

河川・ため池の浚渫底泥と竹廃材を有効利用した 新しい地盤改良技術の開発

特定チーム（課題番号：197204）

研究期間：令和1年7月24日～令和2年3月31日

研究代表者：古賀 千佳嗣

研究成果

1. はじめに

竹は急成長し、竹林面積増加から放置竹林問題が顕在化し、その有効利用が急務となっている。また、竹は、高い吸水能力と引張強度をもち、ため池等の底泥処理を対象に環境に優しい、新しい地盤改良工法の材料の一つとして着目されている。昨今では、線状降水帯の発生に伴う豪雨や大型の強い台風など、異常気象による災害が多発している。これらの災害は山林部からの土砂の流出や、ため池・河川の決壊・氾濫等の水害を引き起こしている。水害発生後の回収される撤去される土砂は、大量の水分を含み運搬が困難であり、復興の妨げとなっている。このようなため池等の底泥処理や水害時に発生した高含水比粘性土の有効な処理方法がより必要とされている。竹チップ混合固化処理土はこれまで、竹チップの吸水と補強効果により地盤改良効果の有効性を示している。しかしながら、竹材は、生物・火災（熱）・化学薬品・水・紫外線・酸素・オゾン及び放射線などにより劣化する有機物である。特に生物は、害虫による食分解や微生物の生物細胞のセルロース等の分解によって、竹材自体の強度低下を招くといわれている。そのため、竹を混合した改良土強度の長期耐久性に懸念が生じることが予測される。そこで、本研究では竹チップ混合固化処理土を2種類の腐朽菌の培養環境下におき、改良土内の竹チップの強制腐朽試験を行った。ここでは、腐朽環境の有無による処理土の長期耐久性に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1. 実験試料

土質試料は、有機物が強熱減量：Ig-loss3.1%と少なく、含水比調整の容易なカオリン粘土を用いた。カオリ

ン粘土の物理特性を表-1に示す。竹チップは、小型竹専用粉碎機¹⁾にて、カッティングフィルターの円形20mm目を用い、チップ長2-35mmを使用した（表-2）。この竹チップは、チップ後60℃の炉乾燥で2日間乾燥させた絶乾竹²⁾を用いている。また、固化材には、高炉セメントB種を使用した。

2.2. 検討内容及び実験方法


2.2.1. 腐朽環境の作製方法

強制腐朽させる環境の作製方法として、木材保存剤の性能基準及び試験方法（JIS K 1571）に基づき、オオウズラタケ、カワラタケの2種類の菌を用いた（写真-1）。オオウズラタケは褐色腐朽菌とも呼ばれ、主に針葉樹を

表-1 土質試料の物理特性

	カオリン粘土
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.731
強熱減量 Ig-loss (%)	3.1
細粒分含有率 F_c (%)	100.0
液性限界 w_L (%)	51.7
塑性限界 w_P (%)	34.3
塑性指数 I_P	17.4

表-2 竹チップの諸特性

外観	
フィルター目の大きさ	円形20mm
繊維長幅	2-35mm

腐朽させる菌である。一方、カワラタケは白色腐朽菌と呼ばれ、広葉樹を腐朽させる菌である。これらの腐朽菌を直径5 cm、高さ10cmの円柱供試体が投入可能な本体外径9.58cm×高さ16.38cmの培養器(写真-2)にて培養した。培養器はクリーンベンチにて事前の除菌を行い、PDA(Potato dextrose agar)をオートクレーブにて温度 $120 \pm 2^\circ\text{C}$ 、圧力0.1MPaで滅菌した寒天培地を作製した。寒天培地作製後、オオウズラタケ及びカワラタケをそれぞれ寒天培地に接種し、約2週間、相対湿度70%以上、室温 26°C の条件で培養する。各腐朽菌ともに培地一面に菌糸が生長することで培養器の完成となる。完成した培養器に供試体を投入する際は、竹の繊維の損傷及び可燃を防ぐため、供試体をオートクレーブにて温度 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 、圧力0.1MPaで、供試体内の細菌類を滅菌し、室温と同等の温度になったことを確認して投入する(写真-3)。また、投入後は、菌には空気が必要となるため、蓋は密閉にせず、空気を出入り可能な状態とし、月毎にクリーンベンチの無菌内にて開封し、24時間開封養生させる。また、長期にわたり菌の繁殖の持続のため、90日以上培養する場合には、新しい培養容器を準備し、供試体をクリーンベンチ内で移動し、腐朽菌が常に活性化している環境下に供試体を設置した。無菌の培養器については、培養器に寒天培地のみ設置し、無菌環境とした。

