

パドル式土質改良機による汚染土壌と薬剤の固液混合シミュレーション

Solid-liquid mixing simulation of contaminated soils and chemical agent in the paddle type soil-recycling machine

高橋 弘*・丸橋 史和*・橋本 久儀**

Hiroshi TAKAHASHI, Fumikazu MARUHASHI and Hisayoshi HASHIMOTO

*工博 東北大学教授 大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

** 日立建機株式会社 (〒112-8563 東京都文京区後楽 2-5-1)

Recently, a soil mixing machine has been receiving considerable attention in order to restore the contaminated soils. In the remediation sites, contaminated soils are fed into the machine and they are mixed with the liquid agent. As the liquid agent is expensive, it is necessary to obtain the mixing behavior of contaminated soils and agent, and to know the optimum operating condition in order to perform the effective remediation. However, many parameters affect the mixing behavior and experimental investigation is uneconomical and ineffective.

In this study, the mixing of contaminated soils and liquid agent was simulated by using distinct element method (DEM). In the DEM simulation, the increase of water content due to the addition of liquid agent was simulated and this result was compared with the experimental one. It was confirmed through the comparison that the model proposed here was almost reasonable.

Keywords: mixing simulation, soil-recycling machine, contaminated soils, remediation

1. はじめに

2003 年に汚染土壌対策法が施行されたのに伴い、ここ数年、汚染土壌修復工事が急増しているが、原位置で汚染土壌を修復する場合、一般に汚染土壌をパワーショベルなどで掘削し、図-1 に示すような自走式土質改良機を用いて汚染土壌と薬剤を攪拌・混合することにより修復工事が行われることが多い。薬剤は汚染の種類によって変わり、土壌が重金属で汚染されている場合は、薬剤として一般に塩化第二鉄などが使用されている。

重金属による汚染土壌に対する上記の修復技術は、不溶化処理と呼ばれている。不溶化処理とは、セメント系固化材などで汚染土壌を安定化させたり、薬剤を添加して重金属などの有害物質の溶出を抑制したりする方法であり、現在多くの現場で使用されている。セメント系固化材などで汚染土壌を安定化させる方法は、通常地盤改良とほぼ同じであるが、液体の薬剤で重金属などの有害物質の溶出を抑制する方法は、固体-液体間の混合になり、通常地盤改良と混合状況が異なっている。

ところで、この処理技術には、汚染物質の種類・形態

による適切な薬剤の選定、汚染土壌と薬剤の確実な混合のための混合プラントや施工方法の選定、施工管理など種々の問題があり、今のところ、これらの問題に対する画一的なマニュアルは存在しない。従って、各々の企業がこれまで独自に蓄積してきたノウハウによって対処しているのが現状である。さらに薬剤使用にはもう一つの課題がある。それは、これまでの処理現場では、確実な汚染土壌処理を行うために、一般に必要以上の量の薬剤を使用する人が多いということである。大量の薬剤を使用すると、施工コストは当然高くなり、かつ土砂が軟泥化するため処理土の再利用にも支障をきたしている。

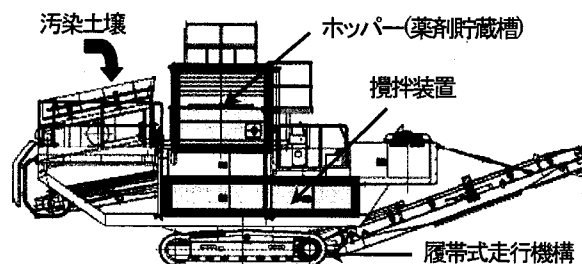


図-1 自走式土質改良機の概略

処理土の再利用では、土壤環境基準をクリアしていればよいので、最近では比較的少量の薬剤を土砂に練り込む工事も増えてきているが、必要最小限の薬剤量などは十分に明らかにはなっていない。

これらの問題を解決するためには、掘削された汚染土壌と薬剤の混合挙動を把握し、混合機の最適設計を図り、最適操業条件を把握する必要があるが、機械要素や土質条件など掘削土砂と薬剤の混合性能に寄与すると考えられるパラメータは非常に多く、それらの影響を全て実験により評価・検討するのはあまりにも非経済的かつ非効率的である。掘削土砂とセメントあるいは生石灰等の添加剤の混合挙動を把握するためのシミュレータについてはいくつかの検討例が見られ、混合容器内における掘削土砂と添加剤の混合挙動の解析が行われており、混合機の最適設計に寄与している^{1)~3)}。しかし、このシミュレータは固体同士との混合に関するものであり、大量の固体中へ液相としての薬剤を少量混合する場合についてのシミュレーションはほとんど見受けられない。

そこで、本研究では掘削土砂と薬剤の固液混合過程をコンピュータ上で再現できるシミュレータを開発し、土砂と薬剤の混合過程について解析することにより、汚染土壌処理機械の最適設計および最適操業条件の把握に資することを目的とする。

2. DEM シミュレーションモデルの構築

本研究では、掘削土砂と薬剤の混合挙動を計算機によりシミュレートする方法として、粒状体の挙動の解析に多く使用されている個別要素法 (DEM : Distinct Element Method) を用いる⁴⁾。ただし土砂は付着性を示すことから、要素間に付着性を付加する必要がある。そこで土砂を離散要素の結合体として表現することにより、DEM を付着性要素の解析に適用する。このような手法は、破壊挙動の解析では既に用いられており^{5)~7)}、本研究でも十分に適用可能と考えられる。ここでは、土砂要素のモデル化と液体要素のモデル化に分けて記述する。

2.1 土砂要素のモデル化

DEM では、剛体と仮定した要素間に作用する力の計算に、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方向を接線方向として、それぞれに弾性を表すスプリング、粘性減衰を表すダッシュポットおよび接線方向にのみ摩擦を考慮するためのスライダを仮定し (図-2)、それぞれの要素ごとに独立な運動方程式を立て、差分近似法を用いて時間領域で前進的に運動方程式を解いて、個々の要素の運動を追跡していくのが DEM の原理である。様々な形の要素を用いた DEM の研究が行われているが、本研究では処理の容易な球形要素を用いて解析を行う。また破壊基準を設定し、それを越える力が働くま

