

個別要素法による マウンド支持力破壊モードの分析

ANALYSIS OF DESTRUCTIVE MODE OF BEARING CAPACITY BY DEM

本田中¹・長尾毅²・吉岡健³・興野俊也⁴・安田勝則⁵・中瀬仁⁶

Ataru HONDA, Takashi NAGAO, Takeshi YOSHIOKA, Toshiya KYONO, Katsunori YASUDA
and Hitoshi NAKASE

¹正会員 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)

²正会員 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)

³正会員 工修 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部 (〒104-8165東京都中央区銀座6-15-1)

⁴正会員 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)

⁵正会員 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)

⁶正会員 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)

The design method of bearing capacity of rubble foundations for breakwaters was constructed assuming of the circular slip surface in rubble foundations. In our recent experiments, however, local destruction in the surface part of rubble foundations instead of the circular slip surface in rubble foundations has been observed. We consider that this local destruction relates directly to the loss of bearing capacity of rubble foundations. First of all, in this research, we confirmed that the numerical simulation by the distinct element method excellently reproduced these experiments. Next, the numerical simulations by the distinct element method to other assumption sections were done. As a result, it was shown that this local destruction was universal.

Key Words : DEM, breakwaters, rubble foundations, bearing capacity

1. 概要

混成式防波堤の捨石マウンドの支持力照査は、簡易 Bishop法による円弧すべり解析を行うことを標準としている。しかしながら、偏心傾斜荷重を作用させるマウンドの変形実験によれば、破壊時のマウンドには必ずしもすべり安全率が最小となる円弧に沿ってすべり面が発生しているわけではないことが観察されている。

本研究では、まず、個別要素法シミュレーションが捨石マウンドの変形実験をどの程度再現するか確かめ、次に、実験で観察された現象にどの程度普遍性があるのか、数値実験を重ねるとともに、シミュレーション結果を分析することにより、実際の支持力破壊の形態が、簡易 Bishop法による円弧すべりとは異なることを示す。

2. マウンド変形実験及びシミュレーションの概要

本章では、検討対象とした偏心傾斜荷重条件によるマウンドの変形実験の概要及び個別要素法によるシミュレーションの概要を述べる。

(1) マウンド変形実験の概要

対象とした実験は、国土技術政策総合研究所が実施した、捨石マウンドにブロック模型を用いて偏心傾斜荷重を作用させ、さらにマウンドが破壊するまで水平載荷するものである。実験装置を図-1に示す。防波堤断面のケーソン後趾側を対象としており、砂地盤、捨石マウンド及び載荷ブロックからなる実験模型を用いる。模型縮尺は1/8である。波圧時における三角形分布荷重を載荷するために、三角形断面の載荷ブロックを用いている。

実験ケースは、実防波堤断面を対象としたケース (Case-1: $P=60\text{kN/m}$) 及び上載圧をCase-1の1.5倍としてよ

り確実に地盤破壊を生じさせるケース (Case-2: $k=90\text{kN/m}$) の2ケースである。载荷ブロックはコンクリート製 (Case-1) 及び鋼製 (Case-2) であり、ブロック高さはブロック重量によって所定の底版反力分布を確保するように設定している。また、载荷ブロック底版で滑動することなく捨石マウンド天端に水平荷重を伝達させるために、ブロック底面には径6mmの溶接金網を設置している。

载荷条件は、鉛直荷重が捨石マウンドに段階的に作用させるように载荷ブロックを吊りおろし、载荷ブロック全自重を载荷した後に、地盤破壊が生じるまで段階的に水平方向に载荷するものである。

計測器配置を図-2に示す。ロードセル及びブロック下部に設置した変位計により、ブロックに作用する荷重と変位の関係を計測する。また、マウンド側面に設置したターゲットの位置を測定することにより、マウンドの変形の様子を観察する。

(2) シミュレーションの概要

a) 模型断面のモデル化

シミュレーションでは、捨石マウンド・砂地盤及び载荷ブロックをモデル化する。シミュレーションモデルを図-3に示す。マウンド部には平均粒径3cmの要素を用い、砂地盤部にはマウンド部の1/3である平均粒径1cmの要素を用いた。均等係数はいずれも1.5である。また、マウンド表層部は粒径2cmの要素を用いて標高補正を行った。マウンド及び砂地盤の強度を決定づける、転がり摩擦係

