

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 (最終回) — 捨石基礎の実用設計法の提案 —

松 並 仁 茂*

Experimental Study on the stability of Sea-bed for the Flow into Rubble Mound (the last report) — Practical Design of the stability of Sea-bed for the Flow into Rubble Mound —

Hitoshige Matsunami

The sea-bed ground of rubble mound in breakwater or revetment is scoured by waves. It brought many disasters, and has been written as serious problems. The author has been reported the many experiments by rubble mounds for practical design.

This paper is the last report, the author proposes the practical design of the stability of sea-bed for flow into rubble mound.

1. はじめに

防波堤や海岸護岸に波が作用すると捨石基礎内に流れが生ずるが、この流れの大きさによっては、その下にある海底地盤の土砂が不安定になり、洗掘されるようになる。それがやがて、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、倒壊におよぶこともある。わが国の防波堤の被災例によると、海底地盤の洗掘が被災の原因と見られる件数は21%にもおよぶと報告されており¹⁾、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殆ど行なわれたことがなかった。ただかなり以前に、運輸省第二港湾建設局が名古屋港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、大掛かりな実験を行った²⁾ことがある。筆者もこの実験的研究に担当者として参加していた。しかし、この実験は名古屋港高潮防波堤建設のためのものであり、一般の防波堤や護岸の地盤の安定性を検討するには無理があることが分かっている³⁾。

その後、富永らの海岸堤防の捨石根固め工の安定についての実験的研究、また、本四公団による明石大橋の主塔基礎の洗掘防止工に関する実験的研究、さらに、鈴木らによる実験的研究が報告されているが、いずれも、捨石基礎内の流れに対する底床の安定を検討するには、かなり無理が

* 建設工学科 地球環境工学専攻

ある³⁾ことが分かる。最近、(独)港湾空港技術研究所の鈴木・高橋らは、「砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について—現地調査と大規模実験—」と題して、消波ブロックの沈下被災についての現地調査と大規模実験の結果を詳細に報告⁴⁾している。しかし、この報告も研究が緒についたばかりのようであり、底床の安定を合理的な検討が行えるものではないことが分かる。

本研究は、捨石基礎下の海底地盤洗掘被災の現状の重大性に鑑み、それらのメカニズムを把握するとともに、洗掘防止対策のための合理的設計法ならびに工法開発に資することを目的とするものである。本学においての研究は昭和62(1987)年に計画し開始したが、実験的研究を行ったのは平成5(1993)年からである。実験は全て本学水理実験室の8 m水平水路(30 cm×30 cm)を用いて行った。

捨石基礎内の流れに関する理論的考察については、本研究分野の嚆矢と思われるB. Le Méhautéの報告⁵⁾を参考とすることとした。彼が導いた関係式は地下水や管水路の流れで広く用いられているDarcy Weisbachの関係式と同一の型式をなしている。ここでの水流は完全な乱流であるが、「捨石の間隙を流れる真の流れ」ではなく、いわゆる「浸透流の流れ」を対象としているところに問題があるといえよう。

一方、捨石基礎内の流れに対する捨石基礎下の底床砂の安定問題は、いわゆる限界掃流力に深く関係するものであることは容易に想像できる。ここでは「真の流れ」を対象とするうえに、流れの共通量として「動水半径(径深)」を用いて論理的検討を行うことにした。さらに、対象とする限界掃流力としては、広く知られているShieldsと岩垣の式とし、本実験の結果と比較検討することにした。捨石基礎下の底床砂の安定問題は、捨石のない状態の限界掃流力とは機構の違いから、両者は全く異なる結果を示すものと予想された。しかるに、捨石基礎をコンクリート半球ブロックで構築したところ、実験結果はShieldsや岩垣の式とほぼ同一のものとなった⁶⁾。

これに対して、自然石からなる防波堤や海岸護岸の捨石基礎は、コンクリート半球ブロックのような均等な真球による充填の場合とは非常に異なるので、従来の限界掃流力とは大きく異なる結果になるであろうと予想された。しかし、真球の充填型式が5種類しかないことから、自然石からなる捨石基礎の解析結果がこの5種類の充填型式の何れかに相当するならば、技術開発上、都合がよいという見地から、あえてその検討を行った^{6, 7)}。それらの検討結果の概要は表-1のとおりであり、5種類の充填型式のいずれの場合もShieldsと岩垣の式の各値とはかなりな隔たりがあり、これらの直接的な流用にはかなり無理があることが分かった。

