

泥土稳定剂在熊家冢遗址土化学加固中的应用

陈 华¹ 周丽珍² 吴顺清¹

(1. 荆州文物保护中心, 湖北荆州, 434020; 2. 中国地质大学, 湖北武汉, 430074)

摘要 熊家冢遗址殉葬墓发掘后出现墓坑坑壁龟裂、掉块现象, 威胁遗址原址保护, 建议采用对遗址扰动较小的化学加固法来治理。考虑到遗址区潮湿多雨的气候条件, 通过开展现场试验筛选泥土稳定剂作为遗址土化学加固材料, 采用室内试验对比遗址土加固前后的物理力学性质, 结果表明土体加固后水稳定性较好、透气性好、胀缩性减弱、强度增加。本文最后研究土体的初始含水率对加固效果的影响, 结果表明土体的初始含水率为17.50%时, 泥土稳定剂的渗透深度和渗透量最大。考古发掘现场采用泥土稳定剂加固殉葬墓坑壁作为应急性保护措施, 目前坑壁无明显开裂、灰化现象, 坑体整体稳定性较好。该研究对其他潮湿环境土遗址的保护具有一定的借鉴意义。

关键词 泥土稳定剂 化学加固 土遗址 潮湿环境

引 言

熊家冢遗址位于湖北省荆州市, 遗址由主冢、祔冢、殉葬墓、车马坑、祭祀坑以及地面建筑遗存等六大部分组成, 整个墓地占地面积约为15万m², 是楚国规模最大、布局最完整的高级贵族特大型古墓之一^[1], 其原址保护意义重大。

2005年11月, 国家文物局正式批准对熊家冢墓地车马坑和部分殉葬墓进行抢救性考古发掘, 现场考古发掘^[2]中发现该遗址区殉葬墓坑开挖后墓坑坑壁龟裂、鳞片状剥落、掉块现象, 威胁熊家冢遗址原址保护, 如图1所示。

现场钻探取芯的室内试验结果表明, 遗址区主要地层土具有中等膨胀潜势^[3], 膨胀土因含亲水矿物, 受大气影响反复湿胀干缩裂隙发育, 导致边坡土块崩解; 雨水顺裂隙下渗, 使边坡一定深度土体抗剪强度衰减, 造成边坡溜塌、滑坡。工程上边坡稳定性和围岩体加固措施有机械加固和化学加固, 化学加固对遗址岩土体扰动很小, 并且与遗址景观相容, 被国际普遍认可。

目前在西北干旱地区开展大量的土遗址化学加固研究^[4-7], 并取得成功的实践经验。土遗址的病害与地质环境因素直接相关, 南方潮湿多雨的气候条件下土遗址病害的特点和产生机理不同于干旱的西北地区, 潮湿环境下遗址土化学加固方面的研究工作较少^[8]。下面结合熊家冢土遗址开展试验研究潮湿环境下遗址土化学加固。

