

構造物の反射波による海浜変形の制御効果

森下保壽*・高橋次郎**・川又良一***
坂井隆行***・片野明良***

1. まえがき

構造物の設置による沿岸漂砂の場所的な変化による海浜の変形については、一般的には沿岸漂砂の遮断による漂砂上手側の堆積・下手側の侵食としてとらえられてきた。しかしながら、構造物の漂砂上手側の海浜変形の事例の中には、必ずしも上記のような単純な形の変形を示さず局所的な侵食傾向を示す場合のあることも知られている。

従来より、このような事例については、構造物からの反射波の影響として考えられてきたが、反射波が海浜変形に及ぼす効果についてはいまだ十分な検討はなされていない。構造物からの反射波は、波の入射方向と反対の波向となり、入射波による沿岸漂砂量を低減する効果があると考えられることから、反射波を適度に発生させることで、港湾等の構造物設置による沿岸漂砂上手側の過度の土砂の堆積による航路の埋没やそれに伴う海岸侵食等の種々の影響を軽減することが期待できる。

本研究は、宮城県仙台港の建設に伴う海浜変形の事例を基に、沿岸漂砂上手側の海浜変形を詳細に検討すると共に、現地の海岸線の変化について汀線変化モデルを用いた追算を行い、防波堤などからの反射波による海浜変形の制御効果について検討を行ったものである。

2. 仙台港南海浜の沿岸漂砂と海浜変形

仙台港は、福島県松川浦～仙台に到る約 50 km にわたって続く砂浜海岸の北端に位置する掘込み港湾で、その南防波堤は海岸線から斜めに延長 1800 m にわたって設置されている（図-1）。既往の研究結果では、仙台港から阿武隈川に到る海岸では、南から北への沿岸漂砂が卓越するとされているが（田中ら, 1980；宇多ら, 1990）、南防波堤の建設に伴って防波堤南側に局所的な汀線の後退を生じたことはすでに知られている（田中, 1983）。また、仙台港の南側約 2 km に位置する七北田川は、流域面積が 200 km²程度の小河川で、年数回の洪水時に河口砂

洲がフラッシュされるが、その土砂の多くは高波浪時に河口外から河口に持ち込まれたものであり（田中ら, 1990）、河川からの供給土砂は少ないと推定される。

ここでは、仙台港の建設の始まった 1968 年前後から近年の地形変化について、空中写真や測量結果より、防波堤の反射波による海浜変形の実体を見ることとした。解析は、建設前後の汀線の変化や水深変化の平面分布などについて行い、防波堤建設過程を含む近年までの海浜地形の変化についてその特性を整理した。また、仙台港で観測された波高・周期・波向の資料を基に、波浪特性から判断される漂砂の傾向などについても検討を行った。

（1）防波堤の建設と海浜変形

仙台港の南防波堤は、1968 年 2 月に着工し、1974 年 3

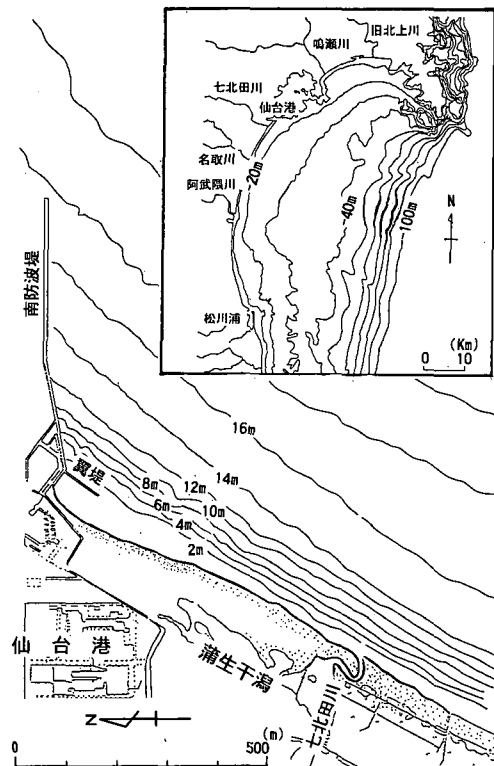


図-1 仙台港及び周辺海底地形

* 運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所所長
** 運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所第一工務課長
*** 株式会社エコー第一技術部解析調査課

