

地域で発生するバイオマスを活用した特殊土の再生地盤材料としての有効活用

林 泰弘

九州産業大学

概要: 建設工事で発生した火山灰質粘性土(赤ぼく)を地盤材料として活用するために、地域で発生する廃棄物系のバイオマス(裁断紙、針葉樹バーク、竹パウダー)を混合することで改良し、材料特性を調べた。コーン指数、圧密降伏応力、せん断強さなどに改良効果がみられ、従来の石灰等を用いた化学的安定処理に比べ安価で安全な改良が期待できることがわかった。

1. はじめに

建設発生土搬出量は土砂利用量の 2 倍程度あり、供給過多の状態にある一方で、搬入土砂利用量の 4 割弱を新材に頼っている。その理由は、軟弱な粘性土の改良における技術的な問題だけでなく、経済性や再利用に関するシステムが不十分な面も問題として挙げられる。リサイクルにおける費用では改良だけでなく運搬に要する費用も大きなウエイトを占めている。また、発生した廃棄物を他地域で使用することは、心理的な面でも受け入れられにくい。そのため、廃棄物や副産物の「地産地消」が求められる。

九州地方に分布する有明粘土などの海成粘土や赤ぼく等の火山灰質粘性土は、粘性土系の特殊土として有名である。これらは高含水比であるため、そのままでは地盤材料としての利用が困難である。土質改良のためにセメントなどの化学的安定処理を施す場合には費用が高くつくうえ、高アルカリや六価クロムの溶出など環境面での負荷が大きい。環境負荷が小さい方法として脱水処理があるが、強制脱水では費用が、天日乾燥では要する時間が長いので適用できる場面が少ない。

建設業以外で、特に近年有効利用のとりくみが盛んなものにバイオマスがある。「バイオマス・ニッポン総合戦略」では、未利用あるいは廃棄物系のバイオマスの有効利用を求めている。バイオマス系廃棄物は各地で広く薄く発生し、かさばるという特徴を有するため、発生する地域で消費するのが望ましい。

これまでの筆者の研究で針葉樹バークなどのバイオマスを泥土に混合することにより土の補強効果が確認されている¹⁾。本研究では、粘性土系建設発生土である火山灰質粘性土にバイオマスを加えて改良し、再生地盤材料として活用するための研究を実施した。この方法は、通常行われる固化材

等の混合改良に比べ、経済的にも環境負荷の面で効果があると考えられる。

2. 実験試料

2.1 火山灰質粘性土

火山灰質粘性土は洪積世から沖積世にかけて噴出された降下火山灰が特殊な条件の風化過程を経てできたものである。赤ぼくは黄褐色ないし赤褐色を呈する洪積世末期に堆積した新規ローム層であり、関東ロームの立川ロームに対比される²⁾。地山における土粒子間のセメンテーションが強いいため、地山強度は強いが、攪乱による強度低下が大きいので、第 4 種建設発生土や泥土に分類されることが多い。

対象とした建設発生土は熊本県阿蘇郡西原村で採取した火山灰質粘性土(赤ぼく)である。採取した試料は含水比 $w=144.3\%$ 、液性限界 $w_L=135.0\%$ 、塑性限界 $w_p=82.3\%$ 、土粒子密度 $\rho_s=2.743\text{g/cm}^3$ である。宋チャート³⁾や諸戸チャート⁴⁾によって分類すると、HH に分類され、流動性、不安定性ともに高く、トラフカビリティは劣悪であり、捨土か高価な安定処理が必要な土と判断された。


2.2 バイオマス

バイオマスは生態学で、特定の時点においてある空間に存在する生物の量を、物質の量として表現したものであるが、転じて生物由来の資源を指すこともあり、本研究では後者を指す。バイオマスは表 1 のように分類される。廃棄物系、未利用系のバイオマスの利活用用途はエネルギーや堆肥が主体である。地盤工学分野での研究では、ため池底泥にペーパーシュレッダー(裁断紙)をセメントとともに混合することで強度増加がみられること⁶⁾、針葉樹バークを泥土に混合すると、コーン指数、一軸圧縮強さや脆性の改善効果があること¹⁾などが報告

