

潜堤による非線形波の分裂に関する数値解析

榊 山 勉*

1. 緒 論

波浪制御構造物として潜堤の利用に関心が高まり、透過潜堤、不透過潜堤や水平版を用いた潜堤など各種潜堤に関する研究が行われている。潜堤の効果の1つに波の分裂により周期を変化させる効果がある。不透過潜堤による波の分裂現象については数値計算により実験結果が再現されている(大山・灘岡, 1991)。透過潜堤については、磯部ら(1991)が鉛直積分した非線形波動方程式を誘導し適用しているが、精度向上の課題が残されているものと思われる。工学的には、透過潜堤の建設が中心であるために透過潜堤による波の分裂現象を精度高く評価できる計算手法の開発が不可欠である。著者ら(榊山ら, 1990, 1991)は透過性構造物を含む非線形波動解析手法としてポラスボディモデルを開発し、その適用性について報告した。本研究では、透過潜堤ならびに不透過潜堤の両者に本手法を適用し、潜堤による波の分裂現象について解析するとともに、水理実験により検証する。

2. 実験方法と実験条件

実験は幅 2 m, 長さ 50 m, 深さ 1.5 m の造波水路を用いて行った。図-1 に実験に用いた潜堤の形状を示す。海底勾配 1/15 の斜面上に不透過マウンド(水平床長さ 1.67 m)を作製し、この上に潜堤を設置した。潜堤の形状は1種類で、天端幅 0.40 m, 高さ 0.14 m, 法面勾配 2:1 とし、透過潜堤と不透過潜堤の2種類を用いた。透過潜堤は消波ブロック(空隙率 0.5)で、不透過潜堤はモルタルで作製した。

図-2 に波高計と電磁流速計(EMCM)の設置位置を示す。波高計10台を用いて入射波、一樣勾配斜面上ならびに潜堤周辺における水面変動と電磁流速計8台で各測定点の水深の 1/2 の深さの流速を測定した。

表-1 に実験条件を示す。規則波を対象に非碎波の範囲で、透過潜堤については周期 $T=1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 2.2$ s の6種類、不透過潜堤については $T=1.2, 1.7, 2.2$ s の3種類について波高各1種類ずつの

表-1 実験条件

CASE	T (s)	H_I (m)	h_I (m)	h (m)	h_T (m)	ε
P-10	1.0	0.047	0.59	0.20	0.06	透過潜堤 0.5
P-12	1.2	0.045				
P-15	1.5	0.056				
P-17	1.7	0.054				
P-20	2.0	0.056				
P-22	2.2	0.065				
I-12	1.2	0.045	0.59	0.20	0.06	不透過潜堤 0.0
I-17	1.7	0.054				
I-22	2.2	0.065				

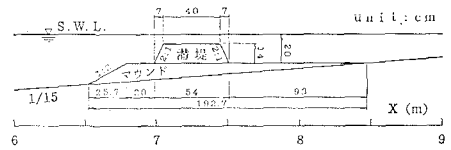


図-1 潜堤模型

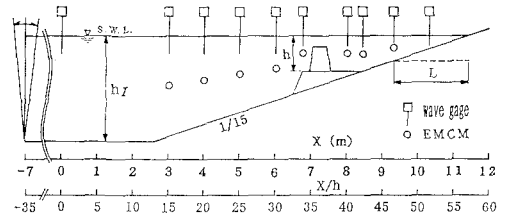


図-2 波高計、流速計設置位置

実験を行った(入射波高 $H_I=0.045$ m $\sim$ 0.065 m の範囲)。沖側の一樣水深部の水深は $h_I=0.59$ m, 潜堤設置水深 $h=0.20$ m, 潜堤天端水深 $h_T=0.06$ m で、天端幅水深比は $B/h=2.0$ である。

3. 数値計算手法と解析内容

数値計算は、基本的には榊山ら(1990, 1991)と同じ手法を用いた。本計算でのメッシュ間隔、時間ステップは、計算条件における最大周期($T=2.2$ s)の波速に対して、Courant 条件を満足する $\Delta x=0.02$ m, $\Delta z=0.01$

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所

m , $\Delta t = T/200$ とした. 計算領域は, 図-2 の $x=0$ m を入射境界にとり, $x=9.33$ m まで実線で示した地形に合わせ, これより岸側では周期に応じて破線で示されるように 1 波長分の水平床を設置した. 計算は潜堤周辺で定常状態が得られるまで行った.

