

透水性基礎地盤を有する堤体の内部侵食によるパイピング危険度上昇の評価

Piping Risks because of Internal Erosion to an Embankment Having a Permeable Foundation Layer

佐藤 真理¹⁾, 坂本 奈温子²⁾

1) Mari SATO, 助教, 島根大学学術研究院, maris@life.shimane-u.ac.jp

2) Naoko SAKAMOTO, 大学院生(修士), 岡山大学大学院, p9ly7aer@s.okayama-u.ac.jp

河川堤体では、表層に難透水の被覆土があり、基盤層に砂礫質の透水層がある場合に、噴砂による被災が数多く報告されている。本研究では、堤体内の平時の水位変動や降雨による内部侵食に着目し、内部侵食を受けた堤体の噴砂やパイピング危険度上昇について明らかにすることを旨とした。二層の地盤を模擬した小型模型地盤に長時間の浸透を与えた後に、地盤内の地点ごとの粒度や強度特性を調べ、粒度の変化による局所的な透水係数の変化を考慮した定常浸透流解析を実施した。最終的には実スケール堤体モデルで内部侵食による透水係数変化箇所を設定して解析を行い、パイピング危険度上昇可能性を示した。

キーワード：内部侵食，パイピング，噴砂，目詰まり，模型実験，定常浸透流解析

(IGC : E-07, H-07, G-14)

1. はじめに

河川堤体では、下部に透水性の砂礫質などによる基盤層があり、表層に粘土やシルトを主体とするような難透水の被覆土層がある場合のパイピング事例が多く報告¹⁾されている。これらの事例では、特に透水性の層が途中で途切れているような行き止まり層がある場合に、透水層内の水がせき止められ、さらに危険度が増すことが指摘されている。

近年はこのような状況下でのパイピングに関して研究が進んでおり、例えば齊藤ら²⁾は模型実験を実施して、基盤内で揚圧力が発生し、ボイリング発生後に地盤内で空洞が進行し貫通するという形に段階毎に現象を整理した。伊神ら³⁾は、模型実験と三次元浸透流解析を行って、噴砂により間隙水圧の消散が伝播していく様子を明らかにし、パイピングの進展状況を示した。小松ら⁴⁾は、堤体模型実験により複数の層がある場合の、基礎地盤の土質特性による浸透破壊挙動の変化について明らかにした。田端ら⁵⁾は、透水層内の浸透流と圧力水頭分布を準二次元非定常浸透流解析の中で算定し、被覆土層の盤ぶくれとパイピング発生プロセスを評価する手法を提案した。

その一方で、築造から年月が経過した土木構造物が増えていく中で、堤体をはじめとする土構造物の長期的な維持管理が課題となりつつある。近年浸透に伴う内部侵食、所謂地盤内の細粒分の抜け出し、suffusionによって地盤の強度特性が変化することが指摘されている。例えば Sato・Kuвано⁶⁾や Prasomsri・Takahashi⁷⁾は、三軸圧縮試験装置内で suffusion を発生させ、強度や変形挙動が内部侵食により変化することを示した。その他にも模型実験や数値解析により、内部侵食が地盤に及ぼす影響が検

討されている。例えば堀越・高橋⁸⁾は、堤体模型に浸透流を発生させ、地盤内で内部侵食による細粒分の増減が発生することを示した。Suffusion は細粒分が抜け出すことで減少するだけでなく、抜け出した細粒分が特定の範囲に堆積することによる目詰まり、所謂 clogging という現象を伴うこともあり、複雑な現象である。近藤ら⁹⁾は、一次元透水模型実験と個別要素法による内部侵食と目詰まり現象に関する検討を行い、粒度分布の影響が大きいこと、また動水勾配が不均一になることを示した。

地盤層境界での内部侵食挙動は contact erosion と呼ばれ、ダムフィルタ材・コア材という観点やドレーン工法においてよく考慮される。基本的には粗粒なフィルタ材と細粒なコア材それぞれの粒度分布をもとに、流出可能性が評価される。代表的なフィルタ材は Terzaghi のフィルタ材¹⁰⁾ (後述) がよく知られ、国土交通省のドレーン工設計マニュアル¹¹⁾では、ジオテキスタイルの開孔径とフィルタ材との関係が規定されている。本研究では上述のような背景をもとに、上層細粒土と下層粗粒土により構成される二層地盤の長期的な浸透による内部侵食・目詰まり挙動を明らかにし、侵食や目詰まりの結果パイピングにどのような影響を与えるかを調べた。河川堤体では洪水時のような破堤や決壊、パイピング等の現象が見られない平時においても、日常的な降雨や水位変動により長年の浸透にさらされており、浸透に伴う内部侵食が発生している可能性がある。佐藤ら¹²⁾は、小型二次元アクリル土槽内に二層地盤を作製し、長時間の浸透を行うことで、地盤内の粒度組成の変化を調べた。その結果浸透による細粒分の移動と局所的な粒度組成の変化が確認されたものの、比較高い水頭を与えて浸透を行ったため、地盤表層の湛水が見られるなどの

表-1 模型実験条件一覧

| 実験 | 3号ケイ砂 | | 7号ケイ砂 | | 浸透時間 | 水頭差 | 開口幅 | 給水口高さ |
|-------|--------|---------|--------|---------|------------|-----|-----|-------|
| ケース名 | 高さ(cm) | 相対密度(%) | 高さ(cm) | 相対密度(%) | 秒(時間) | cm | mm | cm |
| S7_5 | 16.5 | 38 | 16 | 69 | 181740(50) | 32 | 5 | 20 |
| S3_5 | 16.5 | 38 | 16 | 69 | 186420(52) | 32 | 5 | 12.5 |
| S3_20 | 15.1 | 40 | 16 | 66 | 187800(52) | 30 | 20 | 12.5 |

課題が残った。本研究では、まずは佐藤ら¹²⁾の手法を改善し、また実験条件を複数ケース設定して詳細を検討した。その後得られた実験結果をもとに模型地盤内の粒度組成の変化による透水性の変化を考慮した浸透流解析を実施した。最終的に浸透流解析から得られた知見をもとに、地盤内で細粒分が移動した層を実スケール河川堤体模型に設定し、パイピングを模擬した浸透流解析を行うことで、地盤内の長期的浸透、具体的には築造後年単位以上のスケールでの地盤内の細粒分移動がパイピング危険性の上昇に結び付く可能性を示した。

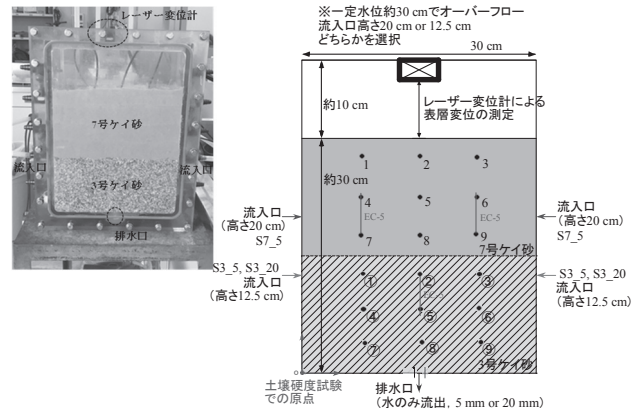


図-1 模型実験図(左:写真,右:模式図)

2. 二層地盤浸透実験概要

2.1 実験装置概要と実験手順

実験装置写真と模式図を図-1に示す。高さ40cm幅30cm奥行10cmの亚克力製の土槽であり、左右壁面の中央部に5か所、高さを変えた内径約8mmの給水口が設置されている。給水口の高さを変えることが可能であり、本研究では左右対称に高さ20cmまたは12.5cmで設定した。チューブと漏斗からなる給水装置を用いて、両端から水をボイリングが起きない範囲として地盤表層部高さとはほぼ一致する一定水位から流入させ、底部部に設けた幅5mmまたは20mm、奥行85mmのスポンジを詰めたスリットから排水させる。スリット部には湿らせたスポンジを詰めているため土砂は流出せず、水のみが流出する。実験では表層付近の透水性基盤層を想定しているが、浸透の方向など実堤体の要素を切り取り完全に再現しているものではない。層状の地盤において、顕著な破壊が起きない条件で長期間水が浸透したことによる細粒分移動の状況を把握するために、上記のような条件とした。実験試料には3号宇部珪砂($D_{50} = 1.30$ mm)と7号宇部珪砂($d_{50} = 0.122$ mm)を用いた。以下3号ケイ砂7号ケイ砂と記述する。試料についての詳細は後述する。

