

回転式破碎・混合による低品質地盤材料の粒度調整 の効率化について

安福, 規之
九州大学大学院工学研究院

Alowaisy, Adel
九州大学大学院工学研究院

石藏, 良平
九州大学大学院工学研究院

中島, 典昭
日本国土開発株式会社

<https://hdl.handle.net/2324/6790856>

出版情報：地盤改良シンポジウム論文集. 15, pp.687-692, 2022-11-30. 日本材料学会
バージョン：
権利関係：



回転式破碎・混合による低品質地盤材料の粒度調整の効率化について

○安福規之¹・Adel Alowaisy¹・石蔵良平¹・中島典昭²

¹九州大学大学院工学研究院・²日本国土開発㈱

1. はじめに

地球温暖化が主たる要因とされる気候変動によって、土砂災害は増加傾向にあるとの統計データが示されている。この10年わが国では毎年のように豪雨に伴う甚大な地盤災害が広域的に発生している。結果として、土木構造物、特に、河川堤防や道路盛土など土工に関係した土構造物に与える外的要因としてのリスクは、近年高まっていることが指摘されている。このため、土工の質を高める上で、良質な土質材料の安定的な確保は極めて重要である。しかし、現状では、安定的に良質な土質材料を持続可能なかたちで確保することは簡単ではなく、これまでの実務的な対応として、様々な種類の建設発生土を混合して使用したり、セメントや生石灰等改良材を加えたりして、土質材料を改良する方法が検討されて来ている。その手法のひとつに本研究で対象とする「回転式破碎・混合試験機(RCM)を用いた方法」がある¹⁾。

本報では、既に広く現場で活用されている RCM の小型機を用いて、粒度の悪い土質材料の特性を土粒子破碎の励起によって改善させる効果について、実験的検討を行っている。さらに、土粒子の単粒子強さに着目し、RCM による土質材料の粒度分布の簡易な算定方法を提案し、その妥当性の検証を試みている。本研究は、将来的には RCM の機能を活かして、実務的な粒度調整手法の効率化や高度化に繋げることをめざすものである。

2. 使用した実験装置の概要

2.1 回転式破碎・混合装置とその機能

本研究では、回転式破碎・混合試験機として図1に示す Rotary Crushing and Mixing Machine ® (RCM-Machine：通称、ツイスター)を使用した。使用した RCM-Machine(以下 RCM)のシリンダーは直径 500 mm で、4 本のフレキシブルな鋼製のチェーンが3層建てで装着されている。実務では、既に直径 2250 mm のシリンダーを有する RCM も開発されており、装置としては小型機として位置づけられる。装置内の上部から落とし込んだ土質材料を回転するチェーンの打撃力で各粒径の土粒子を破碎し、土質材料の粒度を調整できる構造となっている。毎分の回転数 (rpm) を 400 rpm から最大 1200 rpm まで変化させることで、対象とする土質材料の粒度の調整機能を分析した。また、種類の異なる材料、例えば、土質材料とセメントや石灰などの複数の材料を図に示すようなベルトコンベア上に置けば、チャンパー内で粉碎・混合できることも RCM の特色の一つとして挙げられる。

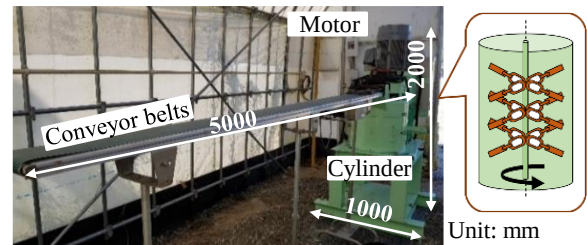


図1 回転式破碎混合試験装置の概要

2.2 単粒子強度試験の特色

単粒子の強度を得るために、単粒子強度試験を行った。単粒子強度試験では、上下2枚の鋼板の間に、ほぼ同じ大きさの3つの粒子を配置して実験が行われる場合もあるが、ここでは、土粒子強度の指標試験として、図2に示すようにより単純な点荷重として鉛直力を負荷することとした。個々の土粒子を数多く試験することで、単一粒子の強度を算定する手順が簡略化でき、かつ実験数を増やせることから測定精度が向上することも期待された。

