

砕波後の波の変形に及ぼす逆流の影響

堀 茂樹* ・ 平山 健一**・ 佐伯 浩***
冷水 康悦****・ 秋山 喜弘*****

1. 緒 言

河口閉塞の防止を目的とする河口導流堤の機能としては、沿岸方向の漂砂を阻止することの他に、河川流の掃流力を海域に於いても保持させ、さらに導流堤内に進入する波を逆流の影響によって沖側で砕波させることにより砕波に伴う激しい砂移動の範囲を河口から遠ざけることが挙げられる。逆流が存在する場合の砕波水深、砕波波高などに関しては種々の研究により解明されつつあるが、砕波帯内での底面剪断力などを検討するには砕波後の波の変形に及ぼす逆流の影響を明らかにする必要がある。

また近年、波高分布や海浜流の流況に関する数値モデルによる計算が多く行なわれているが、波の変形に起因する海浜流がさらに波に影響を及ぼし、この相互干渉の結果安定した波浪、流況場が形成されることを考えると、流れの場での砕波後の波高減衰及び平均水位の変化を正確に評価することはこれらの数値モデルの精度の向上につながる。

本研究では、逆流が存在する場合の砕波後の変形に関する広範な実験を行い、砕波帯内での波高減衰及び平均水位の変化に及ぼす逆流の影響を検討する。また逆流の影響を受ける波の大部分は崩れ波型砕波となることから¹⁾、著者ら²⁾が提案した崩れ波型砕波に対する変形計算モデルを逆流上でも適用できるよう改良し、実験結果との比較により本モデルの適用性を検討する。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置は参考文献 1) に示したものと同じであり、水底勾配 S は $1/50$, $1/30$, $1/15$ の 3 種類とした。

波形は造波開始から 10 波分を記録したが、反射波の影響を考慮し、6 波目から 10 波目までの 5 波を対象として、波高及び平均水位を求めた。また測定間隔は $S=1/50$ で 50 cm, $S=1/30$, $1/15$ で 30 cm である。実験

表—1

単位幅流量 q	0.0 ~ 790.0 (cm ³ /s/cm)
周 期 T	0.83 ~ 2.40 (s)
沖波波高 H_0	1.1 ~ 24.0 (cm)

での単位幅流量 q , 周期 T , 沖波波高 H_0 は 表—1 のとおりである。

3. 実験結果及び考察

(1) 波高減衰と平均水位の変化の特性

砕波帯内での波の変形には砕波点での諸特性が影響する。著者ら¹⁾が既に報告したように、逆流が存在する場合の砕波特性は水底勾配、沖波波形勾配、無次元単位幅流量によって決定されるが、砕波が極めて不安定な現象であるため、同一の条件でも砕波水深、砕波波高は若干変動し、この変動はその後の波の変形にも影響する。従って、砕波後の変形を詳細に議論するには変形特性と沖波波形勾配、無次元単位幅流量との関係を検討するよりむしろ砕波特性量との関係に着目することが妥当である。そこで、次章で述べる砕波後の変形に対する計算モデルでのパラメーターである。

$$A = \frac{q/h_b}{\sqrt{gh_b}}, \quad F = \frac{H_b}{h_b} \sqrt{\frac{h_b}{gT^2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H_b : 砕波波高, h_b : 砕波水深, g : 重力加速度を用いて実験結果を整理する。

図—1 は水底勾配 $S=1/30$ で F が 0.07 ~ 0.08 の範囲にある結果を A をパラメーターとして表わしたものである。(a) は波高減衰についてであり、 F , A が同じ値であれば変形特性は同一であることが分かる。また、 A が零、つまり逆流が存在しない場合に比べて A が大きくなるのに伴い、砕波による波高減衰は大きくなり、砕波後の変形にも逆流の影響が現われている。(b) は平均水位の変化を示したものであり、縦軸は逆流及び波が存在しない時の水位から測った平均水位と水深の比である。波高減衰と同様 A と F によって変化特性が特徴づけられており、また A が大きい程波高減衰が大きいのに対応して、平均水位も大きく上昇している。

