自走式土質改良機における攪拌トルクと 処理量に及ぼす土質の影響*

高橋 弘¹ 安藤 真和²

Effect of Soil Properties on Agitation Torque and Discharge Rate in the Mobile Soil-Recycling Machine

by Hiroshi TAKAHASHI^a and Masakazu ANDO^b

- a. Department of Environmental Studies, Graduate School of Environmental Studies,
Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan
(Corresponding author E-mail: htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp)
b. Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Recently, a mobile soil-recycling machine has been receiving considerable attention in order to recycle the excavated soils produced from the construction sites. This machine is also used to remediate the contaminated soils. Some researches have been already carried out in order to investigate the effects of mechanical factors on the mixing performance of excavated soils and additives. However, there are few researches related to the effects of soil properties on the agitation torque and discharge rate. Because the mixing performance is affected by not only mechanical factors but also soil properties, the investigation of the effects of soil properties on the agitation torque and discharge rate is very important to perform the safe and effective recycling work of excavated soils. Therefore, in this study, the effects of soil properties on the agitation torque and discharge rate were experimentally investigated. The results obtained in this study were summarized as follows:

- (1) The discharge rate and agitation torque were strongly affected by the soil properties and water content, and they increased linearly with increasing the packing rate in the mixing chamber.
- (2) It was confirmed that the working performance which is defined by the discharge rate per unit agitation torque showed minimum at a certain water content. Once the water content exceeds this value, the working performance increased rapidly. Especially, this tendency was significant for clay soil. Therefore, if the water content is close to the one which leads the minimum working performance, the adjustment of water content by adding water is necessary.
- (3) It was confirmed that the agitation torque is largely affected by the cohesive force and internal friction angle for clay soils. In the case of sandy soil, the internal friction angle affects the agitation torque. However, the factors which affect the agitation torque are considered besides the internal friction angle. Therefore, further investigations are still needed.

KEY WORDS: Mobil Soil-Recycling Machine, Agitation Torque, Paddle, Soil Properties

1. はじめに

建設工事によって、日本ではおよそ1億9千万m³(平成17年度)の建設発生土が排出されている¹⁾。資源有効利用促進法により、建設発生土は建設副産物の中で再生資源と位置づけられており、積極的に再利用することが求められている²⁾。建設発生土の主な再利用先として埋め戻し材や盛土材などが挙げられるが、建設発生土は、いわゆる「解きほぐし」の状態にあり、埋め戻し

材や盛土材として使用するために必要な強度上の法的基準を満たしていないことが多い。そのため、上記の使用目的のためには、建設発生土に再処理を施して埋め戻し材や盛土材として使用できる土に改良することが必要になるが、再処理施設への運搬には多大なコストがかかり、その結果、違法な埋め戻しや運搬途中の不法投棄などの問題も発生しているのが現状である。工事によっては処理土を使用せずに、埋め戻しや盛土に山砂などの新材を使用する場合もあるが、新材を取得するためには山を切り崩さなければならない。従って、環境調和型・環境保全型の施工という観点から、建設発生土の有効活用は、今後も積極的に進めていくべきであると考えられる。

建設現場内で建設発生土を改良する際には、一般に自走式土質改良機が使用されることが多い³⁾。建設発生土を現場内で再処理・

* 2008年5月8日受付 11月17日受理
1. 普通会员 東北大学大学院 環境科学研究科 環境科学専攻 教授
2. 学生会員 東北大学大学院生 環境科学研究科
[著者連絡先] FAX: 022-795-7394
E-mail: htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp
キーワード: 自走式土質改良機, 攪拌トルク, パドル, 土質

Fig.1 Structure of the paddle mixer.