表 1 バイオマスの分類⁵⁾

分類	特徴	内容	年間賦存量
廃棄物系 バイオマス	廃棄物として発生しているバイオマス	畜産資源(家畜排泄物など)、食品資源(加工残渣、生ゴミなど)、産業資源(パルプ廃液など)、林産資源(製材工場残材、建設廃材など)、下水汚泥など	湿潤:約 32,700 万トン 乾燥:約 7,600 万トン
未利用系 バイオマス	資源として利用されずに廃棄されているバイオマス	林産資源(林地残材)、農産資源(稲わら、籾殻など)	湿潤:約 1,700 万トン 乾燥:約 1,500 万トン
資源作物	資源としての利用を考えて栽培されたバイオマス	糖質資源(さとうきびなど)、でんぷん資源(米、いもなど)、油脂資源(なたね、大豆など)	-

表 2 使用したバイオマスの特徴

	裁断紙	パーク	竹パウダー
生成方法	コピー用紙をペーパーシュレッダーで裁断したもの	針葉樹パークをガーデンシュレッダーで粉砕したもの	廃竹を機械的に粉砕したもの。粉体の中にチップも混じる(市販品)
寸法	幅約 2mm、最大長約 10mm	最大長約 50mm	最大長約 5mm
実質部密度(g/cm ³)	1.246	1.435	1.546
含水比(%)	5.02	14.4	11.2
外観 (皿の直径は 70mm)			

されている。

本研究では、土の補強を目指したため腐敗しにくい(堆肥となりにくい)バイオマスで、強度面での改良が見込まれるものとして、裁断紙、針葉樹パーク、竹パウダーを選択した。

竹材を粘性土に混合した研究は見られないが、竹材は、すべての組織が軸方向に平行に並んでいるため、繊維方向に強度があり、特に表皮に近いほど繊維の密度が高く、しなやかで折れにくい性質をもっており⁷⁾、補強効果が期待できるものの、有効に利用されず放置竹林が多いこと⁸⁾などの理由から選択した。

これら使用したバイオマスの特徴を表 2 に示す。実質部の密度はいずれも土粒子に比較して小さい。外観からもわかるように形状や寸法には違いがみられる。

2.3 生石灰

火山灰質粘性土の安定処理には生石灰や石灰系安定材(固化材)が用いられることが多い。本研

究では、粉体状の生石灰(特級)を用いた。生石灰を加えることで、土との間に短期的には、①消化吸収反応、②イオン交換反応、③エトリンサイト反応、中期的には、①ポゾラン硬化反応、②炭酸化反応がおこる⁹⁾とされる。

3. コーン指数

発生土を建設資材として利用する場合には、建設発生土利用技術マニュアル¹⁰⁾が適用される。マニュアルでは、主にコーン指数をもとに土質区分がなされる。また、火山灰質粘性土は練り返しによる強度低下が著しく、土工事を行うための締固めるためのトラフカビリティを確保するのが最優先である。そこで、「締固めた土のコーン指数試験方法(JIS A 1228:2000)」を実施した。

混合土の作製手順は以下のとおりである。赤ぼくを 4.75mm ふるいを通過するようにほぐしたのち、バイオマスを所定量混合する。その後、生石灰を混合する。バイオマスと生石灰の混合順序を入れ替えると十分な強度が発揮できない¹⁾ので注意が必

