

侵食海岸の準平衡地形

三 井 宏*・筒 井 茂 明**・中 村 静 弥***

1. 序 言

砂防工事, ダム建設, 砂利採取などによる河川から海岸への供給土砂の減少, および大規模な埋立地, 防波堤の新設による沿岸漂砂の移動阻止があると, 慢性的かつ大規模な海岸侵食の発生の恐れが出てくる。そのような海岸侵食に対し, 突堤や離岸堤などの土木構造物で汀線後退を食い止め得るであろうか。

本研究では, そのような長期の海岸侵食がはたしてどこまで続くのか, ということを明らかにするために, 長期の侵食断面地形を理論的に求め, その理論地形と2次元実験, 3次元実験および現地海岸の地形と比較, 検討を行い, かつ, 侵食断面地形を予測することにより, 侵食防止対策の目安を得ようとするものである。

2. 海岸侵食の Model

海岸の平衡断面地形を理論的に論じた研究は, 数少ない。最近では, Zenchovich¹⁾ や解釈によっては Le Méhauté²⁾ の研究があげられよう。

本研究では次のような侵食海岸地形を対象とする。すなわち, ある海岸の上手からの漂砂供給がまったくなく, 下手側では沿岸流やジグザグ運動により底質は流失する, すなわち, 一方的に波浪により侵食されてしまい, 回復の余地がまったくない海岸である。

このような海岸の侵食過程を次のように考える。斜め入射波により底質は攪乱され, 沿岸流およびジグザグ運動により下手側へ流失し, その地点の水深は増大する。その結果, 漂砂は減少するのであるが, 一方, 海底摩擦による波高減衰率が減少するので, その地点の波高は増大し, その地点よりも汀線に近い側に存在する底質の移動量は増加する。このように, 海底地形に対応して海底摩擦や屈折により定まる波高により沿岸漂砂の流失が起こり, それによってまた海底地形が定まると考えるのである。底質の攪乱と沿岸流の大きさの程度により, 次の2つの侵食地形が考えられる。1つは底質の攪乱と沿岸流の作用が非常に大きく, 急激に侵食され, 近い将来に到達すると考えられる侵食地形で碎波水深に近い水深より

なる。その侵食地形を本論文では準平衡地形と名づける。もう1つは底質の攪乱も沿岸流の作用も小さく, 準平衡地形よりさらに侵食され, 遠い将来に到達するであろうと考えられる侵食地形であり, 移動限界水深に近い水深よりなる。以上から明らかなように, この考え方は, 海底摩擦係数の値が非常に重要な要素となる。

3. 2次元実験水路における再現方法

前述のような侵食地形を3次元の模型実験において再現しようとするれば, 実験時間が非常に長くなり, 大量の底質を必要とし, 流失漂砂となって下手に堆積した底質をなんらかの方法で除去してやらねばならないので, 膨大な時間と費用と労力を必要とする。

Saville³⁾ は暴風海浜においては bar 付近が, 正常海浜においては汀線付近が他の領域に比べて沿岸漂砂量が大きくなることを明らかにしている。したがって, 2次元水路で準平衡の侵食海岸を再現するには, 流失すると予想される bar または汀線付近の底質を人為的に除去してやればよいものと思われる。極限侵食地形を2次元模型実験により再現するには, 底質の運動状態を観察しつつ, 底質粒子の運動の激しい地点から優先的に底質を除去してやればよからう。当然のことではあるが, 上述のような2次元水路による実験では, 沿岸漂砂量の力学的機構が正確に把握されていない現在, 侵食速度すなわち時間縮尺を決定することは困難である。

4. 準平衡地形と極限侵食地形の解析結果

(1) 海底摩擦係数

波は伝播するに伴い変形する。その変形要因として, shoaling 効果, 屈折, 回折や流れの効果などがあり, さらに, 海底摩擦, 内部粘性, 海底砂層への浸透や碎波などによるエネルギー消散が考えられるが, 内部粘性や浸透の影響は海底摩擦の影響の数パーセント以下とかなり小さいことが指摘されている⁴⁾ ので, 本研究では海底摩擦以外の波のエネルギー損失は無視している。

