

(180) 個別要素法を用いたケーソン式護岸の 模型実験に対するシミュレーション

東電設計 (株) 正会員 中瀬 仁 正会員 栗田哲史 正会員 安中 正
東京電力 (株) 正会員 安田 登 正会員 藤谷昌弘

1. はじめに

個別要素法の適用研究は、1)要素試験的な数値実験^{1),2)}と、2)模型実験の代替としての数値シミュレーションの2つの範疇に分けられる。前者の主な目的は、土質材料の持つ粒状体の変形特性に関する新しい情報を土質力学に提供することであり、後者のそれは、大変形を受ける土木構造物の設計に資することであろう。後者は、実務にその成果を直接反映できる可能性があるが、そのためには、定性的な再現性を重視している現状から今一步踏み出す必要があると考えられる。大変形をうける土質材料について定量的な評価を行うための第1の関門は、通常用いる円形要素では土質材料の土粒子のインターロッキングによる強度が十分發揮されないと言う問題であろう。ここでは、要素の回転自由度を拘束する手法³⁾によりこの問題に対応し、ケーソン式護岸の模型振動実験⁴⁾に対するシミュレーション結果からその有効性を示す。

2. 要素の回転自由度と全体としての強度

個別要素法の解析において、通常の円形要素では地盤の破壊を表現できない例として、図-1のような鉛直に切り土した崖の崩壊する様子をシミュレーションするような場合が解り易い。粘着力のない材料が鉛直な壁を保持できないことは当然であるが、回転を自由にした通常のシミュレーションでは、壁が崩壊した後、丸い要素は容易に転がるので反対側の境界に至るまで水のように広がる。

これに対して、実際の土質材料では図-2の例のように一定の安息角を保って崩壊が終了する。実は、図-2のシミュレーションは、他を図-1のシミュレーションと全く同じ条件で要素の回転自由度を拘束して行ったものである。

この場合、要素個々の動きは、並進運動しか行わない不自然なものとなるが、全体としては、図-1に比べて土質材料の崩壊の現象をそれらしく表現できている。これは、要素の回転自由度を拘束する事により要素間の相対変位が「すべり」に限られ、動員される摩擦力が増大し、この結果、全体としての強度 (内部摩擦角) が大きくなるためである。

図-1のシミュレーションが実際と異なる原因は、角ばった砂粒子と丸い個別要素法の要素との形状が異なる点にある。丸くない土粒子のインターロッキングは目黒

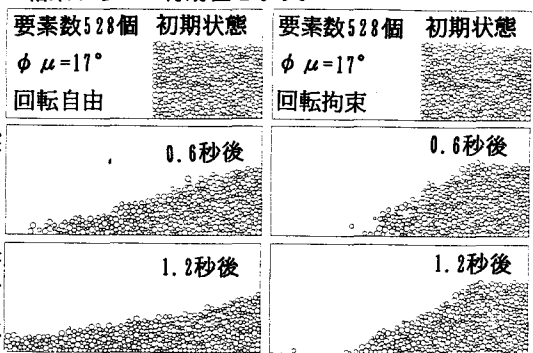


図-1 抵抗が小さいので図-2すべりによる摩擦が反対側の境界まで水の発揮されて自然に安定するように広がる要素る要素

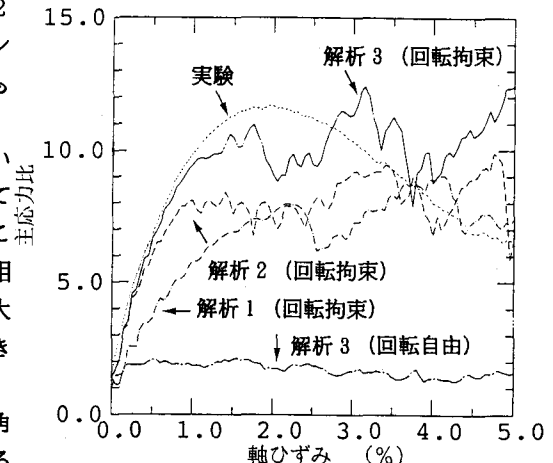


図-3 砂に対する平面ひずみ圧縮試験と個別要素法によるシミュレーション

らによる連結要素^{5), 6)}や沢田⁷⁾らの楕円要素を用いて表すことが物理的に有意義であると思われるが、ここでは、この回転自由度を拘束する手法を土質材料を表現する解析上の簡便なテクニックとして用い、これが有効であることを示す。