月に完成している。この防波堤設置による海浜の変形状況については、図-2に示す防波堤建設前の1952年から近年までの汀線の変化状況を航空写真より読み取ったものでも分かるように、建設直後より防波堤基部の汀線後退が起り、その後1984年までに防波堤基部から約1 kmの範囲で汀線の後退が生じている。このように、防波堤の延伸に伴って侵食が激しくなったため、1973・1974年には港内の浚渫土砂による養浜（田中、1983）を行ったが、その効果は芳しくなく1977年からは防波堤の基部の侵食対策として翼堤の建設が開始され1982年には250 mまで延伸され現在に至っている。

この防波堤の完成後から翼堤の設置を経て現在までの地形の変化について、1976年以降実施されてきた深淺・汀線の測量結果より整理すると以下の通りである。

a) 平面的水深変化

防波堤建設後の海底地形の変化について、1976年10月と1992年8月の深淺測量結果を比較し、水深変化量の平面分布として、図-3に示した。この結果より、防波堤前面域と防波堤基部の翼堤から七北田川河口にかけて1 m以上の侵食域が広がっていると共に、防波堤に沿って侵食域が見られる。また、堆積域は、沿岸部の侵食域の沖側にわずかに見られる程度である。

上記の比較期間内のほぼ1年毎の測量結果を基に、経験的固有関数解析（加藤ら、1976）を行い経年的な変化状況について整理した。図-4は、その結果より得られたモード1の結果であるが、地形変化への寄与率が約57%と高く、上記の水深の変化状況と同様の傾向を示している。したがって、この解析結果は、全体の水深の変化状況をほぼ表しているものと判断され、時間係数の変化を考慮すると、防波堤周辺と南側沿岸部の侵食は、1976年から1984年までの間で生じ、それ以降では大きな水深の変化が生じていないことが分かる。

b) 汀線変化

汀線測量結果を用いた経年的な汀線の変化について整理した結果を、図-5・図-6に示す。図-5は、1976年10月を基準とした汀線の変化量の沿岸方向の分布を表したもので、防波堤基部から生じた汀線後退が、1992年までに防波堤基部から南側約2 kmの七北田川河口付近までの範囲に拡大する様子がうかがえる。また、図-6は、代表測線上の汀線の変動の経時変化を示したもので、上記の変化がほぼ1984年頃までに生じ、それ以降の変化が少ないことを示しており、前述の水深変化の傾向と一致する結果が得られている。なお、若干の汀線の前進・後退が季節的に生じており、主に春から夏にかけて前進、秋・冬では後退する傾向が確認される。

c) 沿岸漂砂の卓越方向の推定

以上の結果より、水深変化と汀線変化の分布に相関が確認されること及び海域沖側への土砂堆積がほとんど生じていないことから、仙台港南海浜では沿岸方向の土砂移動による海浜変形が生じていたと考えられる。したがって、七北田川河口付近までの海域の土砂の減少量が、1976年から1984年までに約18万 m^3 /年（1992年まででは約10万 m^3 /年）であったことから、これに見合う程度の南向きの沿岸漂砂量が生じていたものと推定される。

また、図-2の航空写真の結果でも分かるように、七北

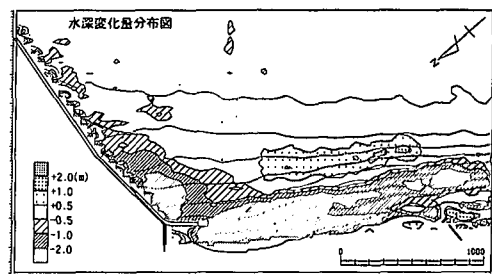


図-3 水深変化分布 (1976.10~1992.8)

