

文章编号: 1674—8247(2020)05—0092—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.018

高速铁路桥墩耐久性因素分析与质量控制

温双义 周戈

(津滨城际铁路有限责任公司, 天津 300011)

摘要:高速铁路桥墩基本采用现场浇筑,其混凝土结构的耐久性影响因素较多。本文对组成桥墩的桩基、承台和墩身的耐久性影响因素进行了逐项分析,并针对桥墩各部位的耐久性特点和主要侵蚀介质的劣化机理,提出了相应的质量控制措施。其研究成果对高速铁路桥墩的耐久性设计和施工具有一定的指导意义。

关键词:混凝土;桥墩;耐久性;机理;质量控制

中图分类号:U443.22 **文献标志码:**A

Analysis on Factors Influencing the Durability of High-speed Railway Bridge Piers and Quality Control

WEN Shuangyi ZHOU Ge

(Tianjin-Binhai Intercity Railway Co., Ltd., Tianjing 300010, China)

Abstract: Since high-speed railway bridge piers are generally poured in place, many factors will influence the durability of the concrete structure. In this paper, the factors influencing the durability of the pile foundation, pile cap and body of the bridge pier are analyzed one by one, and corresponding quality control measures are put forward according to the durability characteristics of each part of the bridge pier and the deterioration mechanism of the main erosion media. The research results have certain guiding significance for the durability design and construction of high-speed railway bridge piers.

Key words: concrete; bridge pier; durability; mechanism; quality control

在高速铁路桥梁主体结构的建设过程中,梁基本采用定型预制,桥墩采用现场浇筑,在混凝土结构耐久性影响因素方面,桥墩相比预制梁更复杂。TB 10005-2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》^[1-2]规定,桥梁主体结构设计使用年限为100 a。为保证桥墩的耐久性,需对组成桥墩的桩基、承台和墩身的耐久性影响因素逐项分析,提出相应对策。与其他钢筋混凝土结构一样,桥墩耐久性寿命的评判准则为保护层的完全侵蚀寿命准则、锈胀开裂寿命准则、裂缝宽度和钢筋锈蚀量限值寿命准则和承载力寿命准

则^[3-4]。这四项评价准则是相互关联和影响的,对于高速铁路桥墩结构来说,主要是控制保护层厚度和裂缝宽度两项指标。理论和实践证明,采用高性能混凝土材料有助于实现耐久性目标。高性能混凝土是以普通混凝土的水泥、砂、石、水四种材料为基础,通过添加复合超塑化剂(高效减水剂)和活性掺合料配合而成,其混凝土性能以工程项目的设计、施工和使用的特定要求为目标^[5]。目前,高性能混凝土配合比设计正由指令式设计(或经验设计)向性能设计发展,但在大规模的基建工程中,一般采用操作性较强的指令式设计,

收稿日期:2020-02-26

作者简介:温双义(1960-),男,教授级高级工程师。

引文格式:温双义,周戈. 高速铁路桥墩耐久性因素分析与质量控制[J]. 高速铁路技术,2020,11(5):92-96.

WEN Shuangyi, ZHOU Ge. Analysis on Factors Influencing the Durability of High-speed Railway Bridge Piers and Quality Control[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):92-96.

它源于因无法对劣化混凝土环境因素的综合作用效应(尤其是复合效应)进行完全量化,故以规范形式规定混凝土配合比的各项最低指标,以此保证工程质量的目标需求。

1 桩基耐久性影响因素分析与质量控制

高速铁路桥墩基础一般采用钢筋混凝土桩基,桩基耐久性的主要影响因素是混凝土腐蚀和钢筋锈蚀。混凝土的主要防腐措施是通过优化混凝土的配合比来提高混凝土密实度;钢筋的常用防锈蚀措施是保证足够的钢筋保护层厚度以及防止断桩、夹泥、夹砂等缺陷发生,以阻止环境水分渗入^[6]。

