

# 多列円柱パイル構造物の波の作用高さについて

大阪大学工学部 正員 榎木 亨  
大阪大学工学部 正員 ○岩田 好一朗

## 1. 緒言

海洋用設計画において海洋構造物がその根拠として重要な意義を有していることはいうまでもないが、その設置海域は比較的水深が深いほど大きな波浪の直撃を受けることが多い。1に於いて、海洋構造物の設計に際しては越波及び波力などにつき慎重に検討を加えなければならない。このうち海中構造物に作用する波力については近年多くの研究者により検討が加えられているのは周知のとおりであるが、構造物への波の作用高さ(打ち上げ高さを含む)については充分検討されているとはいえず、海洋鋼構造物設計指針においてもその作用高さとして  $=0.8H_{max}$  という簡単な式で与えているにすぎない。本論では海洋構造物として海底に支枕が固定されている多列円柱パイル構造物を取りあげて水理実験を行ない、波の作用高さに検討を加えた上でその結果を報告する。なお、波の作用高さとして本論では波の打ち上げ高さを採用しており、従って進行波の静水面からの波峰高さを意味しないこととあらかじめわけておく。

## 2. 単体構造物の波の作用高さ

多列円柱パイル構造物の波の作用高さについて述べる前に、単体構造物への波の作用高さについて略述しておく。いま静水面上の波の打ち上げ高さを  $R_m$  とすると、波高  $H_0$  との比  $R_m/H_0$  は1)式の右辺の諸量により決定される。

$$\frac{R_m}{H_0} = f\left(\frac{h}{L_0}, \frac{D}{H_0}, \frac{D}{L_0}, S_F, \theta\right) \dots (1)$$

ここで、 $h$ =静水深、 $L_0$ =波長、 $D$ =構造物代表長(円柱の場合は直径、四角柱の場合は一辺など)、 $S_F$ =構造物形状(例えば、円柱、三角柱など)、 $\theta$ =構造物への波の入射角である。図-1は三角柱、円柱、四角柱構造物の代表長  $D$  が波高  $H_0$  に比して比較的大きい場合 ( $D/H_0=10.35$ ) の単体構造物に作用する波

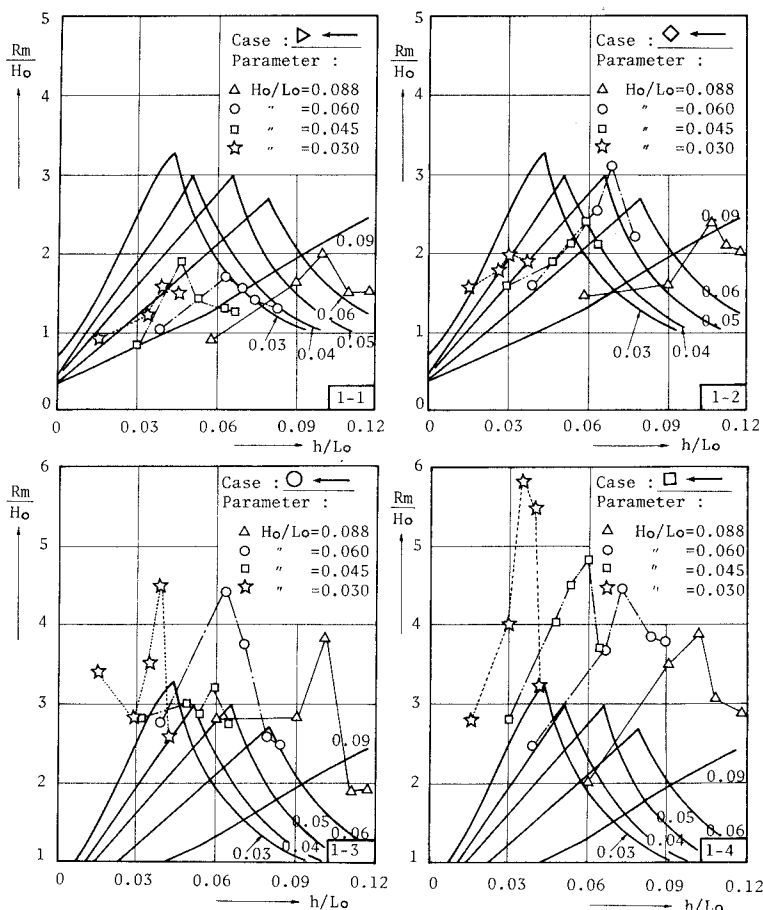


図-1 単体構造物の波の作用高さ ( $D/H_0=10.35$  の場合)

