

岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄 杉井俊夫
 岐阜大学大学院 学生員 山田謹吾

1. まえがき

浸透破壊の発生・破壊条件は、従来からTerzaghiによる限界動水勾配や、Justinによる限界流速に立脚して考えられてきた。しかし、室内の鉛直一次元透水場における浸透破壊は限界動水勾配より大きな値で発生したり、掘削現場においては理論値の $1/3 \sim 1/2$ という小さな値で観測されているケースもある^{1), 2)}。この原因として、その形態からの発生の認定が明確でないことや、実験条件、環境条件の相違による破壊条件の適用の誤り、などが影響していると考えられる。そこで筆者らは均一粒径試料を用いた鉛直一次元浸透破壊実験から、その発生プロセスと限界動水勾配の立場で破壊条件について検討を行い、さらにいままで過大評価とされてきた限界流速との関係を整理した。

2. 限界動水勾配の整合性

表-1 試料の比重及び粒径

名 称	比重Gs	主要粒径(μm)
豊浦標準砂 (標準砂)	2.645	105 ~ 250
ガラスビーズ (GB1)	2.498	105 ~ 250
ガラスビーズ (GB2)	2.491	250 ~ 420

(1) 鉛直一次元浸透破壊実験

鉛直一次元浸透破壊実験装置は定水頭を保つための上下流の給排水タンク、試料をいれるアクリル製パイプ(直径5.23cm,長さ50cm)及びピエゾメーターからなっている。試料上下端にはピエゾメーターを設けており、試料にかかる実水頭差を測定する。

実験試料には、表-1に示す豊浦標準砂(以下標準砂)とガラスビーズGB1, GB2の3種類の均一粒径試料をそれぞれ乾燥単位体積重量 γ_s を変え、均質試料として用いた。試料の長さは概ね30cmとし、6層に分けて各層を均質に締め固めた。試料セット後、水頭差0cmの状態から給水タンクを段階的に上昇させ水頭差を与えた。上昇の割合はTerzaghiの限界水頭差 H_c 付近までは5cm単位、それ以後は1cm単位の割合で上昇させた。各上昇させた段階において流量が一定に落ち着くまで待ち、これを流量 Q として測定、併せて試料長さ、粒子の動きを目視により慎重に観察した。

(2) 実験結果

a. 破壊形態³⁾

動水勾配の増加につれて試料は様々な形態に遷移するが、破壊開始の認定を行う上で重要となる破壊プロセスは、図-1に示す5つの破壊形態として観察された。

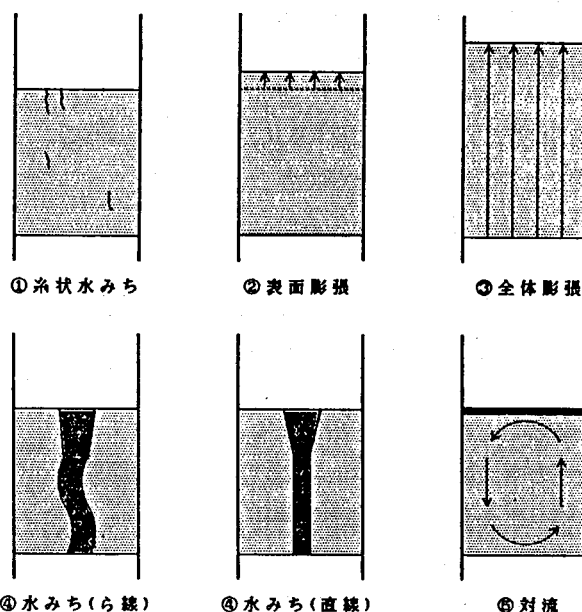


図-1 破壊形態

①糸状水みち……細い糸状の領域で移動している。②表面膨張……試料表面が僅かに上昇する。③全体膨張……試料全体が伸びる。④水みち……太いハッキリとした水みちで下端から上端につながる。⑤対流……上昇する土粒子と下降する土粒子の流れが存在する。①, ②の段階では急激な流量変化もみられず、

