# 大規模沿岸構造物周辺における海浜変形の影響範囲に関する研究 Study on the Extent of Coastal Topography Change around a Large-scale Coastal Structure

坂下大輝<sup>1</sup>·佐藤愼司<sup>2</sup>·田島芳満<sup>3</sup>

## Taiki SAKASHITA, Shinji SATO and Yoshimitsu TAJIMA

Extensive beach erosion is observed around a large-scale structure constructed on the coast. However, the extent of impact of coastal topographic change seems to be larger than expected in research in the past. In this study, the influence of large-scale structure on coastal erosion was investigated through experiments and numerical simulation of shoreline change. Significant extension of coastal erosion area around a large-scale structure was observed in laboratory experiments when external currents or waves with alternately changing incident angles were introduced. The development of circulation currents and the arrest of sand in the sheltered zone were considered to be the essential mechanisms.

## 1. はじめに

近年各地で深刻化している海岸侵食の原因のひとつ に、大規模沿岸構造物による沿岸漂砂動態の変化がある. 港湾の防波堤などの大規模沿岸構造物周辺で発生してい る海岸侵食については、佐藤ら(1974)によると、防波 堤による周辺の地形変化は,防波堤先端から汀線に対し ての角度が45度までの範囲で侵食が発生し、45~60度 までの範囲では堆積が生じるとされている.また,田中 (1977)は、典型的な地形変化としては、防波堤先端か ら斜め40~45度付近で汀線が最も後退するとした.こ のような大規模沿岸構造物周辺での海岸変形は、全国各 地でみられるが,構造物による周辺海浜地形への影響範 囲が,既往研究で報告されている防波堤先端から汀線に 対して45度という範囲を超えて生じている事例も多い. さらに海岸侵食には流砂系規模の供給土砂の減少など複 数の要因が複雑に関係することも多く,既往研究で示さ れた範囲にかかわらず大規模構造物による地形変化の影 響範囲を把握することは重要と考えられる. そこで本研 究では, 現地で見られる沿岸流れの存在や, 波向きの変 動に焦点を当て, 平面水槽における移動床実験と数値計 算により,大規模沿岸構造物の影響範囲を定量的に検討 することとした.

## 2. 平面水槽における移動床実験

## (1) 実験条件と実験方法

実験は,沿岸方向11m,岸沖方向6.5mの平面水槽において行った.平面水槽の平面図および断面図は図-1の通

1	学生会員		東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻
2	フェロー	工博	東京大学大学院教授 工学系研究科
3	正会員	Ph. D.	在云墨盤子导攻 東京大学大学院 准教授 工学系研究科 社会基盤学専攻

りである.水槽の底面は岸側壁から3mまで勾配が1/20 で、沖側の1mは1/10である.本論文では汀線位置を水 槽岸側壁から110cmとするため、水深を22.5cmとした. 図中の灰色の部分が観測対象範囲である.今回の実験で は図-1中にあるように沿岸方向にX軸,岸沖方向にY軸 を定義し、また波向き角度θについても反時計回りを正 として定義する.X軸は防波堤の位置、即ち左端から 400cmの位置をX=0(cm)とし、Y軸は岸側壁をY=0 (cm)とする.

底質としては中央粒径0.3mmの相馬珪砂を用いた.こ れを水槽の底面勾配1/20の床の部分に厚さ4cmになるよ うに敷き詰め,初期地形とした.初期地形の静水汀線位 置はY=110cmである.また水槽の左端から4mの位置に 防波堤模型を設置した.模型は2枚の金属製パネルを用 いて配置した.それぞれは1mの長さで,1枚は汀線に直 角に汀線から50cm突出した状態で,もう1枚はその沖端 から斜め45度に配置した.

実験条件としては表-1に示すようなA~Cの3つのケースを設定した.いずれのケースにおいても、一様水深部における波高Hは4cm,波の周期Tは1秒とした.ケースAは波向きが斜め(0=20°)の波のみを作用させる.ケースBは沿岸流れを付加し、ケースCでは波向きを1時間ごとに変動させた.即ち最初の1時間は0=20°の波を、



実験ケース	波高 (m)	波向 θ (°)	沿岸流れ
A (斜め波のみ)		20	なし
B(斜め波+流れ)	0.04	20	あり
C (交互波)		$\pm 20^{*}$	なし

表-1 実験条件

※1時間ごとに波向きを変動させる(最初の1時間はθ=20°)

次の1時間はθ=-20°の波をあてることを繰り返す.いず れのケースも波の作用時間は10時間とし、1時間後から 10時間後まで3時間おきに地形を計測した.

