

複合斜面での反射について

Wave Reflection from Compound Slope

浅川耀賛¹・岡本 弘²・関 克己³・水口 優⁴

Yosuke ASAKAWA, Hiroshi OKAMOTO, Katsumi SEKI and Masaru MIZUGUCHI

Wave reflection from compound slope is studied experimentally. When the water depth is small, breaking and reflection occur on the offshore mild slope and little reflection is observed. When the water depth is large, reflection occurs on the steep slope with high reflection coefficient. For the intermediate water depth, relatively high reflection with significant high frequency components is observed. These high frequency components introduce space variation of local wave height of reflected waves. Energy-based reflection coefficient is evaluated and compared with hypothetical single slope method for wave run-up with some success.

1. はじめに

海岸護岸や堤防などの構造物に入射する波の遡上（打ち上げ高と遡上幅）、および反射の特性は、海岸構造物の防災と機能の面から検討されるべき重要な要素である。また、遡上と反射は相互に関連性がある。

構造物における波の遡上、打ち上げ高の検討は現地海岸を想定して、自然の海底勾配と構造物の斜面勾配の2つの勾配を持つ複合斜面において行われることが多い。また算定手法として仮想勾配法が提案されている（水理公式集, 1999）。しかしながら、複合斜面での反射特性に関しては反射率に対する堤脚水深（接合部水深）の影響が指摘されるのみで、算定方法に関しては検討が不十分であった（高田, 1970）。

本研究では、複合斜面地形における波の反射に着目し、堤脚水深を変化させた実験を行い、その反射特性について検討することにした。その実験結果から、反射波にかなりの高周波数成分が含まれることがあることが明らかとなったため、反射波に含まれる高周波数成分の挙動と発生メカニズムについても検討を行う。また、複合斜面での打ち上げ高算定方法として用いられる仮想勾配法の反射率への適用性について検討を行った。

2. 実験概要

実験は、吸収制御機能付きピストン型造波機を有する幅30cm、長さ20mの断面水槽を用いて行った。海底地形模型は図-1に示すように、沖側は実験室における一様

勾配の標準的な値である1/20、岸側は緩傾斜護岸として標準的と考えられる1/3勾配とした。勾配変化地点の鉛直高さは20.5cmであり、勾配変化地点での水深（以下、堤脚水深： h_s ）と沖側一様水深部の水深 h を使い分ける。実験は水深 $h=16.0\text{cm}\sim 32.0\text{cm}$ （ $h_s=-4.5\text{cm}\sim 11.5\text{cm}$ ）の間で行った。

造波信号は正弦波で周期1.5sに固定し、各水深において沖波波高が1.0cm, 2.0cm, 3.0cmとなるように微小振幅波理論を用いて造波板振幅を決定した。

計測は分圧式波高計（正豊工学製）および遡上計（正豊工学製）を設置して、水面変動および遡上波形を収録した。遡上計は容量線を斜面に沿うように設置したが、その際表面張力の影響を除くため、底面に幅1.0cm、深さ5mmの溝を切り、容量線が底面と同じ高さになるように設置した。データの収録にはAD変換ボードを実装したノートパソコンを用い、サンプリング周波数100Hzで収録した。

なお、沖側斜面の先端地点において、波高計群による入・反射波分離手法を適用するために、4台の波高計を設置している（水口, 1991）。その際、波高計の設置間隔は、入・反射波分離手法の適用範囲を考慮して、1/16～1/8波長に収まるように設定している。入・反射波の分離基準地点は沖側斜面先端地点（図-1中の X_4 地点）

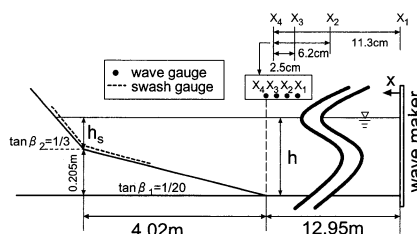


図-1 実験水槽概要図

1	修 (工)	富士急行株式会社
2		中央大学理工学部土木工学科
3	正 会 員 博 (工)	(独法) 港湾空港技術研究所 特別研究員
4	正 会 員 工 博	中央大学教授 理工学部土木工学科

