# 科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 2 6 年 6 月 5 日現在

機関番号: 33910	
研究種目:基盤研究(C)	
研究期間: 2011~2013	
課題番号: 2 3 5 6 0 6 0 0	
研究課題名(和文)目詰まりに起因する地盤機能障害の評価と対策に関する研究	
研究課題名(英文)Degradation of permeability of ground due to clogging	
研究代表者	
山田 公夫 (YAMADA. Kimio)	
中部大学・	・教授
研究者番号:2 0 0 9 0 1 7 8	
交付決定額(研究期間全体):(直接経費	) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文):本研究は内部浸食のメカニズムについて検討するため、豊浦砂とサバ土(まさ土)を用いて 土粒子流出実験を行い、内部浸食により土粒子が流出、目詰まりの発生などによる透水性の変化について地盤の不安定 化を検討を行ったものである。目詰まりを想定した斜面崩壊に着目、土粒子流出による間隙が疎になること、また間隙 に粒子が補足(目詰まり)されることによる局所動水勾配の上昇または透水性の変化について誘電率式土壌水分計(AD R)を用いて確認を行った。さらに堤体基礎に水平流れが卓越する場での土中の内部浸食による浸透破壊時の間隙率の 変化と局所動水勾配の関係を計測し、内部浸食のメカニズムについて検討している.

研究成果の概要(英文): In this study, it is intended to clarify it about relationship between the destabi lization of the ground by the soil particle outflow and the mechanism of the internal erosion. Here, two e xperiments are conducted. At first, the permeable changes of Toyoura sand and Granite soil are investigate d by the test of efflux of soil particles in the one-dimensional vertical flow ground. The occurrence of t he efflux of soil particle makes the ground loose, and soil particle effluxed makes other part of the groun dense. Finally, the local hydraulic gradient at the part of the ground increases. Second, authors measu re the permeability and the porosity of soil by Dielectric constant-type soil water meter. The volumetric water content is equal to the porosity of soil in saturated soils, therefore, the porosity change can be m easured during efflux. With the soil tank that a horizontal flow excels under the levee, the porosity change and the local hydraulic gradient are measured.

研究分野:工学

科研費の分科・細目: 土木工学・地盤工学

キーワード:目詰まり 土粒子流出 浸透破壊 局所動水勾配 限界流速 団粒化

#### 1. 研究開始当初の背景

地盤は一般に、その粒状体によって構成さ れていることから、土粒子移動によって起こ る目詰まり・透水性の低下や閉塞が常に問題 となる。近年の豪雨による斜面崩壊において もパイプ流の跡が多く確認され、パイプ流の 目詰まり・閉塞による水圧上昇がトリガーと なることは以前から知られている。そのため に現場斜面では応急対策として、まず水抜き による水圧上昇を抑えることが施される。ま た盛士等の擁壁の排水工や液状化対策とし てのドレーン材も目詰まりによる堤体盛土 や地盤内の水位低下を妨げる原因にもなっ ている。さらには、近年の透水性舗装におい ても土砂や粉塵などの目詰まりにより、透水 性の低下がその機能に障害を引き起こすこ とにも繋がっている。

## 2. 研究の目的

本研究は内部浸食のメカニズムについて 検討するため、土粒子流出実験を行い、内部 浸食により土粒子が流出、目詰まりの発生な どによる透水性の変化による地盤の不安定 化の検討を行ったものである。目詰まりを想 定した斜面崩壊に着目、土粒子流出による間 隙が疎になること、また間隙に粒子が補足さ れることによる局所動水勾配の上昇または 透水性の変化について誘電率式土壌水分計 を用いて確認を行った。さらに堤体基礎に水 平流れが卓越する場での土中の内部浸食に よる浸透破壊時の間隙率の変化と局所動水 勾配の関係を計測し、内部浸食のメカニズム について検討している.

