

## 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（その二）

—岩垣の限界掃流力の実験式との比較—

松 並 仁 茂\*

### Experimental Study on the Stability of Seabed for the Flow into Rubble Mound (No.2)

—Compared with Iwagaki's Experimental Formula of Critical Tractive Force—

Hitoshige Matsunami

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 the studies for the stability of seabed. This paper is the second report, that is compared with Iwagaki's Experimental Formula of Critical Tractive Force.

#### 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、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<sup>1)</sup>されているが、その重大性が推察される。

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。

---

\* 建設工学科 土木工学専攻

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<sup>2,3)</sup>を行ったが、筆者はこの実験的研究に参加していた。この実験は限定された範囲のもので、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<sup>4)</sup>。

これに対して、海岸堤防の捨石根固め工の安定についての実験的研究が富永ら<sup>5)</sup>によって行われたが、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。また、明石海峡大橋の主塔基礎の洗掘防止工に関する実験的研究が本四公団ら<sup>6)</sup>によって報告されている。最近では、鈴木ら<sup>7)</sup>によって、礫の移動がない逆フィルター効果を利用して粒径や層圧の条件を実験的に検討し、多層捨石工の設計法を報告している。しかし、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安定問題を解明するには十分でない。

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<sup>8,9)</sup>。後者に関する研究成果の第一報<sup>10)</sup>は既に報告したが、本論文はこれに続くもので、特に、限界掃流力の関係について考察するものである。

## 2. 捨石基礎下の底床砂の安定と限界掃流力について

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、限界掃流力との関係について比較検討することが必要不可欠であると考え。底床が一様な粒径の砂の場合、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<sup>11)</sup>と呼ばれる式がある。

$$\frac{\tau_{0c}}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{u_{*c}^2}{\{\rho_s/\rho - 1\}gd} = \phi \left( \frac{u_{*c}d}{\nu} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\tau_0$ ：底床に働く摩擦応力、 $u$ ：砂粒子近傍の流速、 $u_*$ ：摩擦速度、 $\rho_s$ ：砂粒子の密度、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力の加速度、 $d$ ：砂粒子の平均粒径、 $\nu$ ：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。

これらの研究については、わが国においては栗原や岩垣ら<sup>11)</sup>の研究が広く知られているが、ここでは岩垣の実験式を対象として比較検討することにする。

## 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結果および考察

### 1) 捨石基礎内の流れを浸透流として取扱う場合

捨石基礎内の流れについての研究結果はすでに取りまとめ報告したことはすでに述べたが、ここの流れはB.Le Méhautéの論文<sup>12)</sup>の中に報告されているように浸透流として式(2)のように取扱っている。すなわち、

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

ここに、 $\Delta H$ ：損失水頭(cm)， $\Delta S$ ：流路長(cm)， $\zeta$ ：抵抗係数， $U$ ：透水体の流れの平均流速(cm/s)， $g$ ：重力の加速度( $\text{cm/s}^2$ )， $d$ ：捨石の平均粒径(cm)

本実験の底床砂の移動について、Shieldsや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、まず、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 $d$ を円管路の直径と等しいとするとときの径深 $R$ を用いて、式(4)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(3)のように表すことができる。

$$\frac{U_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_s} = \phi \left( \frac{u_{*c}d}{\nu} \right) \dots\dots\dots(3)$$

$$U_{*c} = \sqrt{gRi_c} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $U_*$ ：摩擦速度(cm/s)， $\sigma$ ：砂粒子の密度( $\text{g/cm}^3$ )， $\rho$ ：水の密度( $\text{g/cm}^3$ )， $d_s$ ：砂粒子の平均粒径(cm)， $R$ ：捨石の平均粒径 $d$ を円管路の直径と等しいとするとときの径深(cm)， $I$ ：損失勾配，なお、砂粒子移動の限界状態のときの平均流速や摩擦速度などには添字 $c$ をつける。

