

抗裂型外加剂对粉煤灰混凝土抗压强度的影响

蒋建华,林明益,裘佳琪

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024)

摘要: 考虑抗裂型外加剂类型及其掺量的影响,开展了粉煤灰混凝土在养护与硫酸盐腐蚀条件两种情况下抗压强度的试验研究。试验结果表明:不同粉煤灰掺量下 UEA 型膨胀剂对混凝土力学性能的影响规律一致,HME-V 高效抗裂剂的影响规律不同。养护龄期内,掺加 UEA 或 HME-V 与 30%粉煤灰的混凝土抗压强度值均在 90 d 后处于稳定,掺量均以 5%为最佳强度掺量,硫酸盐腐蚀后以 5%外加剂掺量的试件损失最低。5%和 8%两种掺量下,随着粉煤灰掺量的提高(10%~30%),掺加两种抗裂外加剂的试件 28 d 抗压强度均降低。养护的 30%粉煤灰掺量的 UEA 试件强度总大于 HME-V 试件。硫酸盐腐蚀后掺加 HME-V 的试件强度大于 UEA 试件强度。HME-V 外加剂较 UEA 能更好地延缓硫酸盐腐蚀造成的力学性能损失。

关键词: 混凝土;抗裂型外加剂;硫酸盐腐蚀;抗压强度

中图分类号: TU528

文献标识码: A

The Influence of Crack Resistant Admixture on the Compressive Strength of Fly Ash Concrete

JIANG Jianhua, LIN Mingyi, QIU Jiaqi

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Considering the influence of the type and content of anti-cracking admixture, the evolution of compressive strength of fly ash concrete under the conditions of curing and sulfate corrosion was studied. The test results show that the effect of UEA expansion agent is the same under different fly ash content, and the effect of HME-V high-efficiency anti-cracking agent is different. During the curing period, the compressive strength value of 30% fly ash mixed with UEA or HME-V is stable after 90 days. The best strength content is 5% and the loss of the specimen with 5% content is the lowest after sulfate corrosion. With the increase of fly ash content (10%~30%), the compressive strength at 28d of the two kinds of anti-cracking admixtures decreases. The strength of UEA specimens cured with 30% fly ash content is higher than that of HME-V specimens. After sulfate corrosion, the strength of HME-V specimens is higher than that of UEA. HME-V admixture can better delay the loss of mechanical properties caused by sulfate corrosion than UEA.

Key words: concrete; anti-cracking admixture; sulfate attack; compressive strength

随着混凝土材料不断向高强度、高性能化发展,现代混凝土结构的早期开裂已经成为一个越来越突出的问题。混凝土若产生危害性裂缝,将会对混凝土力学性能、耐久性能等产生严重影响,裂缝控制是保证结构安全与耐久性的关键问题^[1-2]。在混凝土中使用抗裂型外加剂是改善混

凝土早期抗裂性能、满足工程耐久性要求的主要技术途径^[3-6]。为了更好地指导抗裂型外加剂在混凝土中的应用,研究抗裂型外加剂对混凝土力学性能的影响十分必要。

目前已有学者在抗裂型外加剂对混凝土的性能影响方面作了相关研究。李华^[7]等作了含膨胀

收稿日期:2020-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408192);河海大学中央高效基本科研业务费专项资金资助项目(B200202232)

作者简介:蒋建华(1982-),男,重庆忠县人,博士,副教授,研究方向为钢筋混凝土耐久性。

剂混凝土构件损伤的力学和声学分析;Wang^[8]等研究了 CaO、MgO 膨胀剂对钢管混凝土变形及力学性能的影响;崔朋勃^[9]对不同膨胀剂掺量下的喷射补偿收缩钢纤维混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度进行了试验研究。高培伟^[10]对掺粉煤灰与新型镁质类膨胀剂的大体积混凝土进行了力学性能研究。周小菲^[11]等研究了掺加膨胀剂的混凝土抗裂效果。目前的研究主要集中在特定外加剂对混凝土各方面性能的改进上,而对于不同类型外加剂及其掺量对混凝土力学性能的影响对比研究有待加强,因此有必要对其开展试验研究。

