

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.010

高性能混凝土的拉伸徐变特性

李司晨,张云升,张国荣

(东南大学材料科学与工程学院,南京 211189)

摘要:掌握拉伸徐变行为为进行混凝土应力分析和开裂预测的重要前提。采用自行设计的混凝土拉伸徐变试验装置,系统研究了不同加载龄期(1、3、7 d)、不同水胶比(0.29、0.33、0.37)和不同粉煤灰掺量(0%、20%、40%)下高性能混凝土的拉伸徐变特性。实验结果表明,拉伸徐变随加载龄期和水胶比的增大而显著减小。粉煤灰掺入可以明显提高混凝土抵抗徐变的能力,且随掺量的增加而增强。拉伸徐变可抵消42%~62%的自由收缩,降低混凝土早期开裂的风险。

关键词:拉伸徐变;加载龄期;粉煤灰;高性能混凝土;水胶比

中图分类号:TU528.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0040-05

Study on Tensile Creep Characteristics of High Performance Concrete

Li Sichen, Zhang Yunsheng, Zhang Guorong

(School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The understanding of tensile creep behavior is extremely important in accurate stress analysis and crack prediction. A set of concrete tensile creep testing apparatus was constructed. The characteristics of tensile creep under different loading ages (1, 3 and 7 days), different water-binder ratio (0.29, 0.33 and 0.37) and different fly ash proportion (0%, 20% and 40%) were discussed. The results show that tensile creep of HPC decreases as the loading age and water-binder ratio increases. The creep-resistance of HPC enhances with the increase of fly ash proportion. Tensile creep counteracts free shrinkage by 42%~62%, decreases the possibility of cracking of HPC at early ages.

Key words: tensile creep; loading age; fly ash; high performance concrete; water-binder ratio

随着混凝土技术的快速发展,高性能混凝土在大跨桥梁、薄壁结构等预应力结构中已得到广泛应用。高性能混凝土具有优异的工作性能、力学性能及耐久性,但由于其水胶比小,使得它在水硬化过程中除产生干燥收缩及温度收缩外,还伴随着较大自收缩,明显增加了高性能混凝土早期开裂的风险^[1-2]。高性能混凝土的收缩变形受到骨料、钢筋或外部结构的约束,在混凝土内部产生拉应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时,混凝土发生开裂。早期开裂发生与否,不仅取决于混凝土体积变化的发展以及约束的形式与程度,而且与混凝土抗

拉强度、杨氏模量、极限拉伸能力以及拉伸徐变等密切相关^[3-4]。拉伸徐变及其引起的应力松弛,可大大降低混凝土内部的约束应力,从而降低混凝土早期开裂的风险。研究表明^[5-6],早期徐变量占自收缩的30%~70%,拉伸徐变能松弛50%以上体积变化造成的拉应力,在延缓开裂方面具有重要作用。因此,高性能混凝土拉伸徐变研究对定量分析混凝土早期开裂,评估开裂风险具有十分重要的意义。

过去研究人员将研究对象集中在成熟混凝土,且主要研

究压缩徐变性能^[7]。近年来,随着高性能混凝土的广泛应用,人们开始关注早龄期的徐变^[8],但是对于早龄期高性能混凝土的拉伸徐变,国内外相关研究较少且不系统^[9-12]。文中以高性能混凝土为研究对象,使用自行设计的加载装置进行拉伸徐变试验,系统探讨了不同水胶比(0.29、0.33、0.37),不同加载龄期(1、3、7 d),不同粉煤灰掺量(0%、20%、40%)条件下的高性能混凝土的拉伸徐变性能,为将来建立高性能混凝土拉伸徐变模型奠定基础。

