

フィン形消波部材を有する 水中ストラット式構造物の反射特性 に関する基礎実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF REFLECTED WAVES OF UNDER WATER STRUTTED STRUCTURE SYSTEM WITH FIN MEMBER

佐藤光一¹・原田典佳²・半沢稔³・佐伯浩⁴

Kohichi SATOH・Noriyoshi HARATA・Minoru HANZAWA・Hiroshi SAEKI

¹正会員 工修 新日本製鐵株式会社 北海道支店 (〒060-0002 札幌市中央区北2西4)

²正会員 新日本製鐵株式会社 大阪支店 (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-4)

³正会員 工修 株式会社テトラ 環境事業本部技術部 (〒300-0006 土浦市東中貫町2-7)

⁴正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628札幌市北区北13西8)

The purpose of this study was to clarify the characteristics of reflected waves about the new type structure for wave control (under water strutted structure system with fin members on the front pipe piles array).

The parameters of hydraulic model test about fin members were setting angle in plane, setting range in water depth, opening ratio of the front pipe piles array with fin members, etc.

The main results of this study are that the characteristics of reflected waves are similar to slit wall caisson, the rational setting angle of fin members in plane is 90 degrees to the direction of incident waves, and the rational setting range of fin members is 60 percent sea water depth, etc.

Key Words : under water strutted structure system, fin member, reflected waves, hydraulic model test

1. はじめに

最近開発された水中ストラット式構造物^{1),2)}(岸壁タイプ)は、直立の土留壁体の前面に前方鋼管杭が打設されている。前方鋼管杭は法線方向に数m間隔で配置されているため、この部分を通じた波は土留壁体により反射される。このときの反射波高を低減させるために、前方鋼管杭の所定範囲にフィン形消波部材(以下、必要に応じフィンと略記する)を取り付けた構造を開発した(図-1)。

この消波構造はフィンとフィンの中でスリットを形成するため、縦スリットケーソン^{3),4)}に類似の消波効果を期待できる。本構造と通常の縦スリットケーソンとの消波面での構造上の大きな違いは、下部が透過構造であること、また法線直角方向に隔壁が存在しないことである。

本研究は水理模型実験によりフィンの設置角度、設置深さ、消波室幅、開孔率、周期、波形勾配等を変化させたときの反射率を求め、フィン形消波部材を有する水中ストラット式構造物の反射波対策設計を行うための基礎資料を得ることを目的としている。

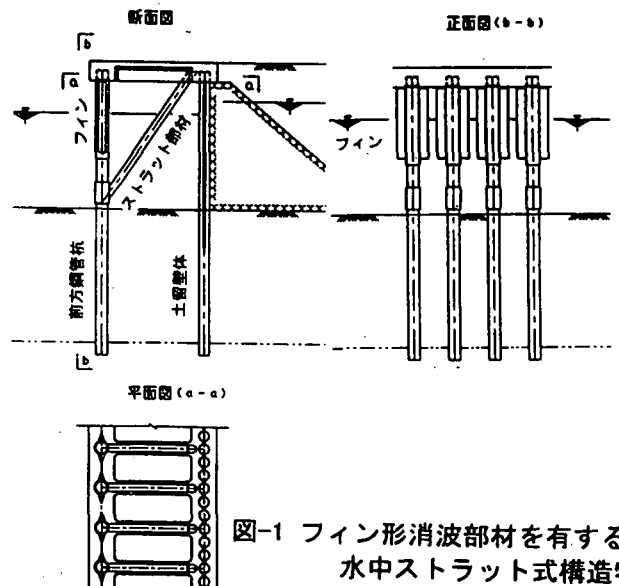


図-1 フィン形消波部材を有する
水中ストラット式構造物

2. 実験装置と実験条件

(1) 実験装置

2次元水理実験には図-2(a)に示す2次元造波水路(長さ:54.0m, 高さ:1.2m, 幅:1.2m, ピストン式・反射吸収型)を, また3次元水理実験には同図(b)に示す3次元造波水槽(縦:40m, 横:30m, 高さ:1.2m, ペンジュラム型・油圧駆動方式)を使用した。

