

河川堤防の降雨浸透における植生の根系が選択流形成に及ぼす影響

Effects of vegetation root on selective flow formation in rainfall penetration of river levee.

大桑有美¹，前田健一²，一瀬守³，澤村直毅³

1 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム・E-mail address a.okuwa.729@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・社会工学系プログラム

概 要

気候変動に伴う豪雨の強度増加や長期化により堤防決壊に至る危険性は高まっている。しかし、堤防決壊の原因の1つである降雨浸透に加え、実堤防に存在する植生が浸透に与える影響については未解明な部分が多く、現行の河川堤防における設計要領では十分に考慮されていない。そこで本研究では、選択流と根に着目し、竹串を模擬根系（以下、根とする）として模型実験と数値解析を実施し、根が降雨浸透に与える影響を検討した。また、異なる条件下における降雨発生時の間隙空気の挙動についても確認した。模型実験では、根の側面に集水され選択流を生じるが、根の先端で界面が形成されてしまい、浸透速度が遅くなった。数値解析では、根の先端を境界に浸透流速差から、波形をなす界面が形成された。以上から、根が浸透、間隙空気の挙動に影響を与えることが確認された。今後は、数値解析に間隙空気の影響を加え、定量的な指標の確立を目指す。

キーワード：河川堤防，植生，降雨浸透，間隙空気

1. はじめに

気候変動に伴う豪雨の強度増加や長期化によって、堤防決壊に至る危険性は高まっている。堤防決壊の原因の1つとしてあげられる降雨浸透、それに伴う間隙空気の挙動について堤体の安全性に対して考慮する必要がある。また、実堤防には植生が存在しており、降雨浸透や間隙空気の挙動に影響を与える可能性があるが、未解明な部分が多いため、現行の河川堤防における設計指針¹⁾では、降雨浸透、間隙空気、植生について明記されていない。

そこで本研究では、植生の根のみに着目し、地盤内への降雨浸透における水の部分的、あるいは選択的な特殊流れである選択流と根について、模型実験²⁾と数値解析を実施した。そして根が地盤への降雨浸透に与える影響のメカニズム解明や定量的評価を目指し、検討を実施した。

2. 模型実験

2.1 実験概要

図1に実験模型概略図を示す。本実験は実堤防の一部を取り出した一要素と想定している。試料には豊浦砂を使用し、空中落下法で堆積させて相対密度を40%とした。豊浦砂の透水係数は $k=0.123\text{mm/s}$ であり、粒度分布は図2に示す。また、根は直径3mm、長さ150mmの竹串を模擬根系

として地盤に挿入した。竹串は吸水性およびスケールの観点から根を簡易に再現している。本実験では、地盤表面から50mm (No.1)、150mm (No.2)、250mm (No.3)、350mm (No.4)の位置に土壌水分計を設置し、模型中央の体積含水率を計測した。また、散水装置には安定して均一な降雨強度を保つために、均等分布ノズルを用いた。実験ケース一覧を表1に示す。Case1は、選択流の形成を確認するために、ウラン溶液を用いて模型断面を可視化した。他ケースでは根の有無、間隔の条件、また底面の透気排水条件を変えて実験を実施した。ここで、底面が不透気非排水の場合については、実堤防において降雨の浸透と地下水位の上昇により間隙空気がより圧縮される状況を想定している。実験は全7ケース実施し、降雨強度30mm/hの雨量で150分間継続した。

2.2 実験結果および考察

(1) 模擬根系による選択流形成

模擬根系（以下、根とする）によって形成される選択流について確認するために、ウランを用いて断面の浸透流を可視化した。図3に模型断面における浸透の様子を時系列に並べた。ただし、ウランを注入した時点をも0minとしている。また、黄色線がウランの最先端である。3minでは根に沿って鉛直方向に浸透している。さらに、根の先端にウラン溶液が到達した6min以降では、水平方向に

