CAE による中圧噴射攪拌工法の施工過程の可視化と評価[†]

小牧 貴大* 中西 康晴** Shakya Sudip*** 稲積 真哉****

Visual Assessment of Mixing Process of Middle-Pressure Jet Grouting Method

by

Takahiro KOMAKI*, Yasuharu NAKANISHI**, Sudip SHAKYA*** and Shinya INAZUMI****

This study focused on the in-situ mixing process of middle-pressure jet grouting method of 20 MPa or less and aims to establish a computer-aided engineering (CAE) system that can simulate the performance on a computer from the planning/design stages. This ground improvement method is the combination of a jet grouting method and a jet grouting with mechanical agitation and mixing method having been put into practical use. These two ground-improvement processes were computationally reproduced here using the moving particle semi-implicit (MPS) method which is capable of handling ground failure phenomena and high-velocity fluids and construction specifications were examined according to the ground conditions. In order to confirm its effect, a comparative analysis was performed with different jet pressures, development situation was visualized, and its performance was evaluated. The results show that the cement slurry jet ratio in the planned improvement range, including the periphery of the mixing blade was increased and a high-quality columnar soil-improved body was obtained. It is expected that the introduction of CAE will contribute to the visualization of the ground, and that CAE will be an effective tool for the visual management of ground improvement method during and after the construction.

Key words:

Cement slurry, Computer-aided engineering, Middle-pressure jet grouting method, Moving particle semi-implicit, Soil-improved body

1 緒 言

セメントスラリーの高圧噴射を用いた地盤改良体造成技術は、1970 年に日本で初めて単管式高圧噴射攪拌工法として開発され¹⁾、河川、港湾、道路、鉄道ならびに上下水道などの社会基盤整備に幅広く活用されている。単管式高圧噴射攪拌工法は、高圧で噴射されるセメントスラリーで地盤を切削し、同時に切削された軟弱土とセメントスラリーを攪拌混合することにより円柱状の改良体を造成する地盤改良工法である。近年ではこの技術を応用し、スラリー噴射に珪砂あるいは機械式攪拌を併用する (Fig. 1, Fig. 2) ことで、比較的低い噴射圧力でも高品質な改良体を造成できる中圧噴射攪拌工法が実用化されている^{3), 4)}。特に機械式攪拌の併用技術は高圧噴射攪拌工法の進化技術であるが、スラリー噴射と攪拌翼回転を組み合わせることにより、改良体の造成メカニズムは複雑化している。一方で、地盤改良工法全般の抱える課題の一つに地盤特性に応じた施工仕様の設定や当該地盤への適否など地盤改良工法自体の性能評価手法の高度化が挙げられる。改良体の造成は、原地盤内で実施されることから、目視にて施工状況ならびに施工仕様の妥当性を確認することができず、そのため、地盤改良工法の施工は主として経験則に頼らざるを得ない状況である。

そこで、本研究では複雑な改良体造成メカニズムを有する中圧噴射攪拌工法に関して、その計画段階から当該性能をシミュレーションするシステム (Computer Aided

Engineering ; CAE) の適用に着目し、CAE 技術の一つとして地盤の破壊現象や高流速流体を扱うことができる粒子法⁵⁾ (Moving Particle Semi-implicit Method ; MPS 法) による MPS-CAE を用いて、本工法による原位置造成状況の可視化と造成径や計画改良範囲への注入量に関する性能評価を試みた。

2 MPS法を用いたCAE (MPS-CAE)

2・1 CAE

CAE とは、「ものづくり」の研究・開発工程において、従来より行われている試作品を用いた室内や原位置での大規模実験の代替として、CAD (Computer Aided Design) 等で作成されたコンピュータ上の試作品ならびに現場条件を用いてシミュレーションを実施し、それを分析する技術の総称である⁶⁾。同時に、コンピュータによって支援された、工法も含む製品の設計・製造や工程設計の事前検討等といった工学的な作業あるいはそのツールなどを指す場合もある。地盤工学分野においては、CAE を活用することで地盤内の様子や地盤内部に作用する応力の可視化、莫大なコストを要する実験や再現困難な現象の把握が可能と成り得る。また、時々刻々と変化する現象の 3 次元表示や物理量のグラフなどを用い、適切にポスト処理を行うことで、専門家以外にも視覚的にわかりやすく伝えることができる。本研究では、地盤改良施工中の地盤内の様子の可視化や一連の施工の再現について、要素技術として 3 次元 CAD ならびに粒子法のひとつである MPS

[†] 原稿受理 令和3年5月26日 Received May 26, 2021 ©2022 The Society of Materials Science, Japan

* 賛助会員 東洋産業 (株) 〒807-0073 北九州市八幡西区 Toyo Industry Co. Ltd., Yahatanishi-ku, Kitakyushu, 807-0073.

