鉛直立坑閉塞可視化モデルを用いた 鉱石閉塞現象可視化と閉塞条件の評価*

佐藤 晃¹ 森 拓実²
中里 計麻³

Visualization and Assessment of Hang-Up Phenomena Using Vertical Transparent Ore-Pass Models

by Akira SATO^a, Takumi MORI^b and Keima NAKAZATO^c

- a. Associate Professor, Graduate School of Advanced Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto 8608555, Japan
(Corresponding author, E-mail: asato@kumamoto-u.ac.jp)
b. Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto 8608555, Japan
c. Omuta City Office, Ariakemachi 2-3, Omuta, Fukuoka 8368666, Japan

Limestone is one of the most important mineral resources, and it is only one mineral that can be fully supplied by domestic producers. Generally, a certain amount of ores is stored in the ore passes temporally after blasting excavation, and extraction is carried out from the bottom of the ore pass. However, the hang-up phenomena in the ore passes sometimes occurred and some cases are recently reported. Once the hang-up phenomena in the ore passes occur, it will cause serious problems.

In this study, ore flow experiments in the vertical ore passes were conducted using ore pass models which was composed of transparent acrylic tubes, and the conditions of hang-ups were discussed. Since the ore passes were assembled with transparent tubes, it was also possible to observe the hang-up phenomenon directly. To discuss the effect of cross-sectional shapes of ore passes, two kinds of ore-passes, that is, circular and square shapes of cross-sections, are prepared. Using various sizes of ores, the relation between ore size and cross-sectional area was also discussed. It was found that the hang-up phenomenon almost did not occur when the ratio of ore pass size to the mean grain size of ores exceeds the value of 5. It was also found that the circular-shaped ore passes were a little preferable to avoid ore pass hang-ups compared with the square ore pass. The same procedure was applied to the mixed ores which two types of ores with different mean diameters are mixed. In this case, also, the results were almost the same as the results obtained by single-size ores. 3D-DEM analysis was also conducted, and the validity of the experiments was discussed.

KEY WORDS: Hang-Up, Cross-Sectional Shape, Vertical, Ore Path, Limestone, Open-Pit Mining

1. はじめに

日本には全国各地に石灰岩が分布しており、現在日本では200以上の石灰岩鉱山が稼働している。令和2年度においては年間約1億3千万トンもの石灰岩が採掘されており¹⁾、日本では数少ない自給率が100%の鉱物資源である。また、石灰岩の鉱床の多くは山地に分布しているため、ベンチカットと鉱石を払い出すための立坑を組み合わせた方法が一般的であり、我が国の石灰石鉱山では、武甲山にみられるように700mにも達する鉱石輸送用の立坑が開発されている²⁾。一般的に、石灰岩はまず立坑に投入され、ある一定量が貯鉱された後に立坑底部の払出口から払い出される。鉱石の払い出しに当たり大きな問題となるのが払い出し立坑内での鉱石の閉塞である。国内外の鉱山においてもその事例が幾つか報告されている³⁻⁷⁾。閉塞の発生は、生産に支障をきたし、

その解消には、例えば立坑上部から大量の水を注入することで閉塞を解消するなど多大な労力を費やすため、閉塞が起きにくい発生条件を解明する必要がある。

現在、国内での露天掘り鉱山の場合、立坑形状のほとんどが円形断面である。一般には、レイズボーリングにより最大6m程度の鉛直円形立坑の掘削が可能である。レイズボーラー直径以上の断面積が必要な場合でも、基本的には発破により円形に拡張される。しかし、閉塞を避ける観点から円形断面以外の形状、例えば正方形断面の適用の可能性も検討されている。Hadjigeorgiouら⁸⁾は鉱石直径の2倍程度の直径をもち、高さが30mの立坑を対象として、円形および正方形断面の立坑閉塞状況を3次元個別要素法(3D-DEM)により解析を実施し、円形断面の方がやや閉塞は起こりにくいことを示している。ただし、この研究で対象としている立坑の高さは30mであり、日本国内の露天掘り鉱山で運用されている立坑に比較して1/10程度と小さい。そのため、より上部での閉塞や鉱石の自重による上載圧の影響は反映されていない。また、特に摩擦係数や粘着力といった粒子同士の相互作用については言及しておらず、立坑と粒子の寸法比をパラメータとしている。これはいわゆるインターロッキングハングアップと呼ば

*2021年6月28日受付 2021年10月1日受理

1. 正会員 熊本大学大学院先端科学研究部 准教授

2. 熊本大学大学院自然科学教育部 大学院生

3. 大牟田市役所

[著者連絡先] E-mail: asato@kumamoto-u.ac.jp (熊大・佐藤)

キーワード: 閉塞, 断面形状, 鉛直立坑, 石灰石, 露天掘り

Fig. 1 Visualization system of hang-up phenomena.
The part of vertical ore pass is made by acrylic tube.

