キャピラリーバリアにおける八戸しらすの適用性に関する研究

清原雄康¹, 岩渕光生², 風間基樹³

1 八戸工業高等専門学校・建設環境工学科

2 東北大学大学院・工学研究科土木工学専攻博士前期課程

3 東北大学大学院・工学研究科土木工学専攻

概 要

廃棄物処分場の表面遮水技術の一つであるキャピラリーバリア材の上部排水層に、保水・透水特性、粒度分布が異なる八戸しらすと豊浦砂を用いてキャピラリーバリア¹⁾に関する室内模型実験を行った。斜面傾斜角を 5° 、 10° 、降雨強度を $5\sim 40\text{mm/h}$ に変化させ、各降雨強度での定常時の有効限界長や貯留量、水収支、保水形態の比較を行ったところ、八戸しらすのバリア材としての有効性が確認できた。また Kung²⁾が提案したバリア限界長の理論値との比較、飽和不飽和浸透流解析コード PlaxFlow³⁾を用いた数値解析から、実験値との整合性を検討した。

キーワード：不飽和土、透水性、しらす、毛管現象

1. はじめに

廃棄物処分場における浸出水抑制のための表面遮水技術の一つとして、キャピラリーバリアがある。キャピラリーバリアとは、上部排水層に砂、下部遮断層に礫を層状に配し毛管力の差を利用して、所定の勾配下で側方排水を促進させ雨水の鉛直浸透を制御する技術である。この技術は a)保水性が高く、かつ側方排水性に優れていること、b)ガス抜きや好気性微生物のために通気性がよいこと、c)自然材料を使うため経済的であること、d)長期耐久性・安定性に優れていることなどの特長^{4), 5)}があることが知られている。

従来の研究では、上部排水層にキャピラリーバリア材として理想とされている均等係数の小さい砂、下部遮水層に礫を用いた模型土槽実験による性能評価が多数報告^{6)~13)}されている。また、上部砂層の表面に粘土層を設け、高降雨強度時に雨水のバリア層への浸透を制御する研究や防水シートとの併用に関する研究^{14)~16)}がある。そして、国内でも適用事例が数例報告¹⁷⁾されている。

性能評価に関しては、材料の透水性、保水性をもとに、Ross¹⁸⁾や Kung²⁾が限界長式（バリア効果が破過して鉛直浸透が生じるまでの斜面長を求める式）を提案しており、その検証¹⁹⁾も多くなされている。不飽和浸透理論に基づいた有限要素法や有限差分法によるキャピラリーバリア現象再現についても研究がなされている^{20), 21), 22)}。また、東條ら²³⁾は、バリアが破過するときのフィンガー流も再現できるように下部礫層に膜状流れ式を用いた解析を行っている。

しかし、いずれの研究も、上部排水層にキャピラリーバ

リア材としては比較的理想的な均等係数が小さい材料を用いた研究がほとんどである。本研究では、保水性が高く、締固め効果に優れていることが知られている²⁴⁾青森県の十和田カルデラ由来の火山灰質砂質土である八戸しらすを、上部排水材として有効利用した場合の性能評価を報告する。上部排水層に保水透水特性、粒度分布が異なる豊浦砂と八戸しらすを用いてキャピラリーバリアの室内模型実験を行い、定常時の水収支、保水形態、有効限界長の比較を行った。また Kung が提案した限界長に関する理論式を用いた性能評価や、飽和不飽和浸透流解析コード PlaxFlow による現象再現と精度検証も行った。

2. キャピラリーバリア材の材料特性

本研究の上部排水材に用いた、八戸しらす、豊浦砂及び、下部遮水層に用いた細礫の材料特性を以下に述べる。

2.1 供試体性状

バリア材として用いた八戸しらすは十和田カルデラから東方約 15km の青森県新郷村地内から採取し、10mm 以下の通過試料を用いた。八戸しらす、豊浦砂、細礫の風乾試料は高さ 1m、直径 10cm の土柱法用供試体に振動を与えながら所定の密度になるように充填し、保水性試験に供した。また、同様な手順で作製した供試体を用いて定水位透水試験も行い、飽和透水係数を求めた。表 1 にそれら供試体の諸元、図 1 に実験に用いた材料の粒径加積曲線を示した。平均粒径は八戸しらす、豊浦砂でそれぞれ 0.5mm、0.225mm、均等係数はそれぞれ 34、1.96 であった。