実験手順は、まず下に3号ケイ砂、上に7号ケイ砂をそれぞれ約高さ15cmとなるように、4cm厚3層と3cm1層で土槽に突固めて詰める。初期含水比を3号ケイ砂が3.7%、7号ケイ砂が10%となるよう調整し、突き固めて合わせて約30cm高さまで作製する。実験中はレーザー変位計で表層部中央での変位を1秒ごとに計測した。また地盤内の浸透状況を把握するため、図-1に示す3か所、左右2か所左右端から7.5cm、高さ23cmの7号珪砂地盤と、中央部1か所高さ12cmの3号ケイ砂地盤に

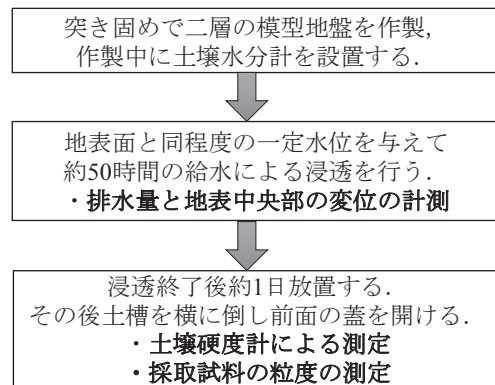


図-2 模型実験フローチャート

表-2 模型実験試料物性値

| | 土粒子密度 | 最小密度 | 最大密度 | 15% 粒径 | 85% 粒径 | 20% 粒径 |
|-----|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| ケイ砂 | ρ_s (g/cm ³) | ρ_{dmax} (g/cm ³) | ρ_{dmin} (g/cm ³) | D_{15} (mm) | d_{85} (mm) | D_{20}, d_{20} (mm) |
| 3号 | 2.67 | 1.34 | 1.59 | 0.965 | / | 1.000 |
| 7号 | 2.76 | 1.25 | 1.64 | / | 0.202 | 0.078 |

において、土壌水分計(METER社製、EC-5、プローブ長5.5cm)を用いて計測を行った。センサー設置高さは、プローブ付け根における位置である。ただし土壌水分計はMETER社の補正計算を用いており、実験試料でのキャリブレーションは行っていないため、若干の誤差がある可能性がある。流入口の位置や排水口の幅を変えた3ケースで試験を実施した。ケース名は「流入側地盤略称_排水口幅」となっている。給水はどのケースでも約50時間連続して行った。実験条件一覧を表-1に示す。給水時間は流入口に接続したチューブに取り付けた流量計の記録

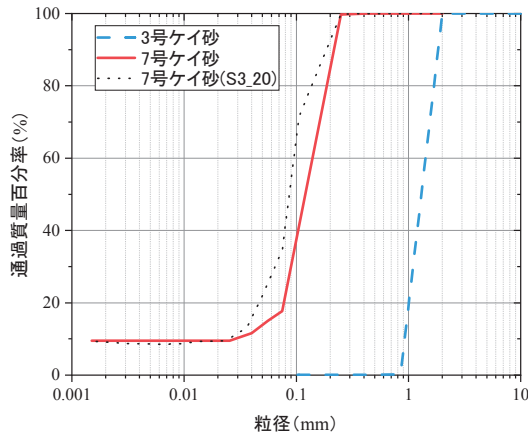


図-3 模型実験試料粒度分布

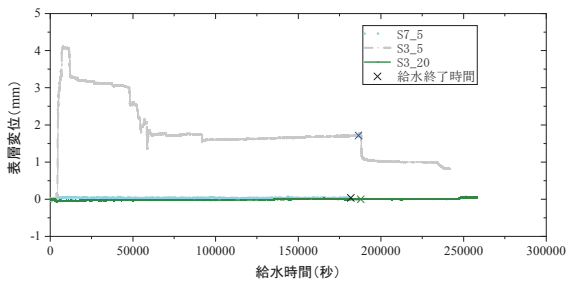


図-4 表層変位推移

により算出した。ケース S3_20 は後述のように結果の様な比較が難しかったため、一部結果のみを紹介する。

給水による浸透終了後排水をどのケースでも約1日行った後、土槽前面の蓋を開けて横に倒し、各層9地点(3号ケイ砂①～⑨, 7号ケイ砂1～9)計18地点で山中式土中硬度計による強度試験を実施した。地盤高さは各ケースで若干ズレがあるため、厳密な計測位置は後述の図-7を参照されたい。硬度測定後に、3号ケイ砂では①④, ③⑥, ⑤⑧の3か所で、7号ケイ砂では14, 36, 8の3か所において試料を取り出して粒度試験を行い、土粒子の移動状況を調べた。実験フローチャートを図-2に示す。

2.2 実験試料について

実験に用いた3号ケイ砂と7号ケイ砂について、計測した各種物性値と粒度分布を表-2と図-3に示す。7号ケイ砂には10%程度細粒分が含まれていたが、本実験では細粒分の流出を見るためにそのまま除去せず利用した。S3_20の7号ケイ砂は、別バッチであり再度粒度試験を行った。原因は不明であるが、元の7号ケイ砂と比較して細粒分が多く、平均粒径がかなり小さい結果となった。S3_20は開口幅が大きく排水が多かったため(3.1参照)、3号ケイ砂地盤内でも浸透量が多くセンサー周囲地盤が乱れてしまい、3号ケイ砂内部の土壌水分量の測定が困難であった。そのため一部の結果を本論文では記述した。以下7号ケイ砂と呼ぶ試料は図-3のS7_5とS3_5で用いたものとする。

粗粒土と細粒土を層状に敷設した条件であるため、フィルター則について簡単な検討を行った。3号ケイ砂の

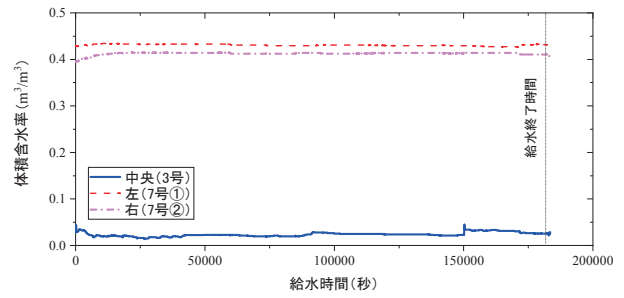


図-5 S7_5 体積含水率推移

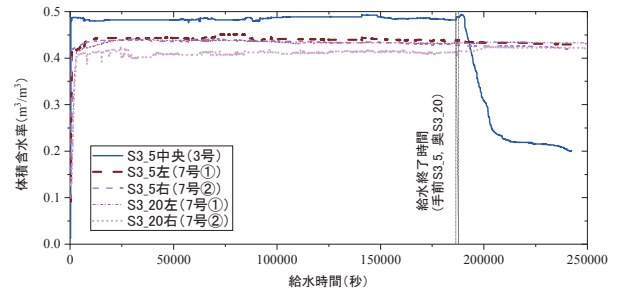


図-6a S3_5, S3_20 体積含水率推移

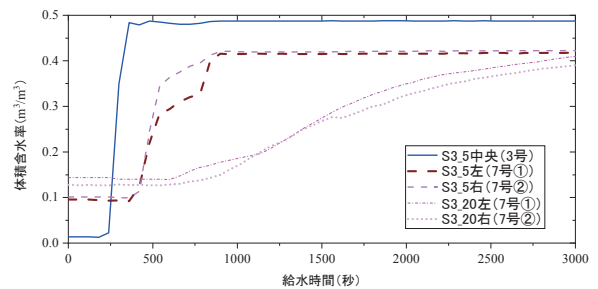


図-6b S3_5, S3_20 体積含水率推移浸透開始部拡大

15%粒径 D_{15} と7号ケイ砂の85%粒径 d_{85} について表-2に示す。表-2より、 D_{15}/d_{85} は4.77となり、例えばTerzaghiのフィルター則¹⁰⁾に当てはめると、基準値4を超えるものの、近い値であり細粒分の大幅な流出と大きな地盤変形は発生しないと予想されるが、長期的な浸透による細かい粒子の抜け出しは発生しうると考えられる。