Fig. 2 Schematics of ore flow.

(a) Circular tube

(b) Square tube

Fig. 3 Cross-section of acrylic tube. (a) Circular tube, (b) Square tube.

れる現象についての研究である。一方, Sato ら⁹⁾は, より大断面, かつ, 日本で開発されている露天掘り鉱山の立坑の規模を念頭に400mの立坑を対象として2次元個別要素法により閉塞解析を実施している。ここでは, 鉱石の摩擦係数および粘着力といった粒子間あるいは粒子と壁面との相互作用を考慮し, これらが閉塞に及ぼす影響を検討している。これはいわゆるコヒージョンハングアップと呼ばれる現象についての研究である。さらに佐藤ら¹⁰⁾はこの解析を3次元に拡張し, 円形断面と正方形断面とで断面形状が閉塞に及ぼす影響について検討している。その結果, このようなコヒージョンハングアップによる閉塞回避には正方形断面の方が有利である事を示している。

これらの研究を踏まえ, 本研究では立坑断面に対して十分な高さを持つ立坑モデルを用い, かつ, 断面形状が異なる円形および正方形の立坑モデルを対象として, 立坑内部での鉱石の閉塞現象を再現する。ここでは, 立坑をモデル化したアクリル製閉塞現象可視化装置を用い, 鉱石試料を使った立坑閉塞現象を再現し, 閉塞が発生する諸条件の特定を試みる。本研究で用いる鉱石試料は基本的には乾燥状態であり, 粘着力はほぼ0と見なすこと出来るものであるが, 摩擦力は存在する。よって, 基本的にはインターロッキングハングアップを基本とした実験となる。先に述べたように, 断面形状の影響については, 円形断面, 正方形断面の2種類の異なる形状の断面の立坑を想定し実験を行うことで, 断面形状が閉塞に与える影響を考察する。他にも, 鉱石の粒径, 立坑の内径が及ぼす閉塞への影響を明らかにする。また Sato ら¹⁰⁾が実

施した3次元個別要素法を用いて数値解析を実施し, 実験結果との関係について考察する。

2. 閉塞現象可視化装置及び鉱石試料

2・1 アクリル製閉塞現象可視化装置

本研究では立坑鉛直部分での閉塞を想定し, Fig. 1に示す立坑部分をアクリルチューブで作製した閉塞現象可視化装置を用いて閉塞現象の可視化を試みる。立坑の払出口付近の模式図を Fig. 2に示す。このように立坑底部払出口部分は開閉できるものとなっており, 粒子を立坑内に貯留した後, Fig. 2の下部に示すストッパーを解放させることで払い出しができる。アクリルチューブ立坑モデルは立坑断面形状による影響を考察するため, Fig. 3に示すように円形断面および正方形断面でそれぞれ寸法の異なる3種類を用意した (Table 1)。ここでは主に形状の影響を検討するために, 円形断面チューブと正方形断面チューブでは断面積が等しくなるようにチューブ内径 D およびチューブ内辺長 L を設定した。

2・2 閉塞実験に用いた鉱石

閉塞実験に用いた鉱石は, Fig. 4に示すように Particle A から E の平均粒径の異なる5種類の鉱石を用いた。Particle A は大理石であり, Particle B, D, E は石灰石である。また, 可視化装置内での閉塞状況の視認を容易にする目的で, Particle C として有色鉱物を多く花崗岩を用いた。それぞれの平均粒径をまとめて Table 2に示す。また, それぞれの鉱石については, 平板上に鉱石を自由落下させ, 安息角 θ を求め, 次式の関係から摩擦係数

Table 1 Size of tubes.

