

速度の異なる流体の不安定性に着目した洗掘現象における地盤内浸透のメカニズム解明 Clarification of the mechanism of infiltration into ground during scour, focusing on the instability of flows with different velocities

蒲生光琉¹, 前田健一², 村瀬颯生³

- 1 名古屋工業大学大学院 工学専攻環境都市プログラム・E-mail address h.gamo.840@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
- 3 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻

概要

既往の洗掘に関わる研究は、多くが土粒子と流体力の力のつり合い条件に着目した、掃流力の概念によって追及されてきた。本研究では、洪水や津波による高速かつ大きな流体力の作用する地盤の洗掘現象について、掃流力に加えて地盤内部への浸透に着目することで、マルチスケールな視点から洗掘メカニズムを解明することを目的とした。洪水や津波等の高速流と地盤内の浸透流とは速度が大きく異なり、その境界面は流体力学的に不安定となっている。浸透挙動の可視化実験の結果、流速差の存在により浸透と排水が発生していることがわかった。粒径や浸透層厚によって異なる浸透特性を把握することで浸透の発生有無・洗掘の予測精度が向上すると考える。

キーワード：洗掘，掃流力，浸透流，不安定

1. はじめに

洪水や津波等の高速な開水路流れによって発生する洗掘は、構造物の支持力低下や地形変化をもたらす、深刻な被害につながる。令和6年能登半島地震による津波被害においても、海岸構造物周辺の地盤で洗掘が発生し、被害が拡大したケースがあった¹⁾²⁾。また、近年多発する台風・豪雨に起因する洪水においても、河床変動や河川堤防のパイピング破壊などによる洗掘を最小限に抑える必要がある。

既往の洗掘に関わる研究は、従来は流体による、地表面に作用する掃流力と土粒子の有効重量とのつり合いに着目した評価がされてきた³⁾。しかし、実際の構造物レベルでの洗掘量や洗掘形状については、発生規模の大きさを考慮すると、単純にこの観点のみでは説明が困難である。近年の研究においては、流体力が地盤表層のみならず地盤内部の応力を変動させ、洗掘を助長する影響も考えられており、洗掘メカニズムの解明のためには地盤内部にも着目する必要があると考える。

また、河床変動解析で一般的に用いられている洗掘量の予測式は掃流力の関数となっている。これまでの検討⁴⁾⁵⁾から、浸透層厚によって流れのエネルギー損失が変化し、洗掘予測量が変わることが明らかとなっている。したがって、洗掘・河床変動計算の精度向上のために浸透を加味する必要がある。本研究では、高速流体作用下における地盤表層部の浸透特性の把握と、浸透の定量的評価を試みた。

2. 高速流体作用下の浸透挙動

開水路流れ下の地盤内で生じる浸透流を観察する。実験装置は、水路勾配がなく水平なアクリル製開水路を用い（図1）、水路途中に土槽区間を設置した。土槽には水中落下法により相対密度 $D_r = 40\%$ の飽和地盤を作成し、間隙水をあらかじめ柱状に着色した（図2）。開水路流れはポンプにより流体を循環させて作用させた。結果（図3）、浸透領域をラグランジュ的に俯瞰すると、開水路流れ方向に移動の様子が確認できた。さらに現象を細かく考察す

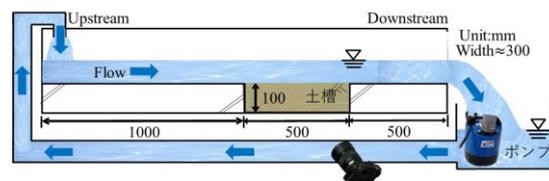


図1 実験装置の概要図



図2 間隙水を柱状に着色する

る。表層約 40mm 以深の領域では、着色した間隙水が平行な位置関係を保ちながら開水路流れ方向に移動しており、浸透は規則的な挙動を示している。一方、40mm 以浅では、着色した間隙水が左右に移動するもの、地盤外に流出するものなど様々で、不規則な挙動となった。ここで、地盤表層部における特異的な浸透挙動は慣性力の不均一性から発生する流体力学の不安定性に起因すると考える。