で要素間に結合力を持たせて結合状態とすることで、粘性土のような付着性要素の挙動を取り扱うことにする。

DEM 計算の基本原理は多くの文献に記載されているので、その詳細はそれらの文献⁴⁾にゆずり、ここでは本研究で対象としている土塊のような媒質の集合体に適用するための条件について述べる。

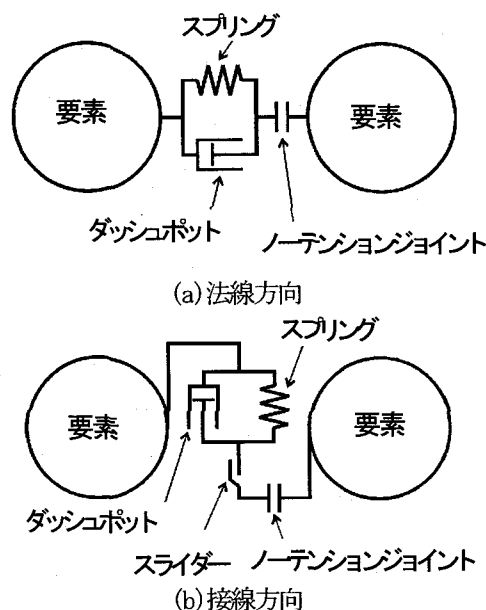


図-2 要素間相互作用力の力学モデル

2.2 結合要素解析への応用

本研究では最初に要素を配列した時点で全ての要素間の位置関係を求め、隣接している要素同士については要素間力が分離基準に達するまでは結合状態にあると定義する。要素間が結合状態にある場合には、法線方向に圧縮および引張りのいずれの力が働いても要素間力を作用させる。また要素間に滑りは発生しないものとする。

要素間力が分離基準に達し結合が切れた場合、あるいは結合状態にない要素と接触した場合には、法線方向に圧縮力が働くときのみ要素間力を作用させ、引張り力が働くときには要素間力は作用させない。また、接線方向に動摩擦係数以上の力が働いたときには滑りを発生させる。すなわち通常の DEM と同様の処理を行う。

要素間の結合が切れる条件としては「引張り力が原因の場合」、「せん断変形が原因の場合」の2通りを考え、それぞれに対して破壊基準を設定し、それらを越える力が作用するまではいずれの力にも抵抗するように定めることで、要素間を結合状態とすることが可能となる。

(1) 引張り力による法線方向の破壊基準

要素間引張り力の最大値を $S_{\max}$ として、法線方向の力が $S_{\max}$ 以上の時に結合が切れるとし、法線方向に加え接線方向にも力が作用しなくなるものとする。離散体 (個々

の要素) に対しては引張りを認めていないが、結合体(要素の塊)に対しては引張りを認めており、法線方向のスプリング力の大きさが $S_{\max}$ 未満である場合にはいずれの力にも抵抗することになる。そしてこの基準を満たさなかった場合には、次の(2)に示す破壊基準に従って、要素間の結合の破壊を判定する。

(2) せん断変形による接線方向の破壊基準

一般にせん断強度はせん断面に作用する直応力の影響を受ける。本研究で対象とするモデルのせん断強度は接線方向のスプリングの破壊基準に相当すると考えられる。それゆえ、実際の現象と同じように接線方向の破壊基準としてモール・クーロンの破壊基準を用いた。モール・クーロンの破壊基準式は次式で表される。

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

ここで τ はせん断強度、 σ は滑り面上の直応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。さらに要素間に圧縮力が作用する場合と引張り力が作用する場合に分けて上式の適用方法について述べる。

要素間に圧縮力が作用する場合、まず法線方向および接線方向の要素間に作用する力を求める。要素同士の接触面積を A として、接線方向のせん断限界値 $T_{\max}$ を次のように定める。

$$T_{\max} = A \cdot \tau = A \cdot c + A \cdot \sigma \cdot \tan \phi = C + [f_n] \cdot \mu \quad (2)$$

ただし、

$$C = A \cdot c, \quad [f_n] = A \cdot \sigma, \quad \mu = \tan \phi \quad (3)$$

であり、 C は DEM 解析における粘着力、 μ は前出の要素間摩擦係数である。しかし本研究では要素が球形であり、図-3(a)に示すように球同士の接触は点接触であるため、 A の値は 0 となってしまう。そこで同図(b)に示すように要素間に擬似的に接触面積を仮定する。複数の要素が結合状態にあり、ある大きさの要素塊を形成している場合、本研究では要素を面心立方格子配列で配列しており、一つの要素は最大 12 個の要素と接触していることから、接触面積を半径 r の球形要素の表面積の 12 分の 1、すなわち A を次式のように仮定する。

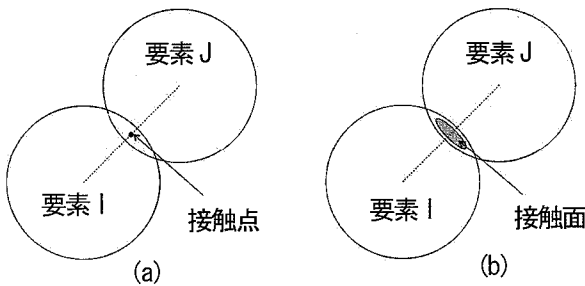


図-3 球形要素の接触および断面積の仮定

$$A = \frac{4\pi r_i^2}{12} \quad (4)$$

このようにして設定した $T_{\max}$ と求めた接線方向の力の総和 $|S|$ とを比較し、 $|S|$ が $T_{\max}$ よりも大きくなったとき、接線方向のスプリングは破壊し、要素間の結合が切れたものとする。またそのとき、 $|S|$ を動摩擦力で置き換える。

要素間に引張り力が作用する場合、圧縮力が作用する場合と同様に、法線方向および接線方向の要素間に作用する力を求める。引張り力が作用する場合は(2)式右辺第2項を 0 と仮定し、次のように破壊基準を設定する。

$$T'_{\max} = C \quad (5)$$

すなわち、 $|S|$ が $T'_{\max}$ よりも大きくなったときに要素間の結合が切れるとする。またこの条件では、もはやスプリングの力を伝達する能力は失われているので、法線方向および接線方向の両方向において力が作用しなくなるものとする。