③の段階から急激な流量変化がみられた。④の水みちでは試料の違いが現れ、標準砂の場合は、線状となり、ガラスビーズの場合には直線状を呈するケースが多くみられ粒子形状による抵抗の影響と推察される。

b. 破壊の認定と限界動水勾配

観察された浸透破壊過程, 動水勾配及び流量の測定結果を図-2(a), (b), (c)に整理した。こうした浸透破壊プロセスの観察をもとに、浸透破壊の認定方法として次の4つの基準を検討した。

- (A) 糸状水みち発生時
- (B) 試料長さの増加開始時
(表面膨張)
- (C) 動水勾配と流量の関係における比例限界時
- (D) 流量Qの急増時

その結果、(A)は局所的な破壊として捉えることができるが、肉眼での側面からの観察だけでは難しい。(C)は明確な変化が認めがたい。(B)は試料表面の膨張と試料全体の膨張があるが、破壊は上部土質が浮上することを考えると破壊発生時点と考え易い。(D)については、水みちや試料全体が伸び始めた後に観察されるため、この直前の段階を考える必要がある。こうした場合、(B)と(D)は発生段階としては接近したものであることが図-2からも分かる。破壊認定方法として(B)のときの動水勾配を用いて、Terzaghiの限界動水勾配と対比しつつ、そのときの間隙比との関係を図-3に示した。土粒子形状, 土粒子の噛み合いが

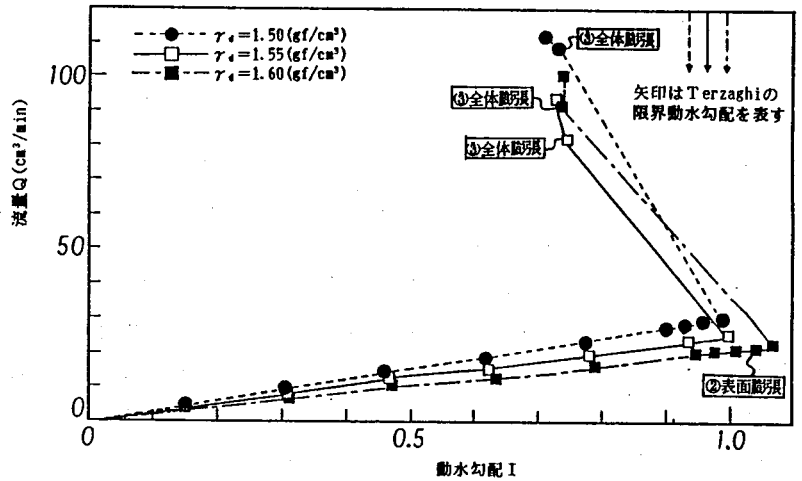


図-2(a) 動水勾配と流量の関係(標準砂の場合)

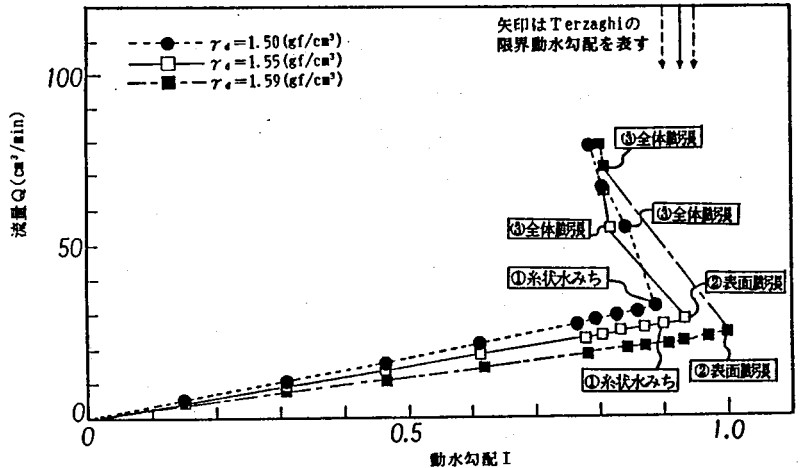


図-2(b) 動水勾配と流量の関係(GB 1の場合)

