

# 港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

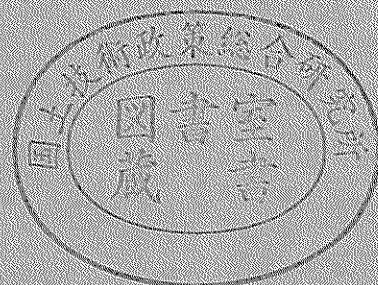
No. 764

Sept. 1993

捨石マウンド表面形状の評価および  
それに基づくケーソン底版の発生応力の検討

石 原 弘 一  
横 田 弘

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

1. ま え が き .....	4
2. 捨石マウンドの特性 .....	4
2.1 捨石マウンドの均し精度と表面形状 .....	4
2.2 均し精度がケーソンの断面力に及ぼす影響 .....	5
3. $1/f$ ゆらぎ .....	5
4. 捨石マウンドの表面形状の検討 .....	6
4.1 捨石マウンド出来高データの解析方法 .....	6
4.2 捨石マウンド出来高データ .....	6
4.3 捨石マウンド表面のパワー・スペクトル解析結果 .....	7
5. 捨石マウンド上のケーソン底版の発生応力の検討 .....	11
5.1 解析の目的 .....	11
5.2 捨石マウンドの特性 .....	11
5.3 基本波形の算出 .....	11
5.4 基本波形の検証 .....	13
5.5 ケーソン底版の発生応力の算出方法 .....	15
5.6 解析条件 .....	
5.7 解析結果および考察 .....	
参 考 文 献 .....	22
付 表 .....	22

# Evaluation of Surface Configuration of Rubble Mounds and its Effect to Stress of Bottom Slab of Caisson

Hirokazu ISHIHARA\*

Hiroshi YOKOTA\*\*

## Synopsis

Accompanying with the development of deep water areas, levelling work of a rubble mound is mechanized.

Surface configuration of a rubble mound which is levelled by mechanized work is rougher than that by manual work. In the design stage of offshore structures, it is necessary to estimate the roughness of surface configuration of a mound and its effect to stress of the structure.

In this study, surface configuration of rubble mound is analysed. The effect of roughness of rubble mound on the stress of the bottom slab of caisson is investigated.

The main results as follows:

- 1) Surface configuration of a levelled rubble mound is not regarded as random fluctuation, but has a kind of regularity which is called the  $1/f$  fluctuation.
- 2) Bending moment of bottom slab of caisson on the rubble mound with  $1/f$  fluctuation regularity is rather reduced compare to that on rubble mound with random fluctuation.

**Key Words:** Rubble Mound, Surface Configuration,  $1/f$  Fluctuation, Stress of Bottom Slab

---

\* Senior Research Engineer, Planning and Design Standard Division

\*\* Chief of Design and Construction Technology Laboratory, Planning and Design Standard Division

# 捨石マウンド表面形状の評価および それに基づくケーソン底版の発生応力の検討

石原弘一\*  
横田 弘\*\*

## 要 旨

港湾構造物の大水深化に伴い、捨石マウンドの均し作業の機械化が進められている。機械均しされた捨石マウンド表面の不陸は入力による本均しマウンドよりも不陸が大きいため、構造物の設計の際にはその影響を見込んだ設計を行う必要がある。

本研究では捨石マウンドの表面形状の特性と捨石マウンドの不陸がケーソン底版に与える影響について調査し、以下のことがらについて明らかにした。

- 1) 捨石マウンドの表面の不陸はランダムに分布するものではなく、 $1/f$  ゆらぎと呼ばれるある種の規則性を有している。
- 2) 捨石マウンドの不陸の分布が $1/f$  ゆらぎの特性をもつとすると、不陸の分布がランダムであるとする場合よりケーソン底版に生じる曲げモーメントはかなり小さくなる。

キーワード：捨石マウンド，形状特性， $1/f$  ゆらぎ

---

\* 計画設計基準部 主任研究官  
\*\* 計画設計基準部 設計技術研究室長

## 1. まえがき

ケーソン式防波堤に代表される重力式港湾構造物は、海底地盤上に石材で人工的に築造された基礎マウンド上に設置されるのが一般的である。この基礎マウンドは、石材を海上から捨て込んで（捨石）施工されるもので通常、捨石マウンドと呼ばれている。捨石マウンドが用いられる理由の1つは、構造物を支持力が十分に得られる安定した基礎の上に設置させるためである。つまり、重力式港湾構造物にとって、捨石マウンドの果たす役割は極めて大きいと言っても過言ではない。

捨石マウンドは港湾構造物にとって重要なものであるが、その諸特性に関して十分に説明されているとは必ずしも言えない状況である。とくに、十分な支持力が得られているかどうかの検討法、およびマウンド表面の形状が構造物本体に与える影響の評価が確立されていない。後者の場合、構造物にはマウンドから反力が作用することとなるが、マウンド表面の形状によってきわめて複雑な反力の大きさおよび分布を示すことになる。理想的にはマウンド表面は鏡面のように平坦であることが反力分布の観点から望まれるが、港湾工事で使用される捨石は天然材であり、形状が不規則であるため、ある程度大きな許容範囲をもって平坦と判断せざるを得ない。現行の施工基準では、潜水夫が人力で行う本均しの場合の表面の許容範囲は±5cm、荒均しの場合のそれは±30cmとなっている。

一方、港湾整備を取り巻く最近の状況として、港湾事業の大水深海域への展開、施工の省力化、合理化などが挙げられる。大水深海域でのマウンド築造には潜水夫の作業にも限界があることとともに、施工の合理化の観点からマウンド均しの機械化が進められようとしている。

機械によるマウンドの均し（機械均し）が実施される場合、人力による本均しよりも精度を緩和せざるを得ないので、構造物の構造設計においては、捨石マウンドの均し精度を考慮する必要がある。なぜならば、このような荒い均し精度で築造せざるを得ないマウンド上に設置される構造物は、マウンドから作用する反力の分布が従来のものと異なる可能性が高いからである。構造物の据え付け直後は言うまでもなく、据え付け後に沈下がある程度進んだとしても、底版がマウンドに接しない部分が残される結果、底版に発生する断面力はもとより、側壁、隔壁などにおける断面力も異なってくる可能性がある。

このような場合の構造設計では従来、マウンド表面の形状（凹凸）を統計的にランダムに与え、構造物に算定される断面力を求めてきた。しかしながら、捨石マウン

ドの表面形状は完全にランダムな変化をしているのではなく、ある程度の規則性あるいは自己相関性をもつ形状を有することが示唆されている。その場合、表面形状をランダムに与える方法に比べて、発生断面力が小さくなることが容易に推察できる。

本資料では、捨石マウンドの表面形状を統計的手法により解析し、形状を表す数学モデルを提案する。このモデルを表されるマウンド上にケーソンが据えられた場合の断面力の大きさについて試算を行った結果を報告する。

## 2. 捨石マウンドの表面形状の特性

### 2.1 捨石マウンドの均し精度と表面形状

捨石は、防波堤、係船岸などの重力式構造物の基礎に用いられるもので、「港湾工事共通仕様書」<sup>1)</sup>において直轄工事に用いられる場合の仕様が規定されている。この仕様規定の下に、実際の現場では重量などの規格が設定されている。捨石の仕様と形状特性については口田ら<sup>2)</sup>により統計的に取りまとめられている。

捨石マウンドはこれらの規格に適合する石材を海上から投石したのち、表面を平坦に均すことで築造される。捨石の運搬および投入には、石運船、ガット船、底開捨石投入船などが用いられている。最近は施工の効率化や合理化を計る観点から、各種の技術開発も実施されている。

捨石均しについては、従来より、潜水夫が人力でマウンド表面の捨石を移動させ、平坦に均す方法が取られている。この作業についても、作業の効率化のみならず海中作業の安全性の確保および潜水夫不足への対処から、機械化施工の導入が行われている。捨石マウンドの機械化による均し作業（機械均し）は、運輸省の施策である「港湾に係る民間技術の評価制度」において平成元年度に5件の技術が評価を受けたことでもわかるように、新しい技術が数多く生み出されている。実際に釜石港湾口防波堤において適用されており、今後もさらに実績が積み上げられて行くものと思われる。

一方、これら機械均しで築造された捨石マウンドの出来形、すなわちマウンド表面の形状特性については、調査研究が緒にいたばかりであり、定量的な把握が十分に行われていない状況にある。「港湾工事共通仕様書」<sup>1)</sup>によれば、国の直轄工事では、捨石マウンド表面形状に関しての基本的な許容範囲が次のように決められている。

- ① 荒均し面：±30cm
- ② 本均し面：±5cm

### ③ 被覆均し面：±30cm

これらのうち「②本均し」については、潜水夫による人力均しを対象に設定されているが、今後機械化均しが導入される場合には、±5cmの本均し程度の精度は無理としても±30cm程度の荒均しと同レベルの精度が要求されることになると思われる。

捨石マウンドの表面形状は、直感的にはマウンド上に設置される構造物とマウンドとの摩擦に影響を及ぼすことが考えられるほか、マウンドからの反力として与えられる構造物底板からの荷重にも大きな影響を与えることが懸念される。しかしながら、捨石マウンドの表面形状に関して、その空間的な変動パターンについてはほとんど解明されておらず、一般にはランダムな変動を与えて構造設計を行っている例が多い。

口田ら<sup>2)</sup>の研究では、さまざまな捨石サイズと荒均し、本均し、機械均しなどの施工条件で築造された6種類のマウンドで得られたデータに基づき、捨石マウンド表面の形状の変動パターンの解析が試みられている。その結果、パワー・スペクトルおよびフラクタル次元により捨石マウンド表面形状のモデル化が可能であることが示唆されている。

本資料では、この研究をさらに進め、荒均し、本均し、および機械均しで築造された15種類のマウンドの表面形状の統計的解析を行い、形状のモデル化の可能性を検討する。これに関しては、4. で詳しく述べる。

## 2.2 均し精度がケーソンの断面力に及ぼす影響

捨石マウンド上に設置される構造物は、重力式港湾構造物であり、ケーソンが代表的なものである。ケーソンの構造設計では、各種外力によりケーソンの各部材に発生する断面力を算定し、これに対して所定の安全性を有するように部材の寸法や補筋筋の量が決定される。このうち、とくにケーソンの底板に関しては、マウンドからの反力が主要な外力となる。2.1で述べた本均しの精度が満足される場合には、マウンドからの反力は等変分布（直線分布）として良い。しかし、マウンド表面の凹凸がある値を越えて大きくなると、部分的に大きな荷重となるおそれがある。また、凹凸の発生パターンによってはケーソンにねじりが生じることとなり、これに対する配慮も必要になる。

外山<sup>3)</sup>は、マウンド上に設置される構造物の断面力の観点から捨石均しの精度を検討している。この研究では、マウンド表面に±30cmの範囲であるランダムな凹凸を与えた場合のケーソン底板に算定される曲げモーメントを求めている。その結果によれば、このときの曲げモーメントは従来の設計で考慮しているモーメントの値の1.1

～1.6倍程度になる。このことから分かるように、捨石マウンドの表面の凹凸を考慮すると、構造物本体に発生する断面力が相当大きくなる場合がある。このことは、機械均しの普及に伴うマウンド均しの精度の設定の観点から考えると、捨石マウンド表面形状を考慮した構造設計が必要であることを示している。

これまでの構造設計では、捨石マウンドの表面形状に関する情報が確立していなかったため、表面にランダムな凹凸を与えて断面力の計算が行われてきた。しかし、2.1で述べたとおり、捨石マウンドの表面の凹凸にはある発生パターンがあることが推察できる。この場合には、ランダムな分布を仮定して得られた断面力に比べて、より小さな断面力あるいは断面力の変動が計算される可能性もあり、結果的に経済的な構造物の建設に結びつくこととなる。

