

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

APPLICATION RESEARCH OF DEM IN THE QUANTITATIVE EVALUATION OF DEFORMATION OF CAISSON TYPE BREAKWATER

興野俊也¹・本田中²・安田勝則³・中瀬仁⁴

Toshiya KYONO, Ataru HONDA, Katsunori YASUDA and Hitoshi NAKASE

¹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)

²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)

³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)

⁴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 of a breakwater is shifting to the performance-based-design from the evaluation method by safety factor to sliding, overturning, and bearing capacity. And the reliability-based-design for having taken deformation of a breakwater into consideration is devised. In order to adopt the reliability-based-design in the design of a breakwater, a numerical simulation technique is desired, which can describe dynamic destructive phenomenon and predict quantitative deformation appropriately. The authors think that DEM is leading as the calculation technique to acquire important data about deformation. In this research, the authors carried out the numerical simulation for the sliding experiment of a typical breakwater model using DEM. Consequently, the experiment is reproduced good using the dynamic friction 0.5 in addition to the static friction 0.6 between the caisson and the mound. And it became clear that bearing capacity structure of caisson load was formed in the mound.

Key Words : DEM, quantitative prediction of deformation, deformation mode, destructive mechanism, caisson type breakwater

1. 概要

防波堤の設計は、従来の滑動、転倒および支持力に対する破壊安全率での照査方法から性能規定型の設計体系に移行しつつあり、下迫・高橋ら¹⁾、土田・湯ら²⁾により期待滑動量、期待沈下量を照査する防波堤の変形を考慮した設計法が考案されている。今後、性能規定型の設計体系を採用し、防波堤の設計を実施するためには、防波堤の破壊時挙動を含め、様々な構造形式や規模を有する防波堤の滑動、沈下等の動的破壊現象やマウンドの破壊メカニズムなどを解明し、変形量を適切に予測する数値シミュレーションが望まれている。筆者らは、こういった要求を満たす計算手法として、大変形時において多くの情報が得られる個別要素法(DEM)が有力であると考えている^{3),4)}。

本研究では、個別要素法を実務に採用することを目指して、直立堤の滑動実験を対象とした数値シミュレーションを実施し、変形量の再現ならびに変

形メカニズムについての検討を行った。

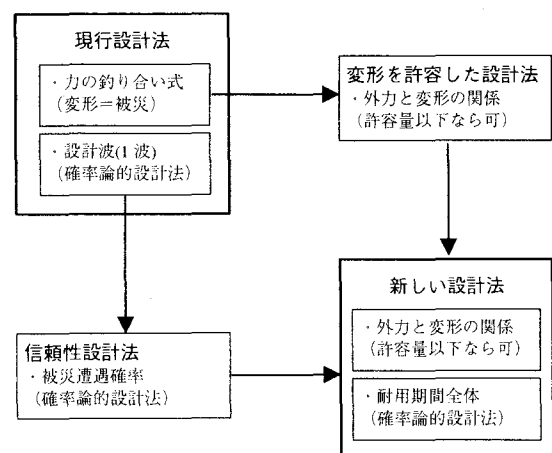


図-1 現行設計法と新しい設計法の比較
(下迫・高橋ら¹⁾)

2. 水理模型実験およびシミュレーションの概要

(1) 水理模型実験の概要

シミュレーションの検討対象とした実験は、東京電力で実施した低天端直立ケーソン防波堤である。実験で使用した二次元造波水路を図-2に示す。また、模型断面形状を図-3に示す。実験縮尺は1/50である。ケーソン模型は、二次元造波水路内に設けた1/100勾配斜面上の水深40cm（現地換算20m）の位置に設置した。マウンド厚は8cmであり、ケーソン静水面天端高の異なる二種類の断面を用いた（天端高=3cm, 9cm）。入射波は、周期 $T=1.98\text{sec}$ 、波高 $H=28.9\text{cm}$ の規則波を作用させた。その時の天端高3cm及び9cmにおける、現行設計法による滑動に対する安全率は、それぞれ0.78, 0.92である。ケーソン模型の各壁面に設置した波圧計により、前面波圧、底面波圧、背面波圧、天端面波圧を測定した。また、ケーソンの滑動量は、ロッキング等の影響の少ない堤体背面下部において測定した。

