

海底掘削に伴う浜崖侵食機構のモデル化

Modeling of formation of scarp associated with offshore dredging

芹沢真澄*・宇多高明**・三波俊郎***・古池 鋼***・神田康嗣****

Masumi Serizawa, Takaaki Uda, Toshiro San-nami, Kou Furuike and Yasutsugu Kanda

Formation of scarp associated with offshore dredging is modeled with the assumption of equilibrium profile. Offshore dredged hole is assumed to be refilled by cross-shore sand transport as well as longshore sand transport. The Fukiagehama coast in Kagoshima Prefecture is considered for an example. Predictive model of the formation of scarp is developed.

Keywords : offshore dredging, cross-shore sand transport, longshore sand transport, scarp, predictive model of beach profile changes.

1. まえがき

海岸侵食の原因には種々の要因があげられるが、それらの一要因として海砂利採取に伴う海底掘削が考えられる。宇多ら（1985）は、高知海岸沖での海底掘削に伴う汀線や沖合の等深線の後退と、漂砂による掘削穴の埋め戻し現象について実態データをもとに議論し、さらに、宇多ら（1995）は、高知県の仁淀川河口沖での海底掘削による仁淀川河口砂州の後退について調べている。これらの事例は、いずれも沿岸漂砂が著しく卓越する海岸での海浜変形であるが、この種の現象については、宇多・河野（1996）が述べたように、掘削穴への土砂の落ち込みなどが等深線変化モデルによる予測計算により可能になっている。一方、両側を岬などにより囲まれ、したがって沿岸漂砂の著しく卓越していない海岸で海底掘削が行われる場合もあるが、このような場合における海浜変形が実態論的に明らかにされた例はあまり存在しない。しかし、このような海岸での海底掘削の影響予測もまた重要な問題の一つであろう。影響予測においては、力学的機構を取り込んだ各種海浜変形予測モデルを用いれば、変形過程の予測も可能であるが、工学的に見れば、最終形状を簡便に予測可能なモデルの構築もまた有効であろう。このことから、ここでは平衡海浜の概念を応用して、海浜変形の静的予測モデルを構築する。

2. 鹿児島県吹上浜における浜崖侵食

沿岸漂砂がほぼ閉じた系で海底掘削が行われた例として、鹿児島県の吹上浜海岸の事例がある。吹上浜海岸は、薩摩半島の西側に位置し、東シナ海に面する延長約50kmの砂浜海岸であって、日本三大砂丘に数えられる。海岸線の背後は国有保安林であり、松林が広がっている。近年、台風に伴う高波浪が来襲し、例えば1996年7月と8月には台風6, 12号に伴う高波浪により著しい浜崖侵食が発生した。浜崖侵食は沿岸の各所で発生したが、と



写真-1 吹上浜海岸の天神ヶ尾海岸における
浜崖形成状況（1996年9月3日撮影）

くに日吉町の天神ヶ尾海岸では著しいものであった。写真-1には、天神ヶ尾海岸での浜崖の発生状況を示す。この付近では、海岸線には防波堤や導流堤など、沿岸漂砂の移動を阻止する施設はないにもかかわらず、写真に示すように高さ数mにも達する浜崖が形成された。したがって浜崖侵食の原因として沿岸漂砂の阻止は考えにくい。

吹上浜海岸では、経年的な地形変化分析に役立つ浅深測量データは取得されておらず、現地データの分析から原因の特定を行うことは難しいが、1975年以降砂利採取のための海底掘削が行われてきており、これが浜崖侵食と関係する可能性がある。このうち、1975年以前については海底の掘削量や採取位置に関する情報が残されていないが、1975～1993年には図-1に示す場所で土砂採取が行われた。このうち1989～1992年では-15～-25mにおいて合計 $84 \times 10^4 \text{ m}^3$ の土砂採取（許可量）が行われた。その後1994年以降の海底掘削では、掘削水深は-35m

*正会員 海岸研究室（有）（〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉208）

**正会員 建設省土木研究所河川部長

*** 海岸研究室（有）

****正会員 （株）エムエーシー

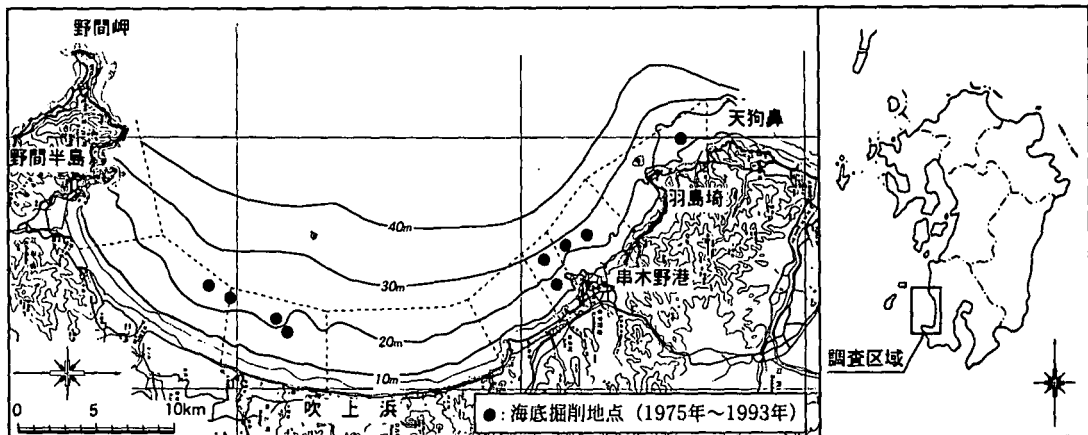
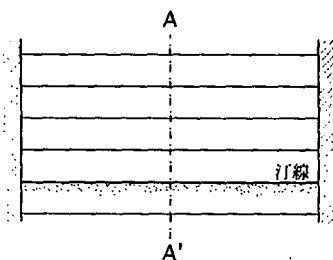


図-1 鹿児島県の吹上浜海岸の地形図と海底掘削区域

以深で、明らかに波作用下での移動限界水深より深い場所で海底掘削が行われていることから、屈折の影響はあっても著しい浜崖を形成させるような影響があるとは考えにくい。したがって、海底掘削の影響があったとしても、1975年以前の掘削の影響が出ているとしか考えられない。しかしながら、それらを実証する現地データは十分ないことから、ここではモデル化して検討を進める。

(a) 平面図



(b) A-A'断面図

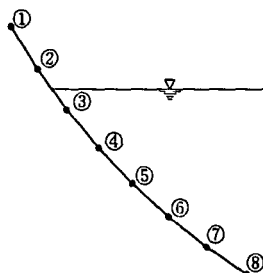


図-2 平行等深線を持つ初期海浜地形

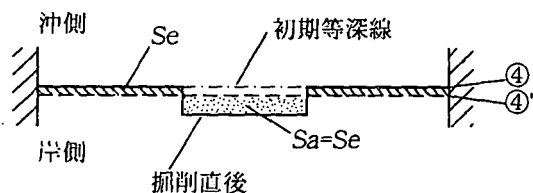


図-3 任意の等深線の変化

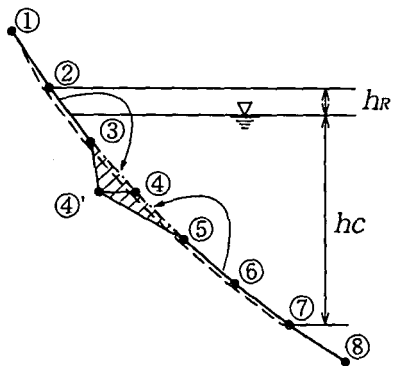


図-4 海底掘削に伴う等深線位置の変位

3. モデル化の基本的考え方

両端を岬などにより囲まれ、沿岸漂砂の出入りのない海浜を考える。そして、季節的変動は有するものの、平均海浜形状が長い間の波の作用のもとで十分安定な形となっており、海浜プロファイルが平衡断面で与えられるとする。この場合、何らかの原因によりこの海浜形状に地形変化が起これたとすると、波の作用によりもとの地形に戻ろうとする復元力が働く。海浜形状に変化をもたらす要因として、海底掘削を考える。いま、海底掘削が砕波点と波による地形変化の限界水深 (h_c)

