

現地発生土を用いた廃棄物処分場のしゃ水工法の開発

—— E S L (エコ・ソイルライナー) 工法の配合設計技術 ——

日笠山 徹 巳 松 尾 龍 之
久 保 博 平 間 邦 興

Development of Impervious Soil Liner in Waste Landfill using Existing Excavated Materials —— Method for Mix Proportion Design of E.S.L. (Eco Soil Liner) ——

Testumi Higasayama Tatsuyuki Matsuo
Hiroshi Kubo Kunioki Hiramata

Abstract

The authors have developed an impervious soil liner for waste landfill using excavated materials and bentonite, gravel, fused slag, or soil stabilizer. This method is called the E. S. L. (Eco Soil Liner) method. This report first describes the relation between mix conditions and compactability, permeability, and the mixture's strength properties. Next, it describes the application of fused slag as a substitute for gravel as the soil liner aimed at achieving zero emission. The results of the investigation are as follows. (1) The compactability of the mixtures depends on the properties of the sand/bentonite mixture for mixture gravel ratios up to 40%. (2) The permeability of the mixture depends on the bentonite to sand ratio for mixture gravel ratios ranges up to 60%, and it can be reduced effectively at the rate of 10~15%. (3) ϕ_{cu} increases as gravel rate increases in providing that the bentonite/sand ratio is constant. (4) Soil liner using fused slag has about the same permeability and strength properties as that using gravel.

概 要

著者らは、廃棄物最終処分場のしゃ水構造のひとつである土質材料による難透水層いわゆる土質しゃ水層の造成技術として、現地発生土にベントナイトや礫、熔融スラグあるいは固化材などを混合するE.S.L (エコ・ソイルライナー) 工法の開発に取り組んでいる。本報告では、配合条件が土質しゃ水材の締固め性や透水性、強度特性に及ぼす影響を室内試験により明確にし、ゼロエミッションの思想のもと熔融スラグの礫代替として土質しゃ水材への適用性について検討を行った。その結果は、次のとおりである。(1)土質しゃ水材の締固め特性は、礫率が40%程度までは礫を除いた砂とベントナイトの混合部に支配される。(2)透水係数は、礫率が60%までは砂に対するベントナイト率に依存し、10~15%程度で効果的に透水係数を低減できる。(3)せん断抵抗角 ϕ_{cu} は、砂分に対するベントナイト率が一定であれば礫率が大きいほど大きい。(4)熔融スラグを混合した土質しゃ水層は、礫を混合した場合と同等の透水性や強度特性を有し、有害物質溶出試験では基準値を下回る。

1. はじめに

廃棄物最終処分場からの汚染水漏出についての社会的関心は極めて強く、そのしゃ水技術向上は急がれている。従来、処分場のしゃ水工は、しゃ水シートを単独で敷設した構造が一般的であったが、一部の処分場で漏水が見つかるなど、改めて安全性確保についての指摘が強調されている。平成7年12月の厚生省通達では、しゃ水構造を2重シートか、土質材料による難透水層いわゆる土質しゃ水層とシートの併用構造 (Fig. 1) が謳われた。平成10年6月に総理府と厚生省から示された最終処分場構造基準¹⁾では、土質しゃ水層の有効性が具体的に盛り込まれており、今後土質しゃ水層のニーズは確実に増大する。したがって、合理的な設計・施工法を配慮した施工技術の確立は緊急の課題である。

著者らは、廃棄物処分場における土質しゃ水層の造成方法として、現地発生土にベントナイトや礫、熔融スラグあるいは固化材などを混合するE.S.L (エコ・ソイ

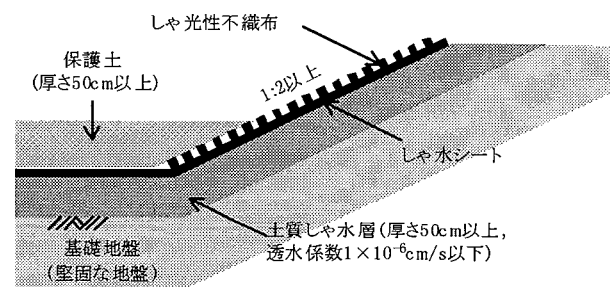


Fig. 1 廃棄物最終処分場のしゃ水構造の内、土質しゃ水層としゃ水シートの併用方式
Soil Liner & Seat Type in Impervious Liner of a Waste Landfill