3. 浸透実験計測結果

3.1 浸透中の経過概要と表層変状

浸透中は地盤には目視での大きな変形は見られず、一定水位での浸透と底面開口部からの排水が断続的に続いた。底面からの排水は秤を設置することで数分間隔で計測した。ただしS3_5では実験中一部時間内で計測した。その結果S7_5では排水量は1分あたり3-10ml程度であり、最も排水量が少なかった。S3_5では1分あたり30-40ml程度であり、S3_20では500-600ml程度と大きな差がみられた。排水量は多少の変動はあるものの試験開始直後以外はほぼ一定値に収束した。流入側材料の透水性

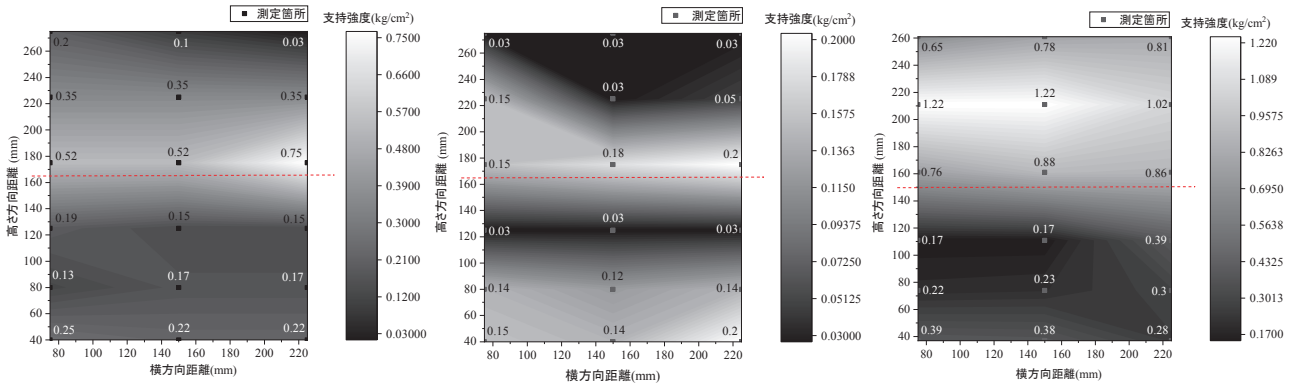


図-7 左から S7_5, S3_5, S3_20 の土壌硬度測定結果

の違いと排水口幅の違いによると考えられる。

浸透中のレーザー変位計の計測結果を図-4に示す。図は変形方向と同じ膨張側が正である。浸透終了時間がケース毎に図に示されている。S3_5とそれ以外のケースで大きな差が見られ、前者は数ミリ程度の膨張が実験開始後かなり早い段階で見られた一方、他のケースではほぼ変状が見られなかった。S3_5では3号ケイ砂側からの給水で給水量が多いにも関わらず排水口の幅が狭いため、排水が十分に行われずに7号ケイ砂内への急激な上向き浸透が発生し、揚圧力の発生や有効応力の減少により地盤が緩んで膨張した可能性も考えられる。ただし地盤内で間隙水圧や土圧等を計測していないため、現象の詳細の解明については今後の課題である。一方S7_5においては透水性が低い地盤への流入のため給水量が少なく、下向き浸透であったため、またS3_20においては排水口の幅が広いために7号ケイ砂内に十分な水が流入せず、そのまま排水口から大量に排水されたため、S3_5のような現象が発生しなかったことが推測される。

3.2 体積含水率測定結果

S7_5とS3_5の、土壌水分計による測定結果を図-5と図-6に示す。S3_20は7号ケイ砂内の結果のみS3_5と合わせて載せる。なお実験開始時刻はレーザー変位計による計測を開始した時刻として揃えたため、示された傾向に影響を与えるものではないが、最大数分程度誤差がある可能性がある。どのケースでも7号ケイ砂地盤の左右差はほぼ見られなかった。流入口の位置の違いにより傾向に大きな差がみられ、S7_5では7号ケイ砂内では給水開始前からやや高い含水率となっており、そのため体積含水率は7号珪砂側で僅かに上昇するものの、実験中ほとんど変化がないという結果になった。3号ケイ砂側も初期値からほぼ変化がなく低い含水率に留まったが、浸透中断続的な排水は観測されている。S3_5とS3_20では、S7_5とは異なり急激な含水率上昇が見られた。上昇後はどちらも同じような値となった。測定値はMETER社付属の校正結果を用いているが、試料物性値を当てはめると3号ケイ砂と7号ケイ砂どちらも体積含水率0.45 m³/m³程度で飽和となる。そのため地盤表層とほぼ同じ

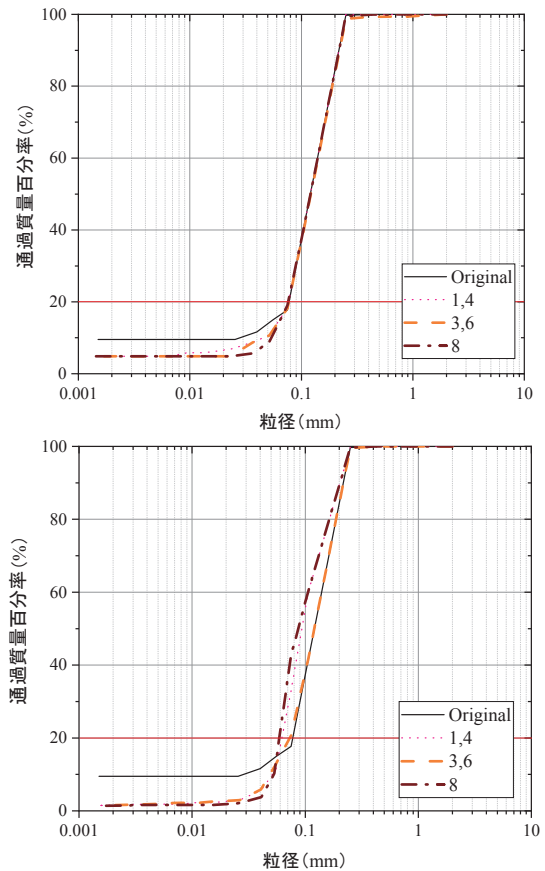


図-8 上から S7_5, S3_5 の7号ケイ砂粒度測定結果

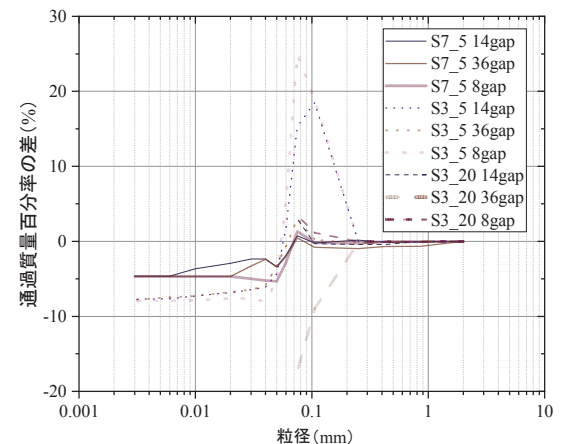


図-9 浸透前後の粒度分布差

表-3 二層地盤浸透流解析のケース一覧

| ケース名 | 流入口(mm) | 排水口(mm) | 流入境界水頭 (cm) | 浸出面境界水頭 (cm) | 流入位置 (cm) |
|------|---------|---------|-------------|--------------|-----------|
| AE_1 | 20 | 6 | 30 | 0 | 26 |
| AE_2 | 20 | 6 | 30 | 0 | 13 |