表 3 コーン指数試験供試体の諸元

石灰 混合率(%)	バイオマス		湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	飽和度 (%)	含水比 (%)
	種類	混合率(%)				
0	なし	0	1.290	0.550	92.6	134.7
4	なし	0	1.305	0.560	93.8	133.0
8	なし	0	1.305	0.574	92.8	127.5
12	なし	0	1.315	0.612	91.1	114.9
0	裁断紙	3	1.285	0.542	93.0	137.1
0	裁断紙	7	1.270	0.576	88.7	120.5
0	裁断紙	9	1.330	0.589	95.5	125.8
0	裁断紙	12	1.290	0.566	92.7	128.0
4	裁断紙	3	1.295	0.557	93.1	132.5
4	裁断紙	6	1.260	0.551	89.5	128.6
4	裁断紙	9	1.270	0.558	90.6	127.6
8	裁断紙	3	1.320	0.579	94.7	128.0
8	裁断紙	6	1.325	0.589	94.8	124.9
8	裁断紙	9	1.340	0.604	95.9	121.7
0	パーク	3	1.275	0.536	92.1	138.0
0	パーク	6	1.275	0.542	91.9	135.1
0	パーク	9	1.320	0.584	94.4	126.0
4	パーク	3	1.255	0.541	89.3	131.8
4	パーク	6	1.270	0.561	89.8	126.2
4	パーク	9	1.245	0.555	87.5	124.5
8	パーク	3	1.300	0.579	92.1	124.6
8	パーク	6	1.225	0.548	85.4	123.6
8	パーク	9	1.265	0.574	88.5	120.4
0	竹パウダー	3	1.245	0.522	89.5	138.3
0	竹パウダー	7	1.290	0.555	92.8	132.4
0	竹パウダー	11	1.285	0.556	92.4	131.2
0	竹パウダー	12	1.280	0.565	91.1	126.7

要である。混合率は赤ぼくの乾燥質量に対する添加材の湿潤質量である。

生石灰を混合した土は消化を待つために密封し恒温庫(20±3℃)で1日仮置き後、締固めによって供試体を作製した。なお、生石灰を混合しないものは仮置きを行っていない。締固め後ただちに万能試験機を用いて、コーン貫入試験を実施した。

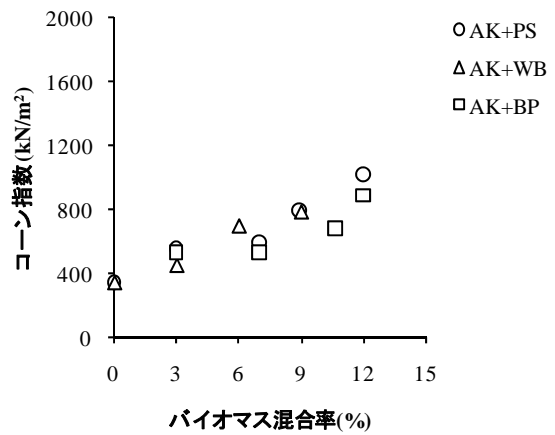
供試体の諸元を表 3 に示す。バイオマスを混合することで含水比と飽和度が低下していることがわかる。

図 1 にバイオマス混合量とコーン指数の関係を示す。なお、(a)は生石灰非混合土、(b)は生石灰混合土である。凡例の AK は赤ぼく、L は生石灰、PS は裁断紙、WB はパーク、BP は竹パウダーを、数値は混合率を示している。未処理の赤ぼくのコーン指数は400kN/m²以下であり、第4種建設発生土に分類された。生石灰を混合しなくても、バイオマスを3%混合すると第3種改良土、9~12%混合すると第2種改良土相当のコーン指数が得られた。生石灰を4%混合した場合は、第3種改良土、生石灰4%にバイオマスを3~6%混合した場合は第2種改良土相当のコーン指数が得られた。

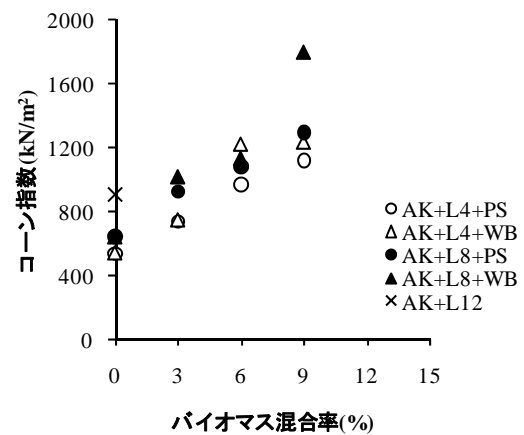
この結果より、コーン指数の改善には生石灰とバイオマスが同等の効果があることがわかる。

4. 圧密・せん断特性

生石灰を混合した場合には化学的な作用によって強度改善効果が得られるが、生石灰を混合しない場合には、通常の土と同様に圧密による強度増



(a) 生石灰非混合



(b) 生石灰混合

図 1 バイオマス添加率とコーン指数の関係

加が期待できる。そこで、裁断紙または竹パウダーの混合土に対し圧密試験、リングせん断試験を実施した。圧密試験は段階载荷による土の圧密試験(JIS A 1218 : 2000)に基づいて実施した。供試体は各配合の湿潤密度がコーン指数試験のものと一致するように調整して締固めた。供試体の諸元は表 4 に示すとおりである。

