

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.015



早龄期加载对粉煤灰混凝土变形及强度的影响

叶建雄¹, 陈勇¹, 严小康²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆维实公路工程质量检测有限公司, 重庆 400060)

摘要:研究了粉煤灰掺量、加载龄期和加载应力对粉煤灰混凝土早期变形及加载后强度变化的影响。研究表明:随着粉煤灰掺量增加,混凝土的变形量逐渐降低,当掺量为30%时,变形量减少了33.6%;随着加载龄期提前或加载应力增大,粉煤灰混凝土的早期变形量增大,其中,加载应力的影响尤其明显,60%加载应力(60%的标准养护条件下7d轴心抗压强度)比20%加载应力下混凝土最终变形量增加了277.2%;混凝土初始加载时间提前或加载应力增大会导致加载后粉煤灰混凝土强度下降,加载应力比加载龄期对加载后粉煤灰混凝土强度的影响更明显。

关键词:粉煤灰;早龄期;荷载作用;变形;强度

中图分类号:TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)05-0115-07

Influence of load on deformation and strength of fly ash concrete at early age

Ye Jianxiong¹, Chen Yong¹, Yan Xiaokang²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;
2. Chongqing Weishi Highway Engineering Quality Inspection Co. Ltd, Chongqing 400060, P. R. China)

Abstract: The effect of content of fly ash, load age and stress on the deformation and strength was investigated at early age. The results indicated that creep of FA (fly ash) concrete decreased as content of fly ash increased and the maximum reduction was 33.6% when the content was 30%. Advancing load age and magnifying stress could increase the deformation. Effect of magnifying stress on deformation was drastically, as final creep of FA concrete loaded at stress ratio of 60% exceeded that of concrete loaded at stress ratio of 20% by 277.2%. Advancing load age and magnifying stress could decrease the axial compressive strength of FA concrete after being loaded. Effect of loading stress on the strength was more obvious than loading age.

Keywords: Fly ash; early age; load; deformation; strength

混凝土在建筑行业中占有至关重要的作用,但其基本原材料水泥的生产会对大气造成污染。矿物

掺合料替代部分水泥生产混凝土可以减少碳排放,有效缓解环境污染,对混凝土的可持续发展起到强

收稿日期:2016-05-31

基金项目:国际科技合作项目(2009DFR50450)

作者简介:叶建雄(1974-),男,高级工程师,主要从事建筑材料研究,(E-mail)yjxiong1974@163.com。

Received: 2016-05-31

Foundation item: International Science and Technology Cooperation Project (No. 2009DFR50450)

Author brief: Ye Jianxiong (1974-), senior engineer, main research interest: building materials, (E-mail)yjxiong1974@163.com.

烈推动作用^[1]。粉煤灰作为常用的矿物掺合料,具有节约资源、保护环境等优点而广泛应用于混凝土。研究表明粉煤灰对混凝土的工作性、孔结构、长期力学性能以及耐久性能具有明显的改善作用^[2-4],另外,粉煤灰混凝土变形性能直接影响到混凝土结构以及钢筋混凝土结构的变形、刚度、预应力损失等,因而变形性能也是粉煤灰混凝土应用于上述结构必须要考虑的问题^[5-6]。

目前,粉煤灰混凝土的变形性能研究主要集中在 28 d 龄期后恒应力加载下的徐变研究。大多研究表明,粉煤灰能够大幅度减少混凝土的徐变,但减少的程度受粉煤灰品种、水胶比、养护温度等的影响^[5,7-10],粉煤灰降低徐变的原因可能是粉煤灰能诱导产生高密度 C-S-H 凝胶^[11]。针对中国现行道路交通(公路、铁路、桥梁等)规范中混凝土名义徐变系数未考虑粉煤灰的影响,研究学者通过试验对徐变系数提出了修正建议,经修正后的规范徐变系数计算模型可提高粉煤灰混凝土徐变的预测精度^[12-14]。另外,据调查,为了缩短工期,施工单位往往会让粉煤灰混凝土结构在早龄期就承受大量施工荷载^[15-16],加载后对混凝土性能损害的方式和程度也未进行相关的系统研究,因此,有必要对粉煤灰混凝土早龄期荷载下的变形和加载后的强度进行研究。对未掺粉煤灰混凝土的研究发现,与 14 d 开始加载相比,7 d 开始加载并持荷 274 d 的徐变系数增大了 67.2%^[17],另有研究发现在良好养护的前提下混凝土的自愈作用使得早龄期加载对 28 d 强度影响并不大^[18]。也有文献表明,加载应力从 30% 增加到 50% 时,徐变度呈现非线性增长,但这对粉煤灰的早期徐变是否适用还有待确定^[19]。另有试验采用水化程度模型来预测粉煤灰混凝土的早龄期基础变形,但仍需要对模型进行进一步修正^[20]。