3. 流体力学の不安定性理論

2つの流体が境界面を境にして隣接して存在している状況下で、境界面において流速に不連続が存在すると、流れは微小変化に対して不安定となることが知られている⁶⁷⁾。これをケルビン・ヘルムホルツ (Kelvin-Helmholtz) 不安定という。流れは非粘性であるとすると、境界における速度の不連続面は小さな渦からなる渦層でおきかえることができる。非粘性流を仮定しているため、渦層は非常に薄くてその厚さを無視することができる。このような渦層に、流れ方向に周期的な正弦波状のゆらぎが加わると、渦層は次第に大きなスケールの渦へと変化する。この大きな渦によって、流体の境界面は不連続性を維持することができず、ゆらぎに対して不安定となる (図 4)。

したがって、洪水や津波発生時の河川において、流速の大きい河川流と地盤内を流れる浸透流の間に不安定が発生することが予想される。導出は二次元非圧縮完全流体を考え、密度・圧力・速度・変位に関するゆらぎ (平面波で与える) を流体の支配方程式であるナビエ・ストークス式、質量保存則に代入する (図 5)。ナビエ・ストークス式を式(1)、(2)に、質量保存則を式(3)に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

x, y の任意の点で流体に微小な変動 (ゆらぎ) を与え、その変動により密度が ρ から $\rho + \delta\rho$ 、圧力が p から $p + \delta p$ 、また速度の x 成分が $U + u$ 、 z 成分が w となったと仮定する。

この微小変動をそれぞれ式(1)-(3)に代入する。ただし、2次の微小項 (微小量と微小量の積) は無視し、1次の微小項のみで考える。代入した結果を式(4)-(6)に示す。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho U \frac{\partial u}{\partial x} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \delta p \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho U \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial z} \delta p - g \delta \rho \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

さらに、流れによってある CV 内の単位時間当たりの質量は変化しないため、式(7)が成立する。

$$\frac{D(\rho + \delta\rho)}{Dt} = \frac{D\rho}{Dt} + \frac{D\delta\rho}{Dt} = 0 \quad (7)$$

微小量について代入すると ($\rho = \rho(z), \delta\rho(x, z, t)$)、次式のようなになる (式(8))。

$$\frac{\partial \delta\rho}{\partial t} + U \frac{\partial \delta\rho}{\partial x} = -w \frac{d\rho}{dz} \quad (8)$$

境界面の位置を z_s とすると、微小変動によって δz_s だけ変化し、となる (式(9))。

$$\frac{D\delta z_s}{Dt} = \frac{\partial \delta z_s}{\partial t} + U_s \frac{\partial \delta z_s}{\partial x} = w(z_s) \quad (9)$$

ここで微小変動 (ゆらぎ) における $\delta\rho, \delta p, u, w$ を x 方向に進む、波数 k 、振動数 ω の平面波で表す (式(10))。

