

MPS 法によるニューマチックケーソン施工時の地盤変形解析

Deformation Analysis of Ground in Construction of Pneumatic Caisson using MPS Method

珠玖隆行	Takayuki SHUKU	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
西村伸一	Shin-ichi NISHIMURA	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
川崎 元	Motoi KAWASAKI	((株)大本組土木本部)
尾形恒夫	Tsuneo OGATA	((株)大本組土木本部)
柴田俊文	Toshifumi SHIBATA	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)

本研究では、粒子法の1つである Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法に着目し、ニューマチックケーソン施工時の地盤の変形予測手法を新たに提案している。はじめに、Mohr-Coulomb の破壊基準を導入した Bingham 流体モデルを用いた MPS 法プログラムを構築し、ベンチマークテストによりプログラムの精度検証を行った。その後、ニューマチックケーソンの施工を模擬した数値実験を実施し、ケーソン施工に伴う地盤の変形挙動予測への提案手法の適用性について検討した。ベンチマーク問題の解析結果から、構築したプログラムによりベンチマーク問題を精度よく再現できることが示された。さらに、提案手法はニューマチックケーソン施工に伴う地盤の変形、具体的にはケーソン周辺の連込み沈下や、沈設に伴う地盤の変形挙動を定性的に再現できることを示した。

キーワード：MPS 法，ニューマチックケーソン工法，変形解析 (IGC : E12, E13)

1. はじめに

ニューマチックケーソン (pneumatic caisson) 工法とは、ケーソン底部の作業室に圧縮空気を送ることで地下水を排除し、掘削・排土を繰り返してケーソンを沈設する工法である¹⁾ (図-1)。地下水位以下の地中においても地上と同様の掘削作業が行えること、基礎地盤が直接確認できることが特長として挙げられ、橋梁下部工への利用のみならず、調整池やポンプ場、シールドマシンの発進・到達立坑といった種々の土木構造物の施工に応用されている^(例えば 2)。

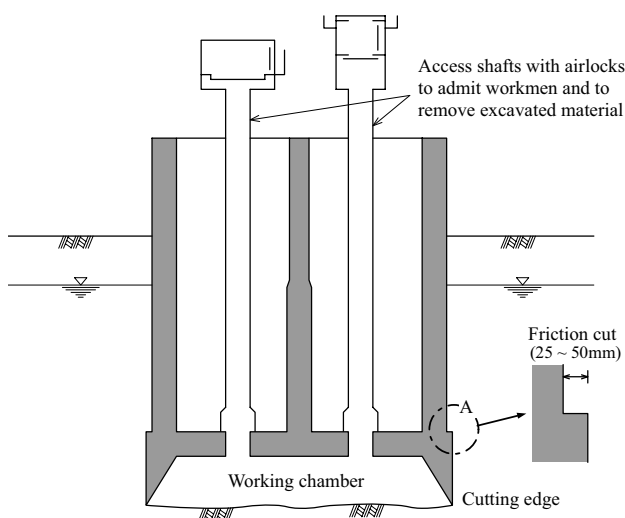


図-1 ニューマチックケーソン工法

ニューマチックケーソン工法においては通常、ケーソン沈設時の周面摩擦を減少させることを目的に、厚さ 25mm ~ 50mm のフリクションカットと呼ばれる段差が設けられる (図-1 参照)。このフリクションカットによって、ケーソン本体と地盤の間に空隙が生じ、この空隙に土砂が移動して地盤の変位の原因となることが報告されている³⁾。最近では、既設構造物の近接したサイトにケーソンを沈設する事例も増加しており、ケーソン沈設に伴う周辺地盤への影響を評価し対策を検討することは、安全な工事を実現するために必要不可欠である。

ケーソンの近接施工に伴う周辺地盤への影響を評価する代表的な方法として、有限要素法 (以下、FEM と略称する) が挙げられる。最近のコンピュータの発達と汎用プログラムの開発により、高度な数値シミュレーションが実務レベルで利用されている。ニューマチックケーソン工法を対象とした FEM の研究例として、例えば梅田ら⁴⁾は、ケーソンの各施工ステップにおける力の釣合いを考え、躯体と地盤に作用する外力を計算し、得られた外力を FEM の荷重として考慮することで、ケーソン沈設に伴う地盤の変形を解析した。また、井上ら⁵⁾は、梅田らと同様の方法を用いて、周面摩擦やフリクションカットに関するパラメトリックスタディを実施した。一方、Peng et al.^{6),7)}は、梅田らの方法を実際の上海のニューマチックケーソン施工現場に適用し、上記の方法により、実観測データを精度よく再現・予測できることを示した。

しかしながら、梅田らの方法においてケーソン躯体は、地盤に荷重を伝えるためのインターフェースの役割しか果たしておらず、周辺地盤がケーソン躯体に及ぼす影響や

ケーソン沈設に伴う躯体の傾きを評価することは困難である。さらに、FEM では掘削に伴うフリクションカット空隙への土砂の流れ込みや、施工に伴う地盤の大変形挙動を表現することはできない。

そこで本研究では、ケーソン沈設に伴う周辺地盤の変形挙動予測精度の向上を目的とし、新たな評価手法を提案することを目的とする。先述した FEM に基づいた解析手法の課題を克服するため、本研究では粒子法の一つである Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法⁸⁾⁹⁾に着目し、そのニューマチックケーソン施工過程解析への適用性について検証する。MPS 法をはじめとする粒子法は、流体の分野で開発され発展してきた手法であるが、最近では構造工学や地盤工学の分野で幅広く応用されるようになってきた^{例えば 10)}。

本研究でははじめに、地盤の挙動評価を目的とした MPS 法プログラムを構築し、手法の精度検証を目的とした数値実験を実施する。その後、ニューマチックケーソン施工過程解析に適用し、数値実験を通して提案手法の有効性について議論する。

2. Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法^{8), 9)}

2.1 MPS 法の概要

MPS 法は、粒子法の一つであり、微分演算子を粒子間相互作用モデルで表現することで、連続体の支配方程式を離散化することに特徴がある。粒子間相互作用モデルの導出過程や詳細な説明は越塚⁹⁾により詳しく解説されているため、ここでは概要について述べるにとどめる。

代表的なベクトル演算子である勾配、発散、ラプラシアンは相互作用モデルによって次のように表すことができる。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (1)$$

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)] \quad (3)$$

ここで、 ϕ はスカラー変数値、 \mathbf{v} はベクトル変数値を表す。また、 d 、 n^0 、 \mathbf{r} 、 w 、 $(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$ および λ は、それぞれ次元数、初期粒子数密度、位置ベクトル、重み関数および粒子間距離の二乗平均である。ここで、重み関数 w は次式により表される。

$$w(r) = \begin{cases} R/r - 1 & (0 \leq r \leq R) \\ 0 & (R \leq r) \end{cases} \quad (4)$$

