

潜堤周辺における海浜流場の発達機構

下園武範*・佐藤慎司**・磯部雅彦***

潜堤周辺には様々な波の変形要素を含む複雑な重合場が形成されるとともに、大きな水位変化と強い海浜流場を生じることが知られている。潜堤の設置にあたっては、このような波の二次量にも十分に配慮する必要があるが、潜堤周辺における波・流れ場の特性は十分に理解されていない。本研究では、堤長および設置間隔をパラメータとした水理模型実験を通して、潜堤周辺における波・流れ場の特性と発達機構を明らかにした。また、数値モデルによる検討では、波・流れの相互干渉が重要な役割を演じていることを示した。さらに波・流れ場が不安定となる条件を示した上で、その成因を議論した。

1. 序 論

広い天端を有する潜堤が、人工リーフと称して現地に適用されるようになって久しい。潜堤は没水型構造物であるため環境への阻害要因が比較的少ないという利点を有する反面、様々な波の変形要素を含む複雑な重合場を生じる。加えて、急激な流体運動の変化を強いる構造物であるゆえ、代償としての水位変化や海浜流場といった平均的な運動が波の運動に対して大きく、両者の相互干渉が起きる。潜堤背後での水位上昇と堤外への発散流の発生は古くから指摘されてきた問題であり、潜堤を設置するにあたっては波浪減衰だけでなく、その結果として生じる二次量を適切に評価する必要がある。しかしながら、これまでの潜堤に関する研究の中心は造波水路による 1 次元的な検討であり、波・流れ場の平面的な特性には未だ不明な点が多い。特に海浜流場については、宇多ら (1987) によるフロート追跡に基づいた流況パターンの分類に留まっており、その定量的な特性や発達機構は十分理解されていない。

本研究では、潜堤周辺に生ずる平面的な波・流れ場の特性とその発達機構を明らかにすることを目的として、水理模型実験および数値計算による検討を行った。

2. 模型実験の概要

実験は図-1 に示す幅 11 m、長さ 6 m 平面造波水槽の一樣勾配部 (勾配 1/20) で行った。水槽内にコンクリートで作製した不透過潜堤模型を設置し、図-2 に示すように導波板によって仕切られた潜堤一基の左半分を計測対象領域とした。導波板は薄い金属でできており、端部で発生する擾乱波の影響を避けるため沖まで延伸している。波を直入射させる限りにおいて、当該領域は潜堤を一定

間隔で沿岸方向に無限に並べた状態と等価であるとみなすことができる。実験に用いた入射波の波高は $H = 3.2$ cm、周期は $T = 1.0$ s で汀線に対して直角に作用する。数ある形状・配置に関するパラメータのうち堤長 L と設置間隔 G を変化させながら周囲に生ずる平面波浪場及び海浜流場を調べた。その他のパラメータについては図-2 および図-3 に示すように離岸距離 84 cm、天端幅 30 cm、天端水深 1 cm に固定した。波浪場は、領域内に 8 cm のメッシュ状に測点を配置し、各点での水面変動を互いに同期しながら容量式波高計により計測した。海浜流場については、粒子追跡に基づく計測システムを適用した。このシステムは著者らが海浜流場に対して開発したものであり、詳細については下園ら (2004) を参照されたい。トレーサー粒子としては、トラフ下の流れ場を対象とするため水よりもわずかに重い、比重 1.05、直径 5 mm のプラスチック球を用いている。表-1 に実験条件を示す。Case1~Case6 が順に堤長を大きくした場

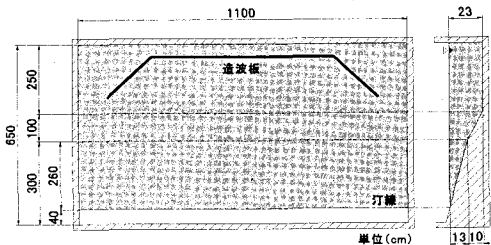


図-1 平面造波水槽

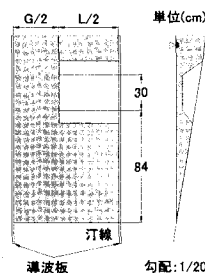


図-2 計測領域

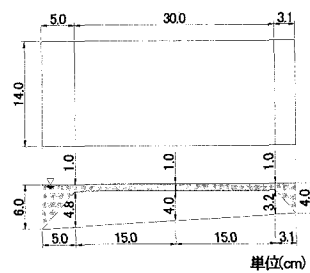


図-3 潜堤模型

* 学生会員 工博 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
** 正 会 員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科
社会基盤学専攻
*** フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻

表-1 実験条件

	堤長 L (cm)	設置間隔 G (cm)	G/L
Case1	28	28	1.00
Case2	56	28	0.50
Case3	84	28	0.33
Case4	112	28	0.25
Case5	140	28	0.20
Case6	168	28	0.17
Case7	84	14	0.17
Case8	84	42	0.50
Case9	84	84	1.00

合の組合せあり、Case7, Case3, Case8, Case9は順に開口幅を大きくした場合の組合せである。

3. 実験の結果及び考察

(1) 波 浪 場

図-4に全てのケースについて波高分布を計算した結果を示す。汀線付近の水深の小さい領域では波高計を挿入できないため、図-4の $Y=0$ cmは静水汀線から10 cm だけ沖側の位置となっている。沖から到来した波は潜堤沖端で一部反射するとともに、岸に向かって碎波する。そして潜堤を透過した成分は、開口部から潜堤背後へと進入する円筒波状の成分と重合する。この両者には波速の違いによって位相差が存在している。そのため堤長や開口幅によって、両者の位相関係が変化するため各ケースで潜堤背後での重合の様子が大きく異なっている。

図-5はCase3における潜堤沖側の領域で計測した水面変動データから、隣接する計測点間で波峰到達時間の差を求め、幾何学的に波速を算出してベクトル表示したものである。上述のとおり潜堤背後では複数の成分が存在するため、一意に波速が定義できないものの、潜堤沖側では単一の波峰しか存在しないため容易に対応付けができる。図-5から潜堤沖側から開口部へ向かって波が集中していることが分かる。これは図-6に概念図として示したように、後述する潜堤端部を中心とした時計回りの強い循環流の影響で波が屈折するためであり、すべてのケースに共通して見られる。そのため開口部の波は外側に向かって進行し、壁面で反射あるいは沿い波となって潜堤背後へと進行するため、通常の防波堤における回折とは様子が異なる。ここで壁面での反射とは、鏡像成分の領域内への進入を意味することに注意されたい。鏡像成分と交差する領域にはエネルギーが集中する極大点が存在し、通常はこれが開口部での碎波点となる。この点は、堤長が大きくなるほど沖側に移動するが、これは開口部での沖向き流れが強くなるためである。一方、設置間隔を大きくした場合には逆に岸側へと移動し、より広い範囲のエネルギーが集中するため波高の増幅も大きくなっていることが分かる。

