

捨石マウンド表面の工法別特性とシミュレーションによる近似表面形状の設定に関する考察

口田 登

正会員 運輸省第四港湾建設局 環境技術管理官 (〒750 山口県下関市竹崎町4-6-1)

捨石マウンド表面の不陸(凹凸)形状に関する現場データを統計幾何学的手法により解析し、各種の均し工法に分類して基本的な特性を体系的に考察した。その結果、均し作業の施工形態(均し無→荒均し→本均し、均し無→機械均し)に応じて、不陸形状の統計的な性質(空間的な変動パターン)はある程度の規則性をもって変化することが確認された。また、解析結果から、より汎用性の高い指標であるフラクタル次元を求め、非整数ブラウン運動モデルに基づくシミュレーション計算を行うことにより、それぞれの不陸特性に対応した近似表面形状の設定ができることを示した。

Key Words : rubble mound, configuration property, fractal dimension, fractional derivative

1. ま え が き

港湾の防波堤や係船岸に最も多く採用されている重力式構造物の標準的な様式は、海底地盤上に石材で台形状の基礎マウンドを築造し、その上に鉄筋コンクリート製のケーソン等を据付け堤体としたものである。この基礎マウンドに用いられる石は海上から捨て込んで施工されるので捨石と呼ばれており、また、基礎マウンド自体についても一般に捨石マウンドと呼ばれている。

捨石マウンドは、上部堤体を安定した基礎地盤上に設置させること、および上部・下部の二層構造により工費の削減を図る目的で施工されている。現場で使用される捨石は天然材で、1個の質量が5kg~1t(直径約10~150cm)と大きく、ロックフィルダムに用いられる石材と類似している。また、マウンド築造工事は、捨石を石運船、ガット船あるいは底開式投入船などで岸壁から積み出し、海上で投石した後、表面の捨石を潜水夫が人力で1個ずつ移動して平坦に均す方法が一般にとられている。

こうした捨石マウンドに関する設計・施工上の技術課題としては、①基礎構造としての支持力の評価(従来の経験法に代わる広い適用範囲をもつ合理的な手法の開発)、②上部堤体に作用する波圧や土圧に対してマウンド表面で生じる滑動抵抗力の評価(摩擦増大工法の定量評価)、③マウンド表面から堤体に作用する地盤反力によって生じる堤体内の断面力の評価(マウンド表面の不陸(凹凸)の許容範囲の緩和との関係)、④大型の底開式投入船からの直投入による大規模・急速施工の造成出来形の評価、

⑤各種均し工法に対応したマウンド表面の出来形の評価(荒均し、本均し、機械均し)などが挙げられる。これらの課題が近年特に重要視されてきた背景には、最近の港湾・空港・海洋開発において、大水深や厳しい波浪条件の地点に大規模な重力式構造物を建設する必要が生じてきたことがある。例えば、設計波高14m、最大水深-63m地点の37m厚のマウンド上に、堤体高さ35mもの超高型ケーソン式防波堤を、また設計波高16m、最大水深-16m地点の5m厚のマウンド上に、堤体長さ100mの超長型ケーソン式防波堤を建設するなどの事例は、その典型的なものである。このようなこれ迄に蓄積された設計・施工実績に基づく経験則や、類似した現場データの統計的な分析に基づく知見のみでは対処し難い施設の建設にあたっては、その巨大な投資規模を極力圧縮することをも強く求められることから、各技術課題に対し従来以上に精緻かつ合理的な検討が不可欠となってきている。

課題①については、小林ら¹⁾が大型三軸圧縮試験や遠心載荷試験等による捨石の力学特性(せん断強度、破碎性状)や、現場実物大試験によるマウンドの支持力特性などの解析・考察を行い、新しい設計法を提案している。課題④についても、奥出ら²⁾が大型模型実験や現場のデータなどを踏まえて投石条件と現場条件を考慮した捨石マウンドの造成出来形のマクロ推定法を提案している。

一方、課題②および③については、これ迄マウンド表面の不陸の最大鉛直変動量のみが重視され、空間的な変動に関してはランダムであると直感的に受けとめられてきたことから、②の摩擦・付着問題や③の版の応力解析問題の定量的な取り扱いが必ずしも十分とは言えず、既

往の設計・施工実績に基づく慣用的な取り扱いとなっているのが実態である。また、課題⑤については、均し工法による不陸の変動パターンの相違が、課題②および③と密接に関連してくる基本的な課題であるが、空間的な形状特性に関するデータ解析は殆ど行われていない。

本研究では、こうした現状を踏まえて課題⑤を主眼とした検討を行うため、捨石マウンド表面の不陸データを均し施工の形態別に解析し、空間的な変動パターンの体系的な考察を先ず行っている。次に、課題②および③の検討の前提として不可欠である、実際の出来形を近似した標準的な表面形状を求めるための、それぞれの均し工法がもつ基本的な特性を考慮したモデルによるシミュレーションについて考察を行っている。

2. 捨石マウンドの施工仕様と実態

防波堤や係船岸を、混成式と呼ばれる捨石マウンドと上部堤体(鉄筋コンクリート製のケーソンやブロック)の二層構造で築造する施工法は、わが国で古くから用いられてきている。そして、これ迄に蓄積されてきた数多くの施工実績から、十分な耐波・安定性能を有しかつコスト面でも優れていることが確認されている。

海上の作業船(石運船、ガット船、底開式投入船等)から大量の捨石を、経験と勘をも含めた施工管理技術によって投下し、海底面上に概ね台形状をしたマウンドが造成される。引き続き形を整えるための均し工が行われるが、潜水夫が人力で表面の捨石を1個ずつ移動して平坦にする素朴な方法がとられている。均し工を行う目的には、単に表面を平坦にするばかりではなく、個々の捨石のかみ合わせを良くすることによってマウンドを一体化し、堅固にするという効果もあるものと考えられる。

