

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.012

桥梁用 C60 高性能补偿收缩混凝土性能研究

侯明扬¹, 孙志勇², 李梦希¹, 张新龙¹, 邓毅^{3,4}, 张国荣^{3,4}

(1. 滇中新区嵩昆路建设指挥部, 云南 昆明 650211; 2. 滇中新区管委会规建部, 云南 昆明 650000;

3. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112;

4. 在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室, 江苏 南京 211112)

摘要: 嵩昆路军长立交辅道桥采用 C60 高性能补偿收缩混凝土, 由于对高强补偿收缩混凝土研究较少且缺乏指导性, 为制备性能优良的高强度补偿收缩混凝土, 采用室内试验方法, 系统研究了配合比关键参数对 C60 补偿收缩混凝土工作性能、力学性能和耐久性能影响规律。研究表明, 随着水胶比的增加, 混凝土的力学性能和耐久性均呈现下降趋势; 当砂率从 39% 增加到 43%, 混凝土抗压强度、弹性模量呈现先增后减的趋势, 氯离子扩散系数和电通量呈现先减后增趋势; 膨胀剂的掺入使混凝土抗压强度呈现下降趋势; 膨胀剂掺量的增加, 混凝土氯离子扩散系数和电通量呈现先降低后增加的趋势。

关键词: 补偿收缩混凝土; 砂率; 膨胀剂掺量; 矿物掺合料

中图分类号: TU528.31

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0057-05

Characteristics of C60 Compensating Shrinkage Concrete used in Bridges

HOU Mingyang¹, SUN Zhiyong², LI Mengxi¹, ZHANG Xinlong¹, DENG Yi^{3,4}, ZHANG Guorong^{3,4}

(1. Construction Command of Song Kun Road in Central Yunnan New Area, Kunming, Yunnan 650211, China;

2. Ministry of Planning and Construction of Management Committee in Central Yunnan New Area, Kunming, Yunnan 650000, China;

3. JSTI Group, Nanjing, Jiangsu 211112, China;

4. State Key Laboratory of Safety and Health for In-service Long Span Bridges, Nanjing 211112, China)

Abstract: C60 compensating shrinkage concrete has been used in the Jun Chang Viaduct of Song Kun Road. Due to the lack of guidance and research on high strength compensated shrinkage concrete, and in order to prepare high strength compensating shrinkage concrete with good performance, the influence of the key parameters of mix ratio on the working performance, mechanical properties and durability of C60 compensating shrinkage concrete is systematically analyzed by laboratory test method. The results show that with the increase of water-cement ratio, the mechanical properties and durability of concrete decrease. Considering that the lower the water-binder ratio, the higher the amount of cementitious material and the higher the risk of cracking. The compressive strength and elastic modulus of concrete increased first and then decreased, and the chloride diffusion coefficient and electric flux decreased first and then increased. The incorporation of mineral admixture significantly reduces the chloride diffusion coefficient and electric flux of concrete. Therefore, it is suggested that high quality admixtures should be selected for the preparation of concrete. The compressive strength of concrete decreased with the addition of expansive agent, which was due to the equal substitution of expansive agent for the cementing material. With the increase of the content of expansive agent, the chloride diffusion coefficient and the electric flux tend to decrease first and then increase.

Keywords: compensated shrinkage concrete; sand rate; the dosage of expansive agent; mineral admixture

嵩昆路军长立交桥梁工程辅道桥采用 C60 高性能补偿收缩混凝土现浇施工, 混凝土优良的工作性能是施工浇筑、振捣过程中混凝土密实性的前提; 而

混凝土力学性能和耐久性能是混凝土结构适用性和安全性的保障^[1-2]。因此, 有必要对 C60 高性能补偿收缩混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能进

