

砕波段波衝突による波力に関する実験

松 富 英 夫*

1. まえがき

ゲート急開流れの段波は、しばしば津波の段波と類似と仮定され、津波の段波理解のために利用されてきている¹⁾。

著者はそのゲート急開流れの砕波段波衝突による衝撃波力の一評価方法を示した²⁾。工学的に非常に重要と思われる最大衝撃波圧 P_m と全(衝撃)波力 F に関しては、その有効性が確認された。ただし、全衝撃波力については一実験値³⁾との比較・検討での結論であった。他に利用できる既往の実データがなかったためである。

検討結果の信頼性を高めるには、多くの実データとの比較・検討が不可欠と思われる。今後のこの種の研究の発展のためにも、利用できる実データの蓄積は重要である。しかし、全衝撃波力に限らず、利用できる既往の実データは非常に少ない。同一地点での入射段波水位と全衝撃波力の経時変化に関する実データは皆無である。また、それらデータの精度も不明である。実データの蓄積(提供)ということも含め、著者の理論の妥当性に関する検討結果の信頼性を高めるためにも、実験を行う必要がある。

本研究は、ゲート急開流れの砕波段波衝突による衝撃波力の実験を行い、著者のその評価理論の妥当性の再検討と利用できる実験データの提供を目的とするものである。

2. 実験装置と方法

実験に使用した水路は高さ0.5 m、幅0.3 m、長さ11.0 mの水平に設置された鋼製矩

形水路で、水路下流側の10 m部分が両面ガラス張りのものである。ガラスの片面には、経時的流れ先端位置と空間波形読み取りのため、5 cm間隔のメッシュが刻まれている。ゲートとして、手動の引き揚げ式のもの(塩化ビニール樹脂製で、厚さ12 mm)が用いられた。水路下流端から6 mのところろに位置している。ゲート下流側水深調節のため、水路下流端に取り外し可能な堰も取り付けられた。また、波力測定には受圧板付きの、しっかりと固定できるL型鋼棒が用いられた。受圧板は塩化ビニール樹脂製で、大きさ $10 \times 295 \times 500$ mmである。L型鋼棒の諸元は断面 40×70 mm、固定時水平部長さ550 mm、鉛直部長さ970 mmである。波力の評価には、防水垂みゲージで鋼棒の歪みを測定し、それを力に換算する方法が取られた。つまり、全波力の測定が行われた。実験装置の概要を図-1に示す。

上述の波力測定法では波力計のキャリブレーションが問題となる。合波力の作用点が時間的に移動するからである。本研究ではそれを、バネ秤(秤量50 kg)を用い、全衝撃波力のピーク値付近(ほぼ一定値となる $t = 0.4$ s付近。図-4~9参照)に対してのみ行った。しかも、比較する理論モデル²⁾との整合性を考え、合波力(静水圧を除く)の作用点に対して行った。つまり、衝突壁がない時の、全衝撃波力ピーク時付近での入射段波水深 h の $1/2$ 点に対して行った。この結果からはピーク前の波力が過大評価されることになるが、本波力計では高々数%であることを確認した。図-2にキャリブレーション結果例(ゲート下流側水深 $h_0 = 0.02$ m、上流側水深 $h_1 = 0.4$ m)を示す。合波力の作用点は底

*秋田大学助手・鉱山学部土木工学科

面から 64 mm のところである。縦軸は載荷力で、横軸はペン・レコーダー記録紙上の変位量である。図中の前面・後面は歪みゲージの貼り付けられた L 型鋼棒（受圧板の取り付けられた鉛直部）の側面を示す。上流側が前面で、下流側が後面である。前面と後面の結果はほぼ同じで、直線性も非常に良い。他の実験ケースでのキャリブレーション結果も同じであった。

実験ケースは初期のゲート下流側流速 u_0 と h_0 を各々零と 0.02 m に固定し、 h_1 を 0.35 m, 0.40 m, 0.45 m とした 3 ケースである。ただし、測定は各ケースともゲート下流 $x = 3.87$ m と 5.05 m の 2 箇所で行われた。ゲート位置は $x = 0$ m である。

測定項目は全波力、段波衝突前後の壁面近傍での水面形、衝突壁前面 0.4 m と 1 m での入・反射段波の時間波形、衝突壁を取り除いた時の壁の据えられる位置での入射段波の空間と時間波形などである。段波衝突前後の壁面近傍での水面形の測定は段波衝突後に Cumberbatch 理論で想定されているような水面形となるかどうかの確認、鉛直方向に投げ出された流体塊の挙動の確認などのために行われた。衝突壁前面での入・反射段波の時間波形の測定は Stoker 理論⁴⁾ で予測される反射段波水深の妥当性の確認などのために行われた。これらの測定には、上述の波力測定装置の他に、モーター・ドライブ・カメラ（約 5 コマ/秒）と容量式波高計が用いられた。図-3 に波高計のキャリブレーション結果を示す。本実験ケースのように、 $h \geq 0.02$ m となる場合には直線性が非常に良いことが判断される。全波力と段波水位の経時変化の記録にはペン・レコーダーを用いた。

3. 実験結果と考察

段波衝突後の壁面近傍での水面形の一例を写真-1 (a), (b) と (c) に示す。 $h_1 = 0.40$ m, $x = 5.05$ m でのもので、各々段波

