

# 平均水面の変化が浮消波堤の波高低減効果に与える影響に関する実験的研究

## Experimental Study on Performance of Floating Breakwater under the Influence of Water Level Change

沖 和哉<sup>1</sup>・柿木哲哉<sup>2</sup>・由比政年<sup>3</sup>・辻本剛三<sup>4</sup>・山田文彦<sup>5</sup>

Kazuya OKI, Tetsuya KAKINOKI, Masatoshi YUHI, Gozo TSUJIMOTO and Fumihiko YAMADA

Experimental study is conducted in vertical 2-D wave basin to investigate the wave dissipation performance of floating breakwater under the influence of water level change. Two types of floating structure are tested; one is rectangular body and the other is double barrier floating breakwater (DBFB) which has vertical barriers on both sides of rectangular body. Fixed and heaving cases are examined to reveal the characteristics of reflection and transmission coefficient. From these results, it is found that fixed type breakwater is severely influenced from water level and DBFB shows high performance constantly.

### 1. はじめに

十分な天端高さを有する不透過型消波構造物は、没水あるいは越波しない限り外海からの波浪を完全に遮断するが、漁港やマリナーなどの小規模な閉鎖性水域を対象とした場合、港内の水質悪化を防ぐためには透過型消波構造物が望ましい。水底設置型の透過型防波堤も候補の一つであるが、施工性・経済性の面から、浮消波堤は好ましい選択肢として挙げられる。ただし、透過型消波堤の場合、入射波周期や平均水位によって港内静穏度が変わる。これは、不透過型消波堤との大きな差である。したがって、設計の際にはこれら諸条件に応じた性能把握が重要となる。

浮消波堤に関してこれまでに数多くの研究が行われ、様々な形式の浮消波堤に関する一連の研究がMcCartney (1985) によってまとめられているが、これらは消波堤の最も効果的な大きさ、形状、設置水深および対象とする入射波などについて検証されたものがほとんどであり、平均水位が変化すること（場合によっては没水すること）を想定していない。一方で、没水平板は没水状態であることを前提に設計されるものであるが、設置水深が極めて浅くなると理論的な取り扱いが難しくなり (Yu, 2002)、平均水位の変化によって平板が水面上に出ることも想定されていない。また、浮消波堤の消波性能

を実験的に検証する場合、固定した消波堤を比較対象とする場合が多く見られる（たとえば、Gesrahaら, 2006；Koo, 2009）が、この比較において、設定される水深は固定された状態と可動の場合も同一とされる場合がほとんどであり、水深の設定も極限られた数ケースのみである。消波あるいはエネルギー減衰のメカニズムのみを検証するのであれば一つの水深についての検討でも問題ないが、固定型および可動型の浮消波堤の比較においてその機能を検証する上では、重要なファクターとなる平均水位の昇降も含めた性能評価が必要である。

実際問題を考えると、平均水位が常に一定である海域はなく、程度に差はあるものの平均水位は時間的に変化している。その原因のひとつである潮位差が大きい海域の例を挙げると、地形に特徴があるところで顕著であり、国内では有明海で5～6m、海外ではランス河口（フランス）で約8m、ファンディー湾（カナダ）では12mを越える。潮位差が大きいほど、平均水位の影響を受けにくいと想定される浮消波堤の実用性は高いが、消波堤が平時に消波の対象とする風波の周期に対して十分長い周期の変動は、平均水位の昇降とみなせるため、潮位差が小さいところでも高潮等による潮位偏差は無視できない。温暖化による平均海面上昇はただちに影響が表れるレベルではないが、消波構造物のライフサイクルを勘案するとこの変化も安易に看過することはできない。機能特性上同じ問題を有する水底設置型消波構造物も含めて、透過性を有する消波構造物は平均水位の影響を受けるが、既往の研究を改めて概観すると、このような条件も含めた検証という視点が欠けている。

以上のように、既往の研究では、入射波周期に関しては多くの検証例があるが、潮位変動や高潮、地球温暖化

- 
- |        |      |                               |
|--------|------|-------------------------------|
| 1 正会員  | 博(工) | 京都大学講師先端技術グローバルリーダ<br>ー養成ユニット |
| 2 正会員  | 博(工) | 神戸高専准教授都市工学科                  |
| 3 正会員  | 博(工) | 金沢大学教授理工研究域環境デザイン学<br>系       |
| 4 フェロー | 工博   | 神戸高専教授都市工学科                   |
| 5 正会員  | 博(工) | 熊本大学教授大学院自然科学研究科              |