各ケースの波浪減衰効果を考える場合、透過率をどの

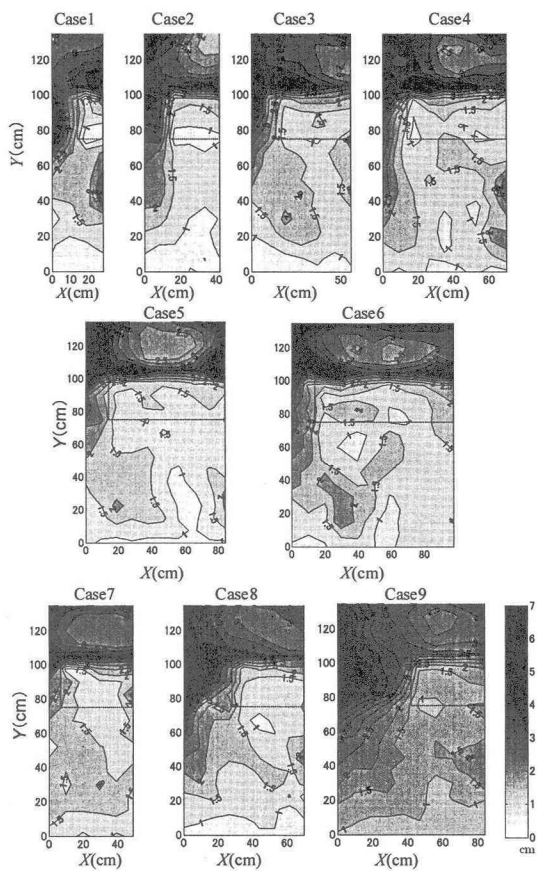


図-4 潜堤周辺の波高分布

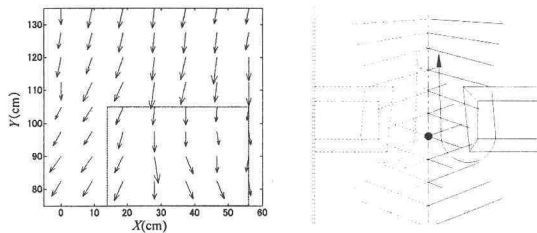


図-5 潜堤沖側での波速ベクトル 図-6 循環流による屈折

ように定義するかという問題を生じるが、汀線付近に作用する波の大きさを指標とするならば、堤長が波長に対して短い場合に減衰効果が高いと言える。なお、短い堤長の潜堤を連ねた方が波浪制御という観点からは効率的であることは、合田(2003)によって指摘されている。

(2) 平均水位変化および海浜流場

図-7は平均水位の変化を表し、図-8には対応する海浜流場を示している。まず潜堤沖端での急激な岸向き碎波は、大きな radiation 応力の勾配を生じるが、その大部分は非回転成分として背後の水位上昇に伴う圧力勾配と釣り合う。一方、開口部ではこの水位勾配に対応するようなネットの岸向き力が存在しないために、潜堤端部

を中心とした時計回りの循環流を生じることでこの不連続を解消する。開口部に対して堤長を大きくした場合には、背後での水位上昇が大きくなるとともに、端部の循環流は局所的になり開口部での冲向き流れが強められる。そのため、開口部での波に遅れが生じ、碎波点が沖側に移動すると同時に、碎波波高が増大するため不連続の解消に寄与することになる。背後域全体の水位上昇量および開口部の冲向き流れの強さは、潜堤上での碎波に規定されている。図-9は堤長と設置間隔の比 G/L と潜堤岸端 ($Y = 75$ cm) での水位上昇量の沿岸方向平均値をプロットしたものである。このグラフからは G/L が小さいほど水位上昇量が大きくなることが分かる。また図-10には G/L と潜堤沖端および岸端での波高の沿岸方向平均値の関係を示している。前者は潜堤による碎波波高であり、水位上昇量の変化とよく対応していることが分かる。 G/L が大きいほど潜堤による碎波が緩やかになるのは、前節で述べたとおり、流れとの干渉を通して潜堤沖側の波のエネルギーが開口部側へと輸送される機構が存在するためである。

潜堤岸端よりも背後の領域の水位変化および海浜流場は、概ね開口部から進入する成分によって決まるが、潜堤上での碎波の非一様性や潜堤背後での重合波が局所的な水位上昇や循環流を引起す場合もある。開口部に対して堤長が長い場合には、開口部からの成分が沖寄りですべての水位上昇に寄与するために、潜堤岸端より背後での水位変化や海浜流場に対する起因力が小さくなる。このことは図-10に示した G/L と岸端での波高の関係からも読み取れる。しかし、Case5やCase6のように堤長が碎波点での波長に比べて大きい場合には、潜堤中心まで端部での不連続の影響がおよばなくなるため、中心部で碎波波高が大きく、背後で局所的な水位上昇と循環流を引起す。開口部を大きくした場合には、上述の通りそこでの碎波点が岸に近づくと同時に、波高も増大するため、開口部背後に局所的な水位上昇を引起すと同時に、反時計回りの循環流を生じるようになる。大抵の場合には潜堤背後の海浜流場は反時計回りの循環流を示すが、Case1のように堤長が波長に比べて小さい場合には、汀線付近での波向きが他のケースと反対になって、逆向きの流れを生じる。一般には開口幅が大きいほど背後の循環流が発達すると同時にその中心は開口部側へと移動する。しかし、開口幅がある値より大きくなると、鏡像成分との交差が起きなくなるため循環流は消失、あるいは規模の小さいものになると考えられる。事実、開口幅を無限に大きくした場合、つまり単一の潜堤を設置した状態では背後に大きく発達した循環流は観測されなかった。