図—2 は水底勾配 $S=1/50$ での結果であり、図—1 に

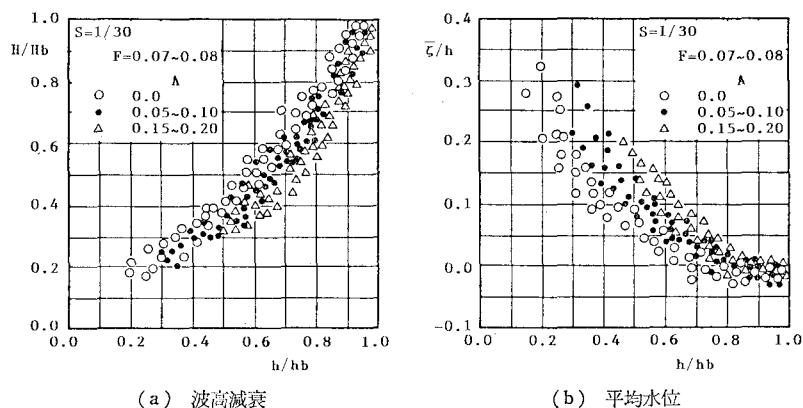
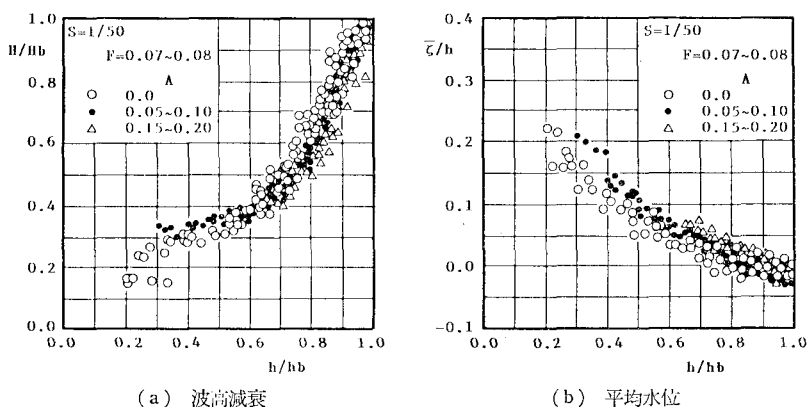
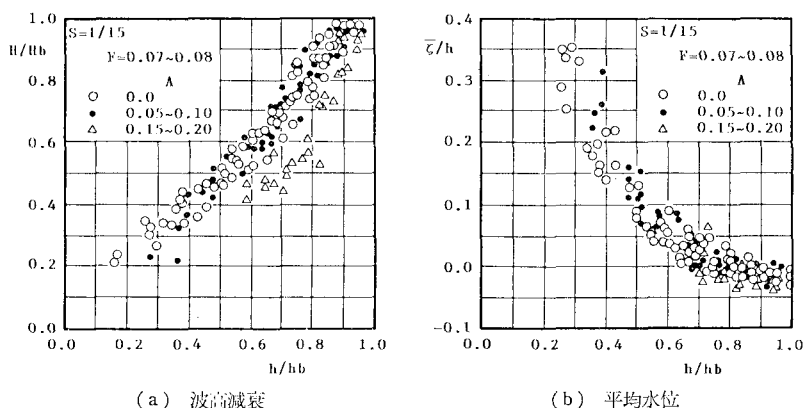
* 正会員 工博 岩手大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 Ph.D. 岩手大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工修 運輸省第二港建東京空港工事事務所

***** 正会員 NTT いわき電報電話局

図-1 変形特性に対する A の効果 ($S=1/30$)図-2 変形特性に対する A の効果 ($S=1/50$)図-3 変形特性に対する A の効果 ($S=1/15$)

示した $S=1/30$ での結果と全く同一の傾向が見られる。ただし、緩勾配に特有であるのは $h/h_b=0.6$ 付近からの波高減衰はそれ以深での減衰に比べ多少弱まっている点にある。これは水底勾配がさらに緩い場合には碎波が一旦おさまり、その後の浅水変形により2次碎波が生じる現象と同じであり、本研究での $S=1/50$ では浅水変形による波高増大にまでは至っていないが、波高減衰は途

中から弱まる。このような状態になってからの A の効果はそれ以深での効果と逆で、 A が大きい程減衰は弱まり、 h/h_b の小さい所では相対的に波高は大きくなる。

