

砕石ドレーンにおける目詰まり防止に関する研究

伊藤克彦*・大北康治**・松澤 宏***

地盤の液状化防止に用いる砕石ドレーンの排水材には、高透水性と地震時に目詰まりを生じないといった相反する特性を兼備する必要がある。均等係数を変えた3種の砕石群の目詰まり実験を行った結果、地山砂の侵入した砕石の層（フィルターゾーン）が砕石の透水性を保護し、定常状態を維持する粒度範囲があることが分かった。この粒度範囲を明確にし、設計に活用することによって高透水性の砕石ドレーン築造を可能にした。

Keywords : gravel drain, clogging test, sand, liquefaction

1. ま え が き

地震時に液状化する可能性のある地盤へ、透水性が高い砕石等の排水材を打設し、地盤の透水性を改良して液状化を防止する工法の施工例が増加している¹⁾。砕石ドレーン工法を代表とするこれら液状化防止排水工法は、排水材を用い、地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制・消散させて液状化を防止する工法である²⁾。この工法は、Seedら^{3),4)}によって1976年に提案された工法であったが、当初は、排水材が目詰まりする懸念がある等の理由で、1,2の施工例を除き液状化防止対策工として採用されることはなかった。

従来、フィルダムや暗渠排水などにおいては、目詰まりを生じない排水材の選定基準としてTerzaghi⁶⁾の基準等⁷⁾が採用されている。しかしながら、この基準は、長期間の通水に対し土粒子の流亡や排水材の透水性の低下を防止することを目的として確立された基準である。

一方、地震継続中の短時間に発生する過剰間隙水圧をいち早く消散させる必要がある砕石ドレーンに関して、従来の粒度選定基準を適用することは、従来の基準が長期のものを評価するための基準であるので不適当である。液状化対策の砕石ドレーンでは、排水材の透水性を向上させることが必要であるが、これは長期的には排水材の目詰まり促進という相反する効果をもたらす。しかしながら、筆者らは、これら相反する関係の中で、排水材の透水性確保と地山砂による目詰まり防止の2つの条件を同時に満足する粒度の組合わせが存在すると考えた。

本論文は、砕石ドレーンに使用する排水材の短期目詰

まり防止基準を提案するものであるが、まず、長期の目詰まりを対象としてこれまでに提案された各種基準^{9)~14)}を分類し、それらを砕石ドレーンの粒度選定基準を検討するための参考とした。次に、排水材の短期目詰まり試験⁵⁾を実施し、その実験結果を基に、効果的な液状化防止機能を有する排水材の粒度選定基準を求めた。

2. 従来の粒度選定基準

フィルダムのフィルター材のように、長期にわたる排水安定性を主目的とするフィルター材と、比較的短期の間隙水圧消散を主目的とする砕石ドレーン材の粒度選定基準とを同一基準で比較することはできないが、目詰まりに関する既往の研究成果として提案されてきた基準の概略を以下に述べる。

フィルター材は周囲の土粒子の流出を防ぐと同時に、間隙水を速やかに排水させ、間隙水圧の上昇を防ぐ機能を持つ必要がある。Terzaghiが1920年に透水性と目詰まり防止特性の2機能を兼ね備えたフィルター材の選定基準を発表して以来、Bertram⁷⁾、Casagrande, U. S. B. R. (U. S. Bureau of Reclamation)¹⁴⁾、アメリカ陸軍工兵隊(U. S. Army Corps of Engineers)¹²⁾、Sherard⁸⁾、Vaughan¹⁰⁾、河上、西垣⁹⁾などによって多くの基準が提案されている。表-1は、これらのうち主な基準を示したものである。これらの基準を目詰まり状態を表す指標によって分類すれば、①パイピング比 (D_{F15}/D_{S85}) を指標とした基準、②粒径比 (D_{F15}/D_{S15} , D_{F50}/D_{S50} など) を指標とした基準、③その他の基準の3つに分類できる。ここで、 D は粒径を、添字のうち F と S はそれぞれフィルター材と地山試料を表し、これらに続く数値は加積通過率である。

(1) パイピング比を用いた基準

パイピング比を用いた基準にはTerzaghi, Bertramなどの基準があり、均一な試料を用いた実験結果から、排

* 正会員 工修 (株)鴻池組 東京技術部長
(〒101 東京都千代田区神田駿河台 2-3-11)

** 正会員 工修 (株)鴻池組 東京技術部

*** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部地盤工学教室

表-1 フィルター材に関する主な選定基準

提案者	適用材料	選定基準 (表中の添字は D_{F15} :フィルター材の15%粒径、 D_{S85} :地山試料85%粒径等を意味する)	発表年	分類
Terzaghi		$D_{F15}/D_{S10} > 4$ $D_{F15}/D_{S85} < 4$	1920	パイピング比
Bertram		$D_{F15}/D_{S10} > 9$ $D_{F15}/D_{S85} < 5$	1940	
アメリカ陸軍工兵隊 (U.S. Army Corps of Engineers)		$D_{F15}/D_{S10} = 5 \sim 20$ $D_{F15}/D_{S85} < 4$	1941	
U.S.B.R. (U.S. Bureau of Reclamation)		$D_{F15}/D_{S10} > 5 \sim 40$ $D_{F15}/D_{S85} < 5$	1960	
日本大ダム会議		$D_{F15}/D_{S10} > 5$ $D_{F15}/D_{S85} < 5$	1971	
Kjaernsli	やや丸い粒子	$D_{F15}/D_{S10} = 4 \sim 40$ $D_{F15}/D_{S85} < 25$	1982	
Sherard		$D_{F15}/D_{S85} < 9$	1984	
西垣		$D_{F15}/D_{S85} < 10$	1987	粒径比
U.S.B.R. (U.S. Bureau of Reclamation)	グレイテッドフィルター	$D_{F15}/D_{S10} = 12 \sim 40$ $D_{F50}/D_{S50} = 12 \sim 58$	1955	
	均一フィルター	$D_{F50}/D_{S50} = 5 \sim 10$		
U.S.B.R. (U.S. Bureau of Reclamation)	グレイテッドフィルター やや丸い粒子	$D_{F15}/D_{S10} = 12 \sim 40$ $D_{F50}/D_{S50} = 12 \sim 58$	1974	
	グレイテッドフィルター 角張った粒子	$D_{F15}/D_{S10} = 6 \sim 18$ $D_{F50}/D_{S50} = 9 \sim 30$		
	均一フィルター	$D_{F50}/D_{S50} = 5 \sim 10$		
河上		$\log \frac{D_{F10}}{D_{S10}} - 2 < \frac{9}{\log(D_{S10} - 0.001) \times 10^8}$	1966	
Wolski		ノモグラムより D_{F17} を規定	1970	
Vaughan		$k = 6.1 \times 10^{-6} \cdot \delta^{1.42}$ (k :透水係数、 δ :代表粒径)	1982	

