文章编号:1001-4888(2015)06-0785-06

粉煤灰及 SAP 对喷射混凝土早龄期开裂损伤影响*

安新正，陈科，王雷雷，申彦利
(河北工程大学 土木工程学院，河北邯郸 056038)

摘要：为系统研究粉煤灰、吸水保水剂(SAP)对喷射混凝土早龄期开裂损伤的影响，以掺入了粉煤灰、SAP 的喷射混凝土为研究对象，对喷射混凝土的早龄期开裂损伤进行平板法试验研究。完成了各种试件的早龄期开裂损伤测试，研究了粉煤灰对喷射混凝土以及 SAP 对掺入 20%粉煤灰喷射混凝土的早龄期开裂损伤的改善作用。试验结果表明，掺粉煤灰等量取代 10%、20%水泥后，喷射混凝土的早龄期开裂损伤与基准喷射混凝土相比分别减小约 7.2%和 26.8%。掺 0.25%SAP 和 0.5%SAP 可以使 20%粉煤灰掺量喷射混凝土的早龄期开裂损伤与基准喷射混凝土相比分别减小约 57.9%和 66.50%。因此，掺粉煤灰可有效地降低喷射混凝土早龄期开裂损伤，且在掺加粉煤灰的基础上再掺加适量的 SAP 效果会更佳。

关键词：喷射混凝土；粉煤灰；开裂损伤；吸水保水剂；早龄期
中图分类号：TU528. 53　　**文献标识码**：A　　DOI：10.7520/1001-4888-15-058

0　引言

当前喷射混凝土以其独特的优势在桥梁工程、隧道工程、水电工程、矿井工程与大型储仓工程等工程领域中都得到了较为广泛的应用[1-4]。在实际工程中，喷射混凝土的早期收缩变形会引发其早期开裂损伤现象的发生，这将严重影响喷射混凝土的工程质量及其结构的耐久寿命，因此喷射混凝土的早期开裂损伤一直是工程界关注的热点问题。梁丹等[5]通过研究后发现，在喷射混凝土中掺入适量的粉煤灰可有效抑制由速凝剂引发的喷射混凝土强度的损失；李洪泉等[6]基于隧道支护结构安全性分析方法，研究了喷射混凝土的收缩和徐变变形对隧道安全性的影响；陈德鹏等[7]基于早期开裂与长期收缩试验，研究了高吸水树脂对混凝土的收缩开裂性能的改善作用；朱伶俐等[8]经研究后发现在普通喷射混凝土中掺入适量的偏高岭土可有效提高喷射混凝土力学性能；Berra 等[9]通过掺粉煤灰喷射混凝土的强度试验研究认为喷射混凝土的早期强度与粉煤灰掺量呈负相关关系；Pichler 等[10]在微米级上对喷射混凝土徐变进行了理论分析；Malmgren 等[11]经研究发现喷射混凝土的干缩随喷层厚度的减小而增大；Jensen 等[12,13]认为在新拌制混凝土时掺入预吸一定量水分的吸水保水剂(SAP)，可有效改善混凝土自收缩。然而到目前为止，关于粉煤灰、SAP 对喷射混凝土早龄期塑性开裂影响方面的研究文献还较少，因此开展粉煤灰、SAP 对喷射混凝土早龄期塑性开裂损伤影响方面的研究很有必要。

本文以掺加粉煤灰、SAP 的湿法喷射混凝土为研究对象，对喷射混凝土早龄期开裂损伤进行相关的试验研究，以期掌握粉煤灰、SAP 对喷射混凝土早龄期开裂损伤的影响规律，从而为喷射混凝土的科学设计与工程应用提供有益的参考。

* **收稿日期**：2015-04-15；**修回日期**：2015-05-28
基金项目：国家自然科学基金(51378169)资助
通讯作者：安新正(1963－)，男，博士，副教授。主要从事结构耐久性方面的研究。Email：axz6022@163.com