(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、捨石マウンド部とケーソン

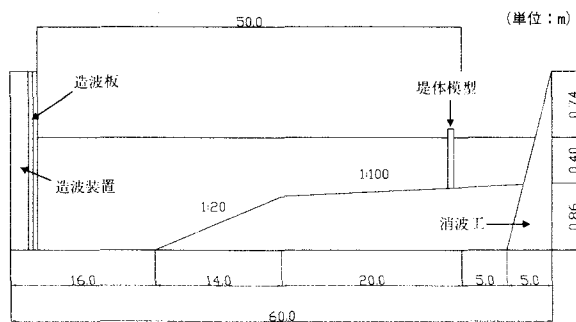
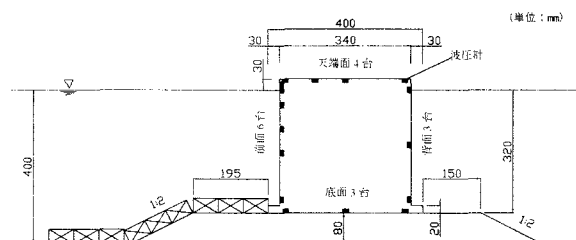
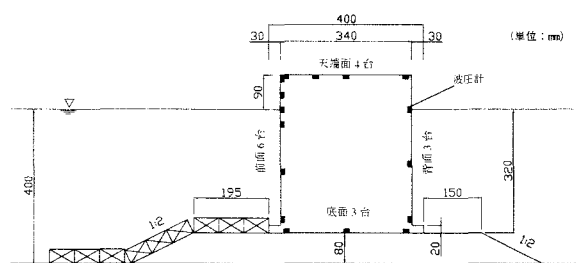


図-2 二次元造波水路



①天端高3cm

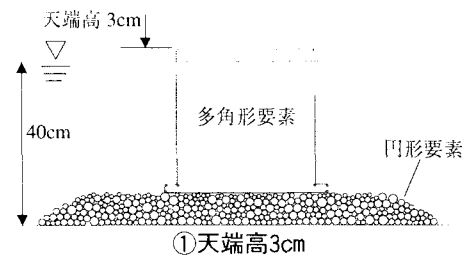


②天端高9cm

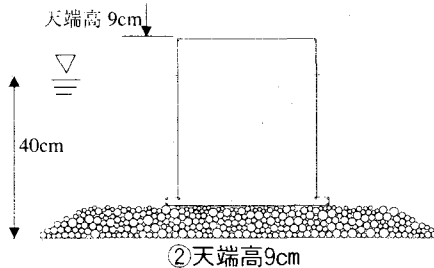
図-3 模型断面図

ン部のみをモデル化した。シミュレーションモデルを図-4に示す。

マウンド部は、はじめに500個程度の円形要素を重力下において自由落下させ、余分な要素を除去することで所定のマウンド形状に整形した。要素は、平均粒径1.7cm、均等係数1.5である。次に、マウンドの平坦性を再現するために、マウンド表層部に小粒径要素（粒径1cm）を追加配置し、均し作業を行った。これは、実際のマウンド建設における「間詰め石」による標高補正にあたる。



①天端高3cm



②天端高9cm

図-4 シミュレーションモデル

表-1 マウンド材料定数

要素平均粒径		D_{50}	(cm)	1.7
要素均等係数		U_c		1.5
要素密度		ρ	(kg/m ³)	2400
バネ係数	法線方向	k_n	(N/m)	2.22×10^8
	接線方向	k_s	(N/m)	5.54×10^6
粘性減衰係数	法線方向	η_n	(N/m・s)	3.37×10^3
	接線方向	η_s	(N/m・s)	9.2×10^{-2}
粒子間摩擦角		ϕ_n	(°)	24.0
転がり摩擦係数		α		1.0
転がり摩擦角		θ_r	(°)	24.0
要素と境界間の摩擦角			(°)	45.0

表-2 ケーソン材料定数

要素平均粒径		D ₅₀	(cm)	0.5
要素密度		ρ	(kg/m ³)	1.39×10 ⁶ (天端高3cm) 1.62×10 ⁶ (天端高9cm)
間隙	法線方向	k _n	(N/m)	3.26×10 ⁸
バネ係数	接線方向	k _s	(N/m)	8.15×10 ⁶
間隙	法線方向	γ _n	(N/m・s)	6.01×10 ³
粘性減衰係数	接線方向	γ _s	(N/m・s)	1.64×10 ⁻¹
要素と辺の摩擦係数		μ		静止摩擦係数 0.6 動摩擦係数 0.5

