

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012

課題番号：24658201

研究課題名（和文） 被覆盛土方式による放射性汚染土壌の貯蔵保管工法の実用化試験

研究課題名（英文） Feasibility study on practical applicability of capillary barrier of soil to shallow land waste repository.

研究代表者

森井 俊廣 (MORII TOSHIHIRO)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30231640

研究成果の概要（和文）：キャピラリー・バリア（CB）は、砂層とその下に礫層を敷設した単純な土層システムをいう。地表面から浸潤してきた土中水は、土の不飽和水分特性の違いにより、両土層の境界面に沿ってうまく遮断される。危険な廃棄物、あるいは低レベルの放射性廃棄物を安全に隔離するための盛土式廃棄物貯蔵施設を提案した。この施設は、降雨による浸潤水を低減するとともに、貯蔵廃棄物を浸潤してくる土中水を排水するために、上部 CB 被覆層と底部 CB 排水層を敷設する構造となっている。盛土式廃棄物貯蔵施設の構造設計に必要な CB の限界長を室内土槽試験で決定し、この貯蔵施設を試験施工した。長期にわたって盛土内の土中水分量を測定し、野外条件下における CB の優れたかつ安定した水分遮断機能を確認した。

研究成果の概要（英文）：Capillary barrier (CB) is a soil layer system which is composed of sand layer underlain by gravel layer. Water infiltrating from soil surface is well diverted along an interface between the soil layers due to a physical difference in unsaturated hydraulic properties of soil. A shallow land waste repository, in which a top CB and a bottom CB are included to reduce infiltration due to rainfall and to divert water percolating through the protected waste material respectively, was proposed to isolate safely a hazardous waste material or a very low level radioactive waste. The diversion length of the CB which could be applied to structural design of the shallow land waste repository was determined based on the laboratory soil box test. Long-term measurements of soil moisture content in the test land waste repository showed an excellent and stable water diversion of the CB in the field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：キャピラリー・バリア，放射性汚染土壌，貯蔵保管工法，被覆盛土方式，試験施工，限界長

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故で放出された放射性物質により、多量の汚染土壌が作りだされてしまった。その最終処分の方法が確立されていない現時点では、収集された汚染土壌を更なる環境汚染が生じないように安全に貯蔵保管することが最も重要な対処課題

となる。しかも、除染特別地域における土壌を対象とすると、この貯蔵は相当な長期間を要することになる。

キャピラリー・バリア（Capillary barrier; CB）地盤は、砂層とその下部に礫層を敷設した傾斜した単純な層状地盤をいう。土粒子の大きさに因る砂層と礫層の保水性の違いにより、地表面からの浸潤水は境界面の上部で

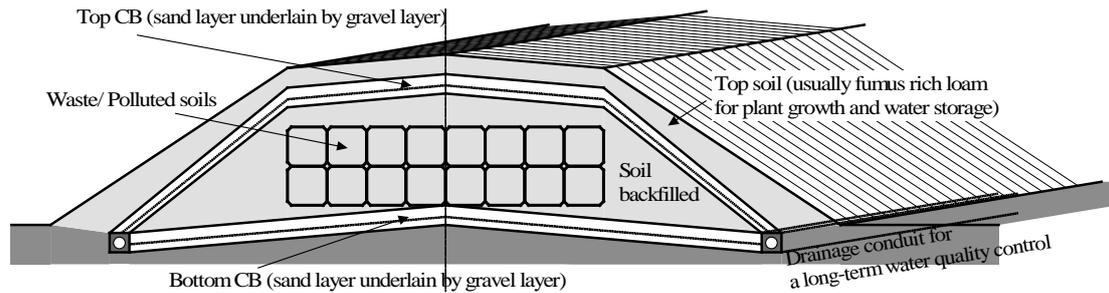


図1 CBシステムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設（提案）

捕捉・集積され、傾斜方向に流下していく。これにより、境界面以深の領域は一定の範囲にわたって水の浸入から保護される。この優れた雨水遮断機能と、しかも自然材料であるため長期にわたって機能が維持される利点を活かして、CB地盤で表層被覆した盛土形式による貯蔵保管工法の展開を図りたい。