の打ち上げ高さを示すものである。  
 なお、葎の打ち上げ高さは水の浸つた部分のみが変色する用紙と構造物の静水面より上オにはり、その変色する部分の高さより算定している。その算定方法についてはオ25回年次学術講演会で報告しているので講演集を参照していただく。また図-1に示す実線は鉦直堤内への葎の打ち上げ高さを示している。図-1によれば、 $h/L_0$ 、 $H_0/L_0$ 、 $S_F$ 、 $\theta$ の全てが $R_m/H_0$ に大きく影響を与えることが認められる。この中で $R_m/H_0$ がある $h/L_0$ の値に対して極値をとっているが、これを $h/H_0$ に換算すると1.0~1.2の値となりほぼ碎波水輝に対応しており、単体構造物の場合でも碎波真に設置されると葎の打ち上げ高さが大きく、図中に示すように従来の海岸堤防及び防波堤への葎の打ち上げ高さと同じ傾向をとることが認められる。また図-1によれば、三角葎、四角葎の場合、隅角部に葎が入射する場合は $R_m/H_0$ は高々3.0程度であるが、逆に直角に入射する場合は $R_m/H_0$ は5.8と大きな値となり、葎の構造物

への入射角により著しく異なる。一方、円葎は葎の入射方向に関係なく $(R_m/H_0)_{max} = 4.5$ 程度であり、このことより形状として円葎が好ましいといえよう。なお、鉦直堤防より若者らの行なつた単体構造物の方が大きい $R_m/H_0$ をとる場合があるが、これは葎の打ち上げ高さを計測する方法の差に帰因するものと考えられる。図-2は円葎構造物(単体)とさらにとりあげて、 $R_m/H_0$ に及ぼす直径 $D$ と葎葎高比 $D/H_0$ の効果と $D/L_0 = 0.087$ と $D/L_0 = 0.165$ の場合について示すもので、整理の都合上、(1)式の $h/L_0$ の代りに $h/H_0$ 、 $H_0/L_0$ の代りに $D/L_0$ の量を用いている。(なお、実験は大坂大学工学部土木工学教室の30m(長さ)×4m(幅)×0.5m(深さ)の鋼製三次元水槽で行なわれた。)図-2によれば、葎の打ち上げ高さ $R_m/H_0$ に及ぼす $h/H_0$ と $D/H_0$ の効果が明らかとなる。すなわち、 $R_m/H_0$ を小さくするには構造物(単体)の径と葎葎高比 $D/H_0$ を小さくする必要がある、例之ば、 $d/L_0 = 0.087$ の場合、 $D/H_0 = 13$ で $R_m/H_0 = 9.0 \sim 6.2$ であるが、 $D/H_0 = 2$ となると $R_m/H_0 \cong 2$ と極めて小さくなり $D/H_0$ の効果が大きく、このことより、構造物への葎の作用高さを低くするには $D/H_0$ をできるだけ小さくすることが好ましいことがわかるであろう。

### 3. 多列円葎パイル構造物の葎の作用高さについて

(i)実験装置とその方法：実験は大坂大学工学部土木工学教室の屋内2次元鋼製葎水槽30m(長さ)×0.8m(幅)×1.0m(高さ)(片面ガラス張り)を用いて行なわれた。葎の作用高さは水の浸つた部分のみが変色する用紙を円葎パイル表面にはりその変色した部分より決定するが、本実験では重複葎となつても碎波しないため、パイ

