

消波ブロック被覆堤による乱れに関する実験的研究

榊 山 勉*・Philip L.-F. Liu**

1. 緒 論

消波構造物に関する諸課題は反射率や透過率, 遡上高さ, 越波流量などの推定にあり, 従来から主として水理実験により評価されてきた。現在の技術をもって概ね対応できる段階にあるといえる。しかし, 近年, 消波ブロックの被災に関連して構造物の法先洗掘の問題に再度関心がもたれてきた。波浪条件と洗掘との関係やさらに直接砂の移動機構に結びつく流速場との関係は明らかになっていない。消波工法先における浮遊砂量の運動機構には, 自然海滨の砂移動と同様に流速の波動成分のみならず乱れ成分が関与しているものと考えられる。

斜面上での碎波により生じる乱れに関しては多くの研究が報告され, 斜降渦や horizontal roller の dynamics が明らかになっている (Nadaoka and Hino, 1989)。底面境界層から発生する乱れの研究も既にある (岡安ら, 1996)。

一方, 消波構造物周辺の波高変化や流速に関する研究は数多くあるものの, 乱れまで測定して研究は少なく, Losada ら (1995) による格子構造の透過性構造物内の乱れに関する研究のみである。

近年, 消波構造物のある場での波浪変形に関する数値計算モデルが開発され (榊山・今井, 1996, 榊山・香山, 1997), 非等方性乱流を対象とする非線形レイノルズ応力を取り入れた乱流モデルが導入されるようになった (Lin and Liu, 1998; Liu ら, 1999)。しかし, 消波構造物による乱れのモデル化を検証するには至っていない。そこで, 本研究では法先洗掘の解明や数値解析モデルの検証に資するため, 非碎波と碎波の条件の下で詳細な流速測定を行い, 消波ブロック被覆堤前面における乱流場の特徴を明らかにする。

2. 実験方法と実験条件

実験は, 長さ 51.0 m, 深さ 1.2 m, 幅 0.9 m の 2 次元造波水路内に 1/25 の一様勾配斜面を作製して行った。図-1 に示すように斜面前面の水深は 0.80 m, ケーソン

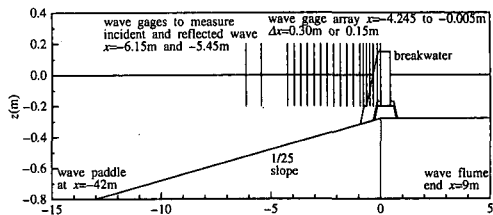


図-1 実験に用いた造波水路(長さ 51.0 m, 幅 0.9 m, 深さ 1.2 m)

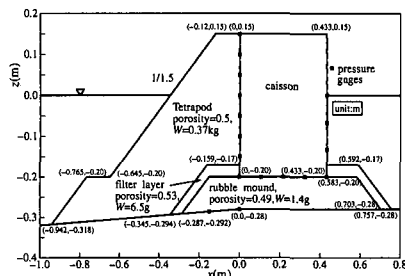


図-2 実験に用いた消波ブロック被覆堤の模型

の設置水深は 0.28 m である。図-2 に実験に用いた消波ブロック被覆堤を示す。捨石マウンド上に幅 0.433 m, 高さ 0.35 m のコンクリート製のケーソン模型を設置し, 質量 0.37 kg のテトラポッドを用いて法面勾配 1:1.5, 空隙率 0.5 の消波工を設置した。捨石マウンド, フィルター層に使用した砕石の質量ならびに空隙率は図-2 に示す通りである。

実験には, 2 種類の規則波を用いた。1 つは非碎波の波浪条件(case A)であり, 一樣水深部での入射波高 $H_I = 0.162$ m, 他の 1 つは碎波の条件(case B)で, $H_I = 0.265$ m である。周期はともに 1.7 s である。

流速測定には, 2 成分レーザードップラー流速計 (DANTEC 社製, 以下 LDV, アルゴンレーザー, 出力 2 W) を用いた。後方散乱型のファイバースコープに焦点距離 600 mm のレンズを用いて水路ガラス壁から 14 cm の点における流速の水平・鉛直成分を測定した。

