

## 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の実用化 －

松 並 仁 茂\*

### Experimental Study on the Resistance Coefficient for the Flow into Foundation of Hemispherical Concrete Blocks(No.2) － Practical Use of the Resistance Coefficient of Spherical Concrete Blocks－

Hitoshige Matsunami

The author repeated experimental studies on resistance coefficient and stability of sea-bed for the flow into rubble mound of breakwater. Causing scale of experimental facility was small, however the experimental results remained some indistinct parts. It was insufficient for practical use. Therefore, the foundation was made by means of filling method of simple cubic type with hemispherical concrete blocks instead of rubble mound with natural stones. First, the author tried the experimental consideration on the flow into the foundation of hemispherical concrete blocks, and got the resistance coefficient.

Furthermore, in this study the resistance coefficient by the hemispherical blocks is applied for spherical concrete blocks.

#### 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。そして、やがては、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みられる件数は21%にもおよぶと報告<sup>1)</sup>されており、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。ただ、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、大掛かりな実験を行ったことがある。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があり、最近では、明石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によって報告されており、さらに、鈴木らによ

---

\* 建設工学科 土木工学専攻

て、多層捨石工の設計法が報告されている。しかし、これらの研究<sup>1)</sup>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はない。

そこでここでは、海底地盤の底床土砂の安定度の検討が広く一般的に行えるよう研究を行うことにした。捨石を自然石とするこれらの実験的研究は、1994年から1997年までに一通りの実験を行い、報告も終えている。しかし、これらの研究は実験施設の規模などにより不明確な諸点を残しており、そのまま実用に供するには十分とはいえない。そこで、実験範囲の拡大を計るうえで、自然石からなる捨石基礎に代えて、コンクリート半球ブロックによる単純立方型充填方式の基礎マウンドを作成し、この基礎内の流れに対する実験的研究を行うことにした。

本論文は、コンクリート半球ブロック基礎内の流れに対する抵抗係数について、追加実験の結果を含めて、総合的に取りまとめるとともに、さらに、これらの研究結果をコンクリート真球ブロック基礎の抵抗係数に応用したことについても述べている。

## 2. 捨石基礎内の流れに対する抵抗係数

実際の防波堤や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。これまで行われてきた捨石基礎内の流れに対する研究としては、B.Le Méhauté の論文<sup>2)</sup>があるが、その中に報告されている Dauphin 水理実験所での M.Cohen de Lara の実験結果も注目される。すなわち、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  $\zeta$  は乱れの程度と間隙率  $n$  の関数であるとしている。

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

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

ここに、 $\Delta H$  : 損失水頭(cm),  $\Delta S$  : 流路長(cm),  $\nu$  : 動粘性係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )である。

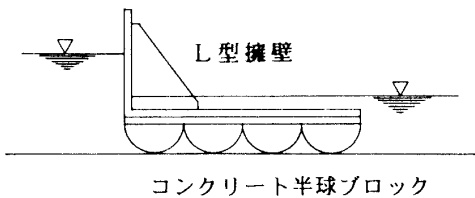
Lara の実験は、径20cmの捨石によって行われたが、その際、式(2)の間隙率に関する式を  $f(n) = n^m$  とおき、 $m = -5$  として、 $C(Re)$  を図に示している。すなわち、係数  $C$  は  $Re < 10$  ではレイノルズ数とほぼ反比例の関係にあるが、 $Re > 10^4$  では  $C \approx 0.3 = \text{一定}$  となっている。この実験の詳細についての記述がないので、更なる検討を加えることはできない。

運輸省が行った実験は  $20 < Re < 10^4$  の範囲にわたって行われたが、係数  $C$  については傾向としてはよく似た結果を示しているが、詳細にはかなりな相違があることが認められた<sup>3)</sup>。

われわれもこれらの関係を確認するため、捨石基礎内の流れに対する抵抗係数の実験を行ったが、その実験結果が Lara の結果とほぼ一致することが確かめられた<sup>3)</sup>。しかし、限られた実験施設での自然石による実験範囲は、せいぜい  $50 < Re < 4000$  の極めて小さくせまい範囲であり、レイノルズ数のさらに大きい範囲の確認が必要とされた。