とし、波高計は分離地点、および分離地点から沖側に-2.5cm, -6.2cm, -11.3cmの4地点に設置した。

3. 反射波の特性

(1) 入・反射波分離

図-2に沖波波高1.0cmと固定し、堤脚水深を変えたケースに関して、入・反射波分離後の水面変動時系列7ケースを示す。図中の η_{raw} は波高計で収録されたデータ、 η_i は入・反射波分離後の入射波、 η_r はその反射波、

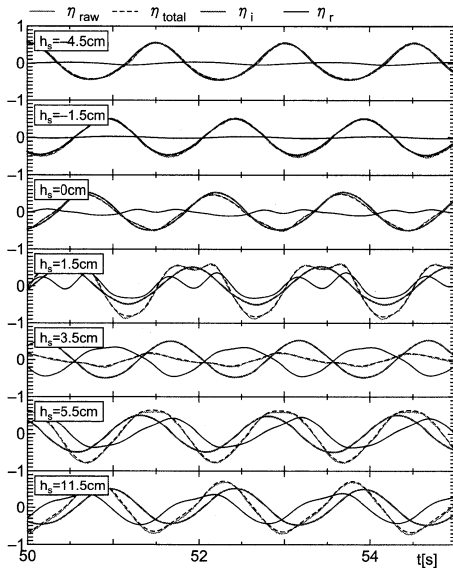


図-2 斜面先端での水面変動時系列および入・反射時系列 ($H_0=1.0\text{cm}$, 縦軸の単位は[cm])

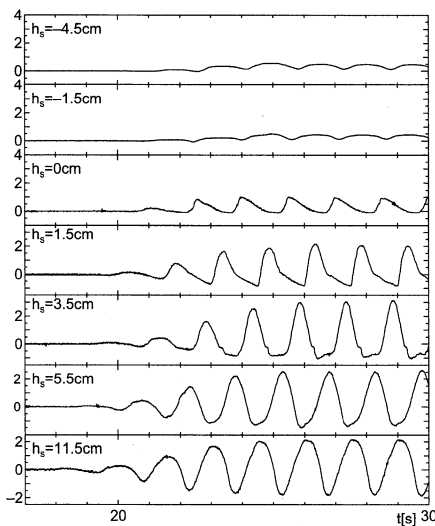


図-3 遡上波形時系列 ($H_0=1.0\text{cm}$, 縦軸の単位は[cm])

η_{total} は入射波と反射波の合成波の水面変動を表わす。

堤脚水深 $h_s=-4.5\text{cm}$, -1.5cm のケースは、沖側斜面上で碎波かつ波高減衰し、最大打ち上げ高は斜面接合部まで達していないケースであり、反射率はほぼゼロである。一方で、水深の深い $h_s=3.5$, 5.5 , 11.5cm のケースは、完全反射とみなせることが分かる。

その中間的な水深 $h_s=0$, 1.5cm での実験データにおいては、明らかに反射波の水面変動データに高周波数の変動が含まれている。特に堤脚水深 1.5cm のケースでは二峰型の波形となっている。

図-3には対応するケースの遡上波形を示す。反射波に高周波成分が含まれる実験ケースでは遡上波形にも高周波数の変動が含まれており、非常に尖った波形となっている。

(2) 反射波の高周波数成分の挙動

次に、高周波数成分が顕著なケースについて、数値ローパスフィルターを用いて、周波数ごとに分解する。以下、基本周波数成分としては $f < 1.5/T$, 2倍周波数成分 $1.5/T \sim 2.5/T$, 3倍周波数成分 $2.5/T \sim 3.5/T$ とする。ここで T は造波周期 1.5s である。周波数分解をした結果を図-4に示すが、4倍周波数以上の成分は検出されなかったため、以下の議論では2倍・3倍周波数成分を高周波数成分とする。