図-3 と図-4 にそれぞれ非碎波, 碎波の条件の下での流速の測定点を示した。測定点の間隔は, 水平方向に消

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部
** Ph.D. Prof. Cornell University

波工法面上では0.15 m間隔, 消波工法先より沖では0.30 m間隔とした。鉛直方向には0.04 m間隔とし、底面近傍では測定可能な範囲までとした。測定点数は、非碎波の場合には112点、碎波の場合には146点である。各々の図には、波高計の測定結果から波峰 η_c 、平均水位 η_m と波谷 η_t の空間分布を示してある。波谷線より上の点についてもLDVを用いて流速測定を行った。

碎波や消波工法面の遡上波に含まれる気泡が流速測定点を通過するか否かを目視により観察し、気泡を混入した測定点と常に水中で測定した点を区別した。データ処理において、乱れを扱う場合には常に水中に没していた測定点のデータを扱い、最大・最小流速、時間平均流速を求める場合には全測定点のデータを対象とした。

使用したLDVの処理システムのデータサンプリングは不等間隔であり、サンプリングの頻度は流速の大きさに依存する。測定時間60秒間の平均的なサンプリング周波数は、最大流速が0.4 m/s程度の場合で約100 Hz、1 m/s程度の場合には約400 Hzであった。データ処理に当たっては100 Hzのデータに内挿した。データ処理に用いる波の数は、造波開始後構造物地点で波が定常状態になってから再反射波の影響のない10波である。

構造物前面での波高分布を詳細に調べるために、ケーソン前面5 mmの位置から消波工法先までは0.15 m間隔で、それより沖側では0.30 m間隔で合計18地点で水

位変動を測定した。同じ点で波高測定を繰り返して行った。また、一様水深 $h_i=0.80$ mと1/25斜面上の2カ所それぞれ波高計を2台ずつ設置し、入・反射波分離法により反射率を算出した。

3. 実験結果と考察

図-5に、代表的な測点での水位の時系列を非碎波と碎波について、各測定点で位相を合わせて示した。上段は一様水深部, 中段は斜面上(case Bでは碎波点), 下段はケーソン前壁での測定結果である。碎波点の判定は、目視により波峰の水粒子が飛び出る点とした。碎波形態はspilling 碎波とplunging 碎波の中間である。波峰から崩れながら伝播とともにplungingに至り水面に突入後、空気を混入しながら伝播し、消波工を遡上した。したがって、碎波点直下では乱れは充分に発達していない。

前述の図-3と図-4に、両実験ケースの波峰, 平均水位, 波谷線を示した。それぞれの測定値は、平均値を記号で標準偏差をエラーバーで示した。非碎波の場合には平均値の変動は小さく、碎波の場合には平均水位と波谷の変動は小さいが、波峰の変動が大きいことがわかる。

非碎波と碎波の両者とも、腹の箇所では平均水位が上昇し、節で低下していることが確認できる。ケーソン前の消波工内での平均水位上昇が著しい。特に、碎波の場合に平均水位の上昇が顕著である。消波工小段法先が部分重複波の節に位置している。反射率 K_R は、case A (非碎波) で $K_R=0.27$, case B (碎波) で $K_R=0.25$ であった。

水平流速のパワースペクトルの岸沖変化を非碎波について図-6に、碎波について図-7に示した。消波工法面の法先の位置は $x=-0.94$ mである。図-6の非碎波の結果では波の基本周波数と高周波数成分がいずれの測線においても明瞭にみられる。沖側の測定点 $x=-3.045$ mのパワースペクトルは、 $f>4$ Hzでほぼ一定値となっている。これはホワイトノイズであり、スペクトル値 $S_u=$

