

構造物周辺の地形変化の観測

堀川 清 司*・宇 多 高 明**・針 貝 聰 一***・久 保 田 進****

1. はじめに

近年、現地海岸の地形変化を直接測定することによって、漂砂および海浜変形現象の解明を進めようとする研究が広範に行われている。しかしながら、これらの研究の殆どは自然海岸を対象としたものが多く（例えば、橋本・宇多^{1),2),3)}）、構造物のある海岸を対象としたものは少ない。

針貝ら⁴⁾は、茨城県大洗港の防波堤背後の海浜に3本の固定測線を設け、週1回の測量を行うことによって、構造物周辺の地形変化特性を調べた。その結果、防波堤遮蔽領域における地形変化と外力の関係は二次元実験あるいは現地自然海浜を対象とした経験式に、必ずしもあてはまらないことが指摘された。

本報告では、構造物周辺の地形変化特性をさらに明確に把握することを目的として、針貝らの観測に引き続き新たな観測結果を含めて検討を行った。

2. 観測方法

観測を行った海岸を図-1に示す。この海岸は茨城県大洗港の防波堤背後に位置しており、海岸の北端には長さ550mの防砂突堤（観測開始時は400m）が設置されている。また観測期間中の昭和55年12月～56年1月には防砂突堤の南約700m地点に小突堤が建設された。

この海岸に5本の岸沖方向測線（No. 1～5）と3本の沿岸方向測線（No. 6～8）を設定した。測線 No. 5を除く各測線は、大洗港防波堤の回折波領域に位置する。また沿岸方向測線はいずれも岸沖方向測線 No. 2に直交している。

観測期間は昭和55年5月16日から57年12月28日の約2年半であり、この間に毎週1回の割合で138回の観測を行った。毎回の観測内容は表-1に示される通り、各測線上の海浜断面測量、測線 No. 2～5の前浜上の底質採取および海象観測である。海浜断面測量の方法はレベルとスタッフを用いた水準測量による。各測線とも

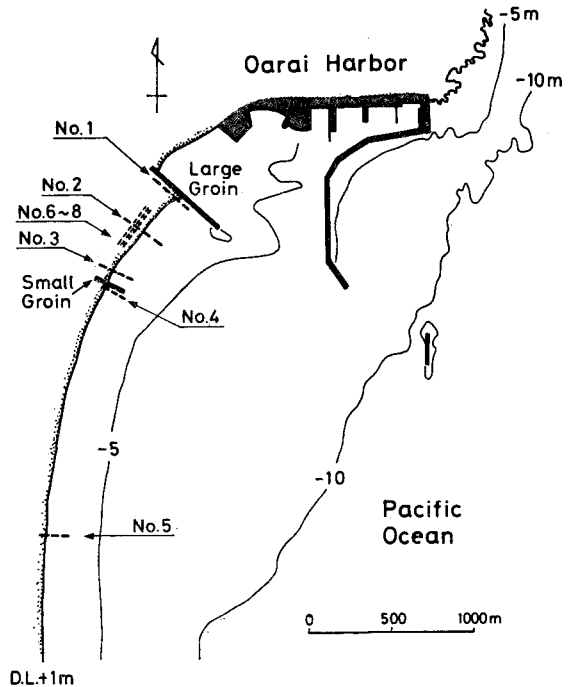


図-1 測線配置図

表-1 観測項目と測定期間

測 線	測 定 項 目							測 定 期 間
	砕波波高	周 期	波 向	流 速	沿岸断面	中央校柱	底 質	
No. 1	●	●		●	●	●		第1回～138回 (S. 55. 5. 16) (S. 57. 12. 28)
No. 2	●			●	●	●	●	"
No. 3			●	●	●	●		"
No. 4	●			●	●	●	●	第35回～138回 (S. 56. 8. 29) (S. 57. 12. 28)
No. 5	●			●	●	●	●	"
No. 6						●		第1回～54回 (S. 55. 5. 16) (S. 56. 5. 22)
No. 7						●		第55回～138回 (S. 55. 10. 31) (S. 57. 12. 28)
No. 8						●		第117回～138回 (S. 57. 8. 6) (S. 57. 12. 28)