2.3 液体要素のモデル化

連続体としての液体中を固体要素が運動する場合、流体の流れ場を記述し、流体と固体の相互作用力を求めればよい。しかし、本研究で対象としているような大量の土砂に液体としての薬剤を練り込むような場合、液体要素を DEM 計算に組み込むための工夫が必要となる。本研究では、数値流体力学の分野で用いられている粒子法の考えを利用する。粒子法では、流体を粒子の集まりで表現するので⁸⁾、ここでは液体を複数の粒子(流体塊)の集合体として取り扱い、その挙動を解析する手法を DEM に組み込むことを考える。ここでは、ある一定距離範囲内に液体要素がある場合、液体要素間に引張力を発生させることを考え、従来の力学モデル(図-2)のうち液体要素間における法線方向のモデルに、図-4に示すように液体要素間の引張力を考慮するための一本のスプリングを追加した新たなモデルを想定して、液体要素間相互作用力を計算することにする。本項ではこれ以後、単にスプリングと記した場合、追加したスプリングを指すものとする。

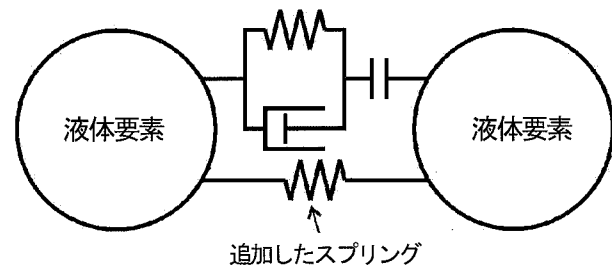


図-4 液体要素間における相互作用力モデル

まず、スプリングによる引張り力が作用する要素中心間距離について考える。引張り力が作用する要素中心間距離の最大値を r_e とすると、 r_e は次のように表すことができる。

$$r_e = (1.0 + C_{\text{limit}}) \cdot r_0 \quad \text{ただし, } r_0 = r_i + r_j \quad (6)$$

ここで、 C_{limit} は相互作用を及ぼす要素中心間距離 R_{ij} の限界を決める係数である。このとき、スプリング力が作用する条件は次式で与えられる。

$$R_{ij} \leq r_e \quad (7)$$

これは要素間相互作用の及ぶ範囲を半径 r_e 以内の近傍に制限するものであり、相互作用を行う要素数が限られ、計算時間を短くすることができる。

ところで、(7)式を満たす間、常に引張り力を働かせていると、液体要素が一点に集中する恐れがある。また、要素が接触している間は引張り力よりもむしろ反発力が生じると考えられる。そこで、本研究では(8)式を仮定する。

$$\begin{cases} 0 < R_{ij} \leq r_0 & \cdots \text{反発力} \\ r_0 < R_{ij} \leq r_e & \cdots \text{引張り力} \\ r_e < R_{ij} & \cdots \text{要素間に力は作用しない} \end{cases} \quad (8)$$

上式において、相互作用力の種類は r_0 を境に変化している。そこで、スプリングによる要素間の相互作用力 $f(R_{ij})$ は、反発力が正であることを考慮し、 $R_{ij} = r_0$ のとき $f(R_{ij}) = 0$ となるよう設定すると、 $f(R_{ij})$ は次式ようになる。ただし、 k_n は法線方向のスプリング係数である。

$$f(R_{ij}) = \begin{cases} k_n \cdot (r_0 - R_{ij}) & 0 < R_{ij} \leq r_0 \\ k_n \cdot (R_{ij} - r_e) & r_0 < R_{ij} \leq r_e \\ 0 & r_e < R_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

上式では要素中心間距離に比例した力が作用することになるが、現実には要素中心間距離に反比例した力が作用すると考えられる。つまり、引張り力が作用する場合は要素中心間距離が近いほどより大きな力が生じ、反発力が作用する場合は要素中心間距離が遠いほどより小さな力が生じる。

そこで、要素間相互作用を重み関数 (weight function) $w(R_{ij})$ に基づいて行うことにする。重み関数は、粒子法の1つである MPS 法⁸⁾ (moving particle semi-implicit method) を参考にして、次式で与えられるものとする。

$$w(R_{ij}) = \begin{cases} \frac{r_0}{R_{ij}} - 1 & 0 < R_{ij} \leq r_0 \\ \frac{r_e}{R_{ij}} - 1 & r_0 < R_{ij} \leq r_e \\ 0 & r_e < R_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

上式では、 R_{ij} が 0 に近づくにつれて重み関数は無限に大きくなっていく。これは、要素の非圧縮条件をうまく

働かせ、要素が一点に集中しないようにするのに効果的である。

これを踏まえて、液体要素間に働く相互作用力 f_{add} を次式で与える。

$$f_{\text{add}} = f(R_{ij}) \times w(R_{ij}) \quad (11)$$

以上の方法で求めた液体要素間の相互作用力を法線方向の力に組み込み、計算を行う。

2.4 固液混合のモデル化

従来の固液混合に関するシミュレーションは、主に連続体としての液体中における離散固体粒子の挙動を解析するものがほとんどであり、本研究で対象としているような、大量の固体中へ少量の液体を混合し練り込んでいく現象について検討した例はほとんど見受けられない。そこで、ここでは、固液混合のモデル化について考察を行う。なお、本研究では固液混合に関して「反応」という表現を用いているが、化学的な部分は一切考慮しておらず、固体-液体間の接触といった物理現象のみを扱っている。

本研究では、固液混合の方法については次のように考える。固液の反応は固体要素と液体要素が接触したときに起こるものとし、図-5 に示すように固体要素を液膜で包み込む様子をイメージする。そこで、固体要素と液体要素が接触したとき、固体要素の半径を微小量増加させることで液体と反応したものとみなし、同時に、液体要素は固体要素との反応により消えてしまうため、半径を 0 とすることで固液混合を表現する。この考え方の妥当性については、実験結果とシミュレーション結果の比較検討によりある程度評価したいと考えているが、後述するように実験は限られた範囲のものであり、従って、妥当性の評価は今後の課題とし、本研究では、この考えにより固液混合を表現することにする。また固体と液体が反応すると、本来は固体の固さなどの物性が変化すると考えられるが、ここでは化学的な固液反応は考慮せず、物性の変化はないものと仮定する。

