

(89) 多機能を有する竹炭の地盤材料への適用性に関する研究

荒牧 憲隆^{1*}

¹ 崇城大学工学部エコデザイン学科 (〒860-0082熊本市池田4-2-2-1)

* E-mail: aramaki@eco.sojo-u.ac.jp

本研究は、竹炭の軽量性及び吸着性能に着目し、竹炭の地盤材料としての適用性について検討を行った。まず、竹炭の軽量性に着目し、粘性土と混合し、造粒化を行った。その造粒竹炭土は、砂や粘土に比べ軽量で、かつ砂と同等なせん断強度を有する結果が得られた。次に、火山灰質粘性土の安定処理効果に及ぼす竹炭混合の影響を考察した。せん断強度は著しい増加傾向を示し、六価クロムの溶出抑制が確認された。この傾向は、炭化温度が高いものほど顕著であった。最後に、竹炭を混合した干潟土の底質改善について検討を行い、竹炭の混合が硫酸還元菌の発生抑制に効果があることが認められた。これらのことから、竹炭は、その多様な物理・化学特性に応じ、種々の地盤材料としての適用性があることが示された。

Key Words : bamboo charcoal, geomaterial, lightweight, adsorption, recycle

1. はじめに

近年、木質系バイオマス廃棄物の有効利用が、種々の分野において、盛んに検討されている。土木分野においても、土構造物建設時には、コスト削減を念頭に置いた合理的な工法、環境に配慮した技術への展開が求められ、この中で、廃木材の有効利用に関する研究が進められている¹⁾。その一つとして、木質系バイオマスを炭化し、軟弱な地盤材料と混合した地盤改良の検討²⁾もされてきている。しかし、現場への適用事例は少ない。その原因として、一意的ではない性質、炭化物の材料としての供給安定性に対する不安や、天然地盤材料に比べ、材料コスト的に木質系炭化物は高くつくためと考えられる。

元来、木材の中でも、竹は、植物の中でも3~4年で成長し、古来より人々にとって有用な資源として活用されてきた。しかし、工業化が進む中で、竹の利用量が減り、竹林は放置され、他の生態系を侵食しているのが現状である。また、この放置地域は拡大し、豪雨時の土砂災害の原因となることもしばしば認められる。そのため、竹の適切な間伐は、他の生態系への侵食を防ぐことや土砂災害の減災へと繋がる。間伐した竹材の有効利用に関する研究・開発の事例として、廃竹材の炭化が挙げられる。この炭化材は、多孔質で吸着性能などの材料特性を有し、水質浄化、農業での土壌改良材など、種々の分野での利

用が図られている^{3,4)}。

このような中で、木質系バイオマスの炭化材の土木分野での有効利用の推進は、直接的な建設コストを考えると高くつくが、長期的に考えると、前述したような災害の抑制、浸食の防止、炭化によるCO₂の固定、森林保全などの環境コスト⁵⁾への投資とも繋がると考えられる。また、竹は成長も早いので、間伐による安定的な材料供給が期待でき、地域資源の有効活用ともなる。

著者においても、以前より、竹炭の吸水・吸着性に着目し、干潟土壌⁶⁾や高含水比の災害発生土⁷⁾の土質特性の改善を行い、竹炭の地盤材料への適用性について検討してきた。しかし、これ以外の竹炭の多機能な性質を踏まえると、地盤材料への有効利用方法に関して、竹炭はさらに広がりを持つ材料であると考えられる。

そこで、本研究では、以上のことを鑑み、竹炭の軽量性及び吸着性能に着目し、環境修復および建設発生土リサイクルの観点から、竹炭の地盤材料としての適用性について実験的に検討することを目的としている。

2. 竹炭の基本的性質

(1) 竹炭作製方法

竹炭の作製には、大学キャンパス内に自生している孟

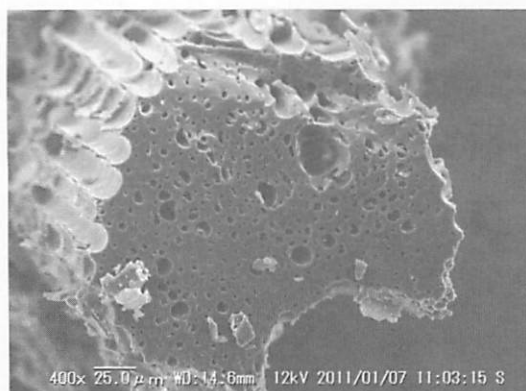


写真-1 竹炭のSEM画像 (350°C)

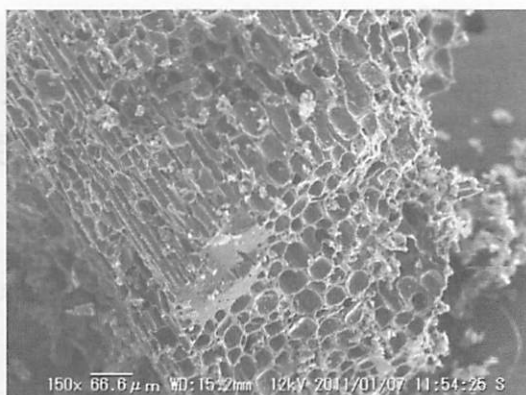


写真-2 竹炭のSEM画像 (700°C)