図-3 は水底勾配 $S=1/15$ での結果であり、平均水位に対する A の効果は他の水底勾配のものに比べ若干不明瞭ではあるものの、他の F の範囲での結果も含めると図-1, 2 と同一の傾向が認められる。また、図-1~3を比較すると、 A の増加に伴う波高減衰の増大は水底勾配が急である程顕著に現われる。

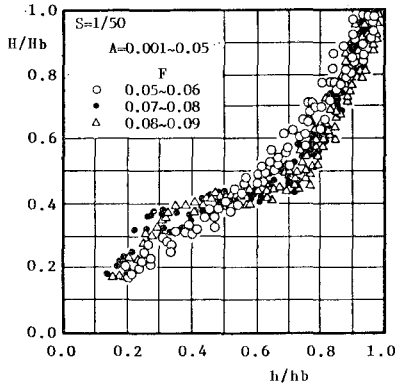
図-4 は水底勾配 $S=1/50$ で $A=0.001\sim 0.05$ の範囲にある結果を F をパラメーターとして表わしたものであり、 F の増加によっても波高減衰が大きくなっていることが示されている。また、 F の増加に伴い平均水位の上昇は小さくなる傾向が見られる。

以上のように、逆流が存在する場合の碎波帯内の波高減衰及び平均水位の上昇の特性は水底勾配及び碎波点での量である A と F によって特徴づけられ、 A , F が大きい程波高減衰は大きく、平均水位の上昇は A が大きい F が小さい場合に大きくなることが明らかとなった。

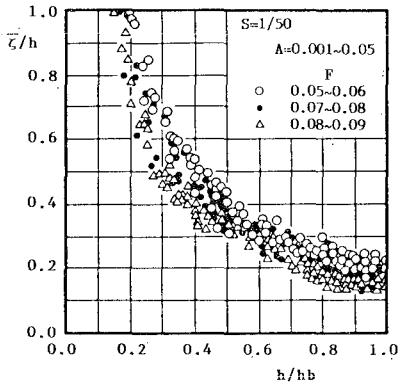
(b) A , F と水底勾配, 沖波波形勾配, 無次元単位幅流量との関係

著者らの従来の研究^{1), 3)}では、逆流が存在する場合の波

浪変形に対する水底勾配 S , 沖波波形勾配 H_0/L_0 , 無次元単位幅流量 q^* の影響に着目してきたが、本研究では新たに A と F というパラメーターを用いて碎波帯内での変形特性を検討した。そこで、 A , F と S , H_0/L_0 , q^* の関係を調べる。図-5 は q^* をパラメーターとして A と H_0/L_0 の関係を水底勾配別に示したものである。 H_0/L_0 の増加に伴い A は減少し、その関係は q^* と S に



(a) 波高減衰



(b) 平均水位

 図-4 変形特性に対する F の効果 ($S=1/50$)

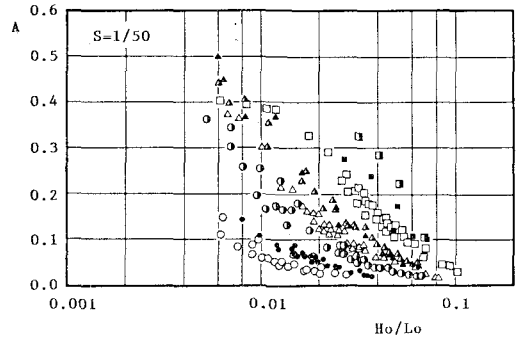
依存している。また、 q^* が大きい場合でも H_0/L_0 が大きくなると A の値はほぼ零になっているが、これは H_0/L_0 が大きいと砕波水深が深くなり、逆流の平均流速 q/h_0 は小さく、また $\sqrt{gh_0}$ は大きくなるためである。

図-6 は F と H_0/L_0 の関係を q^* をパラメーターとして水底勾配別に示したものであるが、 q^* の範囲は図-5 に示したものと異なっている。これは F に対する q^* の効果は q^* がある程度以上大きくならなければ現われないためである。つまり、 q^* が $0.000009 \sim 0.00012$ の範囲では F と H_0/L_0 の関係はほぼ同一であり、 q^* がそれ以上になると F は多少小さくなり、 q^* の影響が現われる。

