

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656293

研究課題名(和文)新しい土砂の流失破壊基準提案への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to propose a new erosion failure criteria of soil

研究代表者

風間 基樹(KAZAMA, MOTOKI)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20261597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：土の流失破壊現象を解明するため、土槽内部に設置したチューブの破損部から土を流失させる実験装置を開発した。土には拘束圧及び内部水圧を任意にかけることができ、チューブに水頭差を与え、水流を流すことで土粒子を流出させ、土を流失破壊させることができる。この装置により、土質材料(粘着力や内部摩擦角に起因するところのせん断強さ)の流失破壊に対する抵抗性を評価できるようになった。

同装置を用いて、土砂流出に対する拘束圧の影響を検討した。その結果、初期拘束圧が大きいほど、土砂の流失速度は小さくなること、土砂の流失が生じなくなる拘束圧を実験的に見出すことができるようになった。

研究成果の概要(英文)：To study a phenomena of erosion failure of soils as a soil element, an experimental apparatus was developed. The apparatus make it possible to apply arbitrary confining pressure and internal water pressure, and to reproduce erosion failure of soils by spilling out soil particle from the opening of pipe. By using the apparatus, it is possible to evaluate the resistance of soil material against to erosion failure.

As a result of the experiment, it was found that the larger the initial confining pressure, the smaller the erosion velocity of soil particles, and it was also found that the confining pressure effect on erosion failure experimentally.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：浸透破壊 パイピング 土砂流失 拘束圧

1. 研究開始当初の背景

水流による土砂の流失破壊機構は、ダムや堤防の浸透破壊とも関連して古くから土質力学上の研究課題である。しかし、現状の土砂流失の基準は、土粒子の粒径と限界流速の関係が与えられているのみで、土の強さとなんら関係のない基準となっており、なお未解明の課題と言える。

近年、盛土中の土砂が地中の埋設管の破損部から吸い出され、地表に陥没になって現れるなどの人災とも言える地盤の陥没事故が生じている。これらは盛土の構成材料、管路の破損による開口部の大きさ、土被り、地表面の状態などの地盤としての要因と管路中を流れる水理条件に大きく影響されると考えられるが、現行の流失破壊基準では、このような問題に解決の糸口すら与えていない。問題の解決のためには、その根本原因である土砂の流失破壊を検討できる方法の開発が必要である。

2. 研究の目的

土砂の流失は、土材料、土の応力状態（土被り厚さ）、間隙水圧、開口部の大きさ、水量・流速などに関する。これまでの基準では、粒径と実流速の関係のみが与えられているだけで、土は水中に漂っている状態の流失現象のみが対象とされている。本研究開発の目的は地中の土砂の新たな流失破壊基準を提案することである。そのためには、まず、土砂流失に対する土質材料の抵抗性を検討できる実験的な方法の開発が必要である。

3. 研究の方法

地盤の土砂流失破壊現象を解明するため、平成 23 年度に要素実験を、平成 24-25 年度に小型土槽を用いた流失実験を行なった。要素実験は、三軸試験装置を改良し、供試体の内部から土粒子を流失させることで、流失破壊を生じさせた。主に、土の拘束圧、間隙水圧、管内流速を変化させて、土砂流出量の非定常な進行の様子をとらえた。平成 24 年度には、開口部と粒径の関係に着目し、開口径の影響を調べた。また、細粒分を含む土を用いて、細粒分の選択的な流失現象を検討した。平成 25 年度には、埋設管開口部からの土砂流失破壊試験を行ない、流失に伴う空洞の発達と、地表の陥没・変状との関係を検討した。

4. 研究成果

(1) 三軸試験機を改良した流失実験

土の応力状態やせん断強度によって、土粒子の流失抵抗は異なると考えられるため、三軸試験装置を用いて、流出破壊実験を行った。図 1 に示すように、三軸供試体下部に、外部から開口部のある管路を立ち上げ、そこに水流を流すことによって、土粒子を流失させる

実験を行った。実験では、流出した土砂質量と供試体の軸変位を計測し、供試体のマクロな要素としての破壊と土砂流失の関係を調べた。図 2 は、時間経過に伴う、土砂の流出と軸変位の変化を示した実験結果の典型例を示したものである。

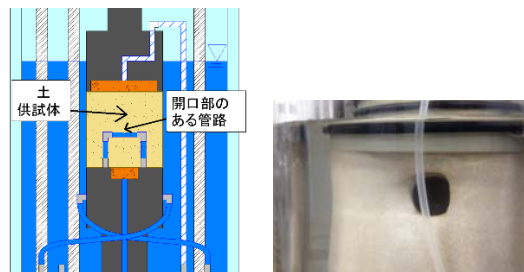


図 1 三軸試験の供試体部分拡大図 (左)