●：周期は防砂突堤において、測線No.1付近の波を測定することにより求めた。

測量間隔は基準点から10m間隔である。海象観測の項目は砕波波高、周期、波向および沿岸流の流向、流速である。これらの測定は次の要領で実施された。まず、測線 No. 1～5 において砕波波高をスタッフを用いて10波測定し、平均値と最大値を記録する。次に、各測線上

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 建設省土木研究所 海岸研究室長
*** 正会員 (株)アイ・エス・エー新土木研究所
**** 正会員 海岸環境工学研究センター 研究員

でひも付きフロートを用いて流れの測定を行う。波の周期を防砂突堤上から30波分測定して平均する。最後に、No. 3 付近に入射する波の波向を海岸背後の高台からアリダードを用いて測定する。

3. 観測結果および考察

3.1 波と流れ

図-2 は、測線 No. 1~5 における砕波波高の頻度分布である。砕波波高は防砂突堤に近いほど小さく、南へ離れるほど大きい。最多頻度の砕波波高を用いて砕波波高の沿岸方向勾配を求めると $d\bar{H}_b/dx = 1.1 \times 10^{-3}$ となる。このような波高分布は防波堤の遮蔽領域外から内側へ向かう沿岸流を発生させる (Kraus ら)⁵⁾。

Kraus らの論文中的図-3 から砕波波高の沿岸方向勾配を求めると、昭和55年12月9日のデータで $d\bar{H}_b/dx = 2.16 \times 10^{-3}$ 、12月7日のデータで $d\bar{H}_b/dx = 1.6 \times 10^{-3}$ となり、先の値にかなり近い値を示す。

図-3 は、測線 No. 1~5 における沿岸流速の頻度分布である。全般的に見るといずれの測線でも北向きの沿岸流の出現する頻度が高い。防砂突堤近傍の測線 No. 1 では特に北向き沿岸流となる割合が大きい。このような北向き沿岸流の発生は、図-2 で明らかにした砕波波高の沿岸方向分布と密接に関連する。

