

土質改良機における土砂と添加剤の攪拌トルクに関する研究

Study on agitation torque of excavated soils and additives in the soil-recycling machine

高橋 弘*・酒井 康雄**・森 泰雄***

Hiroshi TAKAHASHI, Yasuo SAKAI and Yasuo MORI

*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)

** 東北大学大学院工学研究科博士課程前期課程 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

*** 日立建機株式会社 開発センター (〒300-0013 茨城県土浦市神立 650)

Recently, a soil-recycling machine has been receiving considerable attention in order to recycle the excavated soils produced from construction sites. This machine is also used to remediate the contaminated soils. In this study, the theoretical model to estimate the torque to mix the excavated soils and additives was proposed based on the visualization results of soil mixing. Furthermore, the mixing torque was measured under several conditions. It was confirmed through the comparison between calculated results and experimental ones that the model proposed here was almost reasonable.

Keywords: agitation torque, soil-recycling machine, excavated soils

1. はじめに

近年、建設現場等で発生する建設残土を原位置で再資源化し、埋戻し材として再利用する施工事例が増えてきている。このような施工に使用されているのが自走式土質改良機と呼ばれる一種の環境対応建機である¹⁾。自走式土質改良機は、一般に図-1 に示すように履帯式の走行機構を有しており、工事現場間などを自走できるようになっている。建設残土は、パワーショベルなどにより土質改良機に投入され、ホッパー内に貯蔵されている生石灰あるいはセメント系固材などの添加剤と攪拌・混合され、排出されるようになっている。排出された処理土を一定期間養生することにより、所定の強度を有する土砂が生成されることになる。

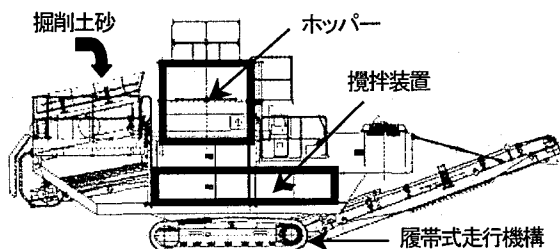


図-1 自走式土質改良機の概略

この自走式土質改良機は、建設残土の再資源化のみならず、近年では、汚染土壌の原位置修復工事にも活用されている²⁾。2003 年に汚染土壌対策法が施行されたのに伴い、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、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。薬剤は汚染の種類によって変わり、例えば揮発性有機化合物の場合は、建設残土の場合と同様に生石灰が使用されている³⁾。すなわち、生石灰を汚染土壌に対して質量比で 10% 程度混合すると、生石灰が土中の水分と水和反応し、土砂の温度が 100℃ 付近まで上昇する。この時、土砂に含まれている揮発性有機化合物が蒸発し、土壌が修復される。土壌が重金属で汚染されている場合は、薬剤として塩化第二鉄などが使用されている。

ところで、自走式土質改良機を用いたこれらの工事現場では、土砂と添加剤を如何に均一に混合するかが極めて重要であり、土砂と添加剤の混合性能に及ぼす機械要素や土質の影響に関する研究は既にいくつか行われている⁴⁵⁾。しかしながら、土砂と添加剤を攪拌・混合する時の攪拌トルクについては、未だ十分には解明されていない。自走式土質改良機に搭載できる動力は限られていることから、土砂の土質条件によっては、あるいは一度に大量の土砂を機械に投入するなどといった工事のやり方によっては、土砂と添加剤が十分に攪拌・混合されない

という事態も発生してきている。土砂の状態に応じた攪拌トルクを理論的に求めることができれば、均一な攪拌・混合という条件を満足し、かつ最大の土砂投入量を決定することができ、最適施工や機械の最適設計などが可能になると考えられる。

そこで、本研究は、自走式土質改良機の攪拌トルクを算出するための物理モデルを導出し、土砂の攪拌・混合実験を通して、モデルの妥当性を検証することを目的とする。

2. パドルによる土砂攪拌の可視化

土砂と添加剤の混合方式はいくつか提案されているが、本研究では、土塊の小割り性能に優れており、既に実機でも採用されているパドル混合方式について検討することにする。パドル混合方式では、シャフトに複数のパドルを設置し、シャフトを回転させることによりパドルを回転させ、土砂と添加剤を攪拌・混合し、下流方向に押し出す構造になっている。パドルの設置形態は、一般に1条3枚あるいは2条4枚方式である。

