

京都大学	学生員	○鎌森 元吾
京都大学大学院	正会員	肥後 陽介
京都大学大学院	学生員	竹川 遊大
清水建設技術研究所	正会員	桐山 貴俊

### 1. はじめに

土留め壁や基礎構造物などとして打設される鋼矢板や鋼管杭等の鋼材を打設する際、鋼材のごく近傍に発生する大変形とその周辺地盤の変形を評価することが必要となる。地盤挙動解析に用いられる代表的な数値解析手法の一つに、Material Point Method (MPM)<sup>1)</sup>がある。MPMは格子法と粒子法のハイブリットな手法であり、大変形解析に有効な解析手法である。本研究では、地盤-鋼材間の相互作用を考慮したMPM地盤大変形シミュレータで、種々の条件での鋼材貫入解析を実施した。その適用例として、変位拘束条件を考慮した鋼材貫入解析と変位制御及び応力制御の貫入解析の比較を行った。

### 2. 解析手法

#### a) MPM

MPMにおける支配方程式として、質量保存則、運動方程式、微小ひずみを仮定したひずみ変位関係式、MC-DPによる弾完全塑性モデルである構成式を用いた。以下に示す弱形式化した運動方程式を離散化した式を用いて解析を実施した。

$$\sum_{h=1}^{N_n} m_{gh} \mathbf{a}_h = \mathbf{f}_g^{int} + \mathbf{f}_g^{ext} \quad (1)$$

ここで、下付きの  $g$  は計算格子での値を指し、 $m_{gh}$  は格子点での質量を表す。また、 $\mathbf{f}_g^{int}$  は内力、 $\mathbf{f}_g^{ext}$  は外力であり、次式で表される。

$$\mathbf{f}_g^{int} = - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^s \cdot \nabla N_g(\mathbf{X}_p) \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_g^{ext} = \hat{\mathbf{b}}_g + \hat{\boldsymbol{\tau}}_g \quad (3)$$

ここで、 $M_p$ 、 $\mathbf{X}_p$  は物質点  $p = 1, \dots, N_p$  における質量および座標ベクトル、 $\mathbf{a}$  は加速度ベクトル、 $\boldsymbol{\sigma}$  は応力テンソル、 $\hat{\mathbf{b}}_g$  は節点における物体力、 $\hat{\boldsymbol{\tau}}_g$  は節点における表面力を表す。また、本研究では強い引張変形が生じることは予測されない上に、不連続な大変形挙動を示すために、MPMの補間関数として uniform Generalized Interpolation Material Point Method (uGIMP法)<sup>2)</sup>を用いた。

#### b) 地盤-鋼材間相互作用の導入

地盤と鋼材との滑りを表現するために、本研究では鋼材粒子の所属する格子の周辺1格子に所属する地盤

粒子に、特定のパラメータを導入することで鋼材と地盤の滑りを表現した。Fig.1に示すように濃灰色の格子に所属する地盤粒子にTable.1に示す特定の内部摩擦角と粘着力を用いた。<sup>3)</sup>

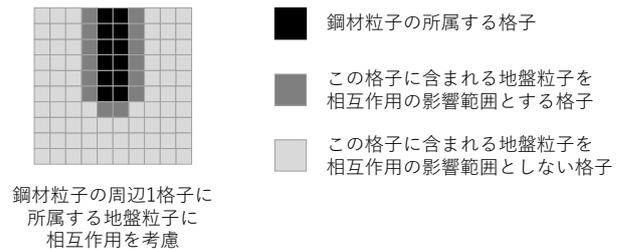


Fig.1 地盤-鋼材間の相互作用の概念図

### 3. 鋼材貫入解析

既往のU字断面形状の矢板の貫入実験においてU字型の内部で変形が拘束されているために、矢板が反れるように外側に変形しやすいことが知られている。そこで、2次元平面ひずみ条件において鋼材の貫入位置を境界付近に設定することで、境界による変位拘束で鋼材の変形を表現することを目的とした鋼材貫入解析を実施した。解析モデルをFig.2、材料パラメータをTable.1に示す。本研究では境界からの変位拘束として左境界から8格子と12格子離れた位置に鋼材を配置して解析を実施した。鋼材の貫入方法として、地表面より上の鋼材粒子に一定の0.02m/sのひずみ速度を入力して鋼材を貫入する変位制御方式を用いた。左境界から8格子分、12格子分空けた位置に鋼材を配置した解析結果をそれぞれFig.3、Fig.4に示す。これらは最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の分布図である。解析結果から、左境界から8格子分空けた位置に鋼材を配置することで変位が拘束され、鋼材が右方向に座屈しているのがわかる。一方鋼材を左境界から12格子空けてしまうと鋼材が左方向に座屈しているのがわかる。これは、数値解析における丸めの誤差に起因する分岐が原因で座屈方向が変化したと考える。つまり、分岐後に変位拘束によって右へ座屈する鋼材と境界の距離には上限があることが確認できた。実際の矢板打設では、U字断面が大きくなると拘束効果が顕著でなくなり、外側への変形は起こりにくくなる可能性が示唆される。