2.2.2. 腐朽環境下における竹チップ混合固化処理土の材料特性の検討

今回は腐朽の進行状態を確認するため、木材保存剤の性能基準及び試験方法(JIS K 1571)を用いて腐朽の判定を行った。この試験方法は、腐朽菌培養の環境の中で、食物繊維状に含まれるブドウ糖やリグニン、セルロースが腐朽菌により分解され水分となり、この水分の気化による質量減少によって腐朽の判定を行うものである。判定の基準は、対象となる物質の質量減少率が3%以上に達した時に腐朽したと判定される。そこで、今回、竹チップ混合固化処理土の長期耐久性の評価において、腐朽判定材料を用いて行った。なお、処理土の材料特性については、培養期間を最長4年(1460日)に設定し、各培養菌に一軸圧縮試験より検討を行った。一軸圧縮試験(JIS A 1216)は、供試体を培養容器から取り出し、供試体体積、質量を測定後、ひずみ速度 $1.0\%/\text{min}$ にて実施して評価を行った。表-3に竹チップ混合固化処理土の腐朽試験条件を示す。供試体は一軸圧縮試験の実施を考慮し、培養器に収まる大きさである直径5 cm、高さ10cmの円柱供試体を使用した。竹チップ混合前の粘土の設定含水比は $w_0 = 100\%$ とし、固化材添加率は $C = 20\%$ 一定とした。また、竹チップ添加率による腐朽進行変化を考慮し、竹チップ添加率を $B = 0, 10, 20, 30, 40, 50\%$ とした。供試体の作製方法は、調整したカオリン粘土に竹チップを添加し、12時間静置⁴⁾後に固化材を添加混合



(a)オオウズラタケ



(b)カワラタケ

写真-1 腐朽菌の種類³⁾



写真-2 培養器



写真-3 供試体投入

表-3 竹チップ混合固化処理土の配合及び腐朽試験条件

土質試料	粘土の 設定含水比 w(%)	竹チップ添加率 B(%)	固化材添加率 C(%)	培養方法	供試体の 初期養生	培養期間 (日)
カオリン粘土	100	0	20	無菌 オオウズラタケ カワラタケ	7	0
		10				30
		20				365
		30				730
		40				1460
		50				

し、モールド内に3層で各層25回のタッピング法により供試体を作製した。供試体の養生期間は7日間とした。長期耐久性の検討として、腐朽培養期間を0, 30, 365, 730, 1460日とした。また、試験後の供試体の含水比測定においては、十分な乾燥と竹チップの燃焼を考慮して、試料を細かくハンマーで砕き、60℃の炉乾燥で2日間乾燥させて測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1. 腐朽環境下における竹チップ混合固化処理土の状態変化

