

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 —

松 並 仁 茂*

Experimental Study on the Stability of Sea-bed for the Flow into Rubble Mound (No.3) — Practical Use of the Resistance Coefficient of Rubble Mound and Critical Tractive Force —

Hitoshige Matsunami

The sea-bed ground of rubble mound in breakwaters or revetments is scoured by waves. It brought many disasters, and has been written as serious problems. The author reports the result of many experiments by rubble mounds and hemispherical concrete blocks for practical use.

1. はじめに

防波堤や海岸護岸の捨石基礎の底床地盤が波によって洗掘され、被災することが多く、その重大性が報告されている。ここでは、捨石基礎とコンクリート半球ブロックによる多くの実験に基づき、実用化に向けてその成果を報告する。

2. 捨石基礎内の流れを浸透流とする場合

防波堤や海岸護岸の捨石基礎内の流れは、レイノルズ数の極めて大きい乱流領域が対象となる。この捨石基礎内の流れの研究としては、B.Le Méhautéの論文¹⁾がある。そこでは、定常流において、損失勾配 $\Delta H/\Delta S = i$ と捨石基礎内の平均流速 U の関係を次式で表すとともに、抵抗係数 ζ は乱れの大きさと間隙率 n の関数によって表すことができるものとした。

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

$$\zeta = C(\text{Re}) \cdot f(n) = F(\text{Re}, n), \quad \text{Re} = \frac{Ud}{\nu} \quad \cdots(2)$$

* 建設工学科 土木工学専攻

ここに、 ΔH ：損失水頭 (cm)， ΔS ：流路長 (cm)， ν ：動粘性係数 (cm^2/s) である。

この論文に述べられている研究方式は、いわゆる、捨石基礎内の流れを浸透流として取り扱っている。この研究方式によって捨石基礎の抵抗係数や底床安定の問題を同時に取り扱うことは、これまで行ってきた多くの実験的研究の結果^{2,3,4,5,6)}から、かなり無理があることが分かった。

3. 捨石基礎が単純立方型に充填されているものとし、流れを真の流れとする場合

捨石基礎の抵抗係数や底床安定の問題を同時に処理するために、ここでは、基礎の捨石が単純立方型に均等に充填されているものとし、また、流れは真の流れとして取り扱うことにした。一般に、管水路や開水路の流れを共通的に処理する場合、両者に共通する量として径深を用いることがあるが、ここでは、この径深に相当する動水半径⁵⁾を用いて実験結果を整理することにした。

1) 捨石透水体が球体で単純立方型に充填されている場合

捨石透水体が球体で単純立方型に充填されている場合については、すでに検討し報告⁶⁾した。

(1) 捨石透水体の粒子は均一な球形 (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流れるものとして、動水半径 R_0 を求めると $R_0 = ed/6$ となる。実際には種々の捨石を対象とするうえ、流れに接する表面の状況は複雑多様であるが、結果として流れの乱れにかなりな影響を与えるものとして、ここでは、適切な補正係数 α を考え、動水半径を次のように表すことにした。また、ここでの間隙率は $n = 1 - \pi/6$ となる。

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

透水体の流れをこのような動水半径を持つ管水路の集合体の流れと考え、さらに、間隙を流れる真の平均流速を $\nu_a = U/n$ とし、損失勾配の関係式を示すと次のようになる。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta_0 = \frac{\nu_a^2}{2gd_0} = \zeta_0 \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_0} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 ζ_0 ：動水半径を持つ仮想の管水路の抵抗係数、 d_0 ：仮想の管水路の直径である。

式(1)と式(3)および式(4)から、抵抗係数 ζ_0 とそれに対するレイノルズ数 Re を求めると、次のようになる。

$$\zeta_0 = \frac{d_0}{d} \cdot n^2 \cdot \zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha \cdot n^3}{(1-n)} \zeta = F(Re_0) \quad \dots\dots(5)$$