ケーソン部のモデル化には、実際の底面の平滑な形状を模擬するために、多角形（ほぼ矩形）要素を用いた。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³⁾。

解析に用いた材料定数及び解析条件を表-1、表-2に示す。パラメータ設定にあたっては、過去に実施したケーソン式防波堤の挙動解析に用いた材料定数をもとにした³⁾。また、ケーソン底版の動摩擦係数が滑動量に及ぼす影響が極めて大きいこと⁵⁾から、ケーソンとマウンド間の静止摩擦係数0.6に加えて、動摩擦係数を考慮した。動摩擦係数は、ケーソン水平変位についてシミュレーション結果と実験結果を比較し、実験を良好に再現する解析パラメータを試行錯誤により0.5と定めた。

b) 波力载荷の方法

シミュレーションでは、ケーソン部に作用する浮力、ケーソン部壁面に作用する波力を考慮した。ケーソン部への波力载荷方法を図-5に示す。ケーソン部各壁面（前面、底面、背面、天端面）に設置した波圧計の計測値から、壁面に作用する波力時系列を算出し、各壁面に作用する集中荷重を壁面の両端に作用する等価な2つの集中荷重に置き換えて作用させた。なお、ケーソン部各壁面に設置した波圧計の計測値を直接用いる方法との比較を行い、解析結果に影響がないことを確認している。

3. シミュレーションによる実験の再現性

本章では、ケーソンの水平変位について、実験とシミュレーション結果を比較し、実験の再現性を検討する。天端高3cm及び天端高9cmにおけるケーソン水平変位の比較をそれぞれ図-6、図-7に示す。シミュレーションでは、ケーソンの4つの壁面に作用する波力を用いているため、同図には滑動合成波力を示した。また、実験では、1回目の計測終了後、ケーソンをマウンド上に据え直し、同一の波高・周期において2回目の計測を実施したため、同図には2回の実験結果と、それぞれの実験における観測波力を用いたシミュレーション結果を合わせて示している。

これによれば、天端高3cm及び9cmともに、2回の実験における滑動合成波力はほぼ一致しているが、ケーソン変位量にはばらつきが見られる。天端高3cmのシミュレーションでは、1回目と2回目の実験における観測波力を用いた結果、最終的なケーソン変位量に1cm程度の差が生じている。波浪一波あたりの平均変位量は、実験とシミュレーション結果はよく一致している。一方、天端高9cmについては、最終的なケーソン変位量は、シミュレーション結果が実験よりも大きくなっている。しかし、ここでの実験とシミュレーションの差は、実験における一波毎の変位のばらつき、及び2つの実験結果のばらつ

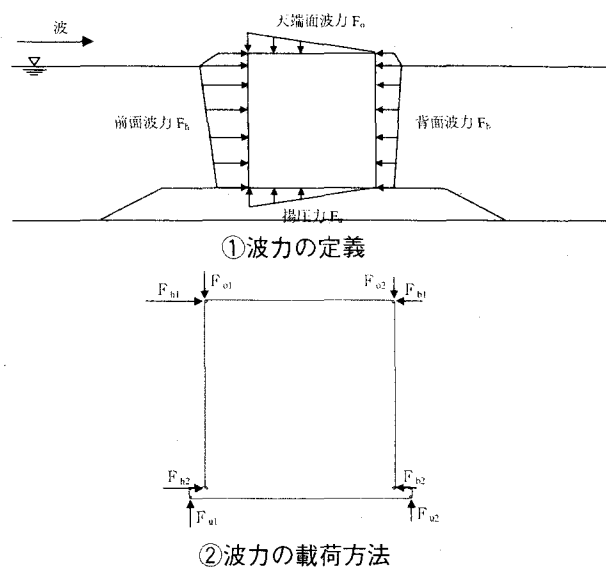


図-5 ケーソン部への波力载荷方法

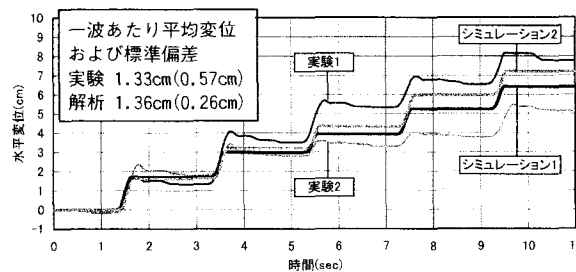
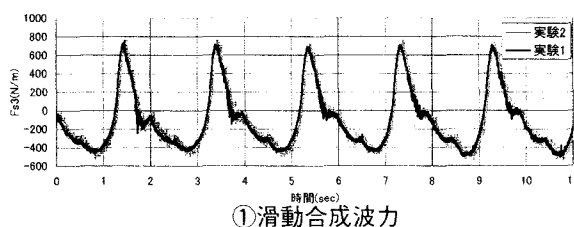


