

硅灰和石灰石粉对碾压混凝土抗裂性能的影响

徐世烺, 葛 唯

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:为研究硅灰和石灰石粉对碾压混凝土材料抗裂性能的影响及作用机理,采用劈裂抗拉强度、拉压比、弹强比等指标,并结合扫描电镜、热重分析、压汞测试等技术,在石灰石粉-粉煤灰系碾压混凝土中加入硅灰,进行试验分析。结果表明,掺合料总量为 40% 时,加入 5% 的硅灰,能够增加微观结构密实度,优化孔结构,有效提高材料的整体抗裂性能。

关键词:碾压混凝土;石灰石粉;硅灰;劈拉强度;拉压比;弹强比;抗裂性能

中图分类号:TU528.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0054-06

Effect of silica fume and limestone powder on crack resistance property for roller compacted concrete//XU Shilang, GE Wei (*College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

Abstract: To investigate the effect of silica fume and limestone powder on the crack resistance for roller compacted concrete (RCC) and its mechanism, silica fume was added into the limestone powder-fly ash-based RCC. Indicators such as the split tensile strength, tension-compression ratio and elastic modulus-compression ratio were used for the experimental analysis with the technology of scanning electron microscopy (SEM), thermal gravimetric analysis (TGA) and mercury injection (Hg). It is suggested that adding 5% silica fume into the limestone powder-fly ash-based RCC of 40% admixture can increase the density of the microstructures, optimize the pore structures and effectively improve the overall crack resistance performance of the material.

Key words: roller compacted concrete; limestone powder; silica fume; split tensile strength; tension-compression ratio; elastic modulus-compression ratio; crack resistance property

碾压混凝土是一种干硬性贫水泥混凝土,广泛应用于大坝、公路等基础建设。经过 20 多年的发展,富胶凝材料高掺粉煤灰碾压混凝土已成为中国碾压混凝土筑坝技术的特色。近年来粉煤灰日益短缺,工程上常用石灰石粉替代部分粉煤灰。但高掺量石灰石粉会导致粉煤灰二次水化效应减弱、混凝土后期强度发展受到限制,甚至会严重降低混凝土强度,对抗裂性能发展不利^[1]。开裂是影响碾压混凝土耐久性的重要因素,如何提高碾压混凝土的抗裂性能已成为碾压混凝土工程技术发展中的一项重大课题。

碾压混凝土的开裂主要是由混凝土中拉应力超过抗拉强度或拉伸应变超过极限拉伸值引起。影响混凝土抗裂性能的因素很多,主要包括混凝土的强度、弹性模量、徐变、线膨胀系数、水化温升和自身体积变形等^[2]。文献[3]提出,抗裂性能较好的混凝土应具有抗拉强度较高、极限拉伸值较大、弹性模量

较低、干缩率较小、绝热温升较小等特点。

关于如何提高混凝土抗裂性能,已有一些研究成果。聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维具有高抗拉强度和高弹性模量,可通过掺入 PVA 纤维提高混凝土的抗裂性能和弯曲韧性^[4]。HLC 外加剂具有高效减水、缓凝、引气、保塑、微膨胀及早强增强等功能,掺入 HLC 外加剂可在早期有效补偿混凝土干缩以提高材料抗裂性能^[5]。此外,硅灰具有高火山活性,广泛应用于高强混凝土的配制,对提高混凝土抗裂性也有一定的优越性,但硅灰在碾压混凝土中的应用研究甚少。本文从掺合料层面,提出将石灰石粉和高活性掺合料硅灰混合使用,替代粉煤灰应用于碾压混凝土,针对硅灰和石灰石粉对碾压混凝土抗裂性能的影响作进一步探讨。

1 配合比设计

原材料:水泥采用 42.5 号普通硅酸盐水泥,细

骨料采用普通河砂,粗骨料采用一级配石子,粒径在 5~20 mm 之间;掺合料采用Ⅱ级粉煤灰、粒径小于 0.016 mm 的石灰石粉和埃肯硅灰;外加剂采用聚羧酸高效减水剂。