### 3. コンクリート半球ブロック基礎の抵抗係数の実験とその結果

捨石基礎内の流れに対する実験範囲の拡大のため、コンクリート半球ブロック基礎実験を行うことにした。この基礎の抵抗係数を求める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。実験装置の概要は図－1と表－1に示すが，前回の研究報告<sup>1)</sup>において詳細に述べた。



図－1 実験装置の概要

表－1 コンクリート半球ブロックの抵抗係数実験とシンボルマーク

コンクリート半球の径 (cm)		30.0	20.0	15.0	10.0	7.5	4.0
抵抗係数実験 (底床砂なし)	初回実験	○	①	⊕	◐	◑	●
	追加実験	◇	---	⊞	---	---	◆
底床砂の安定実験		○	○	○	●	●	●

#### 1) コンクリート半球ブロック基礎内の流れを浸透流として取扱う場合

コンクリート半球ブロック基礎内の流れを浸透流として取扱う場合の抵抗係数の実験結果を図－2に示した。これらの実験は，表－1に示すように，抵抗係数のみを対象とする初回の実験に加えて，確認のための追加実験と，さらに，同時に行った底床砂の安定実験でも求められる抵抗係数の結果も合わせて示した。実験の範囲は  $500 < Re < 50,000$  と捨石基礎の場合より大幅に拡大された。まず， $Re > 10000$  においては抵抗係数の値は9～15にまとまって分散しているが， $Re < 8000$  においては抵抗係数の分散が大きく，実験の難しさが確認された。次に，抵抗係数は半球ブロックの直径が大きいものほど大きく，ブロック直径の大きさの順に，かなり明確に分布していることが分かった。また，抵抗係数の全体的な値は捨石基礎の場合の0.3程度と小さく，かなりの違いがあることが示されたが，その主な理由としては捨石とコンクリート半球ブロックの充填の違いと間隙率の違いによるものと考えられ，検討の必要があると思われた。

一方，われわれの実験結果とLaraの係数Cとを比較したものが図－3であるが，Laraの係数Cは実験値の最小値を通るものとなっており， $8,000 < Re < 50,000$  の範囲では，われわれの実験値はLaraの曲線より30～50%大きいことが分かる。また，Laraが提案した  $f(n) = n^m$  において， $m = -5$  とすることの妥当性を本実験でも確かめることができた。

#### 2) コンクリート半球ブロック基礎内の流れを真の流れとして取扱う場合

管路のような密閉された流れや開水路の流れにおいて，しばしば径深を用いることがある。径深は管路や開水路の壁面の摩擦の影響を示すものとして知られているが，防波堤の基礎内の流れは閉じられた流れであるので，この基礎の捨石とかコンクリートブロックなどの摩擦の効果もこの径深を用いて評価することは十分意義のあることと考える。このような考え方に基づく捨石基礎の流れについては，基礎内の流れを真の流れとして扱う場合として，すでに報告<sup>1)</sup>した。

土質工学ハンドブックによれば，土の間隙中の流れについて「単位流路長において，土の間隙の体積を土粒子の表面積で除したものを動水半径（径深に相当する）とする。」<sup>4)</sup>としている。