ここで R は影響半径である。また、 n^0 および λ は次式により求め、計算中は同じ値を使い続ける。

$$n^0 (= n_i) = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2 w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)}{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (6)$$

2.2 地盤材料の力学挙動を対象とした MPS 法

本研究では、以下に示す支配方程式を解くことにより、地盤材料の挙動を再現する。

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{K} \quad (7)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (8)$$

ここに、 \mathbf{v} は速度ベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$ はせん断応力テンソル、 \mathbf{K} は物体力ベクトル、 ρ は流体の密度を表す。式(7)は Newton 流体のみならず、流体一般に成り立つ Cauchy の運動方程式である。

式(7)右辺の $\boldsymbol{\tau}$ 、すなわち流体の構成モデルとして、Mohr-Coulomb 基準を導入した Bingham 流体を用いる¹¹⁾。まず、一般的な Bingham 流体モデルは次式により表される。

$$\begin{cases} \tau_{ij} = \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}_{ij} & (\tau_{ij} \geq \tau_0) \\ \dot{\gamma}_{ij} = 0 & (\tau_{ij} < \tau_0) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 η_0 は塑性粘度、 $\dot{\gamma}_{ij}$ はせん断ひずみ速度、 τ_0 は Bingham 降伏値を表す。なお、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{ij}$ は次式で定義される。

$$\dot{\gamma}_{ij} = 2D_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

ここに、 D_{ij} は、変形速度テンソル \mathbf{D} の i, j 成分である。

本研究では、先述したように Bingham 降伏値として、地盤材料の破壊規準として一般的に用いられている Mohr-Coulomb の破壊基準を採用する。

$$\tau_0 = c + \sigma \tan \phi \quad (11)$$

ここに、 c は粘着力、 σ は垂直応力、 ϕ は内部摩擦角を表す。式(10)を式(9)に代入し、 σ を圧力 p で置き換えると、式(11)は以下のように書き換えられる¹¹⁾。

$$\tau_{ij} = c + p \tan \phi + \eta_0 \dot{\gamma}_{ij} \quad (12)$$

このモデルを用いることにより、地盤工学実務で一般的に用いられている $c \cdot \phi$ という 2 つのパラメータにより、Bingham 流体の力学挙動を規定することができる。

式(12)をせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{ij}$ で除することにより、Newton 流体と等価な「見かけの粘性係数」が以下のようにならされる。

$$\eta' = \frac{c + p \tan \phi}{|\dot{\gamma}|} + \eta_0 \quad (13)$$

ここに、 $|\dot{\gamma}|$ は次式で定義される。

$$|\dot{\gamma}| = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ij}} \quad (14)$$

式(13)から明らかなように、 $|\dot{\gamma}|$ が0であれば η は無量大となり、数値計算できない。そこで、 η の最大値 η'_{\max} を以下のようにbi-linearな関数として定義する。

$$\begin{cases} \eta' = \eta_0 + \frac{c + p \tan \phi}{\dot{\gamma}} & (\text{if } \eta' \leq \eta'_{\max}) \\ \eta' = \eta'_{\max} & (\text{if } \eta' > \eta'_{\max}) \end{cases} \quad (15)$$

上式から、本モデルではひずみ速度がゼロの状態を再現できないことになるが、粒子が動かないような η'_{\max} を設定することで、実質上ひずみ速度がゼロの計算が可能となる。 η'_{\max} を小さな値に設定すると、Bingham流体の変形挙動に影響するため、なるべく大きな値を設定することが望ましい。しかしながら、大きな値を設定すると時間刻み Δt を極端に小さくしなければ安定的に計算できないため、対象となる問題に応じてその値を設定することが求められる。

2.3 計算アルゴリズム

MPS法の計算アルゴリズムでは、圧力項以外の項（粘性項と重力項）を陽的に解き、その後、非圧縮条件を満たすように圧力項を解く、半陰解（semi-implicit）法が用いられている⁸⁾。本研究で構築するプログラムにおいても半陰解法を採用し、図-2の手順に従い計算を実施する。

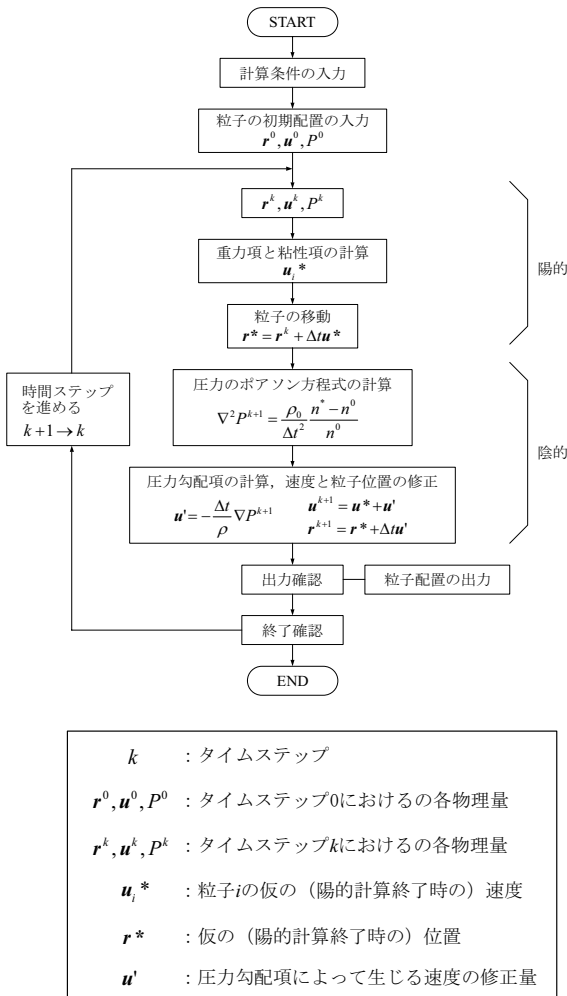


図-2 計算アルゴリズム⁹⁾

本プログラムでは、Bingham流体を構成モデルとして用いるため、粘性項の計算の際に富山^{12),13)}が提案した直接反復法による収束計算を採用した。その手順を以下に示す。

- ① 仮の初期速度 u_i^{*0} を計算する
- ② u_i^{*0} からひずみ速度 $\dot{\gamma}_{ij}$ を計算する
- ③ ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{ij}$ を用いて粘性項を計算し、仮の速度 u_i^* を得る
- ④ 次式により収束判定を行う

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i^* - u_i^{*0})^2}{\sum_{i=1}^n (u_i^*)^2}} \leq \text{eps}$$

- ⑤ 収束した場合は次のステップに進み、収束しない場合は、 $u_i^{*0} = u_i^*$ として②～④を繰り返す。

ここに、epsは誤差判定基準を表し、本研究では0.03と設定する。

3. ベンチマークテスト

ベンチマークテストとは、計算法や計算コードの検証のために実施される標準的な問題の解析を意味する。ここでは、流体計算の検証に一般的に用いられているダムブレイク問題とBingham流体モデルの検証に用いられるフレッシュコンクリートのL型フロー試験を取り上げる。