Types	Diameter D , mm Side length L , mm	Area, mm ²	Height, mm
Circular 1	80	5,000	2000
Circular 2	90	6,300	
Circular 3	100	7,800	
Square 1	71	5,000	
Square 2	80	6,300	
Square 3	89	7,800

(a) Particle A (23.4mm)

(b) Particle B (20.0mm)

(c) Particle C (14.0mm)

(d) Particle D (12.8mm)

(e) Particle E (9.2mm)

Fig. 4 Ores used for the hang-up test. (a) Particle A (23.4mm), (b) Particle B (20.0mm), (c) Particle C (14.0mm), (d) Particle D (12.8mm), (e) Particle E (9.2mm).

Table 2 Mean particle size and values of parameter.

Items	Particle A	Particle B	Particle C	Particle D	Particle E
Mean diameter	23.4mm	20.0mm	14.0mm	12.8mm	9.2mm
Angle of repose	28.5°	34°	30°	35.5°	32.5°
Friction coefficient	0.543	0.675	0.577	0.713	0.637

μ を推定した。

$$\mu = \tan \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

それらの結果も併せて Table 2 に示す。

2・3 実験手順

鉱石の立坑モデルへの充填および払出しは以下のような手順で行った。まず、立坑モデル下部は、先に Fig. 2 で示したように扉を閉めストッパーで固定しておく。アクリルの立坑モデルの上部は解放されており、この上部から立坑モデル内に鉱石を自由落下させ充填する。充填が完了した後、立坑モデル下部に設置したストッパーを素早く取り払い、立坑下部の扉を解放することにより鉱石を流出させ、払出しを行う。充填した鉱石がすべて流出した場合には「閉塞なし」と判定する。また、流出の途中で閉塞が発生した場合には「閉塞あり」と判定し、閉塞した位置（高さ）を記録するほか、デジタルカメラで閉塞の状況を種々の方法から記録するものとする。この一連の過程を 1 サイクルとして、本研究で準備した寸法の異なる円形断面および正方形断面を有する計 6

本の立坑モデルに対して鉱石流出試験を実施した。また、用いる粒子は先に示した Particle A ～ E の 5 種類についてそれぞれ 1 本の立坑モデルにつき 20 回ずつ、また、後述する混合粒子に対しても同じように鉱石流出試験を 20 回ずつ、計 960 サイクルの試験を実施し、それぞれの条件と閉塞の発生との関係について検討する。

3. 単一粒径鉱石を用いた閉塞実験

3・1 閉塞現象の確認

先に示した Particle A から Particle E のそれぞれの粒子を用いて、先に実験手順で示したように鉱石流出試験を実施した。その結果、閉塞が起きずに鉱石が流出する場合と、閉塞が発生する場合がそれぞれ観察された。本研究ではアクリルチューブを用いることにより内部の閉塞状況を外側から観察することができる。その結果、最も多く発生したのが Fig. 5 (a) に示す鉱石がアーチを形成するパターンである。これはアーチ上部の荷重を最も効率よく保持できる形状で有り¹¹⁾、ホッパー出口付近での粒状体の閉塞現象などでも観察される形態である¹²⁾。また、同程度の頻度で、Fig. 5 (b)

Fig. 5 Observed types of hang-ups using single size particle. (a) Arch hang-up, (b) Flat hang-up, (c) Inclined hang-up, (d) Hang-up near exit.

Table 3 Frequency of hang-ups using single size particle.

Sape of tube	D or L , mm	Area, mm ²	Frequency of hang-ups				
			Particle A	Particle B	Particle C	Particle D	Particle E
Circular tube	80	5000	15	8	0	1	0
	90	6300	6	1	0	0	0
	100	7800	0	1	0	0	0
Square tube	71	5000	20	8	0	0	0
	80	6300	10	2	0	0	0
	89	7800	3	0	0	0	0

