

海工高耐久自密实混凝土的研制

胡红梅¹, 余彬彬¹, 陈健²

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门市公路局, 福建 厦门 361000)

摘要: 针对跨海桥梁工程特点与环境条件, 采取七元组分设计混凝土配合比, 通过限制骨料含量、采用低水胶比、复掺磨细矿粉与级粉煤灰以及外掺聚羧酸系高性能减水剂等技术措施, 配制出适合海洋环境条件、中等强度等级、具有良好体积稳定性的高耐久自密实混凝土。

关键词: 自密实混凝土; 耐久性; 徐变; 跨海桥梁

中图分类号: TV431

文献标识码: B

文章编号: 1001-702X(2010)11-0005-03

Development of the high-durability and self-compacting concrete in marine environment

HU Hongmei¹, YU Binbin¹, CHEN Jian²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Xiamen City Highway Bureau, Xiamen 361000, Fujian, China)

Abstract: Aiming at the characteristics and environmental conditions of cross-sea bridge project, we achieved a high-durability self-compacting concrete by adopting seven-component mix design and technical measures including limiting the aggregate content, using low water-cement ratio, double-doped pulverized slag and grade I fly ash and with polycarboxylate-type high-performance water reducer. The produced concrete is suitable for marine environmental conditions, has moderate-intensity level and good volume stability.

Key words: self-compacting concrete; durability; creep; cross-sea bridge

近年来, 随着海峡两岸经济区建设的推进, 福建省桥梁建设发展迅速。一大批跨海桥梁工程陆续涌现, 不断向大跨度、高技术、超优化方向发展。有些桥梁结构因配筋密集、形体复杂、薄壁等因素给振捣带来困难, 容易带来构件内部缺陷, 普通混凝土很难达到施工要求。与此同时, 相对于陆地上的混凝土结构而言, 跨海桥梁的混凝土结构面临着更加复杂、恶劣的自然条件, 尤其是海水中的氯盐会加速钢筋的锈蚀而使混凝土过早损坏, 丧失了耐久性能, 从而严重威胁桥梁的正常使用寿命^[1]。采取有效的耐久性控制措施, 保证桥梁设计寿命目标的实现, 是涉及到跨海桥梁结构设计、材料选择、施工和监理等各方面必须共同面对的综合难题。自密实混凝土因具有很高的流动性、优异的间隙通过性及抗离析能力, 并且具有良好

的力学性能和耐久性能, 在跨海桥梁工程中受到越来越多的关注^[2]。自密实混凝土胶凝材料用量大、水胶比低, 其组分包含一定量超细矿物掺合料及外加剂, 其收缩变形较普通混凝土大得多, 容易引起开裂, 从而严重影响自密实混凝土的耐久性。针对跨海桥梁的工程特点与环境条件, 本文重点研究了自密实混凝土的抗渗性、抗氯离子渗透性及徐变性能, 试图配制出适合海洋环境条件、具有良好体积稳定性的高耐久自密实混凝土。

1 试验

1.1 原材料

建福 P·O42.5 级水泥, 各项性能指标合格, 实测 28 d 抗压强度为 53.6 MPa; 漳州江东河砂, 细度模数 2.7, 中砂, 5~25 mm 连续级配碎石, 针片状含量 5%, 压碎指标值 11.3%; 磨细矿粉 S95 级; 厦门嵩屿电厂的级粉煤灰; 冠疆(台湾)TGC-YS30 聚羧酸系减水剂, 推荐掺量 0.5%~1.5%。

1.2 试验方法

混凝土拌合物的流动性分别采用 L 型流动度试验方法和坍落度试验方法进行测试。

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究项目(2005CCA06700)

福建省建设厅科技计划项目(2005-2-2)

收稿日期: 2010-07-02

作者简介: 胡红梅, 女, 1962 年生, 湖北武汉人, 教授, 主要从事高性能混凝土材料与性能的研究。通讯作者: 余彬彬。

混凝土力学性能按 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行测试。

混凝土抗渗性和徐变收缩按 GBJ 82—85《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》进行测试,抗氯离子渗透性能按非稳态氯离子迁移试验方法(RCM法)进行测试。