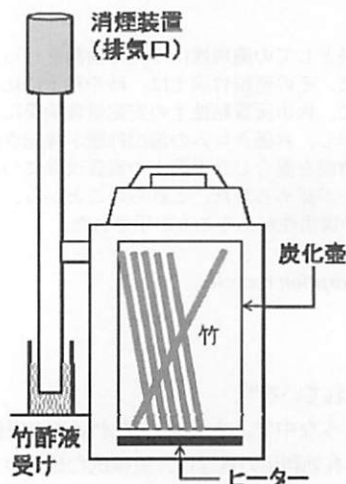


図-1 電気炉の概観図

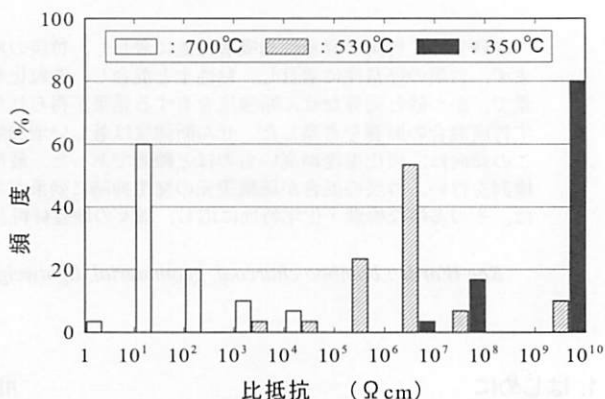


図-2 竹炭の比抵抗の頻度分布

宗竹を間伐した廃竹材を用いた。まず、廃竹材を短冊状に裁断し、屋外にて3ヶ月乾燥させる。竹炭作製の基本工程は、電気炉を用いて行い、乾燥させた短冊状の竹を低温炭化処理、高温炭化の順で行う。図-1に電気炉の概観を示す。まず、排気状態にて炉内温度180°Cとして、竹を8時間燃焼させ、その後、非排気状態にして低温での炭化を行う。続いて、低温炭化と同様に所定の温度にて燃焼させ、非排気とした後、高温での炭化を行った。高温での炭化温度は、350、530、700°Cにて行った。なお、本研究において、竹炭は、粉碎し、砂粒子大となるように粒径2mm未満の粒状化した材料を用いている。

(2) 竹炭の基本的性質

写真-1, 2に、炭化温度350、700°Cで作製した竹炭表面の電子顕微鏡画像である。竹炭は、木炭などに比べると、細胞壁が薄く、全体がポーラスな細孔構造体であることが分かる。また、竹は基本組織(柔組織)の中に維管束が存在しており、炭化されることにより、収縮はす

るが、ほぼ相似形で基本的に竹炭に受け継がれている。

次に、竹炭の導電性について、作製直後の竹炭片を30個取り出した後に、比抵抗を測定した。図-2に、700°C、530°C、350°Cにおける頻度分布を示した。なお、便宜的に、10¹⁰Ωcmに示した結果は、全く電気を通さない不良導体を示した。700°Cでは、そのほとんどが、10²Ωcm以下に分布している。また、530、350°Cと炭化温度が低くなるに伴い、比抵抗の分布は、右側へとシフトしていることが分かる。

図-3には、固液比1:10として、それぞれの竹炭のpHの経時変化について示した。いずれのケースも、経過日数にかかわらず、pH=9~10付近の弱アルカリ性を示していることが分かる。また、炭化温度の依存性も無視できる程度である。図-4には、本研究で用いた竹炭の炭化温度と比表面積の関係を示している。炭化温度の増加に伴い、比表面積が増加していることが分かる。また、700°Cになると著しく増加している。この結果は、竹炭内の細孔部で、530°C以下では細孔部でマクロ孔(細孔直径50nm以上:図-5参照)が発達し、700°Cでは、より微細な細孔であるメソ孔(細孔直径2~50nm)が発達し

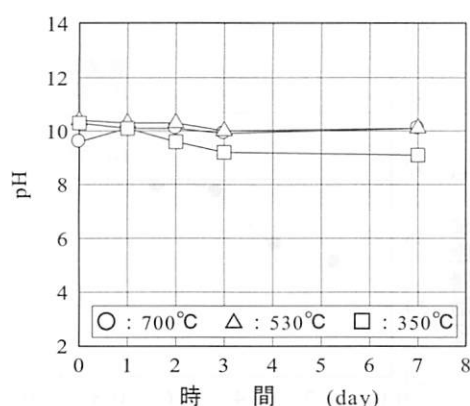


図-3 pHの経時変化

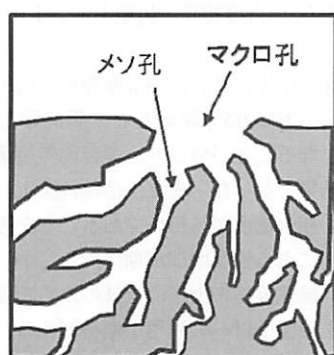


図-5 竹炭粒子の細孔の概念図⁴⁾

たと推察される³⁴⁾。また、竹炭の粒子密度は、 $\rho_s = 0.56 \sim 0.76 \text{ g/cm}^3$ と、豊浦砂 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$) に比べ、非常に小さな値を示した。