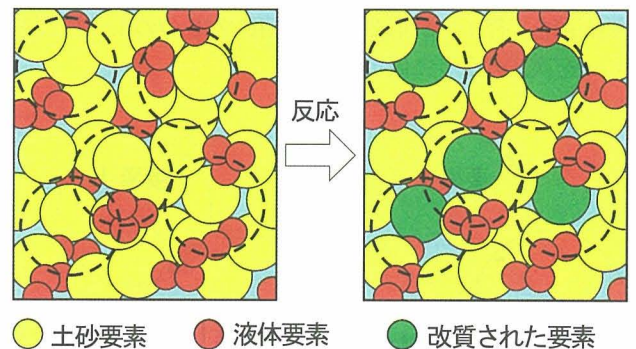


図-5 固液混合のイメージ

反応前の固体および液体要素の半径をそれぞれ r_s および r_l とすると、反応時における固体要素の半径増加量 Δr は、反応前の両要素の体積の和と反応後の固体要素の体積が等しくなるものと仮定すると次式により与えられる。

$$\Delta r = \sqrt[3]{r_s^3 + r_l^3} - r_s \quad (12)$$

本研究では、簡単のため、固体要素と液体要素が「1対1」で反応し、かつ1度反応した固体要素は他の固体要素と接触しても反応を示さず「1段階」のみで終了する反応を仮定する。

3. 固液混合に関するシミュレーション結果

本研究では、後述する実験結果とシミュレーション結果を比較検討するため、シミュレーションでは、図-6に示す混合装置（容器およびパドル・シャフト）を用いて固液混合シミュレーションを行った。

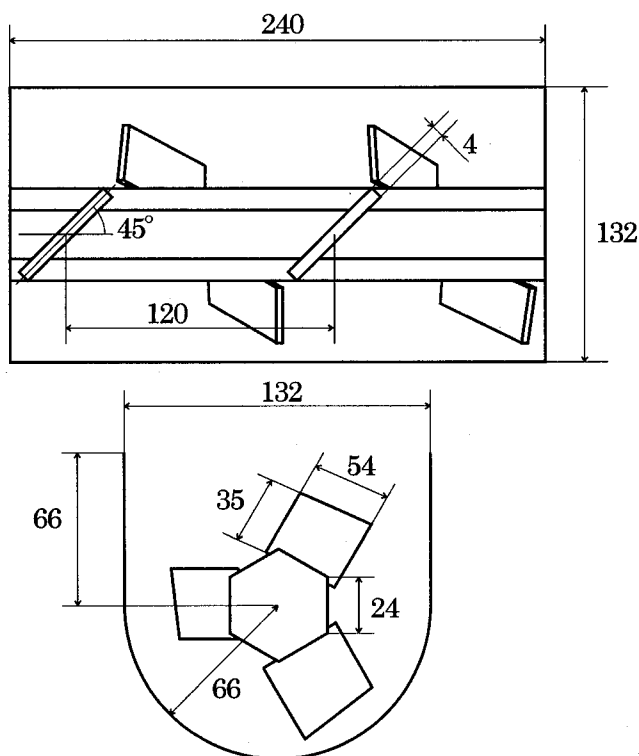


図-6 混合装置の概略

本シミュレーションで想定した容器はシャフト2ピッチ分(1ピッチ 120mm)であり、また、要素を排出するために容器下流の底面に排出口を設けている。本研究で定義する下流とは、パドルにより要素が流される方向である。シミュレーションでは、著者らの先の研究報告¹⁾にならう、排出口から排出された要素は一定のタイミングで容器上流から再投入されるものとし、容器内の要素数をある程度一定に保ちつつ、シミュレーションで扱う要素数を最小限に抑えた。

3.1 シミュレーション諸元

シミュレーションに関する主な諸元を表-1 および表-2に示す。なお、シミュレーションにはパーソナルコンピュータ (CPU: XEON3.06GHz, MEMORY: 4GB) を使用した。下記の条件で計算に要した時間は、1秒あたりおよそ24時間である。

表-1 シミュレーション諸元 (混合容器)

1秒間の計算回数	50000回
シミュレーション時間	20sec
容器半径	6.6cm
パドル枚数	3枚/ピッチ
パドル迎角	45deg
パドル傾斜角	0deg
シャフト半径	2.4cm
シャフトピッチ	12cm
パドル・シャフト回転数	30rpm

表-2 シミュレーション諸元 (固体・液体要素)

	固体要素	液体要素
要素径	8 mm	4 mm
要素数比	2	1
要素数	1000 個	500 個
要素密度	2510 kg/m ³	1000 kg/m ³
粘着力	39190 N/m ²	1 N/m ²
粘着力の倍率	50	
内部摩擦角	40.73 deg	0.01 deg
法線方向スプリング係数	118 N/m	
接線方向スプリング係数	29.7 N/m	
法線方向粘性係数	434.71g/sec	124.93g/sec
接線方向粘性係数	217.35g/sec	62.46g/sec
要素-容器間摩擦係数	0.53	
要素-パドル間摩擦係数	0.53	
相互作用距離限界係数	/	0.05

これらの表で示した装置寸法および物性値等は、基本的に先の研究¹⁾²⁾¹⁰⁾で得られた結果を基に与えている。法

線方向のスプリング係数であるが、本シミュレーションでは、要素-要素間、要素-液体間、液体-液体間にスプリングが設定されるため、それぞれに対してスプリング係数を与える必要がある。DEMシミュレーションでは、スプリング係数は試行錯誤により決定されることが多いが、3つの値を種々に変化させ、試行錯誤により決定するのは極めて困難であるので、ここでは簡便のため全て同一の値を仮定した。ただしこの仮定は必ずしも適切な仮定とは言えないことから、今後、各要素間のスプリング係数について詳細に検討していきたい。

