

土構造物の表面・内部侵食による被害メカニズムの解明

藤澤 和謙（京都大学大学院農学研究科）

fujik@kais.kyoto-u.ac.jp

はじめに

ため池に代表される農業用水利施設は、日本の生産基盤を支える重要な土構造物である。近年は豪雨が激甚化し、施設の維持・管理とともに災害に対する強化が求められている。ため池やフィルダム、堤防といった土で構成された堤体の被害事例は、地震による液状化を除けば、越流、パイピング（漏水）、法面（堤体斜面）のすべりの3つに大きく分類できる。越流は越水とも呼ばれ、洪水時に排水能力を上回る水量が貯水域に流れ込み、貯水位が堤高を越えて水があふれ出す現象である。パイピングは、貯水位が高くなり、堤体内を流れる浸透流の流速や圧力勾配が大きくなることで、堤体を構成する土が浸透流とともに流出することで起こる。法面のすべりは、堤体斜面を形成する土が水の浸入等によって安定性を失う（せん断強度が低下する）ことで発生する。実際の被災事例を見てみると、豪雨時の堤体被害は、越流とパイピングによるものが大多数を占める。これは、堤体法面の安定性に比べて、越流やパイピングによる被害メカニズムが明らかではなく、堤体の設計においてもそれらの考慮が十分になされていないことが主たる理由と言える。越流とパイピングの現象には共通点があり、それは水流による土の侵食・流亡に深く関係している点である。被害過程を考えれば、越流では堤体をあふれ出した水流により、堤体を構成する土が侵食を受けることで流亡し、破堤に至る。また、パイピングでは土の中を流れる浸透流によって土粒子が動かされ、土が流亡することで堤体が被害を受ける。法面のすべりは、土のせん断破壊に関係するものであり、越流やパイピングのように土の侵食・流亡に関係する現象とは異なる。

堤体などの土構造物の設計や維持管理を考える上で最も重要な学問は土質力学である。しかし、現在のそれには土の侵食や流亡を扱うための基礎的な知見が欠けており、越流やパイピングに起因する堤体の被災事例の多さはこの土質力学の現状を映し出していると考えられる。以下では、著者が土の侵食・流亡現象について取り組んできた研究内容を断片的に紹介する。まずは、どのように土の侵食や流亡現象を扱えば良いのかについて簡単に説明を行った後、越流現象に関連する土の表面侵食とパイピングに関連する土の内部侵食についてのこれまでの研究について概要を述べる。

土の侵食・流亡現象の4要素

土の侵食・流亡現象を予測にあたっては、次の4つの要素（I～IV）を把握することで、現象の予測をすることができる。

- I. 土の侵食・流亡を引き起こす水の流れ
- II. 土の侵食・流亡が発生する条件
- III. 土の侵食・流亡のスピード
- IV. 土の水の境界面の形状変化

以上の4要素のうち、IとIVについては、数値解析が重要な役割を果たすが、IIとIIIについては、理論的な考察や実験による侵食現象のモデル化が主要な研究アプローチとなる。これらの4要素が揃えば、Iによって侵食を引き起こす水の流れを予測し、IIによって侵食・流亡が発生するか否かを判断する。侵食・流亡が発生するのであれば、IIIとIVによってその速度に応じて土と水の境界面の形状変化を追うことで、土構造物の侵食・流亡過程を予測することが可能となる。

堤体の越流侵食（表面流による侵食）について

上述の4要素を考えると、地表面を流れる土の侵食については、河川工学分野の知識を活用すれば、多くのことを知ることができる。Iについて、表面流の挙動を予測するには浅水流方程式を用いるのが簡便である。浅水流方程式は水深方向の水圧に静水圧分布を仮定し、深さ方向に平均された流速を用いて、漸変流を扱うものである。堤体を越流する流れに適用すると、のり尻やのり肩における斜面勾配の急変部において漸変流の仮定を満たすとは限らず、そのような箇所では計算精度の悪化が懸念される。しかし、浅水流方程式は準3次元的な計算を2次元の計算格子で行うことができるため、計算負荷の観点から同方程式を用いるメリットは大きい。IIとIIIについては、限界せん断応力や流砂式・侵食速度式といった形で整理されており、特に砂質土については多くの先行研究がある。IVについては、侵食速度に応じて、地表面の高さの時間変化を逐次計算することで侵食面の形状変化を追うことができる。著者らは、浅水流方程式を用いて、堤体の越流侵食過程を準3次元的に安定計算する手法を提案した^{1),2)}。また、室内実験から堤体材料の侵食速度を把握した上で、堤体の越流侵食実験を行った結果から、提案手法によって越流侵食過程の堤高の変化を定量的に予測可能であることを示した^{3),4)}。

