

钢筋混凝土早期收缩特性的研究

李悦, 霍达, 杜修力
(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

摘要: 为了考察钢筋限制条件下外加剂和掺合料对混凝土早期收缩性能的影响, 测量了掺加多种掺合料的钢筋混凝土早期收缩应变和应力的发展情况, 应用钢环实验考察了混凝土的早期收缩开裂情况. 结果表明, 磨细矿渣和硅灰会显著增加混凝土的早期收缩; 石灰石粉和粉煤灰能明显抑制混凝土的早期收缩, 石灰石粉的效果最好; 膨胀剂降低混凝土收缩的早期作用明显; 钢环实验是一种较好的检验早期收缩开裂的实验方法.

关键词: 钢筋混凝土; 掺合料; 收缩; 开裂

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)11-1002-05

混凝土早期收缩开裂问题是目前国内外较为关注的热点问题, 已有研究从原材料组成、配合比设计、后期养护等角度探讨了改善收缩的方法, 发现外加剂和掺合料对混凝土早期收缩性能有重要的影响^[1]. 但上述研究一般是在自由收缩条件下进行的, 实际工程中混凝土结构普遍受到钢筋等条件限制, 因此必须考虑限制条件下, 外加剂、掺合料对混凝土收缩性能的影响以及混凝土的收缩应力发展情况, 评估应力引起开裂的危险性. 目前, 评估混凝土早期限制收缩开裂的实验技术主要有3种: 1) 限制性圆环实验^[2], 用于评估混凝土塑性收缩开裂和硬化混凝土开裂的最常用的方法, 混凝土环浇筑在一个限制环的周围(通常是钢环), 让其限制混凝土的收缩, 拉应力由此而产生, 从而观察到开裂情况. 2) 轴向拉伸实验^[3], 通过约束混凝土条形试件的轴向变形和测量试件的应力来检测试件在不同条件下的开裂行为, 该方法对试验条件要求很高. 3) 平板试验^[4], 主要是用来评价纤维降低塑性收缩开裂的效果, 具体试验方法是把混凝土浇筑在1 m×1 m的板上, 板的四周埋入限制钢筋, 其表面用电扇吹干, 用混凝土开裂程度的大小来评价混凝土的性能. 本文首先考察了多种掺合料对钢筋混凝土早期收缩的影响, 然后应用钢环实验考察了混凝土收缩开裂情况.

1 试验原料与方法

1.1 原料

P.O 42.5 普通硅酸盐水泥; 细度模数 2.6 的河砂; 5~20 mm 连续级配的碎石; 比表面积为 700 m²/kg 的磨细粒化高炉矿渣; 比表面积为 390 m²/kg 的二级粉煤灰; 比表面积为 1 830 m²/kg 的硅灰; 比表面积为 340 m²/kg 的自制石灰石粉; 市场销售的钙矾石型膨胀剂 UEA.

1.2 方法

模具尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm, 1 mm 厚的聚四氟乙烯(PTFE)放置于模具的底部. 3 mm 厚的泡沫聚苯乙烯层放置于端盖, 0.1 mm 厚的聚脂薄膜放置于 PTFE、聚苯乙烯及模具的侧表面. 模具的 2 个端盖各开 1 个直径为 12 mm 的洞. 限制配筋为长 0.6 m、直径为 10 mm 的 Q235 螺纹钢筋. 测量用具为千分表. 新拌混凝土浇入试模后, 立即开始测量; 养护 24 h 后从模具中移开, 之后继续测量, 样品放置于 2

收稿日期: 2005-10-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408004); 北京市科技新星计划资助项目(2005B09)

作者简介: 李悦(1972-), 男, 河北唐山人, 副教授.

