある。なお、横軸の堤体番号は、図—1 中のそれに対応するものである。これらの図から、横波共振点より短周期波側 (図 (a)) および長周期波側 (図 (c)) の場合、有限堤体



(a) $\lambda/L=1.5$ の場合

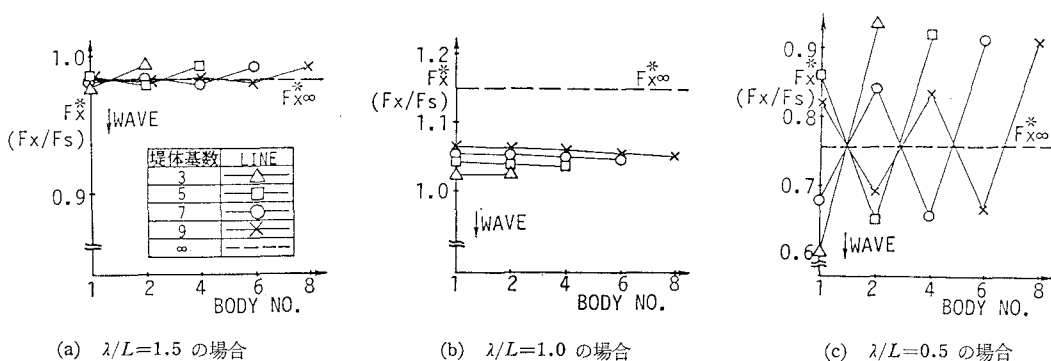
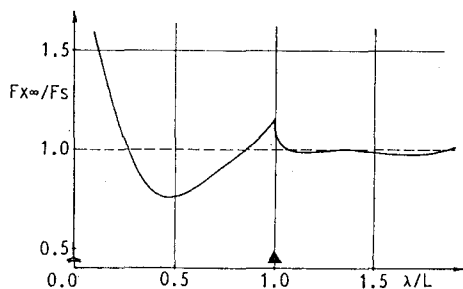
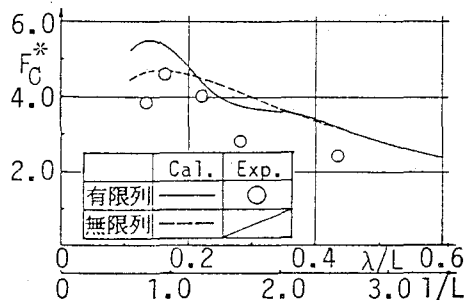
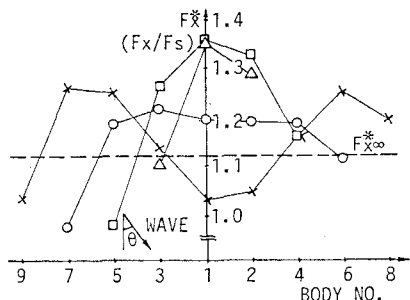


(b) $\lambda/L=0.5$ の場合

図—5 矩形堤体列の中央堤まわりの波高分布の比較 ($\theta=0^\circ$)

列に作用する波力は、無限堤体列の波力 $F_{x\infty}$ のまわりに上下変動する空間分布となっており、配列基数に関わらず列端部に位置する堤体で最大波力が現れている。そして、これらの場合、No. 1 の中央堤体に着目するならば、3.3 で見いだした無限配列を想定した R_p に対する解析法の適用性に関する結果が、堤体波力についてもほぼ妥当であることが認められる。しかしながら、有限堤体列中の最大波力は、上述したように列端部で現れ、しかもその絶対値は $F_{x\infty}$ より比較的大きいことから、無限配列を想定した解析法により堤体波力を推定することは危険と言えよう。一方、横波共振点に一致する図 (b) の場合、配列基数の増加に伴い、有限堤体列の波力は無限堤体列のそれに漸近する傾向が認められるが、遡上高の場合と同様に両者の一致度は十分でない。そしてこの場合、上記の非共振点の場合に比較して、波力の空間分布が上下変動のないほとんど様なものとなることやその絶対値が単独堤体のそれを上回るようになることなどの相違が見られる。