本資料では、今回得られたマウンド表面形状のモデルを用いて算定されるケーソン底板の断面力についての考察も行う。この結果については、5. で詳しく述べる。

## 3. 1/f ゆらぎ

捨石マウンドの表面形状の特性を評価するにあたって、本資料では1/f ゆらぎ<sup>6)</sup>を1つのキーワードと考え、種々の考察を実施した。

1/f ゆらぎとは、その振動波形のパワースペクトルが周波数fの逆数である $f^{-1}$ に比例するような変動のことである。パワースペクトルが1/fに比例するということは、周波数の小さい、すなわち波長の大きい振動成分ほどパワースペクトルが大きく、変動の振幅が大きいことを示している。また、ゆらぎの相関が長く続く振動は、そのパワースペクトルは周波数の増加とともに急激に減少する性質を有する。すなわち、両対数グラフ上で空間周波数（1/波長の値で定義される）とパワースペクトルとの関係を図化すると、右下がりの直線で表される傾向を示す。1/f ゆらぎはその代表的なものである。

1/f ゆらぎは自然界に多く存在し、われわれが心地よいと感じる変動の多くが1/f ゆらぎの性質を示すとされている。たとえば、人間の心拍周期、脳波の変動などは1/f ゆらぎの特性を持っているとされており、こうした生体のリズムと一致するような変動に対して、人間は心地よさを感じるものと考えられている。その例としてクラシック音楽における音波の振幅の変動、そよ風の風圧の変動などがあげられ、これらはもちろん1/f ゆらぎの特性を有している。

また、口田ら<sup>2)</sup>よると捨石の表面の凹凸の変化のパワースペクトルは右下がりの分布を示している。また、その

ような捨石材で構成されている捨石マウンドの表面形状についてのパワースペクトルも右下がりの分布を示しており、この両者には関連性のあることが示唆されている。

このことから捨石マウンドの表面形状についても自然界に広く存在する1/fゆらぎの特性を適用した検討を行うことが可能であると考えられる。

#### 4. 捨石マウンドの表面形状のモデル化

捨石マウンド表面形状の基本的な特性を把握することを目的に、種々の考察を行った。実際の捨石マウンド築造工事において得られた表面形状の計測データをもとに、捨石マウンド表面の凹凸や起伏について数値解析を行った。これより、捨石マウンド表面形状のモデル化について検討した。

##### 4.1 数値解析の方法

数値解析は、計測位置とその地点での捨石マウンドの凹凸に関するデータからパワースペクトルを求め、空間周波数とパワースペクトルの相関関係を調べることで行った。その際、3. で述べた1/fゆらぎに着目し、マウンド形状の規則性に焦点を当てて検討を行った。

捨石マウンド表面形状の計測データから、その測線が描く断面の波形についてパワースペクトル解析を行った。パワースペクトル解析は、以下に示す(a)~(c)の手順で行った。

###### (a) フーリエ変換

全計測データから総数  $N$  が  $N = 2^n$  ( $n$ : 任意の整数) 個となるようにデータを抽出した。こうして取り出されたデータ  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  に対して、

$$X_j = x_j - \bar{x} \quad (j = 0, 1, \dots, N-1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

の変換を行う。

ここで、 $\bar{x}$  は  $x_j$  の平均値であり、

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j \quad \dots\dots\dots (2)$$

で求められる。

つぎに、 $X_j$  を用いて離散的フーリエ変換の係数  $C^{(j)}$  を以下の式で計算した。

$$C^{(j)} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{-i(2\pi k/N)j} \quad (j = 0, 1, \dots, N-1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

###### (b) 平均化したパワースペクトル

平均化したパワースペクトルを式(4)~式(6)により求めた。

$$SP^{(0)} = 2 \{ (\Delta t)^2 \{ Re(C^{(0)})/2 - Re(C^{(N)})/2 \}^2 + (\Delta t)^2 \{ Im(C^{(0)})/2 - Im(C^{(N)})/2 \}^2 \} / N \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$SP^{(k)} = 2 \{ (\Delta t)^2 \{ -Re(C^{(k+1)})/4 + Re(C^{(k)})/2 - Re(C^{(k+1)})/4 \}^2 + (\Delta t)^2 \{ -Im(C^{(k+1)})/4 + Im(C^{(k)})/2 - Im(C^{(k+1)})/4 \}^2 \} / N \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$SP^{(N/2)} = 2 \{ (\Delta t)^2 \{ -Re(C^{(N/2-1)})/2 + Re(C^{(N/2-1)})/2 \}^2 + (\Delta t)^2 \{ -Im(C^{(N/2-1)})/2 + Im(C^{(N/2-1)})/2 \}^2 \} / N \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $Re(C)$  および  $Im(C)$  は、それぞれ複素数  $C$  の実数部および虚数部を示す。また、 $\Delta t$  はデータのサンプリング間隔である。

一方、計算されたパワースペクトルに対する空間周波数は次の式によって求めた。

$$f_n = n / N \cdot \Delta t \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

###### (c) 結果の図化

両対数グラフを用いて、縦軸にパワースペクトルを、横軸に空間周波数を取り図化した。先に述べたとおり、両者の関係が直線であると仮定して、各捨石マウンドごとに回帰式を求めた。

また、サンプリング間隔(測定ピッチ)の2倍の長さより小さい波長を有する波形を検出することができないため、例えばサンプリング間隔が5mの場合には空間周波数が0.001(1/cm)以下の周波数帯でしかパワースペクトルを求めることができなかった。

##### 4.2 捨石マウンド表面形状の計測データ

解析に使用した捨石マウンド表面形状の計測データは、第二港湾建設局管内で行われた捨石基礎築造工事で得られたものである。使用したデータは、表-1に示すとおり、本均し7ケース、荒均し2ケース、機械均し2ケースおよび均しなし2ケースの合計15ケースである。これ

表-1 解析を行った捨石マウンドの計測データ

		測線長(m)	測線数	1本当りの測点数	測点のピッチ(m)	天端水深(m)	石の大きさ(kg/個)
本均し	CASE 1	130.0	9	29	5.0	-16.35	30~300
	2	75.0	8	21	5.0	-13.00	30~500
	3	40.0	5	11	5.0	-15.40	30~200
	4	40.0	6	11	5.0	-9.85	30~300
	5	35.0	9	11	5.0	-14.50	30~800
	6	40.0	7	11	5.0	-9.50	30~250
	7	24.0	51	61	0.3	-15.30	30~200
荒均し	CASE 8	140.0	2	20	10.0	-16.50	30~300
	9	80.0	3	11	10.0	-13.00	30~500
	10	70.0	4	10	10.0	-16.50	30~200
	11	24.0	51	61	0.3	-15.30	30~250
機械均し	CASE12	24.0	51	61	0.3	-15.30	30~200
	13	35.0	16	8	5.0	-25.00	30~200
均しなし	CASE14	25.0	6	8	5.0		30~200
	15	35.0	8	8	5.0		30~200

らのデータは、捨石マウンドの出来形図より、均し面の水深と測定ピッチを読み取ることにより作成した。

#### 4.3 解析結果および考察

解析を行った15ケースの捨石マウンドにおけるパワースペクトルと空間周波数との関係を図-1~15に示す。また、これらの図より得られるパワースペクトルの回帰直線の傾きである $\beta$ の値を表-2に示す。

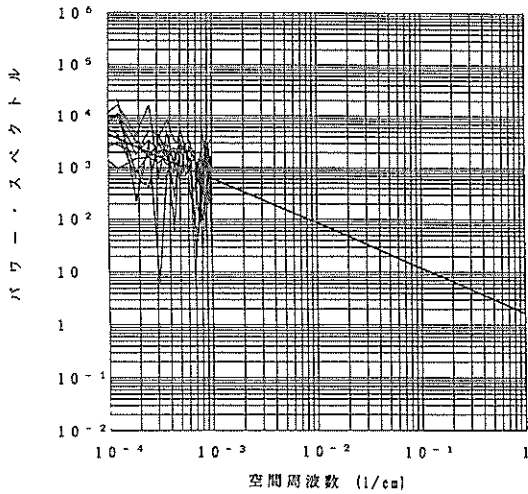


図-1 パワースペクトルの分布 (CASE1)

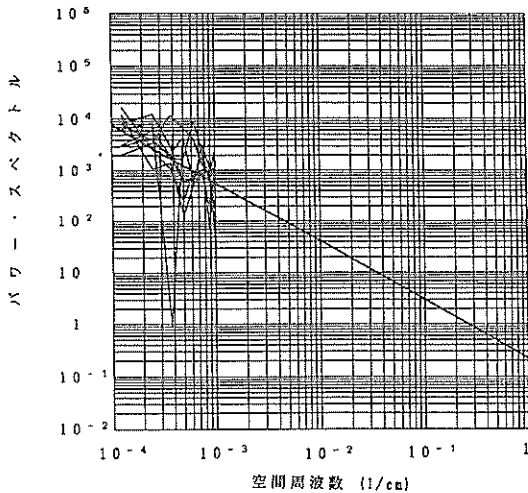


図-2 パワースペクトルの分布 (CASE2)

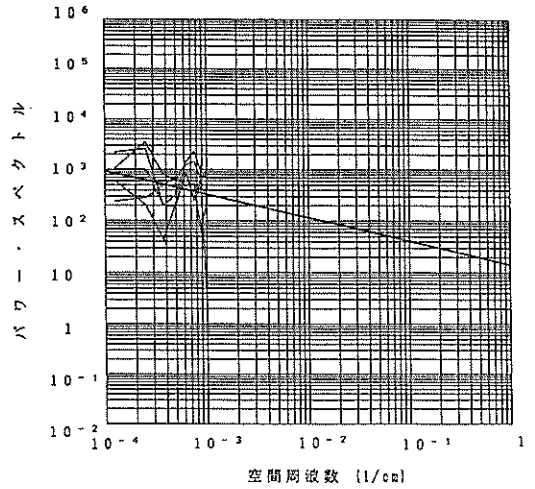


図-3 パワースペクトルの分布 (CASE3)

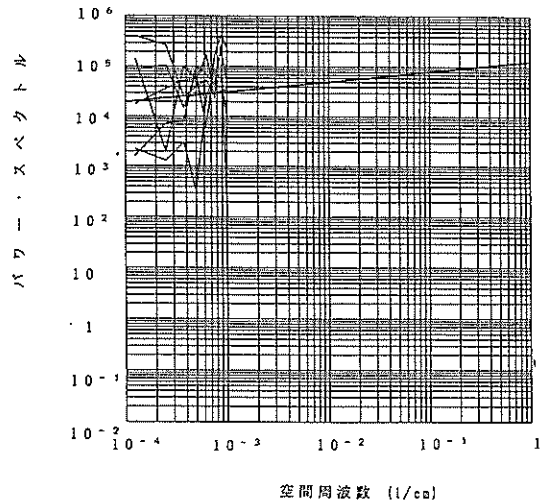


図-4 パワースペクトルの分布 (CASE4)