次に固体と液体の「要素径」、「要素数比」および「要素数」であるが、最近の汚染土壌処理現場では掘削土砂体積のおよそ1/15程度の体積の薬剤を添加していることを考慮した。すなわち、これまでの研究にならい固体要素径を8mmとし、液体要素径を固体要素径の1/2の4mmとすると、液体要素の体積は固体要素の体積の1/8になる。さらに要素数比を2:1とすると、液体要素の体積は、固体要素の体積の1/16になる。そこで、本シミュレーションでは、表-2に示すような値を設定した。さらに、シミュレーションに要する時間を考慮し、「要素数」を表-2のように決定した。

次に、液体の「要素密度」、「粘着力」、「内部摩擦角」であるが、本研究では液体を水で仮定し、液体の「要素密度」には水の値を与えた。また、「粘着力」および「内部摩擦角」は試験等により求めることができないため、0に近い値という仮定の下、試行錯誤により決定した。

ところで、一般にDEMモデルでは、文献や試験結果によって得られた物性値をそのまま用いると、実際よりも小さい力で破壊が生じると言われている⁹⁾。従って、粘着力等の物性値は実際の値よりも大きく設定されることが多々ある。そこで本シミュレータでは、「内部摩擦角」は設定値をそのまま使用し、「粘着力」については設定値の定数倍の値を用いることとし、これを「粘着力の倍率」で与えている。この値は固体要素間に適度な結合力を持たせるために試行錯誤により決定した値である。

また、「相互作用距離限界係数」とは、前章で示した C_{limit} のことであり、この値も試行錯誤により決定した。

3.2 シミュレーション内容

シミュレーションを開始する前に、要素の初期位置設定を行う必要がある。設定方法は次の通りである。まず、パドル・シャフトの回転が無い状態で装置上空から固体要素を自由落下させ、容器内に固体要素を配置する。さらに、容器上流の上空には液体要素を配置する。この要素配置を初期状態とし、この状態からシミュレーションを開始する。

シミュレーションの開始と同時に、パドル・シャフトは30rpmで回転し、液体要素は自由落下を始める。シミュレーションを開始してから3秒後に、それまでに排出

された固体要素を容器上流から投入する。このとき、すでに液体と反応している固体要素は未反応の固体要素へ戻して投入する。次に、固体要素の投入から1秒後に液体要素を投入する。この時に投入する液体要素数は、直前に投入した固体要素数の半分とする。これは、固体と液体における容器への投入要素数の比を常に一定にするためであり、表-2で示した要素数比を用いている。

以上の4秒間の過程を1サイクルとし、20秒経過するまでの計5サイクル分、同様のシミュレーションを行う。

3.3 固液混合度の評価方法

本研究で開発した固液混合シミュレータは、最終的に汚染土壌処理機械の最適設計に資することを目的としている。最適設計に際しては、薬剤を添加した位置からどれくらい下流でどの程度均一に混合されているか、さらには排出された土砂がどの程度改質されているかを知ることが極めて重要になる。また本研究で対象としている混合は大量の固体と少量の液体の混合であるため、シミュレータの検証を行う際の実験結果との比較には、「含水比の増加量」を用いることとし、この値を用いて混合度を定量的に評価した。シミュレーションにおける「含水比の増加量」は以下のようにして求めるものとする。なお、シミュレーションでは、固体要素そのものに水分は含まれていないため、解析対象となる要素群の含水比がそのまま、「含水比の増加量」に相当する。

まず、液体と反応している固体要素（以下、反応要素と記す）は固体要素と液体要素の2つから成っているものとする。混合容器を流れ方向に対して等間隔で6分割し、その区間内の要素群中における固体要素数 N_s を固体要素と反応要素の総数で表し、液体要素数 N_l を未反応の残存液体要素と反応要素の総数で表すことにする。また、固体要素および液体要素の質量をそれぞれ m_s および m_l とすると、解析対象である要素群の含水比、すなわち「含水比の増加量」 ω_{sim} は次式で求められる。

$$\omega_{sim} = \frac{m_l \times N_l}{m_s \times N_s} \times 100 \quad (13)$$

4. 固液混合に関する実験結果

本実験で用いた装置の概略は、前述したように図-6に示す通りである。実験装置の外観を図-7に示す。本実験装置にはトルクメータが組み込まれているが、本実験ではトルクの計測は行っていない。

実験結果とシミュレーション結果との比較検討を行うことにより、開発した固液混合シミュレータの妥当性を検証するため、本実験では混合性能に寄与すると考えられる装置の機械的特性（パドルの配置および設置角度、シャフト回転数等）や実験条件はシミュレーションの条

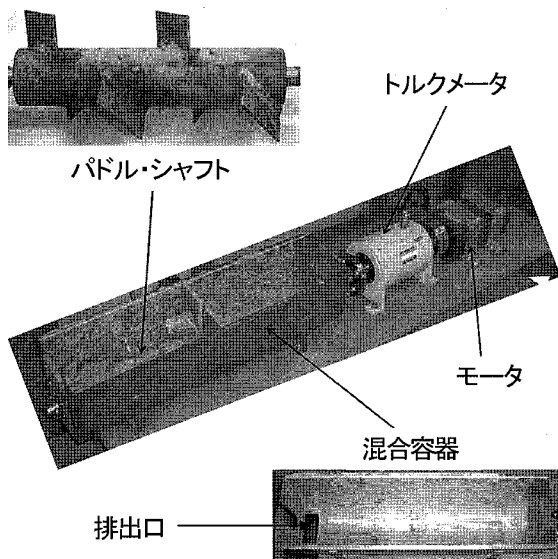


図-7 実験装置の外観

件と同じに設定し、固液混合実験を実施した。なお、ここでは、「含水比の増加量」を計測し、シミュレーション結果と比較検討することにする。

液体添加量については、固体と液体における容器への投入量の比を一定にするため、シミュレーションでは「要素数比」を用いていることから、実験ではこの要素数比を体積換算して、土砂添加量の1/15の体積の液体を添加することにした。

実験試料には、掘削土砂の代わりに蔵王産黒土(メジアン径:150 μ m)を使用し、薬剤の代わりに水道水を使用した。黒土は脱水処理や含水比調整を施さず、自然状態(自然含水比:15%)でを使用した。