4. 造粒竹炭土のせん断特性

竹炭の物理的特徴として、写真-1, 2にも認められたように、内部に空隙を有し、粒状化したときの粒子密度は、非常に小さい。また、一方で、有明海での浚渫土は、粘性土であることが多く、軟弱で含水比も高いためリサイクルしづらい材料である。これら両者の有効利用の一つとして、石灰灰⁹⁾などのように造粒化することで、粒の大きさが砂礫大となり、かつ軽量であることから、取り扱いが容易になる。ここでは、この竹炭を用いて、有明粘土との造粒化を試み、その力学特性を検討した。

(1) 造粒竹炭土の作成方法

造粒竹炭土は、有明粘土をベースとし、竹炭、セメントの重量比を変え、混合し全部で4つのタイプを作製した。ここでは、六価クロムの溶出量を抑制するため、セ

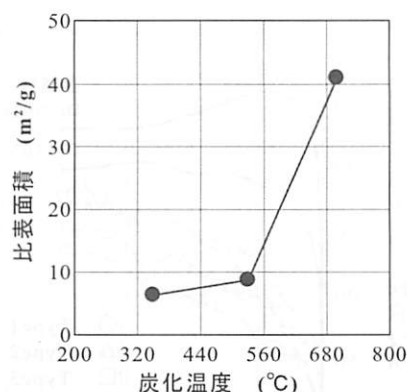


図-4 竹炭の比表面積と炭化温度の関係

表-1 造粒竹炭土の配合比率 (重量比)

Type	有明粘土	竹炭 B	セメント C	竹炭セメント比 B/C
1	10	6	1	0.17
2	10	6	2	0.33
3	10	6	3	0.50
4	10	6	4	0.67

表-2 有明粘土の物理的性質

土粒子の密度 ρ_s	2.642g/cm³
含水比 w	176.8%
液性限界 w_L	99.5%
塑性限界 w_p	43.7%
pH	7.57

表-3 造粒竹炭土の土粒子密度

Type	1	2	3	4	豊浦砂
ρ_s (g/cm³)	1.411	1.443	1.473	1.551	2.656

メントは、高炉セメントB種を用いている。その配合を表-1に示す。有明粘土、竹炭混合量を一定とし、所定のセメント量を混合している。造粒化には、ソイルミキサーを用いて行い、攪拌時間は10分間とした。その後、大気中に養生28日後に実験に用いている。有明海干潟土は、熊本県内の有明海において、表層から20cm程度の深度で採取した。有明粘土の物理的性質を表-2に示す。造粒竹炭土の粒度特性としては、礫混じり砂質土であった。また、造粒竹炭土の土粒子密度を表-3に示す。比較のために豊浦標準砂の土粒子密度も併記している。何れの造粒竹炭土も、豊浦砂の土粒子密度に比べ、土粒子密度は小さく、軽量土として土構造物への利用が考えられる。

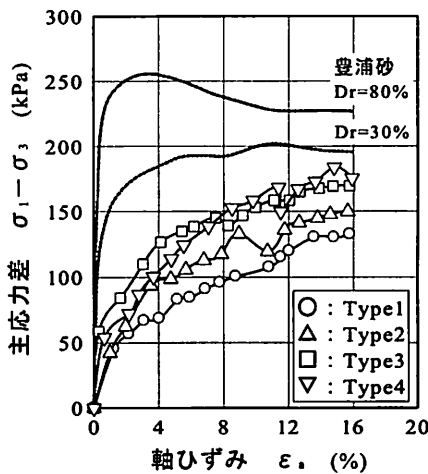


図-6 応力-ひずみ関係

(2) 造粒竹炭土の力学特性

造粒竹炭土の力学特性を把握するために、三軸圧縮試験を行った。三軸圧縮試験は、排水条件下で行っている。供試体は、締固めなどを行わず、目標密度 1.3g/cm^3 (間隙比 $e=0.9$)となるように、空中落下にて作製した。これは、豊浦砂の相対密度 $Dr=30\%$ 相当の間隙比となる。その後、通水し、 B 値が 0.96 以上であること確認し、拘束圧を $\sigma_3 = 100\text{ kPa}$ として、圧密を行い、終了後、排水条件下でひずみ速度 0.5% にて、せん断を行った。図-6には、応力-ひずみ関係を示した。図中、比較のため、豊浦砂の相対密度 $Dr=30, 80\%$ の結果も併記した。載荷初期には、造粒竹炭土のせん断剛性は、セメント量の増加に伴い、高くなっている様子が認められる。その後、何れの条件においても、ひずみの増加とともに、主応力差は増加している。しかし、豊浦砂の相対密度 $Dr=80\%$ のように、ひずみ $\epsilon_a=15\%$ までに、明確なピークは認められず、なお、主応力差は増加傾向にあり、密詰め豊浦砂に比べ、延性的な破壊を引き起こす様子が窺える。

次に、軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ を破壊と定義し、この時の主応力から、内部摩擦角の評価を行った。ここで、用いた造粒竹炭土は、粒状体であるため、粘着力は 0 とし、次式により、内部摩擦角を求めた。

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_{15} \quad (1)$$

ここに、 σ_1 : 軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ 時の最大主応力、 σ_3 : 軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ 時の最小主応力を示す。図-7に内部摩擦角と竹炭セメント比 B/C の関係を描いた。図中には、豊浦砂の結果 ($Dr=30, 80\%$) も併記した。図より、竹