** 賛助会員 (株) エス・アイ・ティ 〒150-0042 東京都渋谷区 N.I.T. Inc., Shibuya-ku, Tokyo, 150-0042.

*** 芝浦工業大学大学院 〒135-8548 東京都江東区 Shibaura Institute of Technology, Koto-ku, Tokyo, 135-8548.

**** 正 会 員 芝浦工業大学 〒135-8548 東京都江東区 Shibaura Institute of Technology, Koto-ku, Tokyo, 135-8548.

Fig. 1 Analytical model of jet grouting method³⁾.

法を用いた CAE の適用を試みる。具体的には, MPS-CAE による中圧噴射攪拌工法の再現を基に, 地盤条件に応じた施工仕様(噴射圧力, 造成径, 機械攪拌の併用)を検討するとともに, スラリー噴射を用いた地盤改良工法の施工や仕様の最適化に向けた CAE 活用の可能性を考察する。

2・2 MPS

近年におけるコンピュータ技術の目覚ましい発展とともに, 粒子法と呼ばれる解析手法が開発・発展している。ここで, 有限要素法や差分法は格子法と呼ばれ, 空間を格子によって分割し, 各格子に物理量を変数として割り当て計算を行う。一方, 粒子法は有限要素法や差分法とは異なり格子を用いず, 代わりに各計算点を物理量とともに移動する粒子として, 連続体をラグランジュ的に離散化する。筆者ら⁷⁾は, 粉体のシミュレーションに多用され, 粒子間相互作用力をバネ定数, 減衰定数, 摩擦係数などを用いて表現することにより各粒子の移動量を計算する個別要素法 (Distinct Element Method ; DEM) を高圧噴射攪拌工法に適用し, 吐出直後のスラリー噴射の挙動を再現しているが, 本研究では流体の運動方程式に従い, 流体粒子としてその挙動を解析する MPS 法⁵⁾を適用する。解析に用いた非圧縮性流れの支配方程式は, 式(1)の質量保存則と式(2)の表面張力を考慮した運動量保存則である。

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho}\sigma\kappa\delta\mathbf{n} \quad (2)$$

ここで, ρ : 流体の密度, $\mathbf{u}$: 流速ベクトル, P : 圧力, ν : 動粘性係数, $\mathbf{g}$: 重力ベクトル, σ : 表面張力係数, κ : 曲率, δ : 表面張力が表面に働くためのデルタ関数, $\mathbf{n}$: 表面と垂直な方向の単位ベクトルである。MPS 法では式(2)で示される支配方程式を各微分演算子(勾配, 発散およびラプラシアン)に対して, 各々粒子間相互作用モデルとして粒子間距離と影響半径(粒子間距離の 2.1~4.1 倍)に依存する重み関数を適用して離散化する⁵⁾。

3 中圧噴射攪拌工法

20MPa 以上の高圧噴射攪拌工法¹⁾より低い 6~18MPa の中圧噴射を用いた中圧噴射攪拌工法は, 噴射攪拌方式の QSJ システム³⁾ならびに噴射機械攪拌方式の CMS システム⁴⁾として, 実用化されている。注入材料に珪砂を

Fig. 2 Analytical model of jet grouting with mechanical agitation and mixing method⁴⁾.

混合する QSJ システムは, Fig. 1 に示す噴射ノズルを備えた単管式のロッドで, 貫入時には回転を伴う水平方向の水噴射により地盤を緩め, 引上げ時にはセメントスラリーを中圧噴射しながら回転し, 最大径 $\phi 1.0\text{m}$ の円柱状の改良体を造成する工法である³⁾。CMS システムは, Fig. 2 に示す端部に逸走防止板を備えた特殊攪拌翼を用いて, セメントスラリーの中圧噴射と機械攪拌を併用することにより, 攪拌混合効率と改良土の流動性を向上させ得る技術である⁴⁾。これにより, 盛り上がり土の排出を促進し, 周辺地盤の変位低減ならびに最大径 $\phi 1.6\text{m}$ の高品質な改良体の造成を実現している^{8), 9)}。