離岸堤の場合には、堤体を横切る質量および運動量が存在しないか、比較的小さいために、大抵の条件で背後

に循環流を生じるが、潜堤の場合には天端を越える質量流束と開口部からの波によるもののバランスに規定される。たとえ、循環流を生じたとしても開口部での冲向き流れに接続するため、離岸堤背後に発達する循環流とは性質が異なる。海浜流場という観点からの最適配置は、漂砂との関連において議論しなければならない。

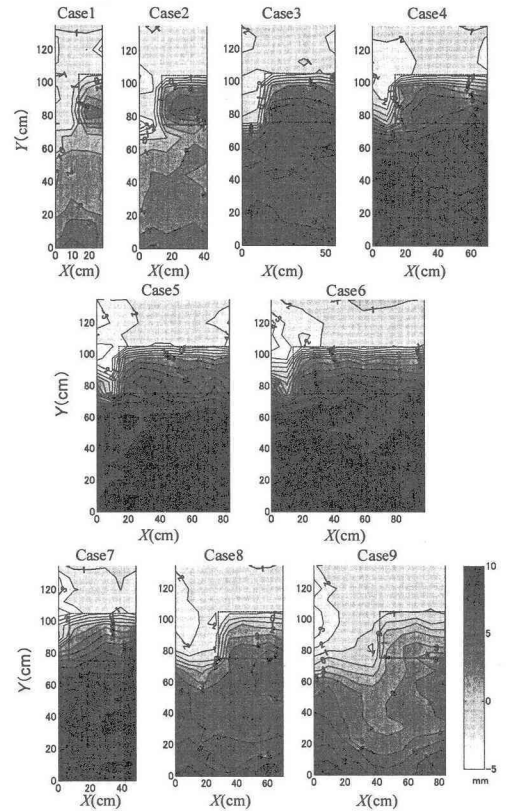


図-7 潜堤周辺の平均水位変化

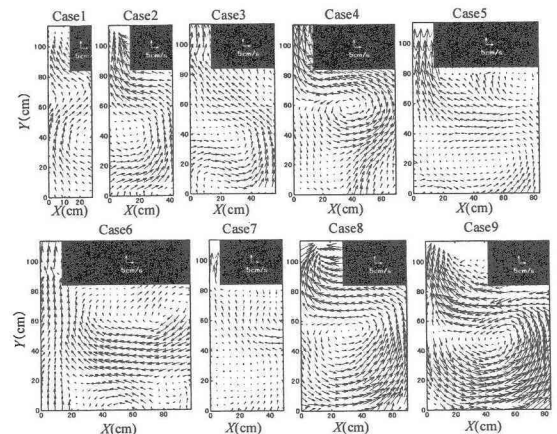
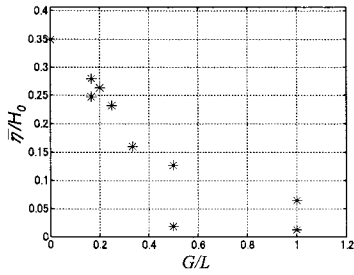
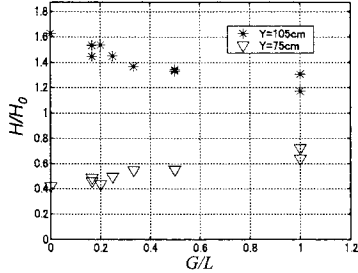


図-8 潜堤周辺の底層海浜流場

図-9 水位上昇量と G/L の関係図-10 潜堤岸端および沖端の波高と G/L の関係

4. 数値モデルによる再現計算

ここでは数値モデルによって潜堤周辺の波・流れ場を再現する。上述のとおり波・流れ場では両者の相互干渉が重要な役割を果たしているが、その効果を検証する為に波の計算には線形モデルである非定常緩勾配方程式を適用する。碎波モデルには、局所水深モデルとして Dibajinia・渡辺 (1987) が示したものをを用いる。まず潜堤のような急激な水深変化に対するモデルの妥当性を検証するために一次元での検討を行った。図-11、図-12 はそれぞれ計算された波高分布および平均水位変化を示している。図-11 では波の計算のみによる結果を実線、水位変化を算出して波の計算に反映させた結果を破線、さらに実験結果をシンボルで示している。潜堤背後では水位変化が波高と同程度となるため、水位変化を考慮しない場合には背後の波高を過小に見積もることになる。しかし、計算された平均水位変化を静水深に加えて、見かけの水深を大きくした上で波の場を再計算すれば良好