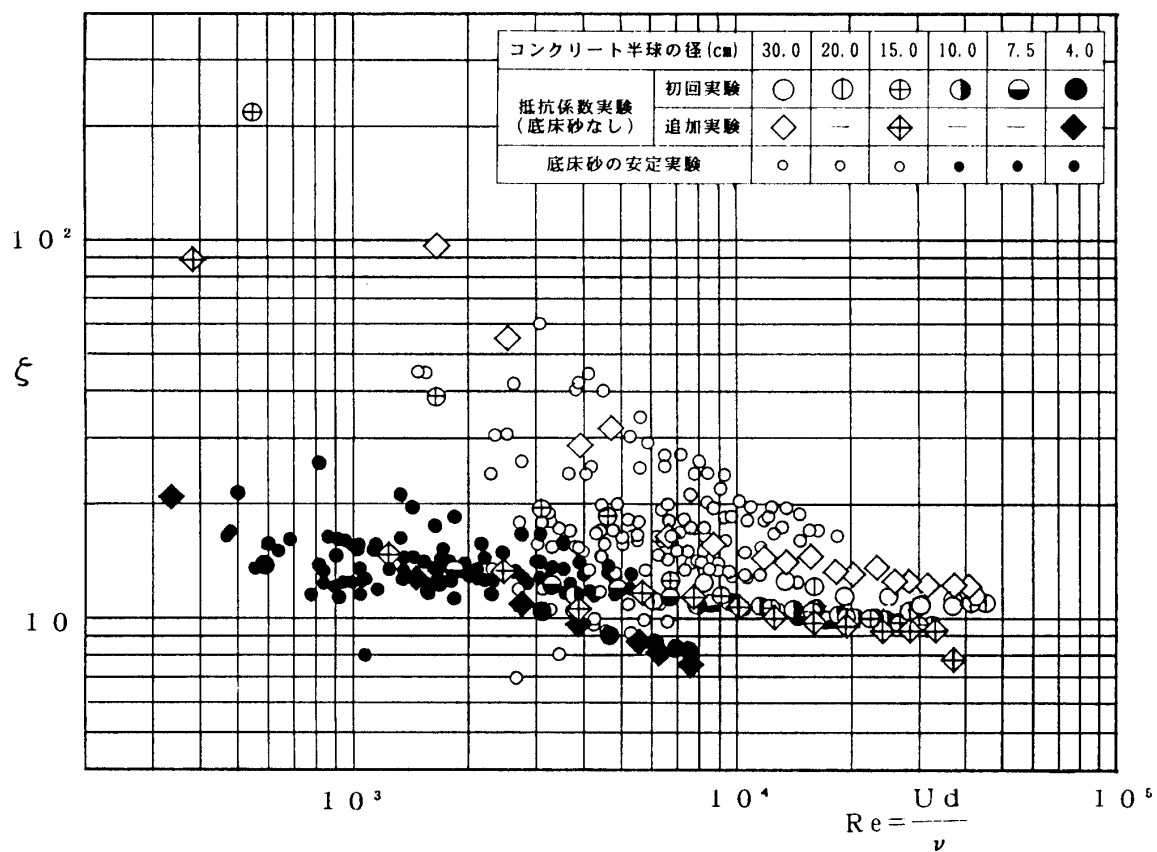


図-2 コンクリート半球ブロック基礎の抵抗係数  $\xi$

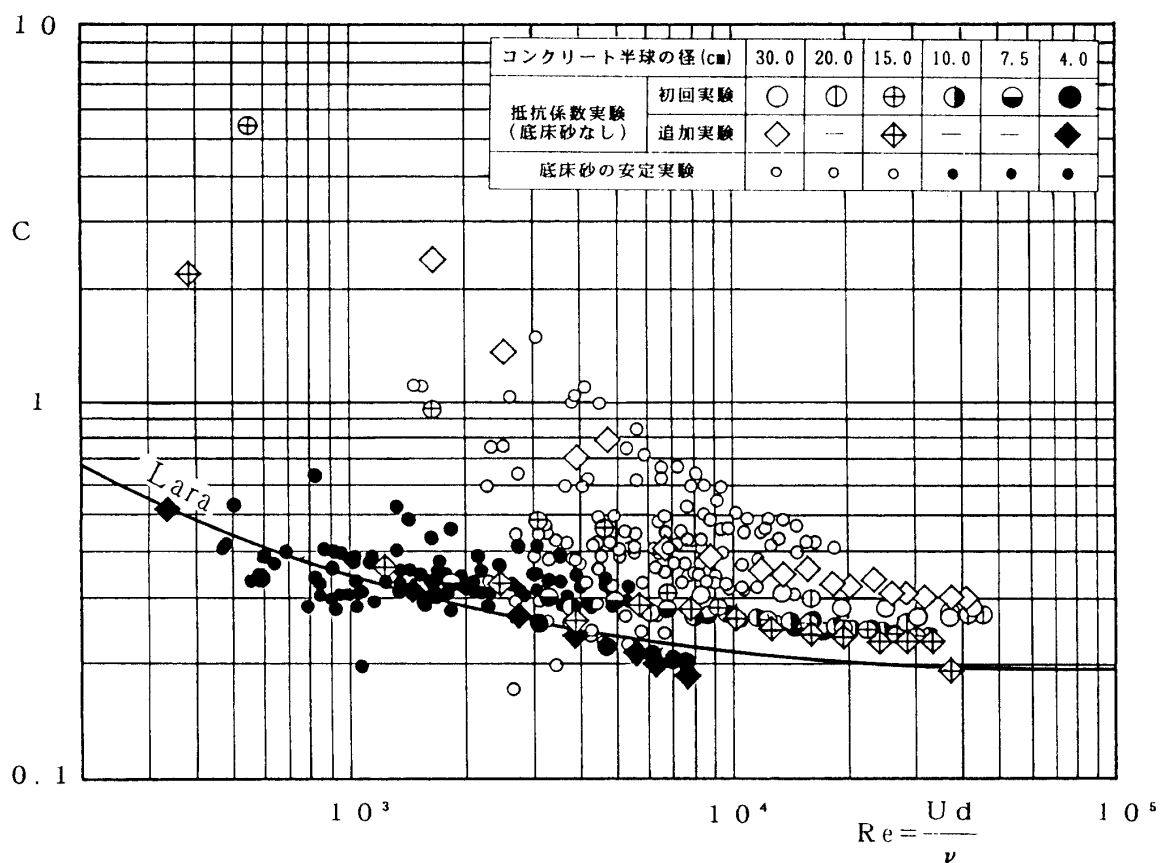


図-3 コンクリート半球ブロック基礎の Lara の係数 C

**a) 捨石透水体が球体により単純立方型に充填されている場合**

捨石透水体が球体により単純立方型に充填されている場合について次のように考える。

(1) 捨石透水体の粒子は均一な球形流径 ( $d$ ) 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多様であり、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、さらに適切な補正係数  $\alpha$  を考えて、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  $n = 1 - \pi/6$  である。

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

透水体の流れをこのような動水半径をもつ管水路の集合体の流れと考え、間隙を流れる真の平均流速を  $v_a = U/n$  として、これらを用いて損失勾配の関係式を示すと次のようになる。

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

ここに、 $\zeta_0$ : 動水半径  $R_0$  をもつ仮想の管水路の抵抗係数、 $d_0$ : 仮想の管水路の直径

式 (1) と式 (3) および式 (4) から、抵抗係数  $\zeta_0$  とそれに対するレイノルズ数  $Re_0$  を求めると、次のようになる。

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

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

