交河故城 PS-C 灌浆加固材料可灌性的实验室研究

杨　璐[1]，孙满利[1]，黄建华[2]，曾　涛[1]，高　燕[1]

(1.西北大学文博学院，陕西 西安 710069；2.秦始皇兵马俑博物馆陶质彩绘文物保护重点科研基地，陕西 西安 710600)

摘　要：为了研究交河故城保护灌浆加固材料，在不同水灰比 PS-C 浆液实际灌浆过程中，对不同裂隙的渗透能力及灌注效果做了初步探讨。在实验室模拟灌浆墙体的基础上，依据实际施工条件分别配置了不同水灰比的 PS-C 浆液，并对其灌浆过程中的灌浆压力及灌注效果进行检测，通过对检测数据的比较分析，得出了现场施工中不同裂隙宽度对浆液水灰比的选择依据。对大于 1 cm 宽度的裂隙应使用 0.6 水灰比的浆液；对介于 0.75～1.0 cm 的裂隙应使用 0.65 水灰比的浆液；当裂隙宽度在 0.5～0.75 cm 时应使用 0.7 水灰比的浆液，而当裂隙小于 0.5 cm 时应使用 0.75 水灰比的浆液。

关键词：PS-C；交河故城；可灌性；文物保护

中图分类号：TU18　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－4548(2010)03－0397－04

作者简介：杨　璐(1979－　)，男，硕士，西北大学文博学院文化遗产保护科学系讲师。E-mail: yanglu@nwu.edu.cn。

Groutability of PS-C Grout for Jiaohe ruins

YANG Lu[1], SUN Man-li[1], HUANG Jian-hua[2], ZENG Tao[1], GAO Yan[1]

(1. College of Culture Heritage and History, Northwest University, Xi’an 710069, China; 2. Key Scientific Research Base of Ancient Polychrome Pottery Conservation, The Museum of the Terracotta and Horese of Qing Shihuang, Xi’an 710600, China)

Abstract: In order to study the influence of PS-C grout with different C/W ratios on its groutability to different fractures of Jiaohe ruins, the grouting pressure and effects are discussed. Based on the data of experiments, a conclusion is drawn that when the fracture width is larger than 1 cm, the grout with 0.6 C/W ratio should be used. When it is 0.75 cm to ~ 1 cm, the grout with 0.65 C/W ratio should be used. The grout with C/W ratio of 0.7 should be used when the fracture width is between 0.5 cm and 0.75 cm. When it is smaller than 0.5 cm, the grout with C/W ratio of 0.75 should be used.

Key words: PS-C grout; Jiaohe ruins; groutability; protection of cultural relics

0　引　　言

交河故城位于吐鲁番市西郊 10 km 牙尔乃孜沟两河交汇处 30 m 高的黄土台上，是公元前 2 世纪至 5 世纪由车师人开创和建造的，在唐代达到鼎盛，至元末察合台时期终被废弃。交河故城是现今世界上最大最古老、保存最完整的生土建筑城市，1961 年被列为国家重点文物保护单位。但近年来由于保存环境、旅游开发及自身质地等因素的综合作用，城内遗迹多遭受到不同程度的侵蚀，有些已大面积坍塌，濒临毁灭，急需保护[1-3]。

国内的土遗址保护研究始于上世纪 60 年代，至今已取得许多显著成果。尤其是针对北方干旱地区土遗址（交河故城、高昌古城等）的加固保护方面，已研制出适于该类环境土遗址加固保护的无机材料 PS 以及针对不同病害的施工工艺。为该类遗址的加固提供了可靠的保护材料及操作方法[4-6]。但土遗址灌浆加固是一个复杂的系统工程[7]，它的渗流过程和灌浆效果是土体、浆液和灌浆工艺三方面共同作用的结果。本课题选取交河故城灌浆加固使用的 PS-C 材料作为浆液，模拟现场施工的环境条件，构造不同宽度的裂隙模型，研究不同水灰比浆液的灌浆压力及可灌性，为交河故城土遗址裂隙灌浆的现场施工提供理论指导。