に示すようにアーチは形成しないが閉塞部がほぼ平坦になるパターンが観察された。また、これらよりは頻度は少ないものの、立坑内部で斜めに閉塞する場合 (Fig. 5 (c))、また出口付近で閉塞するパターン (Fig. 5 (d)) も観察された。いずれの場合も、粒子が壁面に押しつけられる圧縮力により発生する摩擦力がその粒子の作用する上載力を上回り、さらにそれに近接する粒子同士の圧縮力がアーチ状にあるいは水平方向の接線方向に作用し、その際に生じる圧縮力により上載力を支えているものと考えられる。鉱石がアーチを組んで閉塞するパターンは円形断面立坑、正方形断面立坑いずれでも観察されたが、正方形断面立坑の場合、平面と平面の間の最短の距離でアーチを組んでおり、対角線上にアーチを組むことはなかった。また、鉱石流出の過程で一時的に閉塞が発生し、数十秒後に急に落下する現象が観察された。以下では、このような一時的な閉塞現象を一時閉塞と呼ぶものとする。本研究では、合計 960 回の鉱石流出試験の中で 2 度の一時閉塞が観察された。また、一時閉塞までは至らないものの、鉱石が一様に流れるのではなく、立坑内で鉱石が塊を形成し、分裂しながら落下する現象も観察された。これらの閉塞現象をまとめたものが Table 3 である。なお、この表では上述の一時閉塞及び分裂落下は閉塞には含めていない。

3・2 鉱石の粒径および立坑の寸法が閉塞に及ぼす影響

先に Table 3 で示した結果を基に、立坑モデルの寸法と粒径との関係について考える。まず、直径 80mm 円形断面立坑モデルを用いた結果について見てみると、平均粒径の大きい順に粒径 23.4mm の Particle A では 15 回の閉塞が発生し、以下、20.0mm の Particle B で 8 回、14.0mm の Particle C で 0 回、12.8mm の Particle D で 1 回、9.2mm の Particle E で 0 回の閉塞が発生した。このように、粒径が小さくなるほど明らかに閉塞回数が減少し閉塞が起きにくくなっていることが分かる。同じように、直径 90mm の立坑モデルでは粒径の大きい順にそれぞれ 6 回、1 回、0 回、0 回、0 回であった。これらの場合も、粒径が小さくなるほど閉塞が起きにくくなる傾向は共通している。一方、同じ粒径の鉱石を寸法の異なる立坑モデルで流出させた場合、立坑モデルの寸法が大きくなるにつれて明らかに閉塞が起きにくくなっている。上述のような傾向は、正方形断面立坑モデルの場合も同様である。

さらに、円形断面と正方形断面で同じ断面積どうしを比較すると、正方形断面の方が閉塞回数は大きい。つまり、同じ断面積で比較した場合には円形断面の方が閉塞回避の点では有利であると言える。

Fig. 6 Relation between hang-up probability and cross-sectional area using single size particle.

Fig. 7 Relation between hang-up probability and tube sizes using single size particles. (a) Circular tube, (b) Square tube.

3・3 立坑断面積と閉塞確率の関係

ここでは、立坑断面積と閉塞確率の関係について考察する。ここで閉塞確率とは、それぞれの立坑チューブ、鉱石で20回ずつ鉱石流出試験を実施しているが、20回中に閉塞した割合を閉塞確率とした。粒径の異なる全ての粒子について、この閉塞確率と立坑モデルの断面積との関係を示したものをFig. 6に示す。図の●は円形断面立坑の結果であり、■が正方形断面立坑の結果である。この図から、同じ断面積を考えた場合、正方形断面立坑のモデルの方が高い閉塞確率を示している。このことから、円形断面の方が閉塞回避の点では有利であると言える。

さて、粉体工学の分野では円錐形ホッパー内での粉体の閉塞について研究が行われてきた。円錐形のホッパーの場合でも、出口形状が円形の場合と正方形の場合について考察が行われ、例えば、Asoegwuら¹³⁾は円形出口および正方形出口を有するホッパーからの水分を含む穀物粒子の流出速度を評価しており、円形出口を有するホッパーの方が流出速度は若干大きいことを示している。また井伊谷¹⁴⁾は閉塞をおこさず順調な流出を確保するためには、円形断面の場合には正方形断面の85%程度の断面積でよいことを示している。ホッパーの場合には投入部からオリフィス部に掛けての傾斜角も重要な要素となるが、本研究のように傾斜がない鉛直のチューブを用いた実験の場合でも、先にFig. 6に示した結果はこれらの研究と調和的である。

3・4 内径粒径比による閉塞確率の評価

次に、鉱石の平均直径 d と円形断面チューブの直径 D および正方形断面チューブの辺長 L との関係について考える。縦軸を閉塞確率、横軸を鉱石の平均直径 d に対する立坑モデルの寸法比

