

上海地区轨道交通用混凝土的耐久性试验测试与分析

韩凤兰¹ 乐平欢² 张发兴³

1. 上海材九科技有限公司; 2. 上海虹口建设工程质量检测有限公司; 3. 上海建工建材科技集团股份有限公司

摘要: 轨道交通为百年耐久性建筑, 针对混凝土的耐久性问题, 对上海实际工程中的混凝土服役情况进行了大量的调研, 发现较多处典型的混凝土质量遭到破坏的耐久性问题, 大大降低混凝土的服役寿命。本文对C30、C35、C40、C45、C50、C60等不同强度等级的混凝土进行抗渗、抗氯离子渗透、非接触收缩以及碳化测试, 并根据相关标准按测试结果进行耐久性评价。所有强度等级的混凝土都很好地满足了混凝土的抗渗要求; C50和C60强度等级混凝土的收缩值远大于C50强度等级以下的; 随着强度等级的提高, 混凝土的抗碳化能力也不断提升, 甚至当强度等级达到C45以上, 混凝土就不再碳化。

关键词: 混凝土; 抗渗; 抗氯离子渗透; 非接触收缩; 碳化; 耐久性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.07.028

一、上海地区混凝土耐久性分析

混凝土耐久性是指混凝土在使用过程中抵抗环境中侵蚀介质作用并长期保持其使用功能和完整性的特性, 主要包括化学侵蚀、碳化、钢筋锈蚀、冷融以及碱骨料反应等。混凝土耐久性问题比较复杂, 涉及物理、化学、力学等多种因素的耦合作用。同时, 上述反应也不是单一发生的, 往往同时伴随着化学侵蚀、钢筋锈蚀、冷融等, 混凝土耐久性问题带来的危害十分巨大。

上海地区地处长江入海口, 拥有许多富氯离子区域, 比如海工混凝土以及大量的地铁通道以及地下建筑长期处于富氯离子环境中。因恶劣的外部环境以及混凝土内部的缺陷, 氯离子在混凝土内部快速扩散, 降低内部碱度, 从而造成钢筋的快速锈蚀, 造成混凝土结构的严重破坏。上海地区潮湿的气候环境加剧了混凝土的溶蚀行为。

通过对上海各区多地的服役混凝土结构的耐久性进行调研, 发现主要存在混凝土收缩开裂、钢筋锈蚀、体积膨胀、碳化侵蚀以及溶蚀破坏等问题。不同地区耐久性破坏的偏重点不同, 比如在排风井和隧道内部混凝土碳化破坏更严重; 在建筑物外墙结构混凝土溶蚀和体积破坏更多; 在靠海和靠江区域的混凝土, 氯盐和硫酸盐侵蚀造成的钢筋锈蚀和体积膨胀更为严重。混凝土耐久

性问题比较复杂, 涉及物理、化学、力学等多种因素的耦合作用, 对混凝土结构的稳定性和安全性危害巨大。

本文对C30、C35、C40、C45、C50、C60等不同强度等级的混凝土进行抗渗、抗氯离子渗透、非接触收缩以及碳化测试, 并根据相关标准按测试结果进行耐久性评价。

二、原材料和配合比

(一) 原材料

(1) 水泥

水泥使用的是海螺水泥有限公司生产的P·II52.5型硅酸盐水泥, 参照《通用硅酸盐水泥》(GB175-2007) 国家标准。

(2) 粉煤灰

采用C类II级粉煤灰, 参照《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596-2017) 国家标准。

(3) 矿粉

采用上海宝田新型建材有限公司生产的S95矿渣粉, 参照《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB T 18046-2008) 国家标准。

(4) 骨料

采用金鑫砂石有限公司生产的粒径5-25mm的石子以及中砂和粗砂。

(5) 外加剂

建工材料外加剂厂生产的803外加剂。

(6) 拌合用水

采用自来水。

(二) 配合比

参考实际生产过程中各混凝土强度等级的配合比制备了C30、C35、C40、C45、C50、C60等不同强度等级的混凝土, 具体配合比如见表1。

表1 不同强度等级混凝土的配合比

原材料	水	石子	砂	外加剂	水泥	粉煤灰	矿粉
规格	自来水	5-25	中砂	803	PII52.5	C-II	S95
C30	170	1006	791	4.68	205	65	90
C35	175	1011	763	5.7	224	73	110
C40	170	1004	758	5.96	251	68	106
C45	160	1010	762	4.24	268	73	105
C50	155	1002	750	4.72	303	66	104
C60	155	1003	669	5.75	350	73	124