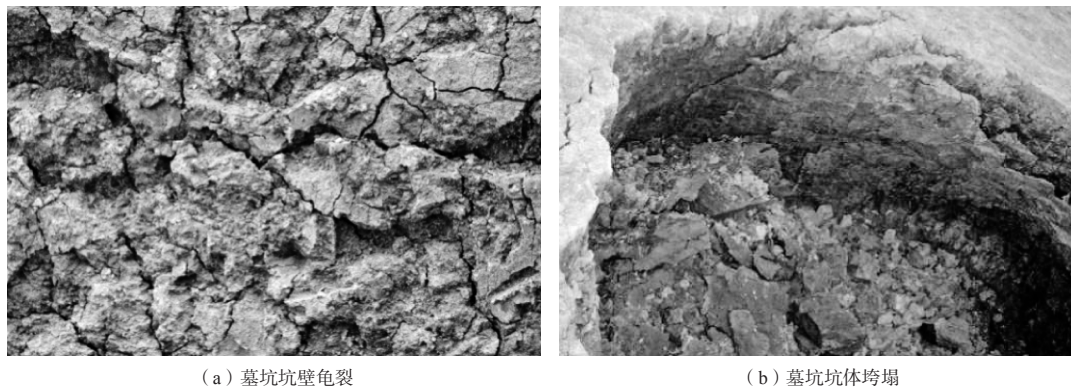


图1 遗址区墓坑稳定性问题

1 化学加固材料优选

熊家冢遗址土化学加固剂的选择首先要考虑潮湿环境的适用性,在此通过开展现场模拟试验来筛选。这里选用四种遗址土化学加固材料:①水玻璃,主要成分为硅酸钠溶液;②溶胶溶液,主要成分为硅溶胶乳液;③硅丙溶液,主要成分为改性有机硅丙烯酸树脂;④泥土稳定剂,主要成分是硅酸钠、高镁矿粉、氯化镁、土壤胶黏材料、表面活性剂等。在熊家冢遗址区不影响主体的部位开挖长、宽、高均为2m的试验坑,分别用相同量的四种化学溶液对坑壁上相同地层的不同区域喷洒加固。经过近半年的动态观察发现:①水玻璃溶液加固面土体严重泛白,三个月后加固土出现蜂窝状孔洞;②溶胶溶液加固面土体颜色基本无变化,但是三个月后加固区域出现大量裂缝,甚至局部脱落;③硅丙溶液加固面土体颜色变白,一个月后局部出现起皮甚至脱落;④泥土稳定剂加固面土体表面渗析少量白色物质,六个月后加固区白色物质基本消失,加固土体颜色无变化。

四种选用的遗址土化学加固材料中,水玻璃、溶胶溶液和硅丙溶液是目前在国内土遗址保护中应用比较成功的保护材料。①水玻璃,易与空气中的二氧化碳以及土壤中的钙、镁等离子反应,从而提高土体强度,起到保护土遗址的作用。在潮湿环境中,渗透深度较低,加固后表面泛白明显,脆性大^[9]。熊兵采用10%水玻璃溶液加固遗址土重塑样,耐水性试验结果是加固样入水就开始大量冒泡掉渣,20min左右就崩解。耐盐腐蚀性试验结果是加固样入水就有大量气泡,30min左右部分坍塌,60min只剩柱心^[10]。②溶胶溶液,其特点是分散性好、稳定性强,基本不影响文物外观,渗透性强,耐老化,老化后的最终产物是二氧化硅,不会损伤文物^[11]。熊兵室内采用10%硅溶胶加固遗址土,耐水性试验结果是加固样入水几分钟就开始坍塌,1h后完全坍塌。耐盐腐蚀性试验结果是加固样入水就有大量气泡,15s开始流失,3min后局部坍塌,45min成散泥^[10]。③硅丙溶液,它兼具有机硅和丙烯酸树脂的优点,渗透性较好,加固材料在土体中固化,形成网络聚合物黏接土颗粒,提高土质的整体强度。而且由于其形成的网络结构,因此不影响土体遗址的透气性^[11]。王赞采用不同浓度硅丙乳液加固榆林明长城原状土样,耐水性试验结果是加固样入水原有裂缝发育,并断裂为两半。在 Na_2SO_4 溶液中进行耐盐腐蚀性试验,加固土样在经历1~3个循环就产生裂隙,并伴有土流失和结壳现象^[12]。熊兵室内采用10%硅丙溶液加固遗址土重塑样,耐水性试验结果是加固样入水5h土样表面出现裂缝,裂缝不断发展,6天后有的脱皮坍塌。

耐盐腐蚀性试验结果是加固样入水后有气泡, 2h后四周起皮, 6个循环后裂缝发育, 7个循环开裂破坏^[10]。周双林等对比研究硅丙溶液和有机硅改性丙烯酸树脂非水分散体加固遗址土, 硅丙溶液加固样耐水性试验结果是入水10min后, 土样中部开始掉土^[13]。文献[10]~[13]分别开展室内试验研究水玻璃、溶胶溶液和硅丙溶液加固遗址土, 加固样的耐水性、耐盐腐蚀性试验现象与在熊家冢遗址土现场加固试验现象具有一定程度的一致性, 表明这三种加固材料不适宜潮湿环境遗址土化学加固。

泥土稳定剂用于现场遗址土加固具有较好效果, 见图2。初期加固土体表面渗析少量的白色物质, 但是随着时间的推移, 该现象消失。推断其原因可能是溶质随溶剂渗入被加固材料, 并随溶剂挥发移向表面, 产生该现象的本质原因将在今后进一步研究。综合现场试验结果和文献, 初步选择泥土稳定剂作为熊家冢遗址土化学加固材料。