ルライナー)工法の開発に取り組んでいる。その一環として、各種材料の配合条件が土質しゃ水層の締固めや透水、強度に及ぼす影響について明確にした。また、廃棄物処理施設より排出される焼却灰などの溶融スラグについて、ゼロエミッションの思想のもと、礫代替として土質しゃ水材への適用性を検討した。

本論文では、これまでの研究成果に基づき、現地発生土を用いた土質しゃ水層の基本的な配合設計法とともに、溶融スラグの適用性や固化材を混合した土質しゃ水層の留意点について論ずるものである。

2. 配合設計法の考え方

2.1 土質しゃ水層に要求される基準

廃棄物最終処分場の土質しゃ水層に求められる基準は、透水係数 ($1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下) および層厚 (50cm以上) である¹⁾。現場の透水係数は通常室内透水係数より1オーダー程度大きくなることから、室内透水係数の基準として $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下とする。

2.2 配合設計フロー

現地発生土あるいは購入材 (山砂など) そのままで土質しゃ水層として利用するには、透水係数や地盤強度などの品質やトラフィカビリティなどの施工面から問題があり、通常これらにベントナイトや粗粒材などを混合し利用する。その際の配合設計フローをFig. 2に示す。

3. 土質しゃ水層の基本的物性

3.1 概説

この章では、土質しゃ水層の基本的物性 (締固め、透水、強度) について、現地発生山砂を対象にした室内試験結果をもとに述べる。

3.2 室内試験

3.2.1 試料 山砂は細粒分を10%程度含有する現地発生砂を、礫はコンクリート用碎石(JIS2005)を用いた。ベントナイトは、Na系の赤城250# (豊潤鉱業) である。Table 1にこれらの基本物性を示す。

3.2.2 試験項目および方法 試験項目は、締固めおよび透水、三軸圧縮試験であり、それぞれの試験方法をTable 2に示す。透水と三軸試験の供試体は、締固め試験で得られた最適含水比、最大乾燥密度の条件で突固め法により作製した。

3.2.3 試験ケース 締固めと透水試験は、式(1)、(2)で定義する礫率Pgが4ケース (0, 20, 40, 60%)、ベントナイト率Pbが4ケース (0, 5, 10, 15%) の計16ケースの混合材料を対象にした。三軸圧縮試験は、Pgが3ケース (20, 40, 60%)、Pbが3ケース (0, 5, 10%) の計9ケースを行った。Fig. 3に試験粒度の粒径加積曲線を原試料とともに示す。

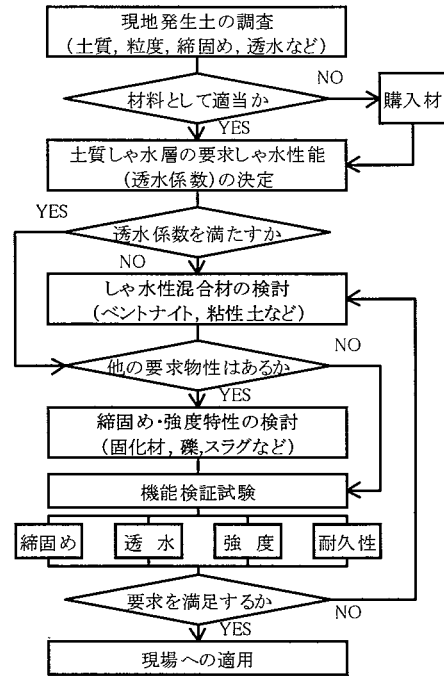


Fig. 2 配合設計フロー
Flow of Mix Proportion Design

Table 1 試料の基本物性
Material Properties

試料名		山砂	礫材	ベントナイト
		富津産	JIS2005	250#
土粒子密度	$\rho_s \text{ g/cm}^3$	2.711	—	2.600
礫の絶対密度	$G_s \text{ g/cm}^3$	—	2.688	—
礫吸水率	$Q_s \%$	—	0.64	—
平均粒径	$D_{50} \text{ mm}$	0.29	8.50	—

Table 2 試験方法
Method of Test

試験名	方法	規準
締固め試験	突固め (A-c) 法	JGS-T-711
透水試験	変水位法, $\phi 15 \times 12.5 \text{cm}$	JGS-T-311
三軸圧縮試験	飽和CU, $\phi 10 \times 20 \text{cm}$	JGS-T-522