表-4に竹チップ添加率B = 0, 30, 50%時の0, 30, 1460日腐朽培養後の供試体の様子を示す。表-4に示すように、投入前の供試体は、竹チップを含むことで若干褐色に変色していることがわかり、それらは培養日数の経過に伴い、濃い褐色となっていることがわかる。これは竹チップの色素が培養日数の経過に伴い、竹チップの色素がカオリン粘土へ移ったためと考えられる。また、いずれの条件において、腐朽菌が供試体全体を覆う様子はみられず、供試体への大きな浸食は確認されなかった。図-2(a), (b)に各腐朽菌における培養日数と質量減少率の関係を示す。ここで、質量減少率は竹チップ混入による影響を踏まえ、竹チップ添加率B = 0%に対する質量減少率を差し引いた値を示している。いずれの腐朽環境下においても培養日数の経過に伴い若干の質量減少率に変動があるものの、ほとんど変化がないことがわかる。また、腐朽と判定される質量減少率が3%以上の値を示していないことが確認できる。このように竹チップ添加率が増加としても、培養日数の経過に伴う大きな変化がみられず、竹チップ自体の腐朽が進行していないことがわかる。これらは、竹チップを乾燥したことで、竹チップの繊維内の結合水の状態を変化させ、腐朽菌に必要な水分やブドウ糖の成分が減少し、繊維質が密になったため⁵⁾と考えられる。

3.2. 腐朽環境下における処理土の強度・変形特性

図-3(a), (b)に無菌、(c), (d)にオオウズラタケ、(e), (f)にカワラタケの各々における竹チップ添加率および培養日数の影響における一軸圧縮試験結果をまとめてい

表-4 経過日数に伴う供試体の培養状況 (オオウズラタケ)

竹チップ添加率B=0%		
投入前 供試体 (気中7日)	養生日数 (days)	
	30	1460
		
$\rho_f=1.454\text{g/cm}^3$		
竹チップ添加率B=30%		
投入前 供試体 (気中7日)	養生日数 (days)	
	30	1460
		
$\rho_f=1.419\text{g/cm}^3$		
竹チップ添加率B=50%		
投入前 供試体 (気中7日)	養生日数 (days)	
	30	1460
		
$\rho_f=1.353\text{g/cm}^3$		

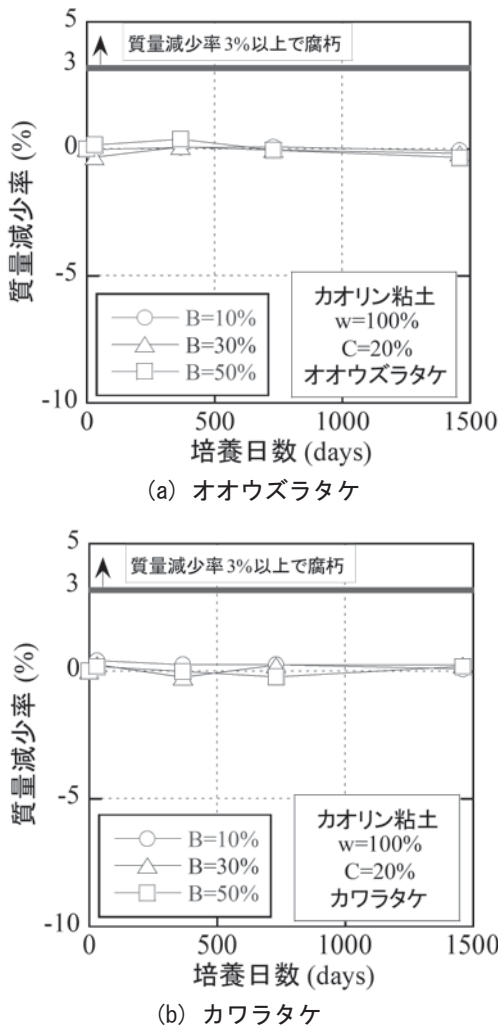
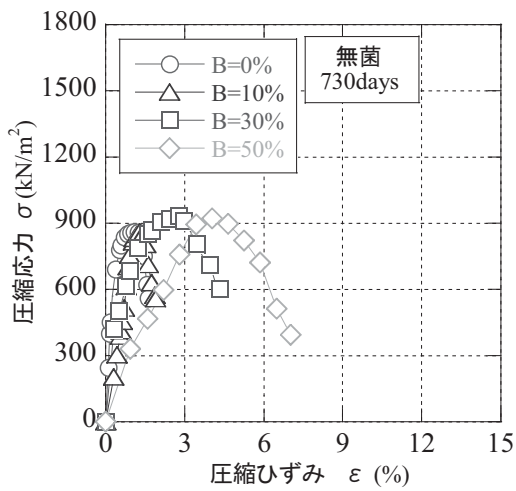