次にハンマー等での打撃を模擬することを目的とした応力制御方式を用いた数値解析を実施し、変位制御方式との解析結果を比較した。解析モデル、材料パラメータは変位制御と同じであり、左境界から8格子離れた位置で解析を実施した。鋼材の最上位粒子に最大400kNとなるように0.04s間隔の三角波形で線形変化する表面力を与えて、0.56s後に再度同様の表面力を加えることを19回繰り返すことにより解析を実施した。この際、打撃の処理間隔と打点回数は一打撃による解析結果を参照し、地盤の振動が落ち着く処理間隔と鋼材が地表面以下まで貫入されるような打点回数に設定した。変位制御方式を用いた解析結果をFig.3に、応力制御方式を用いた解析結果をFig.5に示す。変位制御方式を用いた解析では、鋼材の貫入中鋼材が地盤から常に拘束されているのに対して、応力制御方式を用いた解析では、打撃によって鋼材から離れる方向に加速度が発生し、地盤からの拘束が軽減されるため、拘束の影響による鋼材の変形が抑制されたと考えられる。また、応力制御では、応力の釣り合いを待たずに打撃による振動が収まってから次の打撃を行っているために解析時間が30分以下である。一方、変位制御では応力の釣り合いを待つため解析時間が7時間程度と、二つの解析手法には解析時間に大きな差が確認できた。

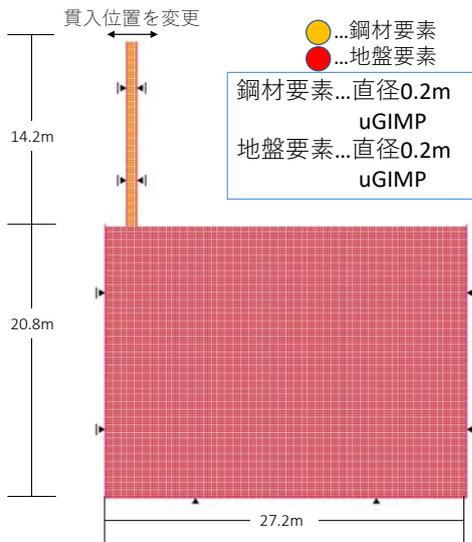


Fig.2 鋼材貫入解析の解析モデル

Table.1 鋼材貫入解析に用いた材料パラメータ

	鋼材材料	地盤材料
実質密度 $\rho$	7.85 ( $Mg/m^3$ )	1.53 ( $Mg/m^3$ )
ラメ定数 $\lambda$	$4.20 \times 10^7$ (kPa)	$9.48 \times 10^3$ (kPa)
ラメ定数 $\mu$	$2.80 \times 10^7$ (kPa)	$6.31 \times 10^3$ (kPa)
粘着力 $c$		
地盤	-	8.50 (kPa)
相互作用	-	0.00 (kPa)
内部摩擦角 $\phi$		
地盤	-	30.0 (deg)
相互作用	-	20.0 (deg)
ダイレタンシー角 $\psi$	-	10.0 (deg)

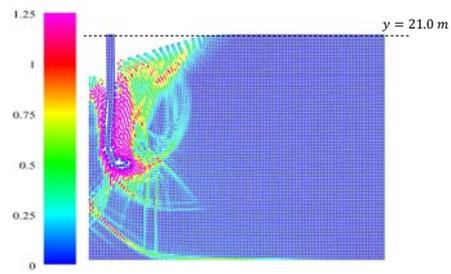


Fig.3  $\gamma_{max}$  分布図 (変位制御, 8格子,  $t = 750s$ )

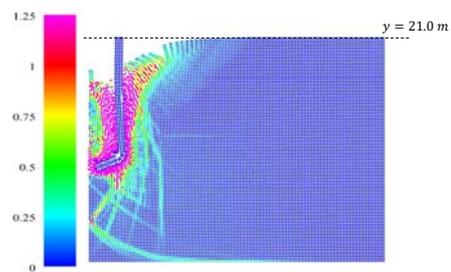


Fig.4  $\gamma_{max}$  分布図 (変位制御, 12格子,  $t = 750s$ )

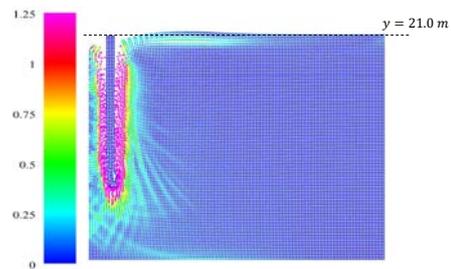


Fig.5  $\gamma_{max}$  分布図 (応力制御, 8格子,  $t = 11.391s$ )

#### 4. 結論と今後の課題

MPM 地盤大変形シミュレータを用いた鋼材打設解析を実施し、鋼材周辺地盤の大変形挙動評価への適用性を示した。U字矢板打設時に見られる変位固定による鋼材の変形を2次元平面ひずみ条件の変位固定境界によって定性的に表現した。また、応力制御方式を用いることで、鋼材の座屈が抑制される得ることが確認できた。今後は、3次元に貫入解析を拡張し、動的貫入や地震動などの解析条件を導入していく。

#### 参考文献

- 1) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.L. : *Comput. Methods Appl. Engrg.*, **118**, pp.179-196, 1994.
- 2) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M. : *Computer Modeling in Engineering and Science*, **5**(6), pp.477-495, 2004.
- 3) 梅崎健夫, 河村隆, 林錦華, 服部晃, 岡本功一: 土と摩擦低減剤を塗布した鋼材の接触面における摩擦特性, 地盤工学研究発表会, **72**(2), pp.1411-1412, 2008.