まず、おおまかな整形のための荒均しと呼ばれる作業が行われるが、運輸省の各港湾建設局が実施する直轄工事では、この荒均し表面の凹凸や起伏の許容範囲(出来形管理基準³⁾)が、防波堤の場合 $\pm 30\text{cm}$ 、岸壁法線前面(堤体前の船舶係留エリア)の場合 $+0\sim -20\text{cm}$ と決められている。荒均し面上には、表面の捨石が波や流れによって散乱するのを防止するための被覆石や、波圧低減および越波防止などのための消波コンクリートブロックが必要に応じて設置される。

次に、堤体が設置されるエリアを対象とした入念な整形のための本均しと呼ばれる作業に移る。この本均し表面の凹凸や起伏の許容範囲に関しては厳しい精度が要求されており、運輸省の基準においては $\pm 5\text{cm}$ で検収されている。したがって、マウンド表面の出来形はこの管理基準値以内に収まるように施工されるが、人力作業であることから1日の海中での作業量が限定される。標準的な例を調査したところ、水深-15m未満の現場条件下で、

1人の潜水夫が8時間勤務したケースにおける均し作業のための実労働時間は5時間程度であり、水深が大きくなるとともに体内ガス圧減少に必要とされる時間が著しく増加し、-30m程度では均し作業に当てられる実労働時間が2.5時間以下となるため、作業効率と経費の面で大きなロスを生じることとなる。このため、均し面の最大水深を-15~-20mとして設計するのが一般的である。しかし、大水深域に設置される施設の場合、台形状のマウンドの断面積が著しく大きくなるので、現場の近隣域にある採石場だけでは、材料供給能力の制約による影響を受けて大量かつ円滑な捨石の確保が問題となることから、水深-30m程度までマウンド天端面を下げざるを得ないケースもあるが、人力均しによる対応の限界と言える。

一方、作業の効率化、安全性の向上および潜水夫の不足への対処といった見地から、均し施工の機械化が進展しつつある。第二港湾建設局で開発された架台を用いるシュート方式の均し機械を始めとして、運輸省の「港湾に係る民間技術の評価制度」によって認証された複数の民間開発機が、各地の現場で稼働し徐々に実績を積みつつある。しかしこれ迄の結果からみて、均し表面の凹凸や起伏の許容範囲として、潜水夫に大半を頼る本均しと同水準の $\pm 5\text{cm}$ の精度を要求することは難しく、ある程度緩和された管理基準として、例えば荒均し程度の $\pm 30\text{cm}$ が暫定的に用いられたりしている。したがって、機械均し面上に設置される堤体の設計・施工は、不陸の許容範囲の見直しを考慮して行うことが必要である。

特に、機械均し工法のもつスケール・メリットがより発揮されるのは、厳しい施工条件(大水深、高波浪等)をもつ大規模な工事であるが、必然的に構造物は大型化し設計外力も増大することから、これ迄は必ずしも設計上のクリティカル要素となることなかった、ケーソン堤体を構成している版等に発生する断面力や、堤体底面とマウンド間に生じる滑動抵抗力に及ぼす影響についての確な評価がなされる必要がある。外山⁴⁾によれば、表面形状が最大変動量 $\pm 30\text{cm}$ のランダムな分布をしていると想定したケースにおける堤体の底版に発生するモーメントは、従来の設計(最大変動量 $\pm 5\text{cm}$ の均質な表面形状を想定)で考慮しているモーメントの約1.6倍になることがあるとの試算結果が示されている。また、横田ら⁵⁾によれば、均し精度が緩和された場合、堤体を構成する版等にねじれが生じるような不陸の変動パターンを考慮した有限要素法による解析を行うことが望ましいとされていることから、合理的かつ精緻な検討が必要と言える。

3. 捨石マウンド表面の形状特性

今回、捨石マウンド表面の形状特性の解析に供するデータとして用いたのは、第二港湾建設局が実施したO港

の防波堤の捨石マウンド（水深-25m, マウンド天端高-16m）における現地大規模試験工から得られたデータ, およびK港の大水深防波堤のマウンド工事（水深-63m, 天端高-26m）から得られた施工管理データである。O港の現場データには, 均し無, 荒均し, 本均しおよび同局の開発機材による機械均しの一連の施工の全てが含まれており, それぞれの表面形状の相互比較を行うための詳細な現地測定がなされている。また, K港のデータは, 同局の均し機械を本工事に適用したものであり, 大水深域の施工という特徴を反映した表面形状が測定されている。

なお, 使用された捨石の規格(質量)は, それぞれ30~800kg/個, 10~800kg/個で, 岩質もそれぞれ花こう岩, 粘板岩である。

表面の形状特性の考察にあたって本章では, 先ず各種の均し工法別に, 不陸の鉛直変動分布と出来形管理目標(許容範囲)の関係について実態を把握する。次に, マウンド表面の空間的な変動(波形)の性質を統計的に表現するため, パワー・スペクトル密度(以下では, スペクトルあるいは $S(f)$ と呼ぶ)による解析を行い, 均し施工の手順と形状特性の変化過程の関連性について考察を行う。

(1) 表面不陸の鉛直変動特性

O港における試験工事では, 4種類のマウンドが区画割して個々に施工された。

捨石マウンド①: 均し無(作業船からの投石で造成されたままの表面)

捨石マウンド②: 荒均し(出来形管理目標 ± 30 cmの表面)

捨石マウンド③: 機械均し(第二港湾建設局開発の機材で均された表面)

捨石マウンド④: 本均し(出来形管理目標 ± 5 cmの表面)