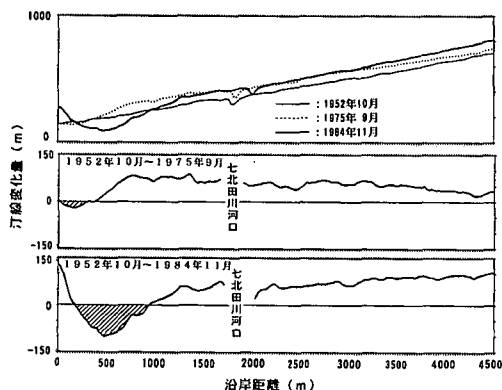


図-2 航空写真による汀線変化

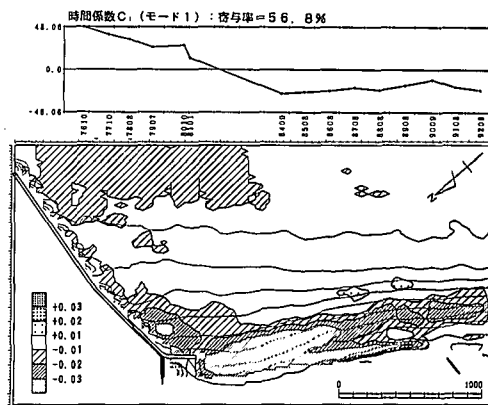


図-4 経験的固有関数解析結果 (モード1)

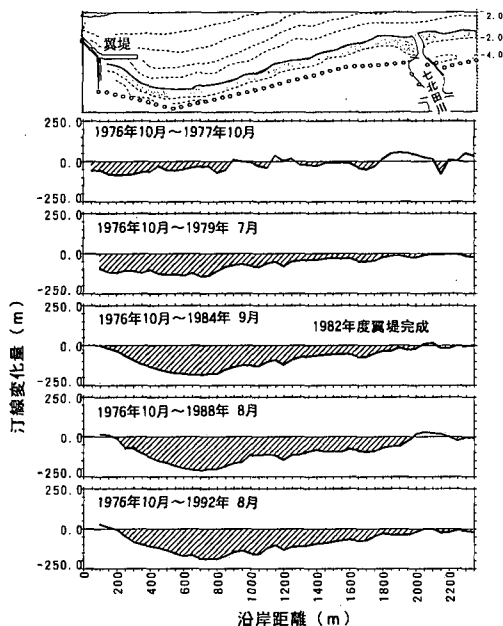


図-5 汀線変化の沿岸方向分布

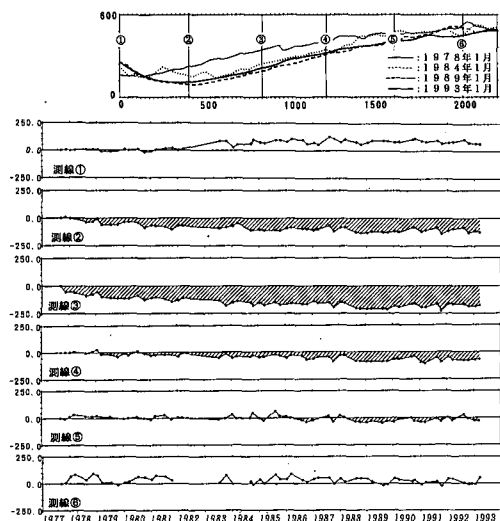


図-6 汀線距離の経時変化

田川から南側では汀線の前進が見られることから、広域での漂砂としては、従来から言われている北向きの沿岸漂砂が卓越していると考えられ、対象海域では、局所的な南向きの沿岸漂砂が生じていたと考えられる。

(2) 波浪特性

仙台港沖合いの波浪観測資料の中から、波向観測資料の整っている1980年から1992年までの有義波の観測資料を基に、対象海域の波浪特性について整理した。有義波高では1m未満の波高が全体の75%を占め、周期は