ところで、実験は一旦装置を移動させると途中で中断することなく一定時間連続で行わなければならない。従って、実験の最中に、排出された土砂をシミュレーションのように液体と混合される前の状態に戻したり、排出量と同量の土砂を測って容器上流から添加したりすることはできないばかりでなく、添加された土砂の1/15の体積の水を即座に測って添加することも不可能である。そこで予備実験として、実験装置内に土砂を充填した状態で4秒間装置を移動させた土砂排出実験を行い、排出される土砂量を予め計測し、実験に用いる土砂および液体の添加量を決定した。ここで、実験条件がシミュレーションと同じになるように、土砂充填量はシャフト下端に接する程度とし、パドル・シャフト回転数は30rpmとした。この実験を数回繰り返し、平均して得られた土砂排出量を本実験での土砂添加量と仮定し、さらに土砂添加量の1/15の体積の水を液体添加量として、それぞれ実験に先立ち用意しておくことにした。また、本実験で求める値は「含水比の増加量」であるため、実験に使用する土砂の初期含水比も測定しておく必要がある。そこで、

実験に使用する土砂の初期含水比も計測した。

本実験の手順は、以下に示す通りである。

①土砂の充填およびパドル・シャフトの初期位置設定

パドル・シャフトの初期位置をシミュレーションにおける初期位置と同じ状態に設定し、この状態で実験装置内へ土砂を充填する。土砂充填量は、予備実験と同様にシミュレーションにおける初期状態と同じにするため、シャフト下端に接する程度とした。また、この初期設定に使用した土砂の1/15の体積を実験開始時の水分添加量として用意する。

②固液混合実験

装置を移動させ固液混合実験を開始する。移動条件や実験内容はシミュレーションと同じである。まず、実験開始と同時に①で用意した水を容器上流から添加する。次に、実験開始3秒後に、予備実験で予め計測し用意しておいた土砂を容器上流から添加する。さらにその1秒後に添加した土砂の1/15の体積の水を容器上流から添加する。この4秒間の操作を1サイクルとし、20秒間の計5サイクル繰り返す。ただし、5サイクル目の最後の水分添加は行わないものとする。なお、実験中に排出される土砂は4秒毎に別々のトレイに受ける。4秒間にサンプリングされる土砂量は、おおよそ450 cm^3 である。実験開始から20秒経過後に運転を停止し、装置内残留土砂をパドル位置ごとに取り出し、トレイに取り分ける。

③結果の整理

固液混合実験でサンプリングした土砂は、質量を計測し、その後炉で乾燥させる。十分に乾燥させた後もう一度土砂の質量を計測し、乾燥前後の質量差から水分量を計算し、実験後の含水比を求め、その値を ω_{exp} とする。本実験では1回の実験で使用した土砂(初期充填分と添加分)の初期含水比は全て同じであると仮定し、実験後の含水比 ω_{exp} から予備実験で求めた初期含水比 ω_0 を引くことで、実験における「含水比の増加量」 $\Delta\omega$ を求めることとする。

$$\Delta\omega = \omega_{\text{exp}} - \omega_0 \quad (15)$$

5. 実験結果とシミュレーション結果の比較検討

図-8は、シミュレーションにより得られた土砂粒子挙動の画像の一部を時系列で並べて表示したものである。初めにこれらの画像を動画にすることで固液混合過程を視覚的に表現し、シミュレータの妥当性を定性的に検討した。その結果、固体要素と液体要素の反応状況や、反応要素がパドルによって掻き混ぜられる様子、またパドルにより下流へ運ばれ排出される様子など、固液混合挙動を十分に表現していると視覚的に判断できる映像が得られた。前述したように、本シミュレータでは、解析結