表 1 土柱法供試体諸元

	八戸しらす	豊浦砂	細礫
ρ_s (g/cm ³)	2.52	2.64	2.64
D_{50} (mm)	0.5	0.225	3
均等係数 U_c	34	1.96	1.55
ρ_d (g/cm ³)	1.22	1.51	1.69
間隙率(%)	51.4	43.0	62.8
飽和透水係数(cm/s)	4.27×10^{-3}	2.5×10^{-2}	2.64
空気侵入値(cm)	35	15	1

図 1 粒径加積曲線

2.2 バリア材の透水・保水特性

図 2 に八戸しらす，豊浦砂，細礫の体積含水率に対する水分特性と透水係数の関係を示した．豊浦砂の空気侵入値は約 15cm，八戸しらすは約 35cm で，全体的にしらすの方が高い保水性を有していることが分かる．図 2 の中の実線は Van Genuchten（以下 VG と称す）式(1)²⁵⁾ への曲線近似を RETC コード²⁶⁾を用いて行い，VG 定数 α, n, m, θ_s を決定して求めた曲線を示している．残留体積含水率 θ_r は 0.0 としている．また図中の不飽和透水係数は，飽和透水係数と有効飽和度 S_e ，VG 式による不飽和透水係数の予測式(2)，式(3)から求めている．これより，体積含水率に対する透水係数は八戸しらすの方が豊浦砂より 1 オーダー小さい値を示すことが推察される．

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + |\alpha \cdot h|^n} \right]^m (\theta_s - \theta_r) + \theta_r, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \tag{1}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{2}$$

$$K_{unsat} = K_{sat} \cdot S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right] \tag{3}$$

ここに， θ ：体積含水率， θ_r ：残留体積含水率， θ_s ：飽和時体積含水率， S_e ：有効飽和度， h ：サクション水頭， α, n, m ：VG 定数（4.1 節の表 5 参照）， K_{unsat} ：不飽和透水係数， K_{sat} ：飽和透水係数である．

図 2 水分特性曲線

図 3 模型実験概要図

表 2 実験条件

上部排水材	八戸しらす	豊浦砂
下部遮水材	細礫	細礫
降雨強度 (mm/h)	5, 10, 20, 30, 40	5, 10, 20, 30, 40
勾配 (度)	5, 10	5, 10

3. 室内模型実験

3.1 模型実験装置

模型実験は長さ 78cm，高さ 40cm，奥行 20cm の土槽を用い，図 3 に示したように，上部排水層 20cm に透水保水性の異なる豊浦砂または八戸しらす，下部遮水層に細礫を敷き，乾燥密度が土柱法供試体とほぼ同じ値になるよう加水調整した試料を突き固めて充填した．斜面下端部には長さ 8cm の排水引き込み部を設けている．排水層には誘電率測定型土壌水分計（Decagon 社製 EC-10）を土槽中央の所定の深さに 4 箇所埋設した．また，排水層と遮水層の境界には不織布（厚さ 3mm，透水係数 0.1cm/s，空気侵入値 2cm）を敷き，排水層と遮水層の混合を防止した．不織布は，厚さが 3mm と細礫の空気侵入値 1cm に対して十分小さく，かつ排水材より透水係数が十分大きいため，不織布と細礫の境界に生じるキャピラリーバリア現象や不織布

の透水性が結果に及ぼす影響は小さいものとする。

実験条件は表 2 に示したように、傾斜角を 5° 、 10° 、時間降雨強度をスプレーノズルを用いて 5、10、20、30、40mm/h に変化させ、排水位置 No.1～No.7 での流出量を計測し、降雨による流入量と総流出量の差が 5%以内になった時を定常状態とし、定常時の水収支や保水形態、有効境界長の比較を行った。各降雨強度に設定後、定常状態に至るまでに要した時間は平均で 17 時間であった。

