

DEMによる払出立坑の閉塞シミュレーション*

佐藤 晃¹ 尾原 祐三²

Blockage Simulation of Vertical Shaft for Ore Carry-Out by Discrete Element Method

by Akira SATO^a and Yuzo OBARA^b

- a. Associate Professor, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto, 860-8555, Japan
(*Corresponding author, E-mail: asato@kumamoto-u.ac.jp)
- b. Professor, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

Limestone is one of the most important mineral resources, and it is only one mineral which can be fully supplied by the domestic product. Generally limestone mines in Japan located at mountainous regions, and the combination between bench-cut method and the carry-out system using vertical shaft is widely used in the domestic mines. Generally certain amount of ores is stored in the vertical shafts temporarily after blasting excavation, and they are carried out from the bottom of the vertical shaft. However, the blockage in the vertical shafts sometimes occurred and some examples are recently reported. Once the blockage in the shafts is occurred, it will cause serious problems towards the mine operations, and a lot of works and dangerous procedures are necessary to solve the problems. It is thought that blockage is influenced by the cohesion due to clay minerals thrown into the vertical shafts, however, the quantitative and precise reason is not revealed yet.

In this study, the process of blockage occurrence was simulated by Discrete Element Method (DEM). In the DEM analysis, discontinuous circular particles are generated, and the individual movement of each particle is calculated by forward difference method. Since the movement of each ore is similar to the procedure, it is suitable method to simulate the blockage process in the vertical shaft. Here we assumed standard shaft size and ore size distributions, the conditions which causes blockage in the vertical shafts, such as cohesion and friction coefficient, were discussed. Moreover, various kinds of shaft shape including inclined shafts were also simulated, and those influences to the blockage occurrence were discussed. It was found that the cohesion between ores was the main factor to cause blockage, and that minimum cohesion existed towards any values of friction coefficient. It was also found that the wider diameter of the shafts is effective in order to avoid from blockage. The shapes of shafts are also important factor, and it was found that the blockage often occurs where the diameter suddenly becomes smaller.

KEY WORDS: DEM, Vertical Shaft, Blockage, Bench-Cut, Limestone

1. 緒 言

日本には全国各地に石灰岩が分布しており、秋吉台（山口県）、平尾台（福岡県）などカルスト地形や秋芳洞（山口県）に代表されるような鍾乳洞が日本各地に存在する。同時に、現在日本では300を超える石灰石鉱山が稼働している。平成25年度においては年間約1億5千万トンもの石灰石が採掘されており¹⁾、我が国では数少ない自給率が100%の鉱物資源である。採掘方法としてはほとんどの鉱山で露天採掘でのベンチカット採掘法が採用されている。また、石灰石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払出しのための立坑を組み合わせた方式が一般的であり、我が国の石灰石鉱山では、時に500mにも達する鉱石輸送用の立坑が使用されている。一般的に、鉱石は立坑に投入さ

れ、ある一定量が貯留された後に立坑下部から払い出される。鉱石の搬出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り、国内の鉱山においてもその事例がいくつか報告されている²⁻⁴⁾。閉塞の発生は、以後の生産に支障をきたし、その解消には、例えば閉塞箇所近くの目貫坑道で発破を実施しその振動で閉塞を解消する方法や、立坑上部から大量の水を注入する³⁾など多大な労力を有する事となる。

このような立坑内の閉塞に大きく影響する因子としては、粘着性アーチの形成、つまり落下中の鉱石に作用する粘着力が大きく影響しているとされ、茂木らは鉱山における立坑内部の鉱石挙動のモニタリングを行っている^{5,6)}。また、頓所ら²⁾により立坑設計の際に模型実験の結果から閉塞現象の回避に斜坑を用い、その最適傾斜角の提案もされるなど、立坑の寸法、形状が閉塞現象に与える影響についても検討されている。しかし、立坑において閉塞が発生する根本的な原因やその因子については明らかになっていないのが現状である。

本研究では、払出し立坑における閉塞現象を数値解析によってシミュレートし、閉塞が発生する諸条件の特定を試みる。不連続

*2014年4月17日受付 2014年6月4日受理
1. 正会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 准教授
2. 正会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授
[著者連絡先] TEL & FAX: 096-342-3694
E-mail: asato@kumamoto-u.ac.jp
キーワード: DEM, 立坑, 閉塞, ベンチカット, 石灰石

