掘削土砂リサイクル処理機械内土砂挙動解析用 シミュレータの開発に関する基礎研究*

高橋 弘¹ 渡嘉敷 憲一郎² 山中 勇人²
関野 聡³ 橋本 久儀³

Fundamental Study on the Simulator to Analyze the Behavior of Excavated Soils in an Excavated Soil-Recycling Machine

by Hiroshi TAKAHASHI¹, Ken-ichiro TOKASHIKI¹, Hayato YAMANAKA¹
Satoshi SEKINO² and Hisayoshi HASHIMOTO²

1. Dept. of Geoscience and Technology, Graduate School of Engineering, Tohoku University,
Aoba-ku, Sendai 980-8579
2. Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

A soil-recycling machine has been receiving considerable attentions in order to recycle the excavated soils at the construction site. Excavated soils are fed into this machine and they are mixed with the cement or slaked lime. But, the mixing process is very complicated because not only many mechanical factors such as paddle inclination angle, pitch and shaft rotation number, but also physical properties of soils affect the mixing process in the chamber.

In order to design the soil-recycling machine, the effect of these factors on the mixing process has to be fully investigated. However, an experimental investigation requires much cost, and this is not only uneconomical but also ineffective.

In this study, the simulation model to estimate the behavior of soils in the mixing chamber is developed by using Distinct Element Method (DEM) to assist the economical and effective design of the soil-recycling machine. A numerical simulation of the soil behavior was carried out based on this developed model. It was confirmed that the processing volume of the soils showed a maximum at 45 degrees of the paddle inclination angle.

KEY WORDS : Soil-Recycling Machine, Excavated Soils, DEM, Numerical Simulation

1. はじめに

近年、地価の高騰により従来は宅地化の対象外であった軟弱地盤地に建物を建設する要望が高まり、その結果、軟弱地盤を掘削した土砂とセメントを混合し、元に埋め戻すといった土質改良工法の需要が増大している。また水道管などのライフラインの埋設作業現場で発生する掘削土砂は、埋め戻しの適用標準を満足しない限り、そのままでは埋め戻しに利用できず、一旦、掘削土砂を処理工場まで運搬し、乾燥処理などを施した後に埋め戻しに使用することになっている¹⁾。しかしながら、実際には処理工場までの運搬コストが大きな負担となることから、運搬の途中で掘削土砂がしばしば不法投棄されており、この不法投棄された土砂が周辺環境に悪影響を及ぼすなど社会問題になりつつある²⁾。そこで、建設現場で掘削土砂に処理を施し、埋め戻しに再利用できるような掘削土砂リサイクル処理機械、すなわち土質改良機の開発に多大の期待が寄せられている。

ところで、この土質改良機が行う作業は、セメントや生石灰などの添加剤と土砂とを均質に混合することであるが、この機械の

最適設計を行う場合、例えばパドルの取り付け角度、ピッチ、回転数などの機械要素のほかに土質条件など土砂の混合に関与すると考えられるパラメータは非常に多く、それらをすべて実験によって評価・検討するのは非効率的であるばかりでなく、あまりにも非経済的である。これに対し、コンピュータ上で土砂の混合過程をシミュレートすることができれば、コンピュータ上で土質改良機の最適設計を行うことが可能になる。土砂の混合装置に関しては、建設機械メーカなどにより独自に研究開発が進められつつあるが、混合状態は定量評価が難しいことから、各メーカが独自にノウハウを蓄積している状況であり、発表されているデータは少なく、土砂と添加剤の混合過程の数値計算例はほとんど見受けられない。

そこで、本研究は、処理機械の効率的かつ経済的な設計を可能にするため、コンピュータ上で混合容器内における土砂挙動を解析するためのシミュレータの開発を目的としている。本報では、シミュレータの概略について述べ、さらに本シミュレータを用いた計算結果の一例を示す。

2. 混合方式

土砂と添加剤の混合方式は、コンクリートミキサに代表される容器回転型とスクリーコンベヤに代表される容器固定型に大別される³⁾。Fig.1 に示すパドル方式は容器固定型に属し、(1) 連続式とした構成が可能であり、(2) 混合する対象物の性状に幅広

* 1999年11月10日受付 2000年2月9日受理

1. 正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科地球工学専攻

2. 東北大学大学院生 工学研究科地球工学専攻博士前期課程

3. 日立建機(株) 技術開発センター

【著者連絡先】 TEL&FAX 022-217-7395 (東北大・地球)

キーワード: 掘削土砂リサイクル機械, 掘削土砂, DEM, 数値シミュレーション

Fig.1 Schematic diagram of paddle type mixing chamber.

