

中国古来の添加材による遺跡土の改良効果

Remains Soils Improvement Effect with Additive Materials Used in Ancient China

鬼塚 克忠 (おにつか かつただ)

佐賀大学教授 理工学部都市工学科

押領寺 祐也 (おおりょうじ ゆうや)

東亜道路工業㈱
元 佐賀大学大学院 工学系研究科博士前期課程

陸 江 (るー じゃん)

中国・浙江科技学院講師

馬 渡 侑 佑 (まわたり ゆうすけ)

㈱テレウェイヴ
元 佐賀大学 理工学部都市工学科 学生

1. はじめに

中国では、古来より盛土工事¹⁾には、自然材料(砕いた石や磚(せん, レンガの意味), 焼いた土, 砂, 石灰など)や餅米の炊き汁などが補強添加材として用いられた。唐, 宋以降には石灰に桐油(きりあぶら, とうゆ)を加えた混合物が防水性と強度をもつ漆喰やモルタルとして, また宮殿の基礎などの改良材として利用された^{2), 3)}。

盛土遺跡を, 現地あるいは移設先で保存・公開する場合, 遺跡自体の強化ならびに表面部分の風化・劣化に対する処理が必要である。このような場合には, 合成樹脂が主に利用されているが, 樹脂によっては, 時間が経つにつれて, 保存材料自体の劣化や雨水等への溶解が生じることが問題となる⁴⁾。

本研究では合成樹脂の代わりに, 盛土や基礎の構築に用いられた中国古来の添加材を, 盛土遺跡の修復・復元材料として利用する場合の改良効果を調べることを目的とした。中国古来の添加材や現在使用されている合成樹脂を土の改良材として, 粘性土の吉野ヶ里墳丘墓土や砂質土のまさ土に加えて混合し, 力学試験や耐久性試験を行い, 改良効果を検討する。

2. 試験概要

2.1 試験に用いた試料・添加材

試験に用いた試料の物理的性質を表一に示す。まさ土は佐賀県唐津市七山村から採取し, 試料の調整⁵⁾を行ったものを用いた。中国古来の添加材として, 消石灰(以下, 石灰と呼ぶ), 餅米の炊き汁(本試験では, 餅米1の体積に対して, 8の水を加えて炊いたものである。口絵写真一16), 桐油(市販のもの, 口絵写真一17)を用いた。餅米の炊き汁は版築土層の表面に吹き付ける, あるいは土と混ぜるという方法で, 版築工事に使われる。口絵写真一18は, 中国浙江省杭州市に位置する良渚遺跡に属する匯観山祭壇の復元工事の様子である。この時, 石灰, 餅米の炊き汁が添加材として使われ, 復元された祭壇を口絵写真一19に示す。桐油はアブラギリの種子を圧搾してできる乾性油であり, 耐水性, 耐候性に優れ, 中国では, 古くから重要な防水塗料として幅広く利用さ

れている。桐油と石灰の混合物も, 防水・密封材および粘着材として多方面に用いられた。建設工事では磚や石の構築物, 宮殿の基礎や床などにも使われてきた。

比較のため, 合成樹脂は水を含むものを固めるのに適するポリウレタン樹脂(以下, 樹脂と呼ぶ)を用いた。これは, 実際に吉野ヶ里遺跡の復元工事で使われている。

2.2 試験方法

最適含水比に調整した試料に, 表一に示す10種類の水・添加材の混合比になるように水と添加材を加えて混合する。次に試料をモールドを用いて, 最大乾燥密度になるように突固めた。なお, まさ土では餅米の炊き汁の③と(餅米の炊き汁+石灰)の④は作製していない。

試験は, 力学試験として一軸圧縮試験と圧密試験, 耐久性試験として乾燥湿潤と凍結融解の繰返しによる劣化試験を行い, さらに, 供試体を室外に1年間放置した場合の変化を調べる室外試験も行った。なお, まさ土では, 圧密試験と室外試験は行っていない。

圧密試験は, 非水浸, 水浸条件で行い, 水浸条件では供試体を荷重載荷30分前から水浸させた。また, 短時間で圧密が終了するため, 荷重は30分間隔で載荷した。乾燥湿潤の繰返しによる劣化試験は24時間の水浸と24時間の60℃での乾燥を1サイクル, 凍結融解の繰返しによる劣化試験は-10℃での凍結と20℃での融解を1サイクルとし, これらを10サイクル繰り返す。また途中で崩壊したら, 試験終了という形をとった。