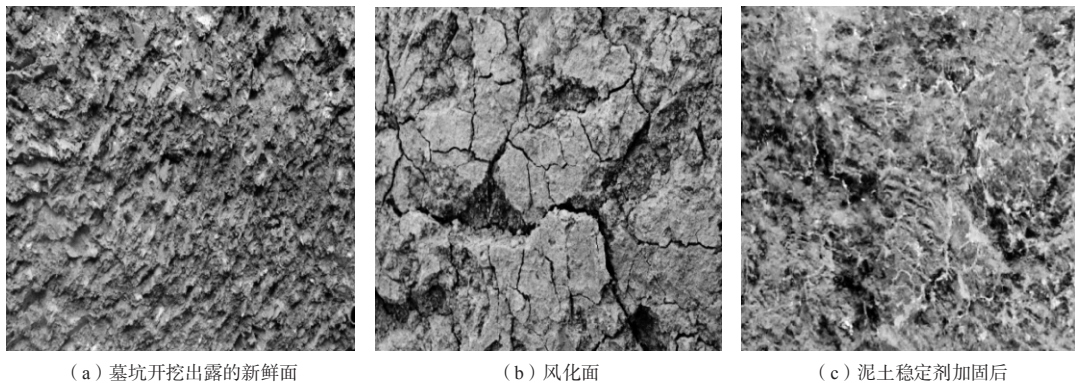


图2 泥土稳定剂加固前后对比图

2 加固效果研究

化学加固是通过化学材料渗透已风化的文物, 提高岩土体的胶结强度, 降低岩土体随温度、湿度变化反复胀缩, 达到土体加固目的。下面开展一系列室内试验研究熊家冢遗址土体的基本物理力学性质评价化学加固效果。

2.1 加固土的密度

本试验采用原状土样, 参照标准《土工试验规程》^[14] (SL237—1999) 切削为标准环刀样, 用电子天平称量土样的质量 m_1 , 将土样浸泡在泥土稳定剂中28天, 然后取出土样轻轻擦拭表面的化学溶液, 再次称量土样加固后的质量 m_2 , 分别将 m_1 、 m_2 除以环刀的体积 v , 得到土样加固前后的密度 ρ_1 、 ρ_2 , 图3是土体加固前后的密度对比。加固后土样的密度略有增加, 其中1号土样密度的增长率最小为1.742%, 4号土样密度的增长率最大为2.5%。土样加固后其密度的增长率较小, 可以忽略加固土密度增加而加大墓坑边坡的下滑力。

2.2 土体的稠度

按照规范要求将天然土样加水调成土膏泥, 过0.5mm的筛, 取筛下土, 采用广东佛山光学研究

所生产的FG-Ⅲ型液限测定仪测定，土样加固前后塑性指数的平均值分别为20.675、12.875，加固后土体的塑性指数降低率为37.73%。土体的塑性指数能够一定程度综合反映影响黏性土特征的重要因素，图4为土样加固前后塑性指数对比图，对比土样的塑性指数发现加固土样的塑性指数都有很大程度的降低，塑性指数越大，土体的颗粒越细，比表面积越大，土体的黏粒或者亲水矿物含量越高，土体处在可塑状态的含水率变化范围越大，塑性指数降低表明土体物理力学性能提高。

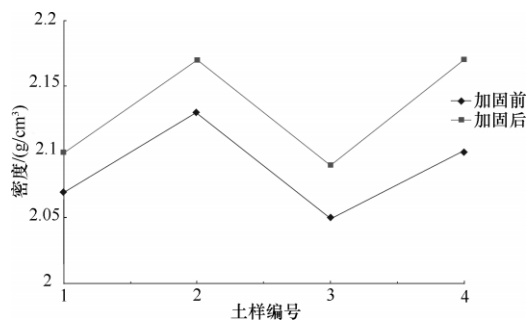


图3 土体加固前后的密度对比图

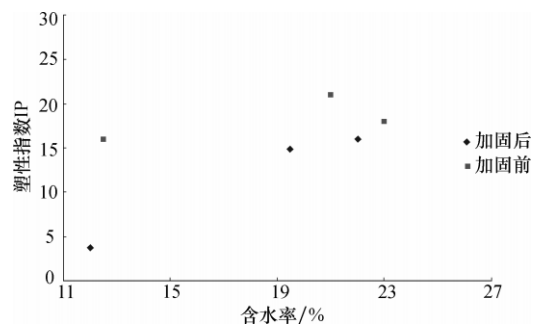


图4 土样加固前后的塑性指数

2.3 土样的胀缩性

为了研究泥土稳定剂对土体胀缩性的削弱作用，这里分两组开展试验，一组采用天然土样测定其自由膨胀率和膨胀力，另一组土样在泥土稳定剂中浸泡28天后，取出擦干表面加固剂，然后保鲜膜密封置于保湿缸中养护30天，最后试验测定其自由膨胀率和膨胀力，试验结果如图5所示。