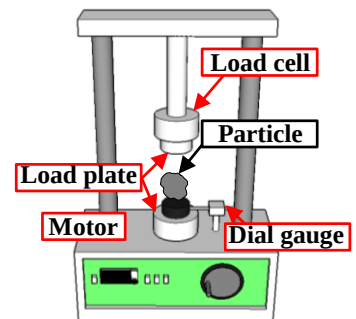


図2 単粒子強度試験装置

3. 対象とした実験材料と実験方法

実験には、写真1に示す砕石 (C-1 と C-2) と人工的に試作された RC40 と称する試料 (後述のように単粒子強さの異なる RC-1, RC-2, RC-3 の3種の人工材料) を実験に使用した。表1にそれぞれの土粒子の基本的な特性がまとめられている。試料は、粒径によって砕石2種類、RC40は3種類に分類されている。表1に、使用した材料の平

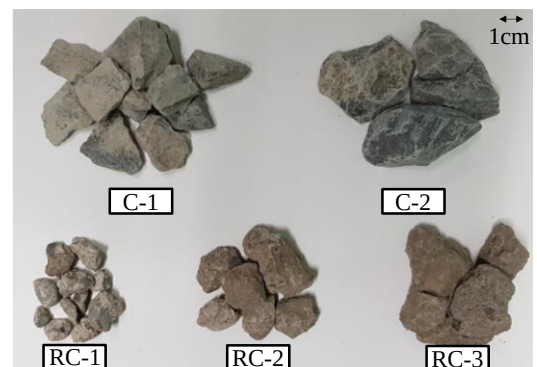


写真1 実験に使用した土質材料

均粒径 D_{50} と均等係数 U_c とともに D_{50} の単粒子の破碎時における軸荷重 F_{max} (力の単位) と破碎応力 σ_c (後述の通り, F_{max} を $(D_{50})^2$ で割ったもの) の平均値も併せて示している。表から初期(Rpm=0 のケース)の D_{50} と U_c は、それぞれ、14-40 mm と 1.2-1.5 程度の粒度の悪い材料であることを示している。また、各材料の単粒子強さは、図 2 に示す単粒子強度試験から求めた。試験は、試料の平均粒径 (D_{50}) に近い 10 個の土粒子を用いて実施しており、表中にはその平均値が示されている。

RCM を用いた破碎・混合試験では、まず粉碎(破碎)前の地盤材料の粒度分布曲線をふるい分析によって求めた。粉碎前の各試料 1 kg を、粉碎・混合の入り口から 1 m 手前のベルトコンベア上に等間隔で置き、所定の速さで RCM 本体に移送できるようにした。RCM 本体まで移送された試料は、装置上部から自由落下させ、所定の速さで回転しているチェーンと衝突することで、破碎・混合される。チェーン回転数(以下、回転数)は、400, 800, 1200 rpm とし、粒度分布に表れる回転数の影響を確認した。また、RCM で破碎・混合した試料の粒度分布曲線の結果から、路床土や河川堤防材料として使用できる粒度になり得るかどうかを分析することとした。今回用いた RCM によって改良された土質材料 (RC-2) の粒度分布曲線を RC-1 と RC-3 の基本情報に基づいて予測する方法を提案し、その検証を行い、単粒子の強さを理解することの重要性について言及した。最後に、装置内の土粒子の動きを把握することを目的に装置内の動画撮影も実施しており、それから読み取れることを示す。

4. 実験結果と考察

図 3 は、今回使用した碎石と RC40 の典型的な単粒子破碎試験の結果を示している。 F_{max} は土粒子の強さとして定義されたものであり、最大の軸(垂直)荷重 F として求めている。表 1 には、5 つの土粒子の平均的な単粒子強さ荷重をそれぞれまとめている。次いで、土粒子の破碎応力 (σ_c) は、 $\sigma_c = F_{max}/A$ として算定され、断面積 A は、粒子の接合面が複雑でありその面積を合理的に評価することは難しいと判断されることから、便宜上 $A = (D_{50})^2$ として求めている。したがって、ここで定義される破碎応力は、土粒子の強さを示す一つの指標として認識しておく必要がある。

ここで得られた破碎応力を D_{50} に対して対数表示でプロットすると、図 4 の結果となった。この結果を Kwag ら^{2),3)} と加登ら^{4),5)} が先行的に示している珪砂や石灰質砂の結果も含めて分析した。まず、碎石、RC40 とともに、粒径が大きくなると破碎応力が直線的に低下することがわかる。また、その傾向は加登ら(2001)が示した結果とも良い一致を示しており、土粒子径が小さくなるほど破碎応力は高くなると言える。したがって、このような結果は、母材が同一の場合など異なる平均粒径の土粒子の破碎応力を粒径に応じて概略推定することが可能となることを示唆する。