1 早龄期开裂与收缩变形试验

1.1 试验材料及配合比

1.1.1 试验材料选用

水泥采用邯郸市太行水泥有限责任公司生产的太行山 P.O.42.5 级普通硅酸盐水泥;粉煤灰采用邯郸马头电厂生产的Ⅰ级粉煤灰;粗集料选用粒径为 5～10mm 的连续级配石灰岩质碎石,压碎指标为 10.2%,表观密度为 2655kg/m^3;细集料采用沙河的天然河砂,细度模数 2.72,表观密度为 2506kg/m^3,含泥量小于 0.5%;减水剂采用 KDSP-1 聚梭酸盐高性能减水剂;速凝剂采用山西桑穆斯建材化学有限公司生产的无碱粉态速凝剂。SAP 采用北京汉力森新技术有限公司生产的超吸水树脂(粒径 0.2～0.4mm),在自来水条件下试验测得其饱和吸水量约为其自身质量的 65 倍。

事先将 SAP 用总用水量的 43%预浸泡,1.5h 后将预吸水后的 SAP 与骨料、水泥混合后搅拌 20s,然后再加水搅拌并使 SAP 在喷射混凝土中分散均匀。

1.1.2 配合比设计

目前,在喷射混凝土生产中采用 10%或 20%的粉煤灰来替代水泥进行配合比设计,是较为常见的做法,而应用较广的当属 20%粉煤灰掺入量的喷射混凝土。考虑到以上原因,本文在喷射混凝土早龄期开裂损伤试验研究中,拟采用 10%和 20%两种粉煤灰掺入量进行配合比设计。同时,鉴于 20%粉煤灰掺入量在喷射混凝土生产中的广泛应用,又进一步在 20%粉煤灰掺入量的基础上,对添加适量 SAP 的喷射混凝土进行配合比设计,具体为:在基准喷射混凝土中掺入 20%粉煤灰和 0.25%SAP,以及掺入 20%粉煤灰和 0.5%SAP 分别配制喷射混凝土试件 SC3 和 SC4。相关的喷射混凝土的配合比详见表 1。

表 1 喷射混凝土配合比(单位:kg/m^3)

Tab.1 Mix proportion of shotcrete (unit: kg/m^3)

试件组编号	喷射混凝土用材料							
	水	水泥	粉煤灰	细集料	粗集料	减水剂	速凝剂	SAP
SC0	179	415	0	922	922	4.15	16.6	0
SC1	179	375	41.5	922	922	4.15	16.6	0
SC2	179	335	83	922	922	4.15	16.6	0
SC3	179	335	83	922	922	4.15	16.6	0.9
SC4	179	335	83	922	922	4.15	16.6	1.8

1.2 试验方法与试件设计

每组喷射混凝土试件的制作均采用湿法喷射混凝土,喷射方法参照文献[14]的相关要求进行。鉴于平板法试验过程简便,可有效量化喷射混凝土早龄期开裂损伤,本文试验中采用平板法试验来研究掺加粉煤灰与 SAP 对喷射混凝土早期抗裂性能的影响。依据文献[15]的相关规定,各类平板法试件的制作均在室内(温度:25℃±2℃,相对湿度:60%±5%)环境中进行,每组配合比喷射浇筑 3 个试件。将平板法试验装置放置在铺上一层聚乙烯薄膜(防止试件水分从底面蒸发损失)的厚度为 10mm 的光滑复合板上,然后喷射混凝土并在完成喷射后立即抹平试件喷射表面,随即开启电风扇并使其以 3～4m/s 的风速匀速而平行地吹拂在喷射混凝土试件的喷射表面。平板法试验装置如图 1 所示。

平板法试验中,裂缝观测应在喷射混凝土试件完成后立即开始,观测时长为 72h。试验过程中注意观测并记录:①各试件初始裂缝的出现时间、裂缝数目、裂缝长度及最大裂缝宽度;②各试件不同时间段内裂缝的数目、裂缝长度及最大裂缝宽度。早龄期裂缝的度量:①裂缝长度采用皮尺测量;②裂缝宽度采用读数显微镜测量(精度为 0.01mm)。