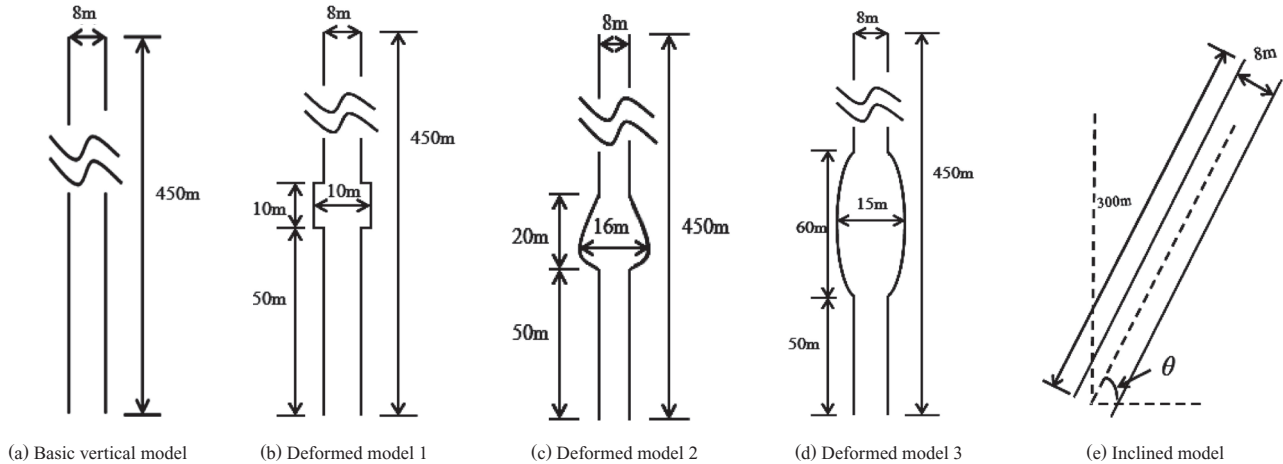


Fig.1 Models of shafts for DDM analysis.

体である鉱石粒子の挙動を計算する手法として、ここでは個別要素法⁷⁻⁹⁾(Discrete Element Method, 以下 DEM と称す)を適用する。DEM は不連続面で仕切られた要素の集合体において個々の要素ごとに独立した運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域で前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体として動的挙動を解析しようとする方法である。したがって、立坑内の個々の鉱石の挙動あるいは貯留後の粒子同士の相互作用をシミュレートする方法として適した方法であると考えられる。本研究では、一般的な立坑の寸法ならびに粒度分布を基に、種々の粒度分布および立坑モデルについて解析を実施する。また数値解析においては、立坑内の摩擦係数、粒子間の粘着力を種々変化させ、摩擦係数、粘着力が閉塞現象に与える影響を検証するほか、様々な粒度分布、立坑の寸法、形状が閉塞現象に与える影響について考察し、立坑設計のために資することを目的とする。

2. 個別要素法 (DEM)

個別要素法は、不均質材料を対象として、特に連続体としての取り扱いが困難な裂性岩盤の力学的挙動を数値解析する手法として Cundall¹⁰⁾ が導入した方法である。また、土のように基本的に多くの粒子から構成される材料に対しても十分に適用が可能であることから、Cundall and Strack¹¹⁾ が土質力学への適用を試みた。この方法は不連続面で仕切られた要素の集合体において個々の要素ごとに独立した 2 階常微分の運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域で前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体として動的挙動を解析しようとするものである。このとき、要素間に作用する力は要素の接触点を通じて伝達され、作用-反作用の法則に従うと仮定している。DEM は粒子の運動方程式を前進解法 (Forward step analysis) で解くため、方程式を連立させずに済む。従って、要素数を多くしても連立方程式を解く他の方法に比較して計算時間の短縮が可能であり、粒状体シミュレーション解析において最も有力な方法の一つとなっている⁹⁾。Cundall⁷⁾ はもともと節理の入った岩盤の力学挙動を対象としていたため、当初は多角形要素を用いた DEM を提唱した。しかし、接触判定が複雑になり解析要素数の制限を受けるなどの問題から、接触判定の容易な円形要素での検討が進められた^{7, 8)}。以降、DEM では一般的に円形要素が用いられるようになっている。

本研究では、個別要素法解析ソフトウェアとして Itasca 社製 PFC^{2D} を用いた。このソフトウェアは個別要素法による粒状体挙動解析コードで、基本となる要素形状を円とし、それらの移動および相互作用をモデル化するためのプログラムである。PFC^{2D} を使用する

ことで、露天掘り石灰石鉱山での払出し立坑において閉塞が起きる場合を想定し、標準的な立坑の寸法・形状、および広く用いられている発破規格を用いた場合の鉱石の粒度分布を参考に解析を行う。

3. 解析モデル

3・1 立坑モデル

本研究では、立坑の寸法や形状が及ぼす影響を特定するために、Fig. 1 に示すような立坑モデルを想定した。実際の立坑下部の払出口付近では鉱石搬出のために斜め方向にずらして掘削される。しかし、閉塞が起きにくいと考えられる立坑鉛直部分においても閉塞が発生している³⁾。そこで本研究では、この立坑鉛直部分での閉塞を対象として、まず、Fig. 1 (a) で示すような鉛直立坑を基本モデルとした。ここでは、払出口部分の形状は考慮せず、モデルの下部から粒子が流出させるものとする。立坑内径は鉱山で使用例がある 8m を基準としている。一般的には立坑の内径が大きくなるほど閉塞が回避されると考えられているので、その効果を検証するために内径が 9m 及び 10m のモデルについても解析を実施することとする。

さて、立坑の長さが高くなる場合、作業用の坑道 (目貫坑道) が設けられるほか、立坑内部の観察および立坑の検層の結果、立坑内部には水平方向に空洞、または壁面に変形が発生していることが分かっている。目貫坑道や立坑検層結果で得られた形状変化の影響を考慮するために、Fig. 1 (b) ~ (d) に示すような立坑内部の形状が変形しているモデルを作成した。さらに、全国には鉛直立坑だけでなく鉱床及び地山の形状の関係から斜坑も存在しているほか、閉塞回避を目的とした斜坑が設計された例もある²⁾。このような立坑の傾きが閉塞現象に与える影響を検証するために、Fig. 1 (e) に示すように水平面から立坑軸までの角度 θ が 70° 及び 80° の場合についてもモデルを作成した。

3・2 鉱石粒度分布

鉱石の粒度を決定するのは、主に発破の規格による。一般的に用いられている $\phi 127$ と $\phi 90$ の 2 つの異なる規格で発破が実施された場合について、測定された粒度分布の例を Table 1 に示す。以下、本文中ではそれぞれ PD 1 (Particle Distribution 1) および PD 2 (Particle Distribution 2) と称する。

この 2 種類の粒子分布を基本パターンとし、さらに PD 1 より平均粒径を 20% 大きくしたものを PD 3 (Particle distribution 3)、PD 2 より平均粒径を 20% 小さくしたものを PD 4 (Particle distribution 4) とした (Table 1)。本研究ではこの 4 種類の粒子を使用して粒度分布による影響をより詳細に検証する。

Table 1 Particle size distributions.