## (1)目詰まりを想定した斜面崩壊

一般に、降雨による斜面崩壊は浸透水の影響が見かけ上の粘着成分の消散や法尻での 地下水上昇に起因するものとして実験等が 試みられてきた。しかし、集中豪雨が引き起 こした災害現場では、パイプ流跡が確認され ることが多く、単に、粘着成分の消散や自重 によるものだけではないことが考えられる。 これまでも地盤が粒状体により構成されて いることから、土粒子移動によって起こる目 詰まり・透水性の低下や閉塞は経験的に考え られてきた。本報告は、斜面内流を発生させ る模型実験を用いて、土粒子の目詰まりを発 生しやすくした層をつくることで、斜面内に 飽和域を生じることによる斜面の破壊形態 について検証を行った。

# (2) 土粒子の流出による地盤の不安定化

土粒子が流出する内部浸食は、Kenney ら のフィルターの内部安定指標を用いること で粒度分布から評価できる。堤防の浸透破壊 において、内部浸食はパイピングの拡大にも 影響することが懸念されるが、そのメカニズ ムについて明らかにされていない。本研究で は、内部浸食のメカニズムについて検討する ため、豊浦砂とサバ土(まさ土)を用いて土 粒子流出実験を行い、内部浸食により土粒子 が流出、目詰まりの発生などによる透水性の 変化について調べている。また、土粒子流出 による間隙が疎になること、また間隙に粒子 が補足(目詰まり)されることによる局所動 水勾配の上昇または透水性の変化について 誘電率式土壌水分計を用いて確認を行って いる。堤体基礎に水平流れが卓越する場での 土中の内部浸食による浸透破壊時の間隙率 の変化と局所動水勾配の関係を計測し、内部 浸食のメカニズムについて検討している.

#### (3) 土粒子移動に関わる限界流速

混合砂礫の限界掃流力で問題になる点を, 岩垣は2点挙げている。(i)いかなる粒径のも のが動き始める時を持って限界とするのか。 (ii)実験して得られた限界掃流力は平均粒径 に対応する均等粒径の場合の限界掃流力よ り大きいのか、小さいのか、である。限界流 速においても確かに、同じ課題がある。 鉛直 一次元浸透破壊実験のデータを破壊時の動 水勾配を理論値の比を多くの研究者のデー タを調べると、均等係数が5付近を中心に小 さな値で破壊が発生している可能性が得ら れている。このことは、移動可能な粒子が供 試体内ですでに移動し始め、目詰まりにより 局所的に動水勾配が高くなって破壊に至っ たのではないかと考察された。また、均等係 数が大きくなると粒子移動が少ないまたは, 目詰まりしにくく平均動水勾配に近くなる ことも考えられる。岩垣が述べたように、流 速の場合にはどの粒子に視点を与えるかが できる,一方,土の大きさの粒径を考えれば, 適切なのかが永久のテーマになる。そこで, Kenney のフィルターの安定理論を用いるこ とで, 限界流速に達した粒子が, 移動できる 間隙空間を有するかについて検討する。

#### 3. 研究の方法

### (1)目詰まりを想定した斜面崩壊

目詰まりにより崩壊が起こりうる場所で は、圧力水頭の値がピークに達する可能性が ある。そのため、今回テンシオメータを斜面 に3ヵ所(上部,中間部,下部)埋め込んで検証 した。実際に実験で使用する豊浦砂の透水係 数以上にならないよう流量を予め計測する とともに、吸水でのパイピングが発生しない



図1実験装置

ように何度も繰り返し試行し、水頭差 3cm, 4 cm, 5 cm 03 パターンとした。実験装置を図1に示す。17°傾斜した斜面とのり尻部に。 7mm の穴の開いた有孔板があり、底面に排 水口が設けられている。17°の傾斜板の上に は両面テープですべり止めをし、含水比 8% の豊浦砂(pd=1.20g/cm<sup>3</sup>)を斜面下部 1/3、斜 面上部 2/3 には豊浦砂と DL クレー(今回使 用する目詰まり材)を 300g 混合(豊浦砂:DL クレー=9:1)させた斜面を形成した。斜面の両 端には水が排水されやすく、斜面を固定する ため、高さ 60 mm の金網を設置した。また、 斜面上にテンシオメータを(上部,中間部,下部 に)置く。また、斜面上部の側面よりタンクか ら水が排水されるように設けてある。また、 低水位タンクを上昇させて水頭を CASE-1:3 cm,CASE-2:4 cm,CASE-3:5 cm  $\geq$  3  $\supset O$ CASE での水頭で崩壊の仕方を確認する。