个棍子上以防止摩擦受限。样品在(20±3)℃、相对湿度为 80% 环境中养护。测量过程中,试样中埋入温度传感器,测量水化温升,其造成的热膨胀值从测量结果中扣除。测量装置如图 1 所示。

从图 1 可以看出,试件断面上的约束是不均匀的,在钢筋表面的混凝土包裹层所受到的约束和限制最大,而在混凝土试件表面几乎无约束,可认为是自由变形状态。考虑到最不利因素,钢筋表面的混凝土包裹层限制收缩应力和开裂的危险性最大。钢筋收缩应变近似等于其表面混凝土包裹层的收缩应变,因此混凝土的最大收缩应力的计算公式为 $\sigma = E \times \epsilon$, 其中, E 为混凝土的弹性模量,据 GBJ10—89 普通混凝土的弹性模量计算公式为 $E = 10^5 / (2.2 + 34.74 / f_{cu})$, f_{cu} 为立方体试件抗压强度; ϵ 为钢筋的收缩应变测量值。

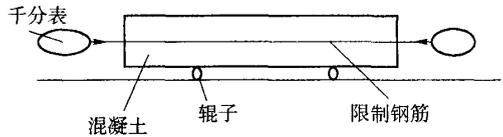


图 1 测量装置示意图

Fig.1 The sketch figure of measuring equipment

1.3 钢环法测混凝土抗裂性

试验装置如图 2 所示,钢环高 10 cm、厚 1 cm,在浇注混凝土环时先把外环装好,然后分层装入并振捣混凝土,最后将混凝土环表面抹平。在混凝土终凝后取下外环,混凝土环的上下表面用硅胶密封,只允许侧面暴露在空气中,侧表面的裂纹宽度用 JC4-10 型读数显微镜进行观察,从 1 d 龄期开始每隔 12 h 观察 1 次。

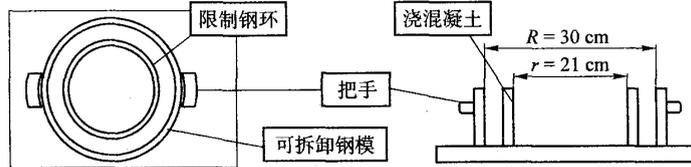


图 2 混凝土钢环试验示意图

Fig.2 The layout of steel ring used for concrete confine testing

2 试验结果与分析

2.1 混凝土的力学性能及收缩应力应变

各种混凝土的配合比及其物理性能见表 1,试样 1~3 的胶凝材料量为 500 kg/m³,其收缩应变及应力如图 3 所示。试样 4~6 的胶凝材料量为 600 kg/m³,收缩应变及应力如图 4 所示。

表 1 混凝土配合比及物理性能

Tab.1 The mix design and properties of concrete

试样	混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)						水胶比	砂率	坍落度/ cm	28 d 强度/ MPa	弹性模量/ GPa
	水泥	硅灰	矿渣	石灰石粉	粉煤灰	UEA					
1#	500	0	0				0.27	0.34	18	57.2	35.6
2#	350	0	150				0.27	0.34	12	66.5	36.7
3#	450	50	0				0.27	0.34	14	70.3	37.1
4#	600	0	0				0.27	0.34	15	56.7	35.6
5#	420	0	180				0.27	0.34	23	62.8	36.3
6#	540	60	0				0.27	0.34	18	74.0	37.5
7#	420			180	0	0	0.27	0.34	20	57.3	35.6
8#	420			0	180	0	0.27	0.34	23	72.3	37.3
9#	528			0	0	72	0.27	0.34	16	74.0	37.5

由表 1 可知,混凝土掺加了矿渣和硅灰后,28 d 强度明显提高,掺硅灰的增加幅度最大.但是,在其他条件基本不变的情况下,混凝土胶凝材料用量从 500 kg/m³ 增加到 600 kg/m³ 并不能提高混凝土强度,因此,高强混凝土的胶凝材料用量应该控制在一定范围内.但胶凝材料用量的增加使新拌混凝土的坍落度得到提高,改善了混凝土的工作性.