CBの雨水遮断機能は広く知られているものであり、通常の廃棄物埋立場の表面被覆工として既に利用されている。地下水流入を防止するためには盛土形式の貯蔵保管方式をとる必要があるが、施工性と雨水遮断効果（範囲）の点から、盛土へのCB地盤の適用事例はいまのところ少ない。当然のことであるが、放射性物質による汚染土壌の貯蔵保管への適用はわが国では前例がないことから、社会に対し説得性をもって提示、あるいは社会に安心感をもって受け入れてもらうためには、当該工法の実務性を学術的な目で分析しその実務性を明らかにする必要がある。

収集された汚染土壌の貯蔵保管にあたっては、飛散流出防止ならびに地下水と雨水の確実な遮断が厳密に確保されなければならない。また、放射線汚染特有の問題から相当の長期間の貯蔵保管が必要となる。たとえば、除染特別地域で表土10cmを除去するとその土量は8,000万 m^3 にも及ぶと試算される膨大な量の汚染土壌を前に、貯蔵庫建屋の建造は非現実的である。コンクリートによる被覆では、対応して必要となる膨大な量のセメントが制約になるのはもちろん、なによりその被覆景観が環境回復のイメージにそぐわない。土木シートによる被覆は簡便であるが、表面敷設だと太陽光による劣化を受けやすく、埋設して敷設する場合には裂傷切断のリスクが高いなど、維持管理に大きな難点がある。いずれも決定打となるものはないが、CB地盤を用いれば、頭書の貯蔵保管のためのすべての要件を容易に克服することができる。つまり、盛土形式により、汚染土壌の飛散流出を防止し、かつ地下水の流入を防ぎ、さらにCB被覆とすることにより雨水遮断を実現する。CB地盤は砂と礫の自然材料のみで構成されるため、耐久性があり長期間にわたって

雨水遮断機能を維持できる。

現地で容易に調達できる土を利用して、同じく現地で汚染された土壌を貯蔵保管し、最終処分に結びつける。理にかなった方法であり、今のところ必要ない議論ではあるが、費用対効果の面からも斬新性に富んだアイデアであると考えられる。CB被覆盛土による貯蔵保管工法が実現した場合の効果、利点には、次のように期待以上のものがあると考えられる。

- ア) 盛土形式による地下水流入の阻止、CB地盤による完全な雨水遮断によって、汚染物質の流出・拡散の防止が可能となり、安心安全な仮置きまたは貯蔵保管を実現できる。
- イ) 砂と礫のみを用いるため、5~10年間さらにそれ以上の期間にわたっても材料劣化および機能劣化が生じない。
- ウ) 盛土構造であるため、飛散流出はなく、地形とスペースに応じた設計施工が可能である。
- エ) 砂と礫のみを用いるため、サイトごとに建設材料が入手でき、施工には一般の建設機械で対応できる。解体にも特殊な建設機械あるいは施工法を要しないため、最終処分の際、汚染土壌の再運搬に容易かつ迅速に対応できる。
- オ) 盛土高が低くなるため斜面すべりおよび地震時の斜面崩壊の危険性が極めて低く、内部の貯蔵土壌に攪乱が起きにくい。したがって、収集搬入、貯蔵および搬出後にわたるトレーサビリティを確保できる。
- カ) 盛土表面の植生景観により、貯蔵保管に対する不要の不安心理が緩和される。さらに、ファイトレメディエーションの導入により、放射性物質吸着等の直接的な除染の可能性を期待できる（ただし本応募研究課題の検討外）。低い盛土であるため、周辺あるいは盛土上で容易に空間線量のモニタリングができる。

2. 研究の目的

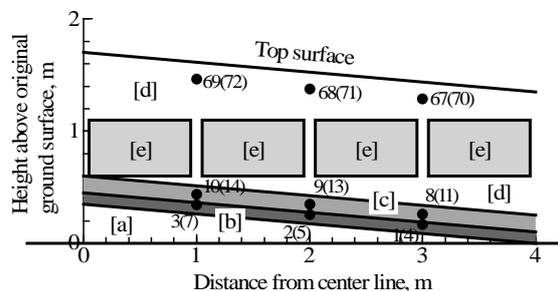
2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出され

