サンドスライム充填に関する基礎的研究* (第1報)

—サンドスライム層の脱水状況について—

正 会 員 堀 部 富 男**

正 会 員 小 林 良 二***

正 会 員 村 上 孝****

Fundamental Studies on Hydraulic Sand-Filling (1st Report)

—Behavior of drainage from hydraulic sand-filling—

Tomio HORIBE, Ryoji KOBAYASHI, and Takashi MURAKAMI

A study on the behavior of drainage from hydraulic sand-filling, changing the heights of the filled sand and the places of drainage bulkheads, made of the pipes and wire gauze, is described in this paper.

The authors made a filling tank 250cm in height, 80cm in length, 50cm in width, from the consideration that the height of the filling tank is to be enough higher than that of the original capillary rise which the filled sand has.

From the tests the following results were obtained.

- 1) Drainage from sand-filling is affected by capillary rise and only gravity water over capillary one is drained.
- 2) When the places of bulkheads are changed to the bottom, the side, or the bottom and side, the quantity of capillary water remained in sand-filling does not vary. Besides, when the filling heights same, the amount of drained water becomes almost same at the end of each test, wherever the places of bulkheads are set up.
- 3) Soon after the beginning of drainage the fine particles of slime migrate to the wire gauze of the bulkhead of the side not of the bottom and form the hardly pervious layer, then it can be scarcely expected to drain water in sand-filling to the sideway, when bulkheads are set up to both the side and the bottom.
- 4) Drainage from bulkheads only at the side continues long merely from the lowest level when gravity water exists.

1. 緒 言

近年わが国の金属鉱山において、サンドスライム充填法が盛んに用いられるようになり、採掘が合理化し能率が向上してきた。この充填材としてのサンドスライムに関する研究はかなり行なわれている。すなわちサンドスライムの物理的性質¹⁾の流送法²⁾、脱水性³⁾などの研究がそれである。そして脱水性に関しては充填高さの比較的低いものについてのみ行なわれている。

筆者らは充填槽の高さは充填されるサンドスライム層が有する独自の毛管水の高さより高くなければならぬとの見地から、比較的高さの大きな充填槽を製作し、その場合のサンドスライム層の脱水性に関する問題を取りあ

げ、特に充填高さ、脱水個所と脱水状況との関係を究明した。

2. 供 試 料

試料としては三菱金属鉱業尾去沢鉱山のサンドスライムをさらに当教室で、デスライムしたものをを用いた。(デスライムの方法は1.8mm/secの上昇水流中に原試料を投入し、水簸した。すなわち、この流速では第1図のように-325meshのものはほとんど除かれる。)これは実験に際し試料中の微粒子(特に325mesh以下)が流出しやすく、試料の粒度分布に変化をきたすので、あらかじめ微粒子を取りのぞいて、実験の再現性をたかめるためである。なお、デスライムした試料の真比重は2.71である。

この試料の粒度分布並びに毛管水の高さ、透水係数は次に示す通りである。

* 昭和40年1月5日受理 昭和38年4月, 昭和39年4月, 日本鉱業会春季大会にて発表

** 工博 東北大学教授 工学部鉱山工学科

*** 工博 東北大学助教授 工学部鉱山工学科

**** 東北大学助手 工学部鉱山工学科

第1図 サンドスライムの粒度累積曲線

2.1 粒度分布

粒度分析を行なった結果を粒度累積曲線で示すと第1図のようになる。供試料はデスライムした関係上、非粘結性の細砂分が多く、一般のサンドスライムに比し非常に粗いものとなっている。なお比較の意味で、デスライムしない原試料の累積曲線も描いたが、これも他鉱山のサンドスライムに比し325mesh以下のものが少ない。

2.2 毛管水の高さ

毛管水の高さの測定には乾燥した試料中を上昇する水

第2図
毛管水の高さ測定
装置 (単位mm)

の高さを直接観測する方法を用いた。装置は第2図に示すごとく、内径65mm、高さ2,000mmの垂直ガラス管の下部に35meshの金網を取りつけ、これに乾燥した試料を詰め底面を自由水表面より約1~2cmの深さに入れたものである。すると水は試料の毛管作用により試料中を上昇する。間隙の一部または全部が水に浸った試料の範囲は黒ずんだ色を呈し、残った他のところは明るい色を呈することから、毛管水の高さ(h)が測定される。この毛管水の高さは土質工学でいう主動毛管高さ⁵⁾のことである。なお試料は詰めかたにより間隙率が変化するので、この変化を少なくする意味で、試料を詰めたのち、ガラス管の管壁に電力20Wの電磁バイブレータで10分間振動をあたえ、充填密度が1.40になるように詰めている。またこの操作により実験初期条件の再現性がたかめられている。