高さの流入水位を与えたことで、地盤はほぼ飽和したと推測される。測定値は METER 社付属の校正結果をそのまま用いており、また給水開始時の結果を拡大すると(図-6b)、3号ケイ砂側で体積含水率が上昇した後に7号ケイ砂側で体積含水率が上昇する現象が確認された。S3_5の含水率上昇はS3_20の含水率上昇より急激であった。また給水終了後は3号ケイ砂からは速やかに排水されたが、7号ケイ砂内では比較的高い含水率を維持した。

3.3 地盤内土壌硬度分布

3 ケースでの土壌硬度計の計測結果分布を図-7 に示す。図-7 では原点を土槽左下端部にとった(図-1 参照)。土壌硬度計の結果は3 ケースで大きく差があり、全てのケースを統合しての一定の傾向を見出すことは困難であった。S3_5 では全体的に支持強度が低い傾向が見られ、前述の上向き浸透と膨張により地盤全体の強度が低下した可能性がある。7号ケイ砂地盤では細粒分が流出したのみである36で他の箇所よりも強度が低く、土砂が移動して空隙が増えて密度が低下した可能性が示唆された。3号ケイ砂地盤では境界部の3か所で様に低い強度となり、特に境界層で土砂移動や上向き浸透の影響を受けた可能性がある。S3_20 では他ケースと比べて全体的に支持強度が高く、締固め時の差異の影響も考えられるが、浸透が3号ケイ砂下部のみにおいて集中して発生したために影響が少なく他の箇所であまり強度低下が発生しなかった可能性もある。S7_5 はそれ以外の2つケースの中間の強度を有しているが、同一地盤内においては局所的な差が少なく、ほぼ同様の値となった。

3.4 地盤内粒度分布

S7_5 と S3_5 では、7号ケイ砂の元の粒度(図-3)を Original とし、それ以外の採取地点ごとの結果をまとめたグラフを図-8 に示す。7号ケイ砂において、3 ケース全てで Original と各地点で採取した試料での通過質量百分率の差をとったものを図-9 に示す。なお S3_20 では沈降分析の結果が粒径ごとの値のばらつきが多くなだらかな曲線とならなかったため、ふるい分析の0.075 mm 以上の結果のみを用い、元の粒度は図-3 の S3_20 での結果を用いた。沈降分析に関しては、通過質量百分率を計測した粒径に関してケース毎に違いがあるため、0.06 mm や 0.05 mm など一定の粒径で粒度曲線の値を読み元の粒度との差を算出した。粒度自体は粒度分布で把握するものであるが、どの粒径で変化が発生したかを示す目安として分かりやすく記載したものである。

図-8 より、7号ケイ砂においては S7_5 と S3_5 で傾向

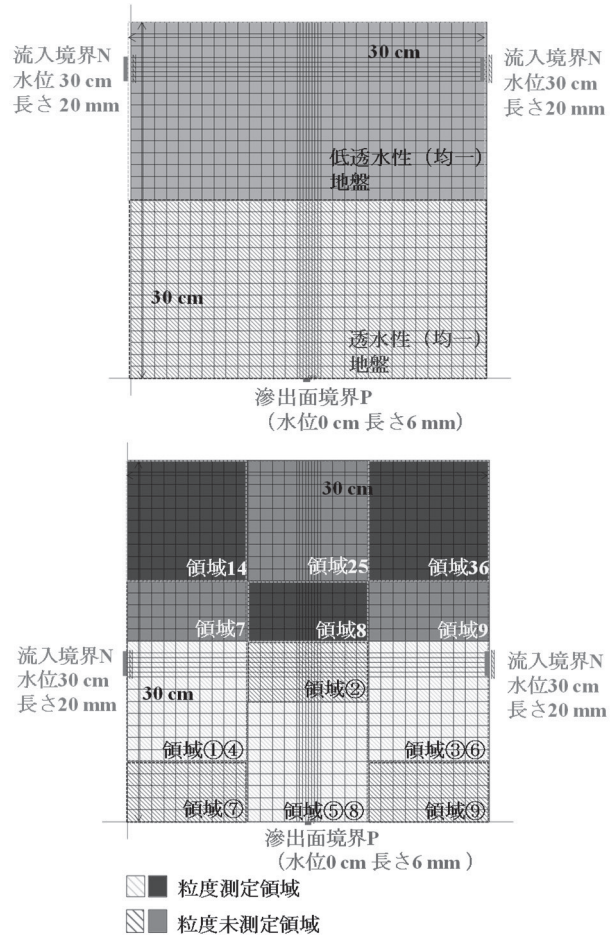


図-10 二層地盤浸透流解析モデルと境界条件
上から、AEini_1 と AEe_2

の違いが見られた。沈降分析を行った0.075 mm 未満の粒径の範囲では2 ケースどちらでも元の粒径より通過質量百分率が低下した。S3_5の方がやや大きく減少した。地点による違いは殆どなく、どの採取地点でもほぼ同様に低下する傾向が見られた。その一方でふるい分析の0.075mm 以上の範囲では S7_5 と S3_5 で傾向が大きく異なっており、S7_5 では殆ど変化が無かったが、S3_5 では Original の粒度分布より特に地盤左側14と境界部付近8において通過質量百分率が増加した。

通過質量百分率の元の粒度からの変化については、結果にばらつきが見られた。S7_5 では、おおよそ0.075 mm 以下の細かい粒子が減少し、それ以上の粒径では変化が少なかった。3号ケイ砂側から水を流入させた S3_5 においては、0.106 mm 粒径付近の混合比率が高まる傾向がみられ、0.075 mm 未満の粒径では S7_5 と同様に減少傾向がみられた。局所的な傾向としては S3_5 では、14 と 8 では増加が顕著であったが 36 では変化が少なかった。

表-4 二層地盤浸透流解析の浸透特性

| 地盤 | 飽和透水係数 | | 不飽和浸透特性 (VG モデル, 全ケース層毎に同じ条件) | | | |
|------|------------------------|----------|-------------------------------|--|--|--|
| | k_{so_c} (m/s) | α | n | 残留体積含水率 θ_r (m ³ /m ³) | 飽和体積含水率 θ_s (m ³ /m ³) | |
| 低透水性 | 1.810×10^{-6} | 1.650 | 3.220 | 0.426 | 0.697 | |
| 透水性 | 3.100×10^{-4} | 1.020 | 2.130 | 0.199 | 0.517 | |

S3_20 では, 地点 36 において 0.106 mm 以下の範囲で大幅な減少がみられた. なお 3 号ケイ砂の結果は載せていないが, いずれの結果でも 0.85 mm 粒径でわずかな増加が見られたのみであった. 詳細は佐藤¹³⁾を参照されたい.

4. 土砂移動を考慮した二層地盤定常浸透流解析

前述の実験ケース S7_5 と S3_5 と類似の地盤モデルを作成し, 土砂移動による透水性変化を考慮した 2 次元定常浸透流解析を行い, 地盤内の状況について詳細を検討した. 本研究では模型実験が初期の水位上昇時以外ほぼ定水位で変化のない状態であったのを踏まえ, またパイピング危険度の簡易な評価手法の検討として, 定常浸透流解析を採用した.

4.1 地盤モデルと境界条件

解析では侵食前 (initial) の均一地盤 AEini と, 侵食後 (透水終了後) の土砂移動が発生した不均一地盤 AEe の二つに分けて二次元の定常飽和不飽和浸透流解析を行い, 結果を比較した. 詳細は後述する. 解析には VGFLOW2D ver.3 を用いた. 支配方程式は Richards 式¹⁴⁾であり, スカイライン法を用いて収束誤差 1.0×10^{-3} , 繰り返し回数 200 回の条件で計算した. 侵食前侵食後条件どちらもメッシュ分割や境界条件は同一であり, 具体的には長さ 30 cm, 高さ 15 cm の地盤を下から透水性地盤, 低透水性地盤の順に設定した. 排水口は高さ 0 cm の地盤中央部に長さ 6 mm で設定し, 水頭 0 cm の滲出面境界 P (Potential Seepage Face) とした. 流入口は S7_5 を想定した AE_1 では左右壁面高さ 26 cm に設置し, S3_5 を想定した AE_2 では左右壁面高さ 13 cm に設置した. どちらも幅は 2 cm, 水位は地盤表層と同じ 30 cm として, 水頭既知の流入境界 N (Known Hydraulic Head) とした. 高さは流入口中心部分までの高さである. それ以外は不透水境界である.

