

浸透破壊現象の展望

The State of the Knowledge on Seepage Failure Phenomena

宇 野 尚 雄 (うの たかお)

岐阜大学名誉教授, ㈱ニュージェック顧問

1. ま え が き

豪雨災害が増加している状況下で、古くから指摘されている「浸透破壊」に関する疑問は何だろうか。①浸透破壊で表現される現象の理解が正しいか、②浸透破壊の発生条件として提案されている基準は明確か、③浸透破壊の対策工法（ドレーン工、フィルター工など）は信頼できるか、などであろう。そこで、本文は既往の研究成果に基づいて浸透破壊現象の展望を試みたものである。

2. 浸透破壊の発生

浸透破壊（Seepage Failure）現象は次のような場所で発生する。

(A) 浸透水による浸出面破壊：ため池、フィルダム、河川堤防など治水用土構造物の裏法尻部に浸透水が激しく浸出する、および斜面法尻への湧水が多量あるときに生じる、

(B) 鉛直上向き浸透水流による破壊：地盤漏水として法先の地盤から浸透水が吹き出る（パイピングとかクイックサンド、ボイリングなどと呼ぶ）、および建築基礎や橋脚の掘削地盤の周辺を囲む矢板下を回る地下水が掘削底面から吹き上げ、底面部が持ち上げられる（ヒービングする）、

(C) 土中の内部浸食：ティートンダムが中央コア材底部で内部浸食されて破壊したように土中内部で浸食が起こる、

(D) 排水管渠（井戸も含めて）への浸透水による周辺土中の浸食：斜面や盛土の地山内の排水のために設定した排水孔への流入水により浸食が地山内に発生する、

(E) 異種材料との接触面に生じる浸食：鉄・コンクリート等の異種材料と接触する面に沿う浸透水による浸食がある、

(F) 斜面や盛土内の間隙水圧による破壊：斜面や堤防、ダムやため池の堤体内に発生した間隙水圧上昇が原因で法面部が（すべり）破壊する。

龍岡前会長が推進する「自然災害への提言」を目標とした委員会で、治水利水部会の「フィルダム、ため池、河川堤防」のうち後者2ケは越流災害の事例が顕著であるが、「越流」は地表土砂面における浸食であって²⁾、浸透破壊とは言わない。堤防の全国的な照査（点検）業務は、結果的に(A)型のパイピング破壊の懸念される箇所が多い。その局部破壊が全般破壊につながるか否かが対

策工法に影響するため、その現象の解明が期待されている。

3. 浸透破壊の分類

M. E. Harr（ハール）は¹⁾、ヒービング（heaving）、パイピング（piping）と内部浸食（internal erosion）、に3分類した。前述した発生状況を勘案して筆者は、(1)(A)、(B)のような狭義の浸透破壊、パイピング破壊と、(2)(C)のような水理学的破壊（Hydraulic Fracturing）の内部浸食、の2分類にしたい。(F)は、近年の土砂災害の増加等により注目された「浸水に伴う土の強度低下」を含んだ「飽和不飽和斜面のすべり破壊」であって、浸水に伴うコラプス現象も関係した不飽和土の研究の進展により研究が進められてきている。筆者は(D)、(E)も含めて内部破壊の範疇に入れて考える。

(1) パイピング破壊

(A)、(B)に当たるクイックサンド、ボイリングは言葉どおりに地表近くで「砂が踊る」、「沸く」ように砂が吹く現象である。パイピングは元来、管状に弱部の水みちをつくって破壊が進行する様を表していて鉛直か水平かの違いに関係なく呼称している。また、近年は堤防の法尻部への浸出水による水平方向の浸透による破壊も含めて呼ばれるので、本文ではパイピング破壊と総称する。

(2) 内部浸食

(C)に該当する土中内部での浸透破壊である。(E)には構造物や粘土層が上部にある帯水層を浸透する際に地層境界付近に発生するルーフィングも該当し、境界部の拘束応力が小さい応力条件の箇所が発生する。(F)は人工盛土や自然斜面の内部で発生するので、その応力状態がせん断破壊規準に照らして定式化される。

地震時に発生する地盤下部の液状化層から噴出したパイピング跡のような例外を除いて、土中の内部破壊は見えない現象である。不飽和土の浸水による強度低下を考慮した土・水連成解析法の進展により、浸透力が作用する場での内部破壊と総括して扱える。すなわち、①あるレベルの応力状態での浸透力が作用するせん断破壊、②極めて緩い状態の応力状態での浸透力による浸食（コラプス発生瞬時やルーフィング状態の破壊形式）、に分類すれば足りる。