行系统研究,以便对混凝土配合比关键参数设计提供指导。

目前,主要集中在对补偿收缩混凝土的变形性能和抗裂性能的研究^[3-12],且研究基本针对中低强度补偿收缩混凝土^[13-16],对高强度补偿收缩混凝土性能的研究较少,对本工程中 C60 高性能补偿收缩混凝土的制备缺乏指导性,因此,有必要针对嵩昆路军长立交桥工程当地原材料特性,开展配合比关键参数对混凝土性能的影响规律研究,对 C60 高性能补偿收缩混凝土的制备有重要的指导意义。

本文采用室内试验方法,系统研究水胶比、砂率、矿物掺合料、膨胀剂掺量等配合比关键参数对 C60 补偿收缩混凝土工作性能、力学性能和耐久性影响规律。其中工作性能主要测试初始坍落度和 1 h 坍落度损失,力学性能主要测试抗压强度(7 d、28 d)和弹性模量(28 d),耐久性主要测试氯离子扩散系数(28 d)和电通量(56 d)。

根据工程设计文件要求,同时考虑桥梁工程所处的环境类别为 I 类环境(一般环境或碳化环境),为保证工程混凝土密实性,按照 IV-D(氯离子环境类别,作用等级 D 级)来控制,即 C60 高性能补偿收缩混凝土关键性能指标具体要求如表 1 所示。研究成果可有效指导实际工程中 C60 补偿收缩混凝土的制备过程,有效保证依托工程的经久耐用。

表 1 C60 高性能补偿收缩混凝土关键性能指标要求

性能类别	指标	指标控制要求
工作性能	坍落度/mm	180±20
	1 h 坍落度损失率/%	≤20
力学性能	抗压强度(28 d)/MPa	≥69.0
	弹性模量(28 d)/GPa	≥36.5
耐久性能	氯离子扩散系数(28 d)/(m ² ·s ⁻¹)	<8×10 ⁻¹²
	电通量(56 d)/C	≤1200

1 试验

1.1 原材料

(1) 水泥(C)。云南东骏生产的 P.O 52.5 水泥,其初凝时间为 236 min,终凝时间为 359 min,比表面积为 342 m²/kg,安定性合格。

(2) 粉煤灰(FA)。I 级,烧失量为 4.5%,需水量比为 90%,细度(45 μm 筛余)为 10.2%。

(3) 磨细矿渣(SL)。S75 级,比表面积为 354 m²/kg,烧失量为 1.11%,7 d 活性指数为 67%,28 d 活性指数为 82%。

(4) 细集料(S):普通河砂,细度模数为 3.1,含泥量为 2.4%,坚固性为 3%。

(5) 粗集料(G):玄武岩碎石,采用 10 mm~20 mm 和 5 mm~10 mm 两种级配石子按照 8:2 比例进行混合时,满足混凝土用碎石 5 mm~20 mm 连续粒级要求,压碎值为 8.3%,针片状含量为 3.1%,含泥量为 0.5%,泥块含量为 0.1%。

(6) 减水剂(A)。云南建投高分子公司生产的聚羧酸 PCA 型,减水率为 26%,泌水率比为 65%,固含量为 12.17%。

(7) 膨胀剂(EA)。江苏省博特公司生产的复合膨胀剂,比表面积为 210 m²/kg,碱含量为 0.27%,氯离子含量为 0.018%,水中 7 d 限制膨胀率为 0.065%,空气中 21 d 限制膨胀率为 0.010%,7 d 抗压强度为 23.2 MPa,28 d 抗压强度为 45.2 MPa。

1.2 配合比设计

试验研究水胶比、砂率、矿物掺合料、膨胀剂掺量四个配合比关键参数对 C60 高性能补偿收缩混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响。其中各影响因素设计值及编号如表 2 所示。

1.3 试验方法

(1) 工作性能。混凝土拌合物流动性用坍落度表示,坍落度和 1 h 坍落度损失率按《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[17](GB/T 50080—2002)规定采用坍落度筒进行测试,同时对混凝土拌合物黏聚性、保水性进行观察评价。