解析ケースと境界条件一覧を表-3 に示す. AEini と AEe に流入口の違いにより_1 か_2 を組み合わせてケース名とする. 二層地盤モデルの一例として AEini_1 と AEe_2 を図-10 に示す. AEini と AEe では, メッシュ分割の仕方は流入口の位置の違いにより若干異なるが, 領域の区分はどちらも同一である. 領域の区分の詳細については次節で示す. メッシュ分割幅は 0.0025 m ~ 0.0100 m の範囲とした. 流入口と排水口近傍, 二層の境界部分下層側を特に細かく分割した. 接点数は AE_1 と AE_2 ともに 1258 点, 要素数は 1188 個である.

表-5 AEe_1 飽和透水係数補正值一覧

| AEe_1 | 地点 | D_{20} (mm) | C_e | k_{se_c} (m/s) |
|-------|----|---------------|-------|------------------------|
| 低透水性 | 14 | 0.078 | 1 | 1.810×10^{-6} |
| | 36 | 0.078 | 1 | 1.810×10^{-6} |
| | 8 | 0.077 | 0.970 | 1.757×10^{-6} |
| | 25 | 未測定 | 0.990 | 1.792×10^{-6} |
| | 7 | 未測定 | 0.986 | 1.784×10^{-6} |
| | 9 | 未測定 | 0.986 | 1.784×10^{-6} |
| 透水性 | ①④ | 1.00 | 1 | 3.100×10^{-4} |
| | ③⑥ | 1.00 | 1 | 3.100×10^{-4} |
| | ⑤⑧ | 0.99 | 0.977 | 3.028×10^{-4} |
| | ② | 未測定 | 0.992 | 3.076×10^{-4} |
| | ⑦ | 未測定 | 0.988 | 3.064×10^{-4} |
| | ⑨ | 未測定 | 0.988 | 3.064×10^{-4} |

表-6 AEe_2 飽和透水係数補正值一覧

| AEe_2 | 地点 | D_{20} (mm) | C_e | k_{se_c} (m/s) |
|-------|----|---------------|-------|------------------------|
| 低透水性 | 14 | 0.062 | 0.586 | 1.061×10^{-6} |
| | 36 | 0.073 | 0.857 | 1.551×10^{-6} |
| | 8 | 0.059 | 0.522 | 9.453×10^{-7} |
| | 25 | 未測定 | 0.655 | 1.186×10^{-6} |
| | 7 | 未測定 | 0.554 | 1.003×10^{-6} |
| | 9 | 未測定 | 0.690 | 1.248×10^{-6} |
| 透水性 | ①④ | 1.00 | 1 | 3.100×10^{-4} |
| | ③⑥ | 0.98 | 0.954 | 2.958×10^{-4} |
| | ⑤⑧ | 0.98 | 0.954 | 2.958×10^{-4} |
| | ② | 未測定 | 0.969 | 3.005×10^{-4} |
| | ⑦ | 未測定 | 0.977 | 3.029×10^{-4} |
| | ⑨ | 未測定 | 0.954 | 2.958×10^{-4} |

4.2 浸透特性と細粒分移動による透水性変化の算出

侵食前地盤の浸透特性一覧を表-4 に示す. 浸透特性は xy 方向で同一で等方的である. 上層の低透水性地盤と下層の透水性地盤それぞれで浸透特性を設定した. 不飽和浸透特性は Van Genuchten モデル¹⁵⁾である. 本研究では解析ソフトに組み込まれている一般的な浸透特性値を用いた. そのため前述の模型実験で使用した試料の浸透特性を直接表したものではない.

侵食後条件は, 3.4 で示した土砂移動を考慮して飽和透水係数の補正を行った. 不飽和浸透特性は侵食前後で

変化していないとした。侵食前の定常浸透流解析での飽和透水係数を $k_{so,c}$ とし、侵食後の飽和透水係数を $k_{se,c}$ とすると、以下の式で侵食後の飽和透水係数は表される。

$$k_{se,c} = C_e \times k_{so,c} \quad (1)$$

ここに、 C_e は透水係数の侵食前後での変化率である。 C_e は本研究では Creager の式¹⁶⁾を用いて算出した。Creager 式は具体的には飽和透水係数 k_s (m/s)、試料の 20% 粒径を d_{20} (mm) とした時、以下のように表される。

$$k_s = 0.00359 \times d_{20}^{2.327} \quad (2)$$

まず模型実験における侵食前の透水係数 $k_{so,m}$ を、図-3 に示す 3 号ケイ砂、7 号ケイ砂それぞれの 20% 粒径から、式(2)により算出する。侵食後地盤は、図-8 に示すように各地点で計測した粒度分布から、模型実験における侵食後飽和透水係数 $k_{se,m}$ を同じく式(2)により算出する。すなわち侵食前後での 20% 粒径の変化により透水係数の変化を推測した。そのため C_e は式(3)により求められる。 $k_{so,m}$ と $k_{se,m}$ は C_e に用いるため、浸透流解析に直接使うパラメータではない。

$$C_e = \frac{k_{se,m}}{k_{so,m}} \quad (3)$$

解析領域は試料を採取し粒度試験を行った地点近傍(測定領域)と、それ以外の未測定領域で分割した。まず二層それぞれの地盤モデルを長さ 10 cm 高さ 5 cm ブロックに 9 等分し 1~9 (上)、①~⑨ (下)と番号を振る。その後上層低透水性地盤では、(粒度)測定領域として 14, 36, 8, 未測定領域として 25, 7, 9として区分する。下層透水性地盤では、測定領域を①④, ③⑥, ⑤⑧, 未測定領域を②, ⑦, ⑨とする。測定領域では計測した

粒度分布を用いて、上述の手法により侵食後飽和透水係数 $k_{se,c}$ を算定した。未測定領域の C_e は、式(3)からではなく求められた $k_{se,c}$ より、式(1)から直接算出した。透水係数の空間的分布に関しては、例えば齊藤・川谷¹⁷⁾の研究などがあるが、未測定領域は粒度分布のデータがないため、本研究では、計測を行った隣接する領域で求められた侵食後飽和透水係数の平均値をとった。上層低透水性地盤では、領域 25 は領域 14, 36, 8 の平均をとり、領域 7 は領域 14, 8 の平均をとり、領域 9 は領域 36, 8 の平均をとる。下層透水性地盤では領域②は領域①④, ③⑥, ⑤⑧の平均をとり、領域⑦は領域①④, ⑤⑧の平均をとり、領域⑨は領域③⑥, ⑤⑧の平均をとる(図-10 参照)。具体的に各領域で設定した飽和透水係数を表-5, 表-6 に示す。AE_1 では 20% 粒径は侵食前後で殆ど違いがなかったため、透水係数も侵食前後でほぼ変化しなかった。なお排水口の大きさや材料の違いなどの詳細を検討した結果は Sakamoto・Sato¹⁸⁾を参照されたい。

4.3 鉛直動水勾配分布

鉛直動水勾配分布を図-11 に示す。図は侵食前、侵食後の変化が顕著にみられた上層部における鉛直方向動水勾配のコンター図を示しており、フローネットを重ねたものである。左が侵食前の結果 AEini, 右が侵食後の結果 AEe である。なお、スケールは侵食前後の変化を顕著にするため、最も差が見られた下向き流れ方向(負の値)のみに着目しスケールを一定の範囲に狭めた。AE_1 を -0.89 ~ 0, AE_2 を -0.50 ~ 0 とした。上層と下層の境界部付近真上と上層中部の AE_2 における具体的な平均