写真 1 パイピング破壊した供試体の典型例 (右)

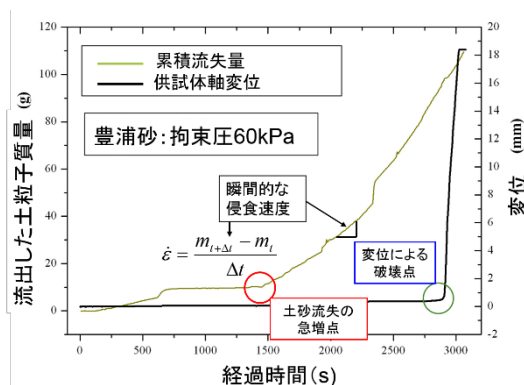


図 2 供試体の流失破壊点の定義 (実験例)

図からわかるように、土砂の流出が始まることとマクロな要素としての破壊は同じではないことがわかる。供試体に作用させている内部水圧（間隙水圧）と管路開口部の水頭差、および流速によって土砂流失が生じる基準を検討できるツールが開発できた。

また、土砂流失の進展による空洞は、試験体の斜め上方にパイピング状に発達することも写真 1 のように観察された。実験から、土粒子の流失は、土のせん断抵抗が弱いところに選択的に進行する破壊であることが示唆された。このようなパイピング状の破壊を供試体レベルで再現したのは、世界で初めてであり、このような実験手法が、パイピング破壊に対しても有効であることも示唆された。実験結果から、拘束圧力が大きいほど、パイピング破壊が卓越することもわかった。

(2) 開口径に影響と細粒分の流失に関する実験

流出現象における地盤の粒径 (D) と管渠破損による開口部幅 (W) の比 (以下 D/W)、細粒分含有率 (FC)、細粒分の粘着力の影響について検討した。

実験装置の概略図を図 3 に示す。透明アクリル円筒内に模型飽和地盤を作成し、地盤上

部から一定の水頭で浸透流を与えることにより、円筒底部に設けた流出口から土粒子を流出させる実験を行った。

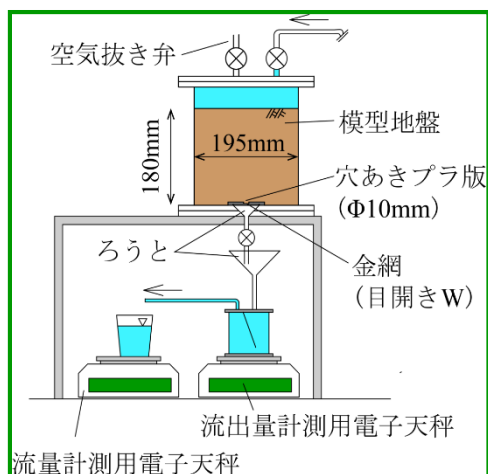


図3 小型アクリル円筒による土粒子流出実験

① D/W についての実験

土材料の粒径 D および、流出口に設けた平織り金網の目開き W により変化を与えた。この実験は土粒子の流出に対する開口径 W の影響および、 D が小さくなることによる透水性の低下の関係を明らかにする目的で行った。細粒分については、粒径および粘着力の異なる材料の FC を変化させ配合し、流出特性の違いを考察した。この実験から、細粒分の粘着力による流出抑制効果についても検討した。

流出した土粒子は円筒形の土粒子トラップに堆積させ、その質量の時間変化を電子天秤で計測した。流出現象に関する粒径の影響を考慮するため、粗粒の地盤材料として、規格ごとに粒径がほぼ単一なガラスビーズ（以下 G.B と称す）を用いた。また、G.B は形状がほとんど球形に近いため、凹凸によるかみ合わせの影響を無視することができる。G.B の密度は 2.5g/cm^3 である。細粒分には、粘性のないものとして細粒の G.B、粘性を有するものとして青葉山ロームの $75\mu\text{m}$ ふり通過分を用いた。細粒の G.B は粗粒分が最密構造に配位した際に形成する理論上の間隙を通過可能なものと通過不可能なものを採用した。

ロームの液性限界、塑性限界、塑性指数はそれぞれ $w_l = 54\%$, $w_p = 34\%$, $I_p = 20\%$ 、土粒子密度は 2.617g/cm^3 である。

