

個別要素法によるケーソン式防波堤の挙動解析

Application of DEM to Deformation Analysis for Caisson Type Breakwater

中瀬仁*, 宮田正史**, 長尾毅***, 本田中****, 興野敏也*****, 安田勝則*****, 菅野高弘*****
Hitoshi NAKASE, Masafumi MIYATA, Takashi NAGAO, Ataru HONDA, Toshiya KYOUNO,
Katsunori YASUDA, Takahiro SUGANO

*工博 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)
**工修 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
***工博 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
****工修 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)
*****東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)
*****東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)
*****工博 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

In this study, we conducted a series of numerical simulations for caisson type breakwater that is subjected to an external wave loading. In order to investigate the overall behavior of the breakwater and the load support mechanism of a rubble rock foundation, we employed a two-dimensional distinct element method. In this paper, we show the modeling method of this system and the parameter determination procedure for the simulations. Based on the simulation results, we report some preliminary results on the load support mechanism and the breakwater behavior.

Keywords: *distinct element modeling, caisson type breakwater, rubble foundation, load support mechanism*

1. 緒言

港湾施設には数多くの種類と形式があるが、混成式防波堤や重力式係船岸に代表される重力式構造物は、我が国で最も普及しているものの一つである。その構造様式は、図-1 に示すように石材で人工的に構築したマウンド状の基礎(以下マウンドと称す。)の上に、ケーソン等を据え付けて本体とするものである。図に示す構造は、ケーソン式防波堤と呼ばれている。

マウンドの表面については、マウンドに上載する鉄筋コンクリート製のケーソン底板(スラブ)に過大な集中荷重が作用しないように、従来から潜水土による入念な均し作業が行われており、その均し精度(マウンド表面の凹凸程度)は $\pm 5\text{ cm}$ と定められている¹⁾。しかしながら、近年の潜水土の不足・高齢化、潜水作業の危険性、および工期短縮による建設コスト削減が求められていること等の理由により、国土交通省では、現行のマウンド築造基準である均し精度 $\pm 5\text{ cm}$ を緩和し、マウンドの施工効率を向上させる方向で検討を進めている。

マウンドの均し精度(凹凸量)を緩和した場合、ケーソン底板に対して、これまで以上に不均一かつ集中的な接触荷重が作用することが想定される。このためケーソン

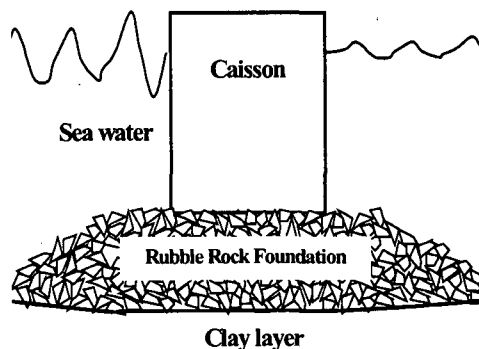


図-1 ケーソン式防波堤の構造

ン底板に作用する曲げモーメント等の断面力が増加する可能性がある²⁾。また、マウンド表層付近の捨石同士の噛み合わせが悪くなり、ケーソンの滑動抵抗の減少を誘引する可能性もあると言われている。従って、均し精度緩和の検討にあたっては、均し精度がケーソン支持構造およびケーソン防波堤全体系挙動に及ぼす影響を適確に評価する必要がある。

マウンドによるケーソン支持機構については、筆者らが別途実施した載荷実験の結果^{3,4)}から、その詳細が明らかになってきた。実験の結果、マウンドによる荷重支持

は、極めて不均質かつ離散的なものであり、現行設計法で想定しているケーソン底版に作用する線形分布荷重とは全く異なる支持機構であった。また、マウンドの表面均しを専門とする潜水士によって建設された「本均し」及び「荒均し」のマウンドのケーソン支持機構の相違は認められなかった。このように実験結果から、ケーソン支持機構の特性が明らかになってきたが、マウンド表層の凹凸程度の相違がケーソン支持機構に及ぼす影響については、いまだに未解明な部分が多いといえる。一方、ケーソン式防波堤の全体系挙動については、マウンドとケーソンの両者を抱合した形で、その大変形挙動を精度良く再現することができる解析手法は、著者らが知る限りほとんど無い。

ケーソン支持機構およびケーソン式防波堤の大変形メカニズムの検討を可能とする解析手法として、個別要素法がある。個別要素法は、個々の粒状体の準静的・動的な挙動解析が可能であるため、マウンドの粒状性を考慮できる。また、個別要素法は、もともと大変形解析を目的として開発されているため、ケーソン式防波堤の全体系の大変形挙動についても解析・検討が可能である。従って、ケーソン式防波堤の挙動解析に個別要素法を適用することにより、マウンドによるケーソン支持機構とケーソン防波堤の全体挙動の両者について、非常に有用な情報が得られると考えられる。

以上の背景のもと、本論文では、ケーソン式防波堤の全体系挙動およびマウンドによるケーソン支持機構について新しい知見を得ることを目的として、2次元個別要素法を用いたケーソン式防波堤の挙動解析を実施する。解析は、実大規模のケーソン式防波堤の建設過程および波浪を受けて変形する過程を再現するものである。本論文は、個別要素法によるケーソン-マウンド系のモデル化手法、解析パラメータの設定方法、ケーソン式防波堤の挙動解析の検討結果、解析結果と現行設計法⁵⁾との比較を行っている。

2. マウンドの支持機構に関する大型模型載荷実験

本章では、解析パラメータの設定に必要な事項についてのみ、実験方法および実験結果を示す。なお、実験の詳細については、別途文献を参照されたい^{3),4)}。

2. 1 実験装置および実験方法

マウンドのケーソン支持構造を明らかにするために、実際に港湾工事で使用される捨石を用いた室内大型載荷実験を実施した(写真-1、図-2)。捨石の質量は、約1kg~200kg程度であった(図-3)。これらの粒径は短径の最小値が約10cm程度、長径の最大値が約80cm程度であった。マウンドの層厚は約3.5mである。実験は、ケーソン底版の一部分を模擬した載荷ブロック(載荷面2.5m×2.5m)をマウンドに載荷するものである。載荷は2機の油圧ジャッキを用いて行い、載荷ブロック底面に作用する鉛直応力が、ケーソン中詰め完了時(約200

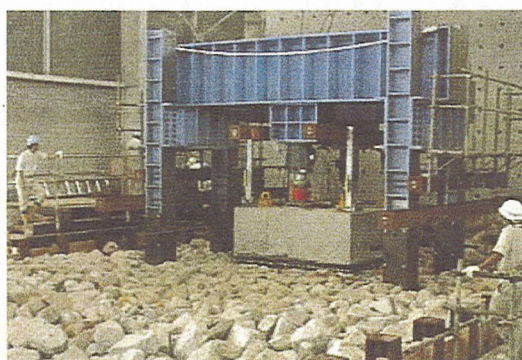
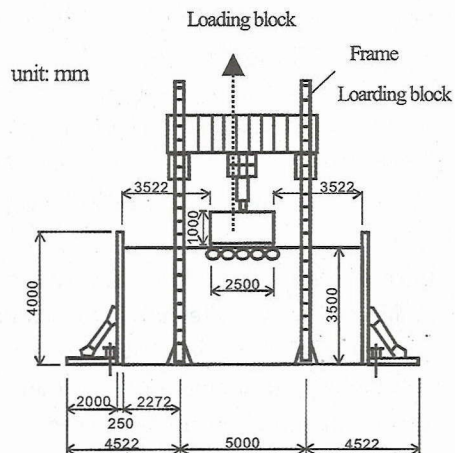
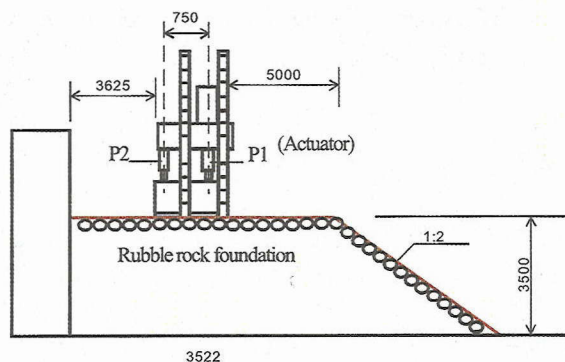