表-7 上層低透水性地盤の領域毎の平均鉛直動水勾配

| 地盤 | 侵食前後 | 境界部真上 | 上層中部 |
|------|---------|---------|---------|
| AE_1 | AEini_1 | -0.9702 | -0.7058 |
| | AEe_1 | -0.9773 | -0.7024 |
| AE_2 | AEini_2 | -0.2320 | -0.0770 |
| | AEe_2 | -0.2680 | -0.0585 |

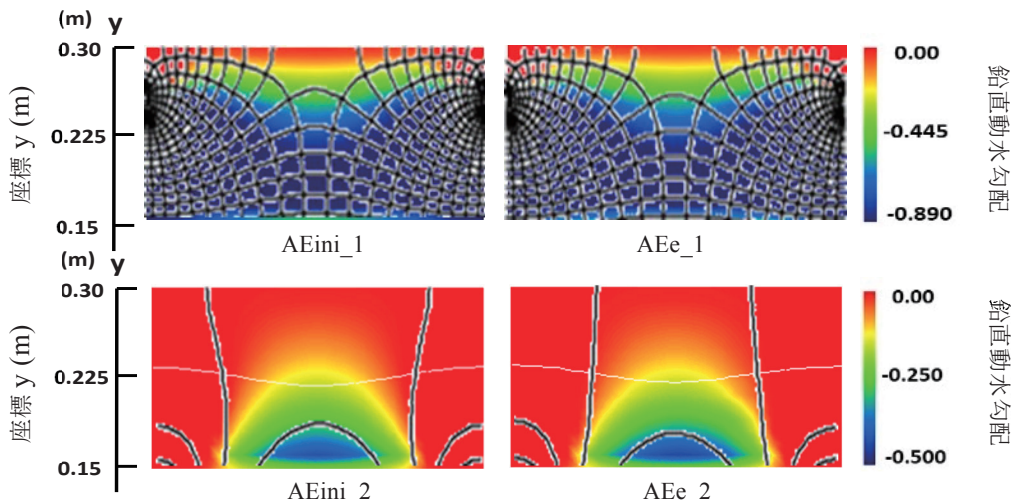


図-11 鉛直動水勾配分布とフローネット (Sakamoto・Sato¹⁸⁾を加工修正)

表-8 実スケール浸透流解析の浸透特性一覧

| 領域区分 | | 飽和透水係数 (m/s) | | | 不飽和浸透特性 (VG モデル, 全ケース同じ条件) | | | | |
|------|----|--------------|----------|----------|----------------------------|------|---|---|--|
| 領域 | 模様 | APne_2 | APne_6 | APe_6 | α | n | 残留体積含水率 $\theta_r(\text{m}^3/\text{m}^3)$ | 飽和体積含水率 $\theta_s(\text{m}^3/\text{m}^3)$ | |
| I | | 1.81E-06 | 1.81E-06 | 1.81E-06 | 1.65 | 3.22 | 0.426 | 0.697 | |
| II | | 1.81E-06 | 1.81E-06 | 9.05E-07 | 1.65 | 3.22 | 0.426 | 0.697 | |
| III | | 3.10E-04 | 3.10E-04 | 3.10E-04 | 1.02 | 2.13 | 0.199 | 0.517 | |

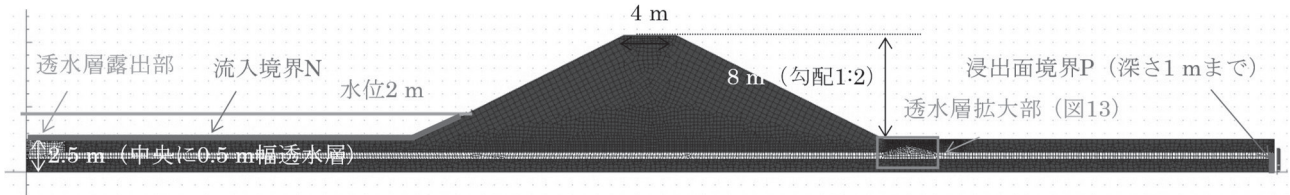


図-12 APne_2 河川堤体モデルと境界条件

鉛直方向動水勾配の値を表-7に示す。具体的には、原点(0,0)を下層地盤左下端に取った時に、上層の境界部真上としての範囲は幅0.15m高さ0.07m部分の、座標地点(0.07,0.15),(0.22,0.15),(0.07,0.22),(0.22,0.22)の4点の範囲の節点の平均鉛直動水勾配の値を求めた。上層中部は座標地点(0.07,0.23),(0.22,0.23),(0.22,0.25),(0.07,0.25)の4点の範囲の、幅0.15m高さ0.02m部分の節点での平均鉛直動水勾配の値を求めた。AE_1においては侵食前後ではほとんど差が見られなかった。AE_2では図-11から上層と下層の境界部(y軸0.15m)真上においてAE_2では鉛直動水勾配が侵食前と比較して侵食後の方が大きくなった。既往の研究¹⁸⁾では、透水性地盤から水を流入させた場合には透水性の差の大小や排水口幅によらず同様の傾向が見られた。

具体値を見ると表-7により、二層境界部直上での鉛直下向き動水勾配が侵食前に比べて侵食後で1-2割程度大きくなり、上層中部(y軸0.225m付近)においては侵食前に比べて同程度小さくなった。

5. 実スケール堤体定常浸透流解析

本章では、前章の浸透流解析を参考に、実スケールの堤体モデルにおいて、前章と同様の地盤パラメータの透水層と低透水層を設定して定常浸透流解析を行い、結果を検討した。

5.1 通常時における細粒分移動層の推定

実スケール河川堤体を模擬して、図-12(図-15も同一のモデル)に示すように堤高8m、のり勾配1:2、天端幅4mとして上流側下流側に30mの長さを取り二次元堤体モデルを作成した。透水層は例えば地盤工学会¹⁾や田端・福岡⁵⁾を参考に、深さ1.0mから地中鉛直方向に幅0.5mの層を設置し、水平方向に層厚が変動することを踏まえ、法尻付近や被覆土層の浅い箇所では填砂が発生した調査報告¹⁹⁾なども参考にし、途中で拡大している箇所として、

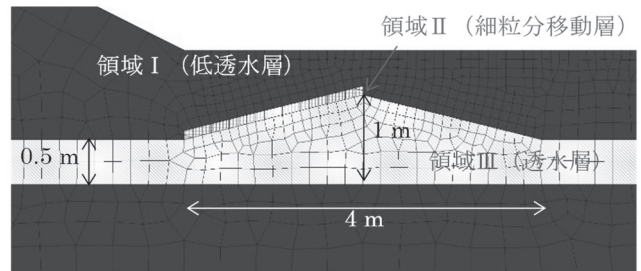


図-13 透水層拡大領域と細粒分移動層拡大図

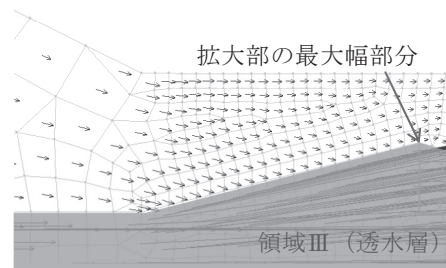


図-14 APne_2 透水層拡大領域流速ベクトル

図-13に示すように長さ4mの範囲で表層側に1m幅に拡大している箇所を設定した。透水層以外は比較的透水性が低い低透水層とした。模型実験と同様に透水層に水が流れ込む状態を模擬するために、堤体上流側に3m長さの露出部を設置した。与えた浸透特性は表-8に示す。用いた解析ソフトや手法は前章のものと同様で、不飽和浸透特性も同じくVGモデルを用いた。前章の透水地盤、低透水地盤と本章の透水層(領域III)、低透水層(領域I)をそれぞれ同じ特性とした。解析領域は表-8と図-13に示すように領域I~IIIと三種類に分類される。定常的な状態での浸透状況を模擬するため、水位2mの堤内水位を与え水頭既知境界Nとし、右端下流側に透水層高さ1.5m(深さ1m)までの各接点の標高と同じ水頭の浸出面境界Pを設定して定常飽和不飽和浸透解析を行った(図-12, ケースAPne_2)。APne_2では領域IIとIIIは同じ浸透特性である。節点数は6200点、要素数は6112個であり、メッシュ幅は0.050m~0.400mであるが、透水層と法尻パイピング危険箇所を中心として細かく分割した。

