

焦山古炮台夯土成分分析及建造工艺研究

袁 润¹, 宋向荣^{2,3}, 李建康², 丁 超⁴

- (1. 江苏大学科技信息研究所, 江苏镇江 212013;
2. 江苏大学理学院, 江苏镇江 212013;
3. 江苏科技大学船海学院, 江苏镇江 212003;
4. 镇江焦山碑刻博物馆, 江苏镇江 212000)

摘要: 夯土建筑是中国古代建筑的典型代表, 现今许多古代建筑的夯土成分、配比及制作工艺已基本失传, 夯土的力学性能取决于夯土成分、夯筑方法等, 是夯土的重要性能。研究古代建筑夯土成分及性能对于我国古代夯土建筑保护和古代夯土技艺研究具有重要意义。为此, 本工作以焦山古炮台夯土为研究对象, 使用传统配制和夯筑工艺, 在水分控制、糯米汁制作等方面取得一些经验, 通过力学性能对比分析、成分分析、X 射线衍射分析等, 认为 4:3:3 仿制夯土的各项指标与焦山炮台古代夯土最为接近, 可看作古代夯土近似配比。在此配比下模拟传统夯筑工艺, 应用于焦山古炮台修复工程取得了较好的效果。

关键词: 夯土建筑; 古炮台; 夯土成分

中图分类号: K85 **文献标识码:** A

0 引言

中华民族几千年灿烂文化给我们留下了大量历史文化遗产, 其中长城、古城墙、古炮台等夯土古建筑作为历史文化的载体, 是历史、文化艺术和科学史研究的极为重要的实物资料。经历上百年的风雨侵蚀及战争等人为因素的影响, 我国古代夯土建筑状况普遍较差, 不少已风化、剥落、开裂, 如果不及时抢救, 将可能永远消失。近年来, 国家在文物保护方面非常重视, 在夯土建筑加固保护方面, 取得了一些经验, 但由于夯土建筑的特殊性, 关键是夯土的成分及工艺的失传, 并且各地的夯土古建筑的成分、建造方法、所处的环境不同, 在修旧如旧的过程中, 尚没有一种方法和材料能令人完全满意。因此研究古代夯土的成分、工艺及性能, 对于古代夯土建筑的维护和修复具有十分重要的意义。本工作以焦山古炮台为例, 通过 X 射线衍射分析研究古代夯土成分, 采用传统工艺仿制焦山炮台古代夯土, 抗压力学性能对比分析研究夯土成分及制作工艺, 取得了较好的效果。

焦山古炮台建于清道光二十年(1840年), 炮台

以方石为基, 整体用三合土分层夯筑成形, 表面涂有黑色保护剂, 八个炮堡呈马蹄形排列, 炮口向东南面对大江, 与字山、象山等处炮台呈犄角之势, 扼守长江咽喉地带。经战争洗礼及百年风雨侵蚀, 已出现开裂、坍塌, 并且一些大树的根系等植被伸入墙体, 对土建筑遗址造成了破坏, 急需处治。2005 年底镇江文物部门启动焦山古炮台局部维修工程, 2006 年江苏省科技厅资助研究古炮台修复的若干关键技术, 为焦山炮台修复提供技术支持, 本文介绍此项目的部分研究成果。

1 古代传统夯筑工艺及仿制技术

古代夯土建筑分为湿夯、干夯、特殊配方湿夯三种^[1]。湿夯以砂为主, 石灰、土为辅, 干夯则以土为主, 砂和石灰为辅。经过这三种材料配制、夯实而成建筑材料, 就是常说的三合土。不同的地区有不同的三合土, 土是其中的主要成分。我国古代很早就积累了有关土的性质描述^[2], 《管子·度地》中记载, 秋季土壤含水量较大, “土弱难成”, 冬季冻土含水量不均匀, “土刚不立”, 而春天则“天地干燥”, “土乃益刚”。由于单独一种土往往

收稿日期:2009-02-16; 修回日期:2009-07-01

基金项目:江苏省社会发展计划资助(BS2006042)