喷射混凝土试件早龄期开裂损伤评价值的计算:①单个喷射混凝土试件的早龄期开裂总面积依据(1) 式进行计算[15];②得到单个喷射混凝土试件早龄期开裂总面积后,再通过(2)式即可得到该组喷射

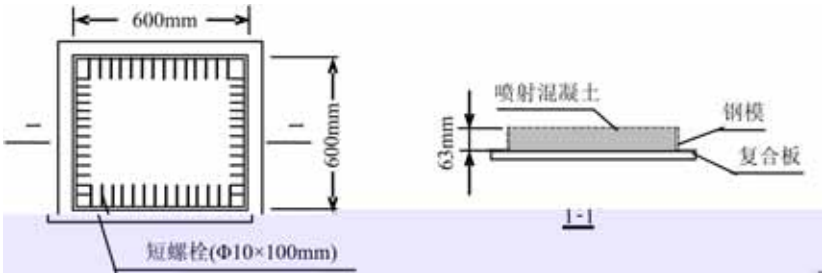

图 1　平板约束试验装置示意图

Fig. 1　Sketch experiment device of flat restraint

混凝土试件早龄期开裂损伤的评价值。

$$A_{cr,j} = \sum_{i=1}^{n} w_i l_i \tag{1}$$

式中，$A_{cr,j}$为每组试件中第 j 个试件裂缝名义总面积，mm^2；w_i 为第 j 个试件第 i 条裂缝的最大裂缝宽度，mm；l_i 为第 j 个试件的第 i 条裂缝长度，mm；n 为第 j 个试件的总裂缝条数。

$$\overline{A_{cr}} = \sum_{j=1}^{k} A_{cr,j} \tag{2}$$

式中，$\overline{A_{cr}}$为每组试件的早龄期开裂损伤评价值，mm^2；k 为每组中试件的数量，取 $k=3$。

2　试验结果与分析

2.1　粉煤灰对喷射混凝土早龄期开裂性能的影响

观察 SC0 组、SC1 组和 SC2 组喷射混凝土试件的早龄期开裂过程与现象，可以发现：SC0 组 3 个试件的初始开裂约出现在喷筑后的 2.0h 之后。其中一个试件的裂缝数量为 2 条，其余两个试件的裂缝数量均为 3 条，裂缝长度在 53～107mm 之间，裂缝宽度在 0.16～0.41mm 之间；SC1 组 3 个试件的初始裂缝约出现在喷筑后 3h 时。3 个试件的裂缝数量均为 2 条，裂缝长度在 65～72mm 之间，裂缝宽度在 0.12～0.36mm 之间；SC2 组试件的初始裂缝约出现在喷筑后 3.3h 时，其中一个试件的裂缝数量为 1 条，其余两个试件的裂缝数量均为 2 条，裂缝长度在 48～81mm 之间，裂缝宽度在 0.14～0.30mm 之间。从初始开裂至喷筑后的 24h 内，SC0 组、SC1 组和 SC2 组试件的新增裂缝均有明显增加；喷筑后的 24～72h 内，新增的裂缝数量明显减少。早龄期内平均裂缝数量的统计结果显示：SC0 组＞SC1 组＞SC2 组。

观察各组喷射混凝土试件表面裂缝的具体分布与开裂走向，可以看出各组试件的初始裂缝均主要发生在试件的 4 个角区范围内。试件喷筑后的 72h 内，约裂缝的 22%发生在试件的中部区域，其余裂缝基本都发生在试件的角区范围之内。

结合每组喷射混凝土试件中每个试件在不同时段内，每条裂缝的长度及开裂宽度的实际测量结果，依据(1)式及(2)式计算得到的该组试件完成喷筑后，早龄期各个时间段内试件喷射表面的早期开裂损伤评价结果如图 2 所示。