衝突直後 ($t = 0$ s), その後 0.2 s と 0.4 s での水面形である。写真中のメッシュは 5 cm 間隔で、右側が上流である。これらの写真より、鉛直方向に投げ出され、気泡を多量に含んだ先端部分を除けば、少なくとも $t = 0.4$ s くらいまでは Cumberbatch 理論で想定されているような水面形にほぼなっていることが判断される。

図-4 (a), (b) と (c) に、 $h_1 = 0.35$ m, $x = 3.87$ m での入射段波水位、全衝撃波力と衝撃波圧 p の経時変化に関する実験値（白丸）と理論値（実線）の比較を示す。ここで、理論における抵抗係数 K は従来の滑面開水路抵抗則での水深に、Stoker 理論⁴⁾ より計算される理想段波水深を用いて推定されている。その値はおよそ 0.002 である。以下の理論計算でのそれも、全て同じ方法で推定されている。滑面水路に対して、この方法が有効であることは確認済みである⁵⁾。また、衝撃波圧に関する実験値は入射段波水位と全衝撃波力の平均的な時間波形から評価されている。図-4 (a) と (b) 中の破線がその平均的時間波形である。これは同一段波で、しかも同一地点でのそれらの実験値が得られないこととなる便法である。図-4 (b) には二点鎖線で Stoker 理論による全静水圧が示されている²⁾。ちなみに、本実験での反射段波水深は Stoker 理論で予測されるそれより若干小さめの傾向であった。図-4 (b) と (c) 中の黒丸は理論的に計算された段波衝突時の全衝撃波力と最大衝撃波圧である²⁾。以上の諸記号の意味は以下の図でも同じである。

図-5 ~ 9 は各々 ($h_1 = 0.35$ m, $x = 5.05$ m), ($h_1 = 0.40$ m, $x = 3.87$ m), ($h_1 = 0.40$ m, $x = 5.05$ m), ($h_1 = 0.45$ m, $x = 3.87$ m), そして ($h_1 = 0.45$ m, $x = 5.05$ m) での入射段波水位、全衝撃波力と衝撃波力の経時変化に関する実験値と理論値の比較を示したものである。

これらの図によると、入射段波水位の経時変化に関する理論値と本実験値の一致度は、

Cross の実験値の時と比較して²⁾、良くなっている。特に、 $h_1=0.35\text{ m}$ と 0.40 m の時は $t=0.2\text{ s}$ までの水位の立ち上がり過程も良く一致している。理論値と Cross の実験値との不一致は気泡などのあまり含まれない、ほぼ一段段水深となる領域でも大きい²⁾。

$h_0=0.01\text{ m}$ 、その他は既述の条件と同一条件での付加実験を行ったところ、これと同じ傾向の結果が得られた。Cross の実験値はゲート下流側水深が約 0.006 m という非常に小さな条件で得られたものである。波高計の線形応答に必要な水深確保などという細工はなされていない。理論値と Cross の実験値との不一致は主に、波高計出力の線形性が十分に保たれていなかったためでないかと思われる

(本実験での波高計のキャリブレーション結果については図-3を参照)。

全衝撃波力の経時変化に関する本実験値は Cross の実験値と同じ傾向を示している²⁾。ただし、図-6(b)を除いて、どれも単調増加しており、Cross の実験値でのような緩いピークは見られない。 $t=0.5\text{ s}$ 付近での立ち上がりは、段波衝突後鉛直方向に投げ出された流体塊が落下してきた時に生じるものである。同じような立ち上がりは Cross の実験値でも見られる。ただし、その相対的大きさは本実験値に比べて少し小さい。本研究ではこの立ち上がりまでの波力を衝撃波力としている。実験値と理論値の一致度も比較的良好い。以上より、全衝撃波力に関する Cross の実験値はほぼ妥当なものと判断されよう。

衝撃波圧の経時変化に関する本実験値は全体的に Cross の実験値と同じ傾向を示している²⁾。しかし、最大衝撃波圧への立ち上がりが少し緩めの傾向にある。最大値の理論との一致度も、Cross の実験値の時と比べ、あまり良くない。この理由の一つに、本実験で動ひずみ測定器の感度を落し過ぎ、全衝撃波力の立ち上がりが緩慢になっていることが考えられる。その他として、実験データの整理方法の問題などが考えられよう。

4. むすび

ゲート急開流れの砕波段波衝突による衝撃波力の実験を行い、著者のその評価理論の妥当性の再検討と利用できる実験データの提供を試みた。本研究で得られた主要な結論は次の通りである。

1) 入射段波水位、全衝撃波力と衝撃波圧の経時変化に関する著者の評価理論の有効性が再確認された。

2) 全衝撃波力に関する Cross の実験値はほぼ妥当なものと判断される。

3) 同一地点での入射段波水位と全衝撃波力の経時変化に関する実験データの提供がなされた。それらの平均的時間波形を用いて、衝撃波圧の経時変化に関するデータの提供もなされた。ただし、最大衝撃波圧に関しては、あまり精度良い結果が得られていない。

謝辞：実験を行うにあたり、本学卒業研究生栗田純次君の助力を得た。記して謝意を表す。なお、本研究は昭和62年度文部省科学研究費自然災害特別研究(1)(研究代表者：首藤伸夫教授)と奨励研究(A)により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、Matsutomi, H. : On the propagation of a bore over a sloping beach, Coastal Eng. in Japan, Vol. 28, pp. 45~58, 1985.
- 2) 松富英夫・浅田 宏・檜岡善治：砕波段波衝突による波力の一評価方法，第34回海講論文集，pp. 522~525, 1987.
- 3) Cross, R. H. : Tsunami surge forces, Proc. ASCE, Vol. 93, WW4, pp. 201~231, 1967.
- 4) Stoker, J. J. : Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, 1975.

