

土粒子レベルからみたパイピングに関する一考察

鹿児島大学工学部 学生員 ○中野裕二郎 正会員 北村良介
 鹿児島大学大学院 学生員 酒匂一成 学生員 荒木功平

1. はじめに

鹿児島県では降雨時に斜面崩壊等による土砂災害がしばしば発生している。この原因の一つとしてシラス地盤の力学特性が挙げられる。すなわち、すべり面下端でのパイピングがシラス斜面崩壊のトリガーとして考えられる。

本報告では、シラス斜面崩壊のトリガーと考えられるパイピング現象を解明する研究の第一段階として、簡単なパイピング発生試験装置を用いて豊浦標準砂のパイピング現象を観察した。また、土粒子レベルでの力の釣り合いに関する考察から限界動水勾配を誘導し、既存の試験結果との比較・検討を行った。

2. 砂質土に対するパイピングの実験

2.1 試験装置・試験試料・試験条件

図-1 は用いた試験装置の概略を示している。装置は供試体を入れるセル、圧力を加えるためのコンプレッサー・水槽、間隙水圧計・データ取り込みシステムから成り立っている。セルの内径は6 cm、高さは20cmであり、底部にはポーラスストーンを置いている。用いた試料は豊浦標準砂である。供試体の高さは12cmあり、乾燥した状態の豊浦標準砂を間隙比が0.84 となるように作製し、その後、供試体下端より注水し、その時の圧力を間隙水圧計で測定した。

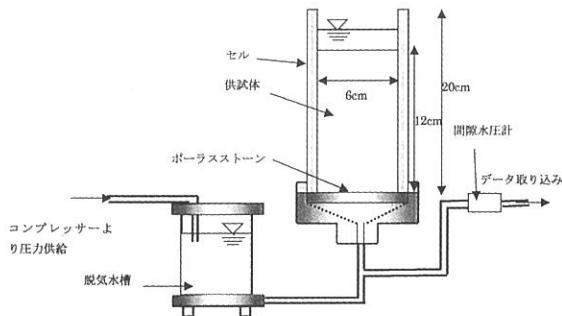


図-1 試験装置の概略

2.2 試験結果

水圧の小さな時（5.29kPa 付近）は、なにも変化はなかったが、水圧を変え実験していくと（7.35kPa 付近）、写真-1 のように供試体が徐々にもちあがるヒーピング（写真中の白いラインが初期状態を示す）が見られ、それとほぼ同時期に間隙空気により写真-2 のような水みち（写真中の白いラインにはさまれた部分）が形成され、その水みちを土粒子が通り噴き上がる、パイピング現象が見られた。さらに水圧を増やすと（22.3kPa 付近）供試体全体が噴き上がるボイリング現象の発生が確認された。

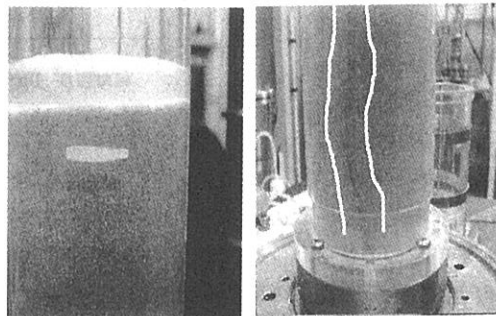


写真-1 ヒーピングの状態 写真-2 パイピングの発生状態

2.3 既存の試験例¹⁾

パイピングに対する試験例として参考文献 1)での試験結果を参照する。試験は、大型長期透水試験装置（直径 10 cm、長さ 20 cm 程度の円筒＋水圧加圧装置）に麦生田から採取した一次シラスの不攪乱試料を詰め、水圧を段階的に変化させて行われた。また図-2 に一次シラス限界流速試験結果を示す（なお、図中の矢印はパイピング開始地点、No は、採取試料番号）。パイピング発生時の実流速、動水勾配はそれぞれ $v = 1.0 \times 10^{-2} \sim 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $i = 6 \sim 9$ の範囲にあり、その時の透水係数は、 $k = 1.0 \times 10^{-3} \sim 2.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