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

これらの各式は、いずれも透水体の基礎が上下左右に無限に広がっている場合のものである。

2) 防波堤の実験基礎が単純立方型に充填されている球体の捨石透水体であるとした場合

防波堤の実験基礎が単純立方型に充填されている球体の捨石透水体であるとした場合については、これらの基礎は上下左右にある壁によって拘束されている。この場合の動水勾配 R_t を用いて各々の関係を示すと次のように表すことができる。

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

$$R_t = \frac{\alpha \cdot n \cdot N \cdot m}{\{2(N+m) + N \cdot m \cdot \pi\}} \cdot d = K_t \cdot d, \quad d_t = 4R_t \quad \dots\dots(8)$$

$$\zeta_t = 4n^2 \cdot k_t \cdot \zeta = F(Re_t) \quad \dots\dots(9)$$

$$Re_t = \frac{U_a \cdot d_t}{\nu} = \frac{4K_t}{n} \cdot \frac{Ud}{\nu} = \frac{4K_t}{n} \cdot Re \quad \dots\dots(10)$$

ここに、 R_t 、 ζ_t 、 Re_t ：防波堤の実験基礎が単純立方型に充填されている球体の捨石透水体であるとした場合の動水半径と抵抗係数およびレイノルズ数である。また、 N 、 m ：捨石透水体の球体の水路における横並び個数と層数である。

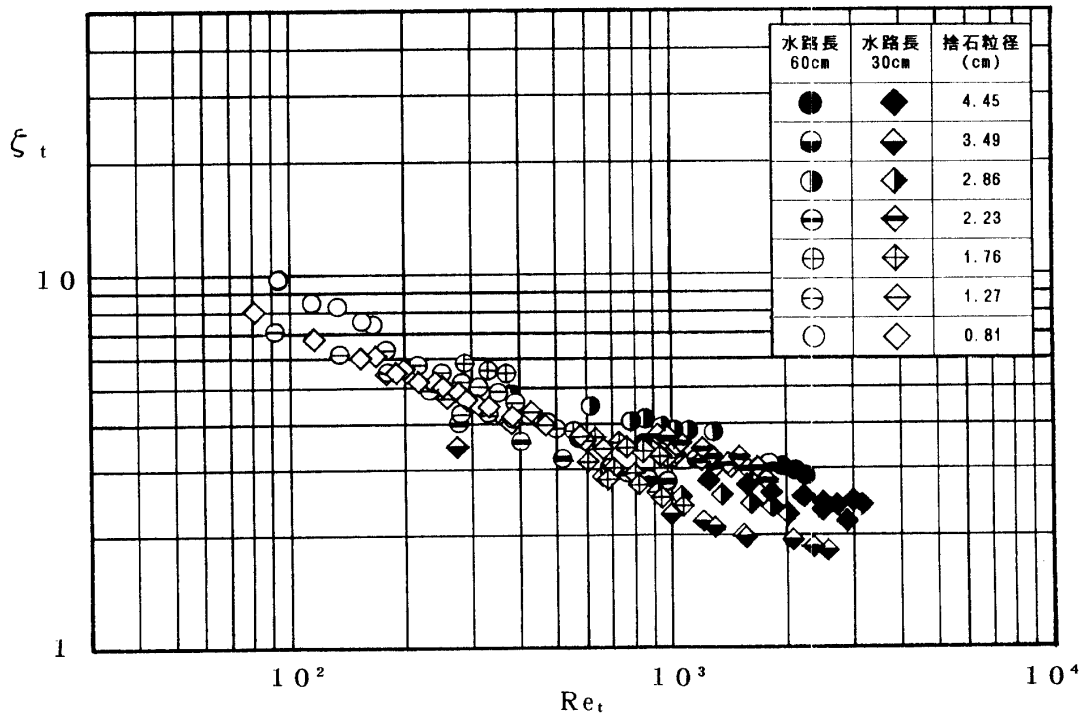


図1. 真の流れにおける防波堤の実験基礎の抵抗係数

実験は本学の水理実験室にある幅30cm、高さ30cm、長さ8mの水平水路を用いて行った。これらの関係を用いて抵抗係数の実験結果を整理し図に表したのが図1である。この結果とコンクリート半球ブロックの実験結果から推算できる多層の真球ブロックの抵抗係数と比較するとほぼ等しい結果となることが分かった。