による海水位上昇など、極めて周期の長い水位変動を含めた平均水位の昇降に対して消波機能がどのように変化し、どの程度維持されるかについて、特に実験的にはこれまでほとんど検討されていない。投影遮蔽面積が比較的小さい浮消波堤は、特に固定された場合に平均水位の位置の影響をシビアに受けることが予想される。本研究では、矩形およびダブルバリア型消波堤に着目し、これら2種類の浮消波堤およびそれらを固定した場合の消波堤について、まず、基準とする水位においてそれぞれの消波機能を調べる。次に、平均水面の高さが変化することによって反射率および透過率がどのように変動するかを調べ、消波特性および消波機能の変化を明らかにする。

## 2. 浮体模型による二次元水路実験

### (1) 実験装置の概要

図-1に示すように、神戸高専所有の二次元造波水路（長さ18m、幅0.6m、高さ0.8m）のほぼ中央に、消波堤模型を設置する。また、水路の一端には造波機が備えられており、他端には反射波を吸収するための砂層斜面を設置する。本研究では、矩形消波堤および矩形消波堤の岸沖両側に鉛直板を装着したダブルバリア型消波堤模型（図-2）を用いる。両模型の矩形断面は同じであり、岸沖方向幅 $B$ は25cmである。なお、模型の縮尺は1/16を想定している。消波堤模型は水底から鉛直に立てられた4本の鋼製杭によって支持され、ベアリングにより上下方向にのみスムーズに動くことができる。また、固定消波堤として実験を行う場合には、模型を任意の高さで杭に固定できる。岸沖両側にそれぞれ2本ずつ設置した容量式波高計によって水位の時間変化を計測し、その結果から入射分離を行って各実験条件における反射率および透過率を算定する。造波後、消波堤模型からの反射波が造波板にて再反射するが、その影響がない区間においてほぼ定常と見なせる時間のデータを以降の解析に利用する。本研究では断面二次元水路および杭係留方式を採用することで現象を単純化し、平均水位以外の影響をなるべく排除することによって消波特性をより正確に検証することができる。

### (2) 実験条件

入射波には、周期 $T=0.75\sim 1.5$  (sec)の規則波を用い、浮消波堤実験において越波しない程度の小さい波高を設定した。本研究では基準水位を水深31.2cmとし、固定消波堤実験を行う場合には、この水位で模型が浮いている状態の位置で固定する。基準水位は小規模港湾に対して縮尺1/16程度を想定した場合の平均水位に相当し、既往の研究において主に設定されている水深に対応する。なお、静水時における喫水深は、矩形消波堤で4.2cm、ダ

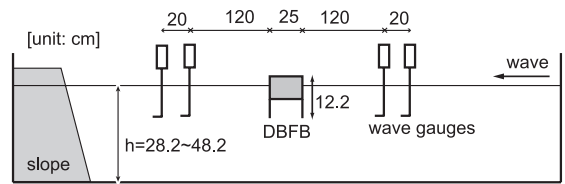


図-1 実験装置

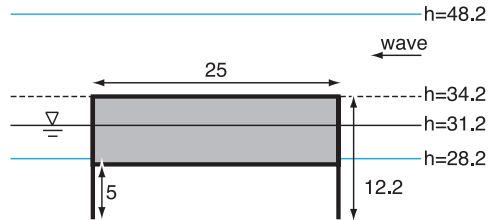


図-2 消波堤模型（ダブルバリア型）

表-1 入射波周期および各水位に対応する波長 (m)

$h \setminus T$	0.75 (sec)	0.88	1.0	1.25	1.5
0.282 (m)	0.87	1.11	1.35	1.83	2.28
0.312	0.86	1.13	1.39	1.89	2.38
0.482	0.88	1.19	1.51	2.16	2.79