透過潜堤の慣性力係数, 抗力係数は既往の成果 (榊山ら, 1990, 1991) を参考に定めた. 潜堤設置位置での進行波の最大流速 u_c と透過潜堤の径深 R で定義されるレイノルズ数 $Re = u_c R / \nu$ が, 本条件では $Re = 9 \times 10^2 \sim 1.2 \times 10^3$ の範囲にある. この範囲では, 抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M はほぼ一定とみなせるので, 計算では全て $C_D = 0.9$, $C_M = 1.5$ の値を用いた. C_D , C_M の影響を調べ, C_D 一定で C_M を変化させると反射波が変化し, C_M 一定で C_D を増加 ($C_D = 1.0$ から 3.0) させると若干透過波高が減少することを確認した. 透過防波堤の慣性力係数, 線形抵抗係数は周期, レイノルズ数により変化する (榊山・鹿島, 1991). しかし, 潜堤の場合には静水面近傍以上の波動運動の大きい場の影響を直接に受けないので防波堤ほど慣性力係数, 抗力係数に対する感度が高くないものと考えられる.

本計算条件では潜堤位置での波高水深比が $H/h = 0.3$ の非線形性の強い波を対象としている. その結果, 不透過潜堤の場合に周期が長くなると計算ができなくなる場合が生じた. これは潜堤の沖側法肩近傍で水位が低くなりメッシュ間隔が相対的に粗くなるためである. $H/h = 0.15$ の条件では計算できた. 透過潜堤についてはいずれの条件についても計算ができた.

4. 結果と考察

4.1 水面, 流速波形の計算結果の検証

図-3 に計算により得られた水面の空間波形の時間的变化を CASE P-15 (透過潜堤, 周期 $T = 1.5$ s) について示す. 座標は潜堤設置水深 $h (=0.20$ m) で無次元化して表した. これより, 潜堤を通過しながら分裂する様子, 基本周波数成分と分裂した高周波数成分の伝播速度の違い, さらに, 基本周波数成分が高周波数成分を追い越していく様子がみられる.

図-4 は図-3 の計算結果から, クレスト, トラフ, 平均の各水位を実験結果と比較したものである. クレストとトラフの水位については, 潜堤沖側の部分重複波領域と潜堤岸側の波の分裂により波高分布が変化する領域とともに, 計算結果は実験結果と良好に一致した. 平均水位は計算結果のほうが低めの値となった.

図-5 に同じく CASE P-15 の水面波形の計算結果と実験結果との比較を示す. 潜堤周辺の 5 測点の水位変動について示した. 両者の比較は, 図-5 (a) $x/h = 30$ での水面波形のクレストの位相を一致させて行った.

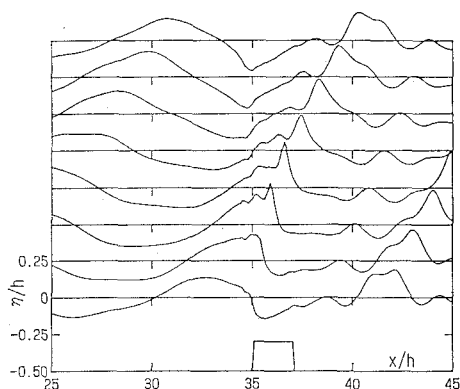


図-3 水面波形の時間的变化 (CASE P-15, $\Delta t/T = 1/8$)

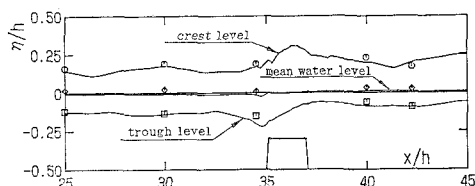


図-4 クレスト, トラフ, 平均水位の実験結果と計算結果との比較 (CASE P-15)