- 5) 松富英夫：下流側水深を有するダム破壊
流れ先端部の水面形，土木学会論文集，No.
375/II-6, pp. 161～170, 1986.

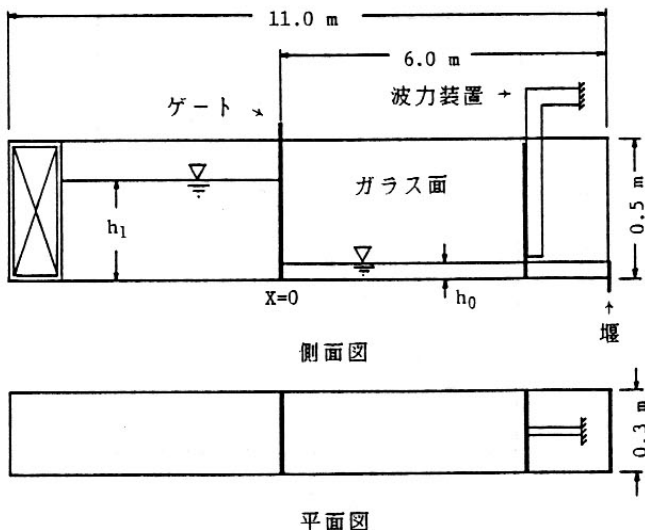


図-1. 実験装置

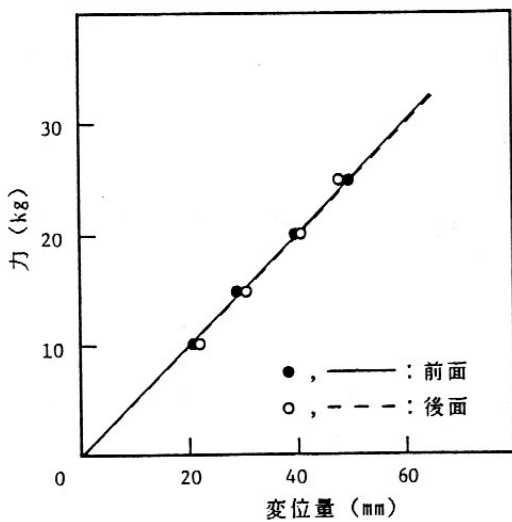


図-2. 波力計のキャリブレーション ($h_0 = 0.02 \text{ m}$, $h_1 = 0.4 \text{ m}$)

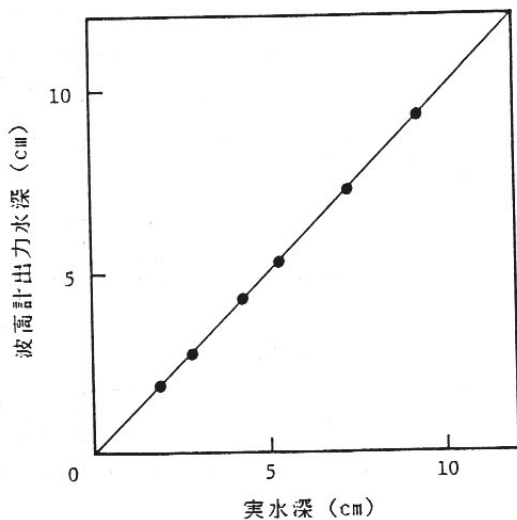
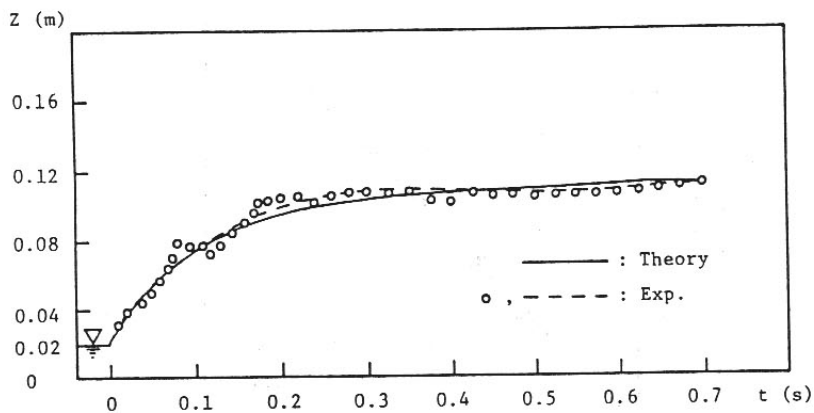