配合比:据相关文献资料显示,目前石粉掺量大约控制在掺合料总量的 50%,硅灰掺量控制在胶凝材料的 5% 左右^[6-7]。本次试验配合比见表 1,水胶比均为 0.5,减水剂掺量为 0.75%,掺合料总量为 40%,分别是 20% 石灰石粉+20% 粉煤灰(LF)、5% 硅灰+35% 粉煤灰(SF)、20% 石灰石粉+5% 硅灰+15% 粉煤灰(LSF)。

表 1 碾压混凝土试验配合比

编号	各材料用量/(kg·m ⁻³)						
	水	水泥	粉煤灰	石灰石粉	硅灰	砂	石
LF	130	156	52	52	0	805	1280
SF	130	156	91	0	13	805	1280
LSF	130	156	39	52	13	805	1280

2 抗拉强度

碾压混凝土的抗拉强度主要与水泥浆的抗拉能力及水泥浆与骨料的胶结能力有关。在其他条件相同的情况下,碾压混凝土的抗拉强度越大,其抗裂能力越强。试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件测定劈拉强度,试验结果见表 2。3 组试件劈拉强度随龄期的增长,抗裂性能逐渐提高,其中 LF 试件的劈拉强度在各个龄期都处于最低值,这表明其抗裂性能最弱。加入硅灰后,早期 LSF 试件的劈拉强度最高,后期 SF 试件的劈拉强度最高,充分体现了硅灰对提高抗裂性能的重要作用。在 90 d 龄期时,LSF 试件和 LF 试件的劈拉强度分别为 2.66 MPa 和 2.10 MPa,LSF 试件的混凝土劈拉强度提高了 26.67%。

以上结果说明,石灰石粉对碾压混凝土材料后期劈拉强度发展不利,硅灰在提高碾压混凝土材料劈拉强度方面具有一定的优越性。在石灰石粉-粉煤灰系碾压混凝土中加入硅灰,既能解决粉煤灰匮乏的现实问题,又能有效提高抗裂性能,具有一定的经济性和重要的工程意义。

3 拉压比

拉压比为劈拉强度与抗压强度的比值,拉压比

表 2 立方体试件劈拉强度、抗压强度和拉压比

编号	劈拉强度/MPa			抗压强度/MPa			拉压比/%		
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
LF	0.74	1.64	2.10	15.37	23.71	23.81	4.84	6.91	8.81
SF	0.92	1.84	3.21	15.39	27.81	35.92	5.95	6.63	8.93
LSF	1.01	1.94	2.66	16.01	28.63	31.04	6.31	6.76	8.57

越大,混凝土材料的韧性越好,抗裂性能越好^[8]。通过测定 3 组 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件的抗压强度(表 2),并根据抗压试验和劈拉试验结果,计算得出 3 组试件在 7 d、28 d、90 d 龄期时的拉压比,结果见表 2。由表 2 可知,拉压比随龄期的延长呈增长趋势,其中 LF 试件的增长幅度最大,90 d 龄期时 3 组试件拉压比接近。单从拉压比的角度看,3 组试件具有相近的较好的长期抗裂性能,但早期 LSF 试件的拉压比为 6.31%,比 LF 试件高 30.4%。早期抗裂性能的提高是保证后期耐久性的重要基础,因此硅灰的加入能够弥补石灰石粉早期抗裂性能不利的缺陷,提高碾压混凝土材料整体耐久性能。