写真-1 載荷実験の様子



(a) 前方断面図



(b) 側方断面図

図-2 載荷実験の断面図

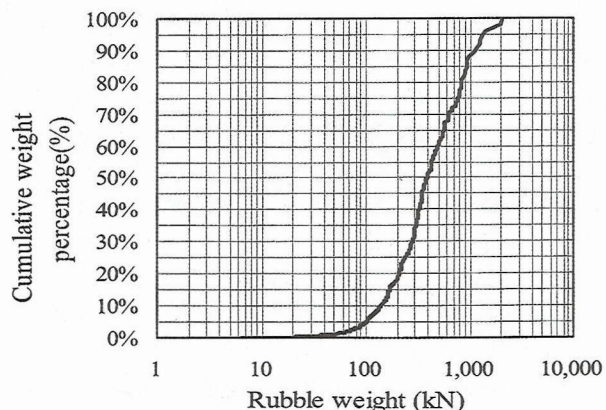


図-3 捨石の重量加積曲線

kN/m²)に相当するまで鉛直载荷した。それ以降は、実際の波圧がケーソン側壁に作用した状況を想定して、若干の偏心荷重を作用させ、(ブロック底面に作用する)鉛直応力が約1000 kN/m²になるよう载荷した。

2. 2 マウンドの標高特性および沈下特性

マウンド表面は、実際の潜水土による均し作業により作成した。本実験では、「本均し」および「荒均し」の2種類の均し精度について载荷実験を実施した。通常、現地においてケーソンをマウンドに設置する際に、ケーソンがマウンドと直接接する領域については、「本均し」と呼び、マウンド表面の標高誤差が±5cm以内になるように仕上げられる。一方、ケーソンと接しないマウンド表面層部分においては、「荒均し」と呼ばれ、標高誤差が±30cmとなるように仕上げられる。

潜水土による本均しの作業方法は、一般的に以下のようである。はじめに、海上のガット船から捨石を直接投入し、マウンドの設計天端高さ付近に捨石が積み上がった時点で投入を止める。その後、設計天端面から+5cmの上方にガイド用のロープを張り巡らす。通常、ロープの間隔は5m~10m 間隔である。潜水土のヒアリング結果によると、潜水土が本均し作業をする際に、特に気を付ける点が2点あることがわかった。ひとつは、大きな石を置く向きである。大きな石を置く際、潜水土は石の平らな面が、ケーソン底版面と平行になるように注意して石の方向を決める。もうひとつは、大きな石の安定性である。潜水土は、大きな石を水平にすることに加えて、大きな石が周辺の石と強固に噛み合うように、相対的に小さな石を大きな石の下部や大きな石同士の間、うまく組み合わせて配置する。これらの石同士の噛み合わせを向上させるための石は、間詰め石と呼ばれている。これらの本均し作業により、マウンド表面は、突起が少なく、かつ表面付近の捨石は安定した構造となる。なお、この方法以外にマウンドの平坦性を確保する方法がある。その方法は、同じく小粒径の石(目つぶし石と呼ばれる)を利用し、石同士の噛み合わせを考慮せず、単純に捨石間のくぼみに小粒径の石を入れる方法である。

一方、荒均しの場合においても、基本的には同じ様な手順で建設される。すなわち、大きな石の平らな面を、可能な限り水平に配置をする。しかしながら、荒均しの場合には、+30cmの誤差まで許容されるため、大きな石の水平性には余り時間をかけない。また、小さな石を用いた間詰め作業も行わない。

ここで、今回の実験における本均しと荒均しのマウンド表面層の標高分布特性を頻度分布として図-4に示す。マウンド標高は、先端に直径2.5cmの円盤を設置したスタッフを用いて、10cm 間隔で計測した。図より、潜水土により建設された本均しと荒均しのマウンド標高分布形状は、本均しの方が標高分布の幅がやや狭いが、大きな相違は見受けられないことがわかる。荒均しについては、±30cmの標高差を許容するが、潜水土は本均しとほぼ同じ手順でマウンドを作成するため、±30cmの標高差

を実際に作成することは無いようである。なお、本均しの場合において、-5cmより低い標高が存在するが、これは今回使用したスタッフ先端の大きさが、通常現地で使用されているスタッフ先端(直径7cm)より小さいことに起因すると考えられる。スタッフ先端面積が小さいため、マウンド表面に多数存在する捨石と捨石との間にある窪みにスタッフが入り込むためである。

最後に、载荷ブロック底面の平均鉛直応力と载荷ブロック中心点における沈下量の関係を図-5に示す。図から、载荷ブロックの沈下量は、鉛直応力の増加とともに線形的に増加することがわかる。本均しと荒均しマウンドの沈下特性において、大きな相違は見受けられなかった。除荷時については、処女载荷時に比較して、剛性が非常に大きくなる挙動を示した。この载荷ブロックの鉛直応力と沈下量の結果をもとに、3章において個別要素法の解析パラメータを設定する。

3. 個別要素法による载荷実験のシミュレーション

本章では、個別要素法によるケーソン-マウンド系のモデル化手法について検討し、材料定数等解析パラメー

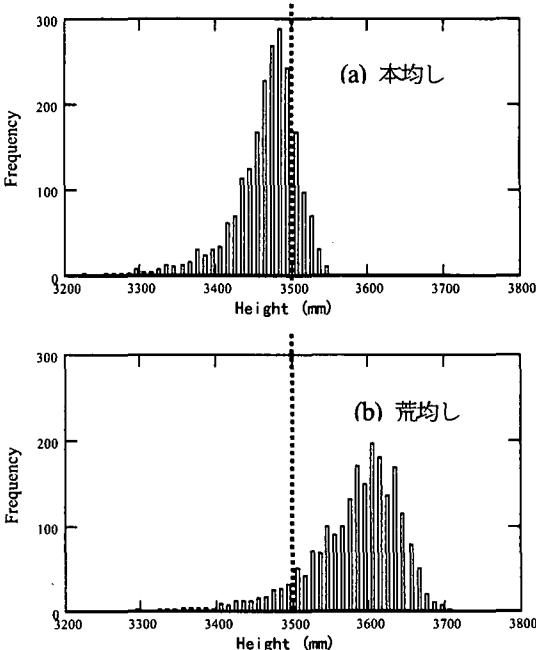


図-4 マウンド標高の頻度分布

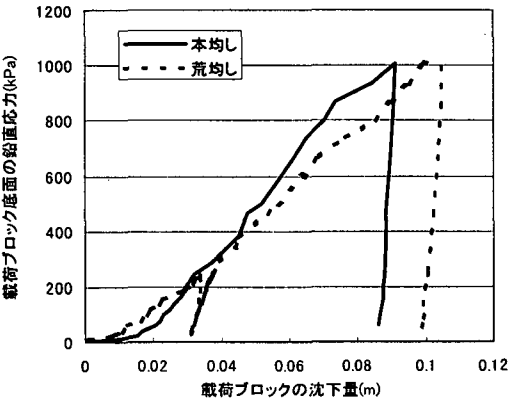


図-5 载荷ブロックの沈下量と鉛直応力の関係

タを設定することを目的として、第2章で述べた載荷実験のシミュレーションを実施する。ここで定められたパラメータを第4章で述べる実大スケールのケーソン式防波堤の変形解析に用いる。

3. 1 個別要素法の改良

(1) 粒子接点におけるモーメント伝達

個別要素法における要素（粒子）の形状については、様々な形が提案されているが、2次元要素の場合、円形要素が使用される事例が圧倒的に多い。これは、円形要素の場合、要素同士の接触判定が簡便であり計算時間を短縮できるためである。しかしながら、今回の解析対象である碎石などの土質材料を円形要素でモデル化する場合、実際の大きなせん断強度（内部摩擦角）を再現できないことが知られている。例えば、円形要素を用いてせん断ねじり試験をモデル化した個別要素法解析の結果⁶⁾によると、円形要素に一般的なレベルであると考えられる摩擦係数を与えた場合においても、内部摩擦角は25度程度にしかならない。この理由として、実際の碎石同士の接触は、1点のみの接触ではなく、複数の接触点によることにより、粒子間でモーメントが伝達されていること、また、凹凸の大きな粒子同士の場合、球形・円形粒子と比較すると、噛み合わせ効果が発揮されやすいこと等が挙げられる。