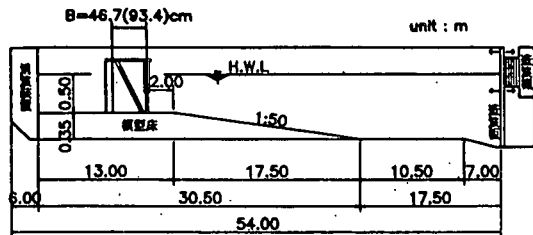


図-2(a) 2次元造波水路

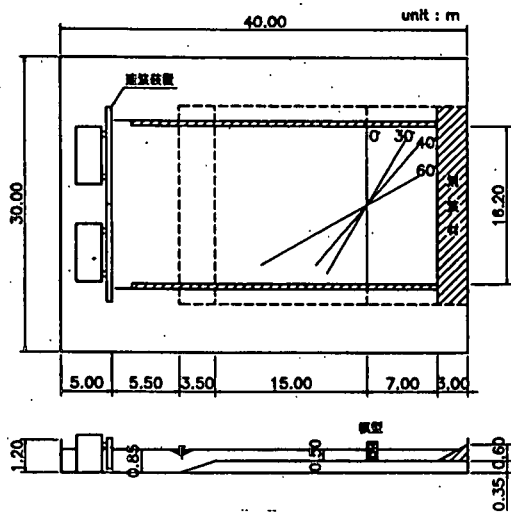


図-2(b) 3次元造波水槽

(2) 実験条件

a) 模型縮尺

模型縮尺は実験波, 実験水路・水槽の諸元及び造波機能等を考慮して, 2次元水理実験は1/15, 3次元水理実験は1/20とした。

b) 模型床及び構造物模型設置水深

2次元水理実験における模型床の勾配は $i=1/50$ で一様とし, 構造物模型は-50cm(現地量:-7.5m)の一樣水深部に設置した。3次元水理実験における模型床は水平とし, 構造物模型は-50cm(現地量:-10.0m)の一樣水深部に設置した。

3. 実験内容

(1) フィンの設置角度及び設置深さと反射率に関する2次元造波水路による規則波実験(実験1)

a) フィンの設置角度

鋼管柱へのフィンの設置角度は, 入射波の波向に対して次の3種類とした。

- ① 直角に設置(90度タイプ, 図-3(a))
- ② 45°傾けて設置(45度タイプ, 図-3(b))
- ③ フィンを設置しない(フィン無しタイプ)

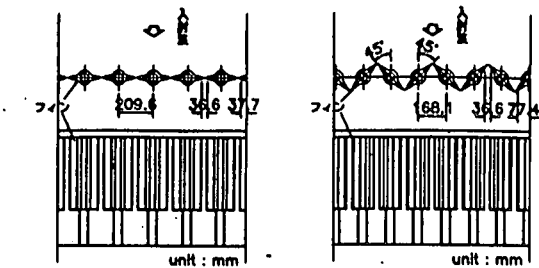


図-3(a) 90度タイプ 図-3(b) 45度タイプ

b) フィンの設置深さ

90度タイプ及び45度タイプについては, フィンの設置下端水深を模型量で-14.2cm, -30.0cm, -42.7cm(現地量:-2.13m, -4.50m, -6.41m)の3段階に変化させて実験を行った(図-4)。

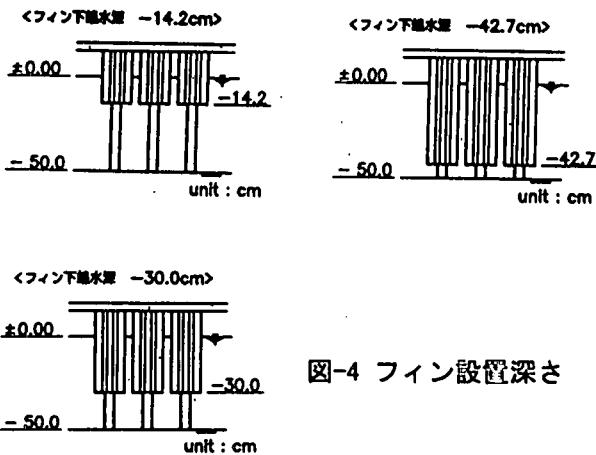


図-4 フィン設置深さ

c) 消波室幅

消波室幅Bは46.7cm(現地量: 7.0m)とした。

d) 波浪条件

2次元造波水路による規則波実験の波浪条件は本構造物の適応範囲を考慮して, 表-1のように設定した。波形勾配H/Lは0.01, 0.02, 0.03の3種類とした。