ケースBでは、水槽全体に流れを作用させた. 岸側か ら見て左から右方向への流れを発生させるため、水槽の 右端にポンプを設置し、取水した水はホースを通じて水 槽左端へ導き再び水槽へ流し込んだ. このとき、なるべ く均一かつ乱れの無いように水を供給するため、直接ホ ースから水槽へ流し出すのではなく、ホースから貯水ボ ックスに水を貯める. 貯水ボックスには底面近くに多数 の直径1cmの小孔を開けており、ボックスの小孔から水 が水槽内へ均等に流れ出るようにしている. ポンプを稼 働させると、水槽に約10cm/sの沿岸方向流れが観測され ることを確認した.

実験の観測項目は、汀線位置、地形変化、海浜流場で ある. 汀線位置は、水槽の斜め上方(図-1参照)に設置 したデジタルカメラにより、1時間おきに記録するとと もに、50cmおきに目視観察で記録した.デジタルカメラ の斜め画像は、複数の標定点をもとに直上方からの画像 に変換して用いた. 画像処理により抽出した汀線は, 目 視観察によるものと5cm以内の誤差で良く一致している ことを確認した.地形の計測は、3時間ごとに水槽の水 を出し入れしながら水位を徐々に変動させ、その過程を デジタルカメラにより撮影した画像をオルソ変換するこ とで,平面的な等深線位置を連続的に抽出した,等深線 は0cm (汀線), -2cm, -4cm, -6cm, -8cmを計測対象と した. また,造波中に青色染料を防波堤周辺に投入し, 染料の移動の様子記録したムービーを分析して、海浜流 場を把握した. 観測例を図-2に示す. 同図は青色染料領 域を強調し、白色領域として示したもので、防波堤先端 に投入した染料が拡散しながら背後の循環流と右向き沿 岸流に流されていることがわかる.

## (2) 汀線位置・海浜地形変化

各実験ケースについての汀線位置および海浜地形の結 果を示す.ここでは10時間後の地形について議論するこ ととする.10時間後の汀線位置のみを比較したものを 図-3に,また,10時間後の2cmごとの等深線位置を図-4 に示す.なお,図-4の点線はそれぞれ,最も岸側の線を 水深0cm(汀線)とした2cmごとの初期等深線位置を示



図-2 染料による流れ場の観測例 (ケースA, 白色部が染料)



している.

汀線位置の比較からは、侵食範囲を防波堤先端から汀 線への角度で表すと、ケースAは40度まで、Bが23度ま で、Cが17度までの範囲となり、A<B<Cの順に侵食範 囲が大きかった.すなわち、沿岸流れが卓越するBの場 合と、波向きが周期的に変動するCの場合の共に侵食範 囲の拡大が見られた.さらに、Bでは拡大が相対的に 20%程度だった一方で、Cの場合は2倍以上と大幅に拡 大した.

次にこれらの侵食範囲の相異について等深線位置を含 めて比較,考察する.まずケースAとケースBの地形を 比較する.防波堤付近ではともに等深線が沖へ移動して いるが、Bの方が先端右側付近(X=100cm付近)での堆 積が多くみられるため、防波堤遮蔽域内の砂の量(図-4 の着色領域)がAより増えたことがわかる.また、防波 堤からやや離れた場所で等深線が沖に張り出す位置は, AではX=200~220cm付近,BではX=300cm付近となっ ており、Bの方がより防波堤から遠い位置になっている. これらの相異は沿岸流れの有無によるものであると考え られる. すなわち、Bの場合は沿岸流れの卓越により、 防波堤背後に形成される渦の大きさがAより大きく発達 し、この渦の大きさに応じて侵食範囲が拡大したものと 考えられる.染料を用いた流れの観察においても、ケー スBでは防波堤背後の循環流が大きくなることが認めら れている.