ブルバリア型で9.2cmである。平均水面の高さは、消波堤を固定した状態で消波堤下面とほぼ一致する水深 ( $h=28.2$ cm) から、20cm上方の水深 ( $h=48.2$ cm) までの間を1cmまたは2cm間隔で設定する。図-2に、消波堤を固定した場合における、基準水位および平均水位昇降の範囲を示す。設定したそれぞれの水位において、消波堤模型を杭に固定した固定条件 (Fix) および鉛直方向に自由に動くことのできる可動条件 (Heaving) にて上述の波を入射させる。表-1に、用いた入射波周期と、基準水位、最低および最高水位に対応する波長を示す。

## 3. 各種消波堤の消波性能

ここでは、矩形消波堤模型を固定した場合と浮体とする場合およびダブルバリア型消波堤模型を固定した場合と浮体とする場合の計4ケースについて、基準水位における計測結果を示し、それぞれの消波特性を評価する。

### (1) 反射率

図-3に、各実験ケースにおける反射率 $K_r$ を示す。横軸は、消波堤幅 $B$ と波長 $L$ の比 $B/L$ である。図中の○および●はダブルバリア型、△および▲は矩形型模型の結果であり、それぞれ白抜きは浮消波堤の条件を表す。反射率

は、消波堤沖側で計測された水位の時間変化から入射波分離を行って入射波高と反射波高を算定し、その比としている。いずれの条件においても、 $B/L$ が大きくなるほど、すなわち入射波周期が短くなるほど反射率が大きくなった。

固定と可動を比較すると、固定の方が概して反射率が大きい。この傾向は矩形型およびダブルバリア型ともにあてはまり、形状には依存していないことがわかる。Ozerenら(2011)は円筒型の消波堤模型を用いて固定した場合と杭係留した場合の比較実験を行っており、本研究と近い条件(実施された3つの相対喫水深の条件のうちの一つ)においては可動よりも固定した方が反射率が大きい結果を得ている。この結果を合わせて考えても、反射率は消波構造物の形状には依存せず、可動か固定かの違いによる影響が大きいことがわかる。

(2) 透過率

図-4に、各実験ケースにおける透過率 $K_t$ を示す。横軸は反射率と同じく $B/L$ である。消波堤岸側で計測された透過波高と、消波堤沖側で算定された入射波高の比を透過率としている。いずれの条件においても、 $B/L$ が大きくなるほど透過率は小さく、すなわち消波性能は高くなった。消波堤の条件については、反射率の場合と異なり、固定か可動の違いでは明確な差がなく、矩形消波堤に比べてダブルバリア型の方が消波性能が高い結果となった。Ozerenら(2011)の円筒型消波堤による類似条件での実験結果と比較すると、本研究と同様に固定か可動かではあまり差がない傾向となっている。

(3) エネルギー減衰率

各実験条件における反射率および透過率から、次式によってエネルギー減衰率 $K_{loss}$ を求める。

$$K_{loss} = \sqrt{1 - K_r^2 - K_t^2} \dots\dots\dots(1)$$

横軸を $B/L$ として、得られたエネルギー減衰率を図-5に示す。いずれの結果も $B/L$ が大きくなるにつれてエネルギー減衰率も大きくなる傾向を示しているが、ダブルバリア型浮消波堤以外は、反射率および透過率の結果と比べてばらつきが大きい。一方、ダブルバリア型浮消波堤の場合には、他のいずれの条件よりも常にエネルギー減衰率が高い。この結果から、バリアが備わっていることおよび消波堤が上下動することによりエネルギー減衰効果が発揮されていることがわかる。

4. 平均水位の昇降と消波性能の関係

上述の結果から総合的に消波性能が高いと考えられるダブルバリア型の消波堤に着目し、平均水位が異なる場合に、固定あるいは浮消波堤の反射率および透過率がどのように変化するかを調べる。