数の値については、マウンド捨石の圧縮試験に対するフィッティングシミュレーション¹⁾を別途実施したうえで、両者に異なる値を用いた。

载荷ブロックは、三角形の多角形要素によりモデル化した。多角形要素は、隅部に円形要素を配置し、それらを互いに間隙バネで連結して物体の骨格を形成し、隅部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²⁾。ブロック底面の溶接金網はモデル化せず、底辺の摩擦係数を0.7として摩擦の増大を模擬した。

シミュレーションモデルの材料定数を表-2、表-3に示す。

b) 荷重条件のモデル化

载荷にあたっては、まず载荷ブロック (多角形要素) を下方へ強制変位することにより鉛直荷重を5段階で载荷し、ブロックをマウンド上に設置する。その後にブロック重量の10%にあたる水平荷重 ($\Delta H/V=0.1$) を段階的に载荷する。ブロック下部への水平载荷状況を模擬するために、ブロック右下隅部の円要素に水平荷重を加える方法を用いた。この手順は、設計で想定している鉛直方向の三角形分布荷重と水平方向の荷重を载荷する際の载荷ブロックの安定性の観点から設定したものである。

3. シミュレーションによる実験の再現性

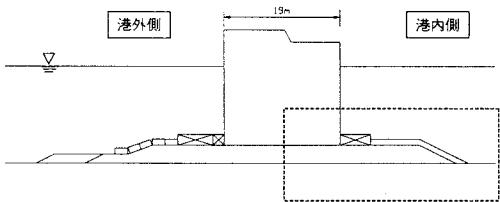


図-1 実験装置 (縮尺1/8)

表-1 実験ケース

	载荷ブロック	鉛直荷重 $V(\text{kN/m})$	水平荷重 $H(\text{kN/m})$
Case-1	コンクリート製	60	地盤破壊
Case-2	鋼製	90	まで载荷