図-5には沖側一様水深部での入・反射波分離をしたものをさらに周波数成分毎に分けたものを示す。また各周波数成分を自由波として計算した波速による伝播状況を示す。

各周波数成分の波は、その周波数により算定された波速により伝播していることから、反射波に含まれる高周波数成分は自由波であることが分かる。

(3) 反射波形成定

前節で、反射波に含まれる高周波数成分は自由波とし

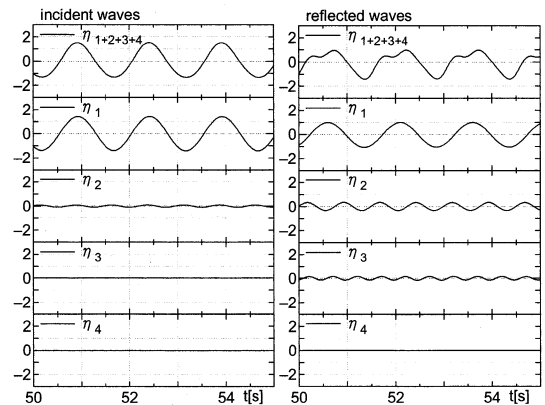


図-4(a), (b) 入射波および反射波の周波数分解結果 ($H_0=3.0\text{cm}$, $h_s=11.5\text{cm}$, 縦軸の単位は[cm])

て、基本周波数成分とは異なる波速により伝播することが明らかとなった。つまり、単純に反射波の個々波を定義すると、個々波の算定地点により基本周波数成分と高周波数成分の重なり方(位相)が異なることになり、個々波の波高が異なることになる。

ここでは、3倍周波数成分までを考慮して、一様水深部での波形を算定することを試みる。具体的には斜面先端部での反射波時系列を周波数ごとに分解し、各周波数の振幅および基本周波数成分との位相差を読み取る。それを入力条件として、任意地点における反射波形を再合成する。図-6に算定結果を示す。結果は実験データとよく対応している。

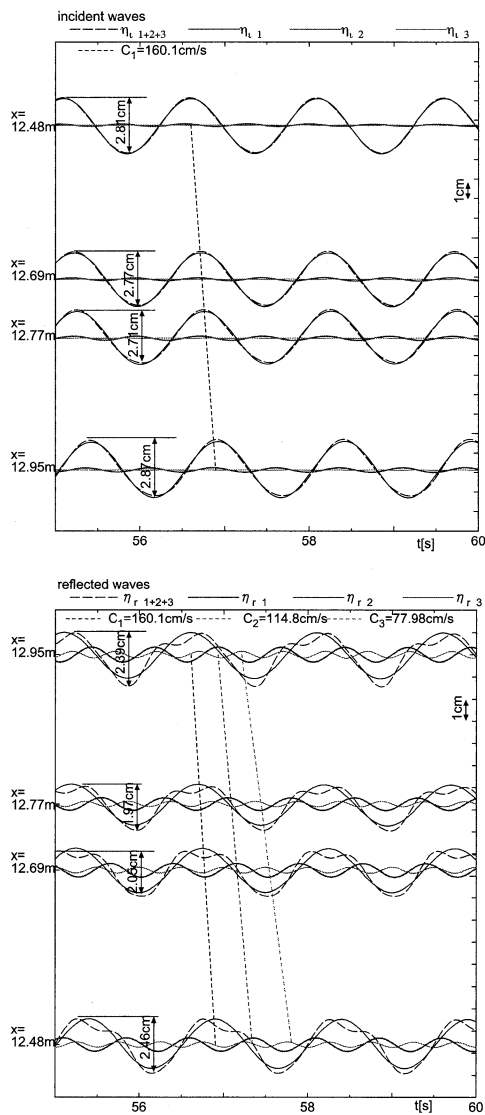


図-5(a), (b) 一様水深部での入射および反射波の時系列 ($H_0=3.0\text{cm}$, $h_s=11.5\text{cm}$)

(4) 高周波数成分の大きさ

ここでは、反射波に含まれる高周波数成分の大きさへの、堤脚水深の影響について考察する。

図-7(a)~(c)には沖波波高で無次元化した入射波と反射波に含まれる高周波数成分の波高と堤脚水深との関係を示す。なお以下の波高は、入・反射波分離基準地点である斜面先端での値である。