上述の装置を用いて、供試料並びにこれをさらに-28~+65mesh, -65~+100mesh, -100~+200mesh, -200meshの4段階にふるい分けした粒度別の試料のそれぞれの毛管水の高さを測定すると、第3図に示すような結果となる。この図から供試料は約60cmの毛管水の高さで安定し、また粒度別試料ではある時間を経過すると粒度の細かいものほど毛管水の高さが高くなることからわかる。しかるに各曲線の最初の測点(実験開始後2時間目の測点)を比較してみると、-100~+200meshのものが最も高い毛管水の高さを示し、それより大きい粒径のものはもちろんのこと、小さい粒径の-200meshのものまでも、これより低い値を示している。この現象はA. Atterbergの解析によつて大体説明されると思う。ちなみにA. Atterbergはかなり密な状態にある石英粉の粒径と毛管上昇高さとの関係を時間をパラメータとして詳細に調べており、その結果、ある時間に上昇している毛管水の高さは、ある中位の粒径の時最高になることを報告している。

2.3 透水係数

透水係数は変水位透水試験より求めた。その結果は第

第3図 毛管水の高さと日数との関係

第1表 粒度別試料の透水係数

粒度区分 (mesh)	透水係数 (cm/sec)
供 試 料	4.1×10^{-3}
- 28~+ 65	4.6×10^{-2}
- 65~+100	1.8×10^{-2}
-100~+200	4.4×10^{-3}
-200	1.1×10^{-3}

1表の通りである。ちなみに変水位透水試験とは、低水位を一定にして、高低両水位間に試料を挿入し、その水位差が時間とともに変化することを利用して流量を測定し、これより透水係数を Darcy の法則から算出するものである。

この表より透水係数は粒径の細かいものほど小さくなることがわかる。

3. 実験装置

装置を製作するにあたり、特に留意しなければならない点は前述のようにサンドスライムの毛管水の高さである。いま、サンドスライム層内の水の状態をみると、重力水と毛管水と吸着水との3種に大別される。ここで重力水とは一名自由水ともいわれ、重力の作用により粒子間隙を徐々に低い方に流れる水、毛管水とは各粒子の間隙と水の表面張力とで形成される水、吸着水とは気乾状態の試料を 110°C で乾燥させた場合蒸発する水分をいう。

サンドスライムスラリを充填槽にいれ脱水試験を行なう場合、吸着水は直接脱水量に関係がなく、問題となるのは重力水と毛管水とが主となる。しかも毛管水は普通の状態では脱水されにくく、サンドスライム層内に残存するため、脱水試験の対象となるのは重力水である。それ故、充填槽は重力水の挙動を調べようよう、充填物の毛管水の高さより高いものでなければならないので、前

第4図 サンドスライム充填槽略図 (単位mm)

節で述べた供試料の毛管水の高さ 60cm よりも十分高い 250cm の高さをもつ、第4図に示すような充填槽を製作した。この充填槽は奥行 80cm、幅 50cm で鉄骨④と 50cm ごとに分離できるように組立てられた鉄板⑤の側壁とで作られている。槽の底部には底蓋⑥があり、サンドスライム充填中は、これで底部を密閉する。脱水仕切個所は底部および側壁 (50×250cm) にあり、35 mesh の金網を 1mesh の金網 2 枚ではさんだものを取りつける。またスライム圧によつて、金網が破損されないように、さらに 22mmφ の鉄パイプ⑦の棧で、金網をおさえている。なお 35mesh の金網を用いたのは漏泥防止のためである。脱水量は底部より脱水されるものに対しては槽の下部に常時設置された水受け皿⑧を経て、側壁より脱水されるものに対しては、槽の底部より 50cm 間隔に取りつけられた水受け皿⑨を経て、それぞれ計量される。ここで⑨の水受け皿の端がサンドスライム層中に 1 cm 程度水平にはいるようにしておき、脱水された水が金網を伝わって下部に流れることを防止する。