$$f = A e^{i(kx - \omega t)} \quad (10)$$

この平面波は式に e の累乗を含み、時間経過とともに指数関数的に増大する。すなわち、不連続面は不安定となる。

これを式(4)-(6), (8), (9)に代入して整理し、ゆらぎの

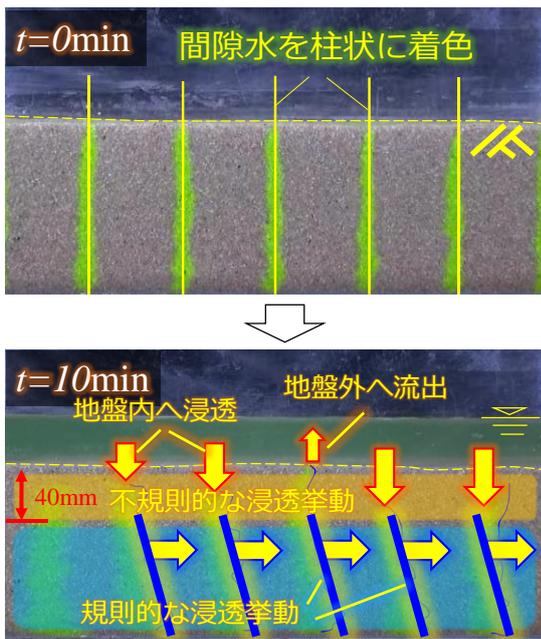


図 3 深さ方向に2層構造となった特異的浸透挙動

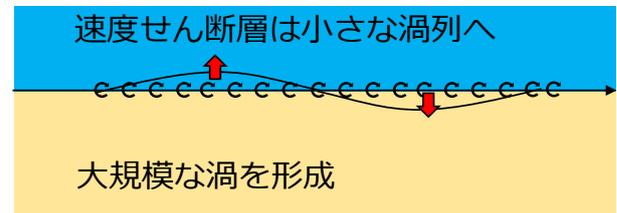


図 4 境界における速度の不連続面

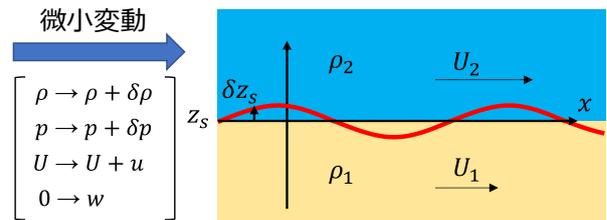


図 5 境界に微小変動 (ゆらぎ) を与える

分散関係を導出する。求めた分散関係式を式(11)に示す。

$$\omega = k \frac{\rho_2 U_2 + \rho_1 U_1}{\rho_2 + \rho_1} \pm \sqrt{gk \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 + \rho_1} - k^2 (U_1 + U_2)^2 - \frac{\rho_2 \rho_1}{(\rho_2 + \rho_1)^2}} \quad (11)$$

ここに、 ρ ：密度、 U ：水平速度、 g ：重力加速度、 $\delta\rho$, δp , u , w ：密度、圧力、速度のゆらぎ、 k ：ゆらぎの波数、 ω ：ゆらぎの角振動数である。式(11)がゆらぎの制約条件となり、この分散関係式からゆらぎの発達による境界面の安定・不安定を判断する。与えた揺らぎの波長が臨界波長 λ_{crit} 以下の場合には発達し、境界面が不安定となる（式(12)）。

$$\lambda_{crit} = 2\pi \frac{(U_1 - U_2)^2 \rho_1 \rho_2}{g(\rho_1^2 - \rho_2^2)} \quad (12)$$

式(12)に対して表面張力を考慮した場合、不安定条件は式(13)で表され、速度差がある一定以上の場合はあらゆる波長で不安定となりうる。

$$|u_2 - u_1| - \sqrt{\frac{2(\rho_2 + \rho_1)}{\rho_2 \rho_1}} \sqrt{\gamma g (\rho_1 - \rho_2)} > 0 \quad (13)$$

ここに、 γ ：表面張力である。

4. 不安定性理論に着目した浸透挙動の可視化実験

4.1 実験条件

高速流体が地盤内へ浸透する様子を可視化するために、あらかじめ土槽空間を着色した間隙水で満たしておき、そこへ地盤材料を水中落下により設置することで飽和地盤を作成した（図 6）。なお、着色液には拡散による着色拡大が生じない等、実験方法の妥当性を確認している。

実施したケースを表 1 に示す。再現性の確認のため、それぞれのケースを 2 回ずつ行った。地盤材料は珪砂 5 号を用い、相対密度 $Dr=40\%$ とした。そして、流量（主流流速）を変化させることで各ケースでの違いを比較した。なお、主流流速はポンプによる流出流量を開水路模型の断面積で除することで算出している。

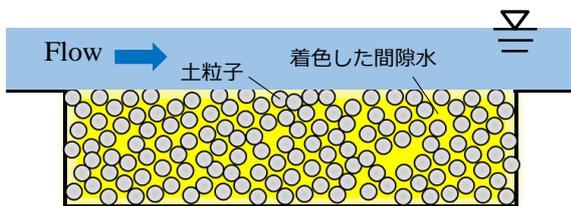


図 6 着色した間隙水

表 1 実験ケース

実施ケース	地盤材料	Dr (%)	流量(L/min)
Case1	珪砂#5	40	0
Case2	珪砂#5	40	60
Case3	珪砂#5	40	120

4.2 実験結果

(1) 流速差が存在しない条件 (Case1)