こうした時の結果は、岩垣の実験式に対して、底床砂の移動限界において、微動の場合、初期移動の場合そして一斉移動の場合のいずれかの場合においても、その差は非常に大きく、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結論づけた。

捨石基礎内の流れに対する底床砂の安定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。実験装置や実験方法，捨石や底床砂の種類や分類，さらに，砂粒子の移動の判定基準など実験に関わる全てについてはこれまでの報告と同様であるので，ここでは省略する。実験は表－1に示すように，今回で35ケースとなり，

表－1 底床の安定の実験ケースとシンボルマーク

数砂粒径 (cm)	捨石粒径 (cm)						
	4.45	3.49	2.86	2.23	1.75	1.27	0.81
0.1125	●	⊙	⊖	⊗	⊕	⊖	○
0.0725	■	▣	▤	▥	▦	▧	□
0.0513	▲	▴	▵	▶	▷	▸	△
0.0338	◆	⬤	⬥	⬦	⬧	⬨	⬩
0.0215	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆

第一段階の実験は終わった。これらの実験結果について，上述の流れに対する限界掃流力を算定すると図－1のようになるが，岩垣の実験式に対して，その差は4～22倍と非常に大きいことが分かる。

## 2) 捨石基礎内の流れを真の流れとして取扱う場合

捨石基礎下の底床地盤の安定問題を限界掃流力的に解析するには，底床地盤に直接作用する真の流れを対象としなければならない。真の流れは粒径，粒度分布，間隙率，捨石の形状，および流れ等多くの要素に影響される。B.Le Méhauté は「間隙率が小さくなると，水分子の軌道長が長くなること，間隙中の平均流速が増大すること，および流れの屈曲部が多くなると考えられる。」と述べている。また，福永らは「通常（浸透流的取扱い方）の方法による摩擦速度の算定は当然