Particle distribution	PD 1 (Blasting size $\phi 120$)	PD 2 (Blasting size $\phi 90$)	PD 3	PD 3
Mean diameter d_m , m	0.378	0.311	0.454	0.249
Standard deviation σ , m	0.311	0.070	0.311	0.070

Table 2 Parameters of particles and walls.

Shape of shafts	Basic vertical model	Deformed model 1	Deformed model 2	Deformed model 3	Inclined model
Inner diameter (main part), m	8, 9, 10	8	8	8	8
Particle distribution (Table 1)	PD1~PD4	PD1	PD1	PD1	PD1
Friction coefficient of particles	0.5~10	0.5~10	0.5~10	0.5~10	0.5~10
Friction coefficient of walls	0.5~10	0.5~10	0.5~10	0.5~10	0.5~10
Cohesion between particles, N/m	$1.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$
Normal stiffness of particles $k_{p,n}$, N/m	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7
Shear stiffness of particles $k_{p,s}$, N/m	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7
Normal stiffness of walls $k_{w,n}$, N/m	1.0×10^8	1.0×10^8	1.0×10^8	1.0×10^8	1.0×10^8
Shear stiffness of walls $k_{w,s}$, N/m	1.0×10^8	1.0×10^8	1.0×10^8	1.0×10^8	1.0×10^8

3・3 解析手順

PFC^{2D}では、モデル作成と同時に壁面の力学パラメータを設定する。ここでは立坑壁面は摩擦やせん断によって切削されないと仮定し固定面とした。さらに、立坑壁面の摩擦係数も設定した。立坑モデルのパラメータ設定が完了した後、立坑内部に粒子を発生させる。具体的には、立坑内部にランダムに粒子を配置させ、後に重力によって立坑内部に落下させる手順を取る。このとき、立坑底部の払出口は閉じた状態にし、要素を落下させる時点では粒子が立坑外部に流失しないようにする。粒子の直径は均一に設定することも可能であり、また、粒径が様々な確率分布に従う場合の設定も可能である。先に Table 1 でも示したように、一般的に鉱山では鉱石の粒子分布を測定し、平均値と標準偏差が得られていることから、本解析においては粒子分布は正規分布に従うものとする。壁面と同様に、粒子にも法線方向・接線方向の粘着力および摩擦係数の設定が可能である。発生させた粒子が全て自由落下し、全ての粒子の釣り合い力に変動が無くなった状態を初期状態とし、立坑下部の払出口を開放し解析を開始する。

本研究では、解析で用いる力学パラメータのうち、立坑内部での粒子の閉塞に大きく影響すると考えられる粒子の摩擦係数および粘着力を種々変化させ、立坑閉塞に影響パラメータを検証する。なお、鉱山の性質上、鉱石と立坑壁面の岩種は石灰石で同一であると考えられる。解析で用いたパラメータをまとめて Table 2 に示す。ここで、摩擦係数については鉱物粒子の形状は複雑であり、その凹凸が噛み合った場合などは、見かけ上、摩擦係数は大きな値をとることが予想される。したがって、本研究では Table 2 に示すように考慮する摩擦係数の範囲を大きくとった。粘着力についても、粘土鉱物の混入や、立坑落下の過程で粉末状になった石灰石成分が水分を吸収することにより、鉱石どうしの粘着力が大幅に増加することが考えられる。したがって、粘着力についても解析で対象とする範囲を大きくとった。また、解析が必要になる、重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 、粒子密度 $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$ 、壁の密度 $\rho_w = 2700 \text{ kg/m}^3$ 、粒子数 $n = 2500$ の値を用いた。

4. 解析結果

前節で示した立坑形状モデル (Fig. 1) と粒子パラメータ (Table

1, 2) を用いて解析を実施する。これまでの研究の結果、立坑モデルで閉塞を再現するためには、経験的に摩擦係数と粘着力の影響が大きいことが分かっている。そこで、本解析では摩擦係数と粘着力を種々変化させ解析を行い、その解析結果を Blockage - flow out map としてまとめた。以下にその結果を示す。

