

洪水により堆積した泥土層の圧力水頭が亀裂の生起におよぼす影響

Effects of pressure head on cracking in mud-soil which deposited after flood

○久保田 康介^{*}, 鈴木 純^{**}

○Kosuke KUBOTA^{*} and Jun SUZUKI^{**}

1. はじめに

2019年の台風19号接近で千曲川堤防が決壊したことによる氾濫が発生し、一帯に泥土が堆積した。当時収穫まじかのリンゴ畑にも泥土が堆積し、これによって根圏土層に供給される酸素の欠乏が懸念されたが、翌年のリンゴの収量は例年並みであった(鈴木ら, 2022)。この理由として、湛水の解消後、比較的速やかに形成される泥土の亀裂を通じて根圏土層に空気が供給された可能性が示唆された(鈴木ら, 2023)。そこで、泥土層に亀裂が生起するメカニズムを検討するために、現地の土層構造を再現したカラム装置を用いて圧力水頭を測定した。

2. 方法

泥土および畑地土壌は長野市長沼地区赤沼のリンゴ園において2019年に採取した(鈴木ら, 2023)ものを再利用した。以前のカラムから取り出した畑地土壌は19.1mmふるいで、泥土は2mmふるいでふるい、内径25cm、高さ75cmの塩ビ管に13cmの砂、20cmの畑地土壌、30cmの泥土を詰めてカラムとした。カラムは底部の塩ビ管を通じて「排水槽」と連結し、この排水槽の水位を調節することでカラムに、泥土表面から深さ45cmから134cmの水位差を設定できる。カラム作成後に湛水状態として約3週間経過後に泥土層の深さ5, 10, 15, 20, および25cmに圧力センサー付きのポーラスカップを差し込み、データを1分ごとに測定した。

実験は2024年12月18日から行った。実験開始1日目に湛水深を5cm、排水槽の水位差を45cmに調節して7日目まで圧力水頭を測定した。8日目に再び湛水深を5cmに戻し、排水槽の水位差を134cmに調整して21日目まで圧力水頭を測定した。なお、実験時の泥土厚は当初の30cmから、15日目には27.4cmに収縮した。

3. 結果と考察

3.1. 泥土層の圧力水頭の推移 図1は圧力水頭の推移を表している。泥土表面と排水槽の水位の差を設定すると圧力水頭が低下した。16日目に湛水が解消すると圧力水頭は急激に低下した。また17日目に亀裂が目視で確認できた。この時、前日に顕著に低下した圧力水頭は-30~-40cm程度に上昇したが、5cmの圧力水頭は継続して低下した。これは亀裂を生じたことによるマトリックポテンシャルの顕在化である。

3.2. 湛水解消後の圧力水頭の低下 次に、湛水解消直後に発現した圧力水頭の急激な低下について検討する。湛水の解消によって泥土表面層の透水係数が変化したことが原因と考えて、成層土にダルシー則を適用して泥土層の圧力水頭 h_p を評価した。以降で使用する計算式は図2のとおりである。まず、湛水解消直後は湛水時のフラックスが持続していると仮定し、このフラックスに相当する水の体積は泥土に収縮を生じさせると考えて $l_c=1.86\text{cm}$ とした。そしてカラム成層土の合成透水係数 $k_{\text{eff}}(\text{cm/s})$ とフラックス $v(\text{cm/s})$ をeq. 1とeq. 2で求めた。ここで l

^{*}国土交通省北海道開発局(Hokkaido Regional Development Bureau) ^{**}信州大学農学部(Agriculture, Shinshu University) 圧力水頭 亀裂 洪水泥土 ダルシー則 有効応力

は土層の厚さ(cm), k は透水係数(cm/s), 下付き文字 f は畑地, m は泥土, c は収縮が生じた泥土を示している。また, $h_w - h_z$ はカラム成層土層の全水頭である。フラックス v はカラム成層土層全体で一定なので, eq.3 から深さ 1cm 当たりの全水頭の差を求めて h_p を導出した。 k_f は 4.31×10^{-4} (cm/s), k_m は 2.16×10^{-6} (cm/s), k_c は鈴木ら(2023)の測定値 4.49×10^{-7} (cm/s)を用いた。カラム泥土層の湛水解消直後と亀裂発生直前の圧力水頭のプロファイルを表した図 3 の左図のとおり, 測定値と計算値は一致していないが, 湛水解消直後に泥土下端に向かって低下する圧力水頭が確認できた。亀裂発生の前には深さ 1.86cm の圧力水頭は-6.33cm から-44.36cm まで低下し, また, フラックス v が 1.39cm/d から 0.96cm/d に低下したことで, 泥土の深さ 1cm あたりの全水頭差 Δh_m も 4.77cm/cm から 3.32cm/cm に低下している。これは図 3 左図の傾きの違いに表れている。したがって, 湛水解消後に泥土層の圧力水頭が低下した理由は, 下方への水移動に伴う泥土上端部の圧縮に伴いこの部分の透水係数が低下したことが原因で, フラックスが小さくなったと説明できる。