作者简介:袁 润(1965—), 男, 1987 年毕业于江苏工学院电气技术专业, 主要从事机电控制工程、情报学研究, 副教授, E-mail: yrun@ujss.edu.cn

有某种缺陷,实践中常以两种或三种土掺合,最常用的是石灰和砂。南北朝时期即出现由石灰、粘土和细砂所组成的三合土。石灰则起到胶结作用,这是由于石灰(氧化钙)接触空气后,吸收二氧化碳而凝固为碳酸钙,从而增强灰浆凝结后的力学强度。砂是骨料,有砂的支撑,灰浆易于接触空气而迅速凝聚,同时也可减轻灰浆凝聚及体积收缩时出现裂缝。

特殊配方三合土^[1]加入了红糖、蛋清、糯米等有机原料,强度更好。其中,使用糯米最为常见,糯米主要成分支链淀粉的空间形态交错有序,形成彼此吸引力大的立体网络,比直链淀粉更粘,古代文献中多有使用记载。明代末年《天工开物》中介绍^[3]:“灰一分,入河沙、黄土二分,用糯粳米、羊桃、藤汁和匀,轻筑坚固,永不隳坏,名曰三合土。”客家土楼正是因为其特殊配方,历经数百年风雨、战火和地震,至今固若金汤。

以上分析表明,古代三合土的主要成分是土、石灰和砂,夯土的性能就体现在成分配比和制作工艺上,其中成分配比是关键。但因地区、技术要求不同,古代三合土并没有统一配比。我国存有部分文献记载有成分配比,但这些配比限于特殊历史年代和地区,许多夯土的成分配比及制作工艺已失传。古代土建筑维护和修复过程中常寻找一些替代材料,这样违背了修旧如旧原则。

试验土样取自焦山附近地下3m左右,先敲打碾细,铺成15~25cm厚的一层,浇水湿润,放置2~4天,这样土质松软和易性好。将糯米磨成粉,以冷水和匀,然后加入大量热水,使糯米汤变得很稀。在土样中加入细砂,石灰,糯米汁,少量水,人工搅拌均匀。制作过程中注意土的性质和水的含量。粘土成分越高,颗粒越细,则内聚力越高,粘性越好,但会影响土的抗压强度。砂的含量较高能提高土的强度,但容易产生裂缝。因此土、砂、石灰的配比取决于土的含砂量。在水分一定的情况下,可用下面方法简单测试三合土的强度^[4]。三合土能搓成直径约3cm的细带,则说明水分适中。然后碾成宽20mm,厚6mm的长条,沿光滑的桌边慢慢滑下,如果仅能伸出几cm,则说明砂含量太多,粘性不够。若能伸出20cm而不断,则说明砂的含量太少,会影响强度。如果混合三合土时水分多了则夯不实,易渗水,且风干过程中会起收缩裂缝。水分少了,则和易性差,粘性差。最优含水率应使其具有最大干密度,可以通过实验方法获得。传统作业中往往凭泥水匠师傅的经验,三合土捏紧能成团、抛下即散开就认为水分合

适。室外简单实验如下,湿润的三合土能捏成直径约4cm的圆球,则说明水分适中。将其从距离地面1.5m高处抛落,若裂纹较少甚至没有裂纹,说明含砂量较少,强度不够;若完全散开,说明砂含量太多,粘性不够;若能成团不完全散开则说明成分合适。

关于夯筑技术,宋代《营造法式》较详细地描述了夯筑方法^[2]，“筑基之制,每方一尺,用土二担,隔层用碎砖瓦及石扎等亦二担,每次布土厚五寸,先打六杵(二人相对,每窝子内各打三杵),次打四杵(二人相对,每窝子内各打二杵),次打两杵(二人相对,每窝子内各打一杵)。”清朝《工程作法》则记有大夯灰土筑法、小夯灰土筑法两种夯土方法,操作程序基本相同,主要有拍底,泼灰,过筛,耨平,冲海窝,筑银锭,充钩等。本工作采用传统方法配置夯筑,支起50厘米见方的模板,加15厘米厚的虚土,手持重约10公斤的夯杵,击实至约9厘米厚。再加一层,重复夯实。实验室养护60天后,切削成10厘米见方的方形试件。