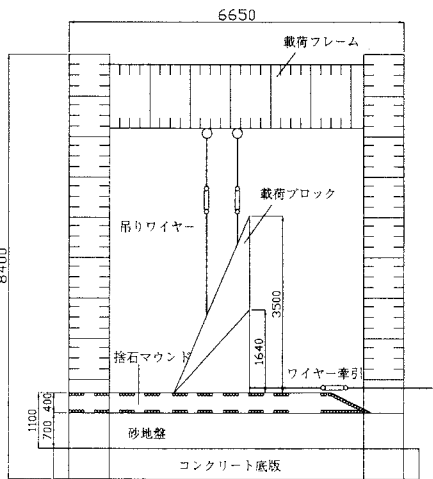


図-2 計測器配置

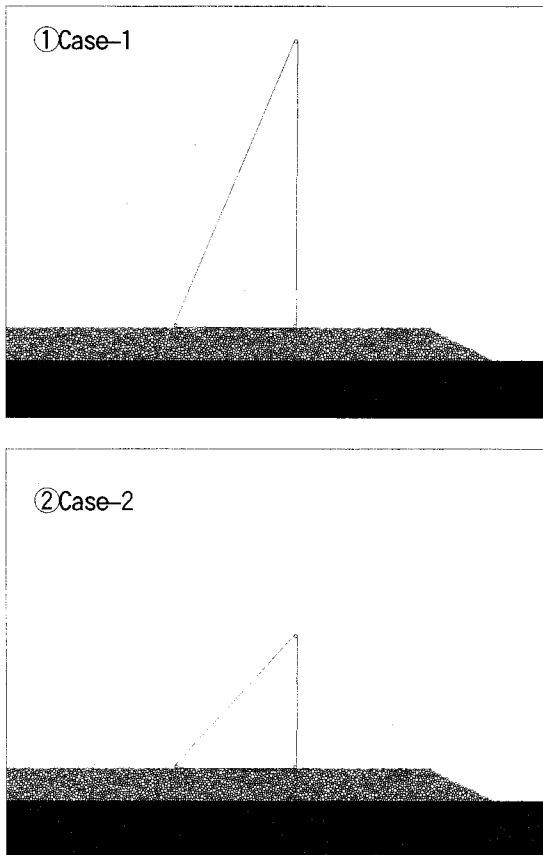


図-3 シミュレーションモデル

表-2 マウンド材料定数

要素平均粒径		D_{50}	(cm)	3.0(マウンド) 1.0(砂地盤)
要素均等係数		U_c		1.5
要素密度		ρ	(kg/m^3)	2300
バネ係数	法線方向	k_n	(N/m)	3.87×10^8
	接線方向	k_s	(N/m)	9.68×10^6
粘性減衰係数	法線方向	η_n	($\text{N}/\text{m} \cdot \text{s}$)	7.81×10^3
	接線方向	η_s	($\text{N}/\text{m} \cdot \text{s}$)	2.1×10^{-1}
粒子間摩擦角		ϕ_u	($^{\circ}$)	24.0
転がり摩擦係数		α		0.65(マウンド) 1.0(砂地盤)
転がり摩擦角		θ_r	($^{\circ}$)	24.0
要素と境界間の摩擦角			($^{\circ}$)	45.0

表-3 多角形要素材料定数

要素平均粒径		D_{50}	(cm)	4.0
要素密度		ρ	(kg/m^3)	1.62×10^6 (Case-1) 2.44×10^6 (Case-2)
間隙	法線方向	k_n	(N/m)	1.37×10^{10}
バネ係数	接線方向	k_s	(N/m)	3.43×10^8
間隙	法線方向	η_n	(N/m・s)	1.65×10^6
粘性減衰係数	接線方向	η_s	(N/m・s)	4.43×10^1
要素と辺の摩擦係数		μ		0.7

本章では、実験とシミュレーションについて荷重変位関係及び変形状況を比較し、シミュレーションによる実験の再現性を確認する。

(1) 荷重-変位関係

実験とシミュレーションにおける水平荷重-水平変位関係を図-4に示す。Case-1及びCase-2ともにシミュレーションでは、荷重傾斜率 $H/V=0.6$ 以降の荷重に対して安定した抵抗を示すことができず、グラフに折れ曲がりが生じているものの、シミュレーションと実験における荷重-変位関係は概ね対応が良いと言える。

(2) マウンドの変形状況

マウンド側壁に設置したターゲットとシミュレーションモデルのそれに対応する位置の要素変形状況を図-5に比較する。ここでは、実験とシミュレーションについて、それぞれの最終状態における変形状況を示した。実験とシミュレーションはマウンド部の変形状況がよく一致している。Case-1及びCase-2の両者とも、ブロック右下隅部近傍の深さ10cmの範囲にあるマウンドの水平変位が局所的に大きく、ブロック牽引方向のマウンド表層部が盛り上がるように変形している。それ以外の領域における変形は小さい。

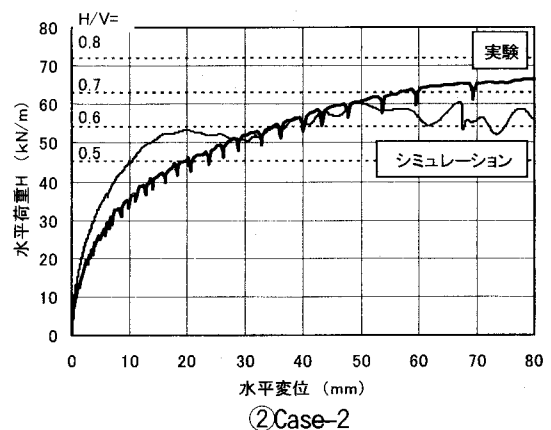
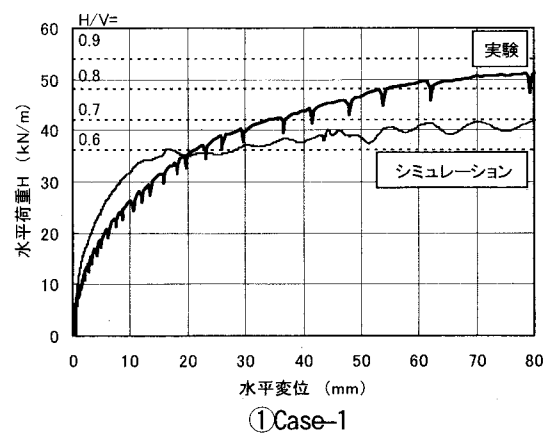