図-2 培養日数と質量減少率の関係

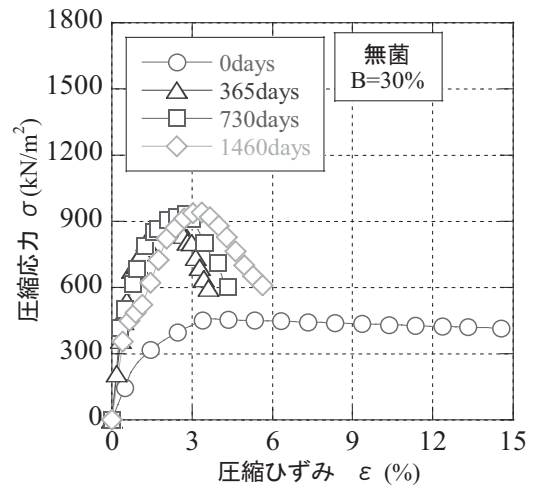
る。図-3(a)の無菌状態における竹チップ添加率に着目すると、圧縮応力のピーク強度においては、竹チップ添加率の影響がみられない。また、竹チップ添加率の増加に伴い、破壊時の圧縮ひずみ量が増加している。さらに破壊後において、圧縮応力の急な低下を抑制していることから、竹チップが引張補強材として機能的に働き、延性的な挙動を示していることがわかる。次に、図-3(b)の培養日数の経過に着目すると、培養日数の経過に伴い、圧縮応力は増加していることがわかる。また、培養365日以降では、培養日数経過による強度増加がみられない。これは、培養365日以降において固化材の水和反応が停止したと考えられる。また、オオウズラタケにて培養した図-3(c), (d)の一軸圧縮試験結果から、竹チップ添加率の増加と培養日数経過に伴う圧縮応力の増加が確認できる。特に竹チップ添加率B=50%では、無菌時より破壊後の圧縮応力の低下が抑制されていることがわかる。さらに、図-3(e), (f)に示すカワラタケで培養した場合においても、図-3(c), (d)のオオウズラタケと同様の破壊形態を示し、ピーク強度はオオウズラタケより

も低い値を示している。これらは、図-2(a), (b)から竹チップの腐朽の確認はできていないが、無菌状態に比べて、せん断に伴う強度発現がゆるやかとなっている。また、2種類の腐朽菌の違いについて着目すると、オオウズラタケよりもカワラタケ方が若干ではあるが、ひずみ発生に伴う強度発現が低いことがわかる。次に、図-4(a), (b)に竹チップ添加率B=20, 50%時の培養日数と供試体の含水比の関係を示す。各供試体の含水比は、いずれの条件において培養日数の経過に伴い、含水比が減少していることがわかる。これは、固化材の水和反応に伴う水分の減少と、室温26°Cの条件内での自然乾燥と考えられる。しかしながら、今回用いた腐朽菌は、増殖にあたり水分を排出する³⁾ため、無菌に比べて有菌の方が高い含水比を示したと考えられ、特にカワラタケはオオウズラタケよりも含水比が高い値を示している。竹チップは、乾燥状態であればより剛性が高く⁵⁾なる性質があることから、今回の含水比変化に影響し、強度発現の起因になったと考えられる。

