

最終処分場におけるベントナイト混合土の性能と品質評価に関する研究と施工事例

氏原康博¹・星野 實²・富田大学²・岡田朋子³
本郷隆夫⁴・藤原照幸⁴・水野克己⁵・嘉門雅史⁶

¹ 浜北市市民経済部環境事業課 (〒434-0007 浜北市灰ノ木172)

² 旭川市環境部 (〒070-8525 旭川市6条通り10丁目第3庁舎)

³ 正会員 (株) ホーゲン 応用粘土科学研究所 (〒379-0133 群馬県安中市原市1433-1)

⁴ 正会員 (財) 地域地盤環境研究所 (〒660-0822 兵庫県尼崎市杭瀬南新町1-1-20)

⁵ 正会員 岡山大学大学院自然科学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

⁶ フェロー会員 工博 京都大学大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市吉田本町)

最終処分場の遮水構造としてベントナイト混合土が用いられている。締固めたベントナイト混合土の乾燥密度と含水比から透水係数を把握し、施工後の締固めたベントナイト混合土の性能(遮水性)と品質(バラツキ)を評価する手法が求められている。旭川市芳野一般廃棄物最終処分場(仮称)並びに浜北市一般廃棄物最終処分場において試験施工並びに本施工が行われた。直接的な手法としてブロックサンプルを採取し乾燥密度と含水比と透水係数から、その性能と品質を評価した。RI法を用いて現場での乾燥密度と含水比から統計的に3シグマ法を用いて品質評価を行ったので報告する。

キーワード：最終処分場、遮水構造、ベントナイト、性能評価

1. はじめに

近年、内陸型管理型最終処分場では、浸出水による地下水汚染防止を目的として、最終処分場埋立地内の底面部や法面部にベントナイト混合土が施工されている。この採用件数は、おおそ二十数件(平成12年8月現在)と少なく、施工規模は、おおむね500～50,000m²とまちまちである。ベントナイト混合土は、製造(混合)、運搬・仮置き・貯蔵、敷均し・転圧・整形と養生の工程を経て施工される。

ベントナイト混合土の要求される性能と品質とは、難透水性($k \leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$)とその透水係数の範囲が小さいことである。室内試験においては、土砂にベントナイトを添加混合し所定の突固めを行うことで、透水試験などで透水係数と乾燥密度と初期含水比を求めることができる。現場においては、締固められたベントナイト混合土に原位置での透水試験、又はブロックサンプルを採取し持ち帰り、室内で透水係数と乾燥密度と含水比を求めることができる。しかし、原位置での透水試験やブロックサンプルの採取は破壊法である。また、ベントナイト混合

土は遮水シートと組み合わせた複合ライナーであり、工程的な時間の制約を受け、ベントナイト混合土を締固めた後に長時間放置することはできない。ベントナイト混合土は、降雨などで水と接触し湿潤膨潤し塑性流動化する。このため、締固め後早期に透水係数を求める手法が望まれていた。

ベントナイト混合土の透水係数は乾燥密度と含水比により変化する。このため、事前に室内試験から透水係数と乾燥密度と含水比の関係を求めることで、透水係数を類推できる。現場で締固めたベントナイト混合土の乾燥密度と含水比を求めるには、砂置換法やRI計器による土の密度試験(以下RI法と呼ぶ)やGPS(Global Positioning System)などと衝撃加速度計を組み合わせた手法などがある。内陸山間谷部に位置する最終処分場では、電波の受信状態が悪くGPSなどは適さない。2～4割法面部と平坦部が混在するベントナイト混合土の施工においては、砂置換法では試験精度に熟練性を有し、短期間に試験が出来ない。

本論では、室内透水試験から得られた透水係数とブロックサンプルにておこなった透水係数の相違を

調べた。また砂置換法と RI 法とブロックサンプルによる乾燥密度と含水比の相違を調べた。これらの試験結果から、RI 法で乾燥密度と含水比の値を求め、これを統計学的に 3 シグマ法を用いて品質と性能を評価した。

2. 室内と現場試験内容

旭川市芳野廃棄物最終処分場(仮称)(以下、旭川市廃棄物処分場と呼ぶ)では、平坦基盤部を未改良(CASE-A)とセメント改良(CASE-B)した 2 種類の試験施工を行った。ベントナイト混合土の撒出しは、均等な敷き均しを行うことを目的としてアスファルトフニッシャー(AS)を用いた。その後旭川市廃棄物処分場では本施工(CASE-C と CASE-E)を行った。浜北市一般廃棄物最終処分場(以下、浜北市最終処分場と呼ぶ)においては本施工(CASE-D と CASE-F)が行われた。ベントナイト混合土に用いられた土砂は、CASE-A, B, C, E は旭川産火山灰土で、CASE-D, F は静岡産まさ土である。ベントナイトの配合量は、CASE-A, B, C, E は 14%, CASE-D, F は 13% である。ベントナイト混合土の物性値を表-1 に、施工条件などの履歴を表-2 に示す。

