

繰返し透水履歴に対する締固め土の内部侵食の評価

Evaluation of Internal Erosion for Compacted Soil Subjected to Repeated Permeation History

長崎智洋 Tomohiro NAGASAKI (山口大学 (現 九州大学大学院))
 梶山慎太郎 Shintaro KAJIYAMA (山口大学大学院)
 中田幸男 Yukio NAKATA (山口大学大学院)

道路盛土の老朽化の現状と近年の降雨特性から、繰返し透水履歴が内部侵食に及ぼす影響を透水実験装置と模型盛土を用いて評価した。透水実験装置では、繰返し透水を行うと、積層方向が縦の方が、侵食抵抗指標が小さく、侵食量が大きいことがわかった。また、流出部に礫層を敷くことで流出土を減少させることが明らかとなった。模型盛土では、繰返し透水を行うことにより、法尻付近の水位を上昇させる結果が得られた。さらに、透水実験の結果を用いることで、模型盛土の法尻側の透水流量と盛土内の水位から、内部侵食量を推定できる可能性があることを示した。

キーワード：透水試験，侵食，細粒分

(IGC : D-04)

1. はじめに

1.1 背景

2009年に出された国土交通省近畿地方整備局：道路法面維持管理のためのハンドブック¹⁾によると直轄国道の多くは、高度成長期の昭和40年代にほとんど今の形状に更新されたものが多く、築後40年以上経過し老朽化が進行した盛土法面も認められるようになり、これらの法面から発生する崩壊災害は年々増加傾向にある。

法面の崩壊は、降雨浸透に伴う乾湿の繰返しによる表層土の強度低下、盛土の内部侵食による、排水機能の低下などに起因する。盛土の内部侵食とは、盛土内の間隙よりも小さな粒径の土粒子が、浸透流により移動する現象である。

前掲書¹⁾によると、盛土に求められる排水性や強度といった健全性は、浸透流によって移動した土粒子が盛土の法尻付近を目詰まりさせることで竣工時から徐々に低下していく。

このような盛土内部の状態は、盛土を本来の目的に使用するために把握する必要がある。ダムや堤体ため池などの貯水、治水目的に建設された盛土は、その内部が常に高水位の状態であり、内部侵食によるこれら盛土の健全性の喪失は盛土の決壊だけでなく、流出した水によって甚大な被害が発生する。このことから、ダムなどを想定した盛土の内部侵食に関する研究は、数多く報告されている^{例えば 2), 3)}。一方で、前述したように道路盛土においても、降雨によって内部侵食は進行しており、盛土内部が常に高水位の状態ではなくとも盛土内部の状態を把握することは重要である。

降雨に伴う盛土の内部領域の変化の概要図を図-1に示す。盛土内部では、降雨時、地下水位が上昇すること

で、常に飽和状態にある飽和領域と、地下水の影響を受けない不飽和領域、そして降雨によって水位が変化することから、飽和状態と不飽和状態を繰返ししている遷移領域に分けられる⁴⁾。変状や崩壊を生じた盛土は不飽和状態から急激に飽和状態に移行するケースが多いことが知られている⁴⁾ことから、盛土の遷移領域における、飽和状態と不飽和状態の繰返し変化は、盛土の崩壊のメカニズム解明に非常に重要であると考えられる。

さらに、近年の降雨特性の分析⁵⁾によると、2003年から2012年の総雨量300mm以上の発生回数は30年前に比べ1.6倍に増加している。そして、時間雨量100mm以上の発生回数は4.1倍に増加していることがわかっている。このように、近年の降雨は、短時間に大量に何度も降るなど、激しさを増してきている。そのため今後、盛土内の遷移領域で飽和状態と不飽和状態の繰返し変化が頻繁に発生することにより、盛土の内部侵食をさらに促進させていく恐れがあると推測される。そして内部侵食された盛土は、それに起因する周囲の交通網に障害を引き起こすような可能性が考えられることから、本研究では降雨によって地下水位が大きく変動する道路盛土を対

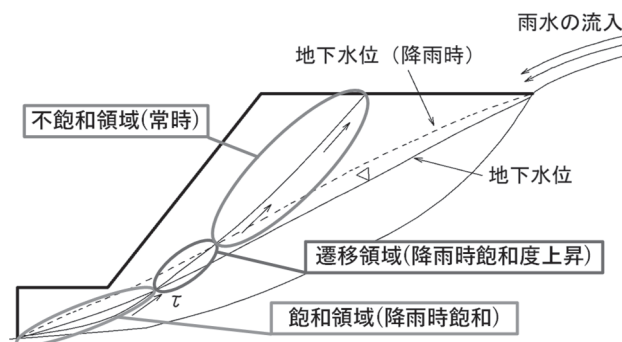


図-1 盛土の内部の飽和、不飽和領域の概要図
(渋谷⁴⁾に加筆)

象に検討を進めることとした。

1.2 目的

これまで内部侵食に関しては、主に一次元的な浸透に関する内部侵食の実験⁶⁾や、土粒子の流出に伴う粒度分布の変化と動水勾配と土粒子の流出量に着目した実験⁷⁾に関する研究が行われている。しかし、これらの研究は実験中常に透水を行っており、実験中に透水と排水を繰返すことによって飽和状態と不飽和状態を繰返し発生させるような繰返し透水の影響に着目した研究は行われていない。

そこで本研究では、透水実験装置と模型盛土を用い、近年の降雨を想定した、水位が急に上昇し、短時間で透水が終了したのち、排水されるような浸透を繰返し行い、その繰返し透水が内部侵食に与える影響を評価することを目的とした。