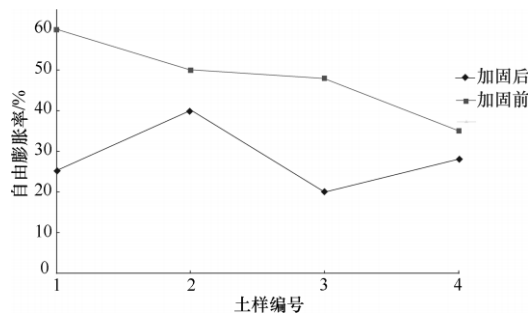
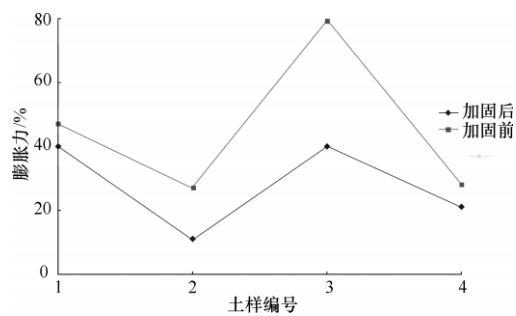


图5 土体加固前后膨胀特性对比图



整体上来看，泥土稳定剂加固后土体的自由膨胀率和膨胀力都一定程度的降低。加固后的土样的自由膨胀率都小于40%，土样的塑性指数基本小于18，根据规范 [15] 可以判定加固后的土体不具膨胀潜势。

2.4 土样的水稳定性

膨胀土因含亲水矿物，遇水软化，水稳定性差，这里采用崩解试验研究泥土稳定剂加固后土体的水稳定性。试验采用一次击实重塑环刀6个，分两组，一组用于直接试验，另一组浸泡加固后开

展试验。将两组土样分别单独浸没在装水的透明烧杯中，记录开始崩解时间，并观察每一个土样的崩解过程。抗崩解试验结果如表1所示。

抗崩解试验的结果表明，未经加固的试样的耐水性能很差，遇水浸泡后，在0.5h内能完全崩解，但是试样经过泥土稳定剂加固之后，试样的耐水性能都非常高，在水中浸泡一个月之后，试样仍然保持完好，并且具有很好的强度，说明泥土稳定剂可以大大提高遗址土体的耐水性能。

表1 土样抗崩解试验结果

试样编号	类型	浸入水中崩解情况	水稳定性
2-5-1	未加固样	7min后开始脱落，18min后脱落一半，25min后完全崩解	差
2-5-2	未加固样	2min后开始脱落，3min后出现崩解，13min后崩解一半，25min后完全崩解	差
2-5-3	未加固样	2min后出现脱落，4min后出现崩解，11min后崩解一半，23min后完全崩解	差
2-5-4	加固样	无明显变化，1个月后仍完好，强度无明显变化	好
2-5-5	加固样	无明显变化，1个月后仍完好，强度无明显变化	好
2-5-6	加固样	无明显变化，1个月后仍完好，强度无明显变化	好

2.5 土样的透水性

为了测定化学剂加固后土体的渗透性的变化，开展室内变水头渗透试验测量土体的饱和渗透系数，试验采用原状土样分两组进行，一组直接开展试验，另一组采用泥土稳定剂浸泡加固后再开展试验，对泥土稳定剂加固后的土体试验结果如表2所示。

表2 土样加固前后的饱和渗透系数

土层	渗透系数/(cm/s)	平均值/(cm/s)
加固前	$4.95 \times 10^{-6} \sim 9.22 \times 10^{-5}$	2.25×10^{-5} (6)
加固后	$5.53 \times 10^{-5} \sim 3.82 \times 10^{-7}$	9.87×10^{-6} (4)