其中 1 h 坍落度损失率(%)按下式进行计算:

$$1\text{ h 坍落度损失率} = \frac{T_{1h} - T_0}{T_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: T_{1h} 为 1 h 后混凝土拌合物坍落度,mm; T_0 为混凝土拌合物初始坍落度,mm。

表 2 影响因素设计值及编号

影响因素	设计值及编号
水胶比	水胶比设计为 0.25、0.26 和 0.27,编号分别为“WB-0.25”、“WB-0.26”和“WB-0.27”
砂率	砂率设计为 39%、41% 和 43%,编号分别为“SR-39”、“SR-41”和“SR-43”
矿物掺合料	矿物掺合料主要考虑粉煤灰和磨细矿渣两种,其“SLOFA0”表示不掺;“SL5FA15”表示磨细矿渣掺量 5%和粉煤灰掺量 15%;“SL10FA10”表示磨细矿渣掺量 10%和粉煤灰掺量 10%;“SL20”表示磨细矿渣掺量为 20%;
膨胀剂掺量	膨胀剂掺量设计为 0%、6%、8% 和 10%,编号分别为“EA-0”、“EA-6”、“EA-8”和“EA-10”。

(2) 力学性能。混凝土力学性能试验按《普通

混凝土力学性能试验方法标准》^[18] (GB/T 50081—2002)进行。其中混凝土抗压强度采用边长为 150 mm 立方体试块,弹性模量采用 150 mm × 150 mm × 300 mm 试块,标准养护到规定龄期分别测试混凝土试块的抗压强度和弹性模量。

(3) 耐久性能。主要测试混凝土的氯离子扩散系数和电通量耐久性指标,具体按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[19] (GB/T 50082—2009)。混凝土试件在标准养护条件下养护到相应的龄期,将试件进行切割打磨加工,混凝土试件采用直径为 100 mm,高度为 50 mm 的圆柱体试件。

2 结果分析

2.1 水胶比的影响

不同水胶比混凝土工作性能和力学性能见表 3。由表 3 可知,各组混凝土初始坍落度和 1 h 坍落度损失率均满足指标控制要求。其中随着水胶比的增加,抗压强度和弹性模量呈现明显下降趋势,将结果和 28 d 抗压强度和弹性模量的技术要求对比可知,三组均满足工程要求。

表 3 不同水胶比混凝土工作性能和力学性能

组别	初始坍落度/mm	1 h 坍落度损失率/%	抗压强度/MPa		弹性模量(28 d)/GPa
			7 d	28 d	
WB-0.25	170	6.2	56.2	78.5	43.2
WB-0.26	180	5.6	52.3	73.5	41.5
WB-0.27	185	8.2	48.5	69.5	38.8

不同水胶比混凝土氯离子扩散系数、电通量试验结果分别如图 1 和图 2 所示。由图 1、图 2 可看出,三组混凝土氯离子扩散系数和电通量均满足设计要求,处于较低的水平,即混凝土密实性能均优异。随着水胶比的增加,混凝土的氯离子扩散系数和电通量均呈现增加趋势,这主要是由于水胶比的增加,使得混凝土密实性能略有降低。

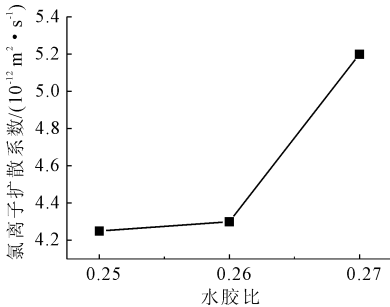


图 1 水胶比对氯离子扩散系数的影响

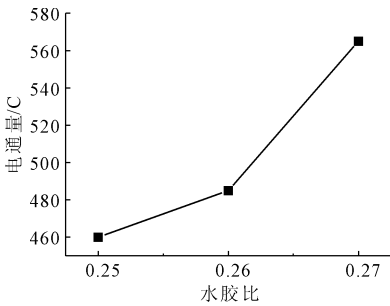


图 2 水胶比对电通量的影响

水胶比越低,力学性能越大,但水胶比越低,胶凝材料用量增加,对补偿收缩混凝土是负效应,增加开裂风险,因此,综合水胶比对混凝土耐久性能的影响规律,确定最佳水胶比为 0.26。