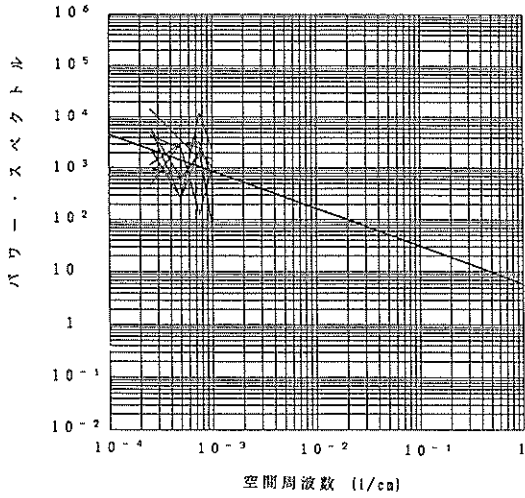


図-5 パワースペクトルの分布 (CASE 5)

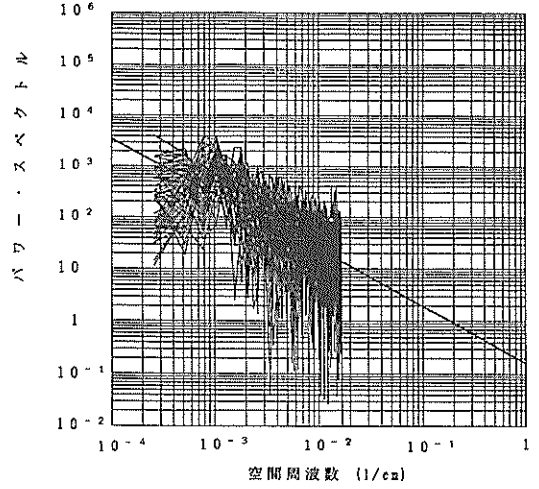


図-7 パワースペクトルの分布 (CASE 7)

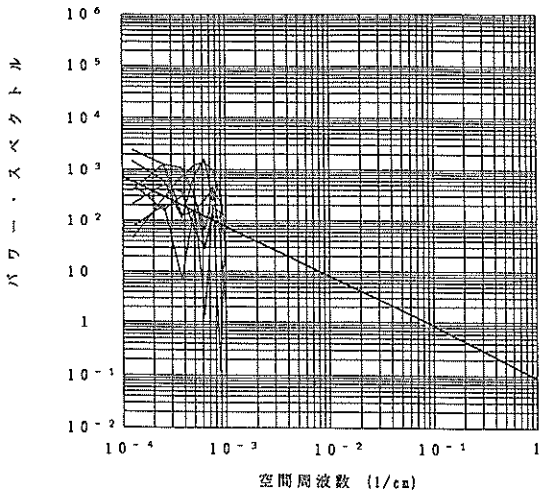


図-6 パワースペクトルの分布 (CASE 6)

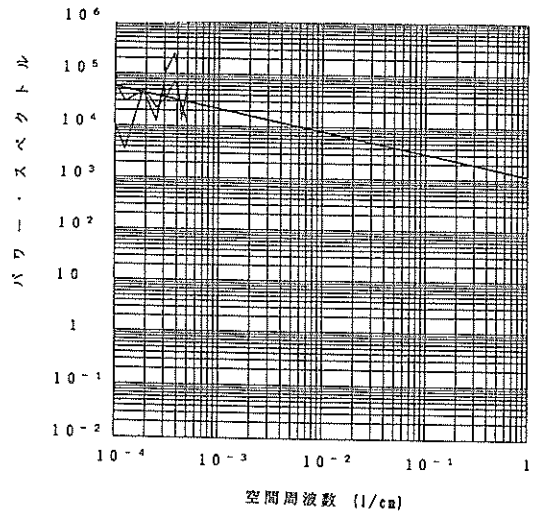


図-8 パワースペクトルの分布 (CASE 8)

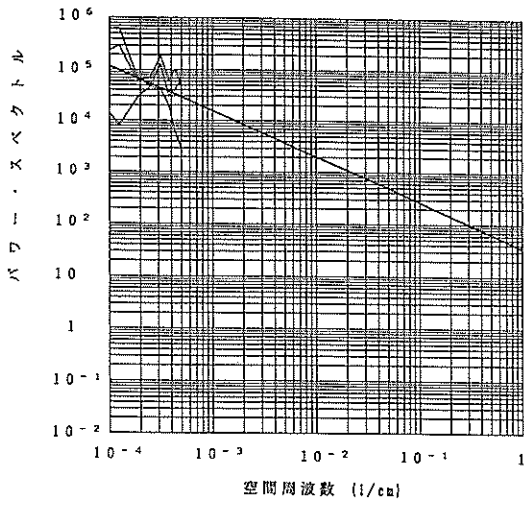


図-9 パワースペクトルの分布 (CASE9)

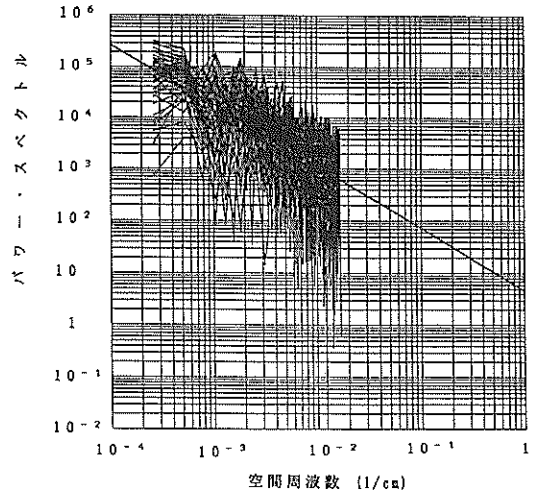


図-11 パワースペクトルの分布 (CASE11)

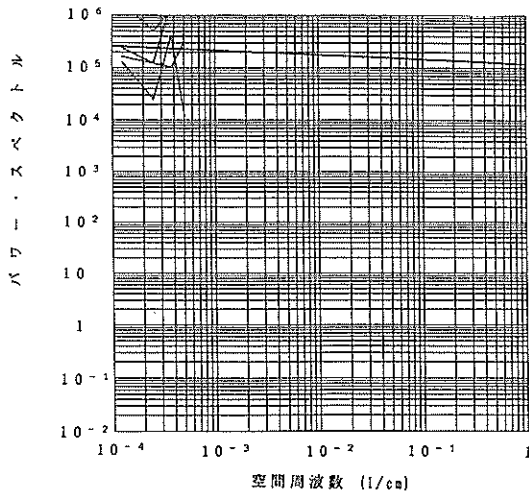


図-10 パワースペクトルの分布 (CASE10)

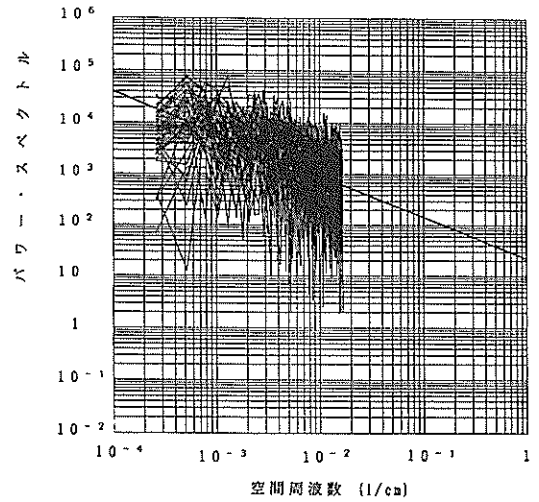


図-12 パワースペクトルの分布 (CASE12)

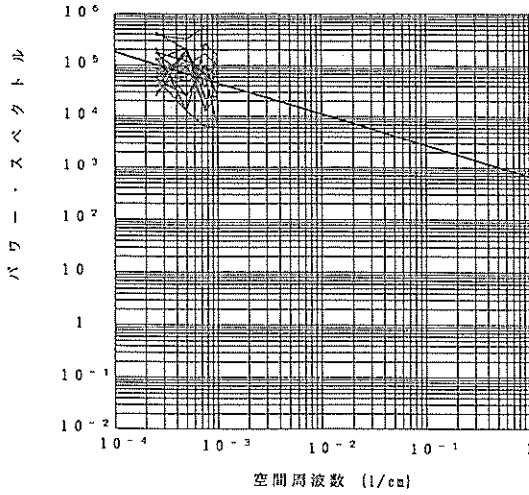


図-13 パワースペクトルの分布 (CASE13)

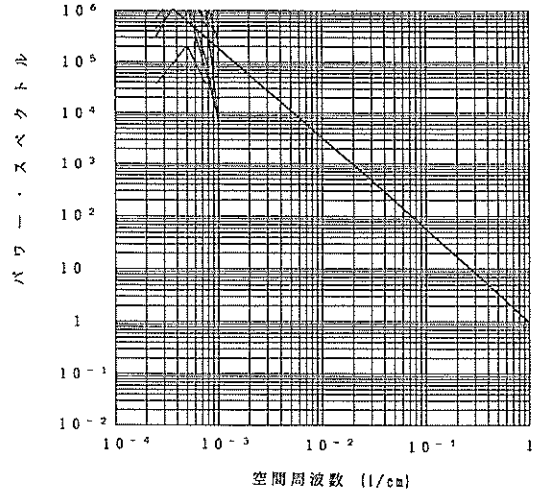


図-15 パワースペクトルの分布 (CASE15)

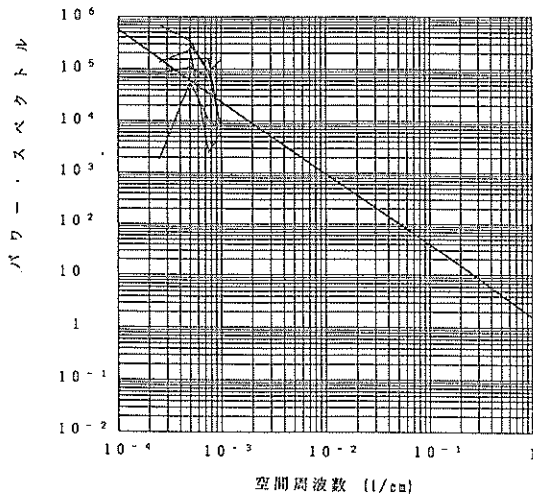


図-14 パワースペクトルの分布 (CASE14)

表-2 回帰直線の傾き $\beta$ の値

	傾き $\beta$
CASE 1	-0.88
CASE 2	-1.14
CASE 3	-0.45
CASE 4	0.21
CASE 5	-0.72
CASE 6	-0.99
CASE 7	-1.08
CASE 8	-0.42
CASE 9	-0.89
CASE 10	-0.08
CASE 11	-1.19
CASE 12	-0.82
CASE 13	-0.61
CASE 14	-1.39
CASE 15	-1.76

マウンド表面形状のパワースペクトルと空間周波数の関係を両対数グラフ上で図示すると図-16のような傾向を示した。この図で、空間周波数は大きく分けてA、BおよびCの3つの周波数帯に区分することができた。A

の周波数帯は周波数の小さい、つまり波長の大きい波の領域であり、逆にCの周波数帯は波長の小さい波の領域である。

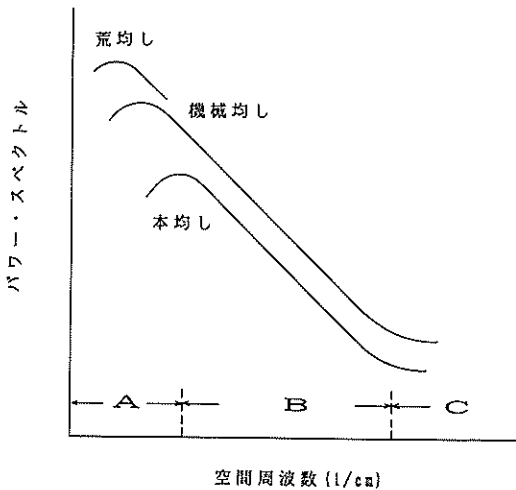


図-16 空間周波数とパワースペクトルの関係

同一空間周波数におけるパワースペクトルの分布を比較すると、荒均しマウンドのパワースペクトルが最も大きく、本均しが最も小さく、また機械均しがこれら2つの中間になっていた。パワースペクトルが大きいものほど捨石マウンド表面の凹凸が激しいものと考えることができる。このことから考えると、捨石マウンドの凹凸は、機械均しの場合が本均しと荒均しの場合の中間に位置するものであることを示している。