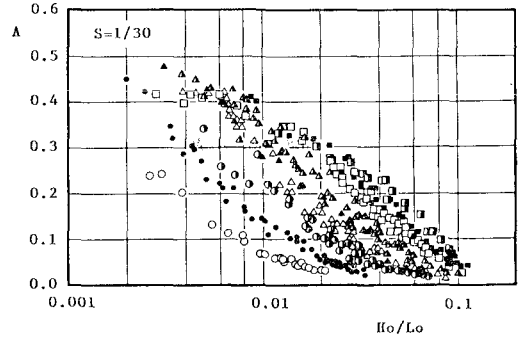
4. 砕波後の波の変形計算モデル

(1) 変形計算モデルの概要

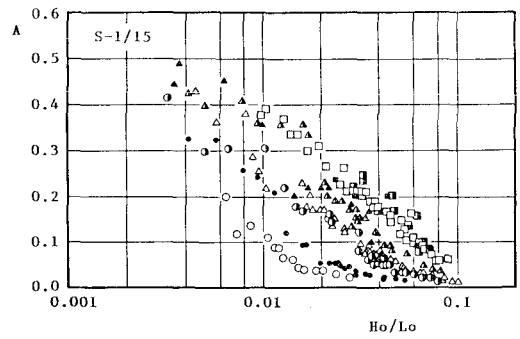
砕波後の波の変形に対する理論的あるいは数値モデルによる解析が多く行なわれてきたが、特に砕波によるエネルギー逸散を段波に於けるエネルギー逸散で近似するいわゆる段波モデルはその取扱いの簡便さから多く用いられてきた。この種のモデルの最初のものは Le Méhauté⁴⁾ の崩れ波型砕波を対象としたものであるが、そ



(a)



(b)

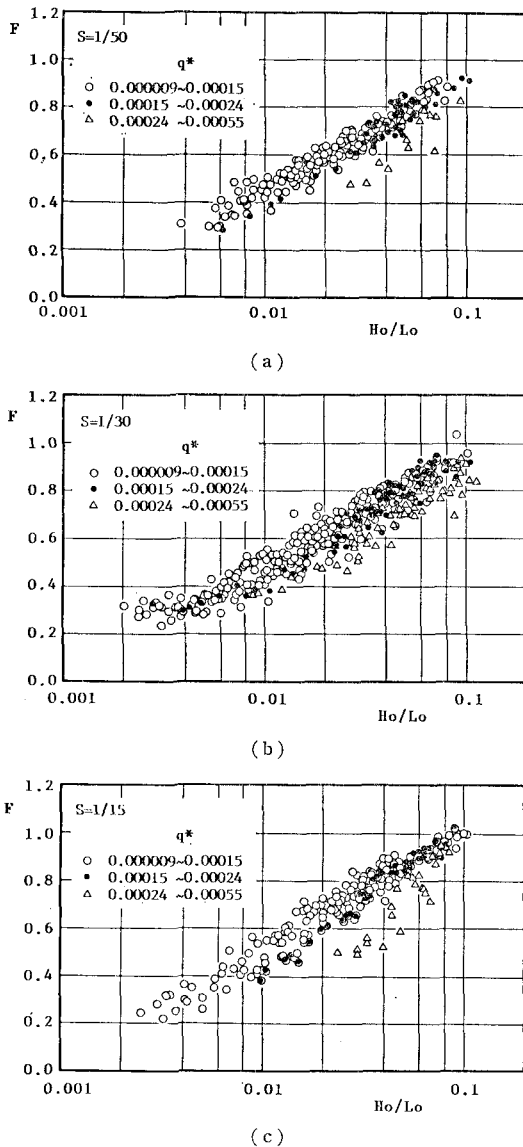


(c)

- | | |
|---------------------|-------------------|
| ○ 0.000009~0.000017 | □ 0.00015~0.00024 |
| ● 0.000017~0.000025 | ■ 0.00024~0.00036 |
| ◐ 0.00004 ~0.00005 | ▣ 0.00045~0.00055 |
| △ 0.00005 ~0.000065 | |
| ▲ 0.000065~0.00009 | |
| △ 0.0001 ~0.00015 | |

 図-5 A と S , H_0/L_0 , q^* の関係

の後の研究では砕波形態は特に限定せず、各種の改良が加えられ、実験結果との比較によりその適用性が検討されてきた。しかし、これらのモデルによる計算結果と崩れ波型砕波の実験結果を比較すると、計算結果では砕波直後のエネルギー逸散が過大になっている。つまり、本研究での実験では砕波直後は比較的緩やかな波高減衰が