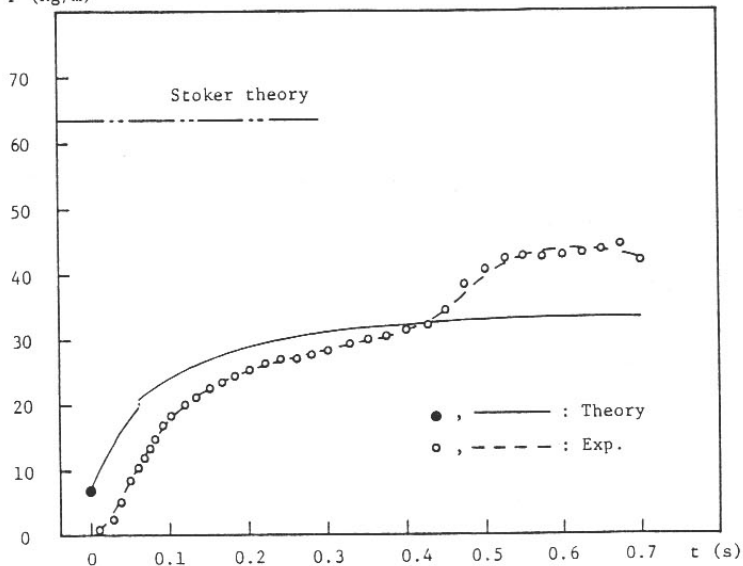
図-3. 波高計のキャリブレーション



(a) 入射段波水位の経時変化

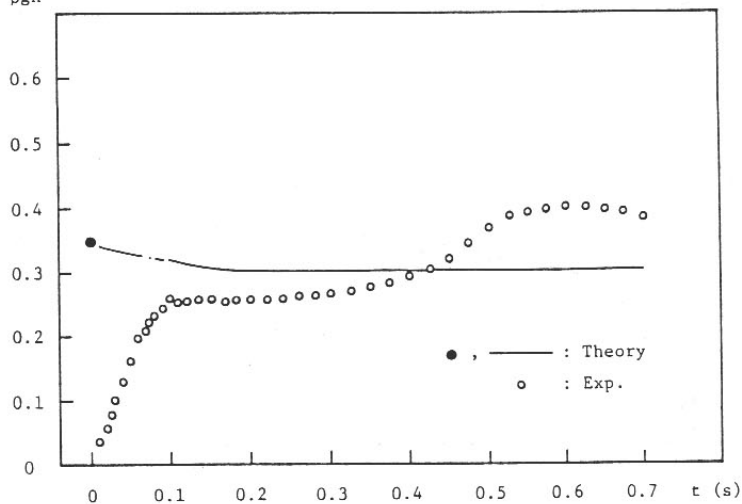
図-4. 実験値と理論値の比較 ($h_1 = 0.35$ m, $x = 3.87$ m)

F (Kg/m)

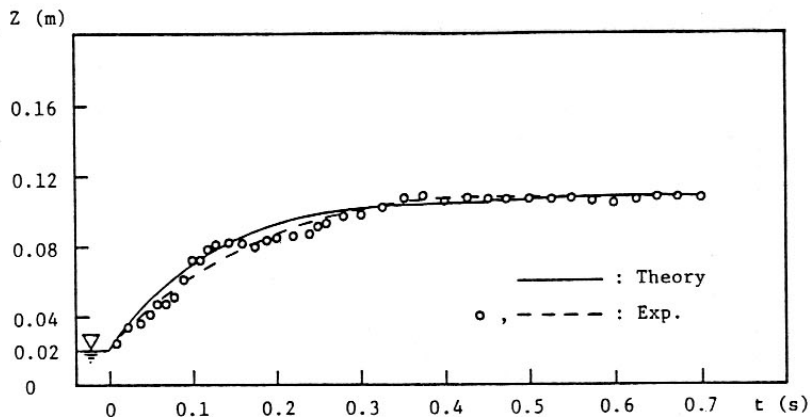


(b) 全衝撃波力の経時変化

$\frac{F}{\rho gh}$ (m)

