

矩形型潜堤上の碎波に伴う気泡混入過程に関する実験的研究

驚見 浩一*・渋谷 貴志**・細井 寛昭***・岩田好一朗****

1. はじめに

海岸構造物による碎波は波浪の静穏化や海浜の安定化を支配する重要因子である。特に碎波によって気泡が水塊内部へ混入する過程は、碎波機構の解明において極めて重要である。碎波に伴う気泡連行の特性に関しては種々の研究が行われ、渡辺ら (2000) は実海域における碎波に伴う気泡の生成・連行特性についてマクロ的に検討し、岩田ら (1987) は理論解析による気泡連行領域で碎波後の波のエネルギー変動を議論している。また、水谷・安田 (2000) は重力波の波峰前面に表面張力波により発生したと推測される‘くぼみ’を確認している。しかし、現在までにどのように気泡が水塊内に取り込まれて、波が碎けるのかという水面内部への気泡連行過程とその機構については、ほとんど議論されておらず依然として不明な点が多い。

そこで、本研究では海岸構造物として近年、その計画・施工例が増加している潜堤を取り上げ、その天端上での碎波現象を対象に超高速デジタルビデオカメラを用いた可視化水理実験を実施して、碎波に伴い水面内部に気泡が混入する過程について考究しようとするものである。

2. 実験装置の概要と実験条件

実験は図-1 に示す名古屋大学大学院工学研究科土木工学教室の片面ガラス張り 2 次元造波水槽 (長さ 30 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.9 m) を用いて、水深 $h=40$ cm の水平固定床上にアクリル製の不透過矩形型潜堤 (堤幅 $B=80$ cm, 堤高 $D=32$ cm) を設置して行った。碎波瞬時の気泡混入過程の可視化画像撮影には、撮影速度 4500 コマ/s の超高速デジタルビデオカメラ (フォトロン製: FAS-TCAM) を使用した。撮影領域 (縦 10 cm×横 10 cm) は図-2 に示すように潜堤天端上の碎波点に設けた。また、

撮影画像をより鮮明にするために撮影領域にはメタルハライドランプを照射した。撮影時間は超高速ビデオカメラが備えるハードディスク容量によって規定され、画像解像度を高く撮影速度を上げるほど短時間となる。具体的には画像解像度が縦 (256 pixel) × 横 (256 pixel) で、撮影速度が 4500 コマ/s, 2250 コマ/s の場合でそれぞれ 1.1 s 間, 2.2 s 間である。実験波は入射波高 $H_I=6.0$ cm, 周期 $T=0.80$ s の 1 種類の規則波であり、発生する碎波形式は Spilling 型碎波と Plunging 型碎波の中間の性質を持つ S-P 型碎波である。水槽のガラス壁面付近の碎波現象を撮影するため、ガラス壁面が流体に与える影響を極力少なくするために、ガラス面に撥水剤を塗装した。

3. 潜堤上の碎波に伴う気泡混入

3.1 気泡混入パターンの分類

碎波瞬時の気泡混入現象は極めて不安定な状態であり、造波開始時の静水状態・造波板の位置・微小な水深変化等により微妙に変化する。したがって、本研究では

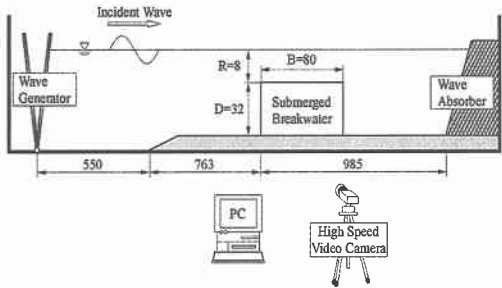


図-1 実験水槽概要 (単位: cm)

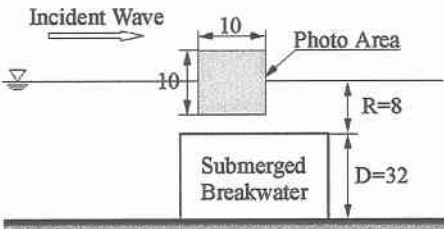


図-2 撮影領域 (単位: cm)

