

## 水理模型実験を用いた地下水溶存気体の析出・溶解に関する考察

パシフィックコンサルタンツ株式会社 つくば技術研究センター ○吉武 央気・市山 誠・小津 貴則  
国土交通省国土技術政策総合研究所 土砂災害研究部 土砂災害研究室 中谷 洋明・小嶋 孝徳・金澤 瑛

## 1. はじめに

著者らは、無降雨時等の斜面崩壊が地下水溶存気体の析出・溶解に起因して生じると仮説を立てている。具体的には次のメカニズムを想定している。(a) 降雨により雨水の地下浸透が生じ、地下水位上昇により地下水圧が増加する。(b) 地下水圧が増加するとヘンリーの法則に従って、地層間隙中の気体が地下水へ溶解する。(c) 気体が溶解した地下水が斜面付近に時間をかけて流動する。(d) 斜面付近では、水圧減少が生じるとともに、日射等の影響で地表および地中温度が高いため、結果として地下水中の溶存気体が気泡として析出する。(e) 析出した気泡が地層の透水性を低下させることで地下水位の上昇が生じ、斜面の不安定化を招き、斜面崩壊が生じる。

小高ら<sup>1)</sup>は、浸透過程に現れる気泡の発生・発達現象のメカニズム解明のため、二次元浸透実験により未飽和水では空気の溶解が生じること、過飽和水では気泡の析出が生じることを確認した。また、一次元浸透実験では気泡の発生・発達が透水性の不均一性を招き、地盤の安定性を低下させることが示唆された。

本研究では、斜面崩壊メカニズムの仮説を検証するための第一歩として、地層を通過する地下水と気体の溶解・析出の関係を定量評価することを目的とし、水理模型(土槽)実験を実施した。溶解実験では、地下水圧が高い状態を想定した地層間隙中の空気が水に溶解し、飽和水に至る過程を確認した。また、析出実験では、過飽和水が地層を流れる際の地下水圧低下や流速変化に伴って生じる気泡の析出を確認した。なお、溶解・析出は、溶存酸素量で定量評価した。

## 2. 実験条件

溶解実験では土槽 (H=500 mm, φ=190 mm) と変動水槽 (H=400 mm, φ=190 mm) を、析出実験で土槽および加圧水槽 (H=1000 mm, φ=280 mm) を用いた。

## 2. 1 溶解実験

溶解実験の模型状況を図1に示す。実験準備として、変動水槽および土槽内 (D<sub>50</sub> = 3.68 mm) に中間高さ分の水道水を送水し、土槽下部で溶存酸素量 (OXROB10-OI 遮光性ステンレス O<sub>2</sub> ミニプローブ, ビー・イー・エス (株) 製) の計測を開始した。また、変動水槽および土槽内の圧力が +0.1 MPa の加圧状態となるようにコンプレッサーを手動調整した。実験では変動水槽を所定時間で上下に 30 cm 変動させ、土槽内の水面を土槽中間高から土槽上部まで変化させつつ、溶存酸素量の計測を継続した。複数回変動させることや通水水温を 2 パターン設定することにより、溶解量と流速・レイノルズ数、水温の関係を整理した。

## 2. 2 析出実験

析出実験の模型状況を図2に示す。実験準備として、加圧水槽にコンプレッサーで +0.1 MPa の圧を加え、攪拌機を用いて +0.1 MPa 下 (水頭 10 m 程度) での飽和水を作製した。実験では、作製した飽和水をコンプレッサーで所定圧力 (+0.001~+0.040 MPa) に調整しながら土槽内に通水した。加圧水槽および土槽排水口で溶存酸素量 (EXO1・YSIProDSS マルチ水質センサー, ワイエスアイ・ナノテック (株) 製) を、実験土槽排水口で排水量を計測した。土槽内に設置する実験砂 (D<sub>50</sub>=0.49-3.68 mm) や通水時の所定圧力、飽和水の水温を 2 パターン設定することで析出量と流速・レイノルズ数、水温の関係を整理した。なお、土槽には φ31 mm の幅狭水路を中間に設置し、土槽内で流速・圧力

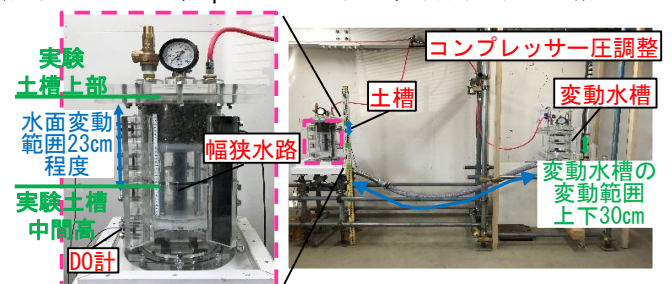


図1 実験模型状況 (溶解実験)

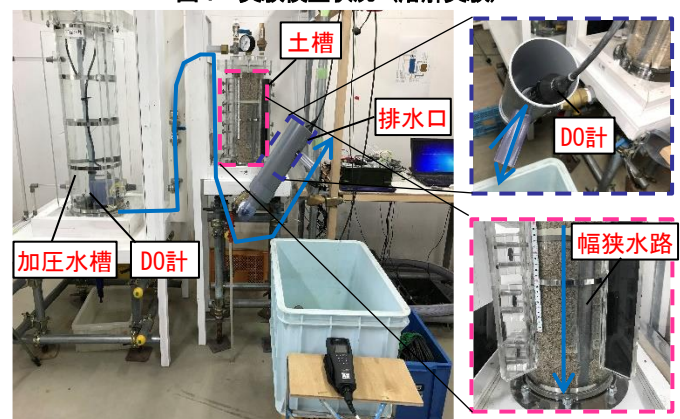


図2 実験模型状況 (析出実験)