水材内に流入する土粒子の85%粒径と排水材の15%粒径との関係を求め、目詰まり防止基準としている。また、現在この基準が土木工学の分野で主流とはなっているが、15%粒径、85%粒径を代表粒径とした根拠は不明確である。

(2) 粒径比を用いた基準

粒径比を用いた基準にはアメリカ開拓局(U.S.B.R.)の基準があり、主として農業土木の分野で利用されている。

U.S.B.R.の基準では、粒径比以外にも土の均等性や土粒子形状が留意されており、保護すべき土の粒度曲線とフィルター材の粒度曲線がほぼ平行な(均等係数がほぼ等しい)フィルター材を使用すると仮定した上で、平均粒径比によって規定している。また、グレイデッドフィルター(粒度分布の広がり大きなフィルター)の分布形状は15%粒径と平均粒径の2点で規定している。

均等性に関しては、粒度分布が均一なフィルター材とグレイデッドフィルター材とに分類しており、グレイデッドフィルター材は、さらに、粒形がやや丸い材料と角張った材料とに細分類されている。

この基準は、農業用の土構造物やフィルダム等は比較的小規模であるため、コア材や排水材、フィルター材として、それぞれについて均一な粒度分布の材料のみを使用できるとは限らず、先に述べたパイピング比を用いた

基準では不十分であるとの観点から提案されたものと考えられる。

(3) その他の基準

その他の基準としては、河上の基準、Vaughanの基準、Wolskiの基準などがあり、その多くは、透水性と目詰まり防止特性が不可分な関係にあるとして提案された基準である。河上の基準式には粒径比が含まれているが、透水性を表す10%粒径を指標としており、透水性を重視した基準であることがうかがえる。

Wolskiの基準は17%粒径を規定した基準であるが、実用上は15%粒径と同一と見なすことができる。この基準は、排水材の境界付近で土粒子(地山土砂)が乱され、これが間隙水と一体となりピンガム体として移動すると考えて、土粒子のレオロジカルなせん断抵抗と17%粒径の関係をノモグラムにまとめ、その図から基準値を求めている。したがって、土粒子を含む間隙水の混相流としての透水性を規定しているとも考えることもできるが、間隙水を多く含んだ土粒子の移動を規定しているとも考えることもできる。

Vaughanの基準は、排水材に侵入する地山砂試料の代表粒径 δ から排水材の透水性を規定しており、代表粒径には85%粒径(D_{F85})が用いられることが多い。代表粒径を何%にするかについては議論があるが、Kenney¹⁵⁾らが指摘するように、 k は排水材の透水係数、

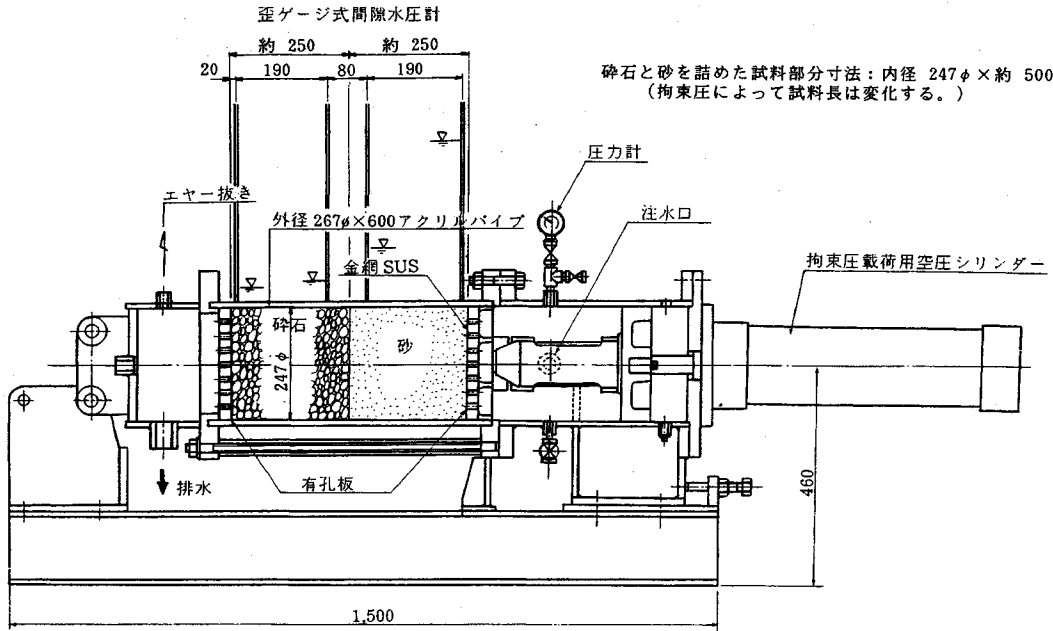


図-1 目詰まり試験装置

D_a を代表粒径, β_a を代表粒径の大きさによる定数, a を代表粒径の粒径加積率として, 透水性と土粒子径の間には, 下式に示す関係

$$k = \beta_a \cdot D_a^2$$

があることが認められており, 透水性を重視したその他の基準に分類されるものとパイピング比や粒径比を指標とした提案式とに本質的な相違は存在しないと考えられる。

3. 短期目詰まり試験

(1) 目詰まり試験装置

図-1に, 目詰まり試験装置を示す。排水材の目詰まり挙動を支配する要因を検討することを目的として作成した試験機であり, 砕石ドレーン打設地盤の一部を模擬している。すなわち, 内径 247 mm のアクリル円筒内の試料 (排水材と地山砂) に作用する有効拘束圧, 通水圧 (動水勾配, 間隙水圧) を変化させて, 排水材の目詰まり挙動を調べるための装置である。有効拘束圧は有孔板を介して空圧シリンダーにより供試体に載荷するようになっている。また, 間隙水圧 (動水勾配, 通水量) は外部のポンプ水圧を調整することによって変化させている。間隙水圧の測定には, アクリル円筒に取り付けた歪ゲージ式間隙水圧計を使用した。目詰まりの判定は, 透明アクリル円筒外側からの目視観察と試験装置外部に配置した流量計の通水量変化によって総合的に判断した。

