

捨石基礎内の流れに対する底床の安定に 関する実験的研究（その一）

松 並 仁 茂*・ 右 梅 尚**

Experimental Study on the Stability of Seabed for the Flow into Rubble Mound (No.1)

Hitoshige MATSUNAMI・ Hisashi MIGIUME

When wind waves, storm surge and tsunami strike breakwaters or revetments, some flow arises in rubble mound by the difference of the pressure between outside and inside of breakwaters or revetments. The strength of the flow is important to know the exchange of sea water in harbour. And it is important to know the decrease of the functions of the breakwaters for storm surge or tsunami. On the other hand, that flow works the earth and sand of seabed to be unstable and to be scoured. And that flow causes the rubble mound on seabed to sink, then causes gradually the casson or the brock of breakwaters or revetments to sink and to be destroyed.

However, we have not been offered any studies for the scour to seabed. So we offer, first, the studies for the flow into rubble mound, next, the studies for the stability of seabed. The former theme was finished until last year. This paper is the first one for the latter theme.

1. はじめに

風波や高潮および津波が防波堤や海岸護岸に襲来すると、その外側と内側の圧力差によって捨石基礎内に流れが生ずる。この流れの大きさは、港内の海水交換を知るうえで重要であるとともに、高潮や津波対策用の防波堤に対しては、効果を減少するということでも重要である。一方、この流れは、その下にある海底地盤の土砂を不安定にし、洗掘するようになる。そして、これがその上にある捨石基礎を沈下させ、やがて、防波堤のケーソンやブロックおよびコンクリート護岸の沈下をまねき、遂には、倒壊にいたらしめることもある。わが国の防波堤の被災例によると、当初の設計条件をはるかにしのぐ海象条件に遭遇したことが多いが、その中で海底地盤に関連した被災も少なくはない。例えば、海底地盤の洗掘が被災の原因とみられる件数は21%にもおよぶと報告¹⁾されているが、その重大性が推察される。

* 建設工学科 土木工学専攻 ** 元大学院生

しかるに、このような海底地盤の底床の洗掘に関する研究はほとんど行われたことがなかった。かなり以前に、運輸省第二港湾建設局が名古屋港の高潮防波堤を建設するにあたって、底床砂の洗掘に対する安定度の確認のために、大掛かりな実験^{2,3)}を行ったことがあるが、筆者の一人はこの実験的研究に参加していた。この実験は名古屋港高潮防波堤の建設のためだけのものであり、特に、海底地盤の土砂は当地で用いられるものだけに限定して行われたために、これらの実験結果を広く一般の防波堤や海岸護岸の海底地盤の底床の安定度の検討に適用するには、かなり無理があるといえる⁴⁾。

そこで、ここでは、海底地盤の土砂を広範囲に選択し、底床の安定度の検討が広く一般の海底地盤の安定問題にも適用できるよう研究を行うことにした。まず、その基礎的な研究として、捨石基礎内の流れに関する研究を行い、次に、海底地盤の底床の安定に関する研究に分けて行う。前者の研究は前年までに報告を終えている^{5,6)}。本論文は後者の研究成果の第一報である。ここでは、最初の試みとして問題の単純化を計るため、捨石基礎には単一粒径の石を用いるとともに、底床土砂としては粘性土を含まない単一粒径の砂を用いることにした。

2. 捨石基礎下の底床砂の安定について

捨石基礎下の底床砂の安定についての研究を行うにあたって、よく知られている限界掃流力の概念をとりいれ、これらの研究結果と比較検討することが必要不可欠なことと考える。底床が一樣な粒径の砂の場合、次のような限界掃流力と砂の粒径の関係を示す Shields の公式^{7,8)}と呼ばれる式がある。

$$\frac{\tau_{oc}}{(\rho_s - \rho)gd} = \phi \frac{u_* c d}{\nu} \text{ or } \frac{u_*^2 c^2}{\{\rho_s/\rho - 1\}gd} = \phi \frac{u_* c d}{\nu} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 τ_o ：底床に働く摩擦応力、 u ：砂粒子近傍の流速、 u_* ：摩擦速度、 ρ_s ：砂粒子の密度、 ρ ：水の密度、 g ：重力の加速度、 d ：砂粒子の平均粒径、 ν ：水の動粘性係数、添字 c ：砂粒子移動の限界の状態を意味する。