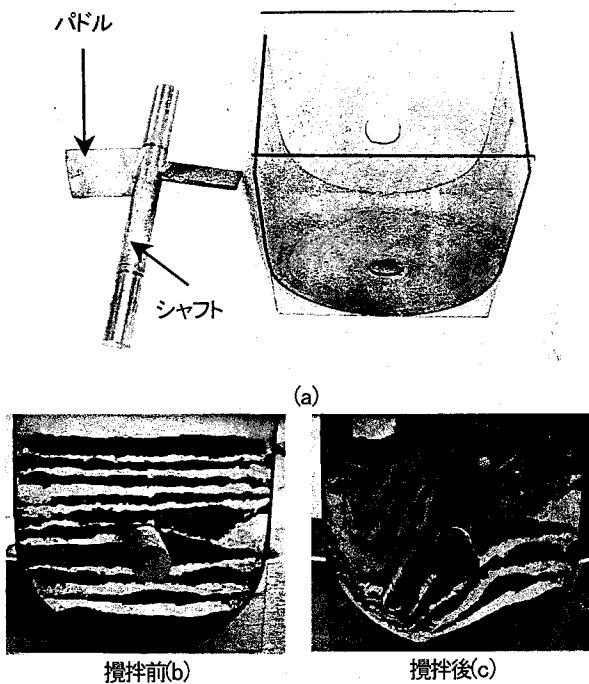


図-2 可視化実験装置および攪拌前後の土砂の様子

攪拌トルクの物理モデルを導出するに当たり、パドルの移動に伴う土砂攪拌の様子を可視化により確認した。図-2(a)に示すようなパドル付きのシャフトと透明なプラスチック容器を用意し、プラスチック容器内に黒土と石灰を交互に敷き詰め、シャフトを回転して土砂攪拌の様子をビデオ撮影した。パドルの傾斜角は45度に設置した。図-2(b)は、シャフト回転前の状態を、また図-2(c)は、シ

ャフトを反時計回りに約90度回転させた時の土砂攪拌の様子を示している。この図より、パドルを半径とする円弧状に明確な破断面があることが分かる。また図-3に示すように第1～第4象限を定義すると、混合容器内の土砂の充填率、すなわち土砂の充填高さにもよるが、土砂攪拌の様子は、定性的に概ね以下のものであることが確認された。すなわち、パドルの回転方向の前面には、パドルとともに移動する一定量の土砂の塊(以下、パドル前面の土塊と記す)があり、パドルが第1象限にある場合は、パドル前面の土塊を持ち上げる作用が生じるが、パドルの回転角度が大きくなると、パドル前面の土塊が下方へ流下する。パドルが第2象限にある場合は、土砂は自重で落下し、第3象限にある場合は、パドルによる土砂のせん断力が顕著になり、第4象限にある場合は、パドルによる土砂のせん断力が回転とともに減少し、パドル前面の土塊を掻き揚げる作用が大きくなることが確認された。そこで、次章では、パドルが第1～第4象限にある場合に分けて、攪拌トルクの物理モデルを導出することにする。

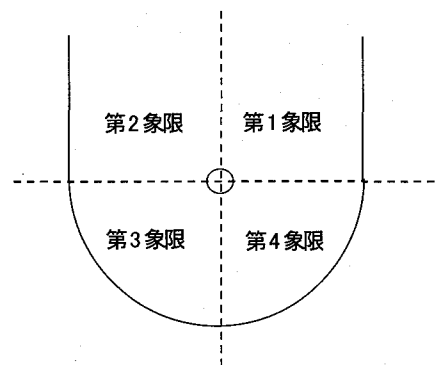


図-3 第1～第4象限の定義

3. 攪拌トルクの物理モデル

本研究では、モデルを簡略化するため、パドルに作用する力としては、パドル前面の土塊の自重および破断面におけるせん断力を考える。なお、本研究では次式で示すクーロンの破壊基準に基づき、せん断応力を算出することにする⁶⁾。

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

ここに、 τ は破断面におけるせん断応力[N/m²]、 c および ϕ は土砂の粘着力[N/m²]および内部摩擦角[rad]、 σ は破断面における垂直応力[N/m²]である。また本研究では、1枚のパドルによる攪拌トルクについて考察し、後述する実験結果との比較の際には、実験装置のパドルの枚数に応じた値を乗ずることにより、実験値と計算値との比較を行うことにする。

3.1 パドルが第1象限にある場合

(1)土の高さ h がシャフトの高さ e よりも低い場合：

この場合、パドル前面の土塊の自重のみがパドルに作用する。本研究では、パドル前面の土塊を図-4 に示すように扇形で仮定し、その大きさを扇形の中心角度 ξ で定義する。土塊中に微小部分を取ると、この微小部分の質量 dm は次式で与えられる。

$$dm = r b \rho g \cdot dr \cdot d\alpha \quad (2)$$

ここに、 r は原点から微小部分までの距離[m]、 b はパドルの幅[m]、 g は重力加速度[m/s²]、 ρ は土砂の密度[kg/m³]である。パドルに作用する撹拌トルク T は次式で求められる。

$$T = \int_0^{\xi} \int_0^a r \cdot dm \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (3)$$

ここに、 a はパドルの長さ[m]、 θ はパドルの回転角度[rad.]、 α はパドルから微小部分までの角度[rad.]である。

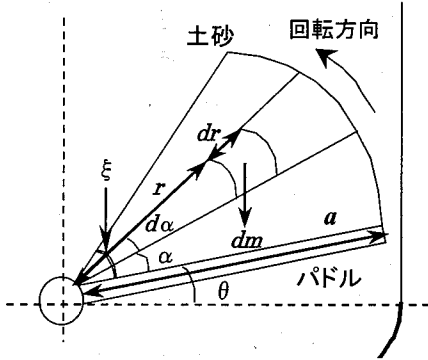


図-4 パドルが第1象限にある場合(充填率小)

($\theta + \xi$) が土砂の安息角よりも大きくなる場合、土砂は下方へ崩れ落ちるので、パドル前面の土塊の自重が小さくなる。この影響は、土塊の大きさを表す角度 ξ の値を、角度($\theta + \xi$) が安息角を越えないように小さくすることで考慮する。なお、パドルは図-4 に示すように反時計回りに回転するので、土砂の左斜面は下方へ崩れ落ちやすいため安息角を考慮するが、右斜面ではその影響が少ないことから、ここでは簡単のため図-4 に示す土塊の形状を仮定した。