4. 浸透破壊の要因

4.1 土中の応力状態（力学的要因）

方向性を持つのは、重力場に対する浸透流の向き（上下左右）と土の鉛直下向き自重である。浸透流と同じ向きの浸透力は発生する土構造物の位置に対応して危険側のときと安全側のときに変化する。浸透流の集中する箇所は設計において重要である。異種材料との接触部が狙われるからである。

土中の応力状態（初期の拘束応力とせん断応力、浸透により発生するせん断応力の増加の有無）と最大せん断応力面の方向は、発生する間隙水圧、間隙空気圧の影響を受けて、浸透流の進行する箇所の違いにより進行性となるか全般せん断破壊するか否かの判定につながる。初期の応力状態が良いケースを期待するのが、コラプス（浸水による構造崩壊）も発生させない高い締固め度（乾燥密度）を確保する施工である。このときの拘束応力が初期条件となるので内部浸食の条件に強く影響する。

4.2 土質物性の要因

間隙比（または乾燥密度、締固め度、 N 値など）、真比重、それらの変動ばらつき、土粒子の粒径（ d_{10} , d_{15} , d_{50} , d_{85} など）、粒形、粒度分布（粗粒分、細粒分含有率、均等係数 U_c ）、固結度など（強度に影響する要因）である。

4.3 山口らの指摘する要因

山口らの論文³⁾は、浸透破壊を展望した優れたものである。山口らは浸透破壊抵抗性を推定するために、9 ダムの基礎地盤の土質に対して、ガリ浸食に開発された洗掘抵抗試験などを実施して、興味ある成果を挙げている。注目すべきは、砂礫を含む粗粒土に対して（室内試験用試料の直径や高さが最大粒径の5倍程度以上必要との見解）、主に供試体の固結度を乱さない試料で再現すべく一軸強度との関係を調べた。最大の特徴は「限界動水勾配が1以上100を越す実験値が得られていること、および一軸圧縮強度と概略的に比例する限界動水勾配が得られていること」である。土質試料の固結度の大きい骨格構造が要因として指摘され、通常限界値1に近い議論から脱却した視点を示して、人工的地盤でない自然地盤のときの留意点を指摘した。

5. 判定基準は動水勾配が流速か

5.1 パイピング破壊の規準

本項では、先述の山口らの固結した自然地盤でなく、人工的に盛土した地盤を主に対象として議論する。鉛直上向きの浸透水によるパイピングは土粒子重量との平衡状態で規準化されてきた。粉体工学分野での「多粒子限界流速」の概念は、一粒子の平衡条件を考える地盤工学でも適用されるべきであって、流速を過大に推定してしまう懸念がある⁴⁾。一方、浸透水流が鉛直上向きから傾いてくると、破壊規準は「せん断」破壊成分が卓越するはずであるが、未だ定式化されていない。水平方向の法尻のパイピング破壊には後述する赤井の式が提案されている。後述するように、せん断破壊による解釈に統一で

きる可能性がある。

動水勾配と流速の関係は、本特集で梅村が取り上げる。

(a) 鉛直上向きのパイピング

【動水勾配の視点】 鉛直方向のパイピング破壊は、砂の真比重 G_s 、間隙比 e として、重量の平衡条件から導かれたテルツァーギの限界動水勾配 $i_c = (G_s - 1) / (1 + e)$ で表され、近似的に1に近い。多くの研究者により室内実験で確認されているが、誤差が数%ある。

関係する要因を挙げて述べる。三木らは次の3条件のとき発生しやすく、堤防法尻部で鉛直上向きパイピング実験で緩い密度では、限界動水勾配 $i_c = 0.33 \sim 0.45$ であったことを報告している⁵⁾。

- 1) 50% 粒径 $d_{50} \leq (0.3 \sim 0.4)$ mm の細砂
- 2) 細粒分含有率 $\leq 10\%$
- 3) 均等係数 $U_c \leq 5$