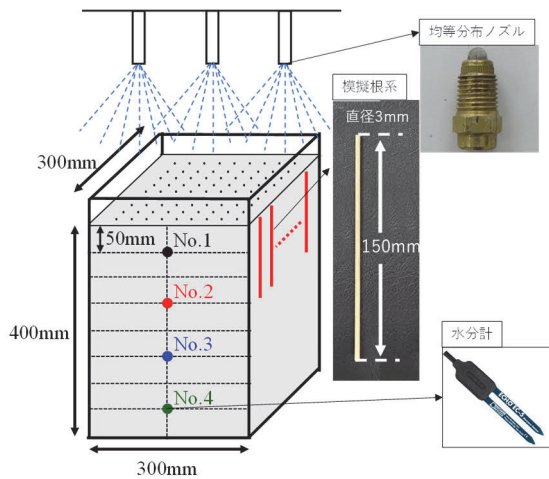


図1 実験模型概略図及び水分計の設置位置

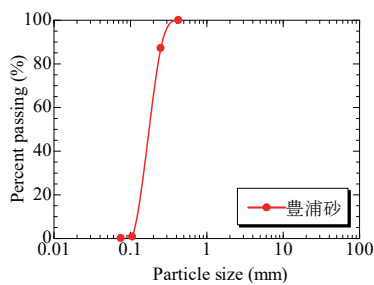


図2 実験に用いた豊浦砂の粒度分布

表1 実験ケース一覧

実験Case	模擬根系の有無	模擬根系の間隔(mm)	底面の条件
Case1	○	50	不透気非排水
Case2	×	×	透気排水
Case3	○	50	透気排水
Case4	○	30	透気排水
Case5	×	×	不透気非排水
Case6	○	50	不透気非排水
Case7	○	30	不透気非排水

も浸透していく様子が確認された。浸透断面から読み取った鉛直方向における浸透流速の経時変化を図4に示す。ウラン注入から6minまでは鉛直方向の流速が20mm/min程度である。一方、選択流が根の先端に到達した6min以降では、鉛直方向の流速が10mm/min程度になっている。これは根による選択流が解消され、水平方向に浸透が広がったと考えられる。また、12min、15minにおける模型断面を図5に示す。これより、根の間に残留していた間隙空気が徐々に圧縮される様子が確認された。

(2) 透気排水条件における浸透挙動

Case2からCase7における体積含水率の経時変化を図6に示す。また、No.4の体積含水率が10%に到達する時間を図7に示す。

底面が透気排水条件における浸透挙動の違いを把握するためにCase2, 3, 4を実施した。Case2(根なし)とCase3(間隔50mm)では大きな違いがみられなかった。一方、Case4(間隔30mm)では、水分計No.2, 4の体積含水率が上昇し始める時間がCase2(根なし), Case3(間隔50mm)と比べて遅い。これは根の側面に集水され選択流を生じる