流体力学的に安定である、流速差の存在しない条件での地盤内への浸透挙動を検討する。実験は、開水路模型の下部を堰き止め、無色透明の水を微量ずつ流し、間隙水を着色した飽和地盤の上部に準静的に作用させた。そして、十分な時間が経過し、開水路が水で満たされたのを確認して水の供給を止めた。このとき、飽和地盤の上部では流体が静的に存在している状態であり、地盤内と上部の流速差は 0 とみなせる。その後しばらく経過観察を行った。

実験開始から 2 時間後の様子を図 7 に示す。浸透が発生している場合は無色透明の上部流体が着色した飽和地盤に浸入し、着色領域が減少すると考える。ところが、着色領域に変化は確認できず、これらより飽和地盤上に流速をもたない流体が存在している条件下では、浸透は発生しないと考える。

(2) 流速差が存在する条件 (Case2,3)

次に流体力学的に不安定である、流速差の存在する条件での地盤内への浸透挙動を検討する。

実験開始から 30 分後の様子を図 8 に示す。結果より、表層 40mm 以浅において着色した飽和地盤が透明化している。これは上部を流れる高速流体が浸透したためであると考えられる。また浸透は波状で、ある一定の大きさを持っていることが分かる。一方で、地盤内への水の収支を考えると、地盤内へ水の流入がある場合には、地盤外への流出も考えられる。したがって、高速流体が作用しても着色領域が変化していない部分では間隙水が地盤外へ流出していると考えられる。この間隙水の流出挙動は土粒子の有効重量を減少させ、洗掘を助長すると考えられる。

上部流体の流速の大きさを変化させた実験結果を図 9 に示す。左図に可視化された実験結果を、右図に浸透領域を明瞭にするために二値化した結果を示す。結果より、ある一定の大きさを持った波状の浸透（浸透波長）が発生していることが分かる。また、流速が小さい場合（Case2）は



図 7 流速差がないと浸透は発生しない (Case1)

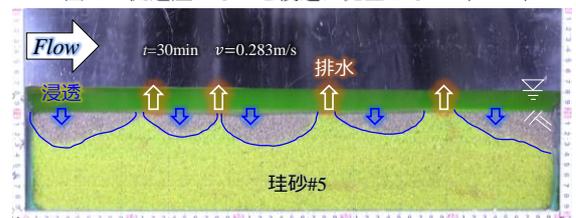


図 8 流速差の存在下で確認された浸透の波長

比較的小さい波長で浸透し、流速が大きい場合 (Case3) は大きな波長で浸透していることが分かる。以上の結果より、水平な地盤、水平な水面勾配であっても流速差の存在により浸透と流出が発生していると考えられる。

4.3 不安定性理論との比較

実験で確認された浸透波長の結果を図 10 に示す。図中の実線は各時刻における浸透波長の平均値を表す。時間経過に伴い、観察された浸透の波長が大きくなっていることが分かる。Case2 について、流体を作用させてから 5 分後に確認できる初期の浸透波長は 20~70mm 程度である。20 分後には、20~120mm 程度の波長が観察され、80 分後には 50~80mm 程度の大きさの波長が観察された。一方 Case3 について、流体を作用させてから 5 分後の初期の浸透波長は 40~100mm 程度である。20 分後には、100~120mm 程度の波長が観察され、80 分後には 150~250mm 程度の様々な大きさの波長が観察された。このように、流速と観察された浸透波長の大小関係は一致している。ここで、不安定性理論では、速度が大きいときは長波長のゆらぎが不安定となり、速度が小さいときには短波長のゆらぎ

が不安定となるため、実験結果は理論と定性的に一致する。

次に実験で観察された浸透の波長を不安定性理論の理論値と定量的に比較する。臨界波長 λ_{crit} は式(12)を用いて算出する。流量が 120mL/min の場合の臨界波長は約 120mm、流量が 60mL/min の場合の臨界波長は約 90mm である。実験で確認された浸透波長は理論的な臨界波長よりも大きくなっており、不安定性理論では説明できない。これは不安定性理論に表面張力が考慮されていないためであると考えられる。

表面張力を考慮した不安定条件は式(13)で表される。表面張力を考慮した場合、式(13)の第 2 項は一定値であるため、第 1 項が示す流速差がある一定以上の値であれば不安定となる。すなわち、Case2, 3 の両ケースにおける流速で確認されたあらゆる波長で不安定となりうる (図 11)。