筆者の経験では、これに類似した現象が矢作川内の橋脚工事（細砂地盤で浅い数 m の掘削かつ広い数十 m の範囲）で見られた。矢作川では、くしくも限界動水勾配は三木らの値に一致する $0.33 \sim 0.5$ （場所的なばらつき）であった。一方、岐阜の砂礫地盤で深い十数 m の掘削かつ十 m 四方の狭い領域では、 $i_c = 1$ 程度までパイピングは発生せず、次の因子が効いたと考えられた。

4) 地層の拘束土圧が大きいと i_c も大きくなること

三木らは、細粒分が多いときや最大粒径が大きいときは、 $i_c = 1.5$ 程度の大きい値を局所的破壊時に観測している。掘削地盤で注意を要する事項は次項である。

5) 掘削面下の地層の変化

掘削面下から止水矢板等の深度までの地層の構成が均質でなく⁶⁾、上部の透水性が下部より高いとき動水勾配は小さく安全側になって、逆の土層構成のとき逆に湛水底面直下で勾配が大きく不安定側になる。

6) 通水断面積が変化するときのパイピング破壊

この問題は松本らが実験的に調べた⁷⁾。断面積が狭くなって浸透水が集中する箇所に生じやすい。円筒等断面試料のほかに台形状の供試体の下部から上向き浸透破壊させたときの上面で動水勾配が最大となるけれども、限界動水勾配も1より大きくなることを示した。筆者は流れの集中する浸透力に対して、砂試料の内部上面に土粒子の骨格構造に逆アーチ作用が発生したのではないかと推定する。これは後述する明渠排水や井戸排水による土砂の吸出しに関して大きめの動水勾配が期待できる可能性を示す。

【流速の視点】 動水勾配でなく、流速で表現した規準で考えるとき使われるのが「粒径（平均粒径）～浸透実流速」の関係図である。動水勾配と流速のいずれで考えても透水係数で関係付けられるが、原則的に鉛直上向きの浸透に対する実験データと対比すべきである。水平や傾斜した浸透流に対する動水勾配は鉛直上向きのテルツァーギ規準の1より小さく、流速もJustin式などより小さい。しかし、粉体工学分野で解明された多粒子限界流速は単粒子のときに比べて、次式で表される α 値は20～40分の1であって小さい値をとる⁴⁾。Richardson

によると⁸⁾,

$$v_n = \alpha v_c = n^{1/m} v_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 v_n : 多粒子限界流速、 v_c : 単粒子限界流速 (いずれも (cm/s)), n : 間隙率、 $1/m$: レイノルズ数 R_e の関数で与えられ⁴⁾, $R_e < 0.2$ のとき $1/m = 4.65$, $0.2 < R_e < 1.0$ のとき $1/m = 4.46 R_e^{-0.03}$, $1.0 < R_e < 500$ のとき $1/m = 4.46 R_e^{-0.1}$, $500 < R_e < 7000$ のとき $1/m = 2.39$ 。

すなわち、単粒子の限界流速に比べて実際の土質のように、多粒子がある地盤での多粒子限界流速は2桁も小さくなることに地盤工学関係者は目をふさいでいる。本特集の杉井らの論文で議論されるだろう。読者の注意を喚起したい。

また、本特集の前田らの間隙空気圧が浸透破壊に影響する研究は、小高や浅岡が指摘した浸透水中の空気の溶解を背景に、浸透する間隙断面積の減少、流れの集中、などの要素の影響を検討して、新展開が期待される。

(b) 水平方向のパイピング

冒頭の(A)で挙げた堤防の法尻部の浸透破壊は、規準が重量平衡規準ではなく、せん断破壊となる。赤井の式が単粒子のすべり出しに対して提案されている⁹⁾。

$$i \leq \frac{4}{3} c_f \frac{\gamma}{\gamma_w} (\tan \phi - \tan \theta) \cos \theta = i^* \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 i : 制御すべき動水勾配、 c_f : 土粒子の形状係数で0.75程度、 γ : 湿潤重量、 γ_w : 水の単位体積重量、 ϕ : せん断抵抗角、 θ : 裏法面の傾斜角。

式(2)によると、限界動水勾配 i^* は法面勾配 2 割～3 割の範囲で0.26～0.50程度である。したがって、鉛直方向より基準値は小さく発生しやすい¹⁰⁾。浸透変形の連成解析によれば、発生ひずみの視点から限界値は0.5とみなす見解もある¹¹⁾。現在、河川堤防設計指針では、設計動水勾配は水平方向も鉛直方向と同じ安全率2を見込んで、オランダと同一の基準値0.5に設定している。ところが、河川堤防点検はかなり不適合な箇所が多い結果となっている。古くから空石積みなどで法尻が保護されていたことが関係すると思われる。局部破壊の進行性が明確にされる過程で恒久的な対策に向けた努力が必要なる状況にある。