(2) 実験に用いた試料

実験に用いた試料砂は, 市販の天然珪砂 4号~8号お

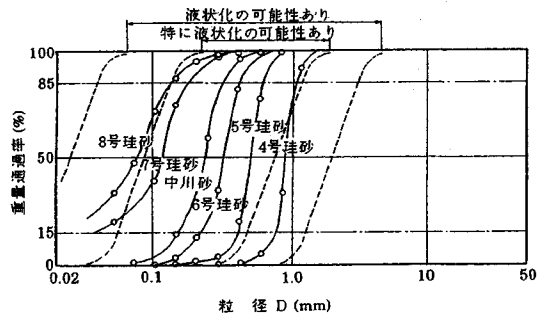


図-2 試料砂および液状化の可能性のある粒度範囲

よび川砂で, 粒度範囲は「特に液状化の可能性あり」とされている粒度範囲 (図-2 参照)¹⁰⁾ を覆うように 6 種類を選定した。排水材 (砕石) は, 市販の砕石をコンクリート骨材試験用ふるいでふるい分けたのち, 均等係数の異なる 3 シリーズの砕石群に粒度調整した。均等係数が比較的小さいシリーズ No.1 ($U_c=1.2\sim 1.4$) 10 種類の粒度曲線を図-3 に, また, 中間の均等係数を持つシリーズ No.2 ($U_c=2.5\sim 3.1$) 10 種類を図-4 に, 比較的均等係数の大きなシリーズ No.3 ($U_c=4.9\sim 6.9$) 10 種類を図-5 に示す。以上に述べた合計 30 種類の粒径および均等係数の異なる排水材を用意した。なお, 砂の物理特性は表-2 に示すとおりである。

(3) 実験方法

a) 実験手順

実験方法の概略手順を図-6 に示す。供試体の作製方法は, まず, 鉛直に立てたアクリル円筒内へ注水したの

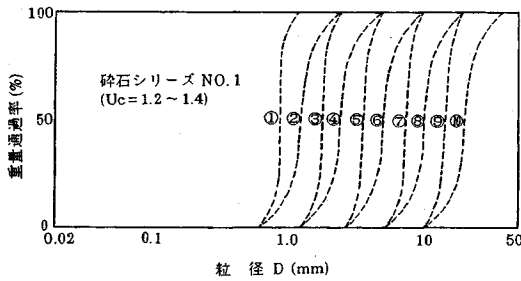


図-3 砕石の粒度・シリーズ No.1 ($U_c=1.2\sim 1.4$)

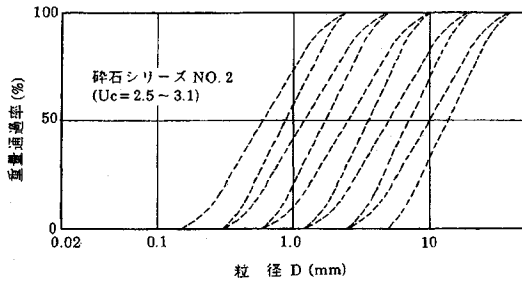


図-4 砕石の粒度・シリーズ No.2 ($U_c=2.5\sim 3.1$)

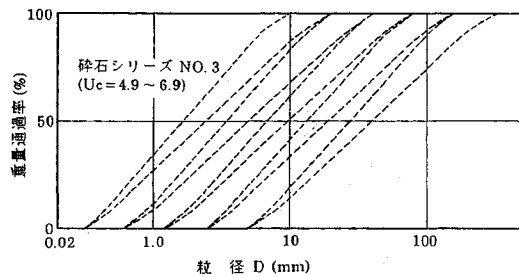


図-5 砕石の粒度・シリーズ No.3 ($U_c=4.9\sim 6.9$)

表-2. 試料砂の物理特性

試料	比重	最大間隙比	最小間隙比	試験時平均 相対密度 (%)
珪砂 4号	2.68	1.063	0.807	74.2
珪砂 5号	2.67	1.091	0.794	78.1
珪砂 6号	2.67	1.121	0.792	77.2
珪砂 7号	2.67	1.157	0.714	70.2
珪砂 8号	2.67	1.310	0.745	72.9
中川砂	2.75	1.241	0.728	89.0

ち、砕石を3層に分割して突き棒で1層20回突き固めた。次に、供試砂を投入し、表面が水平になるよう回数突き棒を差し入れたのち、載荷板を載せて拘束圧を加えた。その後、通水しながら試料の飽和度を高めた。拘束圧(全応力)を 2.0 kgf/cm^2 ($19.6 \times 10^4 \text{ Pa}$)の一定に保ち、ポンプによる通水圧を 0.4 kgf/cm^2 ($3.92 \times 10^4 \text{ Pa}$)ずつ5段階に変えた実験を行った。試料砂の間隙水圧が