したがって、実験で観察された浸透の波長は表面張力を考慮したケルビン・ヘルムホルツ不安定性で説明できると考える。また、地盤への浸透には表面張力を考慮する必要がある。

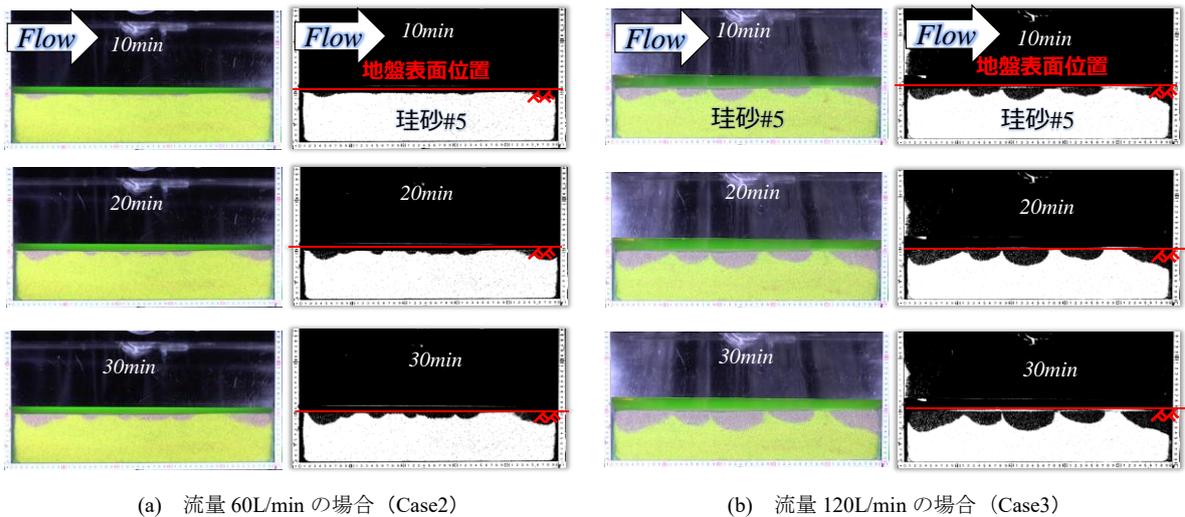


図 9 時間経過による浸透波長の変状 (流速差による比較)

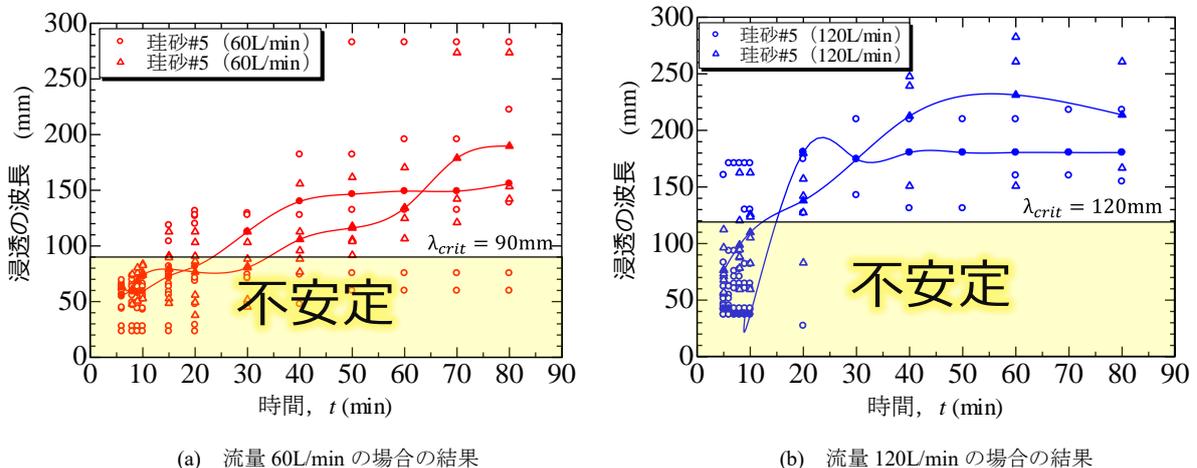


図 10 観察された浸透波長と理論的な臨界波長との比較 (流速差による比較)