本文针对抗裂型外加剂对混凝土力学性能的影响,选取两种抗裂型外加剂,并考虑外加剂掺量的影响,分别研究了粉煤灰混凝土在养护条件与硫酸盐腐蚀条件下的抗压强度演变规律。

1 试验方案

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;矿物掺合料采用 F 级粉煤灰;粗骨料为粒径为 5~15 mm 的碎石,级配良好;细骨料为河砂(中砂),细度模数 2.5;无水硫酸钠,纯度大于 99.5%。

本试验采用两种外掺型抗裂剂,分别为 UEA 型膨胀剂、HME-V(温控·防渗)高效抗裂防渗剂。UEA 型膨胀剂以硫铝酸盐为主,通过适度膨胀补偿收缩。HME-V(温控-防渗)高效抗裂防渗剂是一种具有调控水泥水化放热速度、补偿水泥基材料收缩双重作用,由混凝土水化温升抑制剂,与氧化钙类或硫铝酸钙-氧化钙类或氧化镁复合膨胀剂按照一定比例复合的水泥基膨胀材料。

1.2 试件设计与制备

试件设计为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体,水胶比为 0.40。养护试件粉煤灰掺量为 10%、20%、30%;腐蚀试件粉煤灰掺量为 20%。参照各类型外加剂的掺量范围,UEA 型膨胀剂考虑 2%、5%和 8%三种掺量,HME-V 的掺量为 5%、8%和 10%,粉煤灰和外加剂均采用等量取代水泥的方式。表 1 为掺两种抗裂剂的粉煤灰混凝土试件配合比。

1.3 养护与硫酸盐腐蚀

试件脱模后分为养护试件与腐蚀试件,养护试件放入装有温度(20±2)℃的清水养护箱中养护至相应测试龄期(7、28、60、90、120 d)。将用于硫酸盐腐蚀试验的试件养护至 28 d 龄期后,放入温

表 1 混凝土试件配合比 (单位:kg/m³)
Tab. 1 Mix proportion of concrete specimen

工况	水	粉煤 灰	石	砂	水泥	外加剂	
						UEA	HLC-I
U1					396.0	9.0	—
U2					382.5	22.5	—
U3					369.0	36.0	—
H1	180.0	45.0	1165.0	655.0	382.5	—	22.5
H2					369.0	—	36.0
H3					360.0	—	45.0
U4					351.0	9.0	—
U5					337.5	22.5	—
U6					324.0	36.0	—
H4	180.0	90.0	1165.0	655.0	337.5	—	22.5
H5					324.0	—	36.0
H6					315.0	—	45.0
U7					306.0	9.0	—
U8					292.5	22.5	—
U9					279.0	36.0	—
H7	180.0	135.0	1165.0	655.0	292.5	—	22.5
H8					279.0	—	36.0
H9					270.0	—	45.0

度(20±2)℃,浓度 15%的 Na₂SO₄ 溶液中以全浸泡的方式模拟腐蚀环境,腐蚀龄期设计为 60、150、210 d。每月定期更换一次溶液,以保证 pH 的稳定。

1.4 力学性能试验

采用 200 吨微机控制电液伺服万能试验机(图 1),根据《GBT 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准》进行抗压强度试验。测得的抗压强度用于对比和研究不同工况下试件力学性能的变化规律,因此结果中所用的抗压强度值直接采用立方体试件的破坏强度。

2 试验结果与分析

抗压强度作为评价混凝土力学性能的常用指标,通过比较各侵蚀龄期抗压强度的变化,以反映混凝土受硫酸盐侵蚀各阶段的性能劣化过程,对比分析不同外加剂、外加剂不同掺量对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响规律。