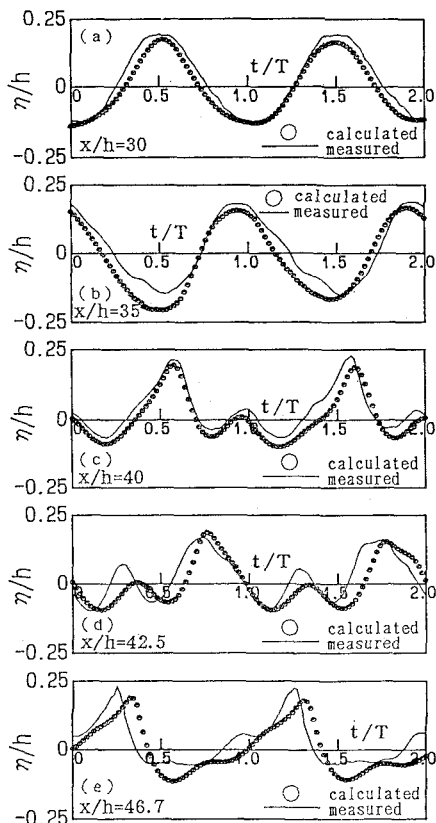


図-5 水面波形の計算結果と実験結果との比較 (CASE P-15)

潜堤沖側の部分重複波領域では計算結果のほうがクレスト近傍で僅かに尖る傾向がある。岸側では、潜堤上で励起された高周波数と基本周波数の自由波の重合により水面波形に空間的な変化が生じる。若干の位相のずれがあるものの、計算結果は各測定点での波形の変形まで実験結果と良好に一致している。

図-6 から 図-8 は各々 CASE P-17 (周期 $T=1.7$)、CASE P-20 ($T=2.0$ s), CASE P-22 ($T=2.2$ s) の結果を、潜堤前後の各 1 測定点での波形を比較したものである。周期が長くなるにしたがって、波の分裂個数は 2 個から 3 個と高周波数成分が顕著になる。計算結果の高周

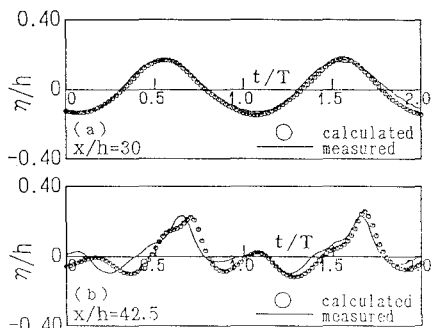


図-6 水面波形の計算結果と実験結果との比較 (CASE P-17)

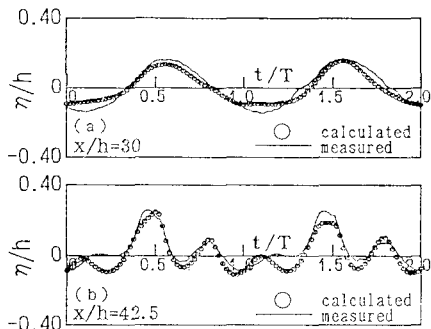


図-7 水面波形の計算結果と実験結果との比較 (CASE P-20)

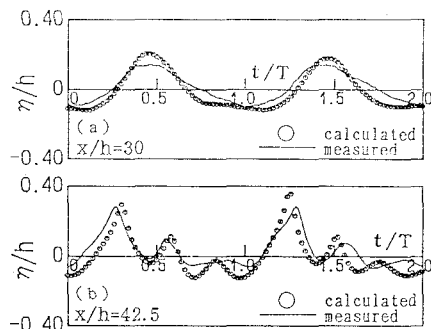


図-8 水面波形の計算結果と実験結果との比較 (CASE P-22)

波数成分は実験結果より若干過大になっているが、分裂の個数ならびに水面波形とも各条件で良好に一致した。

CASE P-10, CASE P-12 の周期が短い計算結果では実験結果との一致は上記の結果ほど良好ではなかった。特に、 $T=1.0$ s の計算では波の分裂が生じなかった。これは差分メッシュと高周波数成分との関係で数値減衰によるためであると思われる (田中, 1978)。正村ら (1991) は差分間隔の大きさによる潜堤背後の波の分裂現象の再現性の相違を示し、同様の結果を得ている。今回の差分メッシュ間隔では周波数 $f=1.7$ Hz 程度から高周波の波動運動に減衰の影響が生じた。差分メッシュを細かくとることおよびスキームの改良を図ることによって高周波数成分の波動運動を精度良く計算できるものと思われる。