由图 3 可知,矿渣混凝土的收缩最大,硅灰混凝土在本实验中收缩却最小,可能是因为硅灰混凝土的早期强度发展很快,试件本身强度和刚度较高,抵抗收缩影响能力较强,结果表现为较小的收缩率.对低水灰比的硅灰混凝土的收缩变化情况进行 28 d 观测,结果发现收缩率在 7 d 以后随龄期发展加快,14 d 后硅灰混凝土的收缩值就超过不掺硅灰的试块.对比图 3、图 4 可以看出,当胶凝材料用量从 500 kg/m³ 增加到 600 kg/m³ 时,普通混凝土和硅灰混凝土的收缩应变基本没有变化,而矿渣混凝土的收缩应变则有较大增加,10 d 的收缩应变增加了 27%,这说明在水胶比相同的条件下,增加矿渣混凝土单位体积内胶凝材料总量,会导致较大收缩,因此,在保证强度的前提下,应尽量减少胶凝材料的掺量.

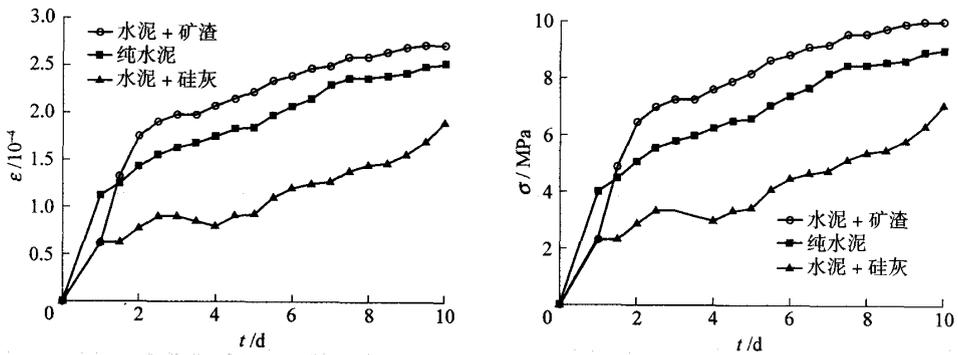


图 3 每立方米胶凝材料量为 500 kg 的混凝土收缩应变和应力
Fig.3 The shrinkage stress and strain of concrete with 500 kg binder per cubic meter

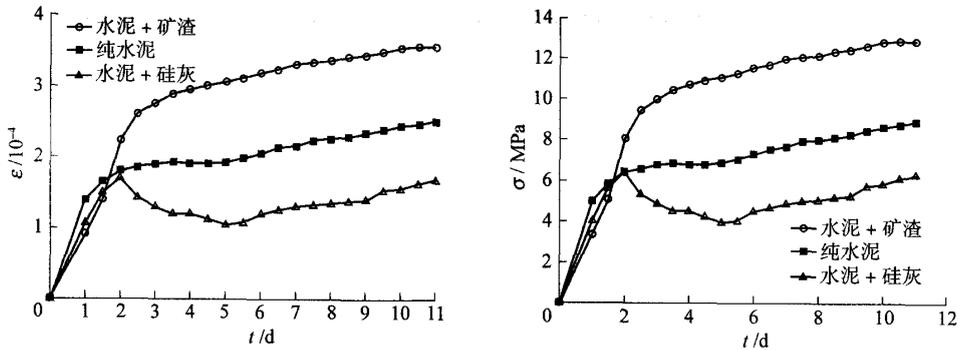


图 4 胶凝材料量为 600 kg/m³ 的混凝土收缩应变和应力
Fig.4 The shrinkage stress and strain of concrete with 600 kg binder per cubic meter

在上述实验的基础上,控制混凝土胶凝材料量为 600 kg/m³ 不变,用石灰石粉、粉煤灰和膨胀剂作为混凝土掺合料,混凝土配合比及其物理性能列于表 1 中,收缩应变及应力如图 5 所示.

由表 1 可知,与纯水泥混凝土相比,掺石灰石粉不降低混凝土强度,坍落度有所提高;掺粉煤灰及膨胀剂明显提高了混凝土的强度,坍落度并不损失.造成上述现象的原因是石灰石粉能在水泥水化过程中生成早强性的水化碳铝酸钙等矿物,并且石灰石本身表面光滑、不吸水,相对释放出较多的自由水,促进了水泥在低水胶比条件下的水化进程,提高了混凝土的坍落度.粉煤灰含有大量的光滑漂珠,也能在低水胶比的条件下相对减少用水量和促进水化反应,另外粉煤灰本身具有火山灰反应活性,因此混凝土 28d 强度和坍落度提高.上述反应的作用机理可参见文献[5-7].

