

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 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：23560600

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：20090178

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(ADR)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 destabilization of the ground by the soil particle outflow and the mechanism of the internal erosion. Here, two experiments are conducted. At first, the permeable changes of Toyoura sand and Granite soil are investigated by the test of efflux of soil particles in the one-dimensional vertical flow ground. The occurrence of the efflux of soil particle makes the ground loose, and soil particle effluxed makes other part of the ground dense. Finally, the local hydraulic gradient at the part of the ground increases. Second, authors measure 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 measured 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。また盛土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ことができる、一方、土の大きさの粒径を考えれば、適切な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カ所(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

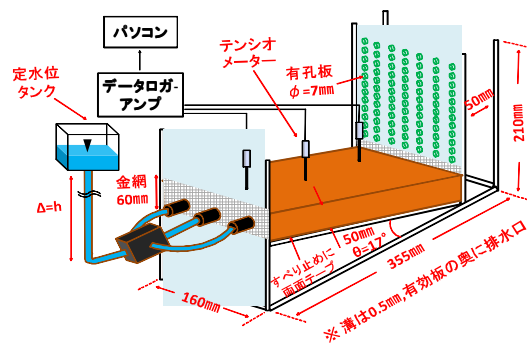


図1 実験装置

ように何度も繰り返し試し、水頭差 3cm, 4 cm, 5 cm の 3 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  $\phi$  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 ( $\rho_d=1.20 \text{ g/cm}^3$ ) 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 300 g 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 と 3 つの 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  $D_{50}$  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  $D$  の通過質量百分率 (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「 $H/F \geq 1.3$ 」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+珪砂 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

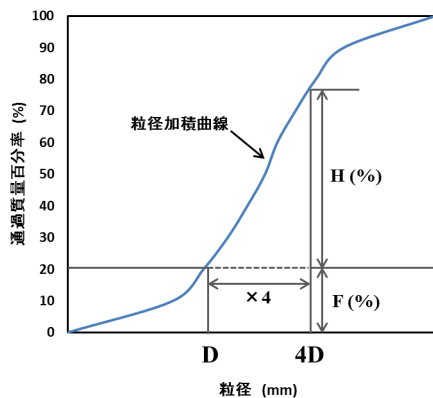


図 2 Kenney らの H/F 指標の定義

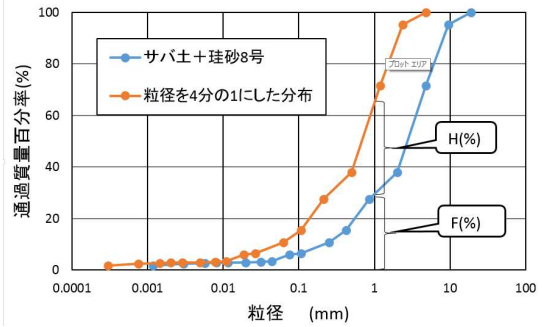


図 3 流失試験試料の粒度分布

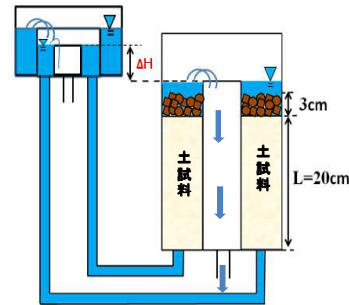


図 4 流出実験の概要図

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、内側の排水管を通し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碎石を敷いた。水位差  $\Delta H=0\text{cm}$  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、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 5 cm

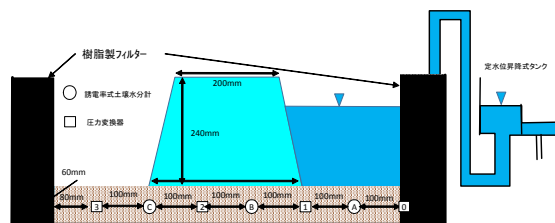


図 5 実験水槽とセンサー設置箇所の概要



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、 $\theta$ : 体積含水率、 $V_w$ : 水の体積、 $V_v$ : 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できる。