1 试验研究

1.1 原材料

水泥:P·II 52.5 硅酸盐水泥,密度为3 100 kg/m³;粉煤灰:I级(F类)优质粉煤灰,密度为2 200 kg/m³;细集料:细度模数3.0的河砂,表观密度2 630 kg/m³;粗集料:5~10 mm连续级配石灰岩碎石,表观密度为2 750 kg/m³;减水剂:PCA聚羧酸高性能减水剂,减水率为25.2%。水泥和粉煤灰的化学组成如表1所示。

收稿日期:2013-09-30

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(2010Y36);国家自然科学基金项目(51178106);教育部博士点基金(20120092110037)

作者简介:李司晨(1989-),男,硕士生,主要从事低收缩徐变高性能混凝土的制备、变形性能与机理研究,(E-mail)sichenli1 @126.com。

表 1 原材料的化学组成

| 样品名称 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|
| 水泥 | 16.52 | 8.33 | 3.37 | 69.52 | 0.85 | 1.53 | 0.06 | 0.20 |
| 粉煤灰 | 39.07 | 48.52 | 3.37 | 5.96 | 1.32 | 0.46 | 0.07 | 0.32 |

1.2 实验方案

设计了 7 组高性能混凝土,其中 37C-7、33C-7、29C-7 用于研究水胶比的影响,33C-1、33C-3、33C-7 用于研究加载龄期的影响,33C-7、33CF20-7、33CF40-7 用于研究粉煤灰掺量的影响,具体的混凝土配合比如表 2 所示。聚羧酸减水剂掺量根据新拌拌合物的状态进行调整,保证坍落度在 180 mm±

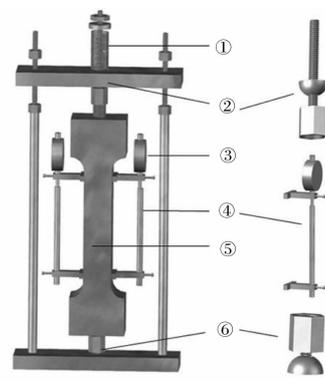
20 mm。试件浇筑成型后,放入标准养护室(温度 20±2℃、相对湿度 95%RH 以上)中养护,1 d 后拆模。至预设加载龄期时,先进行抗拉强度试验,根据设定的荷载水平,确定徐变加载应力,然后在恒温室内(温度 20±1℃、相对湿度 60%±5)进行拉伸徐变的加载。

表 2 混凝土配合比

| 组别 | 水胶比 | 单方混凝土原材料用量/(kg·m ⁻³) | | | | | 加载龄期/d |
|----------|------|----------------------------------|-----|-----|-----|-------|--------|
| | | W | C | FA | S | G | |
| 37C-7 | 0.37 | 156 | 422 | 0 | 674 | 1 198 | 7 |
| 33C-1 | 0.33 | 156 | 473 | 0 | 656 | 1 165 | 1 |
| 33C-3 | 0.33 | 156 | 473 | 0 | 656 | 1 165 | 3 |
| 33C-7 | 0.33 | 156 | 473 | 0 | 656 | 1 165 | 7 |
| 33CF20-7 | 0.33 | 156 | 378 | 95 | 656 | 1 165 | 7 |
| 33CF40-7 | 0.33 | 156 | 283 | 190 | 656 | 1 165 | 7 |
| 29C-7 | 0.29 | 156 | 538 | 0 | 632 | 1 124 | 7 |