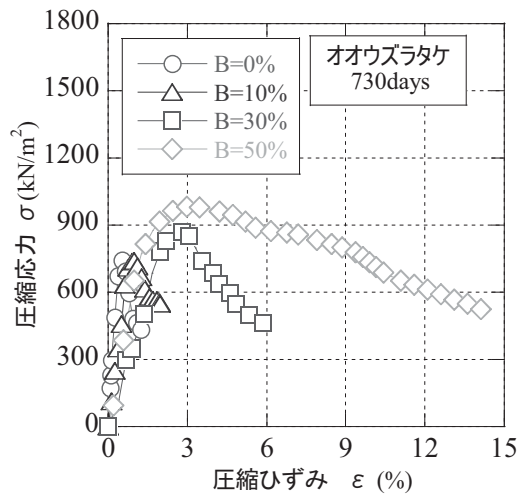
次に図-5(a), (b)に竹チップ添加率と一軸圧縮試験から得られた一軸圧縮強さの関係を示す。培養日数0日以外は、いずれの条件においても竹チップ添加率の増加に伴い一軸圧縮強さは増加していることがわかる。培養日数0日は、竹チップ添加率B=30%まで一軸圧縮強さは増加し、その後減少傾向となっている。また、培養日数1460日では、初期の0日と比較すると、2倍以上の一軸圧縮強さの増加が伺える。竹チップ添加率の増加による強度の発現としては、図-4に示す竹チップ添加率の増加により、供試体の含水比が低下することで、竹チップ自体の含水比が低下し、竹チップの剛性が高くなったためと考えられる。写真-6に培養1460日、竹チップ添加率B=50%の一軸圧縮試験後の供試体断面の様子を示す。写真より竹チップ混合固化処理土では、竹チップが供試体内部の全体に広がり、添加率が高くなると竹チップ同士が重なり合い、竹チップの骨格が形成されていることが確認できる。次に、竹チップ混合固化処理土の破壊形態に着目し、図-6(a), (b)に各培養日数における竹チップ添加率と破壊ひずみの関係を示す。図より、破壊ひずみは竹チップ添加率の増加に伴い、竹チップ添加率B=40%までは増加し、その後、竹チップ添加率B=50%では、低下傾向であることがわかる。これは、図-3(a), (c), (e)に示した竹チップ添加率の増加により、竹チップの引張補強材としての効果が現れ、破壊に向かうにあたり延性的な挙動を示し、破壊ひずみが高い値を示したといえる。また、この破壊ひずみに竹の腐朽の影響が生じると考え、図-7(a), (b)に竹チップ添加率B=20, 50%時における培養日数と破壊ひずみの関係を示す。いずれの条件においても、培養日数の経過に伴う変化はみられず、無菌と有菌による変化もみられなかった。これは、長期的な腐朽環境下においても竹チップ混合固化処理土



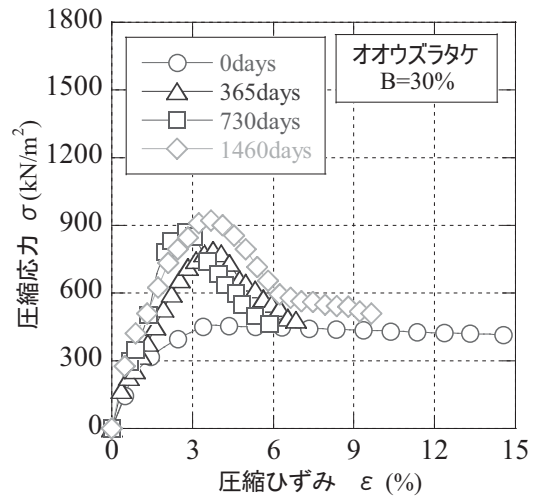
(a) 竹チップ添加率の影響 (無菌)



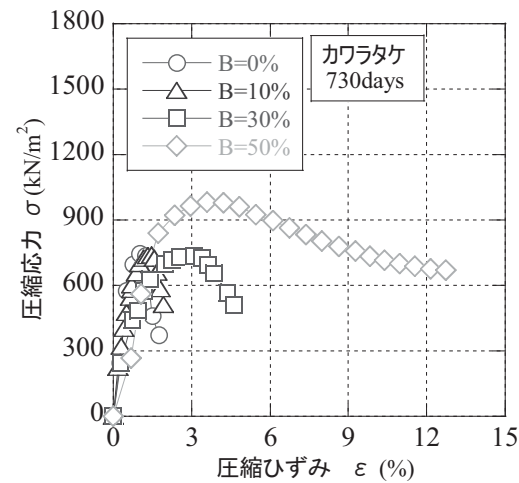
(b) 培養日数の影響 (無菌)