図-9 は CASE P-17 の流速波形を比較したもので、図-6 の水面波形に対応する。流速は水深の 1/2 の深さで測定したものであるために、実験、計算結果の両者の流速波形には、水面波形にはみられた分裂波の高周波数成分の変動がみられない。

図-10 に CASE P-17 の流速ベクトルの経時変化を、 $T/4$ 間隔で $T/2$ 間について示す。図-10 (a) で潜堤上で波形が切り立ち、図-10 (b) で波が潜堤を通過しながら分裂し、図-10 (c) で基本周波数成分と高周波数成分波が異なる位相速度で伝播する様子がわかる。また、同図では潜堤岸側斜面上での渦の発生が再現されている。

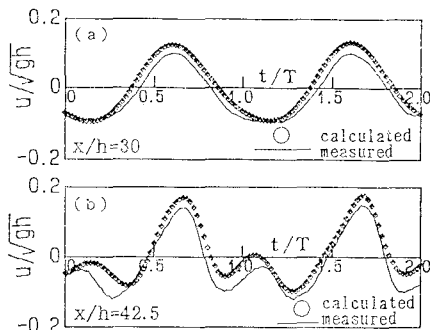


図-9 流速波形の計算結果と実験結果との比較 (CASE P-17)

4.2 透過性潜堤と不透透性潜堤との比較

透過潜堤と不透透性潜堤による波の分裂の違いを調べた研究は少ないため、両者の比較を行い以下に考察を加える。

図-11 は、(a) CASE P-12 と (b) CASE I-12 の計算結果から同時刻の流速ベクトル図を比較したものである。不透透性潜堤の方が潜堤上で水深が浅くなるために非線形性の影響を受け波形が尖る傾向にある。逆に、透過潜堤の方が水深が大きいために、波速が大きく波形が

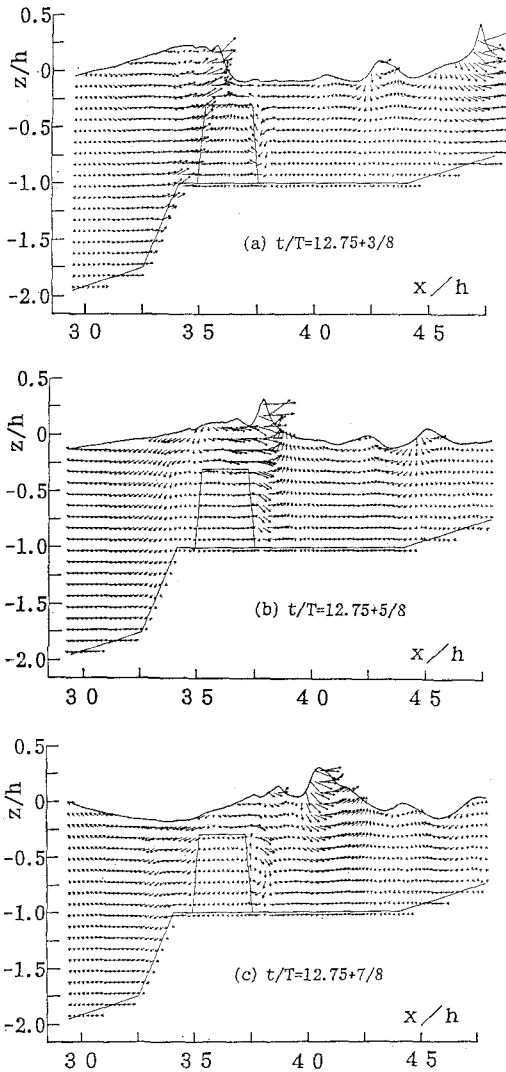
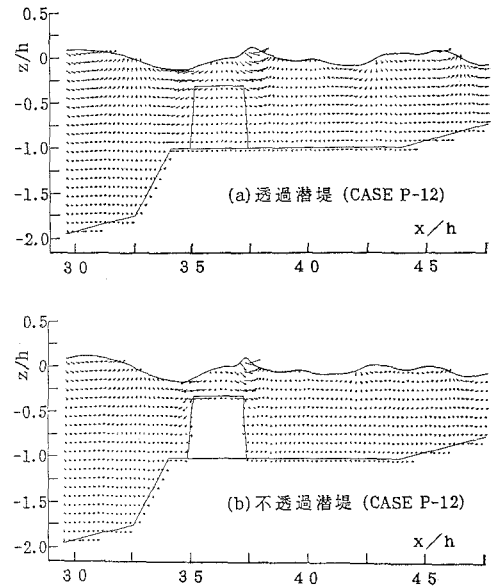