4 弹强比

弹性模量是指混凝土产生单位变形所需要的应力,弹性模量取决于骨料本身的弹性模量及混凝土的灰浆率(即单位体积碾压混凝土中水泥浆体的质量分数)。静弹性模量试验采用 Ø150 mm×300 mm 的圆柱体试件,试验结果见表 3。弹强比是指混凝土的弹性模量与其抗压强度之比,也是迄今为止混凝土抗裂性能评价时使用最广泛的指标。弹强比越小,混凝土的抗裂能力越强^[9],3 组试件各龄期的弹强比见表 3。3 组试件的弹强比随龄期的增长总体呈下降趋势,SF 试件下降速度最快,LSF 试件次之,并且最终这两组试件的弹强比都小于 LF 试件。这说明掺有硅灰的试件具有更好的抗裂性能,石灰石粉在一定程度上阻碍了试件抗裂性能的提高。90 d 龄期时,LSF 试件弹强比为 1 026,比 LF 试件低 16.2%,充分体现了在石灰石粉-粉煤灰系碾压混凝土中加入硅灰能够有效提高长期抗裂性能。

表 3 弹性模量、弹强比试验结果

编号	弹性模量/GPa			弹强比		
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
LF	19.98	27.96	29.14	1301	1179	1224
SF	20.89	32.19	32.20	1357	1157	897
LSF	22.40	33.37	31.83	1399	1166	1026

5 微观分析

各组试件标准养护 7 d、28 d、90 d 后进行试验,

试验后选取核心样品用酒精浸泡停止水化,烘干后保存。采用高真空扫描电镜(SEM)观测碾压混凝土材料水化产物及微观结构形态。采用Micromeritics Autopore IV 9510 压汞仪测量分析试件的孔隙结构,采用TA-Q500 热重分析仪测量试件在不同龄期下的热稳定性能,并通过 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 定量分析解释材料宏观性能。

5.1 SEM 分析

3 组配合比的试件在各龄期的水化产物微观形态如图 1~3 所示。随着龄期的增长,水化产物的微观结构密实程度逐渐提高。相同龄期下,LF 试件的密实度相对较小,这与掺合料的活性以及反应机理有关。石灰石粉的晶核效应对水泥水化有一定的促进作用,但石灰石粉活性非常低,导致早期生成 C-S-H 凝胶较少,无法有效填充钙矾石晶体间的孔隙。另外,石灰石粉的存在会阻碍钙矾石(Aft)向单硫型水化硫铝酸钙(AFm)的转化^[10],导致 LF 试件中存在大量的钙矾石。石灰石粉主要化学成分

CaCO_3 不与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应,导致 LF 试件中有较多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。这些因素都不利于 LF 试件早期抗裂性能的发展。

加入 5% 的硅灰后,SF、LSF 两组试件的微观结构密实程度都高于 LF 试件,一定程度反映了其力学性能和抗裂性能也较好。这是由于硅灰具有高火山灰活性,不仅能在早期促进硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)水化,还能吸收水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,同时生成较多的 C-S-H 凝胶,不断填充钙矾石晶体间的微观孔隙,提高材料的微观结构密实程度,使界面过渡区的黏结力增强,宏观性能得到改善^[11-12]。李建权等^[13]研究发现,硅灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应分布较均匀,除发生在界面区域还发生在浆体的毛细结构中,优化了孔隙结构。由此可见,掺有石灰石粉的碾压混凝土材料微观结构相对疏松,硅灰的加入能够优化水化产物结构,提高材料密实度,从而增强材料的抗裂性能。