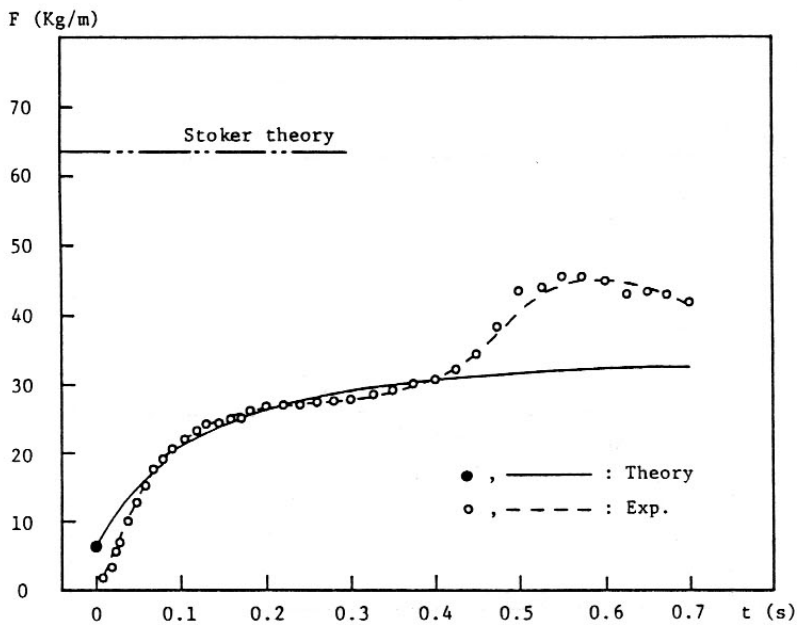


(c) 衝撃波圧の経時変化

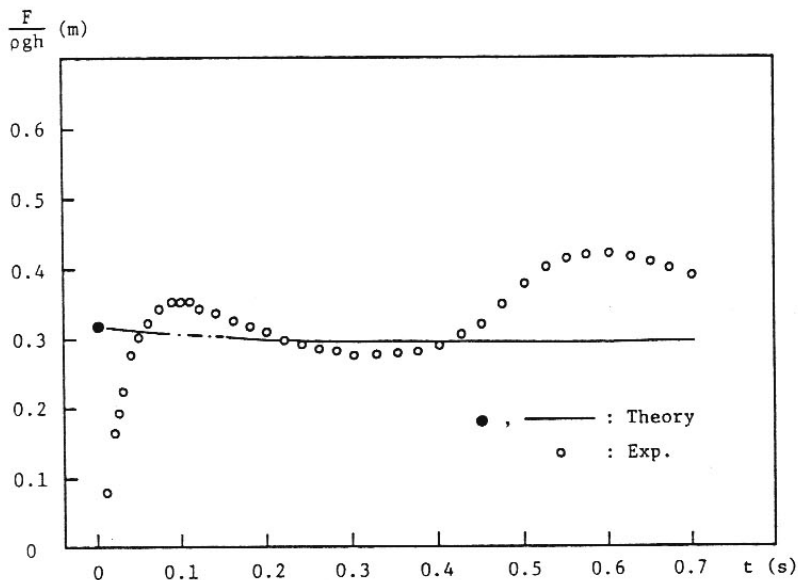


(a) 入射段波水位の経時変化

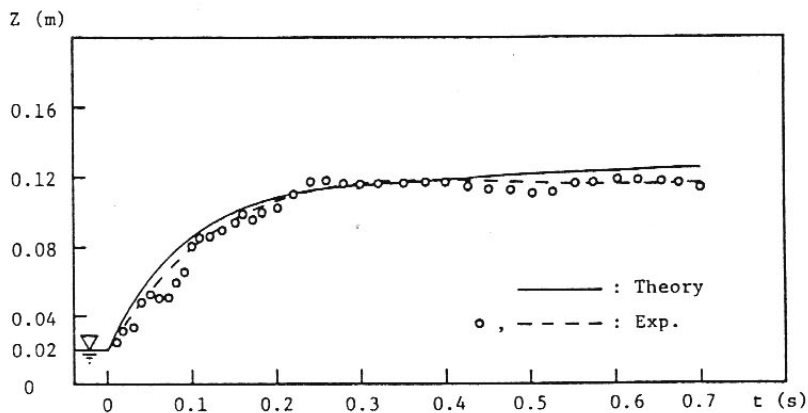
図-5. 実験値と理論値の比較 ($h_1 = 0.35$ m, $x = 5.05$ m)



(b) 全衝撃波力の経時変化



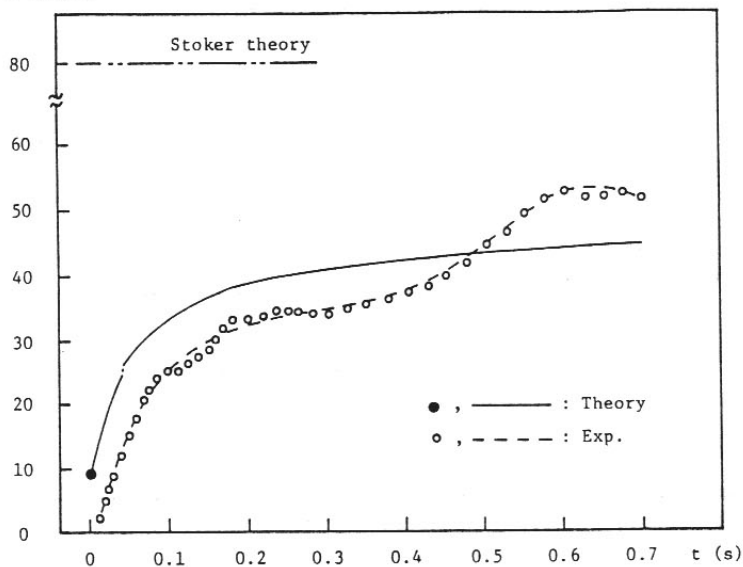
(c) 衝撃波圧の経時変化



(a) 入射段波水位の経時変化

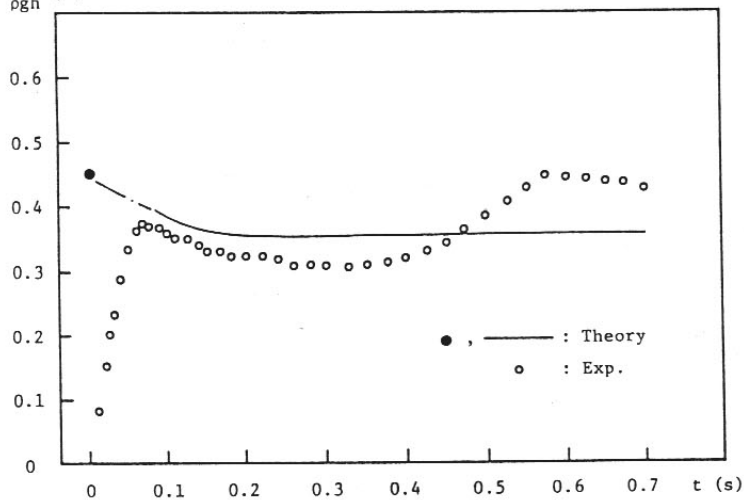
図-6. 実験値と理論値の比較 ($h_1 = 0.40$ m, $x = 3.87$ m)