図-4 荷重-変位関係の比較

次に、シミュレーション結果について荷重変位曲線の折れ曲がり点近傍($H/\lambda=0.6$ 前後)における変形状況として、モデル内に生じたせん断ひずみ増分の分布を観察する(図-6)。Case-1及びCase-2ともに、ブロック隅部付を中心としてひずみの局所化が生じている。

シミュレーション結果は、Case-1及びCase-2ともにせん断ひずみ分布の形状が円弧をなしておらず、マウンドの変形がブロック隅部を中心とした局所的な変形であることを示している。この変形は、同図に示した簡易Bishop法によるすべり面に沿う剛体すべりとは全く異なる。

4. マウンド形状をパラメータとした変形状況の比較

3.で見られたマウンドの破壊形態が、断面の異なる場合でも共通して発生するかどうか、マウンド高と港内側肩幅をパラメータとして、個別要素法による数値実験を実施した。

(1)シミュレーションモデル

図-3のモデルを基に、港内側肩幅を小さくしたケース、マウンド高を高くしたケースについてモデルを作成した。シミュレーションモデルを図-7に示す。港内側肩幅をパラメータとしたケースでは、マウンド及び砂地盤のモデルに図-3と同じものを用いた。マウンド高をパラメータとしたケースについては、新たにマウンド高80cmのモデルを作成した。ここで作成したモデルの材料定数は、表-2,3と同じものを用いている。また、载荷ブロックへの荷重条件のモデル化方法も前述と同様である。

(2)荷重-変位関係の比較

Case-1シリーズ($V=60\text{kN/m}$)及びCase-2シリーズ($V=90\text{kN/m}$)について水平荷重-水平変位関係を図-8に比較する。いずれのケースについても、港内側肩幅を小さくした場合には荷重変位曲線の初期勾配が小さくなっている。マウンド高を高くした場合には、折れ曲がり点近傍まではマウンド高が低い場合と一致している。この結果は、港内側肩幅が狭い場合にはケーソンの変位、すなわちマウンド部の変形が生じやすいこと、マウンド高はある程度高ければ荷重-変位関係にそれほど影響しないことを示している。これは、マウンドの破壊が表層部の局所的なものであることと対応している。

(3)変形状況の比較

Case-1シリーズ及びCase-2シリーズのせん断ひずみ分布をそれぞれ図-9、図-10に示す。ここでは、荷重変位曲線の折れ曲がり点近傍におけるせん断ひずみを示した。また、同図には簡易Bishop法によるすべり面を合わせて

