

波による質量輸送速度と堤防前面の海浜変形過程 との関係について

樫 木 亨*・出口 一郎**

1. 緒 言

海岸堤防が構築された結果、その前面の砂浜の消失および堤脚部の異常洗掘現象、さらにはそれに伴う消波工の沈下散乱の著しいことが現場技術者より報告されて久しいが、その現象の完全な解明はまだなされていない。この間、佐藤・田中¹⁾、野田・岩佐²⁾、Herbich³⁾、その他の研究者によって数多くの実験的・理論的な研究が行われており、著者らも種々の見地から実験を繰返すとともに、堤防前面波浪を部分重複波とし、流砂量公式を仮定して理論的な検討を重ねてきた⁴⁾⁵⁾。しかしながら現地観測の困難さ、二次元移動床実験の相似性の問題などの原因により上述したような洗掘機構に対する完全な解答が得られていないのが現状である。

著者らはこの解析の不完全さの原因が、堤脚部近傍の流れの実態の不明確さに基づくものであると考えて、まず堤防のり面を流下する流れによる洗掘の影響と、そのもとどり流れの実態を解析することに努め、第18回海岸工学講演会論文集にその一部を発表した。そして、砕波点より岸側に設置された海岸堤防に比較的波形勾配の大きな波が入射した場合に生ずる堤脚部の局所洗掘の主因が堤防のり面を遡上した水塊がのり面を流下するときのもどり流れであることを実験的に検証し、その最大洗掘深さ $\Delta h_{\max}$ がこのもとどり流れの堤脚部における流速の最大値 V_s の4乗に比例するということが明らかにした。なお、この最大洗掘深さがもとどり流れの4乗に比例するという事実はその後行った実験結果によっても明確にされている(図-1参照)。なお、図中 θ は堤防のり面角度、 h_i はのり先の初期水深である。しかしながら堤脚部の洗掘現象はこのもとどり流れのみによって力学的に説明できるかという点、決してそのような単純なものではないことに実験を詳細に観測しておれば気づく。たとえば、初期洗掘は確かに上述のもどり流れが主因となるけれども、時間経過とともに生ずる埋め戻し効果はもとどり流れによる洗掘機構では説明ができない。著者らは上述のもどり流れ以外の洗掘現象を左右する流れを堤脚部近傍の波動による質量輸送による流れであると考え、この質量輸送による流れの実態を明らかにしようとした。すなわち、この

論文ではまず、上述の堤防堤脚部の局所洗掘過程において、堤防前面の波形および底部付近の水粒子の挙動をトレーサーを用いた連続写真撮影によって測定し、それより得られる底部の波動による質量輸送速度の実態を求めた。ついでそれに伴う底質の移動が、堤脚部の局所洗掘にいかなる影響を与えるかということに

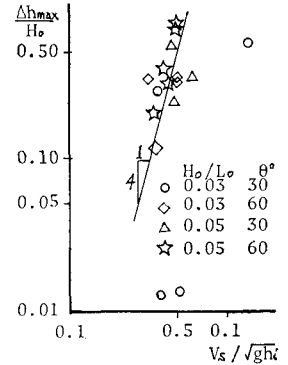


図-1 最大洗掘深さと
もとどり流れの流速

ついて考察を加え、さらに洗掘孔のアーミング効果と洗掘孔の勾配との関係についても若干の考察を行った結果を報告するものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は、大阪大学工学部水工実験場にある長さ 30 m、幅 0.65 m、深さ 0.9 m の片面ガラス張り鋼製造波水槽を用いて行った。実験に用いた底質は平均粒径 $d_{50} = 0.42$ mm の川砂で、初期勾配 1/15 なる一様勾配より実験を開始している。また水粒子の運動の解析には $\phi 5$ mm のガラス球に水銀を注入して比重約 1.0 としたトレーサーの動きを 16 mm 撮影機で追跡することによって測定した。なお、この水粒子運動に対応する地形状態は、波の作用直後、作用後 5 分、10 分、15 分、20 分、40 分、60 分のものを選び、それぞれの地形変化を測定している。なお、堤防前面の波高は砕波による飛沫により抵抗線式波高計では測定不可能のため、上記 16 mm 撮

