

砕波による乱れの時空間構造とそのモデル

酒井 哲郎*・稲田 義和**

1. ま え が き

昨年の海岸工学講演会で、砕波による乱れの測定例が4例発表された。いずれも測定事実のみを示したものであった。ここでは、かなり大胆ではあるが、波浪実験水槽内の斜面 (1/28) 上で砕ける規則波による砕波帯内の砕波による乱れの鉛直分布の、一周期における変化に対して、turbulent wake 理論を適用したモデルを示し、どの程度実験事実を説明しうるかを議論する。位相による変化を議論せずに、単純に各位相で turbulent wake 理論を適用した例として、Stive (1982)¹⁾がある。“大胆”と断わったのは、測定機器がホットフィルム流速計であり、その精度に疑問のあること、また乱れの抽出方法にも後で述べるような問題があることなどによる。

なお、最近2成分レーザードップラー流速計を用いて、同様の波浪水槽内の砕波帯内の水平、鉛直2方向の流速の同時測定を行ない、とくに瞬間レイノルズ応力の位相変化に関して検討したが、その結果は別の機会に発表する²⁾。

2. 実験条件, 方法

昨年の海岸工学講演会³⁾では、典型的な崩れ波型の場合 (沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.088$) と、崩れ波と巻き波の中間型の場合 ($H_0/L_0=0.032$) の実験結果について、とくに後者について詳しく解析した。今回は昨年と同じ実験水槽を用いて、両者の中間にあたる3種類の沖波波形勾配の場合 ($H_0/L_0=0.069, 0.066, 0.055$, したがって、いずれも崩れ波型砕波) について同様の実験を行った。

実験方法は、昨年³⁾とほぼ同じである。流速計としては、昨年同様鉛直方向のシリンダータイプのセンサーを有するホットフィルム流速計を用いて、波の進行方向流速を測定した。流速計のキャリブレーションは、静水中で鉛直方向に正弦運動する板にプローブをとりつけて行なった。流速測定は、今回は静水位においても行なった。

ここではとくに $H_0/L_0=0.066$ の場合について詳しく

表-1 実験条件

i	h_1 (cm)	T (sec)	h_b (cm)	H_b (cm)	W (cm)	H_0/L_0
1/28	35.0	1.16	17.7	12.8	490	0.006

解析した。実験条件を表-1に示す。ここで i は斜面勾配, h_1 は一様水深部水深, T は波の周期, h_b は砕波点の静水深, H_b は砕波高, W は砕波帯幅である。斜面勾配が昨年度 (1/31) と比べてやや急になっている。流速測定は、砕波点から岸側 3.0 m まで 0.5 m おきに、各点で鉛直方向に静水位から底面上約 1.0 cm まで5, 6点で行なった (図-1)。1点での測定時間は 60 sec である。

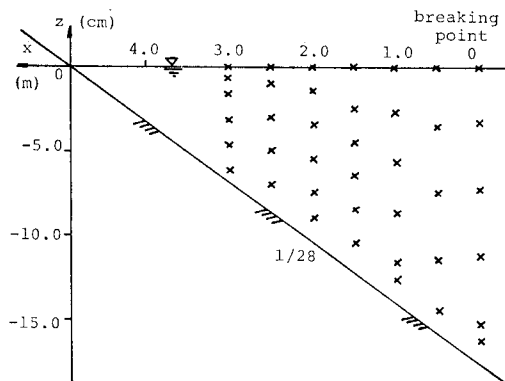


図-1 測定点

3. 解析方法

60 sec 間測定された各測定点の水位 η と波の進行方向流速 u は、その前半の 24 秒間を 0.01 sec 毎に読みとり、X-Y プロッターを用いて図化した。今回は位相変化を議論するために、前回のように流速の向きが逆転する位相が不明瞭な部分を除くことなく、24 sec 間全体について、0.1 sec 間の移動平均を行なった (図-2)。移動平均後の流速 u_w からの偏差 $u-u_w=u'$ を 0.01 sec 毎に読みとった。つぎに、各波の一周期間を、波の前面が静水位を切る位相を原点として、0.1 sec 毎の 12 区間に分けた。最後の 12 番目の区間は、周期が 1.16 sec であるので 0.1 sec に満たない。各区間には、一波で 10 個 (12 番目の区間では 10 個より少ない) の 0.01 sec 毎

