

# 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

松 並 仁 茂\*

## Experimental Study on the Resistance Coefficient for the Flow into Foundation of Hemispherical Concrete Blocks

Hitoshige Matsunami

When wind waves, storm surge and tsunami strike breakwaters or revetments, the flow into rubble mound decreases some functions of them. Furthermore, the breakwaters or revetments are thought to be destroyed by this flow. However, on this important subject any investigations had not been presented for the designing of rubble mound.

So we took up the study of the stability of seabed for the flow into rubble mound. Until now, we have repeated experimental studies on the stability of resistance coefficient and seabed for the flow into rubble mound. However, causing scale of experimental facility was small, the result of experiments remained some indistinct parts. It was not sufficient to put it practical use. Therefore, we made the foundation filled up simple cubic type with hemispherical concrete blocks instead of rubble mound with natural stones.

In the first we tried the experimental consideration on the flow into foundation of hemispherical concrete blocks.

### 1. はじめに

港湾を波浪から防護するために設置されている防波堤や海岸護岸に波が作用すると、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、効果を減少させるということでも重要である。また、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、これがその上部にある捨石基礎を沈下させ、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、海底地盤に関連した被災も少なくない。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

---

\* 建設工学科 土木工学専攻

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<sup>2,3)</sup>を行ったことがある。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護岸の海底地盤の底床の安定度の検討に適用するには無理があるといえる<sup>4)</sup>。

富永<sup>5)</sup>らは、海岸堤防の捨石根固め工の安定についての実験的研究を行った。また、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<sup>6)</sup>によって報告されている。さらに、鈴木ら<sup>7)</sup>によって、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に研究することにした。捨石を自然石とするこれらの実験的研究は、1994年より行ない1997年までに一通りの研究を行い、それらの成果についてはすでに報告<sup>8,9,10,11)</sup>も終えている。しかし、これらの研究の成果は実験施設の規模などにより不明な諸点が残されており、そのまま実用に供するには十分とはいえない状況にある。そこで、実験範囲の拡大を計るうえから、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の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。ここでは、これらの基礎的な研究の最初の課題である捨石基礎内の流れに対する抵抗係数についての研究成果を報告する。

## 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においては、レイノルズ数の極めて大きい乱流領域が対象となるのであるが、これまでの研究成果を参考にして、まずは、その基本的研究として捨石基礎内の流れの確認から始めなければならないものとする。

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>12)</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 の実験結果が特に注目される。すなわち、損失勾配  $\Delta H / \Delta S = i$  と捨石基礎内の平均流速  $U(\text{cm/s})$  の関係は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。

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

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

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、 $C(R_e)$ を図に示している。すなわち、係数 $C$ は $R_e < 10^4$ ではレイノルズ数とほぼ反比例の関係にあるが、 $R_e > 10^4$ では $C \approx 0.3 = \text{一定}$ となっている。

運輸省が行った実験は $20 < R_e < 10^4$ 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>9)</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、われわれの実験結果がLaraの結果とほぼ一致することが確かめられた<sup>9)</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 $50 < R_e < 4000$ 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結果と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

コンクリート半球ブロック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、この一連の実験のために作ったコンクリート製の半球ブロックは、直径30, 20, 15, 10, 7, 5, 4cmの6種類であり、長さ60cm、幅30cm、厚さ1.4cmの木板に木ねじと合成ゴム系接着剤により密着結合した。コンクリート半球の製作は、まず、油粘土で半球の原形を作り、これにソフラン系のプラスチックの合成液を注ぎ込み半球の外型枠を作った。この外型枠の中にコンクリートモルタルを打ち込み、脱型、養生を経て、表面仕上げを行った。ここでは、コンクリートのひび割れを防ぐため、針金ネットを張り巡らした。また、半球ブロックの軽量化と木板への取り付けを完全容易に行うため、木材片を適宜使用したが、さらに、これとコンクリートとの一体化を図るために針金ネットとも緊結した。コンクリート半球ブロックはいずれも板厚1.4cmの南洋材の板に正方形配置に固定した。それゆえ、充填方法としては単純立方型と呼ばれるものとなった。