円形要素を用いた場合において、十分なせん断強度が得られるように、要素間の接点でモーメントを伝達する方法が幾つか提案されている⁷⁾。これらの方法によると、要素間の接点でモーメントが伝達され、上で述べた実際の接触状況に応じたモーメント伝達や粒子形状に起因する噛み合わせ効果を考慮することができる。本検討ではSakaguchi⁸⁾の提案したころがり摩擦による方法を用いる。

図-6に、ころがり摩擦のモデル図を示す。このモデルによると、要素同士は面的に接触していると仮定される。転がり摩擦は、要素が他の要素や境界と面で接触することによる回転に対するモーメント抵抗を表し、その大きさは次式で表される。

$$Mr = R \times Fn \times \tan(\theta_r) \cdots (1)$$

ここに、 Mr ：転がり摩擦（回転抵抗モーメント）、 R ：要素半径、 Fn ：要素間力半径方向成分、 θ_r ：転がり摩擦角である。

別途実施した個別要素法によるせん断試験の結果⁶⁾、転がり摩擦角 θ_r を変化させることにより、粒状体の任意のせん断強度を与えられることが確認されている。

(2) ケーソンのモデル化に用いる多角形要素

前述したように、個別要素法で用いる要素は、通常円形なので、ケーソン等の構造物をモデル化するには、別途工夫が必要である。ケーソン部分のモデル化において、例えば図-7に示すような3種類のモデル化の方法が考えられる。

①の方法は、対象とする物体の形状をそのままモデル

化する方法⁹⁾である。②の方法は、円要素を間隙パネと呼ばれるもので連結する方法¹⁰⁾である。③の方法は、円要素と辺要素を用いて任意形状を表現する方法である。この中で、筆者らは③の方法が、今回のケーソン式防波堤の解析に対して最も適用性があると考えている。

①の方法は厳密であるが、他の要素や境界との接触判定アルゴリズムが煩雑になり、汎用性に欠けるモデル化手法である。②の方法を用いると、この問題は避けられるが、ケーソン表面は円形要素の一部が外面にむき出しになるので、平滑な面をモデル化できない。そのため、ケーソン底面（平面）とマウンドとの境界のモデル化には適していない。③の多角形要素は、多角形の隅部に円形要素を配置し、これらを互いに間隙パネで連結して物体の骨格を生成し、隅部の円形要素の外縁を辺要素と呼ぶ境界で外部を区画するモデル化手法である。円形要素と辺要素のみを使用しているため、基本的な接触判定アルゴリズムをそのまま利用でき、かつ任意形状の剛体を簡単にモデル化できる利点がある。このモデルは、辺要素や隅部の円形要素に接触した他の要素や境界からの荷重を等しく隅部の円形要素に分配することにより、個別要素法の計算アルゴリズムに組み込まれる。この多角形要素を用いることにより平滑な表面を持つモデルでケーソンを表すことができる。本章および4章における解析では、いずれもケーソンは③の多角形要素モデルを用いている。

3. 2 載荷実験のシミュレーション

(1) 解析モデルの概要

解析モデルは、はじめに700個程度の円形要素を重力下において自由落下させ、所定のマウンド形状に合うように整形する。要素の大きさは、半径0.155mのものが σ_{50} の1/2に相当する。均等係数は1.5である。次に、マウンドの平

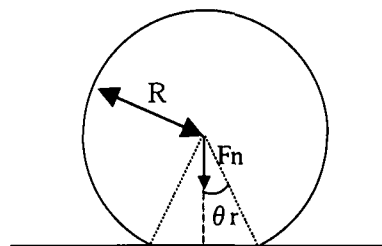


図-6 面接触する要素と転がり摩擦角 θ_r

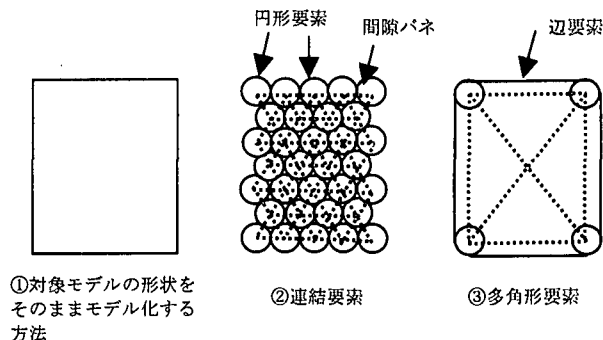


図-7 ケーソン等の円形でない物体のモデル化方法

平坦性を再現するために、マウンド表層上方に小粒径粒子を追加配置し、同じく重力落下させる。その後、小粒径を追加した部分を対象に、均し作業を行う。解析におけるマウンドの均し作業の再現方法については、次項で詳しく述べる。図-8に載荷実験の解析モデルを示す。載荷版に対応する部分は、多角形要素を用いてモデル化した。載荷版要素は、その底面がマウンド標高の最高점에合致するように配置し、その後重力落下によりマウンド上で安定させた。実験におけるジャッキによる載荷ブロックの載荷は、載荷版要素を強制的に鉛直方向に変位させることにより再現した。載荷版要素の鉛直下方への速度は、1cm/sを与えた。

(2) マウンド標高特性のモデル化

既に述べたように、実際のマウンド表面の均し作業は、捨石の形状・方向性などを考慮して、細心の注意を払って潜水土により行われている。この均し作業を再現することは、今回の解析では、粒子形状を考慮せず円形要素を用いていること、および解析上、石の噛み合わせなどを考慮した粒子の配置ができないこと等の理由により、不可能である。従って、解析におけるマウンド表面の平坦性をコントロールする何らかのモデル化が必要である。

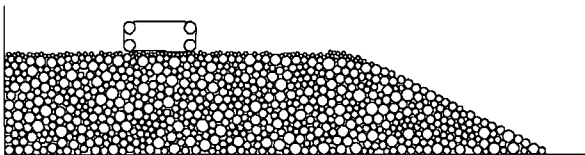
本解析においては、小粒子をマウンド表層部分に追加配置することによりマウンド表面の平坦性をコントロールする方法を選択した。従って、本解析における均し作業は、実際のマウンド建設に照らすと、目つぶし石を利用してマウンド表面の平坦性を確保する作業に相当する。

解析モデルの精度を、マウンドモデル表面の均し状態を実験データに近づけるため、マウンド表面に半径6cm、6.5cm、7cm、7.5cm、8cmおよび10cmの円要素を加えたモデルをそれぞれ作成した。それぞれのモデルについて、図-9に示すようにマウンド表面の要素（上部に露出する部分がある要素）を抽出し、要素表面の標高分布を求めた。実験で得られたマウンド標高と本解析における標高の頻度分布を図-10に示す。解析における標高の分布形状が実験に近いものを選択すると、本均しマウンドとしては半径6.5cmの要素、荒均しマウンドとしては半径7.5cmの要素を用いて整形したモデルが適当であると判断した。

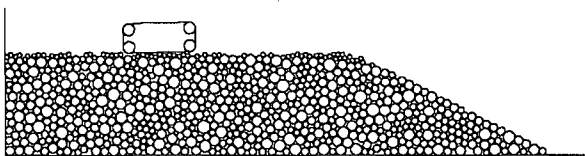
(3) 解析パラメータの決定方法

解析に用いた材料定数および解析条件を表-1に示す。パラメータ設定に当たっては、豊浦砂を対象にねじりせん断試験をシミュレーションする際に用いた材料定数⁹⁾をもとに、試行錯誤によりシミュレーションを繰り返し、実験を良好に再現するよう最終的な材料定数を決定した。具体的には、載荷実験から得られた載荷ブロックの沈下量と鉛直応力の関係に可能な限り近づくようにした。考慮した解析パラメータは、バネ係数、転がり摩擦角およびマウンドモデルの初期間隙比である。図-11に、実験および解析における載荷ブロック鉛直沈下量と平均鉛直応力の関係を示す。処女載荷時の沈下-応力関係を見ると、本均しモデルおよび荒均しモデルの両者において、概ねマウンドの沈下特性を表現していることがわかる。一方、除荷時については、解析のマウンド剛性が実験結果に比較して小さくなる傾向にあった。今回の

解析においては、考慮した解析パラメータのみでは除荷時のマウンド剛性を再現することはできなかった。しかしながら、次章ではケーソン設置時および波力載荷時におけるマウンドの支持構造を観察することを目的とするので、載荷の過程が概ね良好に再現されている表-1に示す材料定数を次章で実施するシミュレーションに用いることにした。