つぎにサンドスライム流送装置は第5図に示す通りで、これは直径 120cm、高さ 120cm の容量をもつ攪拌槽④の内部に長さ 40cm のインペラを押し下げの方向に毎分 300 回転する攪拌装置③と、④で所定の濃度に攪拌されたサンドスライムスラリを流送する、吐出口 50mm のワーマンポンプ⑩とからなっている。充填槽に流送されるスラリの流量は流送管の途中に取りつけたピンチバルブ E_1 、 E_2 により調節される。流送終了時には、流送管を清掃するため、貯水槽⑪から水が送られる。

4. 実験方法

実験に際しては、鉄板と鉄板との合せ目および鉄板と脱水仕切面との合せ目からの漏水を防ぐためまず充填槽内部を 0.1mm のビニール膜で内張りして、所定の脱水個所以外からの漏水を防止し、底蓋⑥をしめる。その後

第5図 サンドスライム流送装置略図 (単位mm)

攪拌槽で濃度65% (重量百分率) のサンドスライムスラリーを作り、ワーマンポンプにより毎分300lの流量で充填槽に流送する。この時ピンチバルブE₁は全開にし、他方のピンチバルブE₂は閉じておく。

サンドスライムスラリーが所定の高さまで充填されたら、流送を中止して、実験条件に応じ底蓋を開き、一定時間ごとに水受け皿よりの脱水量を測定する。毎分の脱水量が充填スラリー中の総水量の0.001%以下になれば実験を終了する。

本研究では脱水箇所を充填槽の底部にもうけて、鉛直方向に脱水させる場合 (以後下抜きと称す) と、側壁にもうけて、横方向に脱水させる場合 (以後横抜きと称す) と、側壁並びに底部にもうけて、横方向と鉛直方向と同時に脱水させる場合 (以後横下同時抜きと称す) とについて脱水状況を調べ、脱水箇所の違いによる充填高さと脱水率との関係をもとめた。なお下抜きの場合は底蓋をしめて、所定の充填高さまで充填してから底蓋を開き実験を行なっているが、横抜きおよび横下同時抜きの場合

第2表 実験結果

充 填 高 さ	脱 水 箇 所	脱 水 時 間	最終脱水率	最終含水率
50cm	底 部 (4,000)*	2,070 min	36.6%	26.0%
	側 壁 (2,500)	2,920	35.7	26.1
100	底 部 (4,000)	2,730	54.0	20.3
	側 壁 (2,500)	4,140	54.7	20.5
150	底 部 (4,000)	3,000	55.1	19.9
	側 壁 (2,500)	5,640	56.1	20.3
	側 壁 と 底 部 (11,500)	3,180	56.1	19.6

* () 内の数字は脱水仕切面の面積 cm²

は、充填時に底蓋をしめても、側壁の脱水仕切面は開放されたままにしてある。それ故、これらの場合は充填の途中において側壁から脱水するので、下抜きの場合と同じ充填量では、充填高さが僅かに低下する。この脱水量は予備試験の結果、本研究の範囲内では最大でスラリー総充填量の1%以下であることを確かめたので、多少の誤差は入るが、充填高さの規定には、底抜きの場合と同様、充填終了時の高さをもつてした。

5. 実験結果並びに考察

前述の実験装置と方法により、脱水箇所を充填槽の底部、側壁、側壁と底部とにそれぞれ変えた場合の各充填高さについて、積算脱水率と時間との関係を調べると、第6図(a), (b), (c)に示すとき結果となる。ここで積算脱水率とは脱水開始時からある測定時間までに脱水された全水量を充填スラリー中の総水量で除したものの百分率である。また測定結果を各充填高さごとにまとめると、第2表のごとくなる。この表に記載される最終脱水率とは実験終了時までの積算脱水量を前記総水量で除したものの百分率である。さらに最終含水率とは実験終了時に充填槽内に残っている水量と充填されたサンドスライム重量とから計算でもとめたもので、槽内のサンドスライムの平均含水率である。