なお、静的締固め法により作成された供試体と、ブロックサンプルを用いた供試体の透水試験、乾燥密度、含水比、ベントナイト選定と配合並びにベントナイト混合土製造と機械の選定、ベントナイト混合土の締固め後の厚さと、砂置換法と、RI 計器による土の密度試験は、下記条件で行った。

(1)室内透水試験条件

a) 静的締固め法により作成された供試体の透水試験

試験条件は、保護土が無いと想定した、保護土の厚さ約 $t=5\text{cm}$ に相当するステンレス板(上載荷重: 1kN/m^2)を供試体上部に載せ非拘束状態にて JIS A 1218 に準拠しリジッドウォール型透水試験装置にて約 5,000min 透水試験(試験水: 水道水)を行った。なお、ベントナイト混合土の締固め条件は、締固め試験(JIS A 1210: A-c 法)から求まる最大乾燥密度に対する乾燥密度の比、締固め度 D_c を 80%, 90%, 95%とした。なお、供試体の作成は設定含水比に含水調整された試料から、予め求めておいた供試体作成に必要な質量を採取し、締固め度 D_c から 80%, 90%, 95%となるよう静的締固め法により行った。

b) ブロックサンプルを用いた供試体の透水試験

ブロックサンプルは、図-1 に示す様に切り出し、

表-1 ベントナイト混合土の物性値

項 目	CASE-A,B,C,E	CASE-D,F
母材の土砂種類	火山灰	まさ土
礫分 (%)	8.3	3.7
砂分 (%)	41.1	63.4
シルト分 (%)	28.2	14.5
粘土分 (%)	22.4	18.4
最大粒径 (mm)	37.5	9.5
土粒子の密度(ρ_s) (g/cm^3)	2.497	2.652
最大乾燥密度 $\rho_{d\text{max}}$ (g/cm^3)	1.349	1.616
最適含水比 w_{opt} (%)	23.5	20.8
液性限界 LL (%)	104.5	131.0
塑性限界 PL (%)	24.8	18.5
塑性指数	79.74	112.5

表-2 ベントナイト混合土の施工履歴

項 目	旭川市		浜北市	
	試験施工 ($t=25\text{cm}$)		本施工 ($t=25+25\text{cm}$)	
	CASE-A	CASE-B	CASE-C	CASE-D
面積(m^2)	100	100	56,056	17,000
基盤状態	未改良	セメント改良		未改良
製造方法	自走式土質改良機(日立建機 SRP-1200)			
撒出し方法	AS フニッシャー		ブルドーザー	
転圧機械	10t 級タイヤローラー		クローラ*	
転圧回数(回)	8		6	

*20t 級ショベルのクローラー走行転圧

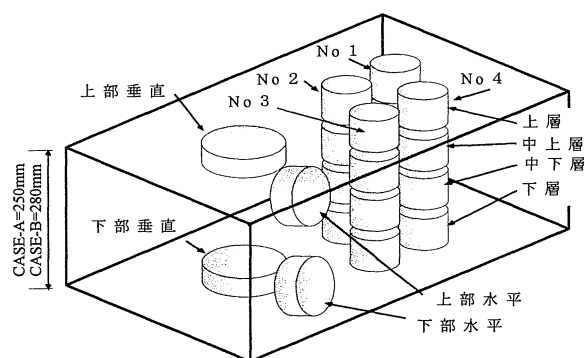


図-1 ブロックサンプル試験位置図

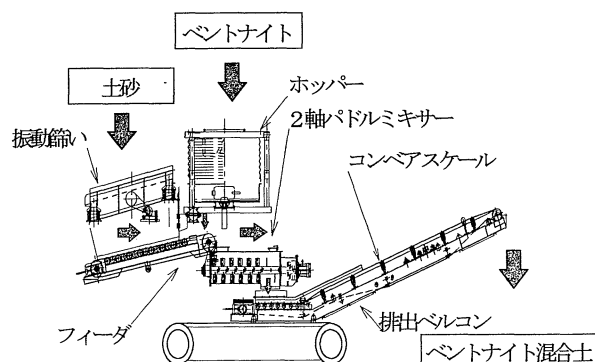


図-2 自走式土質改良機 SR-P1200 の詳細

直径 100mm × 高さ 50mm の供試体を成形した。フレキシブルウォール型三軸透水装置を用いて拘束圧 20kPa、初期動水勾配 18 で透水試験（試験水：水道水）を約 10,000min 行った。透水係数の算出は、ダルシー則に基づいて高さ 50mm の供試体内を試験水が浸透すると仮定し求めた。

c) ブロックサンプルを用いた乾燥密度と含水比

図-1に示すブロックサンプル試験位置図から直径 45mm × 高さ 50mm の供試体を切り出し、砂置換法による土の密度試験（以下砂置換法と呼ぶ）にて乾燥密度と含水比を求めた。

d) ベントナイトの選定と配合

USA Wyo M-I Greybull 産（スーパークレイ）の膨潤力平均値は 23.34ml/2g で、標準偏差値は 0.891、群馬産富岡原鉱産（赤城）は 18.16ml/2g で標準偏差値は 1.668、山形産（クニゲル V1）は、19.1ml/2g で標準偏差値は 1.436 であり、膨潤力でバラツキ（標準偏差値）が小さいスーパークレイを使用した。ベントナイトの配合量と方法は、土砂に対してベントナイトを透水係数にかかわる閾値（Threshold Value）を越えた量とし、土砂の乾燥質量に対してベントナイトを重量比で配合した。