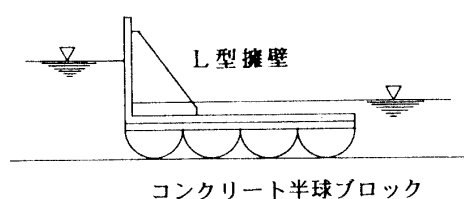


図-1 実験装置の概要

表-1 コンクリート半球ブロック

コンクリート半球の径	(cm)	30.0	20.0	15.0	10.0	7.5	4.0
半球の横並び個数	個	1	1	2	3	4	7
水路幅	(cm)	30.0	20.0	30.0	30.0	30.0	28.0
半球の縦並び個数	個	2	3	4	6	8	15

この特製のコンクリート半球ブロック板の上に木製の流路長60cmのL型擁壁を置いて実験を行うことにした。この実験施設は既存の水路を用いたものであるもので、本研究の最終的であるこの研究成果をそのまま実用に供するには、施設規模としては小型に過ぎる。しかし、捨石基礎内流れの特徴を土木工学的に把握するには、かなりの成果が期待できるものと考えている。

#### 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は、図-2に示した。実験の範囲は $500 < R_e < 50,000$ と捨石基礎の場合より大幅に拡大された。しかし、抵抗係数の値は捨石基礎の場合の0.3程度であり、かなりの違いがあることが分かった。そ