5. 浸透の発生因子と無次元数による発生評価

5.1 地盤内への浸透の発生因子

高速流が作用する水平地盤への浸透（鉛直方向の流入・流出）は、水平方向の流速差に起因する流体力学の不安定性理論で説明できると考えられた。ただし、不安定性理論は完全流体を仮定しており、粘性を考慮していない。実際には開水路流れにも粘性が存在しており、地盤内への浸透にも粘性が作用している。ここで、地盤内への浸透に関与している外力を、慣性力、重力、表面張力、粘性力の4つと仮定し、無次元数を用いて浸透の発生因子を定量的に評価することを試みる。浸透に関与すると考えられる外力の概要図を図12に示す。慣性力と重力が不安定化に、表面張力と粘性力が安定化に作用すると考えられる。

5.2 流れの無次元数による浸透の評価

開水路流れでは重力が卓越しており、通常フルード則が用いられる。しかし、開水路流れ下における浸透の発生因子には、上記の4つの外力が関与していると考えられる。浸透の発生にはどの因子が支配的であるのかを流れの無次元数を用いて検討する。用いる無次元数は、粒子レイノルズ数、ウェーバー数である。

粒子レイノルズ数は慣性力と粘性力の比であり、管路流や流体の抵抗則等で用いられ、以下の式(14)で表される。

$$R_{ed} = \frac{ma}{F_v} = \frac{\rho L^2 U^2}{\mu L U} = \frac{UL}{\nu} \quad (14)$$

ここに、 U ：主流の平均流速、 L ：平均粒径、 ν ：動粘性係数である。

また、ウェーバー数は慣性力と表面張力の比であり、液

滴や毛管現象等で用いられ、以下の式(15)で表される。

$$W_e = \frac{ma}{F_t} = \frac{\rho L^2 U^2}{\gamma L} = \frac{\rho L U^2}{\gamma} \quad (15)$$

ここに、 U ：主流の平均流速、 L ：平均粒径、 ρ ：流体密度、 γ ：表面張力である。

以上の無次元数を用いて浸透の発生を定量的に検討する。ここで、無次元数を変化させるために流量をさまざまに変化させたケースを追加で行い、浸透の様子を確認した。流体は水を用いているため、粘性係数、表面張力は一定である。追加ケースの条件を表2に、浸透の発生有無を粒子レイノルズ数とウェーバー数で整理したものを図13に示す。

粒子レイノルズ数に着目すると、粒子レイノルズ数がおおよそ30以下の流れのとき浸透は発生していない。一方、粒子レイノルズ数が50以上になると浸透が発生している。粒子レイノルズ数が小さい場合に浸透が発生しないのは粘性力が卓越しているからであると考えられる。流速差によって発生しうるゆらぎは粘性力の存在によって減衰し、流れが安定化した。以上のように、粒子レイノルズ数によって浸透の有無を評価できると考える。浸透の発生有無の境界は粒子レイノルズ数が30~50程度である。

次に、ウェーバー数に着目すると、ウェーバー数がおおよそ1.0以下の流れのとき浸透は発生していない。一方、ウェーバー数が2.0以上になると浸透が発生している。ウェーバー数が小さい場合、表面張力が卓越し、流れが安定化するので浸透が発生しないと考える。一方、ウェーバー数が大きい場合は、慣性力が卓越し、浸透が発生すると考える。以上のように、ウェーバー数によっても浸透の発生有無を評価できると考える。浸透の発生有無の境界はウェー

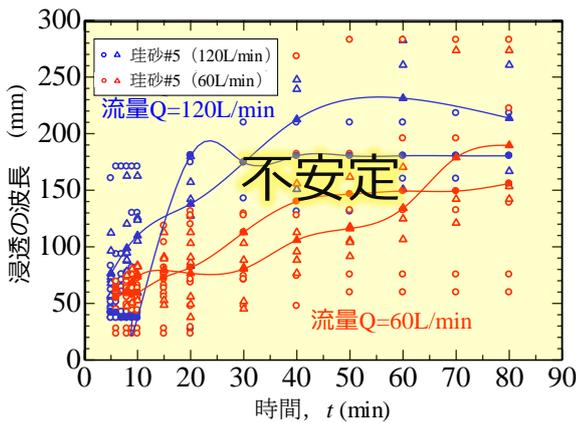


図11 表面張力を考慮した条件下における浸透波長



図12 浸透の発生因子の概略図

表2 実験ケース

実施ケース	地盤材料	Dr (%)	流量(L/min)
Case4	珪砂#5	40	30
Case5	珪砂#5	40	156
Case6	珪砂#5	40	12
Case7	珪砂#2	40	120