* 正 会 員 博(工) 金沢工業大学 講師 工学部 土木工学科
** 正 会 員 修(工) 五洋建設株式会社 四国支社
*** 学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻
(アメリカ合衆国 デラウェア大学留学中)
**** フェロー 工 博 名古屋大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻

碎波に伴う気泡混入過程を解明するために、前述の1種類の実験波を繰り返し造波させ、超高速デジタルビデオカメラを用いて碎波現象を撮影し、63ケースの気泡混入瞬時の画像を得た。まず、この撮影画像より気泡が波内部に取り込まれる形態・形状、すなわち気泡の混入パターンについて考究する。

図-3は進行波において気泡が波内部に混入する一連の過程を示しており、画像解析より気泡混入過程を大別すると3パターンになる。また、図-4は波峰前面の擾乱部からの気泡混入の3パターンを模式的に示している。気泡混入パターンは図-3(a)、図-4(a)のように、入射波の進行方向に対してほぼ水平方向に気泡が混入する場

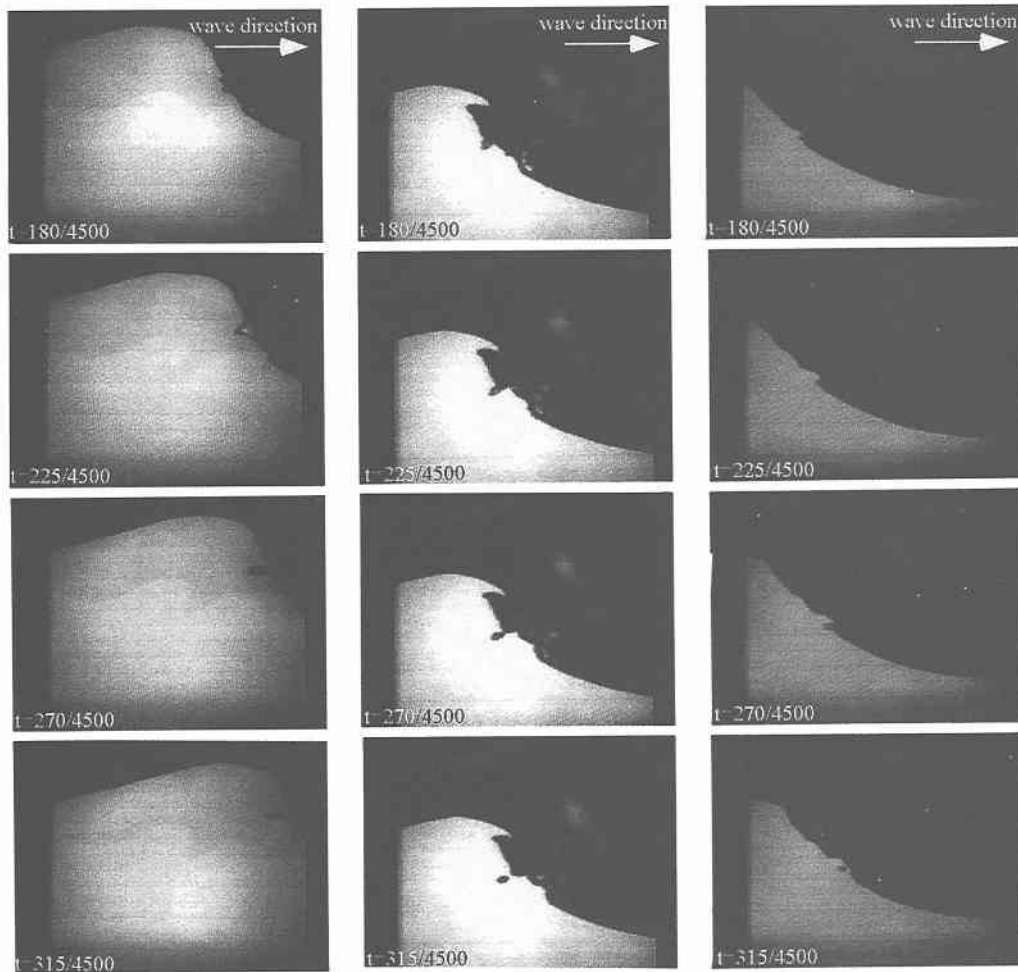


図-3 気泡の波内部への混入過程

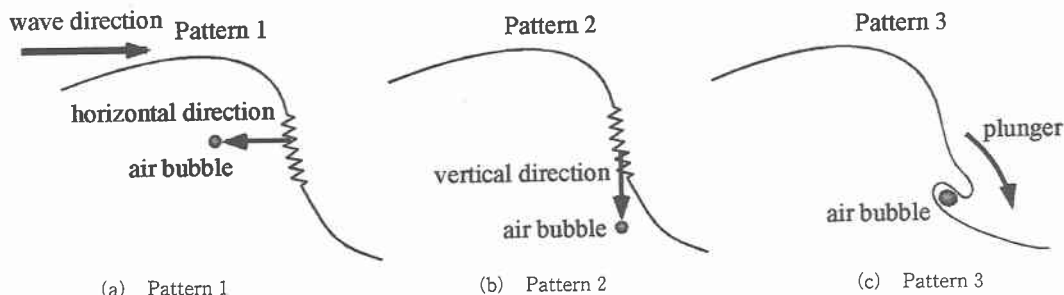


図-4 気泡混入パターンの模式図

合 (Pattern 1), 図-3(b), 図-4(b) のように入射波に対してほぼ鉛直下向きに気泡が混入する場合 (Pattern 2), 図-3(c), 図-4(c) のように波前面から微少な流体部分が飛び出し, この飛び出し部が気体を巻き込むようにして流体内部に取り込む場合 (Pattern 3) の三つである。