2.1 UEA 膨胀剂的影响

2.1.1 不同粉煤灰掺量下 28 d 抗压强度变化

为了比较不同粉煤灰掺量下 UEA 膨胀剂的掺量影响,得到不同粉煤灰掺量下混凝土 28 d 抗压强度的变化,如图 2 所示。



图1 万能压力试验机

Fig. 1 Universal pressure testing machine

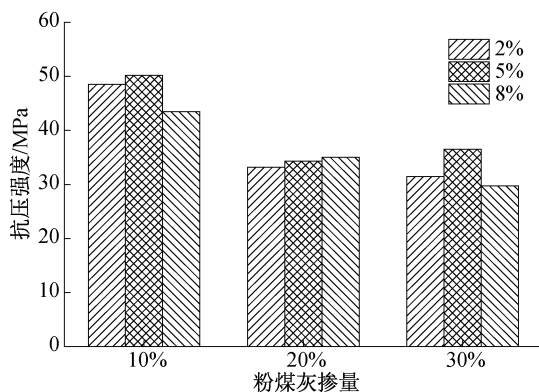


图2 不同粉煤灰掺量对 UEA 试件 28 d 抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of different fly ash content on 28 d compressive strength of UEA specimen

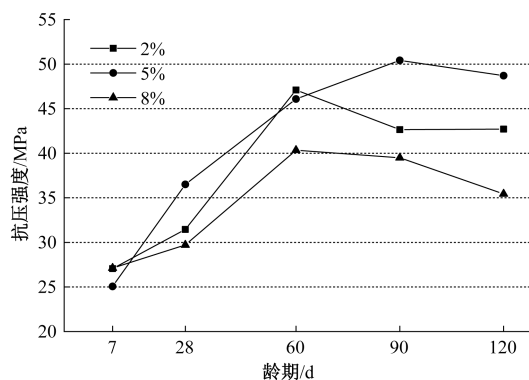


图3 UEA 膨胀剂混凝土抗压强度随龄期的影响

Fig. 3 Effect of UEA expansion agent on compressive strength of concrete with age

由图2知,当粉煤灰掺量为10%时,5% UEA 膨胀剂掺量下的试件抗压强度较2%掺量下的试件强度增长3.4%,8%掺量下的试件强度较5%下降13.3%;粉煤灰掺量为20%时,随着外加剂掺量的增加,强度略有提高,5%掺量下的试件强度较2%增加3.3%,8%较5%增长2.1%;粉煤灰掺量为30%时,5%掺量下的试件强度较2%增加16%,8%较5%下降18.6%。总体而言,不同粉煤灰掺量下,5%的 UEA 掺量是较优掺量。

2.1.2 抗压强度随养护龄期的变化

在特定的龄期对掺加 UEA 膨胀剂的混凝土试件进行强度试验,选取30%粉煤灰掺量的试件强度数据,得到不同膨胀剂掺量下的混凝土抗压强度随龄期的变化规律(图3)。由图3可知,随着养护龄期的增加,混凝土抗压强度逐渐增长,在28 d至60 d龄期之间,强度显著性提高。90 d的试件强度达到稳定。2%、5%、8%外加剂掺量下,60 d

较28 d龄期下的抗压强度分别增长44.8%、26.2%和35.8%。随着水泥熟料矿物成份的充分水化,强度总体呈现增长趋势。由于粉煤灰前期主要作为惰性填充材料,其火山灰效应主要表现在后期,水泥水化时产生的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和粉煤灰中的活性成分 SiO_2 与 Al_2O_3 之间的二次反应产生了附加水化产物,且由熟料水化反应所产生的高碱性水化物与粉煤灰中的活性氧化硅反应后转化为低碱性水化物使胶凝性能提高,从而提高了混凝土强度^[1]。总体而言,抗压强度在60 d至90 d后已趋于稳定。在标准养护试验龄期内,总体而言,膨胀剂掺量为5%的抗压强度整体最高,其后分别为2%和8%。