また, 天端面の出来形計測法としては, 潜水夫によるレベル測量が採用され, 水中スタッフ(直径10cmの円盤付)を用いた30cmピッチでの測定によって, 誤差 ± 1 cm以下の精度の計測が行われた。ただし, 均し無のマウンド①については, 広域での出来形管理測量の迅速な処理を目的に運輸省港湾技術研究所で開発された高精度測量システム(クロスファンビーム型音響測深機)を搭載した測量船上から5mピッチの計測が行われた。この装置は, 超音波の指向角を絞ることにより非常に鋭角な指向性をもたせるとともに, 船体の動揺を自動的に補正するために, 船底の船首尾方向に送波アレー(ピッチング信号で制御)を, 直交する方向に受波アレー(ローリング信号で制御)をそれぞれ配列し, これらの送・受波器のアレーが交わる部分の反射信号からシャープな測深ビームを得るものである。測得されたデータは, 処理ソフトによってヒープ・船位・潮位補正が行われる計測システムとなっており, これ迄の現場を含めた検証結果から誤差 ± 10 cm以下の精度が確認されている。

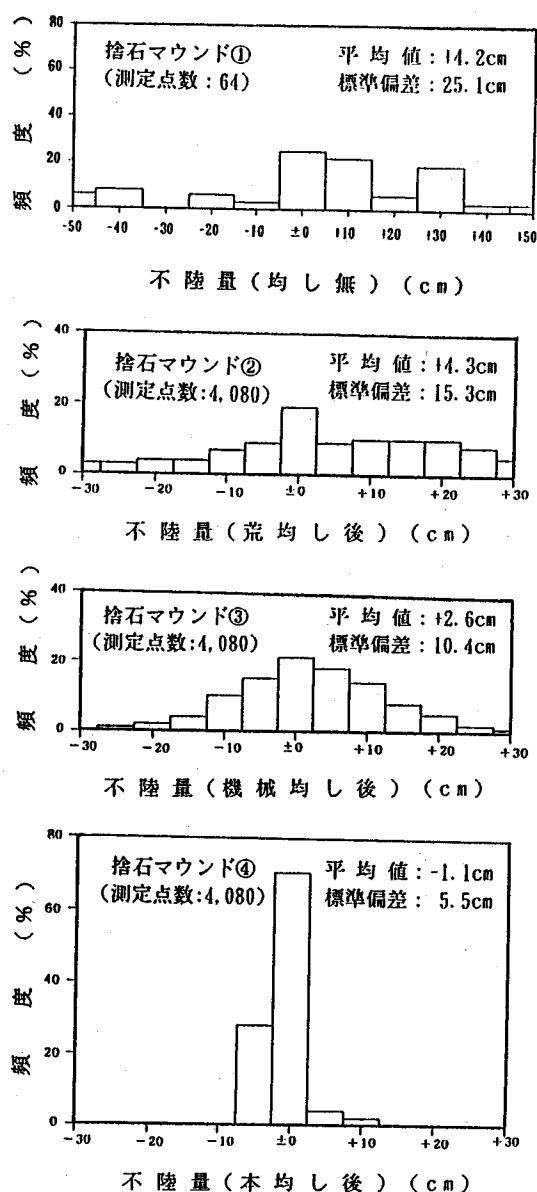


図-1 天端出来形面の鉛直変動分布
(O港: 捨石マウンド①②③④)

図-1は, マウンド①, ②, ③, ④それぞれの表面不陸を, 天端計画高からの鉛直変動量の頻度分布で示したものである。均し作業の施工形態は, (①均し無→②荒均し→④本均し), あるいは(①均し無→③機械均し)のいずれかの手順で進められるが, これを図-1の標準偏差の変化として捉えれば, (①25cm→②15cm→④5cm)あるいは(①25cm→③10cm)の過程を辿ったこととなり, 均し工による表面の凹凸や起伏の平滑化への効果が顕著に表れている。また, 機械均しによる不陸量は, 荒均しと本均しの中間的な出来形となっているが, ± 30 cmを越える測定点も僅

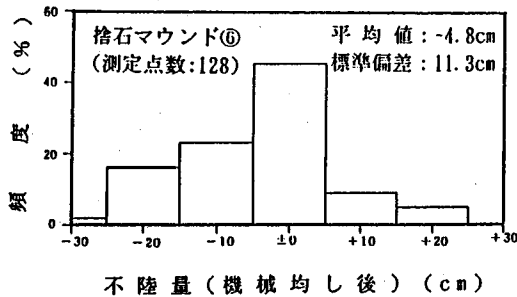
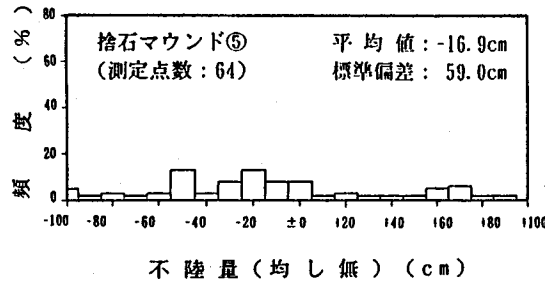


図-2 天端出来形面の鉛直変動分布
(K港: 捨石マウンド⑤⑥)

かばかり(0.3%程度)含まれているので、上部堤体の設計・施工に際して留意する必要がある。

一方K港では、第二港湾建設局開発の大型投石船と均し機による大量・急速施工条件下での天端面の出来形測量が、5mピッチで行われた。マウンド⑥の計測法は、前述の①と同様であるが、⑥では均し機の着座架台(マウンド上に4脚で自立)に取付けられた音響測深機を均し面上で走査させることによって、誤差±5cm以下の精度の計測が行われた。