为了使土样具有更好的代表性,课题组在焦山炮台附近某建筑工地取土,所取粘土属粉质粘土,呈灰黄色,主要物理性能指标见表1。配比夯实后与焦山炮台古代夯土进行化学成分分析对比,各土样主要化学元素百分比见图1。各土样X射线衍射分析结果见图2。

表1 实验用土物理性能指标

Table 1 Physical property of specimen earth

含水量 /%	孔隙比	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩模量 /Mpa	干密度 /g·cm ⁻³
25.1	0.723	38	12.4	7.5	1.65

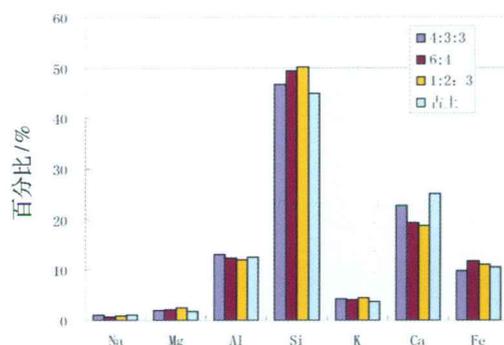


图1 各土样主要元素百分比

Fig. 1 Proportion of major element

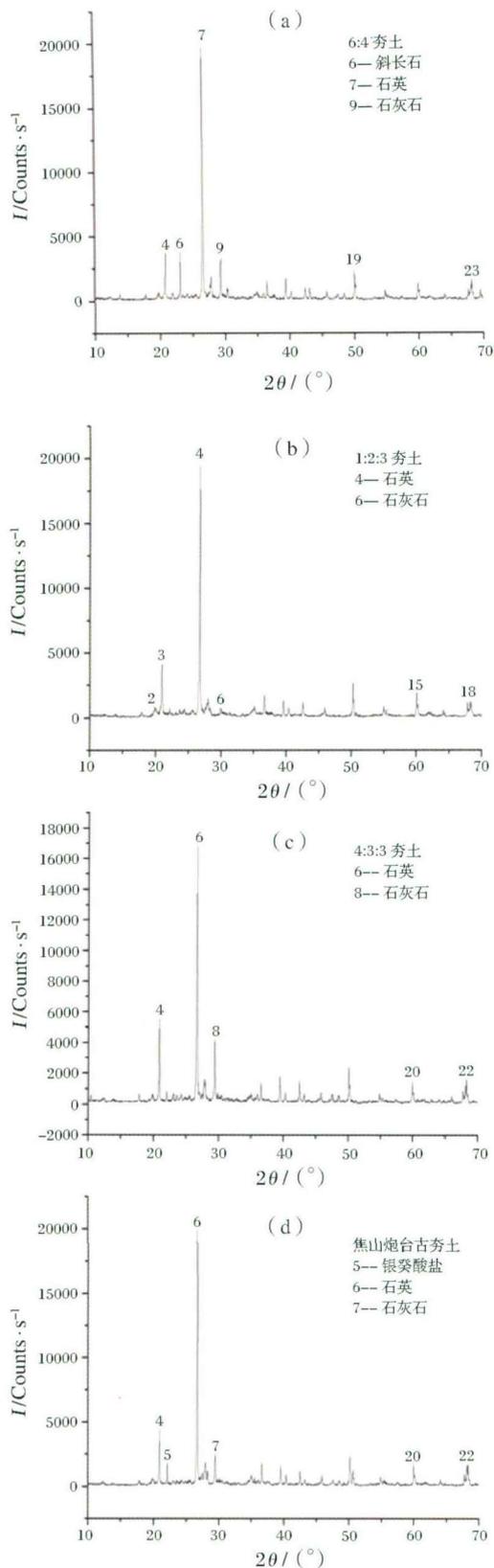


图 2 各土样 X 射线衍射分析图

Fig. 2 X radial diffraction analysis of specimen

2 焦山炮台夯土力学性能及成分分析

力学性能是夯土材料的重要性能,是古代夯土炮台建造的必要条件。不同的材料具有不同的力学

性能,夯土材料的破坏^[5]是内部孔隙及缺陷面随荷载增大不断发展,直至开裂的连续过程。地域不同赋予了土质的差异,化学成分、矿物组成、颗粒分布等都会影响土的抗压强度,因此从力学性能研究古代夯土特性,判断夯土的近似组成成分是一种实用方法。