2.1.3 抗压强度随腐蚀龄期的变化

对于硫酸盐腐蚀后的试件,经强度试验后得到不同 UEA 膨胀剂掺量下混凝土抗压强度随硫酸盐侵蚀龄期的变化规律,如图4所示。

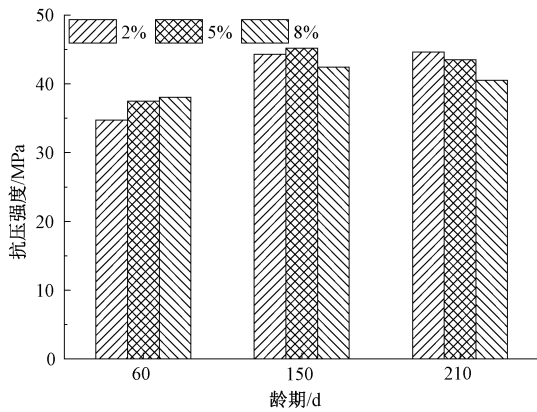


图4 掺UEA膨胀剂混凝土抗压强度随腐蚀龄期的变化

Fig. 4 Change of compressive strength of concrete with UEA expansive agent with corrosion age

图4表明,UEA混凝土150 d抗压强度大于60 d抗压强度,210 d混凝土抗压强度小于150 d抗压强度。2%掺量下的抗压强度增长显著,8%掺量下的强度增长缓慢,这一阶段的强度为粉煤灰的火山灰作用及硫酸盐侵蚀共同作用的结果。随着养护龄期的延长,粉煤灰参与二次水化的速率加快,生成较高粘接强度的水化硅酸钙凝胶,内部结构更加密实,提高了混凝土力学性能。由于二次水化需要 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,其为水泥水化后的产物,随着膨胀剂取代率的增加而减小,因此强度增长率表现为2%依次大于5%和8%。此时由于腐蚀龄期较短,腐蚀破坏造成的强度损失小于二次反应的增强作用,强度仍表现为上升阶段。随着腐蚀的持续进行,龄期达到210 d时,膨胀剂掺量为5%和8%时,强度下降,2%掺量下的混凝土强度基本保持不变。

2.2 HME-V 抗裂剂的影响

2.2.1 不同粉煤灰掺量下28 d抗压强度变化

为了比较不同粉煤灰掺量下HME-V的掺量影响,得到不同粉煤灰掺量下混凝土28 d抗压强度的变化情况,如图5所示。

由图5可知,当粉煤灰掺量为10%时,8% HME-V抗裂剂掺量作用下的抗压强度较5%掺量增加48.33%,10%掺量较8%降低51.63%。粉煤灰掺量较低时,即10%掺量下,抗压强度随着外加剂掺量的增加呈现出先增后降的变化趋势;20%粉煤灰掺量下,HME-V抗裂剂掺量增加至10%时对抗压强度具有较大的促进作用,较5%掺量下的强度增长39.7%;30%粉煤灰掺量下,三者的强度较为接近,8%掺量下的强度略有降低。不同粉煤灰

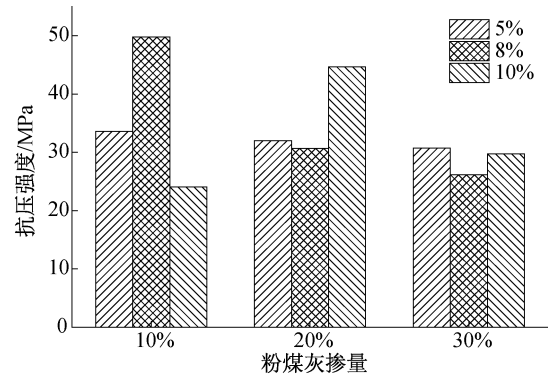


图5 不同粉煤灰掺量对UEA试件28 d抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of different fly ash content on 28 d compressive strength of UEA specimen

掺量下,HME-V抗裂剂的掺量对28 d强度会有影响,10%粉煤灰掺量下以8%的试件28 d强度最高,当粉煤灰含量为20%、30%时,随着HME-V抗裂剂含量增加,试件28 d强度先降后升。

2.2.2 抗压强度随养护龄期的变化

为研究不同掺量的HME-V抗裂剂对养护条件下粉煤灰混凝土强度发展的影响,选取30%粉煤灰含量的试件强度数据,得到试件强度随龄期(7~120 d)的发展规律,如图6所示。