一方、Einstein⁸⁾は限界掃流力を取り扱う代りに、粒子の運動は抵抗力以上の流体力に関する確率によるとして、河床の土砂が単位時間に運動をおこす確率は、この土砂粒子に作用する揚力が粒子の流体内重量を越える確率であるとして掃流土砂量の推定式を提案した。この掃流砂モデルを基に、現在、中川・辻本ら^{8,9)}はこの Einstein の考え方を基に非平衡状態における Pick-up rate 推定式（単位時間当たりの粒子の離脱する確率密度の式）を提案している。

富永ら¹⁰⁾は海岸堤防の根固め工の捨石フィルターの効果などの推定法について実験的研究を行ったが、その際、定常流下の捨石フィルター内の流速と掃流力の算定式を提案した。

善¹⁾は海底地盤の液状化のメカニズムを過剰間隙水圧発生の観点から考究し、残留過剰間隙水圧によるものと、変動過剰間隙水圧によるものがあることを理論的および実験的に明らかにした。さらに、実海域における液状化予測法を提案し、その妥当性を確かめた。

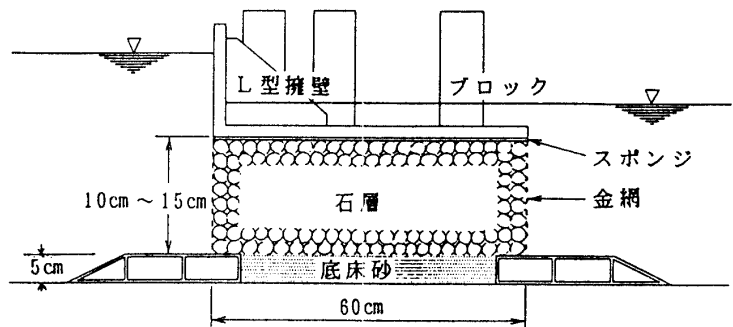
松並⁴⁾は捨石基礎内の流れに対する底床の安定問題の解明には、多大の費用と日時を要するも

のとして、それにいたるまでの暫定措置として、このような底床の安定度を運輸省の実験結果と限界掃流力とを関連づけた推定法を提案した。

これらの研究はいずれも捨石基礎内の流れに対する海底地盤の底床の安定問題を解明するには十分でなく、本研究において考究しなければならないと考える。

3. 捨石基礎内の流れに対する底床の安定についての実験内容

捨石基礎内の流れに対する底床の安定についての実験は、本学の水理実験室にある幅・深さとも30cm、長さ8mの水平水路を用いて行った。実験装置の概要は図－1に示す。いずれの場合も流路長を60cmとする木製のL型擁壁を置いた。また、底床地盤の敷砂層厚は、その前後に設置した塩化ビニール製の模型基礎の厚さに合わせて5cmとした。捨石基礎の層厚は石層の間隙率の一樣性のうから捨石の平均粒径の5倍程度としたので10～15cmとなった。実験の簡易化や単純化をはかるため、捨石も敷砂も単一粒径のものをを用いることとし、



図－1 底床砂の安定実験用の模型防波堤概略図

おのおのの表に示すようにふるい分けし、ふるい目の大きさを平均した値をもって平均粒径と呼ぶことにした。捨石として用いる礫は表－1に示すように6.7～50.8mmの開き目のふるいによって7種類に分割した。一方、敷砂は表－2に示すように0.18～1.40mmの開き目のふるいによって5種類に分割した。また、敷砂の平均粒径別の密度は表－3に示すように、海岸砂は2.67～2.68g/cm³であるのに対し、豊浦標準砂は2.65g/cm³となった。実験ケースは広い範囲で底床敷砂の安定の状況を把握するうから、表－4に示すように19ケースとした。

底床敷砂の移動の観察は水平水路の透明の亚克力板を通して行うので、極めて限られた範囲の観察しか行えない。それゆえ、ここでの砂粒子の移動についての判定規準は極めて重要なものとなるが、事前の観察実験から砂粒子の移動の形式や特徴を次に示すように分類整理した。