次にケースAとケースCの地形を比較する. どちらも やはり遮蔽域内に砂が堆積しているが, Cの方が, 各等 深線がAよりも総じて沖へ移動している. これは θ=-20° の波を入射させた時に,沿岸漂砂が防波堤遮蔽域へ向か って発生し, X軸の負の方向へ輸送された砂が遮蔽域内 に捕捉され,捕捉された砂はそれ以降の波向きにかかわ らず再び流出しないことが原因と考えられる. さらにA とBの条件でみられた等深線が相対的に沖に張り出す部 分がCでは見られない. これは θ=20°の波向きでは防波 堤背後に渦が形成され, その渦の大きさに応じて突出域 が形成されるが, θ=-20°の波向き時では渦が形成されな いので突出域が平坦化されるためと考えられる. このよ うに,海浜地形の変形には防波堤周辺の流れ場が大きく 影響していると思われるので,流れ場の特性については 次節で詳しく検討する.

以上から、AとBの比較により、沿岸流れの卓越によ り地形変形が生じる範囲が明確に変化することが判明 し、またAとCの比較からは、波向きの周期的変動によ って遮蔽域に捕捉される砂の量に違いが生じ、結果とし て捕捉量が増加したCの場合に、侵食範囲がAよりも大 幅に拡大することが判明した.

## (3) 捕捉土砂量の比較

各ケースについて防波堤遮蔽域内(図-4の着色領域) の初期地形から10時間後までの土砂増減量を,得られた 等深線データを内挿して再構成した地形データより定量 的に求めた.結果を図-5に示す.同図からは,ケースA では遮蔽域から土砂が流出し大幅に減少したが,ケース BとケースCでは土砂が捕捉され堆積したことが分かる.

以上の結果から,沿岸流れと波向きの変動の両者とも が,防波堤への土砂の捕捉を促進させる働きを持つこと が分かる.捕捉された土砂は,元々はXが正の領域に存



図-5 各ケースの防波堤遮蔽域内の土砂増減量

在したものであり,沿岸流れによっては防波堤背後の渦 が変化したこと,波向きの変動によってはXの負方向へ の沿岸漂砂が増えたことが主な要因と推測できる.これ についての詳細な検討も次節の数値計算で行った.

## 3. 汀線変化モデルによる数値計算

実験結果における土砂移動機構を検討するため,大規 模構造物周辺の海浜地形変化の数値計算を行った.まず 砕波変形を考慮して非定常緩勾配方程式により波浪場の 計算を行い,radiation stressや,波高,波向きの計算領域 における平面分布を得た.そして,radiation stressの分布 を外力条件として,平均流と平均水位に関する運動量方 程式と連続式を,所与の境界条件の下で解くことにより, 各点での平均流速と流れの方向,ならびに平均水位を算 出した.防波堤周辺における波高分布と海浜流場の計算 結果を図-6に示す.

最後に以上で求められた波浪場と海浜流場を外力条件 として漂砂量の計算を行った. 漂砂量計算のモデルとし ては,1-lineモデルと清水ら(1992)による3D-SHORE モデルを用いた.前者は砕波波高と波向きから漂砂量を 計算し汀線位置の変化を算出するもので,後者は海浜流 場から局所漂砂量を各地点において計算し,これを積分 した砕波帯内における沿岸漂砂量の評価を介して汀線位 置の変化を算出するものである.

### (1) 1-line モデルによる計算

まず1-lineモデルによる計算方法と結果を示す.今回 の漂砂量計算には大規模構造物による影響を考慮できる 小笹・Bramptonの漂砂量算定式(1979)を用いた.

$$I = (Ec_{g})_{B} \left( K_{1} \sin \alpha_{B} \cos \alpha_{B} - \frac{K_{2}}{\tan \beta} \cos \alpha_{B} \frac{\partial H_{B}}{\partial y} \right) \cdots (1)$$

ここに,  $K_1$ ,  $K_2$ は無次元係数,  $\tan\beta$ は斜面勾配,  $\alpha_B$ は 波向きの汀線に対する相対角度,  $H_B$ は砕波波高で, Iは 式 (2) で表される水中重量で表示した沿岸漂砂量である.