3. 材料定数を決定するための室内土質試験のシミュレーション

ケーソン式護岸の模型振動実験で用いた砂を表す要素の材料定数については、全体としての強度が等価になるようにすることが重要と考え、その砂の平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法のシミュレーションを行って定めた。

図-3の点線がケーソン式護岸の模型振動実験で用いた砂の主応力比-軸ひずみ関係であり、回転自由度を拘束する個別要素法のシミュレーションにおいて、この曲線を再現するようなバネ係数と要素間摩擦角を試行錯誤で決定した。シミュレーションで用いた供試体の要素の配合等の条件は、次の模型実験の解析モデルと同じである。

表-1に各解析で用いたバネ定数(K_n 、 K_t)と要素間摩擦角(ϕ_μ)の一覧を示す。バネ定数は変形特性(初期勾配)に、要素間摩擦角は強度特性(内部摩擦角)に大きく影響する。

図-3において、解析と実験を、最初のピーク強度とこれに至る勾配に着目して比較する。解析1の結果は初期勾配が小さ過ぎる。解析2は初期勾配は良く一致しているが強度が小さい。解析3の結果が初期勾配、強度共に良く一致していると判断した。最初のピークを過ぎた後の残留強度を発揮する過程では、解析と実験との間で傾向が異なるが、ここでは、解析3で用いたバネ定数と要素間摩擦角を砂の材料定数として採用した。ちなみに、解析3の材料定数で要素の回転自由度を拘束しない場合は、図に示すようにその強度は砂に比べてきわめて小さい。

表-1 解析別の材料定数

	K_n (N/m)	K_t (N/m)	ϕ_μ (°)
解析1	1.44×10^7	1.44×10^7	25.0
解析2	3.60×10^7	3.60×10^7	25.0
解析3	3.60×10^7	3.60×10^7	27.0

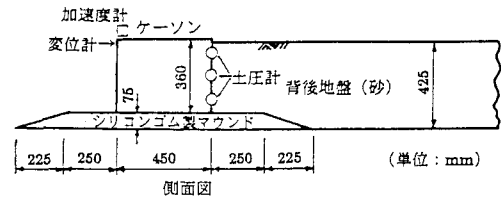


図-4 実験モデルの概要図

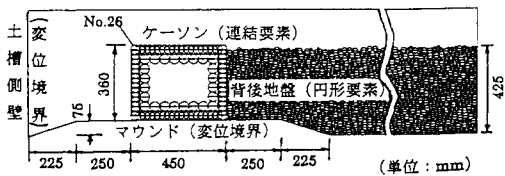


図-5 個別要素による実験模型のモデル化

4. シミュレーション結果

図-4にシミュレーションの対象とした約1/40のケーソン式護岸の模型を、図-5に実験模型の個別要素によるモデル化を示す。ケーソンは連結要素⁹⁾、背後地盤は回転自由度を拘束した円形要素、マウンドと土槽は変位境界で表している。加振は変位境界を入力波に従って変位させることによって行った。入力波は、実験時に計測された振動台の加速度波形

表-2 材料定数と解析条件

要素数	N	2088
ケーソン要素の密度	ρ_c (kg/m ³)	2572
背後地盤要素の密度	ρ_b (kg/m ³)	1920
法線方向要素バネ定数	K_{en} (N/m)	3.60×10^7
接線方向要素バネ定数	K_{et} (N/m)	3.60×10^7
法線方向要素減衰係数	η_{en} (N・sec/m)	2.37×10^3
接線方向要素減衰係数	η_{et} (N・sec/m)	18.9
背後地盤の要素間摩擦角	$\phi_{\mu b}$ (°)	27.0
マウンド-ケーソン間の摩擦角	$\phi_{\mu cm}$ (°)	12.5
マウンド-背後地盤間の摩擦角	$\phi_{\mu bm}$ (°)	15.2
背後地盤-土槽間の摩擦角	$\phi_{\mu con}$ (°)	45.0
背後地盤-ケーソン間の摩擦角	$\phi_{\mu bc}$ (°)	27.0
時間刻み	Δt (sec)	5.0×10^{-5}
継続時間	T (sec)	1.5