3) 混成式防波堤の捨石基礎が単純立方型に充填されている球体の捨石透水体とした場合

混成式防波堤の捨石基礎が単純立方型に充填されている球体の捨石透水体とした場合は、前節の場合と若干異なり、壁面の拘束条件は上下だけであるとする。一方、捨石の積み上げ状態はかなり複雑なものであるが、ここでは最初の試みでもあるので、球体の捨石が単純立方型に充填されていると想定することにした。この条件から混成式防波堤の捨石基礎と実験基礎の抵抗係数の関係を求めると次のようになる。

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta S}\right)_s / \left(\frac{\Delta H}{\Delta S}\right)_t = \frac{i_s}{i_t} = \frac{\zeta_s}{\zeta_t} \cdot \frac{U_s^2}{U_t^2} \cdot \frac{d_t}{d_s} \quad \dots\dots(11)$$

ここに、添字sは混成式防波堤の捨石基礎の場合を示す。上下において、その比率は1に近いものと考えられるが、平均速度をシェジャー則とすると比率は1となるのに対し、マンニング則とするとその比率は1.138になる。ここでは、実験の精度などから比率は1と考えるものとする。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta_s \frac{(2+m \cdot \pi)}{4\alpha \cdot n^3 \cdot m} \cdot \frac{U^2}{2gd} = \zeta_t \frac{\{2(N+m)+N \cdot m \cdot \pi\}}{4\alpha \cdot n^3 \cdot N \cdot m} \cdot \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots(12)$$

これらの捨石基礎の抵抗係数の実験結果を混成式防波堤の捨石基礎に適用するにおいて、上式から動水半径および抵抗係数の関係について求めると、次のようになる。

$$\frac{\zeta_s}{\zeta_t} = \frac{R_s}{R_t} = \frac{d_s}{d_t} = 1 + \frac{2m}{(2+m \cdot \pi)N} \quad \dots\dots(13)$$

実験は限られた条件において行われたが、この範囲において式(13)に従って、実験結果を混成式防波堤の捨石基礎に適用するための補正定数を求めると表1のような結果となる。すなわち、捨石径が0.81cmと小さい場合は横並びの個数も層数も大きいので、動水半径と抵抗

表1. 動水半径および抵抗係数の適用倍率

捨石径 d (cm)	水路幅 B (cm)	水路高 h (cm)	間隙率 (%)	横並び 個数	層数	倍率
4.45	30.15	14.29	40.1	6.78	3.21	1.078
3.49	30.15	15.26	41.1	8.64	4.37	1.064
2.86	30.15	14.96	37.1	10.52	6.69	1.043
1.75	30.15	14.54	39.6	17.23	8.31	1.034
1.27	30.15	14.40	38.5	23.74	11.34	1.025
0.81	30.15	13.43	40.9	37.22	16.58	1.017

係数の割増し定数は1.7%と小さいのに対して、捨石径が4.45cmと大きい場合は横並びの個数も層数も小さいため、動水半径と抵抗係数の割増し定数は7.8%大きくなる。しかし、これらの値は実験の精度や実用上の問題からすると微少な量であり、無視してよいと考えられる。

4. 捨石基礎内の流れに対する底床の安定

捨石基礎内の流れに対する底床砂の安定については、すでに報告したが、そこでの動水半径は流れの上下左右にある拘束壁を無視した状態のものであった。防波堤基礎の水路実験は正しくはこれらの壁を考慮すべきものである。ここでは、この状態に基づく動水半径を通して実験を整理した。図2は微動、図3は初期移動、そして図4には一斉移動の各限界掃流力を示した。いずれも、Shieldsと岩垣の各式より大きな値となつて分布しており、かつ、微動・初期移動・一斉移動^{3,4)}の順に大きな値を示す傾向にあることが分かる。