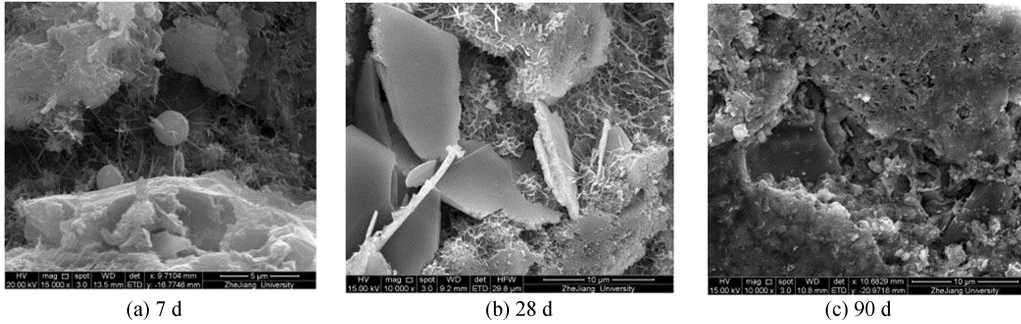


图 1 LF 试件各龄期水化产物形态

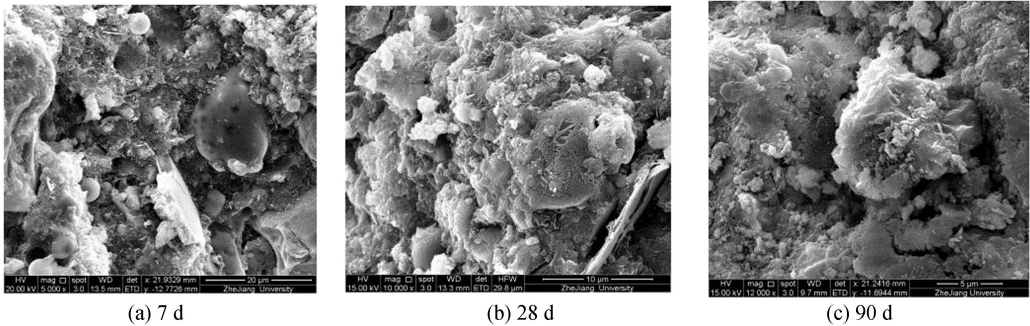


图 2 SF 试件各龄期水化产物形态

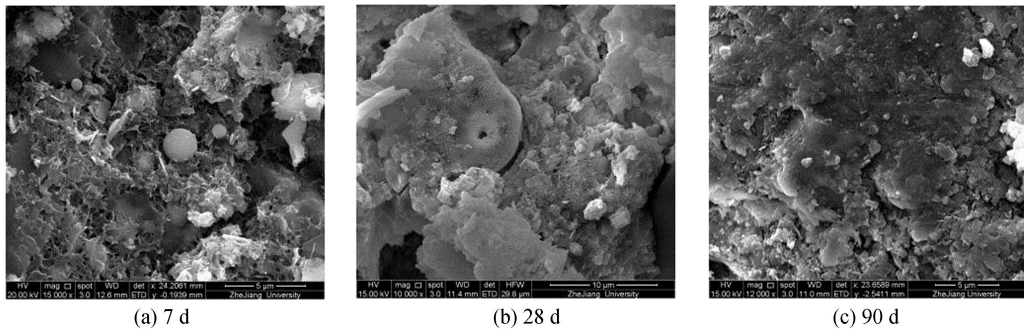


图 3 LSF 试件各龄期水化产物形态

5.2 孔隙结构

压汞试验进行孔隙分析时,根据半径在(r_i , $r_i + dr_i$)占据的孔隙部分等于水银在压力(p_i , $p_i + dp_i$)下浸入的体积增量 ΔV_i ,可得到不同掺量粉煤灰混凝土的孔径分布情况^[14]。按照我国学者吴中伟的研究结论,根据孔级配和孔隙率 2 个因素,划分出不同影响的孔级:无害孔级(<20 nm)、少害孔级[20 nm,50 nm)、有害孔级[50 nm,200 nm)、多害孔级(≥ 200 nm)^[15]。不同龄期时 3 组试件孔隙参数见表 4。

表 4 不同龄期时碾压混凝土孔隙参数

龄期/ d	编号	孔隙 率/%	分孔隙率/%			
			<20 nm	[20 nm,50 nm)	[50 nm,200 nm)	≥ 200 nm
7	LF	15.76	1.39	2.61	6.75	5.01
	SF	14.51	1.77	2.35	6.01	4.37
	LSF	16.59	2.19	3.85	5.82	4.73
28	LF	16.54	3.87	5.01	3.33	4.34
	SF	16.47	4.95	4.65	1.93	4.93
	LSF	16.05	6.29	4.61	1.29	3.86
90	LF	16.87	3.91	6.20	1.86	4.92
	SF	14.41	4.47	3.84	1.36	4.74
	LSF	13.38	5.81	4.18	0.45	2.92