4・1 摩擦係数と粘着力の影響

摩擦係数は、通常、平面どうしが接触しているとき平面に垂直方向の負荷荷重と平面に平行方向に作用させる荷重との関係から求められる。しかし、本研究で対象としているような鉱石同士の接触を考えた場合、必ずしも平面どうしの接触とは限らず、ときに表面の凹凸のかみ合いから見かけの摩擦係数が非常に大きくなる場合も考えられる。また、本解析のような二次元モデルの解析の場合、粘着力は粒子同士が接触している接触単位長さ当たりの力 (N/m) で表される。本研究で解析に使用した粒子モデルは円形のもので、接触面が微小であることを考慮すると、摩擦係数と同様、粘着力も非常に大きな値をとる場合が考えられる。本解析では、平均的に摩擦係数および粘着力が増大あるいは減少する場合を想定し、全粒子に対して一律の値を与えるものとする。ここでは、まず、基本となる鉛直立坑のモデル (Fig. 1 (a)) と前節に記述した PD 1 の粒子モデルで摩擦係数、粘着力の影響を評価する。まず、PD 1 の粒子分布について粘着力を $2.3 \times 10^5 \text{ N/m}$ および摩擦係数を 4 とした場合の解析結果の例を Fig. 2 に示す。このように壁面の滑らかな鉛直立坑であるにも関わらず、払出口の約 60m で閉塞が発生した。以下、同様の手順で粘着力および摩擦係数を種々変化させ、立坑内部で閉塞が起きる場合および起きない場合の値を Blockage - flow out map として示した。その結果を Fig. 3 に示す。この図は縦軸に摩擦係数、横軸に粘着力をとり、閉塞した解析の組み合わせを□印、流出した組み合わせを●印として示してある。この分布から、摩擦係数および粘着力について閉塞が発生する条件を推定することができる。ここで、本解析の場合には粒子は正規分布にしたがって発生させているが、粒子の発生状態によって閉塞の条件は若干ずれる事を確認しており、閉塞の有無の境界値を厳密に計算することが出来ない。また、本研究では閉塞一流出の厳密な境界値を求めることよりも、それぞれのパラメータの相対的な影響の度合いを評価することに主眼を置いている。

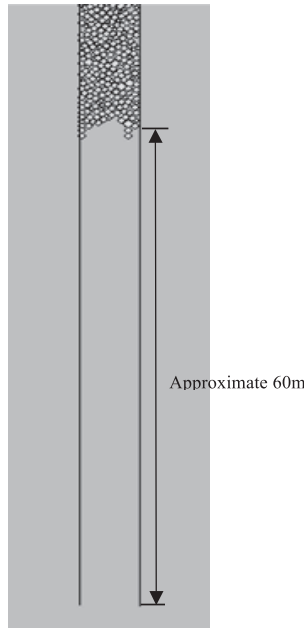


Fig.2 An example of blockage at vertical model.

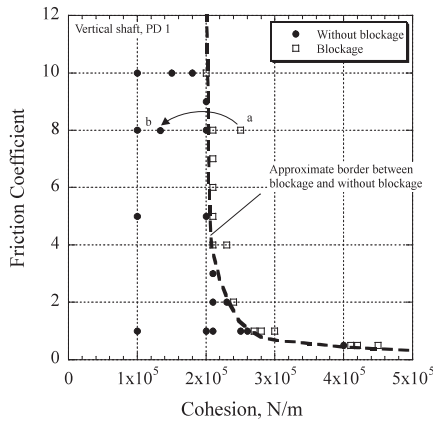


Fig.3 Blockage – flow out map of vertical shaft and particle distribution 1 ($d_m=0.378m, \sigma=0.113m$).

る。したがって、図中には閉塞が発生すると考えられるおおよその境界を点線で示した。このように、摩擦係数、粘着力の組み合わせが閉塞現象の発生を左右しており、摩擦係数、粘着力に関して閉塞現象の有無を決定する閾値が存在することが分かる。また、粘着力が 2.0×10^5 N/m 程度以下の場合には大きな摩擦係数であっても閉塞が発生しないことが分かった。このことから、粘着力が閉塞現象を引き起こす主な原因と考えられる。

さて、立坑閉塞の解消法の一つとして立坑への水の注入があり、実際に現場ではこの方法で閉塞が解消される場合がある³⁾。具体的な閉塞解消のメカニズムは不明であるが、水の注入により鉱石表面の粘土鉱物が洗い流された結果、粘着力および摩擦力が減少し、閉塞が解消されたと解釈することが出来る。このような場合を想定し、本研究においても一度閉塞が発生したモデルに対して粘着力を低下させ、解析を継続した。その結果、例えば Fig. 3 中の点 a の条件で閉塞させたモデルを、点 b で示す条件まで粘着力を低下させた結果、閉塞が解消され粒子がすべて流出した。このような状況を考えると、たとえ立坑内で閉塞が発生した場合でも、水を注入するなど何らかの方法で鉱石間の粘着力を低減することができれば、閉塞を解消できる可能性がある。

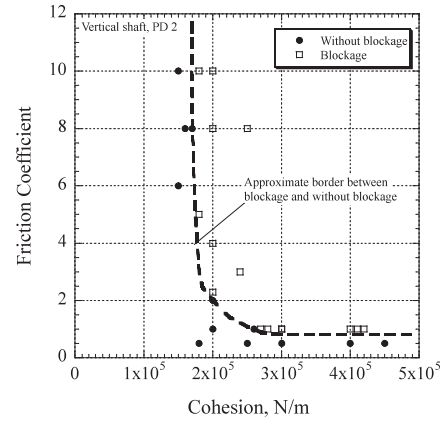


Fig.4 Blockage – flow out map of vertical shaft and particle distribution 2 ($d_m=0.311m, \sigma=0.07m$).

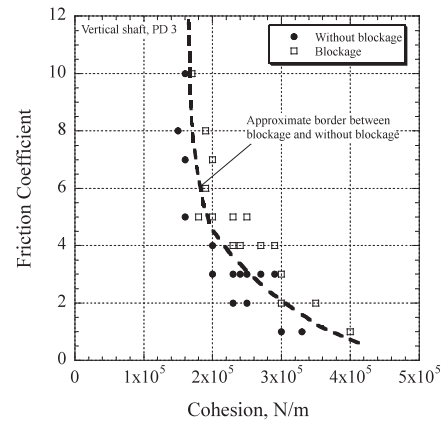


Fig.5 Blockage – flow out map of vertical shaft and particle distribution 3 ($d_m=0.454m, \sigma=0.113m$).