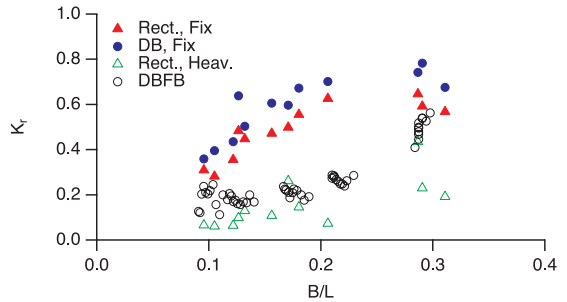


図-3 反射率の比較

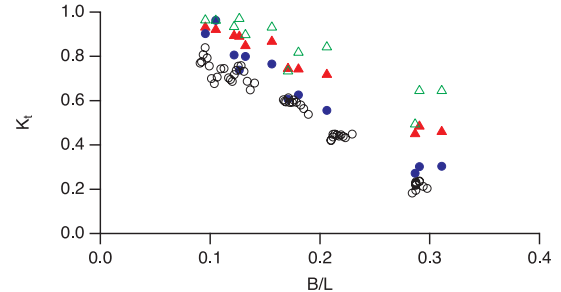


図-4 透過率の比較

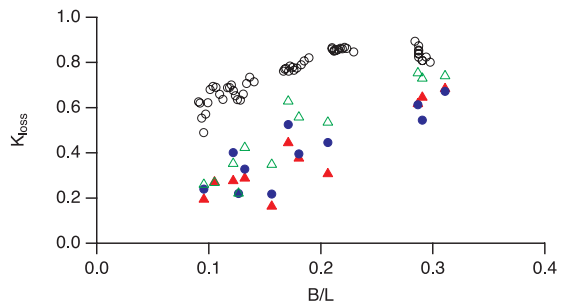


図-5 エネルギー減衰率の比較

(1) 固定消波堤の場合

図-6に、平均水位 $h$ を基準水位で除した無次元水位 $h'$ を横軸として入射波周期ごとに反射率および透過率を示す。反射率は、基準水位付近からやや水位が高いたとこで最も大きい。この付近を極大としてこれより平均水位が高くなっても低くなっても反射率は小さくなる。特に、消波堤上面が平均水面下へ没水するあたりから平均水位が高くなるあたりで反射率が急激に小さくなる。入射波周期が長いほど平均水位が低い条件でも反射率が最低値となる。また、それ以上平均水位が高くなっても反射率は変化せず、一定値をとる。基準水位付近においては入射波周期によって反射率に差があるが、水位が大きくなるとそれらの差はほとんどなくなり、本研究の範囲で平均水位が最大となる条件においてはいずれの周期も反射率が0.1~0.2程度の値となる。

一方、波高低減効果の観点からすると、いずれの周期

においても基準水位付近から消波堤上面と平均水位が一致する辺りまでの範囲で最も透過率が小さくなっている。また、反射率と同様に、基準水位付近では入射波周期

期によって透過率に大きな差があったが、水位が大きくなるにつれその差が小さくなり、水深48.2cm付近においては周期にかかわらずほぼ同じ値となっている。これは、水粒子の運動は平均水面付近でもっとも活発であるため、消波堤の位置がある程度以上深くなると水位による差異がなくなるためと推察される。

図-7に、相対喫水深  $dr/h$  を横軸として、反射率および透過率を示す。没水後の喫水  $dr$  を水路における遮蔽高さ（本研究では12.2cm）とみなすと、没水状態および非没水状態で2価関数となる場合があるため、これまでのように一元的には表記できない。そのため、没水状態での結果は図中に点線で示して区別する。相対喫水深が同じ値なら水路断面において消波構造物による遮蔽率が同じ値であることを意味するが、この同じ値に対して反射率あるいは透過率が没水を境に異なる結果を得たということは、遮蔽位置も反射率および透過率にとって重要なファクターであることを意味する。このことは、水底設置型透過構造物においても、透過部の位置（高さ）が反射率および透過率に影響することを示唆する。

(2) 浮消波堤の場合

図-8に、横軸を相対喫水深  $dr/h$  として反射率および透過率を示す。いずれの水位においても、反射率および透過率はそれぞれの入射波周期ごとに基準水位での値と比較してほとんど差がない。すなわち、平均水位の影響を