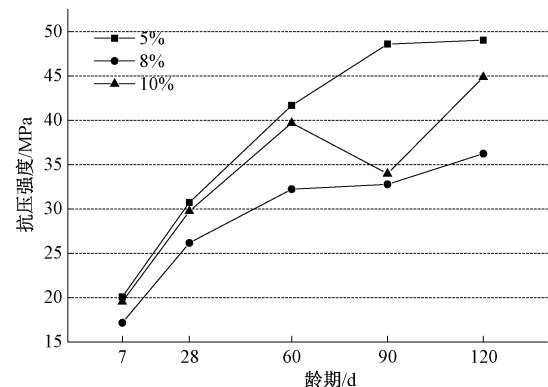


图6 HME-V抗裂防渗剂掺量对混凝土抗压强度随龄期的影响

Fig. 6 Effect of HME-V anti-cracking and anti-seepage agent on compressive strength of concrete with age

从图6可以看出,抗压强度28 d至60 d龄期增长显著,90~120 d内强度趋于稳定。5%、8%、10%掺量下,120 d强度较28 d分别增长61%、27%和50.8%,而28~60 d强度增长占比59.8%、60%、65.8%。由于混凝土本身存在较大的离散型,导致10%外加剂掺量下的混凝土试件在90 d龄期时的强度略有波动。

5% HME-V掺量下的抗压强度大于10%和8%。由于粉煤灰取代水泥比例较高,早期水泥的

水化产物生成量相对减少,强度降低,而随着外加剂掺量的增加,进一步减少了水泥用量,同时其膨胀应力较大对结构产生损伤,由此 5% 外加剂掺量下的抗压强度高于其余两组试件。由于氧化钙类型外加剂通过水化反应生成氢氧化钙,在增加碱度的同时促进粉煤灰的二次水化作用,利于强度的增长,由此 10% 外加剂掺量下的强度相对于 8% 略有提高。

2.2.3 抗压强度随腐蚀龄期的变化

掺 HME-V 抗裂剂混凝土在硫酸盐侵蚀 60 d 至 210 d 的抗压强度变化规律如图 7 所示。

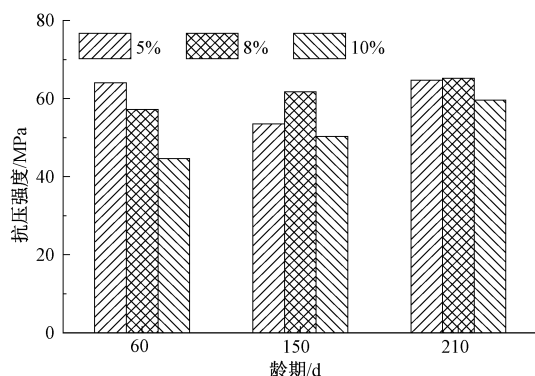


图 7 掺 HME-V 抗裂剂混凝土抗压强度随腐蚀龄期的变化规律

Fig. 7 Variation of compressive strength of concrete mixed with HME-V anti-cracking agent with corrosion age

图 7 表明,掺 HME-V 抗裂剂混凝土在硫酸盐侵蚀达 210 d 时强度未出现损失。5% 掺量下,立方体 60 d 与 210 d 抗压强度基本相近;8% 掺量下随侵蚀龄期的增加强度略有增长;10% 掺量下,强度增加较为显著。硫酸根离子侵入内部生成钙矾石等侵蚀性产物,致使强度略有提升。抗压强度试验结果表明,掺 HME-V 抗裂剂能有效提高混凝土

土抗硫酸盐腐蚀性能。

2.3 不同外加剂对比分析

2.3.1 不同粉煤灰掺量下 28 d 抗压强度对比

针对不同粉煤灰掺量,对掺加两种抗裂型外加剂试件的 28 d 抗压强度作对比分析,不同类型外加剂混凝土试件 28 d 抗压强度在不同粉煤灰掺量下的对比图如图 8 所示。