3.1 ダムブレイク問題

実験の模式図を図-3に示す。幅 L 、高さ $2L$ の初期寸法を持つ水柱が仕切り板で仕切られており、仕切り板を瞬間的に取り去った後の崩壊した水柱先端の移動速度を計測する。そして、ある計算手法によって計測データが再現できるかどうかを検証する。ダムブレイク問題の代表的な実験データとして、Martin and Moyce¹⁴⁾の研究が挙げられ、Martin and Moyce¹⁴⁾の実験データと構築したMPS法によって得られた解析結果との比較を行う。

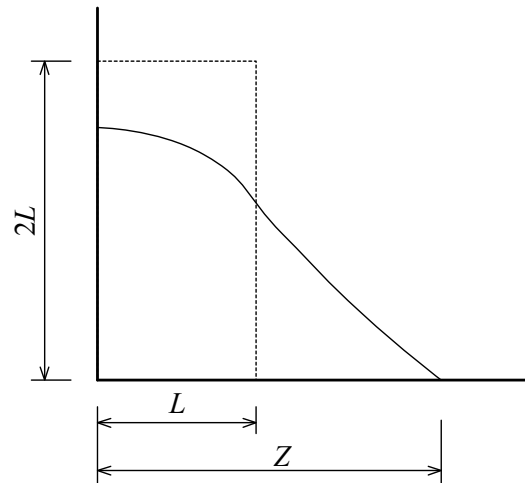


図-3 ダムブレイク問題の模式図

計算に用いた入力パラメータを表-1 にまとめる。作成したプログラムは Bingham 流体を対象としているが、パラメータの設定により、水をはじめとする Newton 流体の挙動を扱うこともできる。

図-4 に崩れた水柱の底面における先端位置の変化を示す。ここに先端位置とは、時刻 t において崩壊した水粒子のうち最も右側に位置する粒子の中心座標となり、この座標を各時刻でプロットし整理したものが図-4 となる。図中のプロットが実験結果であり、実線が MPS 法による計算結果を示している。図より、解析結果は実験データを精度よく再現できていることがわかる。計算の先端速度が実験と比較して少し速い結果となっているが、これは、多くの計算例で報告されている⁹⁾。液体が固体と接触すると、それぞれが持つ表面張力（界面張力）により、一定の角度で接触することが観察される。この接触角の大きさは「濡れ性」と呼ばれ、接触角が小さければ濡れやすく、逆に大きければ濡れにくいと表現される。本研究では表面張力を考慮した計算は行っていないため、液体と固体の接触角が 180° をなす「濡れにくい」状態で解析が行われている。そのため、実際の速度よりもわずかに早い結果が得られたものと考えられる。支配方程式に表面張力を考慮することにより、より観測データに近い解析結果がえられるものと考えられる。

表-1 ダムブレイク問題に用いたインプットデータ

Cohesion	c	(Pa)	0.0
Internal friction angle	ϕ	(degree)	0.0
Viscosity	η_0	(Pa·sec)	0.001
Maximum viscosity	η_{max}	(Pa·sec)	1000
Radiation of a particle	r_p	(m)	0.008
Time increment	Δt	(sec)	0.0001
Density of fluid	ρ	(kg/m ³)	1000

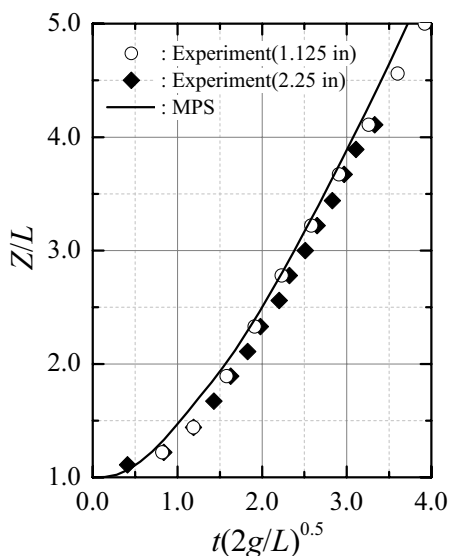


図-4 水柱底面先端の時間変化

3.2 フレッシュコンクリートのL型フロー試験

L型フロー試験は、フレッシュコンクリートのワーカビリティ（施工性）を評価するための試験であり、高粘性のコンクリートの品質管理に用いられている。図-5 に試験の概略図を示す。はじめに、仕切り板（division plate）で仕切られた充填部にフレッシュコンクリート試料を充填し、その後、仕切り板を引き上げる。センサ等により流出部において試料先端の流出速度を測定し、流動が完全に停止した時点の流出距離をL型フロー値とする。L型フロー試験は、フレッシュコンクリートの流動解析のベンチマーク問題として一般的に用いられており^{15),16)}、また、多くの実験結果が得られていることから、本研究においてもこの問題を取り上げることとした。

解析に用いた入力パラメータを表-2 にまとめる。降伏後の塑性粘度 η_0 は、富山ら¹²⁾の計算結果を参考に 300pa·sec と決定した。フレッシュコンクリートの構成モデルとして、塑性粘度と降伏応力に基づいた bi-linear な Bingham 流体モデルがしばしば用いられる。本研究では、降伏応力として Mohr-Coulomb の破壊基準を用いるが、Bingham 流体における降伏応力とは、内部摩擦角が 0° の Mohr-Coulomb モデルに相当するため、フレッシュコンクリートを対象とする本計算においては、粘着力とせん断応力降伏値が一致することに注意されたい。 c を 0pa, 100pa, 200pa と設定した全3 ケースの計算を行い、宮本・山本¹⁷⁾の実験結果と比較した。

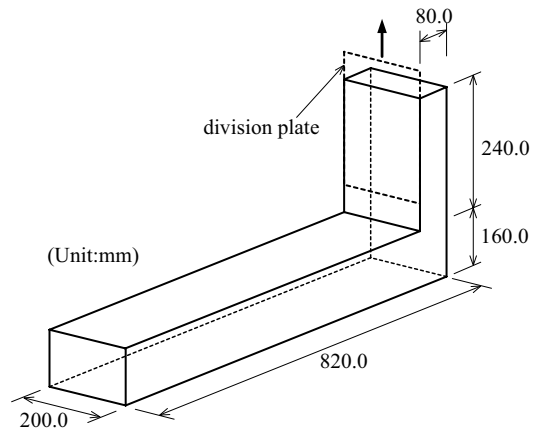


図-5 L型フロー試験

表-2 L型フロー試験に用いたインプットデータ

Cohesion	c	(Pa)	0, 100, 200
Internal friction angle	ϕ	(degree)	0.0
Viscosity	η_0	(Pa·sec)	300
Maximum viscosity	η_{max}	(Pa·sec)	1000
Radiation of a particle	r_p	(m)	0.008
Time increment	Δt	(sec)	0.00001
Density of fluid	ρ	(kg/m ³)	2300