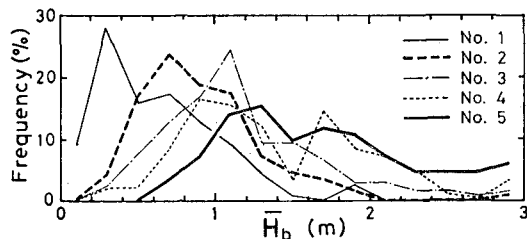


図-2 砕波波高の頻度分布

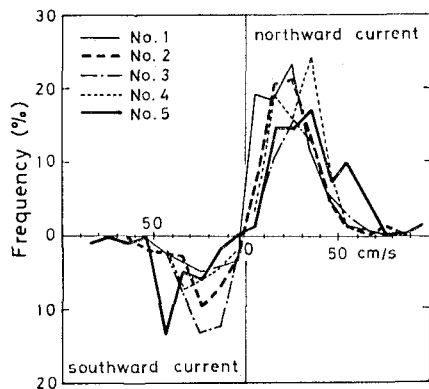


図-3 沿岸流速の頻度分布

3.2 前浜勾配と底質粒径

図-4 は、前浜勾配の頻度分布である。防波堤の遮蔽領域に入るほど前浜勾配は小さくなっている。図-5 に

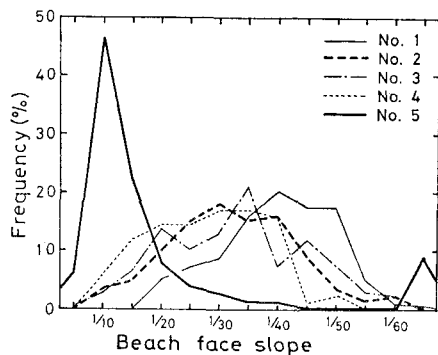


図-4 前浜勾配の頻度分布

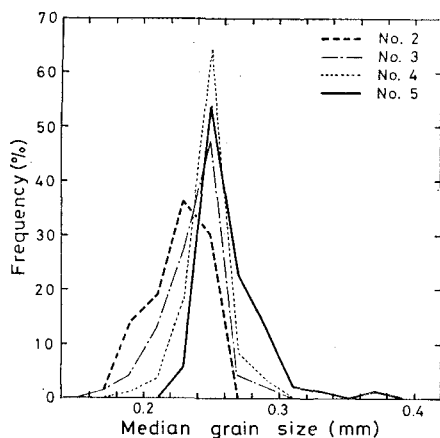


図-5 底質粒径の頻度分布

底質粒径の頻度分布を示す。測線 No. 2 と No. 5 とを比較すると、後者の方が大きい粒径の出現率が高い。最大の頻度となる粒径は $0.23 \sim 0.25 \text{ mm}$ でありほぼ一様である。図-2 によれば最大頻度の砕波波高は測線 No. 1 で 0.32 m 、測線 No. 5 で 1.3 m となっている。前浜勾配を時系列として調べた場合、底質粒径がほぼ一様であれば、波高が低いと、主として岸沖方向の漂砂によって前浜勾配は急になる (橋本・宇多)⁶⁾。今、場所的に異なる地点において生じた前浜勾配の変化が上記の関係に従うと考えると、図-2 の砕波特性から図-4 に示した前浜勾配は遮蔽領域ほど急勾配にならない。しかし、結果は逆の傾向を示している。このことは防砂突堤周辺の前浜勾配が岸沖漂砂でなく、沿岸漂砂の影響で定められている可能性を示唆している。

3.3 地形変化

図-6 は、各測線での汀線変化量の経時変化を示す。防砂突堤近傍の測線 No. 1 では第1回の観測から汀線の前進が見られる。汀線は時間とともに前進したが、その変化は次第に小さくなった。防砂突堤から 314 m 離れた測線 No. 2 では汀線の前進が測線 No. 1 と比較して約20週遅れて始まった。防砂突堤からの距離がさらに大きい測線 No. 3 では、一層時間遅れが増大した。また防

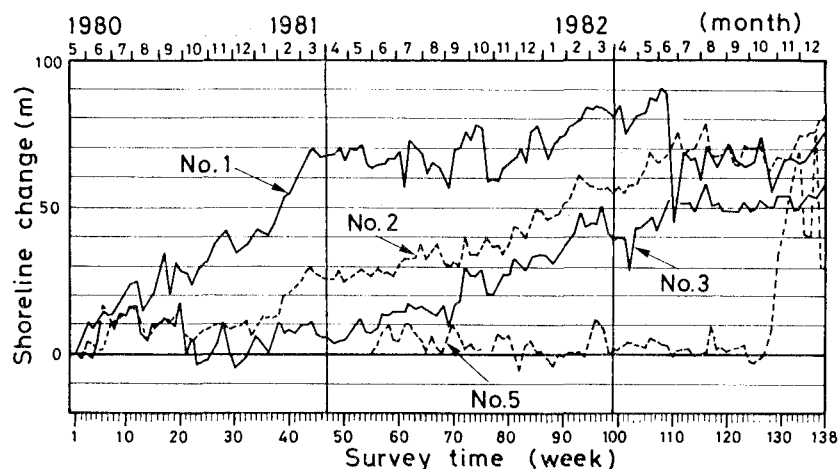


図-6 汀線位置の経時変化

砂突堤からの距離が大きくなるにつれて汀線変化量は小さくなることからわかる。一方、測線 No. 5 は防砂突堤から 2,080m 離れており、防波堤の遮蔽領域外に位置するが、ここでは汀線はわずかつつ後退している。ただし、測線 No. 5 で第 126 回付近に生じた大きな変化は、浜屋の侵食によって生じた一時的な汀線の変化である。