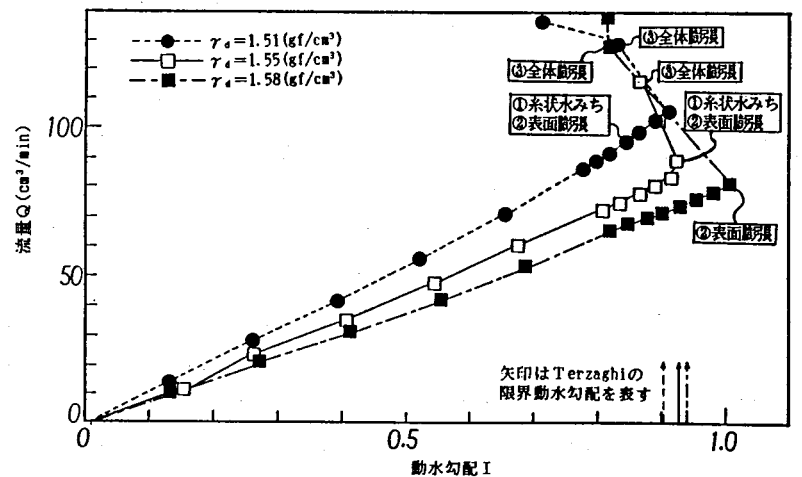


図-2(c) 動水勾配と流量の関係(GB 2の場合)

I_{cr} と実験値のバラツキに影響する傾向が見られたが、(B)を発生時点として実験値をTerzaghiの理論値と比較するとよく適応していることが分かる。

3. 浸透破壊における限界流速式の考え方

(1) Justinの限界流速⁴⁾

浸透破壊における限界流速の考え方はJustinにより提唱されている。種々の粒径の粒子を動かすのに必要な水の速度 v は、種々の粒径の粒子の有効重量 W を越えるjet actionによる圧力 P の計算から求められ、

$$P = 2A \frac{v^2}{2g} \gamma_w \quad (1)$$

ここに、 P : 断面積 A [cm^2]の土粒子が浸透流速 v [cm/s]の中で受ける力 [gf]

γ_w : 水の単位体積重量 [gf/ cm^3]

g : 重力加速度 [cm/s^2]

これにつり合う土粒子の水中重量を W とすれば、 $W = P$ となるから、

$$W = P = \frac{A v^2}{g} \gamma_w \quad (2)$$

よってJustinの限界流速式(3)が得られる。

$$v_c = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}} = \sqrt{\frac{2}{3}} (G_s - 1) d \cdot g \quad (3)$$

ここに、 d :粒径[cm] G_s :土粒子比重

しかし、多くの研究者がこの式の証明を実験により試みているがJustinの限界流速式は実験値と大きく異なり、過大評価とされている。すなわち、Justin式は、理想的な単一粒子の運動則を表すものであり、土粒子の周りの小さな渦、平均粒径からはずれた微粒子の不安定性などが無視されており、過大評価の傾向にあるとされている。

(2) 粒子群を考慮した限界流速⁵⁾

次に、土粒子が受ける掃流力(または土粒子沈降速度)の考え方にに基づき限界流速を考察する¹²⁾。鉛直一次元方向の力のつり合いにより、平衡状態を限界流速 V_c [cm/s]と考えると、 V_c は式(4)となる。

$$V_c = \sqrt{\frac{4}{3 C_D}} \cdot (G_s - 1) \cdot d \cdot g \quad (4)$$

ここに、 G_s :土粒子比重、 g :重力加速度 [cm/s^2]、 d :土粒子径 [cm]、 C_D :抵抗係数(Reynolds数 R_o の関数)である。