古炮台夯土抗压试验土样取自顶部坍塌部分,养护箱中养护 28 天后,切削成 10 见方的方形试件,进行压缩破坏试验。试验机为长春试验机研究所 CSS-44050 型电子拉压试验机,最大载荷 50kN,试验采用位移控制方式,加载速度 0.1mm/min。

焦山炮台古夯土外观细腻,色泽均匀。夯土块表面平整,当应力达 2.5MPa 左右时产生初始裂纹,仍能继续承载,载荷变化规律没有改变。裂纹方向主要为竖向,随着载荷不断增加,裂纹不断扩展,土样表面有少量碎屑落下,载荷达到极值后随变形增加而下降,载荷降至峰值的 60% 时结束试验。卸载后土样仍能保持完整的形状。掰开断裂后的土样,剖面呈竖状,与表面裂纹方向一致。断开的夯土仍呈块状,碎土较少,说明焦山炮台古夯土稳定性较好。裂纹扩展过程见图 3。

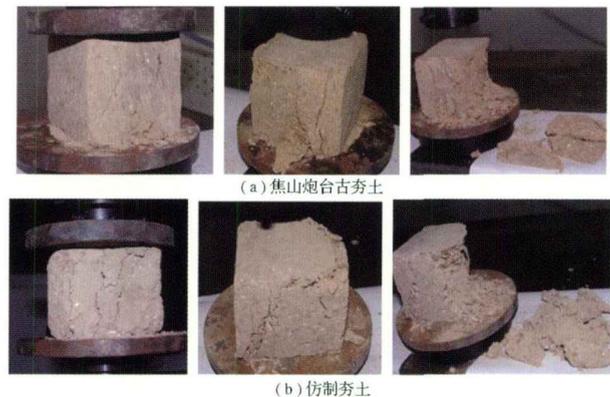


图 3 土样压缩试验

Fig. 3 Compressive test process

仿制夯土对比压缩实验结果表明,仿制土有明显斑纹,一般在 2MPa 以下即出现初始裂纹,并伴随载荷减小现象,仿佛发生屈服,随后能恢复承载能力。仿制土表面松动,掉下土屑较多。裂纹同样呈竖向分布(图 3),竖向裂纹不断扩展,表面有碎屑落下,部分试样有局部坍塌。卸载后也能保持完整的形状,掰开土样,断面呈垂直方向,但碎土较多,说明仿制土稳定性不如古土。

实验测得各土样应力-应变曲线见图 4。由图可知,焦山炮台古代夯土初始压实阶段曲线呈非线性,时间较短,随后有较明显的线性阶段,若取峰值

应力的 50% 所对应的割线模量作为古夯土的弹性模量, $E = 209\text{MPa}$ 。仿制夯土线弹性不够理想。

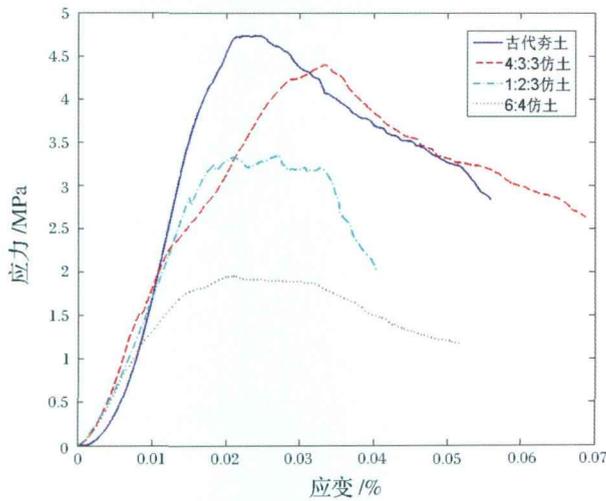


图 4 各土样应力-应变曲线

Fig. 4 Stress - strain curve

各土样主要力学性能指标对比见表 2。试验表明,焦山炮台古夯土具有很好的塑性,并有很强的带裂纹工作能力。初始裂纹出现时,应力-应变曲线没有任何变化,土样仍处于弹性阶段。该阶段卸载试验也表明,微小初始裂纹几乎不影响古夯土的工作能力。仿制夯土有类似屈服现象,也具有很好的塑性和带裂纹工作能力。