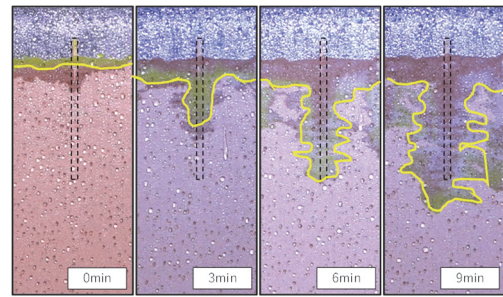


図3 模型断面における浸透流の様子

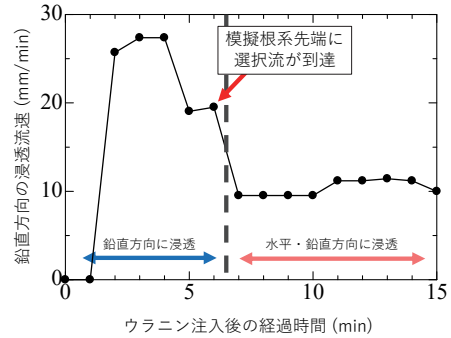


図4 鉛直方向における浸透流速の経時変化

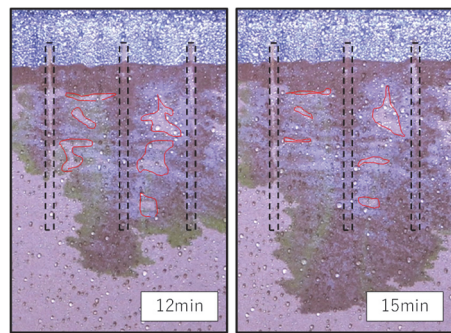


図5 間隙空気が圧縮される様子

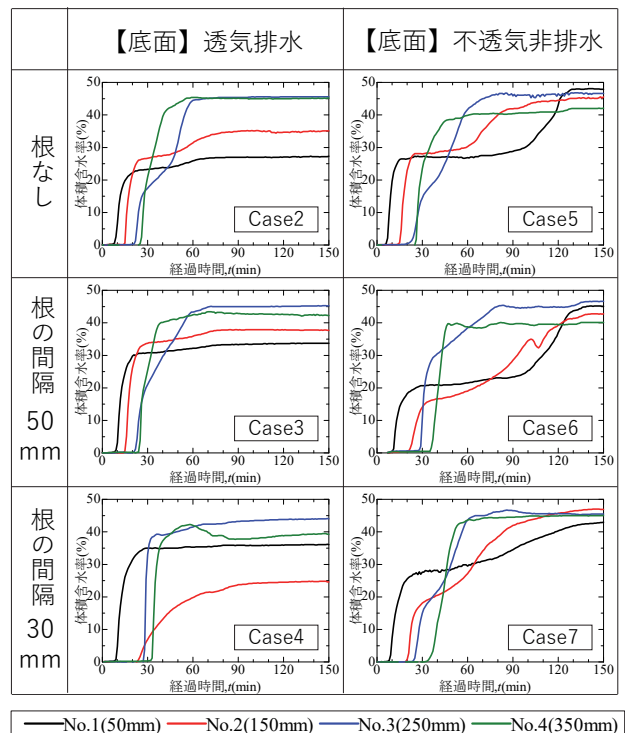


図6 体積含水率の経時変化

ことで鉛直方向に浸透した後、根の先端から水平方向に浸透が広がったことによる界面の形成が要因だと考える(図8参照)。ただし、ここでの界面とは水平方向に一次的に浸透が広がっていることを意味する。特に No.2 ではゆるやかな上昇になっている。これは選択流によって急激に水が浸透したことで、土中に存在する間隙空気が底面から排気できなかつた。それにより、間隙空気は根の間を通過し、地表面から排気されようと上方に移動するが、水平方向への浸透による水の界面が No.2 付近で形成される。そして、間隙空気が排気されにくくなり、一時的に圧縮され、時間経過とともに排気されたと考えられる。また、図7より Case4(間隔30mm)における No.4 の体積含水率が10%に到達する時間は、Case2(根なし)、Case3(間隔50mm)よりも約8min遅くなっている。これも先の現象と同様に、根の先端で形成された界面により水と間隙空気の入れ替わりが容易に行われなかつたため、浸透速度が遅くなったと考えられる。

Case3(間隔50mm)、Case4(間隔30mm)で浸透速度に違いが表れた要因は根の間隔だと考えられる。Case3(間隔50mm)とCase4(間隔30mm)の両ケースにおいても根に集水される形で選択流が生じる。しかし、Case3(間隔50mm)の方が単位面積あたりの浸透流量は少ない。ここで、乾燥砂での急激な浸透は容易に進まないという報告もある³⁾。よって、間隙空気が底面から排気されやすい状況であると言える。また、根の間隔が大きい場合、上方に間隙空気が通過できる面積が大きい。つまり、Case3(間隔50mm)においても界面は形成されるが、間隙空気が底面あるいは地表面に排気されやすい状態であると言える。したがって、Case3(間隔50mm)では、水と間隙空気の入れ替わりが容易となり、浸透速度が速くなったと考えられる。

(3) 不透気非排水条件における浸透挙動

次に、底面が不透気非排水条件における浸透挙動の違いを把握するために実験 Case5, 6, 7 を実施した。Case5(根なし)が Case6(間隔50mm)、Case7(間隔30mm)と比較して最も浸透速度が速い結果となった。また、Case6(間隔50mm)とCase7(間隔30mm)では大きな違いがみられなかつた。両ケースで No.2 はゆるやかな上昇になっている。これは図8に示したように、浸透による界面が No.2 付近で形成されていたため、間隙空気が圧縮され、時間経過とともに排気されたと考えられる。また、図6より Case6(間隔50mm)、Case7(間隔30mm)における No.4 の体積含水率が10%に到達する時間は、Case5(根なし)よりも約10min遅くなっており、根の先端で形成された界面により水と間隙空気の入れ替わりが容易に行われなかつたため、浸透速度が遅くなったと考えられる。