実験結果と解析結果の比較を図-6 に示す。図中のシンボルが宮本・山本¹⁷⁾による実験結果を表し、実線が MPS 法による計算結果を表す。なお、粘着力 0pa の計算ではコンクリートの流動が停止しなかったため、100, 200pa の結果のみを示した。実験結果において A-series, B-series は配合の違いを表し、A-series では、水セメント比、骨材セメント比、細骨材率を変化させ、B-series では水セメント比や細骨材率を一定とし、分離低減剤添加量や高性能 AE 減水剤添加量を変化させている¹⁷⁾。2 種類のせん断強度に対する結果しか得られていないが、解析結果と実験結果により対応がみられた。よって、構築した MPS 法プログラムによって、流動状況の違いを降伏値の違いで再現できており、フレッシュコンクリートの流動挙動を再現できていることがわかる。

図-7, 8 にフレッシュコンクリートの流動過程の解析結果を示す。ここでは、代表的な結果として、図-7 にせん断応力降伏値 0pa の結果を、図-8 に 200 pa の結果をそれぞれ示す。時間の経過に伴い、フレッシュコンクリートが流動していく様子が再現できている。また、流動状況の違いを降伏値の違いで再現できており、フレッシュコンクリートの流動挙動を定性的に再現できていると言える。

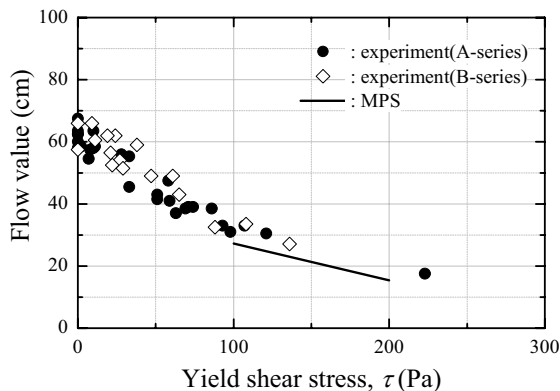


図-6 実測値と解析結果の比較

4. ニューマチックケーソン工法の施工過程解析

本章では、2 章で概要を述べ、3 章で精度検証を行った MPS 法の、ニューマチックケーソン工法の施工過程解析への応用例を示す。

図-9 に対象となる計算モデルを示す。本研究では、1 層からなる水平地盤にニューマチックケーソンを沈設する問題を対象とした。地盤、ケーソン躯体ともに直径 0.1m の粒子によりモデル化を行い、0~2.5 秒 (1~5LOT) まで解析を実施した (図-10)。実際の施工においては数日・数週間で掘削・躯体構築が行われるが、MPS 法の特性上、非常に小さな時間増分でしか計算が実施できない。数日間の解析を実施することは計算時間の制約上困難であるため、ここでは便宜的に 2.5sec を解析時間として設定した。実時間と解析時間の不一致を解消する方法としては今後の課題としたい。なお、ケーソン躯体粒子は剛体としてモ

デル化し、流体-構造連成解析アルゴリズム⁹⁾ (弱連成解析) により、地盤とケーソンの相互作用を計算した。具体的には、 N 個の粒子で表された剛体の重心、慣性モーメントを計算し、剛体に並進運動と回転運動のみを許すように計算している。剛体粒子間の相対的な位置は変化しないが (剛体自身は変形しないが)、剛体全体として、並進運動や回転運動が生じる。このようなモデル化は、剛体粒子同士を剛結して計算を行っているとも解釈できる。本計算における入力定数を表-3 に示す。計算時間を考慮し、粒子径を 0.1m と大きく設定し、粘土質地盤、砂質地盤の単位体積重量として一般的に用いられている 17kN/m^3 とし計算を行った。また、 η_0 は Moriguchi *et al*¹¹⁾ と同様の値を採用し、 η_{max} については、計算が不安定 (続行不能) とならない最大の値を採用した。

掘削の再現は、ケーソン刃先周辺のある領域の地盤粒子を水粒子に変更することで表現した。図-11 に掘削領域の模式図を示す。ここで、図中の r_p は粒子の直径を表す。地盤を表す粒子の中心座標が掘削領域 (図中のハッチ部分) に入った時点で地盤粒子は「掘削された」と判断され、水粒子に変更される。なお、掘削のモデル化方法として、掘削された土砂を計算モデルから消去する計算も実施したが、計算が不安定になり、計算の続行が不可能であった。そのためここでは便宜的に上記の方法を採用した。

これまで示した計算方法と掘削方法により、どのように計算が実施されるかを模式的に示したものが図-12 である。まず、1 LOT の躯体自重が地盤に作用し、図-11 に示した範囲の粒子が水粒子に変更される。この状態を本研究では「掘削された」状態とする。その後、時間の進行に伴い 2 LOT, 3 LOT と構築が進み、それに応じてケーソンの自重も大きくなっていく。計算の過程において、先述した掘削の操作とケーソン構築 (自重の増加) の操作以外の条件は与えておらず、自重の作用と掘削の作用により自動的にケーソンが沈む様子が再現される。従来の方法、すなわち、FEM に基づいた方法では、掘削深度毎に計算を分けて、その都度境界条件を与え直すという計算が行われるが、本研究で提案した手法において、そのような煩雑さは解消される。

ここでは、表-4 に示す 4 ケースの計算を実施した。具体的には、基礎地盤が粘性土・砂質土、フリクションカット有り・無しを組み合わせた、計 4 ケースの計算を実施した。フリクションカットは図-1 で示したように、ケーソン躯体形状によってその有無が表現され、フリクションカット「無し」はケーソン先端部に段差が無いまますぐな躯体を意味する。よって、計算におけるフリクションカットの有無を段差があるケーソン躯体、段差が無いケーソン躯体を剛体粒子でモデル化し、その有無の効果を検討する。

図-13, 14 に、Case3 におけるケーソンの施工に伴う地盤の変形性状を示す。図から明らかのように、提案した MPS 法によってケーソンの構築から地盤の掘削までの一連の過程を連続的に解析することができた。従来の FEM に基づいた方法では掘削深度ごとに境界条件を与えた解析を行っており、さらに、ケーソン躯体も境界条件として