表-1 実験条件

No.	T (sec)	H_0/L_0	h_i/H_0	θ ($^{\circ}$)	
1-1	1.01	0.05	0.25	30	
1-2				60	
1-3			0.50	30	
1-4				60	
1-5		0.75	1.00	30	
1-6				60	
1-7		1.00		30	
1-8				60	
2-1	1.31	0.03	0.25	30	
2-2				60	
2-3			0.50	30	
2-4				60	
2-5		0.75	1.00	30	
2-6				60	
2-7		1.00		30	
2-8				60	

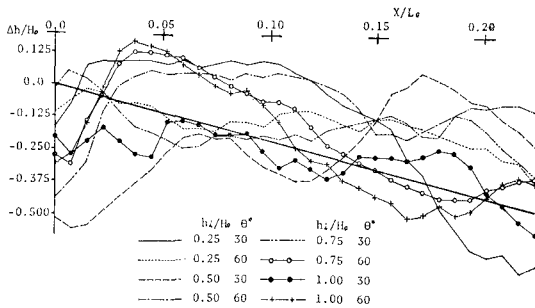
* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

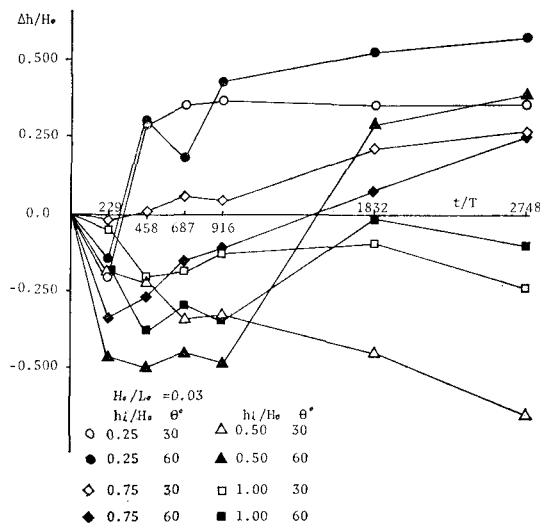
影機より測定することにした。これらの実験条件を表—1に示す。表—1の実験条件において $H_0/d_{50}=1.9 \times 10^2$ となることから、岩垣・野田らの沿岸砂州の発生限界値より No. 1 の一連の実験は暴風海浜、No. 2 の一連の実験は正常海浜に対応するものである。堤防前面の波動による質量輸送速度は、すべてを解析することが困難であり No. 1—4, No. 1—6, No. 2—4, No. 2—6 に対してのみ行っている。

3. 堤防前面の地形変化について

図—2 は、No. 2 の一連の実験における最大洗掘深さを生じた時間における堤防前面の地形を、図—3 は堤脚部における初期状態からの地形変化量 Δh の時間的な変化を示している。図—2 から明らかなように、No. 1, No. 2 のすべてのケースについて堤脚部に局所洗掘孔を生じているが、その規模および洗掘深さはり面角度の変化にかかわらず $h_i/H_0=0.5 \sim 0.75$ といった領域で大きく、逆直角三角形の洗掘孔を示しているのに対して、 $h_i/H_0=0.25$ の場合は堤脚部のごく近傍で小さな洗掘孔を生ずるのみであり、 $h_i/H_0=1.0$ の場合は佐藤ら¹⁾ の