図一1 は海底摩擦係数とレイノルズ数との関係である。固定床模型実験では, 境界層理論による値と非常によく一致することが明らかにされており^{5), 6)}, 現地海岸の観測値は理論値よりかなり大きくなることが報告されている⁷⁾。筆者らの移動床模型実験では, 実験数が少な

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 琉球大学助手 理工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大成建設(株)

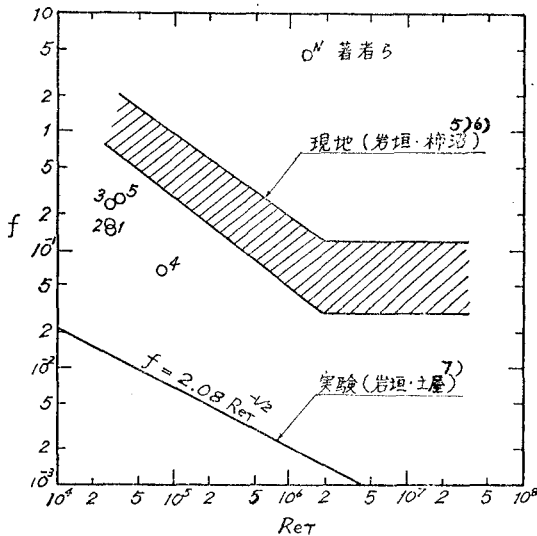


図-1 海底摩擦係数

いのはあるが、それらの中間の値となった。

(2) 準平衡地形

水底勾配 1/50 以下における新砕波指標を次式のように近似的に。

$$\frac{h_b}{H_0'} = 0.113 \left(\ln \frac{H_0'}{L_0} \right)^2 + 0.614 \ln \frac{H_0'}{L_0} + 2.267 \quad (1)$$

ここに、 h_b は砕波水深、 H_0' は相当深水波高、 L_0 は深水波長で、この式の適用範囲は $0.002 \leq H_0'/L_0 \leq 0.07$ である。

海底摩擦による波高減衰は、Bretschneider-Reid⁸⁾ により次式で示される。

$$H_A' = \left[1 + \frac{64\pi^3}{3g^2} \frac{f H \Delta x}{h^2} \left(\frac{h}{T^2} \right)^2 - \frac{K_S}{\sinh^2 \frac{2\pi h}{L}} \right]^{-1} H_A \quad (2)$$

ここに、 H_A は A 点での波高、 H_A' は A 点より Δx 進行した後の波高、 Δx は海底斜面を階段状に分割したときの 1 区間の水平距離、 T は波の周期、 h は水深、 g は重力加速度、 f は海底摩擦係数である。式 (1) と式 (2) により、順次、数値計算を行うことにより、準平衡地形が決定される。式 (1)、(2) からわかるように、小区間長 Δx 、海底摩擦係数 f 、深水波形勾配 H_0/L_0 、波の入射角 α_0 が準平衡地形に影響するので、これらの影響を以下に調べる。

a) 小区間長 Δx の影響

$T=10$ sec, $H_0/L_0=0.02$, $\alpha_0=0^\circ$ と固定し、 $\Delta x/L_0$ のみを変化させて計算した結果、 $\Delta x/L_0$ の値が 0.1 以下であれば、海底勾配を求める際の分割による誤差はあまり問題とならないことがわかった。通常、現地海岸における波の摩擦減衰を考慮した波浪推算の場合には Δx を

数百メートルにとれば十分であるとされているのであるが、このように海底地形を決定する際には Δx を 5~10 m 程度 ($\Delta x/L_0 \approx 0.05$) にとったほうが良いことになる。

b) 海底摩擦係数 f の影響

$T=10$ sec, $H_0/L_0=0.02$, $\alpha_0=0^\circ$ の一定値に対し、 f の値を 0.02~5.0 に変化させて、準平衡地形を求めた計算結果が図-2 である。この計算では 1 つの準平衡地形において全区間 f は一定としている。