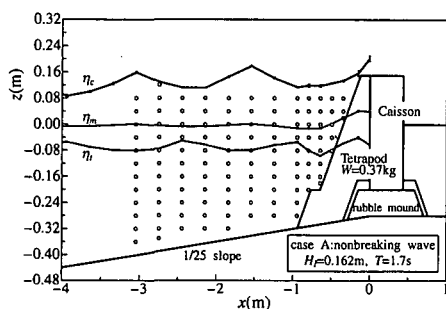


図-3 LDV 測定点と波峰 η_c 、平均水位 η_m と波谷 η_t 、非碎波

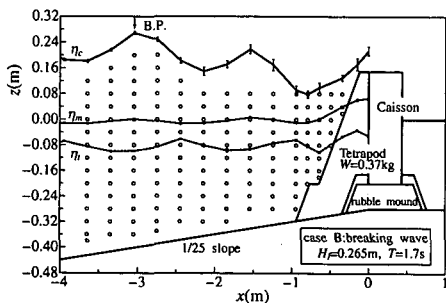


図-4 LDV 測定点と波峰 η_c 、平均水位 η_m と波谷 η_t 、碎波

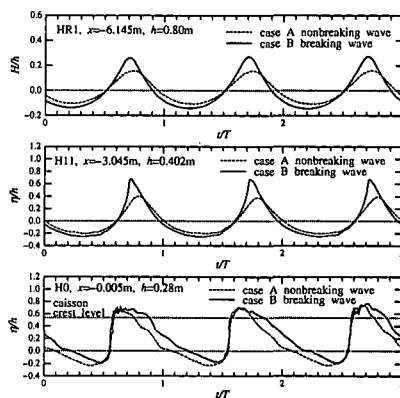
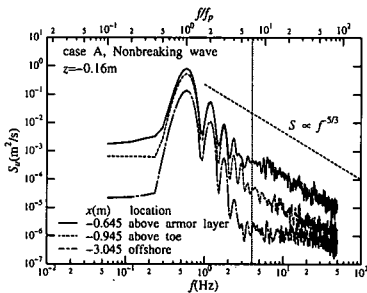


図-5 水位変動

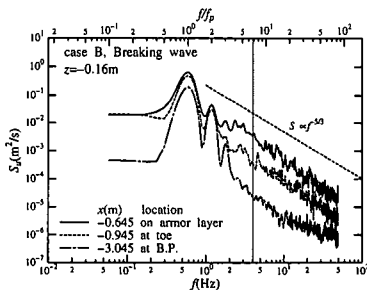
$O(10^{-6})$ (m^2/s) がノイズと判断できる。

図一7の碎波の結果では、碎波による乱れが充分発達していない碎波点直下でのスペクトルは傾きが一定ではなく、10 Hz以下の低周波数と高周波で範囲で乱れがある。傾きが一定でスペクトルが周波数 f の $-5/3$ 乗に比例する慣性領域が確認できる。碎波の場合には、非碎波に比べ波の高周波成分が小さく乱れ成分が低周波側へ広がっている。

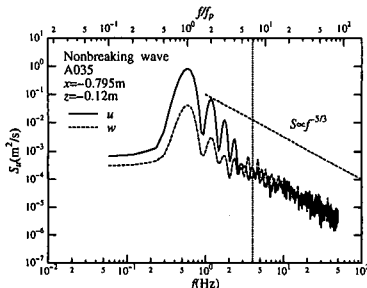
図一8に非碎波の水平、鉛直流速のパワースペクトルの比較を示した。消波工小段の法肩上+0.08 m ($z=-0.12$ m)での測定結果である。水平流速と鉛直流速の波動成分の最大流速には数倍の違いがあるが、高周波数の乱れ成分には明瞭な差がない。このような傾向はその他の測点でもみられた。これより消波工により生成された乱れは等方性乱流と考えられる。



図一6 水平流速のパワースペクトル, case A-非碎波



図一7 水平流速のパワースペクトル, case B-碎波

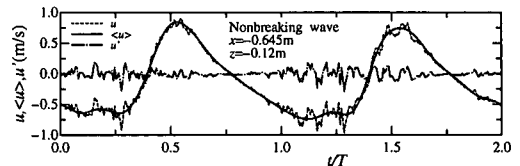


図一8 水平、鉛直流速のパワースペクトルの比較 (非碎波)