1　实验部分

1.1　实验材料

实验用 PS 是一种高模数的硅酸钾，由敦煌研究院提供，原液浓度为 23.52%，模数为 3.8。C 为黏土，采自交河故城建筑倒塌后的原土，经机械粉碎后过筛用于浆液配置。

1.2　实验设备

灌浆压力的测试采用宝大公司生产的电脑伺服式万能材料试验机，传感器为 5 kgf 及 500 kgf，位移速

基金项目：国家科技部十一五科技支撑项目“土遗址保护关键技术研究”（2006BAK30B02）

收稿日期：2008－11－17

率为 100 mm/min，选用压力试验模式。

浆液搅拌采用常州国华电器有限公司生产的电动搅拌器，转速为 650 r/min。

浆液温度控制采用北京科伟永兴仪器有限公司出产的电热恒温玻璃水浴锅。

1.3 实验环境条件

灌浆实验进行过程中的环境温度为 30℃±2℃；环境湿度为 50%±5%。

1.4 模拟灌浆墙体的营造

将粉土和水制成的浆液倾倒于 40 mm×40 mm×160 mm 的试模中制成土块。将土块以 2 块并排，3 块叠压，逐渐后延的方式分别砌成两面墙体，并在两面墙体间留出 0.25，0.50，0.75，1.00，1.25，1.50 cm 的间隙。而后使用泥浆将土墙两侧面抹平，并用有机玻璃平板将其两侧夹紧。在有机玻璃板土墙间隙处从底部每隔 10 cm 开一个孔洞用以放置灌浆管，进行浆液灌输（见图 1）。

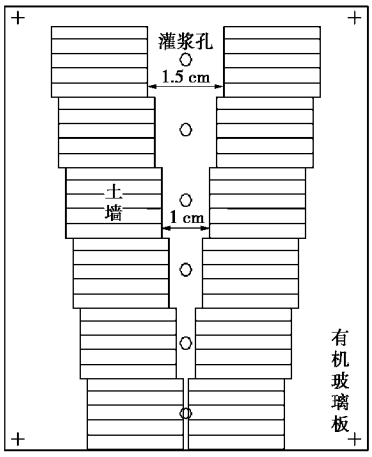

图 1 模拟灌浆墙体

Fig. 1 Grouting wall for simulation

1.5 PS-C 浆液的配置

用200目筛子筛选分离出粒度小于0.075 mm的交河粉土，烘干备用。将PS原液以水为溶剂配置成浓度为12%的PS水溶液，并于恒温玻璃水浴锅中恒温至35℃。后向其中加入适量的过筛后交河粉土（分别按照0.55，0.6，0.65，0.7，0.75五种水灰比配置），于35℃恒温下机械搅拌10 min，使浆液均匀后立即进行模拟灌浆实验。

1.6 模拟灌浆

将搅拌均匀的浆液吸入注射器（容积100 mL，直径4 cm）后放在自制的固定架上。注射器的头部连接灌浆管（外径0.8 cm，内径0.5 cm，管长70 cm）一头，灌浆管另一头插入模拟灌浆墙体侧壁的有机玻璃板表面最底层的小孔中。开启材料实验机，传感器匀速推压注射器尾部，将注射器中浆液挤出，同时传感器记录灌浆压力。随着模拟裂隙中浆液液面的升高，逐步提高灌浆管插入有机玻璃板表面孔洞的孔位，并观察灌入状态。

2 结果与讨论

2.1 不同水灰比的灌浆压力

对0.55，0.6，0.65，0.7，0.75五种水灰比浆液模拟灌浆过程中灌浆压力的监测结果见图2。从图中可以看出：

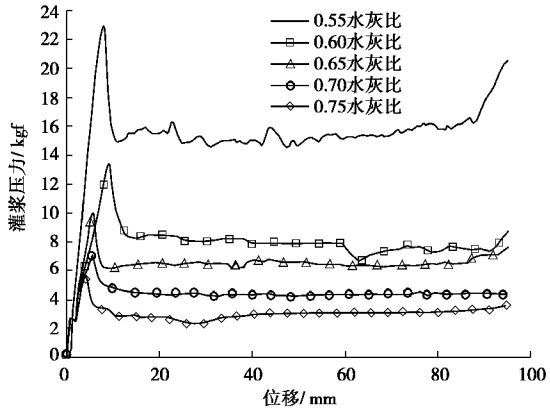

图 2 5 种水灰比 PS-C 浆液的灌浆压力－位移曲线图

Fig. 2 Grouting pressure-displacement curves for PS-C grout with five kinds of C/W ratios