5.2 内部浸食の規準

(a) 内部浸食の発生条件

土中の破壊の際に、浸透水があるか無いかにより、一般の破壊基準と異なる内部浸食という呼称も奇妙であるが、浸透水が主因になることである。次に応力状態が素因となり、特に土質材料の初期条件が効くと考えられる。初期応力条件の把握は困難で、自然堆積地盤のそれは不明なことが多いため別の力学指標が欲しくなり、山口らの示した一軸圧縮強度はその代替因子と考えられる。締固めた人工地盤では土圧係数のような因子が考えられる。基本的に、浸透によって内部破壊したとき土の体積変化の増減が影響する。体積増加する土では相当に強い抵抗を示して山口らの限界動水勾配のように過大になる。体積減少するとき初めて空洞が発生して、破壊が周辺に拡大する。内部浸食の条件を考察しよう。

1) 浸透流のある飽和土の場合

土要素の破壊は間隙水圧を考慮するほかに、流れの影響、つまり浸透力を考慮して、付加する内部応力(体積力)として評価した上で、一般的に土の破壊条件としての成否を検討すればよい。ただし、土の体積変化量 ΔV が正: $\Delta V > 0$, $\Delta V = 0$ (等体積せん断破壊) および $\Delta V < 0$ の体積減少の場合(次述する2)参照)の場合分けした浸透変形連成解析を基に評価するのが論理であろう。いずれの場合でも体積変化の影響を受けた応力経路に依存する。体積増加するときは、かなり土としての抵抗力を発揮する。

σ_h' を水平主応力、 σ_v' を鉛直主応力、 ϕ' を内部摩擦角、 c を粘着力として、破壊規準は鉛直応力の減少に起因するので受働破壊条件の次式で表される。

$$\sigma_h' = \sigma_v' N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad \dots\dots\dots (3a)$$

$c' = 0$ のとき、

$$\sigma_h' = \sigma_v' N_\phi, N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2) \quad \dots\dots\dots (3b)$$

冒頭の(A)の上向きパイピングでは、 $\sigma_h' = \sigma_v' = 0$ の状態であるから単なる土粒子重量の平衡で判断された。

5.1(a)で述べた砂礫地盤の狭く深い掘削では側方拘束応力の影響は $\sigma_h' \geq \sigma_v' \neq 0$ に相当し、大きい抵抗を発揮する場合ではないかと考える。自然堆積している条件では(K : 土圧係数、 γ_w : 水の単位体積重量、 γ' : 水中の土の単位体積重量として)、 $K = K_p = N_\phi$ として、

$$\sigma_h' = \sigma_v' K, \gamma' z = (\gamma' - i_c \gamma_w) z K \therefore i_c = (1 - 1/N_\phi) \gamma' / \gamma_w \quad \dots\dots\dots (4)$$

主働土圧係数 K_A と受働土圧係数 K_P を用いれば一般的に、 $K_A (\cong 0.33) < K < K_P (\cong 3.0)$ であるので、受働破壊として $\phi = 30^\circ$ のとき $i_c \cong 0.67$ となる。観察された限界動水勾配が上記した力学的破壊と解釈できる可能性がある。細粒分が多いときなどの限界動水勾配1以上は受働破壊への過程とも考えられ、極めて危険な全般破壊につながる。

2) コラプスを起こす緩い土質の場合

緩い土質では、その崩壊領域の規模と形状の評価、および継続的な浸潤に伴う崩壊の進行の評価が必要である。このためには地盤の初期条件の把握が必修事項である。

(b) 浸食で発生した空洞の進行性

古代に灌漑用水路として建設されたカナート(三重県や中近東・イランに見られる)は、水路トンネルとして孔壁が水流に表面浸食され難い粘性土で保護された地層形式であれば安定して維持される。しかし、周辺地山の地下水位変動や流動と関係して空洞構造の安定条件を検討する必要がある。

自然や人工地盤内に発生する空洞の拡大は地表陥没にもつながる。本特集の久野らの検討は未固結地盤の陥没につながったもので、水みちの形成が認められた模様である。

㉔巨礫の混在する地盤、㉕水みちの形成を助長する異種土質の境界面、㉖埋設管など土中構造物周辺の土層構成、特に㉗掘削トンネルのような地山地層内の弱部、などに見られる浸透浸食の発生メカニズムは、個々の地盤