D/d および L/d として整理した結果をFig. 7に示す。この図より、円形断面立坑、正方形断面立坑に関わらず寸法比 D/d 、 L/d が5以上になると閉塞はほぼ発生しないことが分かる。また、図中の点線は D/d 、 L/d が5以下における近似直線であり、 D/d 、 L/d が5以下の範囲では閉塞発生確率は線形に減少していくことがわかる。このようにチューブの寸法に対する閉塞確率は、断面形状にかかわらずほぼ同じ出る事が分かる。粉体工学の分野におけるホッパー流出口の研究から、流出口の直径が粒子径の4～5倍程度以下になると閉塞するということが分かっている¹⁵⁾。本研究の場合は、ホッパーのように傾斜部はなく鉛直の壁面だけが存在するが、閉塞は立坑の内径が粒子径の5倍以下と同じ結果になっている。さらに、Daviesら¹⁶⁾は本研究で対象としている鉱石より1オーダーサイズが小さい数mm程度の粉体が長方形スロットを通る場合でも、スロット幅が粉体直径の5程度以下になると、粉体の流出が不連続あるいは閉塞が発生することを示している。

以上のように、粒子サイズの異なる粒子の場合でも出口の寸法と粒子の相対的な大きさから閉塞の発生条件が決定されており、露天掘り鉱山のような立坑においても閉塞を回避するためには立坑内径が粒径の5倍以上にする必要がある。日本における大規模な石灰石鉱山の場合には、多くはこの条件を満たすものの、国外においては内径が数m程度の鉱石運搬用の立坑も運用されている⁸⁾。このような小規模の立坑では、鉱石の粒径を十分に小さくする必要がある。

4. 混合粒径鉱石を用いた閉塞実験

ここでは平均粒径の異なる混合粒径鉱石を混合し、配合割合が

Table 4 Frequency of hang-ups using mixed particles.

Types	D, L, mm	Area, mm^2	Particle A : C			Particle C
			Particle A = 7 : 1 (Group A)	Particle A : C = 3 : 5 (Group B)	Particle A : C = 1 : 7 (Group C)	
Circular	80	5000	15	13	0	0
	90	6300	6	4	0	0
	100	7800	0	0	0	0
Square	71	5000	20	16	3	1
	80	6300	10	6	2	0
	89	7800	3	1	0	0

(a) Group A with circular tube

(b) Group C with square tube

Fig. 8 Observed types of hang-ups using mixed particles. (a) Group A with circular tube, (b) Group C with square tube.

閉塞に与える影響について検討した。用いた鉱石は Particle A および Particle C であり、A : C の体積混合比を 7 : 1 (Group A) , 3 : 5 (Group B) および 1 : 7 (Group C) の 3 種類として鉱石流出試験を実施した。ここでは、1 つの立坑モデルについて、Group A, Group B, Group C の混合鉱石でそれぞれ 20 回の鉱石流出試験を実施した。その結果、単一鉱石を用いた場合と同様に閉塞が確認された。用いたチューブと鉱石グループごとの閉塞回数をまとめたものを Table 4 に示す。なお、単一鉱石の場合と比較するために、Particle A および C 単体の閉塞回数も併せて表中に示す。

4・1 鉱石の粒径および立坑の寸法が閉塞に及ぼす影響

まず例として、直径 80mm 円形断面立坑モデルを用いた結果について見てみる。平均粒径の大きい順に粒径 23.4mm の Particle A では 15 回の閉塞が発生し、以下、Group A で 13 回、Group B で 0 回、Group C で 0 回、14.0mm の Particle C で 0 回の閉塞が発生した。このように、大きな粒径の割合が小さくなるほど明らかに閉塞回数が減少し閉塞が起きにくくなっていることが分かる。更に他の寸法のチューブについても、チューブの直径が大きく、かつ、粒径が小さくなるほど閉塞が起きにくくなる傾向は共通している。そしてこのような傾向は、正方形断面立坑モデルの場合も同様であり、また、単一鉱石の場合と同様に正方形断面の方が閉塞回数は多くなる傾向にある。

次に混合粒径鉱石の閉塞状態について考える。閉塞が起きた場合の閉塞部付近の様子の代表例を Fig. 8 に示す。この図からも分かるように、混合されたときの閉塞部分は粒径の小さい Particle C ではなく、粒径の大きい Particle A がアーチを形成し閉塞する傾向にあり、大きい粒子が閉塞の原因になっていることが確認できる。このことから、立坑への大塊の投入を避けることは、閉塞を回避する上でも重要である事が分かる。