(2) ベントナイト混合土の施工

a) ベントナイト混合土製造機械の選定

土砂とベントナイトの混合は、図-2に示す二軸パドルミキサーで混合される自走式土質改良機（SR-P2001）を採用した。これは装着した振動フルイ機で 40mm 以下にレキなど分級できる。自走式土質改良機から連続的に混合排出されたベントナイト混合土のベントナイト量のばらつきは、メチレンブルー消費量試験の結果から ± 1%以内である。¹⁾

b) ベントナイト混合土の締固め後の厚さ

ベントナイト混合土の締固めた一層の厚さは $t=25\text{cm}$ 以上とした。本論文では、試験施工 CASE-A と CASE-B は $t=25\text{cm}$ で、本施工 CASE-C と CASE-D は総厚 50cm ($t=25 + 25\text{cm}$) を示す。

c) 砂置換法による土の密度試験

図-3に示すように転圧後の上下のバラツキを把握する目的から、締固めたベントナイト混合土の天端部から-10cm までの層（以下、上層と呼ぶ）と-10cm から-20cm までの層（以下、下層と呼ぶ）の上下二カ所で砂置換法を実施した。

d) RI 計器による土の密度試験

RI 法にて乾燥密度と含水比を求めた。RI 計器は線源棒貫入型 RI 法(Direct Transmission)を採用し、事前に砂置換法にて補正した。

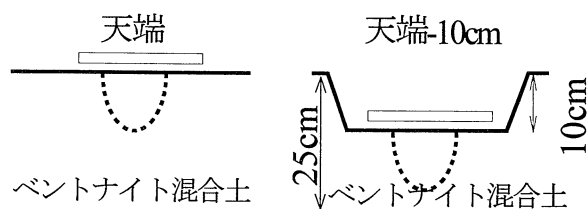


図-3 砂置換法試験位置

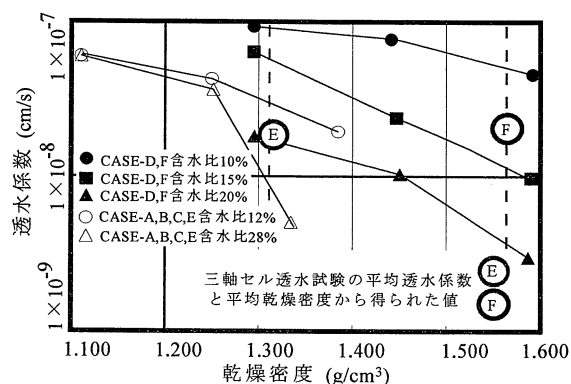


図-4 初期含水比と乾燥密度を変えた透水試験結果

3. 室内と現場試験結果

ブロックサンプルの透水係数から性能を、一層約 25cm の上下方向の乾燥密度結果から品質を、RI 法より得られた含水比と乾燥密度から面状方向（全体）の品質を検証した。なお、室内透水試験と RI 法が適用できるか、その妥当性を併せて検証した。

(1) 室内透水試験結果

旭川産火山灰土配合（配合 14%）と静岡産まさ土（配合 13%）を母材としたベントナイト混合土で、初期含水比と乾燥密度を変えた透水試験を行った結果を図-4に示す。これは、ベントナイト混合土の含水比と締固め度に応じた透水係数を把握することが目的である。乾燥密度が大きく、かつ初期含水比が高いほど、透水係数は小さくなることが判る。

(2) 砂置換法とRI法による密度試験結果

CASE-C のブロックサンプルを採取した付近で行った砂置換法と RI 法の結果を表-3に示す。砂置換法で上層と下層の全データの平均値と RI 法の平均値がほぼ等しい。よって、RI 法にて行われた乾燥密度の値は、砂置換法による上層と下層のほぼ平均値（天端から約 12.5cm の位置）を示していると言える。

(3) ブロックサンプルによる密度試験結果

CASE-B ～ CASE-D の試験結果から得られた乾燥密度と表－4の結果を併せて表－5と表－6に示す。表－4と表－5より乾燥密度は何れも上層から下層に向かって助々に小さくなり、締固めエネルギーが減衰するために上層より下層の乾燥密度が小さいことが判る。CASE-A ～ C では上層に比べ約10%, CASE-D では約5%下層が小さい。セメント処理された基盤 CASE-B は未処理基盤 CASE-A と比べ乾燥密度が大きい。また、含水比が大きいCASE-Cは、CASE-A ～ B と比べ乾燥密度が大きい。このことから基盤強度と含水比が乾燥密度に影響することが判る。