これに対して、コンクリート半球ブロック基礎の実験結果について、図5は微動、図6は初期移動、そして、図7には一斉移動の各限界掃流力を示した。Shieldsと岩垣の各式と比較すると、微動ではこの両式の中心よりやや小さく分布しており、初期移動では両式の中心より僅かに小さく分布し、一斉移動は両式の中心より僅かに大きく分布していることが分かる。すなわち、コンクリート半球ブロックの場合の実験結果はShieldsと岩垣の各式とほぼ一致しているといふことができる。ここでは、捨石基礎もコンクリート半球ブロック基礎の場合も単純立方型に充填されているとして整理したが、コンクリートブロックが半球で一層の実験基礎であったにもかかわらず、理論と実験結果がほぼ一致した。このことは、捨石基礎の底床安定の今後の研究に対して良い示唆を与えたものとして評価できる。

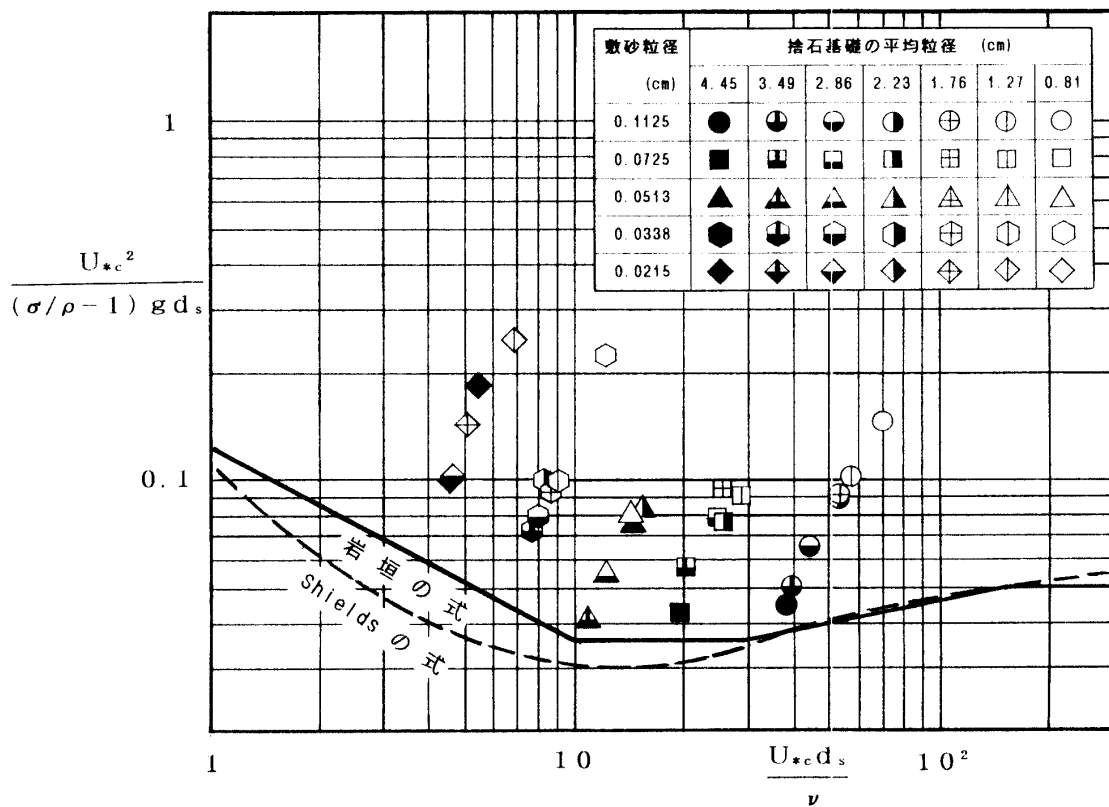


図2. 捨石基礎内の流れを真の流れとするときの限界掃流力—微動の場合—

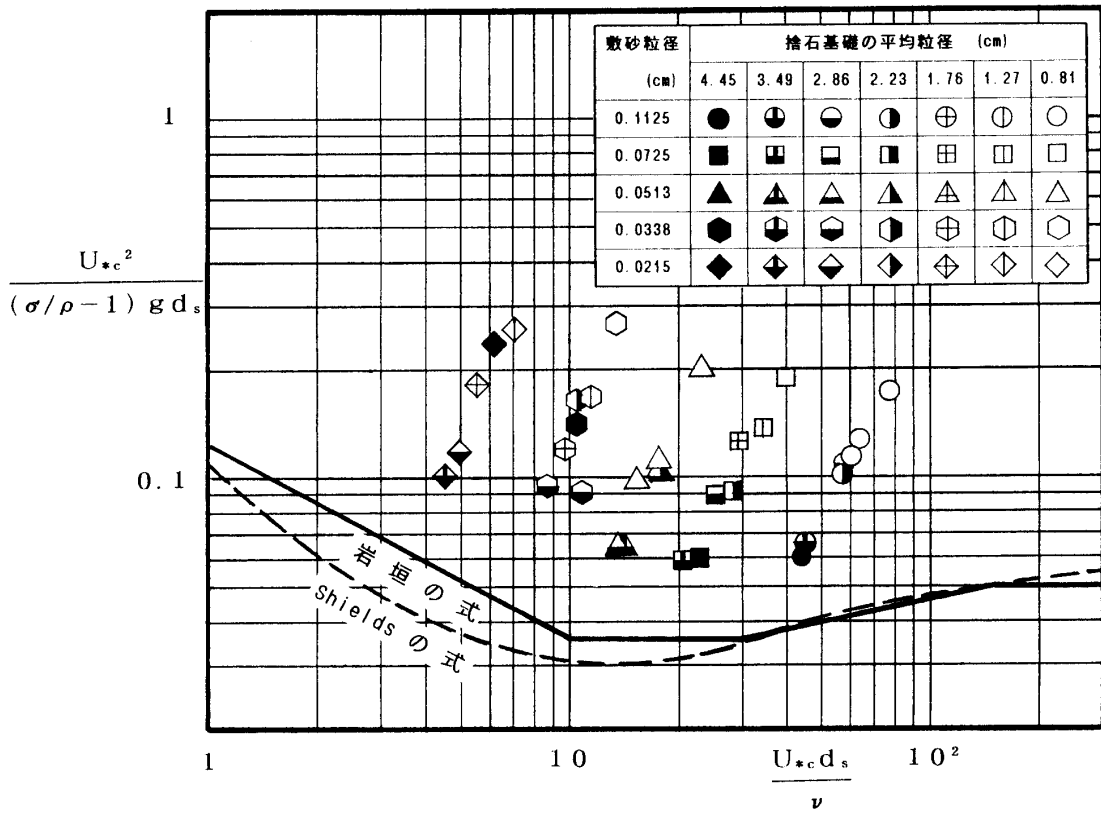


図3. 捨石基礎内の流れを真の流れとするときの限界掃流力—初期移動の場合—

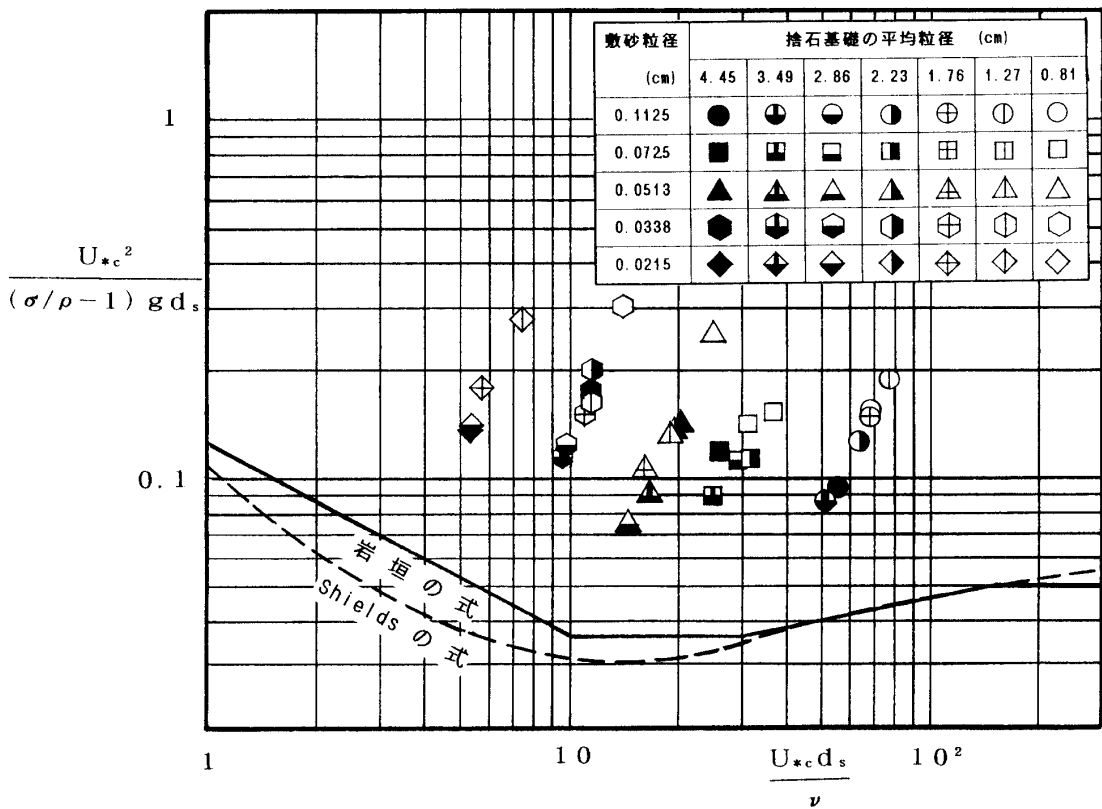


図4. 捨石基礎内の流れを真の流れとするときの限界掃流力—斉移動の場合—

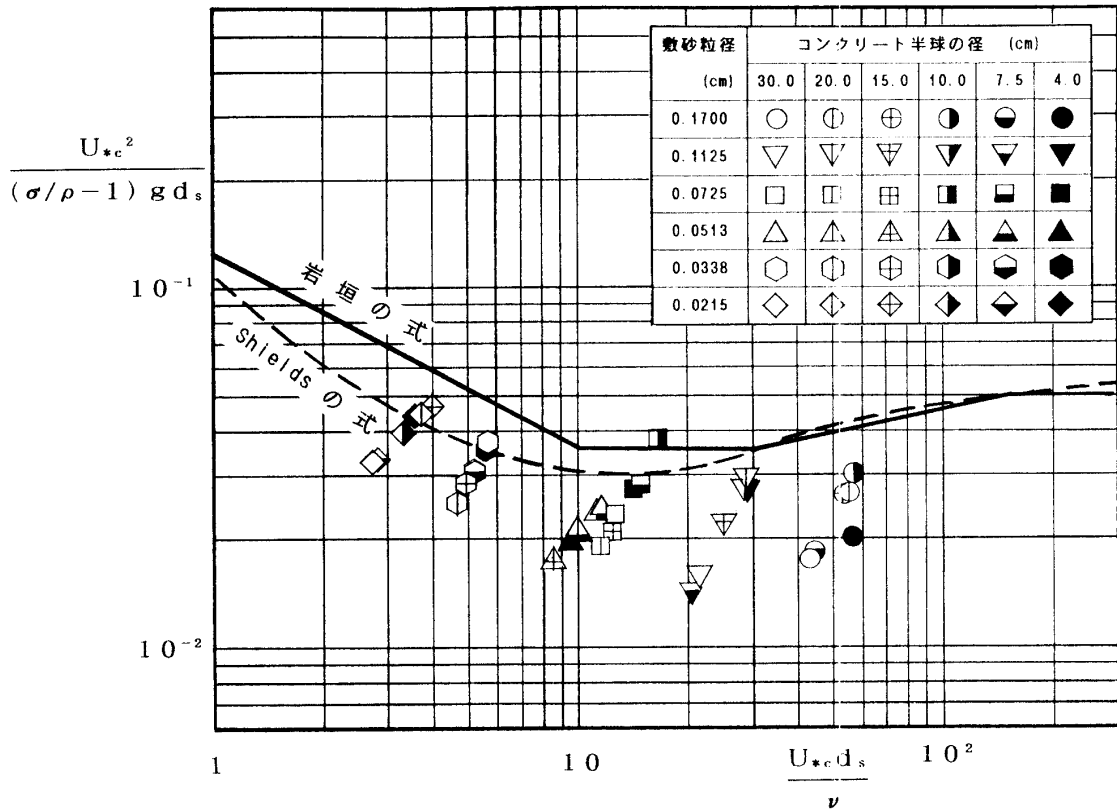