図4に単位流量あたりの土粒子流出量と D/W の関係を示す。いずれの材料についても、 D/W の増加に伴い流量あたりの流出量が減少している。同一の水頭差においては D が小さいほど流量が低下していたが、図4では、流量によらず、 D/W により流出する土粒子の量がある程度定まっていることがわかる。したがって、土粒子の流出に対し、透水性の支配よりも W/D の支配が強いことがわかった。

② 細粒分の影響に関する実験

図5に FC と単位流量あたりの土粒子流出

量の関係を示す。細粒分に J-220 を用いた場合では、 $FC = 10\%$ 付近から流量あたり土粒子流出量が減少傾向を示している。理論上、J-220 は粗粒分の J-30 が最密に配置した際につくる間隙を通過することができるが、10%程度以上混入されることで、粗粒分をつくる間隙を充填し地盤としての構造が補完されたために、このような結果が得られたと考えられた。また、J-220 を用いた場合では細粒分のみ微量流出が長時間継続した。この際、地表面の陥没は生じていなかった。

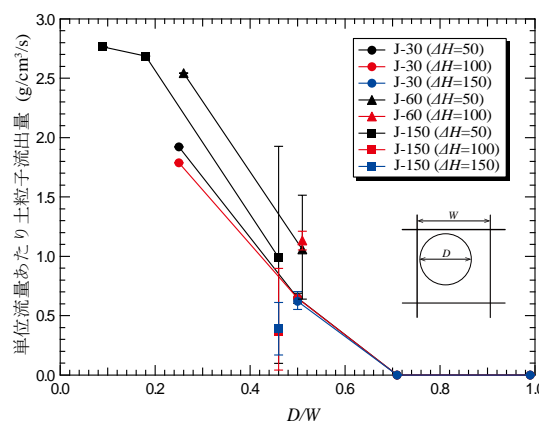


図4 D/W と単位流量当りの土粒子流出量の関係

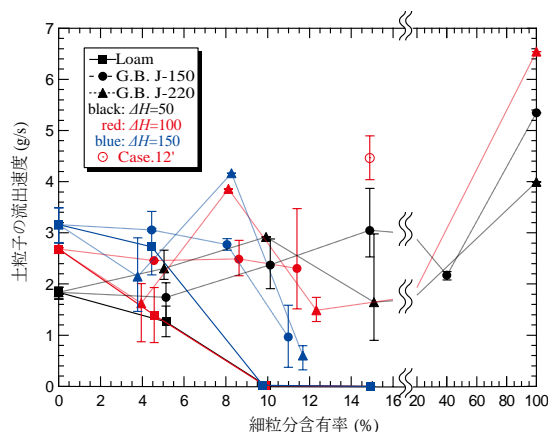


図5 細粒分含有率と単位流量当りの土粒子流出量の関係

一方、細粒分に J-150 を用いた場合、 FC の増加とともに、流量あたり土粒子流出量が増加している。理論上、J-150 は粗粒分がつくる間隙内に入ることができない。そのため、 FC の増加による主骨格の補完が行われず、前節に示した D/W による支配を受けることから、土粒子が流出しやすいものと考えられた。

細粒分にロームを用いた場合は、 FC の増加とともに、流量あたりの土粒子流出量が低下した。 $FC10\%$ では流出分のほとんどが細粒分であり、微量な細粒分の流出が長時間継続するという結果になった。さらに、 $FC15\%$ では連続的な水流が途絶えるほど著しい地盤の透水性の低下がみられた。その結果、土粒子の流出が抑制されたと考えられる。また、高い水頭差でも流出しないのは粘着力による効

果の一つといえる。

以上から、以下の結論を得た。

- ・D/W が小さくなるほど、流出が生じやすく、D/W による影響は大きい。
- ・細粒分が粗粒分のつくる間隙を充填できるか否かで、細粒分含有率と流出特性の関係に違いが生じる。
- ・粘着力を有する細粒分を用いることで地盤の透水性が低下し、土粒子の流出が抑制される。特にロームを 10~15% 含有する地盤では、透水性が急激に低下し、実験の条件では流出が生じなかった。

(3) 小型土槽を用いた流失陥没実験

実験装置のブロック図を図 6 に、断面模式図を図 7 示す。本実験装置は地中に埋設されている管路を想定しており、土槽内(縦 200 mm×横 200mm×奥行 200 mm)に管路の破損部を模擬した穴(直径 5 mm)を開けたシンプレックスチューブ(直径 1/2 インチ)を通してある。このチューブに水頭差を与えて通水し、破損管路部からの吸い込み作用により土粒子を流出させた。チューブ内に通す水流にはレギュレーターを用いて任意の水頭差を与えることができる(チューブの下流側は大気開放状態)。破損管路部の前後にはそれぞれ水圧計が取り付けられており、この二つの水圧計の測定値から破損部の圧力状態を把握することができる。また、土槽内の模型地盤には拘束圧及び内部水圧を与えることができる。また、流出した土粒子は土粒子トラップに堆積させ、その質量の時間変化を電子天秤にて計測した。また、流出水の流量も同様に電子天秤を用いて計測した。