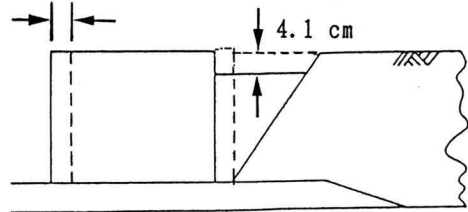
を積分した変位波形を用いた。表-2に材料定数と解析条件の一覧を示す。

図-6に加振後の水平相対変位量の絶対値の分布とせん断ひずみの分布の様子を示す。(a)に示した実験のスケッチと比較すると、背後地盤の沈下範囲が実験に比べやや広い傾向はあるが、全般的にみると、破壊の様子は実験とほぼ対応している。図-7(a)にケーソンの相対変位波形、(b)にケーソンの絶対加速度波形、(c)ケーソンに作用する平均動土圧、(d)入力変位波形を示す。解析が実線、実験が点線である。ここで、変位と加速度は陸側が正、動土圧は圧縮が正である。変位波形、加速度波形、動土圧の各波形共に実験値と良く一致しており、ケーソンの挙動が良く再現できている。

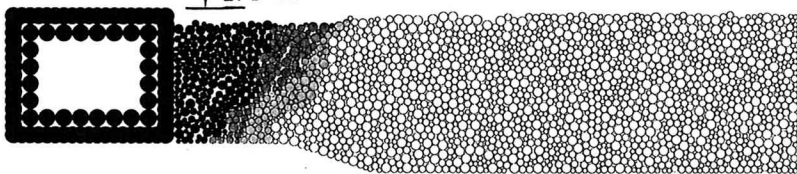
これに対して、回転自由度を拘束しないシミュレーションは、図-8のように背後地盤の破壊領域が実験に比べてかなり広く、図-9のようにケーソンの相対変位が大きくなっており、回転自由度を拘束する手法が有効であることが解る。

5. おわりに

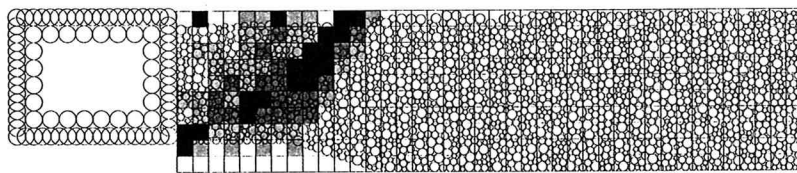
要素の回転自由度を拘束した個別要素法によって、土質材料のインターロッキングによる強度を表現することができ、護岸構造物の模型振動実験に対するシミュレーションを精度良く行うことができた。回転自由度を拘束する手法は、シミュレーションの初期状態を作成する際に連結要素を用いるより簡便であり、楕円要素を用いるより計算時間が約4倍速いので、模型実



(a) 実験のスケッチ



(b) 水平相対変位量の絶対値の分布



(c) せん断ひずみの分布

図-6 加振後の水平相対変位量の絶対値の分布とせん断ひずみの分布 (回転拘束)

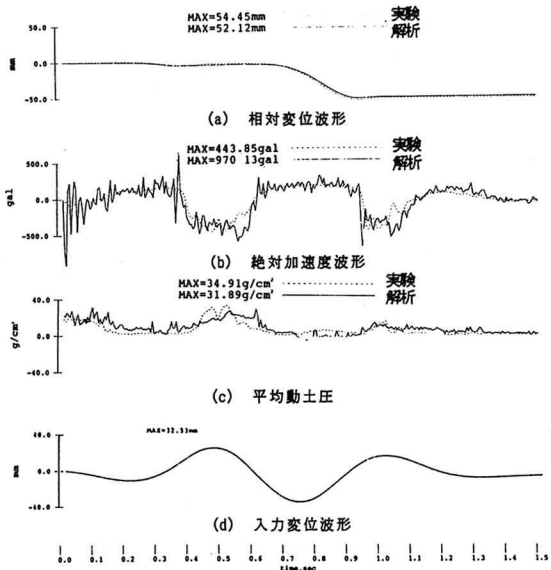


図-7 時刻歴波形 (回転拘束)

T. V. = 5.0 cm

- 0 ~ 1/5 T. V.
- 1/5 ~ 2/5 T. V.
- 2/5 ~ 3/5 T. V.
- 3/5 ~ 4/5 T. V.
- 4/5 ~ T. V.
- T. V. ~

T. V. = 15%

- 0 ~ 1/5 T. V.
- 1/5 ~ 2/5 T. V.
- 2/5 ~ 3/5 T. V.
- 3/5 ~ 4/5 T. V.
- 4/5 ~ T. V.
- T. V. ~

験の代替としての数値シミュレーションを行う際に有利である。

謝辞

要素の回転を拘束する手法を指摘して頂いた東北学院大学教授佐武正雄教授に謝意を表します。本研究で用いた砂の平面ひずみ圧縮試験は、東京大学生産技術研究所龍岡研究室で行われたものである。また、個別要素法のプログラムは京都大学澤田純男助手の開発した「DEMS」を改良したものである。