 図-10 透過潜堤による非線形波の分裂の数値計算例
(流速ベクトル, CASE P-17)


図-11 透過, 不透過潜堤による波の変形計算結果の比較

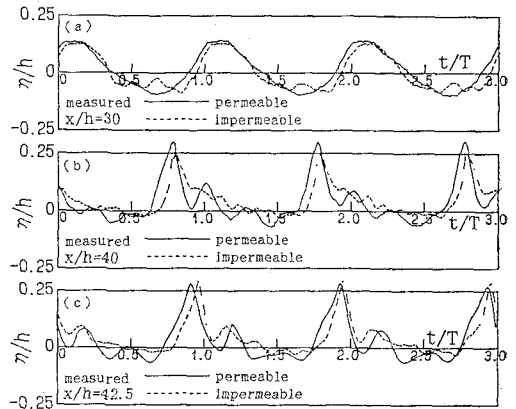


図-12 水面波形の比較 (実験結果, CASE P-22, CASE I-22)

進んでいる。

図-12 は実験結果の分裂前後の水面波形を CASE P-22 と CASE I-22 で比較したものである。破線で示した不透過潜堤の沖側の波形にみられるトラフでの微小な水位変動は反射波の影響である。透過潜堤では、場所的な変化は不透過潜堤ほどみられない。透過潜堤と不透過潜堤を比較しても両者の差は著しくないようである。

図-13 に 図-12 の潜堤岸側 2 測線の水面変動の周波数スペクトルを示す。但し、縦軸は透過波の基本周波数成分のピーク値 S_1 で、横軸は基本周波数 f_0 で無次元化した。ピーク値 S_1 の値自体は透過潜堤の場合の方が大きい。透過潜堤でのエネルギー減衰があっても、不透過潜堤の方が反射率が大きいためである。拘束波と自由波のそれぞれの高周波数成分の区別はできず、3 倍周波

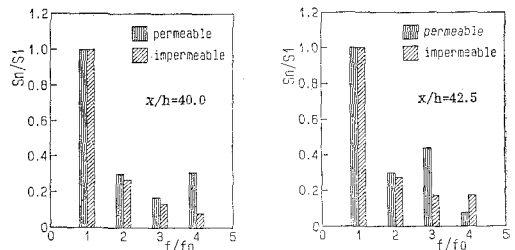
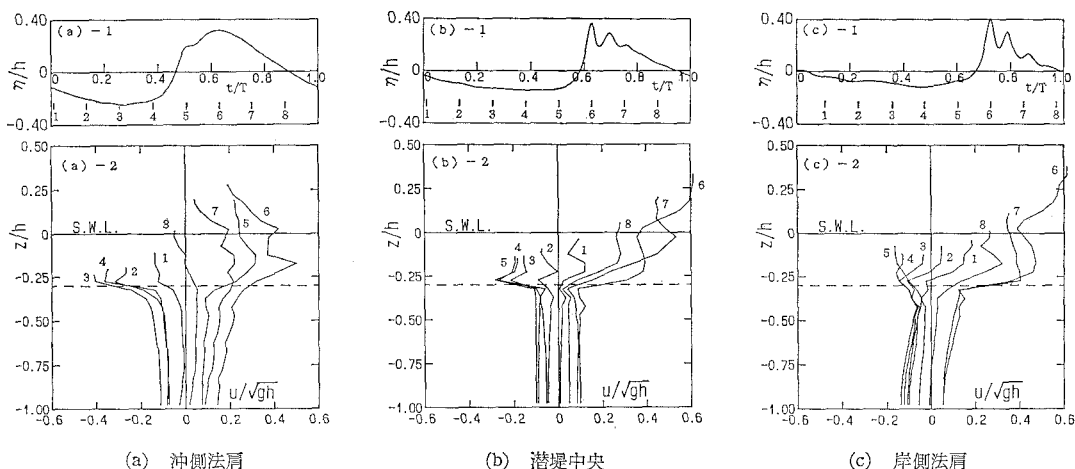