表-1 波浪条件

周期		波高	
模型量[s]	現地量[s]	模型量[cm]	現地量[m]
0.77	3.00	2.00	0.30
1.00	3.90	5.00	0.75
1.29	5.00	6.70	1.00
1.81	7.00	6.70	1.00
2.58	10.00	6.70	1.00

(2) 開孔率, 波形勾配及び消波室幅と反射率に関する2次元造波水路による規則波実験(実験2)

a) フィンの設置角度及び設置深さ

実験1の結果を踏まえ, フィンの設置角度は入射波に対して直角(90度タイプ), 設置深さは-30.0cm(水深の60%)

までとした。

b) 開孔率

開孔率 ε (スリット幅/鋼管柱の中心間隔) は、実験 1 や既往のスリット構造物の消波性能に関する研究成果を踏まえて、表-2 に示すように 0.1~0.4 の範囲で 4 種類設定した。各開孔率 ε におけるフィンの配置状態を図-5 に示す。

表-2 開孔率

開孔率	フィン中心間隔(cm)	スリット間隔(cm)
0.100	19.2	1.9
0.175	21.0	3.7
0.250	23.1	5.8
0.400	28.8	11.5

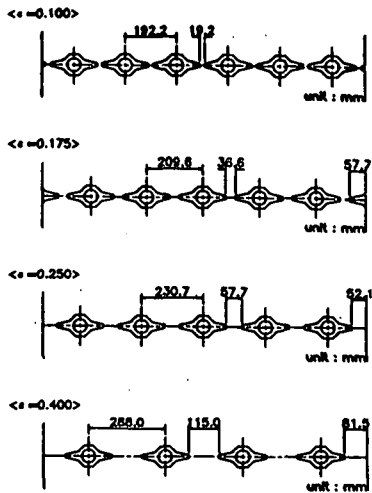


図-5 フィンの平面配置

c) 消波室幅

消波室幅 B は 46.7 cm を基本とした。また、消波室幅・波長比における消波室幅の影響を調査するために、フィン設置角度 90 度・設置深さ 30 cm、開孔率 0.175 に対して、消波室幅 B を 93.4 cm とした実験も行った。

d) 波浪条件

実験 1 と同様の波浪条件とした。

(3) 2次元造波水路による不規則波実験(実験3)

実験 1 及び実験 2 の結果をもとに、消波室幅 $B=46.7$ cm、開孔率 $\varepsilon=0.175$ 、フィン設置角度 90 度・設置深さ 30 cm の場合について不規則波実験を行った。波浪条件は、1/3 有義波レベルで実験 1 及び実験 2 とほぼ同様な波浪条件とした。

(4) 斜め入射時の反射率に関する3次元造波水槽による不規則波実験(実験4)

実験 1~3 は 2 次元実験であったが、実験 4 では斜め入射時の反射率を調査するために 3 次元水理実験を行った。実験の条件は実験 1~3 の結果をもとに表-3 のように設定した。

周期は 2 次元水理実験の結果を参考に、消波室幅 B と入射波長 $L_{1/3}$ の関係から $B/L_{1/3}=0.2$ 及び 0.31

となるように $T_{1/3}=1.57$ sec 及び 1.16 sec の 2 周期を選定した。これらの周期での水深波長比は、それぞれ $h/L_{1/3}=0.167$ 及び 0.257 である。

表-3 斜め入射の実験条件

フィン設置角度	鋼管柱列方向に平行
フィン設置深さ	-30cm(水深の60%)
開孔率	$\varepsilon=0.175$
消波室幅	$B=60$ cm(現地量:12m)
実験波	不規則波
入射波向	0°(直角), 30°, 40°, 60°
波形勾配	$H_{1/3}/L_{1/3}=0.01, 0.02, 0.03$