く適用可能であるという特徴を有するとともに、(3) 粘性の高い土塊を小割する能力を有することが期待できるため、土質改良機における土砂混合には非常に有効な方式であると考えられる。特に複軸式の場合は、それぞれの軸の回転方向の組み合わせによっては、混合性能の向上が期待できることから、実際の機械では、この複軸パドル方式が採用されることが考えられる。しかし、この場合は解析が多少複雑になる。さらに、本研究は基礎研究として、土砂混合過程のシミュレータを開発することを目的としていることから、ここでは、まず単軸のパドル混合方式を取り上げ、パドルの回転による混合容器内の土砂挙動を解析するためのシミュレータを開発する。

3. シミュレータの概略

シミュレータの開発には、粉粒体の解析に多く用いられている個別要素法 (Distinct Element Method: 以下、DEM と記す) を用いる。DEM は粒状体の動的挙動を扱うのに適し、個々の粒子を剛体要素と考え、それぞれの要素ごとに運動方程式をたて、粒状体の解析を行う方法である⁴⁾。運動方程式をたてる際には要素間に作用する力を評価しなければならない。一般に DEM では、要素中心間を結ぶ方向を法線方向、またその方向に垂直な向きを接線方向とし、Fig.2 に示すように、それぞれの要素間に弾性を表すスプリングおよび粘性減衰を表すダッシュポットを仮定し、さらに接線方向には摩擦を考慮するためのスライダを仮定し、これにより要素間に働く力を算出する。なお、図中の k_n および k_s は法線方向および接線方向におけるスプリングのバネ定数、 η_n および η_s は法線方向および接線方向におけるダッシュポットの粘性係数、 e_n は 2 つの要素間に働く法線方向の力、 f_n および f_s は法線方向および接線方向の合力、 μ は要素間摩擦係数を表す。

このようにして求めた運動方程式を時間領域において前進的に解き、粒子挙動の解析を行うのが DEM の特徴である。なお、一般に DEM による解析では、2 次元解析の場合、要素は円板で、ま

Fig.2 Contact model used in this simulation.

Fig.3 Relationship between base frame and local frame.

た 3 次元解析の場合は球と仮定されることが多い。本シミュレーションでは混合容器内における土砂の 3 次元挙動を取り扱うため、要素として球を用いる。DEM は砂のような粘性の少ない粉粒体の解析ばかりでなく、Fig.2 に示されるバネ定数および粘性係数の値を変えることにより粘性の高い土砂にも適用可能であり⁵⁾⁶⁾、さらには岩石のような物体に対しても適用可能である⁷⁾。

ここでは、主として要素間に作用する力の求め方について述べ、DEM の原理については簡単に記述するに留める。

3・1 座標系の設定

本シミュレーションにおいては、Fig.3 に示すように絶対座標系のほかに、絶対座標系と各軸が平行で粒子中心を原点とする局所座標系を定義する。これは、後述する要素間の相互作用力を計算する際に便利であるためである。なお、ここでは、各座標軸は大文字を用いて表し、各座標点是小文字を用いて表す。いま、要素 I および要素 J の絶対座標系における中心座標をそれぞれ (x_0, y_0, z_0) および (x_1, y_1, z_1) とし、これらの座標を「要素 I を基準とする局所座標系 (以後 Σ_1 と記す)」に変換すると、要素 I および J の中心座標はそれぞれ $(0, 0, 0)$ および $(x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0)$ となる。