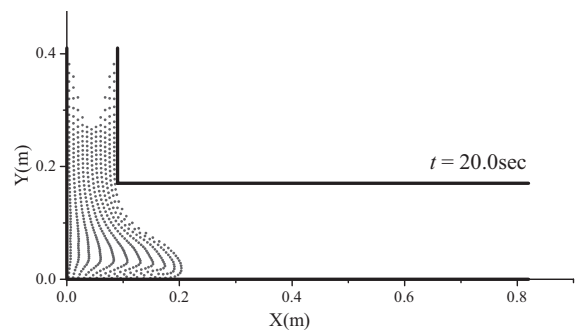
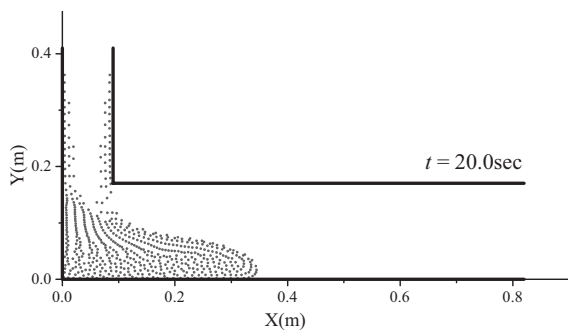
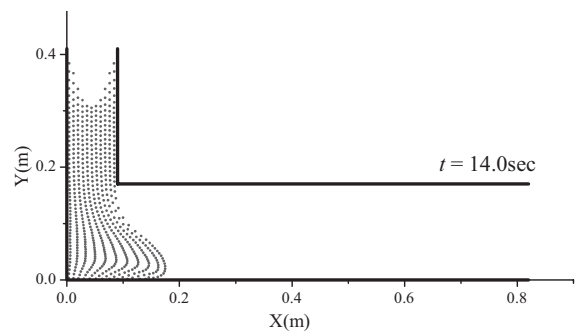
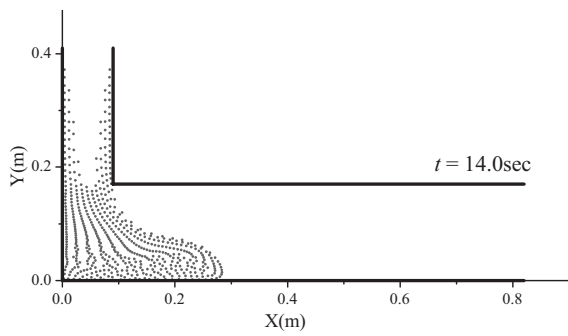
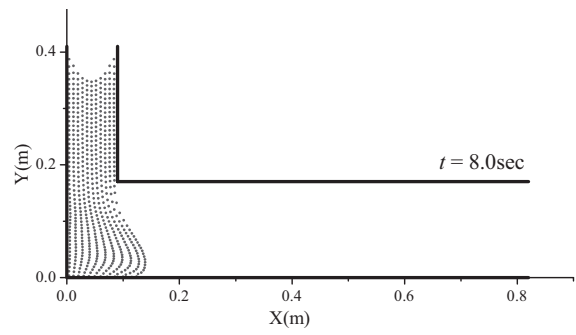
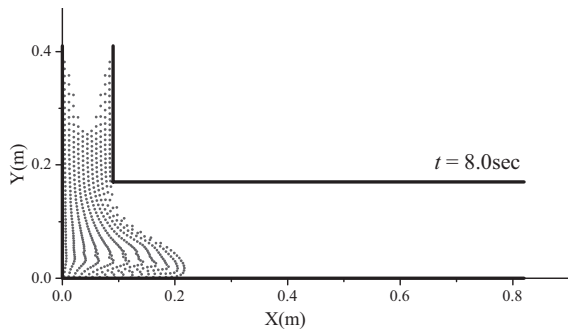
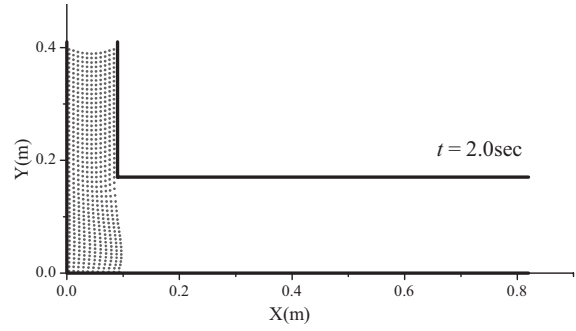
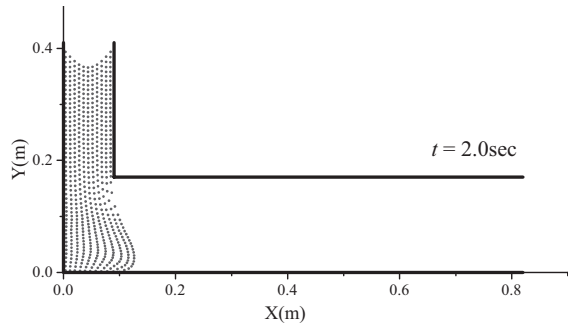
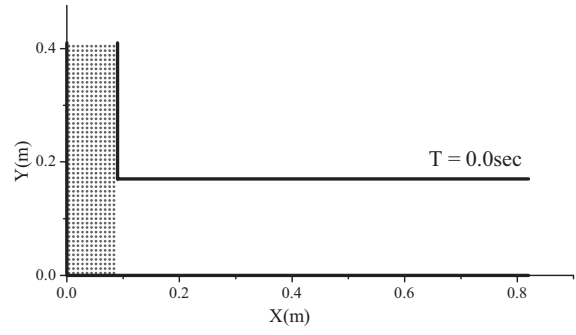
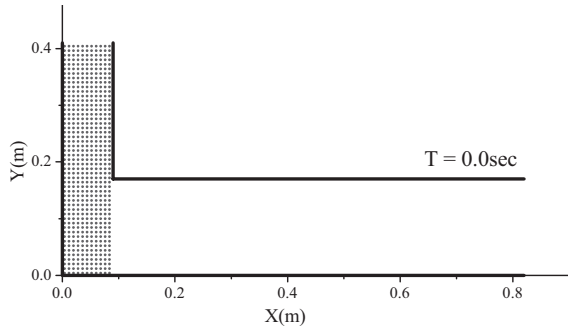
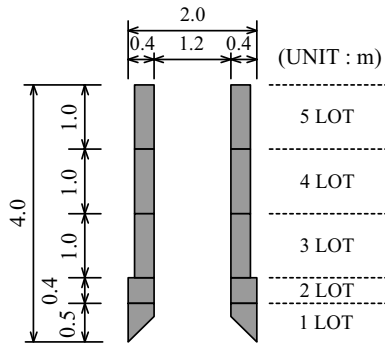


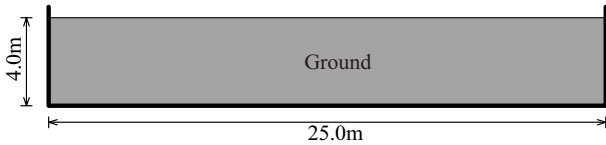
図-7 コンクリートの流動過程 ($\tau = 0\text{Pa}$)

図-8 コンクリートの流動過程 ($\tau = 200\text{Pa}$)