微 動：その場所において揺れ動く状態

微動移動：微動しながら、その場所付近で移動する状態

回転浮上：一旦浮上し、再び沈み、その場所において浮上と沈下を繰り返し続ける状態

回転移動：水流によってその場所から移動する状態

洗掘移動：洗掘個所が2個所以上で認められる状態。または、洗掘個所が1個所であって、

かつ、下流の金網を越えて流出・堆積が認められる状態

これらの砂粒子の移動現象をさらに検討し、以下の3種類に分類した。

微 動：上述の微動と微動移動

表－1 礫のふるい分けと平均粒径

篩の開き (cm)	平均粒径 (cm)
5.08	4.45
3.81	3.49
3.17	2.86
2.54	2.23
1.91	1.75
1.59	1.27
0.95	0.81
0.67	

表－2 砂のふるい分けと平均粒径

篩の開き (mm)	平均粒径 (mm)
1.400	1.125
0.850	0.725
0.600	0.513
0.425	0.338
0.250	0.215
0.180	

表－3 平均粒径別の底床砂の密度

底 床 砂	平均粒径 (mm)	密度 (g/cm³)
海 岸 砂	1.125	2.68
海 岸 砂	0.725	2.67
海 岸 砂	0.513	2.67
海 岸 砂	0.338	2.68
豊浦標準砂	0.215	2.65

表－4 底床の安定の実験ケース

敷砂粒径 (cm)	捨石粒径 (cm)				
	4.45	2.23	1.75	1.27	0.81
0.1125	○	○	○	○	○
0.0725	○	○		○	○
0.0513	○	○		○	○
0.0338	○	○			○
0.0215	○	○			○

初期移動：測定時間内に 2 個所以上で回転移動や浮上が認められる状態

一斉移動：1 分間の観測中に 4 個所以上で回転移動や浮上が認められる状態

ここでは、洗掘移動は本実験の限界掃流力の範囲を越えるものとして、除外することにした。

4. 実験結果および考察

本研究は捨石基礎内の流れと、その下にある底床の砂粒子の安定限界の関係を考究することである。このうち、捨石基礎内の流れについて研究結果は、すでに取りまとめ報告^{5,6)}した。これらは B. Le Méhauté の研究論文¹⁾とその中に報告されている Dauphin 水理実験所で行った M. Cohen de Lara の実験結果や運輸省第二港湾建設局が行った研究結果^{2,3)}を参考にしたものである。すなわち、損失勾配 $\Delta H / \Delta S = i$ と捨石基礎内全断面の平均流速 U (cm/s) の関係を捨石の平均粒径 d (cm) をパラメータとして、式(2)で表わすとともに、式中の ξ を式(3)にあるように、乱れの程度（捨石基礎内流れのレイノルズ数 Re ）と間隙率（ n ）だけの関係で表わすものとしている。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \xi \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\xi = C(Re) \cdot f(n), \quad Re = \frac{Ud}{\nu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ΔH ：損失水頭 (cm)、 ΔS ：流路長 (cm)、 g ：重力の加速度 (cm/s²)、 ν ：動粘性係

数 (cm²/s), また, Lara の実験結果では $f(n) = n^{-5}$ としている。なお, 式(2)は結果として, 直径 d の円管路の式と同様な形となっていることが分かる。

本実験の敷砂の移動について, Shields・栗原・岩垣らの無次元限界掃流力と比較検討する必要がある。ここでは, 捨石基礎内の流れの関連性を考慮するうえから, 底床砂の近傍の流速を上述の式で与えられる平均流速 U を用いることとし, 同様に, 摩擦速度 U_* も捨石の平均粒径 d を円管路の直径とするとときの径深 R を用いて, 式(5)によって求めることにした。このように考えるときの無次元掃流力は式(4)のように表すことができる。

$$\frac{U_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1) g d_s} \dots\dots\dots (4)$$

$$U_{*c} = \sqrt{g R i_c} \dots\dots\dots (5)$$

ここに, U_* : 摩擦速度 (cm/s), σ : 砂粒子の密度 (g/cm³), ρ : 水の密度 (g/cm³), d_s : 砂粒子の平均粒径 (cm), なお, 砂粒子の移動限界状態のときの平均流速や摩擦速度および損失勾配などには添字 c をつける。

すなわち, 微動の場合は図-2 に, 初期移動の場合は図-3 に, そして, 一斉移動は図-4 にそれぞれ示した。いずれの場合も10~50倍もの値となっており, その差は非常に大きいことが分かる。また, これらの図から, いずれの場合も捨石粒径が大きくなるにつれて底床砂におよぼす影響が小さくなっていることが分かる。このことから, 捨石粒径がさらに大きくなると限界掃流