三、混凝土耐久性测试

根据国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)的要求进行抗渗、抗氯离子渗透、非接触收缩以及碳化测试。具体测试方法详见《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)。

(一) 渗水高度

本文采用渗水高度法对不同强度等级混凝土的抗渗性能进行了测试。

从试样内部可以明显看出存在许多肉眼可见的大孔隙,由于砂的粒径较大,水泥和矿物掺合料未能充分填充混凝土内部由骨料产生的空隙,导致渗水高度出现大幅提高。但总的来说,不同强度等级的混凝土抗渗性能都很好,主要原因则是混凝土原材料中含有大量的粉煤灰和矿粉等矿物掺合料,这些原材料粒径较小,会填充水泥颗粒之间的孔隙,从而改善胶凝材料的级配体系,进而减小水泥石的孔隙率和孔径,改善混凝土抗渗性。而且粉煤灰、矿粉的活性氧化物会与水泥水化产生的Ca(OH)₂发生二次水化反应,生成的水化产物会进一步填充在毛细孔内,使孔径减小,形成不连通的孤立的毛细孔,进而细化并改善混凝土的孔隙分布,阻碍了孔隙的连通,提高混凝土的抗渗性能。

对测试结果进行分析,随着混凝土强度等级的提高,渗水高度不断降低,抗渗性能越来越好。根据GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》的要求,渗水高度不大于150mm则满足渗水要求,因此所有强度等级的混凝土都很好地满足了混凝土的抗渗要求。

(二) 抗氯离子渗透

目前最常用的测试混凝土抗氯离子渗透性能的方法为电通量法和快速氯离子迁移系数法(RCM),本文采用这两种方法对不同强度等级的混凝土在不同龄期的抗氯离子渗透性能进行了测试。

表2 不同龄期混凝土电通量

强度等级	电通量/C		
	28d	56d	84d
C30	2200	1650	1152
C35	1876	1421	848
C40	1618	1256	757
C45	1546	911	620
C50	1372	812	534
C60	1147	729	489

表3 氯离子迁移系数

强度等级	氯离子迁移系数 (10 ⁻¹² m ² /s)
C30 (84d)	4.8
C35 (84d)	4.5
C40 (28d)	4.7
C45 (28d)	5.4
C50 (56d)	1.2
C60 (56d)	2.8

从表2中可以明显看出随着养护龄期的增加,不同强度等级的混凝土电通量都出现了不同程度的下降,由此可知混凝土中水化程度越高,内部孔隙率减小,使孔溶液中的电导率降低,电通量出现下降。表3中氯离子的迁移系数与对应混凝土的强度等级不存在显著的线性关系,氯离子的扩散系数与孔结构,尤其是连通孔,有很大关系,因此所得氯离子扩散系数与强度等级存在离散性。但是将同龄期的不同强度等级的同一批混凝土同时进行电通量试验和RCM试验,得到的数据具有较强的指数型线性关系,相关系数R²达到0.9208。

由此可知,随着混凝土抗氯离子渗透性的降低,氯离子迁移系数的增长幅度要小于电通量的;当氯离子迁移系数降为0时,本试验所预测的电通量值为214.71C。出现这些现象的主要原因则是电通量加60V的直流电压容易产生极化;溶液温度升高会影响实验结果;同时,由于溶液中不仅仅只含有氯离子,还有钠离子和氢氧根离子等,在直流电的作用下也能实现电荷迁移,我们测量的电量是总的离子电荷迁移的电量,所以电通量的值比实际氯离子电荷迁移的值大。相对而言,RCM法则由于电压小于60V,极化小,且测量的仅为氯离子的显色深度,影响因素较小,能够比较准确描述混凝土抗氯离子渗透性。

根据混凝土耐久性检验评定标准(JGJ/T 193-2009)中混凝土抗氯离子渗透性能的等级划分以及对应的耐久性水平推荐意见,对不同等级混凝土抗氯离子渗透性能作出评价。由表可知在本试验中所得的不同强度等级的混凝土RCM值中,C30、C35、C40和C45强度等级的混凝土耐久性水平较差,C50混凝土耐久性很好,C60混凝土耐久性好;而对于所得的不同强度等级的混凝土电通量值中,C30、C35、C40和C45强度等级的混凝土耐久性水平好,C50和C60混凝土耐久性很好。因此可以得出,经过电通量测试得到的耐久性水平要好于RCM的。