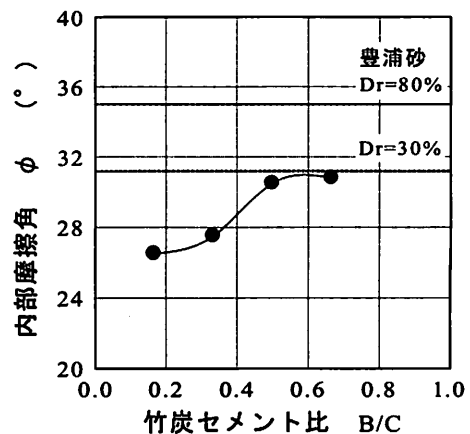


図-7 内部摩擦角と竹炭セメント比

炭セメント比の増加に伴い、内部摩擦角が増加している様子が分かる。 $B/C=0.5$ を超えると、豊浦砂と同程度の内部摩擦角となることが分かり、混合比の最適値が存在するような結果となった。また、造粒竹炭土の初期密度は、豊浦砂の相対密度 30% 相当であることを考えると、締固めることによる強度増加が期待でき、かつ軽量であることから、擁壁等への土圧の軽減のための裏込め材料や軟弱地盤上の盛土材への利用が期待できる。

5. 竹炭の軟弱土安定処理への適用性

セメント系固化処理土検討委員会の報告⁹⁾によれば、圧密による地盤沈下の抑制や支持力増加等を目的としたセメント系固化処理材を用いた安定処理時に関して、六価クロムの溶出が懸念される場合があると報告されている。とりわけ、土質では火山灰質粘性土に、普通ポルトランドセメントを固化材として用いた場合において溶出する割合が高い傾向にあるとされている。ここでは、火山灰質粘性土の安定処理における竹炭の六価クロム溶出抑制効果について検討していく。

(1) 竹炭を混合した安定処理土の力学特性

まず、セメントによる安定処理を行う上で、改良効果の確認を行った。安定処理対象土として、熊本県に広く分布する火山灰質粘性土の“赤ぼく” (以後、赤ぼくと称す) を用いた。この土質特性として、自然含水比が高く、地山強度と比較して、繰り返しにより著しい強度低下を引き起こすことが知られている¹⁰⁾。この赤ぼくを、 4.75mm ふるいで裏ごしし、試料として用いている。安定処理の効果の確認には、一軸圧縮試験を行った。供試体の作製は、試料に、まず、普通ポルトランドセメント

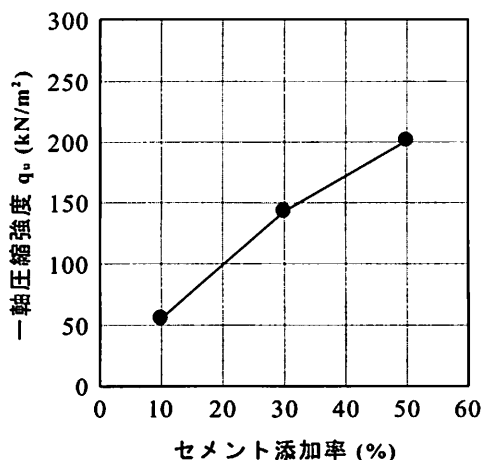


図-8 赤ぼくの配合試験結果

を混合し、団粒化している試料を乱さないように注意しながら、まんべんなく行き渡るように手で3分間混合した。次に、同様に、竹炭を混合している。その後、供試体をJIS A 1210に準拠したIEcのエネルギーで突固めて作製した。安定処理土は、恒温庫（20℃）で7、28日間養生し、一軸圧縮試験を実施した。なお、セメント添加率の決定は、図-8に示す配合試験の結果をもとに、目標一軸圧縮強度150kN/m²とし、セメントの添加率は、赤ぼくの乾燥質量に対して30%とした。また、竹炭の添加率は、赤ぼくの乾燥質量に対して30%とし、炭化温度350、530、700℃にて作成された竹炭を混合し、安定処理効果の確認を行った。比較のため、セメントのみを用いて安定処理された供試体についても一軸圧縮試験を行っている。一軸圧縮試験は、各条件下で供試体を3本作製し、行っている。

図-9に各養生日数における平均一軸圧縮強度 q_u と炭化温度の関係を描いた。なお、便宜的に、炭化温度0℃にセメントのみによる安定処理土の結果を示している。何れの炭化温度においても、セメントのみによる結果と比較し、安定処理効果は認められる。セメントのみによる安定処理土では、養生日数の増加に伴い、強度の増加はほとんど認められず、竹炭を混合した場合、養生日数の増加に伴い、一軸圧縮強度は増加していることが分かる。炭化温度530℃の竹炭を混合したケースにおいて、最も一軸圧縮強度が発揮され、明確な炭化温度依存性は認められなかった。安定処理土の強度増加要因は、竹炭とセメント混合により、粒度調整とセメントによる安定処理効果があったと考えられるが、炭化温度による強度の相違は、竹炭粒子の強度、比表面積等に影響を受けたものと考えられる。特に、図-4に示したように、炭化温度の増加に伴い比表面積は大きくなるため、炭化温度700℃の竹炭においては吸水効果が増し、セメントの水和反応