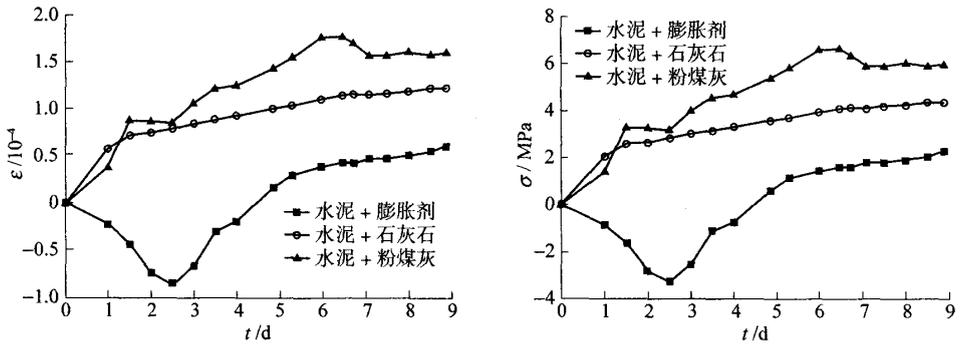


图 5 混凝土收缩应变和应力随时间的变化

Fig. 5 The shrinkage stress and strain of concrete with age

由图 5 可知,掺石灰石粉及粉煤灰的混凝土,其早期收缩远小于普硅水泥混凝土,而且石灰石粉比粉煤灰对混凝土的早期收缩抑制效果更好.膨胀剂对于降低混凝土收缩的早期作用明显,甚至能使试块膨胀,这是因为膨胀剂在早期反应生成了钙矾石;但在水化 2d 以后,随着钙矾石生成速度的变慢及水泥水化的继续进行,混凝土试件不再继续膨胀,开始收缩.观察图 3~5 的收缩应力值,发现水化 9 d 时的最大收缩应力值为 5 号试样的 12 MPa 左右,最小值为 9 号试样的 2 MPa 左右,其余试样多在 4~8 MPa.混凝土的抗拉强度可用经验公式计算: $f_t = 0.4 \times f_c^{0.566}$, 其中, f_t 为抗拉强度, f_c 为抗压强度^[8]. 本实验中混凝土抗压强度在 57~74 MPa, 对应的计算抗拉强度为 3.94~4.57 MPa. 比较计算收缩应力和计算抗拉强度发现,收缩应力远高于抗拉强度,考虑到混凝土徐变、硬化前塑性变形和钢筋混凝土相对滑动等因素的影响,混凝土的实际收缩应力会小于计算值,但也处于较高的应力范围内,容易造成混凝土开裂.

2.2 钢环限制下混凝土的收缩开裂性能

应用钢环法对表 1 中 4~9 号混凝土进行了抗裂性能研究,观察裂纹出现的时间 t 、养护 28 d 时的最大裂纹宽度 w 和最大裂纹长度 l . 试验结果如表 2 所示,掺加了石灰石粉的 7 号混凝土试样开裂时间最晚,裂纹宽度和长度最小,其次是掺加粉煤灰的 8 号试样. 图 5 中,掺加膨胀剂的 9 号试样收缩应力最低,但钢环开裂时间却明显早于 7、8 号试样,其主要原因是二次试验的养护湿度条件不同,膨胀剂需要在潮湿的环境下才能发挥膨胀功效. 出现裂纹最早的试样是掺加了磨细矿渣的 5 号试样,这与收缩应力计算结果相符合. 由此可见,钢环试验能较为方便地判断出混凝土的受限开裂情况.

