

盛土中に敷設するジオテキスタイル排水材の目詰りによる透水性低下の予測に関する研究

林 英雄¹・森 麟²

¹正会員 (株)フジタ関東支店営業専門部長 (〒151 渋谷区千駄ヶ谷 5-23-7 フジタ代々木ビル)

²名誉会員 早稲田大学名誉教授 (〒169 新宿区大久保 3-4-1)

盛土中や盛土の基礎地盤上に敷設する面状排水材としてジオテキスタイルを使用することが多い。この面状排水層の設計に当たっては排水材の目詰りの結果生ずる透水性の低下を予測して、その低下量を考慮したうえで排水層の設計を行うべきである。しかし、この低下量は排水材の種類によって異なるので、工事に使用する種々の排水材の低下量の予測が必要である。このため、実情に合った予測試験方法を研究し、その方法によって各種排水材の目詰りによる透水性の低下量を簡便に予測できることを示した。

Key Words: *clogging, geotextile drainage, nonwoven geotextile, geo-composite, permeability, soil particle size, laboratory test, field test*

1. まえがき

盛土中や盛土の基礎地盤上に水平方向に排水層を敷設して盛土中の浸透水や盛土基礎の軟弱な粘性土層からの圧密排水を流下させて盛土外に流出させる面状の排水材としてジオテキスタイルを用いることが多い。この場合、盛土荷重によって排水材が圧縮されて排水材の厚さが減少するとともに透水係数が低下する結果、排水層の面内方向(水平方向)の通水能力が低下する。また、土中から懸濁液として排水材に流入する土粒子によって排水材に目詰りが発生し、その結果、排水材の透水性が一層低下する。このため、上記の現象を定量的に把握し、排水層全体としての透水性低下を考慮したうえで排水層の設計をすることが大切である。

本研究の目的は盛土中のフィルター層や盛土基礎部のサンドマット層としてジオテキスタイル排水材を使用するとき、排水材に接する土層からの流入土粒子によって排水材に目詰りを発生させる結果生ずる面内方向の透水性の低下量を予測することであり、その予測値を用いて排水層の設計に役立てることである。

目詰りによる透水性の低下量は排水材の種類によって異なるので、使用する排水材について透水性の低下量の予測をする必要がある。ジオテキスタイル排水材の目詰りによる透水性低下について従来行われている試験¹⁾は鉛直流入・流下条件での動水勾配比透水試験や長期透水試験などがある。しかし、これらの試験条件が実際の現場の状況を十分にはシミュレートしていないということと、試験期間を長く要するという問題があった。

わが国でも土質工学会基準案 JSF931-199X, 932-199X など通水性能試験方法が提案されているが、目詰りによる透水性の低下については提示されていないのが現状である。また、本研究で提案した試験法の特長は試験条件が現場の状況をシミュレートできること、また、試験期間を短縮できることである。また、排水層全体の透水性は下流端の目詰り後の低下状況に支配されることに着目し、その低下率の合理的予測を提示した。

また、本試験方法で求めた目詰りによる透水性の低下率の妥当性を現場試験により検証し、本試験法によりジオテキスタイル排水材の目詰り後の透水係数の予測値を簡便に求められることを示した。

2. 排水層の構造と排水材の選定

(1) 排水層の構造

盛土中のフィルター層やサンドマット層として面状に敷設された面内方向排水層の構造は図-1 に示すように(A)は排水材を全面に敷設する場合で、排水路をある間隔毎に設ける。このときの排水材の集水の分担長は図に示すように排水路間隔の1/2となり、排水路には有孔パイプ等を使用する。

(B)は盛土法面の安定の目的で排水材を法面付近のみに敷設する場合を示しており、排水路を設けない。従って、この場合の集水分担長は図に示すように排水材の長さになる。集水された水は排水材の下流端から盛土の外部に直接排水する。

表一 排水材の圧縮特性と面内方向透水性

$1\text{Kgf/cm}^2 = 98\text{KN/m}^2$

圧力 kgf/cm ²	不織布		複合型	
	厚さ (mm)	透水係数 (cm/sec)	厚さ (mm)	透水係数 (cm/sec)
1.0	2.18	1.41×10^{-1}	2.40	3.52×10^{-1}
2.0	1.70	8.14×10^{-2}	1.90	1.51×10^{-1}
3.0	1.48	7.32×10^{-2}	1.80	8.85×10^{-2}

表二 締固め土の土性値

土質	粒度組成(%)			塑性指数	最適含水比(%)
	砂	シルト	粘土		
凝灰質粘土	11	38	51	72	35
立川ローム	20	55	25	70	86
シルト質砂	59	31	10	-	23
粘質土	34	40	26	16	22

(2) 排水材の選定

排水材に使用するジオテキスタイルの種類として、主なものは不織布とその複合型（以下、複合型）、織布、複合管路型に分類され、それぞれに数種類がある。排水材を選定する場合は排水材そのものの通水能力が大きく、かつ、土粒子の流入の結果生ずる目詰りによる透水性低下が少なく、経済性の良いことを条件として選定することが重要である。

(3) 本研究に用いた排水材

上に述べた不織布、複合型、織布、複合管路型排水材の内、織布は厚さが一般に薄いため、通水能力が小さいこと、また、複合管路型は通水能力は高いが、材料費が高価なので除外し、ここでは比較的通水能力が確保でき、安価な材料であることを重視して不織布と複合型を取り上げた。これらの排水材にはそれぞれ数種の品目があるが、その中から拘束圧 $0.5 \sim 2.0\text{kgf/cm}^2$ の状態で清水による通水能力の最も良いものを選んだ。不織布はポリプロピレンを主材料とし、ニードルパンチ方式で製造されたもの、また、複合型はコードカーペット（短繊維不織布）の表層にスパンボンド不織布を融着繊維で固定した構造のものである。これら不織布と複合型の圧縮特性と面内方向透水性について表一に示す。

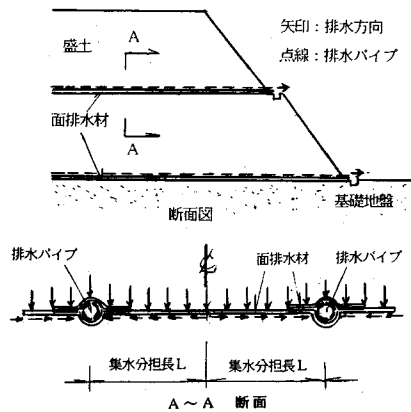
3. 土層から排水材に負荷される土粒子流出状況

(1) 土層からの土粒子流出試験

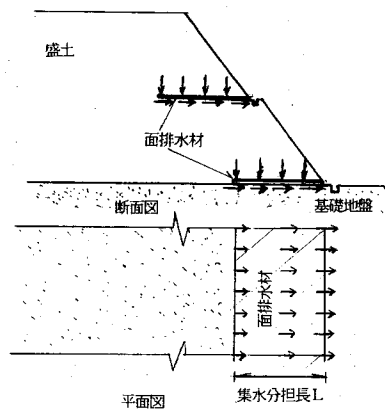
a) 締固め土からの土粒子流出量試験

直径 10cm、高さ 20cm のモールドを使用して 2.5kg のランマーを用いて JIS A1210 相当の締固めエネルギーで土を締固めて試料を作成し、試験に要する時間を