1.1 桩基混凝土配合比优化

在沿海、酸雨、酸性地下水和高盐土壤地区,桩基混凝土易受到硫酸根离子和氯离子的化学侵蚀。硫酸盐的腐蚀机理是:水泥水化物氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在硫酸盐腐蚀下易分解,遇软水还会溶解。硫酸盐对混凝土腐蚀由强到弱的排序为硫酸镁 > 硫酸钠 > 硫酸钙。试验表明,在硅酸盐或普通硅酸盐水泥中掺加 30% 的粉煤灰,其抗硫酸盐腐蚀的效果显著提高。在硫酸盐含量高的环境下,应采用石膏矿渣水泥或矾土水泥^[7]。

对于含有活性骨料的混凝土,氯盐会加速碱骨料反应,从而造成混凝土的破坏,除此以外,对素混凝土几乎无影响。氯盐的腐蚀机理是:氯离子渗入混凝土到达钢筋表面,使钢筋钝化膜的 pH 值迅速降低,形成腐蚀电池致钢筋锈蚀,随之混凝土开裂、剥落,进而加剧钢筋锈蚀,混凝土结构最终破坏。可通过提高桩基钢筋外侧混凝土保护层的防渗能力来防氯盐腐蚀,试验表明,在硅酸盐或普通硅酸盐水泥中加入粉煤灰和矿粉后,其抗氯盐腐蚀的效果明显提高。当总掺量(粉煤灰 + 矿粉)小于 40% 时,掺量越大,抗氯化能力越强,且掺入矿粉比掺入粉煤灰的抗氯能力更强^[8]。

沿海地区处于硫酸盐和氯盐的复合腐蚀环境下,一般采用双掺(粉煤灰 + 矿粉)混凝土,并经试验确定掺加量。如京沪高速铁路静海 - 沧州段,桩基处于 D3 + H4 + L3 环境条件下,采用 C30 混凝土,水胶比 0.42,胶凝材料 370 kg,粉煤灰掺量为 8.1%,矿粉掺量为 5.4%。甬台温高速铁路桩基采用 C30 混凝土,水胶比 0.36,胶凝材料 429 kg,粉煤灰掺量为 30%^[9]。

综上分析可知,通过掺加活性矿物料来优化混凝土配合比,对提高混凝土抗化学侵蚀起重要作用。高

速铁路桥墩桩基常采用 C30 混凝土,坍落度 160 ~ 200 mm,水胶比 0.35 ~ 0.45,采用高效聚羧酸系减水剂,掺加粉煤灰和矿粉。

1.2 桩基保护层厚度控制

桥墩桩基位于地表下,其钢筋保护层厚度不宜小于 70 mm。在钢筋笼下放桩孔过程中,可通过在钢筋笼外侧的箍筋上固定预制混凝土圆形垫块来保持孔壁与箍筋间距,从而使钢筋的混凝土保护层厚度得到保证。

1.3 桩基混凝土浇筑质量控制

混凝土灌注桩常见质量问题有断桩和夹泥层、夹砂层桩。发生断桩和夹泥、夹砂桩时,土壤和地下水中的化学侵蚀物直接与钢筋接触,致使钢筋锈蚀,进而影响桩基的耐久性。工程中通常采用低应变反射波法或声波透射法检测灌注桩的质量。

2 承台耐久性影响因素分析与质量控制

承台是桩基和墩身之间的受力转换层,断面尺寸较大,主要承受压力。承台的耐久性影响因素有裂缝、冻融和化学腐蚀等。

2.1 承台混凝土裂缝控制

高速铁路承台断面尺寸一般大于 4 m × 4 m × 2 m,属于大体积混凝土。承台耐久性问题主要为混凝土开裂,裂缝发展进一步诱导钢筋锈蚀。混凝土开裂的主要原因在于,水泥硬化过程中,收缩和水化热产生的应力极易造成裂纹或裂缝的产生,其解决途径是降低混凝土的弹性模量或减小其收缩应力。目前,国际公认的措施有降低混凝土强度(降低弹性模量)、减少水泥用量、降低用水量、掺加引气剂、掺加矿物掺合料和控制温度梯度。试验表明,对于承台这类大体积承压构件,混凝土拌合料的指标宜按强度不大于 C30,水胶比不小于 0.4,粉煤灰掺量约 40% 来控制^[10]。粉煤灰活性较低,从而使混凝土强度增长约滞后 14 d,虽然混凝土早期强度较低(弹性模量低),但 90 d 后,强度可达到 C30。若工期紧张,可采用双掺(粉煤灰 + 矿粉)方式来加快强度的提升速度。