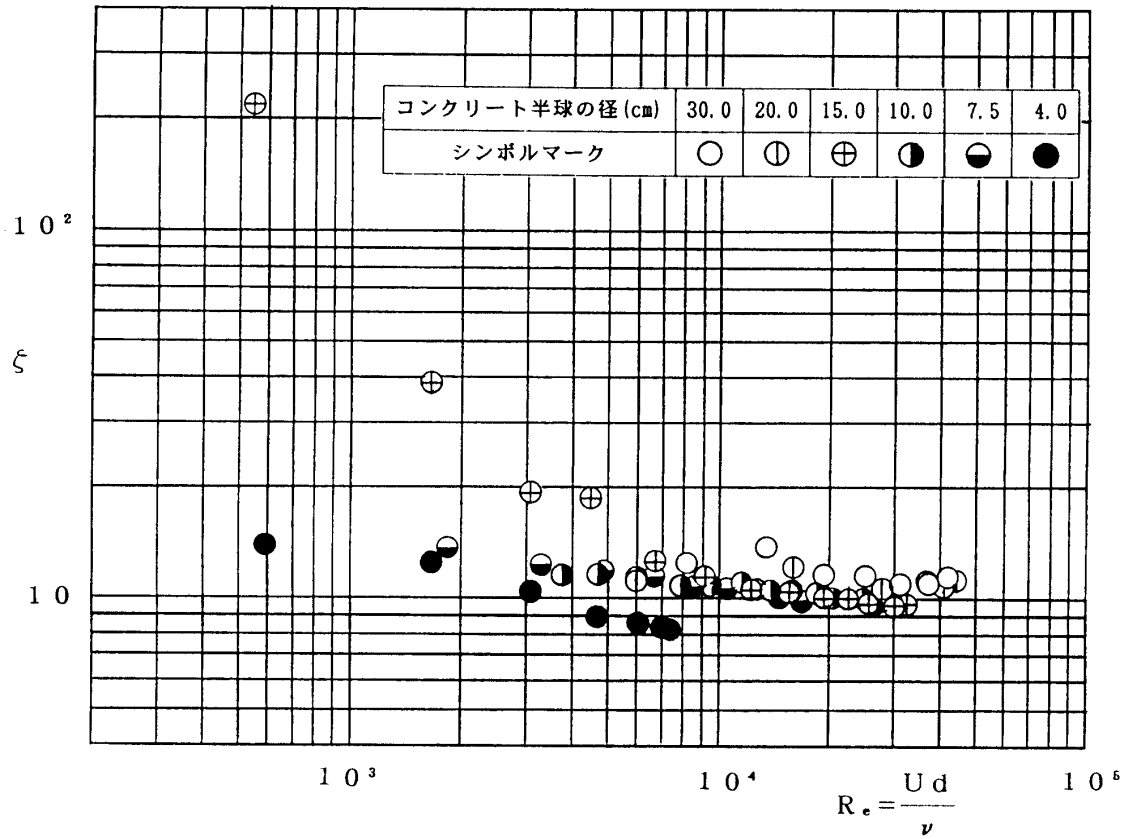


図-2 コンクリート半球ブロック基礎の抵抗係数と

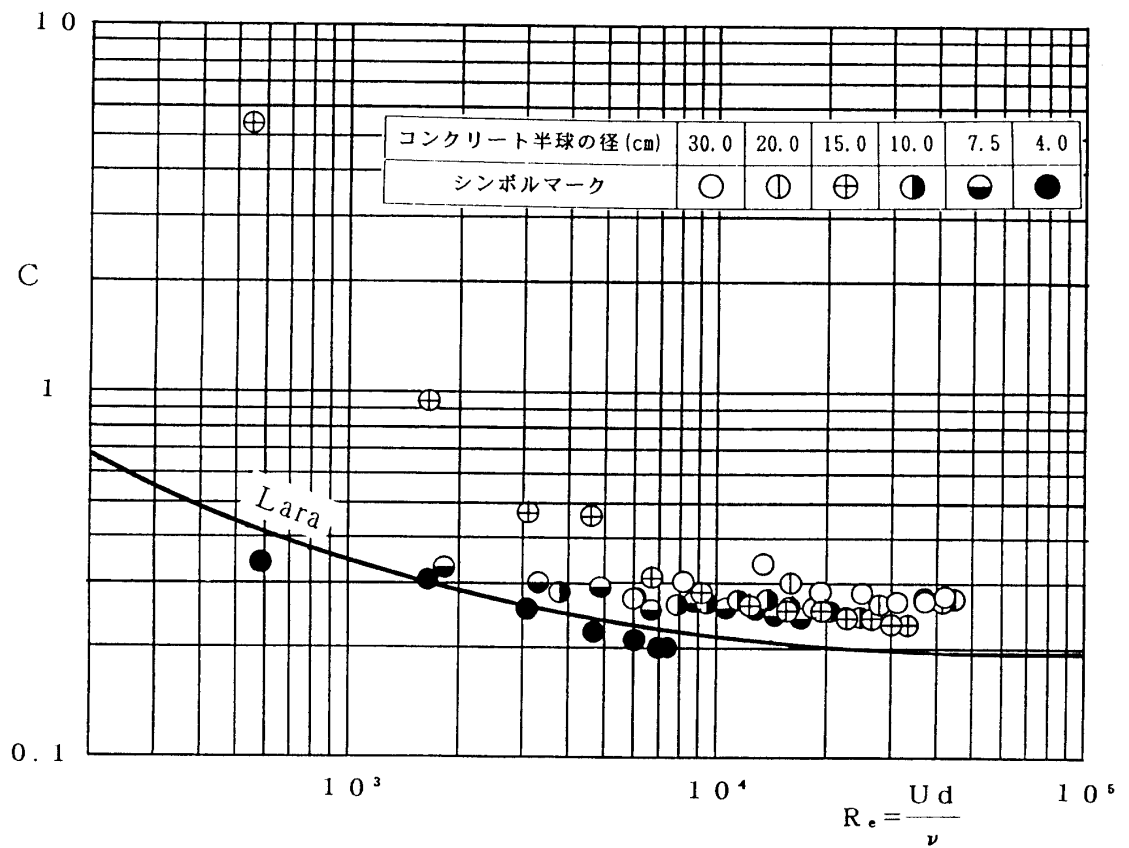


図-3 コンクリート半球ブロック基礎の Lara の係数 C

の主な理由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思われる。

これらの実験結果と Lara の係数  $C$  と比較したものが図-3 であるが、一致しているとはいえないが、よく似た結果となっているといえる。まとまりのある  $8,000 < R_0 < 50,000$  の範囲では、われわれの実験値は Lara のそれより 20~30% 大きいことが分かる。また、Lara の提案した  $f(n) = n^m$  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、流れの中にある捨石とかコンクリートブロックなどの摩擦の効果もこれに加え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>11)</sup>したが、今回のコンクリート半球ブロックの実験においても同様に用いることにした。