一般に、抵抗係数 C_D は、 $R_o \leq 1.0$ のとき $C_D = 24/R_o$ が成り立ち、Stokesの抵抗則である式(5)となる。

$$V_c = \frac{1}{18 \nu} (G_s - 1) \cdot d^2 \cdot g \quad (5)$$

ここに、 ν :動粘性係数 [cm^2/s]である。

参考までに、 $C_D = 2$ とした場合Justin式となる。また、 $R_o > 1.0$ のとき、 C_D は R_o 数が増加するにつれ

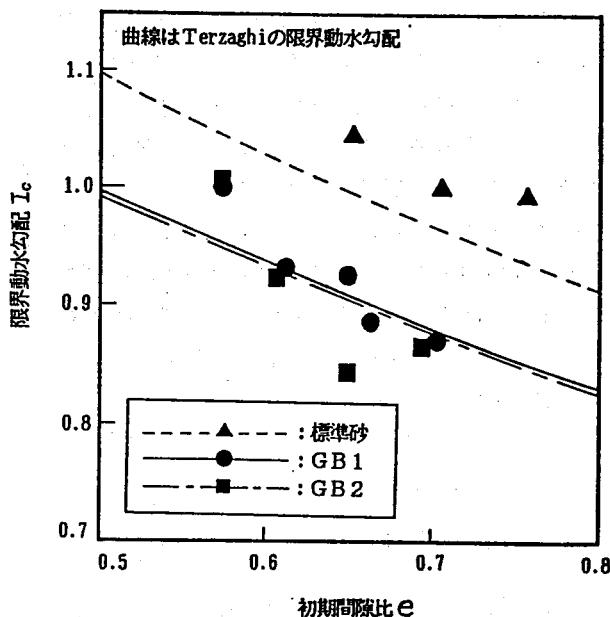


図-3 初期間隙比と限界動水勾配の関係

粒子形状ごとにある一定値に漸近していく⁶⁾。3.で行った実験において、破壊発生時の実流速と初期間隙比の関係を示したのが図-4である。この図から、初期間隙比が大きいほど、破壊発生時の実流速が大きくなる傾向が認められる。すなわち、単一粒子を浮上させる流速よりも、粒子群を浮上させる流速の方が小さくてすむと言えよう。以上のことから式(4)は、単一粒子の限界流速を考えており、周辺土粒子の影響を考慮する必要がある。そこで、多粒子の干渉沈降の考えに基づき、Richardsonらの式^{6), 7)}を土粒子が浮上する浸透破壊現象に適用を試みた^{13), 14)}。Richardsonらの式において空隙率 ε を間隙率 n とみなすと、式(6)のようになる。

$$\left(\frac{V_n}{V_c}\right)^m = n \quad (6)$$

ここに、 V_n : 間隙率 n のときの限界流速[cm/s],
 V_c : 単一粒子の限界流速[cm/s],
 n : 間隙率である。

ただし m は Re 数(= $V_c \cdot d / \nu$)によって定まる数である。(粒子径 \ll 管径、の場合)

$$\begin{aligned} Re < 0.2 & : 1/m = 4.65 \\ 0.2 < Re < 1 & : 1/m = 4.36 + 17.6 Re^{-0.03} \\ 1 < Re < 500 & : 1/m = 4.45 Re^{-0.1} \\ 500 < Re < 7000 & : 1/m = 2.39 \end{aligned}$$

式(6)から

$$V_n = n^{1/m} \cdot V_c \quad (7)$$

式(7)を式(5)または式(4)に代入すると、

$Re \leq 1.0$ のとき

$$V_n = \frac{n^{1/m}}{1.8\nu} (G_s - 1) \cdot d^2 \cdot g \quad (8)$$

$Re > 1.0$ のとき

$$V_n = n^{1/m} \sqrt{\frac{4}{3C_D} (G_s - 1) \cdot d \cdot g} \quad (9)$$

したがって、粒子群を考慮した場合の限界実流速式、式(8), (9)が導かれる。なお、先に示した図-5の太い実線は、式(8), 式(9)に基づいて算出した曲線である。