なお、CASE-A ～ F の試験場所と時期は、同一場所や同一時期ではない。また、表－6の CASE-A ～ C の平均含水比が異なるのは、採取した火山灰の土取り場の時期が異なるためである。

(4) ブロックサンプルと砂置換法とRI法

表－4の CASE-C においてブロックサンプル 16 点の乾燥密度平均値は 1.347g/cm^3 で、表－3の砂置換法の全データの乾燥密度平均値は 1.380g/cm^3 で、表－3の RI 法の乾燥密度平均値は 1.334g/cm^3 であり、現場施工と言う環境条件、母材に混入する小石、また試験精度などを考慮すると、これら乾燥密度のバラツキは誤差範囲内と言える。このため砂置換法と RI 法とブロックサンプルから得られる乾燥密度の値は、ほぼ同じと見て良い。

(5) ブロックサンプルによる透水試験結果

表－7より上下層および水平垂直方向の合計4ケの平均透水係数はCASE-Eでは $1.9 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ で、CASE-Fでは $2.1 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ であった。上層と下層とも水平と垂直方向の透水係数はほぼ同じであり、透水係数の異方性は無い。なお、表－7の平均乾燥密度～平均透水係数関係を、図－4上にプロットする。室内透水試験から得られた初期含水比の値から比較すると、ほぼ同じ含水比の延長線上に透水係数が位置する。室内透水試験と締固めプロセスの異なるブロックサンプルから得られた透水係数は、ほぼ等しいと言え室内透水試験は試験方法として妥当と考えてよい。

表－3 Cブロックサンプル付近の現場密度試験結果

計測方法	測 点	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm^3)	締固め度 (%)
砂置換法	上層 No1	23.5	1.450	107.5
	上層 No2	23.8	1.420	105.3
	平均値	23.6	1.435	106.4
	下層 No1	26.5	1.277	94.7
	下層 No2	26.3	1.379	102.2
	平均値	26.4	1.328	98.4
RI 法	全平均値	25.0	1.380	102.4
	No1	25.6	1.349	100.0
	No2	27.3	1.319	97.7
	No3	27.8	1.336	99.0
	平均値	26.9	1.334	98.9

表－4 Cブロックサンプル乾燥密度試験結果

	A1	A2	A3	A4	平均値
上 層(g/cm^3)	1.477	1.354	1.385	1.402	1.405
中上層(g/cm^3)	1.382	1.398	1.425	1.346	1.388
中下層(g/cm^3)	1.286	1.310	1.324	1.348	1.317
下 層(g/cm^3)	1.306	1.386	1.201	1.215	1.277

※平均乾燥密度= 1.347g/cm^3 ，標準偏差値=0.073

表－5 A～Dブロックサンプル詳細データ

CASE	A	B	C	D
4点平均上層乾燥密度	1.169	1.274	1.405	1.563
4点平均中上層乾燥密度	1.164	1.236	1.388	1.552
4点平均 中下層乾燥密度	1.150	1.187	1.317	1.508
4点平均下層乾燥密度	1.076	1.171	1.277	1.490
上下乾燥密度標準偏差値	0.043	0.047	0.060	0.034
下層/上層×100 (%)	92.0	91.9	90.8	95.0

※乾燥密度の単位=(g/cm^3)

表－6 A～Dブロックサンプル平均値データ

CASE	A	B	C	D
16点平均含水比(%)	14.6	13.2	24.7	13.6
16点平均乾燥密度(g/cm^3)	1.139	1.217	1.347	1.528
16点乾燥密度標準偏差値	0.049	0.050	0.073	0.049

表－7 CASE-E, CASE-F ブロックサンプル三軸セル透水試験結果

項 目	旭川市ブロックサンプルCASE-E					浜北市ブロックサンプル CASE-F				
	上部垂直	上部水平	下部垂直	下部水平	平均値	上部垂直	上部水平	下部垂直	下部水平	平均値
含水比(%)	25.8	25.5	25.3	25.3	25.4	13.3	14.8	14.2	13.7	14.0
乾燥密度(g/cm^3)	1.354	1.338	1.337	1.247	1.319	1.588	1.513	1.579	1.566	1.561
透水係数(cm/s)	2.3×10^{-8}	2.2×10^{-8}	1.6×10^{-8}	1.8×10^{-8}	1.9×10^{-8}	2.6×10^{-8}	1.5×10^{-8}	2.5×10^{-8}	1.8×10^{-8}	2.1×10^{-8}