図-6 天端高3cmのケーソン変位の比較

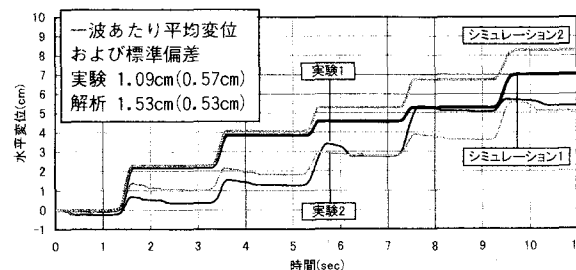
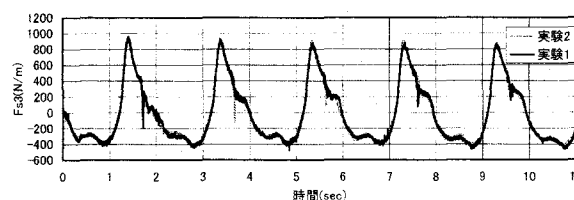


図-7 天端高9cmのケーソン変位の比較

(シミュレーション1・2は、それぞれ実験1・2における観測波力を载荷)

きから考えて、ばらつきの範囲内にあると思われる。

4. マウンドの変形メカニズム

実験とシミュレーション結果についてケーソン水平変位を比較した結果、両者は定量的に対応が良いことが確認された。本章ではシミュレーション結果について、マウンドの変形メカニズムを検討した。その結果、天端高3cmと9cmの比較において、マウンド部の支持力破壊の有無に起因すると考えられる変形モードの相違が見られた。ここでは、マウンド部のせん断ひずみ分布および応力柱分布（応力を伝達する粒子が柱のように連なった様子）により、マウンドの変形メカニズムの相違について述べる。

(1) 支持力破壊が生じない場合の変形メカニズム

ここでは、天端高3cmのシミュレーション結果について、波浪第一波～第三波時におけるマウンドの変形状況を示す。第一波～第三波時において、マウンド部に生じた局所せん断ひずみ増分の分布状況を図-8に示す。これによれば、第一波目でケーソン後趾側のマウンドに変形が生じているが、二波目及び三波目ではマウンドに大きな変形が生じていない。このことから、第二波目以降においては、ケーソン

の滑動変形が卓越していると言える。

第一波～第三波の前面波力ピーク時におけるマウンド内の応力柱分布状況を図-9に示す。図中に黒色で示した線が、大きな応力を伝達する要素の連なりを表す。これによれば、黒色で示した大きな応力柱の分布形状は、第一波目・二波目及び三波目の前面波力ピーク時において、ほぼ同じであることがわかる。これは、マウンドにおける応力の伝達状況、すなわち荷重支持構造がほぼ同じであることを示している。

このマウンドの変形状況と荷重支持構造を照らし合わせると、以下のような変形メカニズムが考えられる。第一波目では、マウンドの変形が生じることにより、マウンド内にケーソン荷重の支持構造が形成される。これは支持力破壊というより、マウンドが締め固まる過程を示すものと考えられる。二波目以降では、マウンド部に大きな変形が生じないことから、第一波目に形成された支持構造によりケーソン荷重を支持する一方で、滑動に対しては、最大静止摩擦力を上回る波力の作用により、動摩擦を伴う純粋な滑動が生じていると考えられる。