**b) コンクリート半球ブロックが一層の正方形に配置されている場合**

われわれの実験はコンクリート半球ブロックを木板に正方形に一層に配置したものを基礎工として用いている。このような基礎工が矩形の水路に設置された場合について、上述の算定法を取入れると、おのおの、次のように表わすことができる。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta_{0h} \frac{v_a^2}{2gd_{0h}} = \zeta_{0h} \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_{0h}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$R_h = \frac{\alpha (2 - \pi/3) N}{4 + (8 + \pi) N} \cdot d, \quad d_h = 4R_h \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\zeta_{0h} = \frac{4\alpha (2 - \pi/3) N}{4 + (8 + \pi) N} \cdot n^2 \zeta = F(Re_{0h}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$Re_{0h} = \frac{v_a \cdot d_h}{\nu} = \frac{4\alpha (2 - \pi/3) N}{4 + (8 + \pi) N \cdot n} \cdot Re \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $R_h$ ,  $\zeta_{0h}$ ,  $Re_{0h}$ : コンクリート半球ブロック基礎の動水半径と抵抗係数およびレイノルズ数、 $N$ : コンクリート半球ブロックの横並び個数、間隙率は  $n = 1 - \pi/6$  である。

実験の結果はこれらの3式において、 $\alpha = 1$  として取りまとめ図-4に示したが、これが同一の実験による図-2に示されている結果より、分散の度合いが少なく、まとまりがよいことが分かる。すなわち、透水体としての真の流れにおいて、動水半径を用いて整理した方が、実験の状況をより一層十分に説明しているといえることができる。