図-7 は、汀線位置の変化量 Δy_s と汀線より陸側の断面面積変化量 ΔA_s との関係を示す。いずれの測線においても Δy_s と ΔA_s の相関は良好で、原点を通る回帰直線の傾きは 0.70~1.54 となった。また当該領域において

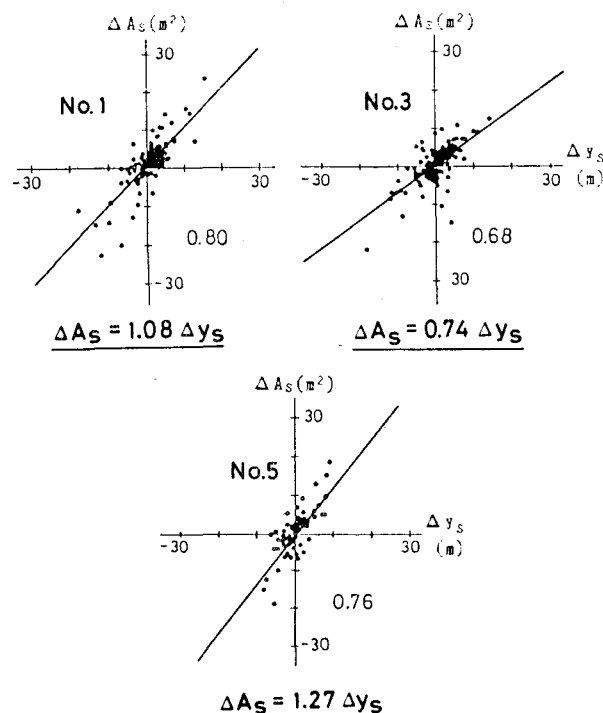


図-7 汀線位置の変化量と汀線より陸側の断面面積変化量の関係

は、昭和 54 年~57 年に 9 回の深浅測量を実施したが、これらすべての組合せについて Δy_s と ΔA_s の関係を調べたところ、いずれも良い相関を示し、原点を通る回帰直線の傾きは 0.53~1.81 となり、各測線で時間的に求めた値とほぼ一致する。

図-8 は、測線 No. 7 における沿岸方向の地形変化を示す。図の上段は平均地盤高であり、下段は地盤高の変動を表す標準偏差である。

図より、観測期間中次第に地盤が高くなったことがわかる。また地盤が概略 D.L. +2m を越えると変動が小さくなる傾向が見られる。測線 No. 7 は No. 1~3 の間の防波堤遮蔽領域に位置しており、図-7 の結果を合せて考えると、地形変化の上限は D.L. +2m~3m にあると言える。

図-9 は、各測線において毎回の測量結果を汀線位置を合せて重ねることにより求めた平均的な断面形状を示す。破線は標準偏差である。防波堤の遮蔽領域では勾配が緩く、断面形状は安定しているのに対し、遮蔽領域外の測線 No. 5 では勾配が急で断面形状の変動は大きい。