次に、図—7 は、堤体の無限配列を想定した場合の $F_{x\infty}$ が λ/L によってどのように変化するかを表すもので、やはり単独堤体の場合の F_s との比で示す。この図より、 $F_{x\infty}$ は、横波共振点付近および $\lambda/L < 0.3$ の領域

図-6 矩形堤体列に作用する波力分布の堤体基数による変化 ($\theta=0^\circ$)図-7 矩形堤体列 (無限列) に作用する波力 ($\theta=0^\circ$)図-9 円筒型堤体列の中央堤の作用波力 ($2R/\lambda=0.83$)図-8 斜波中における波力分布 ($\lambda/L=0.5, \theta=45^\circ$)

で F_s を上回る大きさとなることや図-6 (c) で採用した $\lambda/L=0.5$ 付近では F_s に比較して最小となることなどがわかる。そして、図-6 (c) のように堤体列の間で波力変動が顕著となるのは、上記のような $F_{x\infty}$ と F_s との差が大きくなる場合と言えよう。

一方、図-8 は、図-6 (c) に比較して作用波の方向を変化させた時の結果を表す。この図より、斜波条件となると、堤体波力の空間分布が大きく変化することや最大波力の現れる位置が列端部より内側に移行することが認められる。そして、堤体波力の絶対値も、直角入射の場合と異なり単独堤体のそれを上回るようになることや無限配列を想定した解析法の適用性が多少劣るようになることなどがわかる。

4. 円筒型堤体列に対する実験結果との比較

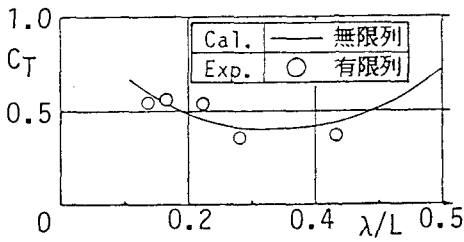
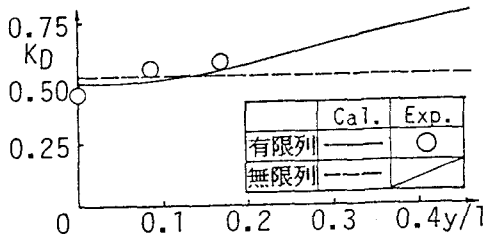
ここでは、建設省の土木研究所で行われた円筒型堤体列についての実験結果(土研資料, 1988)と本研究で採用した2種類の解析法による算定結果との比較を行った。用いられた堤体列は、直径 37 cm の直立円筒を開口率が 17% となるように直線状に 6 基規則配列したもので、隣接する堤体の中心間隔 λ は 44.4 cm, 堤体列長 l は 2.59 m となっている。作用波の条件は、 λ/L で 0.14~0.42, l/L で 0.80~2.44 の範囲にあり、直角入射の条件のみとなっている。したがって、この実験では、最低次の横波共振点より長周期波側のみが対象とされていることになる。実験で測定された水量は、堤体列の中央堤に作用する水平波力、転倒モーメントおよび中央堤前後の波高などである。実験の詳細については、土研資料(1988)を参照されたい。

4.1 堤体波力に関する比較

図-9 は、中央堤に作用する水平波力 F_c に関する実験結果と算定結果との比較を λ/L および l/L による変化で示すものである。なお波力は、式 (1) で定義される無次元波力 F_c^* で表してある。

$$F_c^* = F_c / (\rho g H R^2 / 2) \quad (1)$$

ここに、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 H : 入射波高、 R : 円筒半径である。

図—10 円筒型堤体列の透過率 ($2R/\lambda=0.83$)図—11 円筒型堤体列の透過波側での波高変動
($\lambda/L=0.16$, $2R/\lambda=0.83$, $x/L=0.22$)