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>13)</sup>としている。

### 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、解析のため次のように考える。

(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わすことにした。

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

$$d_0 = 4R_0$$

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  $U_a = U/n$  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。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta_0 \frac{U_a^2}{2gd_0} = \zeta_0 \frac{1}{n^2} \cdot \frac{U^2}{2gd_0} = F(R_0) \dots\dots\dots (4)$$

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であり  $d_0 = 4R_0$  の関係がある。

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  $R_{e0}$  を求めると、次のようになる。

$$\zeta_0 = \frac{d_0}{d} \cdot n^2 \cdot \zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha \cdot n^3}{(1-n)} \zeta = F(R_{e0}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$R_{e0} = \frac{U_a \cdot d_0}{\nu} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{(1-n)} \cdot \frac{Ud}{\nu} \quad \dots\dots\dots(6)$$

#### 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。

$$R_h = \frac{\alpha(2-\pi/3)}{4/N+(8+\pi)} \cdot d \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$d_h = 4R_h$$

$$\zeta_{0h} = \frac{4\alpha(2-\pi/3)N}{4+(8+\pi)N} \cdot n^2 \zeta = F(R_{e0h}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$R_{e0h} = \frac{4\alpha(2-\pi/3)N}{4+(8+\pi)N \cdot n} \cdot R_e \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $R_h$ 、 $\zeta_{0h}$ 、 $R_{e0h}$ ：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、まずは、 $\alpha = 1$  として取纏め図-4に示したが、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。それは、ここでは真の流れにおいて、実験の状況をよく説明している動水半径を用いて整理した結果によるものであるからと思われる。

なお、図中の曲線はいわゆる実験値であり、これを数式で表わすと、例えば、次のようになる。

$$\zeta_{0h} = \frac{10}{R_{e0h}^{0.4}} + 0.45 \quad \dots\dots\dots(10)$$

## 4. 結 言

波や高潮・津波が防波堤や護岸に襲来するとき、捨石基礎工を通しての流れがこれらの構造物の機能を減少することがあるが、さらには、構造物を倒壊にいたらしめることもあると考えられる。しかるに、このような重要な課題について、調査・研究され設計に供されるようなことはなかった。そこで、本研究では、この課題を捨石基礎内の流れに対する底床の安定に関する研究として取り上げることにした。その最初の試みとして捨石基礎内の流れに対する実験的考察を一通り行い、それらの成果についてもすでに報告終えている。しかし、実験施設の規模などにより不明な諸点が残されており、実用に供するには十分とはいえない。実験の範囲を拡大するうえから、ここでは、コンクリート半球ブロックによる基礎マウンドを作成し、第2段階の実験的研究を行うことにした。本論文は最初の課題である抵抗係数についての研究成果の報告であるが、実験は

