

能動的排水ポンプを用いた揚水井戸内の気液二相流を対象とした基礎的な解析

四国山地砂防事務所 ○高原晃宙・松下一樹
 国土技術政策総合研究所 小嶋孝徳、中谷洋明

1. はじめに

地すべり対策で用いられる地下水揚水法にはウェルポイント工法やディープウェル工法がある。また、近年開発されたスーパーウェルポイント工法¹⁾（以下 SWP 工法という）が意欲的に用いられている^{2), 3)}。しかし、ポンプを用いる特性上、地すべり地の地下水位低下工法としては、集水・揚水能力を見込んだ計画・設計並びに運用が難しい、あるいは機器の耐久性や異常の早期発見などに不安が残るなどといった課題がある。そのため、地すべり対策では応急対策工法という整理がされている。

一方で、施工適地が限られる中で効率的な事業実施を目指すために、課題を分析し適用性を広げる努力を継続する必要があると考えている。そのため基礎的な検討として、SWP 工法の設置孔内を対象に、ポンプ発熱による熱対流及び減圧による気泡析出を考慮した気液二相流の再現を試みたので報告する。

2. SWP 工法の概要

SWP 工法は、真空ポンプと水中ポンプを組み合わせ、能動的に飽和地下水を集水・揚水する工法である(図-1)。井戸構造は二重管構造となっており、下部に通水孔を持つ鋼管の外側にスクリーンが設置されている。地上に設置した真空ポンプにより鋼管内を減圧して孔内水位を引き上げ、通水孔から地下水を集水する。この際、スクリーンと鋼管の間で空気が分離されて水のみ鋼管内に流入する。鋼管内に流入した水は水中ポンプで揚水する仕組みとなっている。

3. 解析手法

解析には汎用性のある Advance/FrontFlow/MP を用いた。これは、二流体モデル (Euler-Euler 法) により気液二相流の流動特性や伝熱特性を解析する非構造格子系のソフトウェアである。解析にあたっては、水中ポンプを