(a) 本均しモデル



(b) 荒均しモデル

図-8 載荷実験の解析モデル

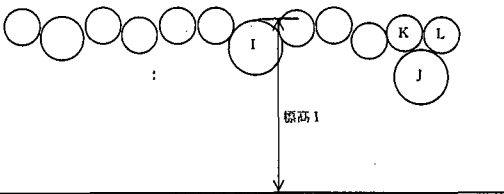
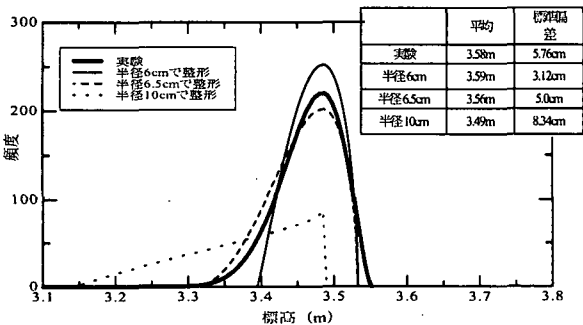
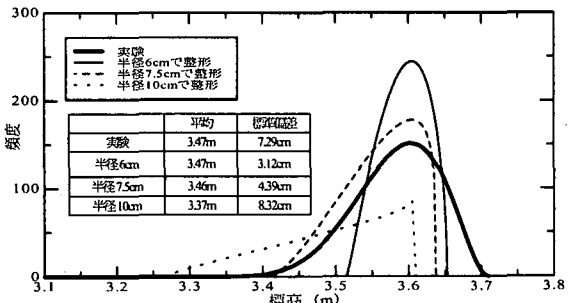


図-9 マウンド表面要素の標高



(a) 本均し



(b) 荒均し

図-10 標高分布の比較

4. 防波堤断面に対するシミュレーション

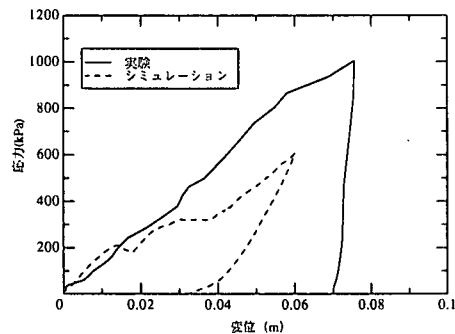
本章では、実大のケーソン式防波堤を対象としたシミュレーションを実施する。シミュレーション結果から、ケーソン着底時およびケーソンに波力が作用した時における、マウンドによるケーソン支持機構、およびケーソン式防波堤の全体挙動について検討する。

4. 1 防波堤のモデル化

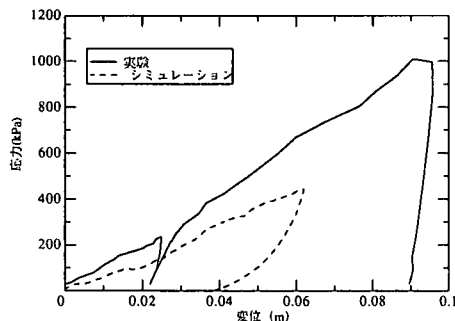
シミュレーションの対象とする防波堤の断面を図-12に示す。個別要素法によるシミュレーションモデル

表-1 材料定数および解析条件

円要素密度		ρ	(kg/m ³)	2400.0
円要素半径(D ₅₀ の 1/2)		r	(m)	0.155
円要素均等係数		U _c		1.50
バネ定数	法線方向	k _n	(N/m)	3.36×10 ⁸
	接線方向	k _s	(N/m)	1.21×10 ⁸
粘性減衰定数	法線方向	η_n	(N/m・sec)	4.81×10 ⁴
	接線方向	η_s	(N/m・sec)	2.89×10 ⁴
粒子間摩擦角		ϕ_μ	(°)	24.0
転がり摩擦角		θ_r	(°)	24.0
円要素と境界の摩擦角		$\phi_{\mu B}$	(°)	30.0
円要素・載荷版間の摩擦角		$\phi_{\mu C}$	(°)	35.0
時間間隔		Δt	(sec)	5.0×10 ⁻⁵



(a) 本均し



(b) 荒均し

図-11 載荷ブロック鉛直沈下量と平均鉛直応力の関係

ルの寸法を図-13に示す。マウンド部は、転がり摩擦を考慮した円形要素を用い、ケーソン部分は多角形要素を用いてモデルを作成した。ケーソンモデルの形状は、実際のケーソンの複雑な形状を考慮せず、長方形断面とした。

マウンド部については、6787個の要素を重力落下させることにより作成した。要素の粒度分布は、3章と同じである。この後、小さい粒子を追加配置して、マウンドの平坦性を再現するが、その手法は3章で述べた方法と同じである。従って、本解析におけるマウンド表面の平坦性の確保も、実際のマウンドの建設における目つぶし石を利用した均し作業に相当する。すなわち、解析における本均しと荒均しは、目つぶし石の粒径を変化させた場合に相当すると言える。マウンド表面に配置する小粒子は2種類とし、本解析では、半径5cmの要素を用いた場合を「本均しマウンド」、半径10cmの要素を用いた場合を「荒均しマウンド」と呼ぶ。マウンドのモデル化において、実験のシミュレーションでは、実験との整合を図るため、表面を均すための要素の半径を「本均しモデル」に対して6.5cm、「荒均しモデル」に対して7.5cmとそれぞれ定めたが、ここで行う全体系のシミュレーションでは、幾つか作成したマウンドの初期状態のうち、均し程度の差が最も大きくなる一対をえらんだ。マウンドの設計高さは約8mであり、最終的なマウンド部分の要素数は、本均しモデルが7387個、荒均しモデルが7006個となった。マウンド標高頻度分布を図-14にそれぞれ示す。標高計測は、3章で述べた方法と同じである。本均しモデルでは、標高の分布が標高8mを中心として±5cmの範囲に収まっているのに対して、荒均しモデルでは7.8mから8.15mの範囲に分布している。マウンド表面の形成後に、図-15に示す多角形要素により構成されるケーソンモデルを設置する。ケーソンモデルの諸元を

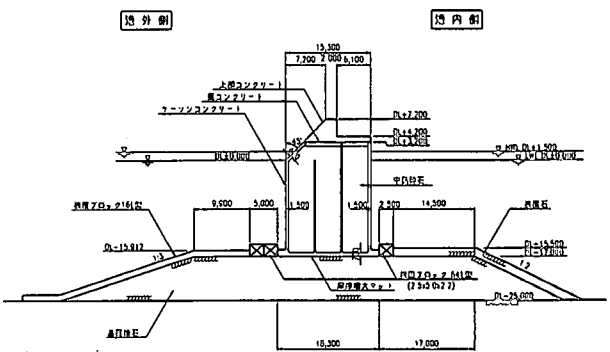


図-12 対象とした防波堤の断面

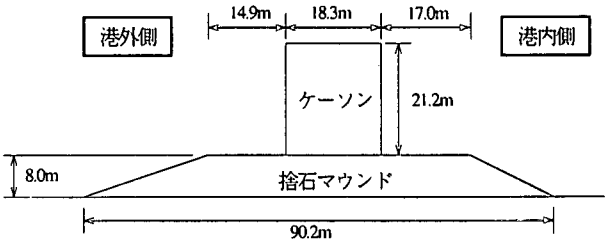


図-13 シミュレーションモデルの寸法

表-2に示す。多角形要素の密度は、実際のケーソンの有効重量を再現できるように定めた。四つの要素を互いに連結する間隙パネの強度としては、ケーソンが剛な構造物として挙動するように安定的に計算できる最大の値を用いた。このケーソン間隙パネ定数は、マウンド要素に与えたパネ定数の約570倍である。ケーソン間隙パネの減衰定数は、3章に示したマウンド物性値に準拠した。ケーソンモデルの円形要素および辺要素とマウンドモデルの円要素間の摩擦係数は0.7(摩擦角35°)とした。