気泡連行過程の撮影に成功した 63 ケース中, Pattern 1, 2, 3 の発生数はそれぞれ 33, 11, 19 ケースであり, Pattern 1 の気泡が水平方向に混入するパターンが最も多く確認できた。また, いずれの気泡混入パターンになろうとも波峰前面部では表面が凹凸となる現象は共通し, すべてのパターンで水表面の凹凸部 (擾乱部) から気泡の波内部への混入が発生している。気泡が流体内部に取り込まれるには, 波頂部付近から波面前脚部方向に発生する擾乱部が大きく寄与していると推察できる。したがって, 次節では気泡混入のメカニズムをこの擾乱域と関連付けて考究する。

3.2 気泡混入機構に対する考察

気泡連行過程を撮影した画像の解析から, 波峰前面に微少な擾乱部が形成され, この擾乱部から気泡が波内部に取り込まれることが判明した。そこで, 最も混入パターンの多かった Pattern 1 の気泡の取り込まれる挙動について, 擾乱部の生成に主眼を置いて既往の研究成果と関連付けながら考究する。

図-5 は進行波が潜堤天端上を伝播して碎波する状況, すなわち気泡が流体内部に混入する過程の連続空間波形を示している。なお, 撮影速度は $1/4500$ (コマ/s) で 15 コマ毎 (時間間隔 $\Delta t = 15/4500$ s) に図示しており, 波の進行方向は図面の左から右方向である。同図から, 潜堤天端上に伝播した入射波が急激な水深変化に伴い波峰が急峻化し, 力学的・運動学的に極限状態に至ることによって, 気泡が混入するという一連の波変形過程が確認できる。

図-5(a)~(g) では, 重力波前面の水面勾配が峻しい部分に擾乱波が確認できるが, 図-5(h), (i) では若干擾乱部がなだらかとなっている。これは流体内部の速度差に伴いせん断力が発生し粘性の効果によって, 重力波前面部の水表面の擾乱部が平均化されたためと推測できる。