（1）各种水灰比浆液灌浆压力随灌浆位移的增加而变化的趋势均基本一致，但曲线并不平滑。这是由于PS-C浆液属非牛顿液体，液体自身并不均匀，灌浆过程中灌浆压力也自然不可能以某种函数方式变化，只能在一定范围内出现无规则的波动，这是非牛顿液体自身特性所决定的。

（2）各种水灰比的灌浆压力－位移图，在大约5 mm位移处均出现一个明显的尖峰，且该峰值在各种水灰比的压力－位移图中均为最高值，因此该峰对应的灌浆压力称之为最大灌浆压力。该峰是在灌浆开始后，浆液从注射器被压入灌浆管的瞬间产生的。随着浆液注入灌浆管，这个尖峰立即消失，尔后曲线便呈现出趋于平直的状态。这个尖峰是两方面因素共同作用的结果。其一是吸取浆液的注射器头是内部空间浆液与外界大气环境直接接触的部位，再加上该区域空间狭小，所能容纳的浆液十分少，因此该部位浆液极易受外界环境因素的影响(主要是温度及湿度的影响）而首先产生趋于凝结的现象，因此浆液从注射器头部流出的瞬间需要克服更大的阻力；其二是浆液与灌浆管及注射器之间的摩阻力由静态阻力到动态阻力变化所需要的外力。该峰出现在5 mm位移处，而不是从位移原点一开始就出现，是由于夹具及注射器结合间的

孔隙而造成的。由于最大灌浆压力为每种水灰比浆液灌注过程中的最大值，它直接决定了该浆液是否可以进行人工灌输。因此，在研究可灌性问题时，浆液的最大灌浆压力为主要研究参数之一。5种水灰比浆液的最大灌浆压力（浆液温度为35℃）见表1。

表 1　5 种水灰比 PS-C 浆液的最大灌浆压力

Table 1 The maximum grouting pressures of PS-C grout with five kinds of C/W ratios

水灰比	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75
最大灌浆压力/kgf	22.95	13.50	10.05	7.05	5.70

在最大灌浆压力出现之后，灌浆压力随位移的变化基本呈现出较为稳定平直的趋势。这个较为稳定平直的区间称之为稳定灌浆区间，该区间对应的灌浆压力的均值称之为稳定灌浆压力。稳定灌浆压力由于受其它外部因素的影响少，数值波动较小，在整个灌浆过程中的大部分时间较为稳定，因此，对不同水灰比PS-C浆液的灌浆压力的研究，稳定灌浆压力可以验证最大灌浆压力得出的部分结论。五种水灰比的稳定灌浆压力（位移区间为20～80 mm，浆液温度为35℃）见表2。

表 2　5 种水灰比 PS-C 浆液的稳定灌浆压力

Table 2 Stable grouting pressures of PS-C grout with five kinds of C/W ratios

水灰比	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75
稳定灌浆压力/kgf	15.29	7.81	6.46	4.37	2.93

由表2可以看出，5种水灰比浆液随水灰比的增加，其稳定灌浆压力逐渐减小。这是因为随着水灰比的增加，浆液中水的含量逐渐增多，在同等温度水平下，浆液更加稀释，流动性更强，对应所需的灌浆压力自然也就会降低。这一点从不同水灰比浆液的最大灌浆压力中也可以得到印证。