4. 実験結果及び考察

(1) フィンの設置角度及び設置深さと反射率に関する2次元造波水路による規則波実験(実験1)

フィンの設置角度 90 度タイプ及び 45 度タイプについて、フィンの設置下端水深の違いによる反射率を比較したものを図-6 に示す。横軸は消波室幅・波長比 B/L 、縦軸は反射率 K_R である。

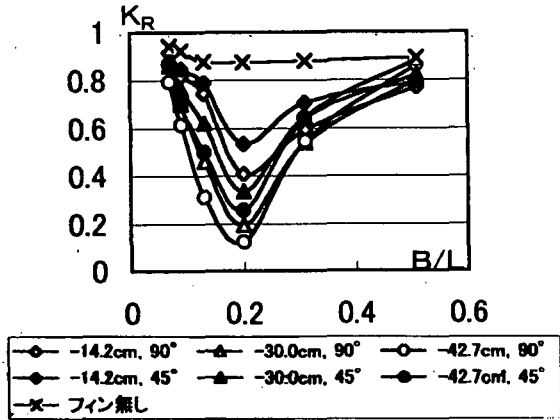


図-6 反射率(フィン下端水深、設置角度比較)

a) フィンの設置深さと反射率

- ① 鋼管柱にフィンを設置していないフィン無しタイプ(x)は、周期にかかわらず反射率が 0.87 以上あり反射率の低減効果はほとんど認められない。
- ② 鋼管柱にフィンを設置した 90 度タイプ(◇, △, ○), 45 度タイプ(◆, ▲, ●)とも反射率の低減効果がみられる。
- ③ 両タイプとも B/L の変化による反射率の違いは顕著である。 B/L が増加するに従い反射率も小さくなり、90 度タイプの場合、 $B/L=0.20$ のとき、反射率は 0.122 まで低下している。 B/L が 0.20 より大きくなると、反射率は増加に転じ、 $B/L=0.51$ ではフィン無しタイプと同様な反射率となる。
- ④ このように、 $B/L=0.20$ で反射率が最小となるのは消波室幅が波長の 1/4 近くになるとフィンの設置位置で入射波と不透過壁からの反射波の位相が 1/2 周期ずれるために、フィン前後の水位差が最大となり、消波効果が高くなるためと考えられる。
- ⑤ フィン設置角度 90 度タイプ、45 度タイプともフィン設

置下端水深-14.2cmでは、 $B/L=0.07$ でフィン無しタイプと反射率に差が無くなる。一方、フィン設置下端水深-42.7cmでは、 $B/L=0.51$ でフィン無しタイプと同様な反射率となる。

⑥ フィン設置下端水深の比較では、 $B/L=0.51$ を除きフィン設置下端水深が深くなるほど反射率は小くなる。特に、 $B/L=0.13, 0.20$ ではその傾向が強くなる。フィン設置角度90度タイプにおいてフィン設置下端水深-14.2cmと-42.7cmの反射率を比較すると、その差は最大で0.436である。一方、フィン設置下端水深-30.0cmと-42.7cmの反射率を比較すると、その差は最大でも0.15と小さい。この傾向は45度タイプでも同様である。

⑦ 以上より、フィンの設置下端水深-30.0cm、すなわち水深の6割程度までフィンが設置されていれば、 B/L によっては、かなりの消波効果が得られるものといえる。

b) フィンの設置角度と反射率

① フィン設置角度90度タイプと45度タイプの反射率を比較すると、 $B/L=0.07, 0.51$ ではその差はほとんどみられない。しかし、それ以外の周期においては90度タイプが45度タイプよりも反射率が低く、 $B/L=0.13, 0.20$ でその差は最大となっている。

② フィン設置下端水深-14.2cmでは、90度タイプと45度タイプの反射率の差は小さいが、フィン設置下端水深が深くなるほど両タイプにおける反射率の差は大きくなっている。