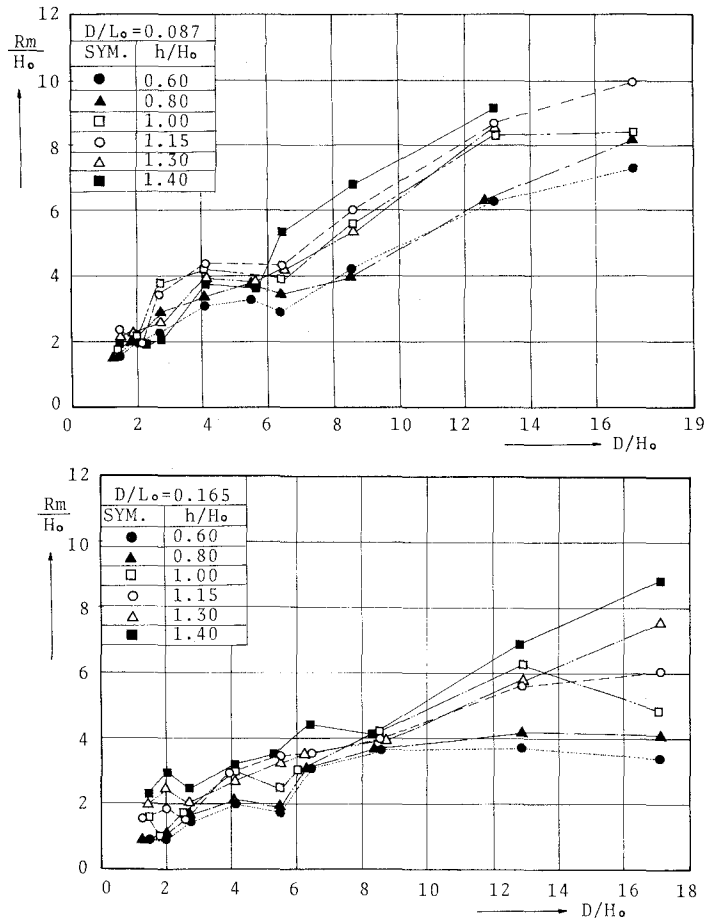


図-2  $R_m/H_0$ に及ぼす $h/H_0$ と $D/H_0$ の効果(円葎構造物)

ルハの複雑な波の打ち上げがない。1に於て、既述の2. 単体構造物の場合と異なり、変色1に部分の最高値と作用高さ $R_m$ として採用している。海床模型は前端部が1/2勾配を持つ水平床であり、多列パイル構造物は水平床部に設置してある。パイルの配置間隔は波の進行方向及びその直角方向とも等間隔に配置されている。パイル構造物は水路幅いっぱい配置されているので実験は二次元である。なお、実験諸元は表-1に示すとおりである。以下水理実験結果について論述していく。

(ii)実験結果とその検討：まず、波の進行方向と直角方向に配置された(水路幅方向)パイルへの波の作用高さであるが、これは著者の行なつた $b/(b+D)=0.067\sim 0.756$ の範囲に対してはほとんど作用高さが等しくパイルと波との干渉により水路幅方向のパイルへの波の作用高さの著るしい差異は認められなかった。1に於て以後、波の進行方向に配置されたパイルへの波の作用高さのみについて述べていくこととする。図-3は1列パイル構造物の波の作用高さ。図-4は2列パイル構造物のオ1列目のパイルの波の作用高さ $R_m/H_L$ とパイル設置間隔 $b/(b+D)$ の効果とを1に於て、図中の $A/H_L$ は(2)式で与えられる静水面からの合成波の峰高と与える式である。

|           |                                                          |
|-----------|----------------------------------------------------------|
| Ho (cm)   | 2.0 cm, 6.0 cm                                           |
| To (sec)  | 0.65 sec, 1.3 sec                                        |
| h (cm)    | 15.0 cm                                                  |
| D         | 4.2 cm                                                   |
| $b/(b+D)$ | 0.067, 0.125, 0.190, 0.276<br>0.386, 0.522, 0.642, 0.756 |

表-1 実験諸元

$$\frac{A}{H_L} = \frac{1}{2}(1+\gamma_R) + \frac{\pi(1+\gamma_R)^2}{4L} H_L \coth \frac{2\pi b}{L} \quad (2)$$

