

轨道交通高架桥墩冬季施工混凝土泛碱机理分析

路林海¹, 周立民¹, 刘家海¹, 马万国²

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 中建八局第二建设有限公司)

摘要: 北方寒冷地区混凝土冬季施工是不可避免的。济南轨道交通 R1 号线工程高架桥梁墩柱保温措施拆除后, 顶部出现泛碱现象, 而中部及下部未出现。结合工程实际分析, 墩柱发生泛碱主要是由于最外层包裹塑料薄膜养护方式选择不当造成, 通过直接包裹土工布改变墩柱的养护方式, 混凝土泛碱得到了有效缓解和抑制。冬季施工防冻剂的掺入使得混凝土原材料中可溶性无机盐含量增加, 也对泛碱的发生起到促进作用。该文总结阐述了冬季施工混凝土泛碱的抑制措施, 为北方寒冷地区高架桥梁墩柱施工防止混凝土泛碱提供了理论依据。

关键词: 混凝土; 冬季施工; 泛碱; 机理分析; 抑制措施

在中国北方寒冷地区, 混凝土冬季施工十分普遍。相关国家标准及行业规范中都对冬季施工做了明确规定: 当室外日平均气温连续 5 d 稳定低于 5 °C 即进入冬期施工。当温度降至 5 °C 时, 水泥水化反应速率显著降低; 当温度降至 0 °C 以下时, 水泥水化作用基本停止; 当温度达到 -2 ~ -4 °C 时, 混凝土内部水分开始结冰膨胀, 产生冰胀应力, 使水泥石结构内部产生微裂纹, 同时水泥与砂石和钢筋间的黏结力降低。受冻后的混凝土在解冻后, 其强度虽然继续增长, 但无法达到原设计强度等级。冬季施工时, 为防止混凝土在早期凝结硬化过程中受冻破坏, 保证后期强度持续增长, 需在混凝土制备、施工阶段采取原材料加热、掺入外加剂以及特殊养护方式等措施, 加大了施工难度, 增加了成本。若措施不当, 还会降低混凝土性能, 对工程实体质量造成一定影响。

水泥混凝土“泛碱”俗称析白或起霜, 是由于盐分沉积在混凝土表面而形成白色粉末、絮团或絮状物质, 通常不会造成明显的破坏, 但会影响混凝土外观效果。泛碱是一个相对复杂的物理、化学和物理化学过程。不同的研究者对水泥混凝土泛碱的形成机理有着不同的理解, 然而大多数认同的是由于混凝土内部的水分迁移和表面水分蒸发散失带出的可溶性盐或碱在混凝土表面形成白色沉积物造成的。

济南轨道交通 R1 线高架桥梁冬季施工, 拆除保温措施后, 墩柱顶部出现泛碱现象, 而墩柱中部、下部

并未出现。针对这种特殊现象, 结合该工程实际情况, 该文首先分析北方寒冷地区高架桥梁墩柱冬季施工混凝土泛碱的产生机理, 并对混凝土墩柱泛碱的抑制措施进行阐述。

1 工程概况

济南轨道交通 R1 线位于济南西部新城区, 途经三区, 连接济南西客站、西部城区、大学城、园博园、创新谷等重要位置节点, 全线 26.04 km, 高架段约 17.04 km, 地下段约 9.00 km, 设置车站 11 座, 含高架车站 7 座, 地下车站 4 座。高架段桥梁墩柱直径 2.2 m, 混凝土强度等级 C40。

济南地处中纬度内陆地带, 属暖温带大陆性气候, 气温 1 月份最低, 月平均最低气温 -1 °C, 高架桥梁墩柱混凝土施工严格按照冬季施工方案进行, 以避免新浇筑混凝土的早期受冻问题。

2 混凝土原材料及配合比

2.1 混凝土原材料

采用 P.O.42.5 级硅酸盐水泥, 其化学成分如表 1 所示, 物理力学性能如表 2 所示; 粉煤灰为山东产 I 级粉煤灰。

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 山东省住房与城乡建设厅科技项目(编号: 2014QG009)

作者简介: 路林海, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: cqzlm@126.com

表 1 水泥基本物理力学性能

细度/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准稠 度/%	初凝时 间/min	终凝时 间/min	安定性 (沸煮法)	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
321	28.8	242	285	合格	31.8	51.0	5.8	9.5