(A) 排水パイプを設ける場合（排水材を全面に敷設）



(B) 排水パイプを設けない場合（排水材を法面付近にのみ敷設）



図一 排水材の敷設状況と集水分担長

短縮するために動水勾配を実状のほぼ 1.0 よりかなり大きい 10 に設定して定水位条件（水頭差 200cm）で透水試験を行ったときの時間と排水量、濃度を測定して試料下端からの土粒子流出量を求めた。試験時間を短縮するために動水勾配を 10 に設定したが、動水勾配を 10 以下に設定すれば、動水勾配の大小が流出する土粒子の総量と排水量～濃度関係に殆ど影響を与えないことを確認していたからである。

また、供試体の厚さを 20cm とした理由は、それ以上の厚さとしたときの結果とほぼ同値になることが試料高さを変えた別の試験²⁾から判っていたためである。懸濁液が流出する供試体の下端に $200\mu\text{m}$ の金網を 2 枚重ねてセットした。流出した懸濁液の濃度は光散乱式の濁度計を使用して測定した。試験に使用した土質は関東地方での盛土材として広く使用されている土質を対象とし、火山灰性常総粘土（以下、凝灰質粘土）、立川ローム、シルト質砂、粘質土であり、表二に土性値を示す。

b) 軟弱粘性土の圧密排水による土粒子流出量試験

直径 10cm, 高さ 20cm の供試体を三軸室で等方圧密条件 (底面排水) で圧密したときの圧密排水中に含まれる土粒子の濃度, 土粒子総量を測定する. 不攪乱の試料を使用し圧密降伏応力で圧密後, 所定の圧密増加応力で圧密したケース, 段階増加応力を載荷するケース, 増加応力経路を変化させたケースについて圧密増加応力を最大 1.5kgf/cm² まで増加させた試験をした. 供試体の高さを 20cm としたのは, 別の試験⁹⁾で供試体の長さを変えて行った試験から 20cm の高さがあれば現場の圧密土層条件をシミュレートできることを確認したからである.

また, 施工中に軟弱粘性土の表面が乱された後に圧密される場合を対象として, 乱された試料を圧密する試験⁹⁾を実施した. この場合, 現場で土層が乱される深さが高々 20cm であることを考慮して供試体の長さを 10cm, 15cm, 20cm とした.

試験中に試料の底面の崩壊を防止するために多孔盤と試料との間に 200 μ m の金網を挟んだ.

試験に使用した土質は沖積シルト, 凝灰質粘土, 沖積粘土などを使用した.

現場での排水材の敷設時に, 排水層を防護するために敷設直後に 30~50cm の盛土をするので, 圧密増加応力は盛土荷重に近い値で, 試験精度を考慮した応力 0.15 kgf/cm² に設定した.

(2) 締固め盛土および軟弱粘性土基礎地盤からの土粒子流出状況

a) 締固め土からの土粒子流出状況

締固め土からの土粒子の流出量は土の締固め含水比に大きく影響されることから, 締固め含水比を変化させたときに流出する土粒子の総量, 濃度, 粒度を調べた. 流出する土粒子の濃度は各土質とも透水開始とともに濃度は最大濃度の値から急激に低下するが, その後は逐次緩やかに低下し最小値に近づく. その後, 土粒子の流出が殆ど止まる状態となる. このときまでの透水量を“限界透水量”⁹⁾と呼ぶことにする. この限界透水量 (単位底面積当たり水量 cm³/cm²) は締固め含水比によって変化し, シルト質砂では 4~8, 立川ロームでは 1.5~6, 粘質土では 2~6, 凝灰質粘土では 0.3~1.6 になる.

限界透水量を土の間隙率から換算して水の土中高さで示すと, シルト質砂 8~20cm, 立川ローム 3~15cm, 粘質土 4~15cm, 凝灰質粘土 1~4cm となる. 限界透水量はいずれの土質も締固め含水比が低いほど大きくなっている. 細粒分が多く, また, 流路となる土の間隙が比較的小さくて土層内に目詰りをおこしやすい粘性土では下流端 (排水層) から高々 15cm 上方迄の土層が, 一方, 細粒分が少なく, 土の間隙が比較的大きく土層内に目詰り

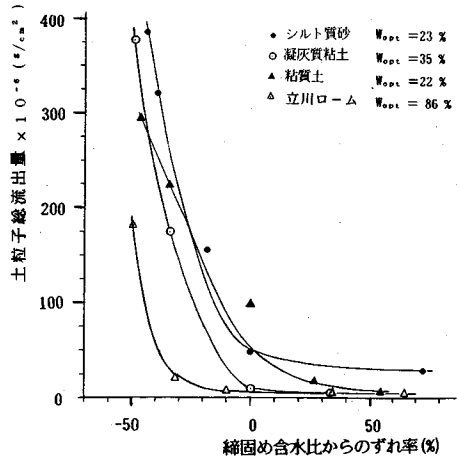


図-2 締固め含水比の最適含水比からのずれ率と土粒子総流出量

をおこしにくいシルト質砂では下流端から高々 20cm 上方迄の土層が土粒子の流出に影響するものと考えられる.

このことから試験で用いる試料高さを 20cm に設定したことの妥当性が裏付けられた. このように, 土粒子の流出に影響する土層厚が高々 20cm 程度で実際の土層高より小さいのは土層の最下部付近まで流下した土粒子が集積してフィルター層が形成される^{1),6),7)}. その後流下した土粒子がこのフィルター層で捕捉されるために, その後に流下する土粒子の流出を止めることとなる.

図-2 は締固め含水比 (w) の最適含水比 (w_{opt}) からのずれ率 $(w - w_{opt}) / w_{opt} \times 100\%$ と土粒子総流出量の関係を示す. 各土質とも締固め含水比のずれ率がプラス側になると土粒子総流出量は減少し, マイナス側になると土粒子総流出量が急激に増加する傾向を示す. これは締固め土の透水性が最適含水比よりやや低くなると急激に増加するので, 透水速度が増加することが大きな理由であると考えられる.