捨石マウンド⑤: 均し無

捨石マウンド⑥: 機械均し

図-2には、マウンド⑤、⑥表面の鉛直変動量の頻度分布を示している。水深-63m、天端高-26mという巨大マウンドの工事であることを反映して、⑤均し無では、標準偏差で約60cmの出来形となっているが、⑥機械均しの結果11cmとO港での試験成果とほぼ同程度まで整形が施されたことが確認できる。しかし、不陸量が±30cmを越える測定点も僅かばかり(1.6%程度)含まれている。

(2) 表面不陸の空間的変動特性

捨石マウンド表面の空間的な変動の統計的な性質を、空間周波数(以下では、周波数あるいは f と呼ぶ)に対するスペクトルを計算することによって解析し、基本的な形状特性を考察する。この方法は筆者⁶⁾が、捨石やマウンド表面の形状特性についての基礎的な考察を行い、両

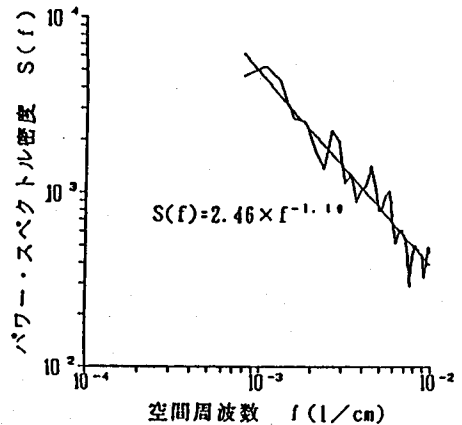


図-3 捨石マウンド③の表面形状の
パワー・スペクトル

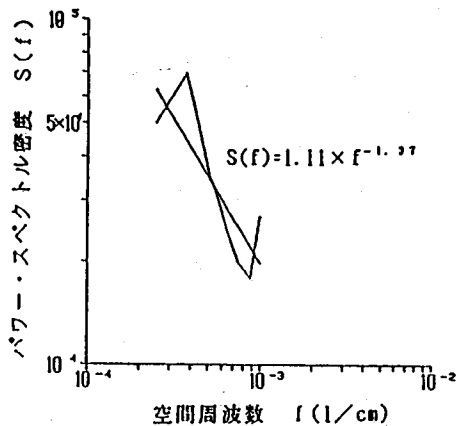


図-4 捨石マウンド⑥の表面形状の
パワー・スペクトル

者間に密接な関連性があることを考察した際に用いた解析手法の1つである。なお、このスペクトル解析に供したデータは、前節と同じくO港およびK港から得られた6種類の天端面の出来形測量値である。

図-3および図-4には、マウンド③と⑥の表面の空間的変動から求めたスペクトルを例示している。図-5には、O港(マウンド①、②、③、④)およびK港(マウンド⑤、⑥)のスペクトルを一括して示している。各図とも、周波数を横軸に、スペクトルを縦軸にとり両対数で描いている。

図-5に見られるように、6種類のスペクトルの測定長や測定ピッチが異なっているので、周波数の範囲はかなりずれているが、スペクトルのレベルは、O港とK港のいずれにおいても均し無(①、⑤)が相対的に最も高く、

