

赤土流出による海洋被害軽減のための 赤土改質に関する研究

STUDY ON RED SOIL IMPROVEMENT TO REDUCE THE MARINE DAMAGE DUE TO OUTFLOW OF RED SOIL

高橋 弘¹・中村 浩之¹・森 雅人²・小谷 謙二³

Hiroshi TAKAHASHI, Hiroyuki NAKAMURA, Masato MORI and Kenji KOTANI

¹ 東北大学 大学院環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

E-mail: htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

² (株)森環境技術研究所 (〒996-0071 新庄市小田島町 7-36)

E-mail: metr@vega.ne.jp

³ 八千代エンジニアリング(株) (〒161-0031 東京都新宿区西落合 2-18-12)

E-mail: kotani@yachiyo-eng.co.jp

Key Words: outflow of red soil, marine damage, soil improvement, fiber-cement-stabilized mud, gully erosion

1. はじめに

沖縄諸島のほぼ全土を占める赤土は粘土質で、水分を含むと付着性が強くなるが、この赤土が沖縄県特有の強い降雨により川から海へ流出し、海洋の珊瑚を覆い、珊瑚を死滅させるなど大きな海洋被害をもたらしている¹⁾。この赤土流出による海洋被害は、1950年以降の農地改良や各種工事による開発などにより顕著になってきた。そこで、沖縄県では赤土流出防止に関する条例を定め、さらに沈砂池の設置や植生の推奨など様々な対策を講じてきているが、いまだに降雨時には赤土が川から海に流出し、海洋生物に多大な被害を与えており、抜本的な赤土流出対策が施されているとは言い難いのが現状である。

ところで、著者らは建設汚泥・ヘドロ等の高含水比泥土のリサイクル率向上を目指して泥土に古紙破砕物と高分子系改良剤を混合して良質な土砂に再資源化する繊維質固化処理土工法を開発した²⁾。この工法により生成される土砂(以下、繊維質固化処理土と記す)は、内部に繊維質を含むため強度特性に優れていることから、国土交通省の直轄工事をはじめ既に数多くの施工実績を有する。さらに繊維質固化処理土は乾湿繰り返しによる劣化がほとんどなく耐久性が極めて高いことが実験的に確認されている³⁾。赤土流出の主なメカニズムは、乾湿により農地・法面などの裸地表面にひび割れが生じ、このひび割れに沿ってガリ

が発生し、降雨時に地面のガリ侵食により赤土が河川へ流れ込むと言われているが、この繊維質固化処理土工法を赤土改質に適用できれば、乾湿繰り返しに対する高い耐久性を有し、ガリ侵食を受けない強い土砂に改質できると考えられる。しかも本工法であれば沈砂池を設置するかブルーシートで裸地を覆う工法と異なり、周辺の景観・環境を乱すことなく環境保全型の修復施工が可能になると思われる。しかしながら、建設汚泥は発生時に既に高含水比状態であるので、古紙破砕物の攪拌・混合は比較的容易であるが、赤土は自然含水比状態にあるので、本工法を適用するためには、自然含水比状態の赤土に加水し、ある程度の高含水比状態まで含水比を上げる必要がある。しかし、逆に含水比が高くなり過ぎると添加物の量が増え、施工コストが高くなる。従って、改質土の要求性能を満足しつつ、かつ低コスト施工を実現するためには、最適初期含水比等について詳細に検討する必要がある。

そこで、本研究は繊維質固化処理土工法を赤土改質に適用し、最適初期含水比、改質土の強度特性・耐久性、土砂流出量などについて実験的に検討することを目的とする。

2. 繊維質固化処理土工法

繊維質固化処理土工法の原理を簡単に記述すると以下のようなになる。

①高含水比泥土は、図-1(a)に示されるように土粒子が自由水の中で自由に動くことができるため、若干の降伏応力を持っているが、流体としての挙動を示す。このため高含水比泥土の運搬はパイプラインかバキュームカー等によらなければならない。

②この状態の高含水比泥土に吸水性の高い新聞の古紙のような繊維質物質を混入すると、図-1(b)に示すように土粒子の周りの自由水が繊維質物質に吸水され、見かけの含水比が低下する。繊維質物質の添加量は含水比に応じて変化させる。例えば含水比が100%の場合、添加する古紙破砕物の量は50kg/m³である。