圧縮曲線を図 2 に示す。バイオマスの混合量が増加するとともに初期間隙比が小さく、曲線の変曲点付近の変化も緩やかになっている。この図より圧密降伏応力を求め、バイオマス混合率との関係を示したものが図 3 である。締固めた土であるため本来の圧密降伏応力とは意味合いが違うが、土骨格の降伏応力という点で利用できる。バイオマスを混合することで圧密降伏応力は大きくなり、特に竹チップにおいてその効果が大きい。この結果より、盛土材として使用する場合には、10m 程度の高盛土でも圧密降伏応力以下の範囲で使用できることがわかる。

表 4 圧密試験供試体の諸元

バイオマス		湿潤密度	乾燥密度	飽和度	含水比	間隙比
種類	添加率(%)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	
なし	0	1.289	0.529	94.2	143.7	4.186
裁断紙	6	1.270	0.533	92.2	138.2	3.986
裁断紙	9	1.275	0.583	89.0	118.8	3.495
竹パウダー	6	1.285	0.536	93.6	139.6	3.988
竹パウダー	9	1.275	0.561	90.6	127.2	3.712

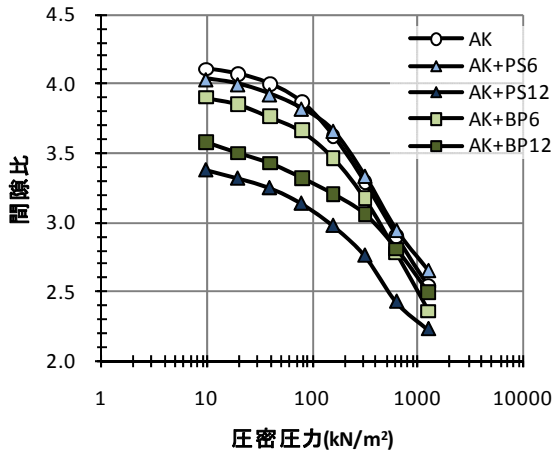


図 2 圧縮曲線

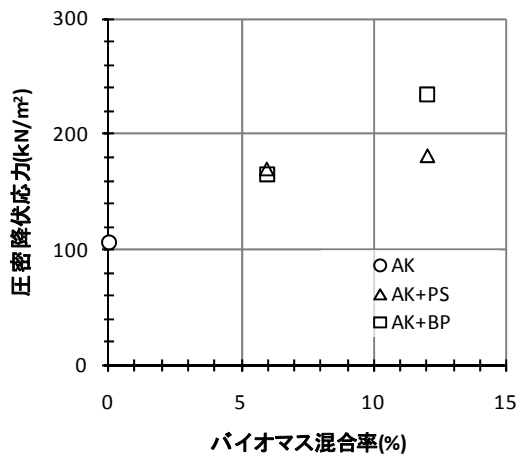


図 3 バイオマス添加率と圧密降伏応力の関係

圧密降伏応力以下の応力範囲(平均圧密圧力 111kN/m² 以下)における圧密係数、体積圧縮係数をバイオマス混合率に対してプロットしたものが図 4、5 である。いずれも竹パウダーを混合したものが若干大きな値を示しているが、有意な差とは言い難く、圧密の促進や圧密量の低減に影響するほどとは言えない。

せん断試験にはリングせん断試験を採用した。リングせん断試験とは、常時における地すべり斜面の安定や地震時における斜面の安定を考える上で土のピーク強度とともに残留時のせん断強さやせん断抵抗角を求めるために行われる。バイオマスを混合することで破壊ひずみが大きくなることが予測された¹⁾ため、この試験を採用した。実験の諸条件