再利用できれば、再処理施設へ建設発生土を運搬する必要がなくなり、運搬コストの削減、不法投棄の抑制、環境保全などにつながる⁴⁾。

ところで、自走式土質改良機は原料土（建設発生土）と固化材とを混合して強度を発現させるなど再利用可能な改良土に改質するものである。さらに自走式土質改良機は、建設現場間を容易に移動でき、原位置で建設発生土を改良できることから運搬コストが不要になり、工期の短縮にもつながるという特徴を併せ持つ。土質改良機には、パドルにより土を攪拌する方式やハンマーにより土を砕いてカッターにより攪拌する方式などがあるが、本研究では広範囲な土質に対応できると言われている「パドル混合方式」について検討する。パドル混合式土質改良機では、土砂は油圧シヨベルなどにより掘削され、土砂フィーダに供給され、そこからパドルミキサに投入される。パドルミキサに投入された土砂はパドルによって固化材と攪拌混合され、ベルトコンベアによって排出される。パドルミキサによって単位時間に処理できる量は実験的に求められているものの、この処理量は土質や含水比の影響を大きく受けるため、パドルミキサの処理能力以上の土砂が投入された場合、土質によっては十分な攪拌・混合が行われないという状況が発生したり、機械に損傷を与える危険性もある。逆に性能を十分発揮できない条件で装置を稼働させていることもある。土質改良機の処理能力に及ぼす土質や含水比の影響を予め十分に把握しておき、投入する土質の種類・含水比によって最適な操業条件を決定することができれば、処理土の品質を確保しつつ、かつ作業の効率化が期待できる。

そこで、本研究では、パドル混合式土質改良機における最適操業条件の把握を目指し、処理量および攪拌トルクに及ぼす土質・含水比の影響について実験的に検討することを目的とする。

2. 実験に用いた試料の物性値

パドル混合式土質改良機におけるパドルミキサの概略を Fig. 1 に示す。シャフトにはパドルが一定の傾斜角およびピッチで設置されており、シャフトの回転とともにパドルも回転し、土砂をせん断しながら下流方向に押し出す構造になっている。

ところで、パドルにより土砂が攪拌される場合、攪拌される土砂とその周囲の土砂との間にせん断破壊が生じるため、攪拌トルクは土砂のせん断強度に依存すると考えられる。つまり、パドル混合式土質改良機で土砂を攪拌する際、土砂の物性値が重要なパラメータになる。そこで、本研究では攪拌トルクの測定に先立ち、一面せん断試験を実施し、土砂の物性値である粘着力 c および内部摩擦角 ϕ の測定を行った。実験試料としては蔵王産の黒土、砕

Fig.2 Relationship between cohesive force and water content.

Fig.3 Relationship between internal friction angle and water content.

石工場から排出される脱水ケーキおよび建設現場から採取した建設発生土の3種類を用い、それぞれの土砂に対して含水比を10, 20, 25, 30, 35%に調整して物性値の測定を行った。一面せん断試験の結果を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。

黒土の粘着力は、含水比にかかわらずおおそ $0.4 \sim 0.5$ [kN/m²] であった。内部摩擦角は含水比20%から30%にかけて微増したが、概ね $31 \sim 38$ 度の範囲内の値を示し、含水比の変化による大幅な変化は見受けられなかった。脱水ケーキの粘着力と内部摩擦角はほぼ同じ傾向を示し、含水比25%でピークを示し、その前後では低い値となった。脱水ケーキの場合、含水比を35%まで増加させると液性が強くなり、一面せん断試験の実施が困難であったため、含水比35%の値は計測されていない。建設発生土の粘着力は黒土とほぼ同じ値、同じ傾向を示した。また内部摩擦角も含水比にかかわらずほぼ一定値を示した。Fig. 2 より含水比25%における脱水ケーキの粘着力が際立って大きくなっていることが分かる。内部摩擦角も同じ25%でピークを示しているが、含水比を30%まで上げると、粘着力も内部摩擦角も大きく減少することが分かる。なお、Fig. 2 および Fig. 3 の結果より、黒土および建設発生土は砂質土であり、脱水ケーキは粘性土であると考えられる。

3. 排出量および攪拌トルクに関する実験結果および考察

3・1 実験装置

本実験に用いた装置の外観を Fig. 4 に示す。この図に示されるように、本装置は、ミキサ、トルクメータ、DC モータ、モータドライバ、AD コンバータおよびパソコンなどから構成されている。ミキサ部分の詳細を Fig. 5 に示す。ミキサ下部は半円柱形状

Fig.4 Outline of the experimental apparatus.

