

技術報文

ナチュラルブランケット工法による放射性廃棄物の隔離技術と施工例

NB 研究会 水野 正之 ((株)ホージュン) ・成島 誠一 (西武建設(株))

1. はじめに

2011. 3. 11 に発生した東北地方太平洋沖地震による福島第一原発事故に伴う放射能汚染物質の拡散における対策として「放射性物質汚染対処特措法」により特定廃棄物の処理方法が明確化されたが、東日本全域にその対策が求められ放射能汚染物質の早期の隔離が喫緊の課題となっている。本論では、わが国で最も早期に 8, 000Bq/kg を超えるセシウム汚染焼却灰（指定廃棄物）の一時保管対策で採用されたナチュラルブランケット工法（以下、NB 工法）によるベントナイト碎石を用いた不透水性土壌層の締固め度と含水比などの関係およびその施工実績などからの知見を示しその有効性について提示する。また、その後進められてきた放射性廃棄物の最終処分として実施した施工例などを紹介するとともに、今後進められる放射性廃棄物の処理対策技術のうち不透水性土壌層としての適用性を評価するものである。

2. 開発コンセプト

近年土質系遮水構造は、その耐久性の高さから多自然型川作りの河川ブランケット、ため池、廃棄物処分場などに適用されている。さらに現地発生土や比較的安価に現地調達できる原料土と粉体ベントナイトを現地混合したベントナイト混合土で施工した実績が増えてきている。これは、近傍に良質な粘土がなかったり要求される遮水性が高い場合、その代替としてベントナイト混合土を採用しているのが実情である。一方で原料土によっては、混合土に適さないものもあり煩雑な品質管理や施工管理、あるいは混合むらなどの課題があった。すなわち、混合土の製造については混合精度をあげるための混合機械の選定、品質管理については混合ムラが生じていないかの事前チェック、盛土管理については RI 計測や砂置換による現場密度試験、ブロックサンプリング後の室内透水試験による遮水性能確認などの工程でおこなわれていた（図-1 混合土製造フロー）。

そこで、この煩雑な工程をできるだけ簡易にかつ確実な遮水性能を発揮させることを目的に、ベントナイト 100%の碎石を所定の厚さで締め固めることで、上記ベントナイト混合土のほとんどの工程を省くことが可能となった。

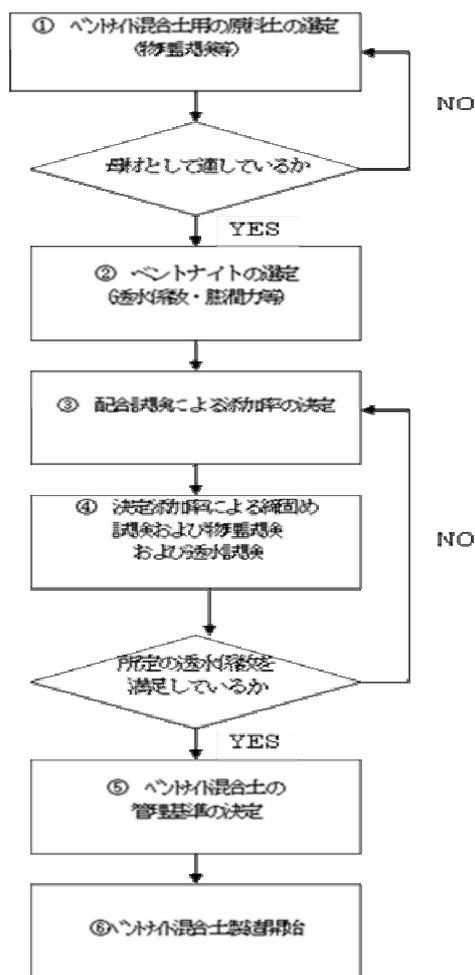


図-1 混合土製造フロー

3. NBの物理的特性

NB 工法に使用するベントナイト碎石は、ベントナイト鉱山から採掘した天然粘土鉱石を粒径26.5mm篩い通過分90%以上の粗砕した天然粘土碎石である。

その産地には、中国産、米国産、国産がある。本論では、今回適用した国産である群馬県富岡産の物理的特性について述べる。

図-2に材料の粒度分布を示す。材料は、概ね礫分より構成され、中分類で砂質礫{GWS}に相当し、メチレンブルー吸着量40mmol/100g以上で自然含水比14~30%付近で調整したものを採用した。