(2) 支持力破壊が生じた場合の変形メカニズム

ここでは、天端高9cmのシミュレーション結果に

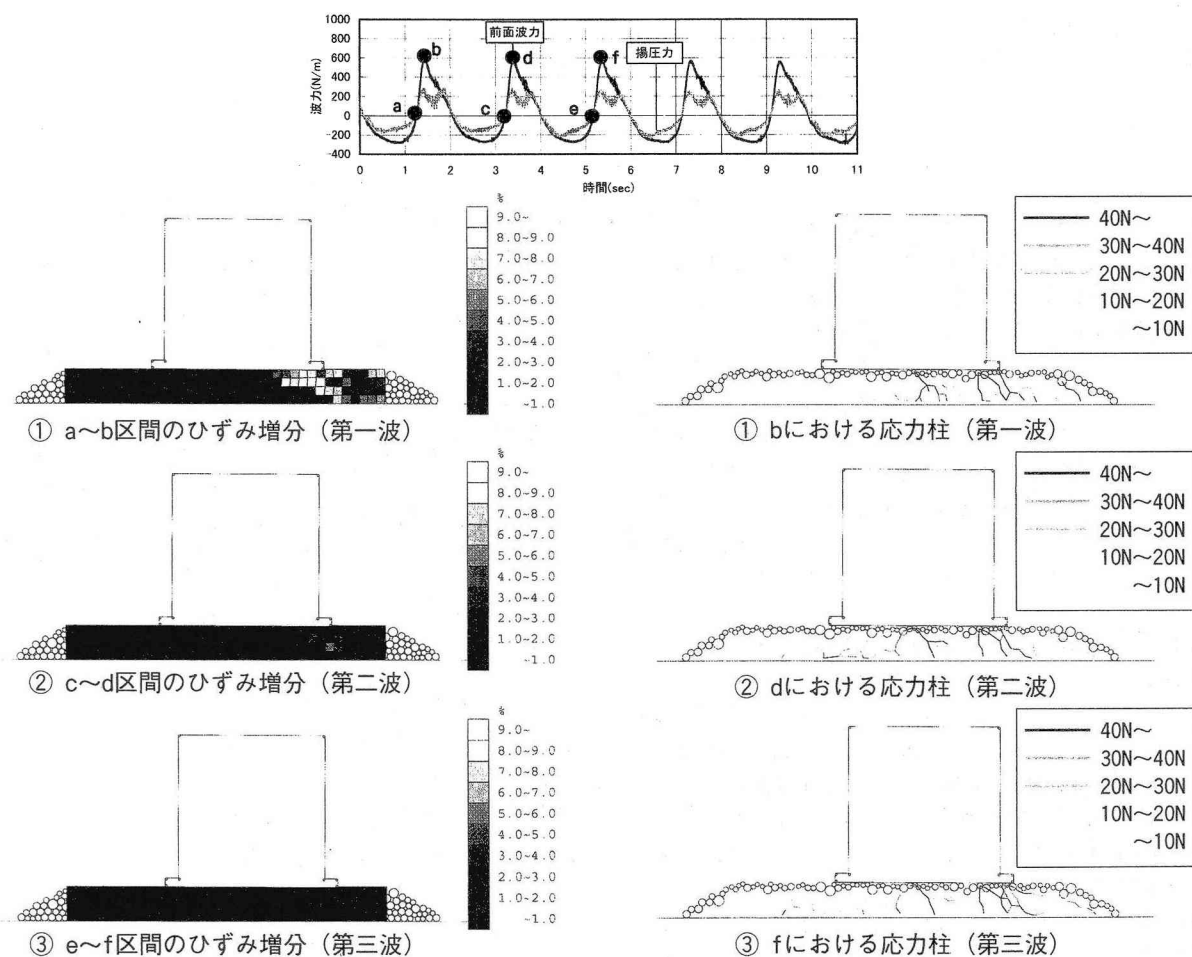


図-8 せん断ひずみ(増分)分布

図-9 応力柱分布

ついて、前項と同様にマウンドの変形状況を観察する。波浪第一波～第五波時において、マウンド部に生じた局所せん断ひずみ増分の分布状況を図-10に示す。これによれば、第一波目ではマウンドの変形が生じ、二波目・三波目ではマウンドには目立った変形が生じておらず、ケーソンの滑動変形が卓越している。この変形状況から、天端高3cmの場合と同様に、第一波目でマウンド部がケーソン荷重の支持構造へと変形し、二波目・三波目では第一波目で生じた支持構造によりケーソン荷重を支持していると言える。

しかし、三波目以降、四波目・五波目では、ケーソンが滑動し、マウンド法肩部に近付くにつれて、マウンド部には新たに大きな変形が生じていることがわかる。シミュレーション結果を観察した結果、第五波では、マウンド法肩部が崩壊する様子が観察された。これは、天端高9cmにおいては天端高3cmよりも、ケーソンの沈下量が大きいことに加えて、ケーソンの滑動量が大きく、後趾からマウンド法肩までの余長が短くなって支持力破壊を起こしているためであると考えられる。