本論文は、これらの研究結果から、捨石基礎の充填型式が最も単純な「単純立方型充填型式」であるとして、まずは、コンクリート半球ブロックの実験結果が示したように、「Shieldsと岩垣の式の結果とほぼ一致する」ような「適切な動水半径の補正係数」を見いだす。次に、これに対応する抵抗係数を求め、実用設計法の設計資料とする。そして、最終の目的である捨石基礎の設計法を提示することとしている。

表－１ 岩垣の式の値と実験値の比較

充 填 型 式	微動			初期移動			一斉移動		
	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値
単純立方型	1.2 倍	3.0 倍	2.1 倍	1.8 倍	8.2 倍	2.8 倍	2.1 倍	8.8 倍	3.8 倍
立方四面体型	1.2 倍	2.6 倍	1.9 倍	1.5 倍	7.4 倍	2.5 倍	2.1 倍	8.2 倍	3.2 倍
立方斜方体型	0.8 倍	4.2 倍	1.7 倍	1.2 倍	5.1 倍	2.1 倍	1.5 倍	7.0 倍	2.8 倍
角 柱 体 型	0.7 倍	3.9 倍	1.5 倍	1.1 倍	4.4 倍	1.8 倍	1.4 倍	7.2 倍	2.1 倍
面心四面体型	0.7 倍	3.9 倍	1.5 倍	1.1 倍	4.4 倍	1.8 倍	1.4 倍	7.2 倍	2.1 倍

２．捨石基礎が単純立方型充填と考える場合の動水半径の補正係数

１）捨石基礎が単純立方型充填と考える場合の水力関係式

捨石基礎が単純立方型充填と考える場合の水力関係式については、これまでの報告^{3, 6)}で述べてきたところであるが、その主要なものについて略述する。

ａ）捨石基礎内の流れを浸透流とする場合

捨石基礎内の流れを浸透流とする場合は、B. Le Méhautéの論文⁵⁾に述べられている。すなわち、定流において、損失勾配 $\Delta H / \Delta S = i$ と捨石基礎内の平均流速 U の関係を次式で表わすとともに、抵抗係数 ξ は乱れの大きさと間隙率 n の関数によって表わすことができるものとした。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = i = \xi \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots (1)$$

$$\xi = C(Re) \cdot f(n) = F(Re, n), \quad Re = \frac{Ud}{\nu} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 ΔH ：損失水頭 (cm)， ΔS ：流路長 (cm)， d ：基礎捨石の平均粒径 (cm)， ν ：動粘性係数 (cm²/s) である。

ｂ）捨石透水体が球体で単純立方型充填と考える場合（上下・左右が無限大の場合）

捨石透水体が球体で単純立方型充填と考える場合において、球体直径 d ，間隙比 e とすると、動水半径（径深） R_0 は適切な補正係数 α を考慮して、次のように表わすことができる。ここでの間隙率は $n = 1 - \pi/6$ となる。

$$R_0 = \frac{\alpha e}{6} d = \frac{\alpha}{6} \cdot \frac{n}{(1-n)} d, \quad d_0 = 4R_0 \quad \dots\dots (3)$$

さらに、基礎捨石の流れをこのような動水半径をもつ管水路の集合体と考え、間隙を流れる真の平均流速を $v_a = U/n$ とおくと、損失勾配の関係は次のように表わすことができる。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \xi_0 \frac{v_a^2}{2gd_0} = \xi_0 \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_0} \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 ξ_0 ：動水半径 R_0 をもつ仮想管水路の抵抗係数， d_0 ：仮想管水路の直径である。

式(1)と(3)および(4)から、抵抗係数 ξ_0 とレイノルズ数 Re_0 を求めると、次のようになる。

$$\xi_0 = \frac{d_0}{d} \cdot n^2 \cdot \xi = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha \cdot n^3}{(1-n)} \quad \xi = F(Re_0) \quad \dots\dots (5)$$

$$Re_0 = \frac{v_a \cdot d_0}{\nu} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{(1-n)} Re \quad \dots\dots (6)$$

c) 単純立方体型充填で混成式防波堤の基礎として用いられる場合(左右のみが無限大の場合)