(三) 非接触收缩

本文对不同强度等级混凝土的收缩性能进行了研究，具体采用非接触收缩法进行测试。不同强度等级的混凝土在成型后10h内的收缩值增长很快，占3d总收缩值的80%以上，10h后收缩值趋于平稳，甚至出现了膨胀。

所有强度等级的混凝土都产生了不同程度地收缩，可以明显看出，C50和C60强度等级混凝土的收缩值远大于C50强度等级以下的，最主要的原因则是因为高强度等级混凝土水胶比低，胶凝材料用量大，其自收缩比较严重；混凝土的用水量小，混凝土的泌水减少，表面更容易“变干”，会加剧干燥收缩；同时水泥的水化放热量大，放热速率快，混凝土的内外温差大，产生的收缩量也大。

（四）碳化

本文对不同强度等级混凝土的抗碳化能力进行研究，通过使用酚酞酒精溶液判断混凝土的碳化深度。而具体测试结果见表4。

表4 混凝土不同龄期碳化深度

强度等级	3d	7d	14d	28d
C30	5.1	8.3	10.5	13.8
C35	4	6.9	8.5	12.4
C40	0	0	0	0.7
C45	0	0	0	0
C50	0	0	0	0
C60	0	0	0	0

由表4可知，随着强度等级的提高，混凝土的抗碳化能力也不断提升，甚至当强度等级达到C45以上，混凝土就不再碳化。主要原因则是混凝土的强度提高后，其孔隙率降低，密实度增加，因此提高了抗碳化能力。

根据混凝土耐久性检验评定标准（JGJ / T 193-2009）中混凝土抗碳化性能的等级划分以及对应的耐久性水平推荐意见，可知在本试验中所测得的不同强度等级的混凝土中，C30和C35强度等级的混凝土抗碳化耐久性水平较好，C40混凝土抗碳化耐久性水平好，C45、C50和C60混凝土抗碳化耐久性水平很好。

四、结论

（1）随着混凝土强度等级的提高，渗水高度不断

降低，抗渗性能越来越好。根据GBT 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》的要求，渗水高度不大于150mm则满足渗水要求，因此所有强度等级的混凝土都很好地满足了混凝土的抗渗要求。

（2）随着养护龄期的增加，不同强度等级的混凝土电通量都出现了不同程度的下降，由此可知混凝土中水化程度越高，内部孔隙率减小，使孔溶液中的电导率降低，电通量出现下降。氯离子的迁移系数与对应混凝土的强度等级不存在显著的线性关系，氯离子的扩散系数与孔结构，尤其是连通孔，有很大关系。不同强度等级的混凝土RCM值中，C30、C35、C40和C45强度等级的混凝土耐久性水平较差，C50混凝土耐久性很好，C60混凝土耐久性好；而对于所得的不同强度等级的混凝土电通量值中，C30、C35、C40和C45强度等级的混凝土耐久性水平好，C50和C60混凝土耐久性很好。因此可以得出，经过电通量测试得到的耐久性水平要好于RCM的。

（3）不同强度等级的混凝土在成型后10h内的收缩值增长很快，占3d总收缩值的80%以上，10h后收缩值趋于平稳，甚至出现了膨胀。C50和C60强度等级混凝土的收缩值远大于C50强度等级以下的，最主要的原因则是因高强度等级混凝土水胶比低，胶凝材料用量大，其自收缩比较严重；混凝土的用水量小，混凝土的泌水减少，表面更容易“变干”，会加剧干燥收缩。

（4）随着强度等级的提高，混凝土的抗碳化能力也不断提升，甚至当强度等级达到C45以上，混凝土就不再碳化。主要原因则是混凝土的强度提高后，其孔隙率降低，密实度增加，因此提高了抗碳化能力。C30和C35强度等级的混凝土抗碳化耐久性水平较好，C40混凝土抗碳化耐久性水平好，C45、C50和C60混凝土抗碳化耐久性水平很好。

参考文献

- [1] 王本娟, 陈玉龙. 城市轨道交通地下车站混凝土耐久性设计的原材料要求[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(23): 1-3.
- [2] 汤国伟. 轨道交通地下工程耐久性混凝土的分析及应用[J]. 山东工业技术, 2017(04): 110.
- [3] 孟路希. 探讨轨道交通地下工程耐久性混凝土的研究和应用[J]. 中国新技术新产品, 2016(07): 110.