解析結果をみると、捨石マウンドの均し方法が本均し、荒均し、機械均しのいずれにおいてもその回帰直線が右下がりになっているものが多かった。前述したとおり、ゆらぎの相関が長く続く場合には、そのパワースペクトルは周波数の増加とともに急激に減少する。すなわち、その回帰直線が右下がりの直線になる。また、回帰直線の傾きである $\beta$ の値も表-2に示したように-1程度の値となっていた。すなわち、捨石マウンド表面の形状が、先に述べたいわゆる「 $1/f$ のゆらぎ」の特性を持っていることが示唆されたわけである。

これらのことから、捨石マウンド表面形状の変化はランダムというよりむしろ何らかの規則性があると考えた方がよいといえる。言い替えば、ある地点の捨石マウンドの標高は、まったく独立な値ではなく、その周囲の地点（本解析では測線に沿った前後の地点）と何らかの相関関係があり、これらの影響を受けていると考えて

よい。また、このような規則性を実際のデータから推測することで、捨石マウンドのモデル化を行うことが可能であると言える。

## 5. 捨石マウンド上のケーソン底版の発生応力の解析

### 5.1 解析の目的

捨石マウンドの凹凸、いわゆる不陸を考慮した場合のケーソンの設計においては、従来は捨石マウンドの不陸がある値の範囲でランダムな変化をしているとして行われてきた。しかし、4.で述べたとおり、捨石マウンドの不陸にはある程度の規則性が認められることがわかった。ここでは、この規則性を有する捨石マウンドを考え、ケーソン底版の発生応力を検討する。

既に述べたとおり、捨石マウンドの不陸が大きくなれば、マウンドからの反力が集中荷重的に底版に作用することになり、現行の設計で想定している荷重条件よりも厳しいものとなる。捨石マウンドの不陸をランダムなものと考えて反力を求め、底版の発生応力を算定すると、現行の設計による値の1.1~1.6倍程度の断面力が発生するおそれがあると報告されている。<sup>4)</sup> この倍率を荷重係数的に考えると、これは捨石マウンド不陸の不規則性によるものであると言える。したがって、この不規則性の程度を緩和し、規則性を定量的に把握できれば、より厳密な荷重係数を求めることができる。

### 5.2 解析方法

4.で求めたように捨石マウンドの不陸は人力均し、荒均し、および機械均しの各工法に応じたパワースペクトルを有する。ここでは、そうした特徴を有するように捨石マウンドをモデル化し、その上にケーソンを据付けた時にケーソン底版に生じる断面力を求めた。底版に生じる断面力は、ケーソン自重等の底版に働く外力により発生するが、ここでは捨石マウンドからの反力のみを外力として取り扱った。これにより、捨石マウンドの不陸がランダムであるとした場合に比べて、モデルマウンドでの曲げモーメント等の断面力がどのように変化するかを調べた。

### 5.3 捨石マウンドのモデル化

#### (1) 捨石マウンド表面形状の特性

捨石マウンドの不陸について4.で述べた解析から得られた特性をマウンドのモデル化の前提条件として再度整理すると以下のとおりとなる。

- ① パワースペクトルの分布は空間周波数の増加とともに減少し、両対数グラフ上では右下がりの分布を示す。これは、全ての均し方法について共通する性

質であり、その回帰直線の傾きは-1程度である。

② パワースペクトルの大きさは荒均しが最も大きく、本均しが最も小さく、機械均しがその両者の中間の値を示しており、これはマウンド不陸の大きさを示しているものと考えられる。

③ 捨石マウンド表面の不陸波形は、 $1/f$  ゆらぎで表される特性を有しており、表面形状がランダムな変化をしているわけではない。

(2) 基本波形の算出

(1)で述べた特徴を有する捨石マウンドをフーリエ変換によりモデル化した。すなわち、捨石マウンドの計測データをもとに高速フーリエ変換を行い、捨石マウンドの測線に沿った断面波形のフーリエ級数を求めた。

任意の波形を有する関数  $f(x)$  は以下の式で表される。

$$f(x) = A_1 \cos 2\pi f_1 x + B_1 \sin 2\pi f_1 x + \dots + A_k \cos 2\pi f_k x, B_k \sin 2\pi f_k x \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 $A_1 \sim A_k$  : 有限フーリエ  $\cos$  級数

$B_1 \sim B_k$  : 有限フーリエ  $\sin$  級数

$$f_k = k/N \cdot \Delta t$$

$$(k=0, 1, 2, \dots, N/2-1)$$

式(8)は、次式のように変形することができる。

$$f(x) = X_1 \cos(2\pi f_1 x + \phi_1) + \dots + X_k \cos(2\pi f_k x + \phi_k) \quad \dots\dots(9)$$

フーリエ変換の計算結果から  $A_1 \sim A_k$  および  $B_1 \sim B_k$  の値が得られるので  $X, \phi_k$  を以下の式からそれぞれ求める。

$$X_k (\text{振幅}) = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad \dots\dots(10)$$

$$\phi_k (\text{位相角}) = \tan^{-1} \left( -\frac{B_k}{A_k} \right) \quad \dots\dots(11)$$

捨石マウンドの断面が描く波形は、先に求めたように次式で表される。

$$F(x) = \bar{X}_1 \cos(2\pi f_1 x + \bar{\phi}_1) + \dots + \bar{X}_k \cos(2\pi f_k x + \bar{\phi}_k) \quad \dots\dots(12)$$

式(12)で、 $\bar{X}_1 \sim \bar{X}_k, \bar{\phi}_1 \sim \bar{\phi}_k$  は、捨石マウンドの測線ごとにフーリエ変換により求めた空間周波数毎のフーリエ級数の平均値である。また、 $X$  および  $\phi$  のそれぞれについて標準偏差  $\sigma_x$  および  $\sigma_\phi$  を求める。

ここで  $X_1 \sim X_k, \phi_1 \sim \phi_k$  の各値は、それぞれの平均値が  $\bar{X}_1 \sim \bar{X}_k, \bar{\phi}_1 \sim \bar{\phi}_k$  で、標準偏差が  $\sigma_{x1} \sim \sigma_{xk}, \sigma_{\phi1} \sim \sigma_{\phi k}$  の正規分布に従うものとし、乱数を用いて各測線の波形を表す  $F(x)$  の各項の  $X$  と  $\phi$  の値を決定する。このようにして求めた断面波形に  $x$  座標を代入して得られる  $F(x)$  の値がその地点におけるマウンド高さとなる。

このようにして求めたものを基本波形と呼び、この基本波形による標高の分布の例を図-17~19に示す。

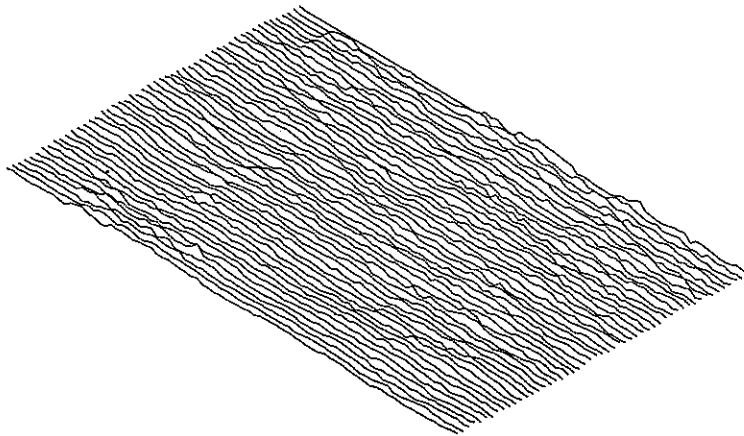


図-17  $1/f$  ゆらぎモデルによる捨石マウンド表面形状 (本均し)

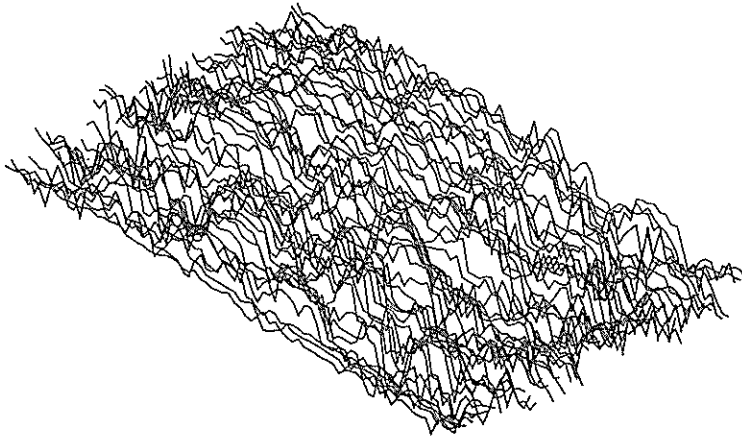


図-18 1/fゆらぎモデルによる捨石マウンド表面形状(荒均し)

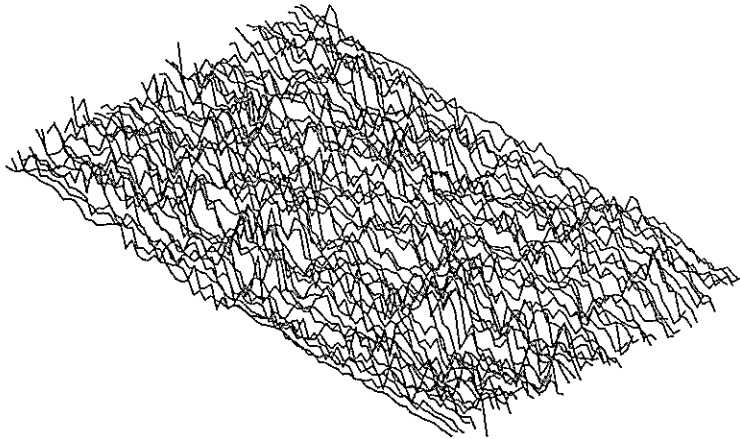


図-19 1/fゆらぎモデルによる捨石マウンド表面形状(機械均し)

(3) 基本波形の検証

各均し方法ごとに求めた基本波形についてパワースペクトル解析を行った結果を図-20に示す。いずれの基本波形もそのパワースペクトルの分布は右下がりになっており、その回帰直線の傾きもおおむね-1程度であることから、1/fゆらぎの特性をもつ波形が再現されていると考えて良い。また、パワースペクトルの大きさもそれぞれの均し方法の特徴を表している。

5.4 ケーソン底版の発生応力の算出

(1) 発生応力の算出方法

$x + y$  平面を捨石マウンドの天端面とすると、ケーソン底版を表す方程式は式(13)で表せる。

$$Z + Ax + By + C = 0 \quad \dots\dots(13)$$

ここで、A, B, C : 平面方程式の係数

ケーソン据え付け前と据え付け後の捨石マウンドの高さを図-21, 22に示すようにそれぞれ  $h(x, y)$  および

$\eta(x, y)$  とし、ケーソンを据え付けてもケーソン底版が変形しないとすれば、各接触点で次の式が成り立つ。

$$\{h(x, y) - \eta(x, y) + Ax + By + C\} \cdot f(\eta) = 0 \quad \dots\dots(14)$$