ここに、 $\rho_s$ は砂の密度で2.65 (g/cm<sup>3</sup>)、 $\rho$ は水の密度で



1.0 (g/cm<sup>3</sup>),  $\lambda_v$ は砂の空隙率で0.4を用いた.式(1)の 無次元数 $K_1$ の値は,  $K_1$ =0.77がよく使われるが,この値 は現地海岸のデータより定めたものであり,実験条件下 では $K_1$ の値も1/10程度に変動しうる.そこで今回の計算 においては実験結果との整合性も考慮して, $K_1$ =0.077と 設定した.また $K_2$ は循環流と沿岸流の相対強さを示し,  $K_2=K_1/1.5$ と設定した.図-7に計算結果を示す.同図は, 初期地形に対する波の計算結果から砕波波高や波向きを 評価し,地形が変化してもこれらは変化しないと仮定し て10時間後の汀線変化を計算した結果である.ただし, 汀線の変形に伴って波向きが時々刻々変化することは考 慮されている.

図-7より交互波(実験ケースCに相当)の場合は θ=20°のみの場合(実験ケースA,Bに相当)と比較して, 遮蔽域内は汀線が前進しているが,θ=20°の場合よりも 前進距離がはるかに大きい,即ち交互波の場合の方が遮 蔽域内に堆積した土砂量が多いことが分かる.またX=80 (cm)付近から初期汀線よりも後退し,そのまま構造物 から離れる方向には,初期の位置まで回復することなく 汀線後退が続いていることが分かる.

従って、1-lineモデルによる結果からも、交互波の場 合には、構造物による地形変化の影響範囲は、入射波の エネルギーフラックスの沿岸方向成分は平均的にはゼロ となるにも関わらず,単一方向斜め波の場合と比べ大幅 に広がることが判明した.

一方で1-lineモデルは入射波向きと砕波波高に基づき 計算を行うため、沿岸流れによる影響(実験ケースBに 相当)を考慮することができない.そこで次項において 局所漂砂量モデルを用いて同様に検討した.

#### (2) 局所漂砂量モデルによる計算

清水ら(1992)の3D-SHOREモデルでは、海浜流場の 定常状態から、各地点での局所漂砂量*q*<sub>c</sub>を渡辺ら(1984) による以下の式(3)より算出する.

$$q_{c} = A_{c}(u_{*}^{2} - u_{*c}^{2})u_{c}/g$$
 ....(3)

ここに、 $u_*$ :波・流れ共存場の最大底面摩擦速度、 $u_{*c}$ : 移動限界摩擦速度 ( $u_{*c}^2 = \phi_c sgD$ )、 $\phi_c$ :限界シールズ数、 s:水中比重、g:重力加速度、D:粒径、 $u_c$ :平均流速、  $A_c$ :無次元係数で、漂砂量係数 $B_w$ を用いて以下の式によ り導く.

ここに、w<sub>f</sub>:沈降速度, f<sub>w</sub>:摩擦係数, λ:空隙率である. 沿岸方向成分の局所漂砂量が求まれば, それを漂砂の 主要発生領域である砕波帯内において岸沖方向に積分す ることで,沿岸漂砂量を求めることができる.今回の計 算においては,波浪場の計算結果から,砕波帯沖側境界 をY=190 (cm)の位置とした.また,防波堤遮蔽域区間 では積分区間の沖側境界を防波堤の位置までとした.地 形変化の計算では, 3D-SHOREで提案されているような 三次元的な地形変化までは対象とせず,断面地形形状が 平行移動すると仮定して,汀線変化モデルにより汀線位







図-8 局所漂砂量モデルによる10時間後の汀線位置計算結果



図-9 防波堤遮蔽域内の10時間での土砂増減量

置と海浜地形を求めることにした.また,この計算にお いては地形変化に伴う海浜流場の変化を考慮するため に、3時間後と6時間後に汀線変化モデルの仮定に基づい て地形を更新し、その条件下で波・流れ場を再計算して 漂砂量を算定した.汀線位置の計算結果を図-8に示す.

図-8から、AとBの汀線を比較すると、侵食が最も激 しい場所がAではX=100 (cm)付近だったのが、Bでは X=140 (cm)と防波堤からやや遠くへ位置が変化してい る.沿岸流れの卓越により防波堤背後の渦が拡大し、そ れに伴い地形変化も渦の拡大した分だけ遠くまで影響し たものと考えられる.