* 正会員 工博 京大工学部助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 飛鳥建設 技術本部土木技術部

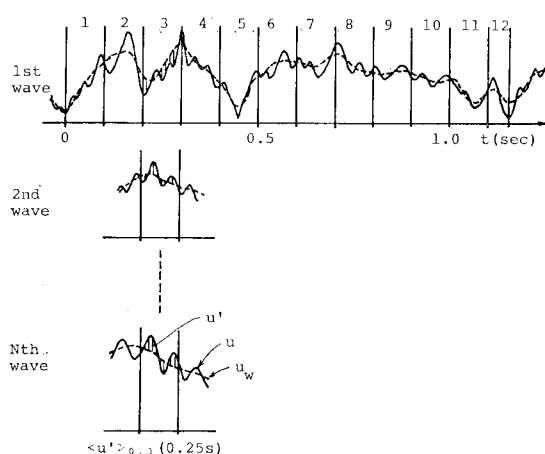


図-2 乱れの位相変化の計算

の u' の値があり、24 sec 間には、21~22 波存在する。ここでは各区分毎に u' の全読みとり値 (11 番目の区分までは 210 か 220 個) の r.m.s. をとった。各区分毎の r.m.s. を $\langle u' \rangle_{0.1}(t)$ とする。

これまで、波動にともなう乱れを抽出するのに、いわゆる位相平均が用いられてきた。その方法では上述の移動平均後の u_w にあたるものとして、多数の波の記録を位相毎に平均した値を用いている。砕波帯内では、砕波点近くと底面付近を除くと一般に流速波形そのものの一波毎の変動が大きく、上述の位相平均を用いると、この変動をも乱れとして含めてしまうことになる。ここでは、移動平均によって u_w を与えて、流速波形の変動は u_w 中に含めるとともに、 u_w からの偏差 u' に関しては位相平均を行なった。ただし砕波帯内では、波毎の水位波形も若干変動し、周期 T も変動しているので、0.01 sec 毎に位相平均すると、一周期の後半の方で位相のずれが生じてくるので、ここでは 0.1 sec というもっと粗い間隔で位相を定義した。

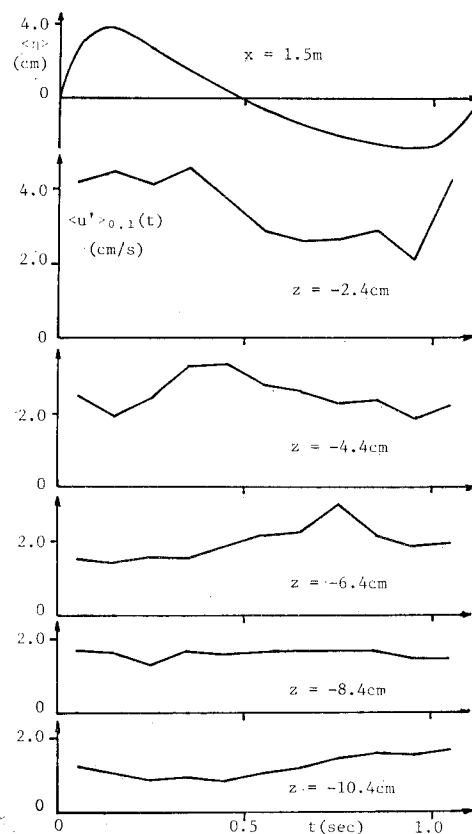
さてこうして計算された乱れの位相変化 $\langle u' \rangle_{0.1}(t)$ の精度は、乱れの定義の方法に関係する誤差と、それ以外の原因による誤差の 2 種類のものから決まる。後者に関しては、気泡通過の影響の他は平均流速や波の水粒子速度 u_w に対しては影響を及ぼしても、 u' に対してはそれほど影響がないと考えられる。今回の測定は、静水位まで行なったが、以下の解析では静水位の結果を用いず、波の谷の高さ以下の結果のみを用いているので、気泡通過の影響も少ないと考えられる。一方前者に関しては、0.1 sec の移動平均では波の峰付近および流速方向逆転時 (ホットフィルム流速計は流速方向を感知できないので、出力はこの位相付近で 0 に急激に落ち込む。) での急激な流速波形の変化に追従できず、その分を乱れとして含んでしまう可能性がある。流速方向逆転時に関しては、上述の位相毎に標準偏差をとる際に、誤差が大