③さらに高分子系改良剤を添加し攪拌すると、図-1(c)に示すように水溶性高分子が溶解し、土粒子の表面に吸着する。土粒子間の架橋・吸着効果により団粒化構造の中に自由水を封じ込め、流動性を失わせ団粒状態となる。

④最後に助剤(無機系凝集剤)を混合し、攪拌機により泥土を攪拌してせん断を与えると、土粒子が団粒化して保水性の高い土砂が生成される(図-1(d))。

処理土を植生土壌として再利用する場合、セメント系固化材を混入する必要はないが、盛土材として利用するため、ある程度の強度を必要とする場合は、目的とする強度に応じて、さらに必要量のセメント系固化材を添加する。

以上の工程により、高含水比泥土が繊維質固化処理土として再資源化される。

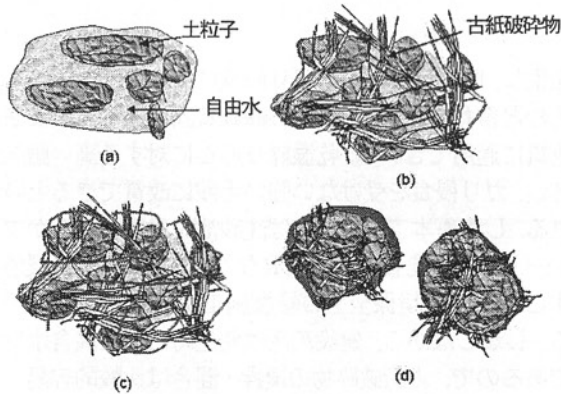


図-1 繊維質固化処理土工法の原理

3. 赤土改質土の強度特性

(1) 実験試料

沖縄県全土を覆っている土壌は、主に国頭マージ、島尻マージ、ジャーガル、沖積土壌に大きく分けられる。どの土壌も降雨により流出しやすいことが報告されているが、一般に「赤土」と呼ばれるものは、沖縄県全体の55%を占める国頭マージであり、この土壌が赤土流出被害を引き起こす代表的な土壌であると言われている¹⁾。

そこで、本研究では、沖縄県中頭郡読谷村座喜味地域にて自然土の国頭マージをサンプリングし、これを実験試料とした。サンプリングした赤土を写真-1に示す。赤土の

土粒子密度、塑性限界および液性限界を求めた結果、土粒子密度は2.8g/cm³、塑性限界および液性限界はそれぞれ26.4%および37.1%であった。またサンプリング時の初期含水比は25.5%であった。

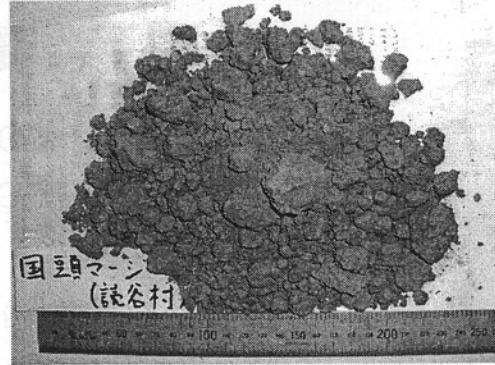


写真-1 サンプリングした赤土(国頭マージ)

(2) 供試体の作成

供試体の作成は、「建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究⁴⁾」に準じた方法を用いた。その概要は以下に示す通りである。

- ① サンプリングした赤土を炉乾燥させ、その後、加水調整して含水比40, 60, 80, 100%の泥土を作成する。
- ② 繊維質固化処理土の作成には、含水比を調整した泥土に古紙破砕物、高分子系改良剤および助剤を加え、攪拌・混合する。さらに所定のセメント系固化材を加え、混合する。固化処理土の作成には、泥土にセメント系固化材のみを加え、攪拌・混合する。
- ③ 初期養生として、上述の処理土を容器に入れて密封し、25±3℃で3日間静置する。
- ④ 固化処理土に対しては、初期養生後、処理土を解きほぐし、その後、供試体を作成する。供試体作成には、直径5cm、高さ10cmのモールド(供試体作製容器)を使用する。繊維質固化処理土は小さく団粒化するので解きほぐす必要はないため、初期養生後、直ちにモールドを用いて供試体を作成する。
- ⑤ 供試体から水分が蒸発しないようにモールドを密封材で被覆し、25±3℃で7日間養生する。