(3) 流動化開始速度^{8), 9)}

一方、化学工学、粉体工学の分野では流動層の研究が進んでおり、鉛直一次元管内での固定層から流動層に移移するときの流速、圧力について調べられている。一般に固定層から流動層に移移する流速は流動化開始速度と呼ばれ、多くの研究者により理論解析をもとに実験値から係数の値を決めた半理論式が提案されている。力学的には、粒子層の重量と流体の圧力損失とがつりあうときに流動化が始まることから次の条件が生ずる場合の速度である。粒子層の重量 W_L は式(10)で表される。

$$W_L = L(1-n)(G_s-1)\gamma_w \quad (10)$$

ここに、 L : 粒子層厚(試料高さ)[cm] n : 間隙率 G_s : 比重 γ_w : 水の単位体積重量[gf/cm^3]

また圧力損失 ΔP はKozeny-Carman式を用いると式(11)で表される。

$$\Delta P = 5LS^2 \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu v_c}{g} \quad \text{ただし: } S = 6 / (\psi \cdot D_v) \quad (11)$$

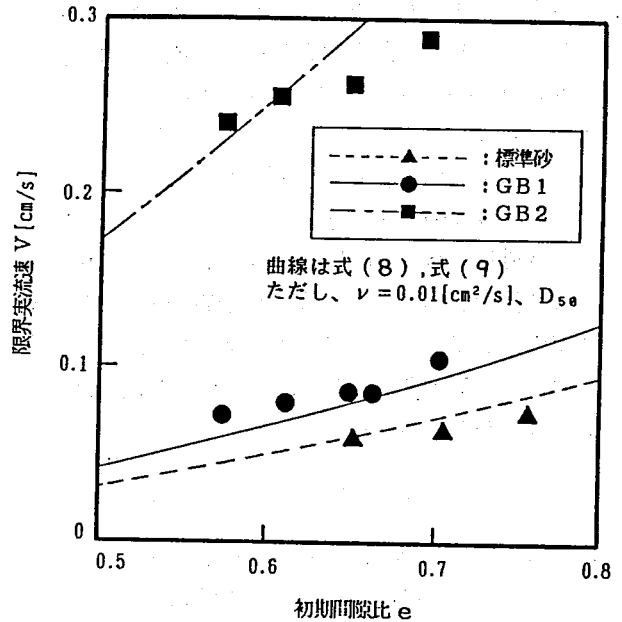


図-4 初期間隙比と限界実流速の関係

ここに、 ψ_0 : Carmanの形状係数(球の場合 $\psi_0 = 1$)

D_v : 等体積相当粒子径[cm]

$W_L = \Delta P$ のつり合う条件から、式(10)と式(11)より、流動化開始速度 v_0 (見かけの流速)を示す式(12)が導かれる。

$$v_0 = \frac{\psi_0^2 D_v^2 (G_s - 1) \gamma_w g n^3}{180 \nu (1 - n)} \quad (12)$$

なお、Levaの式は、層流域では180の代わりに200とおいている⁹⁾。図-5は、図-4に対する流動化開始速度式(12)に基づき、真の流速に算出換算した曲線である。

4. 3つの限界流速式と限界動水勾配の関係

図-7には、Justin式、粒子群を考慮した式、流動化開始速度式および2.で行った鉛直次元浸透破壊実験での破壊発生点(B)または(D)における実流速を求めた結果と、大野ら、中島ら、久楽らの限界流速実験報告の結果も同時に示す^{10), 11), 12)}。この図に