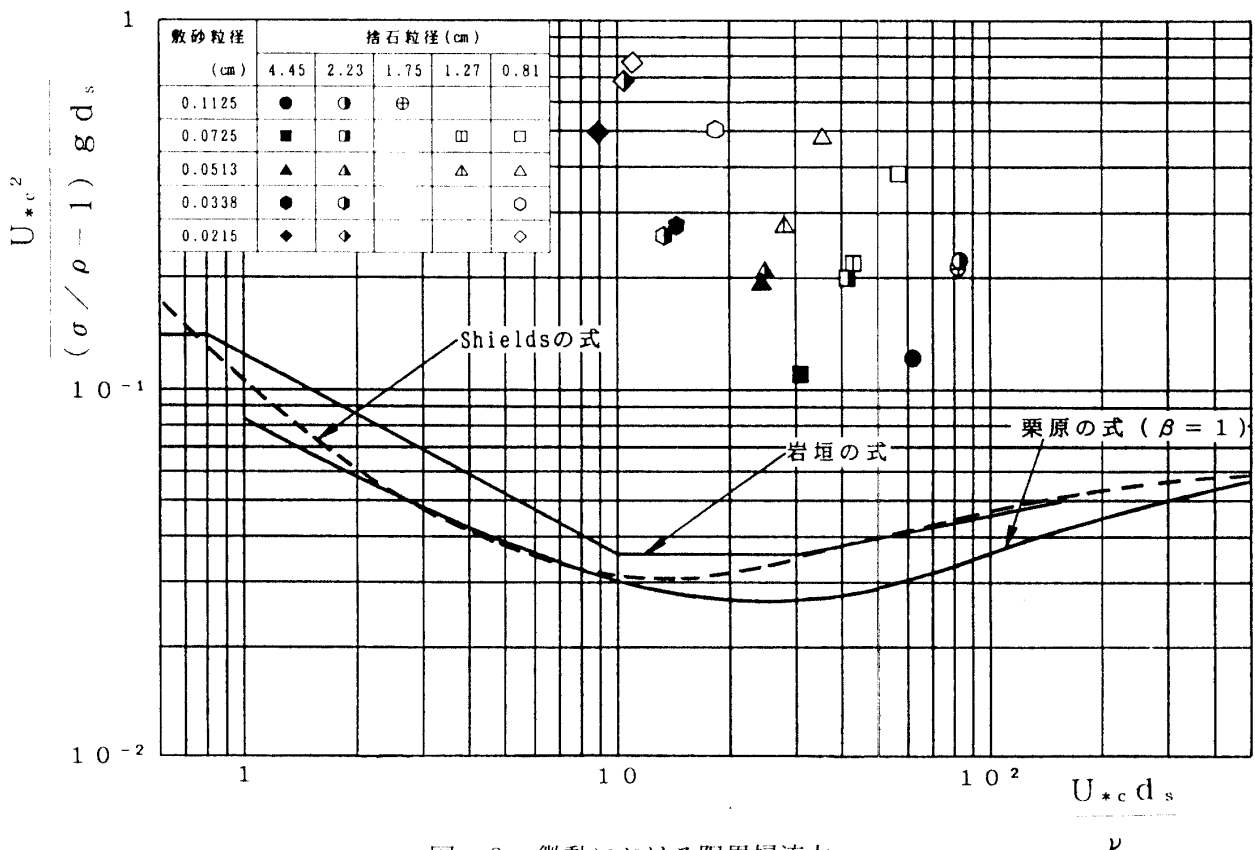


図-2 微動における限界掃流力

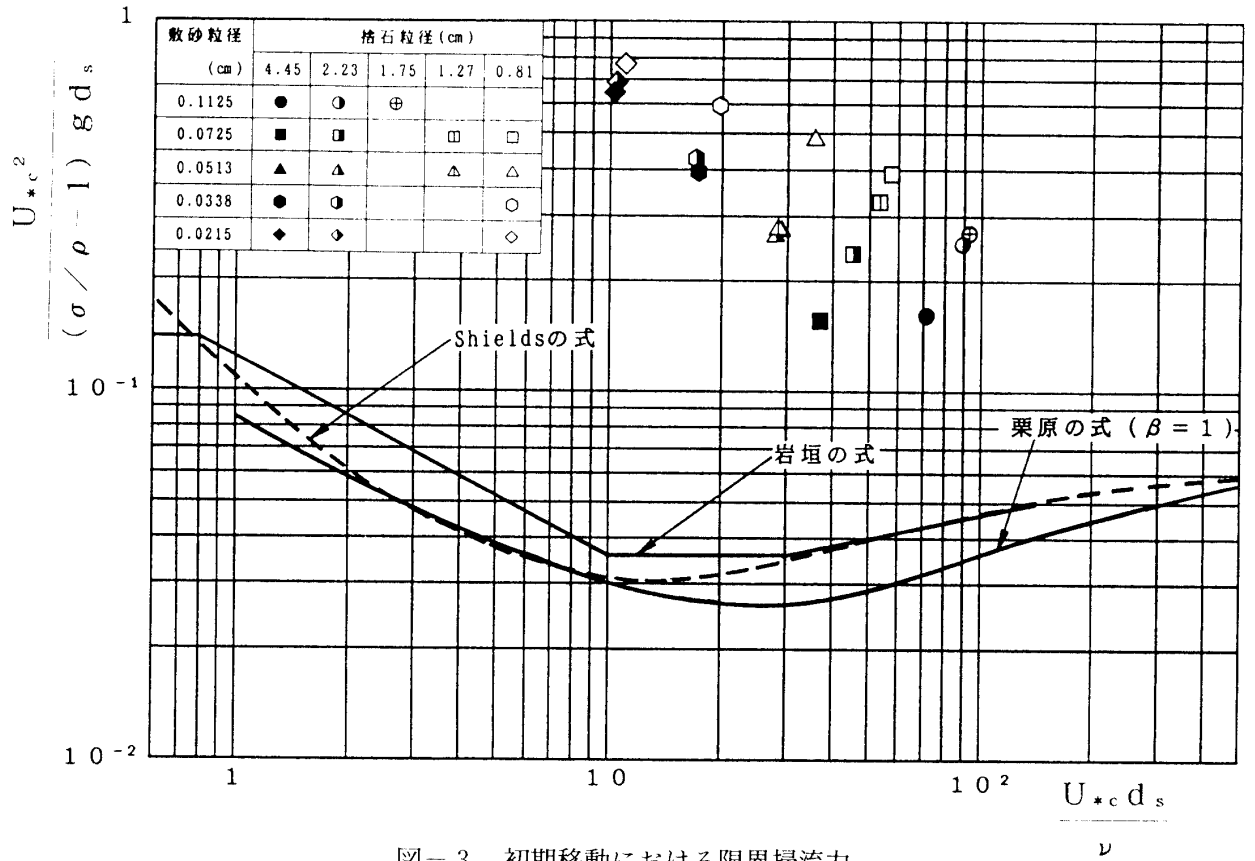


図-3 初期移動における限界掃流力

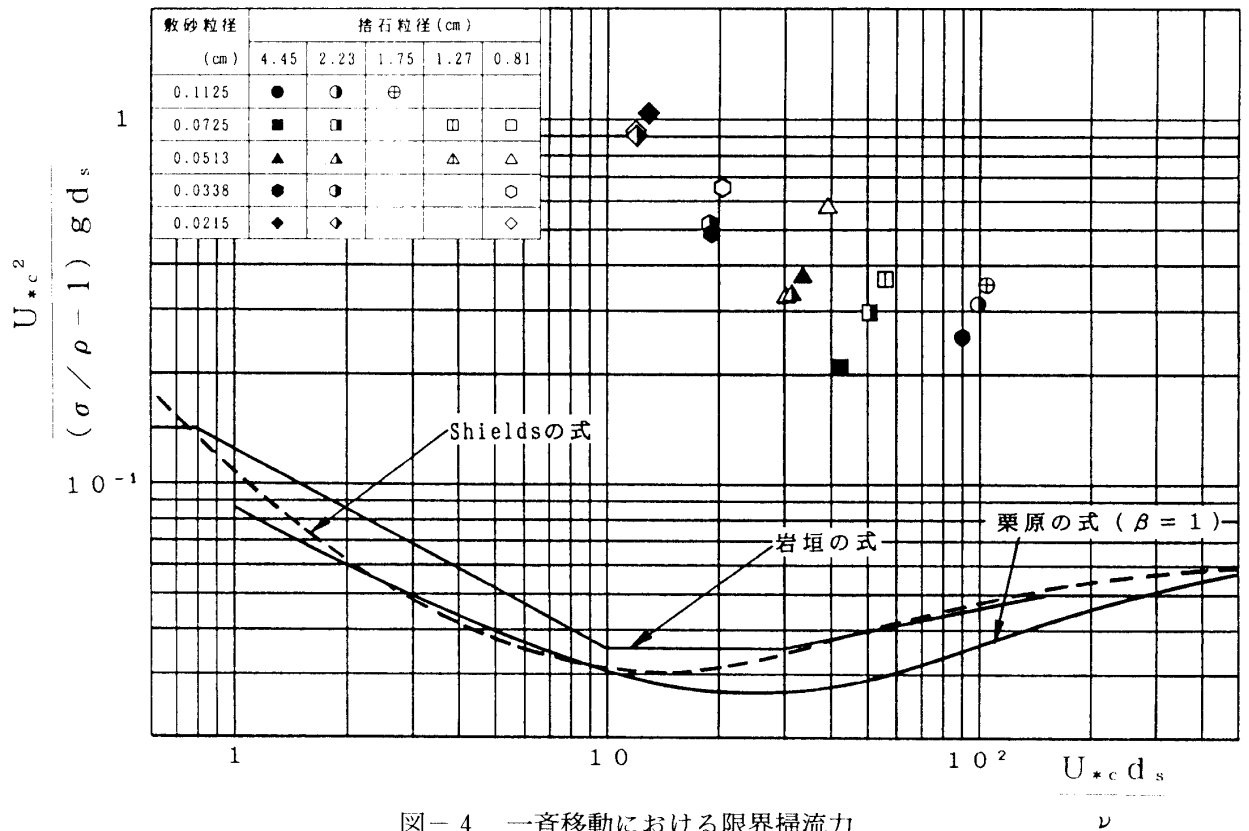


図-4 一斉移動における限界掃流力

力の値が小さくなることが推測されるが、これがさらに、捨石のない限界掃流力の値に限りなく近付くかどうかについては確かなことは言えない。それゆえ、捨石基礎内の流れのもとにおける限界掃流力の特性が適切に表現できる解析法を新たに見出す必要があると思われる。

本実験においては、砂粒子の移動を微動・初期移動・一斉移動に分けて整理することにしたが、これらの判定は微妙で難しいことが予想されていた。