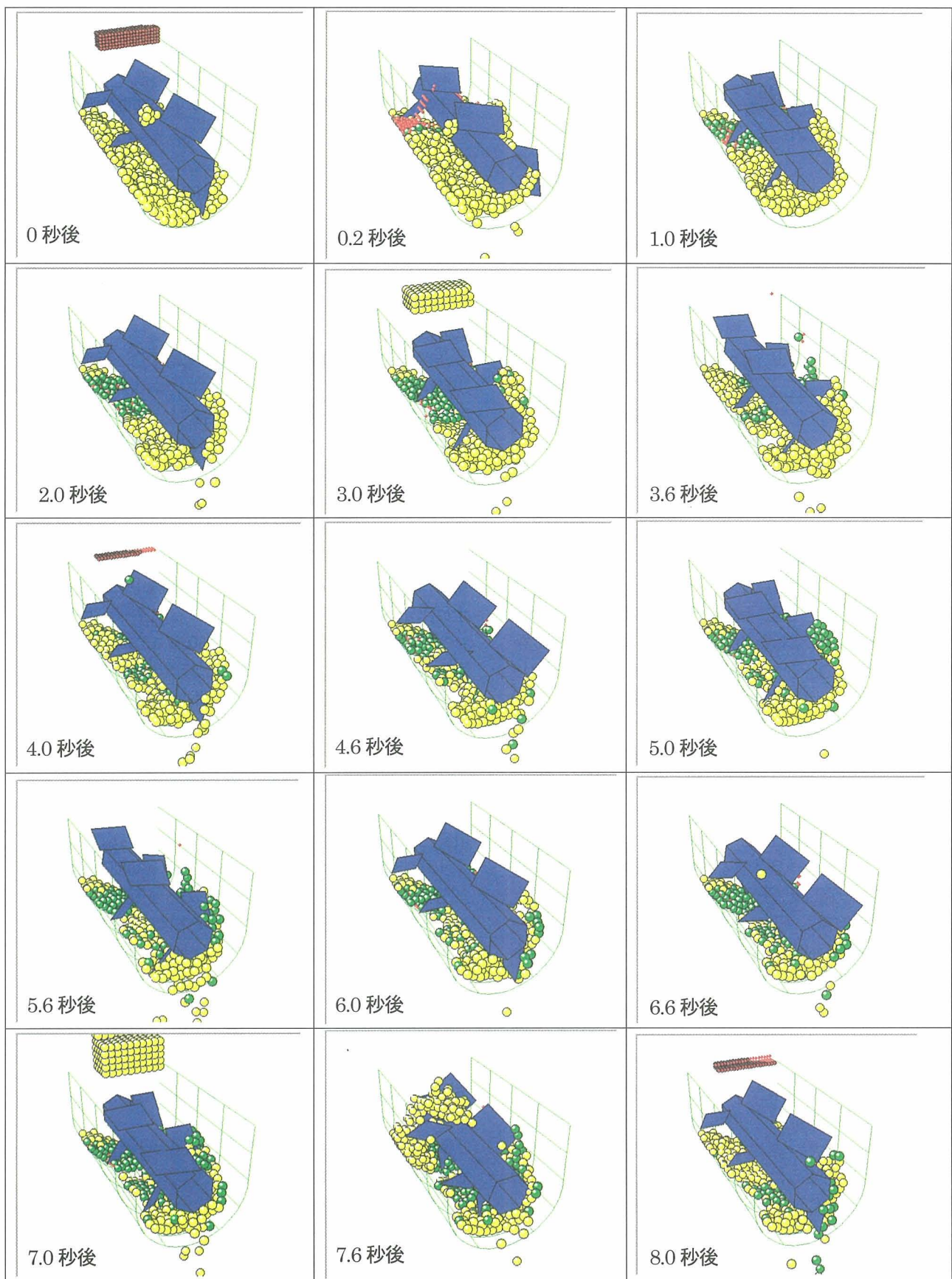


図-8 シミュレーション結果の時系列表示(●汚染土壌要素, ●薬剤要素, ●改質された土壌要素)

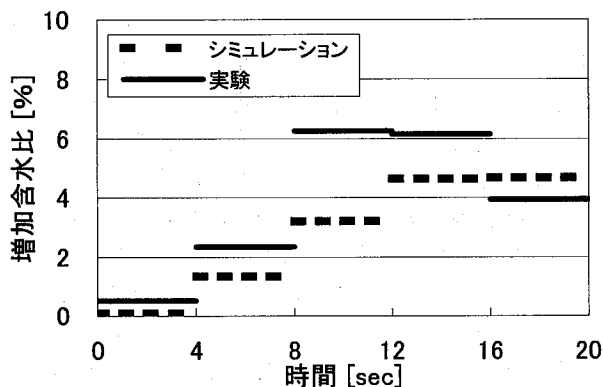


図-9 排出土砂における含水比増加量の推移

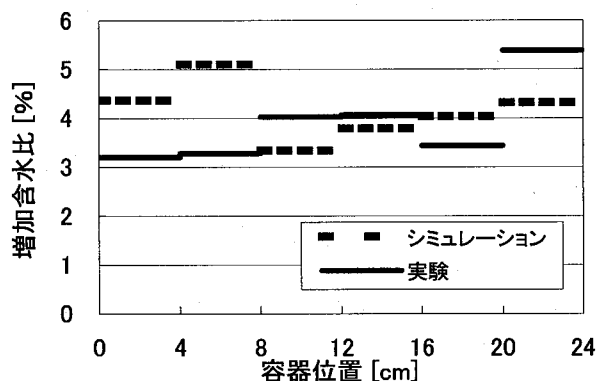


図-10 容器内の残留土砂における含水比増加量

果を実現象に近づけるため固体要素間に結合力を持たせて土塊の表現も行っているが、この土塊はパドルの攪拌によって混合時に少しずつ切断されていき、容器下流の排出口から要素が排出される時点では土塊は十分に解砕され、ほぼ離散要素の状態になっていることが確認できた。以上のことから、本研究で開発したシミュレータは、容器内の固液混合挙動をある程度再現できていると判断し、次に「含水比の増加量」について定量評価を試みた。

「含水比の増加量」に対するシミュレーション結果と実験結果の比較を図-9および図-10に示す。なお図-10の容器位置は、12cmを容器中央として、0cmの方向を容器上流、24cmの方向を容器下流としている。図-9において、実験値はシミュレーション結果に比べて全体的にやや大きな値を示しており、また16～20秒後では増加含水比の実験値は低下している。これは、実際の混合による土砂の流下速度がシミュレーションにおける要素の流下速度よりも多少大きいことを示している。従って、今後はスプリング係数の再検討などを行う必要があるが、全体的な傾向は類似しており、両者とも時間が経過するにつれて一定値に漸近すると推察される。また図-10より、残留土砂における「含水比の増加量」は容器全体でほぼ一定の値になっていることが分かる。

実験値とシミュレーション結果の誤差については、図-9では8～12秒の区間で、図-10では4～8cmの区間で多少誤差が大きくなってはいるが、その他の区間ではおよそ1%程度に収まっており、シミュレータは実際の現象をほぼ再現できていると考えられる。

以上の結果をまとめると、混合開始後20秒程度経過すると、その後の排出土砂および残留土砂はほぼ一様に液体と反応し、均質な混合が可能であると判断される。これは、汚染土壌処理における処理機械の最適設計や操業条件の決定の一助になると考えられる。

本研究ではシミュレーションに要する時間の関係上、混合時間を5サイクルとしたが、もう少しサイクル数を増加した状態で検討を行えば、より詳細なデータが得られると考えられる。さらに、本研究で行ったシミュレーションおよび実験は、実際の処理機械の充填率に比べ多少低い状態であったと言える。従って、今後はさらに充填率を増加した状態でシミュレーションと実験を行い、両者の比較検討を行う必要があると考えられる。

ところで、実際に汚染土壌処理機械の最適設計や最適操業を考える場合、「どれだけの土砂がどれほどの薬剤と反応し、改質されているか」を知る必要がある。しかし、本研究で行った模擬実験ではこれを知ることは難しく、また実際に1つ1つ確認するのでは極めて長時間を要し、あまり効率的とはいえない。そこで本研究では、開発したシミュレータが実際の現象をほぼ再現でき、かつ解析結果も大きな誤差が出ていないことから、上記の点のについてシミュレーションにより検討することにした。