从已有研究可以看出,关于早龄期加载对粉煤灰混凝土变形性能的影响研究还很缺乏,对加载后强度的影响更是鲜有提及。明确早龄期加载对粉煤灰混凝土变形性能以及受载后力学性能的影响程度,对混凝土结构的安全施工、相关标准规范的修订和施工技术的发展具有重要的现实意义。本文中主要研究了粉煤灰掺量、加载龄期、加载应力对早龄期受载混凝土变形量及加载至 14 d 龄期时强度变化的影响规律。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

1.1.1 水泥 试验采用重庆富皇 P. O. 42. 5R 水泥,其化学成分和物理力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 水泥的化学成分

Table. 1 Chemical composition of cement %

| SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | MgO |
|------------------|--------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|
| 21. 20 | 61. 69 | 4. 80 | 3. 00 | 2. 64 | 2. 37 |

表 2 水泥的物理性能

Table. 2 Physical property of cement

| 密度/ (g · cm ⁻³) | 比表面积/ (m ² · kg ⁻¹) | 抗压强度/MPa | | 体积 安定性 | 凝结时间/min | |
|--------------------------------|---|----------|-------|-----------|----------|-----|
| | | 3 d | 28 d | | 初凝 | 终凝 |
| 3. 05 | 335 | 21. 7 | 48. 2 | 合格 | 192 | 275 |

1.1.2 粉煤灰 采用重庆市珞璜电厂生产的二级粉煤灰,主要技术要求如表 3 所示。

表 3 粉煤灰的技术要求

Table. 3 Technical requirements of fly ash %

| 细度(45 um 方孔筛余) | 需水 量比 | 烧失量 | 三氧 化硫 | 氯离 子含量 | 含水率 |
|-------------------|----------|-------|----------|-----------|------|
| 17. 1 | 102 | 5. 68 | 1. 04 | 0. 024 | 0. 1 |

1.1.3 细集料 机制砂与特细砂按照 7:3 质量比复合使用,其技术指标为

机制砂: M_x = 3. 1, s₁ = 2. 69(g/cm³),堆积密度 1 650 Kg/m³,含粉量 7. 2%;

特细砂: M_x = 0. 8, s₁ = 2. 68(g/cm³),堆积密度 1 450 Kg/m³,含泥量 1. 2%。

1.1.4 粗集料 本试验采用粗集料为的 5~10 mm 小碎石和 10~20 mm 大碎石,小碎石:大碎石 = 6:4。

1.1.5 减水剂 聚羧酸高效减水剂,减水率 27%。

1.2 配合比

本试验在配制 C30 普通混凝土的基础上,保持其他材料用量和胶凝材料总量不变,粉煤灰掺量分别为胶凝材料总量的 0%、10%、20%、30%,具体配合比如表 4。

表 4 试验用混凝土配合比
Table. 4 Mix proportion of concrete

| 编号 | 水泥/ | 粉煤灰/ | 细集料/ | 粗集料/ | 水/ | 减水剂/ | 抗压强度/ | 轴心抗压强度/MPa | |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|------------|------|
| | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | MPa | 14 d | 28 d |
| FA—0% | 340 | 0 | 839 | 1019 | 163 | 5.1 | 37.5 | 26.8 | 28.7 |
| FA—10% | 306 | 34 | 839 | 1019 | 163 | 5.1 | 33.5 | 23.7 | 26.3 |
| FA—20% | 272 | 68 | 839 | 1019 | 163 | 5.1 | 27.6 | 19.8 | 21.4 |
| FA—30% | 238 | 102 | 839 | 1019 | 163 | 5.1 | 25.4 | 18.1 | 19.8 |