図 5 は、表中の RC-1($D_{50}=14.3$ mm)を 400, 800, 1200 rpm で粉碎する前と粉碎後の粒径加積曲線を示したものである。この図は、回転数が増加するにつれて、平均粒径は大きく低下し、また均等係数も大きくなる傾向を示し、回転数を変えることで粒度分布の調整が可能であることを示唆している。具体的には、1200 rpm の場合、平均粒径は 14.3 mm から 5.2 mm へ、また均等係数は 1.45 から 9.43 へと変化しており、河川土工マニュアル記載の河川堤体材料許容粒度分布⁶⁾を概ね満足するような粒度の改善が図られていることが理解できる。

表 1 実験に使用した土質材料の試験前後の基本的特性

	Rpm	Crush stone		RC40		
		C-1	C-2	RC-1	RC-2	RC-3
D_{50} (mm)	0	23.5	41.8	14.3	22.8	32.0
	400	22.1	41.0	12.3	21.5	30.5
	800	20.2	28.1	10.0	11.1	9.9
	1200	8.5	13.1	5.2	4.2	4.0
U_c	0	1.46	1.53	1.45	1.19	1.20
	400	1.81	1.64	1.95	2.07	1.71
	800	4.09	5.83	5.95	9.27	10.08
	1200	6.81	8.95	9.43	12.00	11.00
F_{max} (kN)		4.68	5.64	2.48	2.09	2.31
σ_c (MPa)		8.47	3.23	12.13	4.02	2.26
Source		Obtained by crushing rocks		Recycled concrete such as building		

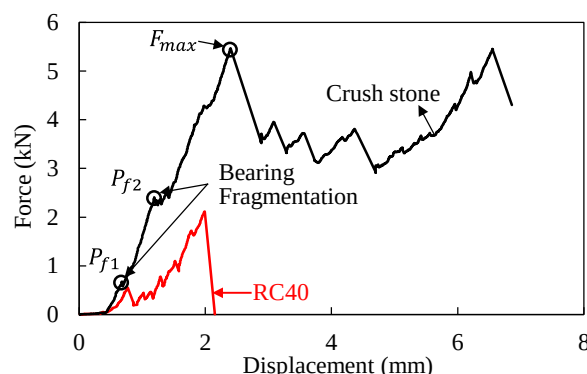


図 3 碎石と RC40 の典型的な単粒子試験結果

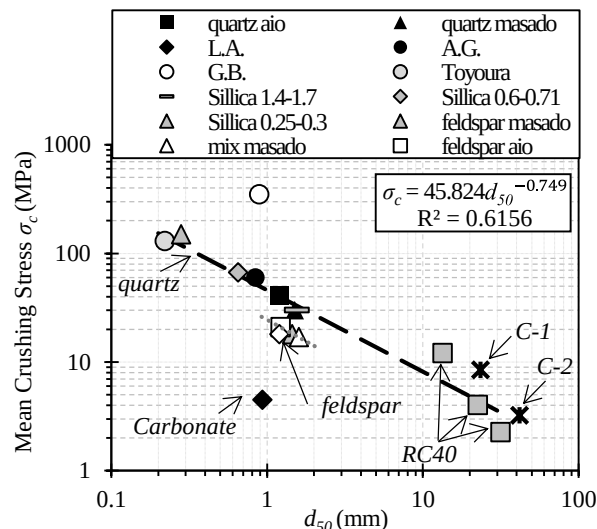


図 4 粒径の異なる各種土質材料の平均粒径 D_{50} と破碎応力 σ_c の関係

5. 破碎後の粒度分布の予測法とその検証⁷⁾

5.1 前提条件

表 1 に示す RC40 中の RC-1 と RC-3 を基準材料として、これらの二つの材料の初期の粒度分布と平均粒径 D_{50} の単粒子の破碎応力 σ_c の平均値、さらには、回転数ごとの粒度分布がデータベースとして既知であることを前提条件として、その場合に今回の RCM500 を用いて 400, 800, 1200 rpm の条件で破碎試験を行った場合の RC-2 の粒度分布を RC-1 と RC-3 の既知の情報から予測する方法をひとつの事例として述べる。