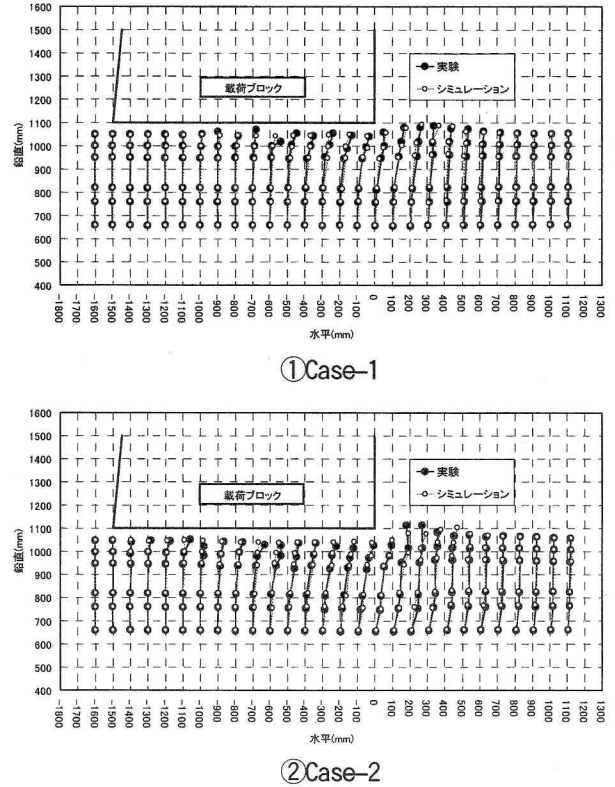


図-5 マウンド変形状況の比較

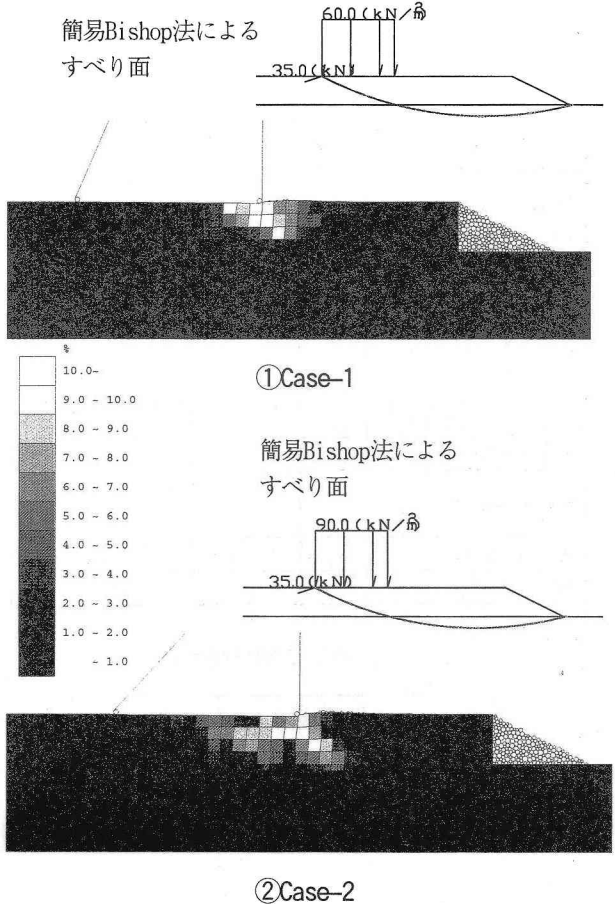
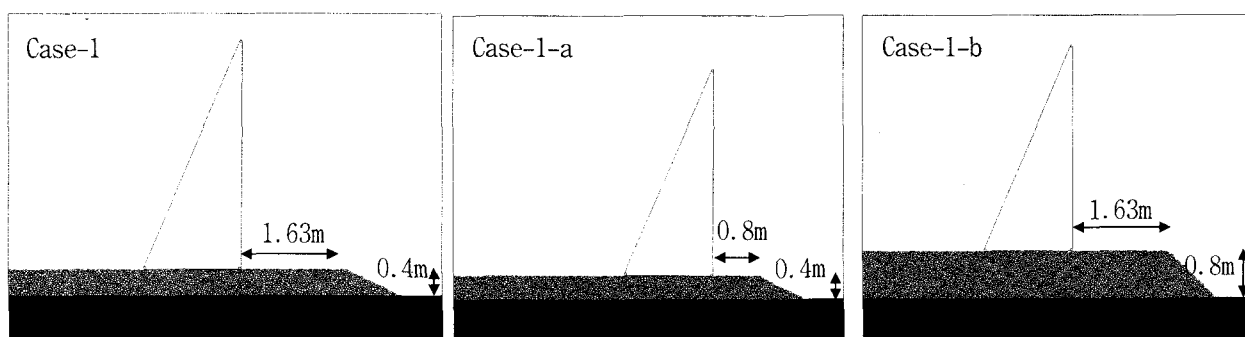


図-6 せん断ひずみ分布

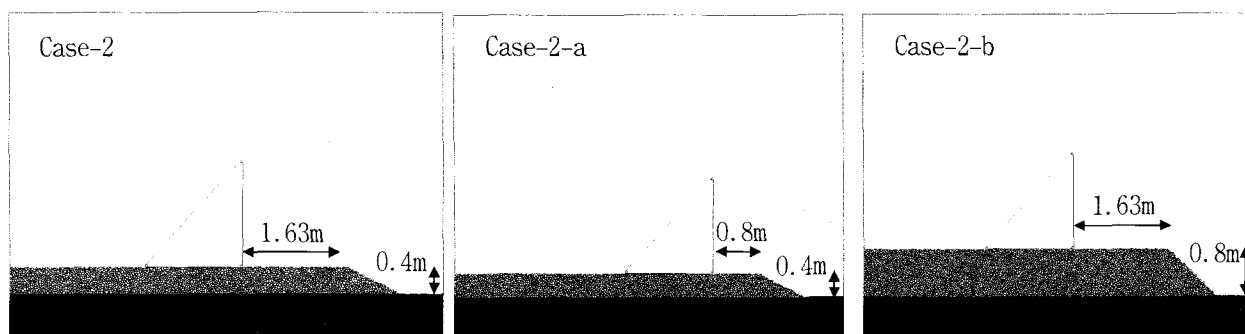
示している。マウンド高が高い場合には、マウンド高が低い場合と同様に、ブロック隅部付近のひずみが大きくなっている。ただし、マウンド高が低い場合に比べて、ごく狭い範囲にひずみが生じるに留まっている。港内側肩幅が狭い場合には、ブロック隅部にも大きめのひずみが生じているが、それよりもブロック下部からマウンド底部へと大きなひずみが生じている。ただし、この場合についても、その分布形状は円弧をなすものではなく、マウンド底部で留まっている。