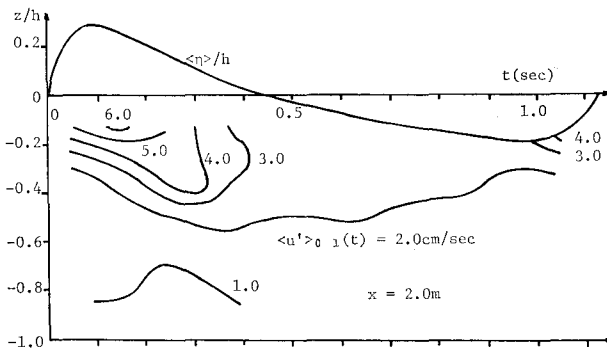
きいと思われるデータを除いた。問題は、波の峰の位相付近であるが、別の機会に発表するレーザードップラー流速計による解析から、その誤差は 2.0 cm/s 以下と考えられる。

4. 乱れの位相変化

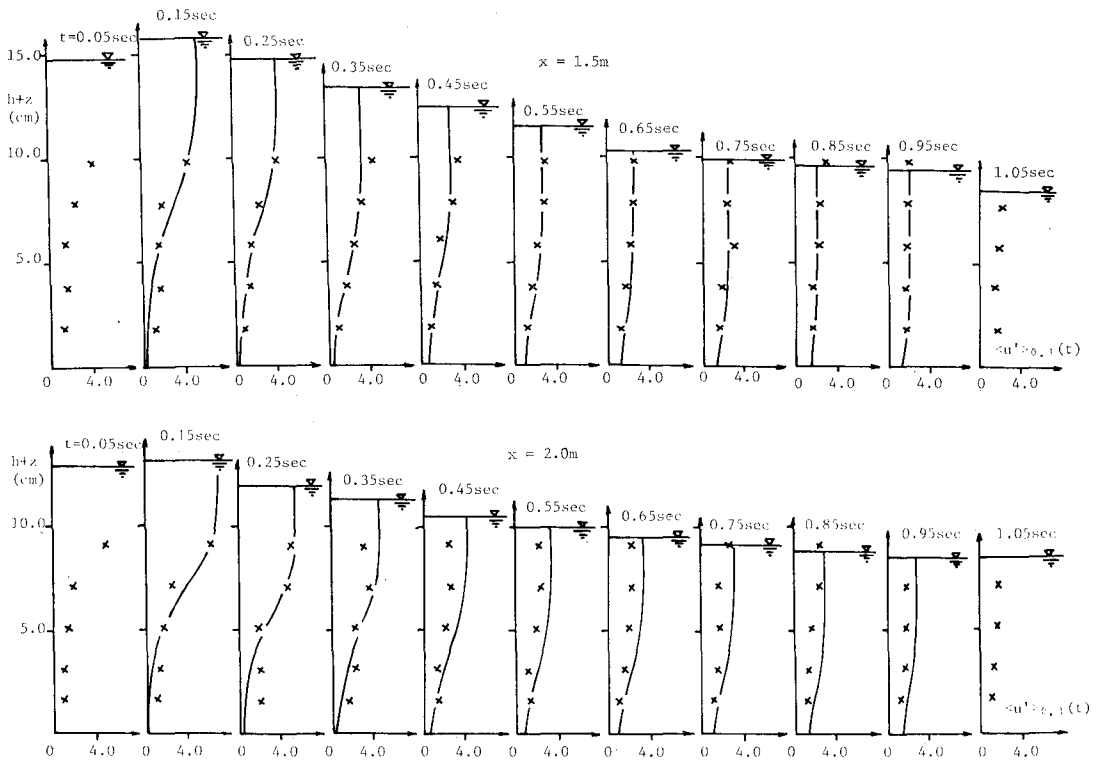
図-3 は、砕波点から岸側 1.5 m ($x=1.5$ m) の、静水位での測定点を除いた 5 点での、3. の方法で求めた波の進行方向乱れの 0.1 sec 毎の変化を示している (11 番目の区分まで示している)。図の最上段のものは、解析された波の平均的な水位変化 $\langle \eta \rangle$ (静水面を原点としている) を示している。図からわかるように、波の後面の水位が静水位になる位相、したがって流速方向が逆転する位相付近で乱れがとくに大きくなる傾向はない。したがってこの位相付近で、流速方向の変化にともなう出力の急激な落ち込みに十分追従できないことによる誤差は、無視しえると考えられる。一方、波の峰の位相付近では、とくに $z=-2.4$ cm (静水面下 2.4 cm) では乱れの値は 2.0 cm/sec よりかなり大きく、誤差以上の有意な値と考えられる。