総 説

条件により変わるため、今後の研究課題である。地盤を大幅に変えることなく実施される対策の一つが、逆に、水みちを助長し兼ねないパイプ排水である。これについては、7.で考察する。一方、実際の工事では種々の対策がドレーン工法などとして実施されているので、次に概観する。

6. ドレーン（フィルター）材の規準

地盤湧水箇所の保護のため設定されるドレーンやフィルターは、治水施設の土構造物に設けられる。保護する土質の粒度とフィルター材の粒度を関連づけた規準は数多くあり、地盤工学ハンドブックには¹²⁾、大ダム会議提案のものと Sherard（シェラード）規準が紹介されている。フィルター材の粒径を D で、保護する原土質の粒径を d でそれぞれ表して、フィルターの選定規準の例を以下に示す。

$$\text{A) テルツァーギ¹³⁾: } \begin{cases} 4d_{15} \leq D_{15} \leq 5d_{85} \\ D_{15} \leq 20d_{15} \\ D_{50} \leq 25d_{50} \end{cases}$$

B) 河上・江刺式と類似式¹⁴⁾:

$$\log(D_{10}/d_{10} - a) = b/\log[(d_{10} - 0.001) \times 10^3] \dots\dots (5)$$

河上らは二つの定数 a, b を 2, 1.9 との提案に Thanika-chalam（タニカッチャラ）らは、3, 1.55 の修正と次式:

$$D_{60}/D_{10} \geq 0.915(D_{10}/d_{10}) - 4.575 \dots\dots (6)$$

を組み合わせる提案している¹⁴⁾。

C) 日本大ダム会議¹⁵⁾: ①フィルターと土砂の粒度が相似であること、②フィルター材は細粒分を5%以上含まないこと、を条件として、

$$5d_{15} \leq D_{15} \leq 5d_{85} \dots\dots (7)$$

D) アメリカ開拓局¹⁵⁾

比: $D_{50}/d_{50} = 5 \sim 10$ (均質フィルター)、 $9 \sim 30$ (角張った粒子)、 $12 \sim 58$ (丸い粒子) と比: $D_{15}/d_{15} = 6 \sim 18$ (角張った粒子)、 $12 \sim 40$ (丸い粒子)。

E) Sherard の規準 (2 mm 以下の含有率(A)で考える)¹²⁾

①細粒分含有率 $A = 100 \sim 85\%$: $D_{15} \leq 9d_{85}$,

② " $A = 85 \sim 40\%$: $D_{15} \leq 0.7(\text{mm})$

③ " $A = 15 \sim 0\%$: $D_{15} \leq 4d_{85}$

④ " $A = 40 \sim 15\%$: $D_{15} \leq 0.7 + (40 - A)(4d_{85} - 0.7)/25$ (mm)

これらに対して、逆に地盤注入工法における注入材の研究もあり、例えば神谷らは次の関係を結論している¹⁶⁾。ただし、彼らの提案するフィルター材の最小間隙径でなく、 D_{15} に置き換えて、次式となる。

$$D_{15} \leq 5.3d_{85} \dots\dots (8)$$

これらの保護する土質とフィルターの粒度分布の関係は理解しにくい、フィルター材の粒径は D_{10}, D_{15}, D_{50} と保護する土質の粒径は $d_{10}, d_{15}, d_{50}, d_{85}$ との関係である。

6.1 D_{15} への制約

フィルターは保護すべき土より大粒径であるから、各粒径より大きくなければならないが、過大を抑制する。規準名は括弧内に記号で記して、

1) d_{15} に対して、4~20倍(A)、5倍以下(C)、6~40倍

(D): フィルターの種類3種「角張った・均等・丸い」に対して)。

2) d_{85} に対して、5倍以下 ((A), (C)共通。神谷らの注入観点からは5.3倍の類似指針)。9倍以下4段階 (E): 細粒分含有率の4段階に対して)。

6.2 D_{50} への制約

1) d_{50} に対して、25倍以下(A)、5~58倍以下に3種類(D)。

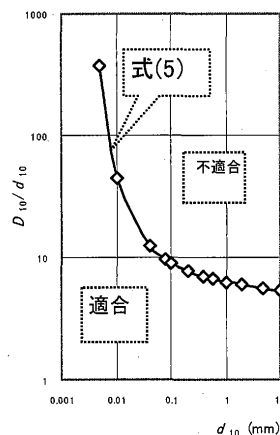
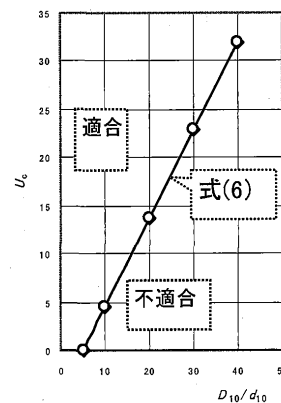
6.3 D_{10} と D_{60} への制約(B)

1) $D_{10}: d_{10}$ に対して式(5)で得る値以下。

2) $D_{60}: d_{10}$ に対する均等係数を式(6)で得る値以上。

6.4 考察

最近(E)の Sherard 法がよく使用されると聞く。先述の5法の中で、細粒分含有率が考慮されていること、および D_{15} への制御だけで済むことが理由であろうか。細粒分が考慮されている方法には(B)があり、均等係数を考慮する特徴がある図-1、図-2を参照すると、フィルターの U_c は大きく D_{10}/d_{10} は制約を受ける。

図-1 $d_{10} \sim U_c$ 関係図-2 $D_{10}/d_{10} \sim U_c$ 関係

一方、交付されたマニュアルに沿う設計業務が進められ、ドレーン工による対策が実施されている¹⁷⁾。しかし、補助フィルターの効果も含めて、全体の効果が確認されたケースが極めて少なく、工費の一部に検証費用を含めて実証する雰囲気づくりが必要である。

7. 堤防や斜面内の間隙水圧を低減するパイプ排水工の可能性

東海道の新幹線建設時に工夫されたパイプ排水工法は、従来山間部の湧水斜面の防災手段として利用されてきた¹⁸⁾。トンネル掘削工事でも、しばしば使用されるドレーン管の仕様、つまり管の適切なストレーナー条件は個人的な経験に基づいているのであろうか。斉藤迪孝氏のシンプルなストレーナーが鉄道盛土で成果を挙げている。一方、地山の土質は適度な範囲の透水性を持つとき浸潤面を低下させ、湧水量の大半を内部のパイプ排水により効果を発揮し得る。この浸透計算は誌面の都合で省くが、地山の内部浸食を抑制できるか否かの土砂吸出し防止の懸念に対してパイプ外周面での流速値を試算して考察する。

単純に、排水量をパイプ配水管の周辺断面積で割ると、管周辺の流速が概算できる。一例を試算してみよう。小さい砂模型堤防（透水係数が 6.7×10^{-2} cm/s 相当）の例であるが、ストレーナーを切った排水管（外径 6 cm, 内径 2.8 cm）の 1 m 延長当たり排水量が約 8 l/min であった。一様な流れではないけれど、管外周面積を単純に 28.3 cm^2 とすると、浸透流速は $2.83 \text{ cm/min} = 4.71 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。これとは別途に、トンネル湧水量では、1 m 延長の配水管（外径 10 cm 程度）で 500 l/min は珍しくない。このとき、管外周からの流入流速は平均的に、概略 1.06 cm/s である。動水勾配を 1 とすると、流速が透水係数の大きさになる。内部浸食の確認は模型では観察されず、透水係数に対する流速の比率は $4.71/6.7=0.7$ である。しかし、一様な流入流速ではないから、地山土砂の部分での流速は数倍変化するであろう。こう考えると、パイプ管排水の機構は周辺地山の内部浸食に意外と強い性質を持つ⁷⁾。勿論、トンネル地山内部に浸食が発生するけれども、土砂の吸い出しが意外にも抑制される土粒子のアーチ構造骨格が形成され得るのかと思考する¹⁾。

多くの技術者が懸念するもう一点は、パイプ外壁面に沿う浸食の発生であろう。これを制御するには、ストレーナーという有孔管としてのパイプ壁面に沿う地山土質との接触を十分に施工することである。ストレーナー一部を部分的に抑制するとか、パイプ内部にフィルターを設けることが考えられる¹⁸⁾。実際の模型実験でも確認できた例がある。

本項は、実務で必要性の高い課題と考えて論述した。

8. あとがき

本文は浸透破壊の発生、その分類、規準の有無、研究状況を展望しながら、従来から力学的関係を論じられにくい点に配慮して筆者の意見を整理して記述した。鉛直上向きのパイピング破壊に対する重量平衡でなく、土のせん断破壊現象と捉えて研究する姿勢が内部浸食には必修であり、統一的な解釈へ展開するべきだ。ここでは、フィルター材、パイプ排水工にも言及した。異論もあるかと想像するけれども、次の良い展開につながることを祈念して筆をおく。

本稿に際して、次の諸氏から種々の情報をいただいた。深甚の謝意を表する：福田光治（肥後地質調査㈱）、山口嘉一（㈱土木研究所）、森啓年（㈱土木研究所）、杉井俊夫（中部大学）、神谷浩二（岐阜大学）、馬場干児（応用地質㈱）、太田英将（太田ジオリサーチ）、井根健（㈱ニュージェック）、岩崎好規（㈱地域地盤環境研究所）。

参 考 文 献

- 1) M. E. Harr and D. Van. Zyl: Seepage Erosion Analyses of Structures, Proc. of 10th Int. Conf. on SMFE., Vol. 1, pp. 503~509, 1981.
- 2) 龍岡委員長ら会長特別委員会編集著：地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために一地盤工学会からの提言，2009年8月発行予定。
- 3) 山口嘉一・田原則雄・松本徳久：ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性に関する基礎的研究，応用地質，Vol. 35, No. 2, pp. 1~13, 1994.
- 4) 杉井俊夫・宇野尚雄・山田公夫・山田謹吾：浸透破壊における粒子群を考慮した限界流速，地下水技術，Vol. 39, No. 8, pp. 28~35, 1997. および杉井・佐藤・宇野・山田：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. 6, pp. 17~22, 1989.
- 5) 三木博史・山田哲也・藤井厚企・野口典孝：堤防基礎地盤のパイピング破壊規準に関する考察，土木研究所資料，37-12, 1995.
- 6) 宇野尚雄・坪井義久：砂礫地盤の掘削に伴う湧水の考察，土木学会中部支部研究発表会講演集，212-213, 1979. および宇野・東隆司：成層地盤の掘削部湧水の解析法，土と基礎，Vol. 37, No. 5, pp. 17~22, 1989.
- 7) 松本徳久・横井一秀・山口嘉一：通水断面積が変化する場合のパイピング特性，第25回土質工学研究発表会講演集，622, pp. 1673~1676, 1990.
- 8) Richardson, J. F. and Meikel, R. A.: Sedimentation and Fluidization III, Trans. Int. Chem. Engrs., Vol. 39, No. 5, pp. 348~356, 1961.
- 9) 赤井浩一：浸透水流による盛土裏法面の局所破壊について，土木学会論文集，No. 36, pp. 44~49, 1956.
- 10) 久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄：透水設計へのアプローチ，鹿島出版会，pp. 127~133, 1976.
- 11) 小高猛司・岡二三生・木元小百合・角南 進・加藤亮輔：不飽和浸透—変形連成解析による河川堤防の安全性評価，第50回地盤工学シンポジウム論文集，pp. 347~354, 2005.
- 12) 地盤工学ハンドブック，地盤工学会，pp. 1026~1028, 1999.
- 13) D. W. Taylor: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons. Inc., pp. 134~135, 1948.
- 14) V. Thanikachalam and R. Sakthivadivel: Grain Size Criteria for Protective Filters —An Enquiry, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, 13-24, 1974.
- 15) 宇梶文雄：フィルダム技術ノート，日刊工業新聞社，1979.
- 16) 神谷浩二・宇野尚雄：砂質土の間隙評価とその利用，地下水技術，Vol. 43, No. 2, pp. 33~43, 2001.
- 17) 青山俊行・中山 修・佐古俊介：ドレーン工設計マニュアル，(財)国土技術研究センター，JICE 資料，第198009号 (ISBN4-87759-009-9)，19p. (資料18)，1998.
- 18) 斉藤迪孝・上沢 弘・毛受貞久・安田祐作：有孔パイプによる新幹線盛土砂面の排水効果，鉄道技術研究報告，No. 631 (施設編 272号)，pp. 1~18, 1968. および山内紀雄：水抜き有孔パイプの効果に関する実験，鉄道技術研究報告，No. 82-1022, pp. 1~22, 1982.

(原稿受理 2009.5.25)