た放射性物質による汚染土壌の貯蔵保管工法を開発し、提案する。最終処分の方法が見出せていない現段階では、当面、収集した汚染土壌の長期にわたる安定した貯蔵保管が最も重要な対処課題となる。貯蔵保管にあたっては、再拡散防止の点から、地下水と雨水の確実な遮断が厳密に確保されなければならない。図1に示すように、盛土形式で、かつ高度な雨水遮断機能をもつキャピラリー・バリア地盤で被覆する貯蔵保管工法を提案し、その実効性を、実形式の盛土を用いた野外築造・計試験により、検証する。図1において、表層部に敷設した上部 CB 被覆層により降雨による浸潤水を遮断するとともに、万が一に浸潤が生じた場合、底部 CB 排水層により貯蔵廃棄物を通過してくる土中水を安全に集水し排水できる構造となっている。先述したように、盛土形式であるため地下水の流入はなく、かつ砂と礫の自然材料であることから非常に長期にわたる供用性をもつ。

3. 研究の方法

CB 層には、平均粒径 0.22mm の砂と 6.0mm の礫を用いた。CB 盛土の構造規模は、砂の飽和透水係数、砂と礫の不飽和土水分特性、層の傾斜角ならびに浸潤量によって決定される限界長（傾斜した CB 層が上からの浸潤を遮断し境界面に沿って排水できる距離）によって決まる。土槽試験から、おおよそ限界長として 4m 程度が可能であることを確認したのち、図2に示すように、貯蔵施設の片側半分を模擬した高さ 2m 弱の CB 盛土を試験造成した。

原地盤（ローム）を 5 度の傾斜をつけて整地したのち、法面バケットを用いて礫を厚さ 10cm に、続いて砂を厚さ 15cm で静的に締め固めた（図3）。CB 層を敷設したのち、現地の砂質土を締め固め、その上に貯蔵体を想定して砂質土を詰めたトンパックを設置し、さらにその上部に同じく砂質土を敷き締め固めた。



- [a]: Loamy soil with surface inclination of 5 deg.
- [b]: Gravel constituting CB layer, 10cm thickness
- [c]: Sand constituting CB layer, 15cm thickness
- [d]: Sandy soil
- [e]: Sandy soil packed in polypropylene soilbag
- : Soil moisture sensor EC-5.

図2 CB 盛土の試験施工断面



a. 法面バケットによる礫層の締め固め



b. 法面バケットによる礫材の敷き均し



c. 完成後の試験盛土(周辺をトンパックで補強)



d. 造成中の CB 区画(奥側)と礫層のない砂層のみの参照区(手前)

図3 CB 層と盛土の造成方法

4. 研究成果

(1) CB 層の施工性能と締固め

CB 層の限界長,したがって CB 盛土の構造規模は砂の透水係数の大きさに比例して変化することから,砂層の締固め密度の均一性が重要な管理パラメータとなる。CB 層を敷設したのち,100cm³容器を用いて採土を行い,密度を測定した。図 4a に乾燥密度の正規分布を示す。図 4b は,現地測定範囲にほぼ対応する密度で供試体を作製し,室内定水位透水試験により求めた飽和透水係数をまとめたものである。図 4a より, CB 層の締固め密度は変動係数 2.0%となっており,バックホーに取り付けた法面バケット用いたにもかかわらず,比較的均質に締固めを行えることが分かる。しかし,密度の 95%信頼区間でみると,図 4b より,最大出現密度における透水係数は最小密度におけるそれより 35%程度小さくなる。上に述べたように, CB の限界長はダイレクトに砂の飽和透水係数に比例することから,砂層の締固めに対してできるだけばらつきが生じないような配慮が必要である。限界長をできるだけ長くするためには締固め密度は小さいほうが良いということになるが,おそらく,ばらつきは大きくなりやすく,なによりも,その後の上載土の施工により密度が増加することになる。このため,当初設計の限界長を実現できなくなり, CB 盛土の遮水機能を見込めなくなってしまう危険性が出てくる。したがって, CB 層の施工にあたっては,通常の土工工事と同じように可能な限り締固め密度を確保し,その条件のもとで期待される限界長をもとに, CB 盛