単純立方体型充填で混成式防波堤の基礎として用いられる場合(左右のみが無限大の場合)とは、実際(設計の場合)の防波堤ケーソン直下の捨石基礎の場合を想定している。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H}{\Delta S} &= \xi_s \frac{v_a^2}{2gd_s} = \xi_s \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_s} \\ &= \xi_s \frac{2+m \cdot \pi}{4\alpha \cdot n^3 \cdot m} \cdot \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$R_s = \frac{\alpha \cdot n \cdot m}{2+m \cdot \pi} \cdot d = K_s \cdot d, \quad d_s = 4R_s \quad \dots\dots (8)$$

$$\xi_s = 4n^2 \cdot K_s \cdot \xi = F(Re_s) \quad \dots\dots (9)$$

$$Re_s = \frac{v_a \cdot d_s}{\nu} = \frac{4K_s}{n} \cdot \frac{Ud}{\nu} = \frac{4K_s}{n} \cdot Re \quad \dots\dots (10)$$

ここに、 R_s , ξ_s , d_s , m , Re_s : 単純立方体型充填で混成式防波堤の基礎として用いられる場合の動水半径、抵抗係数、仮想管水路直径、透水体の層数、およびレイノルズ数である。

d) 実験基礎が単純立方体型に充填されていると考える場合(実験の場合)

実験基礎が単純立方体型に充填されていると考える場合とは、天井と底および両側面が拘束されていると考える場合で、実験の場合である。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H}{\Delta S} &= \xi_t \frac{v_a^2}{2gd_t} = \xi_t \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_t} \\ &= \xi_t \frac{\{2(N+m) + N \cdot m \cdot \pi\}}{4\alpha \cdot n^3 \cdot N \cdot m} \cdot \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$R_t = \frac{\alpha \cdot n \cdot N \cdot m}{\{2(N+m) + N \cdot m \cdot \pi\}} \cdot d = K_t \cdot d, \quad d_t = 4R_t \quad \dots\dots (12)$$

$$\xi_t = 4n^2 \cdot K_t \cdot \xi = F(Re_t) \quad \dots\dots (13)$$

$$Re_t = \frac{v_a \cdot d_t}{\nu} = \frac{4K_t}{n} \cdot \frac{Ud}{\nu} = \frac{4K_t}{n} \cdot Re \quad \dots\dots (14)$$

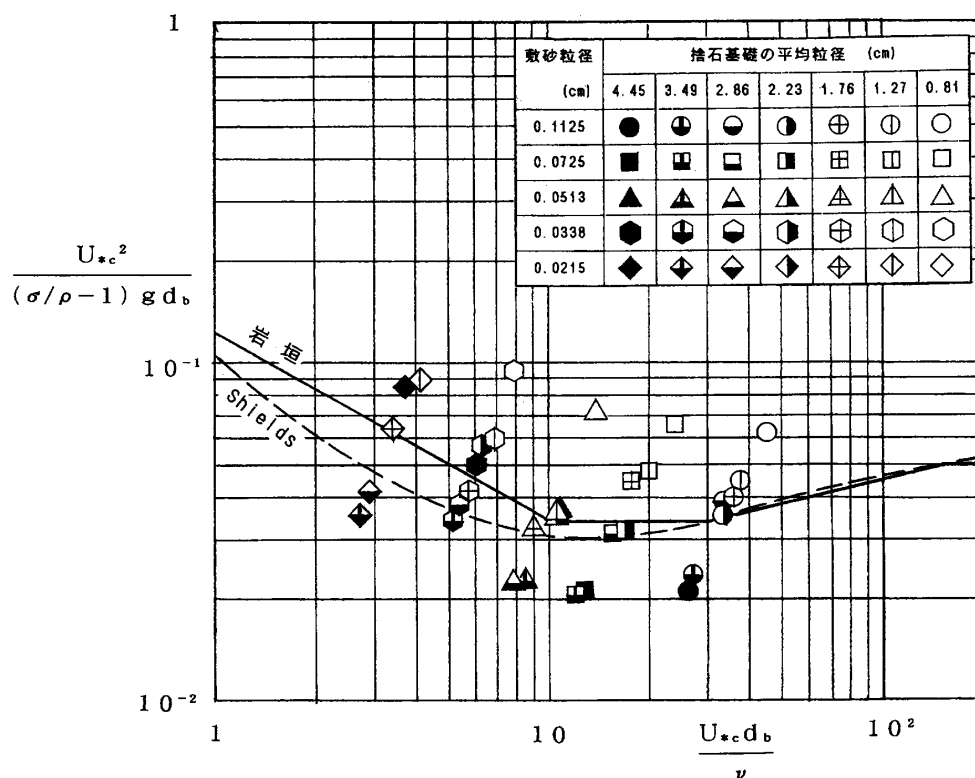
ここに、 R_t , ξ_t , d_t , m , N , Re_t : 単純立方体型充填で実験基礎として用いられる場合の動水半径、抵抗係数、仮想管水路直径、透水体の層数、透水体の横並び個数およびレイノルズ数である。