試験結果から土粒子総流出量は各土質とも締固め含水比により変化し多い順に, シルト質砂 $386 \sim 30 \times 10^6$ g/cm², 凝灰質粘土 $378 \sim 6 \times 10^6$ g/cm², 粘質土 $294 \sim 8 \times 10^6$ g/cm², 立川ローム $180 \sim 4 \times 10^6$ g/cm² となっている^{2),4)}.

この土質の順は表-2 の細粒分の含有量, 塑性指数との関連性は認められない. 土粒子流出量は土中の細粒子と粗粒子との付着力の大きさに支配されると考えられるが, 前 2 者の総流出量が多いのは付着力が小さいことによるためと思われる.

土粒子総流出量の最大値の設定は締固め含水比が小さくなると各土質とも土粒子総流出量は増加するが, 図-

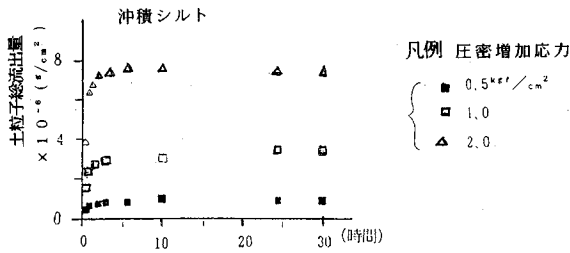


図-3.1 時間と土粒子の総流出量の関係
1Kgf/cm²=98KN/m²

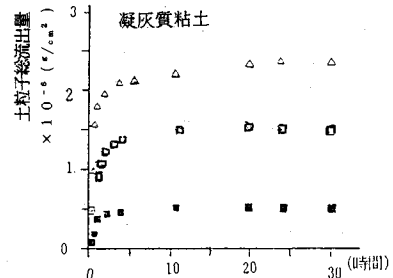


図-3.2 時間と土粒子の総流出量の関係

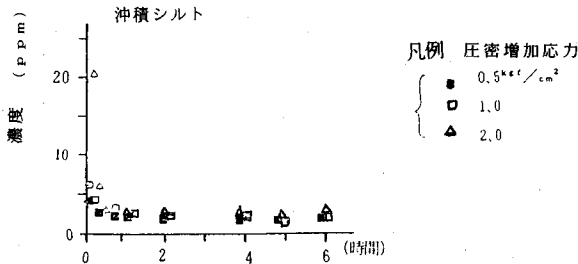


図-3.3 時間と土粒子の濃度の関係

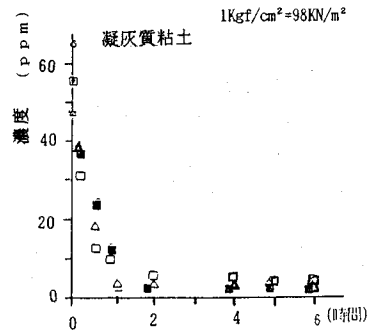


図-3.4 時間と土粒子の濃度の関係

2より締めめ含水比の最適含水比からのずれの比率が-45~-50%程度のときの値を考慮しておけば、現場で盛土材の締めめ含水比が低下する状況を考慮しても、一応安全側の値になるものと考えられる。

従って、締めめ土からの土粒子総流出量の最大値としては凝灰質粘土、シルト質砂の値から $380 \sim 390 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2$ 程度とすることができる。実際には盛土内水位が上下するので、この影響を調査するため、設定水位の200cmから0に低下させて24時間放置し、再び水位を元に戻す“不飽和状態繰り返し流出試験”を行ったが、土粒子の流出総量、濃度に与える影響は認められなかった²⁾。流出土粒子の初期の濃度は200~300ppmであり排水量の増加とともに濃度は減少する。土粒子の濃度に関しては、最終的に濃度は流出する土粒子総量がそれぞれ一定値に近づく傾向があることから0に近づくものと推測できる。各土質の流出懸濁液の平均濃度を流出土粒子総量を限界透水量で除した値から求めると約20ppmである。また、土粒子の最大粒径は80 μm 、 D_{60} は18 μm (凝灰質粘土)から38 μm (シルト質砂) D_{10} は4.5 μm (凝灰質粘土)から8 μm (シルト質砂)の範囲にあることが判った。なお、締めめ土の粒度と流出土粒子の粒度との明確な関連性は認められなかった。

b) 軟弱粘性土の圧密排水に含まれる土粒子流出状況

①不攪乱状態の場合 軟弱な粘性土の圧密排水中に含まれる土粒子の濃度、総量、粒度を明らかにするために、等方圧密試験(底面排水)を行った。圧密増加応力を一定にして圧密したときの時間と土粒子の流出量との関係を図-3.1、図-3.2に、また試験に用いた試

表-3 供試体の土性値

土質	最大粒径 (mm)	自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性指数	圧密降伏応力 (Kgf/cm ²)
沖積シルト	0.84	61	55	2.4	0.94
凝灰質粘土	0.84	56	75	3.9	3.00
沖積粘土	0.25	68	71	3.4	1.70

1Kgf/cm²=98KN/m²

料の土性値を表-3に示す。沖積シルト、凝灰質粘土(洪積)とも予め圧密降伏応力で圧密完了後、圧密増加応力を載荷したが、両土質とも圧密増加応力を作用させると土粒子が流出しており、時間とともに土粒子流出量が増加して一定値に近づく傾向を示している。しかし、圧密による土粒子の流出総量は試料長にかかわらず3.(2)a)に述べた締めめ土からの流出量に比べて極端に少なく、沖積シルトの場合、約 $2 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2$ 、凝灰質粘土の場合、約 $7 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2$ 、沖積粘土の場合、約 $10 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2$ となり、軟弱な粘性土の圧密排水からの土粒子流出総量の最大値として $10 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2$ を考えれば良いと思われる。

濃度については図-3.3、図-3.4に示す。流出濃度は圧密応力が作用した直後の初期濃度が大きく、最大20ppmから急激に低下し、その後約10時間経過後、殆ど0に近付いている。流出総量が一定値に近づくことから時間経過ともない濃度は0になると考えられる。圧密

表-3 供試体の土性値と流出土粒子の濃度, 土粒子総量

土質	自然含水比 %	砂 %	シルト %	粘土 %	塑性指数	締固め含水比 %	初期濃度 ppm	流出土粒子総量 $\times 10^{-6}$ g/cm ²
凝灰質粘土	54	11	38	51	72	52, 54, 58	16 ~ 19	2 ~ 4
沖積シルト	44	43	34	23	24	44, 36, 31	7 ~ 19	2 ~ 7
沖積粘土	78	2	49	49	48	78, 74, 68	28 ~ 54	4 ~ 11
立川ロ-A	110	10	45	45	71	119, 131, 142	4 ~ 10	1 ~ 2