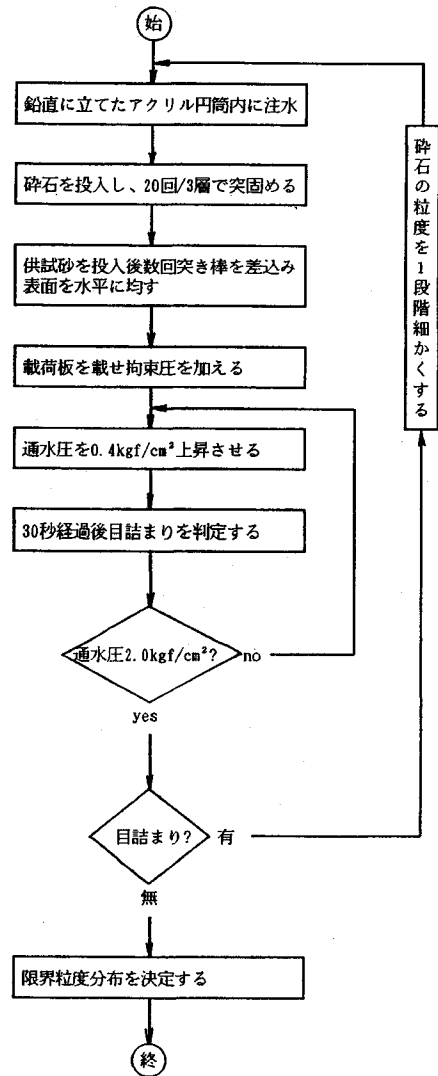


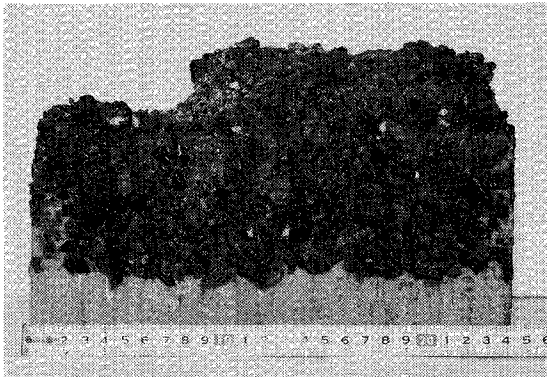
図-6 実験手順フロー

拘束圧に等しくなった時点(有効拘束圧がゼロ、すなわち、液状化した状態)で、昇圧30秒後に目詰まりの有無を通水量の変化とアクリル円筒を通した目視観察結果から判定した。

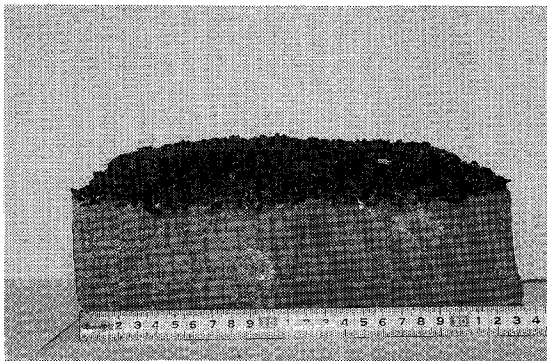
b) 目詰まりの判定

目詰まりの判定は、アクリル円筒外部から目視で観察し、①目詰まりを生じていないと判断される状態、②著しい流量の変化がない状態、の2条件を共に満たす状態を安定状態とし、これら以外は全て目詰まりを起こした状態と判定した。なお、目詰まりを生じていないと判断される状態には、

- 基準1: 試料砂が完全に排水材中へ入り込まない状態をもって目詰まりの無い状態とするもの
- 基準2: 試料砂の一部が排水材中に入り込んで安定し



写真一1 6号珪砂の(7号+6号)混合砕石への目詰まり状況
($D_{F15}/D_{S85}=8.2$)



写真一2 6号珪砂の7号砕石への目詰まり状況
($D_{F15}/D_{S85}=6.3$)

たフィルターゾーンを形成し、試料砂の流入によるそのフィルターゾーンの進行が止まった状態をもって目詰まりの無い状態とするもの

の2種類の判断基準が考えられたので、それぞれの基準について限界状態を求めた。

なお、本論文中で述べるフィルターゾーンとは、粒度の大きな排水材の中へ粒度の小さな地山砂が入り込み、複合した粒度分布を持つ新たな層として浸透水の浸透を維持するとともに、地山砂土粒子の流動を防ぐ機能を持つようになった領域をいう。

c) アクリル円筒壁面の影響

アクリル円筒外部から供試体表面を目視観察した結果と供試体内部の目詰まり状況が一致しているかどうかを凍結試料によって確認した。これには、目詰まり試験後の供試体表面に液化窒素を流して供試体を凍結させたのち、これを大きく破壊して排水材断面の目詰まり状況を観察した。

6号珪砂を用いた観察結果を写真一1, 2に示す。7号砕石と6号砕石を重量比で1:1に混合した供試体(排水材)($D_{F15}/D_{S85}=8.2$, 写真一1)では、アクリル壁面

に接している部分で間隙水の流下方向に約15mm程度、すなわち排水材の粒子個数で2,3個程度に供試砂が侵入している。しかし、供試体の中央部では約5mm程度侵入しているのにすぎなかった。したがって、アクリル円筒外側からの目視観察ではフィルターゾーン形成幅に10mm程度の測定誤差が生じることが考えられるが、実用上十分な精度を有していると判断した。

また、7号砕石を用いた供試体($D_{F15}/D_{S85}=6.3$, 写真一2)ではアクリル円筒に接する周辺部も中央部も目詰まりが生じておらず、この場合には、目視観察結果と供試体内部の状況は一致していた。

このように、フィルターゾーンが形成される場合、若干の測定誤差が入ると考えられるが、定量的には問題がないと判断し、目視観察で目詰まりを判定することとした。

d) 限界状態の排水材を求める手順

用意した6種類の供試砂に対して3シリーズで30回の実験、合計180回の実験を実施し、供試砂に対して目詰まりを生じない限界状態の排水材を求めた。

まず、シリーズ内で最も粗い排水材を試験し、目詰まりを起こしたと判定された場合には、順次粒度の細かい砕石を実験してゆき、最後に目詰まりを起こさない粒度分布の砕石が見つかるまで実験を続けた。このようにして、フィルター効果を有し目詰まりを起こさない粒度曲線の限界を求めた。例えば、シリーズNo.1の砕石(図一3)の場合、⑥で示す試料が目詰まりを生じた場合には⑤の試料を再試験する。⑤でも目詰まりした場合には④の試料について試験する。このように順次試料の粒度を細かくした実験を行い、目詰まりを生じない排水材の限界粒度を求めた。