図-6 F と S , H_0/L_0 , q^* の関係

生じ、その後急激な減衰となり、この傾向は Horikawa and Kuo⁵⁾ の実験の中でも見られるが、これに対し段波モデルは碎波直後から急激な減衰を与えている。この原因は崩れ波型碎波の碎波直後では波峰に局所的乱れが発生し、これが波の進行に伴い次第に波の前面に拡がり、大きなエネルギー逸散を引き起こすのに対し、従来の段波モデルの多くでは段波の波高として碎波の波高そのものかあるいは波高に比例する値を用いているため、碎波直後に最も大きいエネルギー逸散が生じることになる。

以上の観点から、崩れ波型碎波の特徴をより正確に表現するため、著者ら²⁾は崩れ波の乱れの大きさを foam region と呼び、foam region が波の進行と共に発達する機構を含んだ段波モデルを提案し、計算結果が実験結果

と良く一致し、特に碎波直後の緩やかな変化が良く表現されていることを示した。逆流が存在する場合には、水底勾配が 1/15 のような急勾配以外では大部分が崩れ波型碎波となることから、本研究で扱う逆流上での碎波変形に対する計算モデルとして上述のモデルに逆流の影響を加え、逆流上への適用を試みた。以下にその概略を述べる。

(a) foam region の発達

foam region の発達を計算するため、以下のように仮定する。碎波点では波峰での水粒子の水平速度と波速が等しくなり、図-7 に示すように水粒子は瞬間的に水表面から離れ、極めて短い Δt 後に再び水表面に落下する。この地点を foam region の下限と定義する。水粒子はこの地点から同様な運動を繰返し、foam region は次第に波の前面に発達する。 Δt , foam region の発達量を計算するには、さらに波の運動を線形長波理論で近似し、波の前面の形を楕円と仮定した。以上のようないくつかの仮定が設けられているため、補正係数を用い、

$$\Delta t' = \alpha \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (2)$$

として、foam region の発達量の計算を行った。

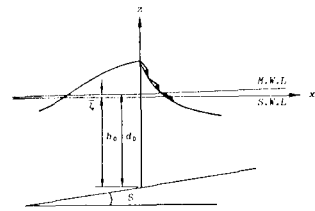


図-7 foam region の発達

(b) エネルギーバランス

崩れ波型碎波によるエネルギー逸散を段波に於けるエネルギー逸散で近似すると、単位長さ当りのエネルギー逸散率 D は、

$$D = -B \frac{\rho g}{4h} \frac{(\beta' H)^3}{T} \frac{1}{(1 - q/\sqrt{gh^3})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 B : 補正係数、 ρ : 流体の密度、 β' : 波高に対する foam region の割合

となる。長波近似したエネルギーフラックス E_f は

$$E_f = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(\sqrt{gh} - \frac{q}{h} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

であるから、碎波以外によるエネルギー逸散を無視すると、エネルギーバランスは次式となる。

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh} \left(1 - \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right) \right\} + B \frac{\rho g}{4h} \frac{(\beta' H)^3}{T} \frac{1}{\left(1 - \frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 t から $t + \Delta t$ 間でのエネルギーバランスを考える。 Δt は極めて短いことから、この間の foam region は一定であるとし、 t での波高 H_1 、水深 h_1 で無次元

化すると、式(5)は積分されて

$$\bar{H}^{-1} = \frac{2}{9} K \frac{3\bar{h}^{3/2} - 2A}{(\bar{h}^{3/2} - A)\bar{h}^{1/2}} + \frac{1}{(1-A)^{1/2}} \left(1 - \frac{2}{9} K \frac{(3-2A)}{1-A} \right) \frac{(\bar{h}^{3/2} - A)^{1/2}}{\bar{h}^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\bar{H}: H/H_1$, $\bar{h}: h/h_1$, $A=(q/h_1)/\sqrt{gh_1}$

$$K = \frac{2B}{S} \frac{H_1}{h_1} \sqrt{h_1/gT^2} \beta^{1/3}$$

となり、 dt 間の波高の変化が計算できる。

(c) 平均水位の変化

本モデルでは Longuet-Higgins and Stewart⁶⁾ が示した波のラディエーションストレスによる平均水位の変化と逆流の流速の変化による平均水位の変化の和を波・流れ共存場での平均水位の変化量とした。