(6) RI法の適用性

砂置換法と RI 法とブロックサンプルから得られる乾燥密度の値は、ほぼ同じと見て良い。また、室内透水試験と現場施工から採取されたブロックサンプルから得られた透水係数は、(4)と(5)の結果からほぼ等しいと考えて良いと判った。したがって事前に、初期含水比と乾燥密度を変えた静的締固め法による室内透水試験を行い、RI 法で乾燥密度と含水比を求めることで、透水係数を類推できる。このため、RI 法にて性能(透水係数)を求めることは可能である。

4. 統計学的な手法による品質評価

統計学による 3 シグマ法管理図から、締固めたベントナイト混合土の透水係数の品質(ばらつき)を求めることが可能か検討を行った。

(1) 品質の最大値と最小値

CASE-A の施工規模は、100m² で基盤はローラー転圧だけで無改良である。ベントナイト混合土は、アスファルトフニッシャーを用いて締固め後に約 25cm の厚さになるように撒出した。その後 8t ローラーにて転圧を行った。転圧は 16 回(8 往復)の走行を行い、0, 2, 4, 6, 8 往復ごとに各 40 点 RI 法で合計 200 点の密度と含水比を測定した。各 40 点毎に RI 法により得られた含水比と乾燥密度の二変数をプロットした相関図を図-5 に示す。また、転圧回数と乾燥密度の関係を図-6 に示す。図-5 と図

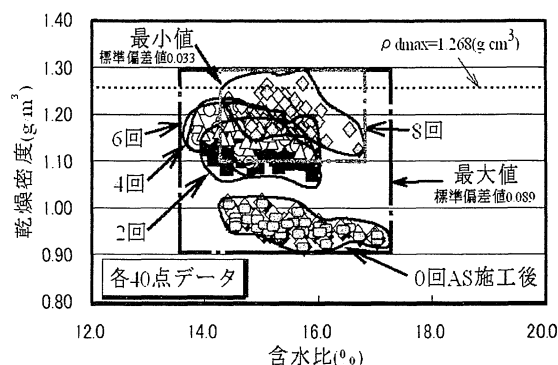


図-5 CASE-A 含水比と乾燥密度の相関図

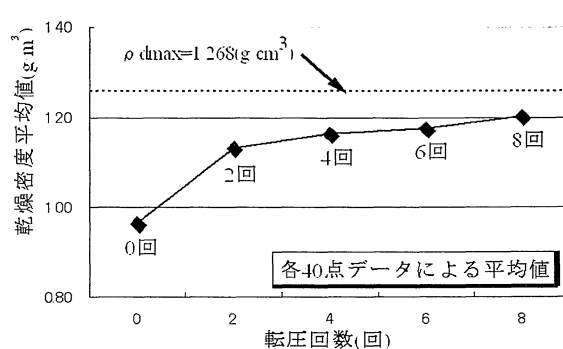


図-6 CASE-A 転圧回数と乾燥密度の関係

図-6 に示す様に転圧回数が 2 ～ 4 回までは乾燥密度が大きく変化し、以降はその乾燥密度の変化が小さくなるのが判る。仮に施工時ヒューマンエラーで転圧回数のバラツキが生じた場合、品質の最大値と最小値を乾燥密度の標準偏差値で知ることが出来る。図-5 より最大値は標準偏差値 0.089 であり、最小値は標準偏差値 0.033 である。