(4) 実験結果および考察

目詰まりに影響を及ぼす要因としては、地山試料と排水材の粒度分布、粒径、粒子形状以外にも、①動水勾配(試験時の通水圧)、②供試体の拘束圧、③試験時の振動の有無が影響する可能性があり、これらの要因について実験結果を検討した。

① 動水勾配

砕石ドレーンを設置した地盤の有限要素解析結果³⁾から、フィルター材周辺には液状化発生時に高い動水勾配が発生することが予想されたので、試験時の通水圧を高め、動水勾配を5~400(大部分の実験は8~300)まで変化させて実験した。しかし、通水圧を上げ動水勾配を高くしても、目詰まりを生じない排水材の限界粒度(フィルター限界)に変化は認められなかった。

しかし、善ら¹⁶⁾の実験結果では、目詰まり長、目詰まり重量比は動水勾配によって変化することが報告されている(図一7)。これは、実験時の動水勾配*i*が、善ら¹⁶⁾のもの($i=0\sim 20$)よりも高く、目詰まり長(試料砂の

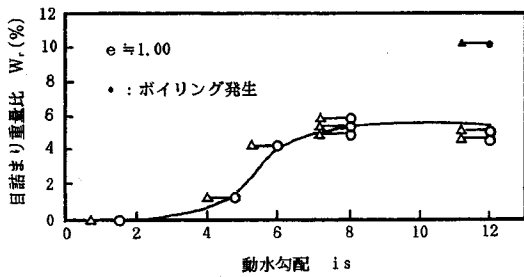


図-7 目詰まりと動水勾配の関係(善ら¹⁶⁾)

侵入長)に変化の生じる動水勾配 ($i=4\sim 6$) より大きい動水勾配の範囲を試験時の動水勾配としているためであると考える。

② 拘束圧

拘束圧を $0.4\sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($3.92\sim 19.6 \times 10^4 \text{ Pa}$) に変化させた実験を実施したが、目詰まり判断基準にかかわらず、フィルター限界に差異はなかった。善らの実験結果によっても上載圧(拘束圧)は目詰まり長、目詰まり量に影響しないことが確認されている。

③ 振動の影響

目詰まり試験機全体を振動する台(振動加速度約 200 gal, 周期約 70 Hz 程度の不規則振動をするバイブレーターを取り付けた台)に載せ、通水時に加振したが、この要因も目詰まり判断基準にかかわらず、フィルター限界に差異はなかった。

a) 基準1と基準2の目詰まり限界の比較

バイピング比を用いて基準1と基準2による目詰まり基準値を比較した。算定結果を表-3に示す。

基準1の実験結果から得られた目詰まり防止の基準は、

$$D_{F15}/D_{S85} < 6.4$$

であり、基準2の実験結果から得られた目詰まり防止基準は、

$$D_{F15}/D_{S85} < 9.2$$

である。

地山砂や排水材が図-8に示す二次元の均等径粒状体であると仮定して、これらの目詰まり基準を幾何学的に考察した場合、粒径の小さな材料が粒径の大きな材料中に入り込むかどうかは、間隙の大きさを算定することによってある程度判定できる。直径 D のフィルター材土粒子によって構成される間隙の大きさ d を幾何学的に求めると、間隙径が最大になる配列の場合と間隙径が最小になる配列の場合に対して、

$$d = (1/2.4) D \sim (1/6.5) D$$

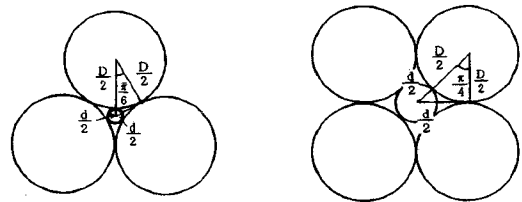
(最大間隙時) (最小間隙時)

となる。すなわち、 D を D_{F15} 、 d を D_{S85} と読み変えて、

表-3 目詰まり試験結果

基準値の比較				基準 1	基準 2
U_c	D_{S85}	D_{F15}^*	$D_{F15}^{\#}$	D_{F15}^*/D_{S85}	$D_{F15}^{\#}/D_{S85}$
1.2	0.14	0.84	0.99	6.0	7.1
	0.18	1.57	1.84	8.7	10.2
	0.30	1.66	3.1	5.5	10.3
	0.43	3.0	4.2	7.0	9.8
	0.62	6.3	7.8	10.2	12.6
	1.05	7.1	7.8	6.8	7.4
平均				7.4	9.6
2.5	0.14	0.82	1.45	5.9	10.4
	0.18	1.17	2.1	6.5	11.7
	0.30	2.1	2.1	7.0	7.0
	0.43	2.1	3.4	4.9	7.9
	0.62	4.1	4.4	6.6	7.1
	1.05	6.5	8.8	6.2	8.4
平均				6.2	8.7
4.9	0.14	0.44	0.54	3.1	3.9
	0.18	1.3	2.2	7.2	12.2
	0.30	1.3	2.2	4.3	7.3
	0.43	2.6	4.3	6.0	10.0
	0.62	5.0	8.9	8.1	14.4
	1.05	5.8	8.9	5.5	8.5
平均				5.7	9.4
総平均				6.4	9.2

#: 基準1による限界粒径、*: 基準2による限界粒径



$$\left[\frac{d}{2} + \frac{D}{2} \right] \cos \frac{\pi}{6} = \frac{D}{2} \quad \left[\frac{d}{2} + \frac{D}{2} \right] \cos \frac{\pi}{4} = \frac{D}{2}$$

(a) 最小間隙時 (b) 最大間隙時

図-8 二次元粒状体モデルによる間隙径の推定

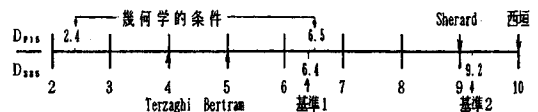


図-9 目詰まり基準値の比較

$$D_{F15}/D_{S85} \leq 2.4 \sim 6.5$$

(最大間隙時) (最小間隙時)