(2)土の高さ h がシャフトの高さ e よりも高い場合：

この場合、パドルの回転角度 θ が小さい場合は、図-5 に示すように、パドル全体が土砂内部に埋まっており、回転角度 θ が大きくなると、パドル前面の土塊の一部が土砂表面から出た状態になる。まず、図-5 に示すようにパドル全体およびパドル前面の土塊が全て土砂内部に存在する状態を考える。この場合、パドルに作用する力は、パドル前面の土塊の自重および破断面におけるせん断力

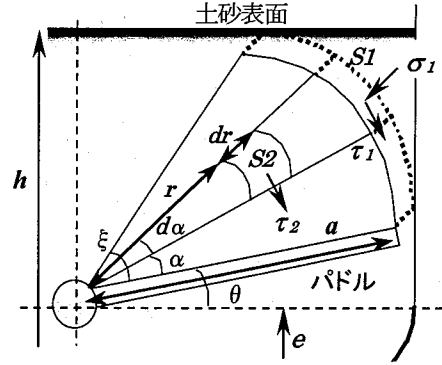


図-5 パドルが第1象限にある場合(充填率大)

になる。図-5 に示すように2つの微小部分 S_1 および S_2 を考え、せん断力を算出する。

①領域 S_1 について：

領域 S_1 に作用するせん断力 df_1 は次式のようにになる。

$$df_1 = S_1 \cdot \tau_1 \quad (4)$$

$$\tau_1 = c + \sigma_1 \tan \phi \quad (5)$$

$$S_1 = a \cdot d\alpha \cdot b \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \rho \cdot g \cdot z_1 \cdot \sin(\theta + \alpha) \quad (7)$$

$$z_1 = h - e - a \cdot \sin(\theta + \alpha) \quad (8)$$

ここに、 h は混合容器の底から土砂表面までの高さ(土砂の高さ)[m]、 e は混合容器の底からシャフトの中心までの距離[m]である。

②領域 S_2 について：

領域 S_2 に作用するせん断力 df_2 は次式のようにになる。

$$df_2 = S_2 \cdot \tau_2 \quad (9)$$

$$\tau_2 = c + \sigma_2 \tan \phi \quad (10)$$

$$S_2 = r \cdot d\alpha \cdot dr \quad (11)$$

$$\sigma_2 = K \cdot \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (12)$$

$$z_2 = h - e - r \cdot \sin(\theta + \alpha) \quad (13)$$

ここに、 K は側圧係数[-]であり、本研究では $K=0.5$ と仮定する。

①および②より、撹拌トルクは次式のように求められる。

$$T = \int_0^{\xi} a \cdot df_1 + \int_0^{\xi} \int_0^a 2r \cdot df_2 + \int_0^{\xi} \int_0^a r dm \cos(\theta + \alpha) \quad (14)$$

パドルの回転角度が大きくなると、図-6 に示すように土塊の先端が土砂から出た状態になり、さらに回転角度が大きくなると、パドルの先端も土砂から出た状態になる。従って、式(14)の右辺第1項および第2項の積分範囲は、図-6 よりせん断が作用する範囲を幾何学的に求め、その範囲内で積分を行うようにする。

$$T = \int_0^{\xi_0} a \cdot df_1 + \int_0^{\xi_0} \int_0^a 2r \cdot df_2 + \int_0^{\xi_0} \int_0^a 2r \cdot df_2 + \int_0^{\xi_0} \int_0^a r dm \cos(\theta + \alpha) \quad (15)$$

ただし、 ξ_0 はパドル前面の土塊が土砂内部に存在する範囲を示す角度であり、 R は角度 $\xi_0 \sim \xi$ の範囲内のある角度においてシャフトから土砂表面までの距離を表す。

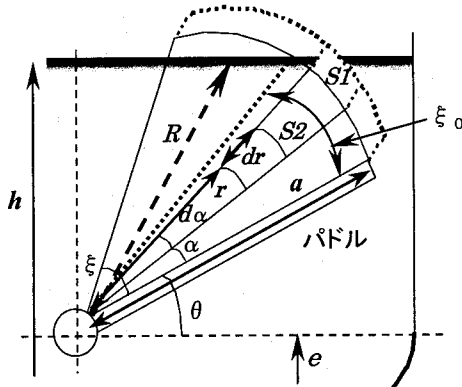
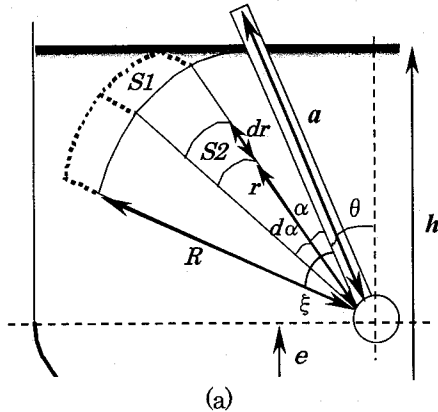