応力を作用させることによって土粒子が流出する原因として、圧密応力の増加によって土の骨格構造に乱れを生じて、圧密排水とともに土粒子が流出するものと考えられる。圧密応力の増加経路が土粒子の流出量に与える影響について試験を行った結果⁹⁾、沖積シルト、凝灰質粘土、沖積粘土ともその影響は殆ど認められなかった。圧密流出した土粒子の粒度は最大粒径 60~80 μ m で大部分の土粒子は 40 μ m 以下である。なお、実験に用いた 3 種の土の粒度と流出土粒子の粒度には明確な関連性が認められなかった。圧密によって排水材に流入する土粒子総量は約 10×10^{-6} g/cm² であり、締固め土からの負荷量に比べて極めて小さい値である。

②攪乱状態の場合 盛土基礎地盤が粘性土の場合には、地盤が乱された後、盛土荷重によって圧密されることがある。このような状況を想定したときの圧密排水中に含まれる土粒子の流出量を試験により求めた。試験結果は表-3 に示すが、土粒子の総流出量は最大 11×10^{-6} g/cm²、濃度の最大値は載荷直後に 54ppm となり、乱されない粘性土の試験結果とほぼ近い値である⁹⁾。

(3) 排水材に負荷する懸濁液及び流入水頭差の設定条件

既に述べたように締固め土から流出する土粒子総流出量の最大値が $380 \sim 390 \times 10^{-6}$ g/cm² であり、軟弱な粘性土の基礎地盤からの土粒子流出量の設定値は不攪乱の軟弱粘土の圧密流出試験から、 10×10^{-6} g/cm²、また乱された軟弱粘土の圧密流出試験から 11×10^{-6} g/cm² となることから、ここでは排水材に負荷する土粒子の総負荷量の設定条件として上記の各値を加えた 400×10^{-6} g/cm² を設定する。その場合、図-1 において、排水材の下流端での単位幅当たりの土粒子流入総量は下記ようになる。

面排水層に設置する排水路間隔は図-1 (A) のとき、一般に 10m 程度であるので、排水材の排水分担長は 5m となる。また、(B) の場合の分担長もおおむね 5m 程度とする場合が多いので、設定総量は $500 \text{cm} \times 400 \times 10^{-6} \text{g/cm} = 200,000 \times 10^{-6} \text{g/cm}$ である。目盛り試験に使用する懸濁液の設定濃度は土粒子流出量のほぼ全量が盛土からの流出量であるので、3.(2).a)の検討結果から、透水量が $3 \sim 4 \text{cm}^3/\text{cm}^2$ までは 100ppm とし、その後は 20

ppm 程度の濃度を設定すれば良いと考えられる。しかし、濃度が 120ppm, 40ppm, 20ppm の懸濁液の流入試験から、目盛り量は濃度に殆ど無関係であることが判かっている⁹⁾、初期の濃い濃度を用いずに、試験時の濃度の調整管理が比較的簡単である 20~40ppm の範囲で濃度は一定のものを用いることにした。懸濁液の土粒子粒度は次のようなことを考慮して設定した。3.(2).a)より、締固め土からの流出土粒子の最大粒径はいずれの土も 80 μ m であり、 $D_{60}=18$ (凝灰質粘土) ~ 38 μ m (シルト質砂)、 $D_{10}=4.5$ (凝灰質粘土) ~ 8 μ m (シルト質砂) である。また、4.(5)の結果から⁹⁾、粒径 10 μ m 以下の目盛り量が透水係数の低下の影響程度がやや大きいことが判ったので、試験に用いる懸濁液の土粒子の粒度は盛土材として粒径がかなり細かい方に属す凝灰質粘土程度を考えるのが安全と思われる。従って、懸濁液の粒度は最大粒径 80 μ m、 $D_{60}=20 \mu\text{m}$ 程度、 $D_{10}=5 \mu\text{m}$ 程度とする。また、懸濁液の流入時の水頭差を 40cm に設定した理由としては流入試験での初期流速と現場の排水層の下流端での排水流速とをできるだけ合わせるためである。盛土からの土中水の流入量が比較的多い砂質土では透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec である。不飽和な盛土中を浸透水が流下するときの最終浸透能(速度)を飽和土の透水係数の 1/2 (5.参照) とすると¹⁰⁾、土中の鉛直方向の浸潤速度は $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ cm/sec 程度となり、排水材の分担長が 5m のとき、下流端での排水の初期流速を時間当りの集水量と排水材の断面積から求めると、拘束圧 1, 2, 3kgf/cm² のとき、それぞれ 1.2~0.1cm/sec, 1.5~0.2cm/sec, 1.7~0.2cm/sec となる。

試験において水頭差を 40cm としたときの排水材の下流端における初期流速は上記の拘束条件で夫々 1.0, 0.7, 0.5cm/sec となり、現場の排水材の下流端での流速に近い値となる。また、別の試験⁹⁾から、水頭差を 20~75cm まで各段階毎に増加させたとき、目盛り量は水頭差の影響を殆ど受けないことが判ったので水頭差を 40cm に設定すれば良いと判断した。

4. 面排水材の目詰り試験による面内方向の透水性低下状況とその予測方法

(1) 排水材の目詰り試験

盛土からの浸透水が懸濁液として排水層に鉛直流入・面内流下条件で流入・流下することにより、土粒子が排水材に目詰りを発生させる結果、排水材の面内方向の透水係数が低下する。このメカニズムを実験で再現し、懸濁液流入後の排水材の面内方向透水係数を測定する目詰り試験装置を考案して試験を行った。図-4は試験装置であるが、面内方向(縦)30cm、横幅10cmの帯状の排水材の供試体を半円柱形の2個のブロック(1つは多数の水平孔のあるもの、1つは無孔のもの)で挟んで三軸室にセットしメンブレンを介して、液圧によって排水材に拘束圧を作用させた状態にする。有孔の半円柱ブロックを通して所定の濃度の懸濁液を一定の水頭差のもとで表面流入・面内流下条件で排水材に流入させることが出来る。排水材の表面は懸濁液が一樣に流入出来るようにブロックの多孔板と排水材との間に300 μ mの金網を挟んだ。目詰り後の排水材の透水係数を測定するときは2個の半円柱ブロックとも無孔のものとする事によって、排水材の面内方向の透水係数を測定することが出来る。懸濁液流入開始は排水材の圧縮試験結果より変形が収束すると思われる24時間載荷後とした。供試体の寸法を長さ30cm、幅10cmに設定した理由として、試験が合理的で簡便にできるように考案した三軸試験装置に合わせたためである。