以上のような中圧噴射攪拌工法は, これまでに実大実験やボーリング採取した改良体の全長確認および一軸圧縮試験などにより改良体品質を確認しているものの解析的な検証は行われていない。そのため, 本研究では中圧噴射攪拌工法に MPS 法を適用し解析的に検証する。

4 MPS-CAE解析

4・1 解析対象

解析モデルは, 噴射攪拌工法と噴射機械攪拌工法についてそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す実スケールモデルを 3 次元 CAD により作成した。直径 $\phi 2.0\text{m}$, 高さ 1.5m の円柱地盤内で, 噴射攪拌工法は噴射ノズルから水平 1 方向に注入材料を噴射させた。噴射機械攪拌工法は下段羽の上下に設置した噴射ノズルより 2 方向に噴射しながら, 翼径 $\phi 1.6\text{m}$ の攪拌翼を昇降, 回転させた。攪拌翼の端部には, 逸走防止板を装着しており, スラリー噴射はこれに衝突する角度としている。これにより, 噴射されるセメントスラリーは攪拌翼の外側に逸走しにくい構造となっている⁴⁾。

解析ケースごとの施工仕様を Table 1 に示す。Case1~4 は噴射攪拌工法の解析モデルにより, 水中および地中における吐出直後の噴流の動圧力を吐出圧力, 注入材料ごとに解析した。Case5 は噴射攪拌工法の再現で, 貫入時は水切削, 引上げ時はスラリー噴射とした。Case6 および Case7 は噴射機械攪拌工法について, 吐出圧力 15.0MPa の中圧噴射と 0.01MPa の低压吐出を設定し他の条件は同一として, 吐出圧力の違いに着目した。初期粒子間距離は 0.03m として, 噴射ノズルから間欠的にスラリー粒子を吐出させた。これは, 粒子数の増加に伴う計算負荷の削減を目的としており, 連続的に噴射される本

Table 1 Construction specifications.

Case of analysis	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
Method of construction	Q SJ	Q SJ	Q SJ	Q SJ	Q SJ	CMS	CMS
Range of target	Water	Water	Ground	Ground	Ground	Ground	Ground
Material of jet	Water	Cement slurry	Water	Cement slurry	Water *1	Cement slurry *2	Cement slurry
Length of penetration while blanking (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Length of penetration while improving soil (m)	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5
Amount of jet (L/min)	80	90	80	90	80	90	80×2
Pressure of jet (MPa)	9.4	18.0	9.4	18.0	9.4	18.0	15.0
Velocity of jet (m/s)	137.5	155.0	137.5	155.0	137.5	155.0	141.5
Velocity of penetration while blanking (m/min)	-	-	-	-	6.0	-	10.0
Velocity of penetration while improving soil (m/min)	-	-	-	-	6.0	-	0.67
Velocity of lifting while improving soil (m/min)	-	-	-	-	-	0.33	1.0
Velocity of rotation (rpm)	-	-	-	-	80	20	20

*1 while penetrating *2 while pulling up

Table 2 Material parameters.

Range of target	Density (kg/m ³)	W/C (-)	Yield value (Pa)	Plastic viscosity (Pa・s)	Yield point (-)	Surface tension (N/m)	Fluid model
Water	1000	-	-	-	-	0.10	Newtonian fluid
Cement slurry	1500	1.0	10	0.28	0.0001	0.10	Bingham fluid
Ground	1600	-	1000000	1000	0.0001	0.002	Bingham fluid

工法の実現象とは異なるが、吐出圧力と噴射量を同時に再現できる方法として、間欠吐出条件を採用した。

4.2 パラメータ

解析対象材料の水、スラリーおよび地盤粒子の材料パラメータを Table 2 に示す。水粒子のレオロジー特性はニュートン流体として一般値を用い、スラリー粒子はビンガム流体として B 型粘度計により測定した塑性粘度を用いた。地盤粒子については、ビンガム流体として一軸圧縮試験の再現解析により材料パラメータを設定した。非ニュートン流体の一種であるビンガム流体は、せん断応力が降伏応力未満の時は流動せず、降伏応力を超えると流動し始める性質をもつ。そのため、せん断応力が降伏値を超えるまでは不動状態とみなされ、ひずみ速度が 0 となり解析不可能となる。この対処法として本研究では、降伏値未満のときは高粘性流体として扱う bi-viscosity モデル¹⁰⁾を採用しており、流動時および不動時の各々構成式は式(3)および式(4)で表される。