図-6 パドルの回転角度が大きくなった場合

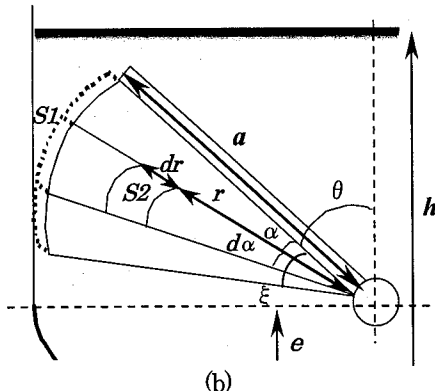
3.2 パドルが第2象限にある場合

(1)土の高さ h がシャフトの高さ e よりも低い場合：

この場合、パドル上の土砂は全て下方に落下しており、パドルの周辺にも土砂は存在しないため、パドルにはトルクが作用しない。従って、この場合は、攪拌トルク $T=0$ である。



(a)



(b)

図-7 パドルが第2象限にある場合

(2)土の高さ h がシャフトの高さ e よりも高い場合：

この場合、ある回転角度までは、図-7(a)に示すようにパドルの一部が土砂内部に存在し、パドルの先端が土砂から出ている状態であるが、回転角度が大きくなると、図-7(b)に示すようにパドル全体が土砂内部に埋まった状態になる。この場合、ともにパドルに作用する力は、破断面におけるせん断力になる

①領域 S_1 について：

領域 S_1 に作用するせん断力 df_1 は次式のようにになる。

$$df_1 = S_1 \cdot \tau_1 \quad (16)$$

$$\tau_1 = c + \sigma_1 \tan \phi \quad (17)$$

$$S_1 = a \cdot d\alpha \cdot b \quad (18)$$

$$\sigma_1 = \rho \cdot g \cdot z_1 \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (19)$$

$$z_1 = h - e - a \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (20)$$

②領域 S_2 について：

領域 S_2 に作用するせん断力 df_2 は次式のようにになる。

$$df_2 = S_2 \cdot \tau_2 \quad (21)$$

$$\tau_2 = c + \sigma_2 \tan \phi \quad (22)$$

$$S_2 = r \cdot d\alpha \cdot dr \quad (23)$$

$$\sigma_2 = K \cdot \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (24)$$

$$z_2 = \frac{r \cdot \sin(\theta + \alpha)}{\tan \theta} + r \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (25)$$

①および②より、攪拌トルクは次式のように求められる。

$$\text{図-7(a)の場合} \quad T = \int_0^{\xi} R \cdot df_1 + \int_0^R \int_0^{\xi} 2r \cdot df_2 \quad (26)$$

$$\text{図-7(b)の場合} \quad T = \int_0^{\xi} a \cdot df_1 + \int_0^a \int_0^{\xi} 2r \cdot df_2 \quad (27)$$

3.3 パドルが第3象限にある場合

(1)土の高さ h がシャフトの高さ e よりも低い場合：

図-9 に示すように、パドルの先端が土砂表面に到達するまでパドルには攪拌トルクは作用しない。パドルの一部が土砂内部に入った状態では、破断面におけるせん断力を考える。

①領域 S_1 について：

領域 S_1 に作用するせん断力 df_1 は次式のようにになる。

$$df_1 = S_1 \cdot \tau_1 \quad (28)$$

$$\tau_1 = c + \sigma_1 \tan \phi \quad (29)$$

$$S_1 = a \cdot d\alpha \cdot b \quad (30)$$

$$\sigma_1 = \rho \cdot g \cdot z_1 \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (31)$$

$$z_1 = a \sin(\theta + \alpha) - a \cos(\theta + \alpha) \tan \theta \quad (32)$$

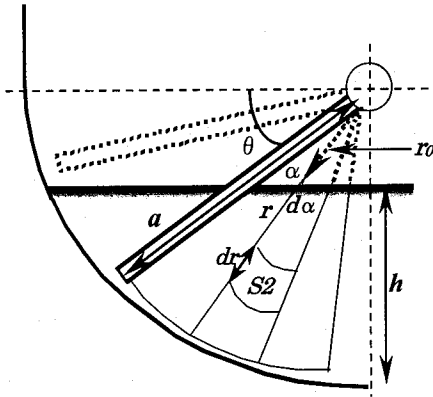


図-8 パドルが第3象限にある場合(充填率小)

②領域 S_2 について：

領域 S_2 に作用するせん断力 df_2 は次式のようにになる。

$$df_2 = S_2 \cdot \tau_2 \quad (33)$$

$$\tau_2 = c + \sigma_2 \tan \phi \quad (34)$$

$$S_2 = r \cdot d\alpha \cdot dr \quad (35)$$

$$\sigma_2 = K \cdot \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (36)$$

$$z_2 = r \sin(\theta + \alpha) - r \cos(\theta + \alpha) \tan \theta \quad (37)$$

①および②より、攪拌トルクは次式のように求められる。

$$T = \int_0^{\xi} a \cdot df_1 + \int_0^{\xi} \int_0^a 2r \cdot df_2 \quad (38)$$

(2) 土の高さ h がシャフトの高さ e よりも高い場合：

この場合、図-9 に示すように、いずれの回転角度においてもパドル全体が土砂内部に存在する。従って、破断面におけるせん断力を考える。計算式は(1)の場合と同様であるが、積分範囲は角度 α に関しては $0 \sim \xi$ 、半径方向に関しては $0 \sim a$ である。それゆえ、攪拌トルクは次式のように求められる。

$$T = \int_0^{\xi} a \cdot df_1 + \int_0^{\xi} \int_0^a 2r \cdot df_2 \quad (39)$$