今回設定した 1 時間あたり降雨強度は、小島ら²⁷⁾が行った日本における確率降雨の計算結果によると、およそ 1～2 年の確率降雨に相当している。

3.2 実験結果

3.2.1 水収支

図 4、図 5 に傾斜角 5° での八戸しらす、豊浦砂の各降雨強度、各排水位置からの総流入量に対する流出割合をそれぞれ示した。

八戸しらすの場合は、表面流出が卓越しておりいずれの降雨強度でも No.1～No.4 での流出は見られなかった。実際の地中への浸透量は $1.74\sim 2.3\text{mm/h}$ で平均 1.94mm/h (総流入量 5mL/min) であった。また、今回の実験結果から No.5 からの流出量は降雨強度の変化に対して $1.6\sim 1.8\text{mL/min}$ の範囲でほぼ一定であった。No.5 からの流出割合は 5mm/h (総流入量 13mL/min) の時で 11.6% (1.68mL/min) だったのに対し 40mm/h (総流入量 104mL/min) の時で 1.5% (1.64mL/min) と、総降雨量の増加に対し割合的には低下する傾向にあった。

豊浦砂の場合、表面流出は見られず、降雨強度 30mm/h 以上で No.2、No.3、No.4、No.5 からの流出が生じ、 30mm/h (総流入量 78mL/min) で 6.3% (5mL/min)、 40mm/h で 20.3% (21.1mL/min) がバリアを破過した。

図 6、図 7 に傾斜角 10° での八戸しらす、豊浦砂の各降雨強度、各排水位置からの流出割合を示した。八戸しらすは、傾斜角 5° の時と同様な結果となり、実浸透量はいずれの降雨強度でも $1.90\sim 1.99\text{mm/h}$ 、平均 1.94mm/h であった。豊浦砂では傾斜角 5° と比較して、特に 30mm/h での効果が改善された。

八戸しらすの方が透水性が小さく、降雨強度が大きくなってもそのほとんどが表面流として流出するため、排水層内での浸透の負担は軽くなり浸透制御効果が高くなることが分かった。しかし、八戸しらすの方は小さい降雨強度でも No.5 からの流出が生じており、浸透割合から比較すると、豊浦砂の方が分離性能が高いと言える。キャピラリーバリア材として要求される性能には、透水性が良く保水性が大きいこと、粒度がなるべく均一なことなどが挙げられている⁹⁾が、表 1 に示したように、八戸しらすの粒径幅が広いことが条件として不利に働き、保水性の大きさに割に透水係数が小さく、間隙の屈曲率が大きくなり、浸透水の側方排水能が小さかったことが、このような結果の原因として考えられる。

図4 八戸しらす傾斜角 5° での流出割合

図5 豊浦砂傾斜角 5° での流出割合

図6 八戸しらす傾斜角 10° での流出割合

図7 豊浦砂傾斜角 10° での流出割合

3.2.2 定常状態下での飽和度分布

図 8、図 9 に八戸しらす、豊浦砂の各降雨強度での定常時の飽和度分布をそれぞれ示した。いずれの土質でも排水層の底部でも飽和度は 80%程度で、層内には約 20%封入空気が存在していたことになる。八戸しらすは表層部 5cm 程度まで飽和度が高い分布を示し、地表面から 8.5cm 程度

で一旦減少後、それ以深では保水試験結果とほぼ同じ分布となった。

また、降雨強度の違いによる飽和度の分布差は小さかったが、これも、透水係数が小さかったために表面流出が生じ、実浸透量がほぼ一定であったことが原因として考えられる。さらに、今回の実験では排水層厚が空気侵入値より小さかったため全層にわたって保水試験とほぼ同じ飽和状態で保水されていたことも考えられる。表面付近で飽和度が高かったのは、表面流の若干の浸透、表層付近での側方流出の影響によるものと思われる。また、八戸しらすにおいては排水層厚を空気侵入値以上にすれば、空気侵入値内の深度での高い飽和域での側方排水をより有効に利用でき、さらに効果が上がるものと思われる。

豊浦砂は八戸しらすより降雨強度の増加による飽和度の増加が顕著に表れていた。また表層部に向かうほど、その差は明確に表れていた。土槽内の水分分布は保水試験の吸水過程の曲線よりやや乾燥側に分布していた。水分分布がこのような結果になった理由としては、豊浦砂の方が八戸しらすより保水性が小さく透水性が大きかったことや、排水層厚が空気侵入値を上回っており、空気侵入値内の深度での高い飽和域での側方排水をより有効に利用できたことなどが考えられる。