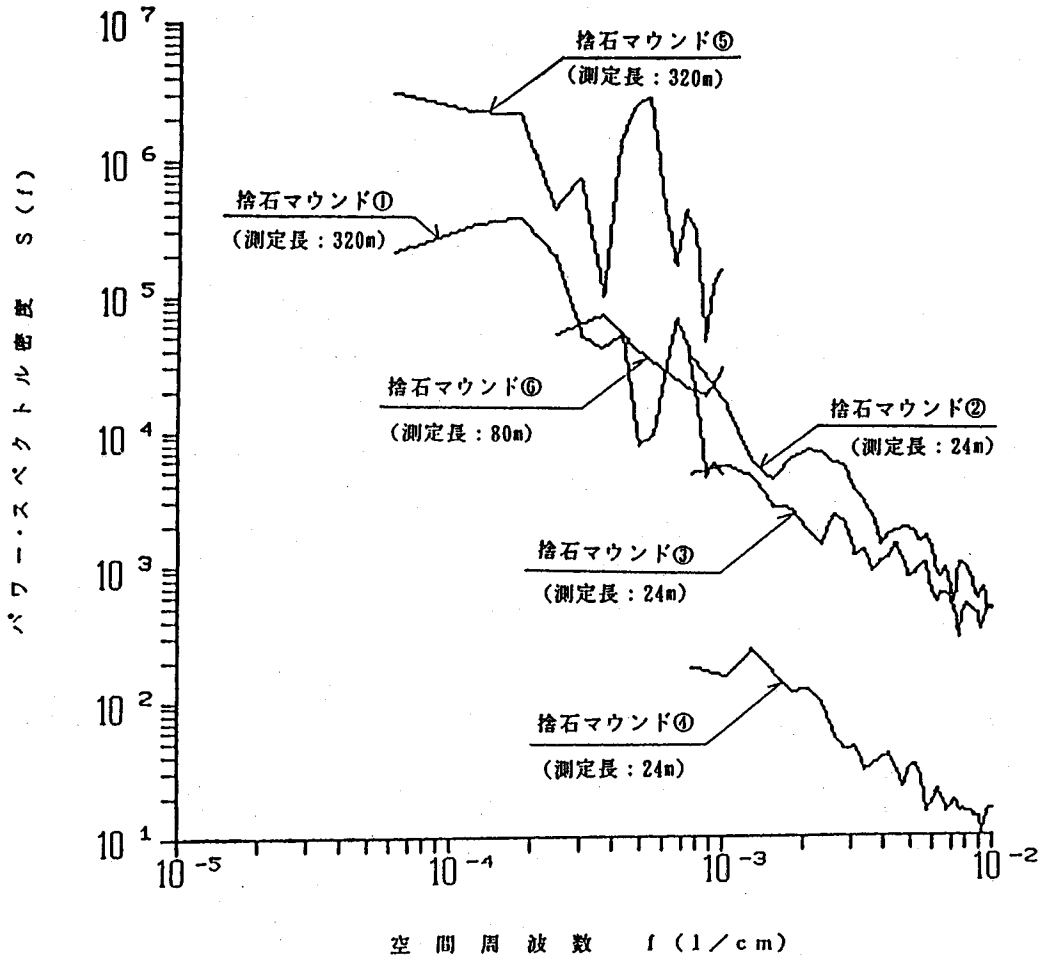


図-5 捨石マウンド①～⑥の表面形状のパワー・スペクトル

均し作業の施工順序(①→②→④, ①→③, ⑤→⑥)に従って低くなっている。このレベル差は、各均し出来形面の鉛直変動量の相違に起因している。

また、各スペクトルはいずれも右下がりの傾向を示している。ただし、均し無のマウンド①および⑤、特に大水深域での工事である⑤においては、前述したデータの測定誤差によると推定されるスペクトル変動のバラツキとともに、高周波数域に比較的高レベルのスペクトルのピークが見られる。これは捨石マウンドを可能な限り平坦に築造するために、大型(1,000m³積)底開式投石船からの直投入を60～30mピッチで、適宜現場調整しながら施工したことが影響しているものと推察される。もし、移動平均法(パルゼン・ウィンドウ等)による平滑化処理をすれば、よりなめらかな①および⑤のスペクトルを求めることができるが、6種類のスペクトルを相互比較するのが本節での主目的であることから、こうした平滑化

処理をせずに描いている。

そこで、図-5に示したマウンド①～⑥の周波数とスペクトルのそれぞれの対数から、多少のバラツキはみられるけれども最小二乗法によって回帰式($S(f) = \alpha \times f^{-\beta}$)を求めてみた。図-3および図-4には、計算された両対数回帰直線も合わせて描いている。

ここで、スペクトル勾配(回帰式中のベキの指数 β)のもつ意味に着目すれば、もしも表面の変動が全くランダムならば、周波数に対して無相関のはずだから、その時のスペクトルは白色(勾配がゼロの横軸に平行な状態)で、いずれの周波数成分に対しても同レベルのスペクトルをもつ)でなければならない。一方、サインカーブのような規則性をもっているならば、ある周波数に対する強い自己相関性を有しているので、そのスペクトルは縦軸に平行な状態(勾配が無限大)となるはずである。しかし、今回の解析結果からみて、マウンドの表面形状には両者の

表-1 捨石マウンドの表面不陸の形状パラメータ

施工形態	O港			K港		
	マウンドNo.	β値	D値	マウンドNo.	β値	D値
均し無	マウンド①	1.57	1.72	マウンド⑤	1.66	1.67
荒均し	マウンド②	1.46	1.77	—	—	—
機械均し	マウンド③	1.10	1.95	マウンド⑥	1.37	1.82
本均し	マウンド④	1.25	1.88	—	—	—

中間的な性質が潜在しており、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となっている。そして、この規則性あるいは自己相関性の度合を表わす指標が、スペクトルの勾配であるβ値の大小と考えられ、βが小さい程ランダムな形状パターンをした表面であると言えよう。また、スペクトルが負の勾配(右下がりの傾向)をもつということは、波長の長い凹凸成分ほど変動量が大きい(卓越した)形状特性をしていることになる。

表-1には、6種類のマウンドから求めた解析結果を一覧にして示している。表中に記載しているD値とは、マンデルブロが18年前に発表したフラクタル理論^{7)、8)、9)}において、対象とする複雑な形状を数値化して表現する際に用いられる、フラクタル次元と呼ばれるパラメータである。フラクタルとは、積乱雲や海岸線の形状、山の稜線の起伏や河道網のような、外見上は何ら規則性や代表的な(卓越した)単位長をもたない自然界の物に共通した幾何学的性質である、容易に接線の引きようがなく、微分が定義できないような複雑な形状を、数学的に取り扱うために生み出された統計幾何学理論である。この新しい理論の導入を試みるのは、フラクタルの概念が極めて理論的かつ汎用性の高いものであること、および本章で考察するマウンド表面の不陸特性を考慮した形状設定のためのシミュレーションに活用し得るからである。

解析結果からフラクタル次元を求める方法¹⁰⁾としては、スペクトルが $S(f) \propto f^{-\beta}$ の型をしているとき、ベキの指数βと曲線のフラクタル次元Dの間に、 $1 < D < 2$ の範囲で次の関係の成立することが数学的に証明されているので、この関係を用いて換算した。

$$D = (5 - \beta) / 2 \quad (1)$$

表-1のD値(β値でも良いが、以下では主にD値で記述する)の変化を、均し工の手順①→②→④、①→③、⑤→⑥)に沿って見て行くと、いずれの場合も徐々に大きくなる傾向を示しているのが分かる。これを、前述し

たスペクトルのレベルが均し精度の向上に従って低下して行くことと合わせて考察すれば、表面の不陸が人力や機械均しによって全体的に小さくなって行く過程では、低周波数の変動成分(波長の長い変動成分)の凹凸や起伏の整形の方がある程度先行して進むことを示唆している。大型の海上作業船を使用した捨石投下によって造成されたマウンド表面には、どうしても大きなうねり状の不陸が発生するが、こうしたマクロな変動の整形が先行するのは、堤体の安定性の確保から見て好ましいことである。