初期の砕波水深 ($h/L_0=3.27 \times 10^{-2}$) は波の諸元が一定のために変化はないが、それ以後の海底地形変化には摩擦係数の影響がよく現われている。図-2 より、 $f=0.02$

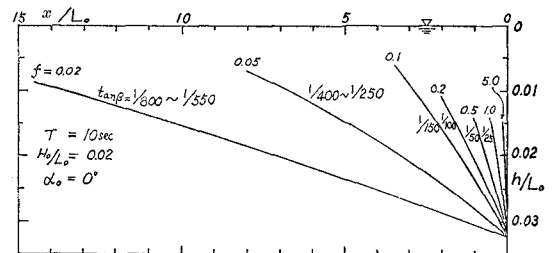


図-2 摩擦係数変化の影響 (準平衡地形)

~5.0 に変化した場合、海底勾配 $\tan \beta = 1/800 \sim 1/10$ まで変化し、海底勾配におよぼす摩擦係数 f の影響は非常に大きいといえよう。

c) 波形勾配 H_0/L_0 の影響

$f=0.1$, $T=10$ sec, $\alpha_0=0^\circ$ と一定に保ち、 $H_0/L_0=0.006 \sim 0.1$ と変化させて、波高変化の影響を示したものが図-3 である。この図によれば、波高変化は初期の砕波水深の値にのみ影響し、海底勾配には影響せず、これ

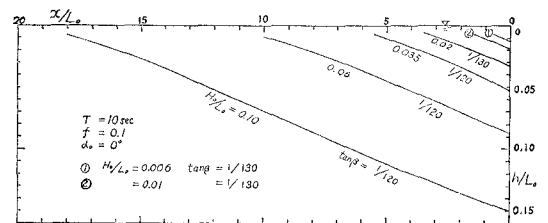


図-3 波高変化の影響 (準平衡地形)

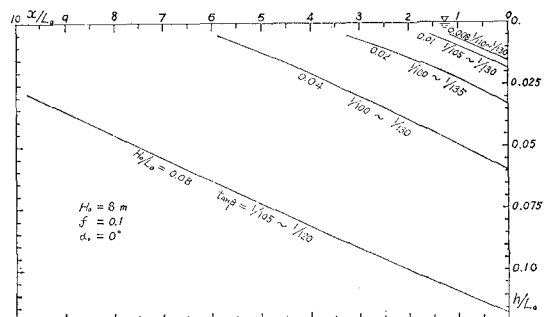
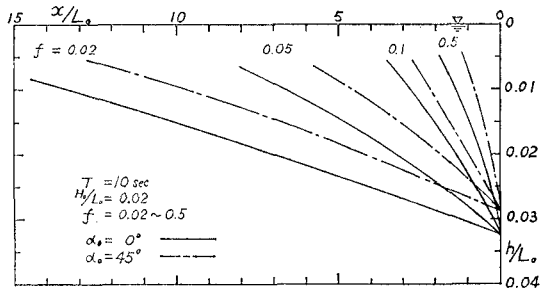


図-4 周期変化の影響 (準平衡地形)



図—5 入射角変化の影響（準平衡地形）

らの曲線群を平行移動させれば、すべて1つの曲線に重ね合わせることができる。

図—4は波高を一定に保ち周期変化($T=8.0\sim 25.32\text{ sec}$)の影響を示したものである。図—4より、波高変化と同様に、周期変化は海底勾配にほとんど影響を与えないようである。

d) 波の入射角 α_0 の影響

$T=10\text{ sec}$, $H_0/L_0=0.02$, $f=0.02\sim 5.0$ の諸元で、 $\alpha_0=0^\circ$ と 45° の場合を比較したものが図—5である。 $\alpha_0=0^\circ$ の場合に比べて $\alpha_0=45^\circ$ の場合は、屈折の影響により初期の碎波水深が若干浅くなり、その後屈折係数と浅水係数の影響が重なって海底勾配は若干急になるようである。