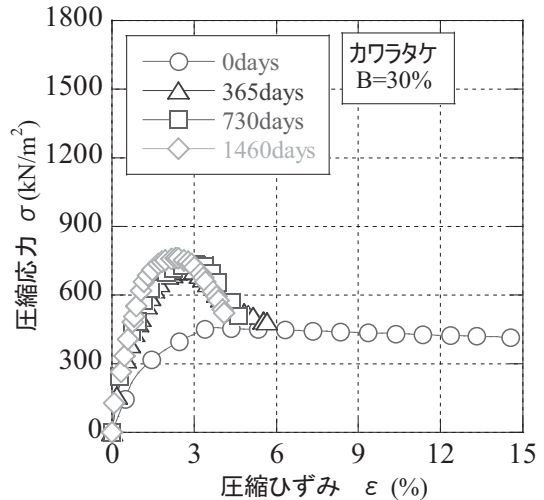
(c) 竹チップ添加率の影響
(オオウズラタケ)



(d) 培養日数の影響
(オオウズラタケ)



(e) 竹チップ添加率の影響
(カワラタケ)



(f) 培養日数の影響
(カワラタケ)

図-3 一軸圧縮試験結果

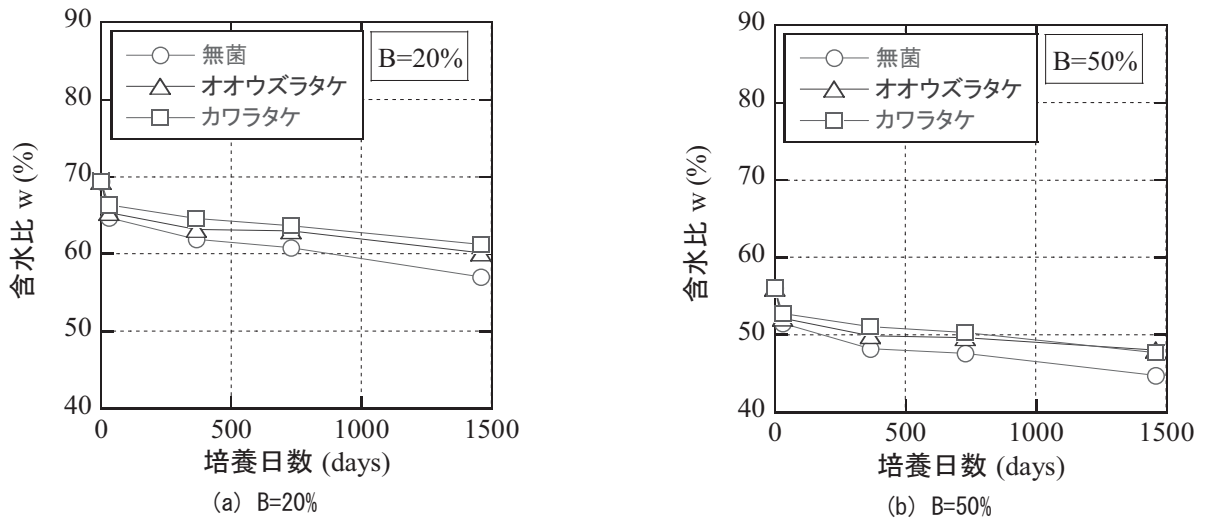