1.3 试验方法

1.3.1 拉伸徐变 混凝土拉伸徐变的测定装置由加载装置和变形测量装置 2 部分组成,如图 1 所示。加载装置采用弹簧加载方式,加载时旋转顶端的螺母压缩弹簧,对混凝土试件施加拉伸荷载,荷载大小通过弹簧压缩量确定,文中采用荷载水平为 0.33。为防止混凝土在端部破坏,成型试件为狗骨型,全长 400 mm,中间段长度 200 mm,两端截面尺寸为 100 mm×70 mm,中间截面尺寸为 50 mm×70 mm,成型时两端预埋螺纹丝杆,加载时两端旋进连接杆件,保证荷载传递到混凝土试件内。上下连接杆件都配有半球形的活动铰,保证试件处于轴心受拉状态。变形测量支架用高强胶水粘在混凝土试件两侧,2 个支点间距为 180 mm,千分表固定在支架上,用于测量支点之间的位移。试验结果为两侧读数的平均值,每个配合比成型 3 个平行试件,以保证试验数据的可靠性与精度。徐变试验时,先加载至徐变应力的 20% 进行对中,调节两侧变形差值小于平均值的 10%,对中结束后加载至所需的徐变应力,读取两侧变形值,每个配合比徐变试件持续加载 54 d,无载试件的自由收缩测试同步进行。为降低弹簧在长期压缩状态下可能发生的应力松弛,选用重荷载模具弹簧,该弹簧预先经过松弛处理,具有刚度大、抗疲劳性好的特点,同时加载时压缩量远低于该弹簧的弹性极限,因此可忽略弹簧松弛引起的误差。另外混凝土试件以及连接杆件的徐变也可能引起应力松弛,故持荷过程中要注意调整顶端螺母以保证加载应力恒定。若进行长期试验(6 个月以上),可在测试装置上添加应力传感器,从而保证长期试验中荷载水平的恒定。



注:①弹簧;②顶部连接杆;③千分表;④变形测量支架;
⑤试件;⑥底部连接杆

图 1 拉伸徐变加载装置

1.3.2 抗拉强度与弹性模量 试验采用自行设计的拉伸夹具进行抗拉强度的测定(如图 2 所示),混凝土试件与拉伸徐变同尺寸。拉伸弹性模量的测定则由拉伸徐变实验中徐变之前的弹性阶段获得。同时为比较同龄期混凝土抗拉与抗压强度关系,根据 GB/T 50081—2002 测定混凝土抗压强度。

1.3.3 自由收缩 加载过程中,测得的总应变是由瞬时应变、徐变应变和自由收缩应变 3 部分组成,为了获得混凝土拉伸徐变变形,必须扣除瞬时应变和自由收缩应变。因此,实验针对每个配合比单独成型 3 个收缩试件,尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,养护条件与徐变试件完全一致。为保证测试稳定性,设计专用的立式千分表架测量混凝土自由收缩变形(如图 3 所示),测试龄期与徐变试验同步。



图 2 抗拉强度测试

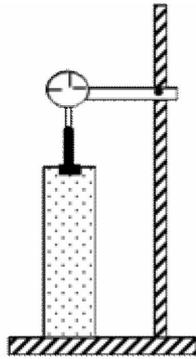


图 3 自由收缩测试装置

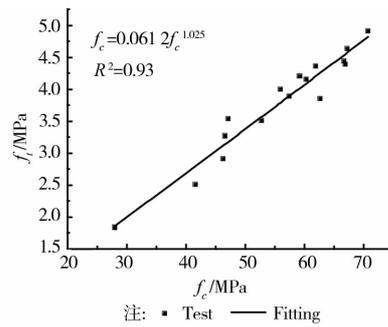


图 5 抗拉强度与抗压强度的关系

2 结果与讨论

2.1 强度与弹性模量

各组高性能混凝土的力学性能如表 3 所示。由表 3 可知,同龄期混凝土的抗拉、抗压强度以及拉伸弹性模量均随着水胶比的降低而提高;掺入粉煤灰以后,混凝土强度及弹性模量降低,且粉煤灰掺量越大,降低幅度越明显。养护龄期对混凝土力学性能影响较大,混凝土抗拉强度和拉伸弹性模量在 3 d 前有较大的发展,而后发展速度逐渐减慢(见图 4)。将试验中抗压强度与抗拉强度用曲线进行拟合(见图 5),得到拟合公式 $f_t = 0.061 \cdot 2 f_c^{1.025}$,拟合系数为 0.93,相关性良好。试验得出的轴心抗拉强度与抗压强度的比值在 1/13~1/17,与其他学者研究结果较为一致^[13-14]。