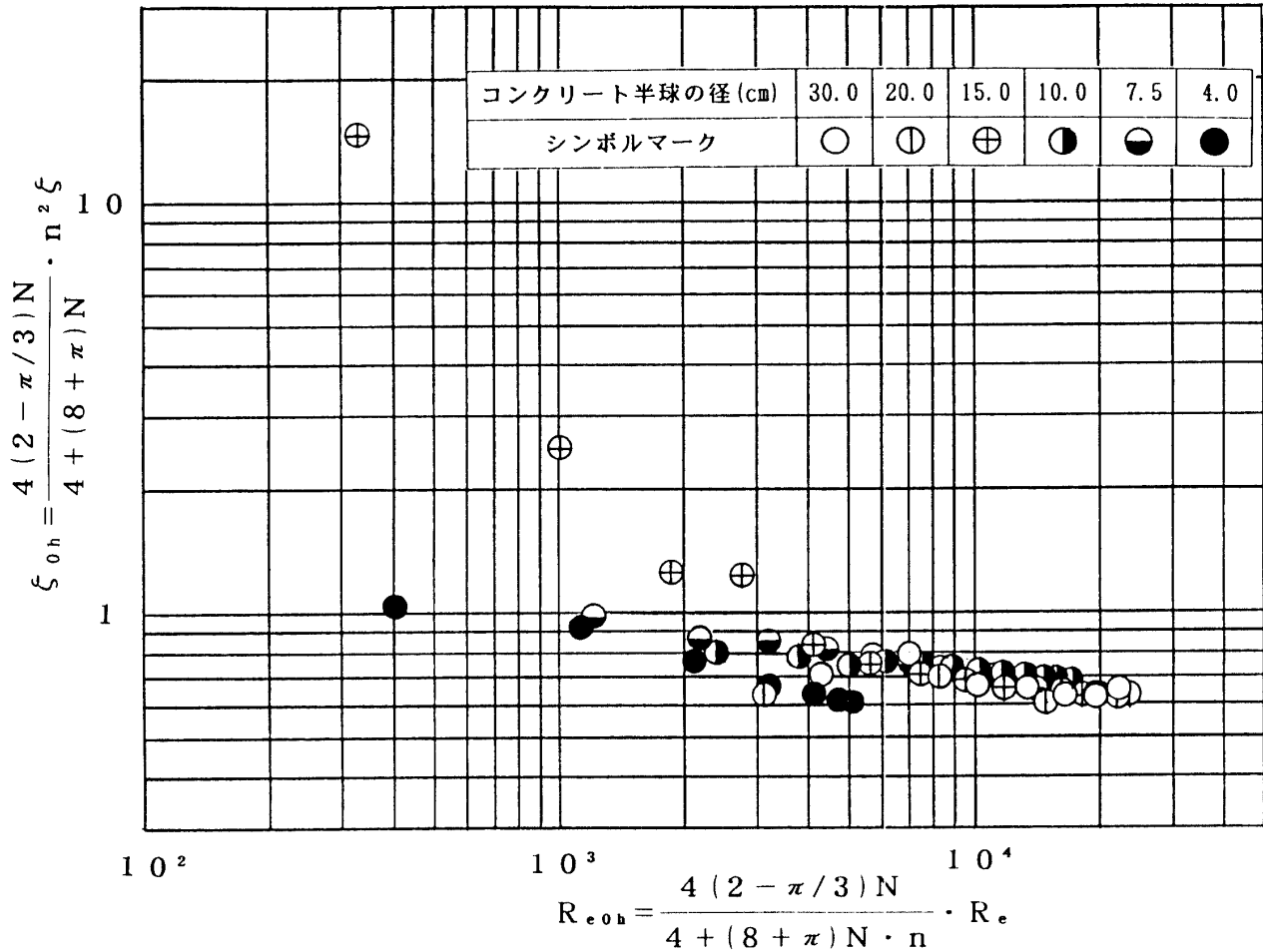


図-4 コンクリート半球ブロック基礎で真の流れの場合の抵抗係数 $\xi_{oh}$

レイノルズ数の小さい範囲では難しく、実験結果もかなりの分散が生じた。しかし、実験状況を明確に説明できる解析法を取入れることができたことは、今後の研究にかなり有効な手段となるものと期待される。

### 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 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(その一)，福井工業大学研究紀要 第26号（第一部），pp. 173～180，1996.
- 11) 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），福井工業大学研究紀要 第28号（第一部），pp. 183～190，1998.
- 12) B. Le Méhauté : Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp. 903～919, Décembre 1957.
- 13) 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10年10月22日受理）