注：()内为试验的组数。

整体上来看，采用化学加固后土体渗透性都一定程度地减小，加固后土样的渗透系数比加固前减小了56.13%，表明化学加固试验小幅降低了土体的透气性和透水性，保证了水汽在遗址土中的运移能力，避免墓坑边坡表层加固土体在表里水力差的作用下起皮脱落，这对于潮湿环境下的土遗址保护具有积极作用。

2.6 土样的耐候性

这里采用环刀样研究遗址土加固前后的抗干湿循环能力，试验方法是采用较低温度60℃烘干6h模拟干燥过程，按规范要求采用抽气饱和和模拟吸湿过程。由湿到干为一个循环，一共开展了5次干湿循环，试验结果如表3所示。

表3 土样干湿循环试验结果

试样编号	类型	第一次循环	第二次循环	第三次循环	第四次循环	第五次循环
2-7-1	未加固样	出现龟裂纹	出现裂缝	裂缝扩大数量增多	试样破碎	—
2-7-2	未加固样	出现龟裂纹	出现裂缝	裂缝扩大贯通	试样破裂	—

续表

试样编号	类型	第一次循环	第二次循环	第三次循环	第四次循环	第五次循环
2-7-3	未加固样	出现龟裂纹	出现裂缝	裂缝扩大 数量增多	试样破裂	—
2-7-4	加固样	完好	完好	完好	完好	完好
2-7-5	加固样	完好	完好	完好	完好	完好
2-7-6	加固样	完好	完好	完好	完好	完好

从试样的耐候性试验结果可以看出，加固前土样的耐候性能很差，经过一次干湿循环后土样就会出现裂缝，但是加固样的耐候性能都得到了明显的改善，经过5个循环之后，试样仍然保持完好。

2.7 土体的压缩性

土体的压缩模量是衡量土体抵抗变形能力的指标值，土体压缩模量越大，其力学性能越强。试验采用原状环刀样，一组直接开展压缩试验，另一组采用泥土稳定剂浸泡加固后开展试验，试验结果见图6，可以发现土样加固后压缩模量都得到了提高，土样压缩模量平均值由加固前的10.00kPa增加到加固后的24.398kPa，增长率为143.98%，加固后土体压缩模量增大，其力学性能增强。

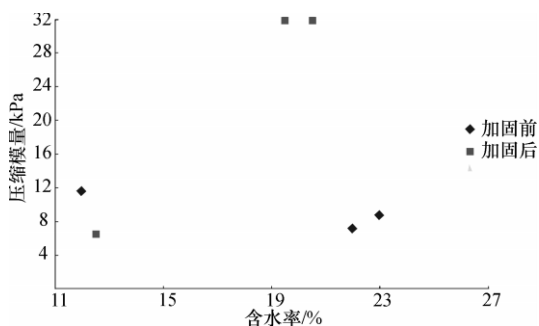


图6 加固前后土样的压缩模量

2.8 土体的强度

这里采用两组土样进行直剪试验，一组直接开展试验，另一组采用浸泡加固后按要求养护后再开展试验，图7试验结果表明化学加固后土样的黏聚力和内摩擦角都有很大程度的增加，具体表现为黏聚力从加固前的平均值28.83kPa升高到加固后的99.33kPa，增加了2.45倍；内摩擦角由加固前的平均值11.33°增加到加固后的33.5°，增加了近2倍，加固土体的强度也得到了一定程度的提高。

土样在泥土稳定剂中浸泡加固后，其无侧限抗压强度也得到了一定程度的提高（图8），具体体现是土样由加固前的平均无侧限抗压强度值0.379MPa增加到0.511MPa，增加率为34.83%。

3 土体的初始含水率对加固剂渗透深度的影响

从前面的试验结果可以看出，遗址土化学加固后其物理力学性质得到了提高，但是化学加固要保证化学溶液在土中的渗透深度。土体的初始含水率直接影响化学加固剂渗透深度，含水率太低，土体会开裂，含水率太高不利于化学溶液向土中渗透。下面采用重塑土样研究土体的初始含水率对加固剂渗透深度的影响，重塑样按照规范 [14] 要求配制一定含水率的土样，然后采用模具一次击实成型，用于开展室内试验，试验结果为遗址土化学加固现场实施提供试验依据。