ここで、 $h(x, y)$  : 各点におけるマウンド高さ

$\eta(x, y)$  : ケーソン据え付け後のマウンド高さの変位量(沈下量)

$$f(\eta) : \eta \leq 0 \text{ のとき } f(\eta) = 0$$

$$\eta > 0 \text{ のとき } f(\eta) = 1$$

式(14)における  $h(x, y) - \eta(x, y)$  の値はケーソンが据え付けられたことによって生じるマウンドの変位量(沈下量)である。鉛直方向の力の釣り合いから次の式が成り立つ。

$$\sum_y K \eta(x, y) \cdot f(\eta) = V \quad \dots\dots(15)$$

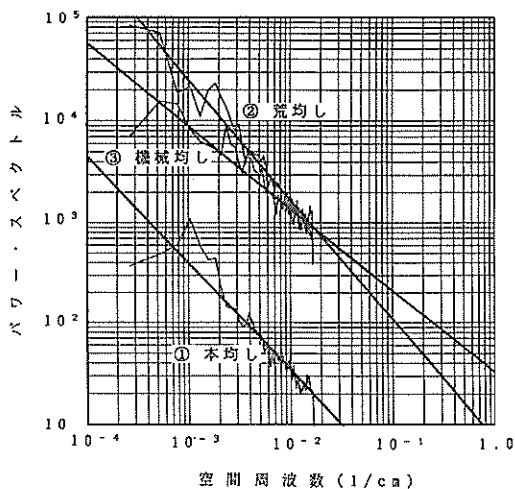


図-20 基本波形のパワー・スペクトルの分布

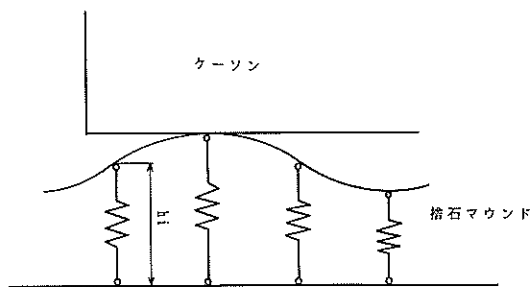


図-21 バネモデル

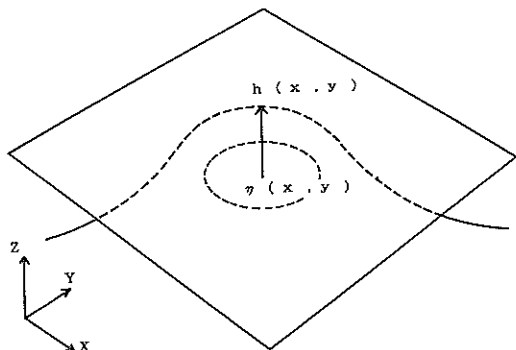


図-22 捨石マウンドの沈下量

ここで、 $K$  : 捨石マウンドのばね定数

$V$  : 外力の鉛直方向成分

また、 $x$  軸、 $y$  軸に関するモーメントの釣り合いから次の2つの式が成り立つ。

$$\sum_x K_y \eta(x, y) \cdot f(x) = M_y$$

$$\sum_x K_x \eta(x, y) \cdot f(x) = M_x \quad \dots\dots(16)$$

ここで、 $M_x$  : 外力によって生じる  $y$  軸に関するモーメント

$M_y$  : 外力によって生じる  $x$  軸に関するモーメント

ここで、 $h(x, y)$  は既知の値であるため、係数  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , および  $\eta(x, y)$  は連立方程式を解くことにより求められる。ただし、 $\eta(x, y)$  が負の場合は、捨石マウンドとケーソン底面が接していないことになり、反力が作用しないのでその点における計算は行わない。

捨石マウンドからの反力がマウンドの変位量(沈下量)に比例するとすれば、各点において捨石マウンド面から受ける底面反力  $P(x, y)$  は次の式から求められる。

$$P(x, y) = K \cdot \eta(x, y) \quad \dots\dots(17)$$

ケーソン底版の断面力は、底版を側壁および隔壁により支持される4辺固定版として、図-23に示す手順により算出する。

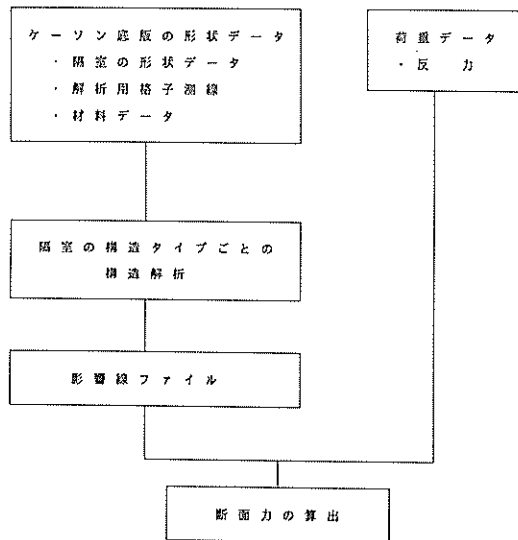
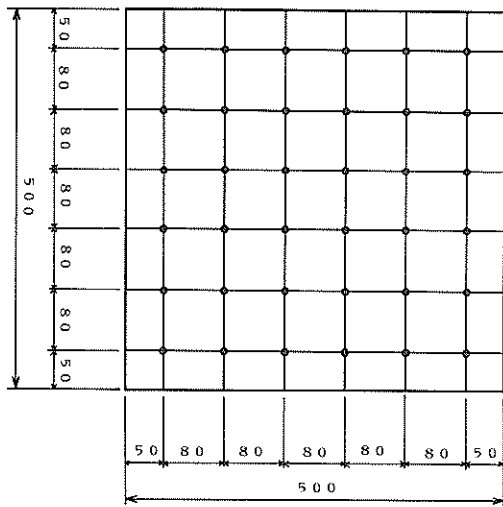


図-23 断面力の算出方法

隔壁の構造タイプは隔壁の形状、材料の種類、および解析用格子測線により求められる。底版は、側壁または隔壁で分割された隔壁により構成されているが、底版を4辺固定版とすると側壁および隔壁の位置に働く反力は

意味を持たない。したがって、捨石マウンドからの反力の作用する位置は、図-24に示すように、各測線の交点にのみ作用するものとした。



単位：cm

図-24 バネ地盤モデル

また、各格子点に作用する反力値は不定であるため、図-25に示すようにある1つの格子点に単位集中荷重を作用させたときに、その他の点にどのくらいの影響が及ぼすかを調べる。このようにして他の点に及ぼす影響がわかれば、各格子点の反力による断面力は次の式から求められる。

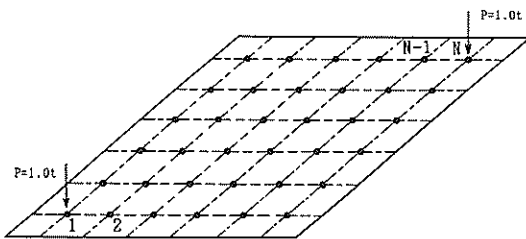


図-25 影響値の算出方法

$$F(n) = \sum_{i=1}^N Ri \cdot fi(n) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $F(n)$  : 節点  $n$  の反力による断面力

$Ri$  : 格子点  $i$  に作用する反力

$fi(n)$  : 格子点  $i$  に単位集中荷重が作用したときの節点  $n$  の影響値

$n$  : 格子点の個数

## (2) 解析条件

解析に用いた底版のモデルは、図-26に示すように、縦5m、横5mの正方形とした。すなわち、ケーソンの隔壁1個分の大きさについてのみの検討を行った。また、底版は4辺固定板とした。解析では、底版の要素分割は、 $x$ 軸、 $y$ 軸方向ともに7分割とし、反力の作用点を $6 \times 6$ の36点とした。

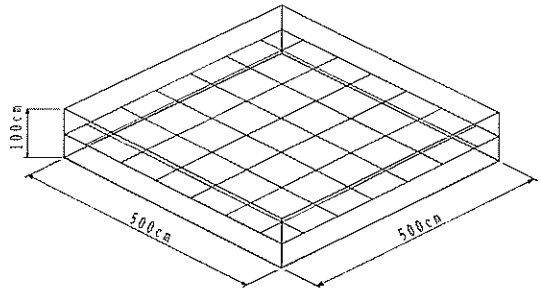


図-26 底版のモデル

底版の材料定数として、弾性係数 $2.7 \times 10^8$  tf/m<sup>2</sup>、ポアソン比0.1667を採用した。

また、地盤モデルは図-24に示すものとした。すなわち、端部の節点を除く36節点の位置で、ばねによりケーソンを支持するものとした。この際の捨石マウンドのばね定数は500 tf/m<sup>3</sup>とした。

今回の解析では、捨石均し方法別の断面力の比較を行うことを目的としているので、荷重の大きさはあまり重要ではない。そこで、通常のケーソンの設計荷重として考慮する波力、地震力等については無視し、ケーソンの本体重量のみを設計荷重とした。その際のケーソンの重量は、20 tf/m<sup>2</sup>とした。

先に述べたように、マウンド標高を求める際の不陸の程度を正規分布により求めているので、1回限りの計算では、場合によっては過大な標高のもとで計算が行われているおそれがある。そこで、各均し方法毎に100回の計算を行って特異性をなくすようにした。

## 5.5 解析結果および考察

解析では、各均し方法毎にそれぞれ100回の計算を行って得られた曲げモーメントの最大値、最小値、平均値、および標準偏差により評価した。また、比較のために、捨石マウンドの不陸がランダムであるとした場合のマウンド上での曲げモーメントについても同様の方法で求めた。断面力については図-27に示すようなケーソン底版の $x$ 方向にあたる中央部の15点の計算結果から比較を行った。



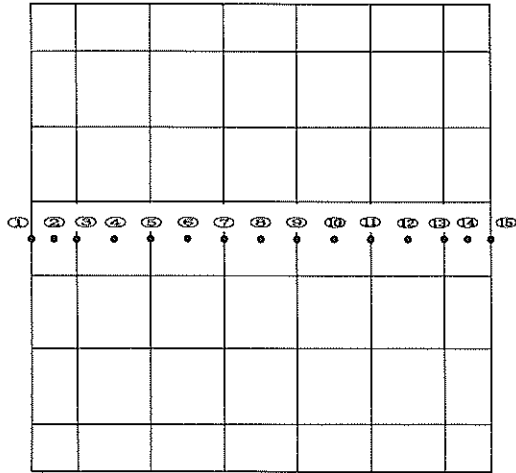


図-27 曲げモーメント値の比較に用いた15点

各均し方法における曲げモーメントの計算結果を表-3～6および図-28～42に示す。

(1) 本均し

① 平均値

マウンドのモデルの違いによる曲げモーメントの差は表-3、図-31に示すように15点の計算点のすべてにおいてみられなかった。また、現行の設計法による不陸を考慮しない版の曲げモーメントによる計算値<sup>5)</sup>ともほぼ一致していた。

② 最大値

表-3、図-29に示すように1/f ゆらぎモデルの不陸マウンドの方がランダムモデルよりも底版の固定端である①と⑮の点を除いたすべての点でわずかに小さい値となった。

③ 最小値

表-3、図-30に示すように底版中央部付近の⑤～⑪で1/f ゆらぎモデルの方が最小値がわずかに大きくなった。

④ 標準偏差

表-3に示すように底版中央部付近の③～⑬で1/f ゆらぎモデルの方が標準偏差が小さくなった。

表-3 底版の曲げモーメントの分布 (本均し)