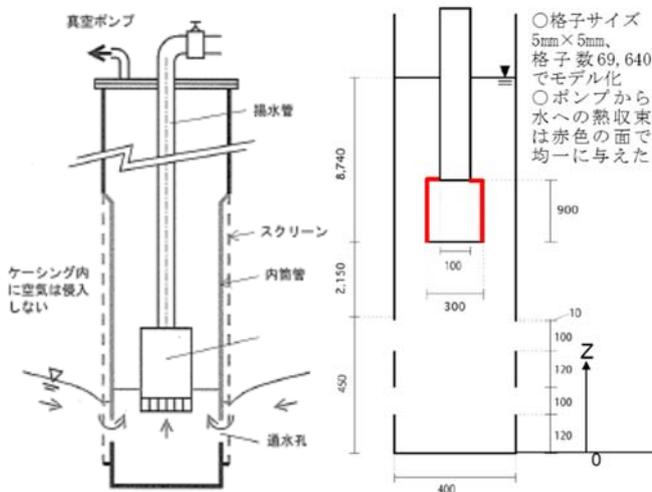


図-1 排水機構イメージ¹⁾

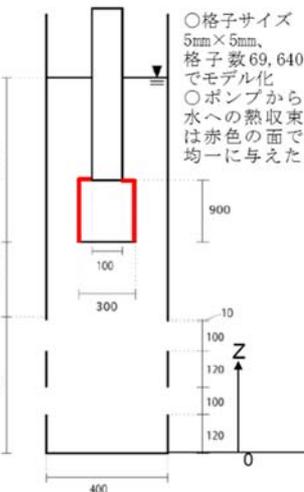


図-2 解析モデルの概略

表-1 計算条件

No.	項目	値	単位	内容
1	水面のゲージ圧	-0.06	Mpa	稼働時の平均表示圧力
2	ポンプが揚水する液相の流量	1.2	m ³ /min	ポンプの定常運転時の排水量 (φ300 mm)
3	通水孔から流入する液相の流量	0.075	m ³ /min	φ100 mm吸水口×16
		1.2	m ³ /min	3次元全体 (=ポンプ揚水量)
4	通水孔から流入する気相の流量	7.7 × 10 ⁻⁴	m ³ /min	φ100 mm吸水口×16
		0.01232	m ³ /min	3次元全体
5	通水孔から流入するボイド率	0.01016	-	気相流量 / (気相流量 + 液相流量)
6	通水孔から流入する液相の温度	12.6	°C	地下水温
7	ポンプから液体への熱流束	2173	W/m ²	= 発熱量/面積 発熱量: 稼働率(80%)、負荷率(10%)と仮定した場合のポンプ熱損失量
8	ポンプを除く壁面の温度	12.6	°C	地下水温と同一と仮定
9	乱流モデル	k-εモデル		
10	液相の密度	999.5	kg/m ³	標準物性値より導出 (水温2.6°C)
11	液相の動粘性係数	1.22 × 10 ⁻³	Pa s	
12	液相の表面張力係数	0.07384	N/m	
13	液相の定圧比熱	4189	J/(kg・K)	
14	液相の熱伝導率	0.59	W/(m・K)	標準物性値より導出 (水温12.6°C)
15	液相のPrandtl数	8.66	-	
16	液相の体積膨張率	1.21 × 10 ⁻⁴	1/K	標準物性値より導出 (気温2.6°C)
17	気相の密度	2.019	kg/m ³	
18	気相の粘性係数	1.986 × 10 ⁻⁵	Pa s	
19	気相の定圧比熱	918.9	J/(kg・K)	
20	気相の熱伝導率	0.02538	W/(m・K)	標準物性値より導出 (気温12.6°C)
21	気相のPrandtl数	0.719	-	
22	気泡径	0.7	mm	通水孔スリット径より仮定

設置した鋼管底部を二次元軸対称モデルとして図-2 のように単純化した。計算条件は表-1 に示した。再現を試みる気液二相流は、圧力差及び出入流量一定の定常状態にあるものと仮定し、気泡の併合は再現の対象としなかった。揚水用の水中ポンプは通水孔より上に設置する。そのため、鋼管内に流入した細粒分は底面へと沈降すると想定し、細粒土砂の挙動は無視した。また、鋼管壁を介しての熱交換は無視した。

4. 解析結果と考察

ケース1を基本ケースとして、気泡の大きさ、気相流量を変化させて3ケース、液体への熱収束を考慮して1ケースの合計4ケースを解析し(表-2)、液相速度(図-

表-2 解析ケース

解析ケース	解析条件			解析結果	
	温度	気泡径	吸水口からの気相流量 ① m ³ /min	(水中ポンプに流入する気相流量) ② m ³ /min	②/①×100 %
1	一定	0.7	0.01232	(0.01002)	81.3
2		1.4	0.01232	(0.00893)	72.5
3		0.7	0.00616	(0.00518)	84.1
4		計算	0.7	0.01282	(0.00692)

※水中ポンプに流入する気相流量以外は上方に流動し、液面から流出する。

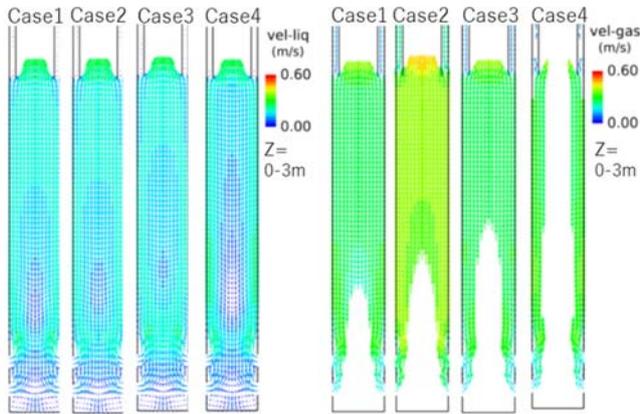


図-3 液相速度分布

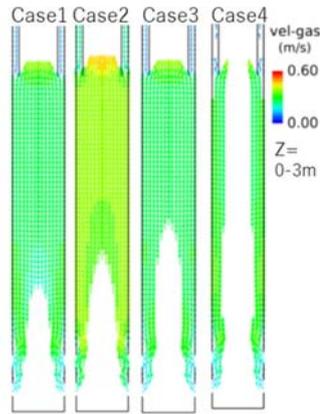


図-4 気相速度分布

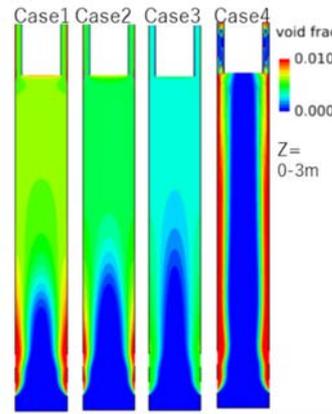


図-5 ボイド率分布

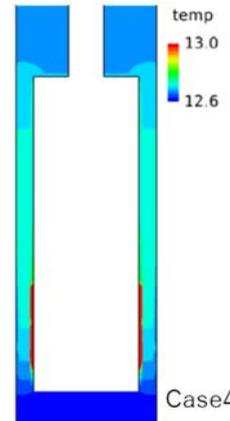


図-6 温度分布 (ポンプ周辺)