4. 2 自重解析

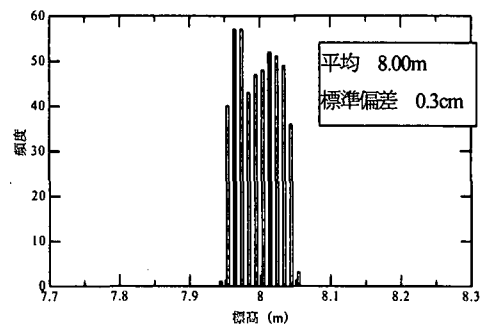
荒均しモデルおよび本均しモデルの上に配置したケーソンモデルに重力を作用させ、自重解析を実施した。このとき、ケーソンの水中重量3908kN（解析ではモデルの奥行き方向を1mとしているので、底面の応力は213.6kN/m²となる）を、ケーソンモデルに即座に作用させると、ケーソン底部と捨石間で大きな接触力が計算されるため、計算の安定性を欠いた。このため、ケーソンモデルには、自重を数回にわたり段階的に作用させた。ケーソンが十分安定した後、さらにマウンドモデル部に浮力をかけて安定させシミュレーションの初期状態を得た。

自重解析終了時のケーソンに作用するマウンド要素からの接触力分布を、本均しモデルと荒均しモデルとについて、図-16に比較する。この図は、ケーソン底面付近のモデルを拡大した図に、マウンド要素からの接触力を、ケーソンに接する要素中心を始点とするベクトルで表示したものである。マウンド表面の線分は、ケーソン底面であり、両端の円はケーソンモデルの左右下端に位置する円形要素を示す。

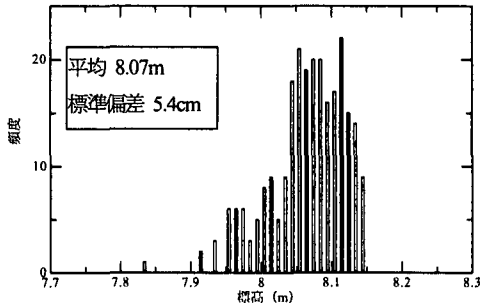
ケーソンとマウンドとの接触状況を見ると、本均しの場合、ケーソンに接する要素数は24個、荒均しの場合は19個であり、本均しの接触数が若干上回る結果となった。本均しと荒均しの接点数の差により、平均接触力は、本均しおよび荒均しの場合、各々約154kNおよび約172kNとなり、本均しの場合の平均接触力が小さくなった。しかしながら、接触力の最大値はほぼ同じレベルであり、単にマウンド表層の粒子の大きさを小さくしただけでは、集中荷重が劇的に緩和されることがないことを示唆する結果となった。また、本均しと荒均しモデルに用いた表層の小粒子の半径比は0.5倍であるので、仮に表層付近の小粒子が水平一列に並び、全ての粒子がケーソン底版に接触したと仮定すると、本均しと荒均しモデルの接触点数の差は2倍となるはずである。しかしながら、解析結果においては、1.26倍であり、単純に粒径を変化させただけでは、接触点数のコントロールが難しいことも示唆する結果となった。実際のマウンド均し作業においても、どの程度の小粒径の石（目つぶし石）を用いれば、設計で想定しているような線形分布荷重のケーソン支持形態になるかは不明であり、今後に検討を進めるべき解析結果となった。

4. 3 波力載荷

本節では、自重解析により得られた本均しおよび荒均しの解析モデルに、波力による設計外力をケーソンモデルに作用させて、マウンドによるケーソンの支持機構、およびケーソン式防波堤の全体挙動について検討する。



(a) 本均し



(b) 荒均し

図-14 マウンド標高頻度分布図

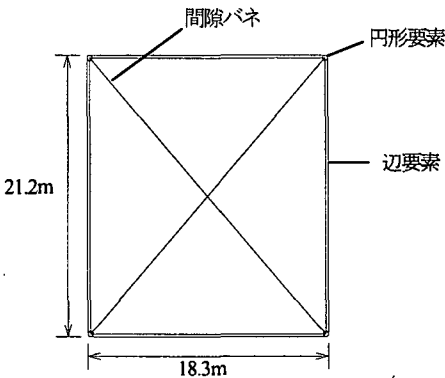


図-15 ケーソンモデル

表-2 ケーソン物性値

円要素密度		ρ (kg/m ³)	港外側	7.68×10 ⁵
			港内側	8.19×10 ⁵
円要素半径		r (m)	0.20	
パネ定数	法線方向	k_n (N/m)	1.91×10 ¹¹	
	接線方向	k_s (N/m)	6.9×10 ¹⁰	
粘性減衰定数	法線方向	η_n (N/m・sec)	2.72×10 ⁷	
	接線方向	η_s (N/m・sec)	1.63×10 ⁷	
円要素と辺の摩擦角		ϕ (°)	35.0	

(1) 波力載荷の方法

波力によるケーソンの作用荷重は、ケーソン底版における地盤反力が最も大きくなる波の山作用時(LWL)とした。細山田らの式¹¹⁾により求めた半没水上部斜面堤に作用する波圧分布を等価な集中荷重に置き換え、図-17に示すようにケーソンモデルを構成する4隅の円形要素の中心に作用させた。

ケーソン式防波堤の設計において、波力の影響は、通常周期 10 秒程度の波の最大値を静的に作用させることで考慮する。ここでは、この状況が実現したときの系の応答を再現するため、計算の安定性を考慮し、約 50 秒をかけて波力による最大荷重が作用するような載荷方法を選択した。従って、波力による載荷荷重は、設計上の最大荷重に、解析における経過時間に対応する荷重時間関数で示される荷重倍率（図-18）を乗じることにより与えられる。

(2) 波力載荷に対する変形応答特性

波力載荷に対するケーソンの変形状況について検討する。図-19(a)に、波力載荷による本均しモデルと荒均しモデルにおけるケーソンの変位応答を示す。同図中には、ケーソン中心における水平変位と鉛直変位を示す。また、図-19(b)にケーソンの陸側への傾斜角を示す。図より、ケーソンモデルが、波力載荷を受けて徐々に変形が進行している様子がわかる。ケーソンモデルの変形は、スムーズに推移する区間と、比較的急激に変形が進む区間があることがわかる。例えば、本均しの場合、約 75 秒付近において、ケーソンの傾斜が急増した後、水平変位および鉛直変位が急増している。また、荒均しの場合、約 45～50 秒にかけてケーソンの水平・鉛直変位および傾斜角がすべて急増している。

ケーソンの変形メカニズムを詳細に見るために、本均しモデルにおけるケーソン底面付近のマウンドおよびケーソンの変位ベクトル分布を図-20 に示す。図-20 (a)は波力載荷の初期段階（0～30 秒）、図-20 (b)は最大波力を作用させた段階（30～50 秒）に生じた変位ベクトル分布である。図-20 (a)より、マウンド内の要素は、ケーソン底面の左から 3/4 程度の位置から、ケーソン右端の下部マウンド内に向けて、大きく変形していることがわかる。特に、ケーソン底面付近に注目すると、マウンド表層近傍の要素がケーソン底面と一体となって移動して

いる様子がわかる。この段階におけるケーソンの水平変位は 10cm であった。一方、ベクトル図より、ケーソン底面付近の要素の水平変位も 10cm 程度であることがわかる。従って、今回の解析条件においては、ケーソンの水平変位は、設計で想定しているようなケーソンとマウンドとの間における滑動ではなく、マウンド内部の変形

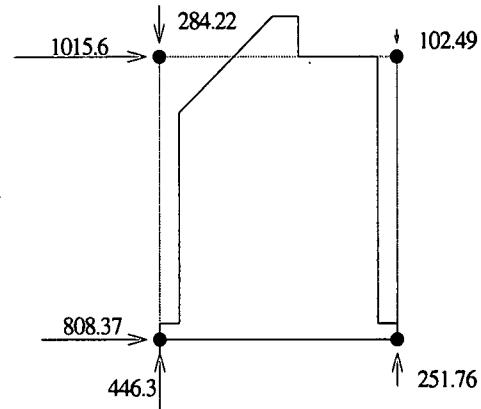


図-17 波力分布図 (単位:kN)