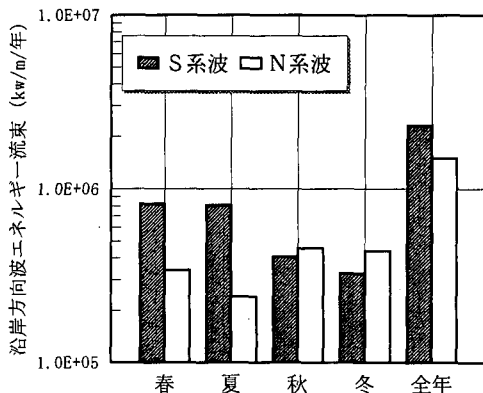


図-7 季節別・方向別波エネルギー流束

7~8秒が20%程度で最も卓越し、波向は、海岸線にはほぼ直角方向のESE・SEの両者の出現率が高い。季節的には、波高0.5m未満が50%以上を占める冬季が、他の季節に比べて静穏な時期となっている。波向では春・夏ではESE、秋・冬ではSE方向の出現率が高い。

沿岸漂砂量は、海浜に襲撃する波浪のエネルギー流束に比例することが知られている。そこで、仙台港南海浜の沿岸漂砂の卓越方向を推定するために、有義波高・周期・波向の観測結果より沿岸方向の波エネルギー流束を算出した。

算出に当たっては、対象海岸の汀線に直角方向(N 124° E)を境にして、南側からの波浪によるものをS系、北側からのものをN系として、それぞれの季節別の年平均エネルギー流束を求め、図-7に示した。

この結果より、春・夏ではS系がN系を大きく上回り、秋・冬ではややN系が大きい。年間ではS系が 2.3×10^6 kw/m/年、N系が 1.5×10^6 kw/m/年と、南からの波による沿岸方向北向きのエネルギー流束が大きく卓越している。このことから、自然海浜での沿岸漂砂は、季節的に南北両方向の漂砂が有るものの、年間の卓越方向は北向きと考えることができる。

(3) 防波堤の反射波による沿岸漂砂方向の変化

以上の地形変化や波浪特性より、南防波堤建設後の局所的な南向きの沿岸漂砂の発生した要因としては、以下のように考えられる。

仙台港南防波堤は、海岸線に斜めに設置されていることや基部付近を除いて消波されていないこともあって、波向によらずに比較的大きな反射波が南方向に向かう構造となっている。そのため、南からの入射波による北向きの沿岸漂砂は低減され、北からの入射波による南向きの沿岸漂砂は増大することになる。したがって、大きな反射波の到達範囲では、局所的に南向きの沿岸漂砂が卓越したものと考えることが出来る。

3. 反射波を考慮した汀線変化の追算

仙台南南海浜の事例を基に、汀線変化モデル (1-line theory) による追算を行い、構造物の反射波による沿岸漂砂の変化に伴う海浜変形について検討を行った。

(1) 計算波浪条件

汀線変化モデルによる汀線変化は、沿岸漂砂量の分布により決定され、その漂砂量は一般に波のエネルギー流束と関連づけられていることから、波のエネルギー流束を考慮した代表条件を設定する。

ここでは、波のエネルギー流束を、便宜的に以下のように表現し、計算に用いる波浪諸元を算定する。

$$W = H_0^2 \cdot T \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W : 波エネルギー流束、 H_0 : 観測有義波高、 T : 周期である。

代表周期は、対象期間内の平均周期を用いる。波高は、対象期間内の平均の波エネルギー流束値を代表する波高を算定するものとして、式 (1) の定義より次式により求める。

$$H_s = (W_m / T_s)^{0.5} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $H_s \cdot T_s$: 代表波高・周期、 W_m : 対象期間内の単位時間当たりのエネルギー流束である。

代表波向については、波のエネルギー流束の沿岸方向成分を考慮し、以下の方法により求める。

沿岸方向の波エネルギー流束は、以下で表される。

$$W_L = W \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 W_L : 波エネルギー流束の沿岸方向成分、 α : 汀線に直角方向からの波の入射角度である。