③ いずれの B/L においても、90度タイプは45度タイプよりも反射率が低く、フィンを入射波に対して直角に設置するのがより効果的であるといえる。

(2) 開孔率、波形勾配及び消波室幅と反射率に関する2次元造波水路による規則波実験(実験2)

各開孔率 ε における反射率 K_R を波形勾配 H/L をパラメータとして比較したものを図-7に示す。また、開孔率 $\varepsilon=0.175$ 、消波室幅・波長比 $B/L=0.2$ の条件で、波形勾配を $H/L=0.05$ まで大きくした場合の反射率 K_R を図-8に示す。

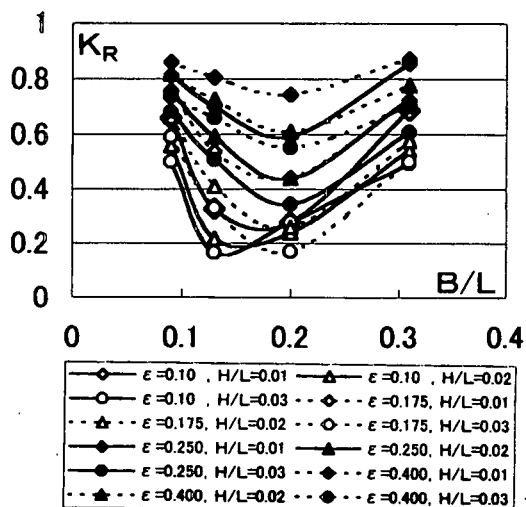


図-7 反射率(開孔率、波形勾配、消波室幅・波長比比較)

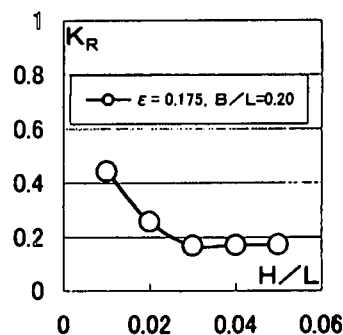


図-8 反射率(H/L の影響)

a) 波形勾配と反射率

① $\varepsilon=0.175 \sim 0.400$ の範囲では B/L によらず H/L が大きくなるに従い、反射率は小さくなっている。

② $\varepsilon=0.10$ 、 $H/L=0.02, 0.03$ を除けば、反射率は B/L が増加するに従い小さくなり、 $B/L=0.2$ で最小値となる。 B/L が0.2よりも大きくなると反射率も増大し、 $B/L=0.31$ では $B/L=0.09$ の反射率とほぼ等しくなる。

③ $\varepsilon=0.10$ の場合には、 H/L の増加に伴い反射率は小さくなるものの、 H/L による反射率の差は他の開孔率と比較すると小さくなっている。

④ $H/L=0.02, 0.03$ の場合には、 $B/L=0.13$ のときに反射率は最小となっており、いずれの開孔率でも反射率が最小値をとる場合に H/L の効果が大きいことがわかる。

⑤ H/L が0.03までは H/L の増加に従い、反射率は小さくなっていくが、 $H/L>0.03$ での反射率はほぼ一定の値になっている(図-8)。

b) 開孔率と反射率

① $H/L=0.01$ の場合、いずれの B/L においても開孔率が小さくなるほど反射率は低下し、 $B/L=0.2$ で最小となっている。

② $H/L=0.02$ 及び0.03の場合、 $\varepsilon=0.1$ のときの反射率は $B/L=0.13$ で最小となっている。

$H/L=0.02$ の場合、 $\varepsilon=0.1$ における $B/L=0.2$ と0.3の反射率は、 $\varepsilon=0.175$ における $B/L=0.2$ と0.3の反射率と差がない。

③ $H/L=0.03$ の場合、 $\varepsilon=0.175$ では $B/L=0.2$ のときに反射率は最小となっている。一方、 $\varepsilon=0.1$ では $B/L=0.13$ のときに反射率は最小となっている。そして、これらの反射率の値はほぼ同値である。

④ B/L による反射率の変化は開孔率にも依存する。 $\varepsilon=0.10$ の場合、 H/L が大きいほど反射率が最小となる B/L の値は小さくなっている。