Fig.5 Details of the mixer.

Fig.6 Paddle and shaft used in this experiment.

で半円柱容器の軸中心とシャフトの軸中心が一致するようになっている。また、土砂排出のために下流方向の容器端の底に 80mm × 40mm の排出口を設けた。

本実験では、パドルとして自走式土質改良機に使用されている方式と同じ 2 条 4 枚方式を採用した。実験に用いた 2 条 4 枚方式のパドルを Fig. 6 に示す。2 条 4 枚方式はシャフトに対して対称に 2 枚のパドルを設置し、それに対して 90 度ずらしたところに次のパドルを設置してある。ピッチ間隔は 110mm であり、パドルの枚数は 20 枚である。なお、Fig. 5 に示すようにパドルのサイズは 60mm × 40mm とし、パドルと容器の隙間を 4mm とした。また、攪拌とともに土砂を下流方向に送り出すため、進行方向に対してパドルに傾斜角度をつけたが、この傾斜角度は 45 度とした。これは、パドル傾斜角が 45 度の時に排出量が最大になるという従来の結果⁵⁾を基に設定したものであるが、実機でも 45 度を採用しているものが多い。

トルクコンバータからの信号は、AD コンバータを介してパソコンに記録した。なお、サンプリング周波数は 10Hz とした。

3・2 実験方法

実験は以下の手順で実施した。まず土砂試料を炉乾燥させ、含水比を 0 に調整した。その後、乾燥させた土砂試料に加水し、所定の含水比になるように調整した。次に、乾燥土砂試料の密度・質量および加水した水の密度・質量から湿潤状態の土砂の密度を算出し、所定の充填率になるための湿潤土砂質量を計算し、その質量だけ土砂をミキサ内に充填した。

Fig.7 Schematic diagram of soil packing in the mixer.

Fig.8 Relationship between discharge rate and water content.

本実験では、DC モータを 1 分間回転させ、1 分間に排出される土砂量をサンプリングするとともに、トルクメータにより攪拌トルクを計測した。なお、同一の計測を 5 回繰り返して、その平均値をもって実験値とした。しかし、DC モータを回転させると、土砂は常に排出口から排出されるので、ミキサ内の土砂量が時間とともに減少してしまい、その結果、排出量や攪拌トルクが変化する。そこで、予備実験として、5 秒間に排出される土砂量を予め計測し、本実験ではこの土砂量を 5 秒毎に上流からミキサ内に供給することにより、ミキサ内の土砂の充填率を一定に保つようにした。予備実験では、DC モータを 5 秒間だけ回転させ、排出口から排出される土砂をサンプリングし、その質量を測定した。この動作を 5 回繰り返して、5 秒間の排出量の平均値を算出した。

なお、含水比は黒土、脱水ケーキ、建設発生土のそれぞれに対して 10%、20%、25%、30% および 35% の 5 通りに変化させた。また充填率は 10%、30% および 50% の 3 通りとし、DC モータの回転数は 12rpm、36rpm および 60rpm の 3 通りに変化させて、排出量および攪拌トルクを測定した。排出量は、排出口から排出される土砂を 1 分間サンプリングし、その質量を計測することにより算出した。また攪拌トルクは、トルクメータからの信号をパソコンに取り込むことにより計測した。

本実験では、ミキサ内の全容積に対する土砂の体積割合を充填率と定義した。充填状況の概略は Fig. 7 に示す通りであり、充填率 10% では、パドルが約半分埋まる程度、30% では、シャフトの下部まで埋まる程度、50% ではシャフトが全て埋まり、上部のパドルに土砂がかかる程度まで充填された状態に相当する。