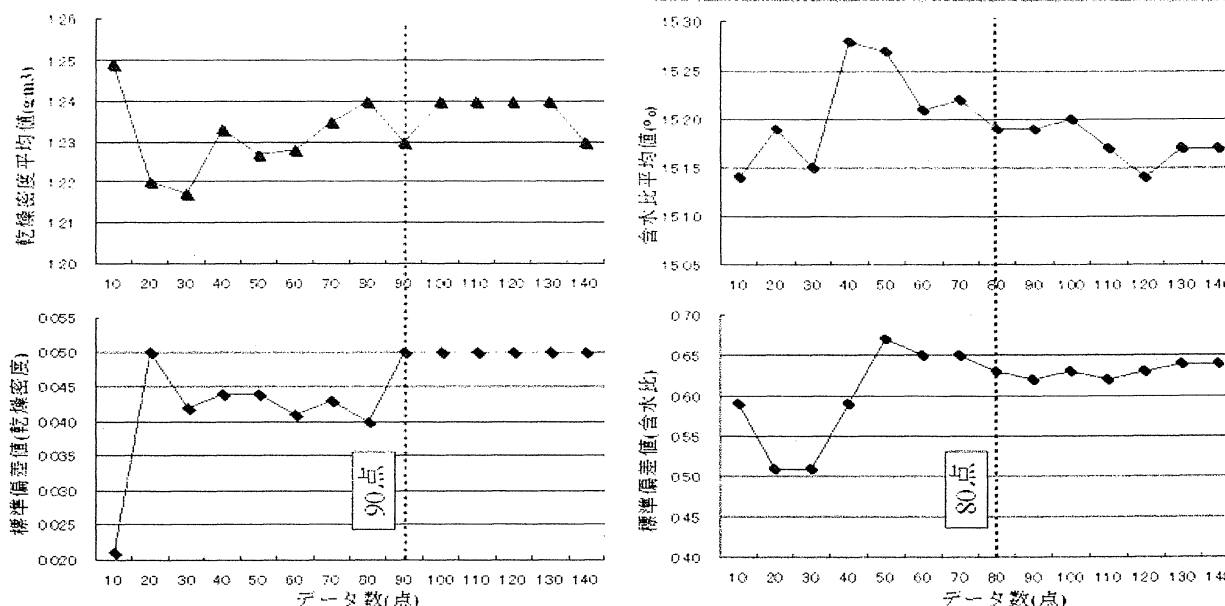


図-7 CASE-A データ数と標準偏差値(含水比, 乾燥密度)と平均値(含水比, 乾燥密度)の関係

(2) RI 法データ採取の最小値

CASE-B の施工規模は、100m² で基盤はセメント改良 (t=30cm, 配合 50kg/m³) 後ローラーにて転圧を行った。ベントナイト混合土は、アスファルトフニッシャーを用いて締固め後約 25cm の厚さになるように撒出した。その後 8t ローラーにて転圧を行った。転圧は 16 回 (8 往復) の走行を行い RI 法で 140 点の密度と含水比を測定した。

統計学を適用するに当たり RI 法のデータ採取の最小値を知ることが重要である。図-7 にデータ数と標準偏差値 (含水比, 乾燥密度) と平均値 (含水比, 乾燥密度) の関係を示す。乾燥密度はおおむね 90 点, 含水比は 80 点採取することで標準偏差値と平均値はほぼ一定になることが判る。RI 法で統計学を適用するには目安として 80 ~ 90 点以上のデータを採取することが望ましいと考えられる。

(3) 施工管理する上で締固め度の目標設定

CASE-B の RI 法により得られた含水比と乾燥密度の二変数をプロットした相関図を図-8 に示す。また, CASE-B の表-8 に示す最適含水比と最大乾燥密度の値と, 図-4 に示す初期含水比と乾燥密度を変えた透水試験結果から得られた透水係数を図-8 にプロットした。乾燥密度標準偏差値と含水比偏差値から 3 シグマ (3 × 標準偏差値 ± 平均値) を求め (以下 3 シグマ領域と呼ぶ) 図-8 にプロットした。CASE-B では, 旭川市廃棄物処分場本施工を想定し, 地盤はセメント安定処理が行われている。ベントナイト混合土は製造後一週間仮置き後に使用した。図-6 よりアスファルトフニッシャーにてベントナイト混合土を撒出した時点で, およそ締固め度が 80% を超えているため, ブルドーザーによる撒出しと比べ均一な締固め密度が得られていると考えてよい。従来の締固め度の規格値は, 締固め度 90% 以上となっている。しかし, 図-8 にバラツキの最小値を示す事で, 施工管理する上で目標 (最小の 3 シグマ領域) を示し施工を行うことができる。

(4) 旭川市廃棄物処分場の本施工結果

旭川市廃棄物処分場から本施工の RI 法により得られた含水比と乾燥密度の二変数をプロットした相関図を図-9 に示す。CASE-B と CASE-C の 2001 年と 2002 年の施工データと, これらを合計 (2001 年 + 2002 年) した含水比と乾燥密度データを表-8 に示す。CASE-B の含水比最小最大値 13.6 ~ 16.9% に比べ, CASE-C では 14.1 ~ 32.4% と含水比の変位が大きい。降雨などの原因で母材の火山灰の自然含水比が変動したことが原因と考えられる。しかし,