(2) 土粒子の流出による地盤の不安定化

土粒子の移動・土粒子の不安定粒度は Kenney らのフィルター安定条件 1) によっ て判断することが可能である。浸透長さ(層 厚)が D5 の 200 倍以上あると、連続する間 隙径は最小粒径の約 1/4 倍に等しくなること を示し、図1に示すような粒度のフィルター 材が内部浸食を起こさないための粒度条件 を示した。対象となる粒径 D の 4 倍粒径 4D の粒子質量含有率(H)が、粒径 D の通貨質 量百分率(F)以上存在する必要があること を示している。対象となる粒径 D の 4 倍粒径 4D の粒子の含有率(H)が、粒径 D の含有 率(F)以上存在する必要があることを示し ている。具体的には「H/F≧1.3」のときは安 定、「H/F<1.3」のときは不安定と判断する 指標を提案されている。

① 土粒子流出試験

試験で用いる試料は、図2に示す Kenney らのフィルター安定条件を用いる。均等粒径 であり安定粒度と判断される豊浦砂と、図3 に示す不安定粒度とされるサバ土+硅砂8号 の2種類を用い、不安定粒度とされる土粒子 で内部浸食の確認をするために土粒子流出 実験を行った。試験方法は図4に示すアクリ



図2 Kenney らの H/F 指標の定義



図3 流失試験試料の粒度分布



図4 流出実験の概要図

ル製2重透水管を用い、昇降式給水タンクと 繋ぎ、下端から水圧を付加して鉛直上昇流下 で実験した。流出が生じた土粒子は、内側の 排水管を通って下端で回収することとして いる。また、流出量を確認するため有効応力 を増加するために試料表面に砕石を敷いた。 水位差 Δ H=0cm から 5cm 間隔で上げていく。 ② 堤体基礎の土中間隙の変化と動水勾配 堤体基礎に水平流れが卓越する場での土中 の内部浸食による浸透破壊時の間隙率の変 化と局所動水勾配の関係を計測した. 図5に示すような水槽に、サバ土(まさ土) を厚さ 60 mmで水中に分級しないように詰め た後、底面に珪砂を張り付けた発泡スチロー ル製の堤防模型に錘を付けてパテで隙間を 埋めて固定設置した。また、水槽の横には、 誘電率土壌水分計を3本設置して飽和土中の 体積含水率(飽和時には間隙率に相当)の変 化と圧力変換器により水圧を測定した。用い た試料土は図3の粒度分布を有するまさ土で あり、Kenney のフィルター安定指標によれ ば内部安定性に欠け(指標 H/F<1.3)、土粒 子が移動する可能性があることが判断でき る材料である。水位を一定に保ちながら5cm



図5実験水槽とセンサー設置箇所の概要

ずつ 10 分間毎に上昇させ、その時の単位時 間当たりの流量を計測する。今回、飽和した 土中での誘電率土壌水分計で体積含水率を 測ることを試みた。体積含水率は、式(1)のよ うに飽和度が 100%である場合には、体積含 水率は間隙率に等しくなる。

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{V_w}{V_v} \times \frac{V_v}{V} = Sr \times n \quad (1)$$

ここに、θ: 体積含水率、Vw: 水の体積、Vv: 間隙体積、V: 土の体積、Sr: 飽和度、n: 間 隙率 である。

- 4. 研究成果
- (1) 目詰まりを想定した斜面崩壊

実験結果から崩壊時間に至るまでの時間 は供給水頭が大きい(供給流量が多い)ほど、 速くなることがわかる。また、いずれかの圧 力水頭が0cm付近(飽和域)に達した場合で崩 壊発生していることもわかり、飽和域が発生 することで崩壊が惹起されるといえる。3cm の実験(図 6 および 7)においては、2 回に分 けて崩壊が起こった際に、一部に斜面下部で 崩壊が起こった。この場合、流量が少ないた め目詰まりが遅れ、斜面下部で飽和域が発生 している関係で P1, P2 が P3 に比べて異常に 高い数値を出していると推測される。

一方、供給水頭4,5cm(図7および8)のケースでは、P2,P3の圧力水頭が正圧側+2cm程になって壊れており、層の境界部で目詰まりにより飽和域が形成され水圧が上がり、崩壊につながったことが推察される。このことは、崩壊の発生位置からも裏付けることがきる。

目詰まりによる飽和域の形成に着目し、斜面に平行な流れを発生させた模型実験の図 7-9の結果、以下のことを得た。1)圧力水頭 が負圧から正圧かわる時点で破壊が発生し、 飽和域が斜面内に発生することで破壊が生