の間の区域で行われるとし、便宜上、図-2aに示すように初期地形が平行等深線で与えられるとする。初期海浜は平行等深線ではあるが、海底勾配は岸沖測線上で一様である必要はなく、等深線の間隔は場所的に異なってもよい。ただし、図-2bに示す海浜縦断面形は、波の作用下で安定な平衡断面とする。

次に、図-3に示すように、沖合の任意の水深に相当する等深線を考える。海底掘削を行うと、一部分でこの等深線に凹みができる。凹みのできた水深が h_c が浅であったとすると、波の作用下で沿岸漂砂の作用により等深線は破線のように変化する。

すなわち、掘削穴位置の等深線の後退部分では土砂が堆積し、周辺域では沿岸漂砂によって土砂が削り取られるために等深線が後退する。この結果、地形変化後の等深線は初期形状と平行となる。海浜プロファイルを水深方向にいくつもの層に分割したとき、その等深線が代表する層の厚さが一定であるとすれば、図-3に示すように、等深線の後退域の面積 (S_e) と前進域の面積 (S_a) は等しい。以上の等深線の後退が生じたとき、海浜プロファイルは図-4の模式図に示すような変化となる。それぞれの水深間の海底勾配は仮定により安定であったとすると、③・④'間では限界勾配 (初期勾配) より急になり、④'・⑤間では緩くなる。プロファイルが平衡断面からずれば、平衡断面のもつ特性から、元に戻ろうとする作用が働く。すなわち、土砂収支を満足しつつ、海浜プロファイルが岸向きに平行移動して、掘削穴が埋めもどされる。この場合、土砂の埋め戻しの機構を、便宜上、④位置の水深を境にそれ以浅と以深とに分けて考える。

④位置の水深より浅い場所では、③・④'区間で平衡勾配より急になるが、これはその地点で限界勾配を越えたと解釈できるから、そこより陸側から土砂が落ち込み、点③は陸側へわずかに移動する。この状態は、④が④'へと移動したのと同じことになり、以下このような影響は次々と陸側へ波及していく。最終的に、これが繰り返されることは、初期プロファイルを陸側に平行移動させ、後退域の面積が三角形③④'④の面積と等しくなるようにすればよいことになる。

一方、④位置の水深より深い場所では、④'・⑤間の勾配は平衡断面の勾配より小さくなるとともに、⑤位置で勾配の急変が起こる。これは平衡断面の定義からそのままではありえず、掘削穴より深い区域の海底面が波の作用で削り取られ、その土砂が掘削穴を埋めもどし、結果として、④・⑦間のプロファイルの平行移動による後退域の面積が三角形④④'⑤と等しくすればよい。ここでは便宜上、④地点で浅と以深をそれぞれ独立に考えたが、実際には両者の計算をそれぞれ行った場合に、最終的な④位置の後退量は、④位置より浅い区域と深い区域をそれぞれ独立に計算した結果、同一にならなければならない。すなわち、結論的に言えば、 $-h_c$ 以浅の全区域のプロファイルを平行に後退させ、その後退面積が掘削に伴う等深線の後退面積と等しいようにすればよいことになる。この場合の海浜縦断面形は図-4に破線で示すようになる。海浜プロファイルの平行移動は沿岸方向に全て同様に行われるから、掘削穴が埋め戻されたとき、その影響は全域に及ぶことになる。

以上に述べた地形変化は、 $-h_c$ (⑦地点) から h_R までの間で生じる。したがって、陸上部で初期の形態のままの等高線(①)と、 h_R の間では浜崖が形成されなければならない。浜崖は砂の安息勾配に依存するある限界勾配で与えられる。

