

对近现代钢筋混凝土建筑文物修复材料的试验研究

——以浙江省磐安县道德桥为例

童芸芸¹, 郑逸杨¹, 叶良¹, 余辉¹, 马梁梁²

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023; 2. 杭州聚代科技有限公司, 杭州 310011)

摘要: 目前对混凝土结构建筑的修复手段主要停留在实验室阶段, 缺少与现场的结合, 且存在成本高、效率低的问题。将试验研究结合现场工况进行综合分析研究, 能达到较高的资源利用率, 确保修复材料的适用性。现场试验针对3个方面的修复材料, 分别使用3种防水材料后对比覆水试验与含水率测定结果来比较防水材料的修复效果; 检测注浆前后的强度、色差及粗糙度变化等来确定注浆材料的修复效果; 通过硬度计与回弹仪测定修复后表面抗压强度与硬度来比较表面修复材料的修复效果。结果表明: 瓦克膏体硅烷材料防水性能最好; 天然水硬性石灰微收缩注浆料 NHL-i07 对表面裂缝处进行针管注浆加固的填充效果最好; 碧林增强剂 KSEOH300 进行表面加固后强度增加较明显。本试验探索了近现代文物建筑保护设计的新方法, 对类似的古建筑修复项目有一定的借鉴意义。

关键词: 近现代建筑文物; 钢筋混凝土; 修复材料; 表面加固; 防水材料; 注浆材料

中图分类号: TU-87; TB302.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2020)03-0216-06

Experimental study on repair materials of modern reinforced concrete cultural relic buildings —Taking Daode Bridge in Pan'an, Zhejiang for example

TONG Yunyun¹, ZHENG Yiyang¹, YE Liang¹, YU Hui², MA Liangliang²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Hangzhou Judai Technology Co., Ltd., Hangzhou 310011, Zhejiang, China)

Abstract: At present, the repair methods of concrete structure buildings mainly stay at the laboratory stage, lacking combination with the site, afflicted by problems of high cost and low efficiency. The purpose of this test was to combine the experimental study with the field working conditions for comprehensive analysis and research, so as to achieve a higher utilization rate of resources and real

收稿日期: 2019-10-19

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(19E080002); 浙江省文物保护科技项目(2019014)

通信作者: 童芸芸(1978—), 女, 浙江省杭州人, 副教授, 博士, 主要从事钢筋混凝土的耐久性研究。E-mail: 2195838307@qq.com。

applicability of repair materials. The field test aimed at three aspects of repair materials; after using three kinds of waterproof materials respectively, compare the results of water covering test and moisture content measurement to evaluate the repair effect of waterproof materials; the repair effect of the surface repair materials was compared by measuring the compressive strength and hardness of the repaired surface with the hardness tester and rebound instrument; the repair effect of the grouting materials was determined by detecting the strength, color difference and roughness changes before and after grouting. The results show that the waterproof performance of Wacker paste silane material is the best; the filling effect of nhl-i07, a natural hydraulic lime micro shrinkage grouting material, is the best; the strength of KSEOH300, a Bilin reinforcing agent, increases obviously after surface strengthening. The new method of protection and design of modern cultural relic buildings is explored through field test, which can provide reference for similar restoration projects of ancient buildings.

Keywords: modern cultural relic buildings; reinforced concrete; repair materials; surface reinforcement; waterproof materials; grouting material