建設汚泥・ヘドロ等を対象とした従来の繊維質固化処理土工法では、古紙破砕物の添加量は含水比に応じて決められており、例えば含水比100%の汚泥に対して古紙破砕物の添加量は50kg/m³となっている。この値は、団粒化のための最適古紙添加量と含水比との関係を実験的に求め、両者の関係から得られたものであるが、最適古紙添加量は土粒子の物性によって変化するため、実際の施工に当たっては汚泥をサンプリングし、予備実験により最終的な最適古紙添加量を決定することが多い。本研究では、初めに著者らが既に求めた以下の実験式を基に、古紙添加量を決定することにした³⁾。

$$\text{古紙添加量}[\text{kg/m}^3] = 1.04 \times (\text{含水比} - \text{液性限界}) \quad (1)$$

(3) 実験結果および考察

本実験に先立ち、赤土の強度特性を把握するために、上述したモールドを用いて種々の含水比の赤土(国頭マージ)を締固め、供試体をそれぞれ2個ずつ作成して一軸圧縮試験を実施した。その結果を図-2に示す。この図に示されるように、含水比が22.5%程度の場合、400kN/m²程度の一軸圧縮強度があることが分かる。

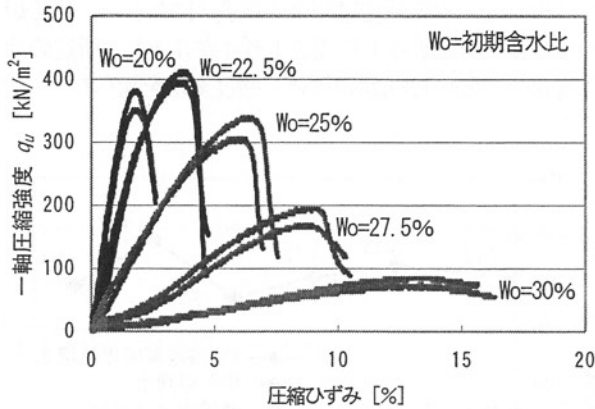


図-2 赤土に対する一軸圧縮強度と圧縮ひずみとの関係

次に赤土改質土に対して一軸圧縮試験を行った。本研究では、改質効果を示す指標として目標値を設定した。建設汚泥の場合、処理土を土質材料として利用する場合の品質区分は、原則としてコーン指数 q_c を指標としており、800kN/m² 以上を確保することが望ましいとされている⁵⁾。また、建設汚泥固化処理土のコーン指数 q_c と一軸圧縮強さ q_u の関係は $q_c = 5 \sim 15q_u$ であることから、一軸圧縮強度で安全側のみで 160kN/m² 以上の強度が求められていることになる⁴⁾。そこで、本研究では破壊強度の目標値を 160kN/m² 以上とし、また破壊ひずみは、過去の研究³⁾から5%以上を目標値とし、これを上回る条件を求めたことにした。

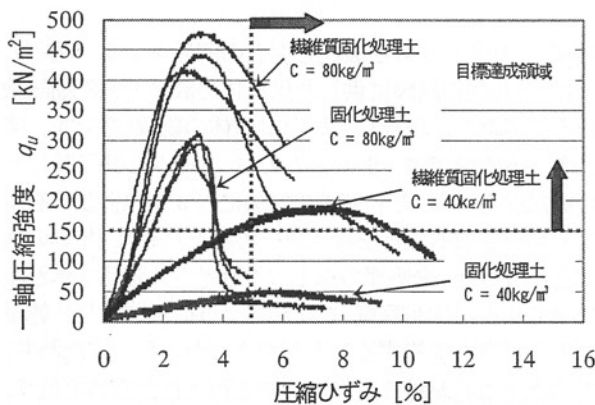


図-3 一軸圧縮応力と圧縮ひずみとの関係

初期含水比 80%の場合における一軸圧縮応力と圧縮ひずみの関係を図-3に示す。破壊強度は、いずれのセメント系固化材の添加量でも、固化処理土より繊維質固化処理土の方が上回っていることが分かる。しかしながら、セメ

ント系固化材の添加量が 40kg/m³の場合は目標値をクリアしているが、セメント系固化材の添加量が 80kg/m³の場合は、破壊ひずみは固化処理土および繊維質固化処理土ともにほぼ同じ値であり、繊維質固化処理土の特徴である「破壊ひずみが大きく、粘り強い性質」が現れていない。また、図-2の結果と比較してみても十分に改質効果が現れているとは言い難い。この傾向は初期含水比 100%の場合でも同様であった。