模型地盤は相対密度 80% を目標として作製し、作製後は飽和状態にした。また、土槽底面から 10, 13, 16, 19cm の高さには色砂を敷いている。この模型地盤に拘束圧及び内部水圧を与えた後、チューブに水頭差を与えて通水を開始する。通水中に破損管路部前後の水圧、流量、土粒子流出量を測定する。模型地盤が陥没した段階で通水を終了する。なお、模型地盤の陥没は拘束圧用の貯水タンクの急激な水位減少をもって発生したと見なした。実験終了後、土槽の蓋を外して 5mm ごとに模型地盤を削り取り、陥没穴の形状を計測した。模型地盤に与える拘束圧と内部水圧、また水流に与える水頭差をパラメータに実験を行った。

実験の一例として、あるケースの破損管路部の圧力、土粒子流出量、流量の時間変化を図 8, 9 に示した。左右のコックを開いて通水を開始(0s)し、59s 後に拘束圧用の貯水タンクの水位が減少している。変位が落ち着いた 108s 後に左右のコックを閉じて実験を終了した。土粒子の流出現象は実験開始直後から始まっている。59s 後には拘束圧が急激に低下しているが、これは先に述べた拘束圧用の貯水タンクの水位が急激に減少するタイミングと対応している。すなわちこのタイミングで模型地盤の陥没が発生したと考えられる。さら

に図 9 を見ると実験開始から 59s 後を境にグラフの傾きが増加していることがわかる。

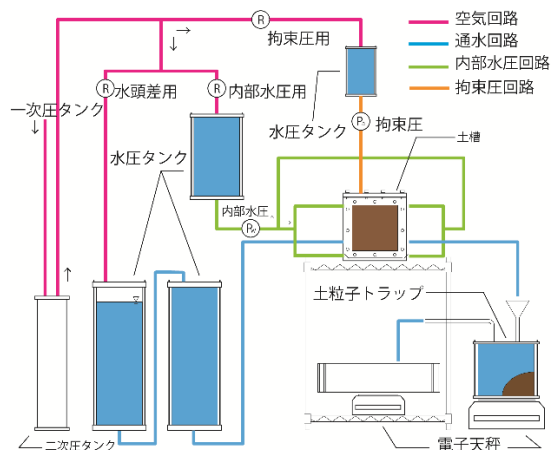


図 6 流出実験装置ブロック図

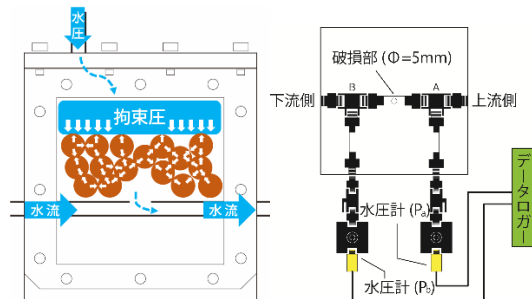


図 7 土槽内正面図及び平面図

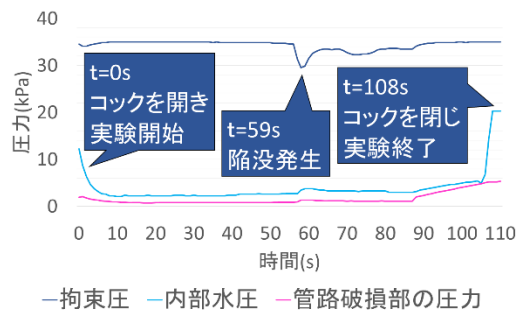


図 8 圧力変化

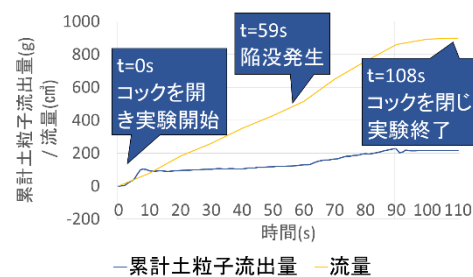


図 9 累計土粒子流出量及び流量の時間変化

初期有効応力に対する土粒子の流出量及び流出速度の関係を図 10, 11 に示した。初期有効応力が大きいほど土粒子の流出量は小さく、土粒子流出速度は遅くなった。

3つのケースの陥没穴の様子を図12に示す。図に示す通り、陥没穴は二つのメカニズムで形成される。土粒子の流出により形成された空洞(V_2)と、陥没穴が破損管路部から成長するに従い模型地盤の厚さが薄くなることで上載圧に耐えることが出来なくなった結果、陥没した穴(V_1)である。図12より、初期有効応力が大きいほど V_2 の体積、最大直径は小さくなる。また初期有効応力が大きいほど、陥没が発生するまでに要する時間は長くなる。さらに、初期有効応力が大きいほど陥没穴の傾斜は大きくなり形は筒状に近づいていくことがわかった。