3・3 実験結果

(1) 排出量 Fig. 8 に含水比と排出量の関係の一例を示す。黒土の場合、排出量は含水比の増加とともに減少する傾向を示した。砂質土である黒土は非塑性であり、含水比の増加に従って粒状体からゆるやかに液性体へと変化し、その過程で多少の塑性を持つ状態がある。黒土のそのような状態変化が排出量に影響を及ぼしたと考えられる。また、液性体になると流動性がよくなり排出量が増加すると考えられるが、本実験の含水比の範囲内では顕

Fig.9 Massive dehydrated cake: If the cohesive force becomes large, the dehydrated cake is easy to be massive, and it is hard to conduct the smooth discharge.

Fig.10 Relationship between discharge rate and packing rate.

著な液性は観察されなかったため、単調に減少する結果になったと考えられる。脱水ケーキの排出量は含水比 25% で極端に低い値をとり、その前後では大幅に増加している。含水比によって排出量が変化するのは、粘性土が含水比によってその状態を固体、半固体、塑性体、液性体と変化させることに関係があると考えられる。土が固体から半固体の場合は、含水比が増加するほど土粒子同士の結合力が大きくなり、パドルの回転力がより多くの土粒子に作用するようになるため、排出量が増加する。土が塑性体に近づくと、排出に用いられていたパドルの力が土砂の変形に使用されるようになり、また粘着力が増大し、パドルや容器の壁面に土砂が張り付くようになるため、排出量が減少する。土が液性体に近づくと、流体のように流れるようになり、その結果、排出量が増加する。また、含水比 25% の排出量が大きく減少しているのは、この状態では粘着力が極めて大きく、Fig. 9 に示すように脱水ケーキが攪拌過程で大きな土塊となって排出が円滑に行われなくなったためであると考察される。建設発生土の排出量と含水比の関係は脱水ケーキとはほぼ同じ傾向であったが、含水比 25% 前後の値の増減は脱水ケーキほど顕著ではなかった。砂質土である建設発生土は黒土と同様に非塑性であり、含水比によって黒土と同様に土の状態が変化した。含水比 35% では液性が強くなり、その結果、排出量が大きく増加したと考えられる。

Fig. 10 に充填率と排出量の関係の一例を示す。土砂の種類にかかわらず、充填率の増加にともない、排出量はほぼ線形的に増加した。充填率が高ければパドルが力を及ぼす土粒子の数が増加するので、排出量が増加する。ただし、従来の研究でパドルの回転領域を超える上部まで土砂を充填すると土砂と添加材が均一に混合しなくなるため、処理土の品質が低下する危険性が指摘されてい

Fig.11 Relationship between discharge rate and number of rotation.

Fig.12 Relationship between agitation torque and water content.

るため⁵⁾、充填率は高ければ高いほどよいという訳ではない。実施工にあたっては、排出量、添加材との混合割合および後述する攪拌トルクなどを考慮して決定する必要がある。排出量および処理土の品質の観点から言えば、充填率はパドルが回転する領域の上部限界付近まで土砂を充填する状態が最も効率的であると言える。なお、Fig. 8 における含水比 20% の 3 つの値は、Fig. 10 における充填率 30% の 3 つの値に相当する。

Fig. 11 にパドルの回転数と排出量の関係の一例を示す。土砂の種類にかかわらず、回転数の増加にともなって排出量は増加した。

(2) 攪拌トルク 自走式土質改良機の場合、搭載できる動力には制限があるため、できるだけ小さな攪拌トルクで大きな排出量を得ることが理想である。そこで、本研究では攪拌トルクと排出量の関係について実験的に検討した。