いずれの土質も、傾斜勾配が大きい方が飽和度は大きくなる傾向にあったが、これは急勾配の方が側方への排水流量が増加することに起因するものと思われる。また、性能評価の際には土柱法等の保水試験の情報があることが分かる。

3.2.3 表面流出を考慮した Kung 式による理論限界長予測

透水性、保水性からキャピラリーバリア材としての性能を評価する式の一つに Kung の限界長理論式(4)がある。

$$L = K_s \cdot \frac{(h_{ae} - h_{ae}^*) \cdot \sin 2\phi}{2 \cdot q_v} \tag{4}$$

ここで、 L : 限界長、 K_s : 飽和透水係数、 h_{ae} : 排水材の空気侵入値 (八戸しらす: 35cm, 豊浦砂: 15cm)、 h_{ae}^* : 遮水材の空気侵入値 (細礫: 1cm)、 ϕ : 傾斜角、 q_v : 浸透量 (表面流出量を除く) である。

そして、表 1 で示した飽和透水係数や模型実験結果から得られた実浸透量を基に、式(4)から限界長を求めた結果を、

図10 傾斜角5度での解析モデル

図8 定常状態下での八戸しらすの飽和度分布

図9 定常状態下での豊浦砂の飽和度分布

表 3 理論限界長 (傾斜角 5 度)

上部排水材	八戸しらす	豊浦砂			
実浸透量(mm/h)	2	5	10	20	40
限界長(m)	2.26	2.18	1.09	0.55	0.28

表 4 理論限界長 (傾斜角 10 度)

上部排水材	八戸しらす	豊浦砂			
実浸透量(mm/h)	2	5	10	20	40
限界長(m)	4.46	4.31	2.15	1.08	0.54

各傾斜角について表 3、表 4 に示した。この結果から 40mm/h までの降雨強度に対し、実浸透量が 2mm/h と小さく抑えられる八戸しらすの方が有利に働く結果となった。

バリアーの限界長が、室内模型実験結果より長くなっているが、排水層の厚さの違いや斜面下端部の排水引き込み部の形状やそこまでの距離の影響によるものと思われる。

図11 傾斜角10度での解析モデル

4. 数値解析

有限要素法による飽和不飽和浸透流解析コード PlaxFlow による解析と室内模型実験との整合性を把握するとともに解析による性能評価をするために、以下に記したような数値解析を行った。

4.1 室内模型実験を想定した解析

4.1.1 解析モデル

PlaxFlow³⁾の基礎方程式には Richards 式が使われ、不飽和浸透モデルには式(1)、式(2)、式(3)に示した Van Genuchten モデルが用いられている。飽和時の比水分容量 C_{sat} は 0.0001(1/m)としている。不飽和時の比水分容量は VG 式(1)をもとに、式(5)より決定している。

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) \cdot m \cdot n \cdot \alpha \cdot |\alpha \cdot h|^{n-1}}{\left[1 + |\alpha \cdot h|^n\right]^{m+1}} \quad (5)$$

本研究で用いた解析コードでは排水層と遮水層の境界面で生じる空気侵入値の違いにより、流れの遮断のような現象までは考慮できないが、どの程度の適用性があるかなど性質を見るために適用した。

図 10、図 11 に傾斜角 5 度、10 度での解析モデルを示した。模型実験と同じ形状とし、排水層と遮水層の境界付近のメッシュサイズは 5～7mm とし、傾斜角 5 度のモデルでは要素数 18824、節点数 9590 の 1 次要素を用い、傾斜角 10 度のモデルでは要素数 22764、節点数 11614 の 1 次要素を用いた。解析に用いた材料定数は、室内透水試験、保水性試験の結果から決定し、表 5 にその値を示した。表中の Van Genuchten パラメータは 2.2 節で述べたように θ_r は 0.0 とし、 α, n, θ_s は RETC コード²⁶⁾によるフィッティングにより決定している。そして、排水層に八戸しらすの物性値または、豊浦砂の物性値を用いた場合とで両者の性能比較を行った。境界条件は、斜面表面をフラックス境界、両側面を非排水、底面を自由浸透境界としている。表層境界に与える降雨浸透強度は、室内模型実験から得られた実際の