が幾何学的に考察した目詰まり防止基準である。

従来目詰まり基準値および筆者らの実験結果から目詰まり判断基準1、基準2に基づいて求めた目詰まり基準、さらに幾何学的考察によって求めた目詰まり基準値を整理したものが図-9である。幾何学的考察によって

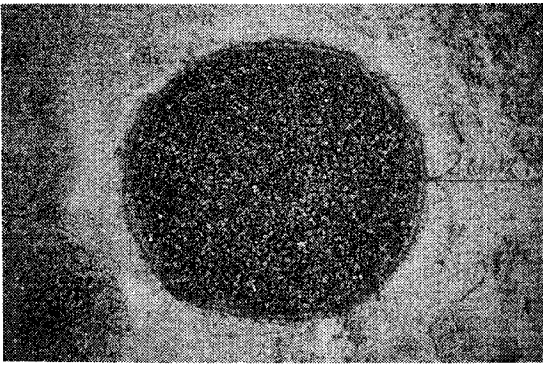


写真-3 加振実験による液状化後のドレーン断面

求めた最大間隙時の基準値と最小間隙時の基準値の間に、Terzaghi⁶⁾の基準値4およびBertram⁷⁾の基準値5、さらに、筆者らの基準1に基づいた実験値6.4が存在し、これら基準値の妥当性を示している。また、筆者らの実験値6.4は、最小間隙時に対応する基準値6.5と近似しており、最小間隙、すなわち、排水材が密な状態での基準値に相当していると考えられる。さらに、Sherard⁸⁾の基準値9や西垣⁹⁾の基準値10は筆者らの基準2に基づいた実験値9.2に近似している。

b) フィルターゾーンの形成幅（試料砂の侵入長）

目詰まり判断基準2の実験で形成されたフィルターゾーンの幅をアクリル円筒の外側から測定した。

試験開始30秒後に基準2に従って目詰まりを起こしていないと判断された供試体を観察し、試験に用いた砂がフィルター（排水材）内に侵入し、安定したフィルターゾーンを形成した部分の長さ（フィルターゾーンの形成幅）を測定したところ、フィルターゾーンの幅は全ての実験で2cm程度以下であった。

なお、この試験結果は、写真-3に示す実物大砕石ドレーンの振動台加振実験における液状化後の断面観察結果や善ら¹⁷⁾が実施した目詰まりに関する室内実験結果とも一致しており、ともに、フィルターゾーンの幅は最大4cmで大部分は2cm程度以下であったことが報告されている。

c) フィルターゾーンの透水性

排水材と試料砂の境界面付近で計測した動水勾配と通水量から逆算して、フィルターゾーンの透水係数を算定することができる。実験では、排水材と試料砂の境界面を挟むように動水勾配を測定した間隙水圧計測点間の長さ（8cm）は一定であるが、その範囲に含まれるフィルターゾーンの長さ（約2cm）および試料砂の長さ（約6cm）が実験ごとに異なるため厳密な透水係数は求められないが、この区間の概略の透水性は推定できるものとする。この方法で推定したフィルターゾーンの透水

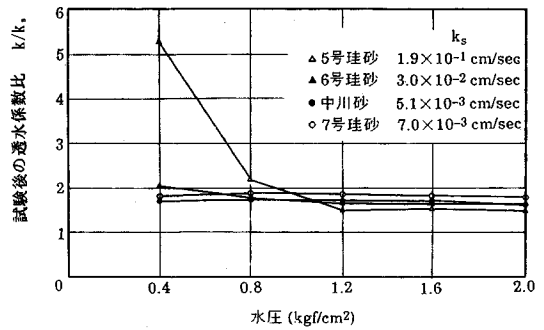


図-10 フィルターゾーンの透水係数

係数を図-10に示す。図-10では、均等係数1.2~1.4の砕石のうち、基準2の安定した目詰まり状態にあるフィルターゾーンの透水係数を試料砂の透水係数に対する比として示している。通水圧の増加にともなってフィルターゾーンの透水性はやや低下しているが、試料砂の透水係数のほぼ1.7倍程度の透水性を維持していることが分かる。この値は、フィルターゾーンと排水材部および試料砂部とを複合して求めた値ではあるが、形成されたフィルターゾーンにおける透水性は試料砂におけるものより低下することはないことを示していると考えられる。

4. 砕石ドレーンに適用する目詰まり防止基準

第2章で述べたように、各種の目詰まり基準が存在するが、砕石ドレーン材粒度の選定を対象とする基準を確立するためには、各基準における目詰まり状態の定義を明確に知る（する）必要がある。すなわち、土粒子の目詰まり挙動そのものを把握したのち、砕石ドレーンの排水材として要求される特性を考慮して目詰まり防止基準を確立しなくてはならない。

排水材と試料砂（地山砂）の境界付近に生じる状態を考察すると、図-11に示す3種の状態が存在すると考えられる。図-11(a)は試料砂が排水材の中に入り込めない状態を示しており、完全に目詰まりしていない状態である。図-11(b)は試料砂の一部が排水材中に入り込むが、安定したフィルターゾーンを形成して目詰まりの進行を防止している状態を示している。図-11(c)は排水材中に試料砂が入り込み、安定したフィルターゾーンが形成されず目詰まりを起こした状態を示している。目詰まり防止基準を規定するためには、安定したフィルターゾーンが形成されている状態を目詰まりに含めるかどうかの問題になる。

目詰まりの考え方としては、試料砂が一部でも排水材中に入り込んだ図-11(b)の状態は、目詰まりの状態であるとみなす考え方と、フィルターゾーンの形成によって目詰まりの進行が停止し、定常状態を保っている

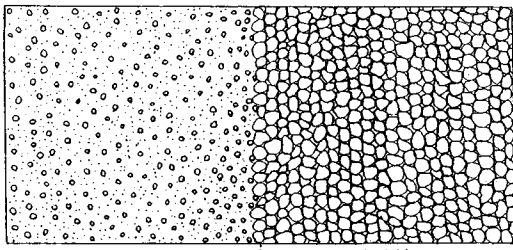


図-11 (a)