単位: t・m/a

	ランダムモデル				1/f ゆらぎモデル			
	最大値	最小値	平均値	標準偏差	最大値	最小値	平均値	標準偏差
①	-29.9	-18.6	-24.8	2.0	-31.3	-16.7	-24.7	2.6
②	-19.9	-12.5	-15.8	1.2	-19.4	-11.2	-15.8	1.5
③	-10.8	-3.6	-7.1	1.2	-8.4	-5.6	-7.1	0.5
④	-2.9	2.3	-0.4	0.7	-0.9	0.1	-0.4	0.2
⑤	11.1	2.1	6.3	1.4	8.1	3.9	6.1	0.7
⑥	11.8	5.2	8.5	1.1	10.8	5.6	8.5	0.9
⑦	15.9	6.2	10.8	1.6	13.6	7.3	10.8	1.1
⑧	14.4	7.1	10.7	1.3	13.6	7.4	10.8	1.1
⑨	16.1	6.1	10.7	1.6	13.6	7.4	10.8	1.1
⑩	11.8	4.7	8.4	1.1	10.8	5.6	8.5	0.9
⑪	10.1	2.8	6.1	1.3	8.1	3.9	6.1	0.7
⑫	-2.2	1.8	-0.4	0.7	-0.9	0.1	-0.4	0.2
⑬	-10.7	-3.1	-7.0	1.2	-8.4	-5.6	-7.1	0.5
⑭	-19.0	-11.8	-15.8	1.2	-19.4	-11.2	-15.8	1.5
⑮	-29.7	-18.8	-24.7	2.0	-31.3	-16.7	-24.7	2.6

表-4 底版の曲げモーメントの分布（荒均し）

単位：t・m/m

	ランダムモデル				1/fゆらぎモデル			
	最大値	最小値	平均値	標準偏差	最大値	最小値	平均値	標準偏差
①	-50.2	-7.1	-24.5	7.4	-47.0	-6.0	-24.0	10.3
②	-31.4	-5.0	-16.0	4.5	-27.8	-4.3	-15.4	5.9
③	-19.9	8.8	-7.6	4.2	-10.0	-2.7	-7.0	2.1
④	7.7	-7.4	-0.6	2.8	-1.5	1.3	-0.4	0.7
⑤	23.3	-1.6	6.2	5.1	12.9	1.0	6.0	2.9
⑥	25.3	-0.1	8.6	4.2	16.6	1.8	8.2	3.7
⑦	38.9	1.3	11.0	6.1	20.6	2.6	10.5	4.4
⑧	27.6	1.6	11.0	4.8	20.1	2.6	10.5	4.4
⑨	37.5	1.0	11.0	6.0	20.6	2.6	10.5	4.4
⑩	30.3	0.3	8.6	4.3	16.6	1.8	8.2	3.7
⑪	31.1	-2.5	6.2	5.1	12.9	1.0	5.9	2.9
⑫	9.4	-6.3	-0.5	2.7	-1.5	1.3	-0.4	0.7
⑬	-24.5	9.4	-7.3	4.6	-10.0	-2.7	-7.0	2.1
⑭	-39.0	-5.0	-16.0	4.7	-27.9	-4.3	-15.4	5.9
⑮	-54.5	-6.4	-24.8	7.5	-47.0	-5.9	-24.0	10.3

表-5 底版の曲げモーメントの分布（機械均し）

単位：t・m/m

	ランダムモデル				1/fゆらぎモデル			
	最大値	最小値	平均値	標準偏差	最大値	最小値	平均値	標準偏差
①	-43.9	-10.2	-24.3	6.0	-46.6	-6.0	-24.5	8.6
②	-28.6	-7.0	-15.7	3.7	-27.7	-4.3	-15.7	5.0
③	-18.3	6.7	-7.1	3.7	-10.0	-2.7	-7.0	1.7
④	8.0	-6.0	-0.4	2.3	-1.5	1.2	-0.4	0.6
⑤	24.5	-0.8	6.2	4.3	12.7	1.0	6.1	2.5
⑥	19.1	1.4	8.4	3.3	16.5	1.8	8.4	3.1
⑦	27.9	2.0	10.6	4.7	20.4	2.6	10.7	3.7
⑧	22.9	1.7	10.6	3.9	20.0	2.6	10.7	3.7
⑨	28.9	0.4	10.6	4.9	20.0	2.6	10.7	3.7
⑩	19.6	0.1	8.3	3.5	16.2	1.8	8.4	3.1
⑪	22.2	-1.4	6.0	4.0	12.5	1.0	6.1	2.5
⑫	-6.3	5.9	-0.4	2.2	-1.5	1.2	-0.4	0.6
⑬	-16.4	4.0	-7.0	3.8	-9.9	-2.7	-7.0	1.7
⑭	-26.6	-5.3	-15.6	3.8	-27.5	-4.3	-15.7	5.0
⑮	-41.8	-10.2	-24.3	6.1	-46.5	-6.0	-24.5	8.6

表-6 ランダムモデルと1/fゆらぎモデルにおける曲げモーメント最大値の比較

	本均し			荒均し			機械均し		
	ランダム(A)	1/fゆらぎ(B)	(A)/(B)	ランダム(A)	1/fゆらぎ(B)	(A)/(B)	ランダム(A)	1/fゆらぎ(B)	(A)/(B)
①	-29.9 t-m	-31.3 t-m	1.06	-50.2 t-m	-47.0 t-m	0.94	-43.9 t-m	-46.6 t-m	1.06
②	-19.9	-19.4	0.97	-31.4	-27.8	0.89	-28.6	-27.7	0.97
③	-10.8	-8.4	0.78	-19.9	-10.0	0.50	-18.3	-10.0	0.55
④	-2.9	-0.9	0.31	7.7	-1.5	0.19	8.0	-1.5	0.19
⑤	11.1	8.1	0.73	23.3	12.9	0.56	24.5	12.7	0.52
⑥	11.8	10.8	0.92	25.3	18.6	0.66	19.1	16.5	0.66
⑦	15.9	13.6	0.86	38.9	20.6	0.53	27.3	20.4	0.73
⑧	14.4	13.6	0.94	27.6	20.1	0.73	22.9	20.0	0.87
⑨	16.1	13.6	0.84	37.5	20.6	0.55	28.9	20.0	0.69
⑩	11.8	10.8	0.92	30.3	18.6	0.55	19.6	16.2	0.83
⑪	10.1	6.1	0.60	31.1	12.9	0.41	22.2	12.5	0.56
⑫	-2.2	-0.9	0.41	9.4	-1.5	0.16	-6.3	-1.5	0.24
⑬	-10.7	-8.4	0.79	-24.5	-10.0	0.41	-16.4	-9.9	0.60
⑭	-19.0	-19.4	1.02	-39.0	-27.9	0.72	-26.6	-27.5	1.03
⑮	-29.7	-31.3	1.06	-54.5	-47.0	0.86	-41.8	-46.5	1.11

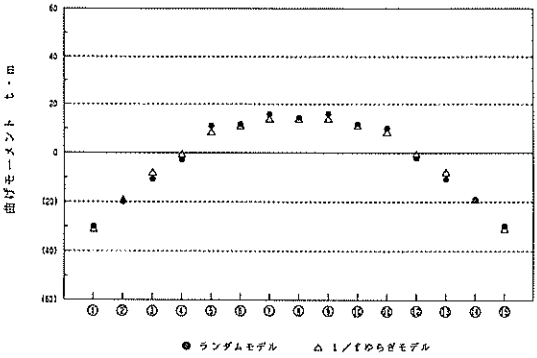
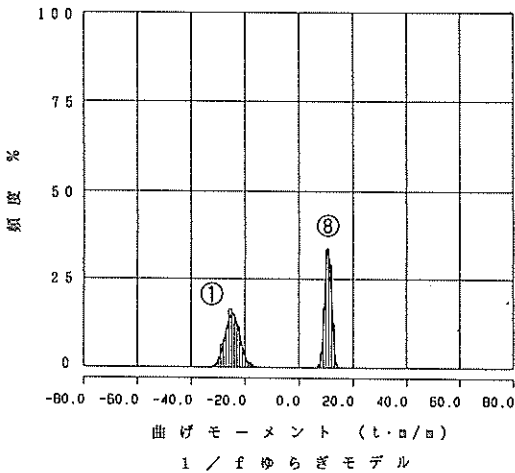
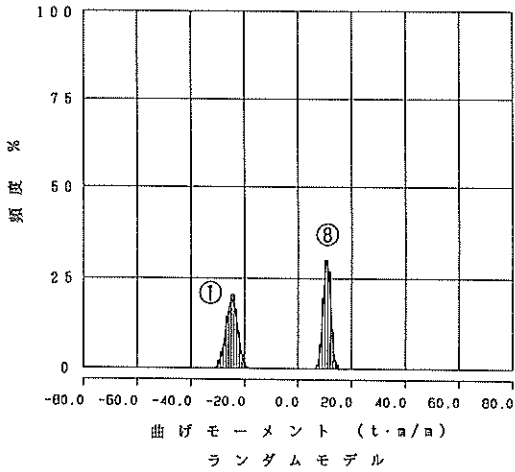


図-29 曲げモーメント最大値の比較 (本均しマウンド)

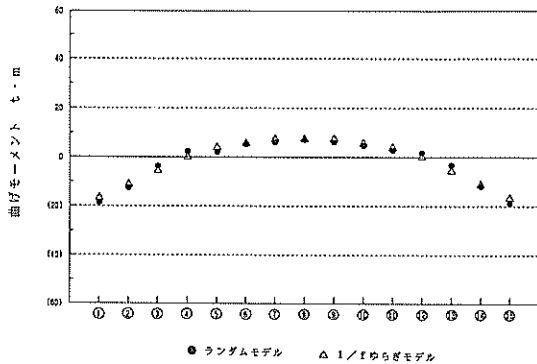


図-30 曲げモーメント最小値の比較 (本均しマウンド)

図-28 底版の曲げモーメント (本均しマウンド)

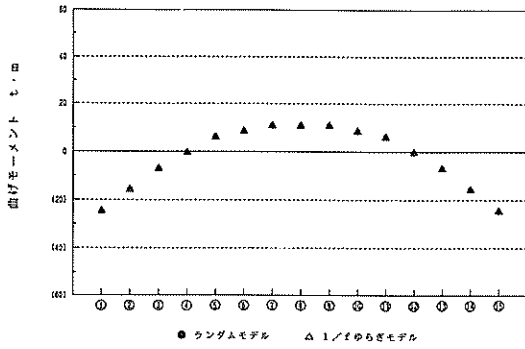


図-31 曲げモーメント平均値の比較 (本均しまウンド)