2. 透水実験装置による内部侵食の把握

2.1 実験試料

本実験で用いた配合砂は、Kenny and Lau⁸⁾と Kezdi⁹⁾の提案した内部安定指標の両方で不安定となる粒度分布になるよう定めた。

Kenny and Lau の内部安定指標は、土の粒度分布から内部安定指標を提案したものである。内部侵食を起こさないためには、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 の質量百分率 (F) 以上存在する必要があることを示した。すなわち「 $H/F \geq 1.3$ 」のときは安定、と内部安定性判断する指標を提案した。

Kezdi の内部安定指標は Kenny and Lau と同様に土の粒度分布から内部安定指標を提案したものである。内部侵食を起こさないためには、対象となる粒径 D の4倍粒径 $4D$ の粒子質量含有率 (H) が、15 以上存在する必要があることを示したすなわち「 $H \geq 15$ 」のときは安定、と内部安定指標を提案した。

配合砂の粒度分布を図-2 に示す。Kenny and Lau の内部安定指標より、図-2 において粒径を 1/4 とした粒度分布と比較することで、粒子が安定しているかの判定を行った。

配合割合を表-1 に示す。実験に用いた試料は、硅砂 4 号、硅砂 V5 号、硅砂 6 号、硅砂 7 号、硅砂 9 号の配合砂($G_s=2.601$, $e_{min}=0.565$, $e_{max}=0.706$, $U_c=7.27$) である。

2.2 実験装置

本実験で用いた、実験装置を図-3 に示す。実験装置は内寸が幅 100mm、高さ 100mm、奥行き 100mm である。浸透水は高さの調節が可能なタンクから供給される。タンクを固定することで、任意の水位を保つことができる。排水する際は、三方バルブを切り替えることで排水できる。透水流量は実験装置上部の管から流出する流量を計

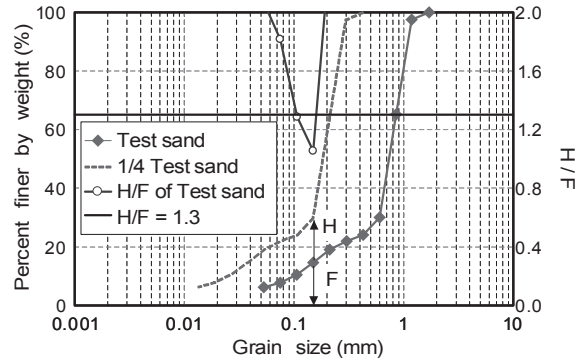


図-2 試料の粒度分布と H/F の関係図

表-1 試料の配合割合

Sand (Silica No.)	4	V5	6	7	9
Ratio (%)	64	14	2	9	11

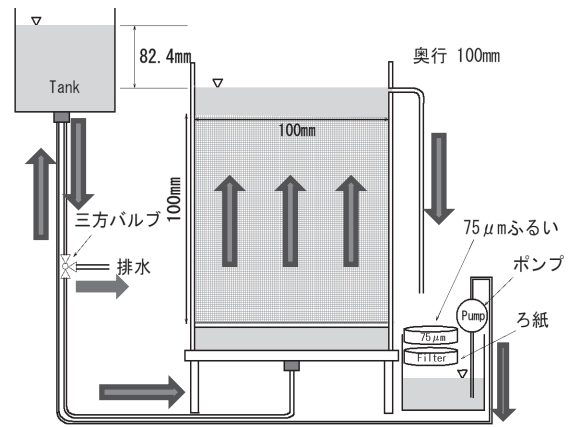


図-3 透水実験装置の概略図

表-2 各 Case の実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4
Porosity n (%)	38.4	38	37.4	37.2
Laminating direction	Vertical	Horizontal	Vertical	Vertical
Permeable method	Repeated	Repeated	Continuous	Repeated

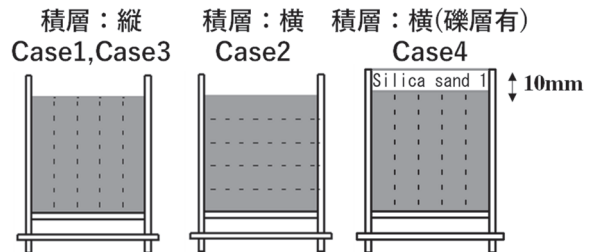


図-4 各 Case の実験条件概略図

測した。流出した細粒分の計測は 75 μ mふるいを通過し、ろ紙に残った細粒分の計測を行った。透水方向は供試体の下部から上部の向きで行った。タンクの高さを変えることで流速を変化させることができる。

2.3 実験条件

2.3.1 供試体条件

本実験で行った各 Case の実験条件を表-2 に示す。Case1, Case2, Case3, Case4 の供試体条件を図-4 に示す。Case1 と Case3 では、透水方向に対して積層方向が平行となるように、供試体を作製した。これは、盛土内部における法尻方向への地下水の影響を想定した条件である。以下、この様に作製した供試体の積層方向については、縦と表現する。一方、Case2 では、透水方向に対して積層方向が垂直となるように、供試体を作製した。これは、盛土内部における深度方向への地下水の影響を想定した条件である。以下、この様に作製した供試体の積層方向については、横と表現する。Case4 では、内部侵食による細粒分流出の防止効果と透水性への影響を検証するため、積層方向縦で供試体上部に珪砂 1 号を高さ 10mm 敷いた。

2.3.2 供試体の作製

供試体の作製手順は次に示すとおりである。

・積層方向が横の場合

- (1) 実験装置を立てた状態で 5 層に分割した一層分の高さまで、間隙率 n が 40% となるために必要な質量の配合砂を実験装置上部から投入する。
- (2) 20mm の高さになるまで突き固める。
- (3) 表面を乱す。
- (4) (1)~(3)を 4 層敷き詰めるまで繰り返す。
- (5) 5 層目を敷き詰める。