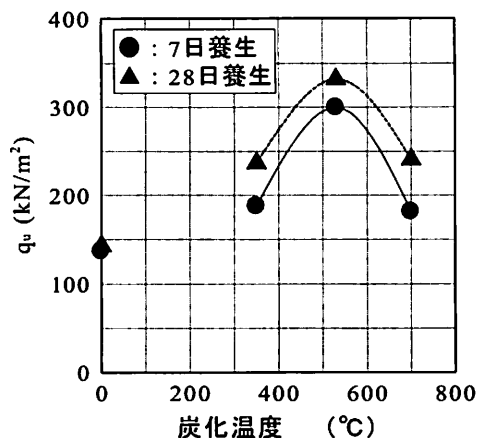


図-9 一軸圧縮強度と炭化温度の関係

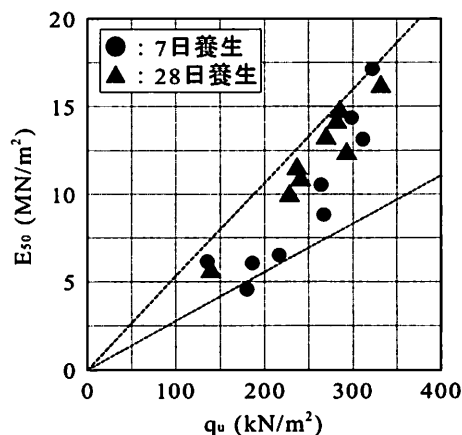


図-10 変形係数と一軸圧縮強度の関係

を阻害したと推測される。全ての実験条件において、変形係数 E_{50} と一軸圧縮強度 q_u との関係を図-10に描いた。概ね $E_{50}=25\sim50q_u$ の範囲内に収まっている。しかし、7日養生において、傾きにばらつきがあるものの、特に、28日養生においては、両者に良好な比例関係が認められ、炭化工程・炭化温度に依存しない様子が窺える。

(2) 安定処理土からの六価クロムの溶出特性

ここでは、平成3年8月23日付け環境庁告示第46号の溶出試験に従い、ジフェニルカルバジド吸光度法（JISK 102の65.2.1）により六価クロム濃度の定量を行った。溶出試験の精度確保のため、検液の作成は統一して行っている。まず、所定の期間養生した供試体を一軸圧縮試験後、何れの供試体においても、2mm以下に粉碎し、40℃の恒温室内で36時間乾燥させた後、これを風乾状態とした。その後、試料と溶媒（純水に塩酸を加えてpH=5.8～6.3としたもの）とを固液比1：10の割合で混合し、6時間振とうさせた。その上澄み液を、遠

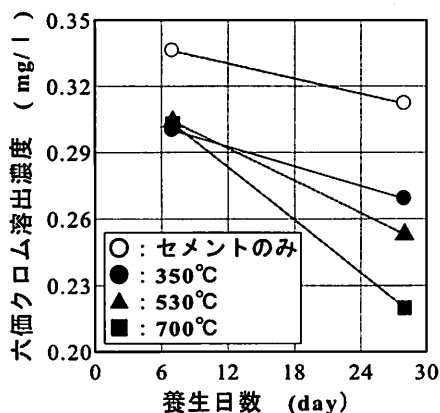


図-11 六価クロム溶出濃度と養生日数の関係

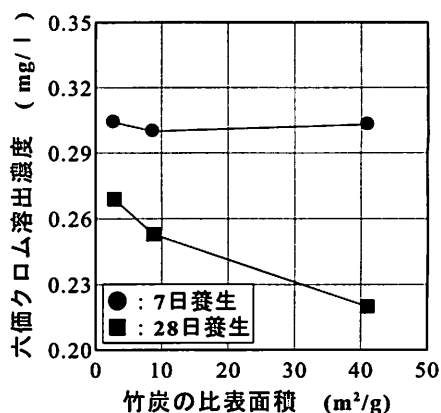


図-12 六価クロム溶出濃度と竹炭の比表面積の関係

心分離機を使用し毎分3000回転で20分間作動させ、固液分離を行い、0.45 μ mのメンブレンフィルタを用いてろ過を行い、検液を作成している。ここでは竹炭の六価クロム吸着性能を相対的に評価するために土とセメントのみを混合したものについても同様の実験を行った。

なお、本研究における溶出試験の精度確認のため、700℃で作製された竹炭を混合したセメント処理土（養生7日）から得られた検液を用いて、（社）熊本県薬剤師会（計量証明事業：熊本県知事登録第45号）に、ICP発光分析法（JIS K0102の65.24）による六価クロムの溶出試験を委託した。その結果、六価クロムの溶出濃度は0.31mg/lであり、同一条件での本研究で測定された溶出濃度0.30mg/l（図-11、12参照）であったことから、本研究における溶出試験の再現性は確保できていると判断し、これ以後、測定を行っている。

図-11には、竹炭を混合した固化処理土からの六価クロム溶出濃度と養生日数の関係を示した。図中には、赤くセメント固化処理土からの六価クロム溶出濃度についても併せて示している。一般に、火山灰質粘性土で作製したセメント改良土が六価クロムを溶出しやすいのは、固化する過程で、土の粘土鉱物や有機物によるカルシウムイオンの吸着がセメント水和物の生成を阻害し、水和反応によりセメントから溶出した六価クロムが同時に生成する水和物で十分固定できなかったためと報告されている⁹⁾。これに対し、何れの炭化温度、養生日数においても、竹炭未混合の安定処理土と比較して、六価クロムの溶出を抑制していることが分かる。また、養生日数7日では、六価クロムの溶出濃度に、炭化温度の影響は認められないが、養生日数28日では、炭化温度が高いもののほど、六価クロムの溶出は抑制されている様子が窺える。