由图 8 可知,5% 和 8% 两种掺量下,随着粉煤灰掺量的提高(10%~30%),两种抗裂外加剂的试件 28 d 抗压强度均降低。不同粉煤灰掺量下 UEA 试件 28 d 强度总是大于 HME-V 试件。5% 和 8% 两种掺量下,UEA 试件和 HME-V 试件的 28 d 强度随粉煤灰含量的变化规律相似。

2.3.2 抗压强度随养护龄期的变化

进一步分析不同外加剂作用下,30% 粉煤灰含量的混凝土抗压强度随龄期(7~120 d)的增长规律。不同外加剂掺量下,混凝土试件各龄期抗压强度对比如图 9 所示。

由图 9 可知,UEA 膨胀剂掺量下的混凝土抗压强度在试验龄期内分别大于同掺量下的 HME-V 抗裂剂混凝土。UEA 膨胀剂和 HME-V 抗裂剂混凝土强度增长规律较为一致,标准养护 60 d 龄期内强度持续增长,至 60 d 时达到后期强度的 85% 至 90%,且二者强度逐渐接近。28 d 后强度增长主要为粉煤灰的二次水化贡献作用,两种外加剂作用下的混凝土均在 90 d 后强度达到稳定值,表明在该养护龄期下粉煤灰及水泥水化反应已趋于稳定。相同掺量下,掺加 UEA 膨胀剂的试件强度总在掺加 HME-V 的试件之上。