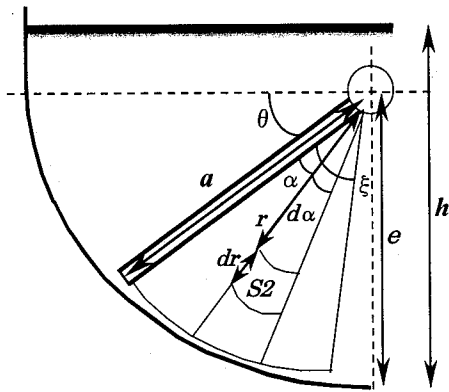


図-9 パドルが第3象限にある場合のモデル化(充填率大)

3.4 パドルが第4象限にある場合

(1) 土の高さ h がシャフトの高さ e よりも低い場合：

この場合、図-10 に示すように、ある回転角度までは、パドルの先端が土砂内部に存在するため破断面におけるせん断力を考える。また第4象限では、パドル上方に存在する土砂の自重による攪拌トルクについても考慮する。ただし、 r_0 は角度 α におけるシャフトから土砂表面までの距離である。

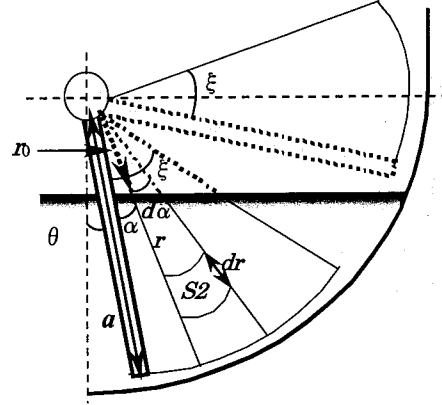


図-10 パドルが第4象限にある場合(充填率小)

①領域 S_1 について：

領域 S_1 に作用するせん断力 df_1 は次式のようにになる。

$$df_1 = S_1 \cdot \tau_1 \quad (40)$$

$$\tau_1 = c + \sigma_1 \tan \phi \quad (41)$$

$$S_1 = a \cdot d\alpha \cdot b \quad (42)$$

$$\sigma_1 = \rho \cdot g \cdot z_1 \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (43)$$

$$z_1 = a \cos(\theta + \alpha) + h - e \quad (44)$$

②領域 S_2 について：

領域 S_2 に作用するせん断力 df_2 は次式のようにになる。

$$df_2 = S_2 \cdot \tau_2 \quad (45)$$

$$\tau_2 = c + \sigma_2 \tan \phi \quad (46)$$

$$S_2 = r \cdot d\alpha \cdot dr \quad (47)$$

$$\sigma_2 = K \cdot \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (48)$$

$$z_2 = r \cos(\theta + \alpha) \quad (49)$$

①および②より、攪拌トルクは次式のように求められる。

$$T = \int_0^{\xi} a \cdot df_1 + \int_0^{\xi} \int_0^a 2r \cdot df_2 + \int_0^{\xi} \int_0^a r dm \cos(\theta + \alpha) \quad (50)$$

なお、図-10 の状態から土砂をパドルで掻き揚げても、図-4 に示すような土塊の状態にはなり難いが、ここではモデル化を簡単にするため、この影響は考慮しないことにした。

(2) 土の高さ h がシャフトの高さ e よりも高い場合：

この場合、図-11 に示すように、いずれの回転角度においてもパドル全体が土砂内部に存在する。従って、破断

面におけるせん断力を考える。計算式は(1)の場合と同様であるが、積分範囲は角度 α に関しては $0 \sim \xi$ 、半径方向に関しては $0 \sim a$ である。それゆえ、攪拌トルクは次式のように求められる。

$$T = \int_0^{\xi} a \cdot df_1 + \int_0^{\xi} \int_0^a 2r \cdot df_2 + \int_0^{\xi} \int_0^a r dm \cos(\theta + \alpha) \quad (51)$$

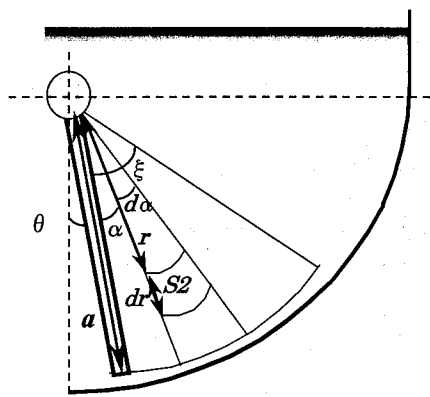


図-11 パドルが第4象限にある場合(充填率大)

以上の諸式により1枚のパドルによる攪拌トルクが求められるが、一般にパドルは図-12に示すようにある角度で設置されている。パドルの傾斜角 ζ を考慮すると、攪拌トルク T' は次式のようになる。

$$T' = T \cdot \sin \zeta \quad (52)$$

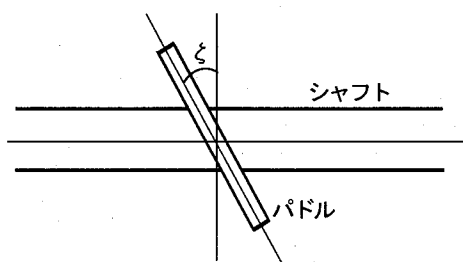


図-12 パドルの傾斜角の定義

4. 攪拌トルクに関する実験的考察および計算値との比較検討

4.1 実験結果

上述したモデルを検証するために、1軸の小型パドル混合装置を作成し、土砂混合を行う際の攪拌トルクの測定を行った。実験装置の概略を図-13に示す。実験装置は、混合容器、トルクメータ、DCモータ、モータドライバ、PCおよびADコンバータから構成されている。実験では所定の回転数になるようにモータドライバから信号をDCモータに送信し、所定の回転数でシャフトを回転させ、土砂攪拌時のトルクをシャフトとDCモータの間に設置