図-5(b), (d) では波前面にそれぞれ顕著な変曲点 1 (Inflection point 1), 変曲点 2 (Inflection point 2) が発生するが, 波峰前面に存在する擾乱波は, この 2 点間でしか認められない。変曲点 1 は徐々に識別できなくなるが, 変曲点 2 は, 波の進行に伴い波頂部前面下部 (図-5(d)) から波面前脚部 (図-5(i)) へと移動している。図-5(k)~(m) において波形の変化に注目すると, 図中の矢印で示す部分の膨らみが次第に拡大しながら波谷に向かうと同時に, 膨らみの上方近傍でくぼみが発生し, く

ぼみから気泡が混入し始めることが確認できる。そして図-5(q)~(v) において波の進行に伴って, 気泡が流体内部に取り込まれる。この瞬間が進行波の潜堤天端上での碎波である (図-5(v))。

さらに図-5(m) において, 擾乱部 (変曲点 1, 2 の間) で発生しているくぼみについて詳細に検討する。図中の矢印部分の上方にくぼみが 2 つ存在している。その後, この 2 つのくぼみが大きな 1 つのくぼみへと結合する。これは 1.0 mm 程度の非常に微少な現象であり, ガラス壁面と水粒子の摩擦粘性の影響とも考えられるが, 2 つのくぼみが結合し大きくなることから, これら個々のくぼみが, 波としての性質を持っている可能性も十分にあると考えられる。

Perlin et al. (1993) は, 造波直後に波峰前面で観測されるこうした擾乱部を表面張力波と断定しており, その表面張力波は伝播してきたのではなく, 何らかの共鳴によって重力波内部から発生し, 表面張力波と重力波は, 互いにエネルギーの授受を行うと述べている。さらに表面張力波の波峰は, 重力波上ではほぼ静止していると述べている。本論で観測された擾乱部も表面張力波であると仮定し, これらの結果と比較すると, 重力波前面に発生する振幅が一度減衰し, 再び内部から発生するという点では一致している。しかし, 図-5(k)~(m) の気泡混入部の下方に存在する膨らみ (振幅) は波峰が平坦化し, 波長を長くしながら波谷へ向かって進行しており, この点は異なる。

また Clapper (1957) は, 重力を省略して表面張力の影響だけに限り厳密な数学的解を得た。これによると表面張力波の極限の波形は, 本論で確認された図-5(m)~(u) のように, 表面張力波 (くぼみ) の波谷のくびれが内面に向かって曲線同士接するような形状となっている。これは図-6 に例示するように, 撮影画像のくぼみ変形の一連の過程と酷似している。したがって, 気泡混入過程における擾乱部のくぼみの形成に表面張力が支配的なパラメータになっていると考えられ, 擾乱部のくぼみは表面張力波の発達により形成された可能性が高い。一方, 完全な気泡となる直前 (図-5(t), (u)) では, くぼみの上側から気体部分を覆い, 閉じ込める様子が観測できるが, これは表面張力よりも重力の影響が支配的であると推測される。

Longuet-Higgins (1995) は表面張力波の発生機構について理論解析より, 重力波の波形変化に伴って波峰前面に尖鋭な不連続性を生み出し, 非常に局所的な表面張力波を発生させ, この過程は表面張力波自身により発生する過度によって促進されるとしている。ここで表現される不連続性というのは, 本研究で確認された顕著な変曲点であると考えられる。前述のように 2 つの変曲点間で