図-3 を見ると、各測定点の一周期以内でのピークの生じる位相が、水面から下方に行くに従って時間的に遅く


 図-3 乱れの位相変化の例 ($x=1.5$ m)

図-4 乱れの等分布線図の例 ($x=2.0 \text{ m}$)

開水路流れの中に翼を挿入し、その背後に生じる空気を連行した乱れた波面下の流れを、レーザードップラー流速計で測定した Battjes・Sakai (1981)⁵⁾ が示している、乱れの鉛直分布の流下方向変化の測定結果 (Fig. 3) に類似している。彼らは、同時に測定した平均流速の欠損、その鉛直分布のスケールおよび乱れ強度の流下方向変化が、turbulent wake 理論⁶⁾によって説明しうることを示した。以下では、turbulent wake 理論を適用して、図-5 の $x=1.5 \text{ m}$, 2.0 m における乱れの鉛直分布の位相変化を説明するモデルを考える。

図-5 乱れの鉛直分布の位相変化 ($x=1.5 \text{ m}$, 2.0 m)

なっていることがわかる。このことをさらにわかりやすく表示するため、図-4 のような位相・鉛直座標平面上に、乱れの等分布線を各測定点 (x) 毎に描いた。図-4 は砕波点から 2.0 m 岸側のものである。上述の図-3 におけるピーク値の生じる位相の変化は、図-4 では等分布線の右斜め下の方へのかたよりとして現われている。この傾向は、とくに $x=1.5 \text{ m}$ と 2.0 m 地点で見られた。このような測定結果は、レーザードップラー流速計を用い、従来の位相平均によって乱れの位相変化を求めた Stive (1980)⁴⁾ の Fig. 8 でも見られる。

図-5 は、 $x=1.5 \text{ m}$ と 2.0 m での測定結果をさらに別の表現で示したものである。この図の傾向は、一様な

5. 砕波の乱れの鉛直分布の位相変化のモデル

(1) turbulent wake 理論⁶⁾

turbulent wake は、turbulent jet および shear layer

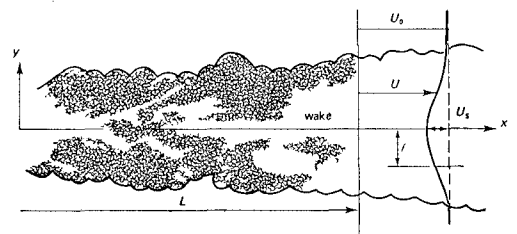


図-6 turbulent wake (文献 6) Fig. 4.1 より)