したトルクメータで計測した。トルクメータからの信号は、ADコンバータを介してPCに取り込んだ。混合容器の長さは600mmであり、容器の断面形状は、シャフトの位置から下半分は半円形、上部は長方形になっている。容器下部からシャフト中心までの距離は75mm、容器の幅は150mmである。本実験では、パドルとして1条3枚式と2条4枚式の2種類を用意した。1条3枚式とは、パドルが一定間隔で120度ずつずれてシャフトに設置されていることを意味する。すなわち、4枚目のパドルは、1枚目のパドルと同じ状態で1ピッチだけ間隔が離れて設置されていることを意味する。2条4枚式では、図-13に示すように1条4枚式がお互いに180度ずれて2つ(2条)設置されている。2条4枚式では、パドルの数は全部で20枚であり、1条3枚式では、パドルの数は10枚である。どちらの方式でもパドルのサイズを幅40mm×長さ60mmとし、パドルの傾斜角 ζ は45度とした。

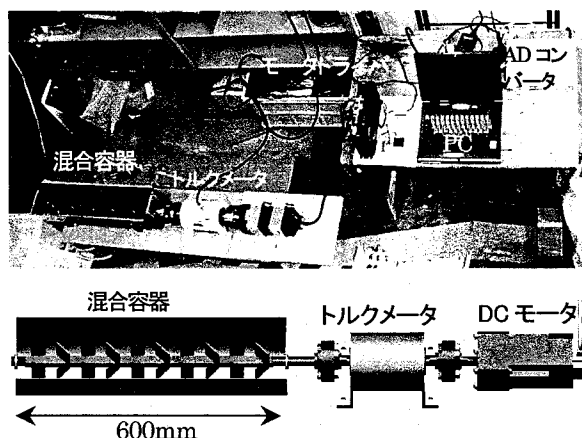


図-13 実験装置の概略

また本実験では、土砂として蔵王産の黒土と建設現場から採取した建設残土の2種類の土砂を使用した。実験では、土砂の充填率を10~60%の範囲内で変化させ、またシャフトの回転数を12~60rpmの範囲内で変化させて土砂攪拌時のトルクを計測した。なお、本研究では混合容器の体積に対する土砂の体積を充填率と定義した。

図-14にパドルとして1条3枚式を用い、黒土の場合の攪拌トルクと含水比との関係を示す。また図-15に攪拌トルクと充填率との関係を示す。図中の実線および破線は実験結果および計算結果を示すが、計算結果については後述する。図-14および図-15はシャフトの回転数が12rpmの時の結果を示しているが、本実験の範囲内では攪拌トルクに及ぼす回転数の影響はほとんど見られなかった。そこで、ここでは回転数が12rpmの時の結果のみを示す。攪拌トルクは、含水比が20%程度までは、含水比の増加とともに緩やかに増大するが、含水比が20%を越えると攪拌トルクは急激に増大し、27~28%付近でピ

ークを示す。それ以上の含水比の範囲では、攪拌トルクは急激に減少する。また図-15より、攪拌トルクは充填率の増加にほぼ比例して増大していることが分かる。

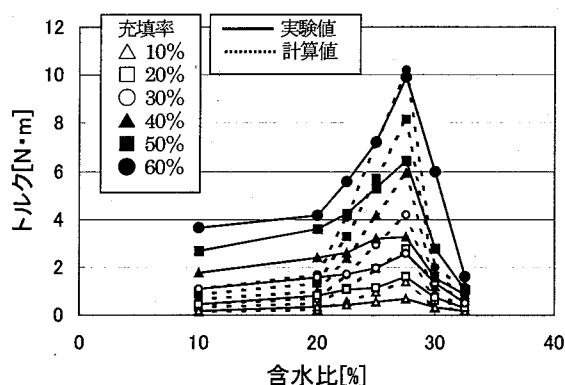


図-14 攪拌トルクと含水比との関係(黒土1条3枚)

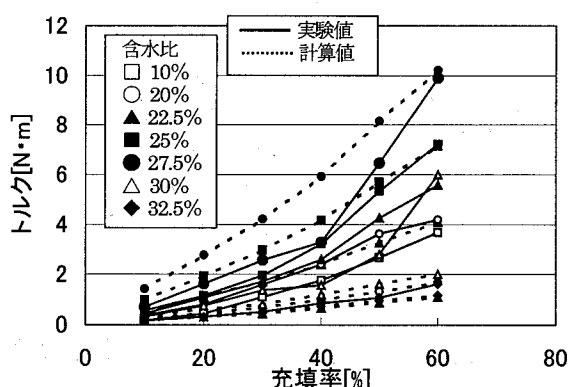


図-15 攪拌トルクと充填率との関係(黒土1条3枚)