実験においても、ケーソンの沈下及びマウンド部の変形が生じており、シミュレーションの結果と対応することを確認している。

5. ケーソンの摩擦係数の検討

今回実施したシミュレーションでは、ケーソン部に作用する滑動合成力がほぼ同じであっても、ケーソンの滑動量には相違が見られた。ケーソンの滑動量に影響を及ぼす要因としては、動摩擦係数が知られている⁵⁾。図-11に、動摩擦係数を考慮せず静止摩擦係数0.6のみによるシミュレーション結果を示す。同図に示すように、静止摩擦係数のみでは実験におけるケーソン変位を良好に再現できないことから、これを良好に再現する動摩擦係数を試行錯誤により定め、3章の検討では、その値0.5を用いた。しかしながら、図-7に示したように、天端高9cmにおけるケーソン滑動量は、2つのシミュレーション結果でばらつきが大きい。そこで、本章では、天端高9cmのケーソンに対する一自由度系のモデルを用いて、摩擦係数が滑動量に及ぼす影響について検討する。ここでは、動摩擦係数と静止摩擦係数に等しい値を用いた。

図-12に摩擦係数をパラメータとした場合のケーソン滑動量を比較する。3章のシミュレーションに用いた摩擦係数近傍における滑動量のばらつきを確認するために、同図には摩擦係数0.6及び0.5を中心として前後にばらつきを持たせた結果を示している。これによれば、摩擦係数0.5付近におけるケーソン滑動量のばらつきは、0.6付近の滑動量に比べ、著しく大きいことがわかる。

