

捨石基礎の抵抗係数に関する実験的研究

松 並 仁 茂*・右 梅 尚**

Experimental Study on the Resistance Coefficient for the Flow into Rubble Mound

Hitoshige MATSUNAMI, Hisashi MIGIUME

When wind waves, storm surge and tsunami strick breakwaters or revetments, this flow into the rubble mound decreases some functions of them. Furthermore, the breakwaters or revetments are thought to be destroyed by this flow. However on this important problem, any investigations had not been presented for the designing of the rubble mound. So we took up the study of the stability of seabed for the flow into the rubble mound.

In the first we tried the experimental consideration on the flow into the rubble mound. Our result of the experiment was compared with the ones of Lara and Ministry of Transport. And we confirmed correcter resistance coefficient.

In this study our result is within the limits of Re (Reynolds number) < 4000 to suit our experimental equipment. We wish to have the experiment of the level of $Re = 10^5$, and to offer more complete result for practical use.

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、効果を減少するということも重要である。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考えられる。

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ていない。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^{1,2)}を行ったことがある。筆者の一人もこの

*建設工学科 土木工学専攻 **元大学院生

実験的研究に担当者として参加していた。この実験は名古屋港高潮防波堤と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³⁾。

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ものである。まず、その基礎的な研究として、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

一般に、浸透性層内を流れる流れは Darcy の法則に従う。これは流れが層流の場合に限られており、レイノルズ数が大きくなり乱流になると、この法則は成り立たなくなる。例えば、応用水理学⁴⁾では、長さ ΔS 、断面 A の砂層の管路において、水頭勾配 $\Delta H/\Delta S = i$ を与えるとき、砂層を定常的に流れる流量 Q は次式で与えている。

$$Q = kAi \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 k を透水係数(cm/s)といい、土砂粒子の大きさ、形状、動粘性係数 ν などに支配される定数である。この実験法則は1856年 Darcy によって見出された。砂層内の流速 V は見かけの平均流速 Q/A で定義される(以後、単に平均流速という)。 d を土粒子の平均的直径とするときのレイノルズ数 $Re = Vd/\nu$ と抵抗係数 $\xi = 2gdi/V^2$ の実測の関係は、 $Re = 1$ 以下の層流領域では $Re \cdot \xi = \text{一定}$ であるが、それ以上になると、最終的には $\xi = \text{一定}$ に近づく。Lindquist は球について、 $Re < 4$ では $Re \cdot \xi = \text{一定}$ 、そして $Re > 4$ では次式を提案した。

$$Re \cdot \xi = a + bRe \quad \dots\dots\dots(2)$$

また、土質工学ハンドブック (1982年版)⁵⁾によると、土中の流れについては、層流領域では Darcy の法則が成立するが、乱流領域については、水頭勾配 i は流速 V のほぼ 2 乗に比例するとして、次のように表わしている。

$$i = aV + bV^m \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 a, b : 定数、 m : 1~2 の間の数

さらに、土中の流れの限界レイノルズ数については、Fancher ほかの研究者によって 1~10 の範囲にあることが明らかになったとして、一般に、レイノルズ数が 1 以下の場合に Darcy の法則が適用できると述べている。

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、先ずは、その基本的研

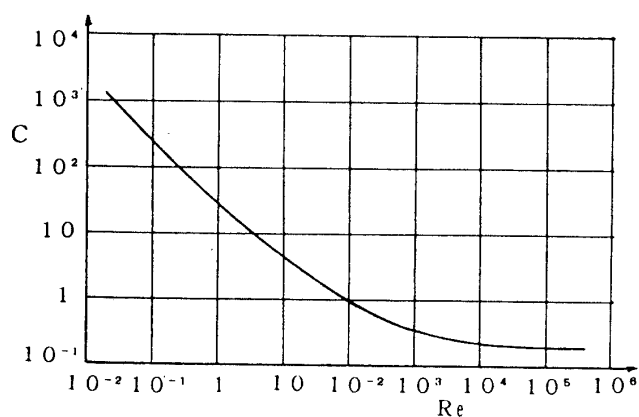


図-1 Cohen de Lara の係数 C

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⁶⁾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、水頭勾配 $\Delta H/\Delta S = i$ 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同時に、抵抗係数 ζ は乱れの程度と間隙率 n の関数であるとしている。