図-16にパドルとして2条4枚式を用い、黒土の場合の攪拌トルクと含水比との関係を示す。実験結果が示す傾向は図-14の場合と同様であるが、2条4枚式のパドルは、パドルの総数が1条3枚式のパドル総数の2倍であるので、同じ含水比では、2条4枚式の攪拌トルクは1条3枚式の攪拌トルクに比べてほぼ2倍の値になっている。

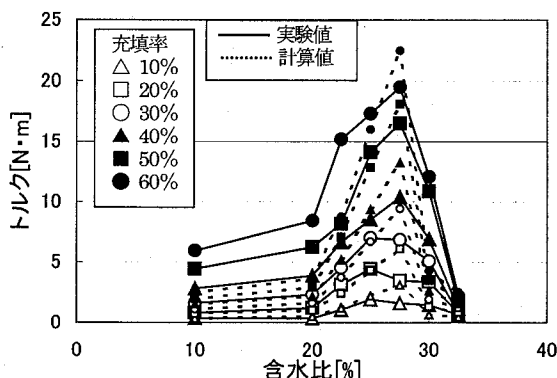


図-16 掘削トルクと含水比との関係(黒土2条4枚)

図-17にパドルとして1条3枚式を用い、建設残土の場合の攪拌トルクと含水比との関係を示す。図中の実線および破線は実験結果および計算結果を示すが、計算結果については後述する。実験結果が示す傾向は黒土の場合とほぼ同様であるが、黒土は砂質系の土砂であるのに対し、本実験で用いた建設残土は粘土質であったため、1条3枚式のパドルでも、黒土を2条4枚式のパドルで攪拌した結果(図-15)とほぼ同程度の攪拌トルクを示している。なお、掘削土砂に対して2条4枚式の場合における攪拌トルクの計測も試みたが、この場合は攪拌トルクが非常に大きくなり、本実験で用いたトルクメータの容量をオーバーしてしまうため、建設残土に関しては、1条3枚式のパドルのみを用いて計測を行った。

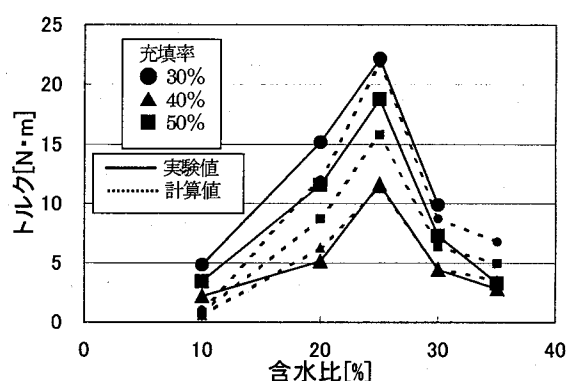


図-17 攪拌トルクと含水比との関係(建設残土・1条3枚)

ところで、本研究では、JIS A 1205に準じて土砂の液性限界の測定を行った。その結果、建設残土の液性限界は33%と得られたが、黒土に対しては本方法では値が得られなかった。しかしながら、含水比を変えて試料作成を行った際の観察では、定性的ではあるが概ね30%程度であると推定された。この結果を図-14、図-16および図-17に示される結果に重ね合わせると、攪拌トルクは含水比の増加とともに徐々に増加し、液性限界の数%手前でピークを示し、液性限界を超えると攪拌トルクは急激に減少する傾向を示すことが分かる。

4.2 実験結果と計算結果の比較検討

図-14および図-15に1条3枚式・黒土の場合の攪拌トルクに対する実験値と計算値との比較を示す。図中の実線が実験値を示し、破線が第3章で提案したモデルより計算される値を示している。ただし、土砂の粘着力および内部摩擦角の値は、それぞれの含水比における土砂を用いて一面せん断試験を行い、粘着力および内部摩擦角の値を実測し、その値を計算に用いた。またパドル前面に存在する土塊の大きさを表す角度 θ については、第2章で用いた可視化実験装置を用いて土砂攪拌の様子をビデオ撮影し、その映像から角度 θ の値を算出した。算出

された角度 ξ の値を表1に示す。

表-1 充填率と土塊の大きさを表す角度との関係

充填率(%)	10	20	30	40	50	60
角度 ξ (deg.)	40	50	60	70	80	90

含水比が27~28%付近では、計算値は実験値と比較的近い値を示すが、含水比が小さい範囲で両者には差異が見られ、計算値は実験値よりもかなり小さくなっている。

図-16および図-17に2条4枚式・黒土の場合および1条3枚式・建設残土の場合の攪拌トルクに対する実験値と計算値との比較を示す。これらの図においても傾向は図-14の場合と同様であり、含水比が低い範囲において計算値と実験値との間に差異が見られる。