4. モデル化と計算のフロー

前節で述べた基本的考え方のモデル化を行う。まず、図-5のように沿岸方向に x 軸、沖向きに y 軸、鉛直上方に z 軸を定める。砂浜海岸の全長を x_0 、初期等深線位置を $Y_l(x,z)$ 、海底掘削後の等深線位置を $Y_D(x,z)$ とする。ここに、現象をできるだけ一般的に論ずるために、等深線形状は x, z の関数とおく。このように変数を定義したとき、海底掘削量の分布 $\Delta Y_D(x,z)$ は、

$$\Delta Y_D(x,z) \equiv Y_l(x,z) - Y_D(x,z) \quad (0 \leq x \leq x_0, -h_2 \leq z < -h_1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに、 h_1, h_2 は掘削域の最小水深と最大水深である。
このとき、総掘削量 V_D は、式(2)で与えられる。

$$V_D = \int_0^{x_0} \int_{-h_2}^{-h_1} \Delta Y_D(x,z) dz dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで平均掘削断面積 A_D を

$$A_D = V_D / x_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

と定義すると、等深線の平均後退量 $\Delta \bar{Y}_D(z)$ は、

$$\Delta \bar{Y}_D(z) = \int_0^{x_0} \Delta Y_D(x,z) dx / x_0 \quad (-h_2 \leq z \leq -h_1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

次に、図-6を参照して縦断面形の変化について考える。まず、浜崖形成に伴って生じる土砂量は無視し、 $-h_c$ から h_R までの範囲で等深線が後退して掘削穴を埋めるとすると、等深線の後退量 ΔY_e は、式(2)～(4)を用いると、

$$\begin{aligned} \Delta Y_e &= \int_{-h_2}^{-h_1} \Delta \bar{Y}_D(z) dz / (h_R + h_c) \quad \dots\dots\dots (5) \\ &= A_D / (h_R + h_c) \quad (-h_c \leq z \leq h_R) \end{aligned}$$

となる。この条件下で浜崖が形成されるが、その高さ ΔR は、幾何学的検討により、

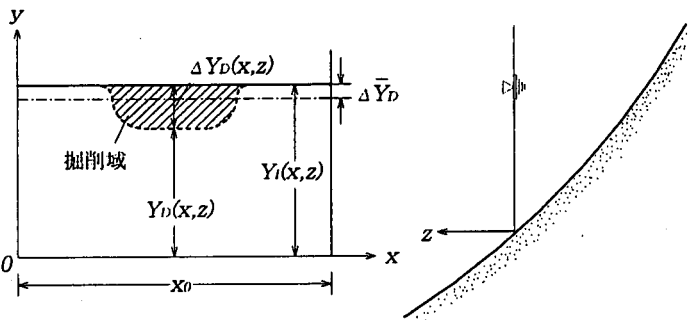


図-5 海底掘削に伴う任意等深線の平面変化時の各種パラメータの定義

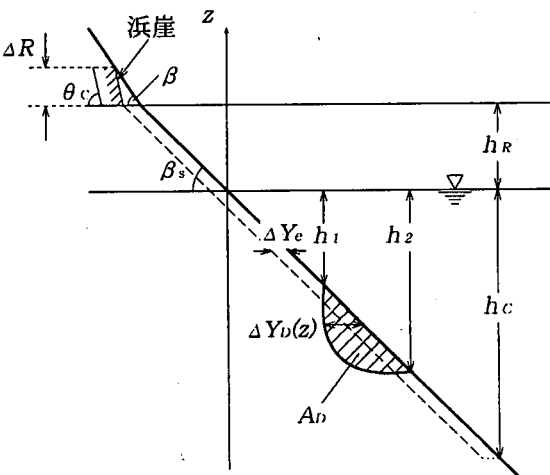


図-6 海底掘削に伴う海浜縦断面形の変化時の各種パラメータの定義

$$\Delta R = \Delta Y_e / (\cot \beta - \cot \theta_c) \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここに β は後浜（陸域）の傾斜角、 θ_c は浜崖の安息角である。

また、その侵食断面積 A_R は、

$$A_R = \frac{1}{2} \Delta R \cdot \Delta Y_e \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。