表面から土粒子が流入することによって排水材の表面に目詰りを発生して鉛直方向(面内方向に直角)の透水性が低下するが、排水材に接する土の透水性よりも低下することは無いと考えられるので、面排水材の鉛直方向の透水性の低下については特に配慮しないこととする。以上のことを考慮して試験条件を設定し表-4に示す。

(2) 懸濁液の流入後の排水材の目詰り状況

供試体(幅10cm、長さ30cm)に拘束圧を作用させた状態で表面流入・面内流下条件で供試体に懸濁液を流入したとき、懸濁液の流入量と流入、流出液の濃度差から供試体の目詰り量を測定した。排水材に流入した土粒子流入総量と下流端から流出した土粒子流出総量との関係を図-5に示す。流入、及び、流出した土粒子総量は排水材の下流端での単位幅当たりの土粒子総量で表示した。流入総量が増加すると流出総量が増加傾向を示すが、拘束圧が小さいほどその傾向は顕著である。また、流入総量の増加にともないその増加率は逐次減少する傾向を示す。ここで、流入した土粒子が全て下流端から流出する状態を“完全流出状態”と呼ぶ。しかし、完全流出状態のある時点から流入総量が増加すると、排水材に目詰り

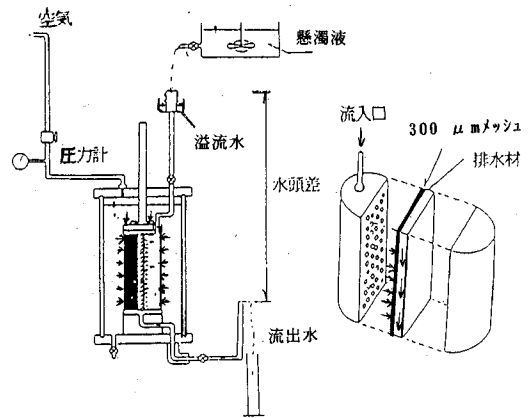


図-4 目詰り試験装置

表-4 試験条件

供試体寸法	30cm(長さ)×10cm(幅)
拘束圧	土被り圧
土粒子負荷量	200,000 × 10 ⁻⁶ g/cm (下流端)
土粒子濃度	20~40ppm (一定濃度)
土粒子粒度	最大粒径 80 μ m D ₆₀ = 20 μ m 程度 D ₁₀ = 5 μ m 程度
水頭差	40cm

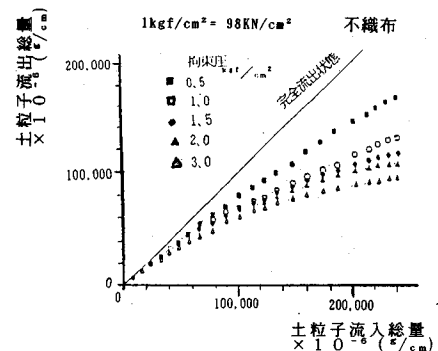


図-5 土粒子流入総量と土粒子流出総量

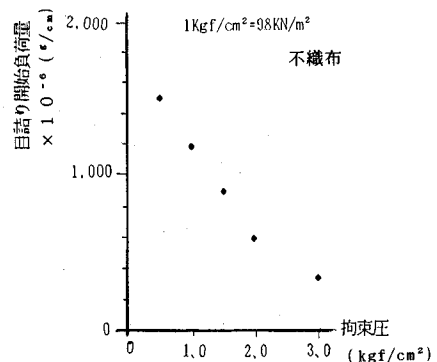


図-6 拘束圧と目詰り開始負荷量

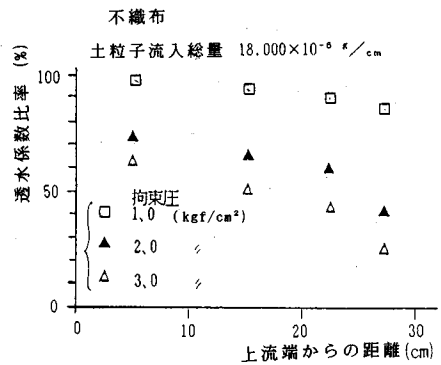
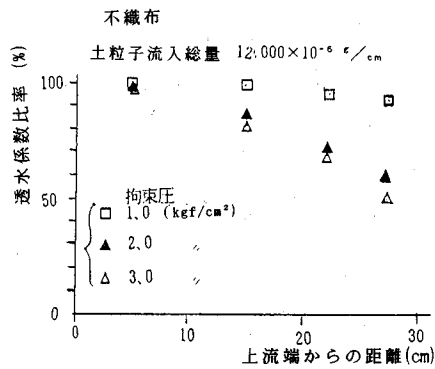


図-7 透水係数比率の分布

写真-1

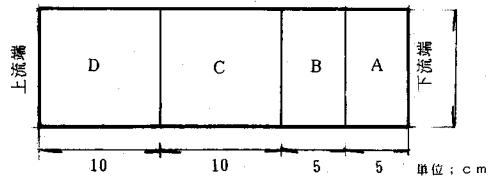
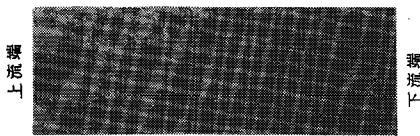


図-8 供試体の分割図

が発生することによって各曲線が完全流出状態を示す直線よりも流出総量が小さくなり、各曲線は直線から離れる。この時点の流入総量を“目詰り開始負荷量”と呼ぶ。また、この関係曲線が完全流出状態を示す直線から大きく離れるほど目詰り量が多いことを意味するが、拘束圧が大きいほど目詰り量が大きくなる(4.(3)参照)。この理由として、拘束圧が大きいほど排水材の間隙径が小さくなり、また、連続する間隙の流路の数が少なくなることによって土粒子が流路を閉塞する確率が高くなることに起因するものと考えられる。

図-6は排水材に作用する拘束圧と目詰り開始負荷量との関係を示すが、拘束圧が小さいほどその負荷量は大きくなるが、拘束圧が0.5kgf/cm²と小さい場合でも高々1500×10⁻⁶g/cmである。

(3) 排水材の目詰り後の面内方向透水係数の低下

長さ30cmの供試体を予め面内方向に4分割に切断してセットし(図-8参照)、所定量の懸濁液を鉛直流入・面内流下条件で流入した後、供試体を取り出して、再び同じ拘束圧のもとで分割した各試験片の面内方向透水係数を測定した。通水能力は排水材の厚さと透水係数とに関係するが、排水材の厚さは懸濁液流入前に排水材に拘束圧を作用させたときの厚さで代表させることとし、懸濁液流入後の透水係数の値を測定した。