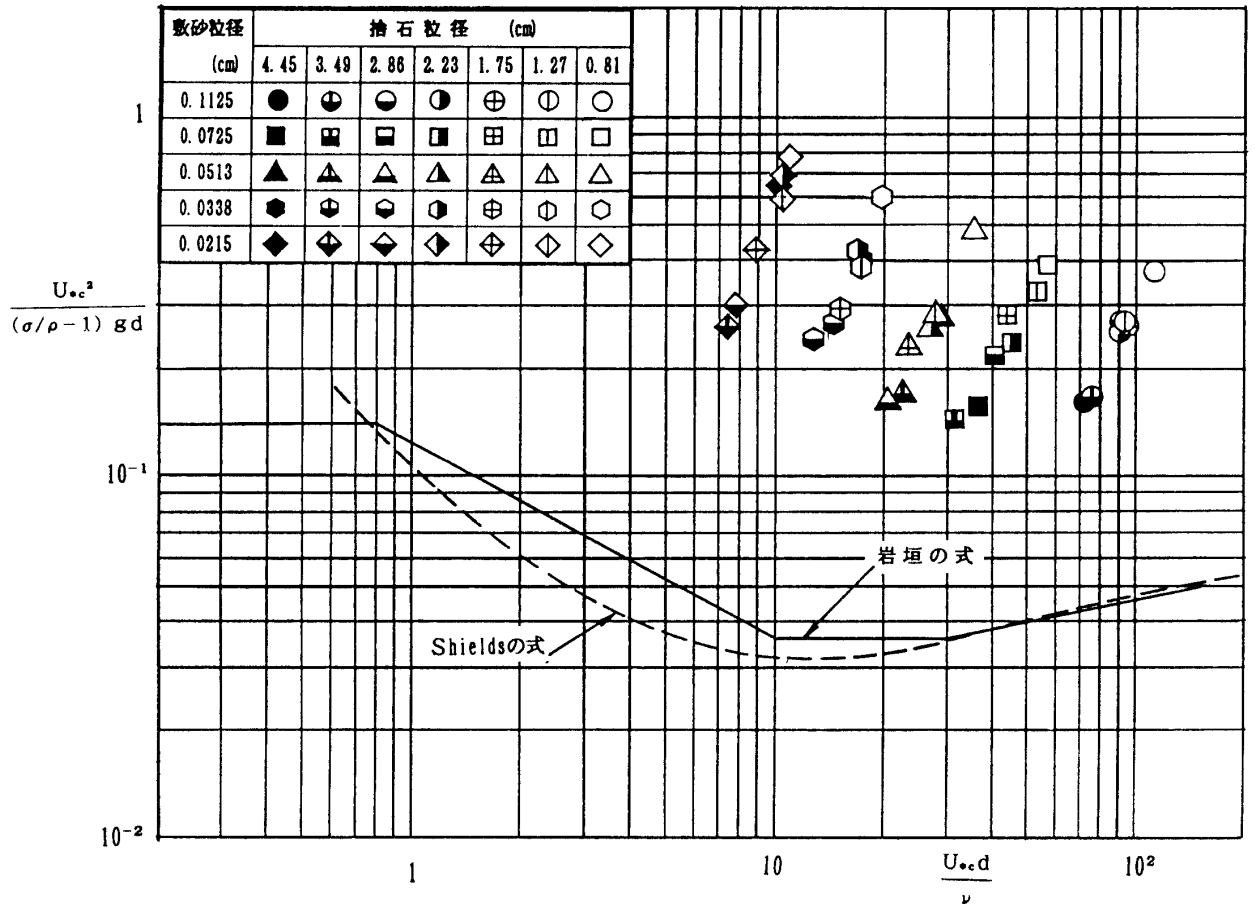


図-1 捨石基礎内の流れを浸透流とするとときの限界掃流力 - 初期移動の場合 -

適用できない。」としている。そこでここでは限界掃流力的解析を行うため、捨石透水体を次のように考える。

- (1) 捨石透水体の粒子は均一な球形粒径(d)とする。
- (2) 各粒子は単純立方型に均一に充填されているものとし、間隙比をeとする。

水流はこのような透水体の間隙をながれるものとして、平均径深 R を求めると  $R = ed/6$  を得る。実際には捨石を対象とするうえ、流れの乱れもあるので、これにさらに、適切な補正係数  $(\alpha)$  を考えと、平均径深は式(5)のように表わすことができる。

$$R = \alpha \frac{ed}{6} \dots\dots\dots (5)$$

このような透水体の間隙を流れる流れに対して、この径深を用いて実験結果における底床砂の初期移動の移動限界の摩擦速度 ( $U_{*c}$ ) を求めると、表-2 のようになる。

## 2)-1 真の流れを平均的な流れ (平均流速) とする場合

まず、真の流れを平均的な流れとして、平均流速として取扱う場合がある。これに相当するのは表中の  $\alpha = 1.00$  の場合についてであると考えられるが、これらの結果を図-2 に示した。図からも分かるように岩垣の実験式に対して2~8 倍の違いがあり、その違いはかなり大きいといえる。