 (a) $x/h=40$ (b) $x/h=42.5$

 図-13 透過波のパワースペクトルの比較
(実験結果, CASE P-22, CASE I-22)

数成分以上で場所による違いがみられるものの、透過、不透過潜堤で基本周波数成分と 2 倍周波数成分の比はほとんど差がみられない。



図—14 透過潜堤上の水位変化と流速鉛直分布

この結果は、不透過潜堤では潜堤上で水深が小さくなるが、反射波が大きく透過波のエネルギーが減少するのに対して、透過潜堤ではエネルギー減衰があるものの透過波のエネルギーが大きいのであるものと考えられる。

4.3 透過潜堤上の水位変動と流速分布

図—14 は潜堤の沖側法肩、中央、岸側法肩の3箇所における水位変動と水平流速成分 u の鉛直分布の計算結果を CASE P-22 (周期 $T=2.2$ s) について示したものである。ただし、流速の鉛直分布は上段の水位変動の図中の番号で示される位相に対応し、それぞれの場所で水位が最大となる位相 (図中の番号6) を含み時間間隔 $T/8$ 毎に示した。水位変動の空間的变化が明瞭に現れ、潜堤上で分裂する様子が観察される。沖側法肩では正負両方向に同程度の流速が生じる。また、潜堤中央の潜堤内部の流速分布は鉛直にはほぼ一様で、流速は小さい。潜堤内部を透過するにしたがって流速が減衰することや、潜堤上の外側の流速に比較して内部の流速は小さく、透過潜堤内部での流体運動が小さいことが推察できる。このことは、透過潜堤と不透過潜堤による波の分裂現象に著しい違いがみられなかったことを説明するものである。

5. 結 語

本研究では、ポラスボディモデルを用いて潜堤による波の分裂現象を数値計算により再現した。種々の周期について計算を行い、実験結果との比較より、透過潜堤に対して精度良く計算できることが検証された。特に、長周期の波に対して、相対的に潜堤幅が小さくなくても非線形性のために波の分裂が顕著に生じることが数値計算によっても再現できた。不透過および透過潜堤による

波の分裂に関しては、両者に著しい差がみられなかった。これは、透過潜堤内の流体運動が小さいためであることが数値計算結果より明らかになった。また、潜堤による波の分裂現象の数値計算を行う場合には、対象とする現象の周波数が高くなるために差分間隔をより細かく取る必要があることが確認された。

最後に、本研究をまとめるに当たって、東京大学渡辺晃教授ならびに磯部雅彦教授には、数々の貴重な御意見を賜りました。また、海岸工学委員会現況レビュー小委員会 WG2 で計算結果を話題提供し、メンバーの各位に討議して頂きました。さらに、計算には(株)電力計算センター岡本直樹氏、図面作成には(株)八重洲土木技術センター吉岡武男氏と(株)CRS 千代大介氏に協力して頂きました。ここに、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・芝 和彦・Eric Cruz Cruz・渡辺 晃 (1991): 透過潜堤による非線形波浪変形について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 551-555.
- 大山 巧・藤岡和夫 (1991): 数値波動水槽を用いた潜堤による波の分裂現象の解析, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 16-20.
- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1991): ポラスボディモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動場解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.
- 榊山 勉・鹿島遼一・阿部宣行 (1991): 傾斜堤周辺の波動場解析へのポラスモデルの適用性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 546-550.
- 榊山 勉・鹿島遼一 (1991): 透過性構造物内の分散関係式に関する一考察, 第46回年次学術講演会概要集 2, pp. 868-869.
- 田中伸和 (1978): 数値シミュレーションを用いた開水路水理解析法に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 87 p.
- 正村憲史・藤岡功司・林健二郎・重村利幸 (1991): 潜堤上の波の変形に関する数値解析, 第46回年次学術講演会概要集 2, pp. 962-963.