堤体の越流侵食の特徴は、限界流において侵食が発生するかどうかにによってその後の侵食過程が大きく変化する点にある。その侵食過程は大きく2つに分類される。1つ目は、流速が大きくなる下流側斜面の法尻側から侵食が始まるケースである（図1(a)参照）。これは、下流側斜面にて越流水から堤体表面に作用する摩擦力が限界せん断応力に達する場合に対応する。この場合、侵食は射流域で生じるため堤体形状の変化は上流に伝播せず、侵食によって下流側斜面の一部がほぼ鉛直な面に変化する。この鉛直面はその底部が落下流による侵食を受けることで上流側へと進展していくことで決壊に至る。2つ目は、下流側斜面だけでなく天

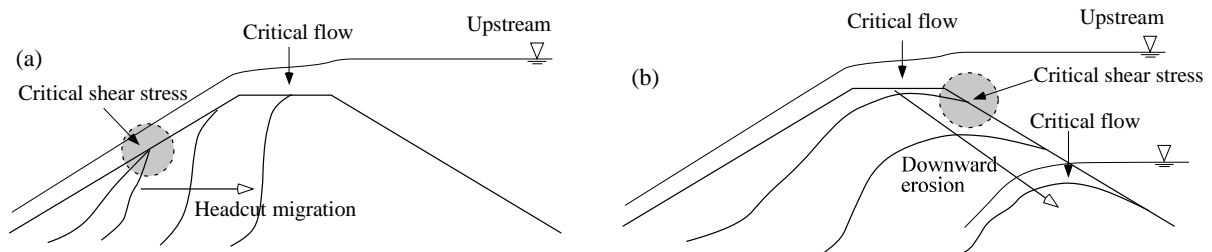


図1 堤体の侵食過程 ((a) 射流域のみで侵食が生じる場合, (b) 常流域でも侵食が生じる場合) 端でも侵食が生じるケースである (図1(b)参照)。これは、限界流においても侵食が発生

し、流速が比較的小さな常流域にて水流による摩擦力が限界せん断応力に達している場合に対応する。この場合は、下流側斜面（射流域）だけでなく天端（常流域+限界流）でも侵食が生じるため、堤体の形状は全体的に変化する。限界流による侵食は下方へと進行することで堤高が減少し、決壊に至る。著者らは、上述の侵食過程についての考察も基づき、越流侵食による堤体の形状変化を理論的に算出することに成功している⁵⁾。

浸透流による土の侵食（内部侵食）について

浸透流による土の侵食について考えた場合、上述の I は、浸透流の流れを把握することに対応する。これについては、動的な浸透解析はまだ検討の余地があるが、ダルシー則を用いた定常計算は既に確立している。また、II については、限界動水勾配や限界流速として、浸透流によって土粒子が動き出すときの圧力勾配や浸透流速が知られている。最も研究が進んでいない部分は III である。これは、浸透流によって土の侵食・流亡が始まった際に、単位時間にどれだけの量の土粒子が侵食を受け、流亡するかを知ることに対応する。もし、この III に対応する「土粒子の流亡速度」が把握できたのであれば、浸透流による土の侵食・流亡の予測は飛躍的に向上すると考える。

著者らは、浸透流による土の流亡速度についても、表面流による侵食と同様なアプローチが可能であると考え、浸透流による土の侵食速度を定義して土構造物の内部侵食解析を試みた⁶⁾。（II と III については侵食速度のモデル化に含まれており、I については飽和・不飽和浸透流解析、IV については土と水の領域を間隙率の時間変化を計算することで実現した。）その結果は、それまでに表現することができなかったパイピングの経路が数値シミュレーションによって予測可能であることを示した。図 2 には、一例として、土塊中で発展する内部侵食の数値計結果を示す。同図は浸透流の出口から始まった間隙率の増加（図 2(a)）が、浸透流の上流方向へ発達し、パイプのような水みちが形成される典型的なパイピングの様子（図 2(b)）を示すものである。

このように、パイピングの進展を定性的に予測はできるものの、内部侵食における侵食速度を定量的な評価には課題がある。著書らは、浸透流による土粒子の流亡速度を定量的に評価するため、実験的かつ理論的にその測定とモデル化を行った⁷⁾。この結果は、現在開発中