MPS法によるニューマチックケーソン施工時の地盤変形解析



(a) ケーソンの形状

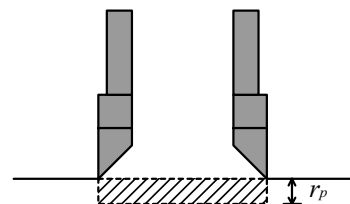


(b) 地盤

図-9 解析モデル

表-3 施工過程解析のインプットデータ

Cohesion	c (Pa)	-
Internal friction angle	ϕ (degree)	-
Viscosity	η_0 (Pasec)	100
Maximum viscosity	η_{max} (Pasec)	1000
Radiation of a particle	r_p (m)	0.1
Time increment	Δt (sec)	0.001
Density of fluid	ρ (kg/m ³)	1700



reason where particles are excavated

図-11 掘削範囲の定義

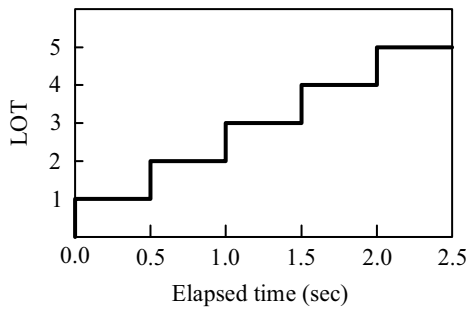


図-10 ケーソン躯体の構築過程

表-4 計算ケース

Case	c (kPa)	ϕ (degree)	Friction cut
1	5.0	0.0	with
2	5.0	0.0	without
3	0.0	30.0	with
4	0.0	30.0	without

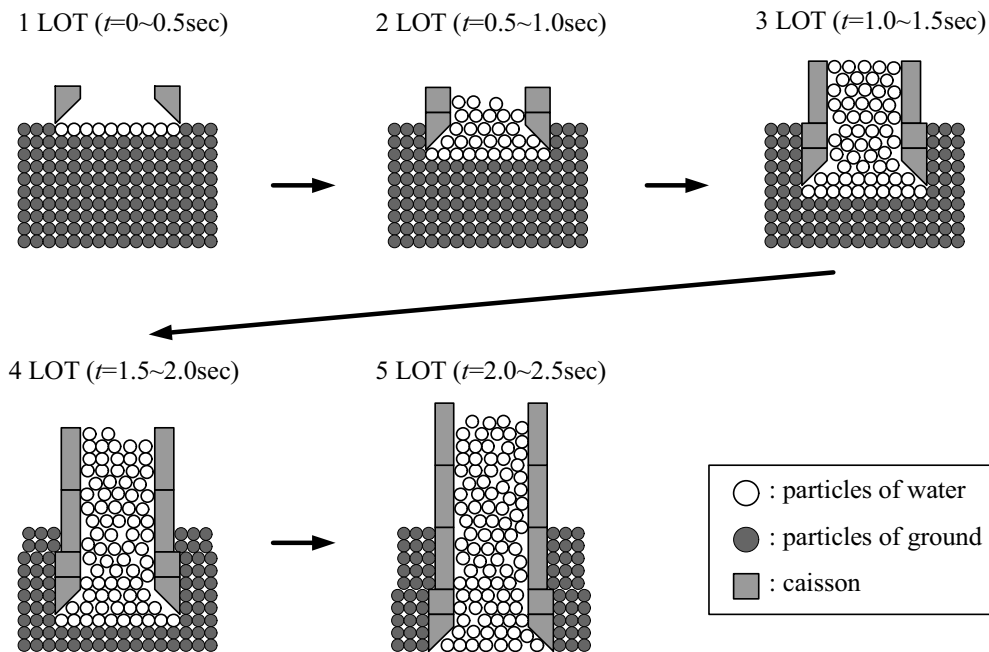


図-12 解析・掘削過程の模式図

与えられている。このような方法は計算が煩雑であるだけでなく、ケーソン躯体の挙動を考慮することができない

め、本研究で示した方法はケーソン沈設に伴う地盤挙動の予測手法として実務に応用できる可能性がある。とくに、

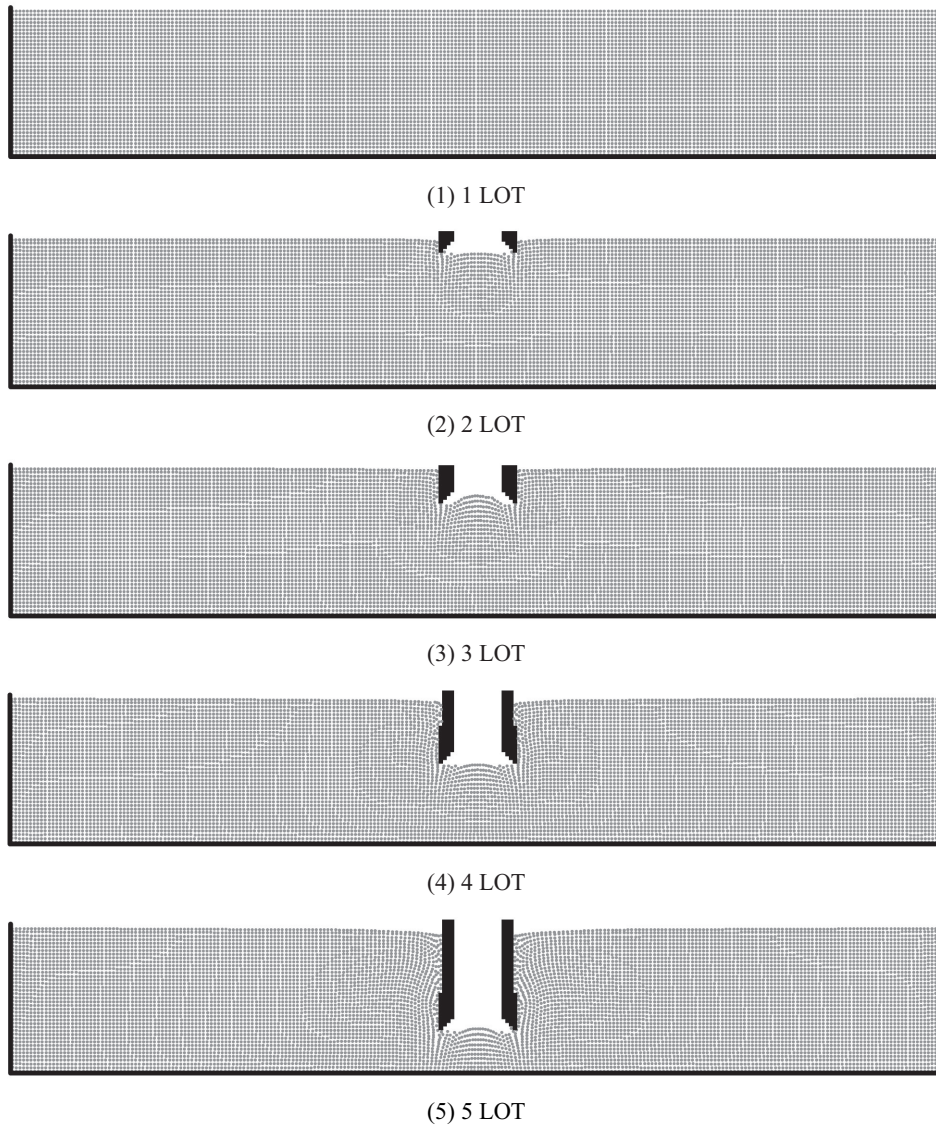


図-12 ケーソン沈設に伴う地盤変状 (Case 3)