表 3 混凝土的力学性能

| 编号 | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa | 拉伸弹性模量/GPa |
|----------|----------|----------|------------|
| 37C-7 | 3.5 | 47.1 | 28.3 |
| 33C-1 | 1.8 | 27.9 | 18.3 |
| 33C-3 | 3.3 | 46.6 | 25.1 |
| 33C-7 | 3.9 | 57.5 | 29.1 |
| 33CF20-7 | 2.9 | 46.2 | 24.2 |
| 33CF40-7 | 2.5 | 41.6 | 20.9 |
| 29C-7 | 4.4 | 61.9 | 37.5 |

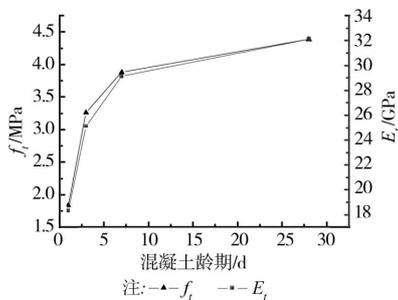


图 4 抗拉强度和弹模经时变化

2.2 自由收缩

混凝土试件自由收缩包含了自收缩和干燥收缩。图 6 为各组混凝土自由收缩随时间的变化关系。由图 6 可以看出,早期收缩发展很快,特别是在 7 d 前发展迅猛,7 d 收缩值达到 54d 变形的 30% 以上。收缩值随水灰比的降低有所减

小,但幅度不明显。粉煤灰的掺入可大大降低混凝土的收缩,掺入 20% 和 40% 粉煤灰,54 d 自由收缩值分别为不掺粉煤灰混凝土的 73.6% 和 60.7%。这可能是由于粉煤灰的加入,降低了体系的水化程度,从而减少了水化产物数量,而水化产物是产生收缩变形的主要原因;另一方面由于水化程度的降低,缓解了混凝土内部自干燥效应,从而大大降低了混凝土的自收缩。

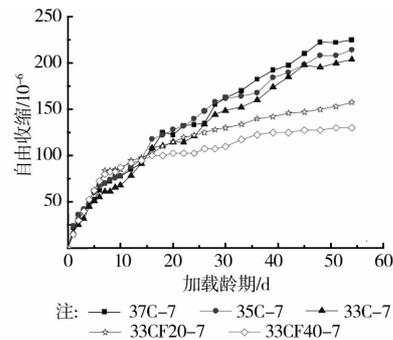


图 6 自由收缩经时变化

2.3 拉伸徐变特性

2.3.1 水胶比的影响 水胶比对拉伸徐变的影响如图 7 所示,图中徐变度(specific creep)是单位应力下混凝土的徐变变形;徐变系数(creep coefficient)是徐变应变与瞬时弹性应变的比值。由图 7 可以看出,徐变度和徐变系数均随水胶比的增大而增大。持荷 54 d 后,水胶比 0.37 的混凝土徐变度和徐变系数分别为水胶比 0.29 混凝土的 1.8 和 1.5 倍。这可能是由于水胶比增大时,水泥颗粒间距变大,混凝土内部结构变得疏松,孔隙率及毛细管孔径增大,水泥石中凝胶体的迁移变得更容易;另一方面水胶比越大,同龄期混凝土的强度和弹性模量越低,抵抗徐变变形的能力也越弱,从而导致徐变的增加。水胶比的变化会造成体系水化产物数量和浆体孔结构的变化,从而对宏观徐变变形产生影响。水胶比越大,体系中水化产物数量越多,同时浆体孔隙率越大,孔结构越粗,有利于水泥石中凝胶体的粘性流动。因此可以推测,随着水胶比的进一步提高($W/B > 0.5$),混凝土拉伸徐变变形也会随之增大。