2.3.3 抗压强度随腐蚀龄期的变化

不同抗裂型外加剂对混凝土硫酸盐腐蚀后的

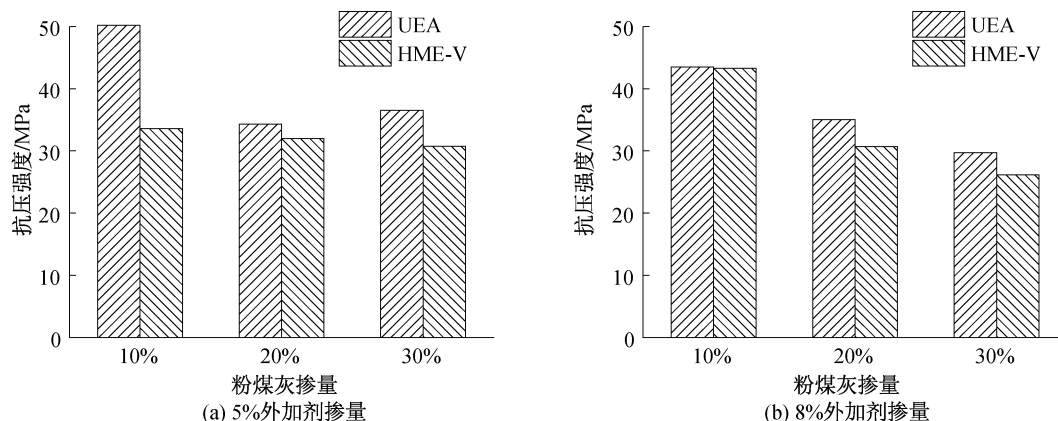


图 8 不同粉煤灰掺量下混凝土 28 d 抗压强度的对比

Fig. 8 Comparison of 28 d compressive strength with different fly ash content

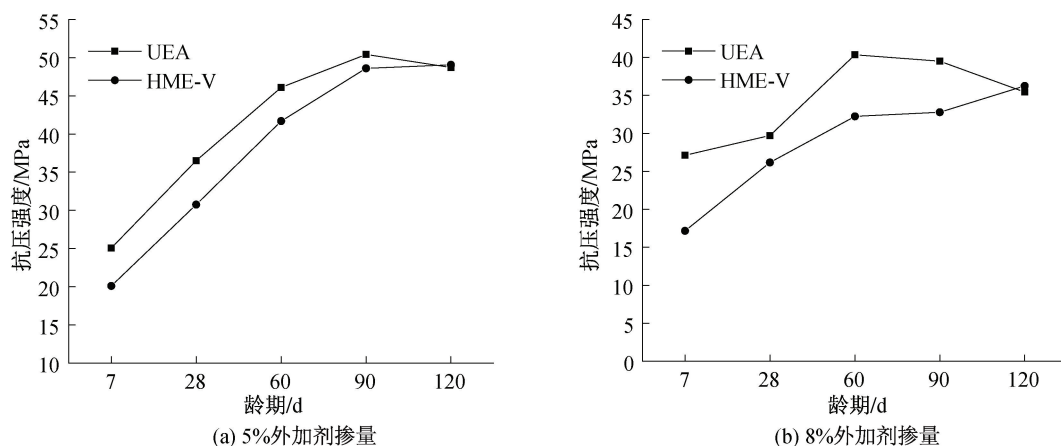


图9 不同类型外加剂混凝土抗压强度随龄期的对比

Fig. 9 Comparison of compressive strength of different admixtures with age

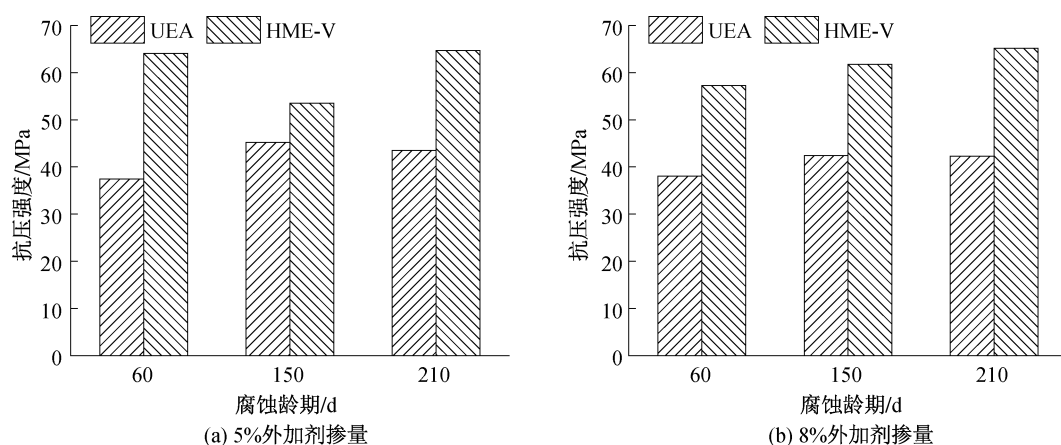


图10 不同类型外加剂混凝土抗压强度随腐蚀龄期的对比

Fig. 10 Comparison of compressive strength of different admixtures with corrosion age

力学性能影响程度不同。通过抗压强度的变化规律可以直观反映试件力学性能退化过程,以对比抗裂型外加剂对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响。不同外加剂掺量的混凝土试件抗压强度随腐蚀龄期的变化如图10所示。

掺 UEA 型膨胀剂混凝土腐蚀 150 d 抗压强度较初始强度增长 31.5%;掺 HME-V 抗裂剂混凝土腐蚀 60 d 强度较未腐蚀混凝土强度增加一倍,强度显著增长,至 210 d 腐蚀龄期,强度仍未表现出下降趋势。两种掺量下,掺 HME-V 抗裂剂混凝土强度总在掺加 UEA 的混凝土之上。

HME-V 抗裂剂以氧化钙为膨胀源,水化生成氢氧化钙补偿收缩,在硫酸盐腐蚀过程中,氢氧化钙与硫酸钠、水化铝酸钙等反应生成钙矾石,此反应消耗的部分浆体中的氢氧化钙由早期外加剂水化生成的氢氧化钙不断补充,由于钙矾石相较于氢氧化钙密度小,反应过程中体积大幅增加,产生适度的体积膨胀应力利于强度增长^[12]。且相较于