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\zeta = C(\text{Re}) \cdot f(n), \text{Re} = \frac{Ud}{\nu} \quad \dots\dots\dots(5)$$

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。

Lara の実験は、径 20cm の捨石によって行われたが、その際、式(5)の間隙率に関する式を $f(n) = n^m$ とおき、 $m = -5$ として、 $C(\text{Re})$ を図-1 のように示している。すなわち、係数 C は $\text{Re} < 10$ ではレイノルズ数とほぼ反比例の関係にあるが、 $\text{Re} > 10^4$ では $C \approx 0.3 = \text{一定}$ になっていることが分かる。

一方、運輸省の実験は Lara の研究を参考にして、 $20 < \text{Re} < 10^4$ の範囲にわたって行われたが、その結果を抵抗係数 ζ については図-2 に、係数 C については図-3 に示した。両者の係数 C の値については、傾向としてはいずれもよく似た結果を示しているといえるが、詳細にはかなりの相違があることが分かる。これらを同様の結果をもたらしているとして、そのまま実用に供するにはかなり無理があると考えられたので、ここでは、これらの関係を確認することを含め、捨石基礎内の流れに対する抵抗係数の実験から始めることにした。

3. 捨石基礎の抵抗係数の実験とその結果

捨石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-4 に示すが、表-1 に示すように粒径 50.8~6.7mm の礫を 7 段階にふるい分けて、長さ 30cm、層厚 10~15cm に敷き詰めた長方形の石層を作り、その上に長さ 30cm の木製の L 型擁壁をおいた。実験ケースは表-2 に示すように、L 型擁壁長すなわち流路長