2.3.2 加载龄期的影响 由图 8 可以看出,拉伸徐变随加载龄期的推迟而减小,养护 1 d 后加载的混凝土,最终徐变度和徐变系数分别高达 $160 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 和 2.9,而 7 d 加载的徐变度和徐变系数只有 $45 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 和 1.3。由于持荷阶段的徐变速度并不是恒定的,为了考察各个阶段徐变速度

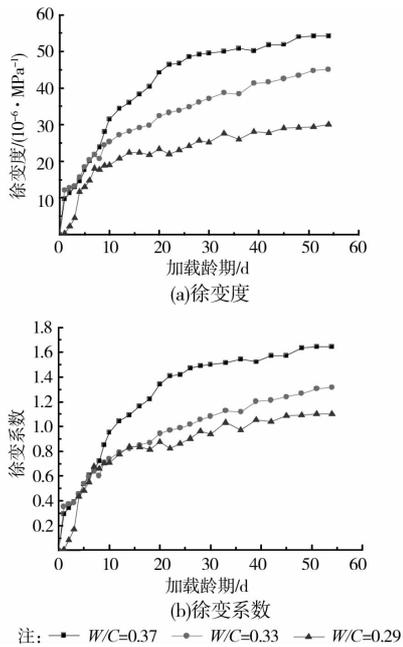


图 7 水灰比对拉伸徐变的影响

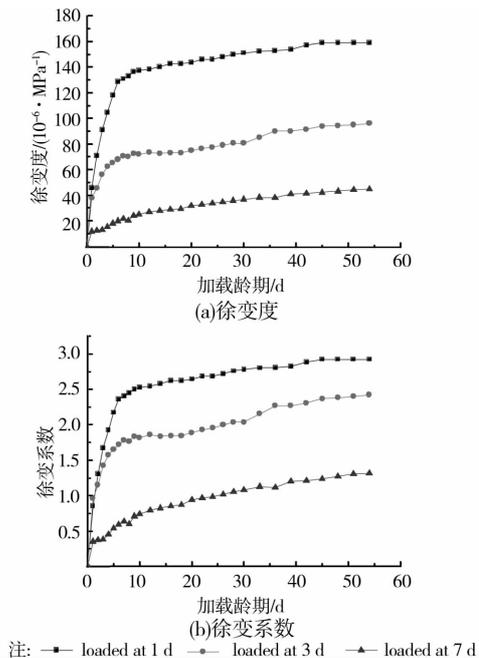


图 8 加载龄期对拉伸徐变的影响

的差异,定义初期徐变速度为混凝土持荷 3 d 内平均每天所完成的徐变度;中期徐变速度为混凝土持荷 3~7 d 内平均每天所完成的徐变度;后期徐变速度为混凝土持荷 7 d 后至卸载时(第 54 d)平均每天所完成的徐变度。图 9 为加载龄期对拉伸徐变速度的影响,可以看出,随着加载龄期的推迟,初期徐变速度呈指数下降。对于不同的加载龄期,后期徐变速度基本没有差异,即加载龄期对持荷 7 d 后的徐变速度影响很小。从徐变曲线的形状可以看出,加载龄期越晚,徐变速度下降越慢,这是因为加载龄期较晚时,混凝土内部结构比较密实,内部凝胶体的移动变得困难,抗拉强度与弹性模量的增长也相对缓慢,以致加载应力与抗拉强度的比值并不会迅速降低,因而徐变速度下降比较缓慢。