図—2 最大洗掘地形

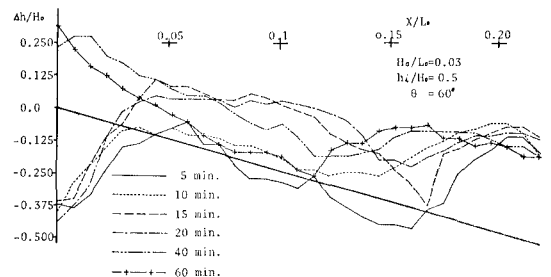


図—3 堤脚部洗掘深さの時間変化

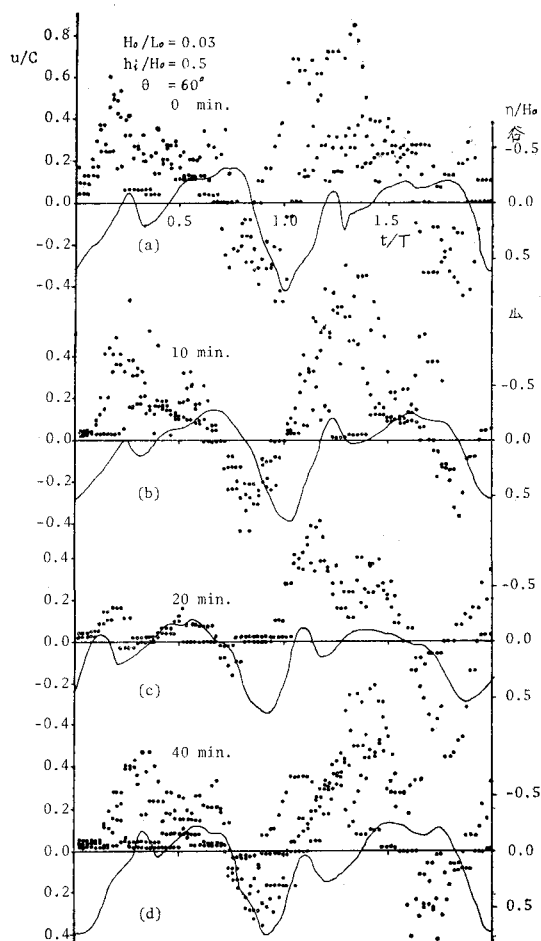
いう部分重複波による凹字型に近い洗掘孔を生じていることに気づくであろう。洗掘深さの時間的な変化は 図—3 より従来いわれている4つのタイプに分類¹⁾できるが、それらはり面角度、波形勾配 ($H_0/L_0=0.05$ の場合と比較して) によっては大きな影響をうけず、堤防の相対設置水深のみによって左右されることがわかる。そして一、二の例外を除いて最大洗掘地形には波の作用後5分～20分(230波～920波)と比較的短時間に到達しているが、この事実は洗掘現象がきわめて激しい砂移動に起因するものであり、波の変化、水深の変化に即応した地形変形を示すものと推定できる。

4. 堤脚部洗掘過程における入射波および底部水粒子速度の変化について

上述の結果において比較的規模の大きい典型的な局所洗掘を示す No. 1—4, No. 1—6, No. 2—4, No. 2—6 についてその洗掘過程において入射波、底部水粒子速度等がいかなる変化を示しているかということを詳細な実験を行って求めてみた。各測定時間における地形変化の一例 (No. 2—4) を 図—4 に、堤防前面の水位変動、堤脚部底部付近の水粒子速度を造波開始後0分、10分、20分、40分について 図—5 (a)～(d) に示す。図—5 中、曲線が堤防前面の時間波形 η で黒丸で示したのがその時間における水粒子速度 u で、トレーサーが最も堤脚部に近づいた時間を $t=0$ としている。まず 図—4 の地形変化について検討してみると、造波開始後5分で堤脚部に典型的な局所洗掘孔を生ずるとともに $x/L_0=0.2$ 付近に bar の頂点が生じている。その後造波開始後20分まで堤脚部の洗掘形状はあまり変化せず bar 付近に堆積した底質が徐々に堤防のほうへと輸送され、造波開始後40分になると堤脚部から沖へ全体的に埋め戻され堤脚部では堆積地形を示し、造波開始後60分までその地形を保っている。一方、このように変化した堤防前面地形に対して堤防前面波高および堤脚部の水粒子速度はどのように変化しているかということを見ると、図—5 から明らかなように造波開始後10分までは堤防前面波高および水粒子速度の時間変化にはほとんど差異が認められないのに対し、堤脚部が埋め戻される直前の造波開始後20分では

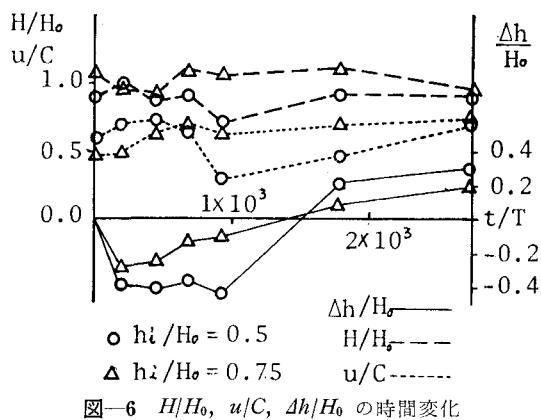


図—4 地形変化 ($H_0/L_0=0.03$, $h_i/H_0=0.5$, $\theta=60^\circ$)