変化が生じて気泡の析出が生じやすくなるように工夫した。

### 3. 実験結果の考察

実験結果の考察として、溶解速度・析出速度とレイノルズ数の相関を確認した。本研究では、将来的に現場で生じている現象の調査・評価等を見据えているため、無次元量であるレイノルズ数で考察することにした。なお、レイノルズ数は、代表流速を幅狭水路（空隙 0.4 と仮定）の通過流速、代表長さを実験砂の平均粒径（ $D_{50} = 3.68 \text{ mm}$ ）、動粘性係数は水温に対する値（ $20^\circ\text{C} - 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $30^\circ\text{C} - 0.008 \text{ cm}^2/\text{s}$ ）として算定した。

#### 3. 1 溶解実験

溶解速度とレイノルズ数の関係を図3に示す。溶解速度は、溶存酸素量の増加量を実験土槽の変動時間で除した値で定義した。溶解速度は、レイノルズ数が5付近では $0.01 - 0.03 \text{ mg/L/min}$ であるのに対し、レイノルズ数が35以上では $0.09 - 0.12 \text{ mg/L/min}$ 程度であった。レイノルズ数がある値以下では、溶解速度は乱れの程度に依存することを確認した。一方、レイノルズ数が35以上では溶解速度が一定となり、溶解速度は乱れの程度に依存しないことを確認した。水温  $30^\circ\text{C}$  の実験では、水温  $20^\circ\text{C}$  の実験よりも溶解速度が増加していた。その程度は、レイノルズ数が低いほど大きい。

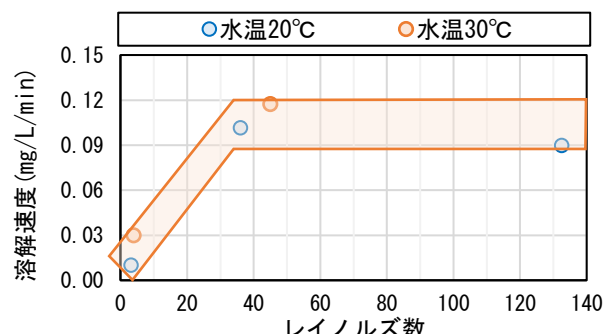


図3 単位時間当たりの溶解量とレイノルズ数との関係

以上の実験より地下水への気体の溶解は、乱れの程度が一定の度合いより低い場合には、乱れの程度や水温に依存すると考えられる。一方、乱れの程度が一定の度合いを超えた場合には、乱れの程度や水温に依存しにくいことが示唆された。なお、溶解速度  $0.01 \text{ mg/L/min}$  というのは、 $1,000$  分（ $16.7$  時間）で  $10 \text{ mg/L}$  の溶解が生じることを示している。この時間スケールは、地下水流動の時間スケールと比べて短いため、溶解する条件が揃うと飽和状態まで気体が溶解する可能性を示唆している。

#### 3. 2 析出実験

析出速度とレイノルズ数の関係を図4に示す。析出速度は、所定加圧条件下の最終時刻において、加圧水槽の溶存酸素量から排水口での溶存酸素量を引いた値を幅狭水路の通過時間で除して算定した。なお、流量や溶存酸素量は、通水中に流況等が安定したと判断できる時間帯において計測、算定した。また、幅狭水路の通過時間・流速は、排水口で計測した流量より算定した。

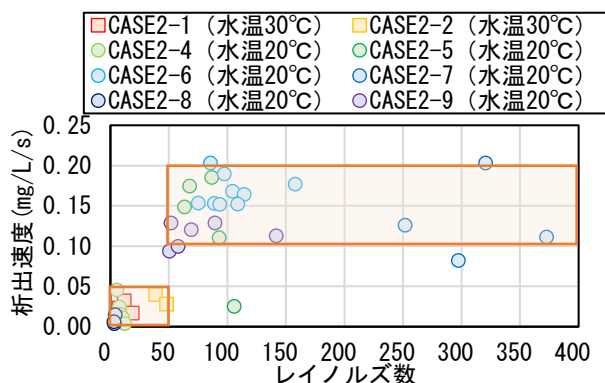


図4 単位時間当たりの析出量とレイノルズ数の関係

析出速度は、レイノルズ数が50程度未満では $0.00 - 0.05 \text{ mg/L/s}$ の範囲内であるのに対し、レイノルズ数が50程度以上では $0.10 - 0.20 \text{ mg/L/s}$ の範囲内であった。水温  $30^\circ\text{C}$  の実験と水温  $20^\circ\text{C}$  の実験を比較すると、析出速度に明確な変化は見られなかった。析出は、乱れの程度に依存して2段階に分かれることが示唆された。

以上の実験より地下水からの気泡の析出は、溶解と比べて速度が速く、溶解同様に析出する条件が揃うと飽和状態まで気体が析出する可能性が示唆された。また、低地下水圧・高温条件となりやすい斜面端部では地層中の飽和状態よりも溶解量が少なくなると考えられる。そのため、地層中と斜面端部での飽和量差が気泡として析出する可能性が示唆される。

### 4. おわりに

本実験より、溶解現象、析出現象ともに、条件が揃うと地層中でも生じることを示すことができた。また、地層を通過する地下水と気体の溶解・析出の関係を定量評価することができた。今後は、析出によって生じる透水性低下に関する基礎実験を行うとともに、加熱された地下水が地層中を通過する際の析出、透水性低下等を与える定量実験を実施する予定である。

#### 参考文献

小高, 浅岡 (1994) : 砂質地盤の浸透過程での気泡の発生・発達現象, 土木学会論文集 No.487 / III-26, pp.129-138.