図6供給水頭3cm崩壊開始時の崩壊図



図7供給水頭3cmでの圧力水頭





図9 供給水頭5cmでの圧力水頭

じることを確認した。2)斜面内流が小さい場 合は、目詰まりが生じにくく飽和域ができて も高い圧力水頭が発生しにくいが、流量が大 きくなると、目詰まりを引き起こし飽和域の 発生と正圧力の増加で崩壊することがわか った。3)層変化するような境界で目詰まりを 発生しやすいことも得られた。

# (2) 土粒子の流出による地盤の不安定化① 土粒子流出試験

図 10 に豊浦砂の流失実験時の動水勾配と 流速の関係を示す。豊浦砂の場合には、動水 勾配を大きくしていっても排水から確認し たところ土粒子の流出はなく、濁水は確認で きなかった。豊浦砂は均等粒径であり、すべ ての粒径範囲において Kenney の安定指標 H/F>1.3 であり、粒度分布から内部浸食が生 じない評価と一致した。図 10 のグラフの勾 配である透水係数は、破壊まで一定であるこ とが分かり、内部浸食の発生がないことが検 証できた。また、Terzaghi の限界動水勾配に 達した後、流速が急激に増加し破壊している ことから、限界動水勾配の理論値で破壊する ことがいえる。一方、図 11 に示すサバ土+硅 砂8号を試料とした試験では、動水勾配を大 きくすると、初期の乾燥密度が異なるが、勾 配である透水係数が流速 1.0×10<sup>-2</sup>cm/s で増 加し、流速 3.0×10<sup>-2</sup>cm/s 程度で透水係数が 低下するといった挙動が確認され、試料内部 の構造が変化していることが推察される。ま た、透水係数が変化前に濁水、細かい土粒子 が流失し、その後、濁水が清水に変わること が計測された。特に、pd=1.61g/cm<sup>3</sup>の試験で は、流速 2.3×10<sup>-2</sup>cm/s (動水勾配では 0.8) が最も流出が大きく、0.0037mm~0.0211m mのシルトから細砂にかけての細かい土粒 子が流出を確認している。図12に、サバ土+ 硅砂 8 号の粒度分布を Kenney の指標を使っ て H/F を全粒径範囲について示した。



これから、流出した 0.0037mm~0.0211mm の粒径で H/F<1.3となっており、移動する可 能性のある粒径範囲に対応していることが わかった。

今回の土粒子流出試験を行った結果、 Kenneyのフィルター安定指標は、浸透破壊時 の内部浸食に適用できることがわかり、次に 実際の堤防箇所にどのように分布している かを検討した。

② 堤体基礎の土中間隙の変化と動水勾配

経過時間と圧力水頭(水位)の関係を図13 に示す。堤内側水位(供給水位)が上昇して いくことにより堤体基礎の上流側の圧力水 頭は上昇する傾向にあるが、下流側の圧力水 頭(堤外側)の圧力はほぼ挙がっていないこ とがわかる。また、3000秒後の全体破壊に至 った段階で大きく上昇しており、堤外側水位



図 15 間隙率の変化率

が上昇していくことで堤内側との水位差(動 水勾配)が広がっていくことが推察される。

局所動水勾配と経過時間の関係を図 14 に 示す。0-1 区間の動水勾配は 700 秒あたりで 急激に上昇しているが、すぐに減少するとと もに 1-2 区間の動水勾配が最も大きくなって いる。このことは、堤外側(0-1 区間)の土 粒子が堤体直下に向かって移動して密度が 小さくなって透水係数が大きくなっている ことが予想される。そのため、その下流 1-2 区間で密度が大きく、透水性が減少している ことが考えられる。また全体破壊に至った局 所動水勾配が 0.5 を大きく下回っていること もわかる。

図 15 は計測された間隙率の変化で、A 点で の間隙率の変化が全体破壊までの中で最も 大きく約 2%の変化がみられる。500 秒まで関 係なく同じような間隙率の変化が生じてい る点も興味深い。また図より、局所動水勾配 と増加すると間隙率は大きくなる傾向があ るが、間隙率が増加すると局所動水勾配は一時的に減少する(700秒、2300秒)傾向があることがわかり、土粒子移動が原因であることが考えられる。

(3) 土粒子移動に関わる限界流速の算定

内部浸食(パイピング含む)は、ある境界 での破壊が切掛けとなって徐々に進行する 進行性破壊である。限界流速を用いた研究や 土中の侵食速度をモデル化した解析法の研 究7)があるが、今後、進行性破壊の実験・解 析といった研究が進むと考えられる。