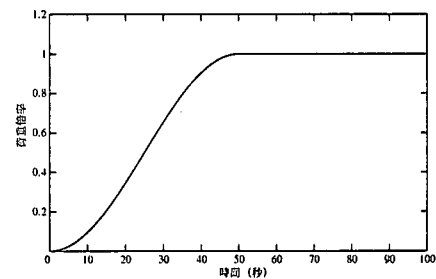
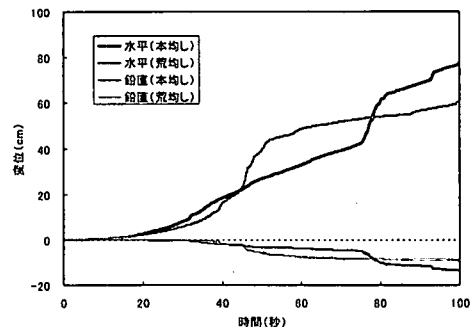
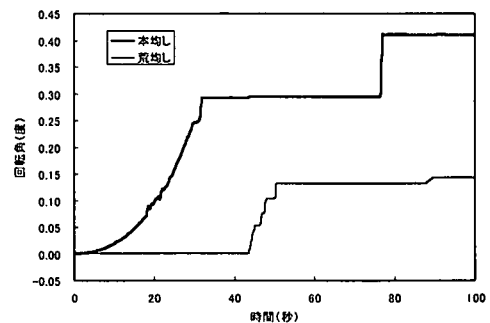


図-18 荷重時間関数



(a) 水平変位・鉛直変位



(b) 傾斜角

図-19 ケーソンの変位応答

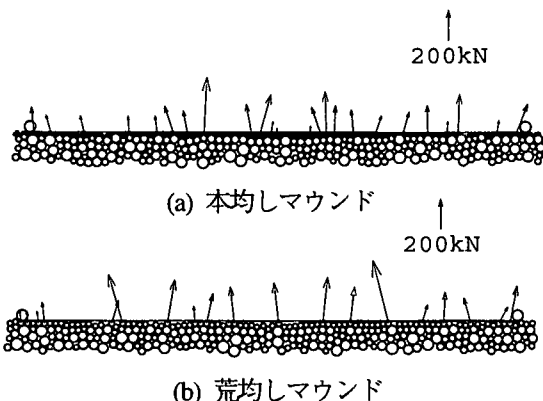


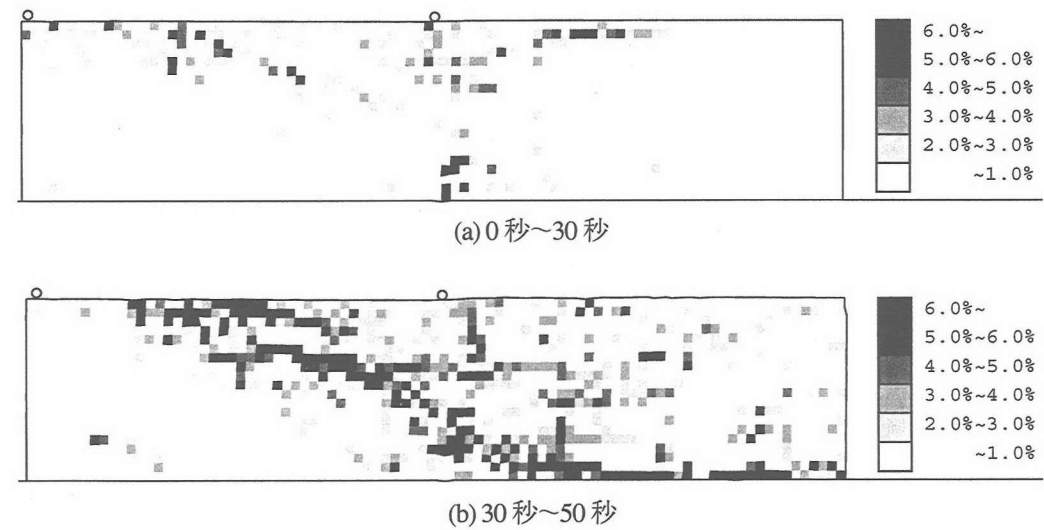
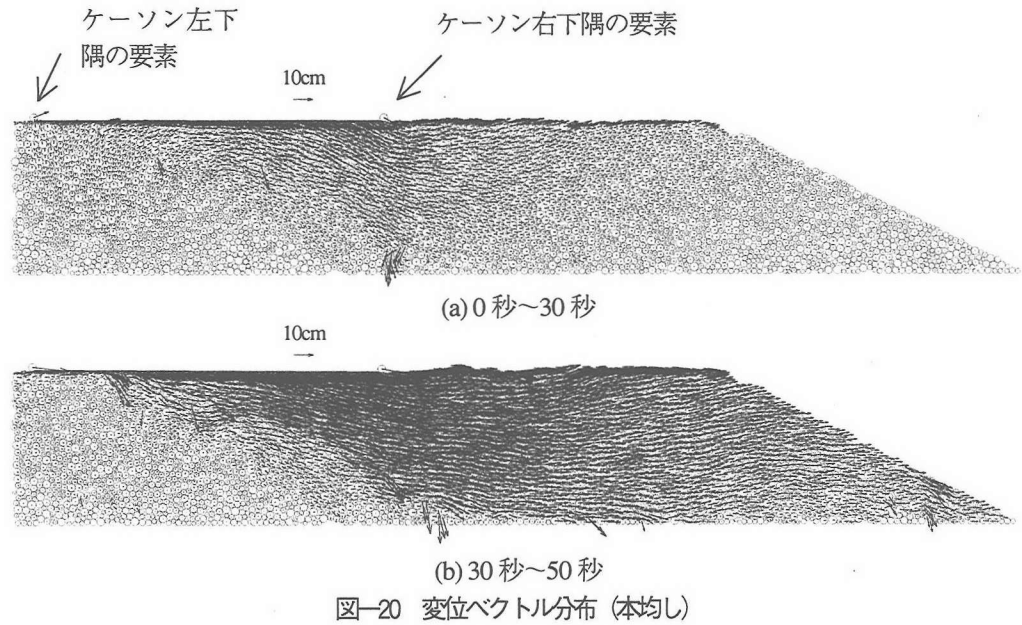
図-16 自重解析終了時の反力分布の比較

によって生じていると言える。さらに波力による荷重が大きくなると(図-20(b)),この傾向がさらに強くなり、マウンドの右半分が全体的に変形するようになり、ケーソンの変形も増加することになる。

マウンド部分の変形状態について観察するため、ケーソン下部領域を拡大し、設定した時間間隔毎に生じた局所せん断ひずみの分布を調べる。図-21(a),(b)に、本均しモデルにおける局所せん断ひずみ分布を示す。本図は、図-20(a),(b)に対応しており、図-21(a)には0~30秒間における結果、図-21(b)には30~50秒間における結果を示す。せん断ひずみのレベルは、図中の凡例に示すとおり、濃淡で識別している。図示した領域は、ケーソン左端付近から、マウンド右肩付近の矩形の範囲である。図-21(a)は、ケーソンが変位を開始する載荷初期の結果を示している。図から、載荷初期において、ケーソン底面の中央からやや左よりの部分から、マウンド右下方向へ連なるせん断帯が発生しているのがわかる。その後、増加する載荷に対して、このせん断帯は明瞭となり、せん

断帯の右側の領域が、全体的に右方向へ移動していることがわかる(図-21(b))。ここで注意すべき点がある。図-21(b)において、発達したせん断帯が、マウンド右側底部の下部境界上に位置していることである。実際のマウンドは、砂や粘土により構成される海底地盤に建設されるため、今回のような剛な下部境界が存在することは皆無であると言って良い。従って、海底地盤とマウンドの相互作用の影響については、本解析では再現できていないので、今後の課題となる。

以上、ケーソン式防波堤を個別要素法でモデル化した場合の変形応答特性を眺めたが、本解析によって現行の港湾施設の設計では考慮していない事項が明らかになってきた。例えば、ケーソンの滑動現象は、マウンド上を単に滑るという破壊形態を設計上想定しているが、実際はケーソン直下の石を引きずりながらケーソンが移動することが、本解析により示された。また、現行設計では、ケーソンの滑動、転倒および支持力破壊の破壊モードを想定して、各々のモードについて静的な安定計算を行い、



所定の安全率を確保するように設計が行われる。しかしながら、今回の解析結果では、実際の防波堤ケーソンの破壊形態は、それらの破壊が複合した形で生じていることを示唆する結果であった。このように、本解析は、個別要素法などの新しい解析手法で、既往の設計法を見直すことの意義を示すものとなった。