(1) 締固め度と透水係数の関係

締固めたNBの遮水性能は、土の透水試験方法(JIS A 1218, 変水位法)により透水係数 k を求めている。供試体寸法は、直径10cm・初期高さ2cmの供試体を作製し、予め計量した試料を鋼製モールド内で締固め度85%、90%となるように締固め作製した。但し、これに先立ちJIS A 1210 (A-c法、締固めエネルギーは標準プロクター相当)により締固め試験を行い材料の最大乾燥密度

$\rho_{dmax}=1.394\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=26.9\%$ であった。なお、覆土厚さが比較的薄い場合の遮水性を考慮し、上載荷重 0.15t/m^2 (1.5kPa ; 覆土7.5cm相当)の条件で透水試験を実施した。

図-3に透水係数の経時変化を示す。これによれば、締固め度 $D_c85\%$ 開始後25日時点では透水係数は一旦 $k \approx 1 \times 10^{-11}\text{m/s}$ まで低下した。その後、徐々に透水係数は上昇傾向を示し経過日数40日程度で定常状態となり締固め度 $D_c85\%$ においては、 $k_{85} \approx 4 \times 10^{-11}\text{m/s}$ 、締固め度 $D_c90\%$ では $k_{90} \approx 3 \times 10^{-11}\text{m/s}$ となった。試験開始後、水の浸透によりNBが膨潤し遮水性が低下するが、上載荷重が小さい場合にはさらに膨潤が進行し供試体全体の(乾燥)密度 ρ_d が小さくなることによって透水係数が若干上昇するものと推察する。結論としては、締固め度 $D_c85\%$ 以上であれば透水係数 $k_{85} \approx 4 \times 10^{-11}\text{m/s}$ 、締固め度 $D_c90\%$ 以上で $k_{90} \approx 3 \times 10^{-11}\text{m/s}$ が確保できることを確認した。

(2) 締固め特性による品質管理

施工上、締固め管理試験の方法に関しては、薄層で測定可能である簡易支持力測定器(以下キャスポル)により測定される衝撃加速度(インパクト値: I_a)を指標にしている。キャスポルによるインパクト値を適用するために、締固め度 $D_c85\%$ 、 $D_c90\%$ の2ケースについて含水比~インパクト値(I_a 値)の関係を把握するため含水比6点($w=10, 14, 18, 22, 27, 31\%$)の供試体を作製し、図-4に示すようにインパクト値 I_a を測定した。既往の研究では、 $I_a \geq 9$ であれば $q_c \geq 1.5\text{MN/m}^2$

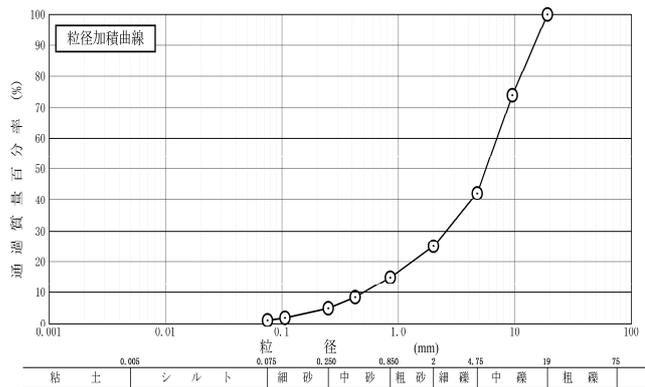


図-2 NBの粒度分布

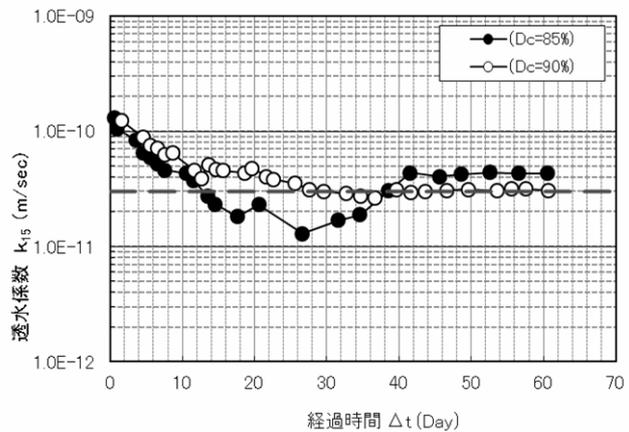


図-3 透水試験の経時推移

であることが把握されているため¹⁾、施工含水比範囲 14~30%であれば適正な材料であると言える。よって、施工上の品質管理は、含水比に影響されるものの概ね締固め度 $Dc85\%Ia_{max}=13$ を品質管理規格値とした²⁾。