とともに自由乱流の範ちゅうに入る流れで、ここでは平面流れに限る(図-6)。 x は流下方向距離、 y は流れの横断方向の距離、 U_0 は一様流の x 方向流速、 U は後流内部の x 方向流速、 U_s は $|U_0 - U|$ の最大値で一つの速度スケールである。turbulent wake 理論では次のような仮定をしている。1) 流下方向の長さのスケールは、横断方向の長さのスケール l よりはるかに大きい。2) レイノルズ数は大きい。3) 速度欠損 U_s は、乱れの大きさと同程度である。以上の仮定から、運動方程式を簡略化する。

自由乱流の特徴は、水深や水路幅などの特徴的な長さがなく、そのため流下方向に直角な断面内の流速分布は流下方向に相似になる (self preservation) ことである。したがって U の分布は y と y 方向の長さのスケール l のみの関数となる。レイノルズ応力についても同様である。このことを簡略化された運動方程式に導入すると、運動量欠損が流下方向に一定であることから、速度スケール U_s は流下距離 x の $-1/2$ 乗、横断方向の長さのスケール l は x の $1/2$ 乗に比例することがわかる。さらに渦動粘性係数を導入して一定とすると、 U は $f = \exp(-1/2 \cdot \alpha \xi^2)$ に、またレイノルズ応力は f' に比例することが得られる。ここに $\xi = y/l$ であり、“ $'$ ” は ξ に関する微分を表す。乱れ強度はレイノルズ応力に比例していると考えられるが、 f' の分布形は、図-7 の実線のようになり、 $\xi=0$ 近辺で十分乱れた現実の乱れの分布 (破線) と異なる。

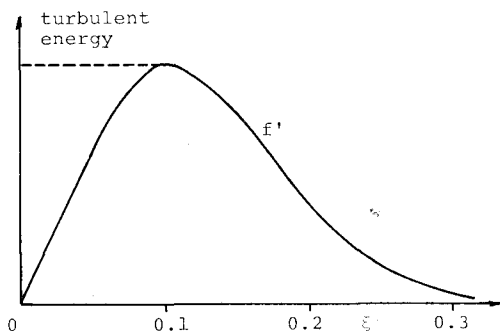


図-7 turbulent wake の乱れの分布 (文献 6) Fig. 4.4 より)

(2) 砕波の乱れの鉛直分布の位相変化のモデル

(1) で述べたように、turbulent wake 理論は横断方向の流れの場の流下方向の変化を与えている。一方今モデル化しようとしているのは、砕波の乱れの鉛直分布の一周期内的での変化である。したがって、砕波の進行にともなう乱れの変化は考えていない。4. で示した図-3~5 での位相の原点と異なって、波の峰を位相の原点とする。モデル化は、波の峰の位相から、波の谷の位相付近の乱れが最も小さいと考えられる位相 t_t までとする。

turbulent wake の中心線 $y=0$ に対応するものとして、ここでは各位相での水位をとった。つぎに各位相での乱れの鉛直分布は、次式で考える。

$$\langle u' \rangle_m^2(t) = \langle u' \rangle_m^2(t) \cdot r \{ (\eta - z)/l \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η は静水面からの水位、 l は鉛直方向のスケールで後述する。 r は、図-7 の $\xi \geq 1.0$ では実線、 $\xi < 1.0$ では $\xi = 1.0$ での実線のピーク値をとる関数に比例するとする。 $\langle u' \rangle_m^2(t)$ は、各位相での代表的な乱れの強さとし、これも後述する。

具体的な r の関数形は、その最大値を 1.0 とすることから次のように与えられる。

$$r(z) = \begin{cases} \frac{\eta - z}{l} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\eta - z}{l} \right)^2 + \frac{1}{2} \right\}, & \frac{\eta - z}{l} \geq 1.0 \\ 1.0, & 0 \leq \frac{\eta - z}{l} < 1.0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

z は図-1 に示すように、静水面を原点とし鉛直上向きを正とした座標である。

$t=0$ (波の峰の位相) での鉛直方向の長さのスケール l_0 として、その位相での水面と静水面との距離、すなわち峰高 η_0 をとる。 l は turbulent wake 理論にしたがって位相の $1/2$ 乗に比例して増加するものとし、次式で与える。