5. まとめ

捨石マウンドの破壊実験をシミュレーションした結果、荷重変位関係及び変形挙動の観点から見て、実験を良好に再現できたと言える。実験で実施しなかった4断面についてシミュレーションスタディを実施した結果、港内側肩幅の狭い断面以外はすべて、マウンドの変形がブロック隅部の局所的な領域にとどまることが示された。これにより、ブロック隅部の変形が全体の挙動を支配していることを示すデータが得られた。港内側肩幅の狭い

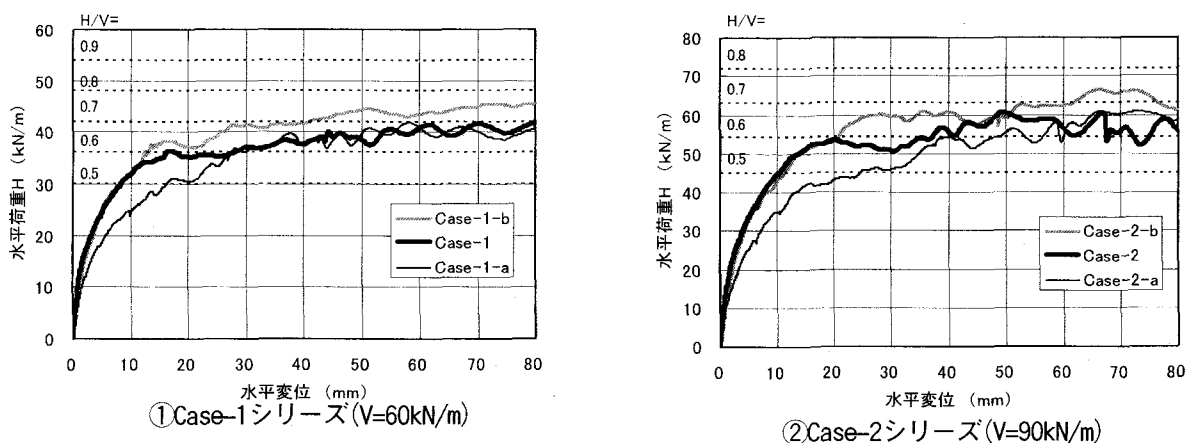


①Case-1シリーズ ($V=60\text{kN/m}$)



②Case-2シリーズ ($V=90\text{kN/m}$)

図-7 マウンド形状をパラメータとしたシミュレーションモデル



①Case-1シリーズ ($V=60\text{kN/m}$)

②Case-2シリーズ ($V=90\text{kN/m}$)