4・2 混合粒径鉱石の閉塞確率の評価

先に示した第 3 章と同様に、立坑断面積と閉塞確率の関係について考察する。この閉塞確率と立坑モデルの断面積との関係を示

したものを Fig. 9 に示す。図の●は円形断面立坑の結果であり、■が正方形断面立坑の結果である。この図から、同じ断面積を考えた場合、単一粒径鉱石と同様に正方形断面立坑のモデルの方が高い閉塞確率を示している。

次に、縦軸を閉塞確率とし、横軸を鉱石の直径 d に対する立坑モデルの寸法の比 D/d 、および D/L として結果をまとめたものが Fig. 10 である。この図での鉱石の直径 d は、混合した鉱石の体積比による相当粒径を用いている。この図より、単一粒径鉱石と同様に、複合粒径鉱石においても、円形断面立坑、正方形断面立坑に関わらず鉱石の体積比による相当粒径 D/d 、 L/d が 5 以上になると閉塞しなくなることが分かる。ただし、先に Fig. 7 に示した単一鉱石の場合と比較すると、同じ粒径比に対する閉塞確率は若干下がる傾向にある。

5. DEM による閉塞現象の検証

本研究では模型実験により立坑閉塞について検討しているが、先に示した通り立坑の閉塞に関してはいくつか数値シミュレーションが行われている。Hadjigeorgiou ら⁸⁾が 3 次元個別要素法による解析を行っている。一方、Sato ら⁹⁾は、日本における数百 m におよぶ長大な立坑を対象として、2 次元個別要素法により閉塞解析を実施している。いわゆるコヒージョンハングアップに関する現象に対する研究であり、後に Sato ら¹⁰⁾は 3 次元個別要素法により同じコヒージョンハングアップ現象を 3 次元で解析を実施している¹⁰⁾。これらの解析では、閉塞の主な原因は鉱石どうしの粘着力と摩擦力であるとして、閉塞発生の有無を閉塞一流出マップ (Flow out and hung-up map) として整理している。以下では、Sato ら¹⁰⁾が実施した解析手法を適用し、本研究で用いている立坑モデルの閉塞解析を実施した。解析では、実験で用いた立坑の寸法と同様の立坑モデルを作製し、平均粒子も実験で用いた値と同じものを用いた。また、粒子は Sato ら¹⁰⁾の解析と同様に球形粒子を用いた。ここでは、粒子どうしの種々の摩擦係数 ϕ

Fig. 9 Relation between hang-up probability and cross-sectional area using mixed particles.

Fig. 10 Relation between hang-up probability and tube sizes using mixed particles. (a) Circular tube, (b) Square tube.

と粘着力 c を与え、それぞれ閉塞解析を実施する。そして、閉塞が起きたとき、閉塞が起きなかったときの摩擦係数 ϕ と粘着力 c の組み合わせを閉塞一流出マップとして表現するものとする。

例として、本研究と同様の正方形断面立坑チューブ寸法に基づき、Particle A の平均粒径を用いて閉塞解析を実施した例を Fig. 11 に示す。図中の ■ 印は閉塞が発生したケースであり、● 印は閉塞が発生しなかったケースである。このように種々の組み合わせで解析を実施することで、閉塞が発生する境界を推定することが出来る。図中の点線の右上側が閉塞が発生する摩擦係数 ϕ と粘着力 c の組み合わせであり、図中ではこの領域を Hang-up region と表現している。このように、立坑チューブの寸法が大きくなるにつれて閉塞領域が小さくなっていき、閉塞が起これにくくなっていくことを示している。この傾向は先に示した実験結果と同様である。また、Table 2 で示したように、本研究で用いた試料の摩擦係数は安息角により推定しており、Particle A の場合には 0.543 であった。また、試料は乾燥状態で実験を実施しており、鉱石粒子同士の粘着力は 0 と見なすことが出来る。よって、Particle A の摩擦係数と粘着力の関係を図中の × 印として示している。