(4) 底面条件と模擬根系の間隔による浸透挙動

上記より、底面の透気排水条件によって根の間隔が浸透挙動に影響を与えることが確認できた。根の間隔が50mmで底面の透気排水条件が異なる Case3 と Case6 を比較する。Case3(透気排水)では間隙空気の影響を受けず浸透し

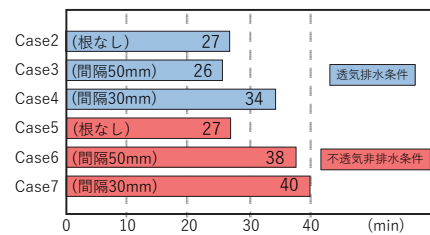


図7 土壌水分計 No.4 の体積含水率が10%に到達する時間

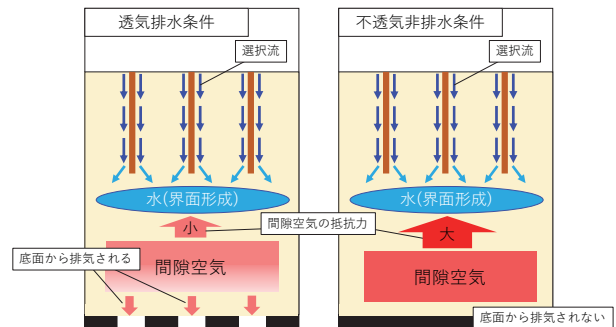


図8 現象の想定図

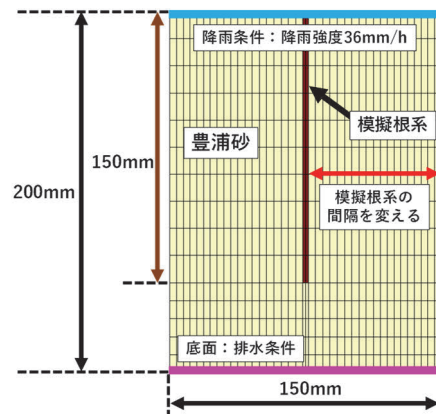


図9 解析モデルの断面概要図

表2 解析ケース一覧

解析case	模擬根系の条件	底面の条件
case1	なし	排水
case2	間隔 50mm	排水
case3	間隔 30mm	排水

たが、Case6(不透気非排水)では間隙空気が圧縮され、結果が異なつた。これは、底面から排気される間隙空気の量に起因すると考えられる。底面が不透気非排水の場合、間隙空気は地表面からのみ排気される。その際、根の側面には選択流が生じているため、根の先端で形成される界面の影響で排気されにくい。よって不透気非排水条件では、界面の影響により鉛直上向きに排気される空気の抵抗力が大きくなり、浸透速度を遅らせると考えられる。