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

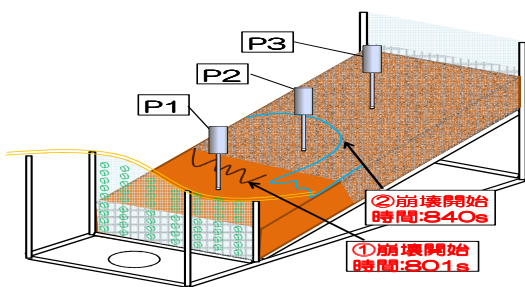


図 6 供給水頭 3 cm 崩壊開始時の崩壊図

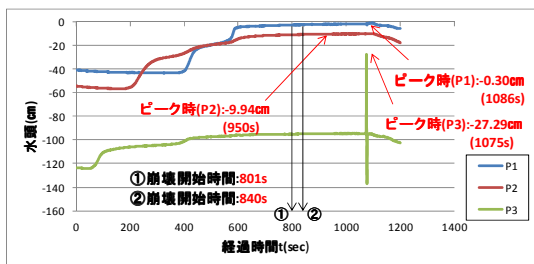


図 7 供給水頭 3 cm での圧力水頭

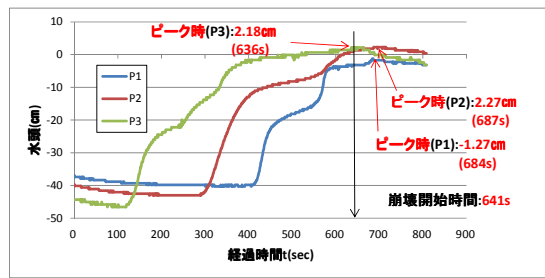


図 8 供給水頭 4 cm での圧力水頭

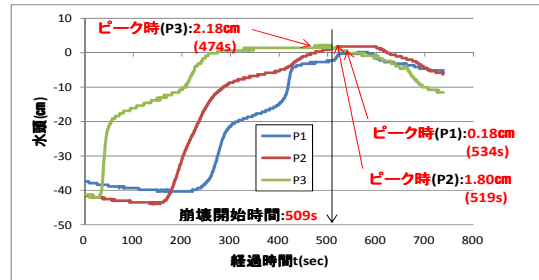


図 9 供給水頭 5 cm での圧力水頭

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高い圧力水頭が発生しにくい、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が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わかり、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  $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  で増加し、流速  $3.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  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、 $\rho_d = 1.61 \text{ g/cm}^3$  の試験では、流速  $2.3 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  (動水勾配では 0.8) が最も流出が大きく、 $0.0037 \text{ mm} \sim 0.0211 \text{ mm}$  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。