随着龄期的增长,3 组配合比的碾压混凝土材料水化产物增多,相同配合比下养护时间越长,微观结构越密实。由表 4 可知,相同龄期时,随着硅灰的掺入,[50 nm,200 nm)区段内的孔隙体积显著降低,LSF 试件最低,其中 28 d 及 90 d 龄期时更为显著,LSF 试件在该区段内的孔隙体积仅为 LF 试件的 39% 及 23%。3 组试件在[20 nm,50 nm)和孔径大于或等于 200 nm 区段内的孔隙体积变化都不够明显。但 90 d 龄期时,LSF 试件的多害孔体积最小,体现出 LSF 试件具备更优的孔结构。由此可知,当同时掺入石灰石粉和硅灰时,材料孔隙直径显著降低,有害孔隙得到明显改善,对于提升材料抗裂性能具有积极影响。硅灰的加入和养护龄期的延长,提高了水泥、粉煤灰等胶凝材料的水化程度,生成水化硅酸钙凝胶填充微观结构中较大的毛细孔孔隙,优化了孔隙结构。

通过孔隙率对比分析可知,7 d 龄期时 LSF 试件的孔隙率最大,90 d 龄期时 LSF 试件的孔隙率最小。这是因为石灰石粉和硅灰的复合火山灰效应^[16]加快了水泥水化速度,早期生成大量含有孔径小于 20 nm 的胶凝孔的水化硅酸钙,提高了孔隙率,但该孔径范围的孔隙不会对材料宏观力学性能和耐久性带来负面影响^[17-18]。后期水化反应充分完成,孔隙率最小说明孔结构得到优化,微观结构更加致密,再次证明抗裂性能得到提高。

5.3 热重分析

水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会导致材料有害孔隙

增多,削弱骨料与界面的黏结程度,降低材料整体力学性能和抗裂性能。图 4 为 LF、SF、LSF 试件分别在 7 d、28 d 和 90 d 龄期时的微分热重曲线,观察可知各组试件微分热重曲线形态相似,主要有 3 个失重峰,分别在 80 ~ 120℃ 区间、400℃ 和 700℃ 附近。400℃ 附近的失重峰主要由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 受热分解失去结构水引起, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数越大,质量损失越多。高翔^[19]在相关研究中提出可以根据失重波峰(380 ~ 430℃)对应的面积计算得到各组样品中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数,结果见表 5。

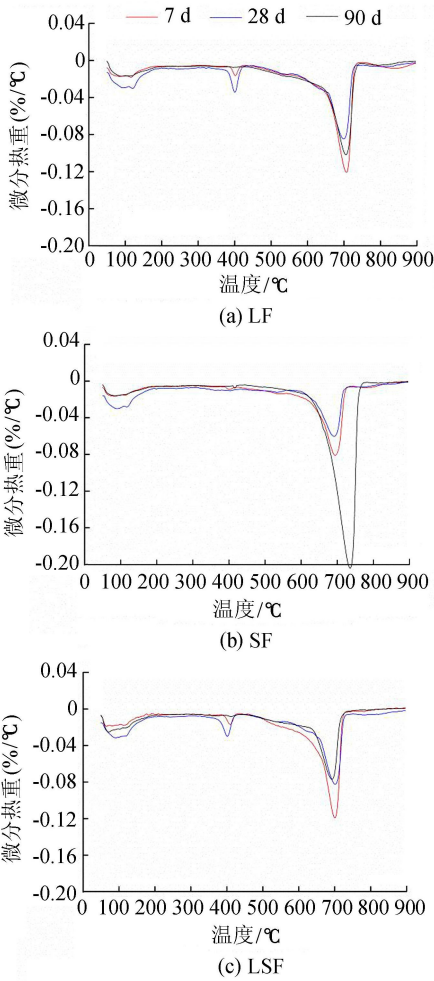


图 4 3 组试件不同龄期下的微分热重曲线

表 5 各龄期 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数

编号	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数/%		
	7 d	28 d	90 d
LF	1.28	2.68	0.90
SF	1.12	1.24	0.72
LSF	1.37	2.55	0.93