また、初回の実験は予備実験とし、2回目の本実験に備えることにした。さらに、流量の段階的調整が適切に行えないこともあって、実験結果にかなりばらつきが認められた。特に、微動はその判定が難しく、一方、一斉移動は洗掘との区別が難しかった。それゆえ、ここでは初期移動を中心に考察することにした。しかるに、実験結果には相当なばらつきが認められることから、今後、さらに十分な検討を行う必要があると思われる。

通常の状態においては、砂や水の密度の変動量が小さいうえ、水質や水温の変化による諸特性値の変動量もごく僅かである。この点に着目すると底床砂の安定の問題は、誤差の多少の増加はあるものの、単純化され、簡単に表すことができる。ここでは、初期移動の場合の実験結果を図-5に示したが、そのときの移動限界の流速と底床砂の平均粒径の関係を捨石粒径をパラメータとして表したものである。全体的にかなりばらつきは認められるが、およそ、捨石粒径の大きさの順に並んでいることが分かる。これを基に、図中に捨石粒径 $d = 1, 2, 3, 4, 5$ cmのパラメータ曲線を書き入れてみた。今後、さらに実験を重ね、パラメータ曲線の精度を高めてゆきたい。

また、砂移動の限界の流速は底床砂の粒径が大きくなるにつれ、右上がりプロットされていることが分かる。一方、底床砂の粒径が小さくなるにつれ、限界の流速はすべて1.5 cm/sに近付く様子が分かる。これが運輸省の実験^{2,3)}では、限界の流速は2.5 cm/sであったが、本実験の結果とはかなりの違いがある。これは運輸省の実験においては、底床砂に粘性土を含む天然の海底砂をそのまま用いたためで、これらの素材が持っている粘着力が砂粒子の移動限界の流速を高めたことは十分考えられる。