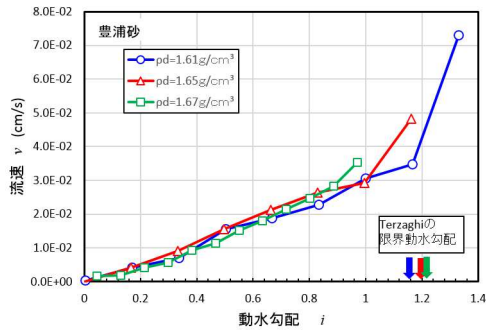


図 10 動水勾配と流速における関係

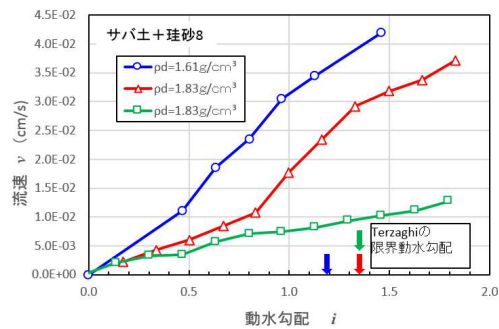


図 11 動水勾配と流速における関係

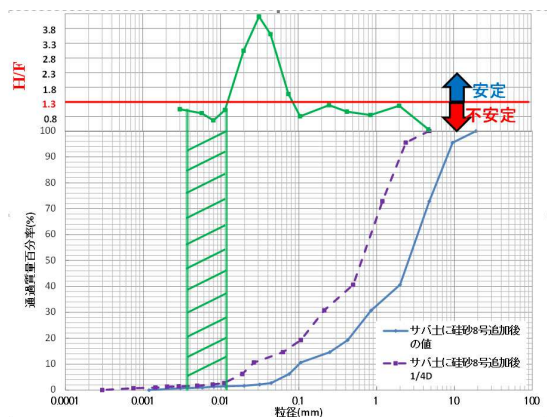


図 12 流失試験試料の粒度分布

これから、流出した  $0.0037\text{mm} \sim 0.0211\text{mm}$  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も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

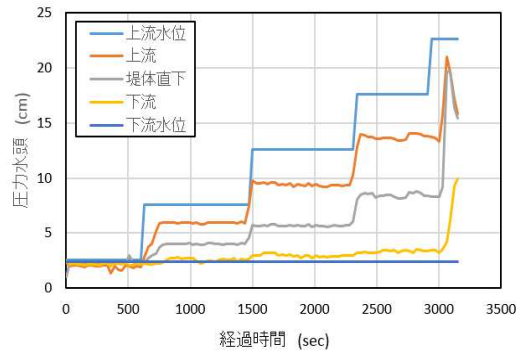


図 13 圧力水頭の変化

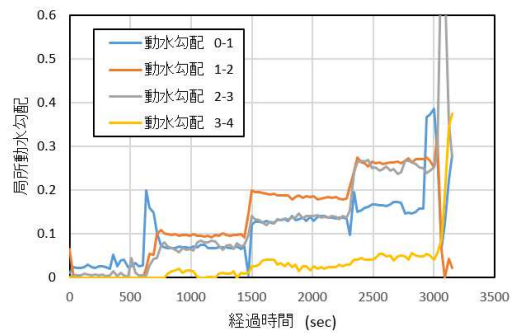


図 14 動水勾配の変化

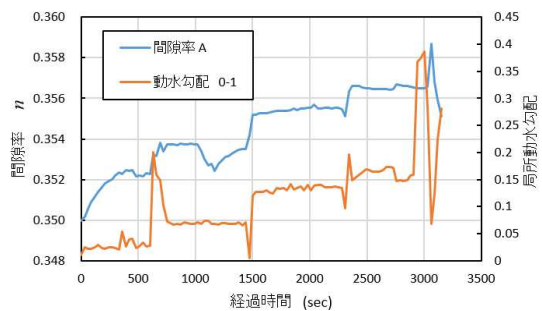


図 15 間隙率の変化率

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<sup>7)</sup>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 $\beta$ 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 $D_w$ 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。

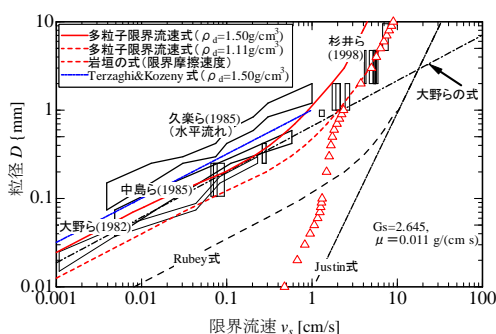


図16 限界流速式と実験値の比較

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Sugii, T. Yamada, K., 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 杉井俊夫・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 杉井俊夫 : 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 杉井俊夫・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 杉井俊夫・山田公夫・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 杉井俊夫・山田公夫・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 杉井俊夫 : 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 杉井俊夫・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 杉井俊夫・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 杉井俊夫・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 杉井俊夫・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 杉井俊夫 : 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.

## 6. 研究組織

### (1) 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