⑤ H/L が小さい範囲では、 $\varepsilon=0.10$ の消波効果が高いといえる。しかし、 H/L が大きくなっていくと開孔率 $\varepsilon=0.175$ においても十分な消波効果が得られるものといえる。

c) 消波室幅と反射率

開孔率 $\varepsilon=0.175$ において各波形勾配 H/L における反射率 K_R を消波室幅 B で比較したものを図-9に示す。 $\diamond, \square, \circ$ は $B=46.7\text{cm}$ 、 $\blacklozenge, \blacksquare, \bullet$ は $B=93.4\text{cm}$ の場合の実験結果である。

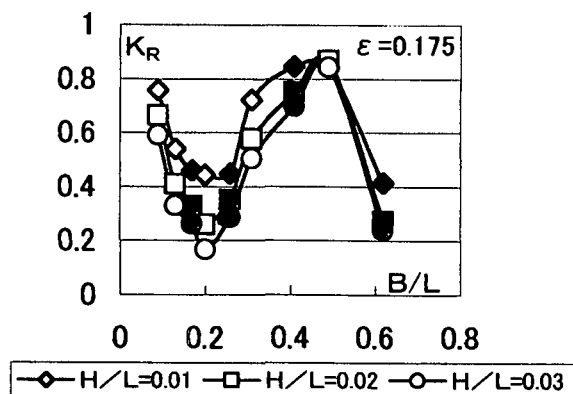


図-9 消波室幅・波長比と反射率

- ① $B=46.7\text{cm}$ と $B=93.4\text{cm}$ の場合の反射率をみると、どの H/L においても両者はほぼ同一曲線上にのっている。したがって、一定の B/L 値を実現するために、周期(波長)を変化させる場合と消波室幅 B を変化させる場合とで反射率に大きな差は生じないといえる。
- ② B/L の変化による反射率をみると、どの H/L においても入射波と反射波の位相が一致する $B/L=0.5$ において反射率は最大になっている。
 B/L が 0.5 より大きくなると、反射率は再び小さくなっている。また、最大反射率は H/L に依存せず約 0.8 の一定値となっている。

(3) 2次元造波水路による不規則波実験(実験3)

図-10は消波室幅 $B=46.7\text{cm}$ 、フィン設置角度 90° タイプ、フィン設置深さ 30.0cm 、開孔率 $\varepsilon=0.175$ の場合について不規則波実験を行ったときの反射率 K_R を示したものである。図には、規則波実験の結果もあわせて示してある。

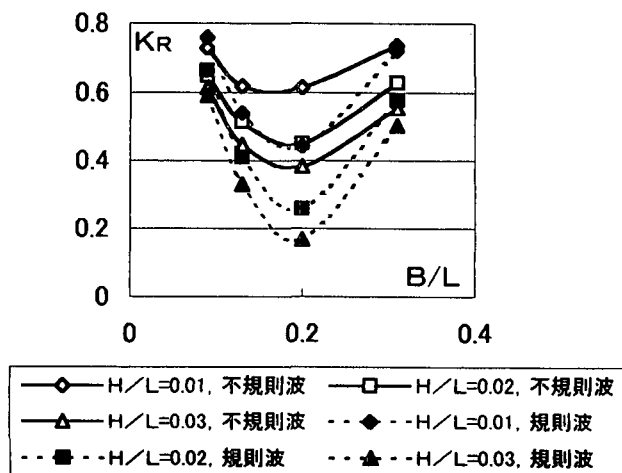


図-10 規則波・不規則波と反射率

① 不規則波による反射率は、規則波と同様に B/L により変動しており、 $B/L=0.2$ において最小になっているものの、規則波に比べて B/L による反射率の変化は穏やかである。

② 規則波と不規則波の反射率を比較すると反射率が大きい $B/L=0.09$ と 0.31 ではその差は変わらないが、反射率が小さい $B/L=0.13$ と 0.20 ではその差が大きい。特に、 $B/L=0.20$ においては、反射率の差が各 H/L とも 0.2 以上あり、不規則波の反射率 K_R は最小でも 0.4 程度となっている。