（3）所有水灰比浆液的位移-灌浆压力曲线的尾端都基本出现上扬的趋势，这主要是由于灌浆过程中当注射器将大部分浆液灌完，只剩少量浆液残存其中时，由于浆液的体量变小，外界环境温度对浆液性能的影响增大，浆液温度的散失直接导致浆液内部摩阻力的增加，从而产生曲线尾部上扬的现象。

2.2　不同水灰比浆液对不同裂隙的灌浆效果

表3为5种水灰比浆液对人工模拟的0.25 cm至1.50 cm逐渐递增的6种宽度裂隙的灌注效果。从表中可以看出0.55水灰比浆液由于其含水率最低，浆液黏度较高，流动性较差，因此它对宽度为0.25 cm的裂隙完全无法灌入；对宽度为0.50 cm的裂隙可部分灌入（能灌入裂隙总高度的44%）；而对于0.75 cm宽度的裂隙则基本可灌入（可灌入裂隙总高度的86%）；对大于1 cm宽度的裂隙可完全灌入。

水灰比为0.6的浆液由于有更多水份的加入，因此其流动性优于0.55水灰比的浆液，但该浆液依然无法灌入0.25 cm宽度的裂隙；对0.5 cm的裂隙可灌入总高度的51%，略优于0.55水灰比浆液；对0.75 cm宽度裂隙的灌注能力也略优于0.55水灰比浆液，灌注高度为总高度的91%；同样，对于宽度大于1 cm的裂隙，该水灰比浆液亦可完全灌入。

0.65水灰比浆液的流动性能更加优良，它对0.75 cm以上宽度的裂隙均可完全灌入；但由于水分含量依然不够充足，其流动能力仍没达到最好，因此它对0.25 cm宽度的裂隙仍然无法灌入；对于0.50 cm宽度的裂隙，该浆液可灌入66%。

随着水分含量的进一步增加，浆液水灰比达到0.7。该浆液的流动性已经很好，因此能完全灌入宽度大于0.50 cm的所有裂隙；对于最细小的0.25 cm宽度的裂隙，也已经从之前水灰比浆液的完全无法灌入发展到可以灌入裂隙总高度的39%。

0.75水灰比的浆液是实际灌浆施工中最稀的浆液，由于水分含量最高，其流动性极佳，因此对于宽度大于0.50 cm的裂隙均完全可以灌入；对于0.25 cm的裂隙，其灌注能力也已经达到了72%。

由以上实验可以看出，浆液中水份的含量直接决定了其对裂隙的灌入能力。水灰比越高的浆液由于其流动性越好，对裂隙的灌入能力也就越强。但在现场施工中决不是用最稀的浆液就可以解决问题的。由于土质浆液在干燥过程中存在较大的收缩，其收缩率与其含水率成正比。因此较稀的浆液将会面临在灌浆结束后，随着浆液的干燥，灌浆部分再次和文物墙体间产生裂隙的问题[8]。故而，在现场施工中，应根据裂隙的实际宽度来确定适宜的灌浆浆液水灰比。

2.3　不同水灰比浆液的灌浆可操作性

在土遗址裂隙灌浆的现场施工中多是采用人工手推注射器法对裂隙进行灌浆加固的[9]，交河故城的现场施工也是如此。因此仅仅只了解某种浆液灌浆压力的数值对浆液灌输的可操作性无法起到指导作用。要了解浆液的可操作性就必须了解人能够达到的手推注射器的压力，以此为基础，判断浆液灌输的可操作性。为了测定人能达到的手推注射器的大致压力，我们使用压力传导装置连接测力传感器，利用手推气压传导的方式测定了一个20岁青年男性的平均手推灌浆压力大约为22 kgf。

结合不同水灰比浆液的最大灌浆压力可以看出，水灰比为0.55的浆液（浆液温度35℃）的最大灌浆压力大于该值，因此从实际施工的角度而言，该水灰比

表 3 5 种水灰比浆液灌入不同宽度裂隙的浆液高度占裂隙总高度的百分比

Table 3 Percentage of grouting height to total fracture height for PS-C grout with 5 kinds of W/C ratios for fractures with different widths