3・2 要素間相互作用力の計算

ある時刻 t における任意の球形要素 I および J の接触を考える。局所座標系を考え、要素の中心座標を I $(0, 0, 0)$ および J (x_j, y_j, z_j) とする。ここで要素中心間距離 R_{ij} は、次式で与えられる。

$$R_{ij} = \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

要素 I, J の半径をそれぞれ r_i, r_j とおくと、これらの要素間に接触があるかどうかの判別条件は次式で示される。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式を満たさないときは要素間に接触がないため、その要素間相互作用力は 0 になるが、要素間に接触がある場合には、その要素間力を評価する必要がある。

さて、要素 I および J の中心を結んだ線が要素衝突の法線方向となる。この線が局所座標系 Σ_1 の座標軸となす方向について、角度 α および β を Fig.4 のように定義する。このとき、角度 α および β の正弦と余弦は、それぞれ次式で与えられる。

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{x_j^2 + z_j^2}}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}}, \cos \alpha = \frac{y_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sin \beta = \frac{x_j}{\sqrt{x_j^2 + z_j^2}}, \cos \beta = \frac{z_j}{\sqrt{x_j^2 + z_j^2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(ただし、 $0 < \alpha < \pi$, $0 < \beta < 2\pi$)

ここで要素 I と J の交点の中心を「接点」と定義し、微小時間 Δt における要素間の相対変位は、接点の相対変位に等しいと仮定する。Fig.5 に示すように、接点の座標 (x_a, y_a, z_a) は次式で与

Fig.4 Definition of angle α and β .

Fig.6 Minute displacement of the contact point in the normal direction.

Fig.5 Definition of the contact point.

えられる。

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r_i^2 - r_j^2}{R_{ij}^2} \right) \cdot \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

次に法線方向および接線方向における接触点の相対変位の増分について考える。このときの要素 I および J の X, Y, Z 軸方向の微小移動変位および X, Y, Z 軸まわりの微小回転角をそれぞれ Δx , Δy , Δz , $\Delta \theta$, $\Delta \phi$, $\Delta \psi$ とし, i および j を添字として要素を区別することにする。

Fig.6 に示されるように、法線方向の微小変位 Δu_n は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta u_n = & (\Delta x_i - \Delta x_j) \sin \alpha \sin \beta + (\Delta y_i - \Delta y_j) \cos \alpha \\ & + (\Delta z_i - \Delta z_j) \sin \alpha \cos \beta \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

次に、接線方向の微小変位について考える。3 次元の場合、要素の回転を考慮する必要がある。そこで、各軸右ネジの回転方向を正の向きとする 3 通りについて考える。なお X 軸まわりの回転方向の微小変位については Δu_x のように添字 x を用いて表す。

まず、接触点の x 座標である $x = x_a$ の平面で、接触する 2 つの球を切ったときの模式図を Fig.7 に示す。初めに X 軸まわりの回転を考える。角度 γ を図のように定義すると、正弦および余弦は次式で表される。

$$\sin \gamma = \frac{z_j}{\sqrt{y_j^2 + z_j^2}}, \cos \gamma = \frac{y_j}{\sqrt{y_j^2 + z_j^2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 Δt 間の相対変位 $(\Delta y_j - \Delta y_i)$ および $(\Delta z_j - \Delta z_i)$ により生じる接触点の「X 軸まわりの接線方向の変位 $\Delta u_x'$ 」は次式で表される。

$$\Delta u_x' = (\Delta y_i - \Delta y_j) \sin \gamma - (\Delta z_i - \Delta z_j) \cos \gamma \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、Fig.8 に示すように、この断面の半径は、要素 I および J のそれぞれに対して、次式のように表される。

$$r_{xi} = \sqrt{r_i^2 - x_a^2}, r_{xj} = \sqrt{r_j^2 - (x_j - x_a)^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Fig.7 Minute displacement of the contact point in the tangential direction.

Fig.8 Radius in each cross section.

Fig.9 Minute rotation angle θ' of element I due to the rotation of element J.