図—5 堤脚部水粒子速度と時間波形

堤防前面の波高は小さくなり、水粒子速度もまた極端に小さくなっている。さらに堤脚部が埋め戻された造波開始後40分では堤防前面波高、水粒子速度とも地形変化の初期の状態にもどっている。すなわち、造波開始後ただちに生じた堤脚部の地形変化の影響が、造波開始後20分で堤防前面波高および水粒子速度の変化となって現われ、さらにその変化した波高、水粒子運動に対応して造波開始後40分にみられる新たな地形変化を生ずるものと推定できる。また、水粒子速度の一周期にわたる変化をみると、離岸方向の質量輸送が卓越していることを示していることがわかるが、このことについては次節で詳述する。さらに堤脚部における初期状態からの時間的な地形変化と堤防前面波高、堤脚部の水粒子速度の離岸方向の最大値を $H_0/L_0=0.03$ の場合について比較すると 図—6 のような結果が得られる。図—6 から明らかなように、造波開始後急激に洗掘された堤脚部が $h_i/H_0=0.75$ の場合には徐々に、 $h_i/H_0=0.5$ の場合には急激に埋め戻されるに伴って水粒子速度も複雑な変化を示しているが、一般に水深が浅くなるほど波高および水粒子速度は

図—6 H/H_0 , u/C , $\Delta h/H_0$ の時間変化 ($H_0/L_0=0.03$, $\theta=60^\circ$)

地形の影響を受けやすい。しかしながら、地形変化の速さは、この地形変化が水粒子速度に与える変化の速さよりも早いようである。

5. 堤脚部における波による質量輸送速度と地形変化量との関係

先に述べたように、第18回海岸工学講演会では堤脚部の初期における局所洗掘の原因が堤防のり面上のもどり流れであり、その最大洗掘深さがもどり流れによって左右されることを実験的に検証したが、その後の洗掘過程において、もどり流れがいかに変化していくかということ No. 2—4 について検討してみた。その結果、洗掘初期の状態と洗掘孔を生じた後の造波開始後5分におけるもどり流れの最大値 V_0 を比較すると初期の V_0 の $1/4 \sim 1/5$ にまで減少している。この事実から、ある程度洗掘が進行した状態では、堤脚部局所洗掘に及ぼすもどり流れは微弱となるものと考えられるが、どの程度洗掘が進行するまでもどり流れが洗掘に対して影響を及ぼすかという限界については、本実験では明らかにできなかった。一方、図—5 から明らかなように、堤脚部の水粒子は常に離岸方向の残留速度をもっており、もどり流れによる急激な洗掘後の洗掘変形過程を支配すると思われる底質の移動を論議する場合、この質量輸送が重要な要因の一つと考えられることはいうまでもない。波動運動下における底質の汀線に直角方向の移動量に関しては古くから Vincent⁶⁾、Manohar⁷⁾、その他の波の特性と漂砂量を結びつけた実験的研究、石原・樫木⁸⁾の河川における流砂量公式を波に適用した研究、さらには比較的物理現象を適確にとらえていると思われる Einstein ら⁹⁾の研究があるが、そのほとんどが乱れの少ない浅海波動理論の成立する領域を対象とするものであり、まだ力学的機構の不明である碎波を含んだ surfzone にまでそれらの研究結果を適用することには疑問がある。しかし堤脚部の底質の移動を論議するにあたり、まず底質砂粒の動きを

Lagrange 的にとらえ、砂粒に作用する流体の質量輸送速度と砂粒の移動速度の関係を求めた Eagleson ら¹⁰⁾の研究に従って、質量輸送速度が堤防前面の地形変化に及ぼす影響について考えてみる。Eagleson らは勾配 α の斜面上にある粒径 D の一粒の砂粒に作用する流体力を考え、砂粒の運動方程式をたて、二、三の力学的な仮定をもうけた後、次式に示す砂粒の一周期平均の移動速度 $\bar{u}_s$ を導いている。