本研究では、固体要素と液体要素が反応した割合を「反応率」と定義し、解析対象の要素群の固体要素数に対する反応要素数の割合で求めるものとした。反応要素数を N_a とし、また固体要素数 N_s を未反応の固体要素と反応要素の総数で表すと、「反応率」 R は次式で与えられる。

$$R = \frac{N_a}{N_s} \times 100 \quad (16)$$

上式を用いて、図-9および図-10と同じ形式で表した「反応率」を図-11および図-12に示す。これらの図より、20秒間の混合後で排出土砂と残留土砂はともに5割から6割程度反応していることが分かる。実際の汚染土壌処理現場でも全体の投入土砂の6割から7割程度処理している現場が多く、またそれでも十分に環境基準値をクリアする程度の処理は行われていることを考えると、本シミュレータは改質量から見ても十分に現象を表現できていると言える。

また、添加する液体体積は、要素体積に比べて小さいため、排出時には、液体要素は全て反応し、未反応の残存液体要素の数はほぼ0であると考えられる。この場合、(13)式中の N_l は反応要素の数 N_a に等しくなるため、「反応率」と「含水比の増加量」の関係について考えると、

(13)式および(16)式より次式が得られる。

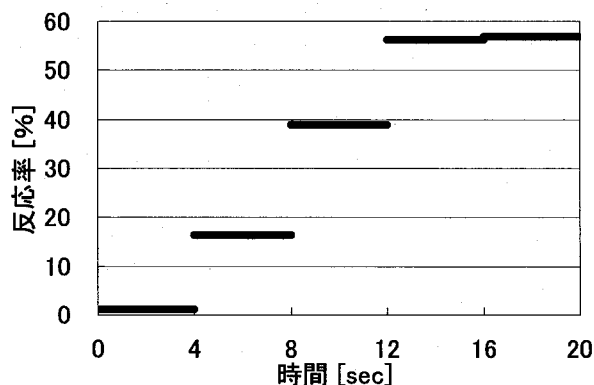


図-11 排出土砂における反応率の推移

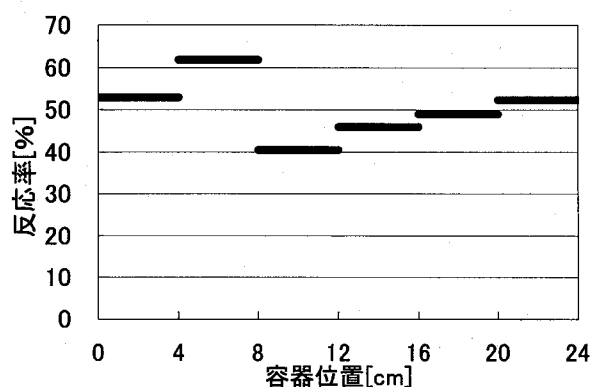


図-12 容器内の残留土砂における反応率

$$\omega_{sim} = \frac{m_l}{m_s} \times R \quad (17)$$

(17)式を用いると、処理後の含水比を計測することでおおよその反応率を判断することが可能であり、反応率を確認するための面倒な試験を省き作業の効率化を図ることができると考えられる。本シミュレーションでは土砂と薬剤の化学的な反応は考慮しておらず、また反応要素が液体要素と接触しても反応は生じないという1段階反応のみを扱っているため、上述したような土砂の薬剤の物理的な関係まで言及することは必ずしも適切ではないが、本シミュレーション結果は、汚染土壌修復工事の効率化の一助となると考えられる。

6. むすび

本研究では、掘削土砂と薬剤の固液混合過程をコンピュータ上で再現できるシミュレータを開発することを目的とし、固液混合シミュレータに必要なモデルを構築するとともに、固液混合の模擬実験を行い、シミュレーション結果と実験結果を比較検討することにより、本研究で開発したシミュレータの妥当性を検証した。本研究では、固液混合状態の定量評価として混合後の含水比の増

加量に着目し、シミュレーション結果と実験結果を比較した結果、両者はほぼ一致し、シミュレータはほぼ妥当であると考察された。本研究で開発したシミュレータを用いると、おおよその反応率を推定することが可能になり、さらに処理後の含水比を測定することにより改質度合を判断することが可能となる。逆に処理目標の決定により薬剤添加量を定めることが可能になると考えられる。かつ経済的な処理を行うことが可能になると考えられる。

しかし、本シミュレータにはいくつかの仮定が含まれており、改良の余地も残されている。また、本研究で行ったシミュレーションおよび実験は、計算時間の関係上、要素数を最小限に抑えたため、実際の処理機械の充填率に比べて低い充填状態であったと言える。従って、今後は、充填率を増加した状態でシミュレーションと実験を行い、両者の比較検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 高橋 弘, 渡嘉敷 憲一郎, 山中 勇人, 関野 聡, 橋本 久儀: 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, J. of MMIJ, Vol. 116, No. 6, pp. 502-508, 2000.
- 2) 高橋弘, 山中勇人, 関野聡, 橋本久儀: 掘削土砂リサイクル処理機械における土砂と添加剤の混合に関する研究, J. of MMIJ, Vol. 116, pp. 839-846, 2000.
- 3) H.Takahashi, H.Yamanaka, S.Sekino and H.Hashimoto: Study on the Mixing Behavior of Excavated Soils and Additives in an Excavated Soil-Recycling Machine, Proc. of the 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media, pp.343-346, 2001.
- 4) P.A.Cundall and O.D.L.Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 5) 高橋弘, 泉亘, 金子勝比古: 油圧ブレーカによる大岩破碎の数値シミュレーション, 応用力学論文集 Vol. 4, pp. 307-316, 2001.
- 6) 佐々木加津也, 清水賀之: 個別要素法によるディスクカッタ形状に関する検討, 土木学会第53回年次学術講演会資料, pp. 258-259, 1998.
- 7) 上半文昭, 目黒公郎: 非線形構造解析によるRC構造物の即時地震損傷度判定法に関する一考察, 応用力学論文集 Vol. 3, pp. 621-628, 2000.
- 8) 越塚 誠一: 数値流体力学, pp. 151-194, 1997, 培風館.
- 9) 伯野元彦: 破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー, 森下出版, pp. 10-55, 1997.
- 10) 高橋 弘, 土肥 将也: 土質改良機の粘性土小割性能に関する研究, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 573-582, 2005.

(2007年4月12日受付)