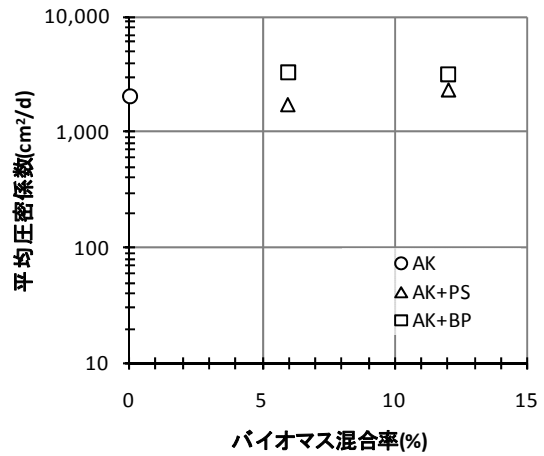


図 4 圧密圧力と圧密係数の関係

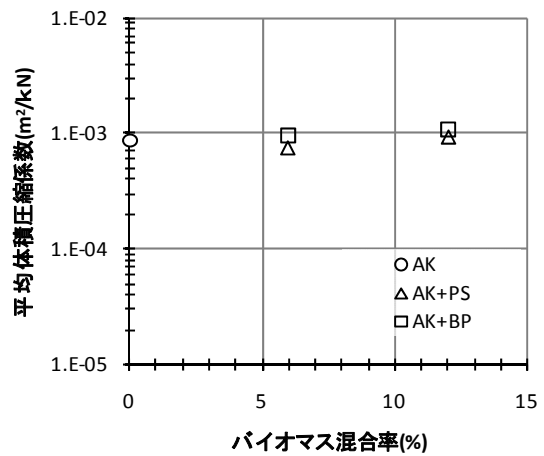


図 5 圧密圧力と体積圧縮係数の関係

を表 5 に示す。せん断時は定圧であり、せん断速度(0.2° /min)は一面せん断試験の 0.2mm/min に対応している。

各圧密段階でのせん断強さと垂直応力の関係を示したものが図 6 である。この結果にクーロンの破壊規準を適用し、強度定数である粘着力と内部摩擦角を求め、バイオマス混合率との関係を示したものが図 7、8 である。バイオマス混合率の増加に従って粘着力は増すが、内部摩擦角はやや減少している。すなわち、圧密圧力が小さい範囲では、バイオマスの混合によってせん断強さが増す(特に、竹チップ)ことがわかる。

4. 一軸圧縮特性

火山灰質粘性土などの含水比が高い粘性土を締固めて使用する場合には、飽和度または空気間隙率による方法によって締固めに関する施工管理が行われる。そこで、締固め仕事量を変化させることで飽和度や一軸圧縮強さはどのように変化するか、また、飽和度と一軸圧縮強さの関係を検討する

表 5 リングせん断試験の設定条件

項目	設定条件
試料の寸法	内径100mm, 外径150mm 高さ20mm
圧密方法	ペロフラムシリンダー による加圧(段階载荷)
圧密時間	24時間
リング側面と試料との摩擦	特に考慮していない
垂直応力(kN/m ²)	50, 100, 150, 200
せん断速度	0.2° /min
リング間の隙間	なし

表 6 リングせん断試験供試体の諸元

バイオマス		湿潤密度	乾燥密度	飽和度	含水比	間隙比
種類	添加率(%)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	
なし	0	1.289	0.529	94.2	143.7	4.186
裁断紙	6	1.270	0.533	92.2	138.2	3.986
裁断紙	9	1.275	0.583	89.0	118.8	3.495
竹パウダー	6	1.285	0.536	93.6	139.6	3.988
竹パウダー	9	1.275	0.561	90.6	127.2	3.712

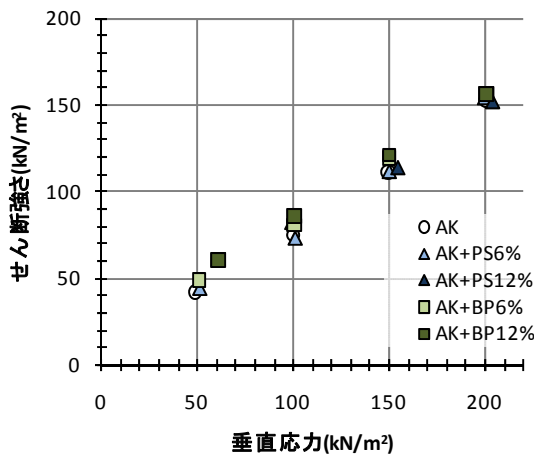


図 6 垂直応力とせん断強さの関係

ことにした。

使用したバイオマスは裁断紙とバークである。配合はコーン指数試験の結果を踏まえて、コーン指数が800kN/m²を越える生石灰0%+バイオマス9%と生石灰8%+バイオマス9%とした。