(3) セシウム吸着特性

福島第一原発事故による放射能の飛散拡大により発生した放射性廃棄物からは自然減衰性に長時間を有する放射性セシウムが含まれている。

この放射性セシウムは水（雨水や地下水）に溶けやすいことから、溶出を防ぐために埋立処分地には①土壌等の吸着層を設置、②埋立場所を制限し降雨接触面積を減らす、③降雨を遮断する、④放射性セシウムの溶出を抑制させるといった工夫が必要と考えられている。

環境省では 8,000Bq/kg 超~100,000Bq/kg 以下の放射性廃棄物の処理について、管理型あるいは遮断型の処分場に処理することが指示されており、廃棄物下位にはセシウム吸着効果を期待する土壌層、雨水浸透を防止する目的として層間およびオーバーキャッピングに不透水性土壌層の構築が提案されている。不透水性土壌層については従来の最終処分場やため池・ダム等の土質遮水材料や人工土木シートなどがあげられるが、セシウム吸着効果が高い土壌層としてゼオライトについてベントナイトの吸着効果が高いと評価されている（ただし、環境中の pH や共存イオンの影響によりその数値は大きく変化する）。我々は従来からの土質遮水技術を目的としてベントナイト系で開発した、①NB 工法、②ベントナイト混合土、③ベントナイトブロック、④ベントナイトシートを放射性セシウム汚染土壌の隔離対策として提案しており、今回 NB 工法に使用するベントナイト砕石のセシウム吸着量効果を定量的に評価した。放射性セシウムの土壌における吸着効果については、独立行政法人国立環境研究所においてその定量的評価として吸着量と分配係数を要素試験より算出している³⁾。今回も同様の試験法において実施した。

この結果、セシウム濃度の自然減衰時間が長いセシウム 137 (C^{137}) の分配係数は予備膨潤無（ドライ）で 83.3 mL/g であり、予備膨潤ありで 69.7 mL/g であった。本試験の結果を独立行政法人国立環境研究所が提示している結果に加筆して表-1 に示す。NB 工法に使用される群馬県富岡産ベントナイト砕石の分配係数（セシウム吸着効果）は、独立行政法人国立環境研究所が提示しているベントナイトの分配係数同等以上であることが示された。ちなみにセシウム 134 (C^{134}) の分配係数も同等以上の結果を得ている。

表-1 ごみ焼却飛灰溶出液中の放射性セシウム 137 に対する分配係数 (mL/g)

	硅砂 5 号	茨城 真砂土	埼玉土壌	ベントナイト	顆粒 ゼオライト	粉末 ゼオライト	NB 原鈹 ベントナイト
pH=7	0.9	16	19	24	620	840	—
pH=12	4.8	13	35	63	530	840	69.7~83.3