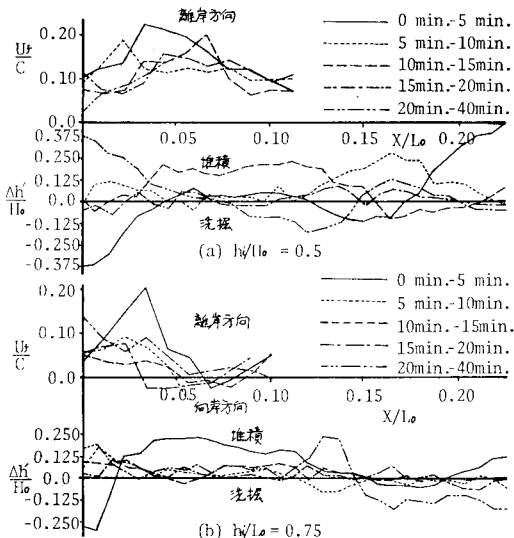
$$\bar{u}_s = U_f - \frac{g(M_s - M_f)}{2.4\pi D \cdot \nu \cdot \rho_f} \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 U_f : 砂粒に作用する流体の質量輸送速度、 M_s : 砂粒の質量、 M_f : 砂粒が排除する流体の質量、 g : 重力加速度、 ν : 動粘性係数、 ρ_f : 流体密度である。式(1)からわかるように、底質の一周期平均移動速度は質量輸送速度に線型に結びついており、式(1)が導かれた仮定に従ってあくまでも Lagrange 的に考えるならば、一周期平均の漂砂量 $\bar{u}_s$ 、すなわち質量輸送速度 U_f に比例すると考えられ、漂砂の連続式より地形の洗掘・堆積は質量輸送速度の場所的な変化率の正負によって定まり、地形の変化量はその変化率の大小によって決定される。しかし堤脚のごく近傍では、堤防より岸側からの土砂の供給がないため質量輸送速度の変化率ではなく、その方向のみで地形の洗掘・堆積が定まる領域が存在することにも注意しなければならない。そこで上述の地形変化量と質量輸送速度の関係をみるために造波開始後0分～5分、5分～10分、10分～15分、15分～20分、20分～40分の間に生じた地形変化量（たとえば5分後の水深と10分後の水深の差、 $\Delta h'$ ）とそれぞれの時間における質量輸送速度の関係を No. 2—4, No. 2—6 について示したのが 図—7 (a), (b) である。なお、図—7 に示す質量

輸送速度はトレーサーの一周期平均の移動距離を波の周期 T で割ったものとして求めた値であり、図中には初期堤脚水深における長波の伝播速度 $C = \sqrt{gh_i}$ をもって無次元化してあらわしてある。図—7 について検討してみると、まず $h_i/H_0 = 0.5$ の場合は洗掘の初期状態における堤防前面の質量輸送速度は堤脚部から離れるに従って増大し、 $X/L_0 = 0.04$ 付近で最大となり、この質量輸送速度の変化率と堤脚部の洗掘の関係が比較的明確に対応している。洗掘孔が生じてから（造波開始後5分）は質量輸送速度は堤脚部ではあまり変化なく、その最大値も徐々に減少している程度で、それに対応した形で地形変化量も大きな変化を示していない。しかしながら造波開始後20分以後の埋め戻し作用が生ずる時点になると、この地形変化量と質量輸送速度の間には先述したような対応関係は見出せない。一方、 $h_i/H_0 = 0.75$ の場合も洗掘初期状態における質量輸送速度は急激に堤脚部から増大し、 $X/L_0 = 0.035$ で最大となり $h_i/H_0 = 0.5$ の場合と同様にこの質量輸送速度によって堤脚部の洗掘が生ずるものと思われるが、 $0.04 < X/L_0 < 0.08$ の範囲で碎波の影響と考えられる（入射波の碎波点は $X/L_0 = 0.11$ 付近）質量輸送速度の方向の逆転が生じており、そのため 図—2 で示されるような $h_i/H_0 = 0.5$ の場合よりも急峻な地形変化を示すものと推察できる。また、この場合も洗掘孔が生じてからは先に述べたような地形変化量と質量輸送速度の間の関係は見出せなかったが、ただ $h_i/H_0 = 0.5$ の場合と異なり、時間経過に伴い質量輸送速度が減少するにつれて堤脚部が徐々に埋め戻される傾向がうかがえる。