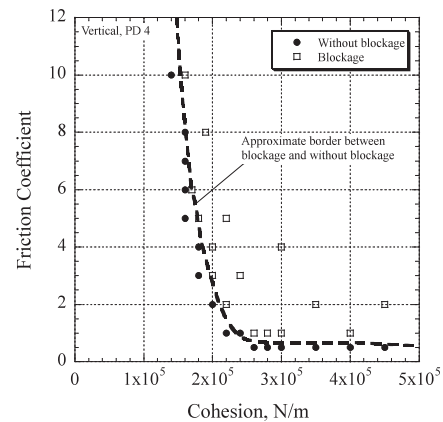


Fig.6 Blockage – flow out map of vertical shaft and particle distribution 4 ($d_m=0.249m, \sigma=0.107m$).

4・2 粒度分布の影響

粒度分布の違いが閉塞現象に与える影響について考察する。先に示したように粒度分布 PD 2 ~ PD 4 について立坑モデル (Fig. 1 (a)) を用いて同様に摩擦係数と粘着力を種々変化させて解析を行った。その結果を Fig. 4 ~ Fig. 6 に示す。

まず、Fig. 3 と Fig. 4 を比較すると、Fig. 4 の PD 2 ($d_m=0.311m, \sigma=0.07m$) の結果の方が僅かであるが Fig. 3 の PD 1 ($d_m=0.378m, \sigma=0.113m$) よりも低い粘着力で閉塞現象が生じている。これは粒子径の小さい PD 2 の方が閉塞現象が起きやすくなっていると

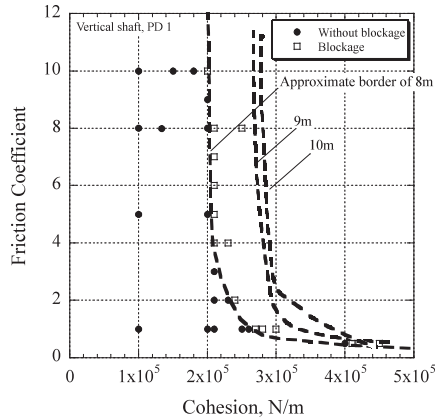


Fig. 7 Effect of diameter for the blockage. Approximate borders between blockage and without blockage of 9m and 10m are drawn in the blockage-flow out map of 8m vertical shaft model.

いえる。つぎに、PD 1より平均粒径を20%大きくしたPD 3 ($d_m = 0.454\text{m}$, $\sigma = 0.113\text{m}$), PD 1より平均粒径を20%小さくしたPD 4 ($d_m = 0.249\text{m}$, $\sigma = 0.107\text{m}$)を使用した結果について考える。PD1のFig. 3, PD 2のFig. 4を元にPD 3のFig. 5, PD 4のFig. 6を同時に比較してみると、やはり最も粒径の大きいPD 3の結果(Fig. 5)の方が、特に粘着力が $2 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ 付近で閉塞の起きる境界が図の上側にシフトしており、閉塞が起きにくくなっていることを示している。また粒径が最も小さいPD 4の場合(Fig. 6), 境界が全体として左下方にシフトしており閉塞が起きやすくなっている。これは鉱石を小さくすることによって、鉱石の自重が小さくなり粘着力の影響がより大きくなったためだと考えられる。したがって、粒径が粘着力の効果を若干変化させているものの、やはり粘着力が閉塞現象に大きな影響を与えていることが分かる。

4・3 立坑内径の影響

立坑の内径の大きさによる影響について考察する。ここでは、Fig. 1 (a)で示したBasic vertical modelの内径がそれぞれ9mおよび10mであるモデルについても同様に摩擦係数および粘着力を種々変化させ解析を実施した。ただし、粒度分布はPD 1を用いている。閉塞の発生の有無を示す境界線を、先に示した8mの解析結果(Fig. 3)の結果に加えて示した。その結果をFig. 7に示す。立坑内径が8mの結果と比較すると、全体的に閉塞現象が生じる境界が大きく右にずれていることが分かる。これは、閉塞に必要な粘着力に大きい値が必要なことを意味し、閉塞しづらくなっていると解釈できる。このように立坑の内径が閉塞に大きく影響していることが分かる。

また、この図から分かるように、本解析では閉塞が発生しない粘着力の下限(最小閉塞粘着力)が存在することが分かる。粒子分布により多少閉塞状況が異なるために厳密な値ではないが、8mの立坑ではおよそ $2.0 \times 10^5 \text{ N/m}$, 9mおよび10mの立坑では、それぞれおよそ $2.6 \times 10^5 \text{ N/m}$ および $2.8 \times 10^5 \text{ N/m}$ の値が下限値と読み取ることが出来る。そこで、立坑内径と最小閉塞粘着力との関係をFig. 8に示す。ここで、最小閉塞粘着力が小さい値である場合の方がより閉塞が発生しやすいことを意味する。この図に示すように、内径が標準的な8mと比較して、内径9mおよび10mの方が最小閉塞粘着力は大きく、より閉塞しにくいことが分かる。ただし内径9mと10mを比較すると最小粘着力の変化量は小さく内径の変化による影響は小さくなるといえる。したがって、粒度分布を変化させるのではなく、あらかじめ立坑の直径を9m程度することで閉塞現象の解消/回避は可能であると考えられる。また、鉱石を小さくするにはブレイカーにより大塊を一つ