・積層方向が縦の場合

- (1) 実験装置を横に倒した状態で 5 層に分割した一層分の高さまで、間隙率 n が 40% となるために必要な砂の質量の一層分を実験装置側面から投入する。
- (2) 20mm の高さになるまで突き固める。
- (3) 表面を乱す。
- (4) (1)~(3)を 4 層敷き詰めるまで繰り返す。
- (5) 5 層目を敷き詰める。

2.3.3 透水条件

本実験における動水勾配は、杉井らが提唱する Richardson の多粒子干渉沈降速度による土粒子と水の相対速度を浸透破壊発生時の限界流速(多粒子限界流速)とすることで周辺粒子の干渉を考慮した速度である多粒子限界流速¹⁰⁾の考えから設定した。Kenny and Lau と Kezdi の内部安定指標から H/F が最も小さくなる粒径である $d=0.15\text{mm}$ の土粒子を動かすこととし、多粒子限界流速の算定式から、 $d=0.15\text{mm}$ の土粒子の限界流速となるよう水位差を 82.4mm に設定した。以下に本実験で用いた多粒子限界流速の算定式を示す。

$$v_c = \frac{6\mu}{\rho_d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - \rho_w)gd^3}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\} \quad (1)$$

$$v_n = n^{1/m} \cdot v_c \quad (2)$$

$$1.0 < Re < 500 \text{ のとき } 1/m = 4.45Re^{-0.1} \quad (3)$$

ここに、 v_c :限界流速[cm/s], ρ_w :液体の密度[g/cm³]

μ :水の動粘性係数[g/(cm·s)], d :粒子径[cm]

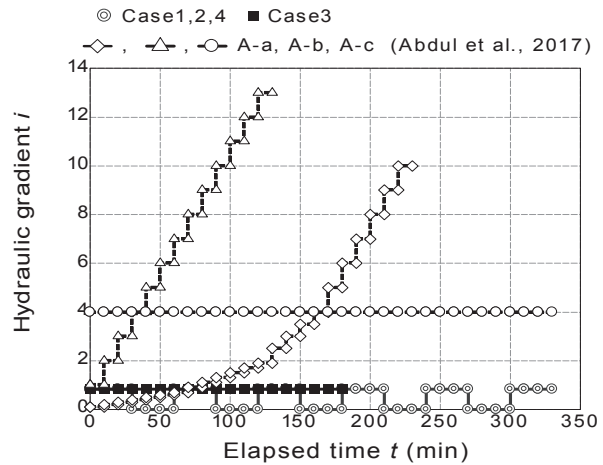


図-5 透水時の動水勾配と経過時間の関係

g :重力加速度[cm/s²], n :間隙率

透水時の動水勾配の操作を図-5 に示す。図中には、比較として Abdul らの実験¹¹⁾での動水勾配も併せて示している。以下に透水実験手順を示す。

Case1, Case2, Case4 では繰返し透水, Case3 では連続透水の方法で実験を行った。

・繰返し透水

- (1) 水位を供試体の高さと同じ高さに設定し、24 時間かけて供試体を飽和させる。
- (2) タンクを所定の高さに設置し、30 分間透水する。
- (3) タンクからの水の供給を中断し、バルブを解放して 30 分間排水する。
- (4) 再び同じ高さまでタンクを上昇させ、30 分間透水する。
- (5) (3)と(4)の操作を 4 回繰り返す。
- (6) 水位を供試体の高さに設定し、24 時間供試体を飽和状態にさせる。
- (7) タンクを所定の高さに設置し、30 分間透水をする。

・連続透水

- (1) 水位を供試体の高さと同じ高さに設定し、24 時間かけて供試体を飽和させる。
 - (2) タンクを所定の高さに設置し、3 時間透水する。
- 以上の二通りの実験を行った。

なお、繰返し透水条件における透水時間の合計と連続透水条件の透水時間は、各実験とも 3 時間となるように実験を行った。

2.4 実験結果

2.4.1 透水流量と流出土量の時間変化

繰返し透水条件での透水流量と流出土量の時間変化を図-6 に示す。なお Case4 では、流出土量が少なく計量ができなかった。繰返し透水条件で行った Case1, Case2, Case4 の透水流量は、図-6 中の(a)から(b)の繰返し透水でそれぞれ 27.2%, 17.1%, 27.9%の減少が見られた。連続透水の条件での透水流量と流出土量の時間変化として、

Case3 の結果を図-7 に示す。Case3 では計量開始後最初の透水流量から、2 時間後までで 6.3%増加し、その後ほとんど一定の値となった。

図-6、図-7 から、繰返し透水の条件では、(a)から(b)の飽和状態から不飽和状態へ変化する時、透水流量は減少し、連続透水の条件では透水流量が増加するような傾向がみられる。繰返し透水を行った Case1, 2, 4 の透水流量の変化率をみると、積層方向が縦の Case1, 4 のほうが大きい透水流量の変化率がみられた。これより盛土内部における浸透流の影響は水平方向のほうが垂直方向よりも大きいと考える。

2.4.2 粒度分布の変化

供試体の流出側の試料 A と流入側の試料 B について透水終了後ふるい分け試験を行い、基準の配合砂の粒度分布と比較した。図-8 から図-11 に Case1 から Case4 の粒度分布の変化をそれぞれ示す。また、図-8 から図-11 には試料 A, B の採取箇所を併せて示す。採取箇所は図-8 から図-11 中のハッチ部分に示すように A, B における中心付近を採取した。