5.2 予測手順

(1) 予測材料で求めておく初期情報：

RC-2 の破碎試験後の粒度分布を予測することを考える。そのために必要な基本情報として、A) RC-2 の初期の粒度分布と B) RC-2 の D_{50} 粒径の単粒子破碎応力が与えられていることが必要である。A) は通常の粒度分布試験から求める。B) は先に示した D_{50} の粒径を使った単粒子強度試験を行い RC-2 の破碎応力の平均値（代表値）を算定する。破碎後の粒径加積曲線の予測の流れを示したものが図 6 である。以下この図の流れに沿って説明する。

(2) 基準(教師)材料としての RC-1 と RC-3 で押さえておくべき基本情報：

1200 rpm 下での破碎後の粒度分布を予測する場合では、RC-1 と RC-3 の破碎応力の平均値と 1200 rpm を与えた後の破碎後の粒度分布と初期の粒度分布が得られている必要がある。また、回転数に応じた粒度分布を予測するには、例えば、400 rpm と 800 rpm 下での基準材料の粒度分布あるいは破碎率がデータベースとして存在することが必要である。表 2 は、RC-1 と RC-3 の粒度変化に関する基準データ (D_{50} 粒径の破碎応力と回転数に応じた破碎率) をまとめたものである。表中の破碎率の考え方については後述する。

(3) 具体的な予測プロセス：

A1) RC-2 の平均粒径の土粒子の平均的な破碎応力（10 個程度の土粒子の平均値）は、単粒子試験から 4.02 MPa が得られている。この時、1200 rpm 後の RC-2 の平均粒径 D_{50} の破碎率は次式で定義される。

$$\text{Rate of change of } D_{50} = \left(1 - \frac{D_{50(1200)}}{D_{50(0)}}\right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $D_{50(0)}$ と $D_{50(1200)}$ は、それぞれ初期と 1200 rpm 後の平均粒径を表している。上式は D_{50} の変化率すなわち、破碎率を表現している。ここでの問題設定としては、この破碎率を先に示した RC-1 と RC-3 の既知の結果からどのように評価するかということである。すなわち RC-2 の $D_{50(1200)}$ をどのようにして算定するかということになる（図 7 参照）。

A2) この「問い」に対する対応として、まず RC-1 と RC-3 の D_{50} の破碎率を算定する。表 1 からわかるように、RC-1 の初期の D_{50} が 14.3 mm、1200 rpm 下での破碎試験後の D_{50} が 5.2 mm と与えられているので、RC-1 の破碎率は上式から下記のように 63.64 % と計算される（図 8 参照）。