第6図と第2表の測定結果をみると、充填高さが高くなると最終脱水率が高くなる傾向がみとめられる。ここで第6図(a), (b), (c)において、充填高さ50cmの場合はいずれも他のものに比べ、最終脱水率が極めて低く、また脱水速度が急に低下している。これは充填当初、サンドスライムスラリーとして充填されたサンドスライムと水とが、時間がたつにつれ、サンドスライムは沈降し、サンドスライム層を形成し、水は重力水と毛管水とに分けられてくる。それ故、試料のもつ毛管水の高さより低く充填された場合は、サンドスライム層上部の上水が重力水として脱水されてしまうと、サンドスライム層内の水はほとんど毛管水として存在し、粒子間隙を飽和した状態となるため脱水が止り、曲線が急激にフラットになると考えられる。つぎに充填高さが高くなれば、試料のもつ毛管水の高さが一定であることから、サンドス

第6図 充填高さ別の積算脱水率—時間曲線

第7図(a) 横抜きの場合の各脱水仕切面における積算脱水率—時間曲線 (充填高さ150cm)

ライム層内の水は、毛管水の高さ以内では粒子間隙を飽和した状態にあるが、毛管水の高さ以上では粒子間隙を満たしていた水の一部は重力水として脱水されるため、脱水量も多くなり、最終脱水率が高くなる。また同一の充填高さでは脱水箇所を底部、側壁、側壁と底部に変えても、実験終了時にはほぼ同じ脱水率に近づいている。そして、重力水はサンドスライム層を通して脱水させるため、充填高さが高くなれば実験終了までの脱水時間は長くなる。

さて、サンドスライムを充填する際、最も重要な問題の一つは脱水速度である。いま脱水速度と〔脱水面積〕/〔充填量〕との関係を取りあげてみると、これらの間には比例関係が存在すると考えるのが常識的であろう。

このような観点から第6図をみると、第6図(a)の脱水開始から20分後に測定される脱水率は充填高さ50cmでは17%、100cmでは13%、150cmでは10%であり、その時における脱水速度と〔脱水面積〕/〔充填量〕との間にはおおよそ比例関係がみとめられる。しかしながら第6図(b)では、充填高さ50cmでは10%、100cmでは17%、150cmでは18%となり、また第6図(c)では、充填高さ50cmでは20%、100cmでは22%、150cmでは22%となる。すなわち、第6図(b)、(c)のように、側壁より脱水させる場合は上記比例関係はみとめ難い。

そこでさらに詳しく側壁よりの脱水を検討する意味で脱水箇所を側壁にもうけた場合、すなわち、横抜き、横下同時抜きについて各脱水仕切面からの脱水状況を脱水開始後30分間について詳細に観測した。これらの結果を第7図(a)、(b)に示す。第7図(a)、(b)は充填高さが150cmの場合の例で、底部から100cmL、50cmL、0cmLの位置にある水受け皿で測定した各脱水仕切面における積算脱水率—時間曲線を示したものである。第7図(a)をみると、充填当初には各脱水仕切面からの脱水が認められるが、時間がたつにつれ上部仕切面より漸次脱水量が減じ、100cmLでは23分、50cmLでは27分で脱水が終了し、遂には0cmLすなわち、最底部からのみ

第7図(b) 横下同時抜きの場合の各脱水仕切面における積算脱水率—時間曲線 (充填高さ150cm)

脱水されるようになる。一方、第7図(b)においては側壁からの脱水は早期に終了する。そして底部と同じ水位の0cmLの側壁水受け皿の個所からの脱水は急激に終了するにもかかわらず、底部からの脱水は依然として継続することは注目に値する。また本実験では側壁0cmLと50cmLとを比較すると、0cmLの方が水位が低いにもかかわらず、早期に脱水量が減少している。なお第7図で側壁50cmL、100cmLおよび底部の各曲線のスタート位置がずれているのは、各脱水仕切面よりの脱水開始時を基準としたためである。

そこで上記の疑問を解明するために第8図(a)に示すごとき側壁と底部とに脱水箇所をもうけた、ガラス製

第8図(a) ガラス製充填槽略図 (単位mm)

第8図(b) 側壁脱水仕切面付近のサンドスライムの状態

充填槽を作り、第8図(b)のような写真を撮つて、側壁脱水仕切面付近のサンドスライムスラリの挙動を観察した。この写真から明かなように側壁の脱水仕切面に接近して、しかもほぼ平行に微粒子スライムよりなる透湿度の低い被膜がみられる。一方、底部の脱水仕切面には、この微粒子スライムの被膜はみとめられない。すなわち、この槽内にスラリーが充填される時、槽内では一時的にサンドスライムが攪拌された状態にあり、やがて粒径の大きい重いものが早く沈降して底部に堆積し、一方、水中に浮遊する微粒子スライムが側壁脱水仕切面に向つて水とともに移動し、この移動したスライムが次々に沈降するサンドスライムにまきこまれて、側壁脱水仕切面とほぼ平行に被膜を形成する。この被膜は側壁よりの脱水の進行に伴つて、次第にその密度を増し透湿度を減じてくる。