室外試験は, これまでの試験でよい改良効果を示している添加材を用いて, 室外放置1ヵ月後, 6ヵ月後, 1年後に供試体表面の観察, 一軸圧縮試験を行った。試験

表一 試料の物理的性質

		吉野ヶ里墳丘墓土	まさ土
土粒子の密度(g/cm ³)		2.62	2.68
液性限界(%)		61.6	NP
塑性限界(%)		37.1	NP
塑性指数		24.5	NP
強熱減量(%)		12.6	2.8
粒度組成(%)	礫	1.0	29.4
	砂	31.0	45.7
	シルト	35.5	19.0
	粘土	32.5	5.7
最大乾燥密度(g/cm ³)		1.27	1.90
最適含水比(%)		37.0	12.5
土質分類		MH	SFG

表一 乾燥土質量に対する混合割合
() はまさ土の場合

	水	石灰	餅米の汁	桐油	樹脂
①添加材なし	37(12.5)				
②石灰	37(12.5)	5			
③餅米			37		
④餅米+石灰		5	37		
⑤桐油	37(12.5)			2	
⑥桐油 2%+石灰	37(12.5)	5		2	
⑦桐油 4%+石灰	37(12.5)	5		4	
⑧樹脂	37(12.5)				2
⑨樹脂 2%+石灰	37(12.5)	5			2
⑩樹脂 4%+石灰	37(12.5)	5			4

表一 供試体の寸法と養生日数
() はまさ土の場合

試験	寸法(cm)	養生日数(日)
一軸圧縮試験	直径 5, 高さ 10	0, 7, 28 (7, 14, 28)
圧密試験	直径 6, 高さ 2	7, 28
乾燥湿潤の繰返しによる劣化試験	直径 5, 高さ 10	28 (28)
乾燥湿潤の繰返しによる劣化試験	直径 5, 高さ 10	28 (28)
室外試験	縦 30, 横 30, 高さ 10 の直方体 直径 20, 高さ 20 の円柱	1 年間室外に放置

別の供試体の寸法と養生日数を表一 3 に示す。

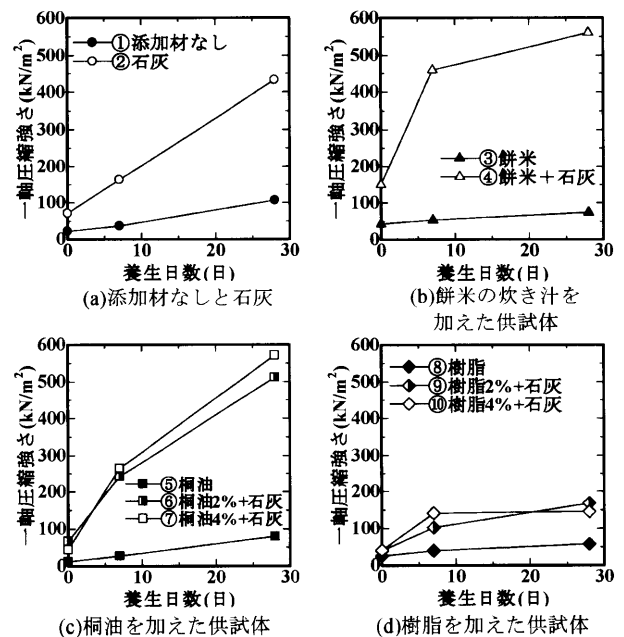
3. 試験結果と考察

3.1 一軸圧縮試験

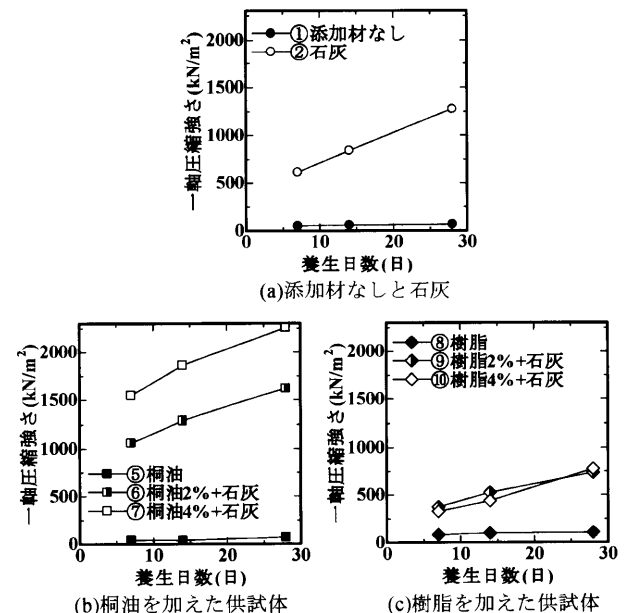
図一 1 に、吉野ヶ里墳丘墓土を用いた場合の一軸圧縮強さを示す。石灰を加えていない供試体 (①, ③, ⑤, ⑧) は、ほとんど一軸圧縮強さが 100 kN/m² 未満で改良効果があるとはいえない。よって、添加材には石灰を用いることが最低限必要であるといえる。(餅米の炊き汁+石灰) の④や(桐油+石灰) の⑥や⑦は、養生した場合は、石灰のみの②より一軸圧縮強さは大きい。