よれば、今回の実験結果(*)と粒子群を考慮した式および流動化開始速度式の値が一致していることがわかる。また式(8), (9), 式(12)は、間隙比の項、粒径および粒子形状 C_D , ψ_0 の項が含まれるため、試料の乾燥単位体積重量 γ_s , 粒径, 粒子形状の違いが限界値に影響してくることが推察される。例えば、間隙比 e が大きくなれば、図-6中の太い実線の式(8), (9), 式(12)は左にスライドし、破壊が発生し易くなる。また、粒子形状が角張ることにより C_D が大きくなるため、同じく式(8), (9), 式(12)は右にスライドし、破壊が発生し難くなることが定性的に説明される。これは、Terzaghi式には直接含まれていないが、動水勾配より土粒子性状はカウントされている。なお、水平次元実験モデルでは、水中重量とのつり

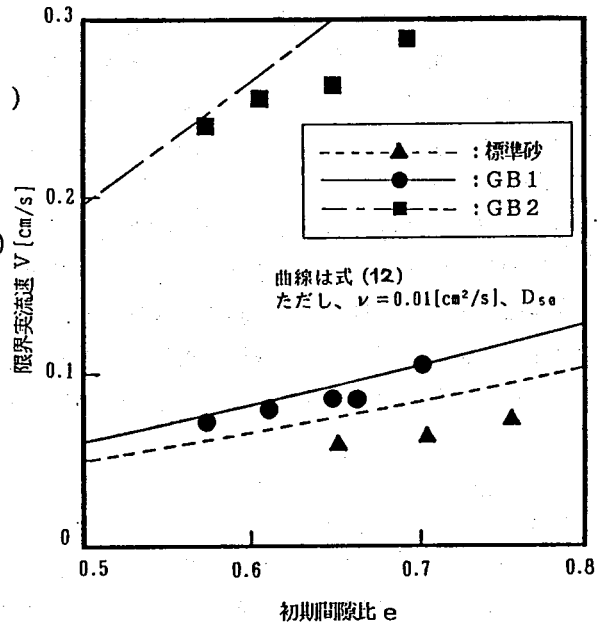


図-5 初期間隙比と流動化開始速度(実流速)

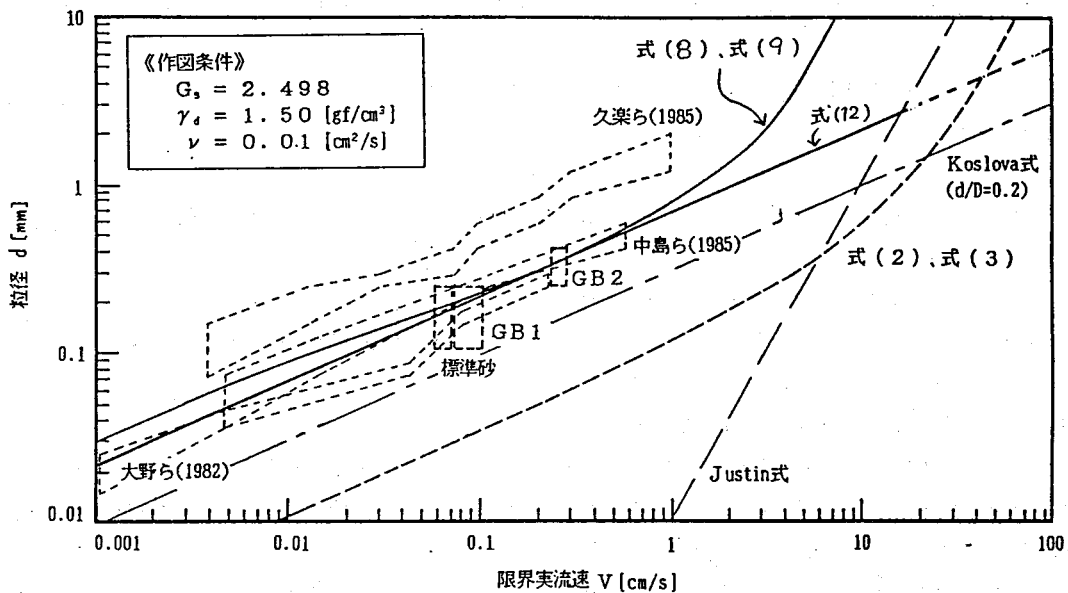


図-6 粒径と限界実流速の関係

合いではなく、土粒子の抵抗力（水中重量×摩擦係数）とのつり合いとなるため、式（8）、（9）、式（12）に比べ、限界流速が小さくても破壊すると考えられ、久楽らの実験にはその傾向が明確に現れている。