図-4 培養日数と含水比の関係

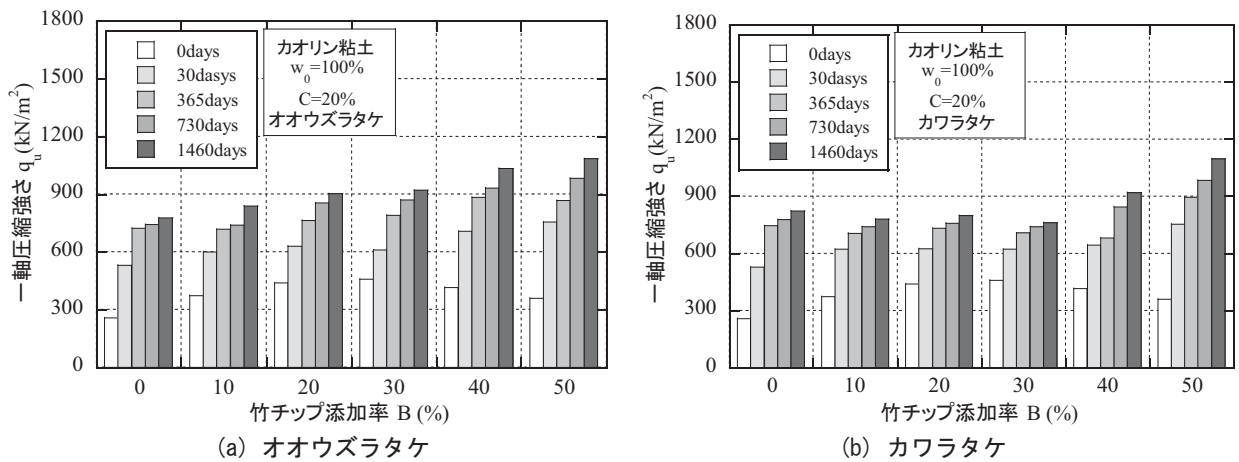


図-5 竹チップ添加率と一軸圧縮強さの関係

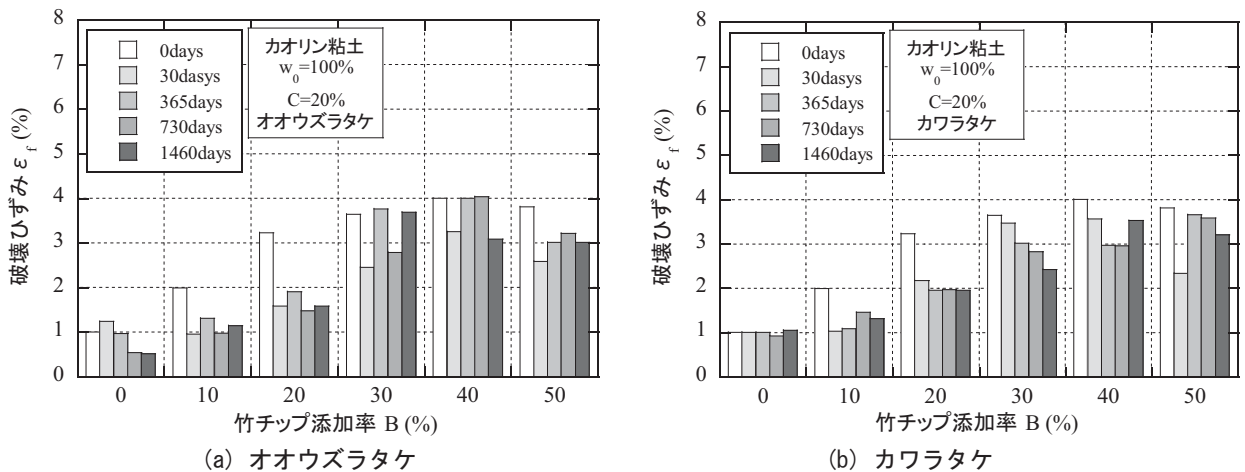
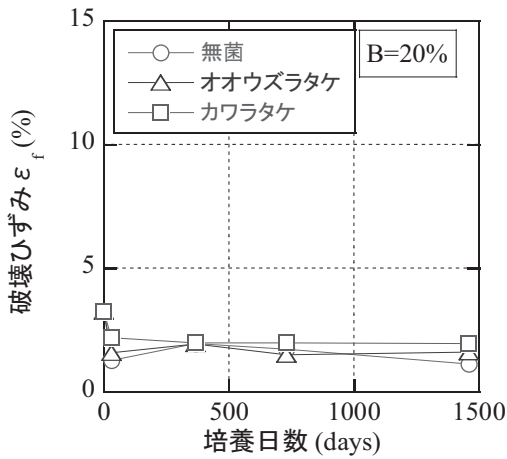


