

长期暴露环境下混凝土收缩及配筋影响试验研究<sup>\*</sup>何海霞<sup>1</sup>, 黎国雄<sup>1</sup>, 邹红坤<sup>1</sup>, 曾向东<sup>2</sup>, 吕松刚<sup>1</sup>, 邹朝胜<sup>3</sup>, 吕毅刚<sup>3</sup>

(1.邵阳县公路建设养护中心, 湖南 邵阳 422100; 2.湖南省邵阳县交通建设质量安全监督站, 湖南 邵阳 422100; 3.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**开展长期暴露环境下混凝土柱收缩及配筋影响试验研究,将素混凝土柱和钢筋混凝土柱的收缩试验结果与不同规范模型的收缩预测值进行比较,分析配筋对混凝土收缩性能的影响。结果表明,自然暴露环境下素混凝土柱的收缩增长速率在 270 d 前较快,后期变化速率逐渐趋于缓和;JTG 3362—2018 与 CEB—FIP—1990 模型的收缩预测结果较准确,ACI 209R—1992 和 GL—2000 模型的预测误差较大;配筋对混凝土的收缩有约束作用。以 JTG 3362—2018 预测模型为基础,引入混凝土收缩修正系数和配筋率影响收缩修正系数,建立自然暴露环境下混凝土收缩修正预测模型,算例验证结果显示修正模型的最大预测误差为 9.21%,误差在可控范围内。

**关键词:**桥梁;混凝土;收缩;配筋;暴露试验;预测模型

中图分类号:445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)03-0122-05

混凝土的收缩性能受诸多因素的影响,难以精确计算,严重影响混凝土桥梁的正常使用<sup>[1-2]</sup>。研究人员通过大量试验研究混凝土的收缩特点<sup>[3-5]</sup>,但由于混凝土的收缩具有时变性,通过各种手段建立的混凝土收缩预测模型的预测结果往往不具备普遍性<sup>[6-8]</sup>。由于钢筋与混凝土之间具有良好的黏结作用,钢筋使混凝土承担外力的能力显著提升<sup>[9-11]</sup>。但二者的弹性模量差别较大,在混凝土收缩过程中钢筋会对混凝土产生明显的抑制作用<sup>[12-14]</sup>。若在计算混凝土收缩的过程中不考虑钢筋的影响,会导致构件内收缩应变被明显高估,使预测模型的准确率大大降低<sup>[15-18]</sup>,钢筋对混凝土构件收缩的约束作用不容忽视。近年来通过混凝土收缩试验建立了诸多混凝土收缩预测模型,如杨健辉等基于 28 d 高强混凝土收缩试验,结合试验结果对 B3 收缩数学模型进行了修正<sup>[19]</sup>;郑怡等以石灰岩质机制砂为原材料,根据 180 d 混凝土收缩试验结果拟合出机制砂的收缩、徐变时程关系表达式<sup>[20]</sup>;曹国辉等对钢管混凝土进行收缩试验,提出了考虑膨胀剂含量、水泥品种和养护方法等影响因素的钢管膨胀混凝土收缩预测模型<sup>[21]</sup>。目前混凝土收缩试验研究基本是在室内展开<sup>[22]</sup>,与混凝土桥梁所处的真实自然条件有较大不同。为模拟桥梁结构的自然环境条件,本文建立暴露试验站开展长期暴露试

验,进行混凝土柱及配筋影响下收缩性能试验研究,并对现有模型的预测值与长期暴露试验实测值进行对比;以 JTG 3362—2018 模型为基础<sup>[23]</sup>,引入混凝土收缩修正系数和配筋率影响收缩修正系数对该模型进行修正,提高模型预测精度。

## 1 试验概况

在桥梁施工现场建立暴露试验站,制作素混凝土柱(SZ1)和钢筋混凝土柱(GZ1),混凝土柱构件均置于暴露试验站中自然养护。采用强度等级为 C50 的混凝土,混凝土柱的高度、直径分别为 600 mm、150 mm,普通硅酸盐水泥的型号为 52.5<sup>#</sup>, $m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{碎石}):m(\text{水}):m(\text{减水剂})=460.00:585.00:1\,175.00:232.50:3.68$ 。钢筋混凝土柱采用 R235 钢筋,主钢筋配筋率为 1.13%,配筋见图 1。

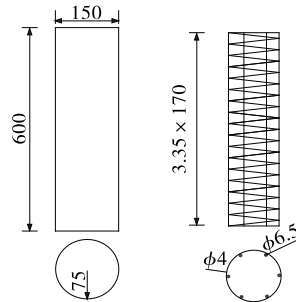


图 1 钢筋混凝土柱的配筋(单位:mm)

<sup>\*</sup> 基金项目:湖南省自然科学基金项目(2022JJ30600);长沙市自然科学基金项目(kq2202208)

分别在两混凝土柱中埋设应变传感器测试其收缩变形。构件养护 3 d 后脱模开始测试,混凝土力学性能测试结果见表 1、表 2。

表 1 混凝土抗压强度测试结果

混凝土龄期/d	抗压强度/MPa	混凝土龄期/d	抗压强度/MPa
2	26.0	133	56.1
11	39.5	170	56.5
28	46.8	780	57.1

表 2 混凝土弹性模量测试结果

混凝土龄期/d	弹性模量/GPa	混凝土龄期/d	弹性模量/GPa
2	27.3	28	36.1
7	32.6	170	36.5
14	34.2	780	38.1

2 素混凝土柱收缩试验研究

2.1 温度和湿度时程曲线

拆模后暴露试验站的环境温度和湿度分别为 4.0~37.9℃、42.0%~94.5%,温度和湿度时程变化见图 2。实测年平均温度和年平均相对湿度分别为 23.8℃、64.2%。

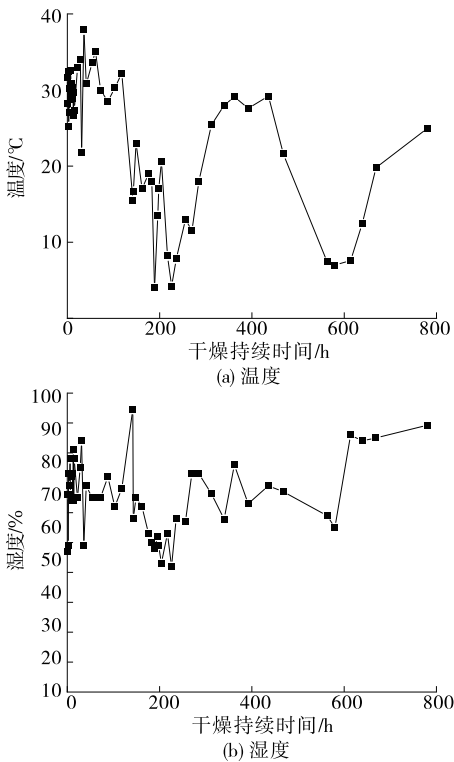


图 2 温度和湿度随时间的变化

2.2 素混凝土柱收缩试验结果分析

为消除温度对应变传感器的影响,通过测试并进行数值拟合,得到素混凝土柱 SZ1 中应变传感器的应变增量  $\Delta\epsilon$  与温度增量  $\Delta T$  的关系:

$$\Delta\epsilon = 1.051\Delta T \tag{1}$$

不考虑温度的影响,素混凝土柱 SZ1 的收缩应变随时间的变化见图 3。

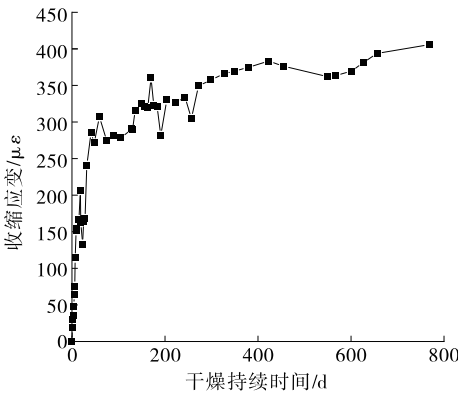


图 3 素混凝土柱 SZ1 的收缩应变曲线

由图 3 可知:素混凝土柱在自然暴露环境下收缩,270 d 以前收缩速率较快,270 d 后收缩速率逐渐趋于缓和,最大收缩应变为 404  $\mu\epsilon$ 。干燥持续时间( $t-t_s$ )为 90 d 时,收缩应变增大至 271  $\mu\epsilon$ ;干燥持续时间由 90 d 变化至 270 d 时,收缩应变增加 32.47%;但干燥持续时间由 270 d 变化至 768 d 时,收缩应变仅增加 12.57%,说明素混凝土的收缩速率逐渐趋于稳定。

2.3 模型预测值与实测值对比分析

分别采用 JTJ 023—85 模型、JTG 3362—2018 模型、CEB—FIP—1990 模型、ACI 209R—1992 模型、GL—2000 模型对素混凝土柱 SZ1 的收缩进行预测,各模型预测值与实测值对比见图 4。

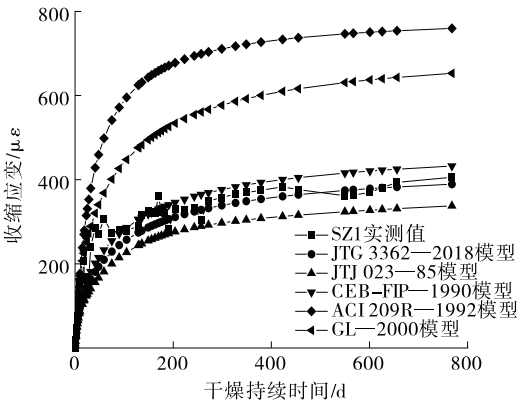


图 4 各模型的收缩应变预测值与实测值的比较

从图4可以看出:与试验实测收缩应变值相比,JTG 023—85模型的收缩应变预测值偏小,二者相差20.08%;ACI 209R—1992和GL—2000模型的收缩应变预测值偏大,分别高于实测值87.24%、60.92%;JTG 3362—2018和CEB—FIP—1990模型的收缩应变预测值与实测值相近,分别相差10.68%、13.58%,较准确。