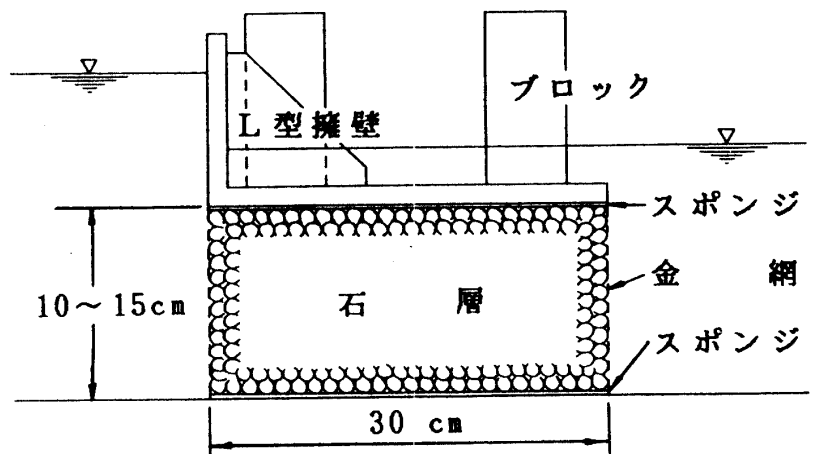


図-4 実験装置の概要

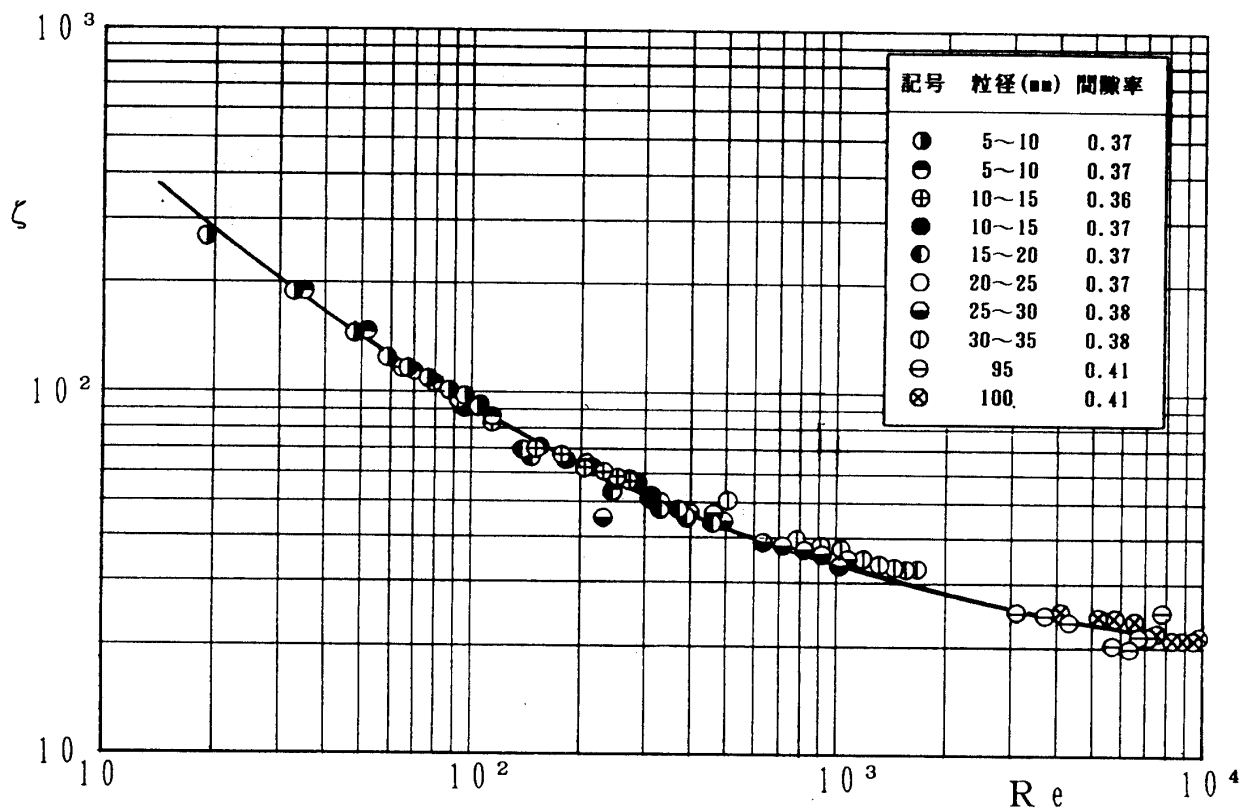


図-2 運輸省実験の抵抗係数 ζ

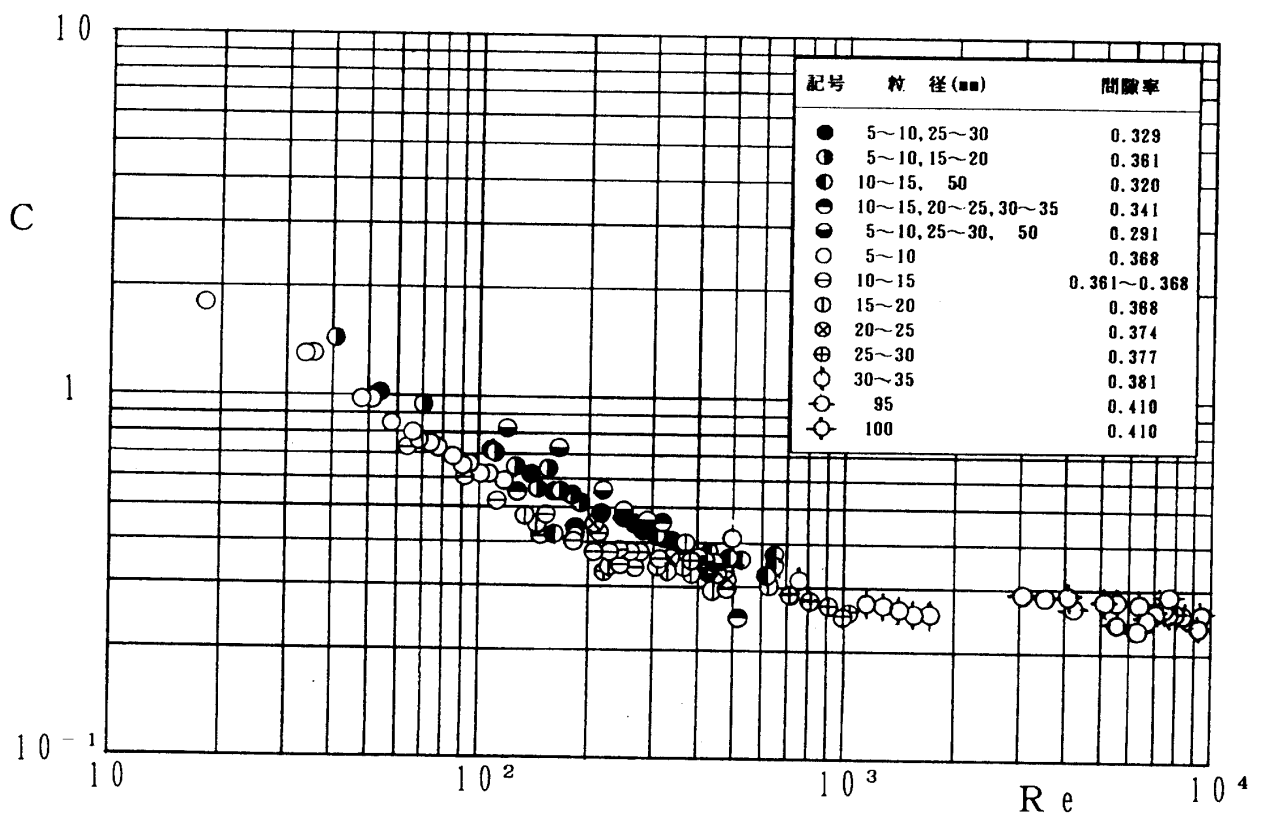


図-3 運輸省実験の係数 C

表－１ 礫のふるい分けと平均粒径

篩の開き (mm)	平均粒径 (mm)
50.8	44.5
38.1	34.9
31.7	28.6
25.4	22.3
19.1	17.5
15.9	12.7
9.5	8.1
6.7	

表－２ 実験ケース

平均粒径	流路長 (30cm)	流路長 (60cm)
4.45	2 ケース	1 ケース
3.49	1 ケース	1 ケース
2.86	1 ケース	1 ケース
2.23	2 ケース	1 ケース
1.75	2 ケース	1 ケース
1.27	1 ケース	2 ケース
0.81	2 ケース	1 ケース
計	11 ケース	8 ケース

30cm については11ケース、一方、流路長 60cm については8 ケースとした。実験の範囲は施設の規模から結果的に $60 < Re < 4000$ となった。なお、ここでは、石や礫の呼び径を、通過したふるい目の大きさと残留したふるい目の大きさを平均した値をもって平均粒径と呼ぶことにした。この実験施設は既存の水路を用いたものであるので、本研究の最終の目的、すなわち、研究成果を直接的に実用に供するには、施設規模としては小型に過ぎる。しかし、捨石基礎の流れの特徴を土木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。

これらの実験結果は、まず、図－５には流路長 30cm の場合について、さらに、図－６に流路長 60cm の場合について、おのおのの抵抗係数を各石層の平均粒径をパラメータとして、レイノルズ数との関係で示した。これらについては、運輸省の場合は下に凸の一つの曲線に集中してプロットされている。これに対し、われわれの場合はいずれの場合も各粒径ごとに一つの曲線に乗っており、全体的には同様な結果を示していることが分かる。運輸省の結果に対しては $Re = 100$ 付近においては ζ の値はほぼ等しいが、 $Re = 1000$ 辺りではわれわれの結果は運輸省の結果の約1.5倍となっており、この傾向が $Re = 10000$ 辺りにおいても変わらないように見受けられ、双方に明確な相違のあることが分かる。図－５の場合は粒径の大きさ順に分布しているのに対し⁷⁾、図－６の場合は一つの曲線に集中的に分布している。このようなことから、抵抗係数 ζ は礫の粒径だけでは分類できるものではないということが分かった。