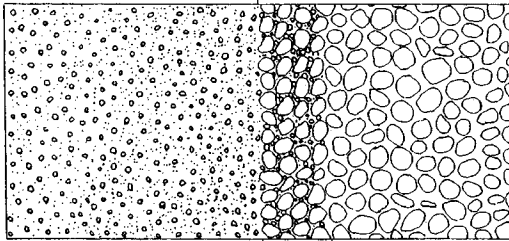


図-11 (b)

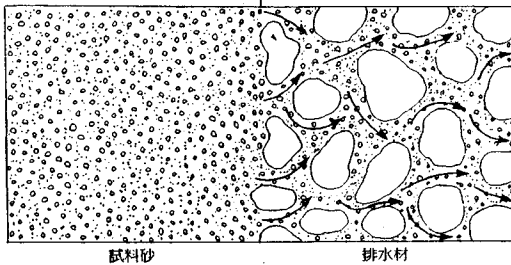


図-11 (c)

図-11 排水材の境界付近に生じる目詰まりの状態

ので、目詰まり状態ではないという考え方がある。前者の考え方に基づいた目詰まり判定基準が基準1に相当し、後者の考え方に基づいた目詰まり判定基準が基準2に相当している。どの判定基準を用いるかは、砕石ドレーンの用途および機能を勘案して決定する必要がある。

(1) 砕石ドレーンの機能を満足するための条件

砕石ドレーンの地盤液状化防止機能を満足するためには、目詰まりの防止と透水性の向上という相反する特性を両立させる必要がある。また、目詰まりを防止できる範囲内であれば、透水性はできるだけ高く維持した方が液状化防止効果が高くなる。図-11 (a) に示す基準1の状態は長期的にも目詰まりを防止することができるが、基準2 (図-11 (b)) と比較すれば排水材の粒径が6.4/9.2倍 (約0.7倍) に小さくなり、それとともに透水性も低下するので液状化防止効果も低下することとなる。このことを避けるためには、安定したフィルターゾーンの存在を許す基準2による目詰まり防止基準を採用

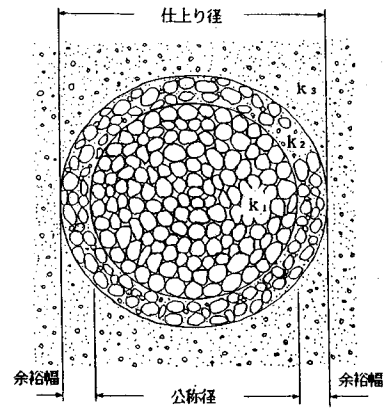


図-12 砕石ドレーンのフィルターゾーン模式図

用する必要がある。

すなわち、砕石ドレーンの機能維持に、目詰まりの完全防止 (基準1) を期することなく、安定したフィルターゾーンを形成することによって (基準2), より高い透水性を持った液状化防止効果のより高い砕石ドレーンの構築が可能となる。したがって、目詰まり防止基準として基準2を採用することが有利であると考えられる。

筆者らが対象とする砕石ドレーンの施工法は、打設地点の土砂をスパイラルオーガー付きのケーシングを用いて排土しながら貫入し、投入した砕石を突き棒で突固めながらケーシングを引き抜くものである。このため、図-12に模式図を示すように、ドレーンの仕上がり径はケーシング径の約1.1倍に増大することが、施工後の断面確認試験結果から分かっている。そこで、基準2を採用するためには、

- ① 安定なフィルターゾーンの形成幅が、砕石ドレーン打設余裕幅 (公称径と仕上がり径の差の半分) 以内にあること。
- ② フィルターゾーンの透水係数 k_2 は地山砂の透水係数 k_3 よりも高いこと。

を同時に満足する必要がある。この2条件を満足すれば、基準1で選定した排水材の透水性よりも高い透水性を有する基準2で選定した排水材を砕石ドレーンの排水材として選定することが可能となり、液状化防止効果の高い砕石ドレーンを施工することが可能となる。

(2) フィルターゾーン部の透水性

短期目詰まり実験で、フィルターゾーンを含んだ部分の透水性を逆算した結果によれば、 $k_1 > k_2 > k_3$ の関係を維持していることが判明した。また、図-13に示すように、砕石と砂を混合して測定した善らや西垣らの実験結果も、フィルターゾーンの透水係数 k_2 は地山砂の透水係数 k_3 より大きく、排水材の透水係数 k_1 より小さい、すなわち、 $k_1 > k_2 > k_3$ であることが報告されており、

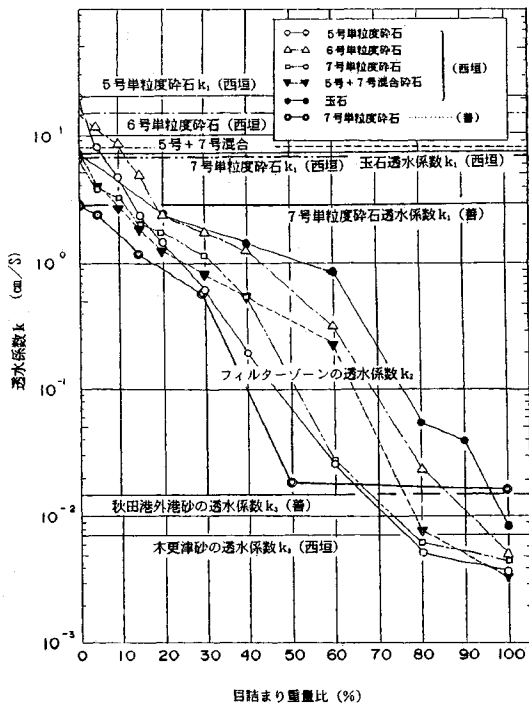


図-13 フィルターゾーンの透水係数
(原図西垣ら⁹⁾, 普ら¹⁶⁾)