ところで、繊維質固化処理土工法の特徴は小さく団粒化した土砂が生成されることであるが、赤土の場合、上述した供試体作成手順の④を終えた時点において、写真-2に示されるように団粒化構造は観察されなかった。このように団粒化されない理由として、赤土は微粒成分が多く、粒子間隙に水分を保持する力が強く、その結果、従来の繊維質固化処理土工法に従った(1)式より算定される古紙添加量では、古紙が自由水を十分に吸着しきれなかったためと考えられる。また破壊ひずみが大きくならないのは、添加する古紙の量が少ないためであると推察される。すなわち、赤土の改質には、建設汚泥やヘドロ等に対して適用される古紙添加量では不十分であり、古紙添加量を増加させる必要がある。そこで、本研究では、古紙添加量を(1)式で算定される量の2倍を添加することにした。

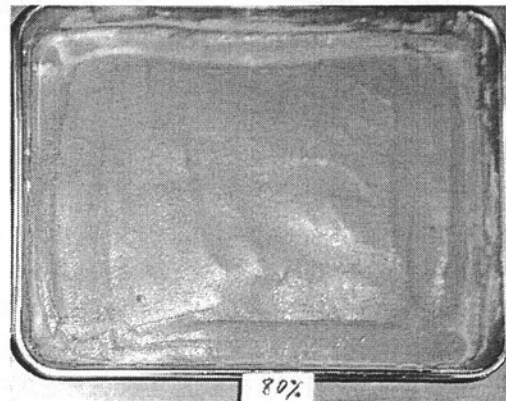


写真-2 通常古紙添加量により赤土を改質して生成した繊維質固化処理土

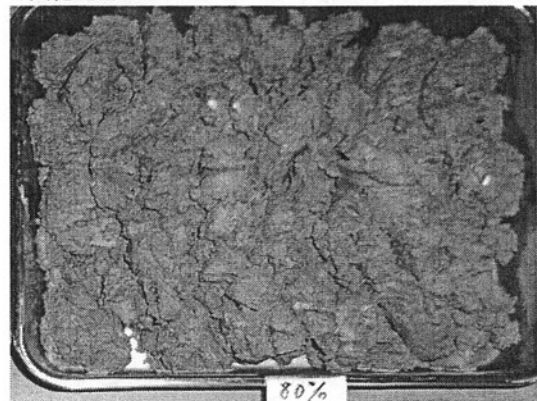


写真-3 通常の2倍の古紙添加量により赤土を改質して生成した繊維質固化処理土

古紙破砕物の添加量を2倍にし、上述した供試体作成手

順に従って、赤土の改質を行った。その結果、写真-3 に示されるように土塊の大きさは若干大きい、団粒化が観察された。そこで、この状態で7日間養生し、 $\phi 5\text{cm} \times \text{h}10\text{cm}$ の供試体を作成し、一軸圧縮試験を行った。

初期含水比 80%の場合における一軸圧縮応力と圧縮ひずみとの関係を図-4 に示す。破壊ひずみが大きく改善されていることが分かる。セメント系固化材の添加量が 40kg/m^3 と 80kg/m^3 の両方の場合において破壊強度が低下している。これは通常古紙添加量の2倍の量の古紙を添加しているため、残存する水分量が少なく、セメント系固化材の水和反応が十分に行われなくなったためと推察されるが、詳細な検討は今後の課題としたい。破壊強度は低下してもセメント系固化材を 80kg/m^3 添加すると、破壊強度および破壊ひずみともに目標値をクリアし、赤土の改質が十分に行われていることが分かる。