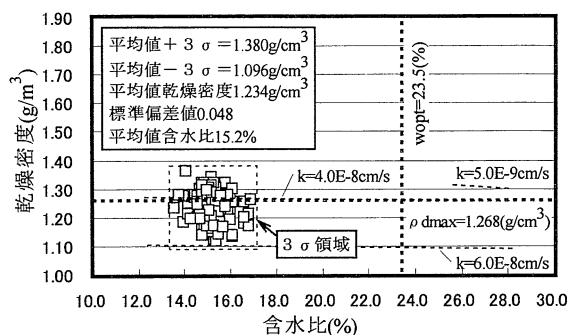


図-8 CASE-B 含水比と乾燥密度の相関図

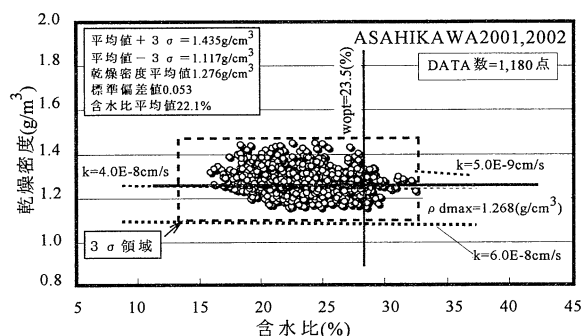


図-9 CASE-C 含水比と乾燥密度の相関図

表-8 ベントナイト混合土の評価結果

項目	B	① 2001C	② 2002C	①+②
RI 法計測点数	143	200	980	1,180
面積 (m ²)	100	12,218	43,838	56,056
乾燥密度				
最小値 (g/cm ³)	1.117	1.177	1.154	1.154
最大値 (g/cm ³)	1.361	1.379	1.449	1.449
平均値 (g/cm ³)	1.234	1.265	1.278	1.276
標準偏差値	0.048	0.043	0.054	0.053
含水比				
最小値 (%)	13.6	14.8	14.1	14.1
最大値 (%)	16.9	24.1	32.4	32.4
平均値 (%)	15.1	18.6	22.8	22.1
標準偏差値	0.6	1.62	3.08	3.27

※ B : t = 25cm, ① 2001C と ② 2002C : t = 25+25cm



写真-1 旭川市廃棄物処分場施工状況

大きな含水比の変動に対して乾燥密度は、最大乾燥密度を中心軸としてほぼ均等に分布していることが判る。

旭川市廃棄物処分場では写真－１に示す様に底面部と４割並びに２割法面部が混在する遮水構造である。約 28,000m³ のベントナイト混合土の製造と施工が２ケ年の長期に渡って行われた。ベントナイト混合土は、最終処分場内で事前に製造を開始し、最大 6,000m³ 程度仮置き・貯蔵され、工程にあわせて運搬した。

旭川市廃棄物処分場のベントナイト混合土(56,056m³)の性能と品質は、RI 法から得られた 1,180 点のデータをもとに、３シグマ法から最大透水係数は、 $5.0 \times 10^{-9} \sim 5.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ であった。図－９に示す様に透水係数の分布は、ほぼ横ばいで分布している。性能を示す透水係数は、 $k=5 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ を中心軸としている。また、施工後に採取した 18 点のブロックサンプルの透水係数は、 $1.1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ から $4.8 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ とバラツキは 5 倍以内であった。

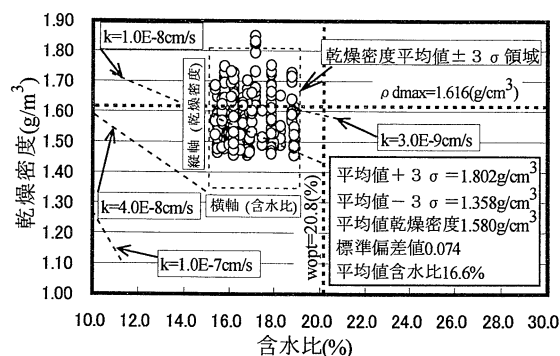
(5) 浜北市最終処分場の本施工結果

浜北市最終処分場の本施工から RI 法により得られた 325 点の含水比と乾燥密度の二変数をプロットした相関図を図－１０に示す。浜北市最終処分場では、工程に応じてリアルタイムにベントナイト混合土が製造・運搬されたため、同一含水比で乾燥密度が上下に変動しているのが判る。

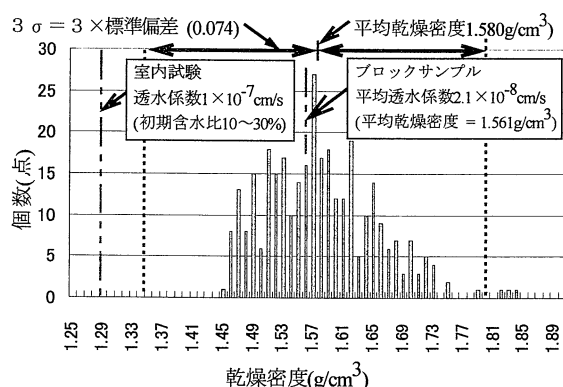
図－１１の３シグマ法管理図から、325 点データの 95 % が平均値±２シグマ(1.43 ～ 1.72g/cm³)の間に入る。このデータの分布は中心極限定理に従い正規分布に近似している。以上から、仮に 1,000 点の RI 法を行ったとしても、得られるデータは 99.73 % が図－１１に示す３シグマ領域(1.35 ～ 1.80g/cm³)の間に入ると言える。

浜北市最終処分場は平坦部 5,000m²、３割勾配法面部 12,000m² の規模で３割勾配法面部が平坦部より面積が大きい。写真－２に示す様に３割勾配法面部で振動ローラでは、作業上安全に転圧が出来ないと考え、試験施工の結果から 20t 級油圧ショベルのクローラを用いた転圧を行った。

浜北市最終処分場のベントナイト混合土(17,000m³)の性能と品質は、RI 法から得られた 325 点のデータをもとに、３シグマ法から最大透水係数は、 $k = 4 \sim 5 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ であった。性能を示す透水係数は $k = 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ を中心軸としている。