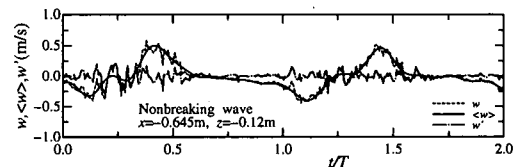
平均流速の定義には、位相平均、移動平均、周波数により乱れと平均流速を分離する方法などがある。岩垣ら(1981)は、3種類の平均操作の方法による比較を行っているが、決定的な方法は示すに至っていない。LDVを使った一様斜面上の碎波に関する既往の研究では位相平均が最も多く適用されている(榊山, 2000)。反射率が小さいため波の数を多くとることにより影響が少ないこともあるが、位相平均で定義した平均流速を用いた場合の乱れ強度は移動平均のその数倍大きくなる(Nadaoka and Hino, 1989)。海岸構造物のような反射率の大きさの場合には、1波毎に微妙に周期が変動するので位相平均は見かけの乱れを生じる。本実験データを整理してもNadaoka and Hino (1989)と同じ結果を得たので、岡安ら(1996)らに倣い、ある周波数以上の高周波数成分を乱れと定義し、数値フィルターを用いて平均流速と乱れ成分を求めることにした。この方法では、図一6に示したように、スペクトル形状から物理的な根拠を示すことができる。しかし、閾値により分離することは低周波側の乱れを無視すること、また波谷線より上での流速測定結果には適用できない、等の課題も残る。

本研究では、閾値として $f_c=4$ Hzを採用し、ローパスフィルターを用いて波動運動としての平均流速を求め、生データからの差を乱れとした。結果の1例として図一9に水平流速、図一10に鉛直流速を示す。これらは、非碎波で消波工の小段上+0.08 mで測定された結果である。平均流速の水平成分が1波毎に変動していること、鉛直流速のほうが変動が大きいことがわかる。水平流速が負の位相の時に乱れ成分が大きくなっている。

図一11(a)に非碎波の、図一11(b)に碎波の場合について、波動成分平均流速の最大流速 $u_{\max}$ 、最小流速 $u_{\min}$ 、時間平均流速 u_{mean} の鉛直分布を代表点2点について示した。上段は、 $x=-3.045$ m (case Bでは碎波点)での下段は、消波工法先 $x=-0.945$ mでの鉛直分布である。



