用語の解説

スラリー輸送に関する用語の解説*

Comments on the Terms Used for Slurry Transportation

益 山 忠**

MASUYAMA Tadashi

固体粒子を水などの搬送流体と混合し、パイプラインによって輸送する水力輸送に対しても、従来、比較的微細な粒子を液体と混合し輸送する場合に用いられていたスラリー輸送なる用語が使用されている。このように成った背景の一つとして、輸送対象物である固体粒子ならびに搬送流体の多様化に伴い、微粒子以上の沈降性粒子と液体との混合体を沈降性スラリーあるいは粗粒子スラリーと称するように成ったことが挙げられる。

本稿では、広義に捉えられたスラリー輸送における流動を取り上げ、用語の説明を試みる。なお、著者の独断が含まれているので、読者諸氏のご意見がいただければ幸いである。

1. 粒子径と流動状態[1,2]

スラリー輸送における粒子の流動状態は、粒子径、比重、抗力係数などの粒子の物性値、平均流速、吐出体積濃度、パイプの敷設状態などによって異なる。

垂直管路においては、上昇流と下降流とでは粒子の管内分布は異なるが、何れの場合も固体粒子は浮遊状態にて輸送されている。

一方、垂直管路においては、微細な粒子は僅かな流速によっても容易に浮遊し流動するのに対し、粒子径が大きくなるに従って浮遊しづらくなり、かなり高い流速においても粒子は主として転動(Rolling)、摺動(Sliding)あるいは跳躍(Saltation)によって流動する。すなわち、粒子の流動状態は粒子径によって著しく異なる。また、スラリーの圧力損失もこの流動状態に応じて変化することから、スラリーの流動および分類は、一般に水平管路における流動状態を基になされている。ここでは、Durand[3]によってなされた分類を中心に述べることにする。

(1) 均質流：粒子径が $20\sim 30\mu\text{m}$ 以下の粒

子を含むスラリーは、粒子が浮遊しやすいことから、ある程度以上の流速において均質流となる。また、このスラリーは、輸送濃度が低い場合にはニュートン流動を、高い場合には非ニュートン流動を呈し、圧力損失の観点からみれば、単相流として取り扱える。

この大きさの粒子を含むスラリーは、微粒子スラリーと一般に呼ばれている。

(2) 擬均質流：粒子径が $25\mu\text{m}$ 以上 $50\mu\text{m}$ までの粒子を含むスラリーは、沈降性の性状を呈するが、高流速領域すなわち、乱流領域では粒子の管内濃度分布がほぼ一様となり、擬均質流となる。また、この領域では、スラリーを単相流的に取り扱うことが可能である。

(3) 非均質流：粒子径が $50\mu\text{m}$ 以上の粒子を含むスラリーは、乱流領域においても粒子の管内濃度分布は一様とはならず、粒子は管の上下方向に濃度差のある懸濁状態あるいは跳躍・摺動状態にて輸送される。また、この非均質流は、粒子の大きさによって、概ね次のように細分される。

a) 粒子が懸濁状態にて輸送されている非

* 1993.11.16 受付

** 東北大学工学部資源工学科 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉
TEL(022)222-1800(4544) FAX(022)222-2114

均質流：粒子径が $50\mu\text{m}$ 以上 0.2mm までの大きさの粒子を含むスラリーは、沈降性の性状を呈し、低流速領域では粒子は堆積する。しかし、堆積速度以上の領域では、前述の懸濁状態にてスラリーは輸送される。なお、流速の増加に従い、スラリーの流動状態は、擬均質流に近い状態となる。

この大きさの粒子を含むスラリーは、細粒子スラリーと呼ばれている。

b) 粒子が遷移状態にて輸送されている非均質流：粒子径が 0.2mm 以上 2mm までの大きさの粒子を含むスラリーは、細粒子スラリーの場合より粒子の沈降速度が大きいため、粒子の約75%が管中心より下部に存在する状態にて輸送される。また、乱流領域にて輸送されていても流速の減少により堆積層を生じる。すなわち、このスラリーは、前述のa)と後述のc)との遷移的な流動を呈する。

この大きさの粒子を含むスラリーは、中粒子スラリーと一般に称されている。

c) 粒子が跳躍・摺動状態にて輸送されている非均質流：粒子径が 2mm 以上の大きさの粒子を含むスラリーは、粒子の沈降速度が大きいため高流速においても跳躍距離が短く、かつ管下部に粒子が集まることから、通常の輸送条件下では、粒子の大部分は摺動層として流動し、上部の粒子のみが跳躍にて輸送される。この場合においても流速を下げれば、堆積層を生じ、最悪の場合には管路閉塞の状態に至る。この大きさの粒子を含むスラリー