入射波に関しては、造波波高が小さい沖波波高 1.0cm のケースでは高周波数成分はほとんど発生していないが、造波波高が大きくなるにつれて、高周波数成分が大きくなる。また、水深が浅いほど高周波成分の発生量は多くなる。これらは波高が大きいほど、また水深が浅いほど非線形性が卓越し、造波する規則波である正弦波と、浅海域での基本解であるクノイド波とのズレが顕著になっていることによるものである(細田ら, 2007)。

反射波の基本周波数成分について見てみると、堤脚水深 h_s が浅い場合は緩斜面上での砕波により、反射率自体が小さく、波高も小さい。一方で堤脚水深が深くなるに従って徐々に大きくなる。しかしながら、高周波数成分は $h_s=0\text{cm}$ で急激に増加し、それ以上の水深の場合には有意な値となる。また、図-8には反射波の高周波数成分の基本周波数成分に対する波高比を示すが、 $h_s=1.5\text{cm}$ のケースで最大値となり、基本周波数と同程度の大きさの2倍周波数成分が含まれていることが分かる。

(5) 高周波数成分の発生原因の考察

反射波に含まれる高周波数成分は、当然のことながら反射率が高いほど大きくなるが、基本周波数成分に対する比率としては、 $h_s=1.5\text{cm}$ のケースで最大となり、それ以上深い場合は小さくなる。この堤脚水深は、今回の実験においては反射率が急激に増大する堤脚水深と一致している。また、図-3で示したように遡上波形が前傾化しているケースと対応する。

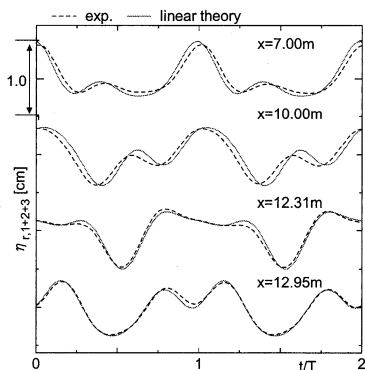


図-6 反射波形の実験値と線形理論の比較 ($H_0=1.0\text{cm}$, $h_s=1.5\text{cm}$)

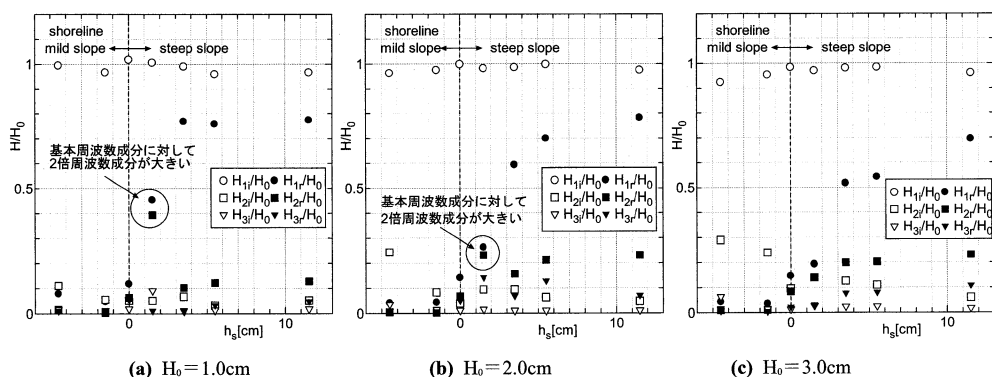


図-7 入・反射波における各成分の大きさ

以上の事から、反射波に含まれる高周波数成分の発生要因としては、以下のように推察される。

- ① 沖側の緩勾配で前傾化ないし尖った波形のもの、もしくは砕波してもエネルギー損失が不十分な状態のものが、急勾配部に入射する。
- ② その非正弦的な波が急勾配斜面で反射される。近似的には入射波形がそのまま反射される。
- ③ その高周波数成分を含んだ反射波が沖に向かって進行する時に水深が深くなることにより、それぞれの周波数成分が自由波として周波数分散する。