ところで、可視化実験装置を用いた土砂攪拌の様子を観察すると、パドルが第3象限にある場合、パドルが前方の土砂を圧密し、いわゆる受働土圧が作用する状態になっていることが分かる。内部摩擦角は含水比が25%までは、ほぼ40~45度の値であるが、25%を超えると急激に減少した。これに対して、粘着力は含水比20%程度までは、0.4~0.5(kN/m²)の値でほぼ一定であるが、含水比が20%を超えると急激に増加し、27~28%付近でピークを示し、その後、急激に減少した。含水比が低い範囲で計算値と実験値に差異が見られるのは、第3象限における内部摩擦角の影響を低く見積もっているためと想像される。そこで、本研究では簡単のため、パドルが第3象限にある場合は、充填率に応じた攪拌トルクの増分を次式で仮定し、攪拌トルクを補正することにした。なお、攪拌トルクの増分に関する理論的考察は今後の課題であると考えている。

$$T_m = T + P \cdot \rho a^2 b \xi \tan \phi \quad (53)$$

ここに、 T_m は補正後の攪拌トルク[Nm]、 T は第3章で提案したモデルより計算されるトルク[Nm]、 P は定数[m]である。

図-18~図-20に補正後の攪拌トルクと含水比との関係を示す。これらの図に示されるように計算値と実験値は比較的近い値を示していることが分かる。パドルが第3象限にある場合の攪拌トルクの増分に対する理論的考察など今後検討しなければならない点は残されているものの、本研究で提案した攪拌トルクモデルは、ほぼ妥当であると考えられる。

5. むすび

近年、建設現場等で発生する建設残土を原位置で再資源化し、埋戻し材として再利用する施工事例が増えてきている。このような現場で使用される機械が自走式土質改良機であるが、土砂と添加剤を均一に混合するための

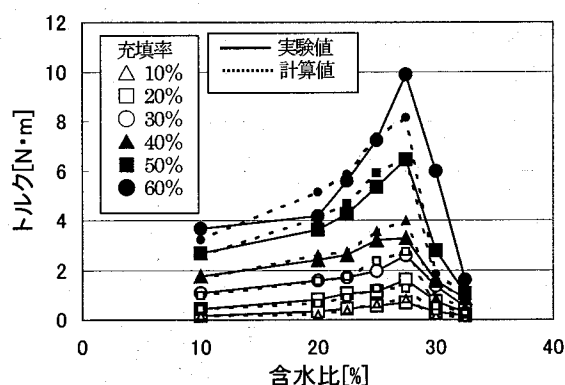


図-18 補正後の攪拌トルクと含水比との関係(黒土・1条3枚)

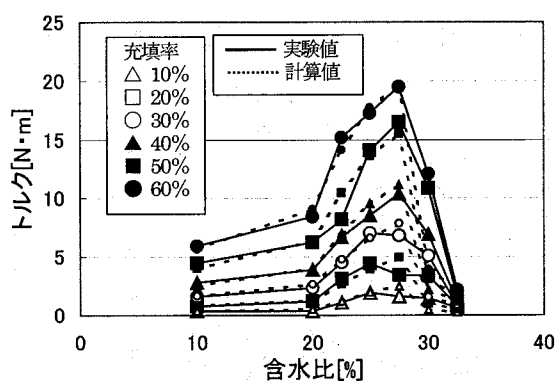


図-19 補正後の攪拌トルクと含水比との関係(黒土・2条4枚)

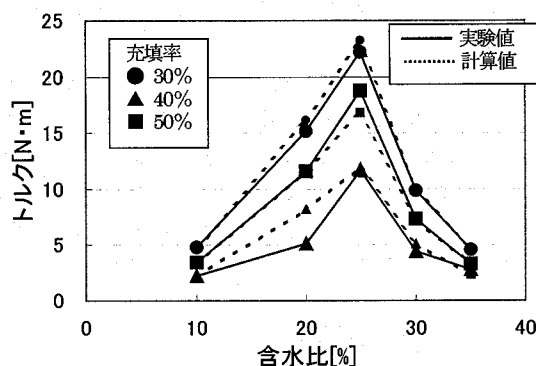


図-20 補正後の攪拌トルクと含水比との関係(建設残土・1条3枚)

研究はいくつか行われているものの、土砂と添加剤を攪拌混合するための攪拌トルクに関してはほとんど検討されていない。

そこで、本研究では自走式土質改良機の攪拌トルクを算出するための物理モデルを導出し、土砂の攪拌・混合実験を通して、モデルの妥当性を検証することを目的とした。初めに、可視化実験を通してパドルの移動に伴う

土砂攪拌の様子を確認し、その結果に基づき、パドルが第1～第4象限にある場合の攪拌トルクを算出するモデルを導出した。さらに小型の攪拌混合装置を作成し、土砂攪拌時のトルクを計測するとともに、実験値と計算値との比較を行った。その結果、パドルが第3象限にある場合の攪拌トルクの増分に対する理論的考察など今後検討しなければならない点が残されてはいるものの、計算値と実験値とはほぼ一致し、本研究で提案した攪拌トルクモデルは、ほぼ妥当であることが確認された。

参考文献

- 1) テラメカニクス研究会：テラメカニクスライブラリー5 テラメカニクスと環境セミナー報告集「最新環境負荷低減の技術とシステム」, pp.83-88, 2002.
- 2) 橋本 久儀：自走式土質改良機による汚染土壌対策と課題, 建設機械, Vol.38, No.10, pp.45-50, 2002.
- 3) 青木一男, 磯谷 修二, 日置 和昭, 吉田 勝久, 深江 邦弘：生石灰攪拌混合による揮発性有機化合物汚染地盤の修復効果に関する研究, 第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.145-150, 2003.
- 4) 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, 資源・素材学会誌, Vol.116, No.6, pp.502-508, 2000.
- 5) 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, 資源・素材学会誌, Vol.116, No.10, pp.839-846, 2000.
- 6) 河上 房義：土質力学, pp.117-120, 1993(森北出版).

(2006年4月13日 受付)