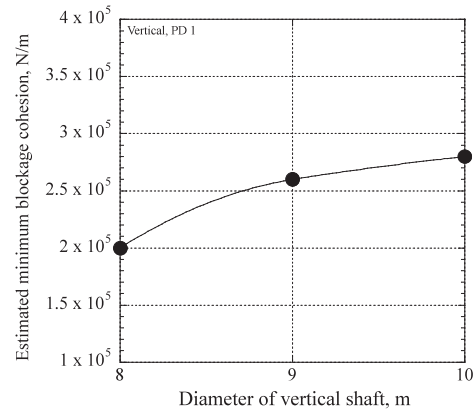


Fig. 8 Relation between diameter of vertical shaft and the estimated minimum blockage cohesion.

ずつ小割りにしていく必要があり、膨大な作業時間を要する。しかし、工事費が増すが立坑の直径は設計の段階で改良が可能であるため、作業効率の面でも立坑の直径を大きくするほうが優れていると考えられる。

4・4 立坑の形状の影響

立坑内部の形状が閉塞に及ぼす影響について考える。立坑内には作業用の坑道があることや、立坑の壁面が鉱石の落下時に鉱石との摩擦で変形するなどの影響で、鉛直立坑の場合でも場所により内径は大きく異なっている。これらの場合を想定して本解析では先のFig. 1 (b)~(d)モデルに示したモデルを用いて解析を行った。ここでも摩擦係数および粘着力の値を種々変化させて解析を実施し同じようにBlockage-flow out mapを作成した。解析結果をFig. 9~Fig. 11に示す。Fig. 3で示したBasic vertical modelの結果とこれらの結果を比較すると、Blockage-flow out mapより推定される閉塞一流出の境界に大きな差はない。次に、この3つのモデルについて、閉塞現象が発生した部分とモデルの形状の特徴に着目する。Fig. 12ではそれぞれのモデルについて閉塞が発生した場合の典型的な例を示す。これはいずれも粒子分布がPD 1における結果である。さらに、Fig. 13では閉塞が発生したおおよその箇所と閉塞回数の結果を示している。Fig. 13 (a)に示すDeformed model 1の場合、30組の摩擦係数、粘着力の組み合わせで解析したが、そのうち16組で閉塞現象が見られた。その16組のうち10組は立坑の内径が急激に減少する箇所では閉塞が発生しており、このような箇所では閉塞が起きやすいことが分かる。これはFig. 13 (b)に示すDeformed model 2においても同様の傾向が見られる。しかし、Fig. 13 (c)に示すDeformed model 3においては先に示したような内径の減少箇所における閉塞の偏りは見られない。これらのことから、立坑の内径が急に縮小する部分が閉塞が発生する危険の高い箇所であるといえる。

本解析においては、立坑モデルは変形部分を1か所しか作成していないが、実際の鉱山の現場では目貫坑道が多く存在する場合もある。また、過去に滞水層が存在した地層は立坑内の壁面の強度が低く鉱石による摩耗の影響が大きく、変形が生じやすい。また、実際に坑内が大きく変形した例や空洞が存在した例もあり、それだけその部分での閉塞のリスクが増すことが考えられる。

4・5 立坑の傾斜の影響

立坑の傾斜角が立坑閉塞に与える影響については、頓所ら²⁾が1/100スケールのアクリルパイプを用いた模型実験による検討が行われている。その結果、立坑軸から水平面から70°である場合がもっとも閉塞しにくいという結果が得られており、この模

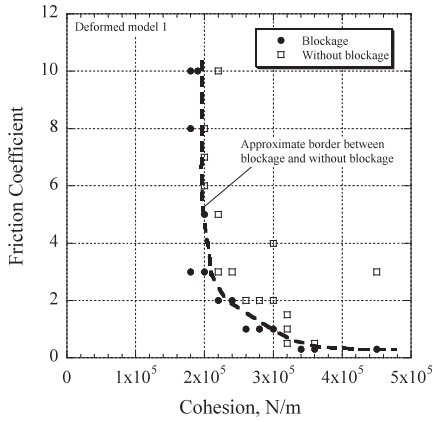


Fig.9 Blockage - flow out map of deformed model 1.

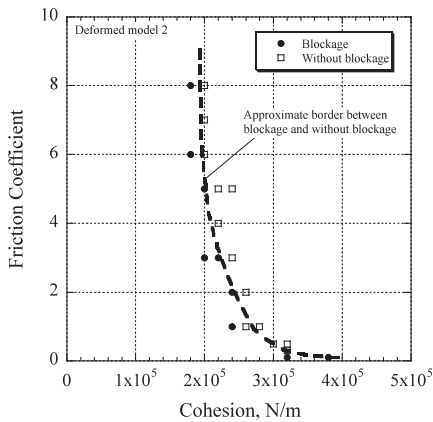


Fig.10 Blockage - flow out map of deformed model 2.

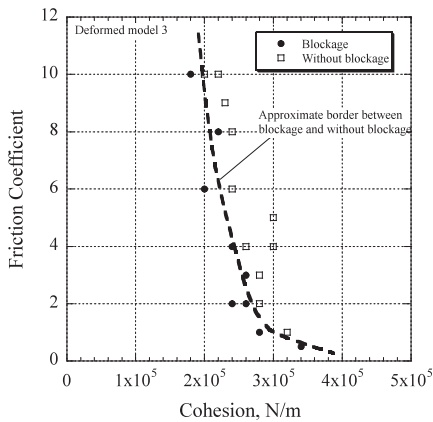


Fig.11 Blockage - flow out map of deformed model 3.