ここで、上記の代表波の持つ沿岸方向のエネルギー流束の値が、対象期間の単位時間当たりの沿岸方向波エネルギー流束値に等しくなるような波向を設定する。

$$W_{Lm} = W_{sm} \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 W_{Lm} : 対象期間の単位時間当たりの沿岸方向波エネルギー流束値、 W_{sm} : 代表波高・周期による単位時間当たりの波エネルギー流束 ($W_{sm} = H_s^2 \cdot T_s$) である。 W_{Lm} は、波浪観測結果より求められるので、式 (4) より代表波向 α_s を求めることが出来る。

(2) 代表波の算定結果

前述の波浪特性の整理結果で得られた沖波波長の出現特性より、季節的に卓越方向が異なることを考慮し、汀線に直角方向から南方向をS系、北方向をN系として、それぞれの代表波浪条件を設定した。なお、海岸に与える影響の少ない波高 50 cm 未満、周期 3 秒未満の波浪については静穏として算定の対象から除いた。

また、季節的な波浪の出現特性を考慮して、各季節別のS系・N系それぞれの沿岸方向エネルギー流束の総和と代表条件から求まる単位時間当たりの沿岸方向のエネ

表-1 代表波の算定結果

代表波浪条件			年間の入射日数			
	波高 (m)	周期 (秒)	波向	春 (日)	夏 (日)	秋 (日)
S系波	1.07	8.3	N134°E	21.2	24.3	12.9
N系波	1.04	9.3	N115°E	10.6	7.8	15.6

ルギー流束値から波の年間当たりの入射時間を設定し、代表波浪諸元と共に表-1に示した。

(3) 汀線変化の追算結果

a) 波浪場の計算

波浪場の計算は、エネルギー平衡方程式を用いて算出したが、南防波堤からの反射波は、入射波の計算結果より防波堤前面の方向スペクトルを折り返し、防波堤を仮想開口堤として反射率を考慮した別途計算を行った。入射波と反射波は、エネルギー合成により波高を求めると共に、波向を式 (4) と同様の考えにより、入射波と反射波の沿岸方向の波エネルギー流束を合成して求めた。

図-8は、南防波堤沖側部分の直立堤による反射波の計算結果より、S系・N系の代表波による反射波高の分布を示したものである。

この結果より、反射角の大きなS系波の影響域が南側に大きく広がっており、反射波高 50 cm 以上の領域が七北田川河口付近まで到達している。反射角の小さくなるN系波は、S系波に比べて狭い範囲に分布し、S系波の反射波が沿岸域に与える影響が大きいことが分かる。

b) 汀線変化の計算

汀線変化の計算は、合成波浪を基に各計算点での碎波諸元を求め、小笹・Brampton (1979) による漂砂量式を用いて算出された沿岸漂砂の分布より、漂砂の連続式により汀線の変化量を求めた。また、S系・N系の季節別の入射日数に応じてそれぞれの波を交互に作用させることで、季節的な波浪特性を反映させることとした。

追算の対象としては、前述の汀線測量結果を採用し、1976年10月から1992年8月までの汀線の変化過程について計算を行った。また、反射波の効果を確認するために入射波のみによる計算も行った。なお、追算対象期間内では、1977年から1982年にかけて翼堤の建設が進

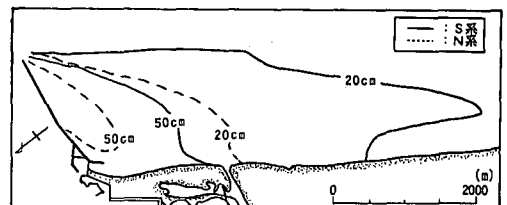


図-8 反射波の分布

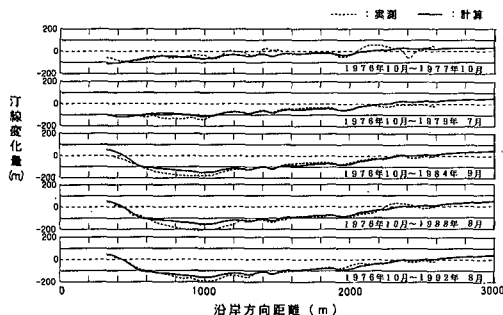


図-9 汀線変化の追算結果(反射波を考慮)