なお、 $H_L$ =水深への進入波高、 $L$ =水深への波長、 $\gamma_R$ =パイル構造物による反射率である。図-3、図-4より判明するように、パイル構造物への波の作用高さ $R_m/H_L$ はパイル設置間隔 $b/(b+D)$ により変化する。(b=パイルとパイルの設置間隔である。)。つまり、 $b/(b+D) \geq 0.4$ のパイルとパイルの設置間隔が広い場合は波の作用高さ $R_m/H_L$ はほぼ一定であり、パイルの設置間隔を変えてもほとんど変化しない。一方、 $b/(b+D) < 0.4$ の場合はパイル設置間隔

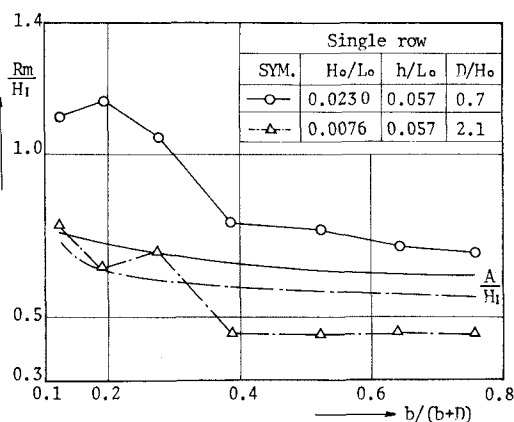


図-3  $R_m/H_L$ と $b/(b+D)$ の関係 (1列パイル構造物)

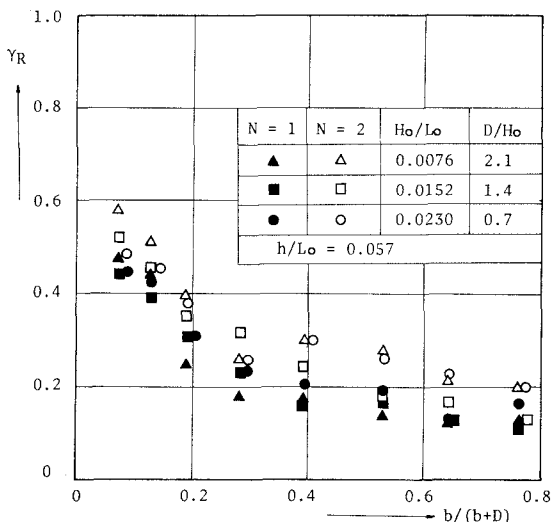


図-5  $\gamma_R$ と $b/(b+D)$ の関係 (1列及び2列パイル)

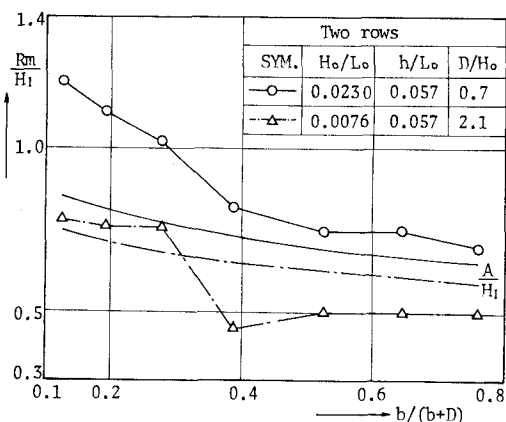
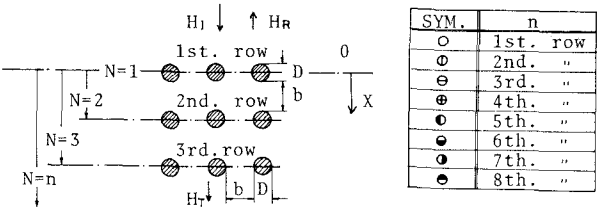


図-4  $R_m/H_L$ と $b/(b+D)$ の関係 (2列パイル構造物のオ1列目パイルの $R_m/H_L$ )