表 2 各土样主要力学性能指标

Table 2 Mechanical performance of specimen

土:石灰:沙之比	峰值应力 /MPa	峰值应变 /%	应变极限 /%	弹性模量 /MPa
焦山炮台古土	4.735	2.38	5.58	209.3
6:4	1.948	2.12	5.19	136.4
4:3:3	4.396	3.37	6.85	185.7
1:2:3	3.341	2.69	4.03	172.4

从力学性能看,4:3:3仿制夯土的各项指标与焦山炮台古夯土最为接近,但有类似屈服现象及线性阶段不够明显,物理特性上表现有颗粒状等。分析原因可能有夯土成分搅拌不均匀,黄土碾得不够细,粘性不够,另外糯米汁工艺也有欠缺。从图 4 看,曲线大致规律相似,若 4:3:3 仿土的线性阶段能更直点,则更能够符合焦山炮台夯土力学性能特征。通过强度、弹性等力学性能对比分析,结合土样物理性能分析,成分分析,X 射线衍射分析,项目组认为焦山炮台古代夯土的近似配比为土、石灰、砂配比 4:3:3。

3 结 论

采用传统方法试制夯土,研究夯筑工艺,取得一

定的实践经验。实验方法获得焦山炮台古代夯土力学性能,为炮台修复及类似夯土结构性能研究提供借鉴。

实验表明,力学性能是夯土的重要性能之一,通过力学性能对比分析可辨别夯土的相似性。本实验方法获得焦山炮台夯土的近似配比为土、石灰、砂配比 4:3:3,该配比下模拟传统工艺方法制作的夯土与炮台古夯土强度及弹性相当,应用于焦山炮台维修工程取得了较好的效果。

研究古代夯土建筑的夯土成分及建造工艺具有重要意义,本工作对焦山古炮台的研究取得了一些成果,今后尚需对夯土的材质构成、工艺等进行广泛全面的调查,如三合土配比、糯米汁的制作、夯筑方法等,北方和南方有很大差异,在此基础上,真正总结出我国夯土建筑中科学合理的传统工艺、材料,为保护文化遗产提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 谢华章. 福建土楼夯土版筑的建造技艺[J]. 住宅科技, 2004, 7: 39 - 42.
XIE Hua - zhang. Construction technique of rammed - earth construction of Fujian earth building [J]. Hous Sci, 2004, 7: 39 - 42.
- [2] 李 焯. 中国传统建筑形制与工艺[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006: 223 - 224.
LI Zhen. Traditional Chinese architecture shapes and technology [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006: 223 - 223.
- [3] 黎 明. 中国古代的粘接密封技术[J]. 粘接, 2002, 6: 57.
LI Ming. Ancient China adhesive and hermetical technology [J]. Adhesive, 2002, 6: 57.
- [4] Gernot Minke. Building with earth [M]. Birkhäuser Publishers for Architecture, 2006: 19 - 35.
- [5] 尚建丽. 传统夯土民居生态建筑材料体系的优化研究[D]. 西安建筑科技大学博士学位论文, 2005: 7, 30.
SHANG Jian - li. A study of optimization of the ecological building material system of traditional rammed earth dwellings [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2005: 7, 30.
- [6] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 甘肃境内长城遗址主要病害及保护研究[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(1): 28 - 32.
ZHAO Hai - ying, LI Zui - xiong, HAN Wen - feng, et al. Study on the main disease of the Great Wall and its conservation in Gansu province [J]. Sci Conserv Archaeol, 2007, 19(1): 28 - 32.
- [7] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 木质锚杆加固生土遗址研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 12: 2156 - 2159.
SUN Man - li, WANG Xu - dong, LI Zui - xiong, et al. Study of immature earthen sites reinforced with wood anchor [J]. Chin J Geotech Eng, 2006, 12: 2156 - 2159.
- [8] 李乃胜, 张治国, 王德发. 天津大沽炮台海字炮台和威字炮台“三合土”研究[J]. 文物保护与考古科学, 2008, 20(2): 46 - 51.
LI Nai - sheng, ZHANG Zhi - guo, WANG De - fa. Primary study on the “Sanhe Tu” from the Haizi and Weizi emplacements in Tianjing