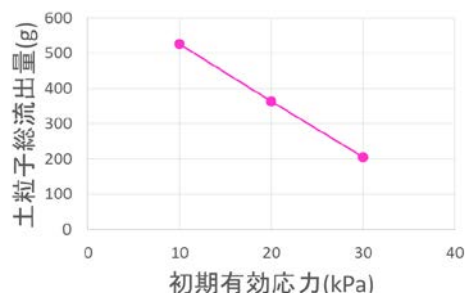


図10 初期有効応力と土粒子流出量の関係

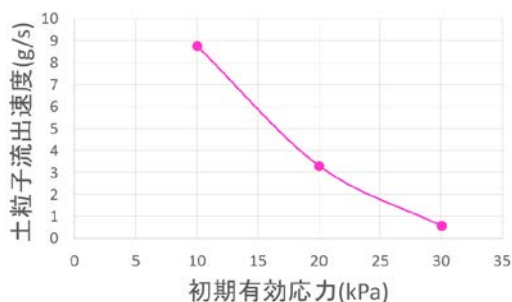


図11 初期有効応力と土粒子流出速度の関係

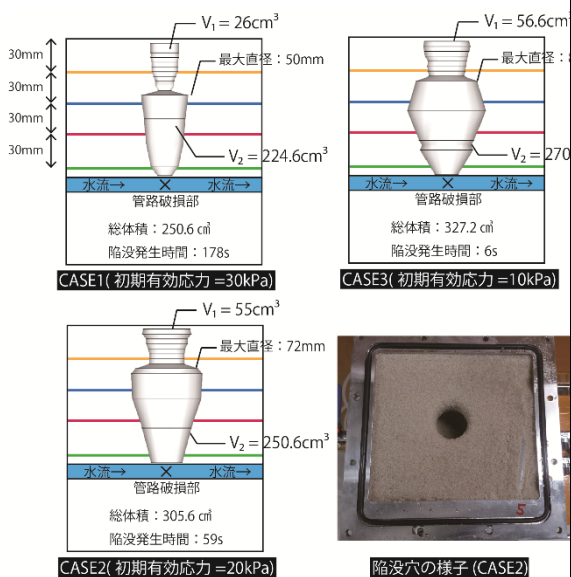


図12 模型地盤の空洞形成状況

以上の3つの実験から、土質材料、開口部の大きさと土の代表粒径の比、拘束圧に応じて、流失破壊を起こす限界の流速や流量を実験的に検討できるようになった。今後、土の流失破壊に対する土砂の粘性の影響など現象に関する支配的要因を絞込むことができ、普遍的な流失破壊基準を提示するための基礎実験データを蓄積できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① R.Moncada, Y. Nakajima, T. Mori, T. Kawai and M. Kazama, Effects of Stress State and Hydraulic Conditions on Soil Erodibility for Cohesionless Soils in Contact with Damage Pipes, *Advances in Geotechnical Infrastructure*, Edited by C.F.Leung, S.H.Goh & R.F.Shen, paper No.37, pp.355-360, May. 2013. 査読有。

[学会発表] (計3件)

- ① 稲垣和哉, 山崎智哉, 風間基樹, 森友宏, 河井正: 破損管路部からの土粒子の流出特性に及ぼす拘束圧の影響について, 第49回地盤工学研究発表会, 発表決定, 2014.7.15-17.
- ② 稲垣和哉, 森友宏, 河井正, 風間基樹: 破損管路部からの土粒子流出による地盤の陥没破壊に対する水理及び拘束圧境界条件の影響に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, III-5, CD-ROM, 2014.3.8.
- ③ 中島悠介, 風間基樹, 森友宏, 河井正: 管渠破損部からの土粒子の流出特性に及ぼす粒径と細粒分の影響, 第48回地盤工学研究発表会, No.726, pp.1451-1452, 2013.7.23-25.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

風間基樹 (KAZAMA, Motoki)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 20261597