図-12には、六価クロムの溶出濃度と図-4に示した竹炭の比表面積について示した。養生日数7日において、

比表面積の違いによる六価クロムの溶出濃度に差は認められなかった。一方、28日養生の場合、比表面積の増加に伴い、すなわち、高温の炭化温度で作成された竹炭ほど、六価クロムの溶出濃度は低下していることが分かる。これらの結果は、竹炭への吸着による六価クロムの封じ込めが考えられる。また、六価クロムの吸着は、竹炭の細孔内部へ侵入した後に起こると考えられ、細孔という狭いパスを通過するため、吸着は拡散の影響を受ける¹⁵⁾。そのため、養生日数7日では吸着速度に差が出ず、養生日数28日では、さらに微細な竹炭中のメソ孔（図-5参照）へと拡散し、比表面積が大きい700℃での竹炭混合において、吸着量が最も増加したものと考えられる。本研究では、気中養生のみの結果であり、今後、地下水や土中の浸透流を考慮し、タンクリーチング試験やカラム試験の実施等を含め、地盤堆積環境を考慮した六価クロムの溶出抑制についての課題を検討し、安定処理土への竹炭混合の有用性を確認する必要がある。

6. 竹炭を活用した干潟土の底質改善

有明海の干潟域は、多種にわたる底棲生物が数多く生息する豊かな海域であった。しかし、近年では海苔の不作や魚介類の不漁が続いており、また、干潟の底質悪化が大きな社会問題となっている¹¹⁾。その原因の一つとして、有明海干潟土内の硫酸還元菌の活発化による硫化物の増加が、底棲生物にとって生存困難な底質環境になったと報告されている¹²⁾。ここでは、竹炭と有明粘土との混合において、硫酸還元抑制の点から底質改善効果について調べている。