2.2 砂率的影响

不同砂率混凝土工作性能和力学性能试验结果如表 4 所示。由表 4 可知,各组混凝土工作性能和力学性能均满足指标控制要求,且随着砂率从 39% 增加到 43%,抗压强度和弹性模量均呈现先增加后降低的趋势,存在最佳砂率,这主要是由于砂率变化对混凝土颗粒堆积密实性的影响。

表 4 不同砂率混凝土工作性能和力学性能

组别	初始坍落度/mm	1 h 坍落度损失率/%	抗压强度/MPa		弹性模量(28 d)/GPa
			7 d	28 d	
SR-39	175	8.9	51.2	70.5	39.2
SR-41	180	5.6	52.3	73.5	41.5
SR-43	190	5.5	49.3	69.4	38.2

不同砂率混凝土氯离子扩散系数、电通量试验结果分别如图 3 和图 4 所示。由图 3、图 4 可看出,随着砂率从 39% 增加到 43%,混凝土氯离子扩散系数和电通量均呈现先降低后增加的趋势,即存在最佳砂率。因此,砂率选择 41% 为宜。

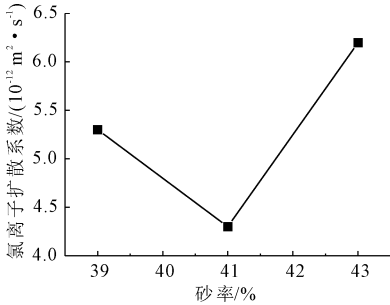


图 3 砂率对氯离子扩散系数的影响

2.3 矿物掺合料对耐久性能的影响

掺入不同矿物掺合料混凝土的工作性能和力学

性能试验结果见表 5。由表 5 可见,各组混凝土工作性能和力学性能均满足指标控制要求,矿物掺合料的掺入对抗压强度略有增加,对弹性模量略有降低;当总掺量控制为 20% 时,随着粉煤灰掺量的增加,28 d 抗压强度略有降低,弹性模量略有降低,这主要由于与粉煤灰相比,磨细矿渣对早期强度和弹性模量的发展有重要的促进作用。

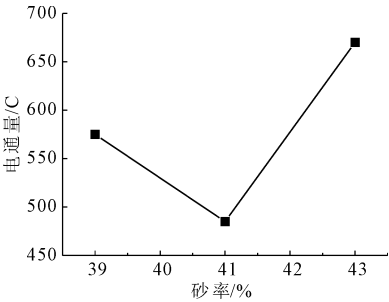


图 4 砂率对电通量的影响

表 5 不同矿物掺合料混凝土工作性能和力学性能

组别	初始坍落度/mm	1 h 坍落度损失率/%	抗压强度/MPa		弹性模量(28 d)/GPa
			7 d	28 d	
SL0FA0	165	10.2	48.9	69.8	42.4
SL5FA15	190	4.2	50.2	71.5	40.4
SL10FA10	185	5.1	51.6	72.3	41.7
SL20	180	5.6	52.3	73.5	41.5

掺入不同矿物掺合料混凝土的氯离子扩散系数、电通量试验结果分别如图 5 和图 6 所示。由图 5、图 6 可看出当不掺矿物掺合料时,混凝土氯离子扩散系数和电通量分别为 $11.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 1560C,均超过指标控制要求。掺入掺合料的混凝土的氯离子扩散系数和电通量显著降低,这主要是由于矿物掺合料二次水化反应和微集料填充效应使混凝土密实性显著提升,从而表现出优异的耐久性能^[20-21]。

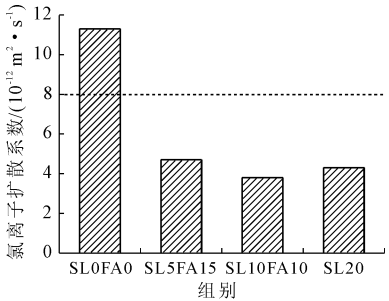


图 5 矿物掺合料对氯离子扩散系数的影响

因此,制备高性能混凝土须掺入适量的矿物掺合料,以提高混凝土密实性和耐久性。本工程宜根

据周边矿物掺合料的供应情况,选择质量优良、稳定掺合料制备 C60 高性能补偿收缩混凝土。

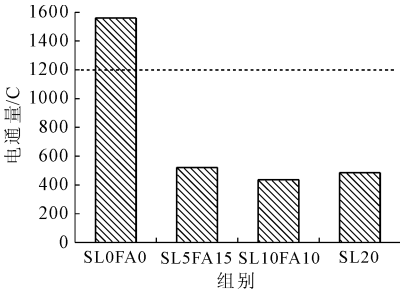


图 6 矿物掺合料对电通量的影响

2.4 膨胀剂对耐久性能的影响

不同膨胀剂掺量混凝土的工作性能和力学性能试验结果见表 6。各组混凝土工作性能和力学性能均满足指标控制要求,随着膨胀剂掺量的增加,混凝土抗压强度呈现下降趋势,这主要由于膨胀剂采用等量取代胶凝材料的内掺方式。一方面,等量取代的膨胀剂活性不及水泥活性;另一方面,膨胀剂掺量增加时,水泥用量相应的降低,导致水化产物量降低,密实性降低。因此,膨胀剂对混凝土力学性能有不利的影 响。但弹性模量出现先增加后降低趋势,与理论分析规律不一致,这种小范围的波动可以认为是试验误差产生的。

表 6 不同膨胀剂掺量混凝土工作性能和力学性能

组别	初始坍落度/mm	1 h 坍落度损失率/%	抗压强度/MPa		弹性模量(28 d)/GPa
			7 d	28 d	
EA-0	194	5.8	60.2	80.2	38.9
EA-6	186	6.8	57.3	75.2	40.2
EA-8	180	5.6	52.3	73.5	41.5
EA-10	162	6.6	50.1	70.2	39.4

不同膨胀剂掺量混凝土的氯离子扩散系数、电通量试验结果分别如图 7 和图 8 所示。

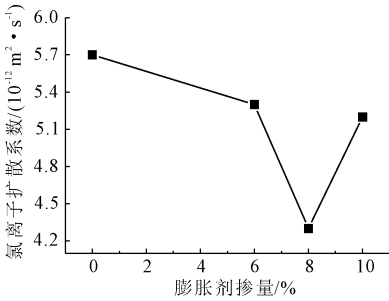


图 7 膨胀剂对氯离子扩散系数的影响

由图 7、图 8 可看出随着膨胀剂的增加,混凝土氯离子扩散系数和电通量呈现先降低后增加的趋势。

势,这主要是由于膨胀剂掺量的增加,一方面混凝土膨胀率增加,这对混凝土密实性是正效应;另一方面,膨胀剂掺量的增加,水泥用量降低,导致生成的水化产物量降低,这对混凝土密实性是负效应。因此,正负效应叠加的效果就出现一个最佳掺量值。综合考虑混凝土各性能影响规律,膨胀剂的最佳掺量为 8%。

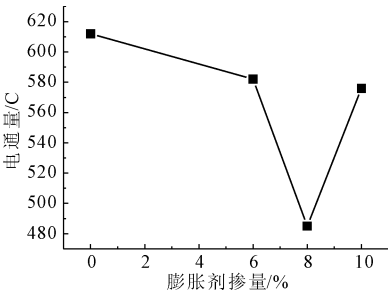


图 8 膨胀剂对电通量的影响

3 结 论

(1) 随着水胶比的增加,抗压强度和弹性模量呈现明显下降趋势,混凝土的氯离子扩散系数和电通量均呈现增加趋势,考虑到水胶比越低,胶凝材料用量增加,对补偿收缩混凝土是负效应,增加开裂风险,推荐最佳水胶比为 0.26。

(2) 当砂率从 39% 增加到 43%,混凝土抗压强度、弹性模量呈现先增后减的趋势,氯离子扩散系数和电通量呈现先减后增趋势,推荐最佳砂率为 41%。

(3) 矿物掺合料的掺入对抗压强度略有增加,对弹性模量略有降低,但满足工程要求;矿物掺合料的掺入显著降低了混凝土的氯离子扩散系数和电通量,建议工程根据周边矿物掺合料的供应情况,选择质量优良、稳定掺合料制备 C60 高性能补偿收缩混凝土。

(4) 膨胀剂的掺入使混凝土抗压强度呈现下降趋势,这主要由于膨胀剂采用等量取代胶凝材料的内掺方式。

参考文献:

[1] 程思胜.混凝土耐久性影响因素的分析及应对措施[J].城市道桥与防洪,2016(12):113-115,15.
[2] 陈浩鑫.混凝土耐久性影响因素分析[J].交通世界(工

程技术),2015(10):78-79.
[3] 李 鹏,苗 苗,苗 芳,等.补偿收缩混凝土变形性能研究进展[J].硅酸盐通报,2016,35(1):192-197,208.
[4] 杨易灵.预拌补偿收缩混凝土膨胀变形性能及抗裂性能试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2015.
[5] 顾征宇,张德锋,杨毅超.补偿收缩纤维混凝土抗裂性及耐久性试验研究[J].建筑结构,2016,46(13):107-110.
[6] 朱长华,李享涛,王保江,等.内养护补偿收缩混凝土的抗裂性能[J].建筑材料学报,2015,18(6):1033-1037,1044.
[7] 齐志强.补偿收缩纤维混凝土强度及变形性能研究[J].新型建筑材料,2017,44(8):137-140.
[8] 李 鹏,苗 苗,苗 芳,等.补偿收缩混凝土变形性能研究进展[J].硅酸盐通报,2016,35(1):192-197,208.
[9] 杨易灵.预拌补偿收缩混凝土膨胀变形性能及抗裂性能试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2015.
[10] 范灵芝.钙镁双源微膨胀混凝土耐久性研究与应用[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
[11] 张 臻,闫宁霞,李 洋,等.掺 MgO 补偿收缩混凝土限制膨胀率研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):142-145.
[12] 梁 娜,赵顺波,朱伟伟,等.全再生骨料混凝土收缩性能试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(6):43-48.
[13] 李长成,张 铭,黄 胜.C35~C40 补偿收缩混凝土制备及其在工程中的应用[J].混凝土,2017(10):160-162.
[14] 陈 戎,叶 青.海水环境及高温对膨胀混凝土的双重影响[J].水利与建筑工程学报,2006(4):71-74.
[15] 游国贤.C35 补偿收缩混凝土在地下车库工程中的应用[J].商品混凝土,2018(Z1):115-117,126.
[16] 陈 莉.C30 补偿收缩混凝土配合比设计及质量控制[J].四川水泥,2018(1):67.
[17] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
[18] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
[19] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
[20] 曹先广,王登山,刘在龙.利用矿物掺合料制备高耐久性混凝土的研究[J].商品混凝土,2017(11):50-53.
[21] 王成启,张悦然.矿物掺合料对海工自密实高性能混凝土耐久性影响[J].混凝土,2014(1):56-60,64.