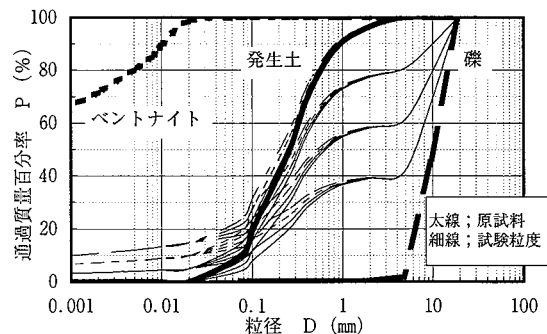


Fig. 3 粒径加積曲線
Grain Size Distribution Curve

$$P_g = \frac{[\text{礫質量}]}{[\text{全質量 (山砂+礫+ベントナイト)}]} \dots\dots(1)$$

$$P_b = \frac{[\text{ベントナイト質量}]}{[\text{全質量 (山砂+礫+ベントナイト)}]} \dots\dots(2)$$

$$P_{bs} = \frac{[\text{ベントナイト質量}]}{[\text{山砂質量}]} \dots\dots(3)$$

3.3 考察

3.3.1 締固め特性 締固め試験結果の内、礫率Pgと最大乾燥密度 ρ_{dmax} の関係をFig.4に示す。この図には、礫の占める体積を除いた山砂とベントナイト部分のみの乾燥密度 ρ_{dc} ^{2), 3)}も合わせて示す。この図より、Pg=0~60%ではベントナイト率Pbが一定ならばPgが増加に伴い、 ρ_{dmax} はほぼ比例して増大する。 ρ_{dc} については、Pg=0~40%はほぼ0%時の密度と同程度か若干小さい程度であるが、それ以降急激に減少し、その傾向はPbが大きいくほど顕著である。Pgが0~40%程度までは山砂とベントナイト部分のマトリックス中の礫が締固めエネルギーの伝達機構に関与せず³⁾、砂ベントナイト混合土の締固め特性を有していることを示す。

3.3.2 透水特性 透水試験の結果について、ベントナイト率Pbと透水係数kの関係をFig.5に示す。この図より、kはPbが0~10%までは急激に低下するが、それ以降の低下傾向は少ない。礫率Pgに着目すると、Pb一定ではPgが大きいくほどkが小さい傾向がある。この現象を明らかにするために、式(3)に示す砂に対するベントナイト率Pbsで透水係数kを整理するとFig.6となる。その結果、礫を混合したベントナイト混合土の透水係数kは、礫率Pgに拘わらず砂に対するベントナイト率Pbsに依存し、Pbsが10~15%程度で効果的に透水係数を低減することが判明した。

3.3.3 強度特性

(1) モール円 三軸試験の結果より得られるモール円を、礫率Pg=40%を例にFig.7に示す。この図より、ベントナイト率Pbが0~10%と増加すると、各拘束圧 σ_3 (49, 98, 196kPa)において最大せん断強度 τ_{max} ($(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}/2$)が急激に小さくなることわかる。この傾向は、Pg=20, 60%でも同様であった。

(2) せん断抵抗角 ϕ_{cu} せん断抵抗角 ϕ_{cu} と礫を除いた部分の密度 ρ_{dc} の関係をFig.8に示すが、 ϕ_{cu} と ρ_{dc} の関係は礫率Pg=20~40%と60%のグループに分かれる。これは、前項の締固め特性で記述したようにPgが40%程度までは、礫を除いたベントナイトと砂の混合部分がマトリックスを支配しているが、一方、60%以上になると礫がマトリックスの主格を成すようになるためと考えられる。そのため、両グループを比較するとPg=60%では ρ_{dc} が小さくても ϕ_{cu} は大きい。

次にせん断抵抗角 ϕ_{cu} に及ぼす礫やベントナイトの影響をより明確にするために、砂に対するベントナイト率Pbsを横軸に ϕ_{cu} をFig.9にまとめた。この図より、Pbsが一定であればPgが増加すると ϕ_{cu} も大きくなり、土質しゃ水材の強度特性改善のために、礫を混合することは有効な手段であることが理解できる。一方、Pgが一定であればPbsが増加すると ϕ_{cu} は小さくなる。

(3) 粘着力 c_{cu} 粘着力 c_{cu} に関しては、砂に対するベントナイト率Pbs一定では礫率Pgの影響は見られなかった。一方、Pbsが増大するにつれて c_{cu} は100から