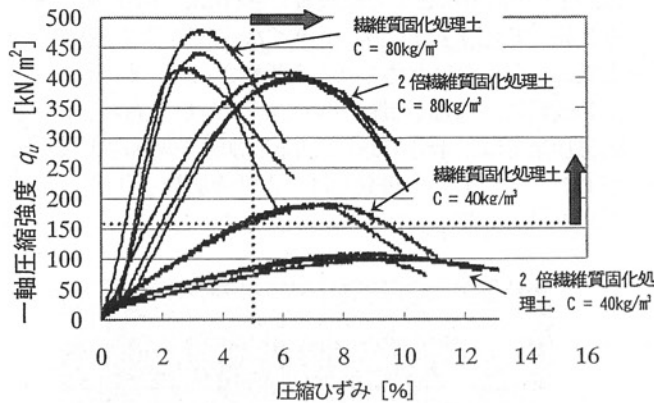


図-4 一軸圧縮強度と圧縮ひずみとの関係

初期含水比を 40, 60, 80 および 100% の 4 条件に、セメント系固化材の添加量を 40kg/m^3 および 80kg/m^3 の 2 条件に、また古紙破砕物の添加倍率を通常値の 1 倍および 2 倍の 2 条件で変化させ、種々の供試体を作成し、一軸圧縮試験を実施し、設定した目標値をクリアした条件を求めた。その結果を図-5 に示す。図中の●印が目標値をクリアした条件を示している。従って、ABCD で示される三角錐の内側の条件で処理を行えば、目標値をクリアする改質が可能になると考えられる。

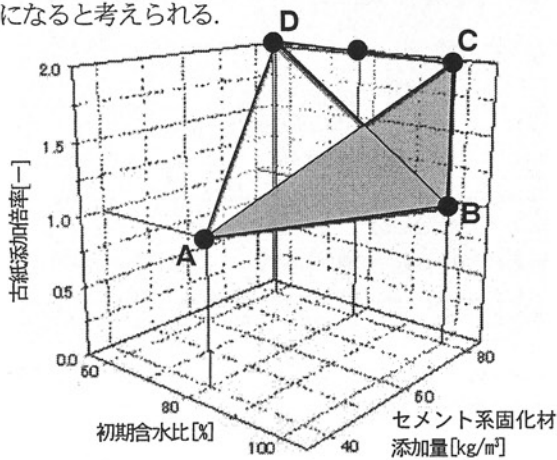


図-5 目標値をクリアした処理条件

3. 赤土改質土の乾湿繰り返しに対する耐久性

ここでは目標値をクリアした条件の中から、初期含水比 80%、セメント系固化材添加量 80kg/m^3 、古紙添加倍率 2 倍を選び、この条件で供試体を作成して乾湿繰り返し試験を行った。なお、比較のため同じセメント系固化材の添加量を用いて固化処理土を作成し、乾湿繰り返し試験を実施するとともに、含水比 20% および 22.5% の状態の赤土も実験に供した。本実験では従来の研究³⁾にならい、 40°C 炉乾燥 2 日間、 20°C 水浸 1 日間を 1 サイクルとし、所定のサイクル毎に一軸圧縮試験を行い、強度変化を調べた。

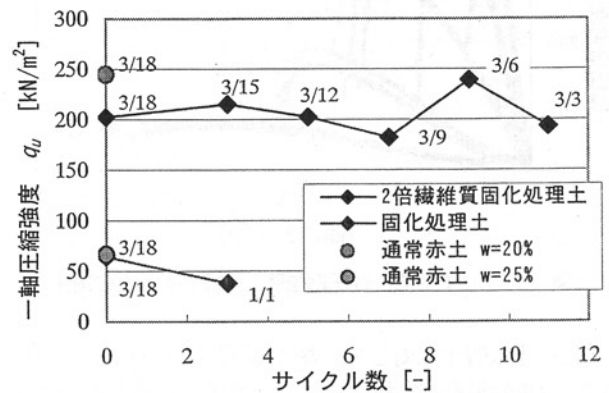


図-6 サイクル数と破壊強度との関係

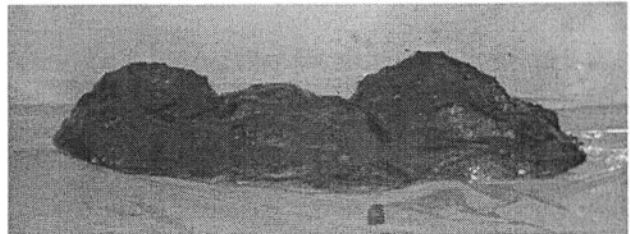


写真-4 水浸工程で再泥化した赤土

図-6 にサイクル数と破壊強度との関係を示す。図中の数字は(一軸圧縮試験に供した供試体の数/一軸圧縮試験を行うに当たり、現存していた供試体の総数)を示す。すなわち、本実験では、0, 3, 5, 7, 9, 11 サイクル終了時に一軸圧縮試験を行い、それぞれの試験には 3 本の供試体を用いて平均値を取ることを考えたため、それぞれ 18 本の供試体を作成した。未処理の赤土は 1 サイクル時目の水浸工程で全ての供試体が写真-4 に示すように再泥化し、乾湿繰り返し試験を実施することができなかった。すなわち、通常の赤土は乾湿繰り返しに対する耐久性が極めて低く、沖縄県特有の強い降雨により容易に流出しやすいことが再確認された。また固化処理土も乾湿繰り返しの影響を受けて大きく劣化し、3 サイクル終了時には供試体が 1 本しか残っておらず、それ以降は乾湿繰り返し試験を継続することが不可能であった。