F (Kg/m)

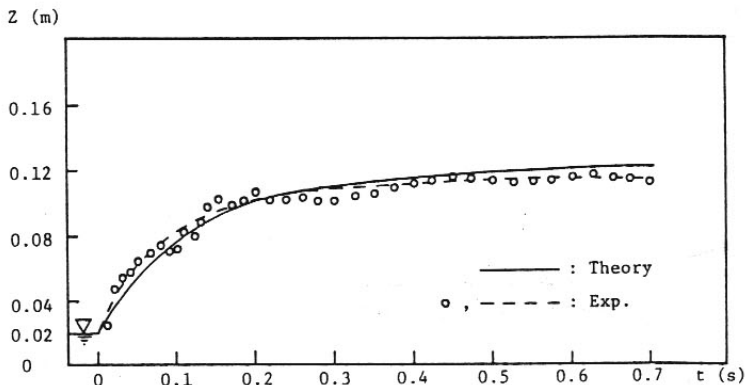


(b) 全衝撃波力の経時変化

$\frac{F}{\rho gh}$ (m)

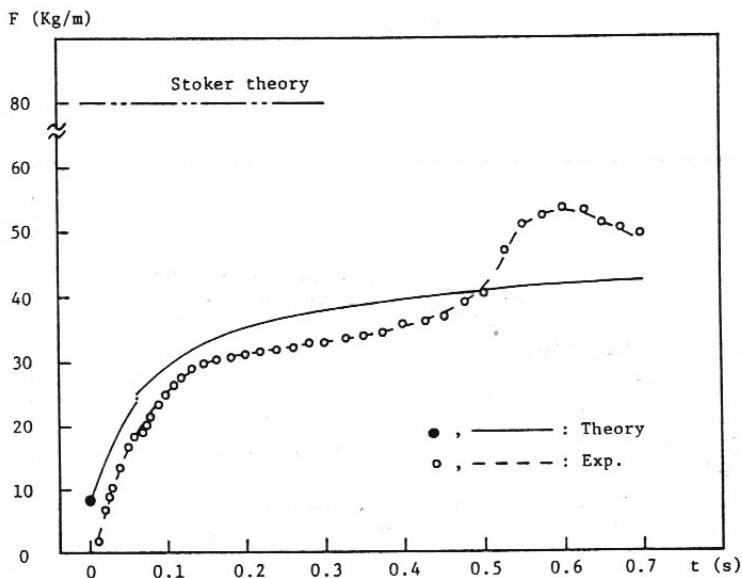


(c) 衝撃波圧の経時変化

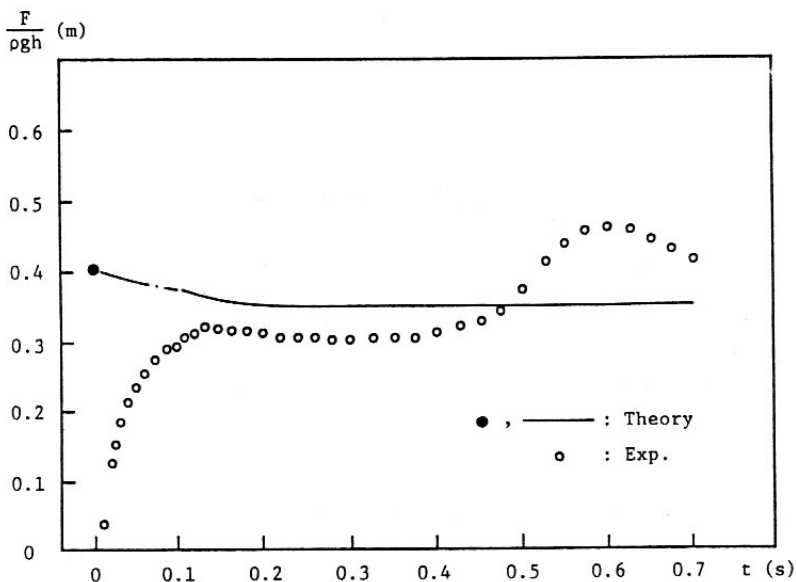


(a) 入射段波水位の経時変化

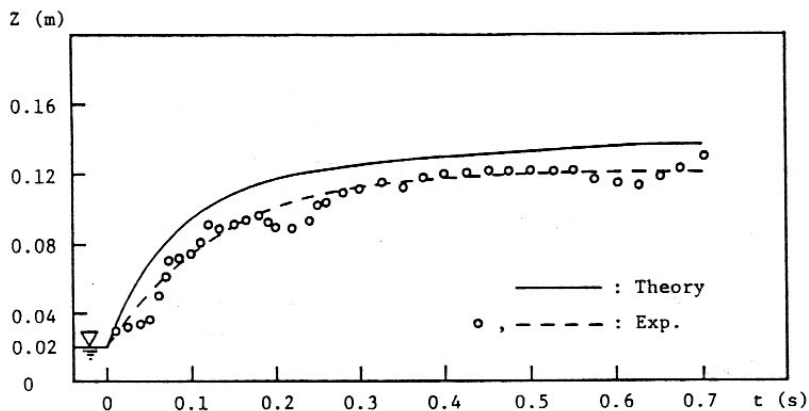
図-7 実験値と理論値の比較 ($h_1 = 0.40$ m, $x = 5.05$ m)