以上は堤防前面の地形変化量を質量輸送速度との関係において考察したものであるが、式(1)および 図—4 から明らかなように、洗掘孔の勾配も底質の移動速度、すなわち底質の移動量に影響を与えるものと考えられるので、次に式(1)に基づいて底質の移動に及ぼす洗掘孔の勾配の効果について考察してみる。式(1)より明らかなように、本実験のような不均一な粒径の底質を用いた場合は、ある程度洗掘孔の勾配が大きくなると粒径の小さい砂粒は離岸方向の質量輸送速度によって離岸方向に輸送されるが、粒の大きい砂粒は重力によって質量輸送速度とは逆方向の堤脚部へ移動し、洗掘孔の埋め戻し、もしくはアーミング効果を生ずる。本実験においても洗掘孔内には粒径の大きい砂粒が集まり顕著なアーミング効果がみられた。一方、均一粒径の底質を用いた実験においては、質量輸送速度が求まれば式(1)において $\bar{u}_s = 0$ とおくことによって洗掘孔の安定勾配を明らかにできるのではないと思われる。

以上の事実を総合して、図—7 に示す $h_i/H_0 = 0.5$ の場合の洗掘過程についてその機構について考察すると、造波開始後まもなくもどり流れおよび質量輸送速度によ



図—7 質量輸送速度と地形変化量

って堤脚部の底質が離岸方向に輸送され、堤脚部に洗掘孔を生じ、さらに洗掘が進行して洗掘孔の勾配が増加するにつれて質量輸送速度が減少し(図—2(a), 図—7(a)), 最終的な洗掘状態(造波開始後20分)に達した状態ではもはや大部分の底質は離岸方向には動きえず、この時点で堤防前面の水粒子の挙動にも変化が現われ、ついには洗掘孔が埋め戻される(造波開始後20分~40分)ものと説明できる。したがって、従来のように質量輸送速度あるいは底質特性を個々に取り上げて洗掘過程および埋め戻し過程を論ずることは無理であり、この点今後いかに取扱っていくかが大きな問題として残される。

6. 結 語

著者らは堤防堤脚部局所洗掘過程における堤防前面の底部水粒子速度、質量輸送速度等を測定することにより、局所洗掘機構を明らかにしようと試み、二、三の興味ある結果を得た。しかし野田ら²⁾が指摘しているように局所洗掘は海浜変形の一部としてとらえられるべき現象であり、碎波点を含む広範囲な領域における質量輸送速度、非平衡状態にある底質の漂砂量、不均一な粒径の底質のソーティング効果、さらに実験的には二次元造波水槽における移動床実験の地形変化の二次元性、再現性等、残された問題は多く、洗掘機構に対する水理学的な考察も十分ではない。今後さらに碎波による乱れなどに浮遊形式で移動する底質も考慮して局所洗掘機構を明らかにしていきたい。

最後に実験に協力していただいた当時学生の水千秋、溝内俊一両君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤昭二・田中則男・入江 功: 直立壁堤脚部の波による二次元洗掘実験, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 156~161, 昭41.
- 2) 野田英明・岩佐敏博: 海岸堤防堤脚部の洗掘に関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 53~57, 昭47.
- 3) Herbich, J. B. and Stephan, C. K.: Scouring of Sand Beaches in front of Seawalls. Proc. 11th Conf. on Coastal Eng. pp. 622~643, 1968.
- 4) 榎木 亨: 海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(その1), 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 329~335, 昭42.
- 5) 榎木 亨・高畑市三: 海岸堤防堤脚部の局所洗掘機構について, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 371~376, 昭46.
- 6) Vincent, D. E.: Contribution to the Study of Sediment Transport on the Horizontal Bed due to Wave Action, Proc. of 6th Conf. on Coastal Eng. pp. 326~354, 1958.
- 7) Manohar, M.: Mechanics of Bottom Sediment Movement due to Wave Action, B.E.B. Tech. Memo. No. 75, 1955.
- 8) 石原藤次郎・榎木 亨: 漂砂の移動限界流速, 限界水深および移動量について, 第7回海岸工学講演会講演集, pp. 47~57, 昭34.
- 9) Einstein, H. A.: A Basic Description of Sediment Transport on Beaches, Univ. of California Hydraulic Engineering Laboratory HEL-2-34, 1971.
- 10) Eagleson, P. S. and Dean, R. G.: Wave Induced Motion of Bottom Sediment Particles, Proc. ASCE, HY 10, 1959.