表 2 不同混凝土受钢环限制开裂情况

Tab. 2 The crack situation of concrete confined by steel ring

试样编号	t/d	养护 28 d 时裂纹状况		试样编号	t/d	养护 28 d 时裂纹状况	
		w/mm	l/mm			w/mm	l/mm
4	8.5	0.40	8.9	7	22.0	0.20	5.2
5	4.5	0.55	10.0	8	17.5	0.30	6.5
6	11.0	0.40	7.6	9	12.5	0.45	8.7

3 结论

1) 磨细矿渣和硅灰替代部分水泥作胶凝材料会显著增加混凝土的早期收缩,但是 2 者影响早期收缩变化的规律不同:矿渣混凝土收缩发展最快,硅灰混凝土水化开始 7 d 内,收缩率小于普通水泥混凝土和矿渣混凝土,7 d 后收缩发展加快,14 d 后收缩率最大.

2) 混凝土胶凝材料量从 500 kg/m^3 增加到 600 kg/m^3 , 普通混凝土和硅灰混凝土的收缩应变基本没有变化, 而矿渣混凝土的收缩应变则有较大的增加。

3) 掺石灰石粉能提高混凝土坍落度, 不降低混凝土强度; 掺粉煤灰及膨胀剂能提高混凝土的强度, 不降低混凝土坍落度。石灰石粉和粉煤灰都能明显抑制混凝土的早期收缩, 石灰石粉的效果最好。膨胀剂对于降低混凝土收缩的早期作用明显, 后期有所波动。

4) 钢环实验可以方便地比较限制条件下混凝土的收缩开裂性能, 结果表明, 矿渣混凝土的收缩开裂危险性最大, 而石灰石粉混凝土的抗收缩开裂能力最强, 这与收缩应力应变测量结果相一致。

参考文献:

- [1] 李悦, 谈慕华, 张雄, 等. 混凝土的自收缩及其研究进展[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(3): 252-257.
LI Yue, TAN Mu-hua, ZHANG Xiong, et al. Autogenous shrinkage of concrete and its research progress[J], Journal of Building Materials, 2000, 3(3): 252-257. (in Chinese)
- [2] GRYSBOWSKI M, SHAH S P. Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete[J]. American Concrete Institute Materials Journal, 1990, 87(2): 395-404.
- [3] 张士海, 覃维祖, 张涛, 等. 混凝土早期抗裂性能评价——单轴约束试验方法的进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(3): 13-16.
ZHANG Shi-hai, QIN Wei-zu, ZHANG Tao, et al. Evaluation on cracking performance of concrete early age: the advances of uniaxial restrained test method [J]. China Concrete and Cement Products, 2002(3): 13-16. (in Chinese)
- [4] KRAII P P. Proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete[J]. Concrete Construction, 1985 (30): 775-778.
- [5] 李悦, 胡曙光, 杨德坡, 等. 铝酸盐矿物与碳酸钙的水化活性作用[J]. 河北理工学院学报, 1996 (2): 54-57.
LI Yue, HU Shu-guang, YANG De-po, et al. The aluminates minerals and calcium carbonate[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 1996 (2): 54-57 (in Chinese)
- [6] 胡曙光, 吕林女, 何永佳. 低水胶比下粉煤灰对水泥早期水化的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(7): 14-16.
HU Shu-guang, LÜ Lin-nü, HE Yong-jia. The effect of fly ash on the early hydration of cement at low W/B ratio[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(7): 14-16. (in Chinese)
- [7] HU Shu-guang, LI Yue. Research on the hydration and hardening mechanism and microstructure of high performance expansive concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 803-807.
- [8] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 200.

Study on the Early Shrinkage Properties of Reinforced Concrete

LI Yue, HUO Da, DU Xiu-li

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to investigate the influence of mineral admixtures on the early shrinkage of concrete under steel bar confinement, the early shrinkage strain and stress of reinforced concrete were measured. Steel ring testing method has been used to investigate the shrinkage crack of different concrete. The test results show that, slag and silica fume obviously increase the early shrinkage of concrete. Limestone powder and fly ash will obviously suppress the early shrinkage, and it shows that the effect of limestone powder is better. Expensive agent can obviously decrease the early shrinkage. It demonstrates that steel ring testing method was a good testing method for checking shrinkage cracking.

Key words: reinforced concrete; additives; shrinkage; cracks