水灰比	裂隙宽度/cm					
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
0.55	0%	44%	86%	100%	100%	100%
0.60	0%	51%	91%	100%	100%	100%
0.65	0%	66%	100%	100%	100%	100%
0.70	39%	100%	100%	100%	100%	100%
0.75	72%	100%	100%	100%	100%	100%

浆液的可操作性不强。而其它水灰比浆液的最大灌浆压力均小于 22 kgf，因此另外 4 组水灰比浆液在施工现场均易于使用。

3 结 论

通过对五种不同水灰比浆液的最大灌浆压力、稳定灌浆压力、不同裂隙的灌入能力及现场可操作性的分析测试，可以得出如下结论：

（1）浆液的最大灌浆压力（从 22.95 kgf 到 5.70 kgf）及稳定灌浆压力（从 15.29 kgf 到 2.93 kgf）随水灰比的增加而降低。

（2）浆液对不同宽度裂隙的灌入能力与浆液的水灰比成正比，但必须同时考虑浆液干燥过程中的收缩率。

（3）从手推注射器压力的实测数据可以看出：0.6，0.65，0.7，0.75 四种水灰比浆液（浆液温度为 35℃）的灌浆具有现场的可操作性。

（4）综合考虑灌浆压力、裂隙可灌性及可操作性三方面因素，可得出在交河故城保护加固灌浆的现场施工中，当裂隙宽度大于 1 cm 时应使用水灰比为 0.6 的浆液；当裂隙介于 0.75～1.0 cm 时应使用 0.65 水灰比的浆液；当裂隙宽度在 0.5～0.75 cm 时应使用水灰比为 0.7 的浆液，而当裂隙小于 0.5 cm 时应使用 0.75 水灰比的浆液。

参考文献：

[1] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京：科学出版社，2003. (LI Zui-xiong. Protection of ancient sites on the Silk Road[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))

[2] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟与土建筑遗址保护加固研究[D]. 兰州：兰州大学，2002. (WANG Xu- dong. Protection and consolidation of grottoes and earthen architecture sites in arid region of northwestern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2002. (in Chinese))

[3] 赵海英. 甘肃境内战国秦长城和汉长城保护研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005. (ZHAO Hai-ying. Study on conservating the Great Wall of the Qin Dynasty at the Waring States Period and the Han Dynasty in Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005. (in Chinese))

[4] 孙满利，王旭东，李最雄，等. 交河故城瞭望台保护加固技术[J]. 岩土力学，2007，**28**(1): 163－168. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong. Technology of protection and reinforcement for observation platform in ruins of Jiaohe[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 163－168. (in Chinese))

[5] 孙满利，王旭东，李最雄，等. 交河故城的裂隙特征研究[J]. 岩土工程学报，2007，**29**(4): 612－617. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Study on cranny characteristics of the ruins of Jiaohe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 612－617. (in Chinese))

[6] 苏伯民，李最雄，胡之德. PS 与土遗址作用机理的初步探讨[J]. 敦煌研究，2000(1): 30－35. (SU Bo-min, LI Zui-xiong, HU Zhi-de. Study on consolidating mechanism between PS and earth relics[J]. Dunhuang Research, 2000(1): 30－35. (in Chinese))

[7] 李最雄，王旭东. 古代土建筑遗址加固保护研究的新进展[J]. 敦煌研究，1997(4): 167－172. (LI Zui-xiong, WANG Xu-dong. The development of consolidation for ancient earth sites[J]. Dunhuang Research, 1997(4): 167－172. (in Chinese))

[8] 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, **28**(12): 2156－2159. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong. Study on immature earthen sites reinforced with wood anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2156－2159. (in Chinese))

[9] 王旭东，张 鲁，李最雄，等. 银川西夏 3 号陵的现状及保护加固研究[J]. 教煌研究，2002(4): 64－72. (WANG Xu-dong, ZHANG Lu, LI Zui-xiong, et al. The study of existing condition and consolidation project of No. 3 Tomb of the Western Xia Mauseoleums[J]. Dunhuang Research, 2002(4): 64－72. (in Chinese))