この図より、有限堤体列の算定波力は、 λ/L で 0.35 以上、また l/L で 2 程度以上になれば無限堤体列のそれとほぼ一致することがわかる。そして、この場合の無限配列を想定した算定結果の適用領域は、3. で述べた矩形堤体列の場合の $l/L > 4 \sim 5$ に比較すると拡大している。これは、同一の l/L の値に対して円筒型堤体列の方が、上記の矩形堤体列に比較して λ/L が小さく 1 波長内における配列基数が多いことによるものと考えられる。次にこれらの算定結果と実験結果とを比較してみると、実測波力は、 λ/L に関わらず算定波力を若干下回るものとなっており、どちらの解析法によってもほぼ推定できることがわかる。

4.2 堤体まわりの波変形に関する比較

図—10は、円筒型堤体列の透過率 C_T に関する算定結果と実験結果との比較を λ/L による変化で表す。ここで算定結果は、堤体の無限配列を想定した解析法によるものである。また、実験結果は、中央堤体の背後水域の異なる 8 地点での平均透過波高から求められたものである。この図より、 C_T の実験結果は、 λ/L の小さな長周期波側で多少の相違が見られるものの堤体の無限配列を想定した算定結果とほぼ一致していることがわかる。次に図—11 は、比較的長周期波の条件である $\lambda/L=0.16$ の場合について、堤体列の透過波側での列方向 (y 方向) における回折係数 K_D の分布を表す。図中では、列長の半分について実験結果と有限および無限堤体列に対する算定結果がプロットしてある。この図より、中央堤付

近に限れば、 K_D の実験値は、有限および無限堤体列の算定値とほぼ一致していることがわかる。そして、列端部付近では回り波の影響を強く受けるようになるため、有限列の K_D 値は、無限列のそれよりかなり大きくなる傾向が認められる。したがって、図—10に示すような無限堤体列を想定した場合の結果は、有限堤体列の中央堤付近のかなり限られた領域に対してのみ適用できるものと推測される。

5. 結 語

i) 矩形堤体列の中央堤まわりの波高分布や遡上高などは、堤体列の横波共振点を除けば、それより短周期波側で堤体基数が 3 基以上の場合に、またそれより長周期波側で 9 基以上の場合にはほぼ無限堤体列を想定した算定結果が適用できる。なお、これらの適用限界を堤体列長 l と波長 L との比で表すとほぼ $l/L=4 \sim 5$ に相当する。

ii) 有限堤体列の堤体間にわたる波力分布は、堤体列の横波共振点に一致する場合を除けば、無限配列を想定した場合の作用波力を中心に上下変動する空間分布を示す。そして、この場合その最大値は、列端部付近に位置する堤体において現れ、その絶対値は無限配列を想定した場合の堤体波力よりも大きくなる。

iii) 6 基で構成される円筒型堤体列に作用する波力およびその波浪制御効果は、中央堤付近に限定するならば、ほぼ無限配列を想定した解析法により予測できる。しかしながら、列端部付近では回り波の影響を受けるため、無限配列を想定した算定では十分でない。

最後に、本研究で用いた実験資料は、建設省土木研究所並びに住友金属工業(株)より提供していただいた。ここに記して謝意を表する次第である。また本研究は、文部省科学研究費(一般研究(C))による成果の一部であることを付記しておく。

参 考 文 献

- 中村孝幸・奥 吉雄 (1985): 任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 594~598.
- 中村孝幸・小野正順 (1988): 規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 527~531.
- 吉田明徳・飯田典生 (1986): 任意断面の鉛直柱体列による波の散乱と波力の解析法, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 521~525.
- 木研究所資料 (1988): 海域制御構造物の開発に関する共同土研究報告書(第 10 章 遊水室を有する鋼板セル式海域制御構造物に関する実験的検討), 建設省土木研究所海岸研究室, 第2661号, pp. 119~133.
- Issacson, M. Q. (1978): Vertical cylinders of arbitrary section in waves, Jour. of Waterway, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol. 104, No. WW4, pp. 309~322.