筆者らの推定結果を裏付けている。したがって、フィルターゾーンの透水係数 k_2 が地山砂の透水係数 k_3 よりも高いという条件は満足されていることが分かる。

(3) フィルターゾーン形成幅

先に、砕石ドレーンの仕上がり径は約 1.1 倍に増大することを述べた。すなわち、公称径が 40 cm の砕石ドレーンは仕上がり径がほぼ 44 cm に、公称径が 50 cm のものは仕上がり径がほぼ 55 cm に増加する。したがって、公称径の余裕幅は 2.0 cm から 2.5 cm 程度あると考えられ、短期目詰まり実験によって測定されたフィルターゾーンの幅が 2 cm 程度以下であることを考え合わせると、フィルターゾーンは打設によって増大した余裕幅の中に納まることが分かる。すなわち、砕石ドレーンの施工に伴って杭径は増大し、フィルターゾーンの幅を除いたとしても、排水材の直径は公称径以上に確保される。

また、排水材の特性によってフィルターゾーン形成幅が打設時に増大した杭径の余裕幅以上になる場合にも、大きめの杭径を選定して余裕幅を大きく取れば、基準 2 によって排水材を選定することが可能となり、透水性が高く、液状化防止効果の高い砕石ドレーンとすることができる。

5. 結 論

砕石ドレーンに用いるフィルター材の目詰まり防止基

準を確立することを目的とし、有効拘束圧・通水圧（動水勾配、間隙水圧）等を変化させ、砕石ドレーン打設地盤を模擬することのできる大型の目詰まり試験機を試作して短期目詰まり試験を実施した。均等係数を変化させた 3 シリーズの排水材群を実験した結果と現場打設状況を勘案して、砕石ドレーンに適用する目詰まり防止基準とその適用方法を提案し、砕石ドレーンの目詰まり防止対策とした。

この研究によって、明確になった主要な結論を以下に示す。

(1) 土粒子が排水材の中に完全に入り込まない目詰まり防止基準（基準 1）は

$$D_{F15}/D_{S85} < 6.4$$

である。

(2) 安定なフィルターゾーンを形成して目詰まりを防止する基準（基準 2）は

$$D_{F15}/D_{S85} < 9.2$$

であり、そのときのフィルターゾーン形成幅は 2 cm 程度以下で、砕石ドレーン公称径と打設後の仕上がり径の差の半分、すなわち、施工時に生まれる余裕幅の中にある。

しかも、フィルターゾーンの透水性は、最大に低下した場合でも、試料砂の透水係数以下にはならない。

(3) したがって、地震という短時間の現象を対象とする砕石ドレーンの排水材目詰まり防止基準には、

$$D_{F15}/D_{S85} < 9.2$$

が適している。

以上のことから、砕石ドレーンの排水材には、多少の目詰まり領域の発生を許容しても、より高い透水性の確保ができるような粒度の材料を使用することが合理的である。

参 考 文 献

- 1) 田中幸久・中島豊・坪井英夫：対策工法，地盤の液状化対策に関するシンポジウム，pp.15-40，1991年1月。
- 2) 石原研而・斉藤彰・有馬宏：護岸液状化対策としての砕石パイルの適用例，Vol.28，No.4，pp.9-15，1980。
- 3) Seed, H.B. and J.R. Booker : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drain, Jour. of Geotechnical Division, ASCE, Vol. 103, No.GT7, pp.757-768, 1977.
- 4) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂，1980。
- 5) 大野義郎，伊藤克彦，南川洋士雄，大北康治：砕石ドレーンの短期目詰まり限界について，第19回土質工学研究発表会，pp.191-192，1984年6月。
- 6) Terzaghi, K. : Effect of Minor Geologic Detail on the Safety of Dams, Bulletin, American Institute of Mining Engineers, Technical Publication 215, 1926.
- 7) Bertram, G.E. : An Experimental Investigation of Protective Filters, Harvard Uni. Soil Mechanics Series No.7, 1940.

-
- 8) Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Tarbot, J.R. : Basic Properties of Sand and Gravel Filters, Jour. of Geotechnical Division, ASCE, Vol.110, No.6, pp.684~700, 1984.
- 9) 西垣 誠, 上山一彦, 奥山一典: グラベルドレーン材における目詰まり機構に関する実験的考察, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第3部, PS III-6, pp.12~13, 1987.
- 10) Vaughan, P.R. & Soares, H.F. : Design of filters for clay cores of dams. JGED, ASCE, Vol. 108, No.GT1, pp.17~31, 1982.
- 11) Wolski, W., Furstenberg, A., Mioduszewski, W. & Reczek, J. : Protection against piping of dam cores of flysch origin cohesive soils, Trans. X ICOLD, Vol. I, pp.575~585, Montreal, 1970.
- 12) U.S. Corps of Engineeriners : Investigation of Filter Requirement for Underdrains, WESTM, No.183-1, 1941.
- 13) Karpoff, K.P. : The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filters, Proceedings, American Society for Testing Materials, Vol.55, p.1183, 1955.
- 14) U.S. Bureau of Reclamation : Design of Small Dams, U.S. Government printing office, Washington 1960.
- 15) Kenney, T.C., Lau, D. and Ofoegbu, G.I. : Permeability of compacted granular materials, Can. Geotech. J. Vol.21, 1984.
- 16) 日本港湾協会 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979.
- 17) 善 功企, 大根田秀明, 入澤一明 : 砕石ドレーン材の目詰まり評価法に関する室内実験, 港湾技研資料, No.534, 1985.
- (1991. 4. 16 受付)
-

STUDY ON CLOGGING CRITERION FOR GRAVEL DRAIN

Katsuhiko ITO, Yasuji OKITA and Hiroshi MATSUZAWA

The materials for gravel drain piles are required properties for possessing both high permeability itself and a resistance to clogging due to fine grain filtration for the surrounding ground. However these requirements are inconsistent with each other. Two states of no-clogging criterion can be considered : one is the state that no particle of surrounding ground goes into the drain pile. The other is the state that some particle goes into drain pile and forms a stable filter zone which keeps the constant condition for permanence. The latter has higher permeability and is more suitable for countermeasure against liquefaction. This paper presents short term clogging test and moreover suggests a new criterion for no clogging of drain material based on the results of the above experiment.