実験手順を以下に示す。4.75mm ふるいを通すようにほぐした赤ぼくに所定量のバイオマスを混合した。その後、生石灰を混合し、密封したのち1日恒温庫(20±3℃)で養生した。養生後、内径50mm、高さ100mmの鋳鉄製のモールドと質量1.5kg、落下高さ20cmのランマーを用いて、3層に分けて締固めて供試体を作製した。締固め仕事量E_cはランマーの落下回数で調整することにし、E_c=420、555、690、825、960kJ/m³となるように調整した。一般的にはコーン指数試験で用いられるE_c=555kJ/m³が1E_cとして基準とされるため、今回の実験の仕事量は、正規化した締固め仕事量として

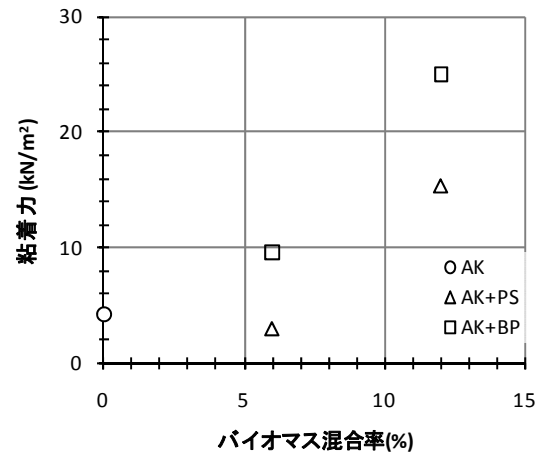


図 7 バイオマス混合率と粘着力の関係

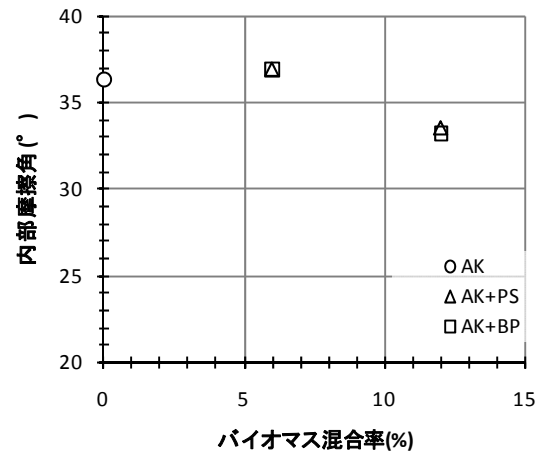


図 8 バイオマス混合率と内部摩擦角の関係

0.76、1.00、1.24、1.49、1.73E_cとあらわせる。

締固め後、再び密封し恒温庫で10日間養生した。水浸養生を行う場合には、最後の1日は開封し水中に供試体を完全につけて養生した。なお、生石灰を混合しない場合には養生を行っていない。

正規化した締固め仕事量と供試体の一軸圧縮試験前飽和度の関係を図9に示す。凡例のAKは赤ぼく、Lは生石灰、PSは裁断紙、WBはバークを表し、数値は混合率、*は水浸養生供試体を表す。非水浸混合土の飽和度は82~95%に分布し、締固め仕事量が小さい範囲では、石灰混合土の飽和度が低い。水浸混合土の飽和度は締固め仕事量によらず概ね95%以上であった。つまり、小さい締固めエネルギーで締固められた石灰混合土は、水浸による飽和度の変化が大きい。

図10に正規化した仕事量と一軸圧縮強さおよび破壊ひずみの関係を示す。非水浸の石灰混合土(AK+L8+PS9、AK+L8+WB9)は1.24E_cで一軸圧縮強さが最大となっており、オーバーコンパクションを起こしているものと思われる。しかし、同じ