(4) 斜め入射時の反射率に関する3次元造波水槽による不規則波実験(実験4)

a) 入射角度による比較

図-11は周期及び波形勾配をパラメーターとして入射角度による反射率の変化を示したものである。

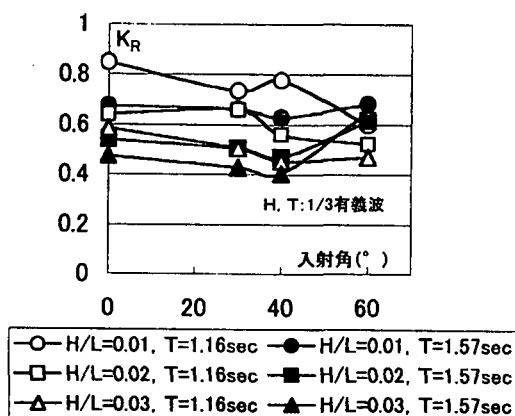


図-11 入射角と反射率

- ① $H/L=0.01$ では、周期 1.16sec の場合、入射角度 0° で反射率 K_R は 0.85 であり、入射角度が大きくなるに従い反射率は小さくなる傾向にあり、入射角度 θ が 60° で反射率 K_R は 0.6 程度となる。周期 1.57sec の場合は、入射角度 $\theta=0^\circ$ で反射率 K_R は 0.67 であり、周期 1.16sec のときよりも小さい。これは、周期 1.57sec が2次元水理実験において反射率の極小値を与える周期に相当しているためである。周期 1.57sec の場合も、入射角度の増加によって反射率は小さくなる傾向がみられるが、その程度は周期 1.16sec の場合に比べて小さい。すなわち、入射角度 40° まではほぼ横ばい状態であり、これを越すと漸増し入射角度 $\theta=60^\circ$ では周期 1.16sec の場合よりも大きな反射率となっている。
- ② H/L が 0.02 、 0.03 と大きくなっても、入射角度に対する反射率の変化の基本的な傾向は変わらないが、全体的に反射率が小さくなる。周期 1.57sec 、 $H/L=0.03$ の場合には、入射角度 $\theta=0^\circ$ で反射率 K_R は 0.47 、 $\theta=30^\circ$ で 0.43 、 $\theta=40^\circ$ では 0.40 まで低下している。ただし、入射角度 $\theta=60^\circ$ になると反射率 K_R は 0.65 に増加している。
- ③ 周期 1.57sec の場合、入射角度 $\theta=60^\circ$ になると反射率の差が小さくなる傾向がみられる。

- ④ 周期1.57secの場合、入射角度 $\theta=40$ 度までは反射率が漸減し、これを超すと増加に転じている。
- ⑤ 周期1.57secの場合、入射角度 $\theta=60$ 度になると波形勾配による反射率の差が小さくなる傾向がみられる。

b) 消波室幅による比較

図-12は周期と波形勾配をパラメーターとして、横軸に $B/L_{1/3}\cos\theta$ をとって入射角度による反射率の変化を比較したものである。 θ は入射角度で、 $B/L_{1/3}\cos\theta$ はみかけの消波室幅・波長比である。図中には2次元不規則波実験の結果もあわせて示してある。2次元実験における入射角度は $\theta=0^\circ$ のみであり、横軸の変化は入射波長(周期)の変化によっている。図中、プロットの左端は入射角度 $\theta=0^\circ$ 、右端は $\theta=60^\circ$ に対応している。