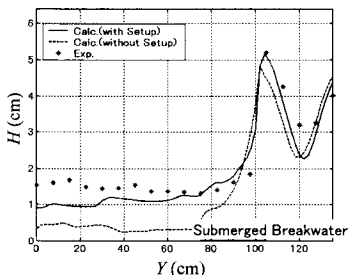


図-11 波高分布

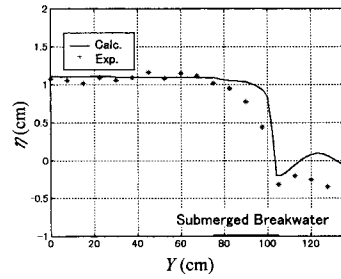
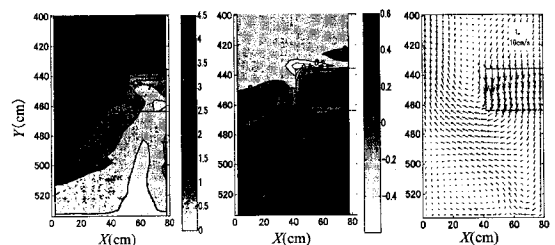


図-12 平均水位変化

な結果が得られる

次に、Case9 を対象として平面的な波浪場を計算した。まず相互干渉を考えずに波の場だけを計算した結果を図-13(a)に示す。大略的な波高分布は再現できているが、潜堤上での碎波が実験結果に比べて急であり、開口部から入射する波の様子も異なる。この結果から radiation 応力を評価し、海浜流場および平均水位の変化を計算すると図-13(b)および(c)のようになる。なお計算上のパラメータについては、摩擦係数は全域で0.01とし、水平拡散係数は離岸距離に従って大きくなるように与えている。境界条件は、すべての境界を横切る流速をゼロとした。平均水位が実験値と比較すると潜堤背後で過大であり、背後の循環流が小さく他方の循環流に押しつぶされた形になっている。これは波・流れの干渉を通じた潜堤沖側から開口部側へのエネルギー輸送機構が考慮されていないためであると考えられる。次にこれらの結果を波の計算に反映させるが、ここでは簡単に分散関係式に流れの影響を考慮して波の場を再計算した。図-14に結果を示す。潜堤沖側の波が開口部へと集中することで潜堤上での碎波が緩やかになり、潜堤背後の水位上昇が低減すると同時に背後の循環流が発達していることが分かる。このことから、潜堤周辺の波・流れ場においては、両者の相互干渉が大きな役割を果たしていることが確認できる。したがって、波の場を含めて精度の良い計算結果を得るためには、相互干渉を考慮しなければならない。線形モデルに基づく相互干渉を含めた計算手法はいくつか提案されているものの、収束性に問題があるため、潜堤



(a) 波高分布 (b) 水位変化 (c) 海浜流場

図-13 非定常緩勾配方程式による再現結果 (Case9)

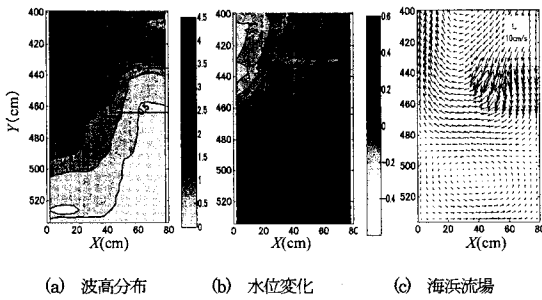


図-14 流れを考慮した計算結果 (Case9)