Case1 では、A から 0.25mm 以下の土粒子が約 10%流出する結果が得られた。Case2 と Case3 ではほとんど変化は見られなかった。Case4 では A において、0.425mm 以下の土粒子が約 5.8%増加する結果が得られた。珪砂 1 号を敷いた Case4 では、土粒子の流出を防ぐような結果

が得られた。礫を敷くことで、表面の土粒子が自由に動けず、細粒分のみが流出した結果、透水流量が Case1 よりも大きくなり、1 層目の粒度分布の変化に差異が生じたと考察する。

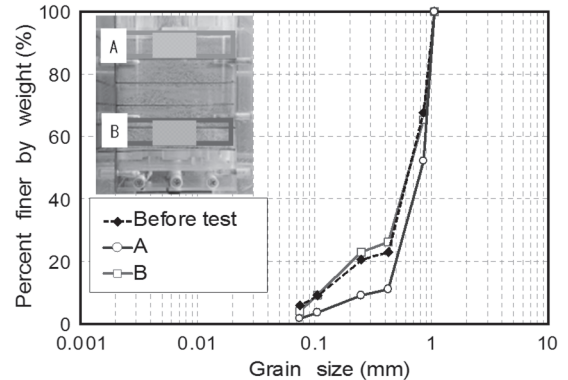


図-8 Case1 の粒度分布の変化

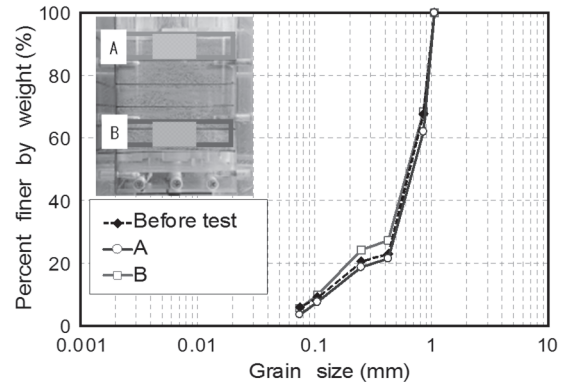


図-9 Case2 の粒度分布の変化

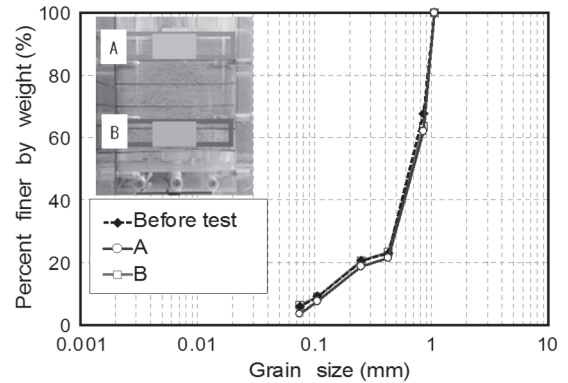


図-10 Case3 の粒度分布の変化

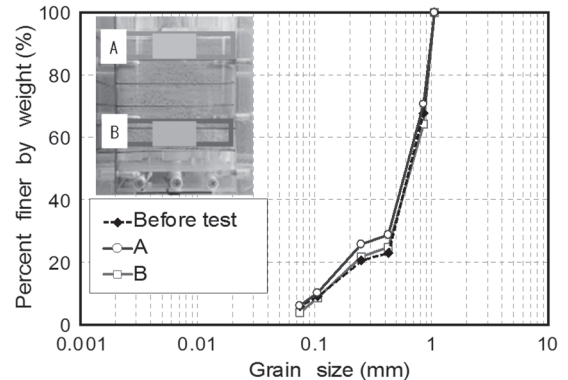


図-11 Case4 の粒度分布の変化

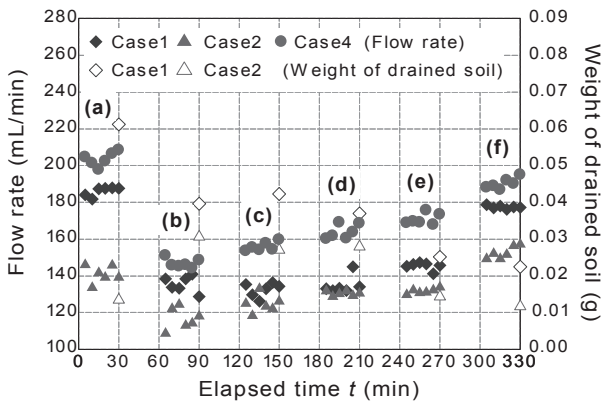


図-6 繰返し透水条件での流量と流出土砂量の時間変化

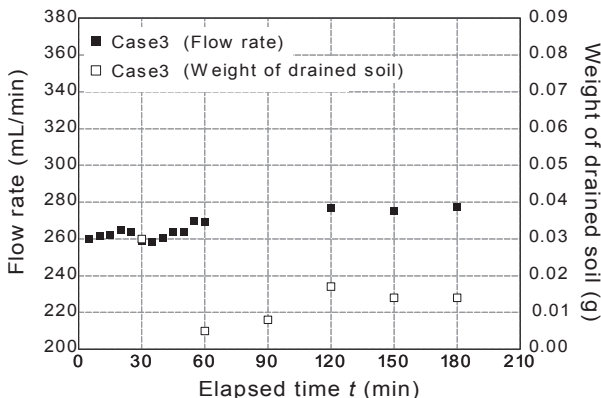


図-7 連続透水条件での流量と流出土砂量の時間変化

これらの結果から、積層方向が縦で繰返し透水を行った Case1 では、土粒子の流出が多く、Case4 では、Case1 と同条件だが、礫を敷くことで土粒子の流出を防止する効果があることが明らかとなった。

佐藤らが行った内部侵食が起こりうる土を用いた実験によると、流出土砂量は、連続的に一定の動水勾配で透水を行った際の流出土量は時間経過にほぼ比例して増加する傾向を示し¹²⁾、連続的に透水し、動水勾配を上下させて行った場合、流出土砂量は時間経過とともに減少している¹³⁾。本研究においても、流出土砂量は、図-6における(a)-(b)間で増減はあるものの、Case1 および Case2 における流出土砂量は時間経過とともに減少し、Case3 では時間経過とともに増加する傾向が認められた。一方で、透水性係数に着目すると、佐藤らの結果は動水勾配を変化させたものの方が高い結果となっている。本研究では、断面積、および流量測定時の動水勾配が一定であることから、透水性係数は流量に比例して大きくなるため、流量から透水性係数を求め比較すると、連続的に透水を行った方が透水性が高い結果となった。これは、佐藤らの実験結果は供試体を1日水浸させて飽和度を上げている状態に対して、本研究では供試体内の水を一度排水したために内部が不飽和状態になった可能性が考えられる。

2.4.3 侵食抵抗指標の評価

図-12に浸透エネルギーと流出土の関係と各 Case の侵食抵抗指標を示す。図中の A-a, A-b 及び A-c は図-5 の動水勾配の変化を与えた時の Abdul らの侵食抵抗指標の実験結果¹¹⁾である。なお、A-a, A-b, A-c の試料の H/F は 0.038 である。浸透エネルギー E_{flow} と侵食抵抗指標 I_α は以下の式から算出した。

$$E_{flow} = tQ\gamma_w\Delta h \quad (4)$$

$$I_\alpha = -\log\left(\frac{m_{dry}}{E_{flow}}\right) \quad (5)$$

ここで、 $t[s]$ は透水時間、 $Q[m^3/s]$ は単位時間当たりの透水流量、 $\gamma_w[kg/m^3]$ は水の単位体積重量、 $\Delta h[m]$ は水位差、 m_{dry} は流出土量である。

侵食抵抗指標が小さいほど、内部侵食により供試体内の土粒子は流出しやすいことを示している。

表-3に各 Case と Abdul らの実験で得られた侵食抵抗指標の値を示す。繰返し透水を行った Case1 と Case2 の侵食抵抗指標を比較すると、積層方向が縦である Case1 の方が、積層方向が横の Case2 より 4.1%程内部侵食されやすいことがわかる。また、繰返し透水を行った Case1 と連続透水を行った Case3 を比較すると、Case1 の方が Case3 よりも 12.8%程内部侵食されやすいことが明らかとなった。

浸透エネルギーと流出土砂量の関係においても侵食抵抗指標と整合するように Case1, Case2, Case3 の順に内部侵食による土粒子の流出量が多くなっている。

また、Case1 と Case2 は、Case3 と比較して傾きが急であることから、内部侵食の進行が比較的速いことがわかる。

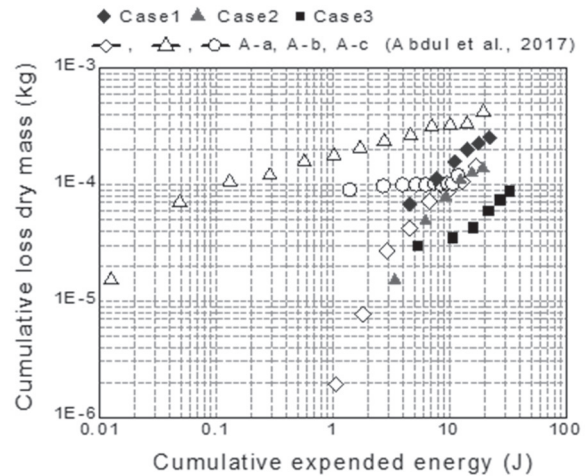


図-12 浸透エネルギーと流出土量の関係と各 Case の侵食抵抗指標

表-3 各 Case と Abdul らの実験における侵食抵抗指標

	Erosion resistance index I_α
Case1	4.94
Case2	5.14
Case3	5.57
A-a	5.12
A-b	4.65
A-c	5.00

本実験は Abdul らの実験と比較して、非常に小さい動水勾配で、侵食しやすい土を用いて繰返し透水を行い、Abdul らの結果と近い侵食抵抗指標を得ることができた。

2.5 内部侵食の評価

透水流量の時間変化、粒度分布の変化、侵食抵抗指標から内部侵食の評価を行った。

結果から、繰返し透水は透水流量、粒度分布、侵食抵抗指標への影響として以下のことが考えられる。

図-6中の繰返し透水(a)から(b)のような飽和状態から不飽和状態への変化で、透水流量は減少する。繰返し透水で積層方向が縦のほうが、土粒子は流出しやすい。繰返し透水で積層方向が横のほうが、侵食抵抗指標の値は小さくなり、より内部侵食を起こしやすいと言える。よって繰返し透水によって、内部侵食は促進されていると評価できる。

さらに、Case1 と Case2 の比較から積層方向が縦の方が浸透流の影響を受けやすいため、盛土内水平方向への内部侵食の影響が大きいことが明らかとなった。Case1 と Case4 の粒度分布を比較すると、Case1 において最も変化が大きかった A における 0.25mm 以下の通過質量百分率は 9.1%、Case4 においては 25.7%と大きく異なっており、礫層を敷くことで、土粒子の流出を防ぐような結果が得られた。

3. 模型盛土を用いた繰返し透水が内部侵食に与える影響

3.1 実験試料

模型盛土実験では、透水実験に用いた配合砂と同様に珪砂4号、珪砂V5号、珪砂6号、珪砂7号、珪砂9号、の配合砂を用いた。模型盛土の作製に用いた配合表を表-1に示す。

3.2 実験装置

図-13に模型盛土を示す。本実験で用いた模型盛土は、道路土工指針¹⁴⁾を元にスケールを1/100とし、勾配1:1.8、天端幅60mm、盛土高150mm、基盤高50mmの高盛土を模擬した。内寸は幅330mm、高さ200mm、奥行き100mmの模型土槽である。盛土斜面の背面から水位上昇を与えることにより、模型盛土内の水位を変化させ透水を行った。浸透水は高さの調節が可能なタンクから水を供給することで、一定の水位を保つことができる。水位計は図-13中の1から順に仕切り板からの距離が30mm、80mm、130mm、180mm、230mm、280mm、の位置に計6本水位計を設置した。また三方バルブを切り替えることで、透水を中断し排水することができる。なお、仕切り版には100 μ mのメッシュを貼り付けており、透水できるようになっている。なお、透水流量は図-13の左側に取り付けているホースから計量を行った。流出土砂量は、わずかであったため、採取することができなかった。

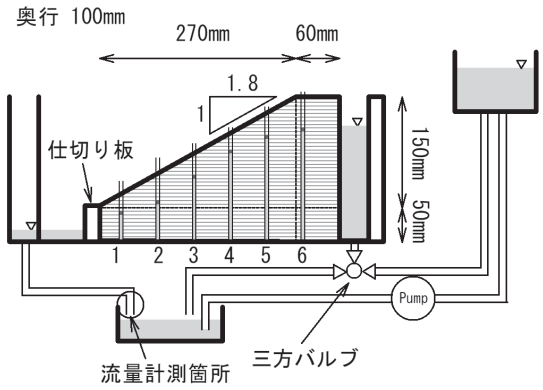


図-13 模型盛土の概略図

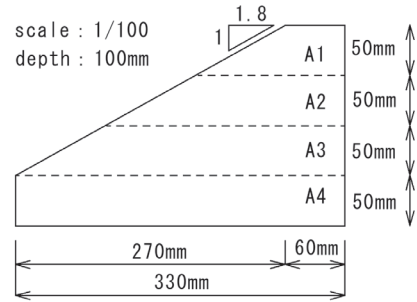


図-14 模型盛土供試体の概略図

3.3 供試体の作製

本実験に用いた模型盛土の作製手順を以下に示す。

- (1) 模型盛土を図-14に示す様に4層に分け1層ごとの配合砂を用意する。
- (2) 1層ごとに表面をかき乱したのち敷き詰める。

3.4 透水条件

本実験では、法先において透水時に地下水位が底面から50mmの高さになるように設定した。

浸潤線の式は、以下の様に表すことができる。

$$S = \sqrt{l^2 + h_1^2} - l \quad (6)$$

すなわち、

$$h_1 = \sqrt{(S+l)^2 - l^2} \quad (7)$$

ここで、 S [cm]は浸潤線の法先における底面からの高さ、 l [cm]は底面の長さ、 h_1 [cm]は盛土斜面の地下水位の高さである。

式(5)より本実験における盛土斜面の背面の地下水位の高さは、 $h_1=18.84 \approx 19$ cmとした。

本実験で行った繰返し透水実験の手順を以下に示す。

繰返し透水を行う条件を Case5、連続透水を行う条件を Case6 とした。

・繰返し透水

- (1) 背面の地下水位を190mmまで上昇させる。

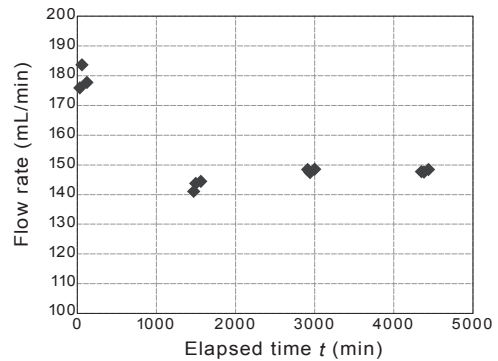


図-15 繰返し透水条件での透水流量の時間変化

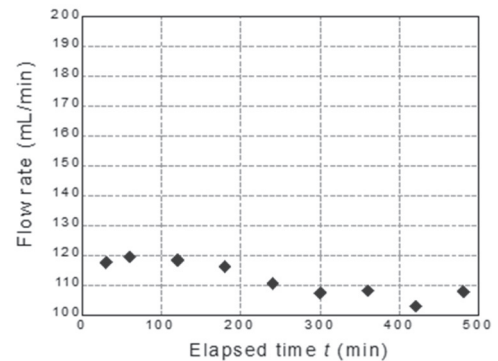


図-16 連続透水条件での透水流量の時間変化

- (2) 背面の地下水位を190mmで一定に保ち、水位上昇から2時間透水を行う。
- (3) 透水を中断し22時間バルブを開いたままにして排水する。
- (4) (1)から(3)の工程を4回繰り返す。

表-4 Case5 の水位計の変化率

Water gauge	1	2	3	4	5	6
Variation ratio of water level (%)	+2.0	+0.7	-3.7	-4.5	-0.6	-0.4

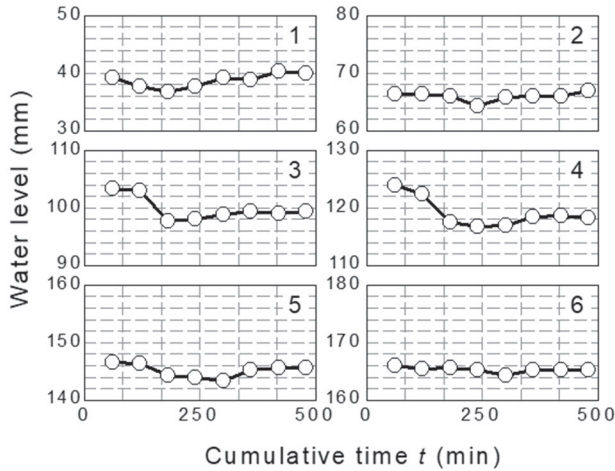


図-17 Case5 の水位の経時変化

表-5 Case6 の水位計の変化率

Water gauge	1	2	3	4	5	6
Variation ratio of water level (%)	-2.8	-4.1	-3.5	-1.7	-3.1	-0.4

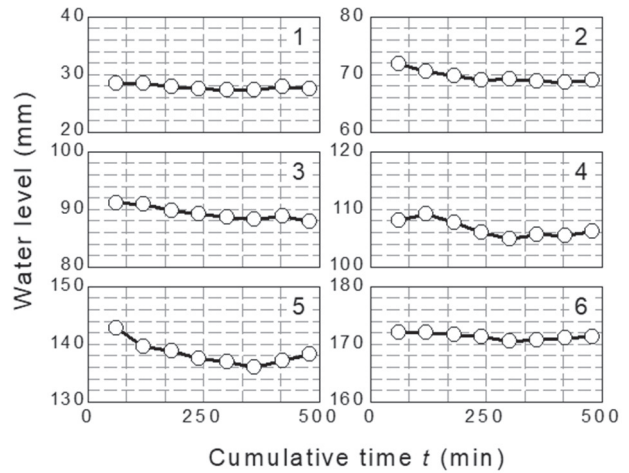


図-18 Case6 の水位の経時変化

・連続透水

- (1) 背面の地下水位を 190mm まで上昇させる。
 - (2) 背面の地下水位を 190mm で一定に保ち、水位上昇から 8 時間透水を行う
- 以上の 2 通りの実験を行った。

繰返し透水条件における透水時間の合計と連続透水条件の透水時間は、各実験とも 8 時間となるように実験を行った。

3.5 実験結果

3.5.1 透水流量の時間変化

Case5 と Case6 の透水流量と透水時間の関係を図-15 と図-16 に示す。最も透水流量の変化が大きいと考えられる、透水経過時間 1 時間時点と 8 時間時点での透水流量を比較すると、Case5 では 15.7%の透水流量の減少が見られ、Case6 では 8.5%の透水流量の減少が見られた。これらの結果から、模型盛土においても透水実験機を用いた透水実験と同様に、繰返し透水のほうが透水流量の減少が大きい結果が見られた。

なお、初期の透水流量の差異は、供試体の状態による影響が考えられる。

3.5.2 粒度分布の変化

粒度分布は模型盛土の法尻、法肩、のり面の背面の浸透水流入部において、透水後ふるい分け試験を行い、基準の粒度分布と比較した。

繰返し透水を行った Case5 においても連続透水を行った Case6 においても粒度分布に大きな変化は見る事ができなかった。変化が見られなかった要因として、透水時間が短い、2 章における透水実験装置よりも、動水勾配が小さいことが考えられる。

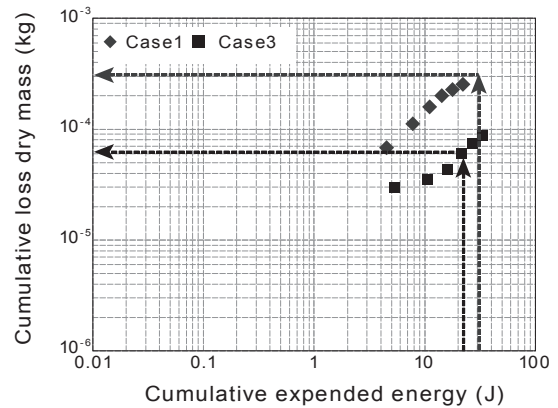


図-19 内部侵食量の推定

3.5.3 水位の時間変化

Case5 の各水位計の 1 時間時点と 8 時間時点での水位変化率を表-4 に示す。水位計 1 では 2%の水位増加、水位計 2 では 0.7%の増加が見られた。水位計 3 から 6 においては水位の減少が見られた。

Case6 の各水位計の 1 時間時点と 8 時間時点での水位変化率を表-5 に示す。表-5 よりいずれの水位計においても水位の減少が見られた

図-17 に Case5 における各水位計と透水を行った積算時間の関係を示す。同様に図-18 に Case6 における各水位計と透水を行った積算時間の関係を示す。Case5 では、透水開始後水位計 1 において水位が増加し、透水時間が 180 分経過したのち、水位が増加することが確認できた。Case6 では水位は次第に減少するような結果が得られた。

3.5.4 侵食抵抗指標の盛土模型への応用

2.6.3 の浸透エネルギーと流出土砂量の関係の結果を模型盛土に応用することで、盛土模型で行った透水実験の透水流量の測定結果から、内部侵食量を推定することができる。Case5 と Case6 の浸透エネルギーを式(4)から