浸透流解析の結果、透水層拡大領域上部の低透水層で

の流速ベクトル(300倍に拡大)は図-14のようになった。透水層拡大部左側において低透水層から透水層側に入り込む流れが算出された。4.3より、特に低透水層から透水層に流れ込む箇所でも動水勾配の局所の上昇がみられたため、該当の箇所に厚さ0.1mで、細粒分移動による目詰まりと透水性低下が発生した層があると想定した。この層を本論文では領域Ⅱとして、細粒分移動層と呼ぶ。

5.2 パイピングを想定した浸透流解析

細粒分移動層(領域Ⅱ)において、飽和透水係数が細粒分移動を考慮していない状態から前章を参考に1/2に減少したとして、浸透特性を与えた。なお浸透特性は前章と同様にxy方向ともに同一で等方的である。不飽和浸透特性は変化をさせなかった。それ以外の層(透水層は領域Ⅲ、その他の堤体部分は領域Ⅰ)はAPne_2と同様に表-8の浸透特性を与えた。パイピング発生時の状態を模擬するため、水位の高い状態として図-15のように6mの水位を与え、下流側の地盤表層を浸出面境界とした。領域ⅡとⅢの区別がないケース(APne_6)と領域Ⅱの透水係数を減少させたケース(APe_6)での違いを検討した。

解析結果として、法尻と透水層拡大領域付近の鉛直動水勾配の分布を示した結果を図-16に示す。上向き流れ方向を正としている。図-16より、APne_6は、法尻付近から透水層拡大領域までの幅広くパイピングの危険箇所があり、透水層の拡大領域の影響は少ないことが示された。その一方で、APe_6では、拡大部の最大幅部分真上の低透水層において、高い動水勾配となった。それぞれのケースでの動水勾配の最大値とその地点を比較すると、最大値をとる箇所は透水層最大幅部分の真上となりどちらのケースも同じであるが、細粒分移動を考慮すると、動水勾配の最大値は考慮しない場合に比べて約1.4倍となった。通常時の細粒分移動が水位上昇時にパイピングに危険側に作用する可能性が示唆された。例えば国交省吉野川堤防強化検討委員会²⁰⁾では、パイピング危険性の評価を水位上昇や降雨を考慮した非定常解析により行い、被覆土の有無によって揚圧力を考慮するなど基準を分けるという手法が提案されている。本研究で透水層拡大部の左側、領域Ⅱと領域Ⅲの境界の間隙水圧平均値を計算したところ、APe_6では境界部の間隙水圧が約6%、APne_6より高いという結果になったが、前述の鉛直動水勾配に比べると細粒分移動層の影響は小さかった。

6. 模型実験と解析結果の考察

6.1 二層地盤での細粒分移動メカニズム

S3_5とS3_20では3号ケイ砂内に流入した水が7号ケイ砂まで浸透したと考えられるが、S3_5では排水が十分ではなく、急激な水位上昇により地盤が膨張して変形し、比較的大きな粒子が間隙に沈み込んだが、それらの粒子は3号ケイ砂側に抜け出すことが出来ないため、目詰まりに近い状態になったと推測される。膨張は数ミリ程度であり、目に見える形のボイリングは発生していないが、地盤内では粒度分布の変化が確認された。粒度分布の変化について詳しくみると、例えばKoslovaの式は平均粒径を基に限界流速を算出するが、図-8の結果からOriginalとS3_5の地点8の平均粒径を比較すると、それぞれ0.121mmと0.087mmになった。細粒分流出が見られた0.05mmの土粒子のKoslovaの式による限界流速は、粒度の変化によりおおよそ2倍となった。そのため、浸透当初はボイリングに近い状況が引き起こされ地盤の若干の膨張が見られたが、その後の粒度組成の変化により同じ浸透状況が続いてもボイリングが発生しない安定状態となったため、大きな変化が見られずむしろ膨張が収まったと推測される。既往の研究¹⁸⁾の浸透流解析結果でも、粒度組成の変化により上層地盤全体の平均流速が下がる結果が報告されているが、ただし動水勾配の値は二層の境界部付近で前述のように高まるため、完全にボイリングに対して安全側に働くだけであるとは言い切れず、今後の検討が必要である。いずれにせよ図-4の表層変位の結果より、浸透当初はボイリングの前兆のような体積膨張が見られるが、土粒子移動によりボイリングは発生しづらくなり、膨張も収束すると考えられる。土壌硬度はS3_5では他のケースよりも全体的に低い傾向が見られた。一方S3_20では流出口が十分に確保されたため排水をしながら比較的ゆるやかに7号ケイ砂内に水が流入したため、S3_5のような急激な浸透とそれに伴う膨潤現象は発生しなかったと考えられる。いずれにせよ長期的浸透により、7号ケイ砂地盤の0.075mm以下の細粒分が徐々に抜けるのは全てのケースで観測された。地盤内で局所的に違いが見られた原因は、左右のオーバーフロ

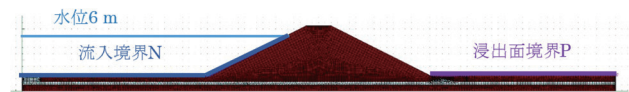


図-15 APne_6, APe_6 河川堤体モデルと境界条件

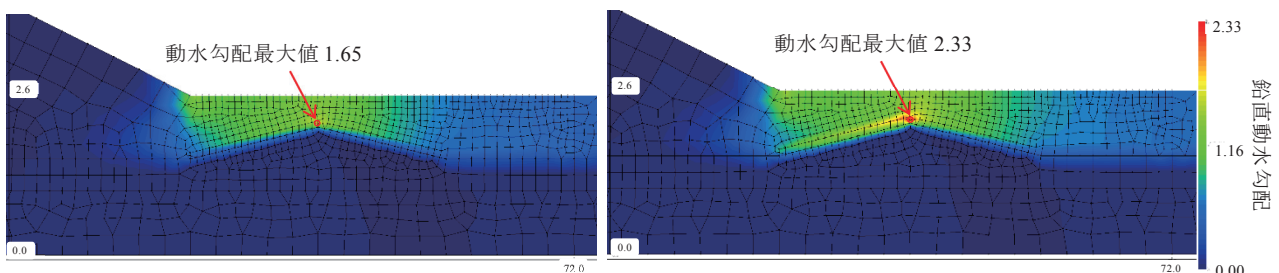


図-16 左から、APne_6, APe_6 の堤体法尻付近鉛直動水勾配分布と最大値

一水位のわずかな差や締固めの不均一性により、水の浸透が複雑な流路を辿り、局所的な土砂移動が発生した可能性が示唆される。

S7_5では、7号ケイ砂側から水を流入させているため、3号ケイ砂に比べて地盤の透水性が低く、所謂キャピラリーバリアのような働き(例えば小林ら²¹⁾)もあり、7号ケイ砂側で保水され、保水しきれない水が3号ケイ砂側に浸透し、排水されたと考えられる。そのため3号ケイ砂は飽和せず、実験中も低い体積含水率となった。ただし、浸透による細粒分の抜け出しは他のケースと同様に発生しており、長期的に浸透が続けば影響があると推測される。それぞれのケースが実際の地盤で発生する状況については、例えばS7_5は表層から地盤内に水が徐々に浸透する条件が考えられる。S3_5とS3_20は透水層の露出部等から水が浸透する状況を想定しているが、S3_20の方が、行き止まり層等がなく排水が十分にされる条件であると考えられる。