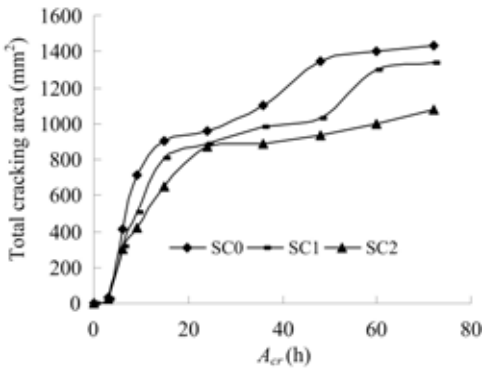

图 2　粉煤灰对喷射混凝土早期开裂性能的影响

Fig. 2　Influence of flyash on early stage cracking properties of shotcrete

由图 2 可知，从初始开裂至 24h 内，SC0 组、SC1 组和 SC2 组喷射混凝土试件的开裂损伤速率均较快，在 24～72h 内，试件的开裂损伤速率均有明显的降低。SC0 组(基准喷射混凝土)试件的喷射面出现裂缝的时间比掺入粉煤灰的喷射混凝土试件(SC1 组和 SC2 组)都提前一些，且其早龄期(72h)开裂损伤($\overline{A_{cr}}$)与 SC1 组和 SC2 组试件相比较都有一定程度

的提高。可以看出,当普通喷射混凝土(SC0 组)处于相对干燥环境时,其早龄期的抗裂性能没有掺10%～20%粉煤灰的优良。通过统计分析可以发现,基准喷射混凝土中掺 10%、20%粉煤灰来替代水泥后,在喷筑后的 72h 内其开裂损伤面积较基准喷射混凝土组试件分别减小了约 7.2%、26.8%。这说明粉煤灰对喷射混凝土的早龄期开裂具有一定的改善作用,且在 20%粉煤灰掺量时粉煤灰对喷射混凝土抗裂性能的改善作用更优。

平板法试验结果表明,掺 10%～20%粉煤灰喷射混凝土初始裂纹的出现时间比基准喷射混凝土有一定的推迟,其各龄期下的最大裂缝宽度也明显小于基准喷射混凝土,可见粉煤灰可以有效地降低喷射混凝土的早龄期开裂损伤。这主要是由于粉煤灰的微珠效应与火山灰效应使得水泥的水化物与骨料间在结构上更加密实。同时,随着粉煤灰掺量的增加,更多的粉煤灰微粒均匀地分散在喷射混凝土的粗骨料与水泥砂浆胶体之间的初始孔隙之中,并形成微观约束效应。这一微观约束效应显著改善了喷射混凝土的早龄期抗裂性能[16]。

2.2 SAP 对喷射混凝土早龄期开裂性能的影响

观察 SC3 组和 SC4 组喷射混凝土试件的早龄期开裂过程与现象,可以发现:SC3 组和 SC4 组试件均在 3.5h 时有 1 条裂缝出现,裂缝长度分别为 75mm 和 86mm,裂缝宽度分别为 0.21mm 和 0.18mm。从初始开裂至 11h 时,SC3 组和 SC4 组试件的裂缝数量、裂缝长度均增加较快。在 11～72h 内,新增的裂缝数量以及旧有裂缝长度的扩展均明显下降。统计早龄期(72h)内各组喷射混凝土试件中出现的裂缝数量,可以发现平均裂缝数量随 SAP 掺入量的增加而减少。

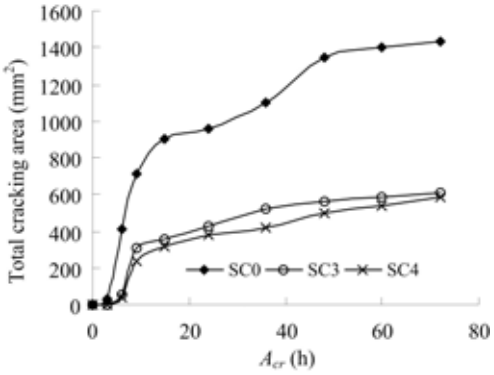

图 3 SAP 对喷射混凝土早期开裂性能的影响

Fig. 3 Influence of SAP on early stage cracking properties of shotcrete

观察各组喷射混凝土试件表面裂缝的具体分布与开裂走向,可以发现:初始裂缝主要分布在试件的 4 个角区范围内。但是,随着时间的推移在试件表面上新增的裂缝先是在角区出现,同时一些原有的裂缝在向试件的中部延伸,且有部分裂缝在试件表面的中部区域形成贯通裂缝。经对试件早龄期(72h)裂缝进行统计后发现,仅有约 16%～21%的裂缝发生在试件表面的中部区域,而其他裂缝均发生在试件表面的角部区域。