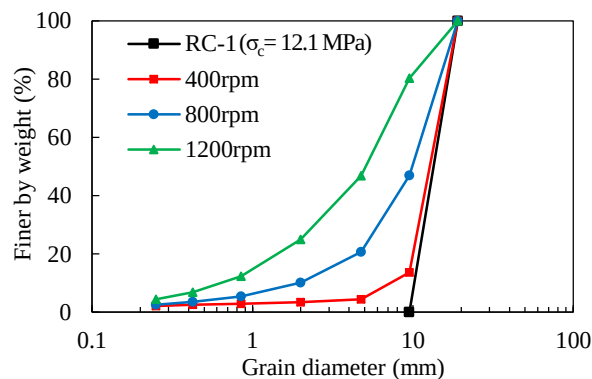


図 5 RC1 の回転数に応じた粒度分布

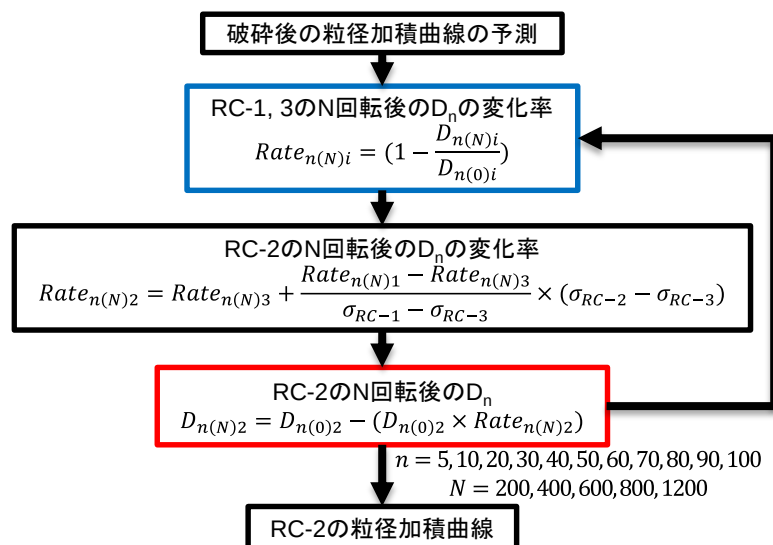


図 6 破碎応力を活かした粒度分布の算定法の流れ

表 2 RC1 と RC3 の粒度変化に関する基準データ

		Reference data					
Samples		RC-1			RC-3		
Stress (σ_c) (MPa)		12.13			2.26		
rpm		400	800	1200	400	800	1200
Percentage change (%)	D5	49.00	92.00	97.00	64.94	98.15	99.26
	D10	27.62	80.95	93.33	34.06	95.65	98.19
	D20	10.53	60.53	86.84	16.38	88.50	95.82
	D30	8.87	48.39	79.03	8.39	81.54	93.62
	D40	6.77	38.35	70.68	7.12	75.40	90.29
	D50	5.59	30.07	63.64	5.63	68.75	87.19
	D60	3.95	22.37	56.58	4.53	60.42	83.38
	D70	2.48	15.53	50.31	3.22	52.34	78.07
	D80	1.75	9.36	44.44	2.27	44.76	73.37
	D90	1.10	4.97	22.10	1.10	32.97	59.34

$$\begin{aligned} \text{Rate of change of } D_{50} &= \left(1 - \frac{5.2}{14.3}\right) \times 100 \\ &= 63.64 \quad (\%) \end{aligned} \quad (2)$$

また、同様に考えると、RC-3 の変化率は 87.19 % と算定される。

A3) 過去の研究例から図 4 に示すように破砕応力 (σ_c) と D_{50} の間には、ばらつきはあるものの対数表示での線形関係にあることが知られている。この関係性を踏まえ、破砕応力と D_{50} の破砕率にも図 9 に示す線形的な関係が成り立つと仮定する。この線形補間の仮定に基づく、RC-2 の D_{50} の破砕率は、次式で算定できることになる。

$$\text{Rate}_{RC2} = \text{Rate}_{RC3} + \frac{\text{Rate}_{RC1} - \text{Rate}_{RC3}}{\sigma_{RC1} - \sigma_{RC3}} \times (\sigma_{RC2} - \sigma_{RC3}) \quad (3)$$

ここに Rate_{RC2} , Rate_{RC3} および Rate_{RC1} は、それぞれ RC-2, RC-3, RC-1 の任意の粒径の破砕率を与えることになる。図 9 の事例は、平均粒径の破砕率を求めたものとなっている。また、 σ_{RC1} , σ_{RC2} , σ_{RC3} は、それぞれ RC-1, RC-2, RC-3 の破砕前の D_{50} 粒径の破砕応力であり、具体的には単粒子強度試験から 12.1 MPa, 4.02 MPa, 2.26 MPa と求まっている。

上式を用いて図 9 に示す考え方に基づいて具体的に RC-2 の D_{50} の変化率を求めると、次式となり、

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{RC2} &= 87.19 + \frac{63.64 - 87.14}{12.1 - 2.26} \times (4.02 - 2.26) \\ &= 83 \quad (\%) \end{aligned} \quad (4)$$

RC-2 の変化率は 83 % と求まる。

これから 1200 回転下での平均粒径 D_{50} は次式で表現され、

$$\begin{aligned} D_{50(1200)} &= D_{50(0)} - (D_{50(0)} \times \text{Rate}_{RC2}) \\ &= 22.80 - (22.80 \times 0.83) \\ &= 3.88 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5)$$

具体的に破砕後の D_{50} が 3.88 mm と推定される。なお、添字のカッコ内の数字は回転数を意味している。

A4) 所定の回転数での他の粒径 (D_{10} , D_{20} , ..., D_{90}) についても同様に A1) から A3) の流れの計算を行うことで、求めたい RC-2 の破砕後の粒度分布の推定が可能となる。図 6 は、その一連の計算の流れをまとめたものである。

5.3 検証結果

図 10 は、推定した RC-2 の粒度分布の結果と実際の RCM500 から得られた粒度分布の結果を比較したものである。この結果から推定された RC-2 の粒径加積曲線は、回転数に関係なく実際の RCM 結果とかなりの精度で一致していることが読み取れる。ここでの方法の適用範囲を広げるためには、母材の特性なども踏まえた基準となる材料の基本データのデータベース化も進めておくことが大切である。