未腐蚀前,孔隙更为致密,孔隙率下降,后期 SO_4^{2-} 离子侵蚀缓慢,210 d 内微观结构损伤不明显,强度未出现损失。UEA 型膨胀剂通过钙矾石填充孔隙,溶液与填充产物无法进一步反应,因此在腐蚀过程中,抗压强度的小幅增长主要由侵蚀产物钙矾石、石膏对孔隙的进一步填充引起,此后较大的膨胀应力导致 210 d 强度开始下降。根据试验结果认为,HME-V 外加剂相对于 UEA 外加剂在硫酸盐腐蚀环境下,早期对混凝土的抗压强度有较大的促进作用,后期离子的腐蚀破坏作用相对缓慢,对强度的负面效应相对延迟。就抗压强度试验结果认为,HME-V 外加剂较 UEA 能进一步延缓混凝土的硫酸盐腐蚀进程。

3 结论

1) 不同粉煤灰掺量下,5%的 UEA 掺量是较优掺量。30%粉煤灰掺量的 UEA 混凝土试件在养护龄期

内,抗压强度逐渐增长,在 90 d 达到稳定状态;UEA 掺量为 5% 的抗压强度整体最高,其后分别为 2% 和 8%。硫酸盐腐蚀后以 5% 掺量的试件损失最低。

2) 粉煤灰掺量不同时, HME-V 作用效果也不同。30% 粉煤灰掺量的 HME-V 混凝土试件抗压强度在 90 d 达到稳定状态, HME-V 掺量为 5% 的抗压强度最高,其后为 10% 和 8%。硫酸盐腐蚀后以 5% 掺量的试件损失最低。

3) 对比 VEA 型膨胀剂和 HME-V 高效抗裂防渗剂两种外加剂在 5% 和 8% 两种掺量下,随着粉煤灰掺量的提高(10%~30%),两种抗裂外加剂的试件 28 d 抗压强度均降低,强度变化规律相似。养护的 30% 粉煤灰掺量的 UEA 试件强度总大于 HME-V 的试件,硫酸盐腐蚀以后掺加 HME-V 的试件强度大于 UEA 试件强度。硫酸盐腐蚀环境下, HME-V 外加剂较 UEA 能进一步延缓混凝土的硫酸盐腐蚀造成的力学性能损失。

参考文献:

- [1] BERTAGNOLI G, MANCINI G, TONDOLO F. Numerical Modelling of Early-age Concrete Hardening[J]. Magazine of Concrete Research, 2009, 61(4): 299-307.
- [2] LI Kefei, LI Le. Crack-altered Durability Properties and Performance of Structural Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 124.
- [3] 文浪. 粉煤灰和外加剂对混凝土力学性能的影响[J]. 湖南水利水电, 2013(2): 23-26.
- [4] 肖茜. 蒸养条件下外加剂对混凝土性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [5] 陈小卫. 外加剂对混凝土性能影响的探究[J]. 科技风, 2019(34): 115.
- [6] 孟志良, 李国宇, 马晓伟, 等. 膨胀剂对自密实混凝土力学性能影响[J]. 混凝土, 2013(5): 89-92.
- [7] XIA Q, LI H, LU A, et al. Damage Analysis of Concrete Members Containing Expansive Agent by Mechanical and Acoustic Methods [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 74: 95-106.
- [8] LI H, WANG Y, WANG Y, et al. Effect of CaO and MgO Based Expansive Agent on Deformation and Mechanical Properties of Concrete-filled Steel Tubes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118723.
- [9] 崔朋勃, 马芹永. 膨胀剂对喷射补偿收缩钢纤维混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(5): 45-47.
- [10] 高培伟, 卢小林, 董波, 等. 粉煤灰对掺新型镁质类膨胀剂的大体积混凝土力学性能的影响[J]. 水力发电学报, 2007(3): 59-62.
- [11] 周小菲, 王强, 阎培渝. 膨胀剂对粉煤灰混凝土抗裂性能的影响[J]. 混凝土, 2011(12): 41-44.
- [12] 陈伯田, 甄巍, 宋雷, 等. 硫铝酸钙类膨胀剂的应用[J]. 辽宁建材, 2007(7): 39-40.

(责任编辑 王利君)