4. 4 マウンドの支持構造

ケーソンの変形が大きくなった時点におけるケーソン底面に作用する本均しと荒均しのマウンドの反力分布を図-22にそれぞれ示す。図から、本均し及び荒均しマウンドの両者ともに、波力に対して抵抗するため、ベクトルの向きが海側に傾斜する様子がわかる。粒状体内部においては、応力が荷重方向の粒子列を選択的に伝播し、他より大きな力を支持する粒子が柱構造を形成する事が知られている¹²⁾。ここでは、この柱構造に着目し、波力載荷前後におけるマウンド内の応力構造の変化を観察する。個別要素法では、粒状体内部の応力構造を表示する方法として要素間の接点力分布(接触する要素の中心間を結ぶ、接点力のレベルに応じて太さ等を変えた線分の分布)を用いることが多い。本均しモデルと荒均しモデルについて図-23に自重解析終了時における法線方向(要素中心を結ぶ方向)の接点力分布をそれぞれ示す。図の太線は100kN(ケーソン有効自重の約2.5%)以上、細い線は50kN~100kNの範囲に入る接点力を示す。両者共にマウンドのケーソン直下の領域に、鉛直方向に延びる応力柱が形成されている。その領域は、ケーソン底面からマウ

ンドにかけてケーソンの幅より大きく広がることなくほぼ鉛直下向きに占められている点が興味深い。一方、マウンド層内の応力分散については、港湾の設計においては、ケーソン底面端部から左右に30度の角度をもって分散すると仮定している。個別要素法の結果は設計上の仮定とは大きく異なるものであった。

この状態に、波力を作用させた場合の接点力分布を図-24に示す。ケーソン下部領域に一樣に分布していた鉛直方向に卓越する応力構造は、応力柱の方向を傾斜させつつ右方向に移動する。また、ケーソン右端を境に水平方向近くまで傾斜した応力柱が、右下方向に新たに形成されている。マウンド内部の支持構造は、波力を支えるために都合のよい形へとその姿を変化させたと言える。この傾向は、両者で共通しているが、応力構造の右方向

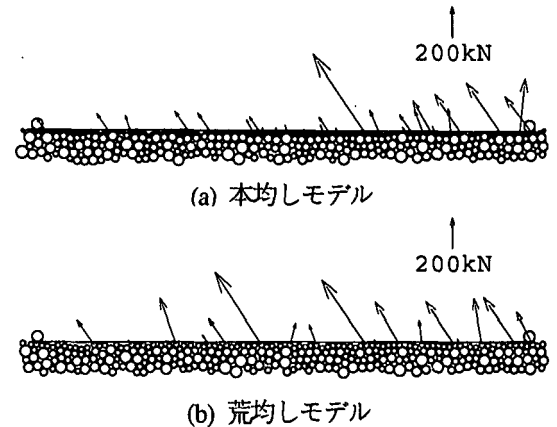


図-22 波力を作用させた反力分布

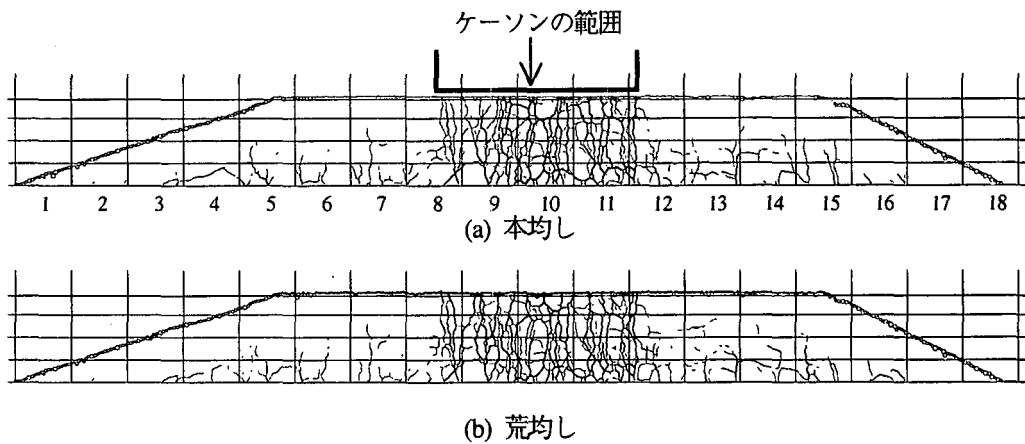


図-23 波力載荷前(自重解析後)の支持構造

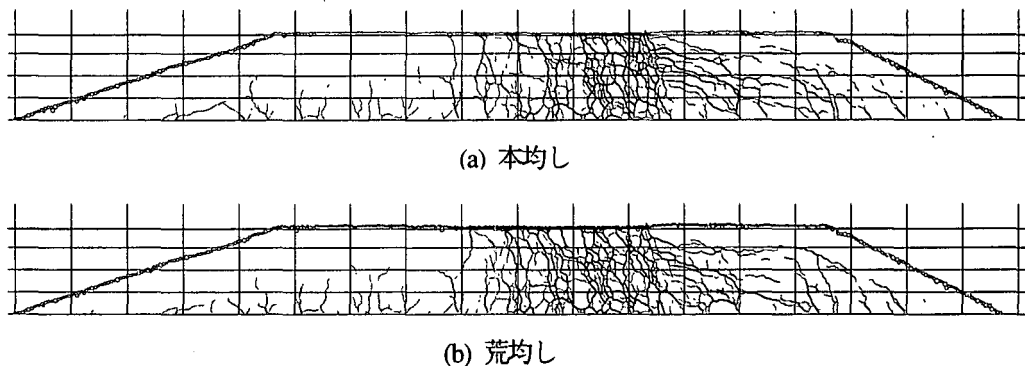


図-24 波力載荷後の支持構造

への移動は本均しの方がやや顕著であり、本均しのケーソン回転量が大きかったこと(図-19)と対応している。

波力載荷前(自重解析後)と波力載荷後のケーソン底面に作用する区間(9,10,11)における応力について、図-25に整理する。各区間の長さは5mである。波力載荷前は、本均しモデルと荒均しモデルとの差異は小さい。水平応力(絶対値)が、ケーソン中央で小さくなっているのは、ケーソン自重解析時にマウンドの両側に押し広げられる作用に対する反作用によると考えられる。

波力載荷後は、本均しの区間10の鉛直応力が荒均しよりかなり小さく、区間11においては、本均しの方が若干ではあるが大きくなっている。これは、本均しの方の支持構造が右方向へ移動する傾向がやや顕著であったことと対応している。事例は一組であるが、ここで対象とした程度の均し精度の向上では、必ずしもケーソン底面に発生する応力の平均化に効果があるとは限らないことを示す。

これまで議論してきた支持構造の特徴を表す試みとして、応力柱密度(単位面積内にある応力柱の本数)を導入し、構造の類似性について述べる。波力載荷前と載荷後について、標高2m、4m、6mおよび7.7mにおける波力載荷前はケーソン直下部を中心として区間8~12の領域。波力載荷後は区間9~13の領域を通過する100kN以上の応力柱密度(本/m)を図-26に示す。応力柱密度が大きいほど、一定の荷重を多数の柱で支えていることを意味し、構造が安定であることを示す¹²⁾。標高が下がるほど応力柱密度は大きくなる傾向があるが、これにはマウンドの自重分が含まれている。

波力載荷前のデータを比較すると、本均しモデルと荒均しモデルとの間の差異は小さく、両者の構造が似通っていることをこの指標を用いて表現できそうである。一方、波力載荷後は、両者に応力柱密度に差が生じている。応力柱密度に差がない場合には、構造が似ていると言えるが、ある程度の差が生じた場合における構造の類似の程度を議論するためにはデータが不足している。これも今後の課題としたい。

5. 結論

(1) ケーソン-マウンド系に対する2次元個別要素法によるシミュレーションを実施するため、ケーソンは多角径要素、マウンドは転がり摩擦を考慮した円形要素を用いてモデル化した。これらの解析パラメータについては、載荷実験の荷重変位関係を良好に再現するよう試行錯誤で設定した。その結果、ケーソンの自重や、波力に対する防波堤の挙動について、ケーソンとマウンドの相互作用を考慮した形で再現できるようになった。また、マウンドの変形、マウンド内部の応力構造、ケーソンがマウンドから受ける反力分布を、円形要素でモデル化された捨石個々のデータとして出力できるようになった。