混凝土是用途较广的一种建筑材料,其耐久性优良、强度较高和价格低廉^[1]。中国的混凝土使用时间最早可追溯至18世纪末与19世纪初,距今也已有百年历史。由于碳化、冻融破坏等问题,那些承载着浓厚历史气息、具有丰富研究价值的近现代建筑正面临着一系列的结构安全问题。如何在保证其原生态的情况下修复建筑体,延长其寿命是目前面临的问题^[2-4]。国内外相关研究大多停留在实验室的小范围试验,忽略了真实环境的不可控性的影响,并且将一道新工艺从实验室推向现场施工,需要较高的费用和较长的时间。虽然实验室得到的结果对现场施工具有一定的借鉴作用,但在真实性和实用性上仍有所欠缺^[5-6],所以现场试验是不可或缺的。王杰等^[6-7]结合实际桥梁修复工程对注浆材料进行研究,结果表明浆液的性质取决于组成成分、温度、时间和渗透速度等因素;张东丽等^[8]和 Manita 等^[3]通过现场试验对古建筑修复材料的研究,得出历史勾缝材料的矿物成分和添加剂含量,并以此作为修复材料的设计依据,从而最大程度地保留历史建筑的真实性。基于此,本研究结合浙江省磐安县道德桥的保护修复项目,通过现场试验开展修复材料的适用性和安全性研究,探索钢筋混凝土近现代建筑文物保护设计的新方法,使得修复更具准确性和针对性。

1 项目背景

据《东永桥会芳名》载道德桥原为木桥,光绪壬辰年(1892年)造石桥,但屡建屡毁。民国十三年(1924年),道德桥由天台道士设计建造,其整体外观如图1所示。桥为单孔钢筋混凝土拱桥,桥长34.73 m,矢高6.88 m。南北两端桥头呈不规则喇叭口状,南北两端桥面最宽处分别为4.4、4.2 m,桥中面宽2.8 m。两端桥墩用条石与块石叠砌,桥面与桥身均用钢筋混凝土模板现场浇筑。桥上设篱笆式栏杆,整个桥栏采用模块一次性铺设钢筋浇筑。在桥面南、北较陡坡段采用水泥砂浆分别浇筑七级踏跺。

钢筋混凝土桥梁在民国初年是一种新兴的建桥方式,这在全省各地都比较少见,具有重要的历史和艺术价值。2011年1月,浙江省人民政府公布道德桥为省级文物保护单位。

通过现场观察得知,道德桥主要存在的问题有:桥栏有混凝土开裂,部分区域有混凝土整块剥落,钢筋裸露;拱底表面混凝土碳化剥落严重,钢筋裸露锈蚀严重;桥底两侧表面渗水严重。混凝土病害现状如



图1 道德桥外观

Fig. 1 Appearance of Daode Bridge

图 2 所示。另外,通过现场石材表面回弹强度检测(用于测定岩石表面强度)、混凝土碳化检测及钢筋锈蚀程度检测来辅助了解道德桥的真实破损情况,得出如下结论:道德桥的桥栏及南北两侧拱底的混凝土已完全碳化,桥面底部的混凝土情况良好,面部也已经完全碳化;道德桥拱底纵向钢筋锈蚀较为严重,横向钢筋的锈蚀情况虽然不能确定,但结合现场实际和纵向钢筋检测的结果,锈蚀概率也较大。现场检测结果为后期建筑的维护修复施工提供了可靠的依据。

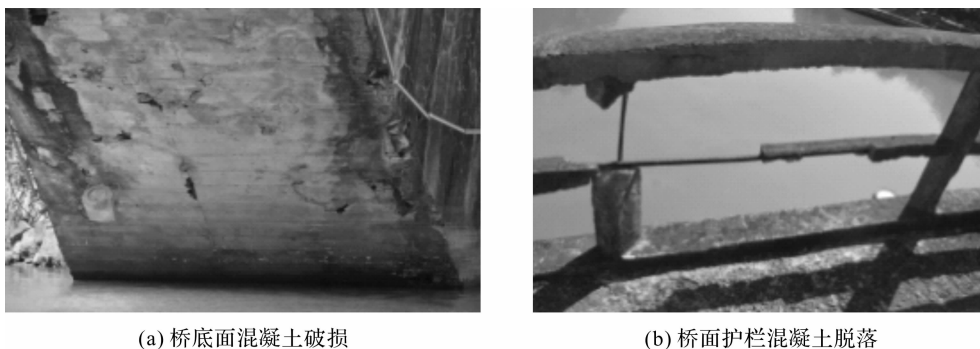


图 2 混凝土病害现状

Fig. 2 Status quo of concrete disease

2 现场试验

现场试验包括防水材料试验、注浆材料试验和表面加固材料试验。

2.1 防水材料试验

根据现场检测资料显示,本试验对象的外表面渗水率为 44%。这表明该建筑物的渗水已经十分严重,影响到建筑物的使用寿命。解决渗水现象可从多个方面入手,如结构设计、外表面材料和工艺工法等,其中使用外表面材料防水剂最为简单而有效。较常见的有机硅建筑防水剂主要分为水溶型、溶剂型和乳胶型 3 类。有机硅建筑防水剂在处理建筑物表面时采用喷涂或刷涂均可。对混凝土和灰土等粗糙表面用喷涂比较好;对石块和大理石等平滑表面则用刷涂。采用何种方法需根据不同防水剂的物态和使用量来决定^[9-10],例如 Wacker BS Creme C 防水剂在操作的时候最好以无空气工艺所需的厚度,不加稀释地涂刷在混凝土上;较小面积时使用刷子和绵羊皮漆或涂漆抹刀。

2.1.1 材料

防水材料试验待选材料有 3 种:防水剂 1,碧林外立面憎水乳液 WS98(图 3(a)),乳白色液体,pH 值为 7 ± 0.5 ,毛细吸水率 $\leq 0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,能防 pH 值为 14 的强碱腐蚀,抗紫外线性能为 5 级;防水剂 2,碧林外立面憎水剂 RS96(图 3(b)),无色透明液体,有效成分为硅氧烷(质量分数约为 7%),毛细吸水率 $\leq 0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,能防 pH 值为 14 的强碱腐蚀;防水剂 3,瓦克膏体硅烷(图 3(c)),白色膏剂,活性物质含量约为 80%(质量分数),25 °C 下密度约为 $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$,pH 值约为 6,闪点约为 74 °C。

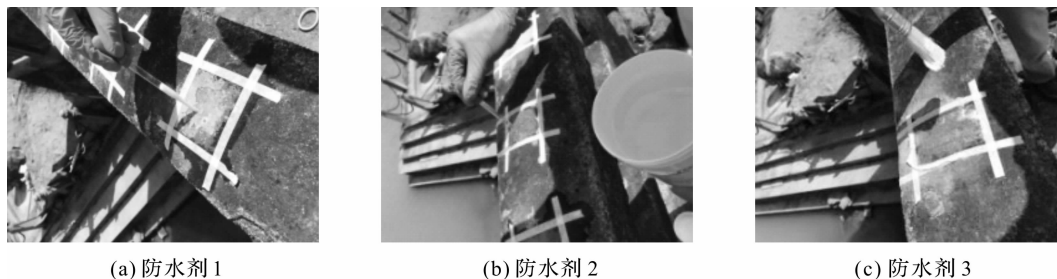


图 3 防水材料

Fig. 3 Waterproof materials

2.1.2 工具和步骤

试验工具包括锉刀、磨砂纸、双面胶、毛刷、滴管等。试验步骤如下:确认现场试验的区域,分为 A、B、C、D 4 个区域;用锉刀或者磨砂纸清除表面浮渣、青苔;分别对 4 个区域进行含水率检测;A、

B、C区域分别涂刷防水剂1、2、3,D区域为对照组;7 d后对4个区域依次进行覆水试验和含水率检测。

用喷壶向试验区域洒水进行覆水试验,通过肉眼观察现场4个试验组在洒水后的表面现象来对比各试验组防水效果的优劣,用仪器检测试验区域在干燥情况下的含水率;再用喷壶向待测部位喷水,待其表面完全湿润后检测其含水率。对比喷水前后两次检测的结果,得知含水率变化情况,再通过对比各试验组含水率变化幅度来确定防水效果的优劣。

2.2 注浆材料试验

注浆修补法针对宽度为0.2~0.5 mm的混凝土裂缝^[11-12]。注浆的方法有钻杆注浆法、电渗法、高压喷射注浆法等^[13],由于本次修复对象的裂缝较多且宽度较大,钻杆注浆法的成本较高,电渗法不适用于大面积修复,故采用了高压喷射注浆法。在刚性注浆与柔性注浆中选择了注浆修补后即使裂缝宽度发生变化也不会有较大影响的柔性注浆^[7],并将其与表面涂装相结合,以确保对混凝土桥梁的裂缝修补能达到较好的效果。

2.2.1 材料

对注浆的目的、土质条件、工程性质、施工技术和造价高低等因素做综合分析后,我们认为水泥基浆材的化学浆液更适用于本试验^[6-8]。化学浆液分为水玻璃类化学注浆材料、有机高分子化学注浆材料及有机高分子复合化学注浆材料,其可注入性好,能注入土层中的细小裂隙与孔隙中;而水泥基浆材具有固结强度高、耐久性好、材料来源丰富、工艺设备简单、成本较低等优点。

试验采用的注浆加固材料为天然水硬性石灰微收缩注浆料 NHL-i07,由符合欧洲 EN459 标准的天然水硬石灰(NHL)作为黏结剂,添加助剂精制而成,现场加水搅拌均匀后即可使用,其流动性好,硬化后低收缩、强吸水、高透气透水,水溶盐含量极低。材料外表为粉状,颜色为标准石灰颜色,容重为0.74~0.8 kg/L,抗折强度为2.5~3.5 MPa,抗压强度为6.5~7.5 MPa,毛细吸水率 ≥ 10.0 kg/(m²·h)。

2.2.2 工具和步骤

注浆材料试验过程如图4所示。试验工具包括天平、量筒、烧杯、注射器、刮刀、毛刷、棉纸等。试验步骤如下:确认现场试验区域,清除表面浮渣、青苔;对修复或加固部位用去离子水清洗,清洗可采用喷壶配合软毛刷轻缓清洗,并用棉纸吸干清洗部位;根据实验室常用配比,进行现场称量、配制;利用注射器进行灌浆处理;28 d后进行试验加固效果检测。注浆材料效果检测采用表观观察、砂浆贯入度的强度检测和红外拍摄效果检测。首先,表观观察,即采用肉眼观察裂隙注浆加固位置,根据现场表面外观差异进行初步比较。其次,使用贯入式砂浆强度检测仪对注浆材料进行强度检测,检测步骤如下:调整贯入仪的初始位置并将扁头对准灰缝中间,垂直贴在待测砌体灰浆黏结材料表面;扳动扳手,将测钉贯入待测材料中;拔出测钉,吹净测孔中的粉尘;调零测量表并对准表面平整处,扁头对准灰缝,测头插入测孔中,其间保持测量表垂直于待测材料的表面,读取表盘数值并记录;将现场贯入度结果换算成黏结强度。最后,红外拍摄效果检测,即待加固完成后,采用 Fluke Tis40 型红外热成像仪进行观测,根据检测区域内材料温度变化的情况来判断材料本身均匀致密情况。

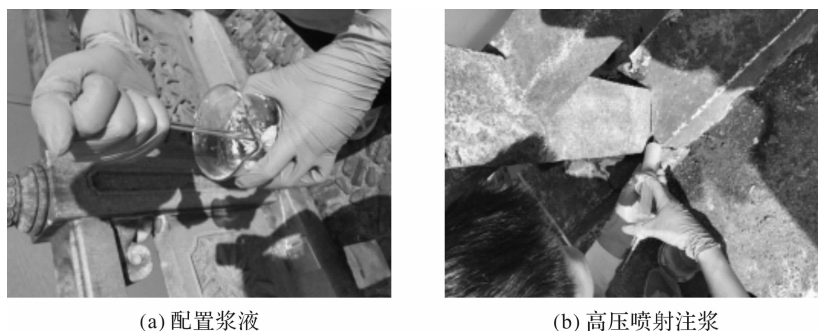


图4 注浆材料试验过程

Fig.4 Test process of grouting material

2.3 表面加固材料试验

2.3.1 材 料

本试验表面加固材料采用的是碧林增强剂 KSEOH300,材料外表无色透明,有效成分为硅酸乙酯,其含量 $\geq 99\%$,20℃下的密度约为 1 g/cm^3 。它是硅酸乙脂增强材料,在开放的自然条件下固化结晶形成二氧化硅,将风化的混凝土表面材料固结,试验过程如图 5 所示。二氧化硅的化学性质比较稳定,不跟水和弱氧化性酸发生反应,低黏度、固化快、抗腐蚀,并且不会改变基材表面的颜色。因此该材料十分适合石材与混凝土建筑文物的修复。

2.3.2 工具和步骤

试验工具包括烧杯、双面胶、注射器、毛刷、刮刀、棉纸等。试验步骤如下:确认现场试验区域,清除表面浮渣、青苔;对表面加固部位用去离子水清洗,清洗可采用喷壶配合软毛刷,并用棉纸吸干清洗部位,以保证基面清洁无杂物和干燥;用喷壶装取一定量的碧林增强剂 KSEOH300,壶口对着加固区域自上而下进行表面加固。为使石材表面充分吸收加固剂,在用喷壶喷刷加固区域时必须均匀操作,且喷刷次数宜在 3 次以上,间隔时间为 0.5 h,保证一次施工足量。此外,为防止加固剂过快蒸发,在喷刷完后需贴膜覆盖。7 d 后进行加固效果检测:一是采用 Elcometer 224 数字式表面粗糙度仪对表面加固区域进行粗糙度检测,比较涂抹加固材料碧林增强剂 KSEOH300 处理过的混凝土表面和未处理过的混凝土表面的光滑度,以探究涂抹表面加固材料的效果。二是选用回弹仪和里氏硬度计测量混凝土强度和表面硬度,比较表面加固前后的强度和硬度差异,从而判断涂抹表面加固材料的效果,检测过程如图 6 所示。



图 5 表面加固材料试验过程
Fig. 5 Test process of surface reinforcement material



(a) 混凝土强度检测



(b) 表面硬度检测

图 6 用回弹仪和里氏硬度计检测混凝土强度与表面硬度

Fig. 6 Concrete strength and surface hardness detected with rebound instrument and Leeb hardness tester

3 结果与分析

结合现场环境因素对 3 种修复材料的试验结果如下。

3.1 覆水试验和含水率检测结果

3.1.1 覆水试验结果

试验后发现:D 区域湿润后被水渗入,表面水迹明显;A 区域基本上未被渗入,表面呈水珠状;B 区域部分被渗入,表面留有水迹;C 区域基本上未被渗入,表面呈水珠状。试验结果表明防水剂 1 和防水剂 3 防水效果较好。这也许是受到防水剂有效成分含量的影响,防水剂 3 的活性物质含量高于防水剂 1 和 2,导致防水剂 3 的效果较明显;且表观状态防水剂 1 为乳液,防水剂 3 为膏剂,它们相对于近似溶液状态的防水剂 2 受施工现场环境因素的影响更小。

3.1.2 含水率检测结果

根据现场 JT-C50 水分仪测试的结果显示,未做防水处理的对照组洒水前后含水率变化明显,而做了防水处理的 A、B、C 3 个区域的含水率洒水前后变化较小,尤其是采用防水剂 2 的 B 区域和采用防水剂 3 的 C 区域防水效果较明显,含水率前后基本上无变化。含水率检测结果见表 1。