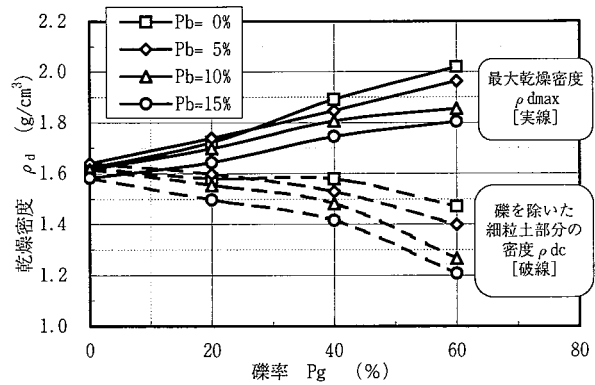


Fig. 4 礫率Pgと最大乾燥密度 ρ_{dmax} および 礫を除いた部分の密度 ρ_{dc} の関係
Relation between Gravel Rate Pg and Maximum Dry Density ρ_{dmax} , Density except Gravel ρ_{dc}

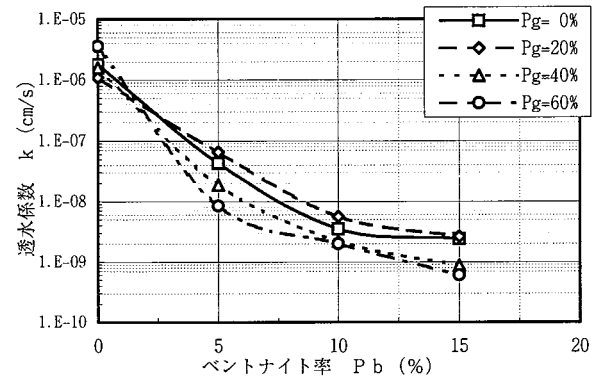


Fig. 5 ベントナイト率Pbと透水係数kの関係
Relation between Bentonite Rate Pb and Coefficient of Permeability k

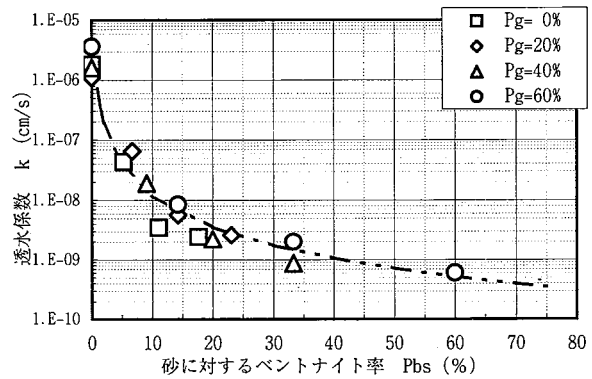


Fig. 6 砂に対するベントナイト率Pbsと透水係数k
Relation between Bentonite Rate against Sand Pbs and Coefficient of Permeability k

60kN/m²へと小さくなった。

(4) 変形性能 変形性能の指標として、各拘束圧に σ_3 における破壊ひずみ ϵ_t を砂に対するベントナイト率Pbsで整理し、Fig.10に示す。この図より、明らかにベントナイト率の増加に伴い破壊ひずみが増加し、変形性能が高まったことを示す。

4. 礫代替材としての溶融スラグの適用性

4.1 概説

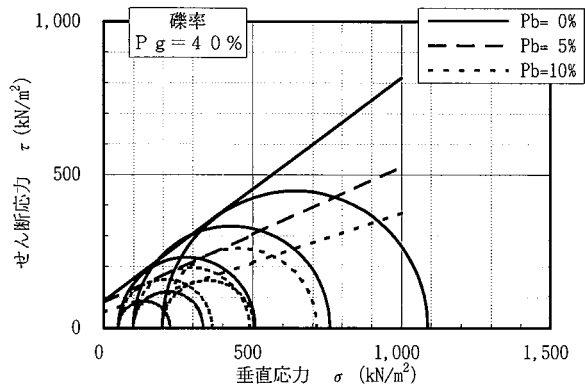


Fig. 7 モール円
Mohr's Stress Circle

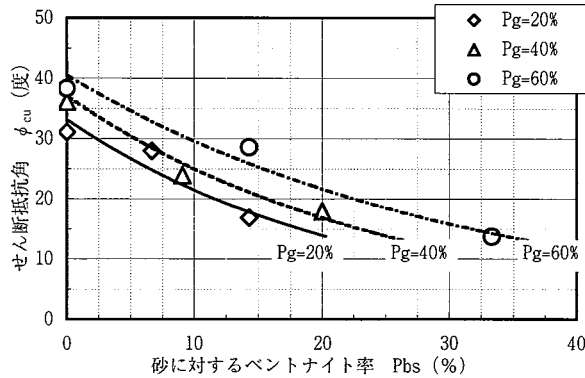


Fig. 9 砂に対するベントナイト率Pbsとせん断抵抗角 ϕ_{cu}
Relation between Bentonite Rate against Sand Pbs
and Angle of Shear Resistance ϕ_{cu}