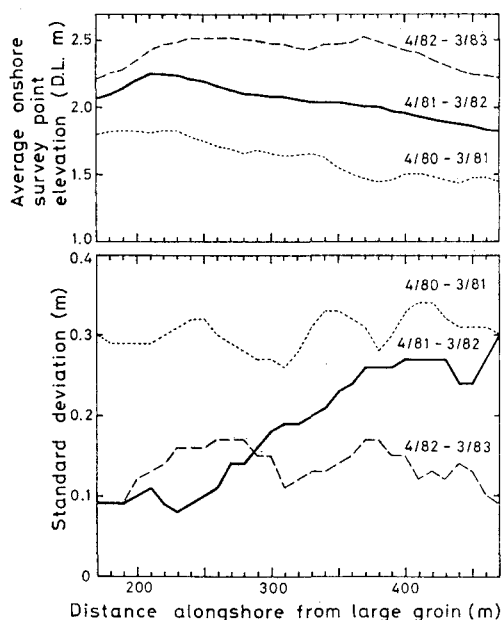


図-8 沿岸方向の地形変化

図-10 は、代表測線における断面形状の変化を示したものである。測線 No. 1 の断面形状はほぼ平行に前進し、測線 No. 3 の断面形状は前進しつつ勾配が緩くなっている。逆に測線 No. 5 の断面形状は後退しており、勾配は急になる傾向がある。

以上により、大洗海岸のように防波堤背後に位置する海岸においては、防波堤の遮蔽領域では堆積が顕著に生じ、海浜勾配が緩くなるのに対して、遮蔽領域外の侵食域では海浜勾配が急になることがわかる。

3.4 汀線変化の理論解による検討

沿岸漂砂が支配的な場合には、漂砂の連続式と沿岸漂砂量式を組み合わせることによって、海岸線の変化を予測できる。沿岸方向に x 軸をとり、基準線から測った汀線までの距離を y 、沿岸漂砂量を q 、漂砂帯の外縁での水深を h とすれば、砂の連続式は式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + (1-\varepsilon)h \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \cdots(1)$$

ここで ε は砂の空隙率である。

大洗海岸においては防波堤の回折効果があるため、沿岸方向の波高勾配が無視できない(Kraus ら)。従って沿岸漂砂量公式として、次の小笹・Brampton⁷⁾の式を用いる。

$$q = H_b^2 C_{gb} \left(K_1 \sin 2\alpha_{bs} - K_2 \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad \cdots(2)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= K_1' / \left\{ 16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-\varepsilon) 1.416^{5/2} \right\} \\ K_2 &= K_2' \cot \beta / \left\{ 8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-\varepsilon) 1.416^{5/2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \cdots(3)$$

ここで、 H_b は碎波波高、 C_{gb} は碎波点での波の群速度、 α_{bs} は汀線に対する碎波角、 K_1' 、 K_2' は無次元係数、 ρ_s 、 ρ は砂および水の密度、 β は海底勾配角である。

α_{bs} は x 軸に対する波峰線の角度 α_b を用いて、

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \frac{\partial y}{\partial x} \quad \cdots(4)$$

ここで、 α_b 、 $\partial y / \partial x$ は微量とし、式(4)を式(2)に代入すれば、若干の近似により、

$$q = H_b^2 C_{gb} \left(2K_1 \tan \alpha_b - 2K_1' \frac{\partial y}{\partial x} - K_2' \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad \cdots(5)$$