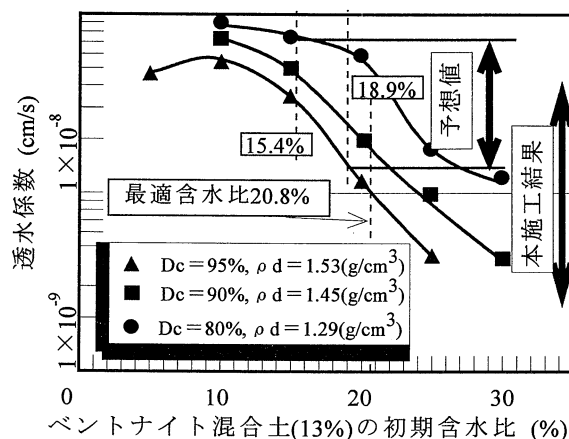
図－１０ CASE-D 含水比と乾燥密度の相関図



図－１１ CASE-D ３シグマ法管理図



写真－２ 浜北市最終処分場の施工状況



図－１２ CASE-D 含水比と乾燥密度を変えた透水係数

(6) 事前の室内試験による透水係数の予測

静岡産まさ土(配合 13%)を母材としたベントナイト混合土の、初期含水比と乾燥密度と透水係数の関係を示したグラフを図-12に示す。3シグマ法から得られた本施工の結果を併せて示す。本施工時の最低と最高含水比は 15.4 と 18.9%だった。図-12に示す様に、締固め度 80%で含水比 15.4%と締固め度 95%で含水比 18.9%の透水係数をもとめ、この透水係数の範囲を予想値とする。本施工結果と比べると安全側の範囲を示し、事前の室内試験で、本施工時の最終処分場全体のおおよその透水係数が、予測が可能である。

(7) 基盤強度と平坦部と法面部の勾配の違い

表-9に旭川市廃棄物処分場、表-10に浜北市最終処分場の法面部と平坦部の RI 法により得られた乾燥密度のデータから最大・最小値と平均値と標準偏差値を示す。表-9と表-10共に法面部も平坦部も一層目が二層目より平均乾燥密度が大きい。また、法面部と平坦部を比べた場合、平坦部の方が平均乾燥密度が若干大きい。基盤強度と平坦部と法面部の勾配の違いが乾燥密度に影響することが判る。

5. まとめ

締固めたベントナイト混合土は、基盤強度と平坦部と法面部の勾配の違いが乾燥密度に影響し、一層上下方向と面状方向(全体)に乾燥密度の若干バラツキがあった。しかし、それは仕様を外れるものではなく、旭川市廃棄物処分場と浜北市最終処分場の本施工においても要求された透水係数 $k \leq 1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ を満足し、締固めたベントナイト混合土の透水係数の異方性は無かった。

RI 法にて性能(透水係数)を求めることは可能であり、統計学による3シグマ法管理図から、締固めた最終処分場全体のベントナイト混合土の透水係数の性能(透水係数)と品質(バラツキ)を求めることができる。

表-9 C 法面部(勾配 1:4)と平坦部と層別密度

項 目	平坦部		法面部(1:4)	
	一層	二層	一層	二層
乾燥密度平均値(g/cm ³)	1.289	1.282	1.266	1.264
乾燥密度標準偏差値	0.052	0.050	0.057	0.053
含水比平均値(%)	22.6	22.5	23.5	22.7
含水比標準偏差値	3.30	3.10	3.00	2.78

表-10 D 法面部(勾配 1:3)と平坦部と層別密度

項 目	平坦部		法面部(1:3)	
	一層	二層	一層	二層
乾燥密度平均値(g/cm ³)	1.629	1.661	1.550	1.556
乾燥密度標準偏差値	0.059	0.082	0.058	0.062

含水比と乾燥密度の二変数をプロットした相関図(散布図)から、相関図の横軸(含水比)は、①土砂の自然含水比、②施工中の降雨や③基盤地下水などの影響、④製造されたベントナイト混合土が直送され直ぐに転圧又はストック後に転圧されたか、また、⑤ストック時に適切に養生されたか、などの5項目の要因を含む。相関図の縦軸(乾燥密度)は、ベントナイト混合土特性として⑥比重や⑦粒度特性と、⑧初期含水比並びに、⑨ベントナイト混合土のコンシステンシーなど、また施工精度として⑩基盤の強度と、⑪勾配を含む平坦性、⑫転圧時の締固めエネルギーと、⑬施工時の転圧回数などの施工管理状態など、3種類の13項目の要因を含む。相関図(散布図)に3シグマ領域を併せて示すことで、これら要因による品質を掌握しコントロールすることが可能である。

このため、統計学的な3シグマ法による評価手法は妥当である。また、事前の室内試験で、本施工時の最終処分場全体のおおよその透水係数が、予測が可能である。

参考文献

- 1) 水野克己, 皆瀬 慎, 古賀 慎: 水理バリアのベントナイト定量, 第45回粘土科学討論会, 粘土学会, pp150-151. 2001