河川水位変動による堤体の 経年劣化メカニズムの解明

近畿大学理工学部 教授 河井 克之 近畿大学理工学部 助教 中島 晃司

概要:

集中豪雨時の堤体からの漏水が顕在化しており、長い歴史の中で河川水位変動履歴を受け、堤体が当初 の品質を保てていないことが示唆される.本研究では、特に水位変動が堤体内の内部浸食に及ぼす影響を 明らかにするために、地盤内の細粒分動態を可視化した模型実験及び、材料特性の変化を考慮した水位変 動シミュレーションを実施した.まずは、浸透模型土槽に動水勾配を作用させ、その前後のX線CT撮影を 行った.ここでは、Region Growing 法を用いて、粗粒分間隙の細粒分と間隙水の分布傾向を明らかにし、 締固め面の様な不連続面も細粒分動態に影響を与えることが分かった.また、固相と液相の屈折率を一致 させた模型土槽に、非透過の細粒分を含有させ、画像解析から細粒分移動を可視化させた透水試験を実施 し、細粒分移動は重力の影響を受けながら透水方向に移動・滞留することも明らかとなった.堤防の高水 位シミュレーションでは、細粒分の移動・滞留が堤体材料の水理特性に影響を及ぼすとして、材料特性変 化を考慮したシミュレーションを実施した.

キーワード:河川堤防,内部浸食,X線CT,透過土模型,飽和不飽和浸透解析

1. はじめに

近年、線状降水帯の発達が頻発しており、河川堤防の被 害も甚大なものとなっている. このような長時間の激しい 豪雨は高水位継続時間の長期化につながっている. 元来, 水害を抑制する河川堤防は、河川水が堤防内を浸透し堤内 に達するまでの緩衝材としての役割を担っているが、その 容量を超過することによる、漏水やそれに伴う噴砂、決壊 が問題となっている.河川堤防の構造検討の手引き1)では、 浸透に対する安全性の照査基準として、浸潤線上昇によっ て堤内法尻が不安定化することによるすべり破壊とパイ ピング破壊を考慮している. このうち, パイピング破壊に 関しては、浸透解析の結果から得られる動水勾配の分布に より評価するが、パイピングは進行性の破壊であり、外水 位変動履歴を受けて,時々刻々と変化する内部状態を反映 することは難しい. また、パイピング破壊はいくつかの要 因が考えられるが、それらが一律のメカニズムで説明でき ていない. 斎藤ら²は、パイピングに関する文献調査によ り、パイピング機構を①堤体基礎地盤の浸食によるもの、 ②堤内法先の盤ぶくれによるもの、③堤体自身の内部浸食 によるものに分類している. 本研究では, 浸透による堤体 自身の内部浸食に着目して、そのメカニズム解明と堤体の 不安定化に及ぼす影響について検討する. 地盤を成す土粒 子の粒径分布がギャップ粒度を示す場合,浸透時に細粒分が粗粒分が構成する間隙を移動して洗い流され,場合によっては目詰まりを生じさせ,浸透特性を変化させる.ここでは,まず細粒分の動態について,X線CTスキャンによる内部可視化を伴う模型土槽浸透試験および透過土を用いた浸透試験によってメカニズム解明を試みる.また,土/水/空気連成解析によって,材料特性変化を考慮した河川水位変動シミュレーションを実施し,堤体の安定性に及ぼす影響について検討する.

2. X線CTスキャンによる細粒分移動の可視化

(1) 試験手順

実験材料として, 珪砂7号と珪砂3号(土粒子比重2.60) を50%ずつ混合したものを用いる.図-1にそれぞれの粒径 加積曲線を示す.混合土は,Kenny and Lau³の指標を満た しており,潜在的に内部浸食に対して不安定性を示す粒度 分布となっている.混合土の最大間隙比,最小間隙比は, それぞれ0.82,0.48であり,相対密度60(%)になるように 突き棒を用いて締固め,模型土槽を作製した.締固めにお いて複層締固めを行う際の締固め面の影響を見るために, 模型土槽を1層で締め固めるケースと,2層に分けて締め 固めるケースを設定した.図-2は試験装置概要である.模



図-3 透水試験における水頭条件

型土槽へはタンクを介して下部に水頭を作用させ、土槽内 に上向き浸透流を生じさせる.模型土槽は、浸透過程で X 線 CT スキャンによる内部可視化 ⁴を行うため、アクリル 円筒製である.図-3に土槽に与えた水理条件を示す.この 土槽条件での試料の飽和単位体積重量から算出される限 界動水勾配は1である.予備実験では、限界動水勾配の2 倍の動水勾配を与えた時に、土槽内でボイリングが生じた. 図中の①~④はX線CT撮影を実施する時間を示している. 模型土槽作製後(①)、まず土槽上面まで水位を与え 24 時 間放置することで飽和させた(②).その後、限界動水勾配 を与え(③)、30 分間通水し(④)、動水勾配を変化させた.