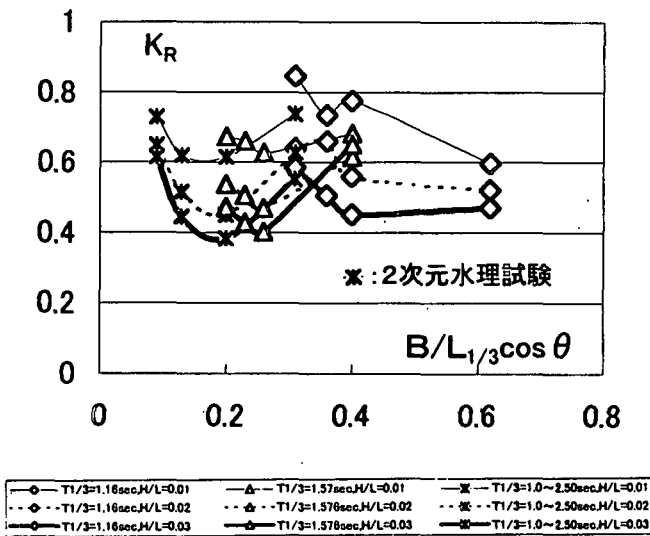


図-12 見掛けの消波室幅・波長比と反射率

- ① 入射角度0度のときの反射率は、2次元実験の結果と良く対応している。
- ② 周期1.57secの場合、 $B/L_{1/3}\cos\theta$ が0.25前後で反射率は極小値をとり、それ以降反射率は増加する傾向にある。この傾向は波形勾配が大きくなるほど顕著である。これは2次元実験と同様の傾向である。
- ③ 周期1.16secの場合は、周期1.57secの場合にみられたような極小値が出現する傾向はみられない。

5. まとめ

水中ストラット式構造物に反射波対策機能を付与するために、前方鋼管杭の所定範囲にフィン形部材を取り付けた消波構造を考案した。本消波構造の反射波対策設計を行うための基礎資料を得ることを目的に水理模型実験を実施した。実験結果をまとめると、以下のとおりである。なお、本実験における斜材(水中ストラット部材)の設置間隔は現地量で数mに対応するため消波効果に影響を与えないものと考え

えられる。このため、本実験結果は杭式の消波構造にも適用することができる。

・実験1から

- (1) 鋼管杭列にフィン形消波部材を取り付けることにより、反射波を低減することができる。
- (2) フィン形消波部材は、入射波に対して直角に取り付けるのが良い。
- (3) フィン形消波部材の設置下端水深は、深いほど消波効果は高いが、水深の6割程度でも十分な消波効果を得られる。
- (4) 消波室幅・波長比 B/L を0.20に近づけることにより、反射波を大きく低減することができる。

・実験2から

- (5) 波形勾配の増加により反射率は低減されが、 H/L が0.03を超える範囲ではほぼ一定となる。
- (6) 開孔率を小さくすることにより、反射率を低減することができるが、開孔率が小さい場合には波形勾配の増加に従い、反射率が最小となる B/L が0.2よりも小さくなる傾向がみられる。
- (7) 同一の B/L であれば、周期を変化させても、消波室幅を変化させても反射率の差は小さい。
- (8) $B/L > 0.31$ の範囲では、 $B/L=0.5$ で反射率は最大となる。

・実験3から

- (9) 不規則波に対する反射率も $B/L=0.2$ において最小となっているが、規則波に比較して B/L による反射率の変化は穏やかである。
- (10) 規則波と不規則波の反射率を比較すると、反射率が大きい $B/L=0.09, 0.31$ ではその差が変わらないが、反射率が小さい $B/L=0.13, 0.20$ ではその差が大きい。

- (12) $B/L=0.20$ においては、反射率の差が各波形勾配において0.2以上あり、反射率は最小でも0.4程度となっている。

・実験4から

- (13) 入射角度 θ が40度前後までは、反射率は漸減あるいはほぼ横ばい状態であるが、入射角度 θ が0度において反射率が最小となる周期1.57secでは入射角度が60度になると反射率が大きくなる傾向にある。

【参考文献】

- 関野高志, 高梁邦夫, 佐藤光一: 釧路港水中ストラット式岸壁の技術開発, 土木学会誌, Vol. 77, No. 1, pp. 16-18, 1992
- 水中ストラット式構造物の実大規模構造物水平載荷試験について, 土木学会 海洋開発論文集 第9巻, pp. 367-372, 1993
- 角野昇八, 小野一紀, 重松孝昌, 玉木博, 芳田利春: 縦スリット直立消波工のスケールエフェクトについて, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, pp. 660-661, 1988
- 谷本勝利, 吉本靖俊: スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響, 海岸工学論文集第29巻, pp. 389-393, 1982