求めると、 $E_{flow(Case5)}=30.90J$ 、 $E_{flow(Case6)}=22.20J$ と算出できる。盛土内部では、水平方向に内部侵食を起こしやすいので、図-12より、積層方向が縦のCase1とCase3の浸透エネルギーと流出土砂量の関係を用いて、Case5はCase1のグラフから流出土砂量の値を読み取り、Case6はCase3のグラフから流出土砂量の値を読み取ると図-19の様にCase5とCase6の土砂流出量はそれぞれ、 $m_{dry(Case5)}=2.8 \times 10^{-4}kg$ 、 $m_{dry(Case6)}=6.5 \times 10^{-5}kg$ と推定量を算出することができる。

本研究において、粒度分布で変化がみられなかったのは、実験時間が短いため、侵食エネルギーが小さく、流出土砂量が少なかったためと考えられる。

このように侵食抵抗指標を用いることで、法尻側の透水流量と盛土内の水位から侵食量を推定できる可能性を示した。

4 結論

本研究では透水実験装置と盛土模型を用いて、繰返し透水による内部侵食の影響の把握を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 透水実験装置において、繰返し透水条件で行ったCase1, Case2, Case4の透水流量は、それぞれ27.2%, 17.1%, 27.9%の減少が見られた。Case3では透水流量は透水2時間後までで6.3%増加し、その後ほとんど一定の値となった。
- (2) 透水実験装置において、透水流量の変化率をみると、積層方向が縦のCase1, 4で透水流量の変化率が大きい結果が得られた。
- (3) 透水実験装置において、繰返し透水条件で積層方向が縦の場合、粒度分布の変化がみられた。Case1では、Aから0.25mm以下の土粒子が約10%流出する結果が得られた。
- (4) 透水実験装置において、Case4では、流出側に礫層を敷くことで、粒度分布において0.425mm以下の土粒子が約5.8%増加する結果が得られた。礫を置くことで細粒分流出を防止する効果があることが明らかとなった。
- (5) 透水実験装置において、Case1の方がCase3よりも、12.8%内部侵食が促進されやすいという結果が得られ、Case1の方がCase2よりも、4.1%内部侵食が促進されやすいという結果が得られた。
- (6) 盛土模型において、透水経過時間1時間時点と8時間時点での透水流量を比較すると、Case4では15.7%の透水流量の減少が見られ、Case5では8.5%の透水流量の減少が見られた。結果から、模型盛土においても透水実験機の結果と同様に、繰返し透水のほうが透水流量の減少が大きい結果が見られた。
- (7) 模型盛土において、模型盛土での粒度分布では、ふるい分け試験の試料を3か所から採取したが、どの

位置においても連続透水と繰返し透水の両方で粒度分布の変化は見られなかった。これは透水実験機より透水時間が短いこと、動水勾配が小さいことが原因と考えられる。

- (8) 模型盛土において、透水経過時間1時間時点と8時間時点での法尻付近の水位計1と2は、繰返し透水で、それぞれ2%と0.7%増加した。連続透水で、2.8%と4.1%減少した。模型盛土の水位上昇は、繰返し透水によって内部侵食が起り、目詰まりが発生し始めたためだと推察される。
- (9) 模型盛土において、透水試験装置の侵食抵抗指標の結果を用いることで、法尻側の透水流量と盛土内の水位から侵食量を推定できる可能性を示した。

以上の結果から、繰返し透水は内部侵食を促進していることがわかった。この結果から近年の降雨のような特徴を持つ降雨が頻発すると、盛土は現在適用されている耐用年数よりも早く劣化してしまう恐れがあり、早期の補修・点検の必要性が示唆される。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局：道路法面維持管理のためのハンドブック(案)、<https://www.kkr.ml.it.go.jp/kingi/database/26/01.pdf>, (参照2019.7.20)
- 2) 小柿響, 丸山貴広, 堀越一輝, 竹山智英, 高橋章浩：透水性鋼矢板まわりの浸透流による砂質土の内部侵食, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2(応用力学論文集 Vol.18), pp.I_419-I_427, 2015.
- 3) 石丸太一, 鈴木素之, 若松知季, 神山惇：細粒分流出を伴う透水を受けたまさ土の力学特性, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.107-114, 2019.
- 4) 澁谷啓：盛土崩壊のメカニズムと対策工, Geosynthetic Engineering Journal, Vol.23, pp.1-14, 2008.
- 5) 竹下清, 齋藤源, 高橋定雄：近年の降雨特性の分析, Report of Water Resources Environment Research Institute, pp.21-27, 2013.
- 6) 山田高弘, 近藤明彦, 前田健一：細粒分流出に起因する粒度変化に着目した粒状体の内部侵食と目詰まりの挙動, 土木学会中部支部研究発表会, III-012, 2012.
- 7) 堀越一輝, 高橋章浩：浸透流による盛土内の細粒土の移動に与える再体積の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.473-488, 2015.
- 8) Kenny, T.C and Lau, D : Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical journal, Vol.22, No.2, pp.215-225, 1985.
- 9) Kezdi, A. : Soil Physics: Selected Topics (Developments in Geotechnical Engineering), Amsterdam, New York, US, Elsevier Science, 1979.
- 10) 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, pp.69-74, 2013.

- 11) Abdul Rochim, Didier Marot, Luc Sibille, Van Thao Le: Effects of Hydraulic Loading History on Suffusion Susceptibility of Cohesionless Soils : Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.143, No.7, 2017.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001673](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001673)

- 12) 佐藤真理, 桑野玲子: 流出水の濁度による土砂流出

の定量評価, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol.64, No.4, pp.187-191, 2012.

- 13) 佐藤真理, 桑野玲子: 地盤の内部侵食と排水の濁度の関係, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol.65, No.4, pp.199-202, 2013.
- 14) 日本道路協会: 道路土工—盛土工指針(平成 22 年度版), p.106, 2017.

(2020 年 6 月 15 日 受付)