いま、要素 I-J 間に滑りがないと仮定する。このとき、要素 J の微小回転角 $\Delta\theta_j$ によって引き起こされる要素 I の回転角 θ' は次式で与えられる (Fig.9 参照)。

$$\theta' = \Delta\theta_j \cdot \frac{r_{yj}}{r_{xi}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

これに要素 I 自身の微小回転角 $\Delta\theta_i$ を考え合わせて接線方向の変位を求めると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta u_x &= -(\Delta\theta_i + \theta') \cdot r_{xi} + \Delta u'_x \\ &= -(\Delta\theta_i + \theta') \cdot r_{xi} + (\Delta y_i - \Delta y_j) \sin \gamma \\ &\quad -(\Delta z_i - \Delta z_j) \cos \gamma \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

同様に、 $y = y_a$ および $z = z_a$ 断面について考え、要素中心間を結ぶ方向を表す角 β および λ を用いると、Y および Z 軸まわりの接線方向変位は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta u_y &= -(\Delta\phi_i + \phi') \cdot r_{yi} + (\Delta z_i - \Delta z_j) \sin \beta \\ &\quad -(\Delta x_i - \Delta x_j) \cos \beta \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta u_z &= -(\Delta\psi_i + \psi') \cdot r_{zi} + (\Delta x_i - \Delta x_j) \sin \lambda \\ &\quad -(\Delta y_i - \Delta y_j) \cos \lambda \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \phi' &= \Delta\phi_j \cdot \frac{r_{yj}}{r_{yi}}, \psi' = \Delta\psi_j \cdot \frac{r_{zj}}{r_{zi}} \\ r_{yi} &= \sqrt{r_i^2 - y_a^2}, r_{yj} = \sqrt{r_j^2 - (y_a - y_j)^2} \\ r_{zi} &= \sqrt{r_i^2 - z_a^2}, r_{zj} = \sqrt{r_j^2 - (z_a - z_j)^2} \end{aligned}$$

とする。

以上のようにして求めた変位を用いて、前出の力学モデルに従い、要素間に作用する力を算出する。まず、法線方向について、 $[\Delta e_n]_t$ および $[d_n]_t$ をそれぞれ「法線方向におけるスプリング力の増分」および「粘性ダッシュポットの力」とする。なお、添字 t は時刻 t における値を表す。つまり、 $[X]_t$ は、時刻 t における X の値という意味である。バネ定数およびダッシュポットの粘性係数をそれぞれ k_n および η_n とすると、 $[\Delta e_n]_t$ および $[d_n]_t$ は次式で表される。

$$[\Delta e_n]_t = k_n \cdot \Delta u_n, [d_n]_t = \eta_n \cdot \left(\frac{\Delta u_n}{\Delta t} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

同様に、接線方向 (3 軸まわりの各方向) についても、バネ定数とダッシュポットの粘性係数をそれぞれ k_t および η_t とすると、次式により各軸方向の力を算出できる。

$$\left\{ \begin{aligned} [\Delta e_x]_t &= k_t \cdot \Delta u_x \\ [\Delta e_y]_t &= k_t \cdot \Delta u_y \\ [\Delta e_z]_t &= k_t \cdot \Delta u_z \end{aligned} \right\}, \left\{ \begin{aligned} [d_x]_t &= \eta_t \cdot \frac{\Delta u_x}{\Delta t} \\ [d_y]_t &= \eta_t \cdot \frac{\Delta u_y}{\Delta t} \\ [d_z]_t &= \eta_t \cdot \frac{\Delta u_z}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

これらの式によって増分が得られるため、それらの総和を取ることにより $[e_n]_t, [e_x]_t, [e_y]_t, [e_z]_t$ も求められる。ここで、要素間の引張り力を認めず、要素間の接触が外れたときには法線方向および接線方向とも力を働かなくするため、以下の条件を付加する。

$$\begin{aligned} [e_n]_t &< 0 \text{ のとき} \\ [e_n]_t &= [e_x]_t = [e_y]_t = [e_z]_t = 0, [d_n]_t = [d_x]_t \\ &= [d_y]_t = [d_z]_t = 0 \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