次に、Particle A の摩擦係数と粘着力の閉塞一流出マップ上での位置と、閉塞領域との関係について考える。寸法が一番小さい $L=71\text{mm}$ の場合 (Fig. 11 (a)), × 印は大きく閉塞領域に偏って存在する。鉱石流出試験結果においても 20 回の鉱石流出試験を実施し 20 回全てで閉塞が発生している。 $L=80\text{mm}$ の場合 (Fig. 11 (b)), × 印は閉塞領域に入っているもの境界部分に近い。鉱石流出試験結果においても 20 回の鉱石流出試験のうち 10 回閉塞が発

生している。このように閉塞領域境界付近にある場合には、必ず閉塞が発生することはないものの、高確率で閉塞が発生すると考えることが出来る。 $L=89\text{mm}$ の場合 (Fig. 11 (c)), × 印は閉塞が発生しない領域に存在するものの、大きく境界から離れているわけではない。鉱石流出試験結果においても 20 回の鉱石流出試験のうち 3 回閉塞が発生している。このように、解析では閉塞が発生しない領域に位置するものの、閉塞が全く発生しないわけではなく、確率は低いものの閉塞が発生する可能性があることを示している。また、例えば粘土鉱物の混入などで鉱石粒子同士の粘着力が増加した場合、Fig. 11 の閉塞一流出マップ上では、摩擦係数 ϕ と粘着力 c の組み合わせは右側に移動することになり、境界に近づいていくことになる。このような場合には、立坑寸法が変わらず同じ粒径であっても閉塞が発生する可能性がある。

上記は Particle A を対象にした解析結果であるが、粒径の小さい Particle B ~ E の粒径を用いて解析を実施すると、閉塞領域は大幅に減少する。その結果、試料の摩擦係数 ϕ と粘着力 c の組み合わせは、大きく閉塞が発生しない領域に存在していた。実験結果においても閉塞回数が Particle A に比較して大幅に減少あるいは閉塞が全く発生しない結果となっている。

6. 閉塞の解消法に関する検討

これまで述べてきたように、実験においては多くの閉塞を再現することが出来た。ここではこの閉塞の解消法について考える。露天掘り鉱山では閉塞が発生した場合には大量の水を立坑に注入することにより閉塞の解消を図っている。よって、本研究でも閉塞が発生した数ケースについて立坑に水を注入し閉塞の解消を試

Fig. 11 Flow out and hung-up maps analyzed by 3D-DEM under the same condition of hang-up experiments (Square tube).

みた。しかし、チューブ体積以上の水を注入しても閉塞が解消されるケースはなかった。一方、筆者らは閉塞を確認し記録を取った後、立坑チューブをプラスチックハンマー等で軽くたたき、振動を与えることで閉塞を解消してきた。閉塞が発生した全てのケースではこの方法で閉塞を解消することが出来た。

Sato ら¹⁰⁾は3次元個別要素解析においてこの点についても言及している。まず、水の注入により起きる現象として考えられるのが、粒子間の摩擦係数および粘着力の減少である。よって、閉塞が発生したモデルに対して摩擦係数と粘着力を同時に非閉塞領域に減少させたところ、閉塞が解消されたとしている。先に Fig. 11 で示した閉塞一流出マップ上でも、摩擦係数を十分に下げることが出来れば閉塞が解消されることが期待できるが、本研究の範囲では再現できなかった。一方、Sato ら¹⁰⁾は閉塞した解析モデルに対して種々の振幅と振動数を有する波形を閉塞モデルに与え、閉塞が解消されるかどうかについて解析を行った。その結果、15Hz以上の振動を与えることによって閉塞が解消されるという結果が得られている。前述のように、本研究では振動を与えることによりほぼ確実に閉塞が解消できることから、実際に立坑内で閉塞が起きた場合でも、閉塞部に何らかの方法で振動を与えることが出来れば、閉塞が解消できるものと期待できる。しかし、そのためには閉塞箇所の特定の他、閉塞中の危険な立坑内への装置の挿入などの問題があるので、今後の研究に期待したい。

7. お わ り に

本研究では正方形、円形断面の亚克力チューブを用いた立坑閉塞可視化装置を作製し、粒径の異なる5種類の粒子を用いて鉱石流出試験を実施した。これにより、閉塞の状況を目視で確認す