2) 捨石基礎が単純立方型充填と考える場合の動水半径の補正係数

ここでは、岩垣の限界掃流力の式を用いて、基礎捨石が上下・左右の壁によって拘束されている実験の場合についての補正係数を求めた。表－2はその計算結果であるが、代表値としての初期移動の補正係数は $\alpha=0.3534$ となった。この値を用いて上述のd)の実験のケースを経て、c)の実際の設計のケースについての限界掃流力を求め、Shieldsと岩垣の式と比較したのが図－1である。実験値が岩垣の式の値を中心に分散しているが、これは補正係数値の選定が適切であったことの証である。

表－2 動水半径の補正係数 α の計算結果

砂の粒径 d_s (cm)	微動			初期移動			一斉移動		
	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
0.1125	0.7688	0.2425	0.4782	0.5832	0.2013	0.3651	0.3698	0.1854	0.2842
0.0725	0.7961	0.3720	0.4975	0.5643	0.1726	0.3135	0.4214	0.2231	0.3117
0.0513	0.8608	0.4193	0.5618	0.5196	0.1684	0.3657	0.4619	0.1404	0.2972
0.0338	0.6199	0.2049	0.4691	0.4763	0.1764	0.3361	0.4001	0.1598	0.3074
0.0215	0.6112	0.2546	0.4508	0.6112	0.2712	0.3996	0.4494	0.1649	0.3263
			0.4893			0.3534			0.3045



図－1 真の流れにおける限界掃流力（単純立方型充填）
－初期移動で補正係数 $\alpha=0.3534$ の場合－

3. 捨石基礎の実用設計の提案

1) 捨石基礎の実用設計のための設計資料

a) 動水半径の補正係数を考慮した抵抗係数

図-2はこの動水半径の補正係数 α を用いて、同様に実際の設計ケースのために抵抗係数を算定し図示したものである。実験値の中央に記入した曲線は設計に用いる抵抗係数値である。