(2) 試験結果

X線CT撮影された画像は、透過X線量を示し、密度の影響を受け、撮影条件が同じであれば、密度が大きい程、画像の輝度値が高くなる。図-4 に、図-3 の②と④で撮影された CT 画像の輝度値の差を示す。通水によって密度が増えた領域ほど、画像が濃く(白く)なることを示す。1 層締固め土槽では確認できないが、2 層締固め土槽では、中央に特に白い領域があり、締固め面の影響が現れていると考える。この密度が増えた領域は、内部浸食によって細粒分が移動後、集積したと考えられるが、通水によって間隙比が小さくなることでも密度増加は起こり得る。そこで、この密度増分の要因を分析するために、Region Growing 法⁵⁾を用いて、細粒分と間隙水の影響のみを抽出する。Region growing 法とは、物質を代表する CT 値を持つ Voxel を初期



図-2 試験装置概要



(a) 1 層締固め土槽(b) 2 層締固め土槽図-4 透水試験前後の土槽輝度値差分



図-5 土槽の撮影範囲と解析範囲

点とし、その Voxel に隣接する Voxel の CT 値が設定した 許容値以内にある場合に同じ連続体とみなす処理を繰り 返し、次々と領域を拡張していく領域分割手法の一つであ る。ここでは、粗粒分の占める領域とそれ以外の間隙部分 を分離することを目的としている.撮影された X線 CT 画 像において Region Growing 法を円滑に進めるために、図-5 に示す様に上下に分割して進める.2 層締固め土槽にお いては、下部画像内に締固め面(破線)が存在することにな る.図-6,7 は、それぞれ Region Growing 法によって、間 隙水と細粒分のみを分離した撮影範囲の上部画像および 下部画像である.ここでは、青色から黄色になるほど輝度 値が高く、密度が大きい、つまり間隙内に細粒分が多く含 まれていることを示す.まず、通水による飽和後の、画像 に注目すると、1 層締固め土槽では2 層締固め土槽に比べ



図-8 ホウケイ酸ガラスの粒度分布

(a) 飽和前(b) 飽和後図-9 インデックスマッチング法による内部可視化

て上部から下部まで均一に黄色い領域が分布しており,間 隙に含まれる細粒分に偏りがないことを示す. それに比べ て,2層締固め土槽では、下部、特に締固め面以下の領域 で黄色い領域が顕著に表れている. その後, 上向きに動水 勾配1を与えて30分間放置した④では、1層締固め土槽 では、下部画像でやや黄色い領域がやや少なくなり、その 分上部画像で黄色い領域が多くなっているように見える. それに比べて、2層締固め土槽では、動水勾配を与える前 に締固め面以下の領域に広く分布していた黄色い領域が 上部画像にまで広がっている. このことを, 図-4(b)の画像 に置き換えると, 締固め面以上の領域での密度増分は, 元々間隙に存在していなかった細粒分が上方への浸透流 で下部からもたらされたものと考えることができる. X線 CT では、撮影に数分を要し、浸透流がない状態で行う必要 がある.また,得られる画像もその時点での密度分布であ り、前後の画像との分布比較から、細粒分の動態を検討す る必要がある. そこで、細粒分移動を動的に可視化する方 法として透過土を用いた模型実験を行った.

3. 透過土を用いた模型試験

(1) 試験手順

固相と固相間隙を満たす液相の屈折率を一致させるこ とにより、固相と液相間の境界を透過するインデックスマ ッチング法⁶を用いて,地盤内部の細粒分の動態を可視化 することを試みる. 試料として, 粉砕したホウケイ酸ガラ スを粒度調整したもの(図-8)に、質量比 0.01 の含有率に なるように黒く着色した7号珪砂(50%粒径:0.25mm)を混合 し、ギャップ粒度試料を準備した.ホウケイ酸ガラスの屈 折率は1.47~1.48であり、江藤らの研究"を参考にして、 屈折率の等しい質量パーセント濃度 60%のヨウ化ナトリウ ム水溶液を間隙流体として用いた. 試料内に水溶液が満た されると、屈折率の等しい、ホウケイ酸ガラスと間隙流体 は透過し、細粒分である珪砂のみが観察される(図-9).図 -10 に試験装置の概要を示す.まずは試料を突固めによっ て土槽に充填し、水頭差を与えて一定期間放置し、ヨウ化 ナトリウム溶液で土槽全体を飽和させる. その後, 左側上 流部より一定流速(7.96cm/s)でヨウ化ナトリウム溶液を 流入させる透水試験を行った. 設定流速については、レイ



ノルズ数から層流であることを確認している. 透水試験の 間,カメラによって5枚/秒の高速連続撮影を行い,撮影 画像に対してPIV解析をすることで細粒分の動態を観測した.