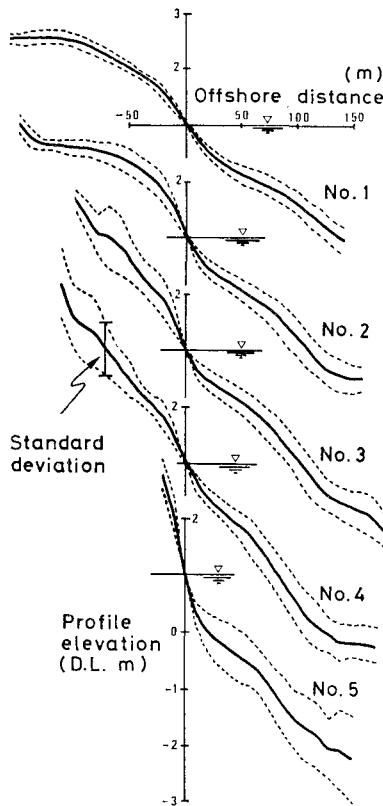


図-9 汀線位置を基準とした断面形状の比較

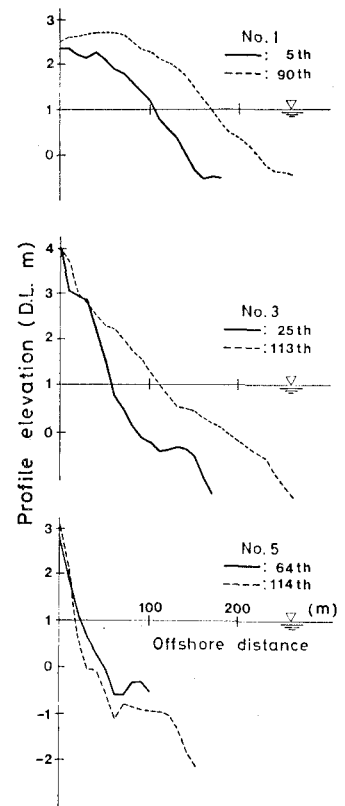


図-10 侵食および堆積断面形状の比較

ここで $2K_1 H_b^2 C_{gb} = F$, $\tan \alpha_b - \frac{K_2}{2K_1} \frac{\partial H_b}{\partial x} = \tan \alpha_0$ として、式(5)を式(1)に代入すると次式を得る。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = A_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \cdots(6)$$

ここで $A_0 = F/h$ であり、 α_b 、 $\partial H_b / \partial x$ の場所的、時間的变化が小さく、ほぼ一定値とみなされるとき α_0 、 F は定数と考えてよい。

$x=0$ で $q=0$ 、波の入射角が α_0 という条件下での式(6)の解析解は次のように導かれる(橋本)⁸⁾。

$$y(x, t) = \frac{\tan \alpha_0}{\sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{4A_0 t} \exp \left(-\frac{x^2}{4A_0 t} \right) - x \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4A_0 t}} \right) \right\} \quad \cdots(7)$$

ただし、

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-\zeta^2) d\zeta$$

防砂突堤近傍の汀線変化は、

$$y(0, t) = \frac{\tan \alpha_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{4A_0 t} \quad \cdots(8)$$

と表される。いま $\zeta = \frac{x}{\sqrt{4A_0 t}}$ とおくと、

$$y(x, t) = y(0, t) \{ \exp(-\zeta^2) - \sqrt{\pi} \zeta \operatorname{erf}(\zeta) \} \quad \cdots(9)$$

$$\frac{y(x,t)}{y(0,t)} = \exp(-\zeta^2) - \sqrt{\pi} \zeta \operatorname{erf}(\zeta) \equiv F(\zeta) \quad \dots(10)$$

式 (8) は、 $x=0$ における汀線変化が $\sqrt{t}$ に比例して増加することを示しており、また式 (10) は任意の時刻と任意の場所 x における汀線変化が一つの曲線と与えられることを示す。以下に実測値を用いてこの点を検討してみる。

測線 No. 1 は防砂突堤より 25m 離れているが、汀線変化の生じた沿岸方向の距離 (約 1km) に比較すると十分小さな距離と考えられるので、この測線における汀線変化を $x=0$ における値とみなすことができる。図-6 より $\sqrt{t}$ に比例して、実測値に良い一致を示す関数を見出すと、

$$y(0,t) = 8\sqrt{t} \quad \dots(11)$$

となる。ただし、 t は 1 週間を単位とする時間であり、 $0 \leq t \leq 110$ とする。この理由は、 $t=110$ 週で不連続な変化が起きているためである。式 (8) と (11) の同値関係より、

$$\frac{\tan \alpha_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{4A_0} = 8 \quad \dots(12)$$