表－2 底床砂の移動限界における摩擦速度 — 初期移動の場合 —

底床砂 粒 径 $d_s$ (cm)	底床砂 比 重	基 礎 捨石径 $d$ (cm)	間隙率 $n$	水温 $^{\circ}\text{C}$	損失勾配 $i_c$ ( $=\Delta H/\Delta S$ )	底床砂の移動限界の摩擦速度 $u_{*c}$			
						実 験 $\alpha$ 値		岩 垣	富 永 $m=0.3$
						1.000	0.361		
0.1125	2.68	4.45	0.376	26.9	0.0275	3.47	2.08	2.55	2.10
		3.49	0.387	26.1	0.0358	3.59	2.16	2.54	2.17
		2.86	0.377	25.6	0.0713	4.49	2.70	2.54	2.72
		2.23	0.368	26.7	0.0861	4.27	2.57	2.55	2.59
		1.75	0.372	26.9	0.1165	4.44	2.67	2.55	2.69
		1.27	0.413	26.6	0.1621	4.86	2.92	2.55	2.95
		0.81	0.404	27.9	0.3444	5.56	3.34	2.56	3.37
0.0725	2.67	4.45	0.390	27.3	0.0171	2.81	1.68	2.01	1.71
		3.49	0.392	22.5	0.0200	2.71	1.63	2.01	1.64
		2.86	0.384	24.2	0.0368	3.27	1.97	2.01	1.98
		2.23	0.358	27.5	0.0510	3.22	1.93	2.01	1.95
		1.75	0.376	22.0	0.0510	3.67	2.21	2.01	2.23
		1.27	0.371	27.2	0.1251	3.91	2.35	2.01	2.37
		0.81	0.402	26.9	0.2323	4.55	2.73	2.01	3.06
0.0513	2.67	4.45	0.375	26.9	0.0215	3.06	1.84	1.69	1.86
		3.49	0.367	26.7	0.0168	2.36	1.42	1.69	1.43
		2.86	0.378	24.3	0.0192	2.33	1.40	1.71	1.41
		2.23	0.363	26.1	0.0414	2.93	1.76	1.71	1.78
		1.75	0.378	22.3	0.0448	2.79	1.68	1.73	1.69
		1.27	0.348	25.3	0.0762	2.91	1.75	1.70	1.76
		0.81	0.370	23.9	0.2067	4.01	2.41	1.71	2.43
0.0338	2.68	4.45	0.355	23.8	0.0202	2.83	1.70	1.60	1.72
		3.49	0.377	24.6	0.0158	2.34	1.40	1.60	1.42
		2.86	0.371	24.5	0.0215	2.43	1.46	1.62	1.47
		2.23	0.352	21.7	0.0433	2.93	1.76	1.62	1.77
		1.75	0.374	25.0	0.0373	2.52	1.52	1.60	1.53
		1.27	0.373	25.2	0.0690	2.92	1.75	1.59	1.77
		0.81	0.391	20.8	0.1676	3.77	2.27	1.62	2.29
0.0215	2.65	4.45	0.370	20.1	0.0205	2.96	1.78	1.49	1.80
		3.49	0.364	25.7	0.0107	1.87	1.12	1.46	1.13
		2.86	0.369	25.6	0.0147	2.00	1.20	1.46	1.21
		2.23	0.364	20.1	0.0437	3.02	1.81	1.49	1.83
		1.75	0.373	23.3	0.0348	2.43	1.42	1.47	1.48
		1.27	0.377	24.0	0.0663	2.89	1.73	1.47	1.75
		0.81	0.381	19.4	0.1357	3.32	2.00	1.50	2.02

## 2)－2 捨石基礎内の流れを真の流れとして取扱う場合

次に、式(5)を用いる流れをもって、これが真の流れに相当すると考えることができる。ここでは、適切な補正係数として $\alpha=0.361$ を用いたが、図－3に示すように岩垣の実験式を中心に分布していることが分かる。