図-7は不織布の供試体の上流端からの距離と面内方向の透水係数比率との関係を示す。“透水係数比率”とは目詰り前の面内方向透水係数 k_0 に対する目詰り後の面内方向透水係数 k_1 の比率(透水係数比率; $k_1/k_0 \times 100\%$)である。供試体に流入した土粒子負荷量は下流端

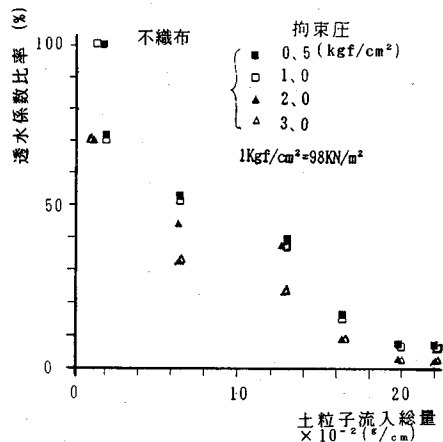


図-9 土粒子負荷量と透水係数比率

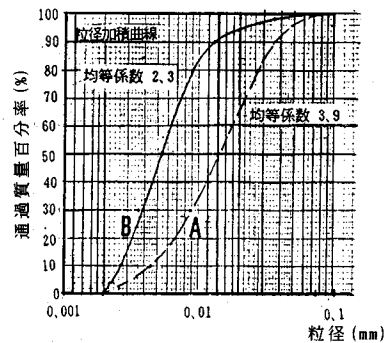


図-10 土粒子の粒度分布

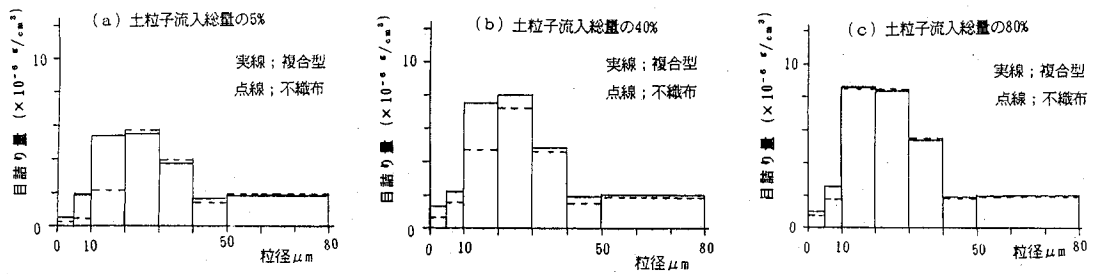


図-11.1 目詰り土粒子の粒径と各流入段階における単位流量による目詰り量 (懸濁液の粒度 A)

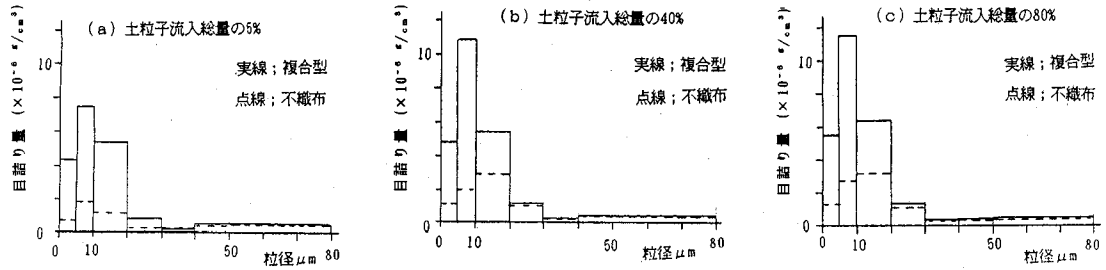


図-11.2 目詰り土粒子の粒径と各流入段階における単位流量による目詰り量 (懸濁液の粒度 B)

での土粒子流入総量として夫々 $12,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ と $18,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ である。どちらの負荷量の場合も拘束圧が高いほど、透水係数の低下が大きく、また、土粒子の通過量が多い下流部ほど透水係数の低下が著しい。

土粒子流入後、供試体を取り出して目視により供試体全体の目詰り状況を調査した。

下流端での土粒子設定流入総量が $200,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ 、拘束圧 2kgf/cm^2 のときの不織布の目詰り状況を図-8と並べて写真-1に示す。排水材に懸濁液が流入する表面付近には目詰りは殆ど認められず、むしろ面内方向の下流部ほど著しく目詰りが発生している状況が認められた。これは土粒子流入後の排水材の面内方向の透水係数比率の分布を示す図-7の結果を裏付けるものである。また、上記のことから排水材全体の透水性低下に最も影響するのは下流端付近の目詰り状況であることから、供試体の長さを 30cm と短くしたことによる問題は殆ど無いものと考えられる。

(4) 排水材の下流端における土粒子流入総量と面内方向透水係数の低下状況

実際に現場で面排水材を使用する場合、排水材の下流端付近の面内方向の透水性が排水層全体の通水能力を支配すると考えられるので、排水材の下流端における目詰り後の通水能力を調査することが重要である。そこで、最下流部の試験片(図-8のA)に着目して、土粒子流入総量(負荷量)と面内方向透水係数との関係を調べた。土粒子の負荷量と面内方向透水係数比率との関係を不織布について図-9に示す。土粒子の負荷量が増加すると透水係数比率が低下する傾向を示している。拘束圧が低

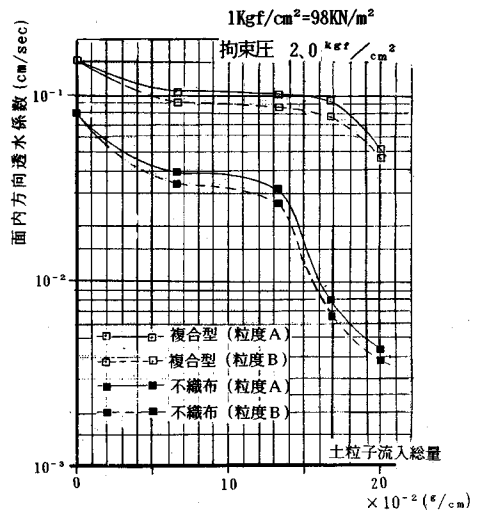


図-12 土粒子流入総量と面内方向透水係数

い 0.5 と 1.0kgf/cm^2 の場合、約 $10,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ の負荷量近くまで透水係数比率が低下せず、目詰り開始負荷量(図-6参照)の7~8倍の負荷量から透水係数が低下している。しかし、拘束圧が高い 2kgf/cm^2 、 3kgf/cm^2 の場合の透水係数の低下は目詰り開始負荷量をそれほど越えない時点から始まるようである。