*独立法人国立環境研究所技術資料より抜粋し加筆。

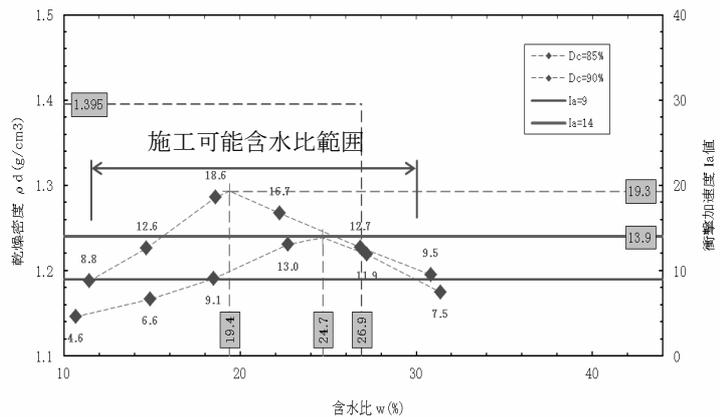


図-4 キャスポルおよび施工可能含水比範囲

4. NB 施工例

(1) 8,000Bq/kg を超えるセシウム汚染焼却灰の一時保管対策の施工

環境省では、2011年6月28日に8,000Bq/kgを超える「一般廃棄物焼却施設における焼却灰の測定及び当面の取扱いについて」関係都県廃棄物行政主管部局へ事務連絡が通達され、一般廃棄物最終処分場（管理型最終処分場）での保管についてはア) からエ) の要件を求めた。ア) 埋立場所を他の廃棄物と分けて保管する。イ) 土壌（ベントナイト等）で30cm程度の隔離層を設けたうえで、耐水性材料で梱包等した焼却灰等を置く。ウ) 雨水浸入防止のための遮水シート等で覆う、あるいはテントや屋根等でカバーする。エ) 即日覆土を行う。この環境省の事務連絡を受け、T環境局では一般廃棄物焼却場の焼却灰から当該セシウム汚染灰が検出されたことから、緊急的に最終処分場保管を行うことになりNB厚さ30cmの不透水性土壌層の敷設で対応することとなった。この不透水性土壌層は、「放射性物質汚染対処特措法」に準拠しており実施工と品質管理としてキャスポルの測定結果を示す。

a) NB の施工フロー

NB工法の施工は、**図-5**の施工フローに示すように、①基盤整地、不陸整正を行い転圧できる地盤強度としてコーン指数 $qc \geq 1.5 \text{ MN/m}^2$ を確認し NB 材料を搬入②敷き均し転圧 1 層仕上がり厚さ $t_1=15\text{cm}$ で施工③4t ローラーで 2 回転圧を行う。転圧後、キャスポルにてインパクト値 $Ia \geq 13$ を非破壊で測定し確認した上で 2 層繰り返し行い総厚さ $t_{1,2}=30\text{cm}$ の隔離層を構築した。NB は、自然含水比付近の概ね 18~23%程度の材料を敷設したが、粉塵もなく平均インパクト値 $Ia \geq 18.5$ で締固めを行い、日当たり 100~150 m^2 の施工量であった。



図-5 一次保管用底部施工フロー

b) 施工後の Ia 値測定結果

NB による不透水性土壌層品質管理上、キャスポルを適用した Ia 値測定結果を **図-6** に示す。また概ね NB の含水比は、自然含水比のため多少の増減はあるものの含水比域 18~23%であったことから締固め度は、**図-4** から $Ia_{85\%} \geq 9$ 、 $Ia_{90\%} \geq 13$ と読み取れ、測定値はすべて $Ia \geq 13$ 以上であったことから少なくとも $Ia_{85\%}$ は満足していることがわかる。また、標準偏差 2.75、平均 Ia 値 18.5 であり $Ia_{90\%}$

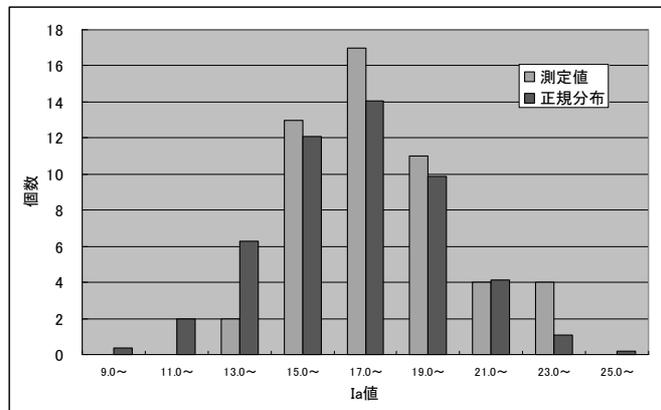


図-6 Ia 値度数分布

以上が 1/2 を占めていた。品質管理は、締固め度 85%以上を規格値とした場合、転圧回数 2 回で満足できることを予め試験施工して把握しておりこの結果を以って標準化した。締固め度を高くすれば透水係数がさらに低下する傾向が示すことから、今後は Ia90%を標準とすることを視野に転圧回数や基盤条件など施工方法を検討していく。

(2) 8,000Bq/kg 以下のセシウム汚染焼却灰の最終処分

環境省では、放射性濃度が 8,000Bq/kg 以下の廃棄物の場合には通常の廃棄物として「廃棄物処理法に基づき、自治体や廃棄物処理事業者等が処理をする」、すなわち従来通りの処理が可能とされている。しかし、実際にはその処理地域周辺住民の合意無しでは処理ができないのが現状であり、フェールセーフの観点からその安全性を確保した処理が必要となっている。