以上、準平衡地形に与える諸要素の影響を単純な条件下で検討した。その結果を要約すると、準平衡地形においては、波高が初期の碎波水深に大きく影響し、海底摩擦係数が海底勾配に大きく影響するようである。

(3) 極限侵食地形

移動限界水深の算定式は多数報告されているが、それらのほとんどは次式の形になる。

$$\frac{H_0}{L_0} = A \left(\frac{d}{L_0} \right)^B \sinh \frac{2\pi h}{L} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (3)$$

そこで、極限侵食地形を決定する算定式として、適用範囲が広いと思われる堀川・渡辺⁹⁾の全面移動限界の算定式を採用した。極限侵食地形の決定は準平衡地形の決定方法とほぼ同じであり、碎波水深の算定式(1)の代わりに移動限界水深の算定式(3)を適用すればよい。

極限侵食地形に影響する要素は、式(2)、(3)からわかるように、小区間長 Δx 、海底摩擦係数 f 、深水波形勾配 H_0/L_0 、波の入射角 α_0 および底質の中央粒径 d_{50} などである。そこで、極限侵食地形に与えるこれら要素の影響を以下に調べる。

a) 小区間長 Δx の影響

波の周期が 10 sec 付近において、 $\Delta x/L_0$ の値を変化させて計算した結果、 $\Delta x/L_0=0.25$ 以下であれば、 $\Delta x/L_0$ の取り方による誤差はあまり問題にならないことがわかったので、以下の計算は $\Delta x/L_0=0.25$ として計算した。

b) 海底摩擦係数 f の影響

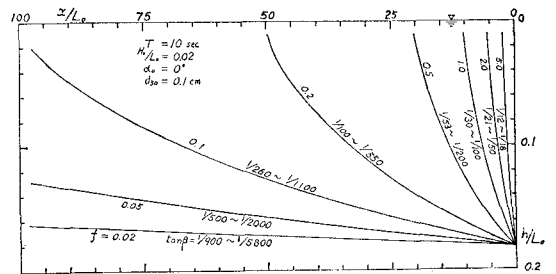
$T=10\text{ sec}$, $H_0/L_0=0.02$, $\alpha_0=0^\circ$, $d_{50}=0.1\text{ cm}$ の一定値に対し、 f の値を $0.02\sim 5.0$ と変化させて、極限侵食地形を求めた計算結果が図—6である。この計算においても全区間 f は一定としている。図—6より $f=0.02\sim 5.0$ に変化した場合、 $h/L_0=0.1$ 付近の海底勾配は $1/2000$ から $1/12$ まで変化し、海底勾配に及ぼす摩擦係数の影響は非常に大きい。

c) 波形勾配 H_0/L_0 の影響

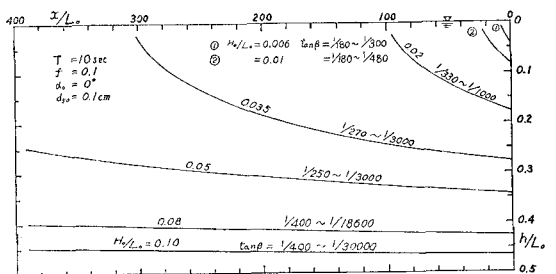
$f=0.1$, $T=10\text{ sec}$, $\alpha_0=0^\circ$, $d_{50}=0.1\text{ cm}$ の一定値に対し、 H_0/L_0 を 0.006 から 0.1 まで変化させて、波高変化の影響を示したものが図—7である。4. (2) c) と同様に、波高の変化は初期の移動限界水深 (h/L_0) に影響し、海底勾配には無関係のようである。

図—8は波高を一定に保ち、波形勾配を変化させることにより、極限侵食地形に関する周期変化 ($T=8.01\sim 25.32\text{ sec}$) の影響を示したものである。周期が長くなるほど海底勾配はわずかに急になる傾向がある。