结合每组喷射混凝土试件中每个试件在不同时段内每条裂缝的长度及开裂宽度的实际测量结果,依据(1)式及(2)式计算得到的该组早龄期各个时间段内试件喷射表面的开裂损伤评价结果详见图 3 所示。

由图 3 可知,SC3 组和 SC4 组喷射混凝土试件在早龄期内的开裂损伤评价值与 SC0 组喷射混凝土试件相比较,分别减少约 57.9% 和 66.5%。可见在基准喷射混凝土中同时掺适量的粉煤灰粉和 SAP 比单掺粉煤灰更加有利于改善喷射混凝土的早龄期抗裂性能,且 0.5%SAP 掺量时的早龄期抗裂效果更优。这主要是由于均匀分布在喷射混凝土内部的 SAP(储蓄一定量的水)释放出来的水分使得水泥的水化反应、试件表面因 3～4m/s 的风速匀速吹过而逐渐消耗散失掉的水分得到了一定量的补充与供给,这在一定程度上延缓并抑制了喷射混凝土试件早龄期开裂损伤的发生[17]。

3 结论

本文通过喷射混凝土早龄期开裂损伤的试验研究,主要得到以下结论:

(1) 在喷射混凝土中掺入 10%～20%粉煤灰可有效降低喷射混凝土的早龄期开裂程度,且 20%粉煤灰掺量的作用效果明显优于 10%粉煤灰掺量的作用效果。

(2)在掺入 20%粉煤灰的基础上再掺入 0.25%～0.5%SAP,可明显延长喷射混凝土的初始开裂时间,显著降低喷射混凝土的早龄期开裂损伤程度,且掺 0.5%SAP 的喷射混凝土的早龄期抗开裂性能优于掺 0.25%SAP 的喷射混凝土。

（3）在实际的工程应用中，粉煤灰、SAP 在喷射混凝土中的实际掺入量应通过喷射混凝土早龄期开裂损伤及其它性能指标（回弹率、抗压强度等）的试验结果来确定。

参考文献：

[1] 黄平明，王达. 喷射混凝土在梁桥加固中的应用[J]. 长安大学学报（自然科学版），2005，25(6)：39－42（HUANG Pingming，WANG Da. Application of sprayed-concrete in bridge reinforcement [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)，2005，25(6)：39－42(in Chinese))

[2] Jong P W，Un J H，Cheol K K，et al. Mechanical performance of shotcrete made with a high-strength cement-based mineral acceletor [J]. Constructure and Building Materials，2013，49(12)：175－183.

[3] 王科. 喷射混凝土在钢筋混凝土结构加固工程中的应用研究[D]. 成都：西南交通大学，2006（WANG Ke. Study of reforcement project in reinforced concrete framework with shot concrete [D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2006 (in Chinese))

[4] 何军拥，田承宇. 聚丙烯纤维喷射混凝土在电站大坝中应用的研究[J]. 新型建筑材料，2007(2)：31－33（HE Junyong，TIAN Chengyu. Study on application of polypropylene fiber sprayed concrete to major dam of hydroelectric project [J]. New Building Materials，2007(2)：31－33 (in Chinese))

[5] 梁丹，朱霞萍，虞丹 等. 粉煤灰在喷射混凝土中的应用[J]. 四川建筑科学研究，2012，38(4)：212－214（LIANG Dan，ZHU Xiapin，YU Dan，et al. The application of flyash in shotcrete [J]. Sichuan Building Science，2012，38(4)：212－214(in Chinese))

[6] 李洪泉，杨成永，陆景慧. 干缩和徐变对隧道喷射混凝土支护安全的影响[J]. 北京交通大学学报，2009，33(4)：18－22（LI Hongquan，YANG Chengyong，LU Jinghui. Influence of shrinkage and creep of shotcrete on the safety of the primary support of tunnels [J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2009，33(4)：18－22(in Chinese))

[7] 陈德鹏，钱春香，高桂波 等. 高吸水树脂对混凝土收缩开裂的改善作用及其机理[J]. 功能材料，2007，38(3)：475－478（CHEN Depeng，QIAN Chunxiang，GAO Guibo，et al. Mechanism and effect of SAP for reducing shrikage and cracking of concrete[J]. Journal of Functional Materials，2007，38(3)：475－478 (in Chinese))

[8] 朱伶俐，赵宇. 偏高岭土提高喷射混凝土性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报，2014，33(5)：1169－1173（ZHU Lingli，ZHAO Yu. Experimental research on the properties improvement of shotcrete with metakaolin [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2014，33(5)：1169－1173(in Chinese))

[9] Berra M，Faggiani G，Mangialardi T，et al. Infiuence of stress restraint on the expansive behaviour of concrete affected byalkali-silica reaction [J]. Cement and Concrete Research，2010，40(9)：140－149.

[10] Pichler Christian，Lackner Roman，Mang Herbert A. Multiscale model for creep of shotcrete from logarithmic-type viscous behavior of CSH at the μm-scale to macroscopic tunnel analysis [J]. Journal of Advanced Concrete Technology，2008，6(1)：91－110.

[11] Malmgren L，Nordlund E，Rolund S. Adhesion strength and shrinkage of shotcrete [J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2005，20：33－48.

[12] Jensen O M，Hansen P F. Water-entrained cement-based materials I principles and theoretical background [J]. Cem. Concr. Res.，2001，31：647－654.

[13] Jensen O M，Hansen P F. Water-entrained cement-based materials II experimental observation [J]. Cem. Concr. Res.，2002，32：973－978.

[14] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T50086－2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2001（General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T50086－2001 specifications for bolt-shotcrete support [S]. Beijing：China Planning Press，2001(in Chinese))

[15] 中国土木工程学会. CCES01－2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005（China Civil Engineering Society. CCES01－2004. Guide to durability design and construction of concrete structures[S]. Beijing：China Building Industry Press，2005 (in Chinese))

[16] 孟凡深，王子敬. 掺合料对混凝土收缩影响及收缩模型分析[J]. 水电能源科学，2009，27(5)：163－165（MENG Fanshen，WANG Zijing. Research for effects of admixture and shrinkage model on high-performance concrete [J].

Water Resources and Power, 2009, 27(5):163－165 (in Chinese))

[17] Bentz D P, Jensen O M. Mitigation strategies for autogenous shrink age cracking [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(6):677－680.

On the Effect of Flyash and SAP on Shotcrete Early Age Cracking Damage

AN Xin-zheng, CHEN Ke, WANG Lei-lei, SHEN Yan-li

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: In order to systematically study the influence of flyash and super absorbent polymer(SAP) on the early age shotcrete cracking damage, taking shotcrete mixed with flyash and SAP as studying object, experimental study was carried out based on plate specimen method. Measurement of early age cracking damage for various specimens was completed. The improvement effect of flyash (mixed with pure shotcrete) and SAP (mixed with shotcrete with 20% flyash) on early age cracking damage was experimentally investigated, respectively. Experimental results manifest that under the condition of flyash amount in pure shotcrete is 10% and 20% respectively, the shotcrete early age cracking damage decreases by 7.2% and 26.8% respectively, compared with standard shotcrete; under the condition of SAP amount is 0.25% and 0.5% in shotcrete with 20% flyash respectively, the shotcrete early age cracking damage decreases by 57.9% and 66.5% respectively, compared with standard shotcrete. So, flyash can effectively reduce the shotcrete early age cracking damage, and the improvement effect of moderate amount of SAP mixed with shotcrete containing flyash is better than that of single flyash.

Keywords: shotcrete; flyash; cracking damage; super absorbent polymer(SAP); early age