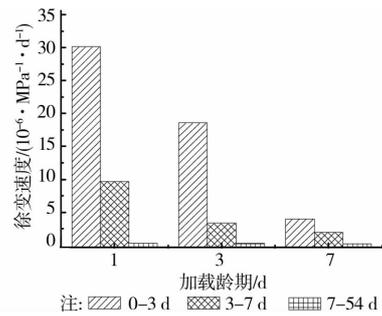


图 9 加载龄期对拉伸徐变速度的影响

2.3.3 粉煤灰的影响 粉煤灰具有活性效应、形态效应和微集料效应,能显著改善混凝土的工作性,降低水化热,提高耐腐蚀性,在抵抗各种变形的能力上尤为突出,因此已经成为制备高性能混凝土不可缺少的关键组分^[15-16]。粉煤灰掺量对拉伸徐变的影响如图 10 所示,掺入 20%粉煤灰,混凝土抵抗徐变的能力得到明显改善,掺入 40%粉煤灰,徐变度和徐变系数进一步降低,但是降低幅度有所减弱。粉煤灰掺量为 20%和 40%时,54 d 的徐变度分别为不掺粉煤灰混凝土的 85.5%和 80.6%;徐变系数分别为不掺粉煤灰混凝土的 71.3%和 57.8%。

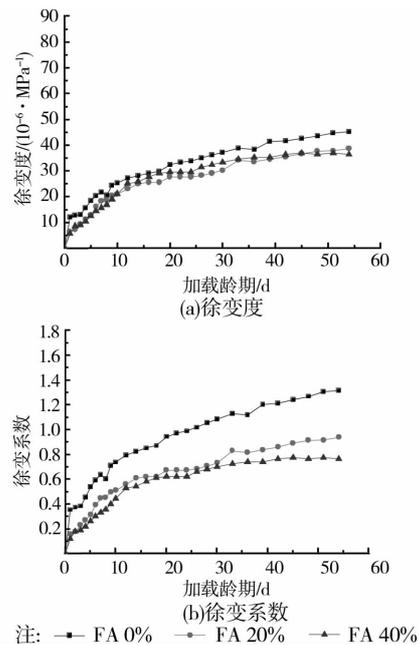


图 10 粉煤灰对拉伸徐变的影响

粉煤灰的掺入,大大减少了水泥石中 C-S-H 凝胶体等水化产物的总量,而这些水化产物是混凝土变形的主要原因。粉煤灰的形态效应能起到减水作用,改善混凝土内部孔结构,减小孔隙率,使混凝土更加致密,增大毛细管通道阻力,从而提高混凝土抵抗变形的能力;同时粉煤灰的活性效应使混凝土后期强度不断增长,提高混凝土的后期徐变性能。赵庆新等利用纳米压痕技术测试了水泥和粉煤灰颗粒的弹性模量,结果表明粉煤灰颗粒弹性模量大约为水泥颗粒弹性模量的 2 倍^[17],粉煤灰作为微集料,其骨架作用对限制水泥石的变形也发挥了重要的作用,这些对徐变变形体现正效应;然而粉煤灰加入以后,抑制了混凝土强度及宏观弹性

模量的发展,尤其在早期表现更为明显,这对徐变变形而言是负效应。掺入 20% 粉煤灰,正效应占优势,宏观上表现为拉伸徐变变形的降低;继续掺入 20% 粉煤灰,增加的那部分正负效应几乎相抵消,宏观上表现为对拉伸徐变降低效果不明显。

2.3.4 总变形与自由收缩的关系 加载过程中,实际测得的总应变是瞬时应变、徐变应变和自由收缩应变 3 部分组成的,以水胶比 0.37 的混凝土为例,总变形与其各组成部分的关系如图 11 所示。瞬时应变和徐变应变为正向应变,这部分变形不足以抵消混凝土的收缩,最终总变形依然为负值。对各组混凝土的总变形与自由收缩变形进行归纳汇总(见图 12),可以看出持荷 54 d 后,各组混凝土的总变形占自由收缩的 38%~58%,大大缓解了混凝土的内部拉应力,延缓了高性能混凝土开裂的时间,降低了早期开裂的风险。