一方、繊維質固化処理土は常に 3 本の供試体を一軸圧縮試験に供することができ、また破壊強度もデータのバラツ

キはあるものの、ほとんど減少せず、11 サイクル終了時にも初期強度を保っていることが分かる。従って、赤土を繊維質固化処理土工法で改質すれば、乾湿繰り返しに対して高い耐久性を有するようになり、ガリの発生を抑えられると考えられる。

4. 人工降雨実験における土砂流出

次に通常の赤土、固化処理土および繊維質固化処理土を用いて人工降雨実験を行い、土砂流出量を評価した。図-7および写真-5に実験に用いた装置の概略を示す。試料を入れる木枠はベニヤを用いて作成した。1レーンは幅8cm×深さ6cm×長さ150cmであり、3レーンが並列に設置されている。それぞれのレーンに通常の赤土、固化処理土、繊維質固化処理土を入れ、それぞれの土砂を締固めて実験試料とした。本実験では、8cm×16cmの板をレーンに敷き詰めた土砂の表面に置き、高さ30cmの位置から質量1.3kgのおもりを板上に15回落下させることにより、それぞれの土砂に対して同一条件で締固めを行った。全ての土砂の締固めが終了した後、7日間養生して人工降雨実験を実施した。人工降雨装置としては、スプリンクラーとシャワーを使用した。

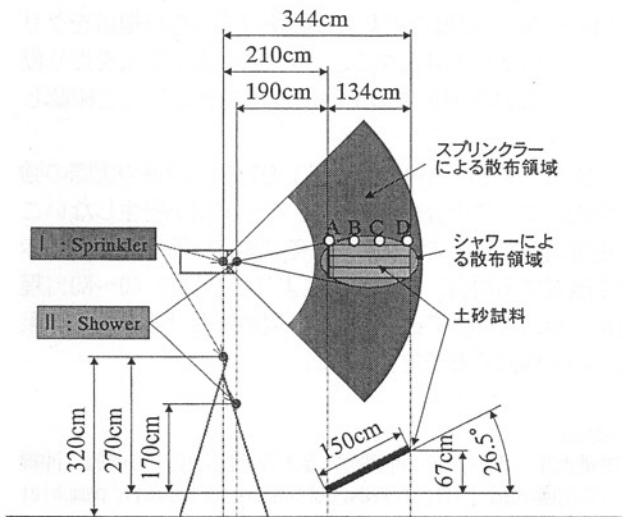


図-7 人工降雨実験に用いた装置の概略と降雨の範囲

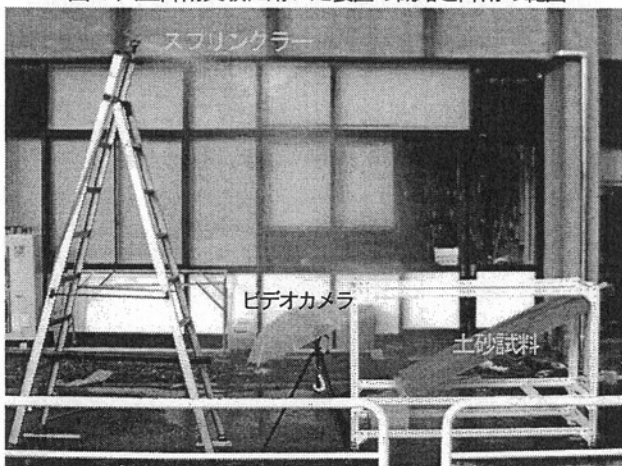
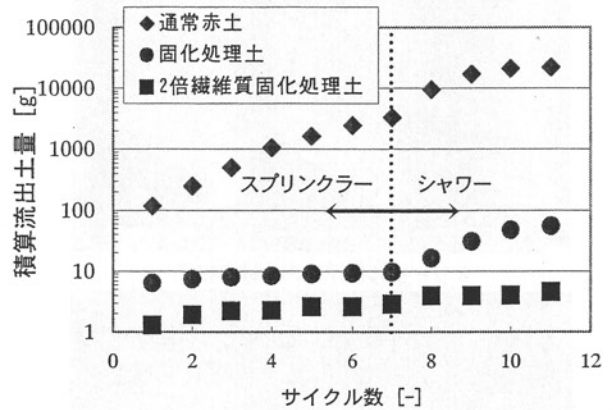