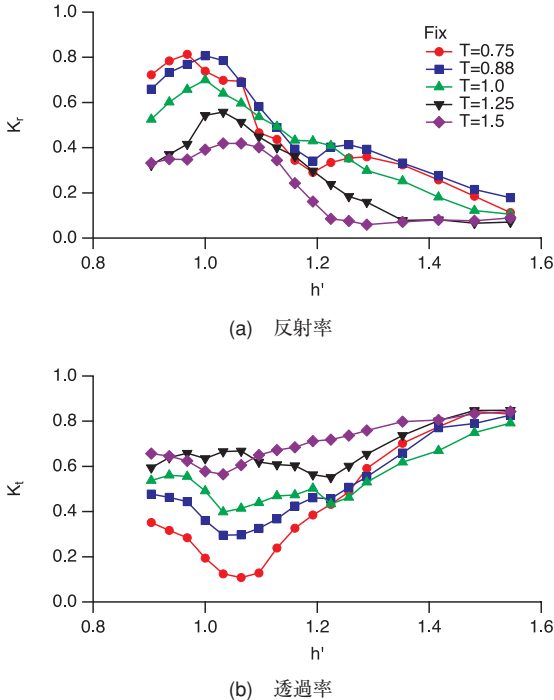


図-6 水位と透過率および反射率の関係（固定消波堤）

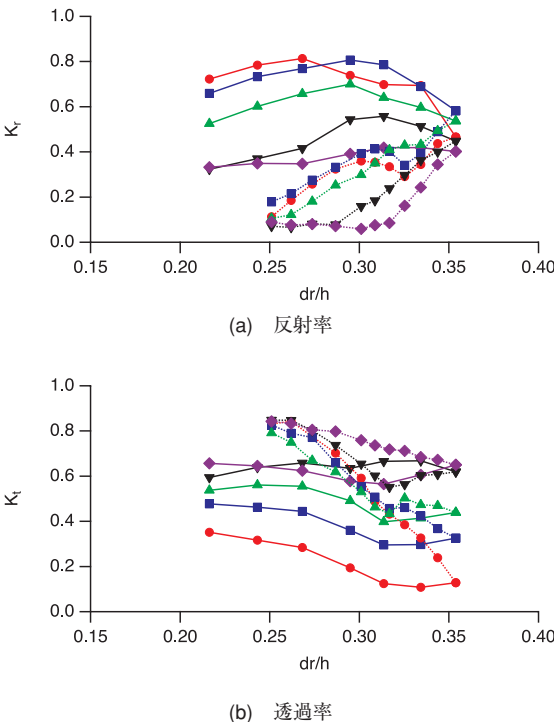


図-7 相対喫水深と透過率および反射率の関係（固定消波堤）

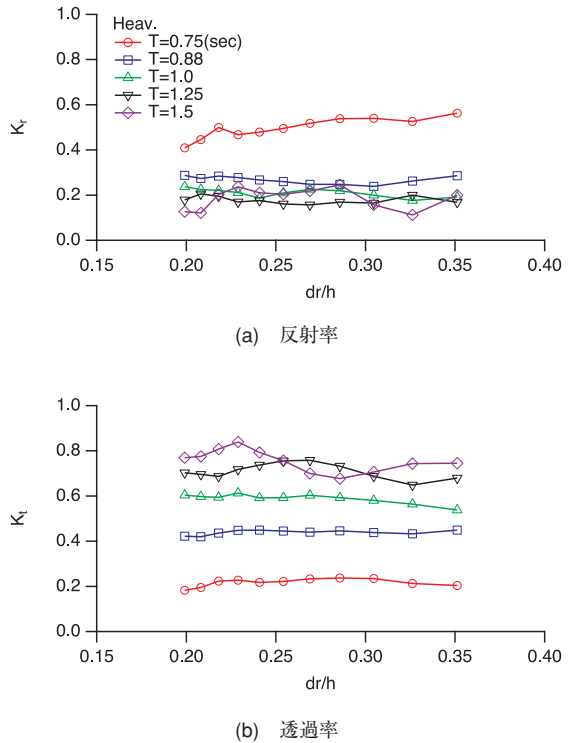


図-8 相対喫水深と透過率および反射率の関係（浮消波堤）

受けず、安定した消波性能を発揮する。

### (3) 固定条件と可動条件の比較

消波機能の面から透過率をみると、効果を最大限に発揮できる水位なら固定消波堤の方が高性能な場合もあるが、その範囲は限定的であり、不向きな水位においては浮消波堤の方が消波機能が高くなる。浮消波堤は平均水位の影響をほとんど受けず一定であり、この点から設計し易いとも言える。

反射率については、固定消波堤では基準水位付近で高い。この結果は、近くを航行する船がある場合にはあまり好ましくない。平均水位の高さによっては反射率は小さくなるものの、その条件に合う水位では消波効果は高くないため、機能面から成り立たない。浮消波堤の場合には、短周期に対してやや高いが、概ね反射率は低くなっている。