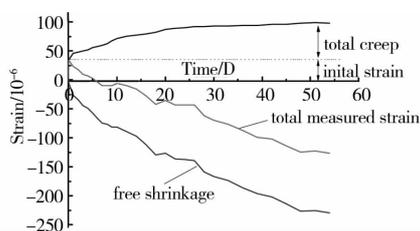


图 11 混凝土中的应变

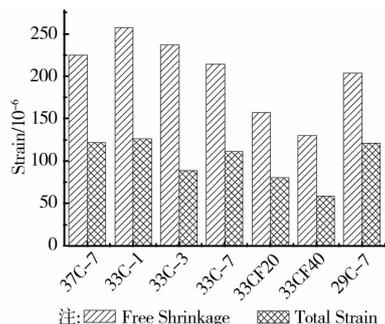


图 12 总变形与自由收缩的关系

3 结论

1) 自行设计一种拉伸徐变加载装置,该装置通过新颖的设计可实现加载应力的恒定,并且减小和消除了偏心和应力集中,可以精确测试高性能混凝土早龄期的拉伸徐变特性。

2) 高性能混凝土拉伸徐变在加载初期快速增长,特别是 7 d 前发展迅猛,之后逐渐趋于稳定。水灰比越小,加载龄期越晚,徐变度和徐变系数越低;初期徐变速度随加载龄期的推迟呈指数下降,后期徐变速度与加载龄期关系不大;加载龄期越晚,徐变速度下降越慢。

3) 粉煤灰的掺入,可有效抑制高性能混凝土拉伸徐变变形,粉煤灰掺量为 20% 和 40% 时,54 d 的徐变度分别为不掺粉煤灰混凝土的 85.5% 和 80.6%;徐变系数分别为不掺粉煤灰混凝土的 71.3% 和 57.8%。

4) 加载 54 d 各组混凝土的总变形占自由收缩的 38%~58%,即拉伸徐变可抵消 42%~62% 自由收缩,大大缓解了混凝土的内部拉应力,延缓了高性能混凝土开裂的时间,降低早期开裂的风险。

参考文献:

- [1] Yoo S W, Kwon S, Jung S H. Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34(0): 1-10.
- [2] Darquennes A, Staquet S, Delplancke-Ogletree M, et al. Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(3): 368-379.
- [3] Ray I, Gong Z, Davalos J F, et al. Shrinkage and cracking studies of high performance concrete for bridge decks [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 244-254.
- [4] Asamoto S, Ohtsuka A, Kuwahara Y, et al. Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(6): 590-601.
- [5] Salah A, Altoubat, David A. Lange. Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age[J], ACI Materials Journal, 2001, 98(4): 323-331.
- [6] 马新伟, 钮长仁, Hooton R D. 高性能混凝土在约束条件下的受拉徐变特征[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 26-29.
- [7] Bazant Z P. Prediction of concrete creep and shrinkage: past present and future [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 203(1): 27-38.
- [8] Maia L, Figueiras J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34(0): 602-610.
- [9] Briffaut M, Benboudjema F, Torrenti J, et al. Concrete early age basic creep: Experiments and test of rheological modelling approaches[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 373-380.
- [10] Østergaard L, Lang D A, Altoubat S A, et al. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12): 1895-1899.
- [11] Garas V Y, Kahn L F, Kurtis K E. Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(3): 147-152.
- [12] Zhang Tao, Q Weizu. Tensile creep due to restraining stresses in high-strength concrete at early ages [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 584-591.
- [13] 欧阳东, 余斌. 超高强混凝土基本力学性能的研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(4): 38-42.
- [14] 尹健, 周士琼. 高性能混凝土轴心抗拉强度与劈裂抗拉强度试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2001, 19(2): 25-29.
- [15] Nochaiya T, Wongkeo W, Chaipanich A. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete[J]. Fuel, 2010, 89(3): 768-774.
- [16] Sun Wei, Zhang Yunsheng, Liu Sifeng, et al. The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10): 1781-1785.
- [17] 赵庆新, 孙伟, 郑克仁, 等. 水泥、磨细矿渣、粉煤灰颗粒弹性模量的比较[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(7): 837-841.