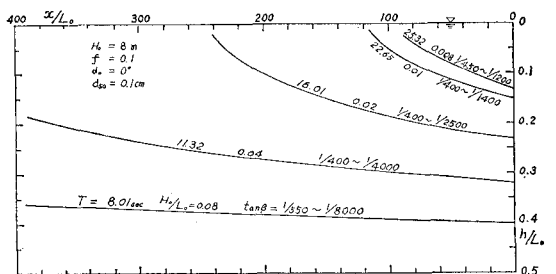
d) 波の入射角 α_0 の影響



図—6 摩擦係数変化の影響（極限侵食地形）



図—7 波高変化の影響（極限侵食地形）

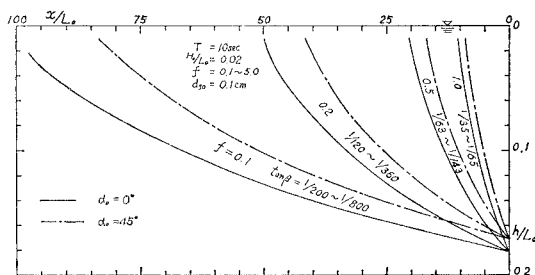


図—8 周期変化の影響（極限侵食地形）

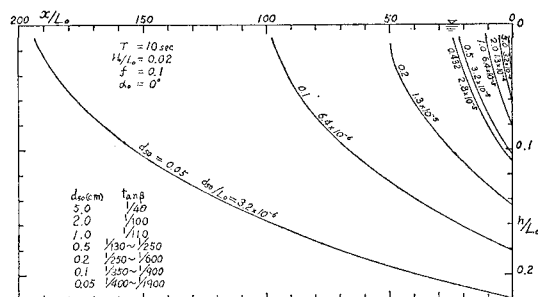
$T=10$ sec, $H_0/L_0=0.02$, $f=0.02\sim 5.0$, $d_{50}=0.1$ cm の諸元で, $\alpha_0=0^\circ$ と 45° の場合を比較したものが、図—9である。4. (2) d) と同様, 入射角 $\alpha_0=45^\circ$ の場合のほうが 0° の場合に比較して初期の移動限界水深は浅くなり, 若干海底勾配が急になる。

e) 底質粒径 d_{50} の影響

$T=10$ sec, $H_0/L_0=0.02$, $f=0.1$, $\alpha_0=0^\circ$ として d_{50} を 0.05 cm から 5.0 cm まで変化させ, 比較したものが図—10である。その結果, 底質粒径が小さいほど地形変化は深いところから始まり, 海底勾配は緩やかになる。このことは礫海岸が急勾配, 砂浜海岸は遠浅が多いという事実と一致する。



図—9 入射角変化の影響 (極限侵食地形)



図—10 粒径変化の影響 (極限侵食地形)

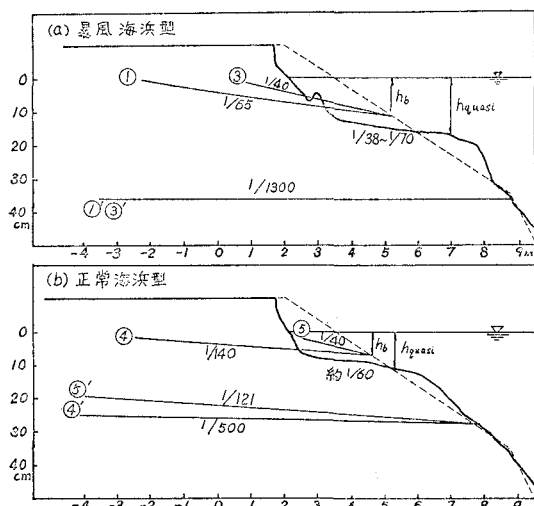
以上, 極限侵食地形に対する基本的な諸要素の影響を—応示し得たものと思われる。それらを要約すると, 波高と底質粒径の変化が初期の移動限界水深に大きく影響し, 海底摩擦係数と底質粒径の変化が海底勾配に大きく影響するようである。