表5 解析に用いた定数

	排水層		遮水層
	八戸しらす	豊浦砂	細礫
k_{sat} (cm/s)	4.3×10^{-3}	2.5×10^{-2}	2.64
θ_r	0.00	0.00	0.00
θ_s	0.39	0.41	1.00
n (VG 定数)	6.743	12.955	-
α (VG 定数)	2.091	5.524	-
C_{sat} (1/m)	0.0001	0.0001	0.0001
φ_k^*	-	-	0.015
φ_s^{**}	-	-	0.015

* φ_k : k_{rel} が 10^{-4} でのサクシヨン水頭, ** φ_s : 飽和度が 0 となる時のサクシヨン水頭

の浸透量を考慮し、表面流出が顕著に見られた八戸しらすのケースでは 2mm/h とし、表面流出が見られなかった豊浦砂のケースでは模型実験での降雨強度と同じく、5, 10, 20, 40mm/h としている。そして各降雨強度について最大時間間隔を 0.000416 日とする非定常解析を行い、各計測点（排出口）での流速の値が収束したときの値を解析結果としている。

4.1.2 解析結果

図 12、図 13 に勾配 5 度、10 度での排水層に八戸しらすを用いた場合の鉛直流速分布を示した。鉛直方向の流速が -0.01m/day 以下となるのは、勾配 5 度で上端からの斜面長約 36cm、勾配 10 度で斜面長約 52cm の地点であった。

図 14、図 15 に勾配 5 度、10 度での排水層に豊浦砂を用いた場合の鉛直流速分布を示した。いずれも降雨強度が増加するにつれ、また、斜面上部から下部に向かうにつれ流速は増加している。鉛直方向の流速が -0.01m/day 以下となる斜面長は、降雨強度 5mm/h の場合、勾配 5 度で約 56cm、勾配 10 度で約 72cm、降雨強度 10mm/h の場合、勾配 5 度で約 31cm、勾配 10 度で約 53cm であった。降雨強度 20mm/h 以上では -0.01m/day 以下となる斜面長は 17cm 以下であった。降雨強度 40mm/h での流速分布は傾斜角 5 度の場合で 0.14～0.16m/day、傾斜角 10 度の場合で 0.04～0.14m/day の分布であった。

4.1.3 解析値と実測値の比較

図 16 に排水材を八戸しらすとした場合の勾配 5 度、10 度での各測定点からの流出量の実験値と解析値の比較を示した。概ね良好な整合性が得られているが、5mm/h、10mm/h の低降雨強度において、実測値では No.1 から No.5 の破過はほとんど生じないのに対し、解析値ではわずかながら破過が生じ、逆に No.5 からの流出量は解析値の方が小さくなった。

降雨強度が 20mm/h 以上では、No. 6, 7 からの流出が卓越し、解析値における No.1～No.5 までのわずかな破過流出量の影響は相対的に小さくなった。各降雨強度における No.7 からの流出量の解析値と実測値の差は、最大で約 20% であった。

図 17 に排水材を豊浦砂とした場合の勾配 5 度、10 度での排出流量の実験値と解析値の比較を示した。八戸しらすと同様、5mm/h、10mm/h の低降雨強度において、実測値では No.1～No.5 の破過はほとんど生じなかったのに対し、解析値では 0.02～0.5mL/min 程度破過した。降雨強度が 20mm/h 以上では、No. 6, 7 からの流出が卓越し、No.1～No.5 までのわずかな破過流出量の影響は相対的に小さくなっている。各降雨強度における No.7 からの流出量の解析値と実測値の差は、2～10% であった。概して豊浦砂の方が八戸しらすよりよい整合性が得られたが、この原因としては豊浦砂の方が均等係数が小さく、均一な材料に近く、解析条件と実験条件が近かったことが挙げられる。

八戸しらす勾配 5 度 実浸透強度 2mm/h

図 12 八戸しらす勾配 5 度での鉛直流速分布(0m~-0.1m/day)

八戸しらす勾配 10 度 実浸透強度 2mm/h

図 13 八戸しらす勾配 10 度での鉛直流速分布(0m~-0.1m)

豊浦砂勾配 5 度 5mm/h

豊浦砂勾配 10 度 5mm/h

豊浦砂勾配 5 度 10mm/h

豊浦砂勾配 10 度 10mm/h

豊浦砂勾配 5 度 20mm/h

豊浦砂勾配 10 度 20mm/h

豊浦砂勾配 5 度 40mm/h

豊浦砂勾配 10 度 40mm/h

図 14 豊浦砂勾配 5 度での鉛直流速分布(0m~-0.2m/day)