(2) 試験結果

図-11 に PIV 解析によって得られた透水 10 分間のベク トル分布である. 領域左端近くで下向き流れが顕著にみら れるが、模型土槽の左端領域外の下部に取り付けられてい る排水口の影響が考えられる. ただし, 透水方向は右から 左であるのに,模型土槽流入口に近い右側の領域も含めて 全体的に下向きの動きが見られる. そこで、流出入口の影 響が少ない土槽中央部分のみ,透水時間毎に再度 PIV 解析 を実施した結果が図-12 である.まず、図-12(a)の透水初 期の挙動に注目すると、透水方向(左方)への移動よりも鉛 直下向きの動きが卓越している. 飽和時には、土槽下部か ら貯水位が上昇することになるが、ストークの法則に従う と、浮遊した細粒分が土槽高さを移動するのに要する時間 は1.6秒であり、図中に見られる下移動は浮遊粒子の沈降 挙動とは言えない、飽和時の貯水位上昇に伴って、上方の 粗粒分が成す骨格構造間に移動し、不安定に存在する細粒 分が、透水に伴って重力の影響で下向きに移動したのでは ないかと推測される. その後, 図-12(b)(c)と時間をかけて 透水方向に移動し、移動する空間的な余地がなくなると留 まる(図-12(d))様になるのではないかと考える. これは、 細粒分の移動や滞留が、粗粒分が成す間隙に占める体積に 依存することを示しており, 地盤構造物において細粒分含

有率と間隙構造が浸透時の内部安定性に影響を及ぼすと いう Prasomsri and Takahashi[®]の研究結果に一致する. こ の様な細粒分の移動は、構造物内での材料特性の局所化を 生じさせることになる. 特に、河川堤防の様な浸透に対す る緩衝を目的とした構造物では、透水係数、保水特性にそ の影響が現れると予想する. そこで、進行的に材料特性が 変化することを考慮した堤体の水位変動シミュレーショ ンを実施する.

4. 材料特性の変化を伴う水位変動シミュレーション

(1) 解析条件

水位変動シミュレーションには、土/水/空気連成有限要 素解析コードDACSAR-MP^{®)}を用いた.図-13 に解析領域と水 理境界条件を示す.左側が川表側を示し、水位に応じて法 面の水頭境界を変化させる.同時に、水圧相当の外力も法 面に作用させる.右側は、浸透境界とした.ここで、浸透 境界とは圧力水頭が負の状態では非排水境界であり、圧力 水頭が正の値を示そうとするとゼロ圧力水頭境界となる. つまり、河川側から流入した浸透水が浸潤線を成し、浸潤 線が右側法面に到達すると、浸潤線以下でゼロ圧力水頭境 界となり、法面からの滲出を表現する.また、内部浸食に よって堤体内の細粒分が移動し、滞留することを模擬する ために、浸潤線が到達した領域下部の法面近傍要素の材料 定数を自動的に変更するようにした.表-1 に解析に用い た材料定数を示す.透水係数については、1.0×10⁻⁶ (m/sec) とする.シミュレーション内で川裏側法面において浸潤線



以下になると透水係数が10分の1(Phase1)になり,さらに 上方要素まで浸潤線が来ると10分の1(Phase2)となるよ うにした.図-15に水分特性曲線を示すが,透水係数の変 更に伴って,水分特性曲線も変化するようにした.水位に ついては,24時間で4.5m上昇するようにし,高水位のま ま放置した.

(2) シミュレーション結果

図-16 に、材料特性の変化を考慮しない水位変動シミュ レーション結果を示す. ここでは、浸潤線が川裏側法面に 到達した高水位9日目の結果である. 初期状態を, 堤体が 完成した時をイメージし、全体的に不飽和状態としたため、 不飽和透水係数が低く,浸透に時間がかかっている.実際 に河川堤防では、完成後、降雨や河川水浸透の履歴を受け て、内部にはある程度の高さに浸潤線があるものと予想さ れるが、結果比較の簡易さからこの様にした. 図-16(a)の 圧力水頭分布で, 圧力水頭ゼロを示すコンターを白実線で 示している. この白実線より上方は不飽和状態にある. 図 -16(b)は等ポテンシャル線をカラーコンターで示し、流速 ベクトルを黒の濃淡で示している.実流速は、動水勾配に 不飽和透水係数を乗じたものとなる.等ポテンシャル線間 の間隔が狭く飽和度が高い領域で最も流速が大きくなる. ここでは、川表側の水面近くで浸透流速が最も大きくなる. 逆に浸潤線の前方の流速は小さい. この後, 浸潤線が上昇

し川裏側法面から滲出するようになると、法面近傍の透水 係数,保水特性が変化することになる.図-17,18に高水位 15日目の状態を示す.図-17は材料特性の変化がない場合, 図-18 は浸潤線到達から、材料特性の変化がある場合の結 果である.まず,圧力水頭の分布をみると、材料特性変化 がない場合, 高水位9日目から15日目までで, 浸潤線の 滲出高さが 1m 余り上昇しているのが分かる. それに対し て、材料特性の変化を考慮すると、1.5m 近くまで滲出面が 上昇しているのが分かる.また、等ポテンシャル線を比較 すると、材料特性の変化がない場合は、川裏法先に向かう 動水勾配が生じているのに対して、材料特性変化を考慮す ると、法尻部の動水勾配が大きくなっているだけではなく やや上向きの動水勾配が形成されている. この上向き浸透 流は、法尻の安定性に大きく影響を与える. 図-19 に解析 から得られたせん断ひずみ分布を示すが,材料特性の変化 の有無による違いはほとんど見られないが、材料特性の変 化がない方が法尻のせん断ひずみがやや小さいのが分か る. この安定性に関する部分は、強度特性に関するパラメ ーターも見直して、より詳細な検討が必要だと考える.

5. まとめ

本研究では、堤体の漏水の原因となり得る内部浸食のメ カニズム解明のために、ギャップ粒度で構成された地盤材 料内の細粒分動態を可視化するとともに、それに伴う材料



特性の変化を考慮した水位変動シミュレーションを実施 し、以下の結論を得た.

- (1) X線 CT 画像に Regeion Growwing 法を適用すること で,粗粒分間隙が作る間隙内の細粒分含有量を可視 化した.その結果,締固め面の様な不連続面では細粒 分移動に不連続性が見られることが分かった.
- (2) 固相と液相の屈折率を一致させるインデックスマッ チング法を用いて、細粒分動態を可視化した. PIV 解 析の結果、細粒分が移動するにあたって、重力が少な からず影響すること、また一定流速流れ内では移動 後、安定した状態で滞留することも分かった.
- (3) 模型実験から得られた、細粒分の移動・滞留が流末での材料の水理特性に影響を及ぼすと仮定し、材料特性の変化を考慮した堤体の水位変動シミュレーションを実施した.ここでの解析条件では、その差はそれほど大きくないが、法尻近傍での動水勾配の違いとなって現れ、堤体の安定性に影響があると考える.

参考文献

- 国土技術研究センター:河川堤防の構造検討の手引き(改訂 版), 2012.
- 2) 斎藤啓,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,第22巻,pp.251-256,

2016.

- Kenny, T. C. and Lau, D.: Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, No. 2, pp. 215-225, 1985.
- 4) 麓隆行:新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用、土木学会論文集E2、(材料・コンクリート構造)、69巻、2号、pp.182-191、2013.
- 5) 木戸隆之祐,肥後陽介,高村福志:三軸王縮下の不飽和砂の 進行的なせん断帯発達過程における間隙水の微視的特性,土 木学会論文集 C(地圏工学),73巻,2号,pp.233-247,2017.
- Wakabayashi, T.: Photo-elastic method for determination of stress in powdered mass, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 5, No. 5, pp. 383-385, 1950.
- 江藤 剛治,竹原 幸生,横山 雄一,井田 康夫:水流の可視 化に必要な関連技術の開発-比重整合・屈折率整合・多波長計 測,土木学会論文集,No.533/II-34, pp.87-106, 1996.
- Prasomsri, J. and Takahashi, A.: The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils, Soils and Foundations, Vol. 60, pp. 1468-1488, 2020.
- Sugiyama, Y., Kawai, K. and Iizuka, A.: Effects of stress conditions on B-value measurement, *Soils and Foundations*, Vol. 56, No. 5, pp. 848-860, 2016.
- 10)Sugii T., Yamada K. and Kondou T.: T. Relationship between soil-water characteristic curve and void ratio, *Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol.1, pp. 209-214, 2002.