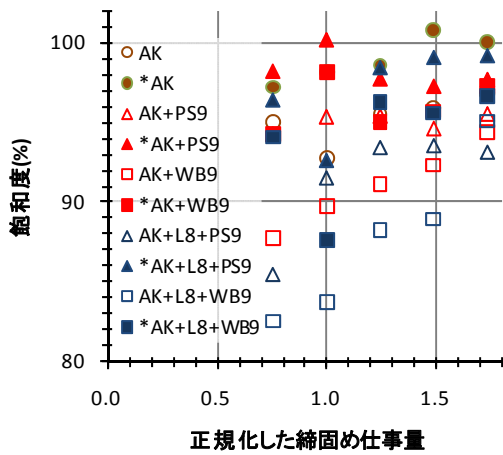


図9 正規化した締固め仕事量と飽和度の関係

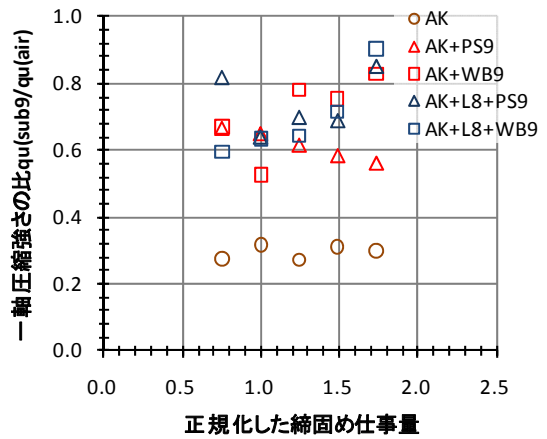


図11 飽和度増分と一軸圧縮強さ低減率の関係

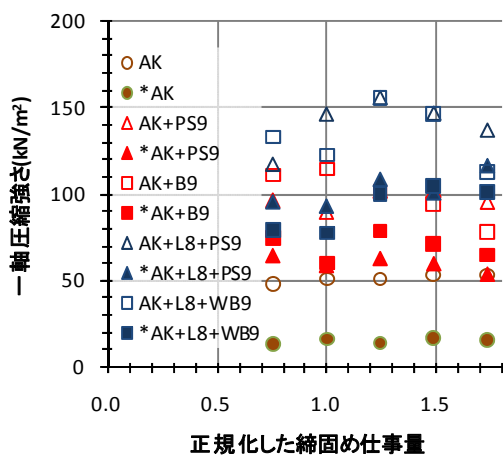


図10 正規化した締固め仕事量と一軸圧縮強さの関係

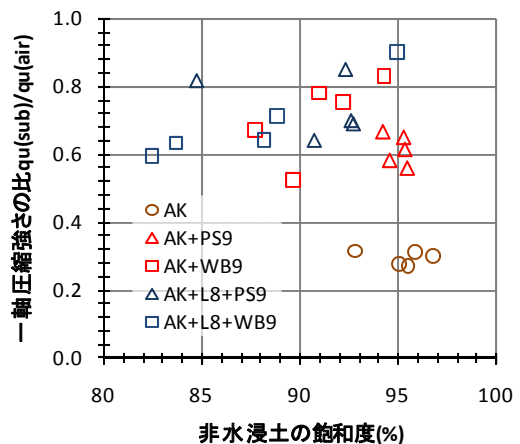


図12 飽和度増分と一軸圧縮強さ低減率の関係

配合の水浸土にはその傾向は見られなかった。

水浸による一軸圧縮強さの低減程度を調べるために、一軸圧縮強さの比 $q_u(\text{sub})/q_u(\text{air})$ を求めた。ここで、 $q_u(\text{sub})$ は水浸土の一軸圧縮強さ、 $q_u(\text{air})$ は非水浸土の一軸圧縮強さである。締固め仕事量との関係を示したものが図11である。締固め仕事量の増加に対して一軸圧縮強さの比は、未処理土は横ばい、バーク混合土は増加傾向、裁断紙混合土は横ばいもしくは低下傾向と異なることがわかる。一軸圧縮強さの比を飽和度で整理しなおしたものが図12である。バーク混合土は締固め仕事量によって飽和度が広く分布し、飽和度が高くなるほど一軸圧縮強さの比は大きくなっている。それ以外の土はほとんどのものが、飽和度が90%を超えており、その傾向が明確でない。いずれの混合土も未処理土に比べて、水浸における強度の低下率は大幅に改善されているといえる。しかし、石灰混合の有無には影響されていないようである。すなわち、水浸