近傍での計算に難点があるが Boussinesq モデルのような非線形モデル適用するのが好ましいと言える。今後の課題としたい。

5. 海浜流場の対称性

ここまでの議論は、現象の対称性を仮定して潜堤一基の左半分の領域を対象としてきた。ここでは現象の対称性を確認するために、先と同様の計測システムを用いて潜堤一基を設置した背後の流況を、堤長 L と設置間隔 G を変更しながら先の実験よりも広い条件で計測した。図-15 に数例の計測結果を示す。実験の結果は、(a)、(b) のように非対称になる場合、(c)、(d) のように対称な流況が得られる場合、そして (e) のようにわずかな非対称性が含まれる場合の 3 つに分類された。(a)、(b) については、潜堤模型や導波板の設置誤差等による影響を受けた可能性も否定できないが、(c)、(d) のような状況では何度か計測を行うと左右反転するような場合があることから、何らかの不安定現象の関与が示唆される。

図-16 にすべての結果を非対称、対称、やや非対称に分類した結果を示すが、縦軸に堤長と碎波波長 L_b の比、横軸には設置間隔 G と碎波波長 L_b の比をとっている。この

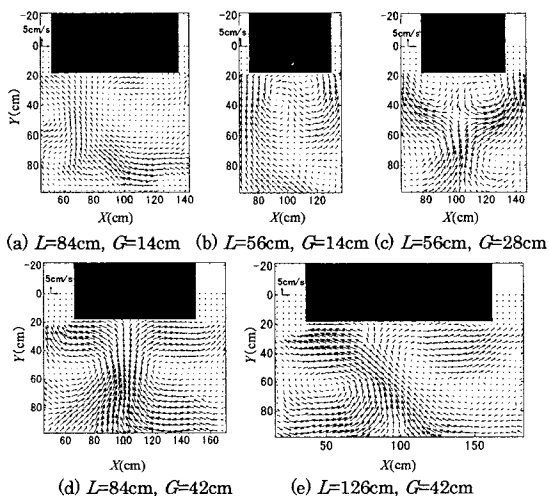


図-15 両側を対称とした場合の潜堤背後の流況

図から非対称になるのは、堤長が碎波波長に近く、かつ開口幅が小さい場合であることがわかる。この堤長は先の実験での Case3 に相当するが、その場合の波高分布を見ると、潜堤背後で大きな重合が見られる。この条件の範囲では開口部からの波と、潜堤背後中央での重合波の作用が均衡するため、左右のわずかな実験条件の差が増幅されて、離岸流のような流れを生じるものと解される。

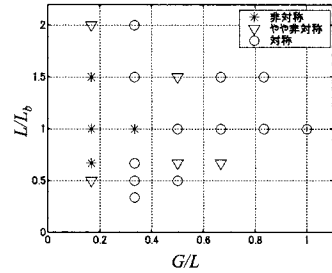


図-16 堤長・設置間隔の違いによる海浜流場の対称性

6. ま と め

本研究は潜堤周辺における波・流れ場の特性とその機構を明らかにすることを目的として行った。主要な結論は、以下の通りである。

- (1) 潜堤周辺の波・流れ場は堤長 L および設置間隔 G に対して多様な変化をするが、概ね G/L が小さい場合には大きな水位上昇を生じるとともに、開口部に局所的な強い冲向き流れを生じ、逆に G/L が大きい場合には開口部側での波が相対的に強くなって背後に循環流を発生させる。
- (2) 潜堤周辺の波・流れ場においては、両者の相互干渉が重要な役割を演じており、潜堤上と開口部側での radiation 応力のバランスに大きな影響を与えていることが実験および数値計算の両面から検証された。
- (3) 波・流れ場には非対称になる条件が存在しており、これは潜堤背後と開口部側での radiation 応力が均衡するような状態で起きる。この均衡状態は、堤長が碎波波長に近く、かつ開口幅小さい場合に生じる。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣篤・横山揚久(1987): 人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化, 海岸工学論文集, 第34巻, pp. 337-341.
- 建設省河川局海岸課監修(1992): 人工リーフの設計の手引き, (社) 全国海岸協会, 10p.
- 合田良実(2003): 段階的碎波モデルによる人工リーフ波高伝達率の特性解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 676-680.
- 下園武範・鈴木純也・佐藤慎司・磯部雅彦(2004): 人工リーフ背後における海浜流場と漂砂の制御, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 606-610.
- Dibajnia Mohammad・渡辺晃(1987): 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 291-297.