2 配合比设计

根据自密实混凝土的自密实机理和配合比设计理论,考虑工程特点与海洋环境条件,在对国内外同类技术分析比较的基础上,提出的配合比设计目标除了满足自密实混凝土所要求的大流动性,易于泵送施工且不需振捣可自密实,拌合物可在长时间保持良好的工作性,以及达到中等强度等级要求外,特别要求硬化混凝土具有优良的耐久性能和抗变形能力。为便于推广应用,采用常用、易得的原材料和常规工艺配制自密实混凝土。

笔者认为,配制高耐久自密实混凝土的关键技术在于:(1)通过胶凝材料组分的优化设计,实现对水化产物相的调控,提高混凝土本体的抗渗能力和固氯、固硫效应;(2)通过颗粒级配最优组合技术和界面调控技术,使水泥石的亚、微观结构和水泥石-骨料界面结构致密化,从而控制有害介质的传输,切断腐蚀通道。相关研究证实,采用优质活性矿物掺合料和高效减水剂配制的多元组分混凝土可有效提高混凝土的密实性,从而显著提高混凝土的抗蚀性^[3]。由多元组分构成的混凝土可看作是具有优良级配的颗粒堆积体系。石子空隙由砂子填充,砂子空隙由水泥颗粒填充,水泥颗粒之间和界面的空隙则由超细矿物掺合料微粒填充。通过整体颗粒级配的优化设计,实现包括粗细骨料和胶凝材料的所有颗粒之间的最密实堆积,从而更有利于体系形成低孔隙的硬化体。纯粹从提高颗粒的填充性方面提高混凝土的抗蚀性。

有鉴于此,在对自密实混凝土的材料组成、颗粒级配和配合比进行多轮优化设计与试验研究的基础上,决定按照七元组分设计混凝土配合比。具体按临界饱和和掺量外掺聚羧酸系减水剂,以等量内掺方式按一定比例复掺磨细矿粉和一级粉煤灰,配合限制骨料含量、采用低水胶比等多项技术措施,保证设计目标的实现。考虑到 C40 以下的自密实混凝土应用较多,经过大量优化试验,设计了 C30 和 C40 自密实混凝土的配合比(见表 1)。

表 1 自密实混凝土的配合比

强度等级	混凝土配合比/(kg/m ³)							水胶比
	水泥	水	砂	碎石	粉煤灰	矿粉	减水剂	
C40	220	185	730	971	132	132	2.90	0.38
C30	158	185	749	953	177	118	3.17	0.41

3 性能测试及结果分析

3.1 自密实混凝土拌和物的性能分析(见表 2、表 3)

表 2 自密实混凝土拌和物的工作性能

强度等级	L 型流动度试验			坍落度/mm	扩展度/mm	表观密度/(kg/m ³)
	T ₁₅₀ /s	T/cm	L/cm			
C40	3.6	27	82	250	615	2370
C30	3.4	26	80	260	720	2350

表 3 C40 自密实混凝土拌合物坍落度经时损失

时间/h	0	9	11	13	13.5
坍落度/mm	250	200	165	85	25

由表 2 和表 3 可见,2 组自密实混凝土拌和物的坍落度均达到大流动性要求,且不离析、不泌水、间隙通过性强,能自流平,而且坍落度的经时损失小,具有优良的工作性,完全满足免振自密实混凝土施工要求。新拌浆体中的水有 2 部分:一部分是填充水,填充在颗粒间的孔隙中,对拌和物的流动性没有贡献;另一部分是表面层水,在颗粒表面形成水膜层,浆体的流动性取决于水膜层的厚度^[4]。在自密实混凝土中掺入磨细矿粉和优质粉煤灰,它们较小的颗粒粒径与水泥粒径在微观上形成级配体系,将原来填充在孔隙中的填充水置换出来成为自由水;另一方面,掺入保坍性突出的聚羧酸系高性能减水剂可以减少表面层水的数量。二者相结合,不仅使混凝土拌合物即使在低水胶比下也能获得大的流动性,同时使坍落度的经时损失亦很小。众所周知,混凝土的流动性与粘聚性和保水性是相互矛盾的,要使自密实混凝土同时具有大流动度又不发生泌水离析的关键在于其胶凝材料浆体是否具有适当的塑性黏度,它能减少骨料间的接触应力,削弱骨料的固体特性,抑制骨料起拱堆集,从而有效抑制泌水离析^[5]。磨细矿粉和粉煤灰等超细掺合料不仅具有填充密实效应,其细小颗粒和超大的比表面积产生出较大的内表面力,阻止骨料的沉降和水分的泌出,因此能够有效防止组成材料的离析。