次に、式(5)の係数 $f(n) = n^m$ について、 $m = -1 \sim -10$ において検討したが⁸⁾、Lara の報告どおり $m = -5$ をとることは、間隙率をパラメータとするうえで適切な値であることを確かめることができた。このように設定した時の係数 C を、流路長 30cm の場合を図－７に、さらに、流路長 60cm の場合を図－８に示した。これらについては、運輸省の場合は粒径や間隙率をパラメータとして分類できる状態ではなく、ただ混然と分散しているように見受けられる。これに対し、われわれの結果は、いずれの場合についても間隙率をパラメータとして、上から下へその大きさの順に分布していることが分かる。このことは間隙率 n の指数の値 $m = -5$ の妥当性がさらに確認されたことになる。さらに、係数 C の両方の図からも分かるように、Lara の結果がわれわれの結果のほぼ中央の値をとっている。これらの実験成果から、われわれの研究が事象の真実性を

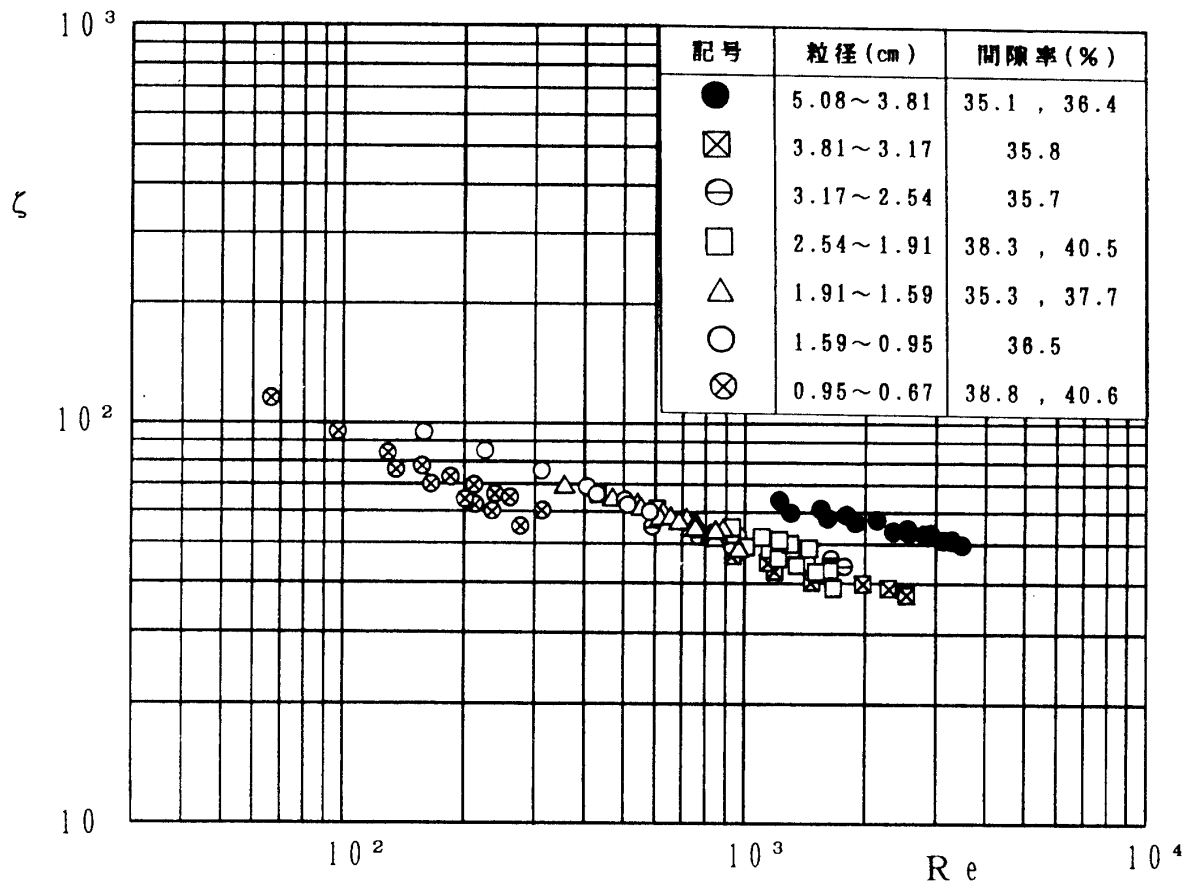


図-5 流路長 30cm のときの抵抗係数 ζ

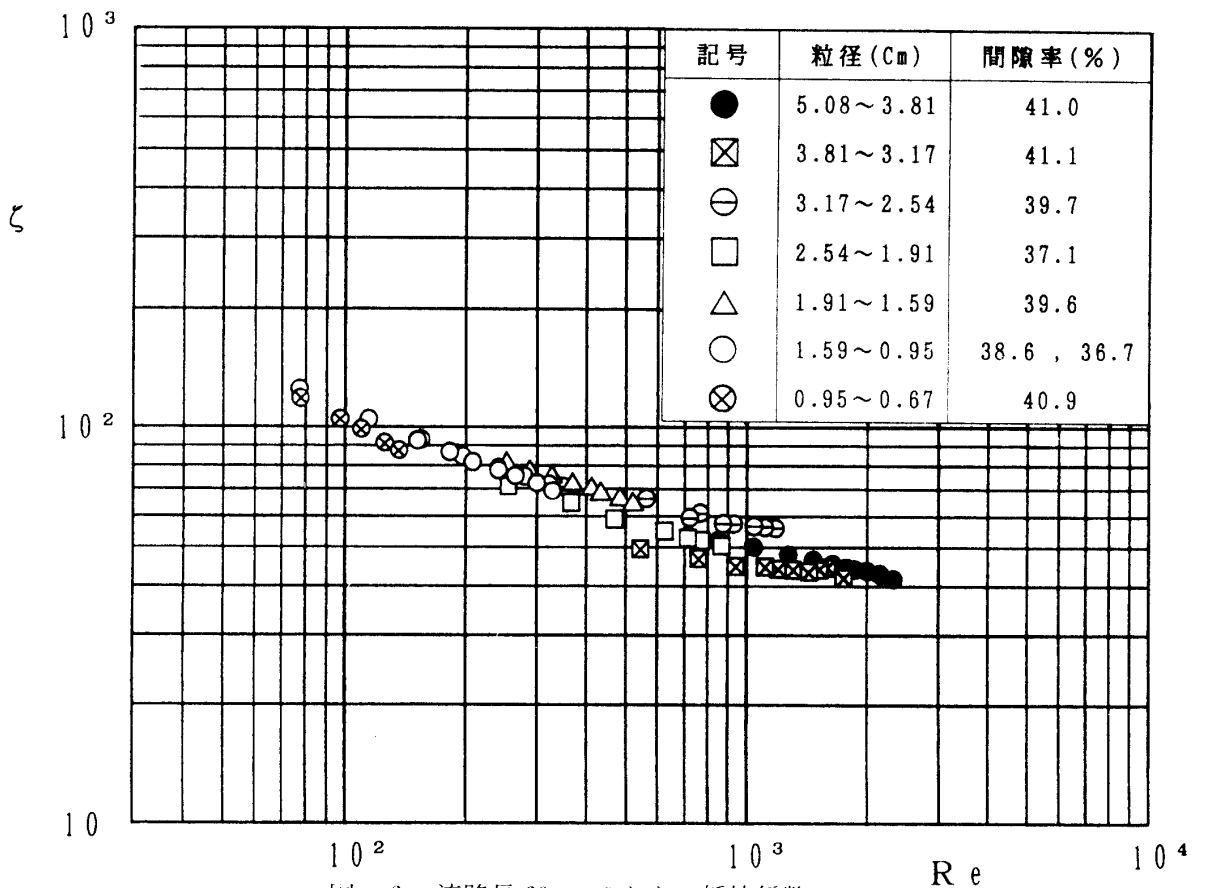


図-6 流路長 60cm のときの抵抗係数 ζ

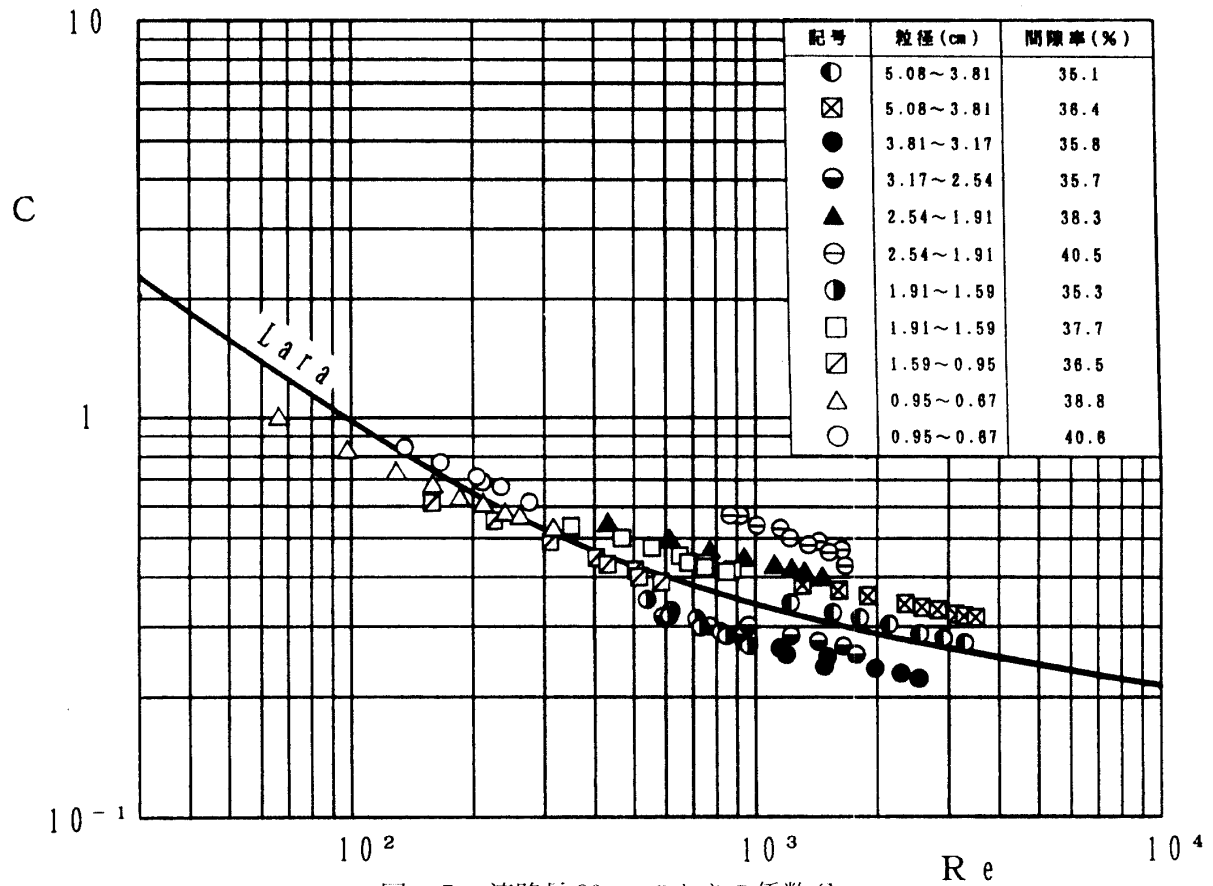


図-7 流路長 30cm のときの係数 C

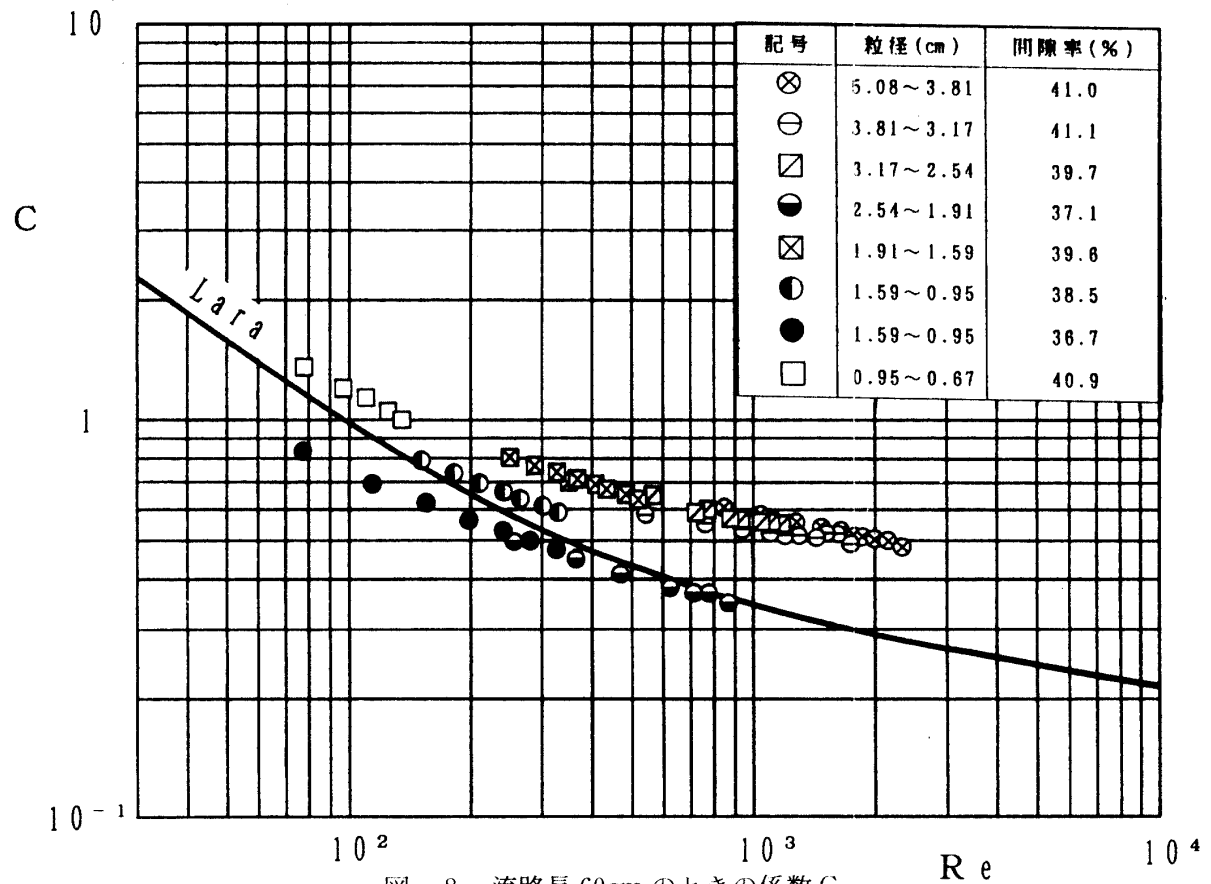


図-8 流路長 60cm のときの係数 C

明確に把握できるということが確かめられた。

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、ここでは、本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行ったが、Lara の実験と運輸省の実験結果について照合し、より正確な抵抗係数を確認することが出来た。ここでは、実験装置の都合で $Re < 4000$ の範囲内でしか確認が出来なかったが、機会があれば、 $Re = 10^5$ 程度の実験を行い、より充実した成果を実用に応えたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) 岡田靖夫：名古屋港高潮防波堤の洗掘防止に対する一考案，土木技術，Vol.19，No.3，昭和39年3月。
- 3) 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。
- 4) 石原藤次郎・本間 仁：応用水理学 上 一般水理学，丸善，pp.184～187，1957。
- 5) 土質工学ハンドブック改訂委員会：土質工学ハンドブック（1982年版），土質工学会，pp.66～69，1982。
- 6) B. Le Méhauté : Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, pp.903～919, Décembre 1957.
- 7) 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。
- 8) 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（修支論文），福井工業大学，1995年1月。

（平成6年10月28日受理）