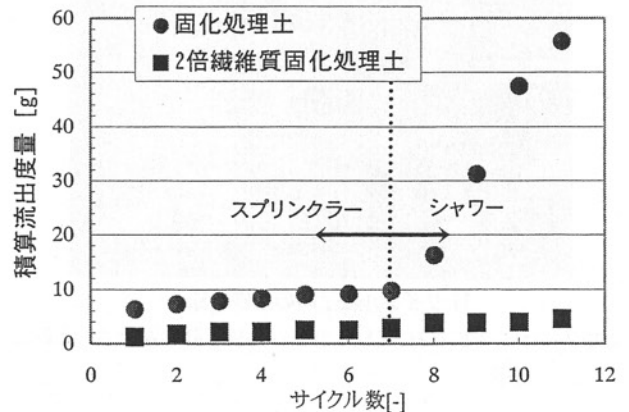
写真-5 人工降雨実験に用いた装置の概略

これは、2種類の降雨を模擬するためであり、シャワーの場合は比較的雨滴が小さく、降水量の少ない雨を、またシャワーは比較的雨滴が大きく、降水量の大きな雨を模擬した。降水量は図-7のA, B, C, Dの点に計量カップを設置し、雨量を直接計測した。本実験の場合、スプリンクラーによる降雨量は約15mm/hであり、シャワーの場合は約300mm/hであった。300mm/hの降雨量は実際の降雨としてはやや現実味に欠ける極めて激しい降雨に相当するが、本実験では装置の限界上、この降雨量よりも小さい雨量を設定すると、実験試料全体にほぼ均一の雨を降らせることが困難であったため、この降雨量で実験を行った。

本実験では、降雨と乾燥を繰り返し、その際に流出する土砂量を計測した。7サイクルまではスプリンクラーを使用し、8サイクル以降はシャワーを使用した。スプリンクラーの場合、降雨時間は60分間とし、60分後に流出した土砂量をサンプリングし、土砂を乾燥させて質量を計測した。シャワーでは降雨時間を20分間とし、その後、流出土砂量をサンプリングした。流出土砂のサンプリングを終えた後、装置全体をブルーシートで覆い、内部にハロゲンヒータを設置して内部を暖め、24時間放置した。



(a)



(b)

図-8 サイクル数と土砂の積算流出量との関係：(a)通常赤土，固化処理土，2倍繊維質固化処理土の比較，(b)固化処理土と2倍繊維質固化処理土の比較

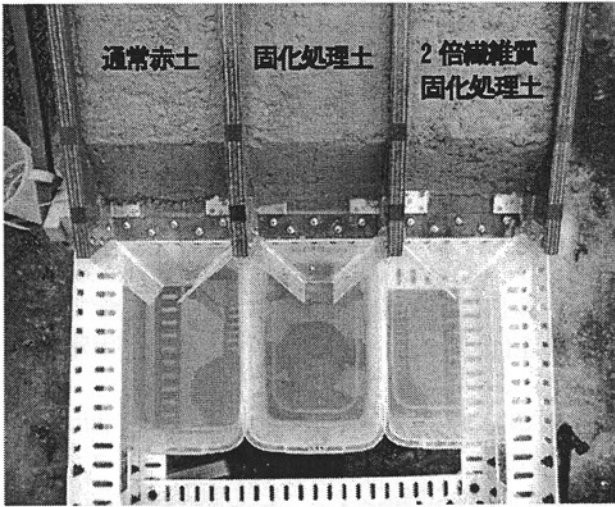
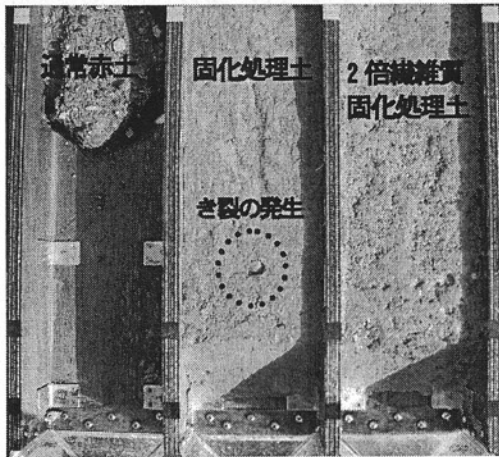
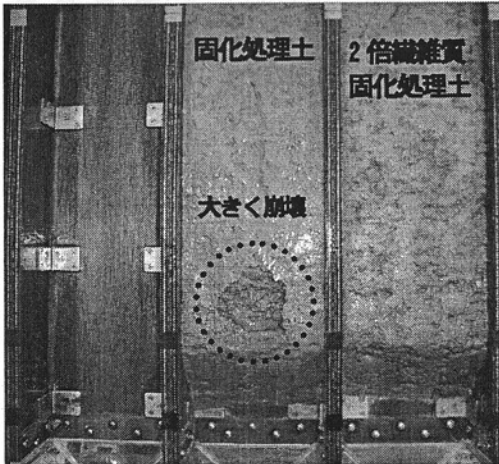