5.4 破砕後の粒度予測における破砕応力の重要性

図 11(a), (b) は、RC-2 の破砕応力が実際よりも小さい 1.0 MPa であった場合と実際よりも大きい 20 MPa の場合の粒度分布の予測値をそれぞれ示したものである。図中では、実際に測定された破砕応力で予測される実測に近い予測値を実線で示している。この結果から、実測の破砕応力よりも小さな破砕応力を与えると粒度分布の破砕率を過大に予測し、大きな破砕応力

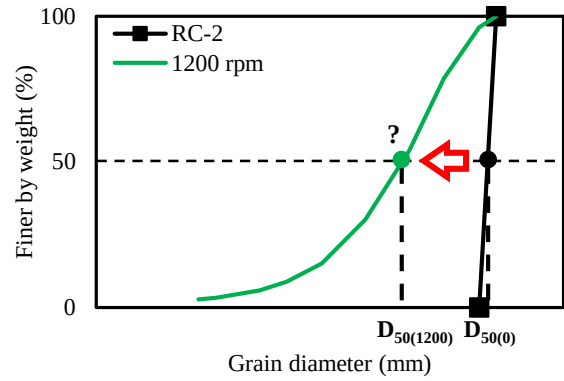


図 7 1200 rpm 下での RC2 の D_{50} と破砕率の算定

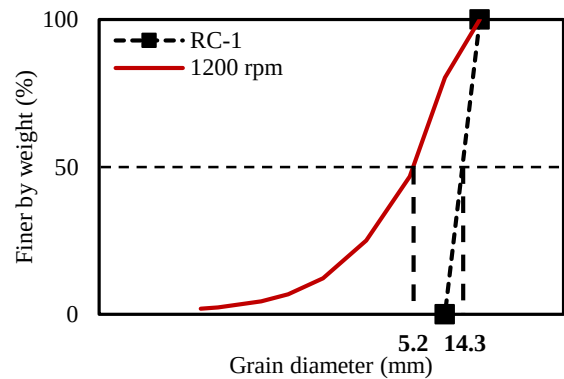


図 8 1200 rpm 下での RC1 の D_{50} の破砕率の算定

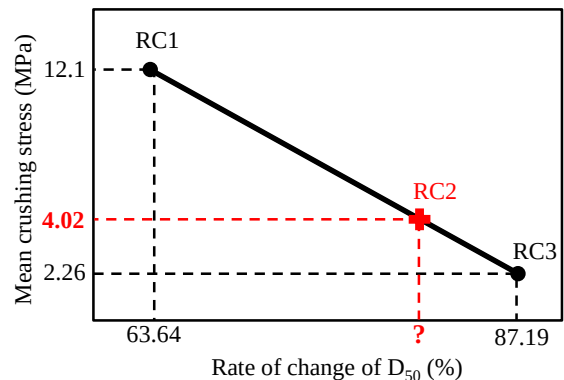


図 9 1200 rpm 下での破砕応力(対数表示)と D_{50} の破砕率の一義性の仮定

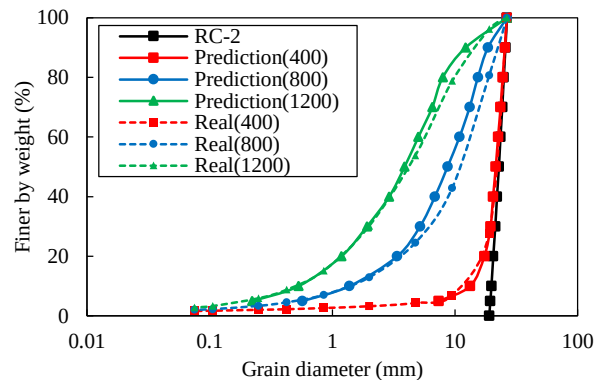


図 10 各 rpm 下での RC-2 の粒度分布の予測結果と実測結果の比較

を与えると、実際よりも破砕率を過少に予測することが読み取れる。このことは、適切な粒度分布の予測を行うためには、破砕応力を適切に求めておくことが重要であることを示唆している。