以上より、時刻 t における 2 つの要素間に作用する法線方向と接線方向 (3 つ) の力 $[f_n]_t, [f_x]_t, [f_y]_t, [f_z]_t$ が次式のように求められる。

$$\begin{aligned} [f_n]_t &= [e_n]_t + [d_n]_t \\ [f_x]_t &= [e_x]_t + [d_x]_t \end{aligned}$$

Fig.10 Definition of the contact point between the boundary and the element.

$$\begin{aligned} [f_{iy}]_t &= [e_y]_t + [d_y]_t \\ [f_{iz}]_t &= [e_z]_t + [d_z]_t \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

次に、この要素 I と接触しているすべての要素間の合力を求め、要素 I における各軸方向の合力成分をそれぞれ f_{xp}, f_{yp}, f_{zp} とし、また X, Y, Z 軸回りのモーメントをそれぞれ m_{xp}, m_{yp}, m_{zp} とすれば、次式を得る。

$$\begin{aligned} [f_{xi}]_t &= \sum (-[f_n]_t \sin \alpha \sin \beta + [f_{iy}]_t \cos \beta - [f_{iz}]_t \sin \lambda) \\ [f_{yi}]_t &= \sum (-[f_n]_t \cos \alpha - [f_{ix}]_t \sin \gamma + [f_{iz}]_t \cos \lambda) \\ [f_{zi}]_t &= \sum (-[f_n]_t \sin \alpha \sin \beta + [f_{ix}]_t \cos \gamma - [f_{iy}]_t \sin \beta) \\ [m_{xi}]_t &= \sum (r_{xi} \cdot [f_{ix}]_t) \\ [m_{yi}]_t &= \sum (r_{yi} \cdot [f_{iy}]_t) \\ [m_{zi}]_t &= \sum (r_{zi} \cdot [f_{iz}]_t) \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

3・3 要素が境界から受ける力

各要素は境界からも力を受ける。本シミュレーションにおいては、「容器の外壁として定義される動かない境界」と「パドルおよびシャフトのような時間の関数で定義される動く境界」の 2 種類がある。要素が境界と衝突した際、要素は境界から反力を受ける。このときの反力の計算には、前述した要素間の相互作用力の算出と同様の方法を用いることができる。なお、シャフトとパドルのモデル化については後述する。

Fig.10 に示すように、「要素」と「ある関数で表現された境界」が接触するとき、境界の関数上で要素中心に最も近い点を取り、この点を前述の「接触点」とし、その微小回転角を 0 とする。また境界が時間 t の関数ならば、それに基づいた移動変位を与え、時間の関数でない場合は微小移動変位も 0 とすることにより、前述と同じ方法を用いて粒子と境界との間の力を算出することが可能になる。

以上の方法で求めた境界から受ける力の成分をそれぞれ $[f_{\text{bou}x}]_t, [f_{\text{bou}y}]_t, [f_{\text{bou}z}]_t$ とし、また各軸まわりのモーメントをそれぞれ $[m_{\text{bou}x}]_t, [m_{\text{bou}y}]_t, [m_{\text{bou}z}]_t$ として、運動方程式に組み込む。

3・4 運動方程式の算出

要素間力および境界から受ける力の他に要素に働く重力を考え、これらをまとめて要素 I に対する運動方程式をたてると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} F_x &= [f_{xi}]_t + [f_{\text{bou}x}]_t = m_i [\ddot{x}_i]_t \\ F_y &= [f_{yi}]_t + [f_{\text{bou}y}]_t - m_i \cdot g = m_i [\ddot{y}_i]_t \\ F_z &= [f_{zi}]_t + [f_{\text{bou}z}]_t = m_i [\ddot{z}_i]_t \\ N_x &= [m_{xi}]_t + [m_{\text{bou}x}]_t = I_i [\ddot{\theta}_i]_t \\ N_y &= [m_{yi}]_t + [m_{\text{bou}y}]_t = I_i [\ddot{\phi}_i]_t \\ N_z &= [m_{zi}]_t + [m_{\text{bou}z}]_t = I_i [\ddot{\psi}_i]_t \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

Fig. 11 Shape and scale of the mixing chamber and paddles.