Fig. 12 に含水比と攪拌トルクとの関係の一例を示す。脱水ケーキと建設発生土の場合、攪拌トルクは含水比 20% 程度までは含水比の増加とともに徐々に増加した。含水比が 20% を越えると攪拌トルクは急激に増大し、25% 付近でピークを示し、その後、含水比の増加とともに急激に減少した。黒土の場合、含水比 20% 後の急激なトルクの増加は見られなかったが、傾向は他の土砂と同様であった。つまり、含水比が低く土砂が砂状を呈する場合、あるいは含水比が高く液状を呈する場合に攪拌トルクは小さくなり、適度に水が交じり合っている場合（例えば液性限界の少し手前の含水比の状態）では、攪拌トルクは大きくなると考えられる。

Fig. 13 に充填率と攪拌トルクとの関係の一例を示す。攪拌トルクは充填率の増加にしたがってほぼ線形的に増加した。攪拌トルクは主として土のせん断破壊によって生じると考えられ、充填率が高くなるとパドルによる土砂のせん断面積が増加することか

Fig.13 Relationship between agitation torque and packing rate.

ら、撹拌トルクが増加したと考えられる。

(3) 単位撹拌トルクあたりの排出量 本研究では、排出量を撹拌トルクで除した値、すなわち「単位撹拌トルクあたりの排出量」を算出し、含水比との関係について考察した。

Fig. 14 に単位撹拌トルクあたりの排出量と含水比との関係の一例を示す。脱水ケーキと建設発生土の場合、単位撹拌トルクあたりの排出量は含水比 25% で極小値を示した。これは、これらの土砂では、Fig. 12 に示すように含水比 25% において撹拌トルクが急激に大きくなったためである。また、含水比が高く液性が強い領域では単位撹拌トルクあたりの排出量が非常に高くなったが、Fig. 8 および Fig. 12 に示すように、これらの含水比領域では、排出量が大きく撹拌トルクが小さくなるためである。黒土の場合、単位撹拌トルクあたりの排出量は含水比の増加とともに単調に減少する傾向が見られた。黒土の撹拌トルクは含水比 35% で増加から僅かながら減少に転じたことから、黒土の場合、単位撹拌トルクあたりの排出量が最小となる含水比は 35% の付近にあると予想できる。そのため、本研究で行った実験の範囲では減少の過程しかとらえることができず、単調減少の傾向を示したと考えられる。

3・4 事前処理についての考察

Fig. 14 より、単位撹拌トルクあたりの排出量が最小となる含水比が存在することが確認された。特に粘性土の場合、特定の含水比で単位撹拌トルクあたりの排出量は極端に低下する。一方、含水比が低い場合、あるいは含水比が高くなり液性体に近づくと単位撹拌トルクあたりの排出量が非常に高くなることが分かった。すなわち、実施工において対象となる土砂が粘性土である場合、事前に液性限界を計測し、土質改良作業時には、できるだけ液性限界直前での含水比で作業することは避け、例えば事前処理により含水比調整を行い、単位撹拌トルクあたりの排出量が最小となる含水比条件を回避すべきであると考えられる。具体的には、土質改良機による本改良の前に、粘性土に含水比調整材をバックホウなどにより簡単に混合させ、その後、土質改良機により本改良を行うという 2 段階混合が考えられる。含水比調整材としては、もちろんセメント系固化材や生石灰などを使用しても構わないが、実際の施工では本改良にかかる経費しか認められないのが一般であるため、2 段階混合を行う場合、事前処理はできるだけコストのかからない処理法とすべきであり、そのため含水比調整材としては、下水道汚泥焼却灰、フライアッシュ、廃石膏ボード粉末などの廃棄物利用が望ましい。

いま、含水比 25% の脱水ケーキ 1m³ の質量が 2,000kg であったとすると、その中に含まれる土砂の質量と水の質量はそれぞれ

Fig.14 Relationship between performance and water content .