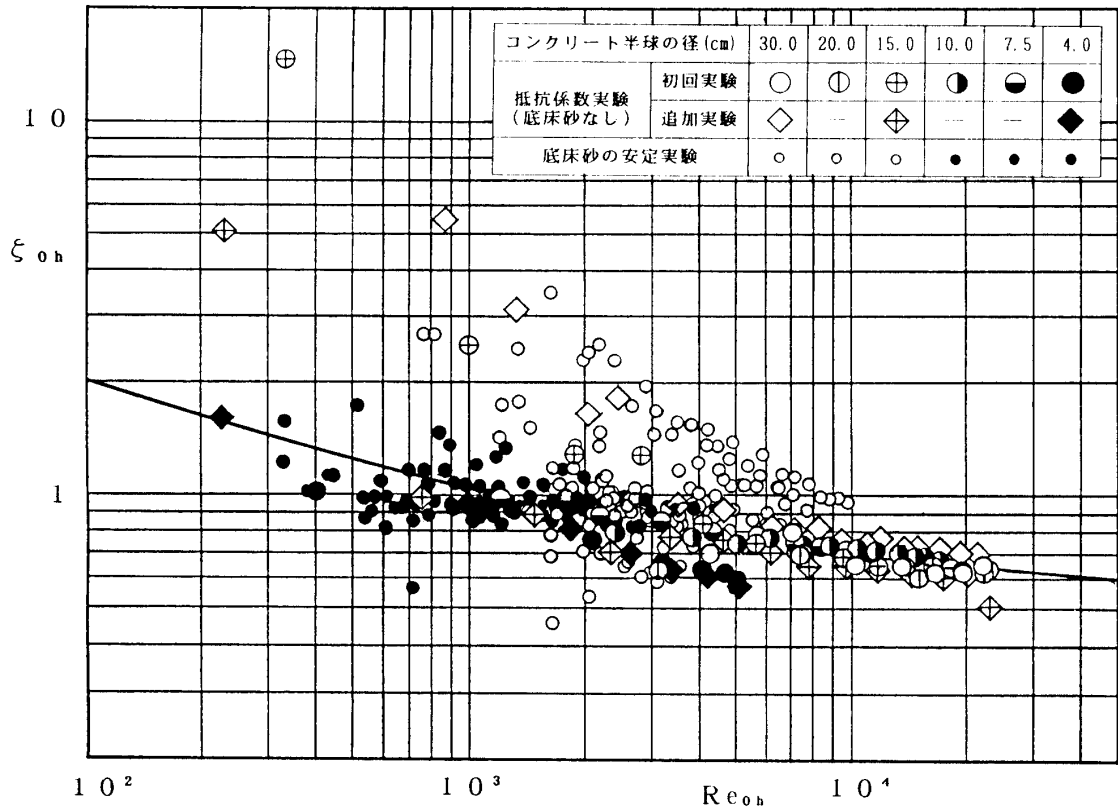


図-4 真の流れにおけるコンクリート半球ブロック基礎の抵抗係数  $\zeta_{oh}$

なお、図中の曲線は実験値の代表値であり、これを数式で表わすと、例えば、次のようになる。

$$\zeta_{oh} = \frac{10}{Re_{oh}^{0.4}} + 0.45 \quad \dots\dots\dots (11)$$

#### 4. コンクリート真球ブロック基礎の抵抗係数

##### a) コンクリート真球ブロックが単純立方型に充填されている場合

コンクリート真球ブロック基礎の抵抗係数について、半球ブロックの場合と同様に求めると、式(12)と式(13)をえるが、さらに、これらの式から式(14)をえる。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta_{os} \frac{U_a^2}{2gd_{os}} = \zeta_{os} \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_{os}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$R_s = \frac{\alpha \cdot n \cdot m}{(2+m\pi)} \cdot d = \frac{\alpha (1-\pi/6) m}{(2+m\pi)} \cdot d = K_s \cdot d, \quad d_s = 4R_s \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta_{os} \frac{(2+m\pi)}{4\alpha n^3 \cdot m} \cdot \frac{U^2}{2gd} = \zeta_{os} \frac{(2+m\pi)}{4\alpha (1-\pi/6)^3 m} \cdot \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $m$ ：真球ブロックの層数である。これらの3式の各記号の意味はこれまで述べてきたものと同様であるが、ここでは、真球を表わすために、いずれの記号の添字にも $s$ を付けた。式(13)の係数 $K_s$ の特性を $\alpha = 1$ の場合について図-5に示すが、ブロックの層数の増加にともなって急激に極限の0.1516に収斂することが分かる。また、層数をパラメータとしたときの動水半径 $R_s$ と球径 $d$ の関係も示した。