$b/(b+D)$ が小さくなるにつれて稈の作用高さ  $R_m/H_1$  が一様に増大していくことが認められて、 $R_m/H_1$ に及ぼす  $b/(b+D)$ の効果の大きいことが認められる。これは図-5に示すようにパイル構造物による稈の反射率  $R_m$ が  $b/(b+D) \geq 0.4$ ではほぼ一定であるのに対し、 $b/(b+D) < 0.4$ では  $b/(b+D)$ が小さくなるにつれて、 $R_m$ がほぼ一様に大きくなっていくことが容易に理解される。この反射率を(2)式に代入して実験値とつき合せると、1列パイル、2列パイル構造物とも  $H_0/L_0 = 0.0230$ の稈に対して稈の作用高さ  $R_m/H_1$ を小さく、 $H_0/L_0 = 0.0076$ の稈に対しては  $R_m/H_1$ を大きく見積ることになり(2)式ではパイル構造物の稈の作用高さを正確に算定することはできない。また、 $H_0/L_0 = 0.0230$ の方が  $H_0/L_0 = 0.0076$ より  $R_m/H_1$ が大きくなり、また1列より2列パイルの方がおのの稈に対して  $R_m/H_1$ が大きくなっているが、これも図-5に示すように、 $H_0/L_0 = 0.0230$ の稈の方が  $H_0/L_0 = 0.0076$ の稈より反射率  $R_m$ が大きくなり、1列より2列パイル構造物の方が反射率  $R_m$ が大きいためであって、稈の打ち上げ高さは(2)式で充分あらわすことはできないにしても、反射率  $R_m$ に大きく左右されることがよくわかるであろう。図-7は4列円柱パイル構造物の場合、図-8は6列円柱パイル構造物の場合、図-9は8列円柱パイル構造物の場合の各列への稈の作用高さ  $R_m/H_1$ に及ぼすパイルの配置間隔  $b/(b+D)$ の効果を示すものであり、図-7～図-9に示した記号は図-6にまとめ示してある。図-7～図-9よりパイルの配置間隔  $b/(b+D)$ により各列パイルへの稈の作用高さ  $R_m/H_1$ は著しく異なっていることが認められる。つまり、 $b/(b+D)$ が小さくなるほど1列目、2列目、3列目の順で  $R_m/H_1$ が小さくなり、前のオのパイルほど稈の



| N \ b/(b+D) | X/L   |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 0.190 | 0.386 | 0.522 | 0.642 | 0.756 |
| 1 (row)     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 2 (rows)    | 0.035 | 0.046 | 0.059 | 0.079 | 0.116 |
| 3 ( " )     | 0.070 | 0.092 | 0.119 | 0.158 | 0.232 |
| 4 ( " )     | 0.105 | 0.138 | 0.178 | 0.237 | 0.349 |
| 5 ( " )     | 0.141 | 0.184 | 0.238 | 0.316 | 0.465 |
| 6 ( " )     | 0.176 | 0.230 | 0.297 | 0.395 | 0.581 |
| 7 ( " )     | 0.211 | 0.276 | 0.357 | 0.474 | 0.697 |
| 8 ( " )     | 0.246 | 0.322 | 0.416 | 0.553 | 0.814 |

図-6 記号の説明

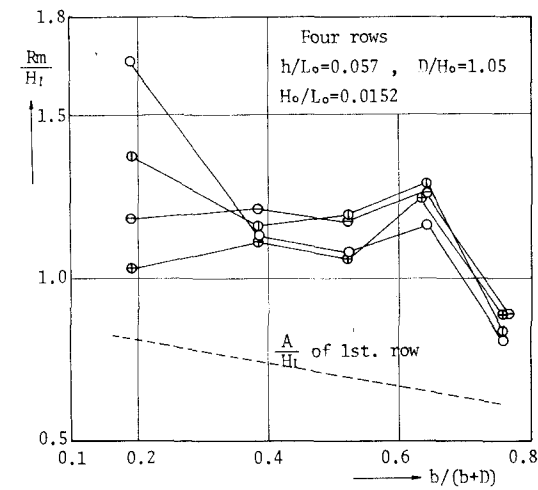


図-7  $R_m/H_1$ と  $b/(b+D)$ の関係 (4列パイル)