$$l = l_0 \left(\frac{t + T}{T} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (2), (3) からわかるように $t=0$ では $l=l_0=\eta_0$, $(\eta - z)/l = \eta_0/\eta_0 = 1.0$ となり、波の峰の位相では、峰の高さから静水面までが $r=1.0$ の一定値をとる。静水面より上の測定値を与えればよいが、いま適用しようとしている $x=1.5\text{ m}$ と 2.0 m では、静水面上には測定点がない。そのため最上点での測定値と式 (2) の分布形から、 $(\eta - z)/l < 1.0$ での一定値を逆算し、これを $\langle u' \rangle_m^2(0)$ とした。 $\langle u' \rangle_m(t)$ は、turbulent wake 理論にもとづき位相の $-1/2$ 乗に比例するとして、乱れのもっとも弱くなる $t=t_t$ での $\langle u' \rangle_m(t_t)$ の値を用いて次式で与えた。なお、 $\langle u' \rangle_m(t_t)$ としては、 $t=t_t$ での実測値の最大値をとった。

$$\langle u' \rangle_m^2(t) = \langle u' \rangle_m^2(0) \left\{ \frac{(1 - K^2)t + t_t}{t_t} \right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K = \langle u' \rangle_m(t_t) / \langle u' \rangle_m(0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(3) モデルと実験値との比較

(2) のモデルを図-5 で示した $x=1.5\text{ m}$ と 2.0 m での乱れの鉛直分布に適用する。波の峰の位相としては、0.95 sec の位相をとった。モデルの計算結果は図-5 に実線で示している。モデルはほぼ実験結果を説明している。

静水面付近から上方の測定値がないが、測定値のある範囲では、このモデルは下方に向かって減少する傾向やその位相変化の傾向を説明出来る。もちろん波の峰と谷の位相で、実測の乱れの値を用いており、とくに波の谷の位相で実測値を用いているので、実測値と合うのは当然かもしれないが、その他の位相での変化の傾向も説明している点は認められる。基本的問題としては、砕波の乱れの位相変化がとくに turbulent wake に類似している物理的説明はなく、むしろ Peregrine・Svendsen (1980)⁷⁾ の言ったように shear layer の方が力学的には近い感じもする。しかし、実測値の傾向は、Battjes・Sakai (1981)⁵⁾ も示しているように、turbulent wake に近い。いずれにせよ、これ以上の詳細な議論は、さらに精度の良いレーザードップラー流速計による測定結果を待って、また乱れの定義に関しても詳細な検討をした後に展開すべきである。

6. あとがき

以上、最初に断わったようにかなり大胆なモデル化を行なった。しかもモデル化の対象としたのは、崩れ波型砕波の一測定例の、しかも砕波帯の中ほどの 2 点での乱れの鉛直分布の位相変化に対してであり、砕波点付近や

汀線近傍に対しては、検討していないことを断わっておく。ここで対象とした地点は、砕波帯幅に対して砕波点から 30~40% の付近であり、段波状に進行する砕波後の波としてかなり安定した領域である。

最後にこの研究は、昭和 56 年度文部省科学研究費一般研究 C によったことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Stive, M. J. F. and H. G. Wind: A study of radiation stress and set-up in the nearshore region, Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 1~25, 1982.
- 2) 酒井哲郎: 2成分 LDV による砕波の乱れとレイノルズ応力の位相変化の測定, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, 1982 (印刷中).
- 3) 酒井哲郎・三反畑 勇: 二次元砕波帯における砕波による乱れの構造, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 15~19, 1981.
- 4) Stive, M. J. F.: Velocity and pressure field of spilling breakers, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., pp. 547~566, 1980.
- 5) Battjes, J. A. and T. Sakai: Velocity field in a steady breaker, J.F.M., Vol. 111, pp. 421~437, 1981.
- 6) Tennekes, H. and J. L. Lumley: A First Course in Turbulence, The MIT Press, pp. 104~145, 1972.
- 7) Peregrine, D. H. and I. A. Svendsen: Spilling breakers, bores and hydraulic jumps, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., pp. 540~550, 1978.