#### b) コンクリート真球ブロック基礎が一層の正方形に配置されている場合

コンクリート真球ブロック基礎が一層の正方形に配置されている場合について、動水半径を求めると式(15)のようになるが、これはまた、式(16)に示すように、半球ブロックの場合の動水半径の1.472倍になることが分かる。

$$R_s = \frac{\alpha \cdot n}{(2+\pi)} \cdot d = \frac{\alpha (1-\pi/6)}{(2+\pi)} \cdot d = K_s \cdot d, \quad d_s = 4R_s \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{R_s}{R_h} = \frac{d_s}{d_h} = \frac{(1-\pi/6)}{(2-\pi/3)} \cdot \frac{(12+\pi)}{(2+\pi)} = 1.472 \quad \dots\dots\dots(16)$$

真球ブロック基礎が一層の正方形配置の場合の抵抗係数は次式により求めることができる。

$$\left( \frac{\Delta H}{\Delta S} \right)_s / \left( \frac{\Delta H}{\Delta S} \right)_h = \frac{i_s}{i_h} = \frac{\zeta_{0s}}{\zeta_{0h}} \cdot \frac{U_s^2}{U_h^2} \cdot \frac{d_s}{d_h} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここで、上式の比率は1に近いものと考えると、平均流速がシェージー式に則るとする場合の抵抗係数の比率は1.000となるのに対して、マンニング式の場合の比率は1.138となる。ここでは、実験の精度などから、1.000として取扱うものとする。以上により、コンクリート真球ブロック基礎が一層の正方形に配置されている場合の抵抗係数の関係は式(18)(図-6)のようになる。

$$\zeta_{0s} = \frac{11.67}{Re_{0s}^{0.4}} + 0.45 \quad \dots\dots\dots(18)$$

#### c) コンクリート真球ブロック基礎が多層の場合

コンクリート真球ブロック基礎が単純立方型の場合について、一層と多層の場合の抵抗係数の関係を式(11)から求めると、次式のようになるが、これらの関係を示したのが図-7である。