図-8 荷重-変位関係の比較

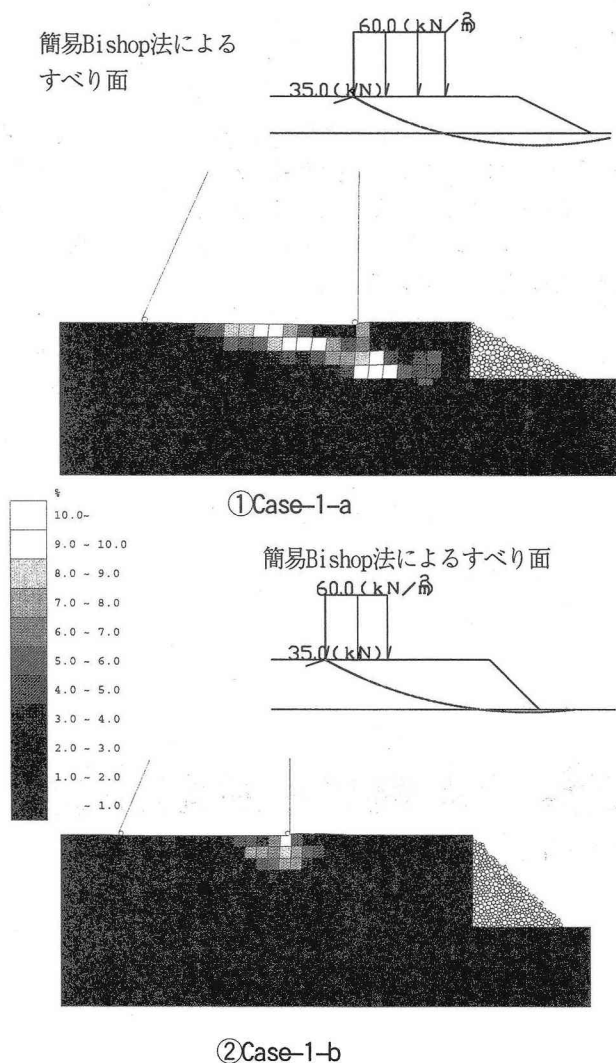


図-9 Case-1シリーズせん断ひずみ分布

断面については、ブロック内部からマウンド底部へと破壊面が進展する破壊モードを示している。しかし、この破壊面は局所的な変形が引き金となって形成される可能性もあり、今後検討を進める必要がある。

謝辞

本研究で実施した個別要素法の解析には、京都大学澤田教授の開発したプログラムに機能を追加したものを用いた。

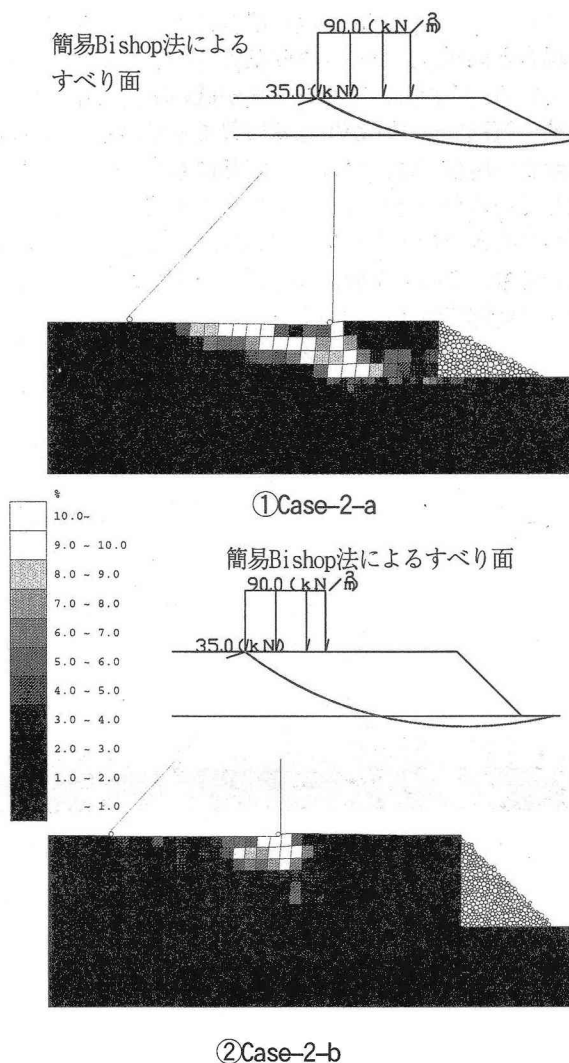


図-10 Case-2シリーズせん断ひずみ分布

参考文献

- 1) 本田中・興野俊也・長尾毅・中瀬仁：DEM解析に用いる捨石マウンドの材料強度設定のための砕石破碎実験，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，Ⅱ，pp.629-630，2003
- 2) 中瀬仁・宮田正史・長尾毅・本田中・興野俊也・安田勝則・菅野高弘：個別要素法によるケーソン式防波堤の挙動解析，土木学会応用力学論文集，Vol.5，pp.461-472，2002
- 3) 興野俊也・本田中・安田勝則・中瀬仁：ケーソン防波堤の変形量評価における個別要素法の適用研究，海洋開発論文集，第20巻，pp.79-84，2004