一方、富永らの摩擦速度については、本実験の場合に対して比例関係にあり、富永らの算定式

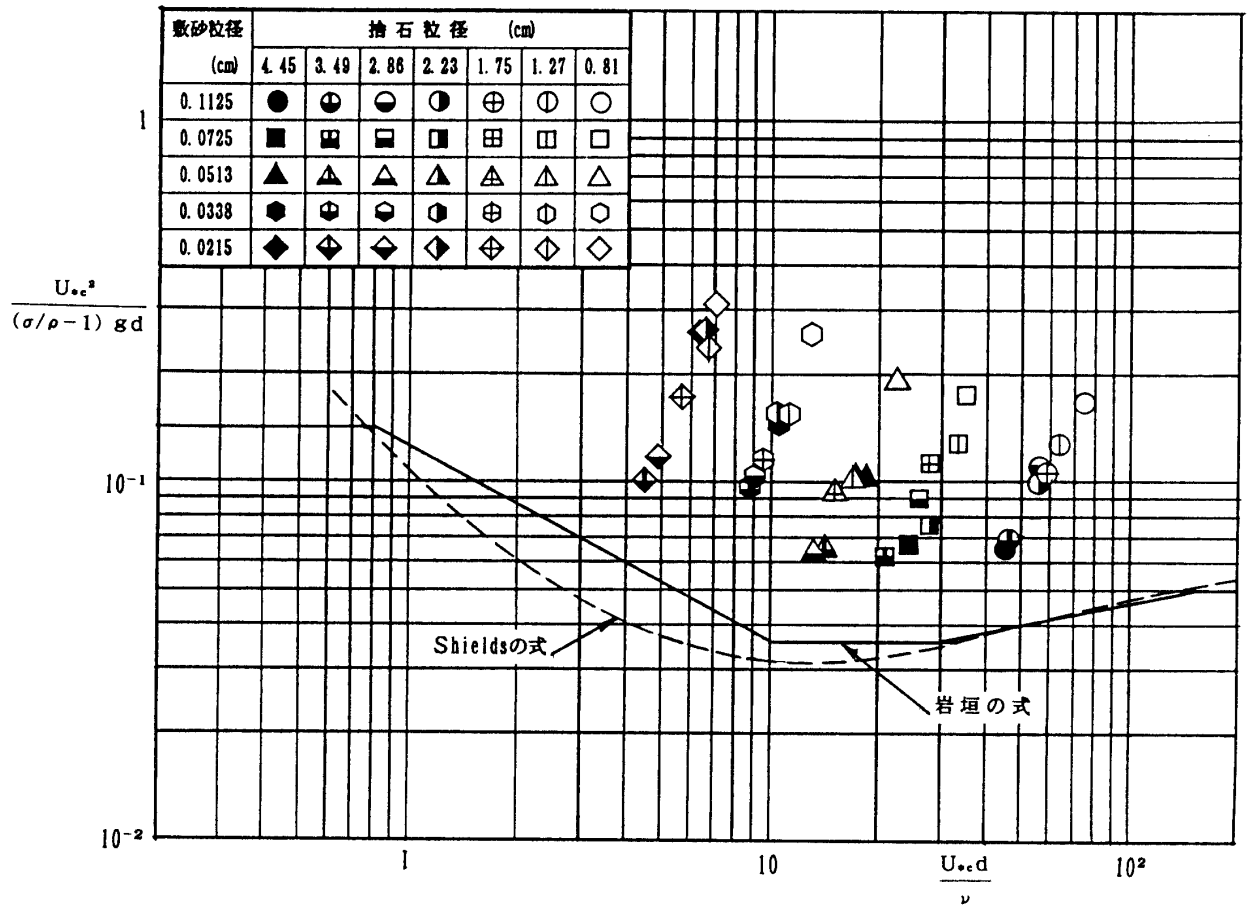


図-2 捨石基礎内の流れを真の流れの平均流速とするときの限界掃流力 - 初期移動の場合 -

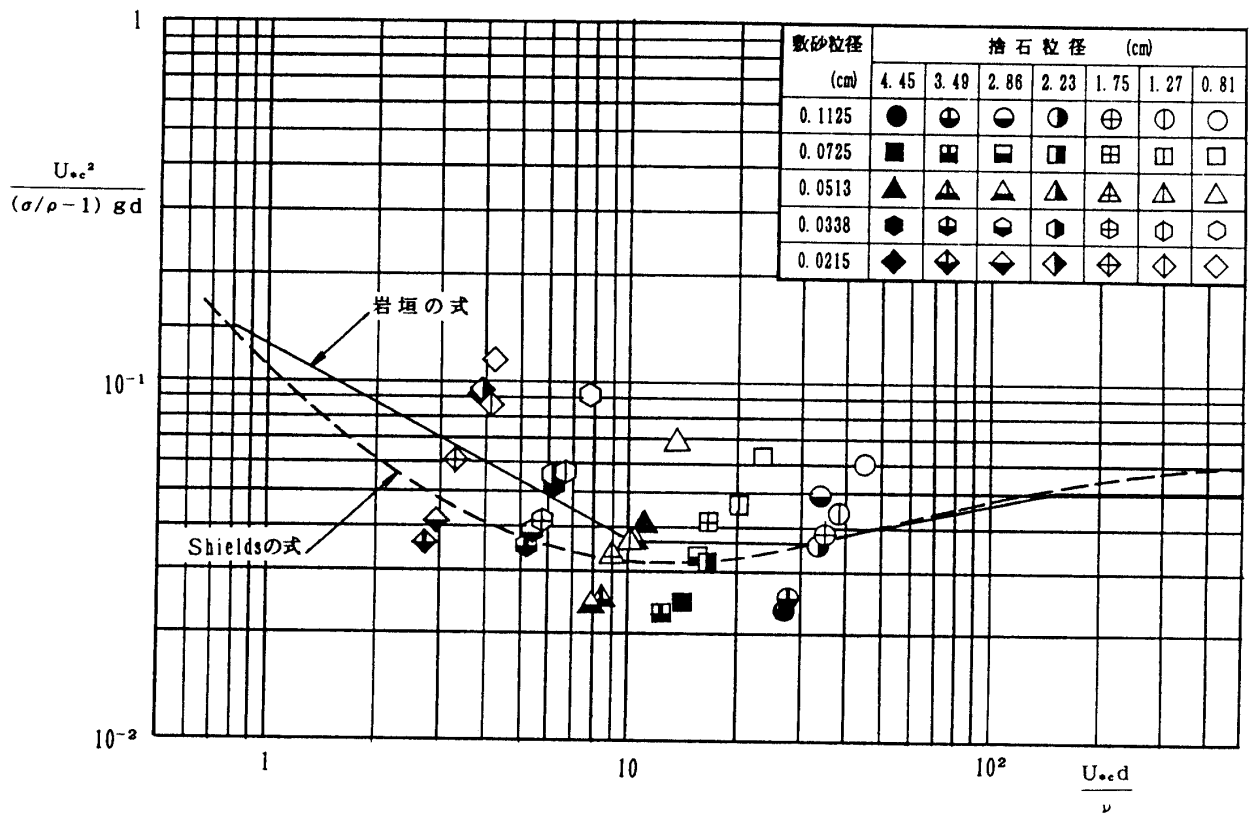


図-3 捨石基礎内の流れを真の流れとするときの限界掃流力 - 初期移動の場合 -

において、 $m=0.3$ とするときは本実験の1.009倍の値を示していることが分かる。このように適切な補正係数を合理的に選定できるならば、十分実用に供することができるものと思われる。

参考までに、移動限界が微動の場合については表-3に示したが、表から分かるように微動の場合の適切な補正係数は $\alpha=0.491$ となった。同様に一斉移動の場合について求めると $\alpha=0.298$ となった。