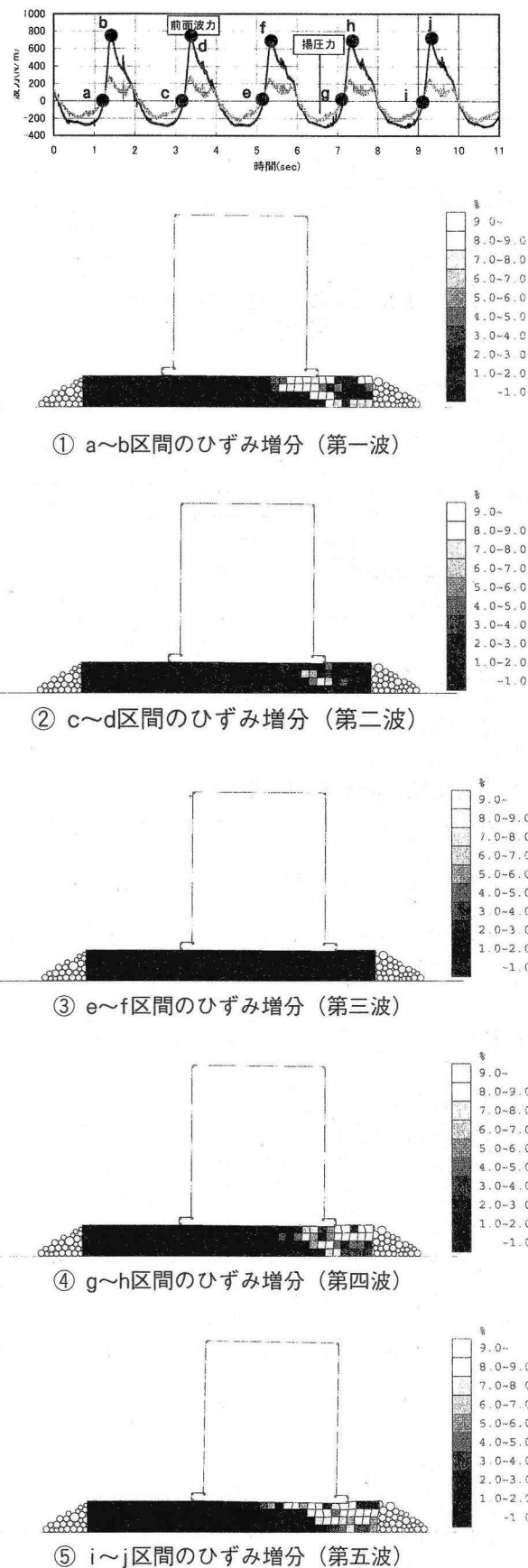


図-10 せん断ひずみ(増分)分布

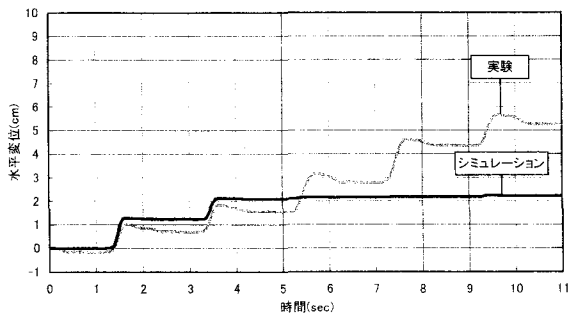


図-11 動摩擦係数を考慮しない場合の結果
(天端高9cm)

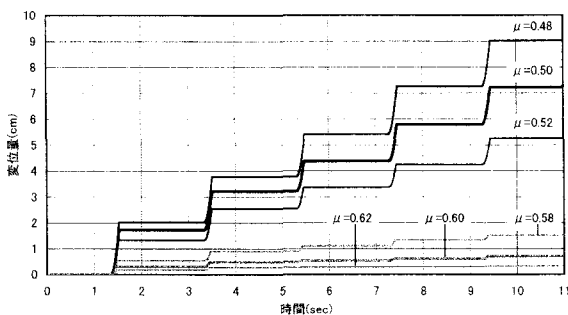


図-12 摩擦係数のパラメータスタディ結果

6. まとめ

本研究では、直立堤の滑動実験を対象とした個別要素法によるシミュレーションを実施した。その結果明らかになった点について以下に示す。

- ①本実験における条件では、天端高3cmのケースでは、第一波目でマウンド部の変形が生じ、二波目以降では、マウンド部に大きな変形が見られなかった。これは、一波目でマウンドの変形が生じることにより、マウンド内にケーソン荷重の支持構造が形成される。この支持構造により、二波目以降ケーソン荷重を支持していること、二波目以降は滑動変形が卓越している。
- ②一方、天端高9cmのシミュレーションでは、ケーソンがマウンド法肩部に近付いた四波目、五波目においては、マウンド法肩部が崩壊する様に変形していた。これは、ケーソンの沈下量が大いことに加えて、後趾からマウンド法肩までの余長が短くなって支持力破壊を起こしていると考えられる。
- ③ケーソン滑動量の累積値に、動摩擦係数の及ぼす影響は大きく、これが小さくなるほど、ケーソン-マウンド系の応答に対して敏感になる。

本研究で対象とした実験は、滑動に対する安全率が1を下回る条件であった。個別要素法を用いてこの実験を再現するには、ケーソンとマウンド間に働く最大静止摩擦力（摩擦係数0.6）を上回る波力の作用に対して、動摩擦（摩擦係数0.5）が働くモデル化が必要であった。このように、動的な変形では、一旦滑動が生じれば、これに抵抗する摩擦は最大静止摩擦力より小さい動摩擦となる。すなわち、滑動に対する安全率が低い場合に、設計限界に達する波浪が襲来すれば、繰り返し作用する波力のうち数十回あるいは数百回は最大静止摩擦力を上回り、力の小さい動摩擦による抵抗となる。このような状況では、ケーソンの変形量は容易に終局状態に達することになる。

また、本検討では、個別要素法で、実験での観測波力を作用させて「滑動」から「支持力破壊」まで一連の変形現象を定量的に再現できることを確認したが、数値波動水路（CADMAS-SURF）で波力を算定し、個別要素法で変形挙動を解析することも可能である。

今後は、マウンドの「支持力破壊」に対するメカニズムの解明や性能照査方法の確立に向けて、実験を補完するツールとして個別要素法を有効に活用していきたい。

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

参考文献

- 1) 下迫健一郎・高橋重雄：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，第37巻，1998。
- 2) 土田孝・湯怡新：港湾構造物の円弧滑り解析における最適な安全率，港湾技術研究所報告，第35巻，1996。
- 3) 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，Vol5，pp.461-472，2002。
- 4) 藤井直樹・興野俊哉・安田勝則・大熊義夫：個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算，土木学会海岸工学論文集，第48巻，pp.801-805，2001。
- 5) 青木伸一・奥部綾子：防波堤直立部の滑動シミュレーション，海岸工学論文集，第42巻，pp.861～865，1995。