ただし、 g は重力加速度であり、 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ はそれぞれ時刻 t における要素 i の加速度の x, y, z 成分を表し、 $\ddot{\theta}, \ddot{\phi}, \ddot{\psi}$ は各軸まわりの角加速度を表す。 m_i および I_i はそれぞれ要素の質量と慣性モーメントを表し、要素密度 ρ を用いて次式で与えられる。

$$m_i = \frac{4\pi\rho r_i^3}{3}, I_i = \frac{2m_i r_i^2}{5} \quad (20)$$

3・5 シャフトとパドルのモデル化

今回のシミュレーションに用いた混合容器およびパドルの形状と寸法を Fig. 11 に示す。容器、シャフトおよびパドルの形状は、コンピュータに組み込みやすいように図に示すような単純な形状とした。なお、容器の高さは 130 mm、幅は 130 mm とし、パドルのピッチは 120 mm としたが、これは以下の理由による。

DEM の最大の問題点は、使用できる要素の個数に制限があることである。すなわち、DEM ではすべての要素の位置座標をメモリ上に記憶しておく必要があるため、使用できる要素の個数に制限があるばかりでなく、要素の個数が増えるに従い、計算時間が飛躍的に増大するという欠点がある。したがって、計算コストの面では要素の個数はできるだけ少なく抑えることが望ましい。一方、要素の直径および個数を小さくすると、混合容器内で土砂が占める体積、すなわち充填率が小さくなる。充填率は本来体積比率であるが、本シミュレーションでは後述するように便宜上、充填率は「パドルの通過する領域をシャフト伸長方向に投影した面積」に対する「混合容器内に充填した要素断面積」の割合として定義する。充填率が小さい場合、パドルによる混合効果はほとんど期待できないことから、実際の処理では、ある程度充填率を高めて、添加剤との混合処理が行われる。したがって、要素の直径を小さく

Fig. 12 Section of the calculation and relationship between shaft and base frame.

Fig. 13 Shape of base paddle.

くし、充填率を低くした状態でのシミュレーションは、実際の処理とはかけ離れた状態をシミュレートすることになり、現実味に欠けてしまう懸念がある。しかしながら、上述したように要素の個数を多くすることは困難であるため、ほとんどの場合、要素の直径を大きくし、仮想的に導入されるバネ定数や粘性係数の値を変化させて、実際の現象に近い現象がコンピュータ上で実現できるように工夫している。以上の点を考慮に入れ、容器およびパドルの寸法を決定するとともに、シミュレーションで用いる要素の個数および直径を決定した。シミュレーションにおける計算条件を Table 1 に示す。

絶対座標系の原点は、Fig. 12 に示すようにシャフトの中心に置き、シャフトの軸方向に X 軸を取り、 Y 軸および Z 軸は右手系をなすように設定した。シャフトの形状は前述したように簡単のため六角柱とした。この場合、Fig. 12 の①で示される面は次式で示される。

$$\begin{aligned} -60 < x \leq 60 \\ -12 < y \leq 12 \\ z = 12\sqrt{3} \end{aligned} \quad (21)$$

他の 5 つの面の関数は、①で示される基準面を X 軸回りに 60 度ずつ回転させることにより得られる。

パドルは、Fig. 13 に示すように Y 軸に垂直な場合の平面を基準とする。すなわち、Fig. 13 に示されている状態は、パドルの傾斜角 θ が 0 の場合である。本シミュレーションでは、パドルは 1 ピッチ中に 3 枚設置されているとし、 X 軸方向に 1/3 ピッチかつ X 軸回りに 120 度ごとに配置する。パドルの傾斜角を θ とすると、 n 番目のパドルにおける各頂点の座標 $P_m(x_m, y_m, z_m)$ ($i = 1 \sim 6$) は、Fig. 13 に示す基準形の各頂点の座標 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1 \sim 6$) を用いて次式で示される。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i - 60 + 60 \cdot (n-1) / 3 \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (22)$$

Table 1 Several conditions in numerical simulation.