型実験に基づいて立坑の設計が行われた²⁾。そこで本研究においても、立坑の傾斜角度が閉塞に及ぼす影響について考える。先に Fig. 1 (e) で示したように、ここでは鉛直立坑のほかにも $\theta = 70^\circ$ および 80° の場合について解析を実施し、Blockage - flow out map として示した。先に Fig. 3 として示した結果に、 $\theta = 80^\circ$ および $\theta = 70^\circ$ の解析結果から得られた境界線を併せて Fig. 14 に示す。ただし、粒子分布は PD 1 である。 $\theta = 90^\circ$ の結果と併せて比較すると、閉塞と流出の境界は角度 θ (Fig. 1 (e)) の低下、つまり水平面からの角度が小さくなるにつれて図の左側にシフトしている。つまり、 θ の低下に伴い粘着力が小さい場合でも閉塞が発生することを示しており、鉛直立坑 ($\theta = 90^\circ$) の方がより閉塞しにくい

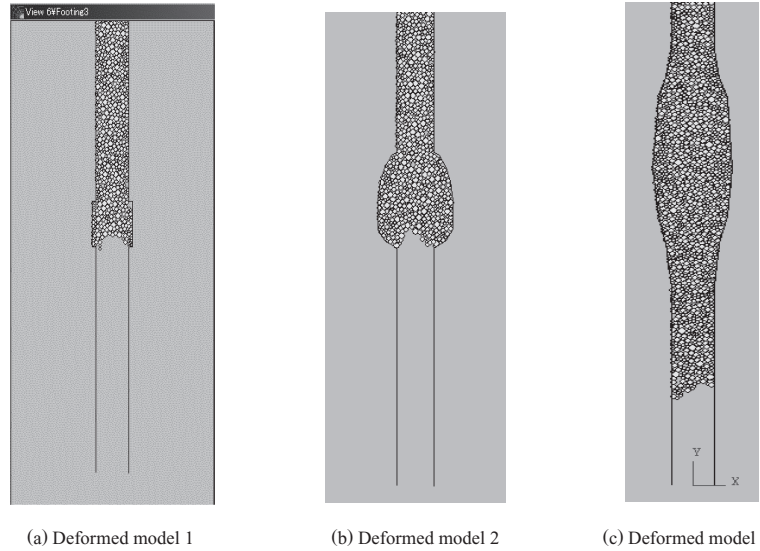


Fig.12 Examples of blockage occurrence for deformed models.

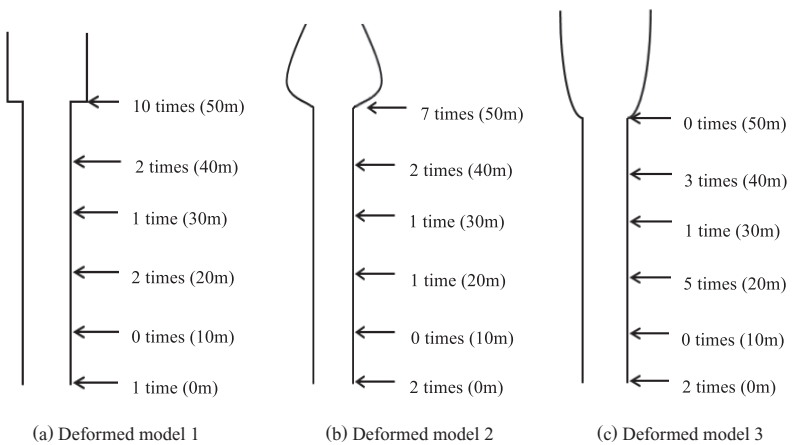


Fig.13 Numbers of blockage occurrence and its approximate positions.

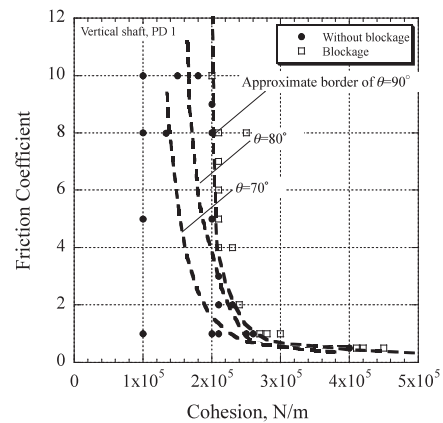


Fig.14 Effect of inclination of shafts for the blockage. Approximate borders between blockage and without blockage of $\theta = 80^\circ$ and $\theta = 70^\circ$ are drawn in the blockage - flow out map of $\theta = 90^\circ$ vertical shaft model.

ことを示している。これは、立坑が傾いたために鉱石が払い出される過程で壁面に垂直方向に作用する力が増加したため、鉱石と立坑壁面との摩擦力が大きくなったためであると考えられる。

4・6 立坑内貯鉱量の影響

立坑内貯鉱量が閉塞現象に与える影響を評価する。これまでは

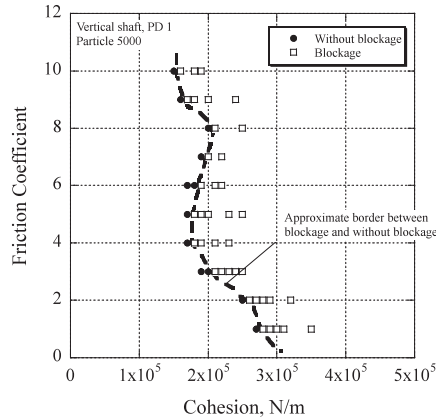


Fig.15 Blockage - flow out map of vertical shaft using 5000 particles.