1.3 试验方法

1.3.1 混凝土基本力学性能试验 混凝土立方体抗压强度、轴心抗压强度测定按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002)进行试验。

1.3.2 混凝土早龄期加载试验 按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行,棱柱体试件的尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,试验装置如图 1,加载制度如表 5。

在进行加载龄期和加载应力对早龄期受载混凝土变形及强度影响试验时选择粉煤灰掺量为 10% 的混凝土。



图 1 混凝土早龄期加载设备

Fig. 1 Loading equipment for concrete at early age

表 5 粉煤灰混凝土早龄期加载制度

Table. 5 Loading system of concrete in early age

| 试验 编号 | FA-0% | FA-10% | FA-20% | FA-30% | LA-3 d | LA-5 d | LA-7 d | RE-3 d | ST-20% | ST-40% | ST-60% | ST-0% |
|----------|---|--------|--------|--------|-------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 试验变量 | 粉煤灰掺量 | | | | 加载龄期 | | | | 加载应力 | | | |
| 拆模时间 | 1 d 拆模 | | | | | | | | | | | |
| 加载龄期 | 标准养护 7 d | | | | 标准养 护 3 d | 标准养 护 5 d | 标准养 护 7 d | 标准养 护 3 d | 后处于 加载环 境但未 加载 | 标准养护 7 d | | |
| 加载环境 | 温度为(20±2)℃,相对湿度为(60±5)%RH的恒温恒湿环境 | | | | | | | | | | | |
| 加载应力 | 以 40% 的 7 d 轴压强度加载 | | | | 以 40% 的相应龄期轴压强度加载 | | | | 以 20% 的 7 d 轴压强 度加载 | 以 40% 的 7 d 轴压强 度加载 | 以 60% 的 7 d 轴压强 度加载 | 处于加 载环境 但未 加载 |
| 加载时间 | 加载至混凝土 14 d 龄期后卸荷并在 1~2 h 内测试混凝土的轴心抗压强度 | | | | | | | | | | | |

2 结果与讨论

2.1 早龄期加载对粉煤灰混凝土变形的影响

图 2 是不同粉煤灰掺量下早龄期受载混凝土的变形量随龄期发展曲线。从图中可以看出,受载混凝土在 1~24 h 内的变形量显著增加,而后变形速率降低。随着粉煤灰掺量的增加,同龄期下的变形量降低且变形速率在 24 h 前变化不大,24 h 后明显降低,当粉煤灰掺量为 30% 时,24~120 h 之间的变形量和最终变形量分别比基准组减少了 60.6% 和 33.5%。可见粉煤灰的加入能够有效抑制早龄期受载混凝土的变形,这与过去研究学者关于粉煤灰对 28 d 后受载混凝土的变形(徐变)的影响规律一致^[8-9],原因是在临界掺量以下粉煤灰与基体粘接良好,微集料效应能更好发挥,从而限制了基体变形。

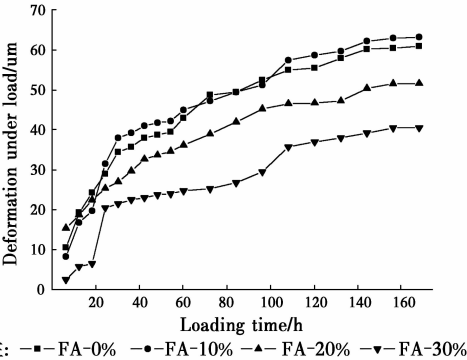


图 2 粉煤灰掺量对早龄期受载混凝土变形的影响
Fig. 2 Effect of fly ash on the deformation of concrete under load at early age

图 3 是加载龄期对掺粉煤灰早龄期受载混凝土变形的影响试验结果。从中可以看出加载混凝土的变形量远远大于未加载混凝土的变形量,加载龄期越靠后同龄期下的变形量越低,降低的程度越小,5 d 龄期开始加载时混凝土最终变形量比 3 d 龄期加载时混凝土变形量低 23.8%,7 d 龄期开始加载时混凝土最终变形量比 5 d 龄期开始加载时混凝土最终变形量低 18.1%。可见加载龄期越晚,粉煤灰二次水化越充分,内部结构越致密,有利于降低荷载下的变形,增加混凝土结构的稳定性,但这种降低程度随加载龄期的靠后而变得不明显,已有研究也证实了这一点^[16,21]。