模型実験で計測した地盤内の粒度分布をもとに定常浸透流解析を行ったが、Creager式による補正では、上述の目詰まり現象による変化を反映することが可能である一方、0.075 mm以下の細粒分の抜け出しによる影響はあまり反映させることが出来なかった。細粒分の抜け出しによる影響を考慮するには、10%粒径を計算に用いるHazenの式²²⁾を利用するなどの手法が考えられる。例えばS7_5において地点8とoriginalの10%粒径を比較し、Hazen式に当てはめ、定数Cが一定であるとすると、地点8で3倍程度透水係数が浸透後に上昇する結果となる。この結果を反映した浸透流解析は今後の課題である。ただしいづれにせよ間接的な推測であるため、実際に同じ粒度条件に試料を調整して、透水試験をする方が本来は望ましいと考えられる。また、模型実験は上載圧がなく、層厚の薄い地盤条件であるが、上述の現象は表層付近の浅い箇所発生する現象であるため、地盤の物性によっては同様の現象は起きうると推測される。ただし具体的な規模や条件については今後の検討が必要である。

6.2 実堤体への影響と実務上の適用可能性について

実スケール堤体モデルにおいて粒度変化を考慮した浸透流解析を実施した結果、透水層の厚さが拡大する箇所において、細粒土側の目詰まりによる透水性の低下と、その周囲地盤のパイピング危険度上昇の可能性を評価することができた。ただし前項の考察のように、動水勾配は上昇しても粒度組成の変化によりパイピング危険度に対して安全側に地盤状態が変化する可能性もあるため、詳細についてはさらなる議論が必要である。本研究では定常解析を行ったため、既往の提案されている評価手法²⁰⁾よりも簡便な方法が用いられているが、どのような条件で目詰まりによるパイピング危険度が増すかという点については、定常解析でも一定の評価が可能であった。定常解析でも危険箇所の把握やおおよその傾向が把握できることは既往の研究²³⁾でも示されている。しかしなが

ら各河川での具体的なパイピング危険度の上昇可能性を判断するためには、前述の行き止まり層の問題や降雨による表層からの浸透についてさらなる検討が必要である。実地盤では目詰まりによる透水性の低下だけでなく、細粒分の抜け出しによる透水性の上昇も局所的に発生している可能性もあり、また層厚は場所ごとに変化するため、より複雑な浸透挙動や流路を辿っていると推測される。いづれにせよ河川堤体が築造されてから長期的に水位変動や降雨に晒され続けることで、徐々に内部で細粒分の移動と粒度特性変化が起きている可能性があり、それらを考慮した危険度評価を行うことがより適切な堤体の維持管理と防災につながると考えられる。

7. 結論と今後の課題

本研究で得られた結論と今後の課題を以下に示す。

- (1) 表層の難透水被覆土層と下層の透水層を模擬した模型実験では、透水層側に水が流入し排水が十分に行われない条件において、急激な水位上昇による変形と境界層での目詰まりが発生する可能性が示された。
- (2) (1)の条件では、表層変状はごく僅かで、目視で現象を確認するのは困難であると推測される。
- (3) 模型実験で低透水層側に流入する条件では、低透水層内部での細粒分が減少した。
- (4) 上述の模型実験を模擬し、粒度組成の変化による局所的な透水性変化を考慮した二次元定常浸透流解析では、透水層からの浸透による目詰まりが、低透水層の境界付近での鉛直動水勾配の上昇を引き起こすことが示された。
- (5) 目詰まりの影響は実堤体では透水層の拡大部真上の低透水地盤に出やすく、その付近の地盤での鉛直動水勾配が上昇することが示された。実務では難透水被覆土がある場合は、下部透水層の揚圧力による盤ぶくれの考慮も必要とされており、そうした現象との複合的な影響を検討する必要がある。水位や降雨条件、河川堤体内の地層分布、実際の被覆土層の浸透特性などをより厳密に再現して、実際の被覆土層の浸透特性などを細粒分移動による透水性の変動箇所を考慮した解析を行うことは、今後の課題である。

謝辞

本研究はJSPS科研費16K21112・22K04312の助成を受けました。島根大学卒業生の宮本真治氏と吉岡万琴氏に、実験遂行やデータの取りまとめについてご協力いただきました。

参考文献

- 1) (公社)地盤工学会：河川堤防の調査・検討から維持管理まで、丸善出版、2020。
- 2) 齊藤 啓，前田健一，泉 典洋：基盤漏水に伴う噴

- 砂及びパイピング進行条件の検討, 河川技術論文集, Vol.22, pp.251-256, 2016.
- 3) 伊神友裕, 前田健一, 牧 洋平, 岡田 類: 河川堤防のパイピング破壊における間隙水圧の消散および浸透流の局所化の影響, 第 32 回中部地盤工学シンポジウム, pp.5-12, 2020.
 - 4) 小松満, 中原 佑, 高橋啓介: 河川堤防における浸透破壊のパターンに関する模型実験, (公社)地盤工学学会中国支部論文報告集 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.61-69, 2019.
 - 5) 田端幸輔, 福岡捷二: 準二次元非定常浸透流解析に基づいたパイピングによる堤防破壊危険度の評価法, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, I_1327-I_1332, 2017.
 - 6) Sato, M., and Kuwano R.: Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil, Soils and Foundations, Vol.55, No.6, pp.1427-1440, 2015.
 - 7) Prasomsri, J., and Takahashi, A.: The role of fines on instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils, Soils and Foundations, Vol.60, No.6, pp.1468-1488, 2020.
 - 8) 堀越一輝, 高橋章浩: 浸透流による盛土内の細粒土の移動に与える再堆積の影響, 地盤工学ジャーナル, 10 巻, 4 号, pp.473-488, 2015.
 - 9) 近藤明彦, 山田高弘, 前田健一: 内部侵食および目詰りに及ぼす間隙構造の影響: 第 24 回中部地盤工学シンポジウム, pp.71-78, 2012.
 - 10) Terzaghi, K.: Der grundbruch an stauwerken und seine verhütung, Wasserkraft 17, pp.445-449, 1922.
 - 11) 国土交通省 水管理・国土保全局治水課: ドレーン工設計マニュアル, 2013.
 - 12) 佐藤真理, 祖父江陵, 堂領翔吾: 模型実験による複雑な内部侵食状況に関する検討, 島根大学生物資源科学部研究報告, 23 号, pp.27-32, 2018.
 - 13) 佐藤真理, 粗粒土と細粒土を層状に有する地盤での浸透の影響に関する検討 (その 1), 第 75 回農業農村工学会中国四国支部講演会, pp.64-66, 2021.
 - 14) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, Vol.1, No.5, pp.318-333, 1931.
 - 15) van Genuchten, M. Th.: A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Society of America Journal, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
 - 16) Creager, W. P., Justin, J.D., and Hinds, J.: Chap.16 soil tests and their utilization, in Engineering for dams, Vol. III: Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, pp.645-654, 1944.
 - 17) 齊藤雅彦, 川谷 健: 透水係数の空間分布に関する理論的考察, 土木学会論文集, 2000 巻, 645 号, pp.103-114, 2000.
 - 18) Sakamoto, N., and Sato, M.: Seepage flow analysis considering the effects of internal erosion due to long-term seepage into ground comprising surface impermeable ground, SEE PATTAYA 2021, pp.98-103, Thailand, 2021.
 - 19) 西村柁哉, 前田健一, 高辻理人, 牧 洋平, 泉 典洋: 実堤防の調査結果に基づいた河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フローの提案, pp.499-504, 河川技術論文集, 25 巻, 2019.
 - 20) 国土交通省四国地方整備局 徳島河川国道事務所: 吉野川資料館 The Yoshino River Museum, <https://www.skr.mlit.go.jp/tokushima/river/yoriyoi/yoriyoikawa/teibou/teibou.html>, (参照 2022.4.4).
 - 21) 小林 薫, 鈴木明日香, 松本和伸, 森井俊広: キャピラリーバリア地盤の限界長に着目した細粒な土の選定に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.14, No.1, pp.43-56, 2019.
 - 22) Hazen, A.: Some physical properties of sand and gravels, with special reference to their use in filtration, 24th Annual Rep., Massachusetts State Board of Health, pp.539-556, 1893.
 - 23) 杉江茂彦, 中道洋平, 鈴木和明: 防潮堤の基礎地盤のボーリングに関する FEM 解析検証 (2), 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-49, 2022.

(2022 年 6 月 13 日 受付)