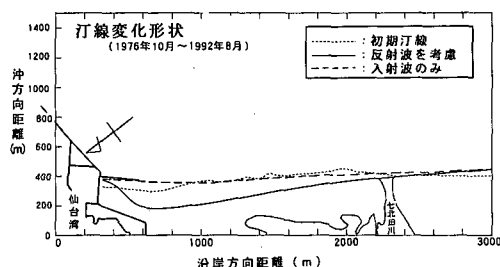


図-10 反射波有り・なしの計算汀線形状比較

められており、その背後の変化状況を再現するために、設置状況に合わせて波の回折を考慮した。

図-9は、反射波を考慮した場合の汀線変化量の分布を計算過程毎に図示したものである。この結果より、計算結果は、汀線の後退する範囲や変化量及び1984年以降に海浜が安定化していること等の現地の状況を良く再現していることが分かる。

図-10は、1992年までの計算結果から得られた汀線形状に、入射波のみで計算された同一期間の汀線形状を併せて示したものであるが、反射波を考慮しない計算汀線は、S系波による北向きの沿岸漂砂が卓越するために、1976年の初期汀線に比べて防波堤基部で前進している。

このように、反射波を考慮しない場合には、現地の状況を再現出来ないことより、南防波堤の反射波によりS系波によって生じる北向き沿岸漂砂の減少とN系波による南向き沿岸漂砂の増大が起こり、反射波の影響範囲では南向きの沿岸漂砂が卓越していたことが確認できる。

4. 結 論

本研究では、防波堤等の構造物の反射波による海浜変

形の制御効果について検討を行った。主な結論を列挙すると以下の通りである。

① 仙台湾北側では、研究事例及び波浪観測資料の整理結果より、自然海浜での沿岸漂砂は北向きが卓越している。

② その沿岸漂砂下手側に設置された仙台湾南防波堤付近では、建設直後より防波堤基部の土砂量の減少や汀線後退が起こり、南側の約2kmの範囲に渡って侵食域が生じた。このことは、新たに防波堤近傍で南向きの沿岸漂砂が生じたことを示すものである。

③ 南北両方向の沿岸漂砂の発生を考慮した汀線変化の追算結果では、反射波を考慮しない場合には防波堤付近の汀線が前進して現地の状況を再現できず、反射波を考慮した場合に現地の汀線の変化過程を精度良く追算できた。

④ これらの結果より、反射波による沿岸漂砂の制御効果が確認され、反射波を適度に発生させることで沿岸漂砂を制御し、港湾における過度の土砂堆積による航路の埋没や海岸の侵食等を防止することの可能性が示された。

なお、本研究では、波による沿岸漂砂を対象として検討を行ったが、山下ら(1994)も示しているように、構造物付近の循環流についての検討も必要であろう。

最後に、本論文は、仙台湾南海浜背後の蒲生干潟保全のための「仙台湾南海浜部環境調査委員会」(委員長：栗原 康 東北大学名誉教授)の調査の一部をとりまとめたものであり、各委員の方々には貴重なご意見を賜った。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・峰松麻成(1990): 仙台湾岸における砂浜消失の危機, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 479-483.
- 小笹博昭・AH. Brampton(1979): 護岸のある海浜のてい線変化数値計算, 港研報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-104.
- 加藤一正・吉松 晃(1976): 三次元の経験的固有関数法による深淺図解析法, 港研報告, 第23巻, 第2号, pp. 89-165.
- 田中則男・小山内秀夫・夷塚葉子(1980): 我が国主要海浜の特性について, 港研資料, No. 356, 67p.
- 田中則男(1983): 日本沿岸の漂砂特性と沿岸構造物築造に伴う地形変化に関する研究, 港研資料, No. 453, 148p.
- 田中 仁・伊藤俊夫・首藤信夫(1990): 七北田川における河口地形変化と水理特性, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 337-338.
- 山下淳平・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃(1994): 斜め突堤を用いた漂砂制御に関する研究, 第49回年講, pp. 740-741.