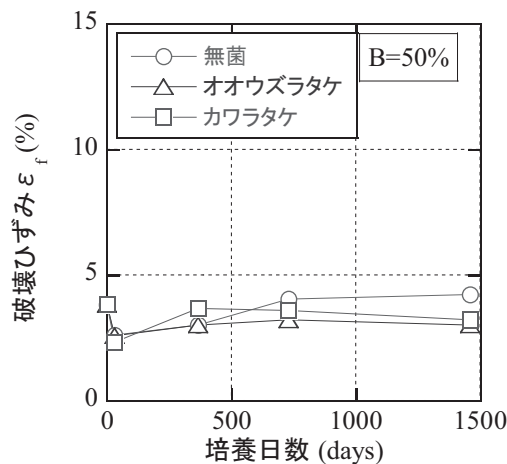
図-6 竹チップ添加率と破壊ひずみの関係



写真-6 B=50%の圧縮後の供試体断面



(a) B=20%



(b) B=50%

図-7 培養日数と破壊ひずみの関係

は、竹チップが腐朽の影響を受けず、竹の引張強度が変化していないためと考えられる。また、竹チップ添加率を増加させても腐朽の進行はみられず、培養日数経過に伴う含水比低下により竹チップの剛性も増加したことが推測できる。このように、竹チップ混合固化処理土は、長期にわたる圧縮強さと引張補強効果の持続性から長期

し耐久性があることが示された。

4. まとめ

本検討では、竹チップ混合固化処理土に対し、強制腐朽試験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 竹チップ混合固化処理土内の竹チップは、4年の長期にわたる培養においても腐朽しないことが確認された。
- 2) 竹チップ混合固化処理土の強度は、竹チップ添加率の増加に伴い、竹チップの持つ引張強度により高い強度を発現し、強制腐朽下の影響を受けないことが明らかとなった。
- 3) 竹チップ混合固化処理土は、培養日数の経過による破壊ひずみに変化はみられなく、さらに含水比低下により竹チップの剛性も増加したことから、竹チップの引張補強効果の持続性が確認された。
- 4) 4年に渡る強制腐朽環境下の実験的な検討から、竹チップ混合固化処理土の長期耐久性が確認された。

参考文献

- 1) 坂本慎也・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣・山岸宏：竹チップの性状が竹土舗装の締固め・強度変形特性に及ぼす影響，平成26年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集
- 2) 西田麻美・佐藤研一・藤川拓朗：チップ・フレーク化した竹廃材の吸水特性に着目した高含水比底泥の改良効果，第10回地盤改良シンポジウム pp. 435-438, 2012.
- 3) 木材保存学入門改訂2版，2005.
- 4) 古賀千佳嗣・佐藤研一・藤川拓朗：軟弱地盤改良における竹の有効利用法の検討，材料，Vol. 65, No. 1, p16-21, 2016.
- 5) 竹の基礎科学と高度利用技術，2008.

研究業績

【論文】 査読あり

古賀千佳嗣・佐藤研一・藤川拓朗：運搬と有効利用を考慮した竹チップを用いた高含水比底泥の改良方法の検討，地盤工学会，第13回環境地盤工学シンポジウム論文集，pp. 395-398, 2019. 9

古賀千佳嗣・佐藤研一・藤川拓朗：竹チップ混合固化処理土の粘土物性と腐朽の影響，日本材料学会，材料，第69巻，第1号，pp. 85-90, 2020. 1

【講演】

古賀千佳嗣・佐藤研一・藤川拓朗：高含水比浚渫土の運搬を考慮した竹チップ改良工法の検討，地盤工学会，第54回地盤工学研究発表会，pp. 465-466, 2019. 7