この章は、ゼロエミッションの思想のもと廃棄物処理施設より排出される焼却灰などの熔融スラグについて、礫代替材としての適用性を室内試験をもとに考察した。

4.2 熔融スラグの基本物性

試験では市販されている熔融スラグを使用した。その基本物性および有害物質の溶出試験結果をTable 3, 4に、粒径加積曲線をFig. 11に示す。この熔融スラグは、Fig. 11からわかるようにクラッシュランC-40相当に調整された材料である。点載荷試験から得られた一軸強度から判定すると中硬岩相当の強度⁵⁾を有し、路盤材としての各種規格値⁶⁾は十分満足している。また、有害物質溶出試験では、土壤環境基準を十分満足することが確認できた。

4.3 試験内容

試験に用いた山砂やベントナイト、あるいは試験項目および方法は、前章の室内試験と同様である。試験ケースは、式(1)において礫を熔融スラグに置き換えた熔融スラグ率Pgsを40%とし、締固めと透水試験はベントナイト率Pbを4ケース(0, 5, 10, 15%)、三軸試験ではPbを3ケース(0, 5, 10%)実施した。

4.4 礫代替材としての考察

熔融スラグを混合したベントナイト混合土の室内試験

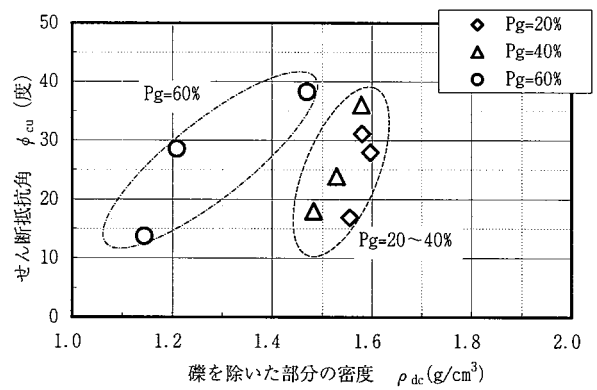


Fig. 8 せん断抵抗角 ϕ_{cu} と礫を除いた部分の密度 ρ_{dc}
Relation between Angle of Shear Resistance ϕ_{cu}
and Density except Gravel ρ_{dc}

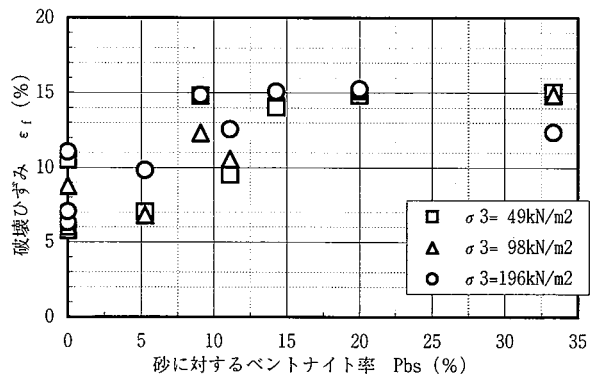


Fig. 10 砂に対するベントナイト率Pbsと破壊ひずみ ϵ_f
Relation between Bentonite Rate against Sand Pbs
and Failure Strain ϵ_f