となる。次に測線 No. 2, 3 の変化を式 (10) の形に整理してみる。式 (10) のように整理するには、実測値 $y(x,t)$ を $y(0,t)$ で割る必要がある。 $y(0,t)$ は実測値をそのまま用いてもよいが、誤差が大きくなる可能性があるので $y(0,t)$ は式 (11) で与えることにした。式 (10) の右辺は ζ のみの関数であるが、 ζ は定数 A_0 変数 x, t の関数である。 (x,t) は各点各時刻において与えられているが、 ζ を計算するには定数 A_0 を定めなければならない。 A_0 は次の方法で求めた。すべての (x,t) に

ついて、式 (10) の左辺の値と $F(\zeta)$ の関数形より ζ を逆算し、これより A_0 の平均値 $\bar{A}_0$ を計算する。 $\bar{A}_0$ と測定値より ζ を求め、式 (10) の関数形に従ってプロットする。この結果を示すのが 図-11 である。測線 No. 2 と 3 は同様な変化傾向を示すものの 2 つのデータ群にはずれが生じている。またこれらの実測値は ζ が小さくなる (t が大きくなる) と理論値からのずれが大きくなる。すなわち実際の汀線変化が理論式と与えられるよりも早く生じたことになる。これらの原因として、測線 No. 3 のデータには、観測期間中に建設された小突堤の影響が含まれていること、また理論計算では単一な波高、波向を仮定していること等が考えられる。

4. おわりに

本観測により、構造物周辺の地形変化特性をある程度明らかにすることができた。すなわち、防波堤の背後域においては、自然海岸と異なり、外力である波、流れの方向が安定しているため、地形変化の傾向は一様である。防波堤の遮蔽領域の海浜断面は前進しかつ勾配が緩くなる。逆に遮蔽領域外の侵食域では海浜断面は後退し、勾配は急になる。また、沿岸方向の波高勾配が生じている遮蔽領域内において突堤周辺の汀線変化形状を 1-line 理論に基づく解析解である程度再現することができた。

今後は、このような地形変化が生じるメカニズムを外力との関連において解明する必要があると考えられる。

謝 辞： 本観測の実施にあたっては、運輸省港湾技術研究所、茨城県土木部港湾課、同三浜港湾事務所に協力を受けた。ここに記して深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程 (第 1 報)、第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 245~249, 1976.
- 2) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程 (第 2 報)、第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 216~220, 1977.
- 3) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程 (第 3 報)、第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 269~273, 1978.
- 4) 針貝聰一・宇多高明・鶴川義郎：大洗海岸における地形変化の観測、第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275, 1981.
- 5) Nicholas C. Kraus・針貝聰一・久保田進：大洗海岸における汀線変化シミュレーション、第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 295~299, 1981.
- 6) 橋本 宏・宇多高明：前浜勾配、粒径及び波高の動的関係について、第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 221~225, 1980.
- 7) 小笹博昭・A. H. Brampton：護岸のある汀線変化数値計算、港湾技術研究所報告, 第 18 巻, 第 4 号, pp. 77~104, 1979.
- 8) 橋本 宏：海浜変形モデルの富士海岸への適用, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 218~222, 1976.

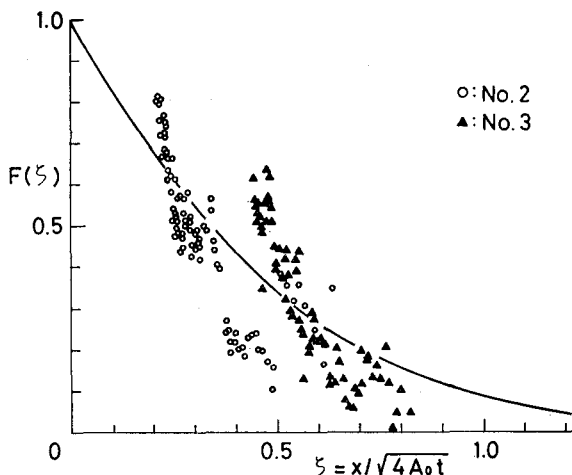


図-11 関数 F の実測値と解析解の比較