(b) 全衝撃波力の経時変化

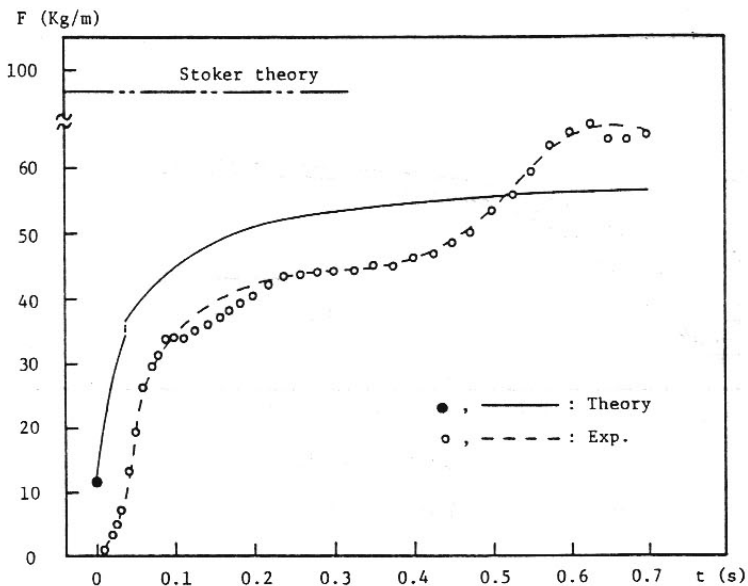


(c) 衝撃波圧の経時変化

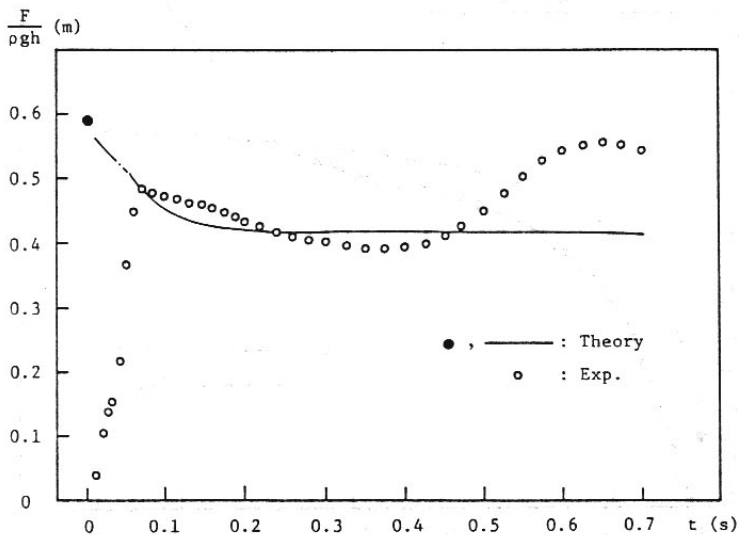


(a) 入射段波水位の経時変化

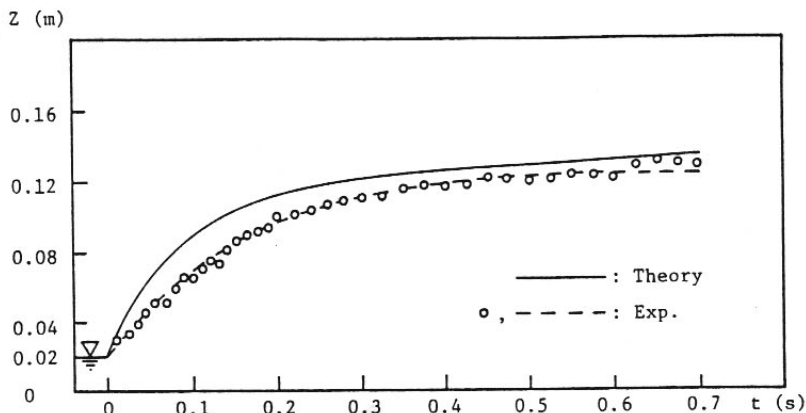
図-8. 実験値と理論値の比較 ($h_1 = 0.45$ m, $x = 3.87$ m)



