

高性能混凝土工作性及耐久性试验研究

姚志雄^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 结合福建当地材料, 配置 C50 等级高性能混凝土, 研究不同矿物质及掺量对拌合物工作性、劈裂强度及耐久性等影响。试验得到粉煤灰、矿粉在改善拌合物工作性、抗渗性及劈裂强度等指标的较优掺量及影响规律。双掺性能更优, 体现了其在粒形级配改善, 工作性提高及火山灰效应的复合优势。提出可综合考虑质量变化率、相对动弹性模量及强度等的混凝土损伤程度指标, 对混凝土在快速冻融、盐水腐蚀等因素共同作用下的损伤情况进行半定量评估。结果表明, 素混凝土损伤程度最大, 而矿粉掺量 20% 和粉煤灰掺量 15% 的损伤指标明显降低, 表明该掺量下混凝土的耐久性能明显提高。

关键词: 高性能混凝土; 工作性; 劈裂强度; 抗渗性; 快速冻融; 损伤指标

中图分类号: TU502.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)01-0010-05

Experimental study on workability and durability performance of high performance concrete

Yao Zhixiong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Key Laboratory of Civil Engineering New Technology and Informationization, Fuzhou 350118, China)

Abstract: High performance concrete (HPC) C50 was prepared in combination with Fujian local materials. Experiments were conducted to investigate the effects and dosages of the added/dosed minerals on the workability, splitting strength, durability of HPC. The optimal dosages of the minerals and their effects on improving the workability, impermeability and splitting strength of HPC were obtained. Doubly mixed HPC is of better performance in that it has composite advantages of ingrain shape grading, workability and volcano ash effect. Damage index of concrete taking account of mass variation, relative elastic modulus and strength was presented to evaluate semiquantitatively the damage of concrete under the action of rapid freezing and thawing and salt water corrosion. The results show that the damage index of plain concrete is the highest while the composite with a dosage of 20% slag powder and a dosage of 15% fly ash has a considerably lower damage with significantly improved workability.

Keywords: high performance concrete; workability; splitting strength; impermeability; fast freezing thaw; damage index

自从 20 世纪 90 年代初清华大学向国内介绍 高性能混凝土以来, 高性能混凝土的研究与应用

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2009J05114); 福建工程学院科研启动基金资助项目(GY-Z14069)

作者简介: 姚志雄(1978-), 男(汉), 福建莆田人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程宏观力学、建筑材料力学方面的研究。

在我国得到重视^[1-2]。特别是对高性能混凝土耐久性问题的研究,一直在进行中^[3]。其实高性能混凝土体现出的优异性能与其材料组成、拌合物性能及施工工艺等密切相关^[4]。高性能混凝土由于掺入合适的高效减水剂及矿物掺合料,并且在配合比设计过程中考虑了合理的浆集比,保证了拌合物粘聚性好,流动性大,保水性好,表现出良好的工作性,即高工作性是高性能的基础。而混凝土的抗渗、抗冻性能在混凝土耐久性中具有重要地位,它与混凝土的密实性及内部结构关系密切,也严重影响到各类混凝土工程的使用寿命^[5-6]。本研究结合了福建当地材料,依据浆集比配合比设计原则,配置 C50 等级高性能混凝土,探讨不同矿物类型及掺量对拌合物工作性能、抗渗性能、劈裂强度等的影响规律,并通过快速冻融法试验探讨冻融循环、腐蚀介质等因素共同作用下高性能混凝土耐久特性。

1 试验方案

根据试验规程(JTG E30 - 2005)进行混凝土拌合物工作性测试、抗渗、劈裂试验,并研究各系列混凝土在快速冻融、盐水腐蚀等因素共同作用下的损伤情况。配置混凝土的原材料如下:水泥采用炼石牌普通硅酸盐水泥 P. O52. 5,比表面积 350 m²/kg;细集料采用闽江河砂,细度模数 2. 85,颗粒级配Ⅱ区中砂,表观密度为 2. 65 g/cm³;粗集料最大粒径不超过 26. 5 mm,针片状颗粒含量 3. 5%,表观密度 2. 65 g/cm³;掺入的矿物质 2 种,一种是 F 类Ⅰ级粉煤灰,细度 3. 6%,烧失量 1. 13%,需水比 94%,另一种是Ⅰ级矿粉,比表面积为 389 m²/kg,活性指数 98%;减水剂采用液态聚羧酸类高效减水剂,减水率大于 30%。

试验证明,水泥浆体和骨料的体积比是影响拌合物整体工作性能的重要参数之一,进而影响混凝土的力学性能,对于 C50 及以上等级的高性能混凝土,浆集比 k 大约为 0. 54 时其工作性最优,性能最好^[1]。这里以浆集比为控制原则配置 C50 等级的高性能混凝土开展相关试验研究。表 1 给出高性能混凝土的基准配合比参数。单掺或双掺矿物质是指在基准配合比基础上,采用等量矿物质替代水泥,其余参数保持不变,即采用等量替代法。

表 1 高性能混凝土配合比参数(C50)							
Tab.1 Proportion parameters of HPC(C50)							
水胶比	$m_{\text{水泥}}/$ kg	$m_{\text{水}}/$ kg	$m_{\text{砂子}}/$ kg	$m_{\text{碎石}}/$ kg	砂率/ %	$m_{\text{胶凝}}/$ kg	$m_{\text{单方}}/$ kg
0. 33	464	153	655	1 116	37	495	2 400

2 试验结果分析

2.1 拌合物工作性

分析粉煤灰对拌合物工作性的影响情况。拌合物坍落度随粉煤灰掺量的增大而逐步增大。素混凝土坍落度为 12. 5 cm,粉煤灰掺量为 8% 时,坍落度为 16. 5 cm,提高 32%;粉煤灰掺量为 15% 时,坍落度 18. 5 cm,提高 48%;继续增大掺量到 25%,坍落度为 21 cm,但整体工作性下降,拌合物粘聚力不够强,浆体有点松散。可见粉煤灰的加入改善了胶凝材料的需水性,拌合物工作性得到明显改善,但不是掺量越大越好,也存在一较优掺量,超过此掺量,拌合物整体工作性反而会出现下降。对工作性的改善,建议粉煤灰掺量 15% 为宜。

这里也探讨矿粉对拌合物工作性的影响情况。结果表明,拌合物的坍落度随矿粉掺量也逐步增加,但拌合物的整体工作性有所变化。当矿粉掺量为 10% 时,坍落度 17 cm,提高 36%,拌合物保水性好,粘聚力强,整体工作性好;掺量为 20% 时,坍落度 19 cm,提高 52%,拌合物的整体工作性优良;继续增大掺量为 30% 时,坍落度继续增大,但拌合物的整体工作性有所下降,拌合物的粘聚力不够强,静置一段时间,有泌水跑浆现象。可见矿粉的加入较大程度改变了胶凝材料的需水性,拌合物工作性得到显著改善,但存在一较优掺量,超过此掺量,拌合物工作性有所下降。

综合分析,在对拌合物工作性改善效果方面,矿粉效果要优于粉煤灰。但无论是矿粉或粉煤灰,对拌合物工作性的改善存在一较优掺量。实际工程中,应根据所采用的材料品质、强度及性能要求,通过试验得到较优的矿物掺量。图 1 给出混凝土坍落度随矿物质掺量的变化情况。

2.2 渗透性能试验

2.2.1 抗渗试验

高性能混凝土以耐久性为特征指标,故其应具备体积稳定性及优良抗渗性。抗渗性就是反映混凝土耐久性的一个重要指标。因此,针对掺矿

物外加剂的高强混凝土,也设计了抗渗试验方案,研究高性能混凝土抗渗性能及影响因素。

混凝土抗渗性试验方法符合试验标准 JTG E30-2005。试件在恒温、湿度标准养护箱养护 28 d 后,对试件表面进行打磨处理,然后蜡封,挤入标准抗渗试模后,将其安装在抗渗试验机上进行试验。采用 6 个上、下底面直径分别为 175 mm 和 180 mm,高为 150 mm 的圆台形试件,从 0.1 MPa 开始施加水压,每隔 8 h 增加 0.1 MPa,直至 6 个试件中有 3 个被压力水穿透,方停止试验。

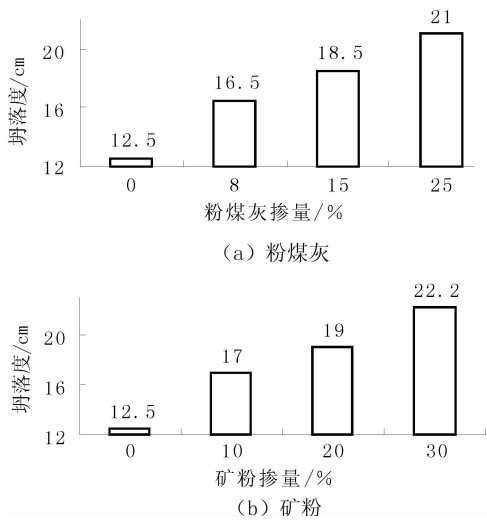


图 1 坍落度随矿物质掺量的变化

Fig. 1 Slump varies with the mineral content

分析试验结果,各系列混凝土抗渗等级远远超出所采用自动调压混凝土渗透仪的测试范围,即经过 8 h,试件仍未渗水,因而在一定的水压力下中止了试验,表明混凝土抗渗等级均达到 P12。

进行渗水高度试验。劈开试件,测量每个试件的渗水高度。在劈裂面上,沿着渗水轮廓量测 10 个点的渗水高度,以平均值作为该试件的渗水高度值,然后再计算 6 个试件渗水高度的算术平均值作为该组试件的平均渗水高度。结果表明,高性能混凝土渗水高度随粉煤灰掺量先减小后增大。素混凝土的渗水高度为 9.95 mm;粉煤灰掺量为 8% 时,渗水高度为 6.98 mm;掺量为 15% 时,渗水高度为 6.85 mm;掺量增加到 25% 时,渗水高度增大到 10.23 mm。表明粉煤灰对混凝土内部结构的改善存在一最优掺量。在最优掺量下,一定龄期时粉煤灰水化反应生成物最大限度填充混凝土内部孔隙,未水化的粉煤灰颗粒也一

定程度上改善了混凝土内部的级配情况,使整体结构达到最密实状态,抗渗能力强。掺量为 15% 时,渗水高度比素混凝土减小 31.36%。但总的来说,混凝土渗水高度都很小,表明高性能混凝土抗渗能力强。综合试验结果,该参数状态下,粉煤灰最优掺量为 15%。

分析矿粉掺量对混凝土抗渗性能的影响情况。矿粉对高性能混凝土渗水高度的影响情况同粉煤灰,渗水高度随掺量的增大先减小后增大,且总的来说,渗水高度比粉煤灰的要小点,表明改善效果有进一步提高。矿粉掺量为 10%,渗水高度为 7.28 mm;掺量为 20% 时,渗水高度为 5.78 mm;继续增大掺量为 30%,渗水高度增加到 10 mm。表明矿粉掺量对混凝土致密结构的改善也存在一最优掺量。根据试验结果,该级配状态下矿粉最优掺量为 20%,此时渗水高度比素混凝土减小 41.91%,效果明显。图 2 给出不同矿物质掺量高性能混凝土渗水高度试验结果。

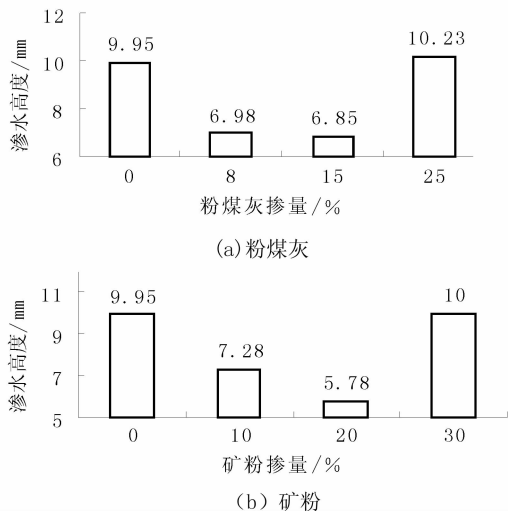


图 2 不同矿物质掺量高性能混凝土渗水高度

Fig. 2 Water penetration height of HPC with different mineral admixture

进一步分析双掺对高性能抗渗性能的影响情况。这里设计了矿粉掺量 15%,粉煤灰掺量 10% 的双掺高性能混凝土进行渗水高度试验。分析试验结果,双掺混凝土渗水高度为 6.75 mm,抗渗性能并非最优,其值介于粉煤灰掺量 15% 和矿粉掺量 20% 之间。但总的来说,与素混凝土相比,双掺高性能混凝土抗渗性能提高 72% 左右。当然这与原材料品质、试验误差等因素有关。

观察混凝土劈裂面可清晰看到,渗透水位线是一条起伏较大的曲线,而且水位突现很高的部位往往都分布着较粗粒径的集料,这就意味着骨料砂浆交界面是混凝土内部的薄弱环节,是影响混凝土性能的本质因素,所以控制好骨料的强度、级配、粒形和浆集比例,改善拌合物工作性,对提高混凝土综合性能至关重要。

为了对高强混凝土的抗渗性能作进一步的评估,根据 JTG E30 - 2005, 采用达西定律初估混凝土的渗透系数。渗透系数的计算式如下:

$$S_k = \frac{mD_m^2}{2TH}$$

(1)

式中, S_k 为相对渗透系数 (mm/s); D_m 为平均渗水高度 (cm); H 为水压力, 以水柱高度表示 (cm); T 为恒压经历的时间 (h); m 为混凝土的吸水率, 一般为 0.03。

表 2 单掺粉煤灰、矿粉高性能混凝土渗透系数

Tab.2 Permeability coefficient of HPC mixed with fly ash and mineral powder

粉煤灰		矿粉	
掺量/ %	渗透系数/ (mm · s ⁻¹)	掺量/ %	渗透系数/ (mm · s ⁻¹)
0	7.58×10^{-8}	0	7.58×10^{-8}
8	3.73×10^{-8}	10	4.06×10^{-8}
15	3.59×10^{-8}	20	2.56×10^{-8}
25	8.02×10^{-8}	30	7.66×10^{-8}

表 2 给出单掺粉煤灰、矿粉高性能混凝土渗透系数。结果表明,合适矿物外加剂掺量(20%)下混凝土的渗透系数为 3×10^{-8} mm/s 左右,混凝土结构致密,抗渗性能好。

2.2.2 圆柱体劈裂强度

抗拉强度是混凝土的另一项基本力学性能,是确定混凝土抗裂度的重要指标。渗水高度试验,需要将圆柱体劈裂,这里也对该情况下的劈裂强度进行分析。探讨不同掺量矿粉、粉煤灰对混凝土劈裂强度的影响规律。结果表明,粉煤灰掺量对混凝土劈裂抗拉强度、拉压比影响规律一致,随粉煤灰掺量的增加,劈裂抗拉强度逐渐降低,拉压比也逐渐降低,表明早期混凝土的脆性有所增大。掺量为 8%、15% 和 25% 时,强度较素混凝土分别降低 2.16%、3.54%、7.47%。见图 3 所示。

矿粉掺量对混凝土劈裂抗拉强度及拉压比的

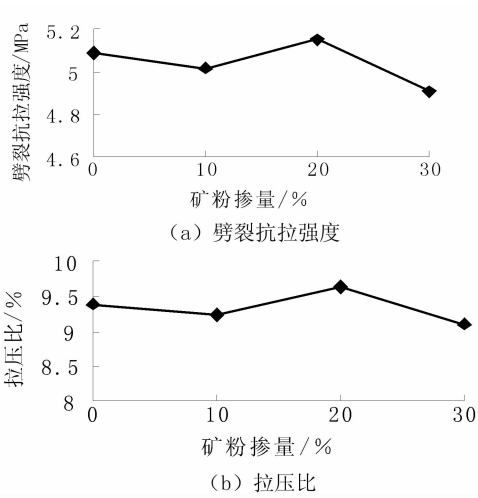


图 3 混凝土力学指标随矿粉掺量的变化

Fig.3 Changes of mechanical parameters of concrete with fly ash content

影响规律一致,随矿粉掺量增大,混凝土劈裂抗拉强度和拉压比先增大后减小,存在峰值点,但变化幅度较小,掺量 10%、25% 时,强度分别降低 1.38%、3.54%,当掺量为 20% 时强度提高 1.18%。具体见图 3 所示。这里也得到龄期 28 d 的双掺高性能混凝土劈裂抗拉强度,粉煤灰掺量 10% 矿粉掺量 15% 的劈裂抗拉强度为 5.18 MPa,比同等条件下单掺的(单掺粉煤灰 8%,单掺矿粉 20%)有所提高,体现了双掺在粒形级配改善,工作性提高及火山灰效应的复合优势,但提高的幅度不大,这与龄期没有足够长有关。



图 4 高性能混凝土劈裂面

Fig.4 Split surface of high performance concrete

可见,在标准养护条件下龄期 28 d 的混凝土试件,矿物质的活性仍未得到充分发挥,导致混凝土早期强度有所降低,但是随着龄期的增长,混凝土强度仍有较大的发展空间,且这种渐进式的强度增长有利于降低混凝土内部的水化热,对改善混凝土内部结构,降低原生缺陷,提高混凝土耐久性具有重要意义。综合分析强度变化程度、拉压

比及本实验龄期因素影响,建议粉煤灰的适宜掺量在 15% ~ 20%,矿粉掺量为 15% ~ 20%。

图 4 为高性能混凝土的劈裂面。从该图可看出,混凝土断裂面上的骨料发生了断裂,只有很少的骨料被拔出,这一方面是由于所配制的混凝土强度较高,硬化后的浆体与骨料联结力大,另一方面是由于混凝土的浆体与骨料达到了较佳的组合,浆体较好地包裹了骨料,拌合物工作性优,硬化后混凝土内部形成致密结构,浆体与骨料的界面粘结力增强,薄弱面相对少,破坏时呈现骨料断裂的整体式破坏,混凝土整体性能优。

2.3 多因素作用下混凝土损伤

混凝土的抗冻性是指混凝土受到干湿变化、温度变化、冻融变化等物理作用而能保持其性能的能力,是反映混凝土耐久性的重要指标之一,它与混凝土的密实性及内部结构有密切联系,严重影响到各类混凝土工程的使用寿命。这里通过快速冻融法探讨矿物掺合料、冻融循环、腐蚀介质等多重因素对混凝土力学特性的影响情况。

采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试件,每组试件成型 6 块,试件龄期 3 个月。采用快速冻融法,在浓度为 3.5% 的盐水中进行,每个冻融 3 ~ 5 h 内完成。试件中心温度控制在 -18 ℃ ± 2 ℃ 和 5 ℃ ± 2 ℃。每冻融一定时间后,取出试件,进行动弹性模量、重量等指标的测试。

为了对混凝土的损伤程度进行更合理评估,为此定义一个全面考虑混凝土动弹性模量、质量变化率及强度 3 个因素的混凝土损伤程度的指标。损伤程度指标定义如下:

$$w = 1 \pm \frac{5\% - W_r}{50\%} \cdot \frac{P - 60\%}{40\%} \cdot \left(\frac{P_n - P_c}{100\% - P_c} \cdot k \right) \tag{2}$$

式中, w 为经过 n 次冻融后混凝土的损伤程度; W_r 为经过 n 次冻融后混凝土质量变化率绝对值; P 为经过 n 次冻融后混凝土的相对动弹性模量; P_n 为经过 n 次冻融后混凝土的抗折强度比; P_c 为混凝土临界抗折强度比,取 70%,即认为低于该值时结构失效; n 为实际冻融次数。 k 为强度影响指数,取 1.0。当 $W_r \geq 5\%$ 且 $P \leq 60\%$ 、 $P_n \geq P_c$ 时取“+”号,其他情况下取“-”号。

w 值综合考虑了混凝土质量变化率、相对动弹性模量及强度劣化的影响。混凝土质量变化率、相对动弹性模量和抗折强度比都可通过实测得

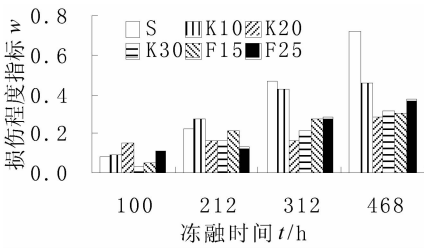


图 5 各系列试件损伤指标随冻融时间变化
Fig.5 Damage index change of various series specimen with freeze-thaw time

到,便可得到混凝土经过 n 次冻融循环后的损伤程度。 w 值越大,表示混凝土损伤越严重。当 $w = 0$ 时混凝土未受到损伤,当 $w \geq 1$ 时混凝土发生破坏,即混凝土的破坏准则为 $w \geq 1$ 。

图 6 给出各系列混凝土损伤程度指标随冻融时间的变化情况。字母 S 代表素混凝土,K 代表矿粉,F 代表粉煤灰,后面数字代表掺量。从结果可看出,经过清水 100 h 冻融循环后,各系列混凝土的损伤程度基本相同,随着盐水冻融循环时间的加长,混凝土的损伤程度逐渐增大。比较各系列混凝土损伤指标,素混凝土的最大,达到 0.72, K20、F15 系列的最小,为 0.30 左右,不到素混凝土的一半,其余系列混凝土损伤程度介于之间。可见矿粉掺量 20% 和粉煤灰掺量 15% 的混凝土耐久性能最好。

3 结论

1) 粉煤灰、矿粉对拌合物工作性的改善,存在一较优掺量。对工作性的改善,建议矿粉掺量为 20%,粉煤灰掺量 15% 为宜。

2) 所配置的高性能混凝土结构致密,抗渗性能好,抗渗等级均达到 P12。综合分析,该级配状态下粉煤灰最优掺量取 15%,矿粉最优掺量取 20%。

3) 圆柱体混凝土劈裂抗拉强度、拉压比随粉煤灰掺量的增大逐渐减小,随矿粉掺量的增加先增大后减小,而双掺的强度比同等条件下单掺的均有所提高,体现了双掺在粒形级配改善,工作性提高及火山灰效应的复合优势。

4) 通过对混凝土损伤程度指标及破坏准则的定义,提出的评价体系可综合考虑质量变化率、相对动弹性模量及强度,可半定量地对混凝土的损伤程度进行评估。
(下转第 53 页)

表 1 本文的方法同 2012 年本体映射评价竞赛参与者的比较

Tab. 1 Comparison between the proposed algorithm and the participants algorithm of Ontology Alignment Evaluation Initiative in 2012

系统	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	运行时/s	系统	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	运行时/s
MapSSS	0.77	0.99	0.87	35	WikiMatch	0.54	0.74	0.62	750
YAM + +	0.72	0.98	0.83	120	ServOMap	0.43	0.88	0.58	18
AROMA	0.64	0.98	0.77	8	LogMap	0.45	0.73	0.56	28
AUTOMSV2	0.54	0.97	0.69	80	MaasMatch	0.57	0.54	0.56	38
WeSeE	0.53	0.99	0.69	650	MEDLEY	0.50	0.60	0.54	85
Hertuda	0.54	0.90	0.68	9	ServOMapLt	0.20	1.00	0.33	7
HotMatch	0.50	0.96	0.66	20	ASE	0.54	0.49	0.51	40
Optima	0.49	0.89	0.63	380	本文提出的方法	0.88	0.94	0.91	8

4 结论

为了更好地组合不同的相似度度量结果以提高本体映射结果的质量,本文提出了一种新的基于调谐值度量和单纯降序提取算法的自动化本体映射技术。该技术首先通过调谐值来度量各种相

似度矩阵的重要性和可靠性,并为每一个相似度矩阵赋予权重以集成不同的相似度矩阵,然后通过单纯降序提取算法结合阈值的策略提取最终的本体映射结果。实验采用 2012 年本体映射评价竞赛的测试数据集,同 2012 年本体映射评价竞赛的参与者的比较表明该文提出的方法是有效的。

参考文献:

[1] Alsayed A. Management of XML data by means of schema matching[D]. Magdeburg: Otto-von-Guericke-University, 2010.

[2] Ji Q, Haase P, Qi G. Combination of similarity measures in ontology matching using the OWA operator[M]//Recent Developments in the Ordered Weighted Averaging Operators: Theory and Practice. Berlin: Springer, 2011: 281 – 295.

[3] Gusfield D, Irving R W. The stable marriage problem: structure and algorithms[M]. Cambridge: MIT Press, 1989: 156 – 157.

[4] Miller G A. WordNet: a lexical database for English[J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11): 39 – 41.

[5] Van Rijsbergen C J. Information Retrieval[M]. London: Butterworth, 1975: 48 – 49.

(责任编辑: 肖锡湘)

(上接第 14 页)

参考文献:

[1] 姚燕, 王玲, 田培. 高性能混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[2] 冯乃谦. 高性能混凝土与超高性能混凝土的发展与应用[J]. 施工技术, 2009, 38(4): 1 – 6.

[3] 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 – 61.

[4] 李清富, 薛延信, 张海洋. 不同掺合料对高性能混凝土工作性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2012(1): 58 – 61.

[5] 李北星, 马立军, 关爱军, 等. 箱梁 C55 高性能混凝土的抗裂性与耐久性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 40 – 44.

[6] 王明芳, 孙玉永. 高性能混凝土抗盐蚀耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(6): 127 – 130.

(责任编辑: 陈雯)