動水勾配という考え方に対して限界流速 (ダルシー流速を間隙率や土粒子を球形と 仮定した断面割合βで除した間隙を流れる 実流速)がダムの分野から用いられてきた。 Justin は様々な粒径の粒子が動く場合の限 界流速を理論式として提案したが、実験値と して大きく乖離する (図 16)。一方, Terzaghi の限界動水勾配から, Kozeny の透水係数の推 定式を用いた限界流速ではダルシーの法則 が成り立つ範囲においては破壊時の限界流 速をうまく説明することができる。周辺土粒 子を考慮した Richardson の干渉沈降速度式 から導びかれた多粒子限界流速式は、層流域 から乱流域まで多くの研究者らの実験結果 を説明できており、乱流域で岩垣の限界摩擦 速度と一致し、流向の影響が小さくなってい る。粒径が異なる混合粒径の場合には、比表 面積と関連が強く, 粒度分布から容易に算出 できる質量基準の調和平均径 Dw を用いるこ とで計算される。限界流速は、粒子が移動し 始める速度であるが,移動可能な空間がなけ れば流出しない。移動できる間隙を有するか 否は, Kenney による内部浸食が起こらないよ うな安定なフィルター材の間隙を考慮した 基準指標を地盤材料に適用している。



図16 限界流速式と実験値の比較

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

① <u>Sugii, T. Yamada, K.</u>, Asano, N. & Yamada, Y. : Measurement of Unsaturated Ground Hydraulic Properties using a Dynamic State Soil Moisture Distribution Model Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査 読有, 2013 1195-1198.

- ②<u>杉井俊夫</u>・佐古俊介:浸透破壊に対する評価・対策,地盤工学会誌、地盤工学会、 Vol. 61、No. 11/12、査読有、2013、63-70
- ③<u>杉井俊夫</u>:河川堤防の弱部断面の特定と
   浸透対策,河川,日本河川協会、査読有、
   2013、2013、40-44
- ④<u>杉井俊夫</u>・山田公夫・方方・馬貴臣 : 団 粒化した土の物性と舗装技術への適用, 総合工学,第25巻,査読無、2013、39-46.

〔学会発表〕(計 7件)

- ①<u>杉井俊夫・山田公夫</u>・浅野憲雄・余川弘至・ 堀伸彰・稲吉隆太:浸透破壊時の土中間隙 の変化と動水勾配、土木学会第 69 回年次 学術講演会(大阪大学)、印刷中、2014 年 9 月 10 日.
- ②<u>杉井俊夫・山田公夫</u>・浅野憲雄・堀伸彰・ 稲吉隆太:土中の内部浸食による浸透破壊 の発生(北九州国際会議場)、第49回地盤 工学研究発表会(富山国際会議場)、印刷中、 2014年7月17日.
- ③<u>杉井俊夫</u>:河川堤防の浸透破壊と液状化, 第 49 回水工学に関する夏期研究会講義集 (名古屋工業大学)、13-A-6、2013 年 8 月 27 日.
- ④<u>杉井俊夫</u>・梅基哲矢・山田公夫・名倉晋: 浸透破壊を対象とした進行性メカニズムの評価に関する研究,中部地盤工学シンポジウム論文集(名古屋大学),2013年8月9日.
- ⑤<u>杉井俊夫</u>・山田公夫・川瀬貴文:斜面内流 による目詰まりを想定した斜面崩壊に関 する研究,第48回地盤工学研究発表会(富 山国際会議場),2013年7月25日.
- ⑥<u>杉井俊夫</u>・方方・鹿田昌史:透水性舗装における路盤材へ団粒化技術の適用,第48回地盤工学研究発表会(富山国際会議場),2013年7月23日.
- ⑦ <u>杉井俊夫</u>・山田公夫・山田雄太: 浸潤 前線と飽和前線の推定に関する研究,第47 回地盤工学研究発表会講演集、913-914(八 戸工業大学)、2012年7月15日.

〔図書〕(計1件)

①<u>杉井俊夫</u>:地盤工学における空間把握がもたらすもの、アリーナ、特集:デジタルアースの最前線、風媒社、pp.49-60、2013.

研究組織
 研究代表者

 山田 公夫(YAMADA, Kimio)
 中部大学 教授
 研究者番号: 20090178

(2)研究分担者
 杉井 俊夫 (SUGII, Toshio)
 中部大学 工学部 教授
 研究者番号: 90196709