つまり、反射波に含まれる高周波数成分は、直接的には週上波形と密接な関係にあるが、緩勾配での浅水・砕波変形と急勾配斜面での高反射率の組み合わせにより発生していると言える。

4. 複合斜面における反射率とその算定方法について

この章では、複合斜面における反射率について検討する。先に示したように、反射波に高周波数成分が存在するケースがあり、その場合には基本周波数成分と高周波数成分との位相差により、単純に波別解析により反射波の波高を定義すると、算定地点により変動することが予

想される。そこでエネルギー比による算定方法と比較し、その問題点について検討する。

また、複合斜面における打ち上げ高算定手法として仮想勾配法が用いられるが、仮想勾配法により求まる仮想勾配と反射率についての検討も行った。

(1) 波高比による反射率とエネルギー比による反射率

図-9には沖側一様水深部4地点において入・反射波分離を行ったときの、各地点での反射率算定結果を示す。ここで入射波および反射波のエネルギーは3倍周波数成分までを考慮し、以下の式で求めている。

$$K_R = \sqrt{E_r/E_i} \quad (1)$$

$$E_i = \frac{1}{8} \rho g (H_{1i}^2 + H_{2i}^2 + H_{3i}^2) \quad (2)$$

$$E_r = \frac{1}{8} \rho g (H_{1r}^2 + H_{2r}^2 + H_{3r}^2) \quad (3)$$

図から分かるように、実験においては波高比で定義した反射率は一様水深部であっても最大で10%程度変動するが、エネルギー比で定義すれば5%程度の変動で収まることが分かる。なお、図中の曲線は図-6に用いたものと同じ計算方法で作成したものである。

(2) エネルギー反射率と堤脚水深の関係

図-10にエネルギー反射率と堤脚水深の関係を示す。

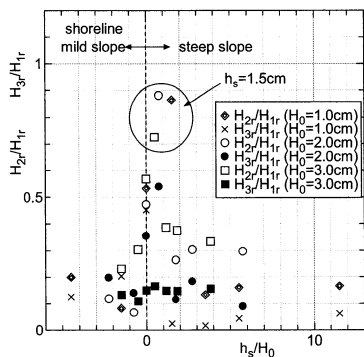


図-8 反射波の高次成分の基本周波数成分に対する比率

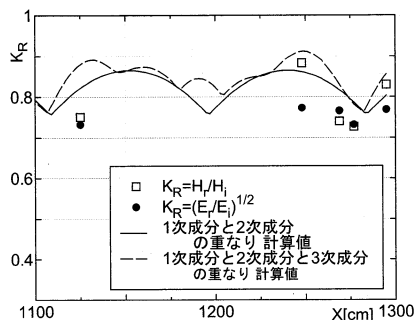


図-9 各地点の反射率 (H₀ = 3.0 cm, hₛ = 1.5 cm)