(1) 試料および実験方法

本研究では、530℃にて作製され、2mm以下に粉砕し

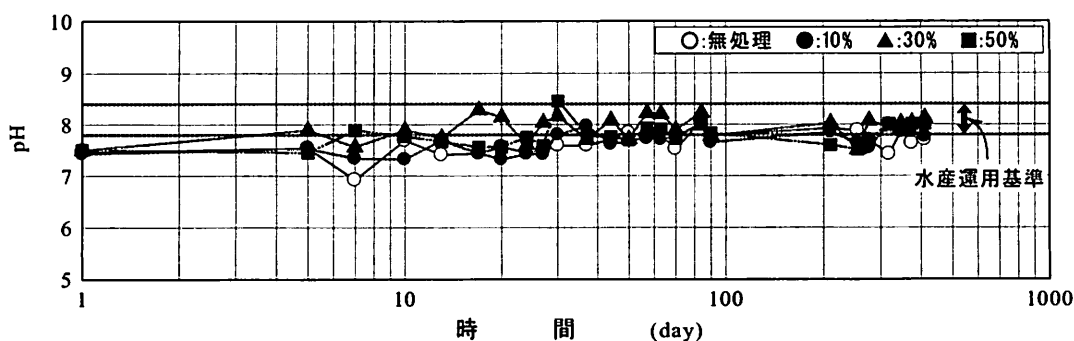


図-13 pHの経時変化

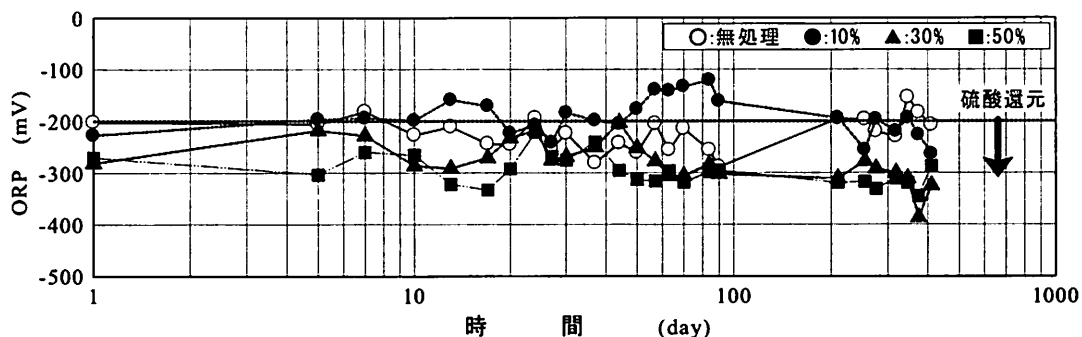


図-14 ORPの経時変化

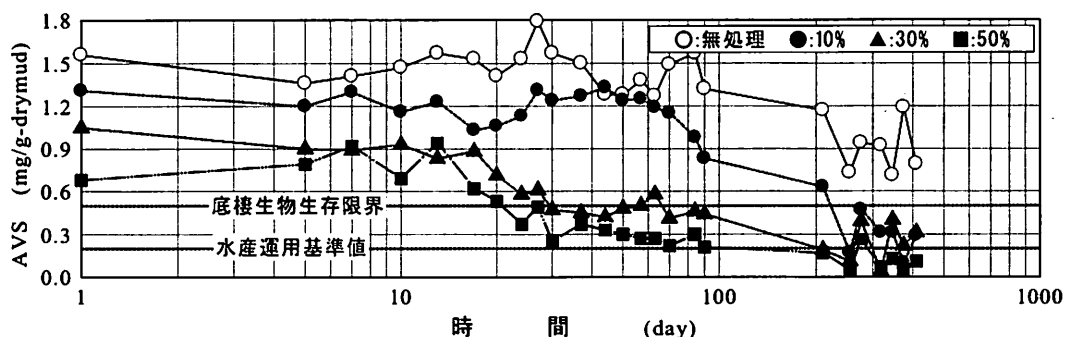


図-15 AVSの経時変化

た竹炭を有明粘土に混合し、その混合土の底質改善効果を検討した。竹炭化材の添加率を、有明粘土の乾燥質量に対し、10、30、50%とした。これを水槽（30cm×30cm×30cm）内に、高さ15cmとなるように地盤を作製した。無対策を含め、計4種類の模型を作製し、実験を行っている。有明粘土は、4.で用いた試料と同一である。実験は、まず、有明粘土を嫌気状態となるように放置し、AVS(酸揮発性硫化物)量が1.5mg/g-drymudとなるのを確認し使用している。

底質改善効果の確認には、混合土の pH、ORP（酸化還元電位）、AVS（酸揮発性硫化物量）の3項目を測定している。混合土の pH、ORP は、混合土に、直接セン

サーを挿入し計測を行った。AVS(酸揮発性硫化物)については、深さ10cmで試料を採取し、これをガラス容器内にて、18N硫酸と混合後、試料の硫化物を全て硫化水素に置換し、それをガス検知管法によって測定している。測定は、約1年間継続し測定を行っている。また、何れの模型地盤も、水による化学的影響を小さくするために、実験中は、エアレーションを行っている。

(2) 計測結果

図-13には、pHの経時変化を対数上に示した。何れのケースにおいても、中性から弱アルカリ性を示していることが分かる。また、pHの大きな変動はなく、地盤は

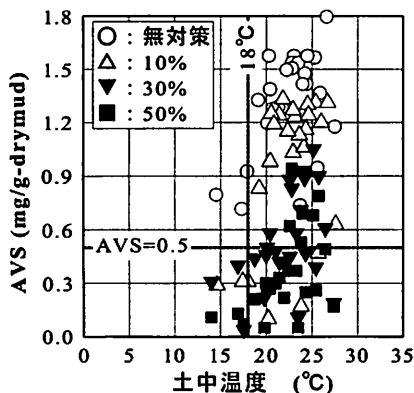


図-16 AVSと土中温度の関係

弱アルカリ性を示し、水産運用基準¹³⁾である海水pH=7.8～8.4の幅に概ね収まっており、竹炭混合による海水への影響はほとんどないと考えられる。図-14のORPでは、何れの竹炭混合率においても、酸化状態になることは認められなかった。ばらつきは大きいものの、竹炭材混合率10%では、計測60日以降、硫酸還元発生の指標¹⁴⁾となるORP=-200mV以上の値を示している。一方で、竹炭材混合率30、50%では、無対策と変わらず、ORP=-300 mV付近の値を示し、嫌氣的な状態であったと考えられる。図-15のAVSについて、竹炭混合率10%では、計測初期において、無対策と比較すると、若干良好な底質の改善効果が認められるが、水産用水基準である底棲生物が生存可能なAVS=0.5mg/g-drymud以下になることはなかった。しかし、300日以降となると改善傾向が認められる。竹炭混合率30%および50%では、計測初期より、漸次AVSの値が減少しており、AVS = 0.5mg/g-drymud以下に抑制されていることが分かる。特に、竹炭混合率50%では、計測開始から65日以降、0.2mg/g-drymud以下を示し、底棲生物にとって良好な底質環境へ改善され、その状態を維持している様子が窺える。

図-16には、AVSと測定時の土中温度との関係を示した。硫酸還元菌による硫酸還元は、ORPの条件とともに、温度条件が18℃以上で開始される¹⁴⁾。無対策、竹炭混合率10%は温度が上昇するに伴い、土中温度18℃以上になると、AVS値も増加し、硫酸還元の活発化が確認される。対して、混合率30、50%では、18℃以上においても、計測初期における高いAVS値も認められるが、無対策、混合率10%と比較し、多くがAVS=0.5mg/g-drymud以下となっており、活発化する硫酸還元菌を抑えることが確認される。

これらの結果から、有明海干潟土の底質改善には、竹炭化材を混合することの有用性が示された。この要因とし、粒子内の細孔容積により、吸着能も高かったと考えられる。また、竹炭の機能の一つである有機物の分解過

程で発生する不安定な水素イオンの硫化水素生成前での吸着、または、悪臭の元である有害物質の硫化水素を吸着したためと考えられる。

7. まとめ

本研究では、竹炭の軽量性や吸着性能に着目し、環境修復および材料リサイクルの観点から、竹炭の地盤材料としての適用性について、実験的に検討を行ったものである。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 竹炭は、炭化温度に拘わらず、弱アルカリ性を示した。水への浸漬による経過時間に伴うpHの大きな変化も認められず、化学的に安定していた。

(2) 竹炭の比表面積は、炭化温度が高いものほど大きくなることが示された。六価クロムの吸着量を調べるためのバッチ試験では、炭化温度の高い竹炭、すなわち、比表面積の大きい竹炭ほど、吸着量は増加した。

