

気泡掘削工法を適用した深層地盤改良における攪拌混合性能の検討

気泡 消泡率 可視化

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
 早稲田大学 学生会員 ○石川 秀一
 戸田建設(株) 請川 誠
 (有)マグマ 国際会員 近藤 義正

前田建設工業(株) 正会員 安井 利彰
 ハザマ 正会員 佐久間 誠也
 太洋基礎工業(株) 俵 豊光

1. まえがき

気泡掘削工法を深層地盤改良工法（機械式攪拌工法）に適用した AWARD-Demi 工法が開発されている。この工法では気泡混入による攪拌土砂の流動性向上という特性を活かし、「排泥量低減」および「セメント添加量低減」を達成することができるので、環境負荷低減およびコストダウンに貢献できる。

一方、機械式攪拌工法においては、従来より攪拌性能向上に向けてさまざまな攪拌翼が考案されている。ここでは、気泡を利用した AWARD-Demi 工法の特性に合った攪拌翼の形状を検討するために、可視化技術を利用した室内実験により攪拌性能確認実験を実施した。

2. 攪拌性能確認実験

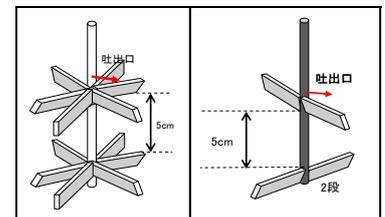
2.1 可視化実験

攪拌状況を視覚的に確認することにより、攪拌翼の特性を把握するために、気泡混合土に相当する攪拌対象材料として透明なホウ砂水溶液 (Na₂B₄O₇・10H₂O) を用い、混入セメントミルクに相当する注入材料として赤色に着色したポリビニルアルコール(以下 PVA とする)を用いた。各材料の粘度比は、気泡混合土とセメントミルクの粘度比に合わせた。表 2.1.1 に使用材料の性状を示す。

攪拌翼は図 2.1.1 に示す 6 枚パドル翼と 2 枚傾斜パドル翼 (45 度傾斜) を使用した。それぞれ 2 段翼とし、上部翼直上に PVA の吐出口を設けた。実験は、図 2.1.2 に示すように攪拌翼を回転させながらホウ砂水溶液中に PVA を吐出し、PVA の攪拌状況を観察することとした。実施工では攪拌翼を引上げながら攪拌するので、ジャッキを使用してモールドを一定速度で低下させて攪拌翼を相対的に引上げることとした。

表 2.1.1 使用材料の性状一覧

| 模擬地盤 | | | | 注入材 | | | | 攪拌速度 (rpm) |
|-----------|-----------|-------------|-------------------------|-----------|-----------|----------|-------------------------|------------|
| ホウ砂濃度 (%) | 高分子濃度 (%) | ホウ砂粘性 (dPa) | 比重 (g/cm ³) | PVA濃度 (%) | 高分子濃度 (%) | 粘性 (dPa) | 比重 (g/cm ³) | |
| 1.0 | 0.5 | 1.8 | 1.1 | 3.75 | — | 0.5 | 1.0 | 60 |



攪拌翼パターン1 攪拌翼パターン2

図 2.1.1 攪拌翼



図 2.1.2 可視化実験模式図

表 2.1.2 に試験ケースを示す。なお、攪拌翼の羽切回数は別途実施した試験施工の条件に合わせた。PVA の注入量をケース 1、2 で同量にするために注入速度を調整した。

表 2.1.2 試験ケース一覧

| ケース | 翼仕様 | 容器径 | 回転速度 | 攪拌翼枚数 | 試験施工 | 上下分割モールド | PVA注入速度 |
|------|--------|--------|---------|-------|----------------|----------------|---------|
| | | D (cm) | n (rpm) | | 羽切回数 (回/100cm) | 目標羽切回数 (回/9cm) | |
| 試験施工 | 2枚翼×2段 | 100 | 60 | 4 | 600 | — | |
| ケース1 | パターン1 | 9 | 60 | 12 | | 600 | 69 |
| ケース2 | パターン2 | 9 | 60 | 4 | | 600 | 23 |

※ PVA 注入速度 (cc/min) = (引上速度 × 容器径 × 容器径 × π ÷ 4) ÷ 10



写真 2.1.1 ケース 1

表 2.1.3 可視化実験結果

| ケース | 攪拌翼パターン | 半径方向の対流 | 上下方向の対流 |
|-----|---------|-------------|--|
| | | | |
| 1 | パターン1 | ・外周部に偏っている。 | ・翼の引き上げに伴い、下部にも対流。 ・初期吐出高さ以降に対流しない。 |
| 2 | パターン2 | ・均質に混ざっている。 | ・翼の引き上げに伴い、下部にも対流。しかし、上部が相対的に濃い。 ・初期と吐出高さ以降にも、若干対流。中心部に偏っている。 |



写真 2.1.2 ケース 2

Visualization of the stirring and mixing condition Hirokazu Akagi, Shuichi Ishikawa, Waseda University of soil during soil mixing process with air foam