また、設定負荷量の $200,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ のときの透水性の低下状況を透水係数比率でみると、拘束圧の影響は殆どなくなり、不織布では約5%、複合型では約30%(後出の図-12では拘束圧 2kgf/cm^2 のみを示す)となった。

(5) 流入懸濁液の土粒子粒度が目詰り量と透水性低下に及ぼす影響

目詰り後の排水材の透水性低下について既に設定した粒度の懸濁液を用いて試験を行ったところ、負荷量が増加すると透水性が低下し、その低下量は拘束圧と排水材の種類によって異なることが判った。そこで、懸濁液の粒度が目詰り量と目詰り後の透水性低下に及ぼす影響について検討するために、改めて不織布と複合型について2種の粒度の懸濁液を用いて試験を行った。

懸濁液の粒度はこれまで使用した粒度Aと細かい粒度Bであり図-10に示す。排水材の拘束圧は 2kgf/cm^2 とし、目詰りした土粒子の量を粒径別に求めた。また、懸濁液を負荷した後、各分割試験片の面内方向透水係数を測定した⁹⁾。各粒径別の目詰り量の測定は設定負荷量 $200,000 \times 10^{-6}\text{g/cm}^2$ の5%、40%、80%の3段階に達したときに各粒径別の目詰り量を測定した。この測定は懸濁液の流入時と流出時の土粒子の粒度分布の差異を液中パーティクル・カウンターで求めて算定した。

図-11は流入懸濁液量が上記の3段階に達したときの懸濁液を採取し、単位体積当たりの目詰り量を粒径別に示したものである。この図から見ると負荷量が5%の段階以後は不織布では $50\mu\text{m}$ 以上、また、複合型では $40\mu\text{m}$ 以上の粒子は流入した分の殆どが目詰りしていることが判かる。しかし、これ以下の粒子は両排水材とも負荷量が増加すると粒度A、粒度Bのいずれも単位流量当りの目詰り量が増加している。また、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子を除いて、各粒径別の目詰り量はどの段階でも粒度Aは粒度Bよりも多い。これは粒度Aの懸濁液は粒度Bより $10\mu\text{m}$ 以下は少なく、 $10\mu\text{m}$ 以上が多いことによると考えられる。

目詰りによる透水性低下の値は図-12に示すように透水係数は負荷量100%において不織布は約5%に複合型は約30%にまで低下し、複合型は目詰りによる透水性の低下が生じにくい材料であることが判かる。なお、拘束圧による両者の断面減少量はほぼ同じである。また、透水性は両者とも粒度Bの方が粒度Aよりもやや小さい値を示している。

このような結果は3.(3)において試験に用いる粒度を細粒分が比較的多い凝灰質粘土程度の粒度の設定が安全側で妥当と思われる。

(6) 盛土中排水材の目詰り後の透水係数の予測方法

現場で使用する面排水材を設計するには目詰り後の透水係数を予測する必要があるため、上記の実験結果から整理して、その予測試験方法について次のようにまとめた。この方法は不織布、複合型やその他の面排水材に適用するもので図-4の目詰り試験装置を用い、現場で排水材に作用する土被り圧に相当する拘束圧を排水材(幅

表-5 現場測定地点の条件

$1\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$

地点	盛土材	土被り圧 (kgf/cm^2)	土被り高 (m)	透水係数 (cm^2/sec)
A	シルト質砂	0.77	4.4	5×10^{-4}
B	立川ロ-A	0.30	1.7	2×10^{-5}
C	シルト質砂	0.33	1.9	3×10^{-4}
D	シルト質砂	0.70	4.0	7×10^{-4}

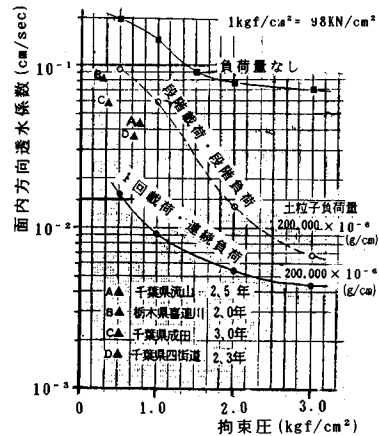


図-13 拘束圧と面内方向透水係数との関係

10cm、長さ30cm)に作用させて、表-4の試験条件のもとで懸濁液を表面流入・面内流下条件で負荷する。その後、排水材の下流端部の長さ5cmの試験片を取り出して、目詰り試験と同じ拘束圧のもとで面内方向の透水係数を求める。この値を使用排水材の目詰り後の透水係数予測値とする。これらの予測値は排水層の設計項目に当たる排水材の選定、排水材分担長、排水材の必要重ね層数などの決定に必要なものである。

5. 盛土中の排水材の透水係数低下状況の実測検証

上記の現場における排水材の長期の目詰りによる面内方向の透水性低下を予測する試験方法を検証するために、室内試験による結果と現場における透水性の低下状況を比較検討した。室内試験で使用したのと同じ不織布排水材を実際の4ヶ所の工事で採用し、排水層の集水分担長が5mとなるように予め施工時に設置し、盛土完了後2~3年経過した後にA~Dの4地点を掘削して排水層の下流端部の排水材を採取した。そして、その排水材を現地で受けていたと同じ圧力のもとで求めた面内方向透水係数の値と上記の4.(4)の室内試験の値とを比較した。上記で提案した試験法は懸濁液の流入開始時点か

ら一定の拘束圧を排水材に作用させた状態で懸濁液を連続的に流入する“1回載荷・連続負荷”方式を用いているが、この他に現場状況に近い“段階載荷・段階負荷”方式についても試験を行い比較してみた。これは拘束圧を1度にかけて3段階に等分して載荷し、懸濁液の流入量も載荷段階毎にそれぞれ総量の1/3ずつ流入させる方法である。土粒子流入総量はいずれも基準の $200,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ とした。

図-13は上記の試験結果を示し、4地点の条件を表-5に示す¹⁰⁾。現場試験を行った関東地方の平均年間降雨量は1400~1600mmである。降雨の年間浸透量は降雨量から年間蒸発量(降雨量の約20%)¹¹⁾と流出量(流出係数は盛土の施工段階の状況を考慮して、平坦な耕地の場合の0.45~0.60の平均値0.53を設定)¹²⁾とを差し引くと約378~432mmとなる。毎日連続して降るとすると、1日当たりでは1.0~1.2mmとなる。また、現場試験地点における盛土の限界透水量は3。(2)a)より、それぞれシルト質砂で $4 \sim 8 \text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、立川ローム $1.5 \sim 6 \text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、これらの値に相当分の雨水が土中に浸透する時間は年間連続して雨水が地中に浸透すると仮定すると、年間浸透量から2~3カ月以内と考えられる。しかし、毎日連続して降雨はないので、年間での降雨量の月別分布を考慮すると概ね半年以内程度と考えられる。