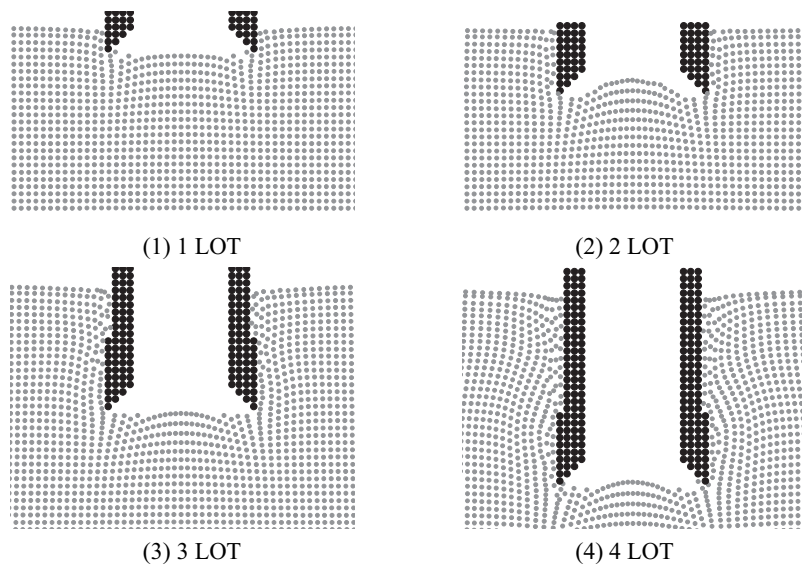


図-13 ケーソン沈設に伴う地盤変状 (Case 3) の拡大図

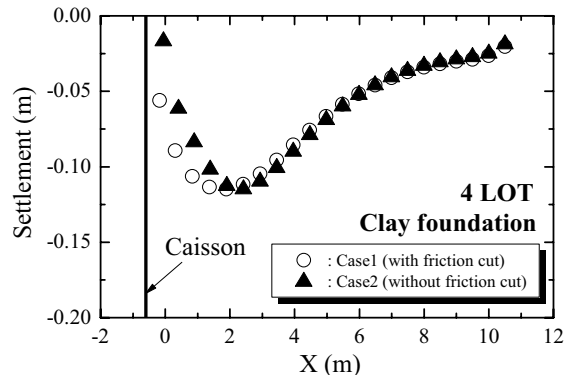
図中で確認されるようなケーソン周辺地盤の連れ込み沈下は、実際の施工現場においてもよく観察される現象である。ここでは、case3 の結果のみ示したが、他のケースにおいても同様に、ケーソン沈設時に観察される現象を再現できた。

図-15 に地表面沈下量の分布図を示す。図中の実線がケーソン躯体の位置を表しており、ケーソン躯体から離れるのに伴い、沈下量も減少していくことがわかる。なお、ケーソンから 10m 以上離れた位置においてもわずかな沈下が認められるが、これは地盤を圧縮性流体として計算しているため、計算初期に圧縮率に応じて粒子が圧縮した結果である。このような自重解析による変位を生じさせないために、あらかじめ自重解析を行った後に、ケーソンの沈設を計算することも可能であるが、MPS 法では粒子の初期配置が正方配置と異なる場合、解が精度良く求まらないことが知られている。自重解析を行うと、重力の作用により粒子は移動するため粒子の配置は正方配置から大きくずれる。本研究では計算精度を優先した計算を実施するため、自重解析からケーソンによる掘削解析までの一連の過程を計算することとした。

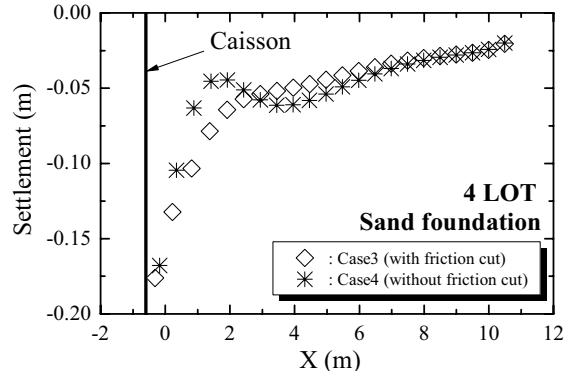
まず、フリクションカットの影響に着目すると、粘性土、砂質土ともに顕著な違いは認められなかった。一般的にはフリクションカットがある場合は変形量、とくに側方変位が大きくなる傾向にあるが、提案手法による解析では再現することができなかった。次に、土質の違いに着目すると、粘性土、砂質土で変形モードに違いが認められた。粘性土では、下に凸の変位分布となり、砂質土では、上に凸の分布となった。実際の施工現場では砂質土のような変形が観察されるが、これは施工現場の地表面が粘性土であることはほとんどなく、砂質土もしくは埋め土で構成されているためであると考えられる。本研究で構築した MPS 法により、ニューマチックケーソン施工時の周辺地盤の挙動を定性的に再現できたと判断できる。

なお、実際の施工においてもこのような連れ込み沈下が観察されるが、その大きさや傾向は、ケーソンの規模や形状、地質等によって沈下量や傾向は異なる。今回得られた結果が一般的な傾向かどうかは判断できないが、計算で示したように、ケーソン躯体周辺で局所的に沈下が生じる傾向はどのような条件でも同じであると考えられる。今後、得られた結果の信頼性について議論するためには、計算結果と模型実験や実工事で得られた観測データとの比較が必要不可欠である。

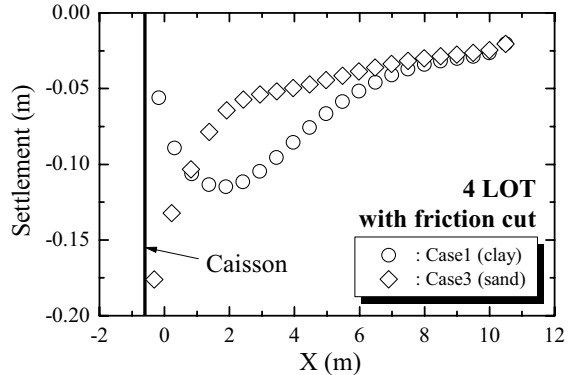
図-16 に 4LOT 構築時のケーソン躯体に作用する土圧の深度分布を示す。図中には土圧の理論値を実線で示した。本研究では、地盤の挙動を評価するために、Bingham モデルを導入した Navier-Stokes 方程式を用いたことになるが、このようなアプローチでは地盤の異方性を考慮できない。よって、静止土圧係数が 1.0 として評価されている（地盤が流体として取り扱われている）ことに注意されたい。また、本論文で示した解析手法は、全応力解析に対応する。間隙水圧を考慮した有効応力解析を行う場合、有限要素法による地盤解析と同様に、土-水連成の支配方程式を解くこと