6. 破砕・混合装置内での特徴的な土粒子の動き

RCM500 の室内上部に高速撮影が可能なビデオカメラを設置し、試料を投入後の動きを観察し、その挙動の把握を試みた。具体的には、1 段当たり 8 ブレードが 2 段設置された TM500 の装置を用い、600 rpm の条件で砂質土と粘性土が装置上部から投入された後の土粒子群の動きが撮影されている。ここでは、この条件で撮影された動画での土粒子の動きの特徴的な時点を切り取ったものを図 12 に示している。図中の矢印は、土粒子の移動方向とその大きさを表現している。図 (a) は、試料を投入して直ぐの状況、図 (b) は、投入後少しの時間が経過し、土粒子が特徴的な動きを示した状況を切り取っている。動画での土粒子の動きを整理すると、1) 試料が投入された初期段階では、全体的に土粒子はブレードの回転する方向にかつ下向きに移動している(図(a)参照)。ただし、特に細粒の土粒子の多くは 1 段目のブレードよりも上部に留まっている状況が読み取れている。2) ある程度時間が経過すると、特に細粒の土粒子は、ブレードの回転方向にかつ上方に向かって移動する土粒子がみられるようになる。この理由の一つにブレードの回転に伴う装置内の気流が上向きになっていることが考えられる(図(b)参照)。また、3) 時間の経過とともに最終的には土粒子が下方に移動していることも読み取れる。このように装置内部での土粒子の動きが体系的に分析できれば、回転式破砕混合のメカニズムを理解し、新しい装置の構造を検討するうえで有益な情報となるものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、既に広く現場で活用されている RCM の小型機を用いて、粒度の悪い土質材料の特性を土粒子破砕の励起によって改善させる効果について、実験的検討を行うとともに、土質材料の単粒子強度に基づいて土質材料の破砕後の粒度分布を予測する考え方を提示し、その考え方の妥当性を検証することで、低品質地盤材料の効率的な粒度調整の一つの方向性を示した。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 複数の砕石と人工材料である RC40 を用いた単粒子強度試験を通して、単粒子の強度と破砕の形態を確認するとともに、単粒子の平均粒径と破砕応力の間には一義的な関係があることを示した。
- 2) 破砕応力は単粒子の平均粒径と密接な関係を有し、破砕応力は平均粒径のみならず母材の特性に依存することを述べたうえで、母材が同一であれば平均粒径の大きい土粒子ほど破砕応力は小さくなることを示した。
- 3) 今回用いた複数の砕石と人工材料である RC40 と

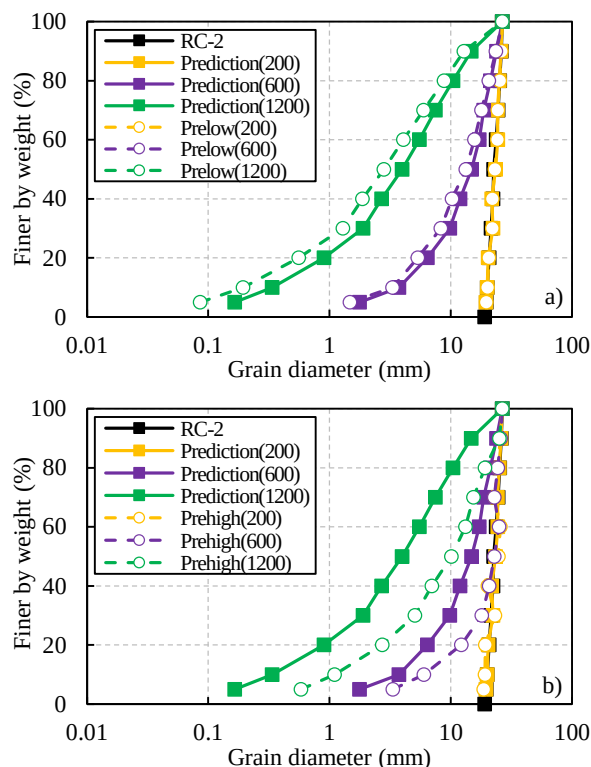


図 11 RC-2 の破砕応力を変化させた場合の粒度分布の予測：(a)実際よりも小さい 1.0 MPa であった場合、(b)実際よりも大きい 20 MPa の場合