粒子数を 2500 として解析を行ってきたが、ここで粒子数を 2 倍の 5000 に増加させ、Fig. 1 (a) の Basic vertical model および粒子分布 PD 1 を用いて解析を実施した。その結果を Fig. 15 に示す。粒子数が 2500 の Fig. 3 の結果と比較すると、全体の傾向としては似ているものの、閉塞一流出の境界線は若干左側にシフトしており、粒子数が多いモデルの場合の方が閉塞しやすいことを示している。これは、粒子数の増加にともない立坑内鉱石の重量が増加し粒子がより圧縮され摩擦力や粘着力が大きくなったほか、払出し過程での鉱石の移動距離が増加したことなどが影響しているものと考えられる。つまり、閉塞現象抑制のためには、立坑内径を大きくするだけでなく、立坑内貯鉱量を減少させることも 1 つの手段であると考えられる。

5. 結 言

本研究では、基本となる鉛直立坑モデルと 2 種類の粒度分布を基本とし、摩擦係数および粘着力を種々変化させ、解析結果を Blockage - flow out map としてまとめ、摩擦係数、粘着力が閉塞現象に及ぼす影響を考察した。その結果を基本データとし、さらに 2 種類の粒子モデル、および 4 種類の立坑モデルを作成し、数値解析を行った。その結果を同様に Blockage - flow out map として整理し、粒子分布および、立坑の寸法、形状、傾斜角ならびに貯鉱量が立坑閉塞に及ぼす影響を考察した。以下に結言を述べる。

(1) 標準的な鉛直立坑および、現場で実測した粒子分布を使用し、摩擦係数、粘着力を種々変化させ数値解析を行った結果、粘着力が一定の値を超えると摩擦係数が小さな値でも閉塞現象を引き起こすことが分かった。

- (2) 閉塞が発生したモデルについて閉塞後に粘着力を減少させ解析を続行した結果、閉塞が解消された。このように、万が一立坑内で閉塞が発生した場合でも、鉱石の粘着力を減少させる措置をとることができれば、閉塞解消の有効な方法になることを示した。
- (3) 4 種類の粒度分布を使用し数値解析を行った結果、粒径を大きくすることで自重が大きくなり粘着力に打ち勝ち粒子同士が離れやすくなるものの、Blockage - flow out map に示される変化は僅かであることが分かった。
- (4) 内径 8m の鉛直立坑モデルを基準に内径 9m、および 10m のモデルを作成し、数値解析を行った結果、立坑の内径を 8m から 9m にすることで閉塞が起きづらくなることが分かった。
- (5) 坑内の形状が変形した立坑モデルを用いて数値解析を行った結果、Blockage - flow out map に示される変化は小さいものの、立坑の内径が急激に減少する箇所では閉塞が多発することが分かった。
- (6) 斜坑について立坑軸から水平面より 70° 、 80° と傾斜を与えた斜坑モデルで数値解析を行った結果、Blockage - flow out map では水平面から立坑軸への傾斜角が小さいほうが閉塞しやすいことが分かった。
- (7) 解析に用いる粒子数を 2 倍にして解析を実施した結果、閉塞が起きやすくなることが分かった。そのため、貯鉱量を制限した管理も閉塞回避の一つの方法と考えられる。

References

- 1) 石灰石鉱業協会 Website: 需要統計, <http://www.limestone.gr.jp/analysis/index.htm>
- 2) 頓所幹宏, 細貝英伸, 千葉敏博: 田海鉱山第 2 立坑の設計と稼働実績, 資源・素材 2011(堺), 地球・資源編, (2011), pp. 117-120.
- 3) 藤野圭介: セメント原料用立坑の更新工事と安定運転への取り組み, 石灰石鉱業大会資料, (2012), pp. 93-107.
- 4) 松本卓也: 秋芳鉱山 立坑閉塞とそのメカニズム, 石灰石鉱業大会資料, (2012), pp. 108-118.
- 5) 茂木源人: 鉱石立坑内における鉱石の挙動に関する研究 (その 7) - 立坑内における鉱石挙動のモニタリングと立坑閉塞の予防 -, 石灰石, **260**, (1992), 19-33.
- 6) 茂木源人, 鍋木寛, 茂田井奇: 立坑詰まりのケーススタディー, 日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集, (1988), pp. 331-332.
- 7) Cundall, P.A. : Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part 1. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, Int. J. Rock. Mech. , Min. Sco. & Geomech. Abstr. , **25** (3), (1988), 107-116..
- 8) Hart, R. , P.A. Cundall and J. Lemos: Formulation of three-dimensional distinct element model - Part 2. Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks, Int. J. Rock. Mech. , Min. Sco. & Geomech. Abstr. , **25** (3) , (1988), 117-125.
- 9) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション—個別要素法で破壊を追う—, 森北出版, 1997.
- 10) Cundall, P.A.: A Computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system, Proc. of the Symposium of the Int. Soc. of Rock Mech. (Nancy, France), **1**, (1971), Paper No.II-8.
- 11) Cundall, P.A. and O.D.L.Strack: A discrete numerical model for granular assembly, Geotechnique, **29** (1), (1979), 47-65.