表 2 水泥化学成分

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	总碱量	烧失量
22.0	2.5	5.7	61.3	2.1	1.9	0.52	3.5

细骨料为泰安中砂,细度模数 3.0,Ⅱ区级配,含泥量 0.8%。

粗骨料为长清碎石。5~20 mm 连续级配,堆积密度为 1 600 kg/m^3 ;16~31.5 mm 连续级配,堆积密度为 1 580 kg/m^3 ,两种级配石子混合使用。

聚羧酸高效减水剂性能指标如表 3 所示;聚羧酸减水防冻剂性能指标如表 4 所示。

2.2 混凝土配合比

轨道交通高架桥梁墩柱工程施工采用的混凝土标号为 C40,配合比如表 5 所示。

表 3 聚羧酸高效减水剂性能指标

固含量/ %	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	减水率/ %	氯离子 含量/%	pH 值	碱含量/ %	硫酸钠/ %
11	1.03	31	0.28	7.23	4.61	3.55

表 4 聚羧酸减水防冻剂性能指标

固含量/ %	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	减水率/ %	氯离子 含量/%	氨释放 量/%	-10℃抗压强度比/%	
					7 d	28 d
25.1	1.18	13	0.01	未检出	36	146

表 5 墩柱混凝土配合比

水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料		减水剂	防冻剂	水
			5~20 mm	16~31.5 mm			
320	80	736	884	220	8.4	6.3	160

3 冬季施工措施

混凝土冬季采取暖棚法、综合蓄热法施工,混凝土入模温度不低于 5℃。墩柱施工采用钢模板,并在模板外铺贴橡胶保温棉。混凝土浇筑完成后,墩柱顶面用土工布整体覆盖保温,墩顶预留钢筋用土工布包裹,并用绳索系牢;墩柱模板拆除(3~5 d)后,由里到外依次使用塑料薄膜、土工布、防雨棉被及高强度塑料布(封顶)包裹,并用绳索固定牢固。

保温措施拆除后,部分墩柱顶部 2~3 m 范围内出现较明显的泛碱现象(图 1),而墩柱中、下部无泛碱发生。

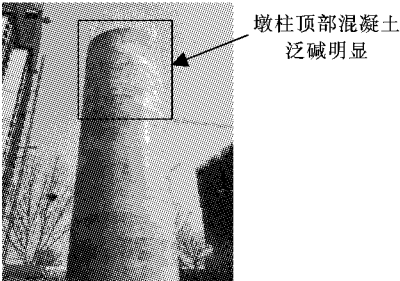


图 1 墩柱混凝土泛碱现象

4 泛碱机理及改进方案

4.1 泛碱机理

泛碱在混凝土表面形成的白色物质主要为 Ca-

CO₃, 另外还有少量的 CaSO₄ · 2H₂O、K₂SO₄、Na₂SO₄ 等可溶性盐类物质。水泥在发生水化反应生成水化硅酸钙的同时还会生成大量的氢氧化钙。氢氧化钙作为一种极易溶解的碱,在凝结硬化的早期,往往溶解于混凝土的自由水中。随着龄期的不断增长,水泥凝结硬化不断进行,混凝土内部自由水沿着微小裂隙及毛细孔向表面迁移,自由水移动到混凝土表面后,逐渐蒸发散失,而溶解于水中的氢氧化钙则迅速地吸收空气中的二氧化碳,生成不溶于水的白色碳酸钙,并沉积在混凝土表面,形成泛碱。混凝土发生泛碱的机理如图2所示。同理,混凝土中的其他可溶性盐也会随着自由水迁移到混凝土表面,随着水分的蒸发散失,可溶性盐结晶析出,也会在混凝土表面形成“泛碱”。

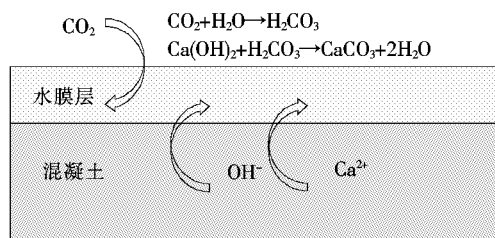


图2 混凝土表面碳酸钙形成过程示意图

4.2 原因分析

混凝土泛碱是一个复杂的物理、化学和物理化学过程,受到很多因素的影响,如:原材料、施工质量、养护方式等。通过对比分析,该工程混凝土产生泛碱,且只在墩柱顶部2~3 m范围内产生,主要是由保温养护措施及原材料这两方面原因引起的,其中保温养护措施占主导作用。

4.2.1 保温养护措施

混凝土是一种多孔介质材料,在其内部会发生水分迁移。一般认为,混凝土中水分迁移分为两种:一种是水分与周围环境的交换;另一种是由混凝土内部水分因水泥水化而发生迁移。水分在水泥混凝土中迁移主要是由扩散传输作用引起的,其迁移动力来自混凝土内部湿度梯度变化。

该工程混凝土墩柱侧面用塑料薄膜、土工布、保温棉被等包裹,顶面覆盖土工布保温。因此,混凝土墩柱只有顶面及顶面以下很小范围混凝土外表面能够与空气接触,进行水分交换。当空气湿度小于混凝土内部湿度时,混凝土中水分向空气中扩散,混凝土内部形成湿度梯度,水分自下而上迁移。

墩柱最外层包裹一层塑料布(封顶),由于墩柱顶端预留钢筋的原因,在顶部形成了一个具有温室效应

的“暖棚”。气温不断升高,加速了混凝土顶面水分向空气中扩散;“暖棚”内水蒸气遇冷(塑料布、钢筋)凝结成水滴,又降低了内部空气湿度,两种因素共同作用使得混凝土内部水分迁移持续不断进行。

随着混凝土内部水分迁移的不断进行,水泥水化产生的可溶性碱与盐也随着水分的迁移,在混凝土墩柱顶部富集。随着墩柱顶部水分的不断蒸发散失,溶解于水中的可溶性碱与盐则在混凝土表面结晶析出,形成“泛碱”。

由于保温措施第一层塑料薄膜的包裹密封作用,使得混凝土墩柱只有顶面能够与空气进行水分交换,导致混凝土内部水分自下而上进行迁移,最终导致了墩柱只在顶部发生“泛碱”,而墩柱中部及下部无“泛碱”产生。

4.2.2 原材料及配合比

通过对原材料和配合比的分析发现,冬季施工期间,混凝土制备掺入了防冻剂,而目前中国使用最广泛的防冻剂为无机化合物与有机化合物复合防冻剂。这就使得混凝土原材料中无机盐类含量增加,且多为可溶性无机盐。另外,矿物掺合料为粉煤灰,本身活性较低,在养护阶段氢氧化钙还未与粉煤灰反应,就随着混凝土内部水分的蒸发散失,与可溶性盐一同在混凝土表面结晶析出,形成了一层白色粉末,造成了“泛碱”。

冬季施工防冻剂的掺入使得混凝土原材料中可溶性无机盐含量增加,也对泛碱的发生起到促进作用。因此,在冬季施工过程中,混凝土配合比也需要进一步优化调整。

4.3 改进方案

结合上述原因分析,采用同种原材料同配比混凝土继续施工,改变墩柱的养护方式,包裹层中去除塑料薄膜的包裹,拆模后直接包裹土工布。保温养护结束,包裹层拆除后发现,墩柱混凝土表面未出现明显的泛碱现象,混凝土泛碱得到了有效缓解和抑制。混凝土表面直接接触具有透气性的土工布,而不是密封不透气的塑料薄膜,墩身混凝土表面都可以进行水分交换,混凝土内部各类可溶性盐或碱不会在墩柱顶部富集,从而避免了泛碱现象的产生。

就该工程而言,造成泛碱的主导因素为保温养护措施选取不当,原材料及配合比的影响只起到促进作用。

5 抑制措施

根据已有的研究成果,混凝土泛碱发生的必要条

件:① 混凝土中存在可溶性的碱或盐(Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+});② 混凝土中存在溶解可溶性碱或盐的自由水;③ 混凝土中存在可溶性碱或盐向表面迁移的通道;④ 混凝土内部与外部存在温湿差、压力差(利于水分蒸发)。

针对上述混凝土泛碱性的必要条件,结合工程实际特点,混凝土墩柱冬季施工抑制泛碱的措施如下:

(1) 控制原材料中 Na^{+} 和 K^{+} 等可溶性盐的含量。选用可溶性盐类含量低的粗细集料,控制外加剂中可溶性无机盐的含量并控制其掺量。

(2) 降低混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成量。混凝土中掺入粉煤灰、矿粉、硅灰等可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应的矿物掺合料,并对掺合料种类、掺量进行试验验证,以达到降低碱含量的目的。