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta_p + \frac{\tau_y}{\sqrt{n}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad \Pi \geq \Pi_c \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta_p + \frac{\tau_y}{\sqrt{n_c}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^v \quad \Pi < \Pi_c \quad (4)$$

ここで、 τ_{ij} ：せん断応力、 P ：圧力、 η_p ：塑性粘度、 τ_y ：降伏値、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ ：流動時のひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ ：不動時の

ひずみ速度、 Π_c ：流動状態と不動状態の降伏基準値である。なお、 Π および Π_c はひずみ速度と降伏点パラメータ C_y を用いてそれぞれ式(5)および式(6)で表される。

$$\Pi = 2\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

$$\Pi_c = \left(\frac{2C_y\tau_y}{\eta_p}\right)^2 \quad (6)$$

4.3 モデル検証

解析に用いる地盤モデルの力学特性を確認するために実施した一軸圧縮試験の再現解析結果を Fig. 3 に示す。図中の解析モデルは供試体の鳥瞰図で、上面から平板を毎分 1%のひずみ速度で下降させた。グラフは、供試体上面粒子の圧縮応力と圧縮ひずみの経時変化を示している。本解析で対象とする地盤の土質は、盛土や構造物を築造する際に地盤改良を必要とする軟弱粘性土地盤を想定している。再現解析による圧縮応力は、6.6 秒後に 20kPa を示した直後に降伏し、圧縮ひずみが増加していることから、解析対象土の一軸圧縮強さは 20kPa 程度と推定される。Table 1 のパラメータは、以上の解析方法を用いて、自立した試料土が载荷による変形後に降伏するように、試行錯誤的に設定した。しかしながら、降伏後の圧縮応力は、载荷が進行するとともに再び上昇と下降を繰り返し 12.7 秒後に最大値の 129kPa を示している。実

Fig.3 Reproduction of unconfined compression test for soil.

際の土の一軸圧縮試験においては、降伏値の一軸圧縮強度到達後に供試体が破壊することで圧縮応力は大きく低下する。本研究では、地盤粒子をビンガム流体と仮定していることから、このように実際とは異なる挙動を示したものと考えられる。

静止流体中における静止した噴射ノズルからの噴射解析 (Case1~4) による噴射距離と噴流動圧力の関係を Fig. 4 に示す。異なる空間・注入材料、吐出圧力についての解析結果であり、噴流動圧力は吐出した先端粒子の位置と時間による噴流速度を用いて式(7)により求めた。

$$P = (\rho \times v^2)/2 \quad (7)$$

ここで、 P ：動圧力、 ρ ：注入材料の密度、 v ：噴流速度である。なお、図中に示した文献¹¹⁾による水中水噴射の実験値と比較することで解析モデルを検証した。

水中における水噴射とスラリー噴射の解析結果によると、いずれのケースも噴射距離の拡大とともに噴流の動圧力が低下すること、水噴射より吐出圧力が高く吐出速度が速いスラリー噴射の方が、より遠くまで動圧力を維持していることが確認できる。吐出圧力が同程度の水中水噴射 20MPa の実験値と水中スラリー噴射 18MPa の解析値を比較すると、吐出直後の噴射ノズル近傍においては解析値の圧力が高く一致していないものの、0.15~0.30m 区間の圧力減少傾向はおおむね一致している。さ

Fig.4 Relationship between jet distance and jet flow pressure.

らに、地中においては水中と比較して噴流の到達距離や動圧力が低下することがわかる。これらの検証結果に基づき、中圧噴射攪拌工法による原位置造成状況の可視化および造成径や計画改良範囲への注入量に関する性能評価において、本解析モデルによる CAE を適用した。

5 CAE による解析結果と考察

5.1 噴射攪拌工法による改良体造成状況の再現

噴射攪拌工法を適用した Case5 による改良体造成状況を Fig. 5 に時系列で示す。図中の上側白色部分は空中で、その下に充填されている地盤粒子を薄黄色、水粒子を水色、スラリー粒子を灰色で示している。これらの図は、施工開始後 10 秒間で深度 1.0m まで回転・貫入しながら水噴射し、その後 90 秒間で深度 0.5m までスラリー噴射を伴い回転・引き上げる施工工程を再現している。