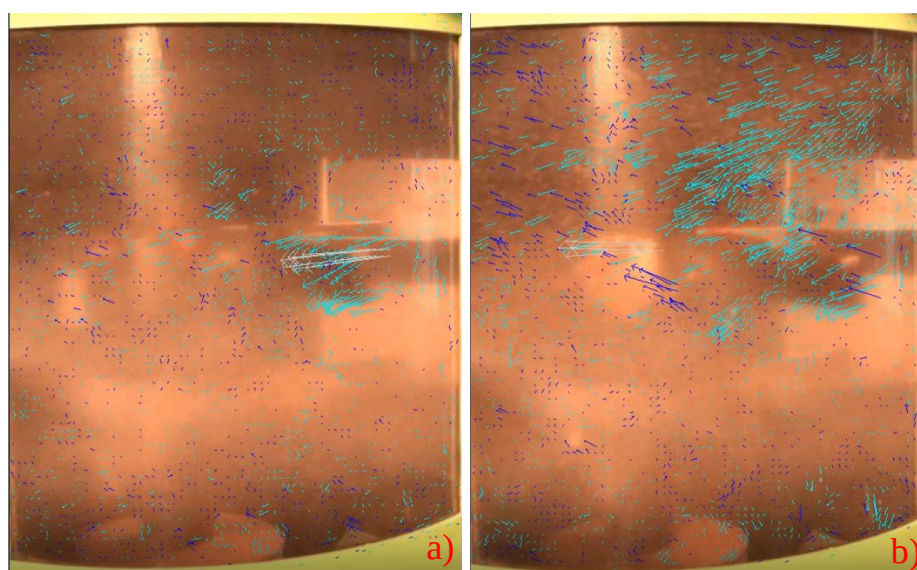


図 12 TM500 の装置内で観察された特徴的な土粒子の動き：(a) 試料を投入した初期の土粒子の動き（投入後 10 秒）、(b)装置内での土粒子が上向きの動きをする特徴的な様子（投入後 56 秒）

に、RCM500 の回転数が 1200 rpm を超えると粒度の良い材料として粒度調整できることを確認した。

- 4) 初期情報として基準材料の回転数に応じた破砕前と破砕後の粒度，ならびに単粒子強度試験に基づく基準材料と粒度を予測したい材料の代表粒径（平均粒径）での平均的な破砕応力が事前に得られていることを前提として，RCM の回転数に応じた粒度調整用材料の粒度分布の予測法を具体的に示した。また，その予測法を適用して RC-2 の粒度の予測を試みた結果，回転数によらずかなりの精度で実験から得られる粒度分布を推定できることを明らかにした。
- 5) この方法の特色は，代表粒径の破砕応力と粒径の破砕率が図 9 で示しているように線形関係で表現できることをよりどころにしている点にある。これにより回転数に応じた粒度分布を比較的簡単に予測できることになる。また，逆に調整したい粒度分布になるような回転数を同定することもこの考え方を利用すれば可能となる。
- 6) 破砕混合試験中の装置内の土粒子の動きを高速ビデオで観察し，特徴的な動きとして，ある段階で土粒子が上方に移動する状況が生まれていることを言及した。

謝辞

本研究は，九州大学と日本国土開発㈱との共同研究として実施されたものであり，ご支援頂いた多くの関係者の皆さんに感謝申し上げます。また，実験や解析を進めるにあたり，技術スタッフの中島通夫氏，九州大学工学府博士前期課程 2 年の相良知輝氏と中山修一朗氏には多大な協力を頂いた。この報文の主要な部分は，Jaewan Kim 氏（元九州大学工学府博士前期課程）の修士研究を取りまとめたものである。Kim 氏には，献身的な実験と分析を行っていただいた。ここにあらためて感謝申し上げます次第である。

参考文献

- 1) 回転式破砕混合工法研究会，「あらゆる建設発生土をリサイクルする回転式破砕混合工法」，広報パンフレット，2022.
- 2) Kwag, J. Ochiai, H. and Yasufuku, N. “Yielding stress characteristics of carbonate sand in relation to individual particle fragmentation strength”, Engineering for Calcareous Sediments, Balkema, Rotterdam, Al-Shafei (ed.), ISBN 90 5809 037 X. (1999)
- 3) Kwag, J. Ochiai, H., Yasufuku, N. and Ohno, S. “Strength Parameter of Sands in Relation to Soil Crushability”, Technology Reports of Kyushu university, Vol. 70, No. 4. (1997)
- 4) 加登文学,中田幸男,兵動正幸,村田秀一 “地盤材料の単粒子破砕特性”，土木学会論文集,No.673,III-54,pp.189-194,2001
- 5) 加登文学,中田幸男,兵動正幸,村田秀一 “破砕性材料の粒子特性と一次元圧縮特性”，土木学会論文集,No.701,III-58,pp.343-355,2002
- 6) (財)国土技術研究センター，河川土工マニュアル，平成 21 年 4 月
- 7) Kim J. “Study on the efficiency of mechanical stabilization for geomaterials based on crushing and mixing method combination, Master course thesis in Kyushu University, (2020.3).