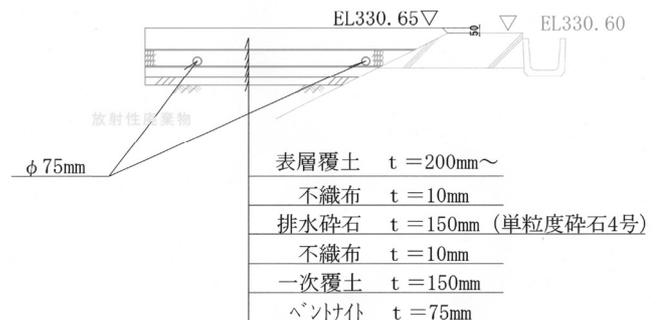


図-7 標準断面図

今回 T 市清掃センターでは震災後約 4,000Bq/kg 以下の放射性飛灰が排出される中、山間谷部に位置する既設処分場（遮水工は 2 重遮水シート）に処分する計画となった。しかし、地元周辺住民より当該地の跡地利用のことも考慮し、8,000Bq/kg 以下の放射性廃棄物であっても確実なオーバーキャッピングによる封じ込め工を施す要求があり、セシウム濃度のクリアランスレベルを 1,000Bq/kg とした要求性能隔離期間まで遮水ができる確実な不透水性土壌層によるオーバーキャッピングを施すことになった。尚、比較設計検討の中ではベントナイトシートやベントナイト混合土も行ったが、最終的な合意として図-7 に示す標準断面図のように NB 工法施工厚さ 75 mm + 上部覆土工 500 mm 以上（雨水排水対策工も含む）とした。

施工管理は前述した T 環境局の一次保管施工結果を受け、キャスポルによる Ia \geq 14（締固め度 90%以上）を目標値として 1 回/30 m²の頻度で締固め管理を行った。施工手順を図-8 に示す。



図-8 オーバーキャッピング施工フロー

NB 工法の施工手順は T 環境局の一次保管施工例同様であるが、今回は放射性廃棄物の封じ込め工と跡地利用も考慮した設計断面となっている。すなわち①放射性廃棄物を埋めた後、基盤材により不陸整形を行い、NB が転圧できるだけの支持力を確保する、②NB の施工、③一次覆土工、④不織布敷設+排水対策用の砕石工（φ75 mmのドレーン管を枝状に埋設）、⑤不織布敷設、⑥表層覆土工で最終仕上げを行った。

5. まとめ

環境省では、「放射性物質汚染対処特措法」により汚染焼却灰のセメント固型化することなど共通事項とした。これは、溶出抑制するための措置であるが、例えば平時まで放射線が自然減衰するには、 C^{137} で半減期 30 年であることから、100Bq/kg をクリアランス基準と考えると100,000Bq/kg で約 300 年のトラベルタイムが必要である。これは、いかに安定した不透水性土壌層が重要であるかということに帰着し汚染度合を勘案しつつ、水を浸透させない構造が必須である。NB 工法は、前述したように透水係数 $k \approx 3 \times 10^{-11} \text{m/s}$ であることから、不透水性土壌層厚さ $t=30\text{cm}$ 、動水勾配 $i=1$ 時でトラベルタイム $T=300$ 年程度確保する構造を提案できる。今後様々な事象で品質が良くかつ耐久性の高い不透水性土壌層が必要となることが考えられる。さらに、「放射性物質汚染対処特措法」ありきではなく、前述した T 市処分場の例にみられるように地域住民とのリスクコミュニケーションを進め安心感のある提案を行うことが求められる。ベントナイトは、天然粘土鉱物のひとつでありその耐久性、信頼性はフェールセーフの観点からも不透水性土壌層として最適な素材としこれまで処分場建設等で適用されてきた。福島第一原発事故により発生した広域放射能汚染地域は必至に除染作業が進められている。しかし、セシウムを含んだ焼却灰や除染で集められた汚染土壌は未だ最終処分地も見つからないまま各地に設けられた仮置きヤードに山積となって保管されている。その数も増え続けているこの未だ国難である現状を「次世代のために」早期に対応していくことは言うまでもない。今後、除染に伴う中間貯蔵施設、管理型最終処分場などにこの NB 工法が広く適用して頂ければ幸甚である。

【参考文献】

- 1) 成島誠一；藤原照幸 「新土質系遮水材高品質粘土の実用化」 土木学会第 64 回年次学術講演会論文集, 343~344, 2009
- 2) 成島誠一；藤原照幸；水野正之 「高品質粘土の試験施工と品質管理」 第 8 回環境地盤工学シンポジウム論文集, 107~110, 2009
- 3) 「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料）」(独)国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター