

钢筋混凝土文物建筑的病害检测技术应用

——以浙江省宁波鼓楼为例

童芸芸¹,余辉¹,叶良¹,王华超¹,吕伟加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: 混凝土碳化是工程中常见的问题,结合宁波鼓楼工程实例,介绍碳化的无损检测方法,即选取用于混凝土的碳化深度检测的原位酚酞测试技术,混凝土表面回弹强度检测技术,以及用于检测钢筋锈蚀程度的电化学技术和X衍射仪混凝土成分分析技术。根据现场勘测和取样采集到的技术数据,宁波鼓楼的混凝土成分主要含CaCO₃、SiO₂等成分,与普通碳化混凝土成分相似,没有检测到氯离子等其他特殊成分。鼓楼瞭望台梁和板碳化严重,碳化深度已达钢筋位置,板内钢筋锈蚀概率大于90%。同时,混凝土表面回弹强度检测显示,其警钟台的柱和瞭望台梁底推定强度只有14 MPa左右。上述结果说明,本课题组选取的检测技术能够在一定程度上对钢筋混凝土文物建筑的病害进行定性的分析,但是需要补充其他微损的实验室分析技术参数进行量化分析。

关键词: 钢筋混凝土文物建筑;碳化;混凝土回弹强度检测;钢筋腐蚀电位;混凝土成分

中图分类号: TB302.2;TU-87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2017)03-0166-06

Application of disease detection technology of reinforced concrete historical buildings

— Taking Ningbo Drum Tower for example

TONG Yunyun¹, YU Hui¹, YE Liang¹, WANG Huachao¹, LYU Weijia²

(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: In response to concrete carbonization, a common problem in engineering, the nondestructive testing methods of carbonization is introduced in this article. With Ningbo Drum Tower as an engineering example, it applies the on-site phenolphthalein test for carbonation depth of concrete, the concrete snapping back test, the electrochemical technique for steel

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51408546);浙江省文物保护科技项目(2015018);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C33058)

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。

corrosion degree and the technique for concrete composition analysis by X-ray diffraction. Based on the technical data obtained by the on-site investigations and sampling, the main compositions in the concrete of Ningbo Drum Tower are CaCO_3 and SiO_2 , which are similar to ordinary concrete, with no chloride ions detected. The beams and the slabs of the observatory are seriously carbonated, reaching deep to the steel level, with the steel corrosion probability of slabs more than 90%. Meanwhile, the concrete snapping back test indicates the deducted concrete strength of columns of the alarm clock stand and beam bottoms of the observatory is only around 14 MPa. The detection techniques applied by this study can partly provide qualitative diagnostic analysis for diseases of historic buildings of reinforced concrete structure. However, other small-invasive laboratory technical parameters should be complemented for quantitative analysis.

Keywords: reinforced concrete historical buildings; carbonization ; concrete snapping back test; corrosion potential of steel; concrete composition

混凝土虽然是一种耐久性材料,但是从浇筑之日起,就会遭受多方面的破坏,主要有碳化、碱骨料反应、冻融破坏,以及氯化物、硫酸盐破坏等。在房龄近百年的钢筋混凝土结构文物建筑中,以碳化病害最为常见,损失也最严重^[1]。干净的混凝土间隙液具有高碱性,在这个高碱性的环境下,钢筋表面形成一层致密的钝化膜,可保证钢筋不会继续锈蚀。混凝土碳化会降低间隙液碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,引起钢筋锈蚀不断进行,锈蚀产生的膨胀体积使得混凝土保护层剥落,继而使得构件的截面减小,承载力降低,使得结构破损或失效,并最终导致钢筋混凝土结构的破坏^[2]。目前国内外学者对混凝土碳化的研究已经很全面了,混凝土碳化的检测手段也是多种多样的,有的适用于快速现场检测,有的只限于实验室分析。目前常用的混凝土碳化现场检测方法是从混凝土表面一定深度取芯后在芯样上喷洒酚酞试剂,混凝土碳化部分显示无色,未碳化部分显示粉红色,因此可以根据芯样显色深度初步判断混凝土的碳化深度。但是,由于碳化会带来混凝土内钢筋的锈蚀,因此,对钢筋锈蚀程度的检测是钢筋混凝土碳化病害分析不可缺少的内容。然而,现场检测中对钢筋锈蚀程度的检测较少涉及,现场人员一般通过锈胀后裸露的钢筋判断锈蚀情况,这种方法是不准确的,因为裸露在空气中的钢筋失去了混凝土保护层的屏障保护,长期与空气中的氧气和水分直接接触,锈蚀速度较混凝土保护层内的钢筋快很多。

本研究结合浙江省宁波鼓楼工程实例,介绍混凝土碳化无损检测方法。为了最大程度保护历史信息的真实,延续历史的完整性,本课题组遵循最少干预原则,选取针对混凝土碳化深度检测的原位酚酞测试技术,针对混凝土表面回弹强度检测技术^[3-5],针对钢筋锈蚀程度的电化学技术和针对混凝土成分分析的X衍射仪技术,把它们应用于宁波鼓楼钢筋混凝土结构瞭望台和警钟台的病害分析。对宁波鼓楼瞭望台和警钟台的病害分析以无损检测技术为主,无损检测技术较有损的检测具有以下几个优势^[6]:一是不破坏建筑物和构筑物本身的结构;二是能进行全面检测;三是能用于老旧建筑,特别是文物建筑的检测。

1 工程概况

宁波鼓楼又称海曙楼,位于宁波市海曙区中山西路公园路口,2011年被公布为浙江省第六批文物保护单位。它始建于唐长庆元年(821年),基础是唐长庆元年的子城南门,城高8m,拱形门深10m,宽5m,石砌建筑,东北设有踏道。后梁开平三年(909年)置明州望海军,鼓楼称为望海军门(楼)。宋太祖建隆元年(960年)又改为明州奉国军,鼓楼也随之改称为奉国军门(楼),由太守潘良贵书“奉国军楼”额。鼓楼现存楼阁建筑是清咸丰五年(1855年)由巡道段光清所督建,1989年重修。民国十九年(1930年),救火联合会呈请市政府拨租全部房屋为会所,即在这一年,在鼓楼三层楼木结构建筑中间,建造了水泥钢

骨正方形瞭望台及警钟台。警钟台采用平屋面形式,分为 2 层,层高 3.3 m,建筑面积约 14 m²,并置标准钟一座,四面如一,既便于市民计时,亦可报火警,如图 1 所示。鼓楼是宁波市唯一尚存的古城楼遗址。

目前,瞭望台及警钟台屋面及外墙渗漏水严重,内粉刷和外粉刷部分混凝土构件表面酥松、剥落,钢筋锈蚀,迫切需要对瞭望台及警钟台进行现状勘测和病害分析,并提出合理、适宜的维护和修复方案,以提高建筑的结构安全性和耐久性。



图1 宁波鼓楼警钟台和瞭望台

Fig. 1 The alarm clock stand and observatory of Ningbo Drum Tower

2 病害检测技术运用

2.1 酚酞检测技术

为了最低程度破坏混凝土本体,本课题组采用原位酚酞检测技术^[7-8],使用钻头直径为 10 mm 的冲击钻在检测构件的适当位置钻取深度 20 mm 左右的小洞,如图 2 所示,对混凝土洞内进行足够的湿润,并用酚酞试剂(1 g 酚酞溶于 100 mL 体积分数为 95% 的乙醇)喷涂,根据显色反应,判断混凝土碳化情况,测量碳化深度,呈粉红色部分的混凝土没被碳化,颜色没有发生变化的部分则混凝土完全被碳化。相对于劈开混凝土和从混凝土表面一定深度取芯,该方法对混凝土的破坏程度相对要小一些,比较适用于文物建筑。



图2 冲击钻钻孔

Fig. 2 Impact drill hole

2.2 混凝土回弹强度检测技术

混凝土回弹强度是评定结构可靠性的重要依据,对混凝土回弹强度的检测一般采用从混凝土表面取芯,再通过抗压试验了解混凝土的抗压强度。为了避免取样对钢筋混凝土结构本体的破坏,检测采用无损的 α -5000cn 型数字回弹仪(深圳市深博瑞仪器仪表有限公司)对混凝土表面的回弹强度进行数据采集。回弹仪测读数值对混凝土表面局部性差异很敏感,特别对有骨料颗粒的地方更突出,因此在每个测区上必须读若干个数据,取其平均值^[9-10]。选取瞭望台柱、警钟台楼板、警钟台梁底面和梁截面进行混凝土强度场检测,并依据回弹强度值及混凝土碳化深度对混凝土强度进行推算。

2.3 电化学腐蚀电位检测技术

本实验采用瑞士 Proceq 公司的 Canin⁺ 钢筋锈蚀仪对梁、板、柱的钢筋锈蚀程度进行无损检测(图 3)。Canin⁺ 钢筋锈蚀仪采用硫酸铜参比电极,其相对标准氢电极(SHE)的开路电位是 316 mV。根据 ASTM C 876-91^[11] 经验值,由钢筋的腐蚀电位大小可初步判定钢筋的锈蚀概率^[12]。钢筋的锈蚀程度与钢筋的腐蚀电位有关,测得的钢筋腐蚀电位负值越大,钢筋的锈蚀概率越大,锈蚀程度也越大。表 1 是钢筋腐蚀电位与锈蚀概率关系,由表 1 可知,当电位大于 -52 mV 时,锈蚀的概率很小;电位在 -52 mV 到 -202 mV 之间时,锈蚀概率不确定;电位小于 -202 mV 时,锈蚀概率很大。采用电化学检测技术可以较准确地了解对大范围混凝土保护层内钢筋的锈蚀程度,对混凝土本体基本无破坏,特别适用于文物建筑。



图3 钢筋锈蚀检测

Fig. 3 Reinforcement corrosion detection

表 1 钢筋自然腐蚀电位与锈蚀概率的关系

(ASTM C 876-91;饱和硫酸铜参比电极)

Table 1 Relationship between rest corrosion potential of steel rebars and corrosion probability (ASTM C 876-91; CSE reference electrode)

E_{corr}/mV	锈蚀概率
> -52	很小($<10\%$)
-202 和 -52 之间	不确定
< -202	很大($>90\%$)

2.4 混凝土成分检测技术

X衍射仪分析是一种通过记录X射线束照射晶体样品时得到物质的衍射花样或衍射线谱图的方法。多晶体衍射线谱的数目及其强度是每种物质的特征,因而能够成为鉴别物相的标志^[13-15]。X衍射仪成分分析只需要1~2 g粉末试样,因此对混凝土本体的破坏不大。本课题组直接收集现场混凝土碳化深度酚酞测试时的钻孔粉末,经实验室研磨和315 μm 筛分后,用布鲁克(北京)科技有限公司生产的D-8 Advance X射线衍射仪(图4)对柱、梁和板各构件混凝土成分进行检测。



图4 D-8 Advance X射线衍射仪

Fig. 4 D-8 Advance X-ray diffractometer

3 病害检测结果与分析

3.1 混凝土碳化深度

原位酚酞检测技术对瞭望台柱、警钟台板、警钟台梁进行钻孔及湿润和酚酞喷涂(图5)。碳化深度原位酚酞检测结果显示,警钟台柱基本上无碳化,瞭望台梁横面碳化深度约为52 mm,梁底面碳化深度约为24 mm,楼板面碳化深度约为28 mm。由此可见,梁和板的混凝土碳化深度已经达到甚至超过混凝土保护层厚度,这些构件内部钢筋完全处于碳化混凝土包裹的环境中,从理论上分析,钢筋的钝化膜已经被破坏。当然,钢筋本身的锈蚀情况还需要由电化学测试数据进一步分析。

原位酚酞检测技术方法简单、方便、快捷,适用于现场检测,对建筑物本身破坏程度不大。现行规范将其作为标准试验方法,但混凝土碳化是逐步向内部扩散的,未碳化和完全碳化之间还存在碳化进行区域,导致指示剂变色分界面不明显,或由于混凝土碳化变脆,导致碳化测量时出现孔口边缘不齐整,孔内可见粗骨料或测量角度不同,这些都会影响测量的碳化深度^[16]。

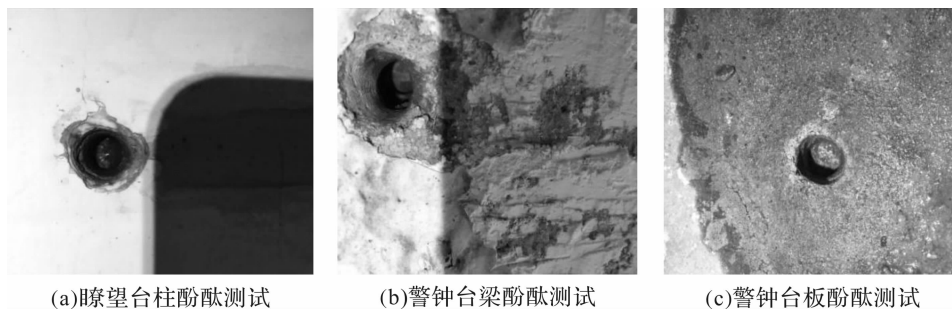


图5 混凝土碳化深度原位酚酞测试

Fig. 5 Concrete carbonation depth phenolphthalein in situ testing

3.2 混凝土强度推定值

选取瞭望台柱、警钟台楼板、警钟台梁底面和梁截面进行混凝土表面回弹强度检测,结果如表2所示。由表2可知,警钟台梁横面和楼板的强度推定值基本上符合目前对新建建筑构件混凝土强度最低值(25 MPa)的要求,但是瞭望台柱和警钟台梁底面的强度推定值比新建建筑构件混凝土强度最低值(25 MPa)低了42%左右,原因有待其他实验进一步分析。同时,须要结合现场整体结构体系,进一步核实是否需要对其进行加固处理。

表2 混凝土表面回弹强度及构件强度推定值

Table 2 Concrete surface rebound strength and component strength estimate value

构件名称	平均回弹值	碳化深度/mm	构件强度推定值/MPa
瞭望台柱	29.9	基本上无碳化	14.5
警钟台梁横面	39.5	52	24.4
警钟台梁底面	29.5	24	14.4
警钟台楼板	38.8	28	23.5

针对混凝土的强度检测,表面回弹检测技术对结构无损伤,检测过程快捷、方便,特别适用于钢筋混凝土检测技术。但是,回弹仪测读数值对混凝土表面局部性差异很敏感,由表面回弹值推定的混凝土强度与取芯抗压强度值之间存在一定的偏差及不稳定性,因此须要谨慎分析结果。

3.3 钢筋锈蚀程度

选取瞭望台柱、警钟台梁和板内钢筋的 3 个不同位置,应用电化学腐蚀电位检测技术对钢筋的锈蚀程度进行评估。结果如表 3 所示,瞭望台柱内钢筋的腐蚀电位较高,介于 -4 mV 到 -85 mV 之间,锈蚀概率低,情况良好;警钟台梁内钢筋的腐蚀电位较低,介于 -74 mV 到 -130 mV 之间,锈蚀概率较大;板内钢筋的腐蚀电位则处于 -194 mV 到 -216 mV 之间,锈蚀概率很大,锈蚀程度严重。由此可见,柱内钢筋的锈蚀情况良好,板内钢筋的锈蚀情况最严重。

电化学腐蚀电位检测技术仅仅是对钢筋锈蚀的概率进行初步定性的判断,而检测的结果受周围环境的温度、湿度等影响,数据有较大的不稳定性。同时,由检测数据离散性可以看出,同一根钢筋的不同位置,钢筋的腐蚀电位有一定的差距,这可能与不同位置材质的不均匀性和锈蚀的不均匀性有关。

表 3 混凝土中钢筋锈蚀程度

Table 3 The degree of reinforcement corrosion in concrete

构件名称	编号	钢筋腐蚀电位/ mV	钢筋锈蚀风险概率
瞭望台柱钢筋	第一组	-85	很小($<10\%$)
	第二组	-29	
	第三组	-4	
警钟台梁钢筋	第一组	-130	较大
	第二组	-104	
	第三组	-74	
警钟台楼板钢筋	第一组	-216	很大(接近 90%)
	第二组	-203	
	第三组	-194	

3.4 混凝土成分分析

对混凝土粉末试样的成分分析结果表明,瞭望台柱、警钟台梁和板的混凝土主要含 CaCO_3 、 SiO_2 等成分,与普通碳化混凝土成分相似,没有检测到氯离子等其他特殊成分。但是,由于取样部位靠近钢筋的原因,X 射线衍射仪检测到少量的铁离子,这可能是来自于钢筋的锈蚀产物。

从理论上分析,未受污染的混凝土的主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (主要来自水泥水化反应)和 SiO_2 (主要来自骨料)。混凝土碳化过程中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 和 H_2O 发生反应生成 CaCO_3 。成分分析结果表明,混凝土保护层的混凝土主要成分为 CaCO_3 和 SiO_2 ,检测部分的混凝土已经被碳化,这与酚酞碳化深度检测的警钟台梁和板结果一致。瞭望台柱也检测到 CaCO_3 成分,这应该这是由于柱内混凝土有部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被碳化成 CaCO_3 ,但由于没有完全被碳化,原位酚酞检测仍显示粉红色。

4 建 议

基于病害分析结果,建议警钟台屋面防水重做,警钟台地面增设防潮层,以及内墙地面处增设防潮层;针对混凝土疏松剥落和钢筋严重锈蚀的问题,建议采用传统挖补修复法,更换旧混凝土;针对面积较大的混凝土碳化 and 钢筋锈蚀问题,可通过电化学再碱化技术来提高混凝土碱性,降低钢筋的锈蚀程度,以阻止或避免钢筋的继续锈蚀。建议宁波市文物部门正式委托其他检测部门,结合钢筋腐蚀电位的检测数据和钢筋锈蚀层厚度的检测结果,更加准确地对钢筋锈蚀程度和锈蚀速率进行定量分析。

5 结 论

本课题组基于最少干预原则,使用混凝土碳化深度检测的原位酚酞测试技术、混凝土表面回弹强度检测技术、钢筋腐蚀程度的电化学技术和针对混凝土成分分析的 X 衍射仪技术,对宁波鼓楼钢筋混凝土

结构瞭望台和警钟台进行病害分析。整个检测过程和检测结果表明:

1)原位酚酞检测技术、表面回弹检测技术、电化学腐蚀电位检测技术对建筑本体基本无损伤,非常适用于钢筋混凝土结构文物建筑的病害分析,但检测数据也存在一定的不稳定性和不确定性;

2)基于X射线衍射仪的混凝土成分检测能够依据检测结果进一步判断混凝土是否受到氯离子和硫酸盐污染,有助于全面地分析混凝土的病害情况;

3)混凝土碳化是宁波鼓楼钢筋混凝土结构瞭望台和警钟台病害的主要原因,梁和板的混凝土碳化深度已经达到甚至超过混凝土保护层厚度,板内钢筋锈蚀程度严重,柱和梁内钢筋情况较好。

综上所述,这4种接近无损的检测技术的综合使用,可以较全面地了解钢筋混凝土结构的病害情况,并对病害原因进行深入分析。与本课题组前期的浙江省湖州市嵛塘碑亭检测技术^[17]相比,此次检测开发了原位酚酞检测技术,增加了表面回弹检测技术,优化了电化学腐蚀电位检测技术,补充了实验室基于X射线衍射仪的混凝土成分检测分析,因此可以作为其他钢筋混凝土结构文物类建筑的病害检测与分析的参考。

参考文献:

- [1] 俞伯平,徐东海.混凝土碳化的研究与进展[J].河南建材,2015(3):201.
- [2] 黄鹏程.酸雨对建筑物的危害及防治[J].柳钢科技,2005(3):32.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.回弹法检测混凝土抗压强度技术规程:JGJ/T 23—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 张智.钻芯法与回弹法在隧道衬砌强度检测中的应用分析[J].铁道建筑,2014(5):60.
- [5] 胡在良,李晋平,张佰战.混凝土强度钻芯法检测与评定的若干问题分析[J].铁道建筑,2012(11):131.
- [6] 钟兴武,陈正仕,张永振.无损检测技术在混凝土工程中的应用[J].四川水利,2015(4):16.
- [7] 庄英豪.测定混凝土碳化深度的指示剂溶液[J].混凝土与水泥制品,1987(2):21.
- [8] 王清贵.松花江大桥混凝土碳化深度检测与研究[J].黑龙江交通科技,2010(3):97.
- [9] 田兴玲,周霄,高峰.无损检测及分析技术在文物保护领域中的应用[J].无损检测,2008,30(3):178.
- [10] 王红霞.回弹法在水利工程混凝土检测中的应用研究[J].北京农业,2015(6):155.
- [11] Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete: ASTM C 876-91[S]. West conshohocken,PA:ASTM International,1999.
- [12] 李悦,于鹏超.钢筋锈蚀检测评价方法的综述[J].建材世界,2015,36(5):34.
- [13] 冯涛,吴光,张夏临.X射线衍射分析技术在花岗岩物相分析上的应用[J].铁道建筑,2008(4):97.
- [14] 静婧.X射线粉末衍射仪的基本原理和物相分析方法[J].赤峰学院学报(自然科学版),2015,31(2):26.
- [15] 胡耀东.X射线衍射仪在岩石矿物学中的应用[J].云南冶金,2010,39(3):61.
- [16] 孟军涛.碳化深度对回弹法检测混凝土强度的影响[J].铁道建筑,2016(10):133.
- [17] 童芸芸,马超,叶良,等.嵛塘碑亭碳化腐蚀再碱化修复现场实验研究[J].浙江科技学院学报,2016,28(6):413.