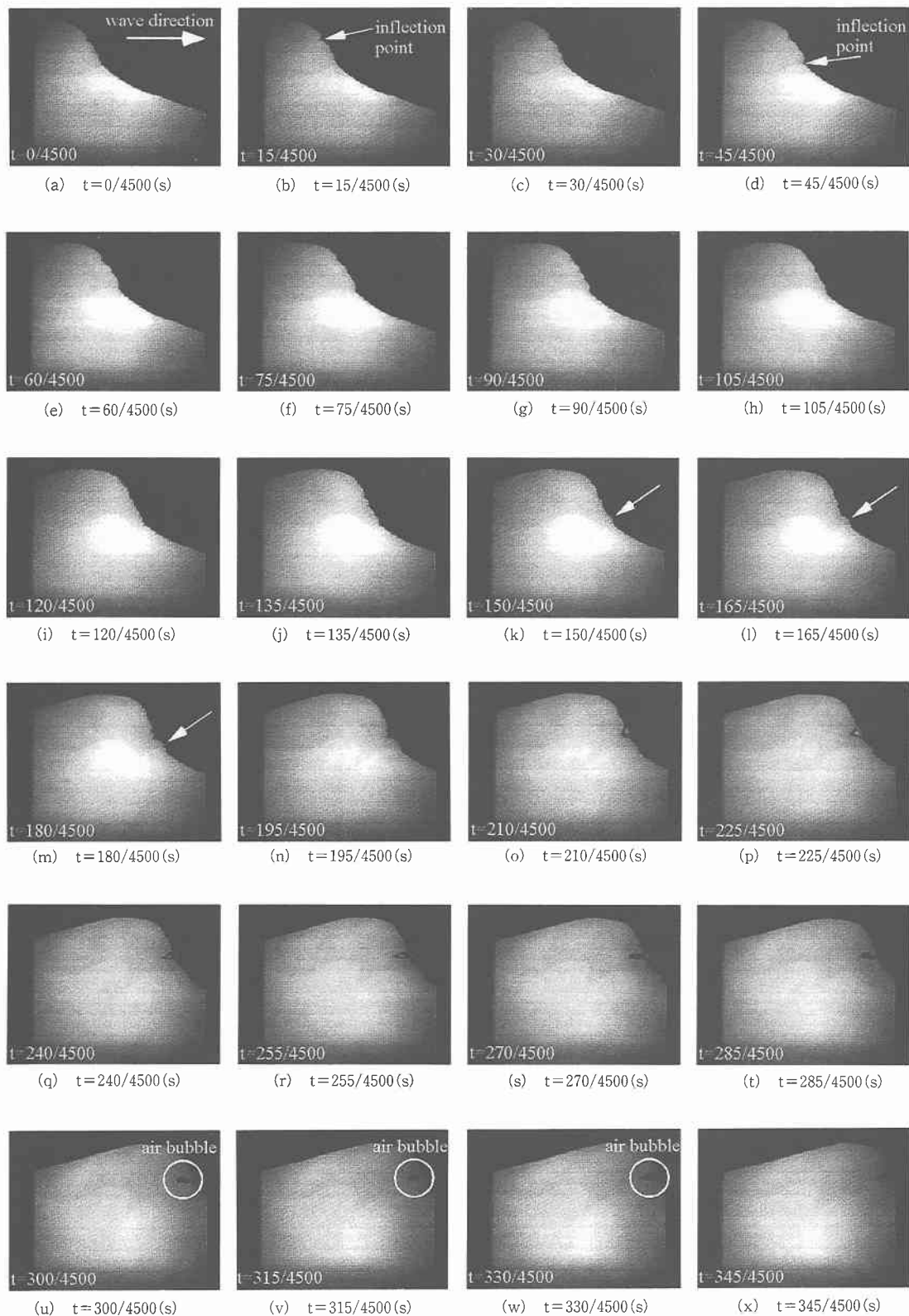


図-5 碎波に伴う気泡混入過程 (Pattern 1)