由表1可知,洒水后A区域含水率增加了0.98%,B区域含水率增加了0.08%,C区域含水率增加了0.18%,D区域含水率增加了2.34%。

根据覆水试验和含水率检测结果,结合道德桥为钢筋混凝土结构的材料特性,防水剂3防水性能较好且较适合此次修复方案。

3.2 注浆效果检测结果

3.2.1 外观表征

观察裂隙注浆加固位置,未发现注浆材料表面有明显的开裂,周围混凝土之间也无明显的拉脱,说明天然水硬性石灰微收缩注浆料 NHL-i07 的黏结性能较好。

3.2.2 砂浆贯入强度检测

使用贯入式砂浆强度检测仪对注浆材料进行抗压强度检测,通过换算得到抗压强度约为5 MPa。由于天然水硬性石灰微收缩注浆料 NHL-i07 后期随着时间的变化抗压强度会有所增大,且该材料的抗压强度增大周期较长,故最终测得抗压强度应该会小于实际材料抗压强度。

3.2.3 红外拍摄效果检测

红外热成像分析如图7所示。由图7(a)可知,裂隙注浆加固处局部材料与周围混凝土有温差,加固材料的温度平均值为74.9 °F,最小值为73.5 °F,最大值为76.0 °F,发射率为95%,环境温度为55.4 °F,温度标准差为0.57 °F,但大部分还是和周围混凝土温度一样,说明注浆方案是可行的。材料与混凝土没有拉脱产生裂缝,材料本身也比较致密,可见天然水硬性石灰微收缩注浆料 NHL-i07 的注浆效果较好。

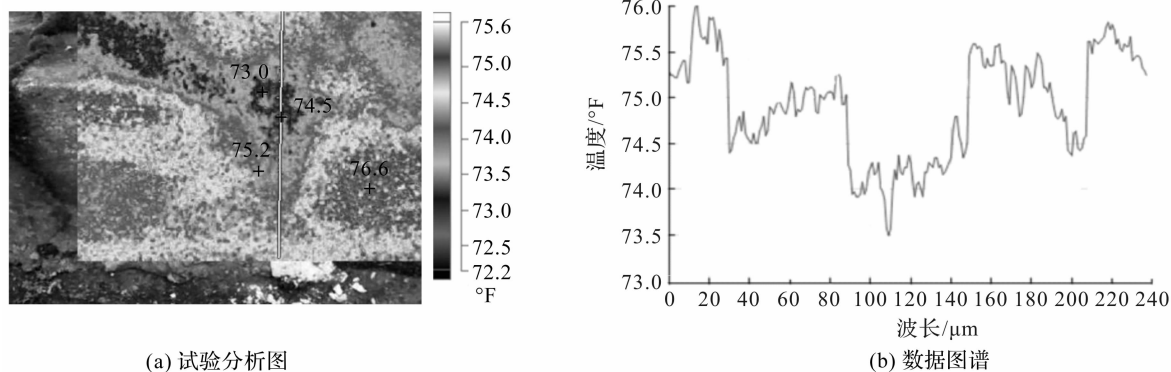


图7 红外线热成像试验分析图与数据图谱

Fig. 7 Analysis diagram and data atlas of infrared thermal imaging experiments

3.3 表面加固材料检测结果

对采用加固材料修复的部位进行粗糙度和硬度检测,结果见表2。由表2可知,经过涂抹加固材料碧林增强剂 KSEOH300 的混凝土界面要比未处理过的混凝土界面光滑,这是由于加固材料已在混凝土表面形成一层类似于保护膜的物质,既能增加表面强度又可以改善表面粗糙度。通过里氏硬度计检测,数据变化不明显,其原因或许是检测周期不够长或受到施工现场环境影响导致加固材料的硬化不足,但对比未加固区域表面,加固后的区域表面硬度还是有一定的增加,因此加固材料还是有一定的效果。

4 结 语

道德桥的修复方案设计坚持“整旧如故、以存其真”的科学修复方式,先模拟再运用、先局部后整体,

(下转第231页)

表1 含水率检测结果

Table 1 Result of moisture content test %

试验区	洒水前	洒水后
A	14.46	15.44
B	12.30	12.38
C	14.12	14.30
D	13.78	16.12

表2 表面加固材料检测结果

Table 2 Test results of surface strengthening material

试验区	粗糙度/ μm	里氏硬度/HL
加固区	290.2	30.98
未加固区	423.4	28.20