

フロス層内における気泡の浮力効率に関する研究

九州大学 学○張 満良 九州大学 正 楠田哲也
神鋼パテック(株) 正 平井孝明 電源開発(株) 正 築地治雄

1. はじめに

加圧浮上濃縮を行う際には、気泡の下方側が液相に接し、上方側が汚泥固相に接し浮力がすべて汚泥固相に伝達されるならば、効率100%となりうるが、そうでないならば、効率は低下することになる。このように、浮力の一部の伝達が汚泥固相でなく汚泥気相（気泡）を通して行われると、汚泥固相に作用する力が一部減少し、効率が低下することになる。本研究は、浮上濃縮機構解明の一環として、フロス層における、有効応力によって変形された気泡の形状を理論的かつ実験的に調べ、さらにその結果に基づいて浮力の効率と有効応力の関係について検討を加えたものである。

2. 気泡形状による応力の計算

通常水中の気泡は、自由エネルギーの原理により表面積の一番小さい形を呈するが、フロス層内において汚泥粒子に付着した気泡は、有効応力を受けて変形する。汚泥粒子の濃縮は一軸的に鉛直方向で行われ、気泡は鉛直方向と水平方向の応力差によって球形から回転楕円体に変形すると仮定し、気泡のX、Y、Z軸（水平軸をX、Y、鉛直軸をZとする）方向の長さをそれぞれa、b、cとする。ここで、応力の対称性からa=bとする。

気泡の上半分（気液界面上の接平面が鉛直になる所より上部）に作用している力の平衡を考えると、

$$\pi a \sigma + (\pi/4) a^2 F = (\pi/4) a^2 (p + \Delta p) \cdots (1)$$

ここで、 σ ：処理水の表面張力(N・cm⁻¹)、F：気泡の伝えるZ軸方向に作用している平均有効応力(N・cm⁻²)、 Δp ：表面張力による気泡内の附加圧(N・cm⁻²)、p：有効応力Psの異方性による側圧（水平圧）起因の圧力(N・cm⁻²)であり、その値は側圧に等しい。

また、気泡内の Δp は R_1 、 R_2 を互いに直交する曲率半径として、

$$\Delta p = \sigma (1/R_1 + 1/R_2) \\ = 2\sigma a (1/a^2 + 1/c^2) \cdots \cdots (2)$$

式(2)を式(1)に代入すると、離心率の逆数をk（=a/c）として、

$$F = p + 2\sigma (k^2 - 1)/a \cdots \cdots (3)$$

3. 実験概要

実験は図-1に示す様な容積3.0ℓの全量加圧式フローテーションテスターを用いて、0℃の冷凍槽にて回分式で行われた。まず、テスターに所定のSS濃度の試料を入れ、加圧力4.0kgf/cm²(3.92×10⁵Pa)で、7分間曝気した後、円筒中にフロスを発生させる。フロス発生終了後4時間、フロス厚がほとんど変化しなくなったときに圧力計で深さ方向のフロス層の総側圧を測定する。その後円筒の外側からドライアイスでフロスを凍らせる。凍ったフロス層の上、中、下三カ所でフロスを採取して、マイクロームで10μm刻みに切断し、顕微鏡撮影によってフロス内の気泡の立体形状を調べる。また、残ったフロスをサンプルとして各相の体積分率を求める。

4. 実験結果および考察

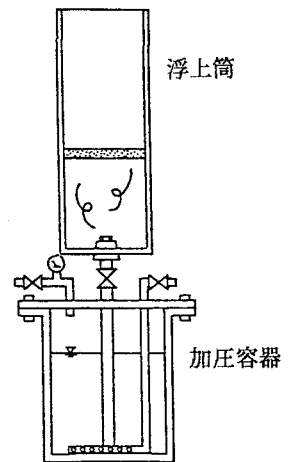


図-1 実験装置

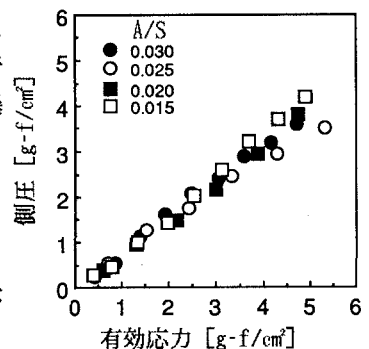


図-2 側圧と有効応力の関係

1) 有効応力による側圧 測定した深さ方向のプロス層の総側圧から静水圧を差し引いて求めた有効応力による側圧と有効応力の関係を図-2に示す。図中の横軸は、プロス層内の側圧測定点での鉛直方向有効応力である。この値は測定点位置以下にあるプロス層の浮力の積分値である。図から分かるように、いずれのA/Sの場合も有効応力により発生する側圧は、有効応力の増加に比例している。この関係は、