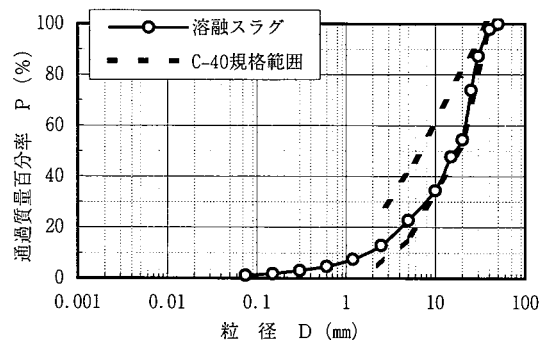


Fig. 11 熔融スラグの粒径加積曲線
Grain Size Distribution Curve of Fused Slag

結果の内、同量の礫を混合した場合と比較して、Fig. 12は透水係数kを、Fig. 13にはせん断抵抗角 ϕ_{cu} を示す。

これらの図より、礫代替として熔融スラグを混合したベントナイト混合土は、礫を混合した場合と同程度の透水性および強度特性を示すとともに、ベントナイト率Pbの変化に対しても同様な傾向があることがわかる。なお、結果は示さなかったが、締固め特性に関しても両者に明確な差異は見られなかった。以上のことより、熔融スラグの礫代替として土質しゃ水材への適用は、室内配合試験レベルにおいては十分可能であることがわかった。今後は、現場転圧試験や試験施工を通じて、現場規模の土質しゃ水層を造成し、締固め性を確認するとともに

Table 3 溶融スラグの基本物性
Properties of Fused Slag

試験名	特性値	試験結果	方法
粗骨材の 密度・吸水率試験	表乾密度 G_a (g/cm^3)	2.846	JIS A 1110
	絶乾密度 G_g (g/cm^3)	2.885	
	吸水率 Q (%)	0.74	
骨材の単位容積質量 および実績率試験	単位容積質量 (kg/l)	1.925	JIS A 1104
	実績率 F_a (%)	68.6	
骨材の安定性試験	損失率 (%)	0.6	JIS A 1122
岩の破砕率試験	破砕率 (%)	2.3	JHS 109
粗骨材のすりへり試験	すりへり減量 (%)	32.5	JIS A 1121
点荷試験	概算一軸強度 σ_c (kN/m^2)	31,700	岩の調査と試験 ⁴⁾
締固め試験	最適含水比 w_{opt} (%)	3.8	JIS A 1210
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	2.155	
CBR試験	修正CBR値 (%)	68.0	JIS A 1211
三軸圧縮試験 (CD)	粘着力 c' (kN/m^2)	52.2	JIS A 1210
	せん断抵抗角 ϕ' (度)	39.9	

Table 4 有害物質溶出試験結果
Toxic Substance Dissolution Test of Fused Slag

項目	試験結果	土壌環境基準 (環告46号)	方法
カドミウムCd (mg/l)	<0.001	0.01	JIS K 0102
シアンCN (mg/l)	<0.01	—	〃
鉛Pb (mg/l)	<0.005	0.01	〃
六価クロムCr ⁶⁺ (mg/l)	<0.01	0.05	〃
砒素As (mg/l)	<0.005	0.01	〃
総水銀T-Hg (mg/l)	<0.0005	0.0005	環告46号付表
セレンSe (mg/l)	<0.005	0.01	JIS K 0102

に所定の透水性や強度特性を満足するか調査する必要がある。

5. 固化材を混合した土質しゃ水材

5.1 概説

施工条件により土質しゃ水層に強度を期待する場合、セメントなどの固化材を混合した土質しゃ水材を適用する。一般のセメント安定処理土では、混合から締固めまでの時間が強度や透水に影響を及ぼすことが指摘されている^{7), 8)}ことから、固化材を混合した土質しゃ水材を対象にその影響度を室内試験を通じ検討した。

5.2 試験内容

山砂は成田産の現地発生土（細粒分率13%，平均粒径0.2mm）であり、セメントは普通ポルトランド、ベントナイトはNa系のクニゲルV1（クニミネ）を用いた。試験配合表とこれらの混合材の物性値をTable 5に、試験項目および方法をTable 6に示す。各供試体は、3種類を混合した後、0, 1, 2, 3, 4, 5時間経過した材料を対象に、「安定処理土の突固めによる供試体作製方法（JGS-T-811）」に準じて作製した。透水試験は、供試体作製後3日目から通水を開始し、飽和を確認の上測定を行った。一軸圧縮試験は、供試体をパラフィンシートにて密封し、恒湿恒温室内で養生の上、材令7, 28日で行った。