写真-6 土砂表面を流下した水の様子



8サイクル終了時の土砂の様子



11サイクル終了時の土砂の様子

写真-7 8サイクルおよび11サイクル終了時の木枠内の土砂の様子

図-8にサイクル数と土砂の積算流出量との関係を示す。通常の赤土の場合、降雨実験を始めると赤土表面を流下する水流は写真-6に示すように、すぐに赤濁し、4サイクル目辺りからガリの発生が見られ、5サイクル目から試料の崩壊も見られるようになった。また11サイクルで全ての土砂が流出した。すなわち、通常の赤土はスプリンクラー

程度の降雨量でも容易に流出し、また図-8(a)からも分かるように流出量も他の2つの土砂に比べて突出して高い。そこで、図-8(b)には、固化処理土と繊維質固化処理土の結果の比較を示した。また写真-7に8サイクルおよび11サイクル終了時の木枠内の土砂の様子を示す。固化処理土は明確なガリの発生は観察されなかったが、7サイクル目辺りから下流域における試料の表面に小さなき裂が発生し、そのき裂がサイクル数の増加とともに増大し、11サイクル目には塊状の崩壊に至った。固化処理土は降雨装置をシャワーに切り替えると土砂流出量が急激に大きくなり、強い降雨に対して抵抗できないことが分かる。これに対し、繊維質固化処理土の表面は初期状態とほとんど変化がなく、乾湿繰り返しを受けてもガリの発生が無く、極めて強い降雨に対しても抵抗できる土砂に改質されていることが確認された。

5. むすび

本研究では、赤土改質に繊維質固化処理工法を適用し、改良土の強度特性、耐久性などについて実験的に検討した。その結果、通常の繊維質固化処理工法で使用する古紙添加量の2倍の古紙を添加すれば土砂を団粒化させることが可能になり、破壊強度および破壊ひずみの目標値をクリアする処理条件を見出すことができた。また赤土をガリ侵食を受けない高耐久性の土砂に改質できることを確認した。

今後は、現地において試験施工を行い、沖縄の実際の強い降雨に対して十分に抵抗でき、赤土流出が発生しないことを確認したいと考えている。その際、法面等の地山の赤土を改質する場合、加水調整により含水比を60~80%程度まで高めて赤土の改質を行い、現地における改質の効果について検討する予定である。

参考文献

- 1) 沖縄県ホームページ：沖縄県の赤土等流出に関する情報，沖縄県文化環境部，<http://reds.okicom.co.jp/redsoil/pamphlet/pamphlet.html>.
- 2) 森雅人・高橋弘・逢坂昭治・堀井清之・片岡勲・石井知征・小谷謙二：故紙破砕物と高分子系改良剤を用いた新しい高含水比泥土リサイクル工法の提案と繊維質固化処理土の強度特性，資源・素材学会誌，Vol.119，No.4,5，pp.155-160，2003.
- 3) 森雅人・高橋弘・熊倉宏治：繊維質固化処理土の乾湿繰り返し試験による耐久性に関する実験的研究，資源・素材学会誌，Vol.121 No.2,3，pp.37-43，2005.
- 4) 建設省土木研究所(現 独立行政法人土木研究所)，財団法人先端建設技術センター及び民間22社：建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(盛土グループ)共同研究最終報告書，pp.77~85，1997.
- 5) 先端建設技術センター：建設汚泥リサイクル指針，大成出版，pp.164-165，1999.

(2006. 5. 19 受付)