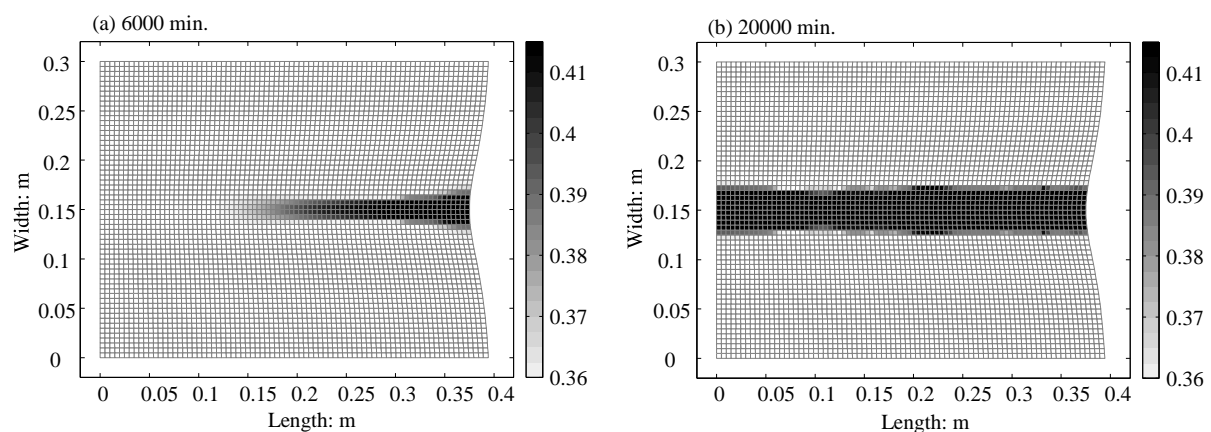


図 2 内部侵食による間隙率分布の変化（浸透流は左から右へ流れている。図中の黒くなっている箇所は侵食が進み、浸透流の集中が起きている部分を示す）

であるダルシー流（浸透流）と通常の水の流れ（Navier-Stokes 流）の同時計算⁸⁾に組み込むことで、幅広い侵食現象の精度ある予測ができるよう研究を進めている。

謝辞

公益社団法人農業農村工学会からのご推薦を賜り、日本農学進歩賞の受賞に至りましたことを身に余る光栄に感じております。同学会の塩沢昌会長、小前隆美専務理事をはじめ、関係者の皆様に心より御礼申し上げます。本研究を遂行するにあたっては、これまでの多くの先生方から多大なご支援を頂きました。特に、著者が日頃からご激励、ご支援を頂いております村上章先生（京都大学教授）、西村先生（岡山大学教授）、著者が博士課程の学生の時からご指導頂いた青山咸康先生（京都大学名誉教授）、小林晃先生（関西大学教授）、木山正一先生（京都大学助教）におかれましては、最大限の感謝を申し上げます。また、忌憚のない意見をくださった若手研究者の方々をはじめ、平素よりご支援を賜っております皆様に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) K. Fujisawa and A. Murakami (2013) 3D Simulation of overtopping erosion on embankments by shallow water approximation, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 715-718.
- 2) K. Fujisawa, A. Murakami, S. Nishimura and T. Shuku (2012) Numerical analysis of embankment erosion caused by overflow using shallow water equations, Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion, 941-948.
- 3) 藤澤和謙, 村上 章, 西村伸一, 珠玖隆行 (2012) 土の侵食速度を用いた堤体の越流破堤解析, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, 68(2), I_317-I_326.
- 4) 藤澤和謙, 村上 章, 西村伸一 (2011) 砂・粘土混合材料の侵食速度測定と室内越流破堤実験, 農業農村工学会論文集, 第 273 号, 45-55.
- 5) K. Fujisawa, A. Kobayashi, S. Aoyama (2009) Theoretical description of embankment erosion owing to overflow, Géotechnique, 59(8), 661-671.
- 6) K. Fujisawa, A. Murakami and S. Nishimura (2010) Numerical analysis of the erosion and the transport of fine particles within soils leading to the piping phenomenon, Soils and Foundations, 50(4), 471-482.
- 7) K. Fujisawa, A. Murakami, S. Nishimura and T. Shuku (2013) Relation between seepage force and velocity of sand particles during sand boiling, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 43(2), 8-16.
- 8) 藤澤和謙, 有本慎一, 村上 章 (2013) Darcy-Brinkman 式を用いた非圧縮性流れと Darcy 流の同時解析手法, 農業農村工学会論文集, 第 287 号, 35-44.

Damage mechanism of soil structures due to surface and internal erosion

Kazunori Fujisawa (Graduate School of Agriculture, Kyoto University)

fujik@kais.kyoto-u.ac.jp