3. 三次元浸透流 FEM 解析による考察

3.1 三次元浸透流 FEM 解析の概要

本章では、根による選択流と界面の形成を確認するために、3D-Flow による三次元浸透流 FEM 解析を実施した。

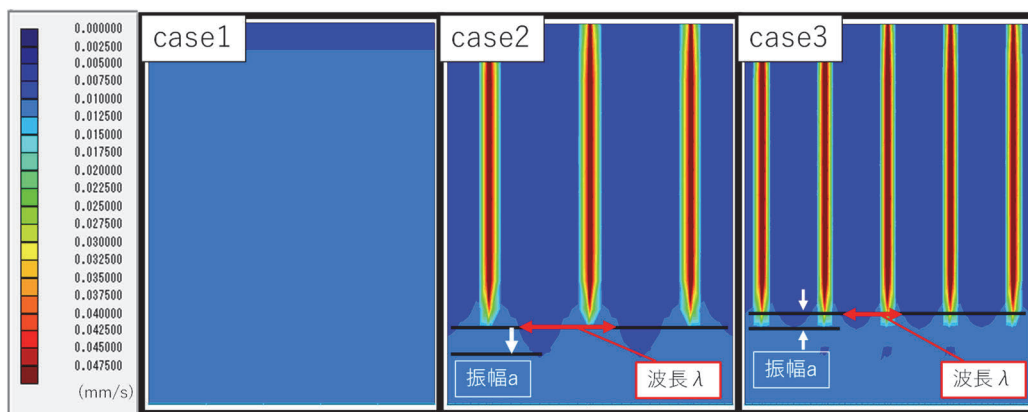


図10 解析断面の流速コンター図

数値計算には VG モデルを搭載し不飽和浸透流計算が可能である，地層科学研究所 GEOSCIENCE の 3D-Flow 三次元飽和・不飽和浸透流解析ソフトを用いた。解析モデルを図9に示す。試料は実験と同様で透水係数 $k=0.123\text{mm/s}$ の豊浦砂とした。また，模型実験結果から根により選択流が生じることが明らかになっている。そのため，直径 3mm ，長さ 150mm の根は，選択流を生じさせるために透水係数を $k=1.00\text{mm/s}$ とした。モデル側面は非排水境界，底面は排水境界とした。降雨強度 36mm/s の雨量を与え，定常解析を実施した。根の間隔を変えた解析ケース一覧を表2に示す。ただし，本解析では水の浸透のみに着目しており，間隙空気の挙動は考慮できていない。

3.2 解析断面のコンター図による検討

図10に解析断面の流速コンター図を示す。case1（根なし）では一定の流速で浸透している一方，根を挿入し，高い透水係数を与えた case2（間隔 50mm ），case3（間隔 30mm ）では，根に沿って鉛直方向の選択流が生じている。また，地表面から 150mm 地点（根の先端）を境界に浸透流速が異なっており，その境界で流速分布による波形が形成されている。これは，根の先端からは浸透流が水平方向にも広がるが，根が複数存在することで，浸透流が干渉するためだと考えられる。

次に case2（間隔 50mm ）と case3（間隔 30mm ）で比較する。case2（間隔 50mm ）の波形の波長および振幅の方が大きいことから，流速分布による波形が形成する界面が不安定化するといえる。ここでの界面が不安定化するとは，選択流によって生じた根の先端における浸透流速の差が時間とともに大きくなることを意味する。また，浸透流速が小さいと浸透流量も少なくなることから，浸透流速が小さい領域は他領域と比べて圧力が小さくなる。つまり case2（間隔 50mm ）では，時間とともに圧力の小さい領域が広がっていくといえる。

ここで間隙空気が存在する時，間隙空気は圧力の小さい領域から排気されると考えられる。したがって，根の間隔が大きい方が間隙空気は排気されやすくなる。そして，水と間隙空気の入れ替わりが容易に行われることで，浸透速度は速くなる可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究では，地盤内への降雨浸透における選択流と根の影響を明らかにするために，模型実験および数値解析を実施した。その結果，以下の知見が得られた。

- 1) 模型実験から，根によって鉛直方向に浸透する選択流が生じ，その選択流が根の先端では解消され，浸透が水平方向に広がることが確認できた。それにより，根の先端で界面が形成され，その界面は間隙空気の排気を妨げる働きをするが，特に根の間隔が小さい場合には，この働きが顕著となるため，底面の透気排水条件に関わらず，間隙空気が圧縮され，浸透速度が遅くなった。一方，根の間隔が同じ場合でも底面の透気排水条件により浸透速度が異なったケースから，浸透には間隙空気の影響が大きいことが確認できた。
- 2) 数値解析から，根の先端を境界に浸透流速が異なり，その境界で波形をなす界面を形成することが確認できた。そして，その界面は根の間隔が大きい方が不安定化し，時間とともに圧力の小さい領域が広がっていく。それにより，間隙空気は排気されやすくなることで浸透速度が速くなる可能性が示唆された。

以上のように，模型実験と数値解析から根が存在することで生じる選択流が浸透速度に影響を与えることが確認できた。今後は，数値解析において非定常解析を実施し，界面の不安定化に対して検討を深めるとともに，間隙空気の影響を取り入れることで，根が地盤浸透に与える影響についてのメカニズム解明と定量的評価を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課，河川堤防設計指針，2007。
- 2) 前田健一，柴田賢，馬場干児，小林剛，榊尾孝之，尾畑功：模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析，河川技術論文集，Vol.18，pp.305-310，2012。
- 3) 小林剛，前田健一，齊藤啓，伊藤藤，阿部知之：河川堤防材料の浸潤挙動に及ぼす降雨強度及び浸潤速度の影響とモニタリング手法の比較，河川技術論文集，Vol.19，pp.69-74，2013。