図 15 豊浦砂勾配 10 度での鉛直流速分布(0m~-0.2m/day)

図 16 八戸しらす勾配 5 度、10 度での流出量

図 17 豊浦砂勾配 5 度、10 度での流出量

5. 結論

透水、保水性の異なる豊浦砂と八戸しらすを用いて、模型実験によるキャピラリーバリアの性能評価、解析による挙動再現性の検討を行った。

- 1) 室内模型試験結果からは、勾配 5 度で 40mm/h、勾配 10 度で 30mm/h 以上の高降雨強度では豊浦砂より、不飽和透水係数が小さく降雨強度や勾配の影響を受けにくい八戸しらすの方が、有利に働いた。しかし、それ以下の低降雨強度においては保水性が小さいが透水係数が大きく排水能力が高い豊浦砂の方が有利になる結果となった。

ただし、今回実験で用いた八戸しらすの空気侵入値は 35cm であったのに対し、模型でのしらすの排水層厚を 20cm と空気侵入値以下に設定している。そのため、今回のしらすを用いた実験結果は高い側方排水能が期待できる高飽和領域を制限した状態でのものであり、排水層厚を空気侵入値以上に大きくすればさらなる性能

向上が期待できると思われる。

- 2) 表面流出を考慮した Kung の限界長理論式による評価では、実浸透量が小さく抑えられる八戸しらすの方が豊浦砂より分離性能が優れるという結果が得られた。模型実験より限界長が長くなる結果となったが、排水層厚や排水引込み部の排水効率、排水部までの距離の影響が出たものと思われる。
- 3) また、飽和不飽和浸透流解析コード PlaxFlow による解析を行い、室内模型実験により得られた実測値と比較したところ、八戸しらすの場合は誤差 20% 以内、豊浦砂の場合は誤差 10% 以内の概ね良好な整合性が得られた。特に均等係数が小さく、材料の不均一性の影響が小さいと思われる豊浦砂において良好であった。

今後は八戸しらすの粒度分布や均等係数を調整した材料の保水透水特性や表面流出量を考慮した模型実験、予測解析や、実規模を想定した予測解析等を行い、さらに八戸しらすの利用可能性を検証したい。