そしてこれら側壁の被膜の形成は常に一樣にできるものではなく、充填時のスラリの状態によつて異なることが考えられるので、第7図(b)のように側壁0cmLからの脱水量が50cmLのそれよりも少なくなることもありうる。ちなみに本実験では、数回の実験のうちほとんど0cmLの方が50cmLより早期に脱水量が減少する経過をとつた。

このように横下同時抜きの場合、透湿度の低い被膜は側壁にできやすく、底部にできがたいから、側壁からの脱水は早期に終了し、底部よりの脱水のみが継続する。一方、横抜きの場合は、側壁全体に被膜ができても、充填槽下部の方は水圧によつて被膜が破れ、0cmLからの脱水が一番ながく継続するものと考えられる。

6. 結 言

本研究はサンドスライム充填層の脱水状況を調べる目的で行なつた。

実験装置としての充填槽の高さは、充填されるサンドスライムの有する独自の毛管水の高さより、十分高くなければならぬとの見解から、奥行80cm、幅50cm、高さ250cmのサンドスライム充填槽を製作した。この装置を用いて尾去沢鉱山のサンドスライムをさらに当教室でデスライムした試料について、充填高さ、脱水個所を変えて脱水試験を行ない、つぎにのべる結論を得た。

1) サンドスライム層の脱水状況は毛管水の高さの影響を受け、毛管水の高さより高い部分の水分が重力水として脱水される。それ故、本実験に使用したサンドスライムの主動毛管水の高さがおよそ60cmであることから、これより低い充填高さの50cmの場合は、他の充填高さ100cm、150cmの場合にくらべ著しく最終脱水率が低い。

2) 脱水個所を充填槽の底部、側壁、側壁並びに底部にそれぞれ変えても、充填高さが同じであれば実験終了時にはほぼ同一の脱水率となる。

3) 側壁並びに底部に脱水個所をもうけた場合は、側壁脱水仕切面に接近して、かつ平行に微粒子スライムによる透湿度の低い被膜が形成されるため、側壁よりの脱水は次第に減じ、遂には底部のみより脱水されるようになる。したがつて、この場合は脱水速度と〔脱水面積〕/〔充填量〕との間には比例関係はみとめ難い。

4) 一方、側壁のみに脱水仕切面をもうけた場合も、サンドスライム充填過程において、側壁脱水仕切面全体にスライム被膜ができる。このスライム被膜形成の時点におけるサンドスライム層にはまだ多量の重力水が残存し、これによる水圧によつて、充填槽下部のスライム被膜が破れるので、重力水は0cmLから最も排出されやすくなる。

謝 辞 本研究において実験に協力された牛田稔助手、奥村清彦技官並びに小山政夫、泉谷文徳、古内督朗各学士に感謝の意を表する。また試料を提供して頂いた、三菱金属鉱業尾去沢鉱山の各位に深謝する。さらに、本研究は文部省科学試験研究費によつて遂行されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 佐々木和郎、阿部秀夫、加藤真蔵；選鉱廃滓の物理的性質、採鉱と保安 No. 9, p. 12~18 昭和31年3月
- 2) 伊藤一郎、寺田孚；充填材としてのスライムの性質 (1) 水曜会誌 Vol. 13, No. 9, p. 697~700 昭和34年4月
- 3) 塚本義郎；浮選廃滓の坑内充填に関する研究、日本鉱業会誌 Vol. 69, No. 766, p. 33~40. 昭和28年2月
- 4) 佐々木和郎、阿部秀夫、加藤真蔵；サンドスライム充填の脱水に関する研究、資源技術試験報告 No. 9. 昭和28年9月
- 5) 河上房義；土質力学、森北出版(株)昭和32年発行 p. 39
- 6) テルツアギ・ベック；土質力学、基礎編(小野・星・加藤・三木共訳) 丸善(株) 昭和36年発行 p. 102
- 7) 河上房義；前出 p. 36~41