(桐油+石灰) の一軸圧縮強さが大きくなる理由としては、桐油の成分の大部分を占めているエレオステアリン酸が考えられる。エレオステアリン酸の 1 分子中の二重結合の数は 3 個であり、その二重結合が 3 個隣り合って存在する共役二重結合であるため非常に重合しやすく、乾燥性も極めて高い⁶⁾。このような性質を持つ桐油と石灰が化学反応の際に強大な固結力を生み出すため、一軸圧縮強さが大きくなると考えられる。(樹脂+石灰) の⑨と⑩は、一軸圧縮強さが小さく、150 kN/m² 程度しかないため改良効果があるとはいえない。

図一 2 に、まさ土を用いた場合の一軸圧縮強さを示す。添加材別による大小は、吉野ヶ里墳丘墓土を用いた場合とほぼ同様の傾向を示している。石灰を加えていない供試体 (①, ⑤, ⑧) は、ほとんど一軸圧縮強さが 100 kN/m² 未満で改良効果があるとはいえず、まさ土の場合でも、添加材には石灰を用いることが最低限必要であるといえる。(桐油+石灰) の⑥と⑦は、非常に一軸圧縮強さが大きい。(樹脂+石灰) の⑨と⑩の一軸圧縮強さは養生 28 日で 700 kN/m² 以上あり、改良効果は認められる。吉野ヶ里遺跡においては搬入まさ土を天日乾燥させ、4~5%の樹脂を混合して締め固めている。



図一 吉野ヶ里墳丘墓土を用いた場合の一軸圧縮強さ



図二 まさ土を用いた場合の一軸圧縮強さ

一般に、添加材に石灰を用いた場合、試料には吉野ヶ里墳丘墓土より、まさ土を用いた方が一軸圧縮強さが大きい。これは、まさ土の粒度分布や締め固め特性の良さなどが考えられる。

3.2 圧密試験

表一 4 に、各供試体の圧縮指数と圧密降伏応力を示す。圧縮指数は、養生日数や非水浸・水浸条件で明確な違いは現れなかった。添加材別にみると餅米の炊き汁のみの③と(餅米の炊き汁+石灰)の④の圧縮指数は 0.24~0.34 と他の供試体の 0.11~0.17 と比べて高い。よって、餅米の炊き汁を加えた試料は圧縮性が高いといえる。

圧密降伏応力は全体的な傾向として、養生 28 日のほうが養生 7 日より大きい。これは、若干の時間効果によるセメンテーションの発達であると考えられる。非水浸条件の圧密降伏応力は、石灰のみの②や(餅米の炊き

論 文

表一 各供試体の圧縮指数と圧密降伏応力

	非水浸				水浸			
	C _c		P _c (kN/m ²)		C _c		P _c (kN/m ²)	
	7日	28日	7日	28日	7日	28日	7日	28日
①添加材なし	0.16	0.17	110	155	0.17	0.16	190	130
②石灰	0.11	0.13	410	505	0.13	0.13	370	410
③餅米	0.29	0.34	210	200	0.28	0.29	95	175
④餅米+石灰	0.32	0.24	450	450	0.28	0.24	245	200
⑤桐油 2%	0.16	0.15	110	160	0.16	0.15	120	140
⑥桐油 2%+石灰	0.15	0.14	375	435	0.14	0.14	335	340
⑦桐油 4%+石灰	0.14	0.13	435	480	0.14	0.14	400	455
⑧樹脂 2%	0.17	0.16	110	120	0.17	0.15	130	115
⑨樹脂 2%+石灰	0.14	0.14	300	325	0.14	0.14	295	305
⑩樹脂 4%+石灰	0.15	0.14	320	320	0.14	0.14	255	310

汁+石灰)の④, (桐油+石灰)の⑥と⑦が大きい。水浸条件の圧密降伏応力は非水浸条件より小さい。特に④は、非水浸条件と水浸条件で圧密降伏応力の差が大きく、水浸させるとセメンテーションによる固結力が大きく減少することが分かる。②や⑥, ⑦は水浸条件でも圧密降伏応力が大きく、セメンテーションによる固結力の減少は小さい。

3.3 乾燥湿潤の繰返しによる劣化試験

図一3に、吉野ヶ里墳丘墓土の供試体が崩壊せずに試験を行えたサイクル数を示す。この図で棒グラフが10サイクルを示すものは未崩壊である。餅米の炊き汁の③と(餅米の炊き汁+石灰)の④は、いずれも2サイクル目の水浸で崩壊しており、水に非常に弱いことが伺える。桐油のみの⑤や(桐油+石灰)の⑥と⑦は、未崩壊であった。よって、桐油の乾湿条件への耐性は非常に高いといえる。樹脂のみの⑧や(樹脂+石灰)の⑨と⑩は、試験の途中で崩壊しており、乾湿条件への耐性は低い。