5. 実験および現地海岸との比較

(1) 2次元実験 (軽量骨材)

図—11は, 人工軽量骨材を底質として使用した模型実験における最終地形および対応する実験諸元を用いて算出した準平衡地形 (①, ③, ④, ⑤) と極限侵食地形 (①', ③', ④', ⑤') を併記したものである。各地形の番号は, 図—1の摩擦係数の番号と対応し, その摩擦係数を使用した計算結果であることを示す。

h_b は式 (1) による碎波水深であり, h_{quasi} は実験の



図—11 2次元実験結果と準平衡・極限侵食地形

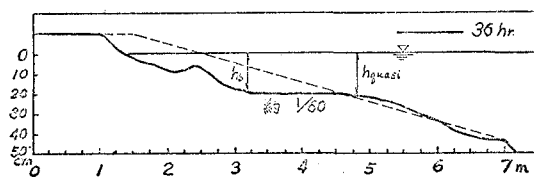
平衡地形での最深部と思われる水深である。図—11 (a) の実験諸元は, $T=0.85$ sec, $H_0/L_0=0.070$ の波で, $d_{50}=0.25$ mm, 比重 $\sigma=1.65$ の底質であり, 暴風海浜である。また, 全造波時間は 20 時間であり, 60 分ごとに bar の底質を約 $4l$ ずつ除去した。準平衡地形の海底勾配 ($1/65\sim 1/40$) と実験における水平軸 3.5 m から 7 m 付近の海底勾配はほとんど一致しているといつてよい。ただし, 実験地形の水深は準平衡地形の $1.2\sim 1.3$ 倍程度となっている。

図—11 (b) は $T=1.55$ sec, $H_0/L_0=0.010$, 底質は図—11 (a) と同じもので, 正常海浜である。全造波時間は 28.8 時間で, 108 分ごとと前浜の底質を約 $4l$ ずつ除去した。準平衡地形の勾配は, 使用した f の違いにより約 $1/140\sim 1/40$ であり, 水平軸 2.5 m から 6 m 付近の実験地形の勾配 (約 $1/60$) はその間におさまる。

人工軽量骨材を用いたこの実験の場合, 暴風海浜, 正常海浜のいずれにおいても, 準平衡地形の水深を下方に $1.2\sim 1.3$ 倍 (この倍率を今後 s 値という) 移動すれば, おおまかではあるが侵食地形が推定できよう。

(2) 2次元実験 (自然砂)¹⁰⁾

図—12は 図—11 (a) と同様の実験を自然砂を用いて行った結果であり, それに準平衡地形を当てはめてみる。実験諸元は, $T=1.5$ sec, $H_0/L_0=0.033$, $d_{50}=0.43$ mm, $\sigma=2.65$ であり, 全造波時間は 36 時間, 3 時間ごとに bar



図—12 自然砂による2次元実験結果

の底質を約10 μ づつ除去したものである。この実験ではかなり顕著な部分重複波が発生し、海底摩擦係数が求まらなかったため、準平衡地形を算定していない。しかし、碎波水深は18.9 cmであり、砂れんを平滑化したほぼ平衡と思われる水平軸3 mから5 m地点までの水深は19 cm~21 cmであることから、 s 値は1.1程度(= h_b/h_{quasi})であることが推定できよう。

(3) 3次元実験(軽量骨材)¹¹⁾

図-13は実験の最終地形と準平衡地形を比較したものである。模型は人工軽量骨材($d_{50}=0.12$ mm, $\sigma=1.65$)で、1/40 勾配に造られた直線状の海岸で、波の入射角は水深20 cmにおいて45°である。実験中、汀線付近に強い沿岸流(7~10 cm/sec)が発生し、その結果、模型は侵食され、底質は流れに沿って沖および沿岸流の下手に堆積した。準平衡地形は図-13に併記した波の諸元と碎波水深により求めた波のレイノルズ数から、図-1の実験値により f の値を0.17~0.25と推定し、準平衡地形を算定した。波の諸元が類似しているため、準平衡地形は f の影響のみを受け $\tan \beta=1/120 \sim 1/40$ となった。実験の平均海底勾配は1/120~1/90であり、 s 値は1.25~1.40程度となった。移動限界水深は約40 cmであり、模型の最深部は水深20 cmであったので、極限侵食地形の検討はできなかった。