図-9に、横軸を無次元水位として入射波周期ごとにエネルギー減衰率を示す。エネルギー減衰率の算定には式(1)を用いる。浮消波堤の場合には、概して周期が短い方がエネルギー減衰率が高く、また、水位の影響は小さい。固定消波堤の場合には、消波堤がちょうど没水するかそれよりやや水位が高い条件においてエネルギー減衰率が最も大きい。これは、消波堤上面に生じる極小水深場での水粒子の乱れによる影響が大きいと考えられる。この水位でのエネルギー減衰率は浮消波堤のエネルギー

減衰率と同程度であるが、浮消波堤の場合には越波はみられないため、固定消波堤の場合のエネルギー減衰メカニズムとは異なり、浮消波堤の動揺にともなうバリア周辺での水粒子の乱れにより大きなエネルギー減衰が生じている。紙面の都合上ここでは示さないが、相対喫水深との対比において、没水状態と非没水状態では大きく差があった固定条件の反射率および透過率とは異なり、エネルギー減衰率にはあまり差がなかった。

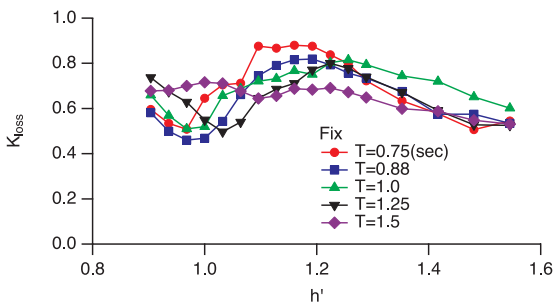
## 5. おわりに

本研究では、杭係留式の矩形およびダブルバリア型消波堤模型を用いて、まず、それぞれ固定した場合および可動とした場合の消波性能を調べた。その結果、反射率は形状には依存せず、固定か可動かに影響を受け、また、透過率はその逆に、形状に依存して変化することがわかった。エネルギー減衰率も含めた消波性能は、ダブルバリア型浮消波堤が最も高かった。次に、平均水位が変わることによる影響を、ダブルバリア型消波堤を用いて、固定した場合および可動とした場合を比較して調べた。その結果、浮消波堤はどのような水位に対しても安定した消波性能を発揮する一方、固定消波堤は水位によって性能が大きく変化することを明らかにした。透過性を有する水底設置型消波堤においても平均水位によって同様の影響があると推察されるが、これは浮消波堤を固定した場合の延長とみなせる。本研究の結果はこの関連分野へも応用可能である。

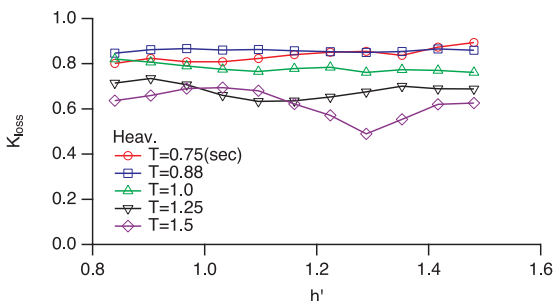
謝辞：本研究の一部は服部報公会より研究助成（代表者：沖和哉）および科学研究費補助金（代表者：山田文彦）を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- Gesrah, M.R. (2006) : Analysis of P shaped floating breakwater in oblique waves: I. Impervious rigid wave boards, Applied Ocean Research, Vol.28, pp. 327-338.
- Koo, W. (2009) : Nonlinear time-domain analysis of motion-restrained pneumatic floating breakwater, Ocean Eng., Vol.36, pp. 723-721.
- McCartney, B. L. (1985) : Floating breakwaters design, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol.111, No.2, pp. 304-318.
- Ozeren, Y., D. G. Wren, M. Altinakar and P. A. Work (2011) : Experimental investigation of cylindrical floating breakwater performance with various mooring configurations, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol.137, No.6, pp. 300-309.
- Yu, X. (2002) : Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: A review, Coastal Engineering Jour., Vol.44, No.2, pp. 127-147.



(a) 固定消波堤



(b) 浮消波堤

図-9 エネルギー減衰率と水位の関係