また、本均しや機械均しの方が、均し無や荒均し面よりもD値が大きい(β値が小さい)ということは、相対的に仕上げ面の方がランダムな形状パターンをしていることになる。即ち、図-1と図-2のように、均しという人為的な行為によって不陸変動範囲は小さくなるが、同時にランダム性を強めた表面形状になって行くのであろう。なお、本均しよりも不陸の大きい機械均しのD値が最も大きくなっているが、これは、第二港湾建設局保有の大型均し機による1工程(1回据付)当りの施工能力が測線方向の延長で13mとかなり大きいことに起因して、波長の長い変動成分の整形が短い成分に対して相対的に促進された結果を反映しているものと考えられる。

一方、O港とK港の機械均しのD値を比較すると、それぞれ1.95、1.82と差異がみられるが、いずれのケースも鉛直変動分布の標準偏差では10cm、11cmとほぼ等しい結果が得られている。両現場の最大の相連点は、K港が-63mという類例の無い大水深での巨大マウンド施工であるという点で、均し無段階の標準偏差も60cmと相当に大きくうねり状の変動も顕著であることから、均し工によって個々の凹凸はかなり整形されるものの、波長の長い変動成分であるうねり性の不陸はある程度残存してしまうことが影響していると考えられる。したがって、大水深の機械均しマウンド上に設置されるケーソン堤体の設計・施工にあたっては、慎重な検討が必要と考えられる。

4. 捨石マウンド表面の形状シミュレーション

捨石マウンドの表面形状がもつある程度の規則性あるいは自己相関性を、構造物の設計・施工に反映させるためには、各均し工の出来形を近似している標準的な不陸表面を設定することが重要である。その手法の一つとして考えられるのは、現場から得られた数多くのデータをフーリエ解析し、その結果を統計的に処理して求められるフーリエ係数の確率密度分布を用いて、モンテカルロ法によるシミュレーションを行う方法である。しかし、各均し形状が数学的にそれぞれ独立した波形として取り扱われるので、施工手順に伴う波形変化の相互の関連性を考察するには余り適しているとは言えない。そこで、前章で求めたフラクタル次元(D値)を活用したモデルに

よる、均し毎の不陸特性を考慮した形状設定のためのシミュレーションについて考察を行うこととする。

マンデルブロが開発した、自然界にある山脈やハワイのような火山群島の地表面のリリーフをコンピュータ・グラフィックスによって描く手法^{11), 12), 13)}は、フラクタル次元を変化させると、様々な形状の表現ができることを示している。このモデルは、微粒子のブラウン運動のもつスペクトルが常に $\beta=2$ (式(1)より $D=1.5$)¹⁴⁾であることに着目し、この導関数を非整数階微積分することによって得られる非整数ブラウン関数を導入して構築されている。また、高安¹⁵⁾は、ブラウン運動の導関数が全くランダムな変動(白色スペクトル)を1階積分したものであることを示している。

こうした微積分(非整数階を含む)という数学的な取り扱いと、フラクタル次元を変化させることとの理論的な斉合性については次のように理解できる。今、鉛直変動値 $g(x)$ 、周波数 f としてフーリエ変換 $F(f)$ を求めると、

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{-2\pi f x i} dx \quad (2)$$

であり、この $F(f)$ と $g(x)$ のスペクトル $S(f)$ の間には、

$$\frac{1}{\Delta x} |F(f)|^2 = S(f) \propto f^{-\beta} \quad (3)$$

の関係がある。なお、 Δx は形状波形の継続長さである。

ここで、関数 $F(f)$ の n 階微分を定義すれば次の通りであり、 n が整数、非整数を問わず成立している。

$$\frac{d^n}{df^n} F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (-2\pi f i)^n g(x) e^{-2\pi f x i} dx \quad (4)$$

式(3)と式(4)から、 n 階微分されたスペクトル $S^{(n)}(f)$ と f の間のべき乗の比例関係を求め、式(1)によってフラクタル次元 D に変換すれば、次のような関係が得られる。

$$S^{(n)}(f) \propto f^{-\beta+2n} = f^{-(5-2D)+2n} = f^{-(5-2D^{(n)})} \quad (5)$$

$$D^{(n)} = D + n \quad (1 < D, D^{(n)} < 2, n; \text{非整数}) \quad (6)$$

したがって、 $n > 0$ ならば $D^{(n)} > D$ であるから、微分をするとフラクタル次元は大きくなり、元よりも複雑な(ランダムな)波形が得られ、逆に $n < 0$ ならば $D^{(n)} < D$ であるから積分をすると小さくなり、波形は平滑化(規則化)されることが分かる。また、 D 値を連続的(線形的)に変化させることと、非整数階の微積分をすることが数学的に等値であるという都合の良い性質を活用すれば、いろいろな複雑さ度合をもつ形状のシミュレーションが、 D のみをパラメータとして組み込んだ非整数ブラウン運動モデルによって行えることとなる。即ち式(2)と式(3)で $\beta=2$ としたのがブラウン運動モデルであり、式(1)と式(6)を用いて拡張したのが非整数ブラウン運動モデルであるから、これをプログラミングして、不陸特性を考慮した形状設定のための二次元シミュレーションを行った。計算ケースは、3章で得られた施工形態毎の鉛直変

動範囲と D 値を考慮して、 $\text{I}(\pm 50\text{cm}, D=1.7)$ 、 $\text{II}(\pm 30\text{cm}, D=1.8)$ 、 $\text{III}(\pm 20\text{cm}, D=2.0)$ 、 $\text{IV}(\pm 10\text{cm}, D=1.9)$ の4ケースとし、**図-6**に結果をグラフで示した。