(4) 現地海岸

現地海岸は、図-14のような形状をしている。第1の変曲点Aが碎波水深付近、その1.5~2.0倍の水深に第2の変曲点Bがある。したがって、次の順序で準平衡地形を求めた。

- Aの水深でちょうど碎波するその海岸の入射波を推定する。
- 図-14のBを h_{quasi} とする。
- h_b と h_{quasi} の区間の f を図-1より推定する。
- 図-2, 5より内挿して、準平衡地形を得る。

図-15は比較的侵食の激しいといわれている現地海岸(徳島、高知、鳥取県皆生、北海道日高海岸の静内)の海底地形に対して、上述の方法で推定した準平衡地形を h_{quasi} 以浅に適用したもので

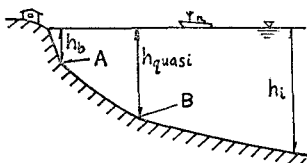


図-14 現地海底地形

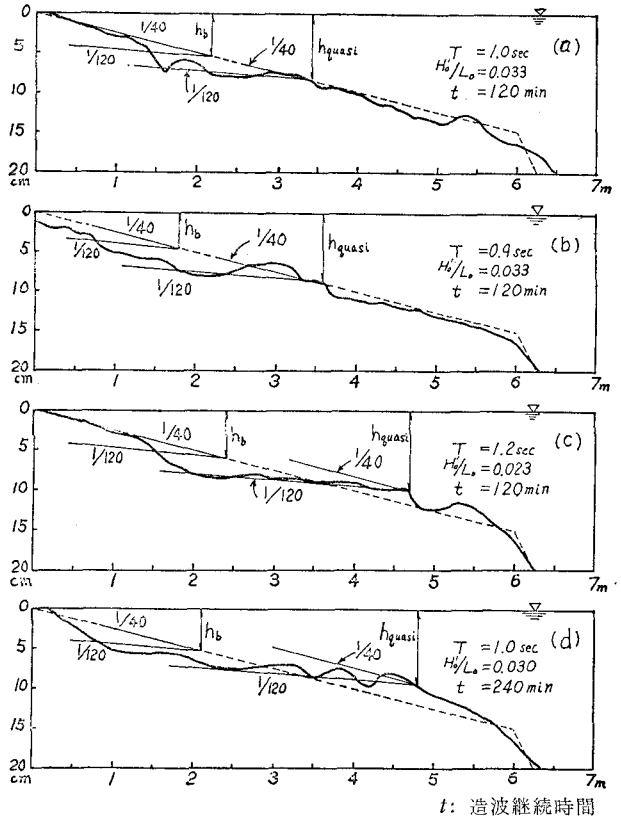


図-13 3次元実験結果と準平衡地形

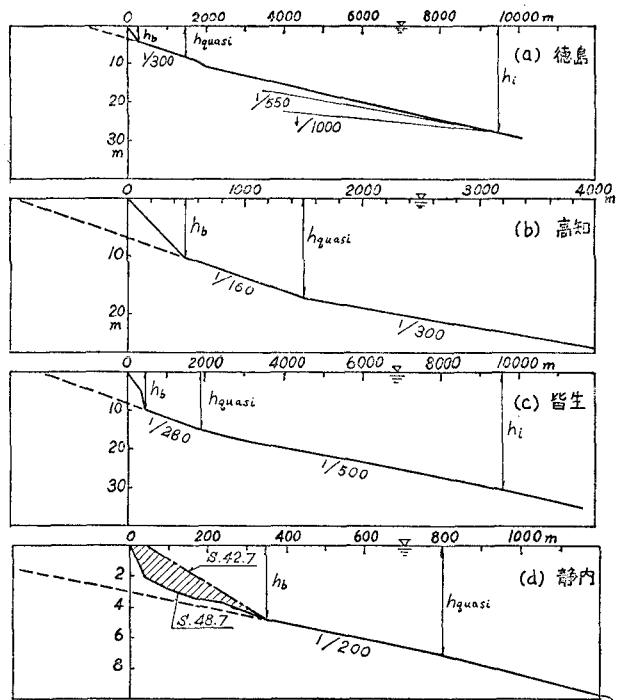


図-15 現地海底地形と準平衡地形

ある。図—15 (a),(b),(c) より、現地の s 値は 1.5 から 2.0 程度であると考えられ、侵食地形は準平衡地形により推定可能と思われる。すなわち、海岸侵食がこのまま進行するならば、近い将来、海底地形は準平衡地形(破線)のようになるものと推定される。図—15 (d) は、北海道静内で測定された海底地形である。1点鎖線は昭和42年7月、実線は昭和48年7月の測定であり、その間に2度の大きな台風が来襲した¹²⁾。昭和42年頃はまだ準平衡地形でなかった地形(1点鎖線)が6年間に侵食されて準平衡地形(破線)にかなり近づいたと解釈され、1~2回の大きな暴風でも、準平衡地形に達する可能性があることを示している。なお、現地海岸における移動限界水深(h_c)以浅の海底勾配は 1/500~1/200 程度であり、図—6~10 より内挿して求められる極限侵食地形の勾配は 1/1 000~1/550 であり、皆生海岸を除いて、未だ、現地海岸は極限侵食地形には達していないと推定される。

6. 結 言

以上、侵食海岸の準平衡地形、極限侵食地形の2つの考え方を提案し、若干の模型実験および現地海岸により検討した。その結果、準平衡地形により、海岸の侵食断面地形を予測できそうであり、また、侵食防止工法の根入れ深さの算定や、ブロックなどの沈下量の推定の参考になりそうである。なお、準平衡地形には底質の粒径が入っていないが、海底摩擦係数 f や s 値に陰に含まれているものと思われる。

最後に本研究は文部省科学研究費(代表者 土屋義人 京都大学防災研究所教授)による研究の一部であることを付記するとともに、実験に協力いただいた当時学生の松永譲二君(銭高組)に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Zenkovich, V. P.: Processes of coastal development, Oliver & Boyd, pp. 101~135, 1967.