図一9 水平流速の時間変化, case A-非碎波



図一10 鉛直流速の時間変化, case A-非碎波

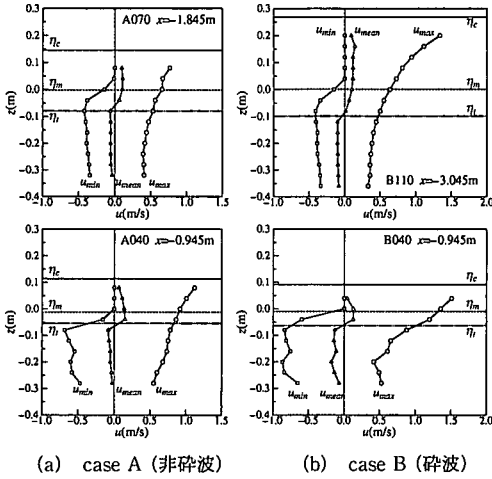


図-11 水平流速の鉛直分布

波谷線上の時間平均流速を含め、有効なデータが得られたと判断できる。

Ting and Kirby (1994) や岡安ら (1996) によると、乱れ強度の時間波形は平均流速波形と類似した変化を示すが、本実験結果では乱れ強度の時間的な変化が場所により明瞭にみられない場合があった。そこで、乱れ成分の時間波形の包絡線を求めて平均流速との関係を調べた。図-12 に水平流速の乱れ成分 $u'(t)$ の包絡線の時間波形 $u_{env}(t)$ と平均流速 $u_m(t)$ との関係を case B (砕波) の $x = -1.545$ m の測定結果について示した。この位置は消波工法先から約 0.5 m 沖に位置する。図-13 は非砕波の場合の消波工斜面上での測定結果である。図-12 の砕波の結果では依然として、乱れ成分と平均流速の時間的な対応が明瞭でない。これに対して、図-13 の消波工小段法肩上では実線で示した水面近傍 ($z = -0.12$ m) の結果と破線で示した小段直上 ($z = -0.18$ m) の結果とで明瞭に位相がずれていることがわかる。即ち、水面近傍では水平流速の谷の位相で乱れが大きくなっており、小段直上では山の位相で大きくなっている。前者は遡上波が消波工内部から引いたときに発生する乱れを、後者は粗度底面上の乱れを捉えている。

図-14 に、非砕波のケースの時間平均流速ベクトルを示す。波谷線より上の測定点では空中に出る時間帯があり流速は 0 である。時間平均はこの 0 の時間を含めて求めた。図の縦横は至んでいるが、流速ベクトルは至ませずに図示した。同図には波峰、波谷と平均水位も重ねて図示した。波谷より上では、ストークスドリフトによる質量輸送がみられる。消波工への遡上波が流下するときに生成された乱れ強度は冲向きのフラックスをもつ。

次に、乱れ強度の鉛直分布を調べる。図-15 に非砕波の、図-16 に砕波の時間平均乱れ強度の鉛直分布を示し

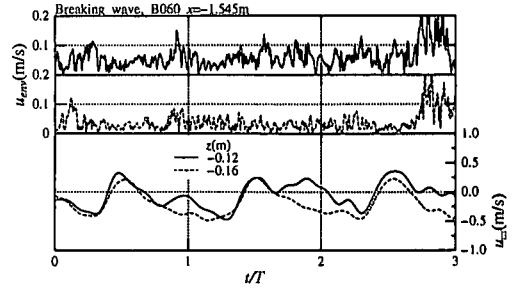


図-12 平均流速と乱れ成分の位相関係, case B (砕波)

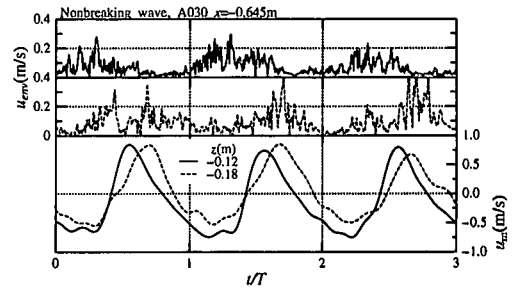


図-13 平均流速と乱れ成分の位相関係, case A (非砕波)

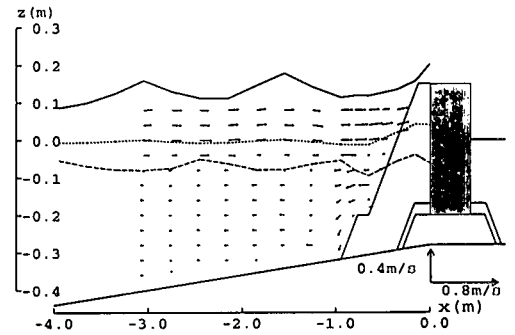


図-14 時間平均流速, case A (非砕波)

た。非砕波の場合には、消波工法面より沖側の鉛直一様分布は前述のごとくホワイトノイズによるものである。消波工斜面上では「くの字」型の分布を示し、浅くなるに従って大きくなる。これに対して、砕波を伴う場合には、砕波により生成された乱れは水面近傍で大きく、これが砕波の伝播とともに発達しながら底面近傍に移流拡散する。消波工法面上では、最も浅い測点を除き、非砕波の場合と同様に「くの字型」になる。砕波帯内で最も消波工に近い測線の結果 (白抜き○と破線で表示) は、この全体的な変化からずれている。この原因を今度は水平方向の乱れ強度の変化を調べることで説明する。

図-17 に時間平均乱れ強度の水深方向の平均値を非砕波と砕波とで比較した。図には部分重複波の波高変化も併せて示した。非砕波では、波高変化に浅水変形の影響が消波工法先までみられる。消波工上で波高が減少し、