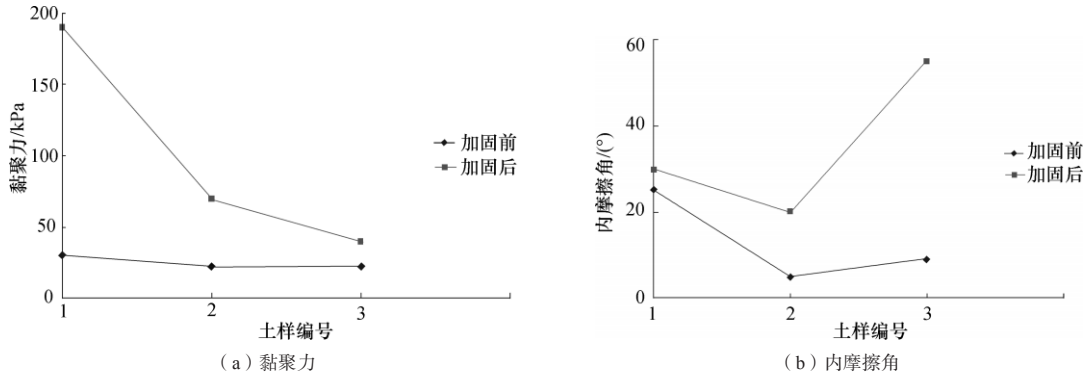


图7 土样加固前后强度变化对比图

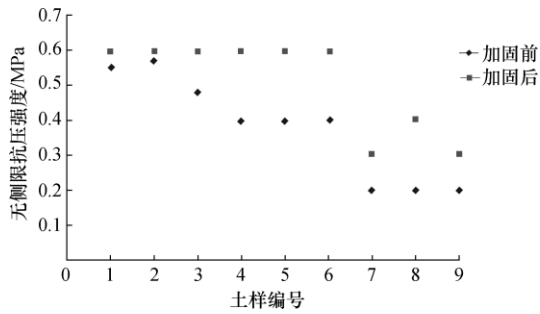


图8 加固前后土样的无侧限抗压强度

3.1 加固剂的渗透深度

文献 [16] 以遗址土的天然含水率的最小值、土体的进气值对应的含水率、塑限配制三个含水率的重塑土样, 土样是长、宽、高均为5cm 的立方体。将立方体重塑样浸泡在泥土稳定剂要求: 泥土稳定剂的液面浸没土样高度的2/3, 浸泡时间28天。加固完成后, 将土样取出室内风干, 对比观察加固剂浸泡的表面和未被加固剂浸泡的表面, 可以发现加固面土体的颜色略深。风

干过程中未加固部分因失水收缩, 加固部分几乎没有变化, 导致加固部分和未加固部分之间由于变形差异而产生裂缝, 另外含水率20.50%的土样未加固部分风干后表面有裂缝发育, 如图9所示。

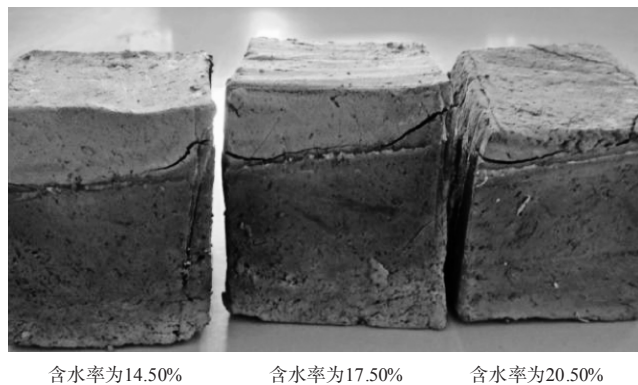


图9 不同初始含水率的加固土样

用钢锯锯开土样的加固部分, 观察加固剂的渗透深度。试验结果为: ①初始含水率14.50% 的土样, 五个面的渗透深度分别为4.0mm、6.0mm、5.0mm、4.0mm、5.0mm, 平均渗透深度为4.8mm; ②含水率17.50%的土样, 五个面的渗透深度分别为5.0mm、5.4mm、6.0mm、5.2mm、5.5mm, 平均渗透深度为5.4mm; ③含水率20.45%的土样, 五个面的渗透深度分别为