Time Interval	0.0001sec.
Number of Particles	1000
Particle Diameter	10 mm
Number of Shaft	1
Rotation Number of Shaft	30 rpm
Density of Particles	2500kg/m ³
Friction Coefficient between the Paddle and Particles	0.59
Friction Coefficient among Particles	0.93
Spring Constant	1.5 × 10 ⁵ N/m
Coefficient of Viscosity	6300Ns/m

Fig. 14 Definition of the packing rate.

Fig.15 Calculation method for the processed soils volume.

Fig.16 Definition of paddle inclination angle.

$$\begin{pmatrix} x_{ni} \\ y_{ni} \\ z_{ni} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left[(n-1)\frac{2\pi}{3}\right] & -\sin\left[(n-1)\frac{2\pi}{3}\right] \\ 0 & \sin\left[(n-1)\frac{2\pi}{3}\right] & \cos\left[(n-1)\frac{2\pi}{3}\right] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' + 12\sqrt{3} \end{pmatrix} \quad (23)$$

3・6 計算区間および計算手法

本研究では、要素の直径は 10 mm、要素数を 1,000 個とし、5 秒間混合を行った場合の土砂の挙動をシミュレートした。計算区間は 1 ピッチ、120 mm の範囲であり、この区間に直径 10 mm の要素を 1,000 個充填した場合の充填率は約 100 % である。ここで、充填率は前述したように「パドルの通過する領域をシャフト伸長方向に投影した面積」に対する「混合容器内に充填した要素断面積」の割合として定義した (Fig.14 参照)。なお、粒子は下流方向に搬送されるので、シミュレーションが進むにつれて計算区間から抜け出てしまう粒子が出現する。この場合、Fig.15 に示すように、計算区間の境界 B を越えた粒子は、搬送方向の座標だけ 1 ピッチ分マイナスして、境界 A にループさせることにより、計算区間に常に 1,000 個の粒子が存在するようにした。シミュレーションではパラメータとして、Fig.16 に示されるパドルの傾斜角 θ を変化させ、土砂挙動をシミュレートし、その結果から混合装置の性能を評価した。

4. シミュレーション結果

混合装置の性能を評価するパラメータとして考えられる代表的なものは、「単位時間当たりの処理量」と「添加剤と土砂との混合

Fig.17 Time history of the behavior of soils : Yellow and red particles indicate the excavated soils and cement (or slaked lime), respectively. Blue part indicates the rotating paddle.

度」である。特に均一に混合されているか否かを調べるためには、容器の深さ方向の断面における混合度の評価が不可欠である。この混合度の評価には、ある程度長時間の混合をシミュレートする必要があると考えられるので、初めに 20 秒間の混合をシミュレートした。

Fig.17 に添加剤と土砂との混合過程の時刻歴を示す。Table 1 に示すように、計算のタイムステップは 1/10,000 秒とし、バネ定数および粘性係数はそれぞれ $1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ および $6,300 \text{ Ns/m}$ とし、簡単のため法線方向および接線方向とも同じ値を仮定した。本シミュレーションでは、土砂として砂粒子のような比較的粘性性の少ない粒子をイメージし、かつ混合過程で粒子が容器から飛び出すなどといった現象が起こらず、シミュレーション結果が定性的に満足いく混合過程を示すように、バネ定数および粘性係数を試行錯誤により決定した。もちろん、バネ定数および粘性係数が異なればシミュレーション結果は異なり、またこれらの値は土砂の物性値との関係で与えられるべきものと考えられるが、これについては今後の課題としたい。

ところで、計算区間は 1 ピッチ分であるにもかかわらず、Fig.17 では 5 ピッチ分の長さにおける土砂挙動が表示されている。これは以下のようにして表示を行った。計算区間は Fig.12 に示すように 1 ピッチ分であることに変わりはない。Fig.17 は 1 ピッチ分の計算結果を単に 5 回繰り返して表示しただけである。したがって、初期状態である $t = 0$ 秒においては、土砂を充填した状態が単に 5 ピッチ分だけ繰り返されている。しかし、このままでは添加剤の粒子がどのように混合されて下流方向に搬送されるかは分からない。そこで、添加剤の混合比率を 10 % とし、1,000 個の要素のうち 100 個を添加剤として土砂粒子と区別する。粒子が境界 B を超えた場合、境界 A にループすることは既に述べた通りである

Fig. 18 Relationship between paddle inclination angle and processed soil volume.