るとともに、粒子と立坑の相対的な寸法と閉塞条件について考察した。また、3次元個別要素解析を実施し、実験結果の妥当性について検証した。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 平均粒径の異なる Particle A ~ E をそれぞれ用いて、断面積がそれぞれ等しい3種類の円形チューブ、正方形チューブに対して、それぞれ20回ずつ鉱石流出試験を実施し、閉塞の発生状況を確認した。その結果、多くの場合にはチューブ内で粒子がアーチを形成し閉塞していることが分かった。それ以外にも、数は少ないものの閉塞面が斜めに傾いている場合、閉塞面が水平である場合など様々な閉塞形態が観察された。
- (2) 上記(1)の試験結果に基づき閉塞確率を求めた。その結果、断面積が等しい円形断面チューブと正方形断面チューブを比較した場合、円形断面の方が閉塞発生確率が低いことが分かった。
- (3) 円形断面立坑、正方形断面立坑に関わらず、閉塞の発生確率は鉱石粒子の平均直径 d と立坑直径 D あるいは辺長 L との比により説明できることが分かった。具体的には D/d あるいは L/d の値が5以上の場合にはほぼ閉塞が発生しないことが分かった。また、 D/d あるいは L/d の値が3~5程度の場合には、その値の減少とともに閉塞確率がほぼ線形に増加していくことが分かった。
- (4) 平均粒径の異なる Particle A と Particle C を種々の割合で混合し、これを用いて同様に鉱石流出試験を実施した。まず、閉塞状況を確認した結果、粒径の大きい粒子どうしがアーチを形成するなどして閉塞していることが分かった。このことから、閉塞を避ける上で直径の大きな鉱石の立坑への投入を避けることが重要である事が分かった。

- (5) 上記 (4) の試験結果に基づき、断面積が等しい円形断面チューブと正方形断面チューブの閉塞確率を求めた。その結果、上記 (2) で示した結果と同様に、円形断面の方が閉塞発生確率が低いことが分かった。
- (6) 混合粒子の場合について、閉塞の発生確率と粒子とチューブとの寸法比 D/d あるいは L/d と関係を求めた。ここで粒子の相当平均粒径は、混合する体積比から換算した。その結果、混合粒子の場合も上記 (3) で示した結果とほぼ同じ結果となった。
- (7) 実験結果と同様の鉱石寸法、立坑チューブ寸法を用いて 3 次元個別要素解析を実施し流出閉塞マップを作成した。実験で用いた鉱石の摩擦係数は安息角から推定したものを用いた結果、実験における閉塞条件をほぼ再現できることを確認した。

References

- 1) Wesite of Limestone Association of Japan,
<https://www.limestone.gr.jp/doc/toukei/pdf/toukei2021.pdf>
- 2) K. Yagi, W. Morita, H. Saito and E. Kato: Journal of MMIJ, **100**(1984), 1011-1015.
- 3) N. Kira, H. Tsutsui, S. Yamasaki, T. Niino: Proc. MMIJ Fall Meeting (2014), Vol. 1, A7-1.
- 4) N. Kira, A.W. Jenike: Bulletin of the University of Utah (1961).
- 5) R. Kvapil: Int J Rock Mech Min Sci. **2**(1965), 25-34.
- 6) J. Hadjigeorgiou and J.F. Lessard: Int. J of Min Reclam Environ. **24**(2010), 267-282.
- 7) T. Vo, H. Yang, Russell A.R.: Int. J Rock Mech Min Sci. **87**(2016), 113-128.
- 8) J Hadjigeorgiou and J.F. Lessard: Int J of Rock Mech Min Sci. **44**(2007), 820-834.
- 9) A. Sato and Y. Obara: Journal of MMIJ, **130**(2014), 421-427.
- 10) A. Sato and H. Tang: Int J of Min. Eng. and Min. Proc., **9**(2020), 1-11.
- 11) P. Guoand and S. Zhou: Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. **37**(2013), 1048-1065.
- 12) A. Drescher, A.J. Waters and C.A. Rhoades: Powder Technology **84**(1995), 165-176.
- 13) S. N. Asoegwu, A. S. Ogunlowo and L. A. Sunday: Global Journal of Science Frontier Research: D Agriculture and Veterinary, **15**(2015)
- 14) 井伊谷鋼一: 粉体工学ハンドブック, (朝倉書店, 東京, 1965), 442-447
- 15) 柴田力, 粉粒体トラブルシューティング, (工業調査会, 東京, 2006), 34-35.
- 16) C.E. Davies, M. Desai: Powder Technology, **183**(2008), 436-440.