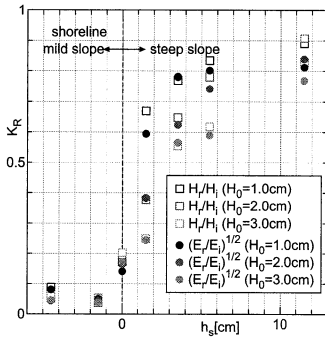


図-10 反射率と堤脚水深の関係

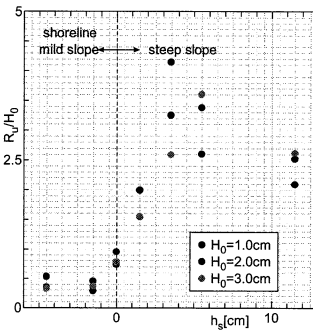


図-11 打ち上げ高さと堤脚水深の関係

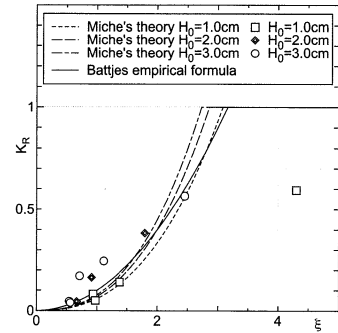


図-12 仮想勾配法を用いた場合の Miche の式, Battjes の経験式と実験結果の比較

堤脚水深がマイナスの領域は、反射率はほぼゼロである。これは、沖側の緩勾配斜面において碎波し、さらに汀線（反射原点）までの距離も長く十分にエネルギー減衰が起こっていることを表す。一方で、堤脚水深が深い（本実験では6cm以上）ケースでは、完全反射に近いことが分かる。その中間的な水深では、反射率の変化が大きく、反射波に含まれる高周波数成分の比率が高い現象が起こる。沖波波高で見ると、波高の大きいケースほど碎波しやすいために、どの堤脚水深の実験においても反射率が低いことが分かる。

図-11は打ち上げ高さと堤脚水深の関係についてまとめたものである。堤脚水深が浅い場合から中間的な堤脚水深までは、反射率と同様の挙動である。しかしそれ以上の堤脚水深になると打ち上げ高さは小さくなるが、これは現象が完全反射に近くなるため、1.0に収束すると考えられる。

(3) 仮想勾配法の適用性の検討

ここでは、複合断面の打ち上げ高算定に用いられる仮想勾配法が反射率算定にも適用可能か検討する。仮想勾配法で算定される勾配（仮想勾配）を用いた surf similarity parameter: ξ と実測の反射率の関係が、反射率算定式である Miche の式（服部, 1987）、Battjes の式（Battjes, 1974）とどの程度一致するかを見たのが図-12である。仮想勾配法の計算は堀川（1991）に倣い、碎波点に関しては合田による進行波の碎波点算定図表、最大打ち上げ高の算定には Saville による算定図表を用いている。

仮想勾配法によると実測反射率の関係は、 ξ が小さく反射率も低い時は、算定式とほぼ一致するが、水深が大きく碎波点が接合部に近いケース（ $\xi=4.2$ ）では外れている。これは、反射の裏返しとも言える碎波現象の強さには碎波以前の勾配も関係しているのに対し、仮想勾配法では碎波後の勾配のみを取り上げるためと考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究は、複合斜面における反射特性を検討することを目的とした実験を行い、以下に示す結論を得た。

- ①水深が浅く、緩勾配部で碎波し反射原点である汀線までの距離が長い場合は、碎波減衰が卓越し反射率が小さい。
- ②水深が大きいケースでは緩勾配部の影響は少なくなり、急勾配斜面における線形的な完全反射に近くなる。
- ③水深が中間的な領域では、非線形性ないし碎波による尖った波形が汀線で反射することにより、反射波に高周波数成分が発生する。
- ④反射波に含まれる高周波数成分が、自由波として進行することにより、反射波高が空間的に変動し、波高比で定義する反射率に影響する。
- ⑤エネルギー比による反射率は空間的な変動を受けない。
- ⑥反射率の算定にあたって、中間的な水深では仮想勾配法は適用が困難である。

今後の課題としては、碎波波形（碎波形式）と発生する高周波数成分の検討、仮想勾配法に代わる複合斜面での反射率算定手法の提案が挙げられる。

参考文献

- 高田彰（1970）：遡上、越波および反射の関連性について（第2報）一堤脚水深の影響一、第17回海岸工学講演会論文集, pp.113-123.
- 土木学会編（1999）：水理公式集 第5編海岸・港湾編, 第7章 構造物への波の作用, pp.525-550.
- 服部昌太郎（1987）：海岸工学, コロナ社, pp.48-50.
- 細田勝也・宮前伸・関克己・水口優（2007）：浅海域における正弦波造波に伴う2倍周波数成分の越波に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.736-741.
- 堀川清司（1991）：新編 海岸工学, 東京大学出版会, pp.114-120.
- 水口優（1991）：浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.31-35.
- Battjes, J. A. (1974) : Surf similarity, Proc. 14th ICCE, pp.466-480.