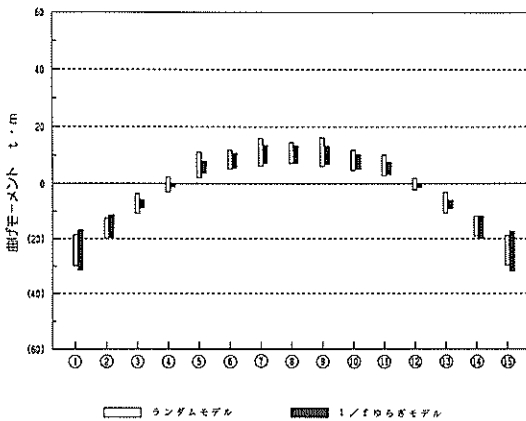
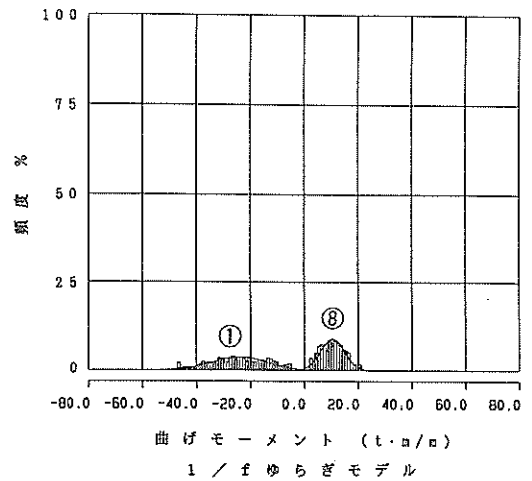
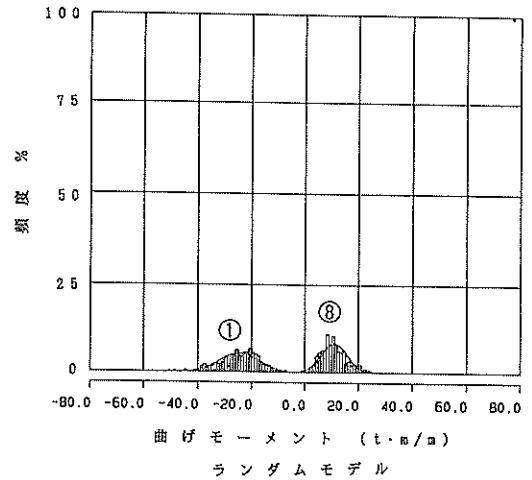


図-32 底版の曲げモーメントの分布 (本均しまウンド)

図-33 底版の曲げモーメント (荒均しまウンド)

(2) 荒均し

① 平均値

表-4, 図-36に示すように15の点すべてで1/fゆらぎモデルの方が5%程度平均値が小さくなった。

② 最大値

表-4, 図-34に示すように15の点すべてで1/fゆらぎモデルの方が小さくなった。とくに、中央部付近では30~50%小さい値を算定した。

③ 最小値

表-4, 図-35に示すように底版中央部付近の⑤~⑩で1/fゆらぎモデルの方が最小値がわずかに大きくなった。

④ 標準偏差

表-4に示すように底版中央部付近の③~⑬で1/fゆらぎモデルの方が標準偏差が小さくなった。

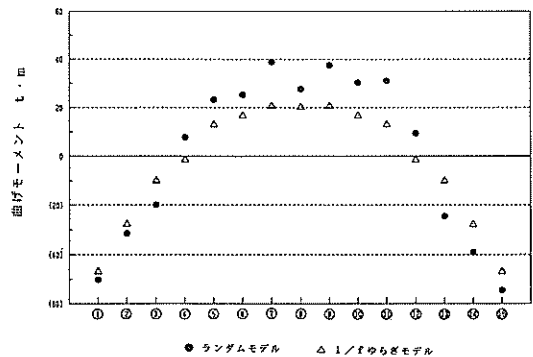


図-34 曲げモーメント最大値の比較 (荒均しまウンド)

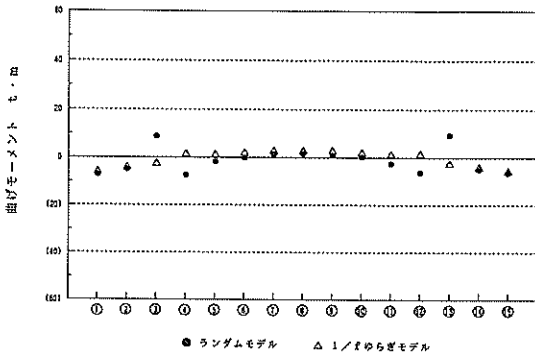


図-35 曲げモーメント最小値の比較 (荒均しまウンド)

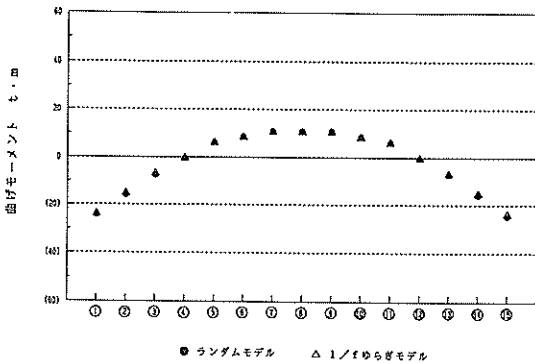


図-36 曲げモーメント平均値の比較 (荒均しまウンド)

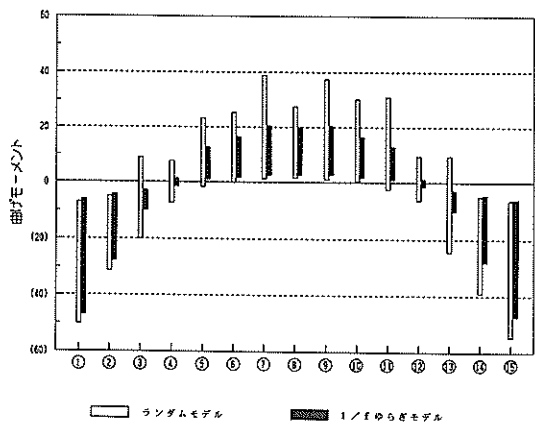


図-37 底版の曲げモーメントの分布 (荒均しまウンド)

(3) 機械均し

① 平均値

表-5, 図-41に示すように不陸モデルの違いによる平均値の差は15の点すべてでみられなかった。

② 最大値

表-5, 図-39に示すように底版の固定端付近以外の②~⑬の点で1/fゆらぎモデルの方が最大値が小さくなった。とくに, 中央部付近で15~30%小さい値となった。

③ 最小値

表-5, 図-40に示すように底版中央部付近の⑤~⑪で1/fゆらぎモデルの方が最小値がわずかに大きくなった。

④ 標準偏差

表-5に示すように底版中央部付近の③~⑬で1/fゆらぎモデルの方が標準偏差が小さくなった。

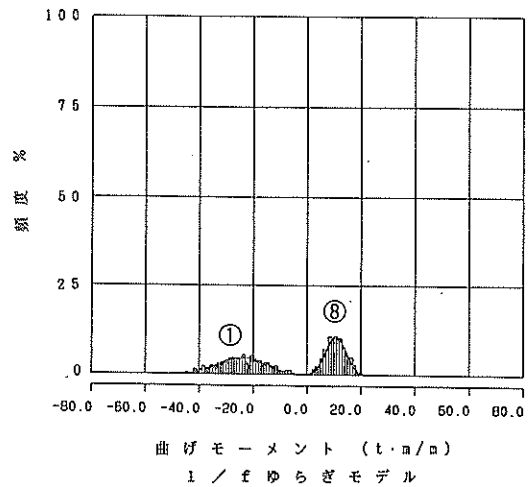
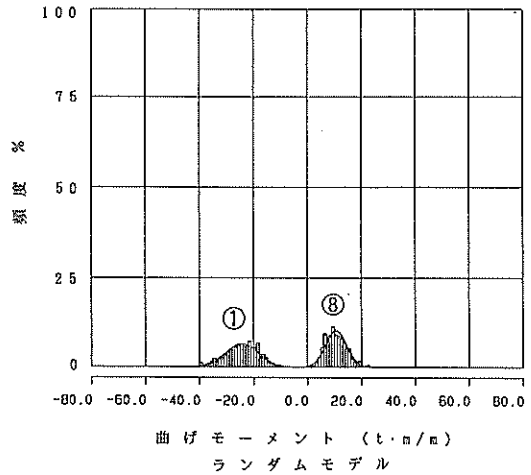


図-38 底版の曲げモーメント (機械均しまウンド)

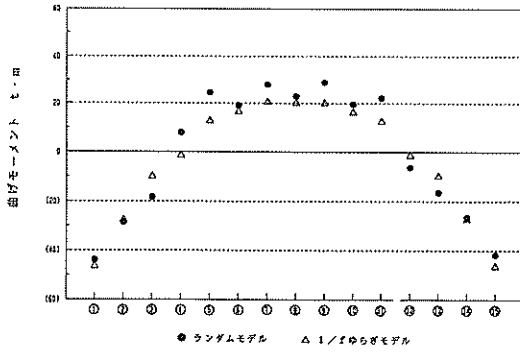


図-39 曲げモーメント最大値の比較 (機械均しマウンド)

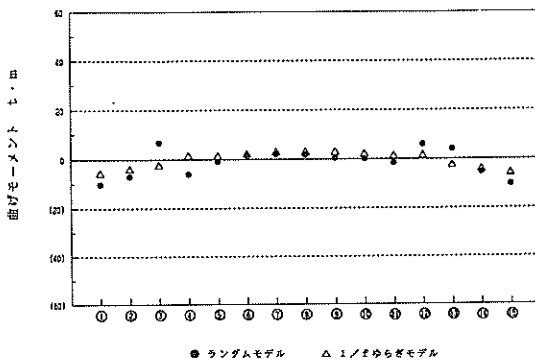


図-40 曲げモーメント最小値の比較 (機械均しマウンド)

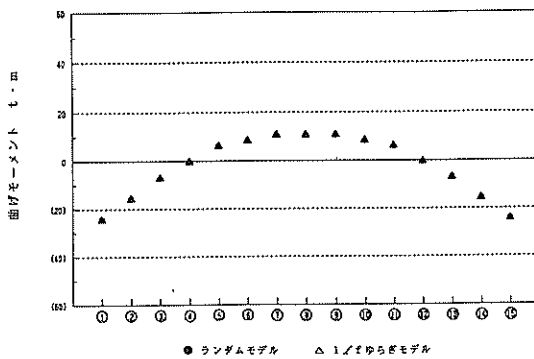


図-41 曲げモーメント平均値の比較 (機械均しマウンド)

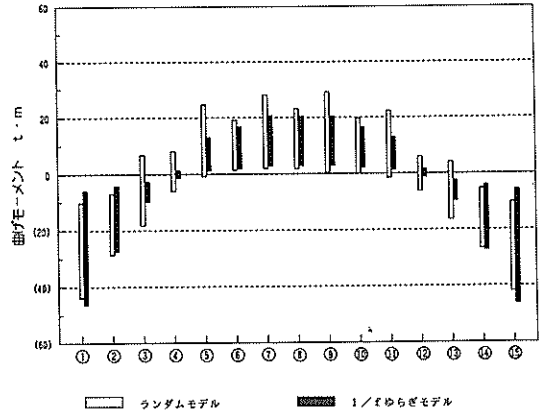


図-42 底版の曲げモーメントの分布 (機械均しマウンド)

曲げモーメントの最大値については、表-6に示すように荒均しの捨石マウンドでは1/fゆらぎモデルの方がすべての点で小さくなっている。また、機械均しマウンドでも1/fゆらぎモデルの方が底版の固定端付近以外の点で最大値が小さくなっており、固定端付近でもその差は小さなものであった。このように捨石マウンドの不陸を1/fゆらぎであるとする、底版に生じる曲げモーメントはかなり小さく算定されることがわかった。荒均しおよび機械均しでは、捨石マウンドの均し精度を±30cmと想定して解析を行ったが、マウンドの均し精度を粗くせざるを得ない場合においても、ケーソンの設計が今回の手法で精度良く行えることがわかった。

ケーソン等の構造物の設計にあたって、底版に生じる曲げモーメントの最大値に着目して設計を行う場合には、捨石マウンドの不陸が1/fゆらぎの特性をもつものとして設計を行うと、不陸の分布がランダムであるとする場合より発生する断面力が小さくなることがわかり、結果的に経済的な断面となる可能性があると考えられる。