表-3 底床砂の移動限界における摩擦速度 —微動の場合—

底床砂 粒 径 $d_s$ (cm)	底床砂 比 重	基 礎 捨石径 $d$ (cm)	間隙率 $n$	水温 $^{\circ}\text{C}$	損失勾配 $i_c$ ( $=\Delta H/\Delta S$ )	底床砂の移動限界の摩擦速度 $u_{*c}$			
						実 験		$\alpha$ 値	富永 $m=0.3$
						1.000	0.491		
0.1125	2.68	4.45	0.376	26.9	0.0209	3.02	2.12	2.55	1.83
		3.49	0.387	26.1	0.0273	3.13	2.19	2.54	1.90
		2.86	0.377	25.6	0.0430	3.49	2.44	2.54	2.11
		2.23	0.368	26.7	0.0754	4.00	2.80	2.55	2.42
		1.75	0.372	26.9	0.0928	3.96	2.78	2.55	2.40
		1.27	0.413	26.6	0.1289	4.34	2.03	2.55	2.63
		0.81	0.404	27.9	0.2857	5.06	3.55	2.56	3.07
0.0725	2.67	4.45	0.390	27.3	0.0121	2.36	1.66	2.01	1.44
		3.49	0.392	22.5	0.0197	2.69	1.88	2.01	1.63
		2.86	0.384	24.2	0.0325	3.08	2.16	2.01	1.84
		2.23	0.358	27.5	0.0436	2.97	2.08	2.01	1.80
		1.75	0.376	22.0	0.0593	3.20	2.24	2.01	1.94
		1.27	0.371	27.2	0.0842	3.21	2.25	2.01	1.95
		0.81	0.402	26.9	未確認				
0.0513	2.67	4.45	0.375	26.9	0.0152	2.55	1.81	1.69	1.56
		3.49	0.367	26.7	0.0102	1.83	1.29	1.69	1.11
		2.86	0.378	24.3	0.0162	2.14	1.50	1.71	1.30
		2.23	0.363	26.1	0.0326	2.60	1.82	1.71	1.58
		1.75	0.378	22.3	0.0382	2.58	1.81	1.73	1.56
		1.27	0.348	25.3	未確認				
		0.81	0.370	23.9	未確認				
0.0338	2.68	4.45	0.355	23.8	0.0142	2.39	1.67	1.60	1.45
		3.49	0.377	24.6	0.0122	2.04	1.44	1.60	1.24
		2.86	0.371	24.5	0.0160	2.10	1.47	1.62	1.27
		2.23	0.352	21.7	0.0267	2.30	1.61	1.62	1.39
		1.75	0.374	25.0	0.0293	2.24	1.57	1.60	1.36
		1.27	0.373	25.2	0.0425	2.29	1.60	1.59	1.39
		0.81	0.391	20.8	0.1422	3.48	2.44	1.62	2.11
0.0215	2.65	4.45	0.370	20.1	0.0159	2.60	1.83	1.49	1.58
		3.49	0.364	25.7	0.0107	1.87	1.31	1.46	1.13
		2.86	0.369	25.6	0.0128	1.87Y	1.31	1.46	1.13
		2.23	0.364	20.1	未確認				
		1.75	0.373	23.3	0.0277	2.17	1.52	1.47	1.32
		1.27	0.377	24.0	0.0632	2.82	1.97	1.47	1.71
		0.81	0.381	19.4	未確認				

#### 4. 結 言

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基準の策定が強く望まれる。本研究において、捨石基礎内の流れのもとでの底床砂の安定と限界掃流力との関係について比較検討したが、適切な解析法を用いて適切な定数を選定することができれば、良好な関係を得ることができるということが確かめられた。

#### 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) 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.
- 6) 北川 信・伊藤進一郎・土谷政治・今井貫爾：強潮流下における大規模基礎の洗掘防止工に関する研究，土木学会論文集 No.438/Ⅱ-17, pp.61～70, 1991.11
- 7) 鈴木幸一・山本裕規・徳安芳典：逆フィルターを利用した捨石洗掘防止工に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 572/Ⅱ-40, 1～9, 1997. 8.
- 8) 松並仁茂・右梅 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。
- 9) 松並仁茂・右梅 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。
- 10) 松並仁茂・右梅 尚：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（その二），福井工業大学研究紀要 第26号（第一部），pp.173～180, 1996.
- 11) 土木学会：水理公式集－昭和60年度版－，土木学会，pp.221～233, 1985.
- 12) B. Le Méhauté : Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp.903～919, Décembre 1957.

（平成9年10月13日受理）