2.2 承台保护层厚度和养护质量控制

承台钢筋保护层厚度一般为 50 mm,由于承台钢筋较粗、较长,施工工序较多,钢筋现场绑扎误差较大,故保护层厚度宜按 70 mm 控制。在养护方面,不宜过早拆除模板和覆盖层,以免混凝土表面与环境的温差超过 15 ℃而引起开裂。当工期紧张时,宜调整混凝土终凝时间或在承台内设冷却管控制温度梯度。

3 墩身耐久性影响因素分析与质量控制

高速铁路桥梁墩身的耐久性影响因素有碳化、冻融、化学腐蚀和裂缝等,墩身与地表接触点以上约1 m处易受干湿交替影响^[11],是墩身耐久性控制的重中之重。

3.1 墩身混凝土配制质量控制

墩身混凝土配制质量需满足墩身的构造性能、耐久性能和工作性能。采用高性能混凝土满足墩身耐久性时,重点在于提高墩身的表层抗渗性和抗冻性。

3.1.1 墩身表层抗渗性的提高

在常见的混凝土劣化因素中,膨胀和开裂都与混凝土的渗透性有很大关系。美国梅塔(Mehta)教授提出“最简单也是最有效的解决方案,是回到缺乏耐久性的基本原因或者根源上,即混凝土的渗透性和服务期影响渗透性增大的因素上来”^[12]。混凝土劣化的内因是微裂缝和孔隙,外因是水和各种阴离子。连通孔隙、环境水和侵蚀介质是钢筋混凝土结构严重劣化的必备条件,侵蚀介质通过连通孔隙或微裂缝向混凝土内部渗透是引起混凝土劣化的关键过程,渗透性是影响混凝土耐久性的重要因素。通过控制混凝土的表面裂缝和内部微裂缝连通,使其在使用期内不渗水、不开裂,就可大幅度地延长混凝土的使用寿命。提高墩身表层抗渗性的主要措施有:

(1) 采用较低的水胶比。水泥达到完全水化所需的用水量约为水泥用量的25%,由于物理吸附作用,另有约15%的水被限制在胶体孔隙中,不能参与水化作用,因此,水泥完全水化所需的用水量至少为水泥质量的0.4倍。试验表明,当水胶比小于0.40时,随着水胶比的降低,混凝土的强度可持续提高,虽然水泥未完全水化,但未水化的水泥颗粒可作为细微骨料发挥作用。较低的水胶比还能减小水泥浆中10~0.1 μm的毛细孔隙体积,降低混凝土的孔隙率并减小孔隙尺寸。在掺入高效聚羧酸系减水剂和矿物料后,可大幅降低水胶比,我国已建成高速铁路的墩身常用水胶比为0.30~0.40。

(2) 提高混凝土的强度。混凝土强度与其抗渗性、抗冻性、抗磨损性、耐腐蚀性等均有较高的相关性,且对抗冻性的影响尤为突出。在保证耐久性能的前提下,采用C35及以上强度的混凝土符合节能、绿色环保和经济的科学理念。我国已建成高速铁路的墩身常用混凝土强度为C35~C45。

(3) 掺加粉煤灰、磨细矿渣等矿物料。粉煤灰与

水泥掺合后具有形态效应、活性效应和微集料反应,能明显改善和增强混凝土的结构强度、均质性和致密性。磨细矿渣具有水硬性胶凝材料的性能,其微细颗粒可填充水泥颗粒间的间隙,改善水泥石的微观孔隙结构,当与高效减水剂复合使用时,具有辅助减水作用;当与粉煤灰复配时,能使二者“优势互补”,改善混凝土的性能。

3.1.2 墩身抗冻性的提高

在寒冷地区,冻融破坏是墩身不可忽略的耐久性影响因素,常发生在与水接触的干湿、冷热交替的墩身根部。试验表明,存在于混凝土毛细孔中的自由水在冻融循环中起破坏作用,冻结温度越低,冻结速率越快,对混凝土的损伤越大。当冻结温度由-5℃降到-10℃时,冻融破坏效果出现突变,在-10℃时损伤明显加大。在冻融单一因素下,公认的混凝土冻融循环次数与服役寿命的数学模型为:

$$t = \frac{kN}{M} \quad (1)$$

式中: t ——混凝土结构使用寿命(a);

k ——冻融比例系数,即室内一次冻融循环相当于室外自然环境下冻融循环的比例,平均值可取12;

N ——混凝土室内试验冻融循环次数;

M ——混凝土结构在实际环境中一年可经受的冻融循环次数^[13]。

混凝土抗冻性影响因素的排序为水胶比>平均气泡间距和含气量>饱水状态>强度>外加剂和矿物掺合料>集料、水泥品种和其他因素。水胶比和含气量是影响抗冻性的主要因素^[14]。含气量不但对混凝土抗冻性非常重要,还可改善混凝土的和易性,尤其是在微细气泡孔径小于300 μm且气孔间距小于0.25 mm的条件下。日本规范要求无论使用环境和结构部位,混凝土必须全部掺加气剂,欧美许多国家的规范也要求掺加,我国水工工程规范要求全部掺加。试验表明,当粉煤灰掺量小于30%时,其对混凝土的抗冻性没有明显影响。

3.2 墩身保护层厚度控制

混凝土的结构劣化总的来说是侵蚀介质由表及里的渗透作用。墩身钢筋的混凝土保护层厚度满足要求是提高混凝土耐久性最简单、最有效、最经济的措施。理论研究和实践表明,在碳化或氯盐单一因素下,控制保护层厚度是保证结构耐久性的最佳措施。

(1) 碳化因素下(一般大气环境)的保护层厚度。在碳化因素下,混凝土钢筋表面因保护层碳化而脱钝,

钢筋开始锈蚀时间为碳化深度到达钢筋表面的时间,常用菲克(Fick)第一定律数学模型表示:

$$x = a\sqrt{t} = \sqrt{\frac{2D_e C_0}{m_0}}\sqrt{t} \quad (2)$$

式中: x ——碳化深度;

a ——碳化速度系数;

t ——碳化时间;

D_e —— CO_2 在混凝土中的有效扩散速度;

C_0 ——环境中 CO_2 的浓度;

m_0 ——单位体积混凝土的 CO_2 吸收量。

试验表明,一般环境下碳化引起的钢筋锈蚀,以干湿交替环境下最为不利,在相对湿度65%的干燥环境下,碳化深度(保护层厚度)大体与时间(耐久年限)的平方根成正比。

(2) 氯化因素下的保护层厚度。在氯化因素下,氯离子浓度梯度沿暴露混凝土表面扩散到钢筋表面方向的变化可使用菲克(Fick)第二定律数学模型表示:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中: $C(x,t)$ —— t 时刻距混凝土表面 x 处的氯离子浓度,一般以氯离子占水泥或混凝土重量百分比表示;

t ——混凝土暴露时间;

x ——距混凝土表面深度;

D ——氯离子扩散系数。

由式(3)可以看出,若已知钢筋保护层厚度 x ,氯离子扩散系数 D 和钢筋表面氯离子临界浓度(一般取混凝土质量的0.05%),就可计算出氯离子扩散到钢筋表面达到临界浓度的时间(耐久年限) t 。对于低水胶比、大掺量(矿物掺和料掺入量)的混凝土,氯离子侵入混凝土的深度(保护层厚度)大体与时间(耐久年限) $t^{0.2}$ 成正比。

我国现行规范中,钢筋混凝土的保护层最小厚度主要依靠工程经验来确定。工程中,通常使用锥型(或工字型)细石混凝土(或砂浆)垫块对钢筋定位,垫块的水胶比不大于0.4,抗渗能力和抗压强度高于本体混凝土,构件侧面和底面的垫块数量不小于4块/ m^2 。常采用电脉冲法非破损钢筋保护层厚度测定仪来检测保护层厚度。

3.3 墩身施工与养护质量控制

墩身模板安装、浇筑和养护的工序质量控制是确保混凝土耐久性的重要措施,按施工顺序可分为施工质量控制和养护质量控制。

3.3.1 墩身施工质量控制

(1) 墩身与承台界面的质量控制。墩身底界面处于干湿、冷热交替的外部环境中,界面的水平施工缝处易出现漏浆、夹渣和收缩裂缝等现象,致使侵蚀介质渗透到钢筋表面。其质量控制要点包括承台剔凿面应水冲干净、墩身模板与承台接触界面应封闭不漏浆、先敷设50 mm砂浆结合层(与混凝土强度相同)再浇筑混凝土等。

(2) 墩身模板安装质量控制。对模板拼缝进行封闭处理,避免漏浆造成钢筋保护层密实性变差。

(3) 混凝土振捣质量。目前,施工采用的泵送混凝土为流态或高流态混凝土,振捣5~10 s就能达到要求的密实度。在作业中,应优先保证保护层的密实度,加入引气剂时,不能振捣过度,含气量应不小于2%,高频振捣时间应小于10 s。

3.3.2 墩身混凝土养护质量控制

墩身为大体积混凝土,墩身表面出现的裂缝大多是由养护不当造成的。其养护原则是:控制水泥水化热引起的内部温度最高点至模板间的温度梯度,使混凝土内任意两点间的温差小于20℃,混凝土表面与环境的温差小于15℃,降温速度小于2℃/d。混凝土的养护方法和养护时间需综合考虑混凝土强度等级、环境的温湿度、风速和构件尺寸等因素,养护时间应根据混凝土的强度比来确定(同条件下养护开始和结束时的强度)。墩身养护应重点做好以下工作:

(1) 夏(热)期养护质量控制。当昼夜平均气温高于30℃时,混凝土入模温度应小于30℃,拆模后,立即用无纺布或棉毡缠裹,外面用塑料布覆盖。在墩帽置水箱,向墩身四周均匀滴灌,使无纺布或棉毡保持潮湿状态。

(2) 冬期养护质量控制。当昼夜平均气温连续3 d低于5℃或最低温度低于-3℃时,混凝土入模温度应大于5℃。一般需搭设保护棚,拆模时,应保证混凝土表面与环境的温差小于15℃。

(3) 混凝土内设冷却管的管理。工程实践表明,现行高速铁路桥梁墩身一般无需内设冷却管来降低混凝土内部的水化热。特殊情况下,需设冷却管时,应注意内设冷却管外壁与混凝土接触面的温差,以免混凝土内部产生微裂缝。采用相变材料作冷却介质可避免此问题的发生。

3.4 墩身根部的耐久性附加措施

墩身根部的耐久性是工程中的关注重点,根据工程经验,常采取的措施有:

(1) 在硫酸盐、氯离子等侵蚀性介质环境以及高

盐、严寒环境下,应采取隔离措施,可在混凝土拆模后且表面未污染前敷涂隔离涂层。常用涂料有硅烷类和氟碳树脂类等。

(2) 在磨蚀环境下(风沙、泥沙、流冰等),应采取增加保护措施或专项设计保护措施。拆模后,可在混凝土外壁浇筑一定厚度的钢筋混凝土保护层或在墩身根部增加钢板护套。

(3) 在严重腐蚀环境地区,可对墩身根部1 m左右部位浇筑特制高性能耐久混凝土,即墩身采用两种配合比的混凝土,以达到经济适用的目标。

4 结束语

本文对桥墩各部位的耐久性特点和主要侵蚀介质的劣化机理进行了分析,并提出了相应的质量控制措施。为搞好高速铁路桥墩各部位的耐久性防护,建议在今后的工程建设过程中:

(1) 在政策上加大对混凝土耐久性的重视。在招标文件中,将混凝土结构耐久性控制措施作为评标条件之一,要求设计、施工、监理单位分别编制混凝土结构耐久性的专项设计、专项施工方案和专项监理方案。

(2) 加强高性能混凝土配制的质量控制。高速铁路为线性工程,其混凝土材料来源的地域性强、供应选择范围小,混凝土配合比试验宜委托专业科研单位提前开展。

(3) 从混凝土耐久性角度出发,制定桥墩桩基断桩和夹泥、夹砂桩的质量控制措施,承台应以控制大体积混凝土温度裂缝为重点,墩身应以控制钢筋保护层的厚度、防渗性能和防裂缝为重点。在较严重腐蚀环境下,墩身根部混凝土结构应增加耐久性附加措施。

参考文献:

- [1] TB 10005-2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S]. TB 10005-2010 Code for Durability design on Concrete Structure of Railway [S].
- [2] GB/T 50476-2008 混凝土结构耐久性设计规范[S]. GB/T 50476-2008 Code for Durability Design of Concrete Structures [S].
- [3] 曹卫群. 干湿交替环境下混凝土的氯离子侵蚀与耐久性防护[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. CAO Weiqun. Chloride Ion Erosion and Durability Protection of Concrete under the Alternation of Wetting and Drying[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [4] 潘洪科, 王穗平, 祝彦珍, 等. 钢筋混凝土结构锈胀开裂的耐久性寿命评判与预测研究[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 111-116. PAN Hongke, WANG Suiping, ZHU Yanzhi, et al. The Judgment and Prediction on Reinforced Concrete Structures' Durability Based on Steel Rustiness and Concrete Cracking[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 111-116.
- [5] 冯乃谦. 高性能与超高性能混凝土技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. FENG Naiqian. Technology of HPC & UHPC[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [6] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese. 钱觉时译. 混凝土设计与控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese. Design and Control of Concrete Mixtures Design and Control of Concrete Mixtures[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2005.
- [7] TB 10210-2001 铁路混凝土工程施工技术指南[S]. TB 10210-2001 Code for Construction of Concrete and Masonry Railway Engineering[S].
- [8] 王伟. 氯离子环境下混凝土结构耐久性设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006. WANG Wei. Research on Durability Design of Concrete Structure in Environment Containing Chloride Ions[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [9] 赵国堂, 李化建. 高速铁路高性能混凝土应用管理技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. ZHAO Guotang, LI Huajian. High-performance Concrete Application Management Technology for High-speed Railway Construction [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [10] 李文伟. 混凝土开裂观察与思考[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. LI Wenwei. Observation and Thinking of Concrete Cracking [M]. Beijing: China Water Power Press, 2013.
- [11] 住房和城乡建设部标准定额司, 工业和信息化部原材料工业司. 高性能混凝土应用技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Department of Standards and Quotas of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development, The Department of Raw Materials Industry of the Ministry of Industry and Information Technology. Technical Guide for the Application of High-performance Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [12] 占宝剑. 盐水侵蚀和冻融对混凝土性能的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009. ZHAN Baojian. Study on the Influence of Brine Erosion and Freezing & Thawing on the Performance of Concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [13] 中国工程院土木水利与建筑学部工程结构安全性与耐久性研究咨询项目组. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 中国建筑工业出版社, 2004. Engineering Structure Safety and Durability Research and Consulting Project Team, Division of Civil and Hydraulic Engineering and Architecture, Chinese Academy of Engineering. Guidelines for Durability Design and Construction of Concrete Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.