次にCに注目すると、Cが最も防波堤遮蔽域で汀線が 前進しており、防波堤遮蔽域に土砂が多く捕捉されたこ とが分かる.また、Cにおいて侵食が激しい場所は X=250 (cm)付近と、防波堤からかなり離れた場所であ った.すなわち、交互波により遮蔽域への土砂の捕捉を 促進し、その結果侵食範囲が防波堤かなり遠くまで及ん だことが分かる.

以上から,局所漂砂量モデルに基づいた汀線位置の計 算では,沿岸流れの卓越するケースBの場合と,交互波 を入射したケースCにおいてともに侵食範囲が拡大した ことが認められ,その傾向は実験結果と概ね整合してい るため,侵食範囲の影響を評価できたと言える.

#### (3) 局所漂砂量モデルに基づく捕捉土砂量の比較

局所漂砂量モデルで算出した汀線位置をもとに,防波 堤遮蔽域内における初期地形から10時間後までの土砂増 減量を定量的に求めた.結果を実験データから算出した ものと併せて図-9に示す.

モデルの結果から算出した土砂の増減は、Aでは減少 し、Cが増加するという結果となり、その傾向は実験結 果と一致している.従って、波向きの変動が土砂をより 多く遮蔽域内へ堆積させる効果を持つことが、土砂量の 点でも確認できた.

一方で,Bは実験では増加したところを,モデルでは 減少するという結果となった.これについては,数値計 算の汀線変化モデルにおいては地形勾配を1/20と仮定し て,その地形が平行移動するとして計算し,土砂量もそ の仮定に基づいて求めたことによると考えられる.実際 に図-4の海浜地形を見ると、Aでは遮蔽域周辺の地形勾 配がやや急であるのに対し、Bでは緩やかであり、勾配 は各ケースによって異なる.従って、モデルでは侵食域 の拡大をあらわす汀線位置が比較的よく再現できた一方 で、遮蔽域内の土砂増減量の計算ではこのように誤差が 生じたものとみられる.今後、地形の三次元性を検討す ることが必要である.

## 4. おわりに

本研究では、大規模沿岸構造物の周辺で比較的遠方ま で海岸侵食が見られる現象に対して、沿岸流れの存在や 波向きの変動などの影響を実験的に検討するとともに、 実験データを用いて、汀線変化モデルをベースとする数 値モデルの適用性を検証した.主要な結論は以下の通り である.

- (1) 大規模沿岸構造物周辺で比較的遠方まで海岸侵食域 が拡大する現象に対して、沿岸流れの存在や波向きの 変動の影響を実験的に検討するとともに、数値モデル を適用することでその機構を明らかにした.
- (2)沿岸の流れが重合する場合には、構造物下手側の流 れ場が変化し、影響範囲が拡大することが確かめられ た.ただし、影響範囲の拡大は、本研究の実験条件の 範囲では20%程度であった。
- (3) 波向きが周期的に交互に変動する場合には、入射波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分は平均的にはゼロとなるにも関わらず、構造物下手側での侵食範囲が2倍以上に大幅に拡大することが確認できた.これは、単一方向波を入射した場合よりも、多くの土砂が遮蔽域内に捕捉されるためである.
- (4)流れが重合する場合や、波向きが周期的に変動する 場合の海浜変形は、それぞれに対して適切な漂砂量モ デルを導入することで、汀線変化モデルである程度評 価可能であり、それぞれの場合において侵食範囲が拡 大することが認められた。
- (5)以上より、強い沿岸流れが卓越する海岸や、波向き が季節により大きく変動する海岸において、大規模沿 岸構造物の影響を評価する手法を提案できた。

#### 参考文献

- 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博(1974):鹿島港建設に伴う 周辺海底地形の変化について,第21回海岸工学講演会論 文集,pp.147-153.
- 田中則男(1977):港湾周辺における地形変化の典型的パターンについて,第24回海岸工学講演会論文集, pp.190-194.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984):構造物設 置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル,第31回海岸 工学講演会論文集,pp.406-410.
- 清水琢三・水流正人・渡辺 晃 (1992):3次元海浜変形モデ ルによる長期的な地形変化予測,海岸工学論文集,第39 巻,pp.416-420.