による強度低減抑制効果はバイオマスによる物理的な効果であると考えられ、その効果を確実にするために飽和度を90%程度以上となるように締め固めることが重要である。

5. まとめ

九州で発生する特殊土である赤ぼくを地域資源であるバイオマス(裁断紙、バーク、竹パウダー)を用いて改良し、地盤材料として有効活用するための力学的性質を検討した。

バイオマスを混合することで、コーン指数の改善、圧密降伏応力の増大、せん断強さの増加、水浸によるせん断強さの低減効果などが得られることがわかった。ただし、水浸時の強度低下を抑制するために飽和度を90%以上に締め固める必要がある。

本研究結果より、従来は石灰などの固化材による化学安定処理を行わなければならなかった場合でも、固化材の不使用もしくは縮減が可能であるこ

とから環境負荷の小さい特殊土の有効利用が可能であることが期待される。

謝辞

本研究成果は(社)九州建設技術管理協会研究開発助成の援助を受けた成果である。実験には九州産業大学工学部都市基盤デザイン工学科松尾雄治副手、同学科高田朋宙氏、庄司敬哉氏、九州産業大学大学院工学研究科土木工学専攻東康平氏の協力をいただいた。ここに、謝意を表す。なお、研究成果は土木学会西部支部研究発表会で発表¹¹⁾、¹²⁾、地盤工学会研究発表会¹³⁾、土木学会年次学術講演会¹⁴⁾で発表予定である。

参考文献

- 1) 林泰弘: 泥土の石灰安定処理におけるバイオマスの混合効果, 第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.27-32, 2008.11.
- 2) 山内豊聡監修・土質工学会九州支部編: 九州・沖縄の特殊土, pp.93-119, 九州大学出版会, 1983.7.
- 3) So, E. K.: Stastical correlation between allophene content and index properties for volcanic cohesive soil, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.4, pp.85-93, 1998.12.
- 4) Moroto, N.: Basic properties of loam soils in Aomori prefecture, Japan, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.2, pp.35-46, 1993.6.
- 5) 農林水産省: バイオマス・ニッポン総合戦略, <http://www.maff.go.jp/j/biomass/index.html>, 2006.3.
- 6) 鍋島康之・友久誠司・森本真衣: ペーパーシュレッターを混合したため池底泥の強度改善について, 第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.19-22, 2008.11.
- 7) 林野庁ホームページ: 竹のはなし
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/take/seisitu.html>
- 8) 鳥居厚志: 竹資源の持続的利用に向けた取り組みー放置竹林の有効利用のためにー, *山林*, Vol.1487, pp.24-30, 2008.4.
- 9) 日本石灰協会編: 石灰安定処理工法 設計・施工の手引, 日本石灰協会, 2005.7.
- 10) 独立行政法人土木研究所編著: 建設発生土利用技術マニュアル(第 3 版), 土木研究センター, 2004.9.
- 11) 庄司敬哉・林泰弘・松尾雄治・東康平: 水浸養生したバイオマス混合火山灰質粘性土の一軸圧縮強さに及ぼす飽和度の影響, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.543-544, 2010.3.
- 12) 高田朋宙・林泰弘・松尾雄治・東康平: バイオマスを混合した火山灰質粘性土の圧密・せん断特性, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.545-546, 2010.3.
- 13) 宮原大輔・林泰弘・松尾雄治: 竹材混合による流動化処理土の圧縮変形特性の改善, 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集, 投稿中, 2010.8.
- 14) 東康平・林泰弘・松尾雄治・庄司敬哉: バーク・裁断紙を混合した火山灰質粘性土の一軸圧縮強さに及ぼす締固め仕事量の影響, 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集, 投稿中, 2010.8.
- 15) 林泰弘・松尾雄治・東康平・高田朋宙: バーク・裁断紙を混合した火山灰質粘性土の圧密・せん断特性, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 投稿中, 2010.9.