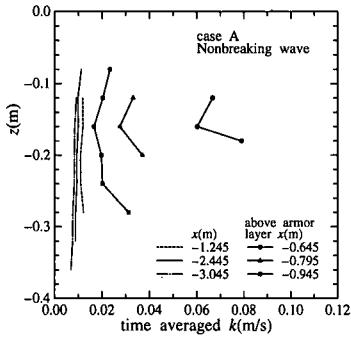
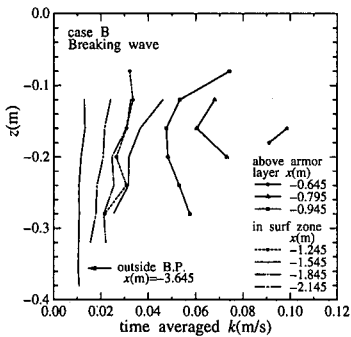
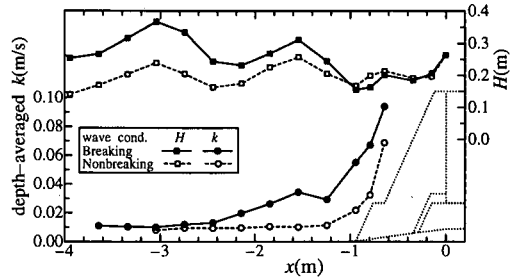
図-15 時間平均乱れ強度 k , 非碎波図-16 時間平均乱れ強度 k , 碎波

図-17 水深平均した時間平均乱れ強度の岸沖変化

2. 水平流速と鉛直流速の波動成分平均流速の振幅は数倍の違いがあっても乱れ強度はほぼ同程度であり、消波工による乱れは等方性乱流である。

3. 平均流速と乱れ流速の位相関係から、消波工近傍の乱れの生成が消波工内から流下する波により生成されるものであることを示し、乱れ強度の鉛直分布は、水面と底面近傍で強くなる“く”の字型の分布をなす。

4. 碎波による乱れが碎波の伝播の空間スケールに及ぶのに対し、消波工で生成された乱れは消波工近傍に集中し、遡上波の運動の空間スケール内の局所的な現象であることが明らかになった。

これらのデータは数値計算モデルの検証用として提供する予定である(榊山, 2000)。

参考文献

- 岩垣雄一・浅野敏之・小谷敏樹 (1981): 周期波と流れの共存場における乱れの定義とその特性について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 10-15.
- 岡安章夫 (1996): 碎波帯における粗底面上の流速場の特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 41-45.
- 榊山 勉・今井澄雄 (1996): 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 696-700.
- 榊山 勉・香山真祐 (1997): 碎波をともし消波護岸への越波に数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 741-745.
- 榊山 勉 (2000): 消波ブロック被覆堤による乱れと波に関する実験的研究ならびにデータセット, 電力中央研究所報告, 研究報告(準備中).
- Lin, P. and P. L.-F. Liu (1998): A numerical study of breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mechanics, Vol. 359, pp. 239-264.
- Liu, P. L.-F., P. Lin, K.-A. Chang and T. Sakakiyama (1999): Wave interaction with porous structures, J. Waterway, port, coastal, and ocean Eng., Vol. 125, No. 6, pp. 322-330.
- Losada, I. J., M. A. Losada and F. L. Martin (1995): Experimental study of wave-induced flow in a porous structure, Coastal Engineering, 26, pp. 77-98.
- Nadaoka, K., M. Hino and Y. Koyano (1989): Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mechanics, 204, 359-387.
- Ting, F. C. K. and J. T. Kirby (1994): Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone, Coastal Engineering, 24, pp. 51-80.

4. 結 論

消波構造物と碎波のある場で乱れを含む流速測定を行い、消波工により生成される乱れについて考察を加え、以下の結論を得た。

1. 斜面上での碎波現象と比較して消波構造物のように反射率が高い場合には、周期が1波毎に微妙に変化するため、位相平均により平均流速を定義すると見かけ上の乱れを生むので適用できない。