3.3. 圧力水頭の鉛直分布と亀裂の生起 次に泥土層の圧力水頭が亀裂の生起に与える影響を検討した。泥土層の水平方向に生じる有効応力を eq.4, 5 と 6 によ

って求めた。なお, σ は全応力(kPa), σ' は有効応力(kPa), 下付き文字 h と v はそれぞれ水平方向と鉛直方向, K_0 は静止土圧係数, ρ_t は湿潤密度で 1.62 (g/cm³), g は重力加速度で 9.81 (m/s²)である。この時の K_0 はポアソン比 ν を 0.5 として eq.7 によって求めた。図 3 右図のとおり, 圧力水頭が低下するにつれて水平方向の有効応力 σ'_h が増加している。泥土に生じる亀裂が圧縮力による土粒子の移動現象と考えると, 泥土層の圧力水頭のプロファイルは有効応力のプロファイルを形成する要因であるといえる。泥土内の圧力水頭は下端に向かうにつれて低下しているため, 水平方向の有効応力が泥土下端で最大となる。したがって泥土に生起する亀裂のきっかけは表層に生じた微細な亀裂であるが, 泥土層下方に向けて増加する有効応力は, 土層を貫く亀裂の下方伝播の潜在力となることがわかる。泥土は, 厚く堆積しても内部(底部)から亀裂を生じるような作用が生じていることが分かった。

4. おわりに

氾濫の後に厚い泥土が堆積した農地の根圏土層にいち早く大気を侵入させるための亀裂の発生は, 重機の利用が検討できる水路等の排泥を進めることによる表面排水が最も効果的である。

(謝辞) 本研究の一部は 2024 年信州大学グリーン社会協創機構調査研究プロジェクト支援事業の補助を受けて実施された。

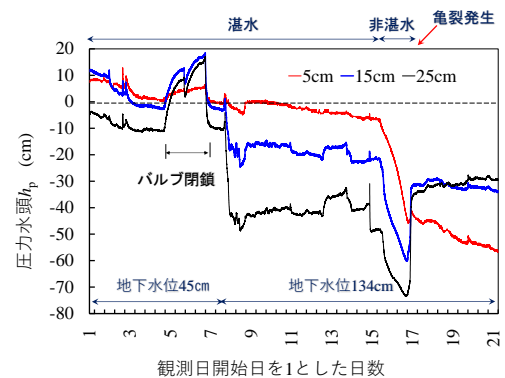


図1 圧力水頭の推移 Changes in pressure head

$$k_{eff} = \frac{l_f + l_m + l_c}{\frac{l_f}{k_f} + \frac{l_m}{k_m} + \frac{l_c}{k_c}} \quad \text{eq. 1}$$

$$v = k_{eff} \frac{h_w - h_z}{l_m + l_f} \quad \text{eq. 2}$$

$$v = k_f \frac{\Delta h_f}{\Delta l_f} = k_m \frac{\Delta h_m}{\Delta l_m} = k_c \frac{\Delta h_c}{\Delta l_c} \quad \text{eq. 3}$$

$$\sigma_v = \rho_t g z \quad \text{eq. 4}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_w \quad \text{eq. 5}$$

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad \text{eq. 6}$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad \text{eq. 7}$$

図2 使用した計算式一覧
List of equations

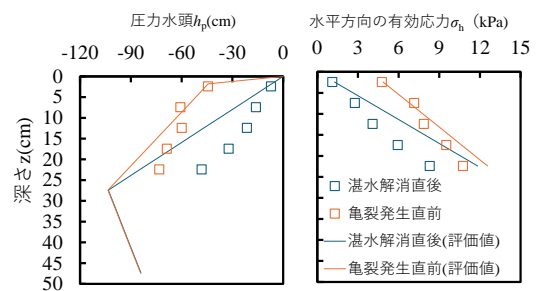


図3 圧力水頭 h_p と有効応力 σ'_h のプロファイル Profiles of pressure head h_p and effective stress σ'_h