5.0mm、5.0mm、5.0mm、4.7mm、4.5mm，平均渗透深度为4.9mm。土样初始含水率为17.50%，泥土稳定剂在土体中的渗透深度最大。

3.2 初始含水率对加固剂渗透量的影响

试验前称量土样的质量，然后将土样浸泡在泥土稳定剂中28天，取出擦干表面的加固剂，放在电子天平上再次称其质量，土样浸泡后与浸泡前的质量差为加固剂在土样中的渗入量。图10为加固剂在不同含水率土样中的渗入量，整体而言加固剂的渗入量随土体含水率的增加而先增加再减少，土样含水率在17.50%左右加固剂渗入量最大平均值为34.12g，以此含水率为基准，含水率增加或减小同样的幅度，对应加固剂的渗入量都会减少。所以土体的初始含水率为17.50%加固剂在土体中渗透量最大。

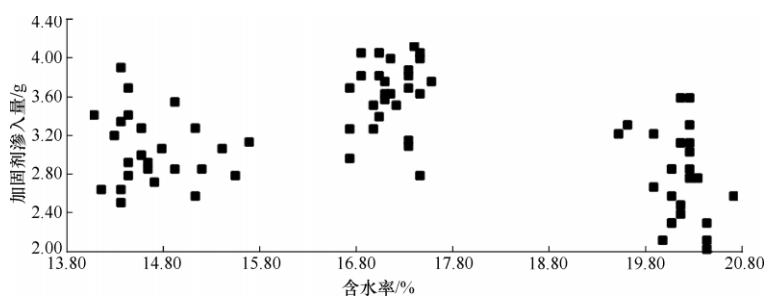


图10 加固剂的渗入量与含水率的关系

4 结 论

遗址土经过泥土稳定剂加固后颜色变化小、水稳定性好、耐候性好、透气透水性好、强度提高，胀缩性降低。在遗址殉葬墓发掘过程中使用泥土稳定剂，采用了喷洒、滴渗和高压灌注相结合的方式对遗址土进行加固。现场应急性保护工作完成后经过八年的考验，殉葬墓坑壁土体化学加固后，坑壁无明显开裂、灰化现象，坑体整体稳定性较好，如图11所示。研究结果表明泥土稳定剂对熊家冢遗址土具有较好的加固效果，该研究对其他潮湿环境土遗址的保护具有一定的借鉴意义。



(a) 化学加固前(墓坑边坡临时支护)

(b) 泥土稳定剂加固后

图11 殉葬墓坑壁化学加固前后

参 考 文 献

- [1] 荆州博物馆. 湖北荆州熊家冢墓地2006—2007年发掘简报 [J]. 文物, 2009, (4): 4-25.
- [2] 陈光利, 魏彦飞, 袁万红. 熊家冢土遗址保护概述 [J]. 东南文化, 2009, (3): 114-118.
- [3] 湖北省水文地质工程地质勘察院. 熊家冢墓地工程地质勘察报告 [R]. 荆州: 湖北省水文地质工程地质勘察院, 2009.
- [4] 赵海英, 李最雄. PS材料加固土遗址风蚀试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (2): 392-396.
- [5] 李最雄, 王旭东, 张志军. 秦俑坑土遗址的加固试验 [J]. 敦煌研究, 1998, (4): 151-158.
- [6] 李最雄, 王旭东, 田琳. 交河古城土建筑遗址的加固试验 [J]. 敦煌研究, 1997, (3): 171-188.
- [7] 邵明申. PS加固对非饱和遗址土的渗透特性影响研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [8] 周环. 潮湿环境土遗址的加固保护研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [9] 陈利君. 硅溶胶-硅丙复合土遗址加固剂的合成与应用 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [10] 熊兵. 土遗址加固与保护 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [11] 李小洁. 新型土遗址保护材料的制备、表征和应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [12] 王赟. 土遗址加固材料比选及试验研究 [J]. 陕西理工学院学报 (自然科学版), 2010, 26 (2): 36-39.
- [13] 周双林, 原思训, 杨宪伟, 等. 丙烯酸非水分散体等几种土遗址防风化加固剂的效果比较 [J]. 文物保护与考古科学, 2003, 15 (2): 40-48.
- [14] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范 [S], 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [16] 袁万红. 膨胀土地区土遗址加固保护试验研究——以熊家冢墓地土遗址为例 [D]. 荆州: 长江大学, 2011.