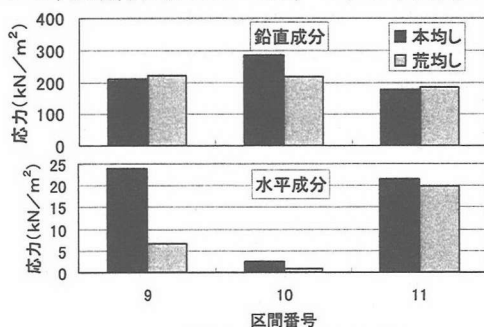
(2) 上記手法によるケーソン式防波堤の挙動解析の結果、ケーソン式防波堤の全体系挙動およびマウンドによ

るケーソン支持機構について、設計において考慮していない以下の事項が明らかになった。

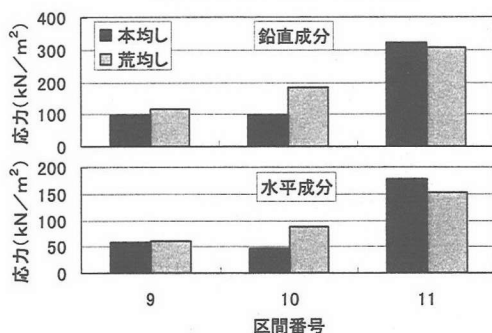
- ・ケーソンの滑動現象は、マウンド上を単に滑るという破壊形態を設計上想定しているが、ケーソン直下の石を引きずりながらケーソンが移動する破壊形態が支配的であることが明らかになった。
- ・現行設計では、ケーソンの滑動、転倒および支持力破壊を独立した破壊モードとして想定しているが、今回の解析結果は、実際の防波堤ケーソンの破壊は、それら複数の破壊モードが複合した形で生じていることを示唆する結果であった。

以上に示すとおり、個別要素法によるケーソン式防波堤の挙動解析は、既往の設計法を見直すことの重要性を示すものであった。

(3) マウンド表面の均し精度は、小粒径要素を配置することによりある程度コントロールできることがわかった。この方法により、本均しマウンドモデルと荒ならしマウンドモデルを作成し、両者に形成されるマウンド内部のケーソン支持構造について観察した。この結果、ケーソンの自重解析時には、マウンド内部の支持構



(a) 載荷前 (自重解析後)



(b) 載荷後 (波力載荷後)

図-25 ケーソン底面の応力分布

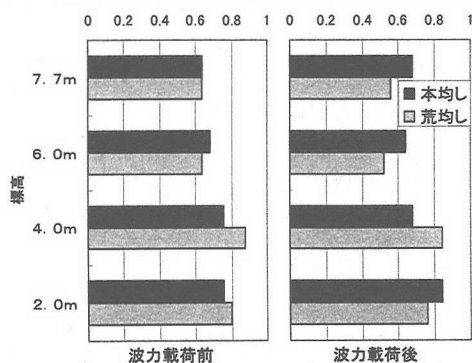


図-26 応力柱密度 (100kN 以上)

造が鉛直方向に卓越する応力柱で構成される点、波力が作用するとこれを支えるため都合の良い方向に応力柱が傾斜する点は、両者で全く同じ傾向を示すことがわかった。しかしながら、その結果としての定量的なデータ、例えばケーソンの変位量やマウンドの変形量については差異が生じ、むしろ「本均し」が危険側であるかのような結果が得られた。これは、必ずしも「本均し」が安全側であるわけではないということを示しているものの、筆者らは、この差異がマウンド表面の均し精度の影響ではなく、実験誤差に類するものと考えている。この点について明らかにするためには、同様の検討の蓄積が必要であると考えている。

(4) この論文では、均し表面の計測に用いるスタッフの寸法は、実際と実験との間で整合しておらず、また、DEMの均し表面の計測方法はこれらと異なっている。実験による計測によれば、本文にあるように標高のばらつきは実際より大きくなる。ただし、実験におけるマウンドの作成は、実際に作業にあたる潜水夫が実施しており、「本均し」と「荒均し」の区別は、実際と同じようにつけられているものとする。DEMにおける標高表示は、スタッフによるものより、ばらつきがさらに大きくなる傾向があると思われる。これらの関係については、今後の検討課題としたい。

(5) 現在の防波堤の外的安定設計法は、滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードについて照査がなされるが、現場で観察される破壊モードとしては滑動が卓越する破壊モードが支配的であると見られている¹³⁾¹⁴⁾。また、このことは、現行設計法の支持力安全性照査方法が他の破壊モードに対する照査方法と比較して安全側であることを示唆するものと考えられている¹⁵⁾。

さて、ここで注意したいのは、現行の設計で考えられている破壊モードと実現象の整合性についてである。確かに、ケーソンが岩盤などの極めて固い基礎上に設置される場合は、設計において想定しているケーソンの滑動が発生すると考えられよう。ところが、今回の解析結果では、ケーソン水平変位が鉛直変位に比較して卓越しているため、一見すると捨石マウンド上をケーソンが滑動しているかのように見えるが、実際には捨石マウンド層の大きな変形を伴っている。しかし、だからと言ってこの結果が、マウンドの変形強度の制御のみによって設計法の合理化が図れることを示唆するものではない。設計法の合理化に向けては、本論文で述べたような破壊の可能性のあることを念頭に、現場や実験で観察された破壊形態等を見直し、滑動抵抗・転倒に対する抵抗・マウンドの強度が、全体の破壊形態にそれぞれどのような影響を及ぼすか今一度照査してゆく必要があるものとする。

そのうえで、滑動が卓越するモードについても、沈下が卓越するモードについても、所期の要求性能を満足する合理的な設計体系を構築する必要がある。

謝辞

マウンドの載荷実験は、旧運輸省 第二港湾建設局 横

浜調査設計事務所（現：国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所）の支援を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表します。本論文で実施した個別要素法の解析には、京都大学澤田助教授の開発したプログラムに機能を付加したものをを用いた。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局：港湾工事共通仕様書、社団法人日本港湾協会発行、2000。
- 2) 宮田正史、菅野高弘、長尾毅、篠原勝次、近藤道彦：均し精度がケーソン底板断面力に及ぼす影響、港湾技術研究所資料 No.945, 1999。
- 3) 宮田正史、菅野高弘、長尾毅、菊池信夫：捨石マウンドの支持機構を考慮したケーソン底板設計法の開発への取り組み、土と基礎、Vol.50, No.4, Ser.No.531, pp.19-21, 2002。
- 4) 宮田正史、菅野高弘、長尾毅、Masami N., Graham G.W. Mustoe, 田中剛、菊池信夫：Experimental study on load support systems of rubble rock foundations, 土木学会論文集第III部門（査読中）
- 5) 日本港湾協会（運輸省港湾局監修）：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999。
- 6) 中瀬仁、本田中、西野隆之：個別要素法摩擦パラメータを設定するためのねじりせん断シミュレーション、第36回地盤工学研究発表会、pp.503-504, 2001。
- 7) 中瀬仁、栗田哲史、安中正、安田登、藤谷昌弘：回転自由度を拘束した個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション、土木学会第47回年次学術講演会、III-175, pp.390~391, 1993。
- 8) Sakaguchi H. : Plugging of flow of granular materials during the discharge from a silo, IJMP, Vol.B7, pp.1949-1963, 1993。
- 9) Cundall, P.A. : A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, Proc. Symp. Int. Rock Mech.(Nancy), Vol.1, Paper II-8, 1971。
- 10) 目黒公郎：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析地震研究所彙報、Vol.63, pp.409-468, 1988。
- 11) 細山田得三、高橋重雄、谷本勝利：離島港湾における上部斜面堤の適用性について、海岸工学論文集、第41巻、pp.706-710, 1994。
- 12) 中瀬仁、安中正、片平冬樹、興野俊也：平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用、土木学会論文集、No.454/III-20, pp.55-64, 1992。
- 13) 河合弘泰、高山知司、鈴木康正、平石哲也：潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災、遭遇確率、港湾技術研究所報告、Vol.36, No.4, pp.3-41, 1997。
- 14) 長尾毅、吉浪康行：信頼性解析によるケーソン式防波堤の外的安定性評価、構造工学論文集、Vol.47A, pp.305-312, 2001。
- 15) 長尾毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の適用、土木学会論文集、No.689/I-57, pp.173-182, 2001。

(2002年4月19日受付)