このとき浜崖部分の等高線の後退量 $\Delta Y_R(z)$ は

$$\Delta Y_R(z) = \{1 - (z - h_R) / \Delta R\} \cdot \Delta Y_e$$

$$(h_R \leq z \leq h_R + \Delta R) \dots\dots\dots (8)$$

となる。

以上の計算では、浜崖形成に伴って生産された土砂が考慮されていない。これを考慮すると等高線の後退量を与える式(5)は、

$$\Delta Y_e = (A_D - A_R) / (h_R + h_c)$$

$$(-h_c \leq z \leq h_R) \dots\dots\dots (9)$$

と改められる。実際の計算ではこの式(9)と式(6)～(8)を用いて繰り返し計算によって土砂収支を満足するようにする。これらの計算の順序は、図-7のようにまとめられる。

図-7のフローに示すように、まず最初の段階では浜崖侵食に伴う侵食断面積 A_R を0とするが、式(7)により新しい値 A_R' が定められると、この値を次の計算ステップの A_R に更新して、収束するまで繰り返し計算を行うことで、 ΔY_e 、 ΔR 、 A_R 、 ΔY_R が求められる。

最後に、

$$Y'(x, z) = Y_I(x, z) - \Delta Y_e \quad (0 \leq x \leq x_0, -h_c \leq z \leq h_R) \dots\dots\dots (10a)$$

$$Y'(x, z) = Y_I(x, z) - \Delta Y_R(z) \quad (0 \leq x \leq x_0, h_R \leq z \leq h_R + \Delta R) \dots\dots\dots (10b)$$

により等高線形状 $Y'(x, z)$ が定まる。

5. 計算結果

平行等高線海岸において、図-8aに示すような形で掘削が行われたとする。この場合の等高線の変化を計算したのが図-8bである。図中には計算条件を示す。計算された等高線は平行等高線となるが、 $h_c = -10\text{m}$ 付近で等高線の間隔が広がり、これと対照的に $h_R = +3\text{m}$ 付近で等高線の間隔が非常に狭くなる。図-9には、海浜中央における海浜縦

$Y_I(x, z)$	: 初期等高線形状
$Y_D(x, z)$	: 掘削後の等高線形状
h_1, h_2	: 掘削最小水深, 掘削最大水深
x_0	: 海岸線長
$\tan \beta$	: 後浜（陸域）勾配
$\tan \theta_c$	: 浜崖の安息勾配

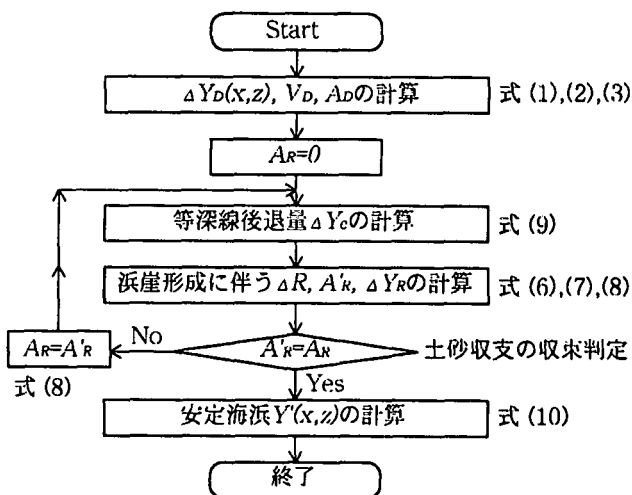


図-7 計算のフロー

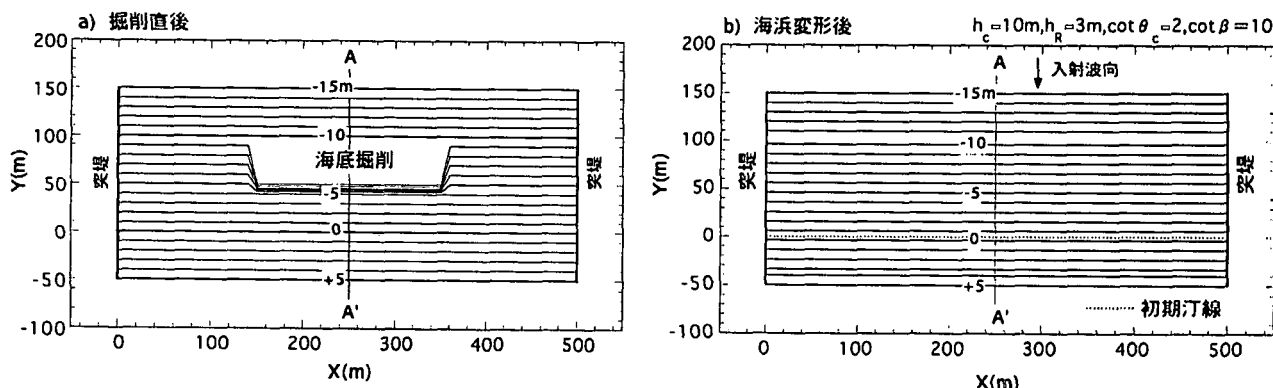


図-8 海底掘削直後と海浜変形後の海浜形状

断形の変化を示す。 $h_c = -10\text{m}$ 以浅でプロファイルが形を保ったまま平行に後退し、前浜上の $h_R = +3\text{m}$ 付近では浜崖が形成される。そして掘削穴は完全に埋め戻される。

ΔY_e は、式(9)で与えられるが、浜崖から生産される土砂量は $-h_c \sim h_R$ 間での等深線後退に伴う土砂量に対して十分小さい場合を考えると式(5)となる。この場合、図-10に示すように、初期海浜における前浜の面積を A_s 、汀線からバーム頂までの水平距離を Y_s として、 ΔY_e と Y_s の比を求めると、

$$\Delta Y_e/Y_s = 1/2 \cdot (h_R/h_c) / (1 + h_R/h_c) \cdot (A_D/A_s) \dots\dots (11)$$

が得られる。図-11には、 h_R/h_c をパラメータとした時の $\Delta Y_e/Y_s$ と相対掘削面積 A_D/A_s の関係を示す。

次に、浜崖の高さは式(6)で与えられるが、式(6)の両辺を ΔY_e で割ると、

$$\Delta R/\Delta Y_e = 1/(\cot \beta - \cot \theta_c) \dots\dots\dots (12)$$

となる。図-12には、 $\Delta R/\Delta Y_e$ と $\cot \beta$ の関係を示す。後浜の標高が h_R で一定の場合、 $\cot \beta$ は無限大となるので浜崖の高さは0である。一方、後浜の初期勾配が急になり、 $\cot \theta_c$ に近づくとき浜崖の高さは急激に増大する。吹上浜海岸を対象として、オーダー的な検討を行ってみる。いま掘削堆積を $200 \times 10^4 \text{m}^3$ 、岬間の砂浜海岸の延長を $30 \times 10^3 \text{m}$ 、 $h_c = 10\text{m}$ 、 $h_R = 2\text{m}$ と置くと、 $\Delta Y_e = 5.6\text{m}$ となる。さらに $\cot \beta = 5$ 、 $\cot \theta_c = 2$ と置くと、 $\Delta R = 1.9\text{m}$ となって、写真-1に見られたように高さ数mの浜崖が形成されてもよいことになる。

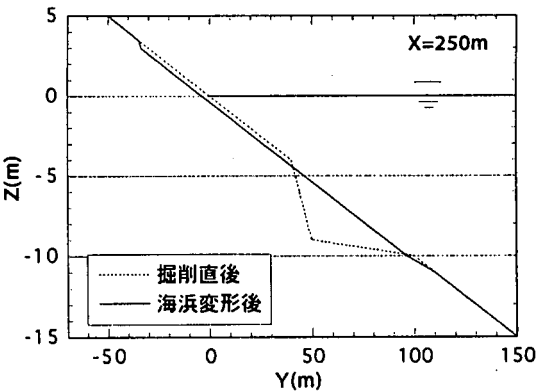


図-9 中央断面における海浜縦断形の変化

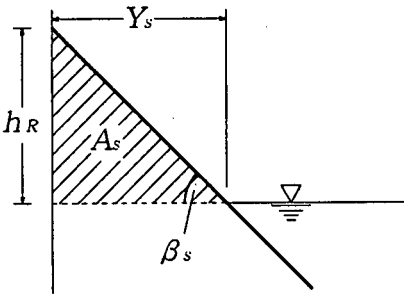


図-10 前浜における Y_s および A_s の定義

6. まとめ

平衡海浜の成立を仮定したとき、波による地形変化の限界水深(h_c)より浅い海域での海底掘削の影響は、波による土砂移動の生じている系全体に及び、海浜プロファイルの陸向きの平行移動をもたらし、陸側の端部には浜崖を形成させることを明らかにした。また、通常の波浪条件では波の作用が活発ではない十分沖合で海底掘削を行ったとしても、頻度は少ないもののその海岸への来襲波のうちの高波浪に伴う海底地形変化が生じる範囲で海底掘削を行うと、結局は浜崖侵食が進むと考えられる。その場合、波の来襲頻度は小さいから、影響の及ぶ時間は長いものの、長期的に見てバランス状態にあった海浜へのインパクトは必ず汀線部に影響し、浜崖の形成に結びつくと考えられる。

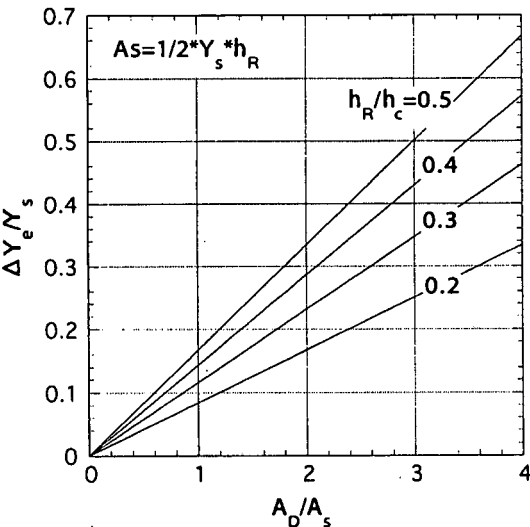


図-11 $\Delta Y_e/Y_s$ と A_D/A_s の関係

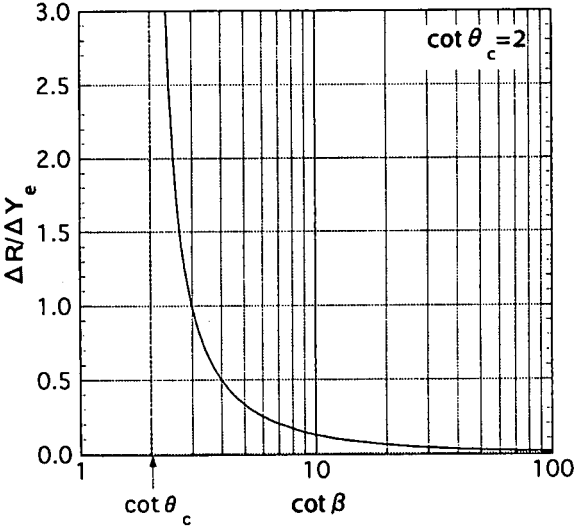


図-12 $\Delta R/\Delta Y_e$ と $\cot \beta$ の関係

参考文献

- 宇多高明・上森千秋・中條徳翁（1985）：海底掘削にともなう海底変形、第32回海岸工学講演会論文集、pp.410-414.
- Uda,T. A.Takahashi and M.Fujii（1995）：Bar topography changes associated with a dredged hole off the Niyodo River mouth, Coastal Eng. Japan, Vol. 38, No. 1, pp. 63-88.
- 宇多高明・河野茂樹（1996）：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発、土木学会論文集、No. 539/Ⅱ-35, pp. 121-139.