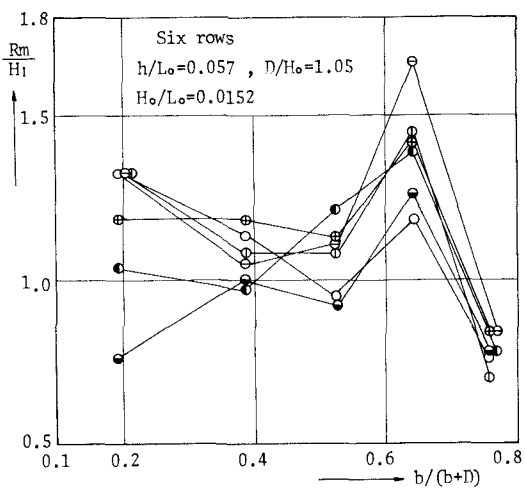


図-8  $R_m/H_1$ と  $b/(b+D)$ の関係 (6列パイル)

作用高さ  $R_m/H_i$  が大きい。例えば、 $b/(b+D)=0.190$  の場合は、図-10に示すようにパイル列数が4列から8列に増加してもオ1番目のパイル列への波の作用高さ  $R_m/H_i$  が一番大きく、以降、オ2列目、オ3列目、と順次  $R_m/H_i$  が小さくなり、 $N=8$ 、つまり8列目になるとオ1列目の  $R_m/H_i=1.32$  に対し  $R_m/H_i=0.68$  となり作用高さは半減している。なお、図-10では、 $x/L=0$  のオ1列目のパイルを示し、以後オ2列目、オ3列目と  $x/L$  が0より大きな値に対応し、その値は図-6に示されている値である。一オ、 $b/(b+D) \geq 0.386$  となると円柱パイル間での波の反射効果も有効に作用して、オ1列目パイルへの作用高さより後列パイルの作用高さが大きくなる。例えば、 $b/(b+D)=0.522$  のパイル設置間隔では図-11に示すように最後列から2列前、3列前の  $R_m/H_i$  が一番大きくなっている。これは、 $b/(b+D)=0.190$  のようにパイル設置間隔が小さくなるると既に図-5に示1のように、1列パイルそのものの反射率  $R_R$  が大きくなり、1に近づくにつれて透過波高が小さくなるため、オ1列目のパイル前面の合成波高が他の後列パイルでの合成波高より大きくなって、オ1列パイルの作用高さ  $R_m/H_i$  が大きくなるものと考えられる。一オパイル間隔  $b/(b+D)$  が大きくなると、図-5に示すように1列パイルの反射率  $R_R$  が小さくなり、1に近づくにつれて大きな透過波高が後列パイルへ伝播する。この透過波がパイル間で反射する結果、波の位相とパイルの設置間隔の関数でオ1列目より後列パイルの  $R_m/H_i$  が大きくなるのであろう。このようにパイルの配置間隔  $b/(b+D)$  とパイル列数の変化により円柱パイルへの波の作用高さが各パイル構造ごとに異なり、パイル間での波の反射効果により、オ1列目及び最後列目のパイルより、その中間にあるパイルへの波の作用高さが大きくなる場合が多いことには充分注意しなければならないといえる。

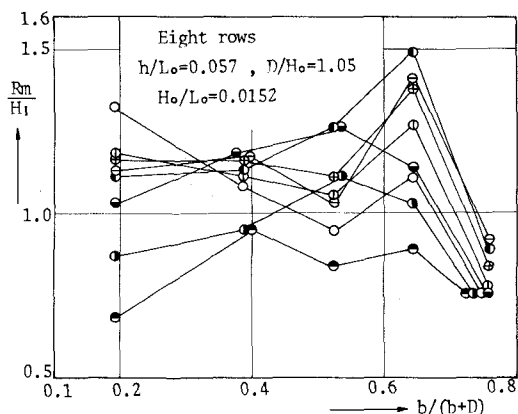


図-9  $R_m/H_i$  と  $b/(b+D)$  の関係 (8列パイル)