図-6の各グラフのもつ周波数とスペクトルの間には式(1)と式(3)の関係があるので、そのスペクトル勾配($\beta=5-2D$)はそれぞれ1.6, 1.4, 1.0, 1.2となっている。即ち、ケース $\text{I} \rightarrow \text{II} \rightarrow \text{IV} \rightarrow \text{III}$ の順に徐々にランダム性を強めた曲線と言える。そこで、これらの曲線に含まれている個々の成分波形に余りとりわれずに、波の連なりによって描き出された波形パターン(ここでは表面形状)の複雑さ度合の違いを感覚的に捉えてみる。いずれのグラフからも、何らかの規則性のようなものは余り感じられず、一見ランダムな波のように見えるが、 D 値が最も小さい I のケースと、相対的に大きい III 、 IV のケースを比較して分かるように、前者にはうねり状の成分波がより強く含まれていることが窺える。

また、 I のグラフを見ていると、どこかの相当急峻な山の稜線を連想させるような形状をしているのに対して、他のグラフは変化が有り過ぎて、海の波や地震波に似たイメージを感じさせる。マンデルブロは¹¹⁾、自然な地形を連想させるグラフが $D=1.2$ 程度で描けると述べているが、人工的に築造された捨石マウンドの表面は、一般の地形よりもかなり複雑な形状をしていると言える。

これらのグラフが、実際の出来形表面の不陸形状をどの程度近似しているのかを調べるために、**図-7**に、0港における4種類(①均し無、②荒均し、③機械均し、④本均し)のマウンド表面の測量結果をグラフで示した。

①のデータだけは測定ピッチが5mと大きいため、グラフのきめの荒さが目立っているが、① \rightarrow ② \rightarrow ④、① \rightarrow ③と均し精度の進行過程を視認することができる。

図-6と**図-7**のグラフの $\text{I}-①$ 、 $\text{II}-②$ 、 $\text{III}-③$ 、 $\text{IV}-④$ を、それぞれの鉛直変動範囲(ただし、マウンド①、②、③、④については便宜上(標準偏差 $\times 2$)で表示、単位cm)および D 値で相互比較すれば、 $(\text{I}50-①50.2)$ 、 $(\text{II}30-②30.6)$ 、 $(\text{III}20-③20.8)$ 、 $(\text{IV}10-④11.0)$ および $(\text{I}1.7-①1.72)$ 、 $(\text{II}1.8-②1.77)$ 、 $(\text{III}2.0-③1.95)$ 、 $(\text{IV}1.9-④1.88)$ となっている。したがって、これらの4組のグラフはスペクトル特性において同程度の近似性を有していると言える。また、4組のグラフをパターン認識的に捉えて相互比較しても、似通った形状(波形)であることが分かる。なお、シミュレーションからは、ある D 値(スペクトル特性)をもつグラフが無数に得られるので、**図-6**以外のグラフも作成し**図-7**と比較したが、いずれの形状パターンにおいても同程度の近似性を確認することができた。

形状シミュレーションの目的は、各均し工の出来形を近似した不陸表面を設定し、構造物の設計・施工に反映させることである。具体的には、与えられた D 値から計算した複数個のグラフを標準的な表面形状と捉えて、そ

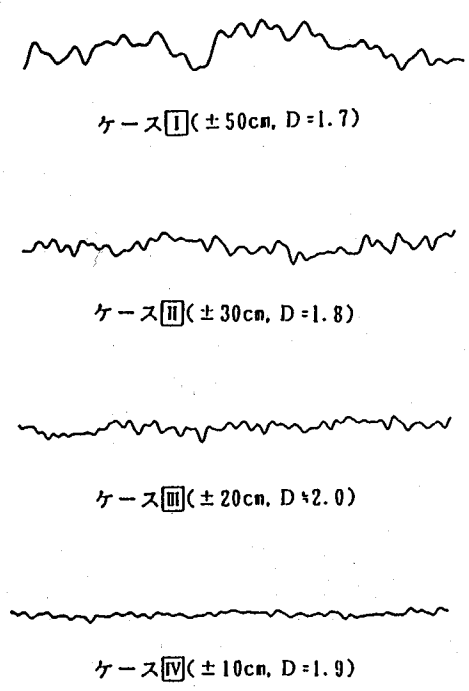


図-6 捨石マウンドの近似表面形状(二次元)
(シミュレーション・ケースⅠ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ)

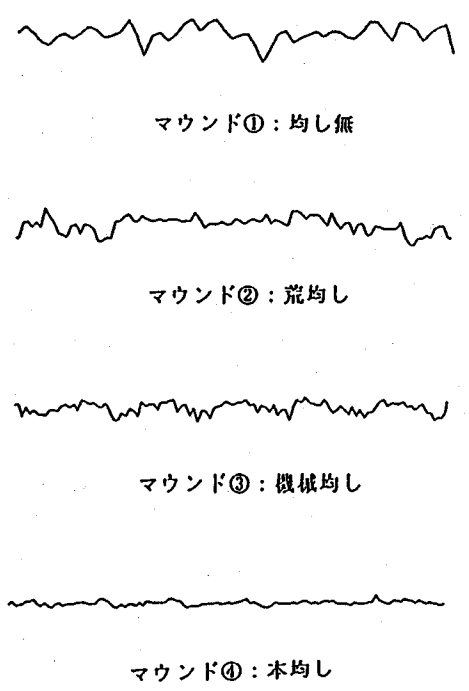


図-7 O港の捨石マウンドの出来形表面形状
(①均し無, ②荒均し, ③機械均し, ④本均し)

の上に設置されるケーソン堤体を構成する版や壁等に発生する断面力を、有限要素法による解析⁵⁾等から求め、最も厳しい(安全側の)結果を与えるケースに対するチェックに基づいて、最終構造の決定を行うことが望ましいと考える。また、堤体底面とマウンド間に生じる滑動抵抗力に及ぼす表面形状の影響についても、既往の実物大による滑動試験結果⁶⁾等と、D値から得られる標準的な表面形状との統計的な比較評価に基づいた設計・施工を行うことが望ましいと考える。ただし、施工分類(均し無, 荒均し, 機械均し, 本均し)毎のD値,特に機械均しについては、施工条件や使用機材の構造・性能によってバラツキが生じる可能性があるため、今後のより多くの現場データの収集および解析に基づいた、適切なD値の設定が必要であろう。