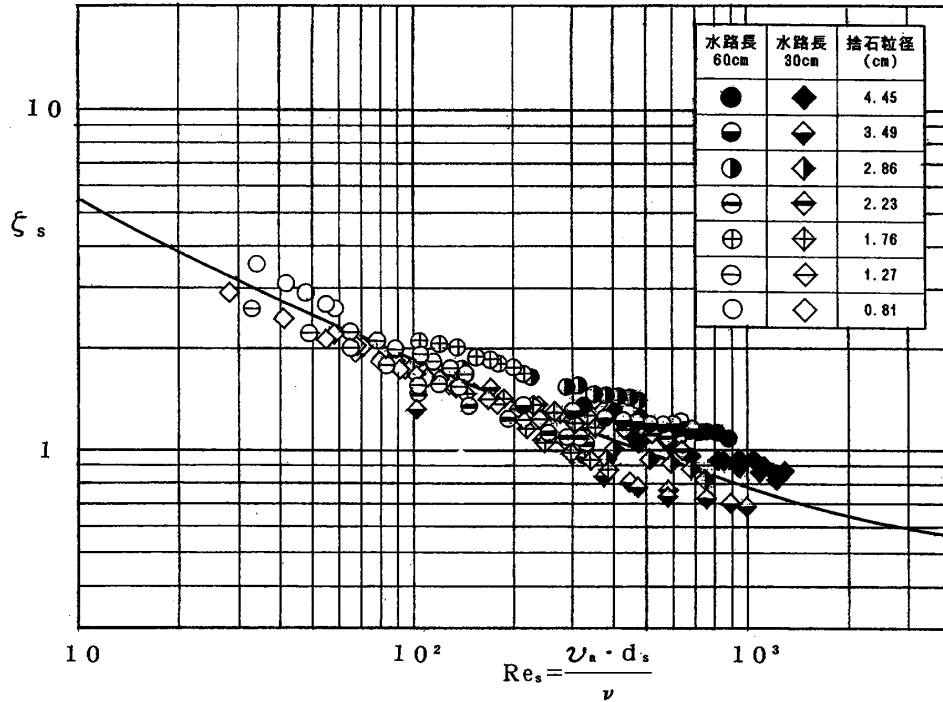


図-2 真の流れにおける防波堤基礎の抵抗係数（単純立方体型充填）
—補正係数 $\alpha=0.3534$ の場合—

b) 砂粒子の移動限界における摩擦速度 U_{*c} と真の平均流速 v_{*c} の関係

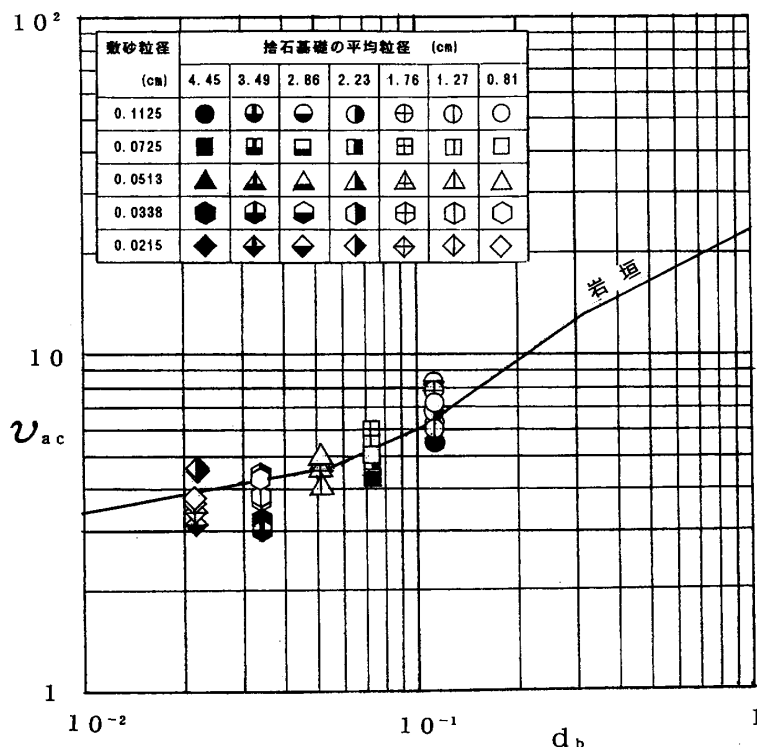
本研究の実験中、砂粒子の移動限界における摩擦速度 U_{*c} と真の平均流速 v_{*c} の間にある一定の関係があることが予想された。この関係が明確になるならば、捨石基礎内の流れに対する底床の安定問題は容易に解決されることになる。以前に、松並⁸⁾は摩擦速度 U_{*c} と浸透流の平均流速 U との間に一定の関係があることを用いて底床砂の安定度の算定を試みている。本実験において真の平均流速 v_{*c} と摩擦速度 U_{*c} との関係の調査結果を両者の比で示したのが表-3である。全体的に安定した値を示しており、各砂の粒径ごとの比の平均値は全体の平均値を中心に3~8%の範囲内にはいっている。限界移動の代表である初期移動の比は $v_{*c}/U_{*c}=2.581$ となった。

表-3 v_{*c}/U_{*c} の計算結果

砂の粒径 d_s (cm)	微動			初期移動			一斉移動		
	最大値	最少値	平均値	最大値	最少値	平均値	最大値	最少値	平均値
0.1125	2.512	1.701	2.192	2.979	2.052	2.645	3.273	2.304	3.018
0.0725	2.431	1.902	2.180	3.006	1.821	2.595	3.265	2.452	2.970
0.0513	2.489	2.186	2.337	2.977	2.014	2.617	3.245	2.227	2.887
0.0338	2.460	1.553	2.059	3.015	1.870	2.484	3.244	2.076	2.732
0.0215	2.405	1.734	2.129	2.938	2.036	2.559	3.202	2.221	2.814
			2.172			2.581			2.882

c) 砂粒子の移動限界における真の平均流速 v_{ac} と底床材の粒径の関係

岩垣は河川や港湾および海岸などへの適用のため、さらに簡略化した実用式を提案しているが、上述の値を用いて、底床材の粒径 d_b に対する移動限界の真の流速 v_{ac} の関係を岩垣の実用式とともに示したのが図－3である。岩垣の限界掃流力の実用式を中心に分布していることが分かる。