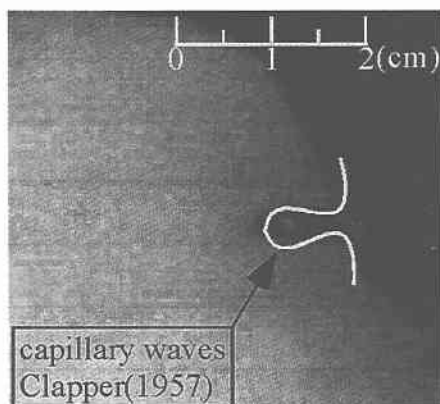


図-6 擾乱部での表面張力波 ($t=270/4500$ s)

のみ、擾乱が確認できることから、変曲点で発生した表面張力波はすべて他方の変曲点に向かって移動するか、もしくは静止していることになる。つまり、他方の変曲点を通過することなく変曲点1と変曲点2の間でのみ、粘性による減衰、または急激な圧力変化（密度変化）により反射すると考えられる。そして表面張力波によって発生した渦同士の干渉が、局所的な圧力低下をもたらし、気泡混入を助長することも考えられる。しかし、変曲点から表面張力波が発生するという根本的な機構の詳細は、不明である。

画像解析により判明した潜堤上の碎波に伴う気泡連行過程の実態は、水深の急激な変化によって波前面に顕著な2つの顕著な変曲点が発生し、2つの変曲点間で擾乱部が形成される。その後、擾乱部の2つのくぼみが1つのくぼみへと成長し、深くくぼみが空気の流体内部への混入を加速する。なお、これらのくぼみは波峰前面に発生した表面張力波であると推測でき、その表面張力波は水表面付近に渦を発生させ、発生した渦の相互干渉が流体内部に空気を取り込まれる現象に寄与していると考えられる。

4. 結 論

以上、本研究では超高速デジタルビデオカメラを使用して、碎波瞬時の波面変化と気泡形成状況を計測した。そして、重力波の波峰前面の擾乱部に発生するくぼみを

表面張力波と関連づけて考究し、さらに碎波に伴う気泡混入過程を既往の研究成果と比較して考察を加えた。気泡混入の機構は、碎波現象のメカニズムやエネルギー逸散機構を解明する上で非常に重要であるが、変曲点の発生原因、気泡混入位置・混入量等、不明な部分が多くこれらを明らかにするには、流体内部の詳細な流速測定が不可欠であり、今後さらなる研究が必要である。

以下に本研究で得られた主要な結論を要約する。

- 1) 波峰前面に微少な擾乱部が形成され、この擾乱部に発生するくぼみから気泡が波内部に取り込まれることが明らかになった。
- 2) 波峰擾乱部に発生するくぼみは表面張力波と推察され、表面張力波により表面付近に発生した渦の相互干渉が気泡の流体内部への混入に寄与していると考えられる。
- 3) 気泡の流体内部への取り込まれる過程は3種類のパターンに大別され、入射波の進行方向に対して水平方向と鉛直方向に気泡が混入するケースと気体が巻き込まれるように流体内部に取り込まれるケースであった。

最後に本研究は科学研究費（基盤(B)(1)、研究代表者岩田好一朗）により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・布藤省三・小山裕文 (1987): 碎波後の波動エネルギーに及ぼす連行気泡量の効果について, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 46-50.
- 水谷夏樹・安田孝志 (2000): リーフ上の孤立波の微笑碎波と崩れ波型碎波への遷移過程, 海岸工学論文集, 第47巻, 2000, pp. 151-155.
- 渡部靖憲・大塚淳一・佐伯 浩 (2000): 実海域における碎波に伴う気泡生成及び連行特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 131-135.
- Clapper, G. D. (1957): An exact solution for progressive capillary waves of arbitrary amplitude, J. Fluid Mech. 2, part6, pp. 532-540.
- Longuet-Higgins (1995): Parasitic capillary wave: a direct calculation, J. Fluid Mech. 301, pp. 79-107.
- Perlin, M.・Lin, H.・Ting, C-L. (1993): On parasitic capillary waves generated by steep gravity waves: an experimental investigation with spatial and temporal measurements, J. Fluid Mech. 255, pp. 597-620.