由表 5 可知 7 d、28 d 及 90 d 龄期时各组试件中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数具有相似的变化规律,LF 试件与 LSF 试件接近,SF 试件最低,其中 90 d 龄期时由于水化反应充分,3 组试件中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数较其他龄期时显著降低。SF 试件中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量

分数一直最低,说明硅灰能够消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 提高微观结构的密实度,从水化产物层面对材料性能进行优化。早期石灰石粉的主要成分 CaCO_3 不与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,导致 LF 试件和 LSF 试件中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数较高。LF 试件和 LSF 试件 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数相近,但结合电镜和压汞分析结果得知两者水化程度不同,LSF 试件的水化程度明显高于 LF 试件,因此 LSF 试件具有更高的抗裂性能。

6 结 论

本文主要以劈拉强度、拉压比、弹强比等指标评估了两种掺合料(20% 石灰石粉和 5% 硅灰)单独或同时等量替代粉煤灰时对碾压混凝土材料抗裂性能的影响,并通过微观结构观测、孔隙分析、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 定量分析等方法从微观角度为混凝土材料宏观性能提供理论依据。具体结论如下:

a. 宏观性能方面,掺合料总量为 40% 时,在掺有石灰石粉和粉煤灰的碾压混凝土中加入 5% 的硅灰,可有效提高抗裂性能。具体表现为与石灰石粉-粉煤灰系碾压混凝土相比,加入硅灰后的碾压混凝土具有较高的劈拉强度、拉压比和较低的弹强比。

b. 由微观机理分析可知,石灰石粉和硅灰都能够促进水泥水化,但硅灰的活性大,促进效果更加明显,两者微观结构也相差很大。双掺石灰石粉和粉煤灰的碾压混凝土材料在水化过程中含有大量 CaCO_3 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,影响界面过渡区的黏结力和整体微观结构密实度。硅灰的加入能够降低水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数,优化孔结构,提高材料密实度,增强材料的宏观性能。

c. 从工程应用的角度看,由于石灰石粉对碾压混凝土材料后期劈拉强度发展不利,硅灰在提高碾压混凝土材料劈拉强度方面具有一定的优越性。在石灰石粉-粉煤灰系碾压混凝土中加入硅灰,既能充分利用石灰石粉解决粉煤灰匮乏的现实问题,又能有效弥补石灰石粉长期抗裂性能不足的缺陷,具有一定的经济性和重要的工程意义。

参考文献:

[1] 肖开涛,董芸. 石粉替代部分粉煤灰对碾压混凝土性能的影响研究 [J]. 水力发电,2007,33 (12): 85-88. (XIAO Kaitao, DONG Yun. Study on influence of limestone powder partially replacing fly ash on rcc performance [J]. Water Power,2007,33 (12): 85-88. (in Chinese))

[2] 李光伟. 混凝土抗裂能力的评价 [J]. 水利水电科技进展,2001,21 (2): 33-36. (LI Guangwei. Evaluation of crack resistance of concrete [J]. Advances in Science and

Technology of Water Resources,2001,21 (2): 33-36. (in Chinese))

[3] 刘数华,方坤河,曾力. 粉煤灰和硅粉对碾压混凝土抗裂性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品,2005 (2): 12-13. (LIU Shuhua, FANG Kunhe, ZENG Li. Effect of fly ash and silica powder on the cracking resistance of RCC [J]. China Concrete and Cement Products,2005 (2): 12-13. (in Chinese))

[4] 郭丽萍,陈波,杨亚男. PVA 纤维对混凝土抗裂与增韧效应影响的研究进展 [J]. 水利水电科技进展,2015,35 (6): 113-118. (GUO Liping, CHEN Bo, YANG Ya' nan. Progress of PVA fibers research in improving crack resistance and toughness of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (6): 113-118. (in Chinese))

[5] 黄国平,卢安琪,胡玉初,等. 混凝土抗裂技术的研究与应用 [J]. 河海大学学报 (自然科学版),2002,30 (增刊 1): 69-74. (HUANG Guoping, LU Anqi, HU Yuchu. Research and application of concrete crack resistance technology [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2002,30 (Sup1): 69-74. (in Chinese))

[6] 刘茉莉,杨万斌. 硅灰裹砂法对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土,2011 (6): 149-150. (LIU Moli, YANG Wanbin. Effect of sand coated by silica fume permeability of concrete [J]. Concrete, 2011 (6): 149-150. (in Chinese))

[7] 赵哲,马志广. 浅谈石灰石粉对碾压混凝土力学性能和耐久性能的影响 [J]. 水利建设与管理,2015,35 (5): 30-33. (ZHAO Zhe, MA Zhiguang. Discussion on influence of limestone powder on mechanics performance and durability performance of roller compacted concrete [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2015,35 (5): 30-33. (in Chinese))

[8] 王德志,孟云芳,万良兴. 纤维素纤维矿物掺合料改善高性能混凝土抗裂性能 [J]. 水利水电科技进展,2010,30 (5): 41-44. (WANG Dezhi, MENG Yunfang, WAN Liangxing. Crack resistance of high performance concrete mixed with cellulose fiber and mineral admixture [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010,30 (5): 41-44. (in Chinese))

[9] 杨华全,周世华,董维佳. 混凝土抗裂性的分析、评价与研究展望 [J]. 混凝土,2007 (10): 46-48,50. (YANG Huaquan, ZHOU Shihua, DONG Weijia. Analyse, evaluation and prospect on concrete cracking resistance [J]. Concrete,2007 (10): 46-48,50. (in Chinese))

[10] 王雨利,王卫东,朱建平. 不同石灰石粉掺量对硅酸盐水泥水化的影响 [J]. 硅酸盐通报,2014,33 (11): 2974-2980. (WANG Yuli, WANG Weidong, ZHU Jianping. Effect of limestone aggregate micro fines with different contents on hydration of portland cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2014,33 (11): 2974-2980. (in Chinese))

[11] GONEN T, YAZICIOGLU S. The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of

- concrete[J]. Building and Environment, 2007, 42 (8): 3080-3085.
- [12] SEZER G I. Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars[J]. Construction and Building Materials, 2012(26): 613-618.
- [13] 李建权, 许红升, 谢红波. 硅灰改性水泥/石灰石砂浆微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(4): 66-70. (LI Jianquan, XU Hongsheng, XIE Hongbo. Microstructural investigation of silica fume modified cement/lime mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(4): 66-70. (in Chinese))
- [14] 鲁彩凤, 袁迎曙, 蒋建华. 粉煤灰混凝土孔隙结构对气体扩散能力的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(4): 523-529. (LU Caifeng, YUAN Yingshu, JIANG Jianhua. Effect of pore structure on gas diffusion in fly ash concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(4): 523-529. (in Chinese))
- [15] 廉慧珍, 童良, 陈恩义. 建筑材料物相研究基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [16] 何峰, 黄政宇. 硅灰和石英粉对活性粉末混凝土抗压强度贡献的分析[J]. 混凝土, 2006 (1): 39-42. (HE Feng, HUANG Zhengyu. Compressive strength contribution analyses of silica fume and crush quartz in RPC[J]. Concrete, 2006 (1): 39-42. (in Chinese))
- [17] KUMARA R, BHATTACHARJEE B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete[J]. Cement Concrete Research 2003, 33(1): 155-164.
- [18] HE Zhimin, LIU Junzhe, ZHU Kangwu. Influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of steam-cured concrete[J]. Energy Procedia, 2012, 16(2): 836-841.
- [19] 高翔. 纳米 SiO₂ 改性超高韧性水泥基复合材料试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

(收稿日期: 2018-01-18 编辑: 骆超)

(上接第 35 页)

- [9] SU Huaizhi, LI Jinyou, CAO Jiping, et al. Macro-comprehensive evaluation method of high rock slope stability in hydropower projects [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(2): 213-224.
- [10] 李隐, 邓建, 彭泽. 基于蒙特卡罗模拟的边坡可靠度评价[J]. 采矿技术, 2010, 10(1): 39-42. (LI Yin, DENG Jian, PENG Ze. Evaluation of slope reliability based on monte carlo simulation[J]. Mining Technology, 2010, 10(1): 39-42. (in Chinese))
- [11] 李德亮, 石崇, 聂卫平, 等. 基于土性相关蒙特卡罗法的争岗滑坡堆积体可靠性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 317-322. (LI Deliang, SHI Chong, NIE Weiping, et al. Reliability analysis of Zhenggang landslide deposit based on Monte-Carlo method with relevant parameters of c and ϕ [J]. Journal of Hohai University(Natural Science Edition), 2011, 39(3): 317-322. (in Chinese))
- [12] 康聪. 蒙特卡罗模拟在两类路径相关期权定价中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [13] 陈铂, 罗麟. 蒙特卡罗法求大体积混凝土不稳定温度场的完整解[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 31-34. (CHEN Bo, LUO Lin. The complete solution of mass concrete in unstable temperature field using the Monte Carlo method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 31-34. (in Chinese))
- [14] 王晶晶, 樊尊荣. 含水层非均质性对地下水蒙特卡罗模拟结果的影响[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 46-51. (WANG Jingjing, FAN Zunrong. Impacts of aquifer heterogeneity on Monte Carlo simulation of groundwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 46-51. (in Chinese))
- [15] 李孝全, 黄超, 徐晨洋, 等. 基于改进 PSO-LSSVM 和蒙特卡罗法的电力系统可靠性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 458-464 (LI Xiaquan, HUANG Chao, XU Chenyang, et al. Reliability evaluation of power system based on improved PSO-LSSVM and Monte Carlo simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 458-464. (in Chinese))
- [16] 林元庆. 专家群评价的校正: 补偿方法及应用[J]. 科学学研究, 1998, 16(4): 69-75. (LIN Yuanqing. The method of correction and compensation to expert group evaluation[J]. Studies in Science of Science, 1998, 16(4): 69-75. (in Chinese))
- [17] HUAIZHI Su, MENG Yang, ZHIPING Wen. Multi-layer multi-index comprehensive evaluation for dike safety[J]. Water Resources Management, 2015, 29(13): 4683-4699.
- [18] 段在鹏, 钱新明, 夏登友. 基于蒙特卡罗模拟和主客观综合权重的化工园区配电系统模糊综合评价[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 15-19. (DUAN Zaipeng, QIAN Xinming, XIA Dengyou. Research on fuzzy comprehensive assessment for chemical industry park on fuzzy comprehensive assessment for chemical industry park power supply and distribution system based on Monte-Carlo simulation [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 15-19. (in Chinese))
- [19] 帅青燕, 何亚伯. 基于云模型的坝基岩体质量综合评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(增刊 1): 54-58. (SHUAI Qingyan, HE Yabo. Comprehensive evaluation on rock quality of dam foundation based on cloud model[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43 (Supl): 54-58. (in Chinese))
- [20] 宋海洲, 王志江. 客观权重与主观权重的权衡[J]. 技术经济与管理研究, 2003(3): 62. (SONG Haizhou, WANG Zhijiang. The balance of objective weight and subjective weight [J]. Technoeconomics and Management Reserch, 2003(3): 62. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-08-16 编辑: 郑孝宇)