(3) 造粒竹炭土において、土粒子の密度は、一般的な砂や粘土と比較し、小さいものであった。また、三軸圧縮試験では、延性的なせん断挙動を示し、内部摩擦角は、豊浦砂と同等であった。

(4) 竹炭を混合した安定処理土の力学特性において、炭化温度の依存性は認められなかったものの、強度は著しく増加する。

(5) 竹炭を混合した安定処理土からの六価クロムの溶出量は、セメントのみの試料からの溶出量に比べ、抑制された。また、竹炭の炭化温度が高くなるに伴い、すなわち竹炭の比表面積量が大きくなるに伴い、溶出量は減少した。

(6) 竹炭を活用した干潟土の底質改善において、時間経過に伴う、環境に影響を及ぼすようなpHの大きな変動は認められなかった。また、AVS（酸揮発性硫化物量）は、硫酸還元が発生しやすい土中温度下および嫌気状態においても、竹炭の混合率の増加に伴い、減少し、底質が改善される傾向が示された。

(7) 干潟土の底質は、竹炭の混合率の増加に伴い、比較的早期に改善される傾向を示した。しかし、低い竹炭混合率においても、時間は掛かるが、底棲生物が生存可能な干潟へと改善される傾向が示された。

なお、竹炭の地盤材料への適用性は、竹炭の物理・化学的性質を踏まえると多様にあると考えられる。今後、地盤材料として竹炭の適用性をより確実なものとするにあたり、竹炭の粒子強度、造粒竹炭土の動的性質等の力学試験や、六価クロムの吸着メカニズムの把握、その他の重金属における竹炭の吸着特性をカラム試験やタンクリーチング試験等試験により進展させていく予定である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究（C）による研究成果の一部である。付記して、深甚の謝意を表します。また、本研究の実験、データ整理の補助の協力を頂いた崇城大学工学部エコデザイン学科の卒業生である齊翔太氏、西口明宏氏、廣瀬大次郎氏、津田史也氏、葉永治氏に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、濱田政則：土木工事での木材活用による温暖化防止への貢献，土木学会誌，Vol. 94, No.10, pp.39, 2009.
- 2) K. Omine, H. Ochiai, N. Yasufuku, T. Kobayashi, K. Kuroki and M. Shiozaki : Improvement in the mechanical properties of cohesive soils by mixing carbide possessing water absorption property, Proc. of Recent Developments of Geotechnical Engineering in Soft Soil Ground, pp.311-316, 2005.
- 3) 日本竹炭竹酢液生産者協議会編：竹炭・竹酢液作り方生かし方，創林社，2004.
- 4) 柳沼力夫：炭のかがく，誠文堂新光社，2003.
- 5) 地盤工学会九州支部編：環境と経済を考慮した建設発生土と廃棄物の有効利用，2003.
- 6) 荒牧憲隆：竹炭化材を活用した有明海干潟土の底質改善効果，海洋開発論文集，Vol.25, pp.395-400, 2009.
- 7) 荒牧憲隆：竹炭を活用した火山灰質粘性土の安定処理：地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム論文集，地盤工学会九州支部，pp.25-28, 2010.
- 8) 国土交通省・セメント系固化処理土検討委員会：セメント系固化処理土に関する検討最終報告（案），2003.
- 9) 吉本憲正・兵動正幸・中田幸男・村田秀一・西園崇志・本郷孝・大中 昭・虫合一浩：造粒石炭灰を混合した土の繰返しせん断特性，材料，Vol.57, No.1, pp.71-76, 2008.
- 10) 地盤工学会九州支部編：九州・沖縄における特殊土，1982.
- 11) 環境省・有明海・八代海総合調査評価委員会：委員会報告，2006.
- 12) 林重徳，杜延軍，末次大輔：有明海湾奥部における干潟環境再生のための地盤工学的視点からの取組み，第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.1-10, 2007.
- 13) 日本水産資源保護協会編：水産用運用基準，2005.
- 14) 地球環境調査計測事典・第3編沿岸域編，フジテクノシステム，pp.140-141, 2003.
- 15) 町田基・天野佳正・相川正美：活性炭による重金属イオンの吸着除去，炭素，No.247, pp.62-69, 2011.

(2011.5.30 受付)

Applicability of Bamboo Charcoal with Multifunctional Characteristics to Geomaterial

Noritaka ARAMAKI¹

¹Dept. of EcoDesign, Sojo University

The purpose of this study is to show applicability of bamboo charcoal with multifunctional characteristics to Geo-material from the viewpoint of both environmental restoration techniques and recycle of construction generated soil. Firstly, triaxial compression tests were performed on samples of granulated bamboo charcoal particle mixed with clay. Internal friction angle of the composite material was almost equal to that of sand. Secondly, unconfined compression tests were carried out to investigate the effect of bamboo charcoal mixture on soil stabilization of volcanic cohesive soil. The unconfined compression strength of stabilized soils mixed with bamboo charcoal was increased remarkably. In addition, hexavalent chromium leaching amounts of stabilized soils mixed with bamboo charcoal were dependent on the carbonized temperature of bamboo charcoal. Finally, the improvement effect of mixed-clay between contaminated clay and granulated bamboo charcoal material were investigated from a point of view of sulfate reduction. The clay improvement effects were observed depending on mixing rate of bamboo charcoal material. Based on these tests, it was shown that the bamboo charcoal had multiple uses for geomaterial.