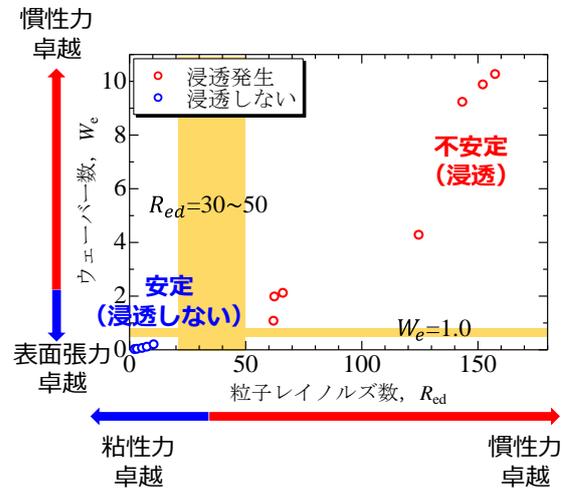


図13 無次元数で整理した浸透発生の有無

パー数が 1.0~2.0 程度である。

5.3 粒径を考慮した流れの無次元数による評価

流れの無次元数に粒径を考慮する。ここでは、流量が 120L/min の条件の下で、地盤材料が珪砂 5 号 (Case3) と珪砂 2 号 (Case7) を比較する。両ケースの浸透の様子を図 14 示す。珪砂 5 号 (Case3) のとき、粒子レイノルズ数が 152.3、ウェーバー数が 0.29 であるのに対し、珪砂 2 号 (Case7) のときは粒子レイノルズ数が 877.1、ウェーバー数が 1.86 となった。これらの結果より、粒径が大きい場合の方の無次元数が不安定側に大きいことがわかる。粒径が大きいほど慣性力が卓越するためであると考えられる。一方、粒径が小さいと慣性力に対して粘性力、表面張力が卓越し、流速差によって発生しうる不安定性が安定化されると考える。

6. 結言

開水路流れにおいて速度の異なる流体の不安定性に着目して浸透の可視化実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 珪砂 5 号を使用した飽和地盤において、表層地盤 40mm 以深では、規則的な浸透挙動を示す。一方、40mm 以浅では浸透流速が開水路流れ方向に均一な分布とならず、不規則な運動となる。そして、この表層地盤への浸透 (鉛直方向の水の流入・流出) は水平方向の流速差による流体力学の不安定性によって説明できると考える。
- 2) 開水路流れと地盤内浸透流において流速差が存在しない条件で地盤内への浸透挙動を検討した。着色した飽和地盤を用意し、上部に無色透明の水を準静的に作用させたが、着色領域に変化は見られなかった。このことから、飽和地盤上に流速を持たない流体が存在している条件下では、浸透は発生しないということがわかった。