表 2.1.3 に実験結果を、写真 2.1.1 および 2.1.2 に攪拌完了時実験状況の写真を示す。攪拌翼パターン 2 の方が、攪拌状況が良好であった。この実験では、攪拌翼パターン 1,2 ともに回転速度 $n:1.0(s^{-1})$ 、攪拌翼径 $d:0.08(m)$ 、ホウ砂水溶液密度 $\rho:1.1\times 10^3(kg/m^3)$ 、ホウ砂水溶液粘度 $\mu:0.18(Pa\cdot s)$ なので、攪拌レイノルズ数 $Re(=nd^2\rho/\mu)$ は 39.1 となり、層流状態である。一般的に層流状態での攪拌は半径方向の流れが卓越するといわれており、攪拌翼から離れるにしたがい流れが減衰していく。従って、攪拌翼の径を大きくしたり、大型翼を使用して半径方向に均一に注入材料を行き渡らせる場合が多い²⁾。今回の実験においては、パターン 2 の傾斜パドル翼の方が上下方向の流れを発生しやすいため、注入材料 (PVA) を半径方向、上下方向に攪拌できたと考えられる。

2.2 消泡性能確認実験

ここでは、2.1 と同じ実験装置により、実施工と同様に気泡混合土とセメントスラリーを用いて攪拌性能を比較した。攪拌性能の良否は混入した気泡の消泡率により判断した。また、試料の配合を表 2.2.1 に示す。気泡混合土をモールドに投入した後、攪拌翼をモールド底面から約 2cm 上の所に設置し、セメントミルクおよび消泡剤を吐出しながら、攪拌翼を引き上げることとした。なお、攪拌翼の羽切回数および引上速度は 2.1 可視化実験と同様である。

表 2.2.1 使用試料配合(全ケース同量)

| 材料配合 | | | | | |
|--------------------|--------|-------|-------------------|------|--------|
| 気泡混合土(仕上がり1.0lあたり) | | | 注入材料(仕上がり1.0lあたり) | | |
| 気泡Wa | 試料土Ws | 水Wsw | セメントWc | 水Wcw | 消泡剤Wsa |
| (g) | (g) | (g) | (g) | (g) | (g) |
| 3.8 | 1516.1 | 333.5 | 150 | 90 | 0.19 |

※試料土は硅砂 5号：硅砂 7号：木節粘土=5：4：1 (重量比)

実験条件は表 2.2.2 に示す通りであり、消泡率はモールド投入後の気泡量に対する攪拌後に残った気泡量の割合である。

表 2.2.2 実験ケース一覧

| 翼パターン | 容器直径 D (cm) | 攪拌翼枚数 N (枚) | 回転数 n (rpm) | 羽切回数 T (回/Dcm) | 引上長 L (cm) | 引上速度 v (cm/min) | 引上時間 (s) | 気泡混合土量 (l) | セメントスラリー+消泡 (l) |
|--------|-------------|-------------|-------------|----------------|------------|-----------------|----------|------------|-----------------|
| 2枚翼×2段 | 1000 | 4 | 60 | 600 | | 40 | | | |
| パターン1 | 9.0 | 12 | 60 | 600 | 15.7 | 10.8 | 87 | 1.0 | 1.517 |
| パターン2 | 9.0 | 4 | 60 | 600 | 15.7 | 3.6 | 262 | 1.0 | 1.517 |
| パターン1 | 9.0 | 12 | 90 | 600 | 15.7 | 16.2 | 58 | 1.0 | 1.517 |
| パターン2 | 9.0 | 4 | 90 | 600 | 15.7 | 5.4 | 174 | 1.0 | 1.517 |
| パターン1 | 9.0 | 12 | 120 | 600 | 15.7 | 21.6 | 44 | 1.0 | 1.517 |
| パターン2 | 9.0 | 4 | 120 | 600 | 15.7 | 7.2 | 131 | 1.0 | 1.517 |

図 2.2.1 より、消泡率は回転速度が大きくなるにつれて一次関数的に増加することがわかる。これは、回転数を大きくすると攪拌レイノルズ数 Re が乱流状態 ($Re>1000$) に近づくためと考えられる。また、攪拌翼パターン 2 の方が、攪拌翼パターン 1 より消泡率が高いので、可視化実験と同様に攪拌翼パターン 2 の方が攪拌性能は良いと判断できる。

3. まとめ

ここでは、可視化技術を利用した室内実験により気泡掘削を利用した Award-Demi 工法における攪拌翼の形状が攪拌性能に及ぼす影響を調査した。得られた成果は次のとおりである。

- 1) 可視化実験、消泡性確認実験のどちらにおいても、傾斜パドル翼の方が攪拌性能は良好であった。
- 2) 回転数を大きくすると攪拌性能が向上するが、実機の攪拌回転数を考慮すると、攪拌状態を層流状態から乱流状態 ($Re>1000$) に大幅に移行することは難しい。

参考文献

- 1) 赤木、請川、安井、佐久間、土屋、近藤：気泡掘削工法(地盤改良、等圧式ソイルセメント壁への使用)
- 2) 最新ミキシング技術の基礎と応用 化学工学会監修

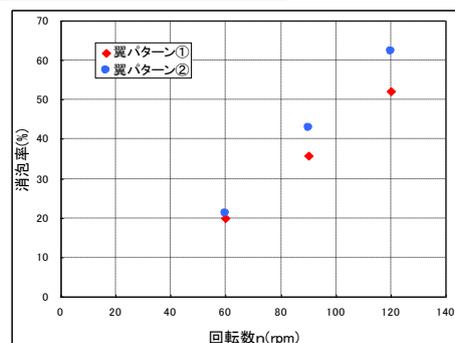


図 2.2.1 消泡率測定結果