- Dagu site [J], *Sci Conserv Archaeol*, 2008, **20**(2): 46 - 51.
- [9] Venkatarama Reddy B V, Gupta A. Characteristics of soil - cement blocks using highly sandy soils [J]. *Mat Struct*, 2005, **6**: 651 - 658.
- [10] Jayasinghe C, Kamaladasa N. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls [J]. *Construct Buil Mat*, 2007, **21**: 1971 - 1976.
- [11] Jose R. Arango Gonzadlez. Uniaxial deformation - stress behavior of the rammed - earth of the Alcazaba Cadima [J]. *Mar Struct*, 1999, **2**: 70 - 74.
- [12] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展 [J]. *文物保护与考古科学*, 2007, **19**(4): 64 - 70.
SUN Man - li. Research status and development of the conservation of earthen sites [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2007, **19**(4): 64 - 70.
- [13] 刘佑荣, 陈中行, 周丽珍. 大型平原土体遗址主要地质病害及其保护治水工程技术研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2007, **19**(3): 11 - 15.
- LIU You - rong, CHEN Zhong - xing, ZHOU Li - zhen. Research on the main geologic diseases and the water - control technology for conservation of the sites made of soil body on the large - scale plain [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2007, **19**(3): 8: 11 - 15.
- [14] 郭祥, 程建军. 整体性·真实性·实益性——广东虎门炮台保护规划应遵循的三个原则 [J]. *南方建筑*, 2001, (2): 47 - 51.
GUO Xiang, CHENG Jian - jun. Holistic facticity beneficiality—the three principles should be guided in planning Guangdong Humen Barbette protection [J]. *South Architect*, 2001, (2): 47 - 51.
- [15] 张洪亮, 胡长顺, 刘保健, 等. 压实石灰黄土力学特性试验 [J]. *交通运输工程学报*, 2003, **3**: 13 - 16.
ZHANG Hong - liang, HU Chang - shun, LIU Bao - jian, *et al.* Mechanical properties experiment of compacted loess - lime [J]. *J Traffic Transport Eng*, 2003, **3**: 13 - 16.

Research on rammed earth composition and building craftsmanship in ancient emplacement at Jiaoshan

YUAN Run¹, SONG Xiang - rong^{2,3}, LI Jian - kang², DING Chao⁴

(1. *Institute of Information Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;*

2. *Faculty of Science, Jiangsu University, Jiangsu 212013, China;*

3. *School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;*

4. *Zhenjiang Jiaoshan Museum of Inscribed Steles, Zhenjiang 212003, China)*

Abstract: Rammed earth construction is typical representative of Chinese ancient structures. Nowadays, the composition, mixture ratios and the craftsmanship used in rammed earth construction have almost been lost. The mechanical performance of rammed earth depends on its composition and ramming techniques, which are of great importance. The study on the components and performances of the old structures is very important for the protection of ancient rammed earth structures and for research on the craftsmanship of rammed earth structures. Therefore, the composition and craftsmanship used in the ancient rammed earth emplacement at Jiaoshan were studied, including water control, sticky soup preparation and so on. Comparative analyses of mechanical properties, composition, and X - ray diffraction results, indicated that the ratio of earth to lime to pinyin, which is 4:3:3, best approximates the composition of rammed earth used at Jiaoshan ancient emplacement. With this mixture ratio, good results have been reached in the repair of repair of the ancient emplacement at Jiaoshan.

Key words: Rammed earth construction; Ancient emplacements; Rammed - earth compositions