Justinの限界流速は3.（3）で述べる流動状態（流動層）が消えた後の移動層状態、すなわち、粒子が踊り始めるときではなく、単一粒子が完全に流されてしまう状態を説明するものと考えられる。

流動化開始速度は式（10）、（11）からもわかるように、土粒子が浮上する際の力のつりあいをTerzaghiの限界動水勾配式に基づき、また透水係数の評価をKozeny-Carmanの式から導いており、透水係数を介して流動化開始速度を定義している。粒子群を考慮した限界流速の場合は、粒子の干渉の影響を考えた沈降速度を粒子の浮上（移動）し始める速度として考えてきたが、実験値および流動化開始速度との値がほぼ一致することから、Terzaghiの限界動水勾配式の考え方と異なる方法でも同一の結果が得られ、式（8）、（9）、式（12）で定義される限界流速と限界動水勾配とは同じ浸透破壊条件を表すものであると解釈できよう。

5. あとがき

本論文では、浸透破壊の発生過程から破壊条件の適用について検討した結果、以下のことが分かった。

- （1）標準砂、ガラスビーズの均一粒径の均質試料を用いた鉛直一次元浸透破壊実験において、試料の表面膨張時を破壊発生時と考えた場合、Terzaghiの理論限界動水勾配 I_{cr} は十分適応し得る。
- （2）土粒子形状（試料の種類の違い）、土粒子の噛み合い（試料の種類、初期間隙比の違い）が I_{cr} と実験値のバラツキに影響する傾向が見られた。
- （3）粒子群を考慮した沈降速度の適用および流動化開始速度と室内鉛直一次元浸透破壊実験結果との一致が得られた。
- （4）Justinの説明する限界流速は単一粒子が完全に流されてしまう時の流速を示すものと考えられた。
- （5）（3）の結果から限界動水勾配と今回示した粒子群を考慮した沈降速度の適用による限界流速と流動化開始速度による限界流速は同じ破壊発生時を説明するものであることが得られた。

【参考文献】

- 1) 河上房義：土質力学第5版，森北出版（株），pp.72～75，1986.
- 2) 宇野尚雄：地下水に関する調査・解析（ライブラリー19「建設工事と地下水」第二章），土質工学会，p.38，1980.
- 3) 宇野尚雄、杉井俊夫、山田謹吾：限界動水勾配の検証，第23回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1857～1858，1988.
- 4) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，pp.1222～1223，1982.
- 5) 杉井俊夫・佐藤 健・宇野尚雄・山田謹吾：浸透破壊の発生プロセスと土の非均質性，土と基礎，Vol.37，No.5，1989.
- 6) 土木学会編：水理公式集（昭和46年改訂版、昭和60年版），1971，1985.
- 7) Richardson, J. F. and Meikle, R. A.: Sedimentation and Fluidization III, Trans. Int. Chem. Engrs., Vol. 39, No. 5, p. 348, 1961.
- 8) 白井 隆：流動層，科学技術社，pp.68～81，1973.
- 9) 狩野 武：粉体粒子の挙動—理論と実際—，産業技術センター，pp.253～265，1975.
- 10) 大野睦雄、山崎弥、トランデュック・フィ・オアン：砂のバイピング特性に関する実験的研究，第17回土質工学研究発表会発表講演集，pp.2317～2320，1982.
- 11) 中島秀雄、松原幹夫、飯島豊：X線写真を利用したバイピング現象の観察（第一報），第20回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1479～1482，1985.
- 12) 久楽勝行、吉岡淳、佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のバイピングについて，第20回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1483～1484，1985.