5.3 試験結果および考察

5.3.1 混合から締固めまでの経過時間と透水係数

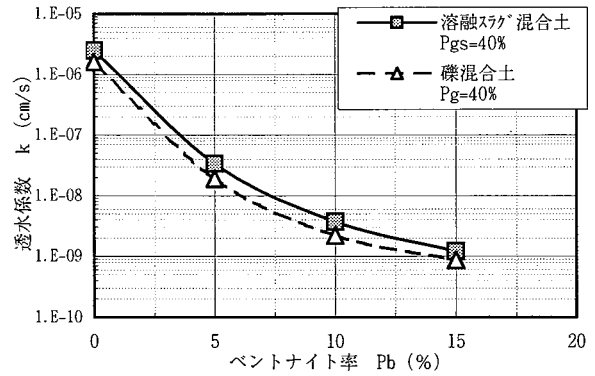


Fig. 12 溶融スラグおよび礫混合土の透水係数kの比較
Comparison between Fused Slag Mixture and Gravel One about Coefficient of Permeability k

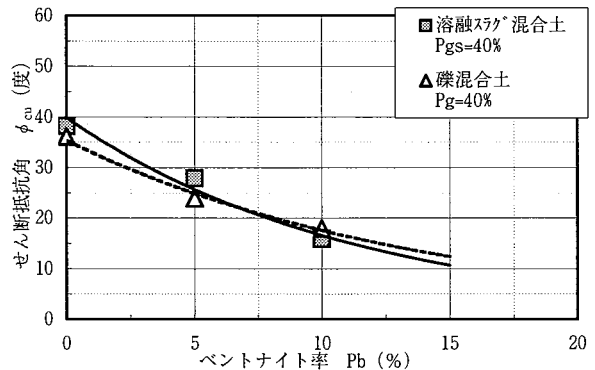


Fig. 13 溶融スラグおよび礫混合土のせん断抵抗角 ϕ_{cu}
Comparison between Fused Slag Mixture and Gravel One about Shear Resistance ϕ_{cu}

Table 5 配合表および混合材の物性
Mix Proportion and Properties of Mixture

配合量		混合材の物性	
山砂	1m ³	土粒子密度	2.746g/cm ³
セメント	100kg/m ³	最適含水比	21.30%
ベントナイト	70kg/m ³	最大乾燥密度	1.595g/cm ³
試験含水比	($w_{opt}+3\%$)	(締固め試験A-c法)	

Table 6 試験方法
Method of Test

試験名	方法	規準
透水試験	変水位法, $\phi 15 \times 12.5cm$	JGS-T-311
一軸圧縮試験	材令7, 28日, $\phi 10 \times 20cm$	JGS-T-522

混合から締固めまでの経過時間Tとそれぞれの時間で作製された供試体の透水係数kの関係をFig. 14に示す。同図には、供試体の締固め度Dcも合わせて示す。

この結果、混合から締固めまでの経過時間は、大きく透水係数に影響を及ぼし、1~2時間を経過すると透水係数は急激に大きくなる。この原因として、経過時間と締固め度の関係をFig. 14にみると、混合後時間が経過した供試体の締固め度が1時間後以降急激に小さくなり、4時間後以降は収束している。この傾向は、透水係数のそれと逆である。このことから、混合後締固め時期が早い場合、セメント固化反応が十分進んでいないため、従来の土質材料と同様に締固めが可能である。一方、締固め時期が遅くなると締固めまでの間に固化反応が進行し、

土粒子間の凝縮、固結が進み、セメンテーションによるマトリックスを構成するようになる。このような状態で締固めを行っても、締固めエネルギーがセメンテーションの破壊に費やされ、十分な締固めが行えない。また、締固め時に破壊されない団塊状態も一部存在するようになり、締固め度は減少、間隙比は増大し、結果として透水係数が大きくなる。なお、一般に土質しゃ水層の室内透水係数の基準は $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ であることから、この材料は混合後2時間以内に締固め作業を行わないと所定の品質を満足しないことになる。

5.3.2 混合から締固めまでの経過時間と一軸圧縮強度

混合から締固めまでの経過時間Tとそれぞれの時間における供試体の一軸圧縮強度quをFig.15に示す。

各材令の一軸強度についても前節の透水係数と同様に、1~2時間後に急激に小さくなる。理由として、締固め度の減少と、締固めまでに形成された固化物が締固め時に破壊され、その後の強度発現に寄与しなくなるためと考えられる。

5.3.3 固化材を混合した土質しゃ水材の留意点 固化材を混合した土質しゃ水材において、混合から締固めまでの経過時間が透水や強度に及ぼす影響が大きく、とくに透水係数の増大が顕著である。今回の試験でも、混合後数時間経過したあとに締固めた供試体は、外見上堅固 ($\sigma_7 \approx 700 \text{kN/m}^2$)にも拘わらず、透水係数は所定の品質 ($k \leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$)を満足せず、ポーラスな状態であった。したがって、施工に際しては、混合から締固めが終了する時間を考慮した施工方法（盛立量、混合や締固め方法、など）を十分検討するとともに、実施工に応じた室内配合試験を実施しなければならない。