貫入速度に比べて引き上げ速度が遅いこと、水噴射よりスラリー噴射の吐出圧力が高く噴射量も多いこと、貫入時に水噴射による地盤の切削が行われていることから、引き上げ時のスラリー噴射による地盤切削距離が大きいことを確認できる。また、実現場で生じる水、スラリーおよび土の混合物がロッドを伝って排泥として排出されていく様子は再現できていないものの、貫入初期の水噴射時に噴射された水粒子が周辺の地盤粒子に衝突した後、上部に排出されていく様子は確認できた。

施工完了時の 100 秒後には、図中に示した直径 1.0m の改良範囲を若干下回る径の改良体が造成されている。

Fig.5 Conditions of development of columnar soil-improved body by jet grouting type method.

Fig.6 Analysis results of mixing process by jet grouting with mechanical agitation and mixing method (jet pressure: 15.0 MPa).

Fig.7 Analysis results of mixing process by jet grouting with mechanical agitation and mixing method (jet pressure: 0.01 MPa).

本施工仕様による実現場での造成径は、粘着力 $c=10\text{kPa}$ の粘性土を対象とする場合: $\phi 0.8\text{m}$, $c=5\text{kPa}$ の場合: $\phi 1.0\text{m}$ とされている³⁾。これは、Fig. 3 で示した一軸圧縮試験結果における載荷初期の降伏値 $q_u \approx 20\text{kPa}$ から粘着力を推定すると、 $c=q_u/2 \approx 10\text{kPa}$ となり、現場での造成径 $\phi 0.8\text{m} \sim 1.0\text{m}$ 程度に一致する。これにより、今回比較した条件 ($c \approx 10\text{kPa}$) では、施工仕様による改良体出来形におおむね合致していると言える。しかしながら、改良体造成過程で生じる地盤粒子を混入した排泥の排出は再現されていない。これは、土の一軸圧縮試験再現解析における降伏後の挙動に示すように、地盤のモデル化に課題を残しているものと考えられる。

5・2 噴射機械攪拌工法による改良体造成状況の再現

吐出圧力の異なる噴射機械攪拌工法を適用した Case6 (中圧噴射: 15.0MPa)、Case7 (低圧吐出: 0.01MPa) による改良体造成状況をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。施工開始 6 秒後は、空打部を貫入し計画改良体天端に到達しスラリー噴射を開始した直後の状況で、48 秒後は最大深度貫入時、78 秒後は計画改良体天端まで引き上げた造成完了時の状況である。図より、中圧噴射 (15.0MPa) の施工開始 6 秒後のスラリー噴射は攪拌翼先端の逸走防止板まで到達しているのに対して、低圧吐出 (0.01MPa) では到達していないことが確認できる。また、最大深度貫入時および造成完了時における計画改良径の外周部付近は、中圧噴射の方が低圧吐出と比較して、スラリー粒子が密に充填されている。さらに低圧吐出の場合、スラリー粒子が攪拌翼中央部に集中することで攪拌翼外側の下方

向に押し出されている。これにより、計画改良範囲へのスラリー注入量が減少しており、低圧吐出では計画改良範囲に必要な量の注入が行われていないことになる。

5・3 噴射機械攪拌工法の性能評価

計画改良長 0.5m とその中央深度 0.1m 区間の計画改良径 $\phi 1.6\text{m}$ の範囲におけるセメントスラリー注入量の経時変化を Fig. 8 に示す。図中の計画注入量は、噴射ノズルから吐出された全スラリー粒子の体積であり、 0.1m 区間計画注入量は全体の $1/5$ としている。図より、施工開始 3 秒後からスラリー注入が開始され、時間経過とともに計画改良範囲の注入量が増大していることがわかる。造成完了時の 78 秒後には、中圧噴射 (15.0MPa) では計画の 9 割程度のスラリー量が計画改良範囲に充填され、中央深度 0.1m 区間では計画値を上回っている。一方で増加傾向は類似しているものの、低圧吐出 (0.01MPa) では計画注入量の 6 割程度にとどまっており、中央深度 0.1m 区間においても計画値を確保していない。

次に、計画改良範囲の中央深度 0.1m 区間における解析結果より、改良体中心軸から半径方向 0.1m ごとのドーナツ状に領域分割し、地盤とスラリーの粒子数を測定し領域内の全粒子に対するスラリー粒子の体積分率よりセメントスラリー注入率を算出した。その水平分布を Fig. 9 に示す。中圧噴射 (15.0MPa) と低圧吐出 (0.01MPa) を比較すると、中圧噴射の方が攪拌翼外周部付近のセメントスラリー注入率が高く、78 秒後の造成完了時には改良範囲全域において高い注入率を示している。これは、中圧噴射を併用することにより、攪拌翼外周部付近のス

Fig.8 Time-dependent change in amount of cement slurry in plan improvement zone.