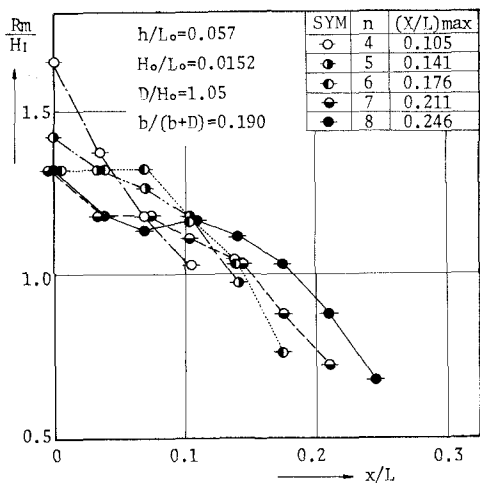


図-10 多列円柱パイル構造物の波の作用高さ  $R_m/H_i$  の距離方向変化 ( $b/(b+D)=0.190$  の場合)

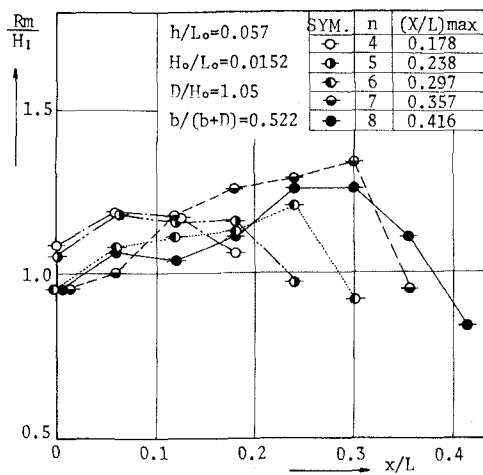


図-11 多列円柱パイル構造物の波の作用高さ  $R_m/H_i$  の距離方向変化 ( $b/(b+D)=0.522$  の場合)

なお、このパイル間での波の反射及射によるパイルへの波の作用高さ $R_m/H$ は、既往の著者らの多列円柱パイルパイル構造物の反射率 $\alpha_R$ と透過率 $\alpha_T$ を算定する式と誘導1)に方法を用いると、ある程度解明的に求まると思われこの点につき、著者らは目下検討を加えている。

なお、本論では波の作用高さのみについて記してきたが、いうまでもなく、こういった多列パイル構造物による反射率 $\alpha_R$ および透過率 $\alpha_T$ の正確な算定も必要とされる。この $\alpha_R$ と $\alpha_T$ の算定については古くはCastello<sup>6)</sup>、あるいは著者ら、またVan Weele & Herbich<sup>7)</sup>などの研究があるのでそういった研究を参照していただくことを考えている。本研究(特に実験)は当時学部学生の高木勲氏(現、本四公団勤務)と武内伸哉氏(現、大成建設勤務)の協力を得て行なわれたいことを記し、ここに謝意を表する次第である。

### <参考文献>

- 1) T. Sawaragi and K. Iwata : Effect of Structural Shape on Wave Run-Up and Wave Damping , Coastal Eng. in Japan , Vol. XIII . 1970 .
- 2) 榎木 亨・岩田好一郎・周 子純 : 波の打ち上げ高さに及ぼす海洋構造物の形状効果について、第25回年次学術講演会講演概要集、昭和45年。
- 3) 水理公式集：昭和46年度改訂版、土木学会編。
- 4) 岩垣 雄一：海岸堤防論、水工学シリーズ64-08、土木学会水理委員会、1964。
- 5) 榎木 亨・岩田好一郎：透過型構造物による波の変形について、第19回海岸工学講演会論文集、1972。
- 6) Castello, R.D. : Damping of Water Waves by Vertical Circular cylinders, AGLI, Vol. 33, No. 4, Aug. 1952 .
- 7) Van Weele, B.J. & J.B. Herbich : Wave Reflection and Transmission for Pile Arrays, Proc of 13th Conf. on Coastal Eng. Vol. III, 1972 .