## 6. まとめ

捨石マウンド表面形状の特性および機械均しマウンド上のケーソンの底版応力に関して、今回の解析から以下の主要な結論が得られた。

- 1) 捨石マウンドの表面の不陸はランダムに分布するものではなく、1/fゆらぎと呼ばれるある種の規則性を有している。
- 2) 捨石マウンドの不陸の分布が1/fゆらぎの特性をもつとすると、不陸の分布がランダムであるとする場合に比べてケーソン底版に生じる曲げモーメントはかなり小さくなる。

本研究により捨石マウンド表面の不陸の特性が明らかとなり、不陸の分布がケーソンの底版に与える影響についてある程度定量的に把握することができた。

しかし、捨石マウンドのモデル化についてはケーソン底版に対してx方向のみに着目してモデル化を行ったためにy方向についての断面力の検討については不十分なものになった。捨石マウンドの計測データの蓄積を含めて今後さらに検討を行うことが必要と思われる。

しかし、今後増加することが予想される捨石均し機械によって築造された捨石マウンド上に建設される構造物の設計の際の参考に十分なるものと思われる。

本資料で取りまとめた解析は、口田 登前設計技術研究室長（現在関西国際空港株式会社工務一部）の発案で始めたものであり、また解析および取りまとめに当たっても多くのご助言を賜りました。また、第二港湾建設局には貴重な現地データを提供して頂きました。ここに、感謝の意を表します。(1993年6月30日受付)

## 参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局編集：港湾工事共通仕様書，日本港湾協会，1991年3月，pp.208～215
- 2) 口田 登・辻垣武彦・森田博史：捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，1991年3月，pp.347～382
- 3) 横田 弘・南兼一郎・清宮 理：ケーソン式港湾構造物への有限要素法の適用，港湾技研資料，No.403，1981年12月，35p.
- 4) 外山進一：ならし精度を考慮した底版の計算，港湾技研資料，No.512，1985年3月，33p.
- 5) 運輸省港湾局編集：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1982年2月。
- 6) 武者利光：ゆらぎの世界，講談社，1980年。
- 7) 森 好生・恋塚 貴・笹山 博・野上富治：釜石港湾口防波堤大型台形ケーソンの設計，海洋開発論文集，土木学会，Vol. 5, 1989年，pp.37～42

付表-1 捨石マウンド計測データ CASE 1

(単位：m)

	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	
測線番号	①	0.05	0.05	0.08	0.06	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.08	0.05	0.06	0.07
	②	0.04	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.08	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.06
	③	0.05	0.03	0.03	0.04	0.06	0.02	0.07	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	0.06	0.07
	④	0.04	0.03	0.04	0.07	0.01	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07
	⑤	0.06	0.04	0.02	0.05	0.04	0.02	0.01	0.04	0.04	0.01	0.02	0.04	0.06	0.07
	⑥	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.01	0.00	0.04	0.05	0.04	0.00	0.03	0.03	0.06
	⑦	0.04	0.06	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.07	0.04
	⑧	0.05	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.04	0.05	0.04
	⑨	0.03	0.06	0.07	0.08	0.06	0.05	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.08	0.06

	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0	110.0	115.0	120.0	125.0	130.0
	0.05	0.08	0.08	0.07	0.05	0.06	0.08	0.03	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03
	0.05	0.07	0.05	0.04	0.05	0.07	0.07	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03
	0.06	0.06	0.07	0.04	0.05	0.06	0.07	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
	0.07	0.07	0.06	0.05	0.03	0.07	0.06	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
	0.03	0.06	0.08	0.02	0.06	0.06	0.07	0.05	0.04	0.06	0.02	0.04	0.02
	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.08	0.06	0.04	0.04	0.07	0.03	0.06	0.04
	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05	0.08	0.04	0.02	0.04	0.04
	0.06	0.07	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03
	0.07	0.05	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08	0.06	0.04	0.03	0.05	0.04	0.06

付表-2 捨石マウンド計測データ CASE 2

(単位：m)

	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	
測線番号	①	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.02	0.06	0.07	0.05	0.05	0.03	0.04	0.01
	②	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.08	0.08	0.08	0.07	0.02	0.02	0.04
	③	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.01	0.04	0.04
	④	0.05	0.06	0.06	0.04	0.07	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.02
	⑤	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.07	0.03	0.07	0.05	0.05	0.04	0.02	0.03
	⑥	0.04	0.03	0.07	0.03	0.03	0.07	0.05	0.04	0.06	0.05	0.06	0.04	0.03	0.02
	⑦	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.03	0.01	0.03	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02
	⑧	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.02	0.03	0.04

	70.0	75.0
	0.00	0.04
	0.03	0.05
	0.02	0.02
	0.01	0.04
	0.03	0.02
	0.05	0.06
	0.06	0.05
	0.07	0.07

付表-3 捨石マウンド計測データ CASE3

(単位: m)

	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
測線番号 ①	15.38	15.42	15.39	15.40	15.40	15.38	15.37	15.38	15.38
②	15.38	15.40	15.38	15.39	15.40	15.40	15.39	15.40	15.40
③	15.37	15.40	15.40	15.39	15.43	15.41	15.40	15.39	15.39
④	15.40	15.39	15.40	15.39	15.40	15.40	15.38	15.38	15.40
⑤	15.39	15.41	15.38	15.39	15.38	15.38	15.37	15.39	15.38

付表-4 捨石マウンド計測データ CASE4

(単位: m)

	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
測線番号 ①	0.0	30.0	30.0	30.0	20.0	30.0	40.0	20.0	50.0
②	30.0	50.0	10.0	50.0	20.0	60.0	40.0	30.0	40.0
③	40.0	40.0	20.0	40.0	30.0	30.0	40.0	40.0	60.0
④	10.0	30.0	20.0	20.0	30.0	50.0	50.0	50.0	40.0
⑤	30.0	50.0	40.0	30.0	40.0	40.0	50.0	20.0	50.0
⑥	30.0	30.0	40.0	20.0	30.0	30.0	30.0	40.0	30.0

付表-5 捨石マウンド計測データ CASE5

(単位: m)

	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0
測線番号 ①	0.05	0.06	0.02	0.08	0.02	0.03	0.04	0.02
②	0.06	0.06	0.02	0.05	0.04	0.05	0.07	0.07
③	0.04	0.07	0.05	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04
④	0.02	0.03	0.05	0.03	0.05	0.02	0.04	0.03
⑤	0.08	0.07	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04
⑥	0.00	0.02	0.01	0.03	0.03	0.05	0.07	0.06
⑦	0.06	0.03	0.03	0.01	0.02	0.04	0.03	0.05
⑧	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.04	0.06	0.04
⑨	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.04	0.06	0.04

付表-6 捨石マウンド計測データ CASE6

	0.00	1.60	6.60	11.60	16.60	21.60	26.60	31.60	36.60	41.60	45.45
測線番号 ①	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02
②	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
③	0.06	0.05	0.02	0.01	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
④	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03
⑤	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02
⑥	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.00
⑦	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04





付表-9 捨石マウンド計測データ CASE7 (その3)

(単位: m)

	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
①	16.3	16.3	16.2	16.2	16.3	16.2	16.3	16.2	16.3	16.3	16.3
②	16.3	16.3	16.2	16.2	16.3	16.2	16.3	16.2	16.2	16.3	16.3

付表-10 捨石マウンド計測データ CASE8

(単位: m)

	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
①	16.3	16.3	16.2	16.2	16.3	16.2	16.3	16.2	16.3	16.3	16.3
②	16.3	16.3	16.2	16.2	16.3	16.2	16.3	16.2	16.2	16.3	16.3

付表-11 捨石マウンド計測データ CASE9

(単位: m)

	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
①	13.0	12.9	12.8	12.9	13.0	13.0	13.0	13.2	12.9
②	12.9	12.9	12.7	12.8	12.9	13.0	13.0	13.2	13.0
③	13.0	13.0	13.0	13.0	13.1	13.0	13.0	13.1	13.1

付表-12 捨石マウンド計測データ CASE10

(単位: m)

	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0
①	16.6	16.4	16.5	16.5	16.5	16.3	16.4	16.3
②	16.1	16.6	16.1	16.6	16.2	16.3	16.4	16.2
③	16.1	16.3	16.1	16.3	16.4	16.3	16.8	16.5
④	16.6	16.4	16.5	16.5	16.3	16.5	16.4	16.5







付表-19 捨石マウンド計測データ CASE13

(単位 : m)

測線番号	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0
①	24.9	25.1	25.2	25.1	25.0	25.0	24.9	25.1
②	25.0	25.0	25.0	25.0	25.2	25.0	25.1	25.1
③	25.0	25.0	25.0	25.0	25.2	24.9	25.0	24.9
④	25.2	25.1	25.1	25.0	25.3	25.0	25.0	25.0
⑤	25.2	24.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
⑥	25.2	25.1	25.0	25.1	25.0	25.0	25.2	25.4
⑦	25.1	25.0	25.0	25.0	25.1	25.1	25.2	25.2
⑧	25.2	25.2	25.2	25.3	25.0	25.1	25.1	25.1
⑨	25.0	25.2	25.0	25.1	25.1	25.1	24.9	25.0
⑩	24.9	25.0	25.2	25.2	25.0	25.0	25.0	25.1
⑪	24.8	24.9	25.4	25.0	24.9	25.0	24.8	25.0
⑫	25.0	25.0	25.0	25.1	25.2	25.0	25.1	25.2
⑬	25.0	25.0	24.9	25.0	25.0	24.8	24.9	25.1
⑭	25.0	25.1	25.2	25.0	25.0	25.0	25.2	25.1
⑮	25.0	25.1	25.1	25.0	24.9	24.8	25.1	25.0
⑯	25.0	25.2	24.8	25.1	25.0	25.0	25.1	25.1

付表-20 捨石マウンド計測データ CASE14

(単位 : m)

測線番号	0.0	3.8	8.8	13.8	18.8	23.8	28.8	34.0
①	15.6	15.7	15.5	15.6	15.8	15.7	15.7	15.8
②	15.8	16.0	15.9	15.7	15.7	15.9	15.9	15.7
③	15.8	15.9	16.0	16.0	15.9	15.9	16.0	15.9
④	16.0	15.9	16.2	16.0	16.0	16.2	16.4	16.7
⑤	16.3	16.0	15.8	15.9	16.0	15.7	15.7	15.7
⑥	16.3	16.0	16.1	16.5	16.5	16.4	16.4	16.4

付表-21 捨石マウンド計測データ CASE15

(単位 : m)

測線番号	0.0	3.0	8.0	13.0	18.0	23.0	28.0	33.0	38.0	41.0
①	25.7	26.2	26.8	26.2	25.7	25.5	26.0	26.2	25.9	25.9
②	26.6	26.1	27.0	26.3	26.1	26.0	26.4	26.6	26.2	25.7
③	24.9	24.9	26.1	26.3	25.8	26.2	26.8	27.1	26.4	26.2
④	25.3	24.6	25.6	26.3	26.2	26.0	26.5	27.1	26.9	26.7
⑤	25.4	25.4	26.3	26.5	25.8	26.1	26.3	26.5	26.2	26.4
⑥	26.9	26.5	27.1	27.1	26.5	26.1	26.2	26.5	26.5	26.5
⑦	26.2	26.0	27.1	27.0	26.7	26.0	26.5	26.8	27.0	26.7
⑧	25.2	25.1	25.4	25.4	25.3	25.2	25.3	25.3	25.3	26.6

港湾技研資料 No. 764

1993・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1993) by P.H.R.I

Allright reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。