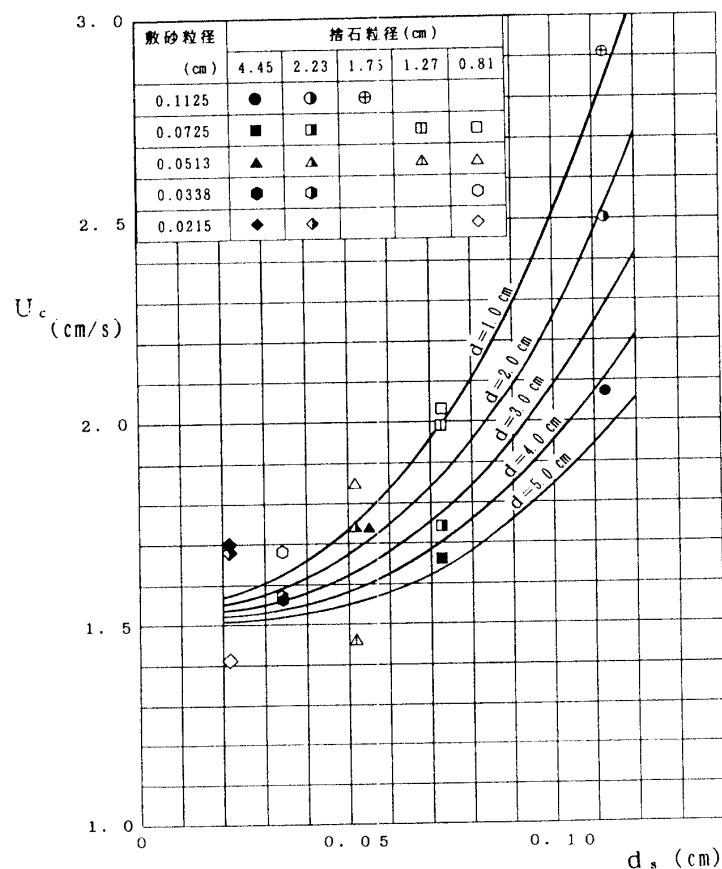


図-5 初期移動における限界の流速と底床砂粒径との関係

5. 結 言

防波堤や海岸護岸などの構造物の捨石基礎内の流れによって、そのしたにある底床砂が洗掘され、遂には、重大な被害を被るようになる。これに対する防護策として、シートやマットを海底の砂地盤の上に敷設することが一般的に行われている。最近、これらの構造物の建設場所は大水深であったり、波や潮流の激しい所であることが多くなっているが、これらに対する技術的対応は十分とはいええず、この傾向は今後も続くものと考えられる。このような現状に鑑みても、捨石基礎下の洗掘防止工法の改良と新工法の開発の必要性が迫られているが、そのための基礎となる研究の促進と実用化のための設計規準の策定が強く望まれる。本研究の取りまとめに当たって、捨石基礎内の流れのもとにおける限界掃流力の特性が適切に表現できる解析法を新たに見出す必要があると思われた。

本研究を行うにあたり、ご協力、ご助言賜りました諸先生に心から感謝の意を表すとともに、実験にご協力戴いた平成5年度・平成6年度および平成7年度の各卒業研究生諸君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 善 功企：海底地盤の波浪による液状化に関する研究，港湾技研資料 No.755, June 1993.
- 2) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所：名古屋港高潮防波堤透水模型実験報告書（第一報），昭和37年3月，同（第二報），昭和38年3月。
- 3) 岡田靖夫：名古屋港高潮防波堤の洗掘防止に対する一考察，土木技術 Vol.19, No.3, 昭和39年3月。
- 4) 松並仁茂：捨石基礎内の流れに対する底床安定度の算定について，昭和62年度土木学会中部支部研究発表会，pp.182～183，昭和63年3月。
- 5) 松並仁茂・石梅 尚：捨石基礎の抵抗係数について，平成5年度土木学会中部支部研究発表会，pp.301～302，1994年3月。
- 6) 松並仁茂・石梅 尚：捨石基礎の抵抗係数に関する実験的研究，福井工業大学研究紀要 第25号（第一部），pp.169～176，平成7年3月。
- 7) 岩佐義朗：朝倉土木工学講座 3 水理学，朝倉書店，pp.242～244，昭和45年。
- 8) 土木学会：水理公式集－昭和60年度版－，土木学会，pp.221～233，1985。
- 9) 村上正吾・辻本哲郎・中川博次：河床砂礫の pick-up rate 推定式について，土木学会論文集 No.443/II-18，pp.9～15，1992.2。
- 10) 富永正照・坂本忠彦：海岸堤防の根固め工について，第16回海岸工学講演会講演集，pp.267～275，1969。
- 11) B. Le Méhauté : Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp.903～919, Décembre 1957.

(平成7年7月17日受理)