なお、より合理的かつ精緻な検討のためには、必要に応じて三次元シミュレーションを行う必要があるが、曲面の形状の等方性を確保しなければならない。このために、式(1)に代えて次の関係を満たすフラクタル次元が用いられる¹⁷⁾。

$$D' = (7 - \beta) / 2 \quad (7)$$

ただし、 $2 < D' < 3$ の範囲で成立することが証明されている。これは、曲面のグラフのD'値が、断面のD値より一次元高い、 $D' = D + 1$ の関係にあるからである。図-8に、

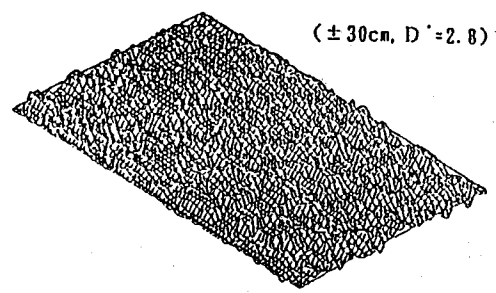


図-8 捨石マウンドの近似表面形状(三次元)の一例

$D' = 2.8$ として計算した結果の一例を示している。

5. 結論

本研究は、捨石マウンド表面の不陸形状を、各種の均し工法毎に統計幾何学的手法により解析し基本的な特性を体系的に考察するとともに、それぞれの不陸特性に対応した近似表面形状の設定を行ったものであり、その結論は次の通りである。

- (1) 捨石マウンドの表面不陸の統計的な性質を、施工

形態に応じて考察した。

①均し無→荒均し→本均し

現場の出来形測量データに基づく鉛直変動の頻度分布および空間的変動のパワー・スペクトル解析を行った結果、人力の均しによって表面不陸の平滑化が効果的に進行すること、並びにいずれの表面も完全にランダムな形状ではなく、ある程度の規則性あるいは自己相関性もっているが、手均しによって徐々にランダム性を強めて行くことを確認した。

②均し無→機械均し

現場データに基づく同様の解析から、機械均しによって表面不陸は荒均し以上に整形され、かつそのランダム性の進行(パワー・スペクトルの両対数勾配の低下)も顕著であることを確認した。しかし、機械均しの適用される大水深海域では、均し無の段階での鉛直変動が大きく、うねり状の不陸も相当含まれているため、整形後もある程度のうねり性状が残存する傾向が強いことが分かった。

(2) 表面不陸のパワー・スペクトル解析を、より汎用性の高い指標であるフラクタル次元に換算すれば、均し毎の不陸特性の連続的な変化を考慮した形状設定のためのシミュレーションに活用できることが分かった。

(3) フラクタル次元をパラメータとして含む非整数ブラウン関数を用いた二次元シミュレーションを行い、現場での出来形表面の不陸形状と相互比較した結果、良好な近似性が確認された。また、今後は各均し工、特に機械均し表面を近似した複数個の標準的な不陸形状を設定し、構造物のより合理的かつ精緻な設計・施工を行うことが望ましいことを指摘した。

参考文献

- 1) 例えば, Kobayashi, M., Terashi, M. and Takahashi, K.
: Bearing Capacity of a Rubble Mound Supporting a Gravity
Structure, *Report of Port and Harbour Research Institute*,

- Vol.26, No.5, pp.215-252, 1987.
2) 奥出 律・山谷弘幸・松本 茂: 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 4, pp. 131-171, 1982.
3) 運輸省港湾局編集: 港湾工事共通仕様書, (社)日本港湾協会, pp. 196-197, 1994.
4) 外山進一: ならし精度を考慮した底版の設計, 港湾技研資料, No. 512, 33p., 1985.
5) 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, 35p., 1981.
6) 口田 登: 捨石および捨石マウンド表面の形状特性に関する考察, 土木学会論文集, No. 516/VI-27, pp. 207-215, 1995.
7) B.B.Mandelbrot: *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman and Company, New York, 1983.; 広中平祐監訳: フラクタル幾何学, 日経サイエンス, 467p., 1985.
8) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, 186p., 1986.
9) 高安秀樹・本田勝也・佐野雅巳・田崎晴明・村山和郎・伊藤敬祐: フラクタル科学, 朝倉書店, 258p., 1987.
10) 文献8)参照, pp. 23-25
11) 文献7)参照, pp. C10-14
12) 文献7)参照, pp. 352-353
13) B.B.Mandelbrot: Fast Fractional Gaussian Noise Generator, *Water Resources Research*, Vol.7, No.3, pp.543-553, 1971.
14) 文献7)参照, pp. 350-351
15) 文献8)参照, pp. 149-152
16) 例えば, 森平倫生・木原 力・堀川 洋: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341, 1978
17) 文献8)参照, pp. 24-25

(1995.8.4 受付)

A STUDY ON CONFIGURATION PROPERTY OF LEVELING SURFACE OF RUBBLE MOUNDS AND FRACTAL MODEL SIMULATION

Noboru KUCHIDA

The configuration properties of the surface of rubble mounds were studied by the analytical methods based on statistical geometry called "Fractal". The followings became clear after the investigation by the surface relief data in actual fields. (1) It's possible to classify into some noticeable patterns according to rubbles leveling methods with different work conditions. (2) It become easier to make parameterization of incomplete random properties such as leveling surface by introducing a theoretical factor called "fractal dimension". (3) It is possible to create several approximate patterns by Brown motin model simulation with non-integral number.