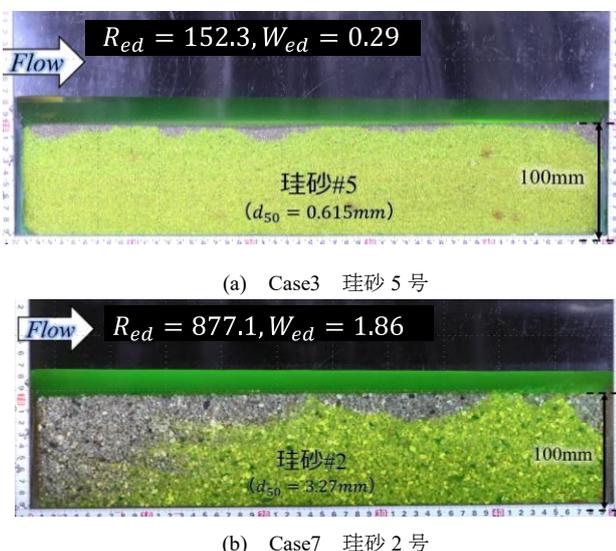


図 14 粒径を変えたケースにおける浸透の様子

- 3) 流速差が存在する条件で地盤内への浸透挙動を検討したところ、表層 40mm 以浅において着色地盤が波状に透明化していく様子を可視化することができた。これは、上部を流れる高速流体が浸透していることを示しており、流速差が大きいほど大きな波長をもって浸透する。また、着色領域が変化していない部分では間隙水が地盤外へ流出している。つまり、流速差の存在によって浸透が発生し、それに伴って排水が起きるということが明らかとなった。そして、この間隙水の流出挙動が土粒子の有効重量を減少させ、洗掘を助長すると考える。
- 4) 実験結果を定量的に比較したところ、実験で確認された浸透波長は理論的な臨界波長よりも大きくなっており、単純な不安定性理論では説明できない。表面張力を考慮した不安定条件を用いると、流速差がある一定以上であれば不安定となりうるということがわかった。つまり、地盤への浸透には表面張力を考慮する必要がある。
- 5) 不安定性理論は完全流体を仮定しており、粘性を考慮していない。実際には、慣性力、重力、表面張力、粘性力の 4 つの外力が地盤への浸透に関与していると考えられる。そして、慣性力と重力が不安定化に、表面張力と粘性力が安定化に作用する。粒子レイノルズ数とウェーバー数を用いて浸透を評価すると、それぞれの無次元数が大きいほど不安定となることが分かる。逆に、粒子レイノルズ数、ウェーバー数が小さいほど、それぞれ粘性力、表面張力が卓越し、流れが安定化に作用するため浸透は発生しない。

粒径、透水層厚によって異なる浸透特性の把握を今後さらに行うことで、洗掘・河床変動の発生規模や箇所予測精度が大いに向上すると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和6年能登半島地震における被害と対応 (令和6年3月)，入手先 <<https://www.mlit.go.jp/common/001739727.pdf>> (参照 2024.6.20).
- 2) 国立研究開発法人 建築研究所：令和6年能登半島地震による建築物の津波被害及び瓦屋根の地震被害，入手先 <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2023/R6_2_1_not_o.pdf> (参照 2024.6.20) .
- 3) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21，1956
- 4) 安江絵翔，前田健一，松田達也，鈴木悠真：高速流体作用下で地盤内に生じる浸透及び過剰間隙水圧が洗掘現象に及ぼす影響，土木学会論文集 A2 (応用力学)，vol.76, No.2, I_301-I_312, 2020.
- 5) 安江絵翔，前田健一，鈴木悠真，丹羽俊介：砂質地盤内で生じる浸透流が開水路流れの抵抗特性に及ぼす影響，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.76, No.2, I_1243-I_1248, 2020.
- 6) 水島二郎，藤村薫，流体力学シリーズ5 流れの不安定性，朝倉書店，2003，pp.1-22.
- 7) 福江純，和田桂一，梅村雅之，宇宙流体力学の基礎，日本評論社，2014，pp.249-259.

Clarification of the mechanism of infiltration into ground during scour, focusing on the
instability of flows with different velocities

Hikaru GAMO¹, Kenichi MAEDA², Satsuki MURASE³

- 1 Nagoya Institute of Technology Graduate School, Engineering major Environmental City Program
- 2 Nagoya Institute of Technology Professor, Advanced Disaster Prevention Engineering Center
- 3 Nagoya Institute of Technology Graduate School, Social Engineering Program

Abstract

Scour occurred by flood and so on cause lowering bearing capacity for structure and serious damage. Most of the previous studies on scour have been based on the concept of scour force, which focuses on the equilibrium condition between soil particles and hydrodynamic forces. In this research, we focus on the mechanism of scour caused by floods and tsunamis from a multi-scale viewpoint by focusing on the seepage into the ground in addition to the scour force. The velocities of high-velocity flows such as floods and tsunamis differ greatly from those of seepage flows in the ground, and the boundary between them is hydrodynamically unstable. Visualization experiments of seepage behavior show that seepage and drainage occur due to the existence of velocity differences. We believe that understanding the seepage characteristics that vary with grain size and seepage layer thickness will improve the prediction accuracy of whether seepage occurs and scour.

Key words: scour, scour power, seepage flow, instability