が、2 ピッチ目以降を表示する際には、ループした粒子の属性、すなわち土砂あるいは添加剤を示す属性をそのまま保持して表示するようにした。つまり、シミュレーションを開始してから t 秒経過して 2 回ループした粒子は、 t 秒後 3 ピッチ目にその状態が表示されることになる。したがって、充填状態そのものは、いずれの時刻でも同じ状態が 5 ピッチ分繰り返されてはいるが、各ピッチにおいては土砂と添加剤の混合状態は異なったものとなっている。Fig. 17 では、土砂粒子および添加剤粒子をそれぞれ黄色および赤色で表示し、パドルを青色で示した。定性的にはあるが、添加剤はパドルの回転により土砂と混合されながら、下流方向に搬送されている様子が示されている。しかし、Table 1 に示した条件で 20 秒間の混合過程をシミュレートするのにクロック周波数 450 MHz の Pentium マシンで約 100 時間という長時間を要した。また、本シミュレーションでは、上述のように 1 個の粒子の大きさは 10 mm とやや大きいため、1 断面に含まれる土砂および添加剤の個数が小さくなり、その結果、信頼性の高い混合度の定量評価は困難であった。この問題を克服するためには、要素の直径を小さくし、かつ全体の要素の数を増大させることにより、1 断面に含まれる土砂および添加剤の個数を増大させる必要があるが、上述した計算上の問題があり、本シミュレーションでは、これは不可能であった。したがって、「添加剤と土砂との混合度」に対する定量評価は次の検討項目とし、今回は処理量の定量評価を

行った。処理量は Fig. 15 に示すように境界 B を超えて境界 A にループした要素の数をカウントし、その数に要素 1 個の体積を乗ずることにより求めた。

Fig. 18 にパドルの傾斜角 θ と処理量との関係を示す。この図より、 $\theta = 45$ 度付近で処理量はピークを示すことが分かる。したがって、処理量をある程度大きくする必要がある場合は、パドルの角度を最適な値に設定する必要があると考えられる。

5. む す び

本研究では、土質改良機の最適設計を支援することを目的とし、個別要素法を用いて土砂混合シミュレータの開発を行った。作成されたシミュレータを用いて混合容器内の土砂挙動をシミュレートした結果、パドル方式による添加剤と土砂との混合過程を定性的に把握することができ、また処理量はパドルの傾斜角が 45 度付近で最大値を示すことを確認した。ただし、本研究で得られたシミュレータの実験による検証は行われていない。本研究により混合容器内土砂挙動解析用のシミュレータの基礎部分は、ほぼ構築されたと考えられるので、今後は模型実験とシミュレーション結果との比較検討を通して、シミュレータに含まれるバネ定数や粘性係数と土砂の物性値との関係について検討し、さらに本シミュレータを複軸のパドル混合方式に適用できるように拡張する予定である。

参 考 文 献

- 1) 建設省大臣官房技術調査室：建設発生土利用技術マニュアル，p. 30—41，(1997)，(財) 土木研究センター
- 2) 同上，p. 1—2
- 3) 化学工学協会編：化学工学便覧，p. 1109—1115，(1968)
- 4) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: Geotechnique, Vol. 29, No. 1, p. 47—65, (1979)
- 5) 木下英郎・藤村 尚：土木学会論文報告集，第 333 号，p. 137—146，(1996)
- 6) Ohkubo, S., Oida, A. and Yamazaki, M.: Proc. of the 5th Asia—Pacific Regional Conf., ISTVS, p. 175—183, (1998)
- 7) 佐々木加津也・清水賀之：土木学会第 53 回年次学術講演会要旨集，Vol. III—B129, p. 158—159, (1998)