参考文献

- 1) 山本、松岡：個別要素法によるアルミ棒積層体の一面せん断試験シミュレーション、第4回地盤工学シンポジウム、pp39～46、1992。 2) 中瀬、安中、片平、奥野：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/ -20、pp.55-64、1992。 3) 中瀬、栗田、安中、安田、藤谷：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、pp.390～391、1992。 4) 安田、福井、佐藤、豊田、黒瀬：護岸構造物の地震時挙動に関する実験的研究（その1）土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.160～161、1992。 5) Meguro, K and Hakuno, M. :Fracture Analysis of Concrete Structures by the Modified Distinct Element Method, Proc. of JSCE, Structural Eng. /Earthquake Eng. , No. 410/I-12, pp. 113～124, October 1989。 6) 中瀬、栗田、安中、片平、奥野：改良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46回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.466～467、1991。 7) 澤田、岩崎、プラダン：楕円要素を用いた個別要素法による砂のせん断挙動の解析、第26回土質工学研究発表会、pp.521～522、1991

連絡先：東電設計（株） TEL 03-5510-6184

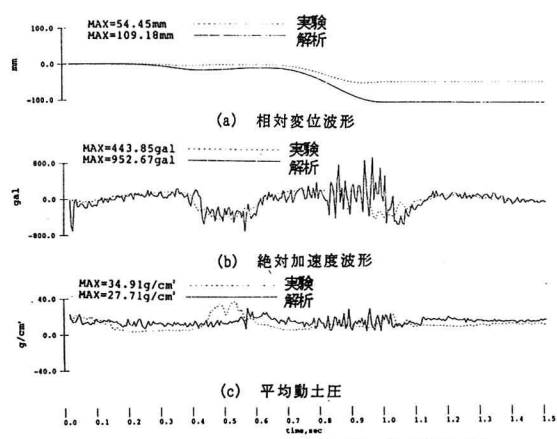
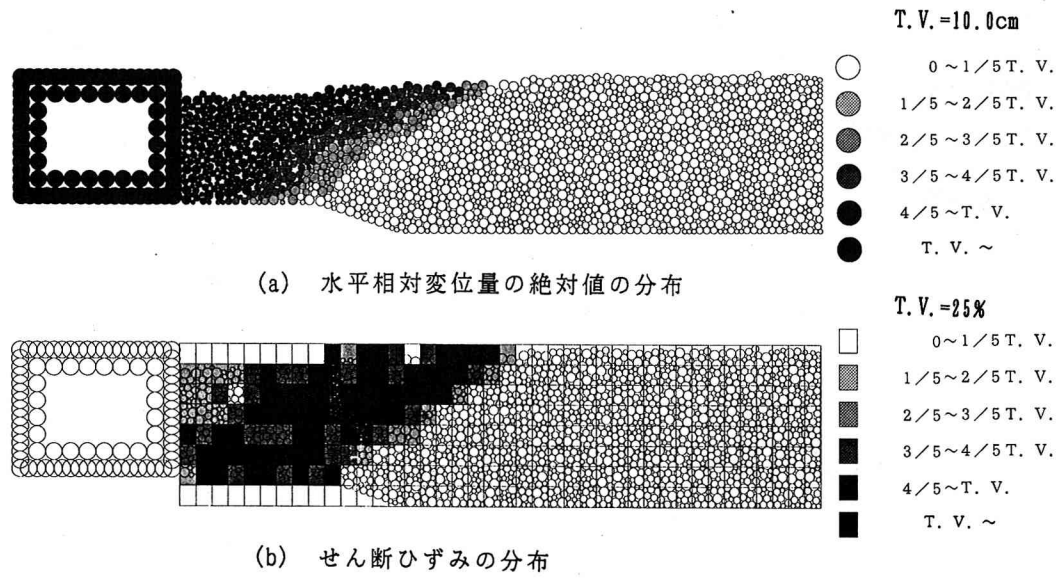


図-9 ケーソンの応答（回転自由）



(b) せん断ひずみの分布

図-8 背後地盤の破壊状況（回転自由）