(b) 全衝撃波力の経時変化

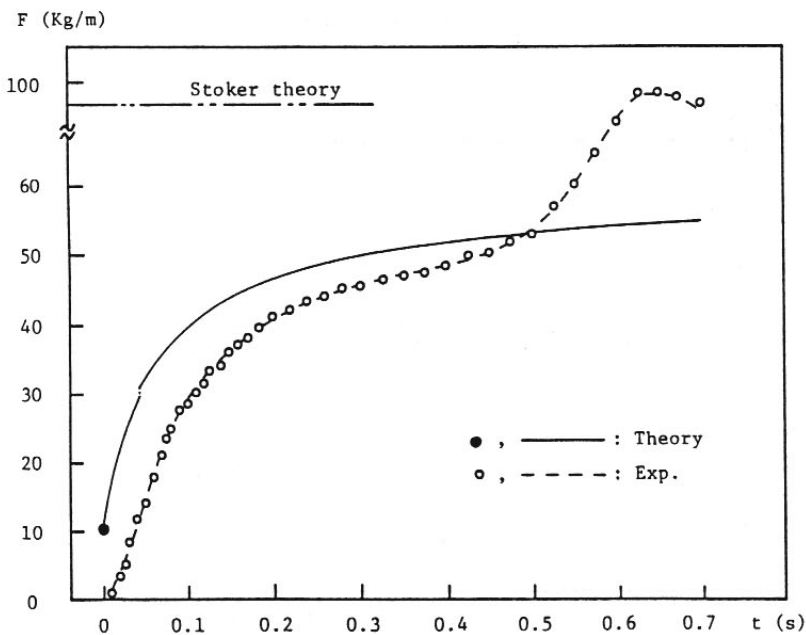


(c) 衝撃波圧の経時変化



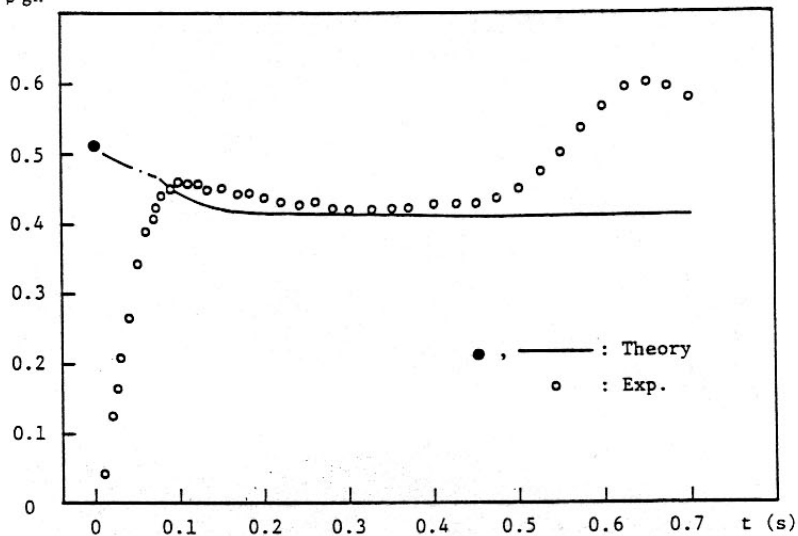
(a) 入射段波水位の経時変化

図-9. 実験値と理論値の比較 ($h_1=0.45$ m, $x=5.05$ m)



(b) 全衝撃波力の経時変化

$\frac{F}{\rho gh}$ (m)



(c) 衝撃波圧の経時変化

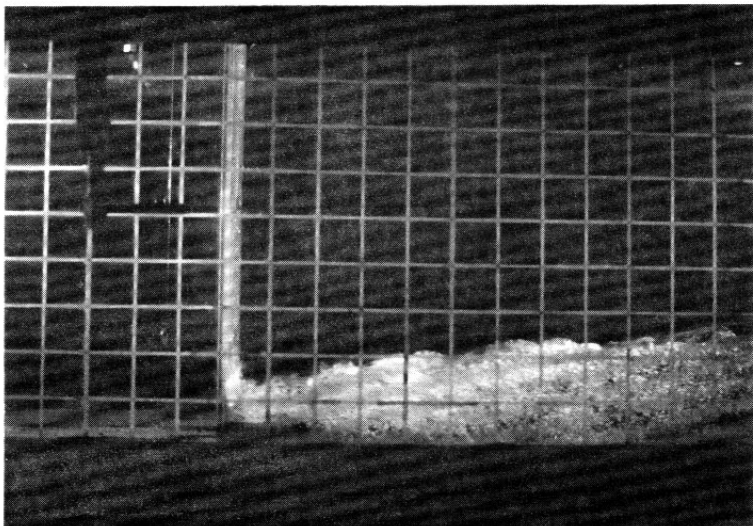
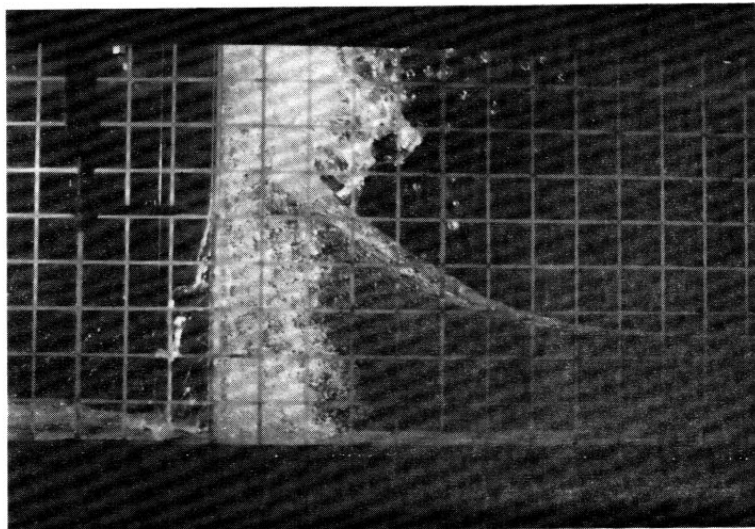


写真-1. 段波衝突後の壁面近傍での水面形
($h_1 = 0.40$ m, $x = 5.05$ m)

(a) $t \doteq 0$ s



(b) $t \doteq 0.2$ s



(c) $t \doteq 0.4 \text{ s}$