ラリー注入率を高めることが可能で、かつ計画改良範囲に確実に注入されることにより、品質の高い改良体の造成が可能となることを示唆している。

6 結 言

本研究では、複雑な改良体造成メカニズムを有する中圧噴射攪拌工法に着目し、計画段階から当該性能をシミュレーションするシステム (CAE) の確立を目的として、地盤の破壊現象や高流速流体を扱うことができる粒子法を用いて改良工程を再現し、地盤条件 ($c \approx 10\text{kPa}$) に応じた施工仕様を検討した。さらに、機械攪拌に中圧噴射を併用する効果を確認するために、異なる噴射圧力による比較解析を行い、原位置造成状況の可視化と造成径や計画改良範囲への注入量に関する性能評価を試みた。

結果として、噴射攪拌工法解析による改良体出来形は、実現現場での造成径と同程度であったものの、実現現象の排泥排出状況が再現できなかった。その主な要因は、地盤のモデル化と考えられるが、一軸圧縮試験の再現解析を用いた、一義的でない試行錯誤的設定手法を採用していることから、パラメータ設定に課題を残している。

噴射射機械攪拌工法解析においては、機械攪拌に中圧噴射を併用することで、攪拌翼外周部付近を含む計画改良範囲のスラリー注入率を高め、高品質な改良体を造成できる可能性が高いことを確認した。この傾向は、地盤のモデル化に課題を残しつつも同一の地盤モデルを用いた比較解析結果であることから、より実現現象に近いレオロジーを再現した地盤モデルにおいても、中圧噴射を併用する効果として、同様に再現されと考えられる。

地盤改良工法への CAE の導入は、地盤条件に応じた改良体造成技術の最適化を可能にするとともに、コンピュータ上ではあるが、地盤の可視化への寄与も期待でき、将来的には地盤改良施工の可視的管理およびライフサイクルにおける改良地盤の維持管理等においても有効なツールになると考えている。

Fig.9 Horizontal distribution of cement slurry jet ratio.

参 考 文 献

- 1) W. Nakanishi and J. Nakazawa, "The process of development on jet grouting methods and their future", Soil mechanics and foundation engineering, Vol.54, No.7, pp.10-12 (2006).
- 2) Committee on Ground Improvement, The Society of Materials Science, Japan, "Measures of subsidence in natural or artificial low land without ground improvement"(2019).
- 3) M.I.T.S Association, "Technical standards of quartz sand jet by middle pressure injection total system"(2019).
- 4) M.I.T.S Association, "Technical standards of combination mixing slurry by middle pressure injection total system"(2018).
- 5) S. Koshizuka, "Particle method of Computational mechanics lecture series", Maruzen (2005).
- 6) H. Okada, "Basic engineering required to master CAE", The Nikkan Kogyo Shimbun (2016).
- 7) S. Inazumi, T. Komaki, Y. Nakanishi, H. Hashida and M. Suzuki, "Qualities evaluation on high pressure Jet mixing ground improvement methods by distinct element method (DEM)", Proceedings of the 13th National Symposium on Ground Improvement, pp.211-216 (2018).
- 8) A. Shimano, K. Sumi, Y. Nakanishi and N. Tanaka, "Introduction of combination mixing slurry by middle pressure injection total system and measurement example of ground displacement", The Foundation Engineering & Equipment, Vol. 45, No.6, pp.97-100 (2017).
- 9) T. Komaki, S. Fukada, K. Sumi, Y. Nakanishi and N. Tanaka, "Demonstration experiment of evolution technology by combination mixing slurry of middle pressure injection total system", Proceedings of the 53th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp.835-836 (2018).
- 10) T. Iribe, S. Iraha, J. Tomiyama and H. Matsubara, "Application of particle method to flow problem of fresh concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.1, pp.905-910 (2003).
- 11) Paolo Croce, Alessandro Flora, Giuseppe Modoni : Jet Grouting (Technology, Design and Control), CRC Press, (2014).