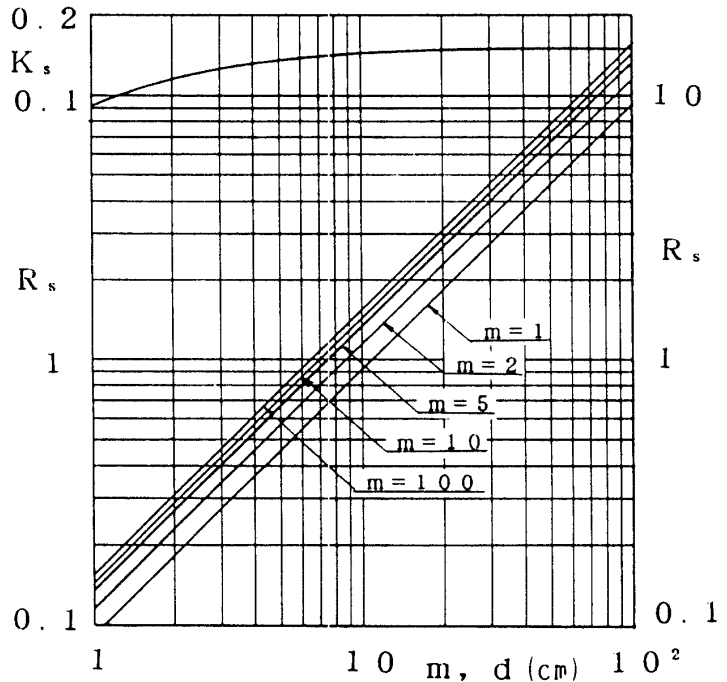


図-5 真球ブロックの動水半径の係数 $K_s$ とブロック層数 $m$ 、および、動水半径 $R_s$ と真球ブロックの直径 $d$

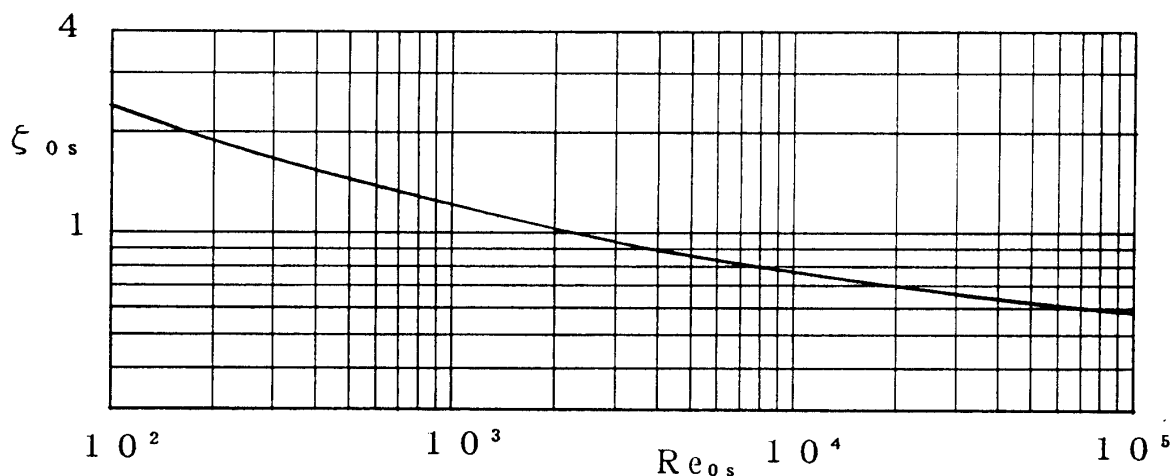


図-6 真の流れにおけるコンクリート真球ブロック基礎の抵抗係数  $\zeta_{0s}$

$$\frac{\zeta_{0s}}{\zeta_{0s1}} = \frac{(2+m\pi)}{m(2+\pi)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

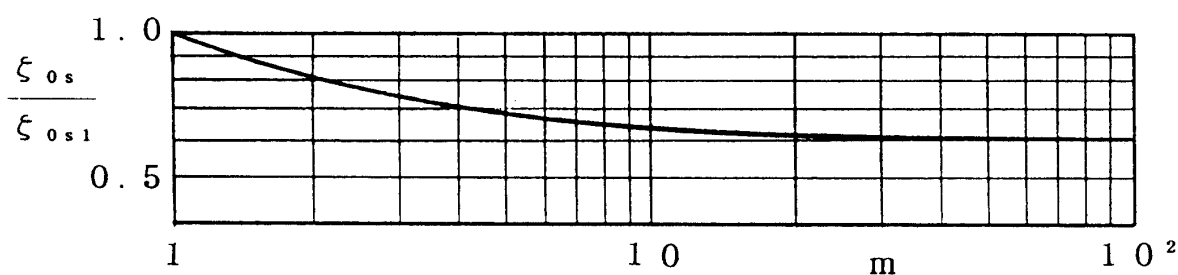


図-7 一層と多層の抵抗係数比

## 5. 結 語

本論文では、コンクリート半球ブロック基礎内の流れに対する抵抗係数について、追加実験の結果を含めて、総合的に取りまとめた。さらに、これらの研究結果をコンクリート真球ブロック基礎の抵抗係数に応用したことについても述べた。今後に残された課題は、一般に用いられている捨石基礎の普遍的な抵抗係数を求めることである。

## 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) B. Le Méhauté：Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp. 903～919, Décembre 1957.
- 3) 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
- 4) 土質工学会：土質工学ハンドブック（1982年版），土質工学会，pp. 66～69，1982.

（平成11年10月21日受理）