6. まとめ

現地発生土を用いた廃棄物処分場の土質しゃ水層の配合設計技術に関して、次のような知見が得られた。

(1) 礫を混入したベントナイト混合土

- ・締固め特性は、礫率40%程度までは礫を除いた部分、砂とベントナイトの混合部の締固め特性に支配される。
- ・透水係数は、礫率が0~60%の範疇は、礫率に拘わらず砂に対するベントナイト率に依存し、10~15%程度で効果的に透水係数を低減できる。

- ・せん断抵抗角 ϕ_{cu} は、砂に対するベントナイト率が一定であれば、礫率が大きいほど大きく、土質しゃ水材の強度改善のためには礫の混合は有効である。

(2) 溶融スラグの土質しゃ水材としての適用性

- ・溶融スラグを礫代替として利用した土質しゃ水材は、礫を混入したベントナイト混合土と同程度の締固め、透水、強度特性を有する。

- ・溶融スラグからの有害物質溶出は基準値以下である。

- ・室内試験レベルでは、土質しゃ水材としての適用性を確認したが、今後現場規模の適用評価が必要である。

(3) 固化材を混合した土質しゃ水材

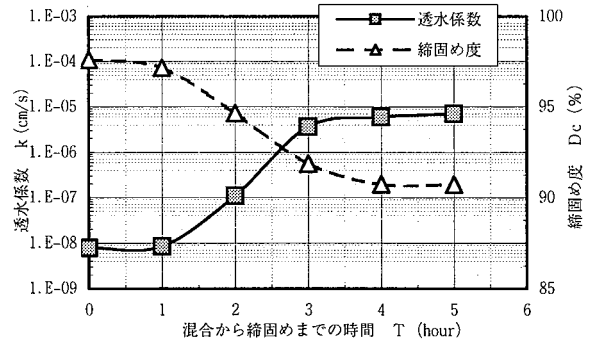


Fig. 14 混合から締固めまでの時間Tと透水係数kおよび締固め度Dcの関係

Relation between Time from Mixing to Compaction T and Degree of Compaction D_c , Coefficient of Permeability k

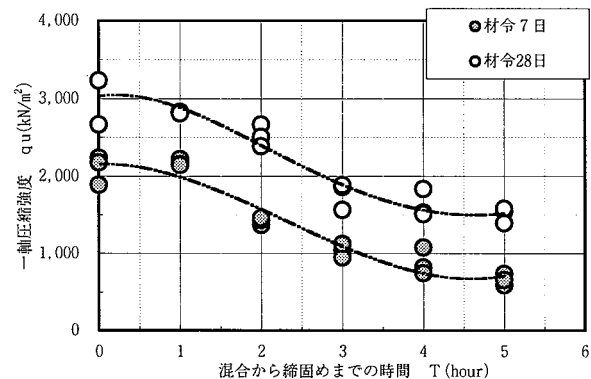


Fig. 15 混合から締固めまでの時間Tと一軸圧縮強度
Relation between Time from Mixing to Compaction T and Unconfined Compressive Strength

混合から締固めまでの経過時間が透水や強度に及ぼす影響が大きいことから、施工に際しては、混合から締固めが終了する時間を考慮した施工方法を十分検討しなければならない。

参考文献

- 1) 総理府・厚生省：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令，官報号外第121号，(1998)
- 2) 久楽ら：締め固め礫まじり土の工学的性質に関する実験的研究，土と基礎，Vol.31-2，pp.39~45，(1983)
- 3) 日笠山ら：粗粒材料の締固め特性に関する研究（その1），大林組技術研究所報NO.51，pp.39~42，(1995)
- 4) 地盤工学会：岩の調査と試験，pp.293~298，(1989)
- 5) 土木学会：ダムの地質調査，pp.111，(1996)
- 6) 例えば，日本道路協会：アスファルト舗装要領，pp.55~58，(1996)
- 7) 大藪ら：安定材の混合から締固めまでの時間の経過が安定処理土の強度に及ぼす影響について，第27回土質工学研究発表会，pp.2313~2314，(1992)
- 8) 岩淵ら：セメント改良土の強度・透水性に及ぼす混合、締固め時間の影響，第32回地盤工学研究発表会，pp.2369~2390，(1997)