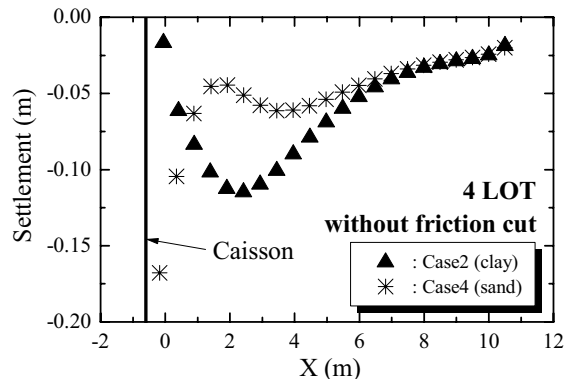
(1) フリクションカットの影響 (粘性土)



(2) フリクションカットの影響 (砂質土)



(3) 土質の影響 (friction cut あり)



(4) 土質の影響 (friction cut なし)

図-15 地表面沈下量の分布

が必要となる。図より、躯体に作用する土圧は概ね理論値に近い値で作用していることがわかる。しかしながら、Case1,4 では、深度の増大に伴い土圧が理論値よりも大き

くなった。MPS 法では、圧力値の計算精度がその他の数値解析手法（例えば FEM）と比較して劣る。圧力の計算精度を向上させる方法として、圧力も陰的に解く¹¹⁾、人工圧力を採用する¹⁸⁾など種々の方法が提案されており、それらの方法を採用することによって、本研究で提案した MPS 法においても圧力の計算精度が改善されるものと推察される。

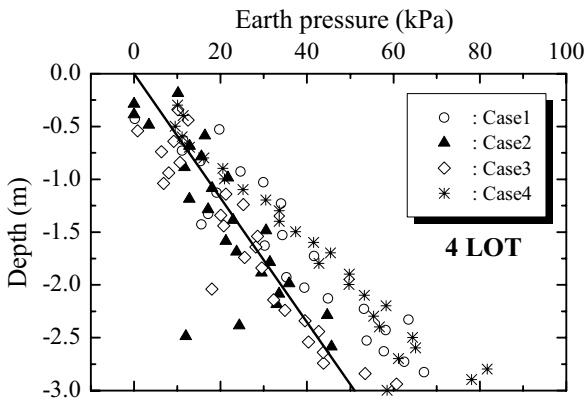


図-16 土圧の深度分布

5. まとめ

本研究では、粒子法の 1 つである MPS 法に着目し、ニューマチックケーソン施工時の地盤変形解析手法を新たに構築した。本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) Mohr-Coulomb の破壊基準を導入した Bingham 流体モデルに基づく MPS 法を新たに構築した。
- (2) ベンチマークテスト（ダムブレイク問題、L 型フロー試験）を実施しプログラムの精度検証を実施した結果、構築したプログラムによってダムブレイクにおける崩壊水柱先端の移動速度と L 型フロー試験におけるフレッシュコンクリートの到達距離を再現できることを示した。
- (3) ニューマチックケーソンの施工を模擬した数値実験により、提案手法によってケーソン沈設時の地盤の変形挙動を定性的に再現できることを示した。

参考文献

- 1) 日本圧気技術協会：ニューマチックケーソン積算資料，pp.1-3，2010。
- 2) 例えば，http://www.ohmoto.co.jp/rovo/matic1_1.html (2013 年 6 月 24 日)。
- 3) 中山知明，古田部剛，田辺嘉一：市街地におけるケーソン工法と周辺家屋への影響に関する一考察，土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集第 3 部，pp.415-416，1979。
- 4) 梅田法義，藤井 直，井上智裕，大内正敏，下間 充，田村 武：ニューマチックケーソン施工過程の数値解析，応用力学論文集，Vol.9，pp.603-612，2006。

- 5) 井上智裕，藤井 直，大内正敏，下間 充，田村 武：ニューマチックケーソン工法によるトンネル施工時の周辺地盤変形解析について，トンネル工学論文集，Vol.16，pp.155-164，2006。
- 6) Peng, F. L., Wang, H. L., Xu Z. L. and Li, Y. L.: Field measurement and finite element method simulation of a tunnel shaft constructed by pneumatic caisson method in Shanghai soft ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.137, No.5, 2011.
- 7) Peng, F. L. and Wang, H. L. : Performance of construction with new pneumatic caisson method in Shanghai soft ground, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol.42, No.3, 2011.
- 8) Koshizuka, S. and Oka, Y. : Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nucl. Sci. Eng.*, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- 9) 越塚誠一：計算力学レクチャーシリーズ⑤ 粒子法，丸善株式会社，2005。
- 10) 野々山栄人，森口周二，八嶋 厚，沢田和秀：SPH 法と CIP 法による粘性土地盤の支持力解析，日本機械学会第 21 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集，pp.257-258，2008。
- 11) Moriguchi, S., Yashima, A. Sawada, K., Uzuoka R. and Ito, M.: Numerical simulation of flow failure of geomaterials based on fluid dynamics, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.2, pp.155-165, 2005.
- 12) 富山 潤，入部綱清，山田義智，伊良波繁雄：ビンガム流体の流動解析における MPS 法の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，2007。
- 13) 富山 潤，入部綱清，崎原康平，伊良波繁雄，山田義智：フレッシュコンクリートの流動解析における MPS 法の適用，構造工学論文集，Vol.55A，pp.164-171，2009。
- 14) Martin, J. C. and Moyce, W. J.: An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser.A.*, Vol.244, pp.312-324, 1952.
- 15) 森 博嗣，渡辺健治，梅本宗宏，谷川恭雄：二層モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法，日本建築学会構造系論文集，Vol.427，pp.11-21，1991。
- 16) 谷川恭雄，森 博嗣，黒川善幸：高流動コンクリートの L 型フロー試験による流動性評価法に関する考察，セメント・コンクリート論文集，Vol.48，pp.208-213，1994。
- 17) 宮本欣明，山本康弘：J 型フロー試験による高流動コンクリートの流動特性・調合に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.547，pp.9-15，2001。
- 18) 田中正幸，益永孝幸：擬似圧縮効果による MPS 法の安定化と圧力の平滑化，*Transaction of JSGES*，20080025，2008。

(2013 年 6 月 24 日 受付)