3)・気相速度 (図-4) やボイド率 (図-5) について比較した。液相は通水孔から流入し水中ポンプに流入するが、気相は通水孔から流入し、水中ポンプで揚水される流れとポンプと管壁の間に存在する水面から放出される流れが存在する。これを踏まえて気相流量の配分にも着目して揚水井戸内の流動特性を分析した。

4.1 温度一定を仮定した解析 (ケース1からケース3)

液相速度はケース1からケース3で大きな差異は見られなかった。気相速度については、ケース1とケース2の比較で、気泡径の大きいケース2の気相速度が大きかった。ケース1とケース3の比較では、気相流量の大きいケース1の気相速度が若干大きかった。

通水孔から流入した液相の流れは壁面に沿って上方に流動し、水中ポンプ吸込口近くの液相速度が大きくなる速度分布が見られた。気相の流れも同様だが、管中央部に気相を含まない領域が存在した。そのため、壁面と気相を含まない領域に挟まれた範囲でボイド率が高くなった。また、ポンプ吸水口近くは気相速度と液相速度の速度差が大きくなり、液相の流量よりも気相の流量が大きいため、ポンプ吸込口近くで気相の占める割合が大きくなり、ボイド率が高くなった。

気泡径を変えたケース1とケース2では、気泡径の小さいケース1の方が水中ポンプに流入する気相流量の割合が大きかった。ケース2の方が、水中ポンプと管壁の間を流動して水面から放出される気相流れの速度が大きかったため、これが影響したと考えた。ケース1とケース3では、ケース3の方が水中ポンプに流入する気相流量の割合が大きかった。これはケース3のボイド率が小さいことに加えて、吸水口付近で液相速度と気相速度の差が小さくボイド率も均等に分布していることが影響したと考えた。

4.2 ポンプの排熱を考慮した解析 (ケース4)

液体への熱収束を考慮したケース4で、ポンプ近くでは液相温度は上昇するが、ポンプから下方では液相から管壁へ熱が移動するため液相温度は低下していた(図-6)。通水孔からポンプ吸水口までの液相速度は、壁面近くで液相速度が大きくなり横断方向で速度差が大きくなった

(図-6)。気相速度についても壁面近くで気相速度が大きくなり、気相を含まない範囲がより上方まで分布するようになった。図-7にボイド率が高くなる範囲を囲み、気相速度の分布図と重ね合わせた。ポンプ吸水面付近では気相速度が低下する速度変化点

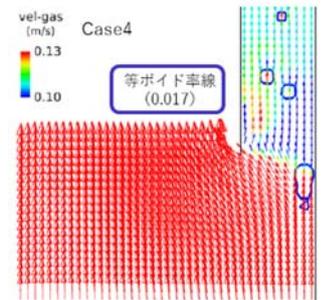


図-7 気相速度 (ポンプ周辺)

でボイド率が高くなり、ポンプと管壁の間では気相速度が局所的に上昇する場所でボイド率が高かった。

ケース1とケース4を比較すると、ケース1の方が水中ポンプに流入する気相流量の割合が大きかった。これは、ケース4では水中ポンプ吸水面にボイド率0の領域が接していることが影響したと考えた。

5. まとめ

SWP工法の揚水井戸中の気液二相流について基礎的な解析を行った。その結果、析出する気泡の大きさや気相流量、ポンプからの排熱による気相速度の上昇がポンプに流入する気相流量の割合に影響する状況を再現できた。現在、SWP工法の施工や運用においてポンプ性能の低下が発生しないように、過去の実績に基づく技術者判断が行われて水中ポンプ位置の調整などが行われている。

本検討で実施したような、常圧と異なる地下孔底部での地下水流れに対して気液二相流解析の適用事例を蓄積し、現場での調整ポイントなどについて技術的な解釈が可能となるように取り組んでいきたい。

引用文献

- 1) 荒井紀之ら (2001) スーパーウェルポイント工法の開発、西松建設技報、Vol24、p101-102
- 2) 中谷洋明ら (2016) 能動的な斜面排水工法の適用性の検討、砂防学会誌、Vol. 69, No. 4, p. 21-24
- 3) Teruyoshi TAKAHARA (2021) Mitigation works for the Aruse I-3 block landslide in Miyoshi, Tokushima, Japan, The Fifth World Landslide Forum Abstracts WLF5 Kyoto 2021