なお、エネルギーバランスと平均水位の変化の両者が同時に満足されるよう繰返し計算を行った。

(2) 変形計算モデルの適用性

逆流が存在しない場合の実験結果と計算結果との比較により、エネルギー逸散に関する補正係数 B と foam region の発達に関する補正係数 α の最適値が得られているので、これらの値を用いて、逆流上での計算を行い、適用性の検討を行った。図-8 は計算結果と実験結果を比較した例であり、本モデルによる波高減衰の結果はいずれの水底勾配に於いても実験結果と良く一致している。特に砕波直後の緩やかな減衰が良く表現されている。平均水位に関しては従来のモデルと同様本モデルも過大に見積っており、この点に関しては今後さらに改良しなければならない。

5. 結 語

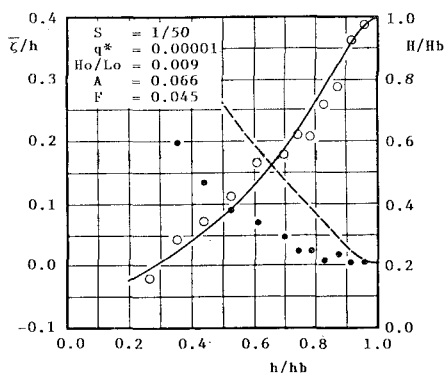
本研究で得られた主要な結論を要約すると、

- 1) 逆流が存在する場合の砕波後の波高減衰及び平均水位の変化の特性は水底勾配と A , F によって決定され、逆流の影響は A で評価することができる。
- 2) ここで用いた A と F は水底勾配、沖波波形勾配、無次元単位幅流量に依存し、その関係が得られた。
- 3) foam region の発達機構を含む砕波後の変形計算モデルは逆流上での波高減衰を極めて良く表現している。

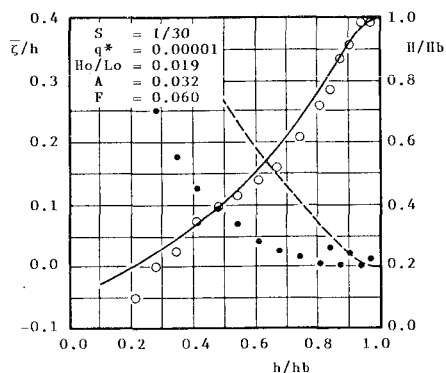
最後に、実験結果の整理及び作図に際し岩手大学笹本誠技官と江口斉、舩谷成幸両君の協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

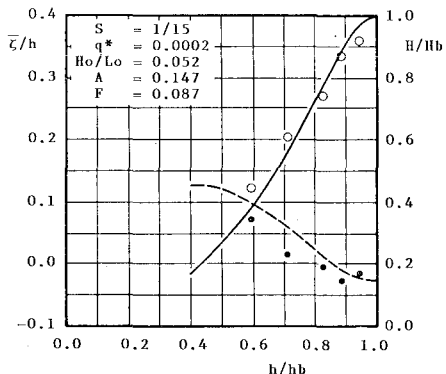
- 1) 堺 茂樹・大塚夏彦・佐伯 浩・尾崎 晃: 斜面上での砕波に及ぼす流れの影響に関する基礎的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 138~142, 1981.



(a)



(b)



(c)

図-8 計算結果と実験結果との比較

- 2) Sakai, S., K. Hiyaizumi and H. Saeki: Wave height decay model within a surfzone, 20th I.C.C.E., pp. 686~696, 1986.
- 3) 堺 茂樹・佐伯 浩・尾崎 晃: 浅水変形に及ぼす流れの影響に関する基礎的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 70~74, 1982.
- 4) LeMéhauté, B.: On non-saturated breakers and the wave run-up, 8th I.C.C.E., pp. 77~92, 1962.
- 5) Horikawa, K. and C. T. Kuo: A study on wave transformation inside surf zone, 10th I.C.C.E., pp. 217~233, 1966.
- 6) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: Radiation stresses in water wave, a physical discussion, with application, Deep-sea Research, Vol. 2, pp. 529~562, 1964.