图 4 是不同加载应力下掺粉煤灰混凝土在荷载下的变形量随龄期发展的试验结果。未施加荷载时,粉煤灰混凝土的变形量最低,变形增长速率也最

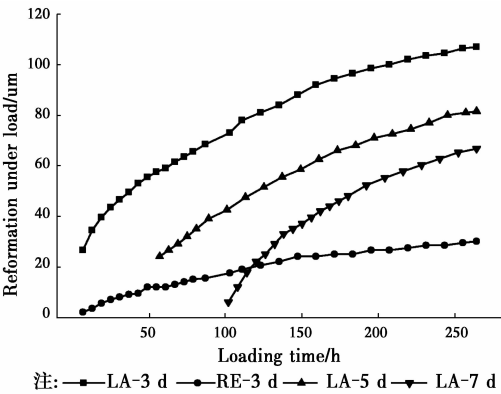


图 3 加载龄期对早龄期受载混凝土变形的影响
Fig. 3 Effect of load age on the deformation of concrete under load at early age

慢。变形量在 0~72 h 期间显著增长,72 h 后各应力水平下变形量的增长幅度相当。加载应力低于 40%~40% 的标准养护条件下的 7d 轴压强度)时,变形量与加载应力呈正相关关系;当加载应力超过 40% 时,比徐变(单位应力下的徐变)增大,且最终变形量比未加载混凝土增加了 572.1%。原因可能是混凝土出现更多微裂纹导致水分迁移,诱发粉煤灰混凝土内部自干燥效应,从而促进变形,且应力水平越高,影响越明显^[22-23]。

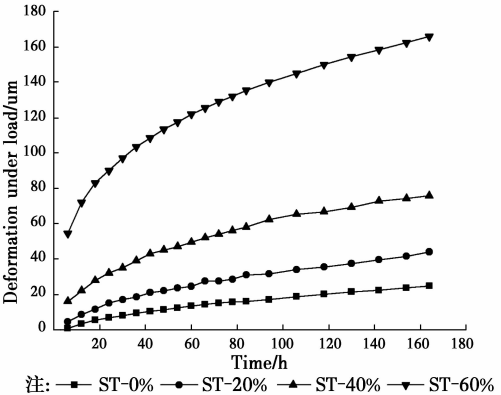


图 4 加载应力对早龄期受载粉煤灰混凝土变形的影响
Fig. 4 Effect of stress on the deformation of FA concrete under load at early age

2.2 早龄期加载对粉煤灰混凝土强度的影响

图 5、图 6、图 7 分别是粉煤灰掺量、加载龄期、加载应力对早龄期加载以后混凝土的轴心抗压强度影响的试验结果。

图 5 表明加载后混凝土的轴压强度随粉煤灰掺量增加而降低。对比图 5 和表 4 可以发现未掺粉煤灰混凝土在加载之后比未加载的同龄期(14 d)轴压

强度降低了 4.9 MPa。相比于同粉煤灰掺量的未加载混凝土,10%、20%、30%掺量的混凝土在加载后强度依次降低了 1.9 MPa、2.8 MPa 和 1.3 MPa,降低程度均小于未掺粉煤灰的混凝土。可见粉煤灰可以补偿混凝土轴心抗压强度损失程度。原因一方面归结于粉煤灰在后期发挥的火山灰效应,另一方面归结为在一定荷载作用下微裂缝的产生使更多未水化水泥以及粉煤灰暴露^[23],从而促进水化产物的生成,补偿了强度损失。

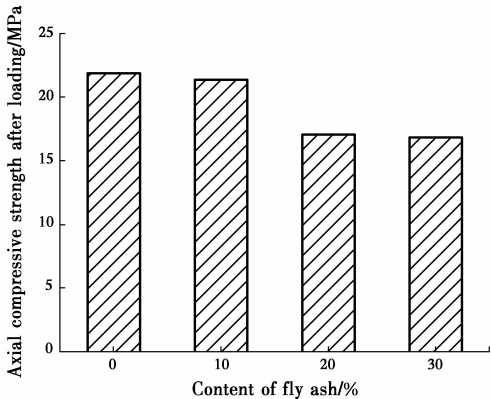


图 5 粉煤灰掺量对早龄期加载后混凝土轴心抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of fly ash on axial compressive strength of concrete after loading at early age