- 2) Le Méhauté, B.: On non-saturated breakers and the wave run-up, National Engineering Science Co.
- 3) Saville, T. Jr.: Model study of sand transport, Trans. A.G.U., Vol. 31, No. 4, Aug. 1950.
- 4) 佐藤昭二・合田良実: 海岸・港湾, 彰国社, 昭和47年.
- 5) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行: 海底摩擦係数による波高減衰の基礎的研究(2), 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 62~68, 昭和39年.
- 6) 岩垣雄一・土屋義人・陳活雄: 海底摩擦係数による波高減衰の基礎的研究(3), 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 41~49, 昭和40年.
- 7) 岩垣雄一・柿沼忠男・宮井 宏: 現地海岸における海底摩擦係数について, 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 35~40, 昭和40年.
- 8) Bretschneider, C. L. and R. O. Reid: Modification of wave height due to bottom friction, percolation, and refraction, B. E. B. Tech. Memo. No. 45, 1954.
- 9) 堀川清司・渡辺 晃: 波による砂移動に関する一考察, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 126~134, 昭和41年.
- 10) 三井 宏・筒井茂明・中村静弥: 海底侵食過程について, 第28回年次学術講演会講演集, pp. 84~85, 昭和48年.
- 11) 三井 宏・筒井茂明・亀川和正: 埋立地造成に伴ううちあげ高, 沿岸流の変化(第2報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 127~134, 昭和48年.
- 12) 尾崎 晃: 海岸における土砂収支と海岸災害(北海道日高海岸), 第10回災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp. 165~166, 1973.