謝辞

本研究で実施した模型実験，解析において多大なご協力，ご指導を頂いた東北大学大学院工学研究科，渦岡良介助教授，仙頭紀明助手に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ning, L. and William, J. L. : Unsaturated Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 2004, 556pp.
- 2) Kung, K-J. S. : Preferential flow in a sandy vadose zone 2. Mechanism and implications, Geoderma, 46, pp. 59-71, 1990.
- 3) PLAXIS manual : PlaxFlow manual version 1, Plaxis Ltd, Delft, The Netherlands, 2003.
- 4) 堀内将人：キャピラリーバリアを用いた土壌汚染制御の可能性，平成5年度放射性廃棄物管理専門研究会報告書，京都大学原子炉実験所，No.179, pp.1-12, 1993.
- 5) 高尾肇，竹ヶ原竜大，植田浩義：高レベル放射性廃棄物処分のバリア性能に関する課題と地盤工学への期待，土と基礎，Vol. 489, No.46-10, pp. 19-22, 1998.
- 6) 永井誠二，鈴木正人，坂本好文，平田征弥，渡辺邦夫：地下水制御技術を利用したトレンチ処分の合理化研究（その2）キャピラリーバリアの排水性能室内実験結果，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，pp. 346-347, 2000.
- 7) 坂本篤，鈴木正人，今井淳，山口陽久：キャピラリーバリア型覆土の性能と解析，第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.1148-1150, 2004.
- 8) 東條安匡，田中信寿，松藤敏彦，松尾孝之：キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋立地底部集排水構造に関する研究－実験的研究－，土木学会論文集，No. 692/VII-21, pp. 53-62, 2001.
- 9) 梅田美彦，永井誠二，山田善之，藤原愛：人工多層地盤を用いた降雨浸透制御に関する実験的研究，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，pp. 1050-1051, 1993.
- 10) Ralph, S. B. and Daniel, H.: Laboratory Tests of a Theory of Fingering During Infiltration into Layered Soils, Soil Science of America. J., Vol. 54, pp. 20-30, 1990.
- 11) John, C. S. and Carl, E. M. : Method to Estimate Water Storage Capacity of Capillary Barriers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 297-302, 1998.
- 12) John, C. S. and Clifford, E. A. : Capillary Barrier Effect from Undelying Coarser Soil Layer, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 641-648, 1999.
- 13) 渡辺邦夫：古墳土構造に見る不飽和浸透流制御，土と基礎，Vol. 408, No. 40-1, pp. 19-24, 1992.
- 14) 小林弘明，小澤一喜，川端淳一，薦田敏郎：地盤材料による廃棄物処分場の表面遮水工に関する研究，第38回地盤工学研究発表会平成15年度講演概要集，pp.1197-1198, 2003.
- 15) 小林弘明，小澤一喜，川端淳一，薦田敏郎：処分場トップカバーにおけるキャピラリーバリアシステムの実験的検討，第39回地盤工学研究発表会平成16年度講演集，pp. 1213-1214, 2004.
- 16) 鈴木正人，田中信寿，大迫政浩，田中勝：降雨浸透抑制型覆土の開発，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，pp. 456-457, 1997.
- 17) 鈴木正人，中尾法生，細野洋一，齋藤誠，宇佐見貞彦，齋藤正浩：キャピラリーバリア型覆土の適用事例，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，pp. 281-282, 2003.
- 18) Benjamin, R. : The Diversion Capacity of Capillary Barriers, Water Resources Research, Vol. 26, No. 10, pp. 2625-2629, 1990.
- 19) 宮崎毅：キャピラリーバリアの限界長に関する研究：農業土木学会論文集，No.179, pp.49-56, 1989.
- 20) 西垣誠，梅田美彦，河野伊一郎：多層地盤内への降雨浸透とその制御法，地盤と建設，Vol.9-1, pp.105-117, 1991.
- 21) Curtis, M. O. and Karsten, P. : On Numerical Modeling of Capillary Barriers, Water Resources Research, Vol.29, No.4, pp.1045-1056, 1993.
- 22) Carl, E. M. and John, C. S. : Parametric Study of Unsaturated Drainage Layers in a Capillary Barrier, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp.1057-1065, 1999.
- 23) 東條安匡，田中信寿，松藤敏彦，松尾孝之：キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋立地底部集排水構造に関する研究－数値解析－，土木学会論文集，No. 692/VII-21, pp. 41-52, 2001.
- 24) 清原雄康，海野寿康，風間基樹：八戸しらす盛土の降雨時浸透挙動と予測，第50回地盤工学シンポジウム平成17年度論文集，pp. 429-434, 2005.
- 25) Van Genuchten, M. T. : Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic conductivity of Unsaturated soils, Soil Sci. Am. J. , Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 26) Van Genuchten, M. T., Leij, F. J. and Yates, S. R. : The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated soils, Res. Rep., 600 2-91 065, USEPA, Ada, OK, 1991.
- 27) 小島謙一，舘山勝，橋本和佳，西原聡：土構造物の設計に用いる設計降雨に関する検討，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，pp. 837-838, 2003.

(2007. 1. 29. 受付)

The applicability of Hachinohe Shirasu as material of capillary barrier

Yukoh KIYOHARA¹, Mitsuo IWABUCHI², Motoki KAZAMA³

1 Department of Civil and Environmental Engineering, Hachinohe National College of Technology

2 Graduate School of Engineering, Department of Civil Engineering, Tohoku University

3 Graduate School of Engineering, Department of Civil Engineering, Tohoku University

Abstract

The laboratory tests of capillary barrier, whose drainage layer was each composed of Hachinohe Shirasu or Toyoura sand, were carried out to study the applicability of Hachinohe Shirasu as a material of capillary barrier. The intensity of rainfall were varied from 5 to 40 mm/h. Under that steady state conditions of high rainfall intensity, Hachinohe Shirasu had good performance, comparing with Toyoura sand. Then by using hydraulic property which acquired from laboratory tests, the finite element analysis of saturated-unsaturated seepage were performed and predicted the behavior of infiltration due to rainfall. Comparing the calculated behavior with measured one, it can be concluded that the calculated behavior agreed with observed one.

Key words: Unsaturated soil, Permeability, Shirasu, Capillary phenomenon