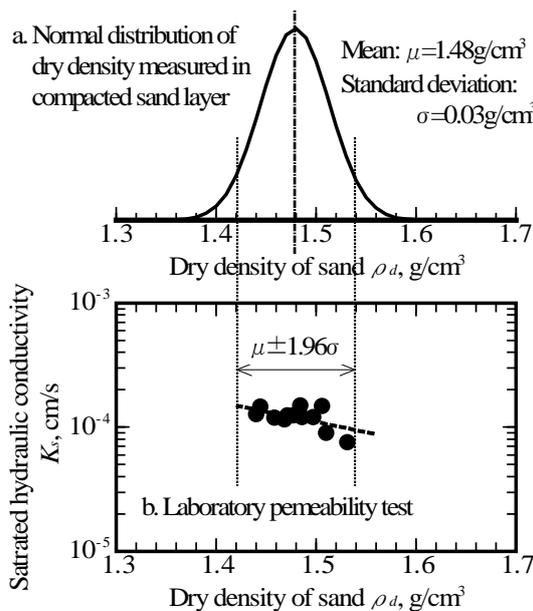


図 4 砂層の締固め密度と透水性

土の構造規模を決定するとの設計方針が必要となる。

(2) CB 層による浸潤水の遮断機能

先の図 2 の断面をもつ CB 盛土の奥行き(幅)は 2m で,その奥側に,対照区として, CB 層のない砂のみの盛土を造成した(図 3d 参照)。盛土内の土中水分量を測定するため,図 2 の黒丸記号で示すように,地表面近傍, CB 層の砂層内および礫層内にそれぞれ 3 個の誘電率水分計 EC-5 (Decagon Devices 社製)を埋設した。CB 層のない対照区の断面にあつては, CB 層断面の水分計と同じ深さ位置に同数を埋設した。

図 5 に, CB 盛土の試験造成後,6 月から 9 月までの約 4 か月にわたる土中水分量(体積含水率)の測定結果をまとめる。図 5c, 5d はいずれも CB 層を敷設した試験区の測定結果で,5c は砂層内,5d はその下の礫層内の体積含水率である。図 5a, 5b は CB 層のない対照区の測定結果で,5a は砂層内の 5c と同じ深さ位置,5b は礫層内の 5d と同じ深さ位置にある。図 5 の右側縦軸に沿って逆バーで示した降水量は,5 分間隔で測定している。CB 層のない対照区では,図 5a と 5b から観察できるように,降雨にともない地表面から浸潤してきた土中水はストレートに降下し,盛土底部の原地盤に達している。これに対し, CB 層を敷設した試験区では,浸潤してきた土中水は砂層に達する(図 5c)ものの,それ以深の礫層には移動していないことが図 5d の計測結果からみることが出来る。つまり,地表面から盛土内を降下してきた浸潤水は, CB 層の境界面上部で遮断され砂層内をこの境界面に沿って流下・排水していったものと考えられる。

(3) 研究成果のまとめ

CB システムを導入して,危険な廃棄物,あるいは低レベルの放射性廃棄物を安全に隔離するための盛土式廃棄物貯蔵施設を提案し,その実現可能性を試験施工により調べた。

次の結果が得られた。

- 1) CB 層の施工にあたっては,通常の土工工事と同じように,可能な限り締固め密度を確保し,その条件のもとで期待される限界長をもとに, CB 盛土の構造規模を決定する。
- 2) 盛土内の土中水分量を測定により,野外条件下における CB の優れたかつ安定した水分遮断機能を確認できた。