は、粗粒子スラリーと一般に言われている。

その他の研究者[4,5]による分類との比較を示したものが、Fig. 1である[6]。同図に示されるように、Durandの均質流と擬均質流とは池森[4]の微粒子混相流に、(3)のa)、b)およびc)は、それぞれ細粒子混相流、中粒子混相流および粗粒子混相流に概ね対応しており、ほぼ同じ粒子径の範囲にて分類されている。また、前述の粒子径区分は、河川工学の分野において用いられている粒子径区分とも良く対応している。すなわち、砂利およびシルトは、それぞれ粗粒子混相流および微粒子混相流を呈するスラリーに含まれる粒子に、また砂は細粒子混相流ならびに中粒子混相流を示すスラリーに含まれる粒子に相当している。

2. 流速と流動状態[1,2,7,8]

スラリーの流動状態は、前述したように粒子径によって異なるが、同一粒子径であっても流速によって変化する。Fig. 2は、Lazaras[8]によって示された水平管路におけるその過程を定性的に表したものである。ここでは、これを基に粒子の挙動を説明する。

水平管内に沈降性粒子が堆積している場合、流速を徐々に増加させれば、静止している層、すなわち堆積層の上部にある安定の良くない粒子は小刻みに動き始めるが、安定の良い状態・位置にて一時的に停止する。これは部分堆積層流れの初期の段階である。さらに流速

Fig. 1 各研究者による固液混相流の流動状態および粒径の分類

を大きくすれば、他の粒子も流体による抗力によって転動し、やがて上流側が緩傾斜、下流側が急傾斜の三角状の砂澁状態を呈しながら粒子は堆積層の上を移動する。また、流速の増加に伴い移動する粒子量は多くなり、しだいに砂澁の間隔が大きくなり、かつ平坦となる。また、粒子は転動・跳躍によって移動するものが増大する。その結果、管の下部に存在する堆積層は薄くなり、ついには全粒子が移動する。すなわち、摺動層を伴う流れに遷移する。さらに流速を大きくすれば、摺動層は消滅し、管の上下方向に濃度差の大きい非均質流れとなる。なお、堆積層が無くなるまでの流れを堆積層を伴う流れと言う。なお、これらの流動状態が遷移する速度は、限界速度または遷移速度と言われている。

スラリーの流動の項で説明した用語

- ☆均質流(Homogeneous Flow)
- ☆擬均質流(Pseudo-Homogeneous Flow)
- ☆非均質流(Heterogeneous Flow)
- ☆微粒子スラリー(Fine Particle Slurry)
- ☆細粒子スラリー(Small Particle Slurry)
- ☆中粒子スラリー(Medium Particle Slurry)
- ☆粗粒子スラリー(Coarse Particle Slurry)
- ☆微粒子混相流(Fine Particle Mixture Flow)

- ☆細粒子混相流(Small Particle Mixture Flow)
- ☆中粒子混相流(Medium Particle Mixture Flow)
- ☆粗粒子混相流(Coarse Particle Mixture Flow)
- ☆堆積層(Stationary Bed)
- ☆摺動層(Moving Bed, Sliding Bed)
- ☆限界速度(Limit Velocity)
- ☆遷移速度(Transition Velocity)
- ☆堆積層を伴う流れ(Flow with Stationary Bed)
- ☆摺動層を伴う流れ(Flow with Sliding Bed)

参考文献

- [1] スラリー輸送研究会編：スラリー・カプセル輸送技術要覧、p.77、開発問題研究所(1983)。
- [2] 日本機械学会編：管路・ダクトの流体抵抗、p.175、日本機械学会(1979)。
- [3] Durand, R., Intern. Assoc. Hydr. 5th Congr. Minneapolis, pp.89-103, (1953)。
- [4] 池森鶴亀：日本機械学会誌、Vol.66, No.537, pp.112-120, (1963)。
- [5] スモールズイレフ：パイプ流送(外尾、永井共訳)、p.13、技術書院(1963)。
- [6] 野田佳六：傾斜管路による粗粒子群の水力輸送に関する研究(東北大学学位論文)(1975)。
- [7] Govier, G.W. and Aziz, K., The Flow of Complex Mixtures in Pipe, p.617, Van Nostrand Reinhold Company(1972)。
- [8] Lazaras, J.H. and Neilson, I.D., Proc. Hydrotransport 5, pp.B1-16, (1978)。

Fig. 2 固液混相流における流動状態の分類