1,600kg および 400kg である。この脱水ケーキに含水比 0% の下水道汚泥焼却灰 400kg を混合させると、含水比は 20% に低下する。脱水ケーキと下水道汚泥焼却灰が均一に混合されれば、Fig. 2 より脱水ケーキの粘着力は大幅に減少すると推察される。しかし、事前処理で両者を均一に混合するには極めて長時間の混合作業を要すると考えられるため好ましい方法とは言えず、実際にはバックホウのバケットで粘性土塊を小割りしながら短時間で含水比調整材を混合する処理法が採用されることが考えられる。従って、事前処理を終えた時点では、含水比調整材により処理された土塊部分と未調整の土塊部分が混在した状態になっていると考えられる。しかし、たとえ未調整でもバケット混合により土塊は小さく小割りされており、またパドル式土質改良機は小割り性能に優れていると言われていることから、本改質でさらに土塊が小割りされることになる。従って、粘着力が Fig. 2 に示される含水比 20% の値まで減少していなくても、含水比調整材の添加は土粒子間粘着力の低減・処理量の向上に大きく貢献できると推察される。事実、粘性土に廃石膏ボード粉末を質量比で 10% 程度バックホウ混合させただけでも、その後の土質改良機による本改質における処理量は、2 段階混合を実施しない場合に比べて約 7～8% 程度向上したという報告もある⁶⁾。現在、事前混合をどの程度まで簡略化できるか、含水比調整材の添加量はどの程度まで削減できるかなどに関して施工現場で実機を用いた現地実験を予定しており、これについては別途報告したいと考えている。

4. む す び

本研究では、土質改良機における排出量および撹拌トルクと土質の関係について実験的に検討し、最適操業条件の把握に資することを目的とした。そのため小型の土質改良機モデルを用いて排出量および撹拌トルクの測定を行い、排出量および撹拌トルクに及ぼす土質の影響について検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 排出量および撹拌トルクは土質や含水比の影響を受けて大きく変化し、また充填率の増加とともに両者はほぼ線形的に増大した。
- 2) 単位撹拌トルクあたりの排出量が最小になる含水比が存在することが確かめられた。一方、この含水比を超えると、作業効率は増加し、特に粘性土の場合は、単位撹拌トルクあたりの排出量は急激に増加することから、実施工においては、この単位撹拌トルクあたりの排出量が最小になる含水比付近での作業はできるだけ避け、事前処理により含水比調整を行い、作業を実施すべきであることが示唆された。
- 3) 粘性土の場合、粘着力および内部摩擦角と含水比との関係は、

攪拌トルクと含水比との関係と傾向がよく似ていることから、粘着力および内部摩擦角は攪拌トルクに大きな影響を及ぼすことが推察された。砂質土の場合、内部摩擦角は攪拌トルクに多少影響を及ぼすが、他の因子も考えられ、今後のさらなる検討が必要である。

なお、本実験を遂行するにあたり、日立建機（株）より種々の支援を頂いた。付して謝意を表する。

References

- 1) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/01/011208_2_.html
- 2) http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/admin_info/law/02/
- 3) Japanese Society for Terramechanics: Saishin Kankyofukateigen no gijyutsu to shisutemu, (2002), pp.83-88 (Terramechanics Library-5).
- 4) H.Takahashi, K.Tokashiki, H.Yamanaka, S.Sekino and H.Hashimoto: Journal of MMII, **116** (2000), 502-508.
- 5) H.Takahashi, H.Yamanaka, S.Sekino and H.Hashimoto: Journal of MMII, **116** (2000), 839-846.
- 6) Marutoshi Kensetsu Co.Ltd.: Miyagiken 3R Shingijyutsu Kenkyu Kaihatsu Jigyohui Hojokin Shinseisho, pp.1-23, 2008.
- 7) E.McKyes and O.S.Ali: Journal of Terramechanics, **14** (1977), 43-58.
- 8) F.Kawakami: Doshitsurikigaku, (1992), pp.117-120 (Morikita Publishing Co. Ltd., Tokyo).