3.2 自密实混凝土的力学性能分析

按表 1 设计的配合比成型相应试件,力学性能测试结果见表 4。

表 4 自密实混凝土的力学性能测试结果

强度等级	成型方法	抗压强度/MPa			28 d 抗压弹性模量/GPa
		3 d	7 d	28 d	
C40	自密实	22.3	42.6	60.4	38.1
C40	振捣 20 s			61.5	
C30	自密实	11.9	28.3	50.2	37.2
C30	振捣 20 s			51.0	

由表 4 可以看出,2 组自密实混凝土试件的力学性能均

达到相应普通混凝土的力学指标水平,且2组未经振捣试件的28 d 抗压强度分别为振捣试件抗压强度的98.2%与98.4% 表明自密实混凝土的力学性能良好。ZHU Wenzhuong 和 BARTOS^[6]的研究表明,自密实混凝土中骨料与基体界面过渡区的宽度约为30~40 μm,与普通混凝土基本相同。同时发现,自密实混凝土中骨料上方界面过渡区与骨料下方界面过渡区的弹性模量几乎相当,而普通混凝土中骨料上、下方界面过渡区的弹性模量则差别明显。总之,自密实混凝土具有更为密实、均一的微观结构。这一结构特点对于自密实混凝土的耐久性显然具有重要意义。

3.3 自密实混凝土的耐久性测试及结果分析

沿海地区的气候与环境条件要求自密实混凝土应该同时具备良好的体积稳定性和耐久性,特别是优良的抗渗性与抗氯离子渗透性。由于混凝土的变形包括非荷载因素和荷载因素引起的体积变形,考虑跨海桥梁结构的受力状况和环境条件,本文选择测试混凝土的受压徐变指标作为体积稳定性的考察指标,测试自密实混凝土的抗渗性和抗氯离子渗透性作为耐久性考察指标。

3.3.1 抗渗性分析

混凝土的耐久性能与抗渗性密切相关,它是混凝土耐久性的第一道防线,反映了混凝土内部的致密程度与孔结构特征。抗渗性好,说明混凝土的总孔隙率低、最可几孔径小、开口连通的孔隙少,侵蚀介质难以渗入,抗蚀性高。按表1配合比每组制作6个抗渗试件,标准养护至28 d 后按标准试验步骤进行抗渗试验。从0.1 MPa 开始加压,持续加压到4.0 MPa,2组试件都未发现渗水现象。试件劈裂后,渗水高度最大的只有5 mm,表明2组自密实混凝土的抗渗性能优良,抗渗等级大于P40。

3.3.2 抗氯离子渗透性分析

海洋工程对混凝土的抗氯离子渗透性能要求很高,要推广使用自密实混凝土,该项指标必须达标。按表1配合比制作标准试件,按照RCM法测得C40、C30自密实混凝土28 d 的氯离子扩散系数分别为 $1.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.78 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,均小于 $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,抗氯离子渗透性符合NT build 492 标准中“非常好”的等级,满足高耐久设计目标要求。

相关研究表明,在合适的掺量范围内,单掺硅灰、I级粉煤灰、矿渣粉均明显改善混凝土的抗氯离子渗透性,而不同掺合料的复掺效果要更加优于单掺效果^[3]。自密实混凝土具备高耐久的重要原因正是由于2种超细矿物掺合料的火山灰效应和复合超叠加填充密实效应,优化了水化产物的组成,改善了混凝土内部的微观结构,使混凝土结构致密、孔隙细化。

3.4 自密实混凝土的徐变收缩研究

按表1中C40配合比制作棱柱体受压徐变试件,同时制作相应的收缩试件,标准养护28 d 后移入徐变室进行测试。测试结果见表5。

表5 自密实混凝土和普通混凝土的徐变值

加载龄期/d	C40 自密实混凝土			C40 普通混凝土		
	总变形量 / $\times 10^{-6}$	收缩值 / $\times 10^{-6}$	徐变值 / $\times 10^{-6}$	总变形量 / $\times 10^{-6}$	收缩值 / $\times 10^{-6}$	徐变值 / $\times 10^{-6}$
1	70	10	60	60	15	45
3	90	20	70	110	35	75
7	150	45	105	190	65	125
14	200	65	135	260	95	165
28	270	95	175	350	125	225
45	300	110	190	460	195	265
60	350	140	210	500	215	285
90	400	155	245	560	225	335

从表5可以看出,除1 d 外,自密实混凝土的早期和后期徐变值均小于普通混凝土,特别是90 d 的收缩值和徐变值分别比普通混凝土要小31%和27%。结果表明,按照表1配制的C40自密实混凝土具有良好的体积稳定性。其原因在于超细矿粉和粉煤灰的有效复掺,使水泥石结构密实,水泥石与骨料之间的界面结构得到改善,从而降低了混凝土内部的早期干燥与收缩程度^[7]。与此同时,聚羧酸系减水剂对于自密实混凝土的减缩也有较大作用。因为聚羧酸系减水剂可以明显地降低孔隙溶液的表面张力,其含碱量低,有利于降低孔隙内部的自干燥程度,以及相同干燥程度下所引起的收缩应力,从而减少了混凝土包括徐变在内的各种收缩变形。

4 结 语

(1)按照七元组分设计混凝土配合比,采取限制骨料含量、低水胶比、复掺磨细矿粉与I级粉煤灰以及外掺聚羧酸系高性能减水剂等技术措施,能够配制出适合海洋环境条件、中等强度等级的高耐久自密实混凝土。

(2)复掺磨细矿粉和优质粉煤灰等矿物掺合料以及外掺聚羧酸系高性能减水剂,是使自密实混凝土同时获得优良工作性能、高耐久性和良好体积稳定性的重要技术手段。

(3)高耐久自密实混凝土以其优良的工作性能、耐久性能和体积稳定性,有效地解决了跨海桥梁复杂结构施工振捣困难与抗氯离子渗透的难题,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 胡红梅,宋明辉,姚志雄,等.跨海桥梁混凝土结构耐久性的质量控制[J].混凝土,2008(11):114-116.

(下转第14页)

表 2 水泥浆体的孔结构特征

水泥 /%	磷渣 /%	中值孔径(体积)/nm		平均孔径/nm		总孔隙率/%	
		28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
100	0	19.5	10.9	9.8	8.1	22.83	22.87
70	30	19.6	7.2	11.5	7.1	35.29	25.28

从表 2 可知,水化龄期延长时,水泥浆体的中值孔径(体积)和平均孔径显著减小,掺 30%磷渣高贝利特水泥浆体的中值孔径和平均孔径的降低幅度较纯高贝利特水泥浆体大很多。水化 28 d 时,掺磷渣高贝利特水泥浆体的中值孔径略大于纯高贝利特水泥浆体的,平均孔径则明显大于纯高贝利特水泥浆体的。水化 90 d 时,掺磷渣高贝利特水泥浆体的中值孔径和平均孔径均小于纯高贝利特水泥浆体的中值孔径和平均孔径。

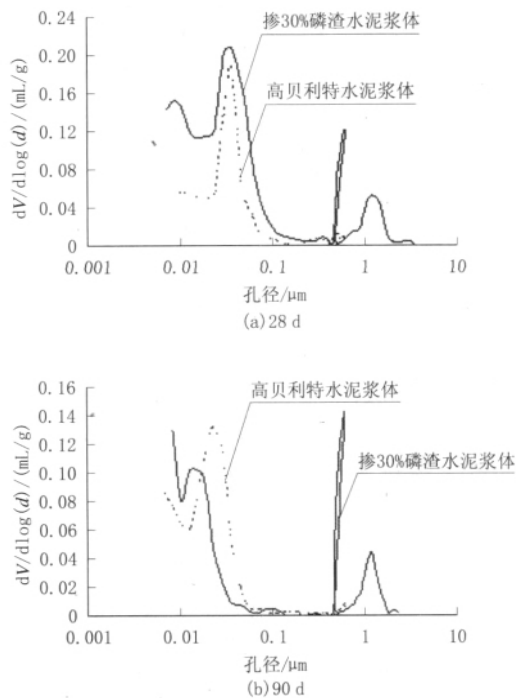


图 8 水泥浆体的孔径分布曲线

图 8 表明,水化龄期延长时,高贝利特水泥浆体和掺磷渣高贝利特水泥浆体的总孔量随之减少,孔峰位置向小孔方向移动。水化 28 d 时,高贝利特水泥浆体中,孔径在 18~112 nm 间的

孔数量最多,水化 90 d 时,大多数孔的孔径在 13~60 nm。对于掺 30%磷渣的高贝利特水泥浆体而言,浆体内部的孔径分布呈双峰分布。水化 28 d 时,孔径主要分布在 18~180 nm,470~2000 nm 之间也有部分的孔隙集中分布,水化 90 d 时,孔径主要分布在 10~60 nm,470~1800 nm 之间也有少量的孔隙集中分布。

水化龄期一定的情况下,对比纯高贝利特水泥浆体和掺磷渣高贝利特水泥浆体的孔径分布范围可知,水化 28 d 时,掺磷渣高贝利特水泥浆体中大孔数量较多;水化 90 d 时,掺磷渣高贝利特水泥浆体中孔隙的孔径明显细化,且小孔含量显著增加。这表明,水化 28 d 时,磷渣的火山灰反应程度较低,浆体中水化产物的量较少,浆体内部的孔隙较多,孔径较大,水化 90 d 时,磷渣的火山灰活性得到了较为充分地发挥,水化产物数量显著增多,浆体内部的总孔隙数量大大减少,孔隙中小孔的含量明显增多。这与浆体 SEM 照片的分析相对应。至于掺磷渣高贝利特水泥浆体中孔径呈双峰分布的原因仍有待于进一步研究。

3 结 论

(1)磷渣掺入后,高贝利特水泥的强度随磷渣掺量的增加而降低,早期下降幅度较大,后期下降幅度明显减缓。且抗折强度的降低幅度较抗压强度小。

(2)磷渣掺入后,显著降低了高贝利特水泥的水化热。

(3)磷渣掺入后,降低了水泥浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量,浆体早期的微观结构和孔结构均比纯高贝利特水泥浆体的差。但后期浆体的孔径分布明显优于纯高贝利特水泥浆体。

参考文献:

- [1] 冯乃谦,丁建彤.磷渣超细粉混凝土流动性、强度与耐久性[J].低温建筑技术,1998(1):2-4.
- [2] 高培伟,张德成.磷渣超细粉对高性能混凝土强度与耐久性的影响[J].山东建材学院学报,1998,12(S1):130-134.
- [3] 郭随华,林震,苏姣华.高贝利特硅酸盐水泥的水化和浆体结构[J].硅酸盐学报,2000,28(12):16-21. ▲
- [4] 郭随华,林震,苏姣华.高贝利特硅酸盐水泥的水化和浆体结构[J].硅酸盐学报,2000,28(12):16-21. ▲
- [5] 郭随华,林震,苏姣华.高贝利特硅酸盐水泥的水化和浆体结构[J].硅酸盐学报,2000,28(12):16-21. ▲
- [6] ZHU Wenzhong, BARTOS P J M. Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC[C]/YU Zhiwu, SHI Caijun, KHAYAT K H et al. Proceedings of 1st international symposium on design performance and use of self-consolidating concrete. Paris: RILEM Publication SARL, 2005: 319-327.
- [7] 谢友均,周士琼,尹健,等.免振高性能混凝土力学性能及耐久性研究[J].建筑材料学报,2000(2):178-182. ▲

(上接第 7 页)

- [2] 杜艳静,叶艳华,朱国平,等.自密实混凝土的收缩性能研究[J].混凝土,2009(7):27-30.
- [3] 胡红梅,马保国.矿物功能材料对混凝土氯离子渗透性的影响[J].武汉理工大学学报,2004,26(3):19-22.
- [4] 王爱勤,张承志,唐明述.火山灰质材料的填充作用[J].混凝土与水泥制品,1995(5):19-21.
- [5] 鲁文斌.复掺粉煤灰和硅灰在自密实混凝土中的应用[J].混凝土,