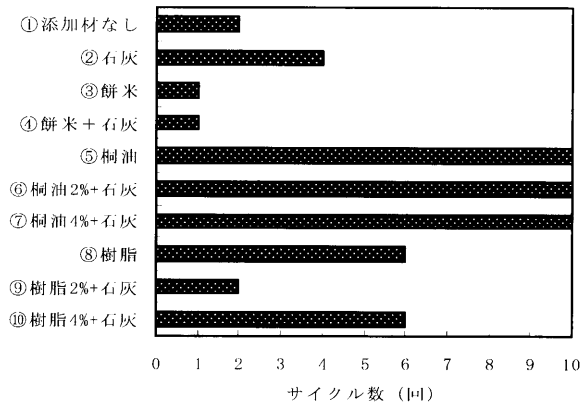
まさ土を用いた場合は、添加材なしの①のみが崩壊した。他の供試体は未崩壊であったため、図一4に示した吸水比によって考察する。なお、吸水比は{(水浸後の質量-乾燥後の質量)÷乾燥後の質量}で求めている。吸水比が低いほど、供試体に水が侵入しにくく、劣化しにくい。まず、樹脂のみの⑧は吸水比が高く、劣化が進んでいるものと思われる。これとは逆に、(桐油+石灰)の⑥や⑦は吸水比が10%未満と低く、劣化はあまり進んでいない。桐油の防水性が効いていると思われる。

3.4 凍結融解の繰返しによる劣化試験

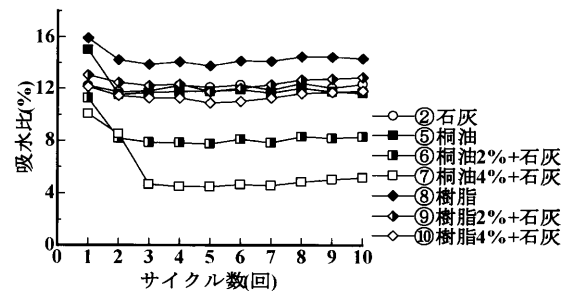
この試験に関しては、吉野ヶ里墳丘墓土、まさ土を用いた場合のどの供試体も未崩壊であった。含水比の変化の図で考察を試みたが、凍結融解による劣化の影響は図中には明確に現れなかった。

3.5 室外試験

これまでの試験でよい改良効果を示している(桐油+石灰)の⑥の混合割合の供試体を作製して行った。供試体表面の変化は、6ヵ月後は表面が白っぽくなり、若干荒れていた。1年後は白っぽくはあったが、6ヵ月後のものよりきれいであった。一軸圧縮強さは1ヵ月後までは急激に大きくなった。その後は1年後まで400 kN/m²前後を維持し続け、劣化は伺えなかった。



図一3 乾燥湿潤の繰返し試験において供試体が崩壊せずに試験を行えたサイクル数
(吉野ヶ里墳丘墓土を用いた場合)



図一4 乾燥湿潤の繰返し試験における吸水比の変化(まさ土を用いた場合)

4. ま と め

試験結果より、桐油と石灰の混合物を土に加えた場合において、最も良い改良効果を示しており、盛土遺跡の修復・復元材料として優れているという結論に至った。現状では盛土遺跡の修復・復元には、合成樹脂が用いられることが多いが、石灰や桐油のような天然の材料の使用も検討すべきである。

謝辞

本研究では、科学研究費補助金、基盤研究 B2「中国古代の版築技術の日本への伝播経路とその変遷」ならびに鹿島学術振興財団平成14年度研究助成金の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 鬼塚克忠・陸 江・唐 曉武・甲斐大祐：中国における古代の版築技術について、土と基礎、Vol. 50, No. 5, pp. 26~29, 2002.
- 2) 帳 馭寰：中国古代建築技術史，中国科学出版社，1985.
- 3) 陸 江：中国の江南土とん墓と日本の吉野ヶ里墳丘墓の地盤工学特性と構築技術に関する研究，佐賀大学博士学位論文，2002.
- 4) 西田一彦・澤田正昭・荒井 仁・中澤重一：古墳の土質工学的調査と保存の事例，土と基礎，Vol. 40, No. 1, pp. 33~40, 1992.
- 5) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版）第8編 特殊土の試験，第4章 まさ土，pp. 762~768, 2000.
- 6) 日本油化学協会：改訂二版 油脂化学便覧，1971.
(原稿受理 2005.3.22)