図5. コンクリート半球ブロック内の流れを真の流れとするときの限界掃流力-微動の場合-

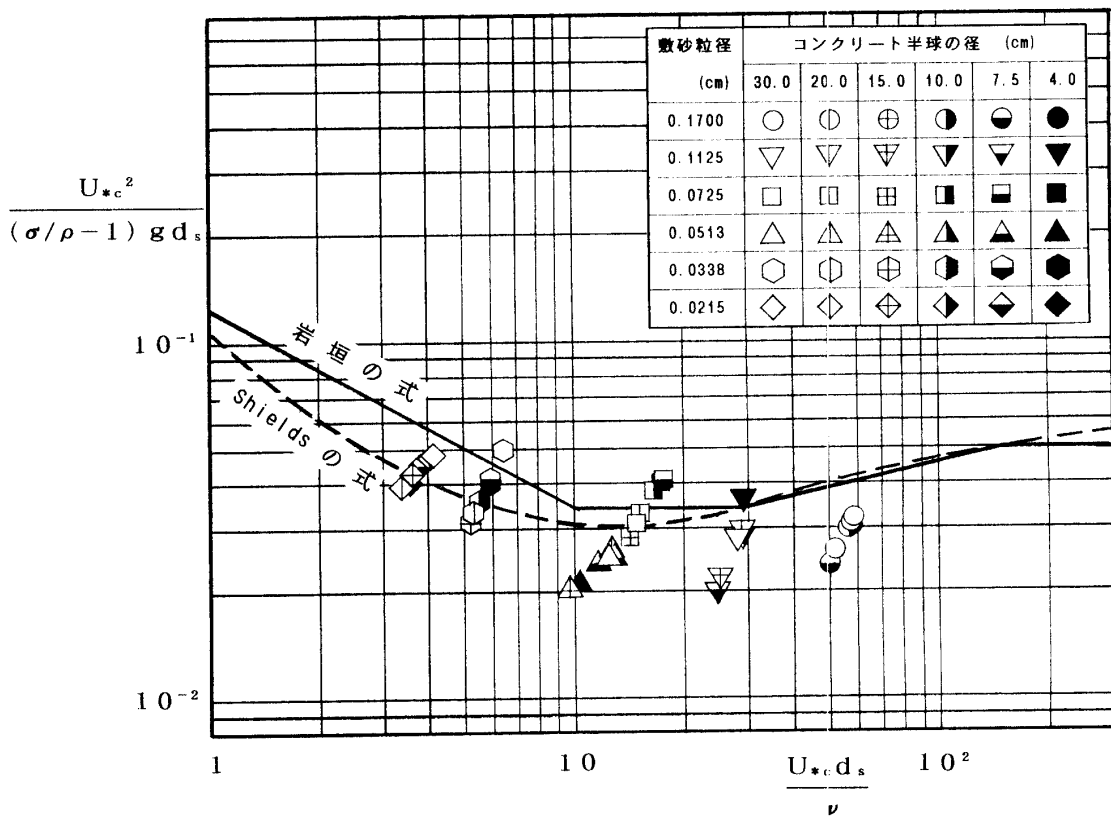


図6. コンクリート半球ブロック内の流れを真の流れとするときの限界掃流力-初期移動の場合-

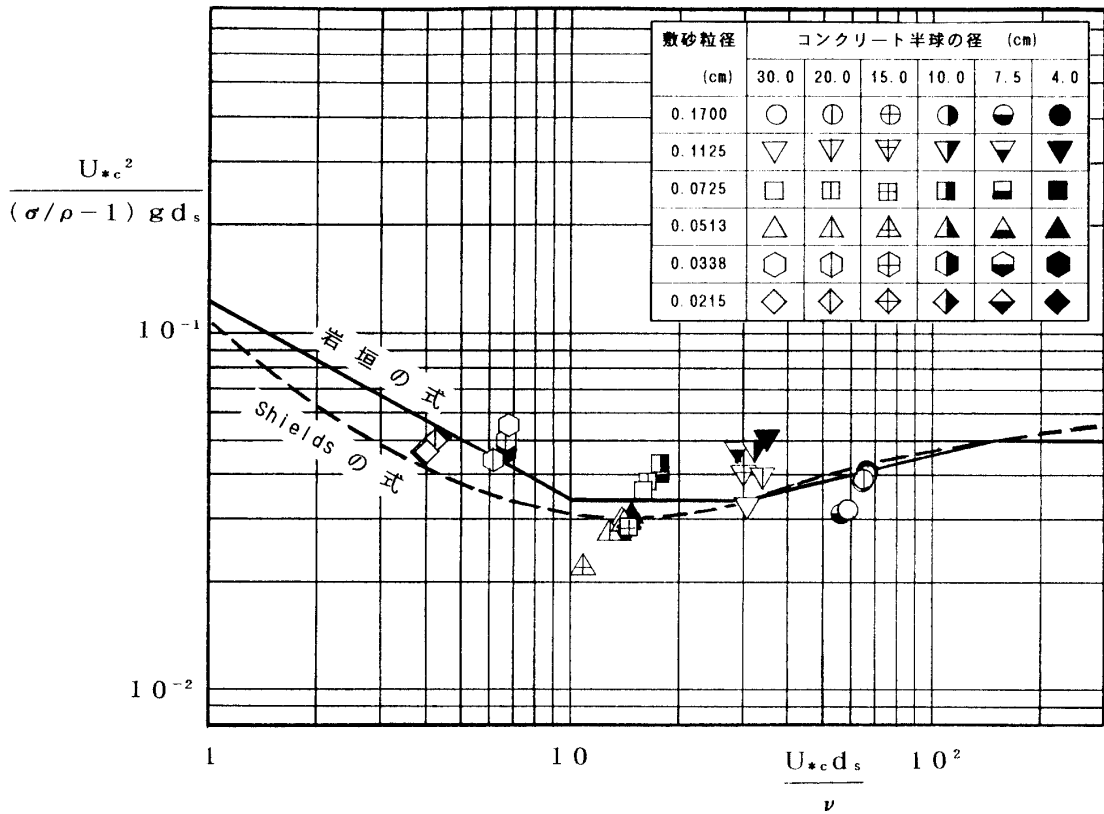


図7. コンクリート半球ブロック内の流れを真の流れとするとときの限界掃流力—斉移動の場合—

5. 結 言

防波堤や護岸の捨石基礎の設計に適用できる抵抗係数を求めることができた。一方、捨石基礎内の流れに対する底床の安定については、捨石基礎もコンクリート半球ブロック基礎ともに、単純立方型の充填として整理したが、Shieldsおよび岩垣の限界掃流力の比較において、捨石基礎の場合はかなり大きな値となったのに対し、コンクリート半球ブロック基礎の場合はほぼ一致した。この理論と実験結果の一致は、捨石基礎の今後の研究に良い示唆を与えたものといえる。

参 考 文 献

- 1) B.Le Méhauté : Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp. 903 ~ 919, Décembre 1957.
- 2) 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
- 3) 松並仁茂・石梅 尚：捨石基礎内の流れに体する底床の安定に関する実験的研究（その一），福井工業大学研究紀要 第26号（第一部），pp.173 ~ 180, 1996.
- 4) 松並仁茂：捨石基礎内の流れに体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（第一部），pp.183 ~ 190, 1998.
- 5) 松並仁茂：コンクリート半球ブロック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29号（第一部），pp.209 ~ 216, 1999.
- 6) 松並仁茂：コンクリート半球ブロック基礎の抵抗係数に関する実験的研究（その二），—真球ブロック基礎の抵抗係数—，福井工業大学研究紀要 第30号（第一部），pp.247 ~ 254, 2000.

(平成12年10月18日受理)