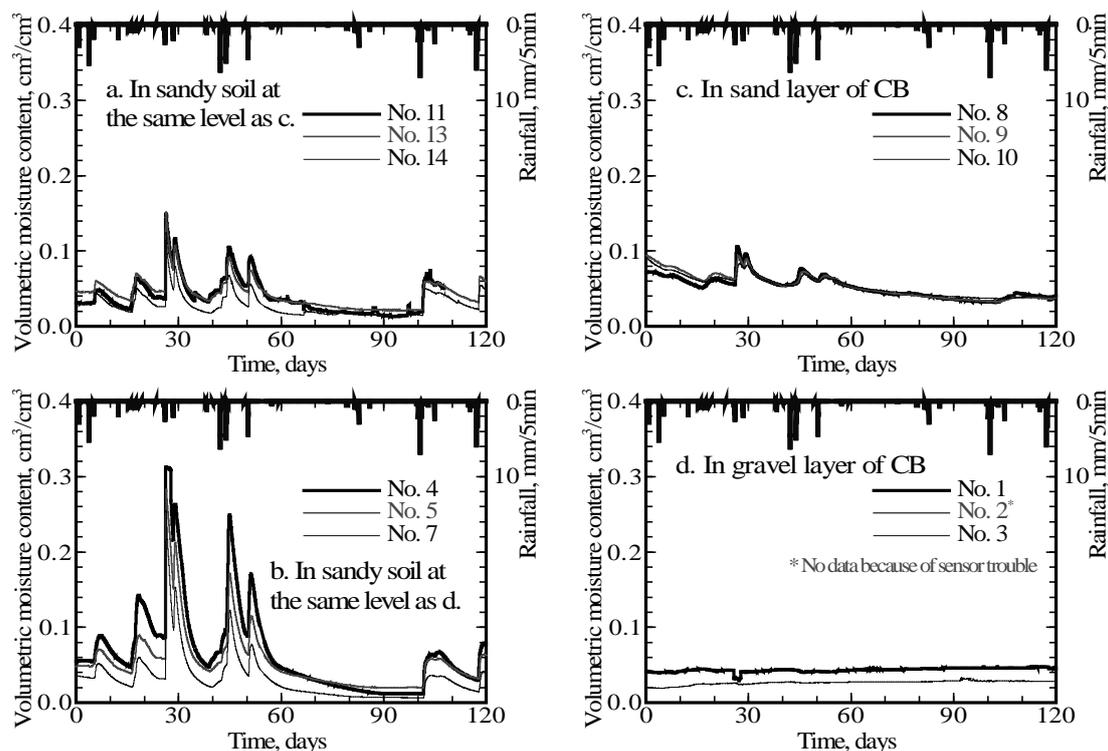


図5 降雨記録とCB盛土内で計測された土中水分量（体積含水率）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- 1) Toshihiro MORII, Tetsuya SUZUKI, Takayuki KAWAI, Kaoru KOBAYASHI and Kazunobu MATSUMOTO: Performance of Capillary Barrier System Included in Test Shallow Land Waste Repository, Bulletin of the Faculty of Agriculture Niigata University, 査読無, 65(2), 2013, 179-186.
- 2) Toshihiro MORII, Kaoru KOBAYASHI, Satoru NAKAFUSA, Kazunobu MATSUMOTO, Tetsuya SUZUKI and Takayuki KAWAI: Practical application of capillary barrier of soil into a shallow land waste repository, Proceedings of the 5th China-Japan Geotechnical Symposium, 査読有, 1, 2012, 379-385.
- 3) Toshihiro MORII, Kawai TAKAYUKI, Tetsuya SUZUKI, Kaoru KOBAYASHI, Nobuyuki MATSUMOTO and Satoru NAKAFUSA: Practical proposal of shallow land waste repository constructed using capillary barrier of soil, 平成24年度不飽和土研究会研究発表論文集, 査読無, 1, 2012, 52-58.

〔学会発表〕（計6件）

- 1) 森井俊広・高橋幸平・鈴木哲也・河合隆行・小林薫・松元和伸：キャピラリーバ

- リアを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設の試験施工, 平成25年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2013年9月3-5日, 東京都
- 2) 森井俊広・小林薫・松元和伸・河合隆行・鈴木哲也：キャピラリーバリアシステムを試験導入した盛土式廃棄物貯蔵施設の性能, 第48回地盤工学研究発表会平成24年度発表講演集, 2013年7月23-25日, 富山市
- 3) 森井俊広・小林薫・松元和伸・中房悟：通気・遮水性に富むキャピラリー・バリアシステムを用いた廃棄物・汚染土の中間貯蔵, 第2回環境放射能除染研究発表会, 2013年6月5-7日, 東京都
- 4) T. MORII, K. KOBAYASHI, S. NAKAFUSA, T. SUZUKI and T. KAWAI: Effective Reduction and Diversion of Infiltration Water in Shallow Land Waste Repository Constructed Using Capillary Barrier of Soil, Eighteenth Southeast Asian Geotechnical and Inaugural AGSSEA Conference, 2013年5月29-31日, シンガポール
- 5) 森井俊広・鈴木哲也・河合隆行・小林薫・中房悟：土のキャピラリー・バリア機能を利用した盛土による汚染廃棄物の貯蔵保管工法の提案, 農業農村工学会京都支部第69回研究発表会講演要旨集, 2012年11月21日, 新潟市

- 6) 森井俊広・河合隆行・小林薫・松元和伸：
底部 CB 排水層を備えた盛土による汚染
廃棄物の貯蔵保管工法の提案，第 1 回環
境放射能除染研究発表会要旨集，2012 年
5 月 19 日-21 日，福島市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森井 俊廣 (MORII TOSHIHIRO)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30231640