从图 6 中可以看出,加载龄期越靠前,加载后的粉煤灰混凝土的轴心抗压强度越低。相比于未加载和 7 d 开始加载的粉煤灰混凝土,3 d 开始加载的粉煤灰混凝土的轴压强度分别降低了 17.0% 和 10.7%; 5 d 开始加载的粉煤灰混凝土轴压强度略低于 7d 开始加载的粉煤灰混凝土的轴压强度。超早龄期(3 d)加载使得水化程度很低的浆体内部结构产生更多的微裂纹,在持续应力的作用下产生一些不可逆微裂纹可能是产生这一现象的主要原因。

图 7 表明,加载应力越大,粉煤灰混凝土加载后的轴压强度越低。与未加载的混凝土相比,20%应力水平与 60%应力水平下的粉煤灰混凝土在加载后的轴压强度分别降低了 4.3% 和 20.8%; 20%应力水平与 40%应力水平对加载后粉煤灰混凝土的轴压强度的影响差别不大。60%应力水平下粉煤灰混凝土加载后的轴压强度大大降低的原因可以认为是这一应力水平下混凝土内部的微裂纹开始出现自我增殖的现象,因此微裂纹的数量也呈现非线性的增长,从而导致内部结构劣化,强度随之降低^[22]。

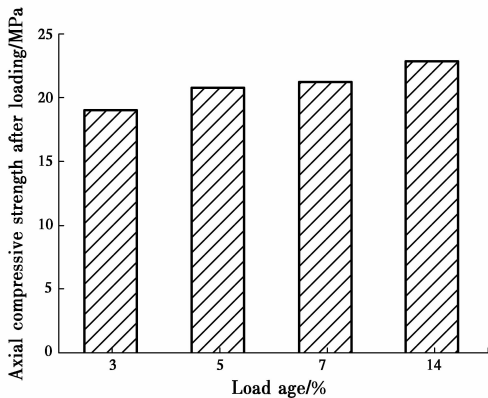


图 6 加载龄期对早龄期加载后混凝土轴心抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of load age on axial compressive strength of concrete after loading at early age

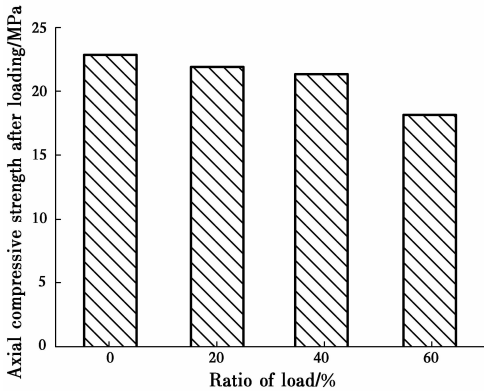


图 7 加载应力对早龄期加载后混凝土轴心抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of stress on axial compressive strength of concrete after loading at early age

3 结 论

- 1) 粉煤灰的加入能够有效抑制早龄期受载混凝土的变形,30%掺量以下随着粉煤灰掺量增加,早龄期受载混凝土的变形越小。
- 2) 加载应力低于 40% 时,变形量与加载应力呈正相关关系;当加载应力超过 40% 时,变形量与加载应力不成比例,比徐变(单位应力下的徐变)增大。
- 3) 加载龄期越靠前,加载后的粉煤灰混凝土的轴心抗压强度越低。相比于 7 d 开始加载的粉煤灰混凝土,3 d 开始加载的粉煤灰混凝土加载后的轴压强度降低了 10.7%。
- 4) 与未加载的粉煤灰混凝土相比,60%应力水平下的粉煤灰混凝土加载至 14 d 龄期后轴压强度

降低了 20.8%,此时降低程度最大。

参考文献:

[1] JOHARI M A M, BROOKS J J, KABIR S, et al. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2639-2648.

[2] KUDER K, LEHMAN D, BERMAN J, et al. Mechanical properties of self consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 285-295.

[3] DARQUENNES A, ROZIERE E, KHOKHAR M I A, et al. Long-term deformations and cracking risk of concrete with high content of mineral additions[J]. Materials and structures, 2012, 45(11): 1705-1716.

[4] BJEGOVIĆ D, STIRMER N, SERDAR M. Durability properties of concrete with blended cements [J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(12): 1087-1096.

[5] ZHANG L L, WU L Q, YANG J X, et al. Effect of fly ash on creep of high performance concrete used in bridge[C]//Applied Mechanics and Materials, 2012, 204: 2192-2195.

[6] 蒙玮,汪兴达,庄庆平,等. 矿物掺合料对箱梁混凝土长期变形性能的影响研究[J]. 铁道建筑, 2014(9): 134-136.

MENG W, WANG X D, ZHUANG Q P, et al. Study on influence of mineral admixtures on long-term deformation performances of concrete in box-girder [J]. Railway Engineering, 2014(9): 134-136. (in Chinese)

[7] PADEVET P, BITTNAR P. The cement paste creep with addition of fly ash in time and ratio of parts 60/40 [C]//Applied Mechanics and Materials, 2014, 486: 341-346.

[8] 赵庆新,孙伟,缪昌文. 粉煤灰掺量和水胶比对高性能混凝土徐变性能的影响及其机理[J]. 土木工程学报, 2009(12): 76-82.

ZHAO Q X, SUN W, MIAO C W. Effect and mechanism of interaction between fly ash proportion and water-binder ratio on the creep characteristics of high performance concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(12): 76-82. (in Chinese)

[9] ZHAO Q, LIU X, JIANG J. Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 326-333.

[10] WANG Y F, MA Y S, ZHOU L. Creep of FRP-wrapped concrete columns with or without fly ash under axial load [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 697-704.

[11] HE Z H, QIAN C X, ZHAO F. Experimental investigation of creep of cement paste with mineral admixtures via nanoindentation[J]. Nanoscience and Nanotechnology Letters, 2014, 6(1): 51-56.

[12] 曹健,王元丰,安小平,等. 轴心受压粉煤灰混凝土构件徐变系数研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 73-81.

CAO J, WANG Y F, AN X P, et al. Creep coefficient of fly ash concrete member under axial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 73-81. (in Chinese)

[13] 邓宗才,徐海滨,李辉,等. 高性能混凝土徐变规律的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 897-901.

DENG Z C, XU H B, LI H, et al. Creep law of high-performance concrete [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 897-901. (in Chinese)

[14] 肖佳,陈雷,邢昊. 掺合料和粗骨料对 C60 高性能混凝土徐变性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(11): 11-15.

XIAO J, CHEN L, XING H. Effect of mineral admixtures and coarse aggregate on the creep properties of C60 high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2011(11): 11-15. (in Chinese)

[15] 建筑结构设计施工质量控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.

Design and construction quality control of building structure[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2012.

[16] MAIA L, FIGUEIRAS J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 602-610.

[17] 刘小芳. 不同加载龄期混凝土轴压柱徐变系数研究 [J]. 广东建材, 2007(11): 110-112.

LIU X F. Creep coefficient of concrete member under axial compression at different load age. Guangdong Building Materials, 2007(11): 110-112. (in Chinese)

[18] 金贤玉, 沈毅, 李宗津, 等. 混凝土早龄期受力对后期性能的影响[J]. 混凝土, 2003 (7): 35-37.
JIN X Y, SHEN Y, LI Z J, et al. Influence of preload concrete on its latter performance[J]. Concrete, 2003 (7): 35-37. (in Chinese)

[19] ATRUSHI D S. Tensile and compressive creep of early age concrete[J]. Civil Engineering, Trondheim, 2003 (2): 314.

[20] JIANG W, DE SCHUTTER G, YUAN Y. Degree of hydration based prediction of early age basic creep and creep recovery of blended concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 83-90.

[21] ROSSI P, TAILHAN J L, LE MAOU F. Comparison of concrete creep in tension and in compression; Influence of concrete age at loading and drying conditions [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 51: 78-84.

[22] ROSSI P, TAILHAN J L, LE MAOU F. Creep strain versus residual strain of a concrete loaded under various levels of compressive stress [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 51: 32-37.

[23] RANAIVOMANANA N, MULTON S, TURATSINZE A. Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52: 1-10.

(编辑 胡玲)