$$p = 0.76 P_s \dots \dots \dots (4)$$

となっている。

2) 気泡の変形と有効応力 多数の気泡鉛直断面の観察から、変形後の気泡は鉛直軸を回転軸とする回転楕円体を呈することが分かっている¹⁾。図-3はそれぞれのA/Sで測定された等価体積球径100から600 μm の気泡のkと有効応力の関係を示す。kは有効応力の増加に伴い増加し、両者の間にはっきりとした相関関係を示している。一方、有効応力が一定の場合、大きい気泡は小さい気泡よりkが大きいことから、前者は後者より伝える有効応力が大きいことが分かる。

3) 考察 以上の実験結果を式(3)に代入することにより、汚泥固相に付着した気泡が伝える有効応力が求められる。その計算結果を図-4に示す。いずれの場合も、気泡の伝える有効応力Fは有効応力 P_s に比例し、 P_s が大きいほど大きくなる。一方、有効応力が一定の場合、気泡が大きいほど、Fが大きい。有効応力は直接汚泥粒子に作用すれば濃縮に有効であるが、気泡に作用すると、濃縮に無効となるので、気泡が伝える有効応力と有効応力の比 F/P_s は浮力中の無駄になる部分の比率を表すと考えられる。図-5は F/P_s と気泡径の関係を示す。200 μm 以下の気泡は F/P_s が P_s に関係せず、0.76位であり、それ以上の気泡は P_s の増加に伴い、 F/P_s が大きくなり、低い浮力効率を示している。500 μm 以上の気泡の F/P_s が1より大きいことは、理論上矛盾があるので、現在検討中である。

5. おわりに

気泡の形状と有効応力の関係について検討し、プロス層内の気泡は有効応力を受けて回転楕円体を呈すること、気泡の変形程度はその径と有効応力とともに大きくなること、気泡の浮力効率は気泡径の増加につれて減少することを明らかにした。したがって、高濃度、高効率かつ省エネルギーの浮上濃縮を図るためには汚泥固相に付着する気泡径を小さくするのも一方法であると考えられる。

<参考文献>

1) 張 満良、楠田哲也、平井孝明:プロス層内の気泡形状と有効応力の関係,平成2年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集,PP314-315,1991

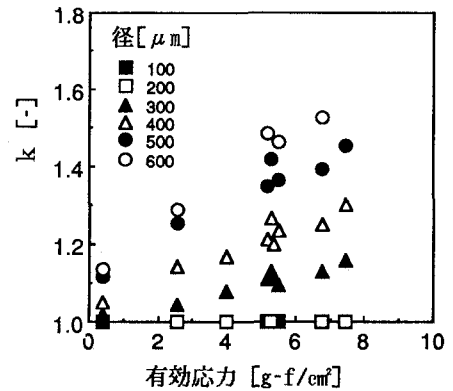


図-3 気泡の変形と有効応力

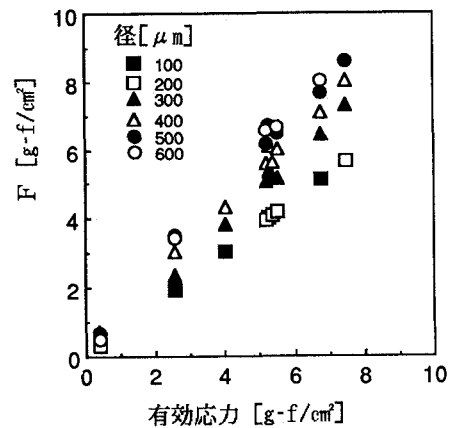


図-4 気泡が伝える応力と有効応力

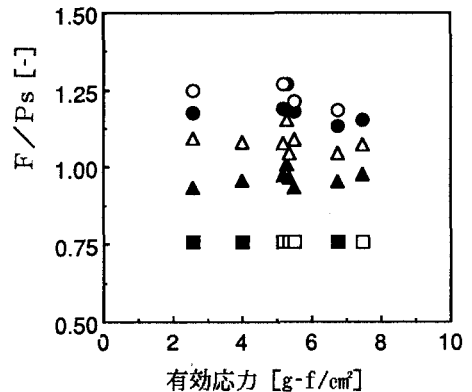


図-5 F/P_s と気泡径の関係