図－3 真の流れにおける限界の流速と底床材粒径（単純立方体型充填）
— 初期移動で補正係数 $\alpha=0.3534$ の場合 —

4. 捨石基礎内の流れに対する底床の安定に関する実用設計法の提案

捨石基礎内の流れに対する底床の安定の実用設計はこれまで述べてきた水理式や実験資料を用いて行う。実用設計の凡その手順は次のようである。

- 作業1：予め、波圧などから捨石基礎の水頭差や流線網の作図を求め、整備しておくこと。
- 作業2：図－3の関係図から底床材粒径 d_b に対する真の流速 v_{ac} を求める。
- 作業3：仮想管水路径 d_{s1} を仮定し、図－2から抵抗係数 ζ_{s1} を求める。
- 作業4：式(7)に抵抗係数 ζ_{s1} と仮想管水路径 d_{s1} を代入し、 d_{s2} を繰り返し計算によって求める。
- 作業5： d_{s2} が決まったら、式(8)で捨石粒径 d を繰り返し計算によって求める。
- 作業6：さらに上層の捨石粒径を決定するためには、作業2～作業5を繰り返す。

なお、混成式防波堤のケーソン直下部の捨石基礎内における底床安定の検討には式(8)を用いるが、ケーソン前面部の検討には上面の拘束が無いので、次の式(15)を用いる必要がある。

$$d = \frac{1 + m \cdot \pi}{\alpha \cdot n \cdot m} \cdot R_s = \frac{1 + m \cdot \pi}{4 \alpha \cdot n \cdot m} \cdot d_s = \frac{1 + m \cdot \pi}{0.6734 m} \cdot d_s \quad \dots\dots (15)$$

ここで提案した実用設計の実例として、新潟西港第二西防波堤の捨石基礎工の底床安定の検討を試みた。この防波堤は水深16mに築造された混成式防波堤であるが、捨石層厚は2.5mとやや薄いものではあったが、一応の成果を得ることができた。ただ、ケーソン前面の捨石基礎の部分には作用する波圧の大きさは現状では不明であるので、ここではケーソン下端の波圧を用いた。

5. 結 語

防波堤や海岸護岸の捨石基礎内の流れとその下にある底床材の安定に関する問題は大きく、検討方法構築の早期確立が必要である。しかるに、対象が海域や河川の施設に限られているうえに、現象が複雑であることから解明への試みが殆どなされていない。この中にあって、筆者はこの問題を取り上げ検討を行ってきた。そして、本論文の実用設計法の提案をもって、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を終了することができた。

捨石基礎内の流れについては、当初、B. Le Méhauté の浸透流の処理法を採用し問題の解決を計ったが、かなり無理があることが分かった。その一方で、捨石基礎下の底床砂の安定には限界掃流力との関係を明確にする必要があった。そこでこれらの接点として、流れの共通量として径深に相当する動水半径を取り入れ、実験結果との関係を明らかにした。途中において、球体の5種類の充填型式への適応についての検討を試みたが、いずれの場合も直接的に適用できるものは見当たらなかった。結局は、最も単純な「単純立方型充填型式」を対象として「適切な動水半径の補正係数」を算出し、これに対応する抵抗係数を求めた。一方、底床砂の移動限界における摩擦速度と真の平均流速との関係を求め、これらをもって実用設計の基本資料とすることにした。

しかし、ここで取り扱った捨石基礎内の流れは定流であり、例えば、波浪など周期のある流れを対象としてはいない。また、実験の規模は小さいものであるので、今後これらは、大規模実験によって確認する必要であると考えらる。

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 No755, 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，（第二報），昭和38年3月。
- 3) 松並仁茂：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－，福井工業大学研究紀要 第28号，pp.183～190, 1998, 3.
- 4) 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎：砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について－現地調査と大規模実験－，港湾空港技術研究所報告 第41巻 第1号 2002, 3.
- 5) B. Le Méhauté：Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp.903～919, Décembre 1957.
- 6) 松並仁茂：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（その三）－捨石基礎の抵抗係数の実用化と限界掃流力－，福井工業大学研究紀要 第31号，pp.239～246, 2001, 3.
- 7) 例えば、平成14年度 松並研究室配属卒業研究生 卒業研究論文：捨石基礎内の流れに対する底床の安定に関する実験的考察－捨石基礎が立方斜方体型および角柱体型に積まれた場合－，平成15年1月。
- 8) 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。

（平成15年11月12日受理）