その後、上記の浸透雨水が盛土内を降下して排水層にまで浸潤し到達する浸潤時間を求める。不飽和の土中を降下浸透する流速は盛土表面に湛水しない状態を考慮して定常降雨による降下浸透とすると、降下浸透能(流速)は時間の経過とともに低減し、最終浸透能に近づく。この最終浸透能は飽和透水係数の約1/2とした¹³⁾。

このことから、各現場測定地点での浸透水が盛土内を浸潤して排水層に達する時間は盛土厚さと不飽和透水係数とから、A地点0.7ヶ月、B地点6.6ヶ月、C地点0.5ヶ月、D地点0.4ヶ月となる。この結果、限界透水量に相当する雨水が盛土に浸透し排水層に到達する時間は浸透時間と浸潤時間との和となり、最も時間を要するB地点でも約1年程度と思われる。よって、現場試験を行った排水材は盛土完了後2.3年~3.0年が経過しているもので、盛土から負荷される土粒子は殆ど全て流入が完了しているものと思われる。

図-13では現場の面内方向透水係数は室内試験の“段階載荷・段階負荷”方式で土粒子流入設定総量 $200,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ としたときの値よりもやや小さい値を示すが、かなり近い値を示す。また、“1回載荷・連続負荷”方式での値より大きい値で、現場実測値は2つの室内曲線の間にある。

しかし、“段階載荷・段階負荷”方式は危険側の結果を示すことから、提案した“1回載荷・連続負荷”方式が妥当であることが判った。

6. 結 論

盛土中や盛土基礎地盤上に敷設する面内方向の排水層をジオテキスタイル排水材を用いて設計するとき、排水材の目詰りによる面内方向の透水性低下の予測が必要となるので、合理的、かつ、短期間に予測する試験方法を研究し提示した。

この方法は試験条件が現場の状況をシミュレートできるうえ、試験期間も短縮でき、排水材の目詰り後の透水性低下を合理的に予測することが可能であることが判った。

本研究で明らかになった事項は次の通りである。

- ①排水材に流入する土粒子の流入設定総量は排水材の集水分担長を一般的な5mとした場合、下流端単位幅当たり $200,000 \times 10^6 \text{g/cm}$ に設定すれば良い。濃度は20~40ppmの範囲の一定値とし、懸濁液粒度は最大粒径 $80 \mu\text{m}$ 、 $D_{60} = 20 \mu\text{m}$ 程度、 $D_{10} = 5 \mu\text{m}$ 程度とする。また、排水材の拘束圧載荷条件と土粒子の負荷条件は“1回載荷・連続負荷”方式とすれば良い。
- ②排水材の目詰りによる面内方向透水係数の低下状況は拘束圧が大きいほど、また、土粒子負荷量が多い下流端に近いほど、目詰りによる面内方向透水係数の低下は著しい。目詰りによる透水係数の予測値は現場で排水材に作用する拘束圧で土粒子流入設定総量を負荷したときの下流端部の透水係数となる。
- ③この予測試験方法により求めた目詰り後の透水係数の値を4地点の現場で実測検証したところ、両者はかなり良い一致を示した。
- ④排水材の種類によって目詰りによる透水性の低下率は異なるので、使用する排水材について目詰り後の透水係数を本試験法により予測する必要がある。
- ⑤排水材の目詰りによる透水性低下状況を透水係数比率でみると今回用いた不織布では約5%、複合型では約30%となった。

参考文献

- 1) Faisal Haji Ali: The Influence of Filter Jacket and Core Geometry on the Longitudinal Permeability of a Prefabricated Drain, *Soils and Foundations*, Vol. 31 pp. 120-126, 1992.
- 2) 林 英雄, 茶山和博, 森 麟: ジオテキスタイル材の排水効率低下特性に関する室内試験結果(第2報), 土木学会第43回年次学術講演会第3部門, pp. 180-181, 1988年9月.
- 3) 林 英雄, 茶山和博, 森 麟: ジオテキスタイルの排水効率低下に関する実験的研究, 土質工学会第25回土質工学研究発表会, pp. 2009-2012, 1990年6月.
- 4) 林 英雄, 茶山和博, 森 麟: 盛土の締固め含水比がその後流出する土粒子総量に与える影響に関する実験的研究, 土木学会第47回年次学術講演会第3部門, pp. 1108-1109, 1992年9月.

- 5) 林 英雄, 茶山和博, 森 麟: 乱された粘性土の圧密排水中に含まれる土粒子濃度と土粒子総量に関する研究, 土木学会第46回年次学術講演会第3部門, pp. 764-765, 1991年9月.
- 6) Hoare, D. I.: Synthetik Fabrics as Soil Filters, *A Review ASCE GT10*, pp. 1230-1245, 1982.
- 7) Haliburton, T. A. and Wood, P. D.: Evaluation of the U.S. Army Corps of Engineer Gradient Ratio Test for Geotextiles Performance Second International Conference on Geotextiles, pp. 97-101, 1982.
- 8) 林 英雄, 森 麟: 地山から流出する土粒子による不織布排水材の目詰り量と透水性に関する実験的研究, 土質工学会第28回土質工学研究発表会, pp. 2437-2440, 1993年6月.
- 9) 林 英雄, 森 麟: 流入土粒子粒度が排水材の目詰り量と透水性低下に及ぼす影響, 土木学会第48回年次学術講演会第3部門, pp. 1146-1147, 1993年9月.
- 10) 林 英雄, 森 麟: ジオテキスタイル面排水材の目詰りによる透水性低下の予測に関する研究国際ジオテキスタイル学会日本支部, pp. 65-76, 1992年12月.
- 11) 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, p. 22, 1979.
- 12) 建設省河川局監修: 河川砂防技術基準(案), p. 150, 1986.
- 13) 榎根 勇: 水文学, pp. 167-168, 大明堂, 1975.

(1994.1.18 受付)

STUDY ON THE PREDICTION OF PERMEABILITY REDUCTION DUE TO CLOGGING OF GEOTEXTILE MATERIALS IN EARTHFILL EMBANKMENTS

Hideo HAYASHI and Akira MORI

Geotextiles are often used to form drainage layers within earthfill embankments and at earthfill/foundation interfaces. When designing the drainage layer, it is necessary to predict the probable reduction in permeability that will result from clogging of the drainage material. However, since the reduction of permeability varies according to the type of drainage material, the reduction of permeability should be predicted for the various types of drainage materials to be used for construction. Prediction of the expected reduction in permeability of the drainage layer can be easily accomplished by studying a prediction test method that reflects actual site conditions.