(3) 提高混凝土密实度,阻止盐碱类物质迁移到混凝土表面。优化混凝土配合比,改善骨料颗粒级配,添加超细矿物掺合料,减少水泥石中毛细孔,提高混凝土密实度。

(4) 减少混凝土体系中的自由水。掺入高效减水剂,降低混凝土内部水分,使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 稳定存在于混凝土内部,而不迁移到混凝土表面。

(5) 冬季施工采用适当的保温措施,使混凝土内部水分均匀散失。避免内部水分发生单一方向扩散迁移,造成可溶性碱及盐在某一部位富集,形成泛碱。

6 结论

北方寒冷地区冬季施工不可避免采取必要的施工措施,高架墩柱冬季施工后在顶部出现泛碱现象,虽不会对结构受力及耐久性造成影响,但会影响混凝土外观质量,尤其对城市市政工程建设的影响更加显著。

该文依托济南轨道交通 R1 线工程,得到以下主要结论:

(1) 该工程冬季施工墩柱混凝土的保温养护措施是造成混凝土泛碱的主导因素。

(2) 后续施工过程中通过加强原材料、施工过程控制及改善保温方式等措施,有效抑制了泛碱的发生。

(3) 实际工程中,应针对混凝土泛碱性的必要条件,结合工程实际特点,采取相应的冬季施工抑制泛碱措施。

参考文献:

- [1] JGJ/T 104—2011 建筑工程冬期施工规程[S].
- [2] JTG/T F50—2011 公路桥涵施工技术规范[S].
- [3] JTS 202—2011 水运工程混凝土施工规范[S].
- [4] 王起才,陈川,张戎令,等.考虑持续低温影响的水泥水化放热计算模型[J].建筑材料学报,2015(2).
- [5] 陈川,王起才,张戎令,等.持续低温环境下的水泥水化特性试验研究[J].混凝土,2014(8).
- [6] 冯晓明.预拌混凝土冬期施工技术及其质量控制措施[J].混凝土,2005(11).
- [7] Kresse P. Studies of the Occurrence of Primary Efflorescence[J]. BetonwFert. tl. — Tech, 1982, 50: 590—597.
- [8] Kresse P. Efflorescence — Mechanism of Occurrence and Possibilities of Prevention [J]. BetonwFert. tl — Tech, 1987, 53: 160—168.
- [9] 朱绘美,王培铭,张国防.羟乙基甲基纤维素对水泥饰面砂浆沾污与泛碱的影响[J].商品砂浆的科学与技术,2011(11).
- [10] 周华新,何廷树.有机醇类防冻组分对液体防冻泵送剂性能的影响[J].新型建筑材料,2007(11).
- [11] 何廷树,王玥,徐一伦,等.盐类防冻组分对聚羧酸型防冻泵送剂性能的影响[J].硅酸盐通报,2016(6).
- [12] 刘浪涛,邵式亮,许金余,等.混凝土防冻剂的研究进展[J].硅酸盐通报,2005(7).
- [13] 乔墩,钱觉时,党玉栋,等.水分迁移引起的混凝土收缩与控制[J].材料导报,2010(9).
- [14] 沈春华,水中和,周紫晨.水泥基材料水分传输及动力学研究[J].武汉理工大学学报,2007(9).
- [15] Dale P Bentz, Phillip M Halleck, Abraham S Grader, et al. Water Movement During Internal Curing Direct Observation Using X-Ray Microtomography[J]. Concrete International, 2006(10): 39—46.
- [16] 秦麟卿,谢济仁,孙振亚.抹灰析霜的分析与防治[J].施工技术,1999(10).
- [17] 秦麟卿,谢济仁.析霜对混凝土的破坏与防治[J].混凝土,1999(6).
- [18] Anthony R R, Bernard T P. Composition for Eliminating Efflorescence in Portland Cement Products[P]. United States Patent, 1972.
- [19] 张灵,王培铭,朱绘美,等.矿渣粉和偏高岭土对水泥基饰面砂浆性能的影响[J].商品砂浆的科学与技术,2011(11).
- [20] Ebrahim N K, Ali A, John L. Provis. Efflorescence Control in Geopolymer Binders Based on Natural Pozzolan [J]. Cement Concrete Composites, 2012, 34(1): 25—33.
- [21] 王培铭,张灵,朱绘美,等.胶凝材料影响水泥基饰面砂浆泛碱的研究进展[J].材料导报,2011(5).