の範囲にある。ボーリングして測定不能となった時点の動水勾配は、No.6を除き動水勾配が $i=20$ 付近である。

3. 土粒子レベルからみたパイピングのモデル化

図-3のような水中の、球形の二粒子を考える。二粒子が、(1)式に示す土粒子自身による自重 W 、浮力 P 、粒子間力 F により釣り合っている状態を考える。この時、下からの水による流れにより、水による抗力により二粒子の力の釣り合いが崩れ、二粒子が離れる時、すなわち粒子間力 F が 0 になる時、パイピング現象が発生するとした。この結果、限界流速 U は(2)式を繰り返し計算により算出される。また、ダルシー則より限界動水勾配 i_c は、(3)式で表される。

$$P = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{R}{2}\right)^3 \rho_w g, \quad D = C_D \frac{\pi R^2}{4} \cdot \frac{\rho_w U^2}{2},$$

$$W = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{R}{3}\right)^3 \rho_s g \quad (1)$$

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{Rg(\rho_s - \rho_w)}{C_D \rho_w}}, \quad \left[\begin{array}{l} \text{Re} = \frac{UR\rho_w}{\mu} \\ C_D = \frac{24}{\text{Re}} \end{array} \right] \quad (2) \quad (R_e < 1)$$

$$i_c = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{Rg(\rho_s - \rho_w)}{C_D \rho_w}} \quad (3)$$

R : 粒径, Re : レイノルズ数, μ : 粘性係数, D : 抗力, g : 重力,
 ρ_s : 土粒子密度, ρ_w : 流体密度, C_D : 抗力係数, k : 透水係数

4. 試験結果と二粒子モデルとの比較、検討

上記の二粒子モデルを用いて限界流速、限界動水勾配を算出した。計算には、麦生田の一次シラスの土質パラメータを用いた。表-1に計算に用いた入力パラメータを示す。

今回の計算結果では、限界流速 U は $4.78 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、限界動水勾配 i_c は、20.78~47.8 となった。参考文献 1) による試験結果と比べるとかなり大きな値を示し、実験結果よりパイピングが発生しにくいという結果がでた。この原因として、提案のモデルでは、二粒子でしか考えておらず他の粒子の影響を考えていないことが挙げられる。そのため、本モデルに他の粒子の影響を考えた場合におけるモデルの構築を行う必要がある。

5. おわりに

簡単なパイピング・ボーリング発生試験装置を用い、浸透力による土粒子の動きを観察した。また、二粒子間の力の釣り合いからパイピングが発生する限界動水勾配を誘導した。今後は二粒子レベルの考察を加えるとともに、統計・確率論を導入して土塊レベルでのパイピング現象のモデル化を目指していきたい。本研究に対して (社) 日本鉄鋼連盟から研究助成をいただいた。ここに謝意を表します。

【参考文献】1) 松本雄二 シラス地盤における鉄道トンネル用透水性スラグ路盤の設計・施工に関する研究, 九州大学博士申請論文, pp. 28-35, 2001.

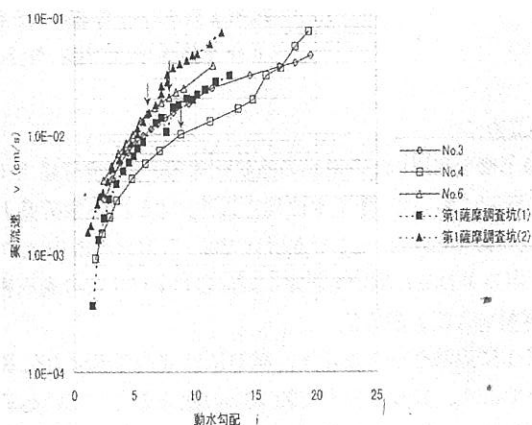


図-2 限界流速試験結果¹⁾

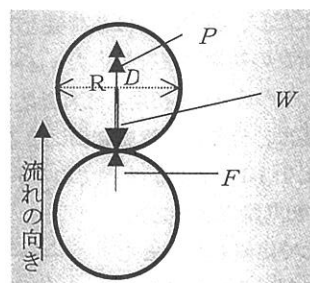


図-3 二粒子の力の釣り合い

表-1 計算に用いた入力パラメータ

土粒子密度 ρ_s	2.3g/cm ³
粒径 (D_{10})	0.026mm
粘性係数 μ	$1.009 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$