## 2.4 混凝土收缩应变修正预测模型

根据前文的分析,JTG 3362—2018收缩应变预测模型的预测结果较准确。以该模型为基础,引入混凝土收缩修正系数对该模型进行修正,得到混凝土收缩应变 $\epsilon_{cs}(t, t_s)$ 的修正预测模型:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \xi(t - t_s) \cdot \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (2)$$

式中: $\xi(t - t_s)$ 为混凝土收缩修正系数; $\epsilon_{cs0}$ 、 $\beta_s(t - t_s)$ 分别为名义收缩系数和收缩随时间发展的系数,其表达式见文献[23]。

混凝土收缩修正系数 $\xi(t - t_s)$ 的时变规律模型为:

$$\xi(t - t_s) = \begin{cases} 0.183 \ln(t - t_s) + 0.447, & (t - t_s) \leq 30 \text{ d} \\ 1.069, & (t - t_s) > 30 \text{ d} \end{cases} \quad (3)$$

在自然暴露环境下,随着时间的变化,公式拟合的混凝土收缩修正系数 $\xi(t - t_s)$ 与试验推算值的对比见图5。素混凝土柱SZ1的收缩应变实测值与修正预测模型预测值的对比见图6。

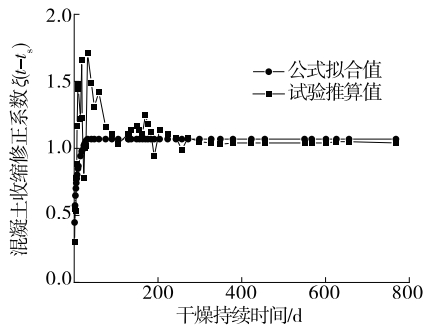


图5 公式拟合 $\xi(t - t_s)$ 与试验推算值的比较

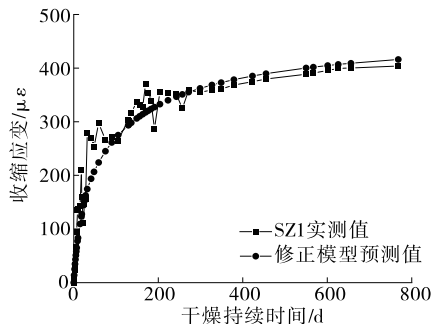


图6 修正模型的收缩应变预测值与实测值的比较

由图6可知:修正后模型预测值与实测值的差值较小,仅为5.56%,表明混凝土收缩修正系数对预测模型的修正效果较好,预测值与实测值的变化趋势极为相似,前期变化迅速,后期趋于稳定,表明修正预测模型能适应桥梁所处的真实环境。

各模型预测值与素混凝土柱SZ1收缩应变实测值相比的变异系数 $\theta$ 见表3。变异系数计算公式如下:

$$\theta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon'_{cs,i} - \epsilon_{cs})^2} / \bar{\epsilon}_{cs}$$

$$\bar{\epsilon}_{cs} = \sum_{i=1}^n \epsilon_{cs,i} / n$$

$$\bar{\theta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j \theta^2}$$

式中: $\theta$ 为第 $j$ 组变异系数; $\epsilon'_{cs,i}$ 为第 $i$ 次收缩应变预测值; $\epsilon_{cs,i}$ 为第 $i$ 次收缩应变实测值; $\bar{\theta}$ 为相对于总体数据的变异系数。

表3 与实测值相比各模型预测值的变异系数

预测模型	变异系数/%	预测模型	变异系数/%
修正预测模型	12.58	CEB—FIP—1990模型	13.19
JTG 3362—2018模型	16.00	ACI 209R—1992模型	104.51
JTG 023—85模型	25.23	GL—2000模型	63.60

由表3可知:修正预测模型的变异系数仅为12.58%,比其他预测模型的变异系数低,该预测模型更准确。

## 3 配筋对混凝土柱收缩的影响研究

### 3.1 配筋对混凝土柱收缩的影响分析

通过测试并进行数值拟合,得到钢筋混凝土柱GZ1中应变传感器的应变增量 $\Delta\epsilon$ 与温度增量 $\Delta T$ 的关系:

$$\Delta\epsilon = 1.219 \Delta T \quad (4)$$

混凝土柱部分测试周期的收缩应变测试结果见表4。不考虑温度的影响,钢筋混凝土柱GZ1与素混凝土柱SZ1收缩应变实测值的比较见图7。

表4 混凝土柱收缩应变测试结果

试件编号	不同干燥持续时间(d)下混凝土柱收缩应变/ $\mu\epsilon$					
	90	150	180	270	600	768
SZ1	271	336	338	359	396	404
GZ1	196	253	272	230	318	336

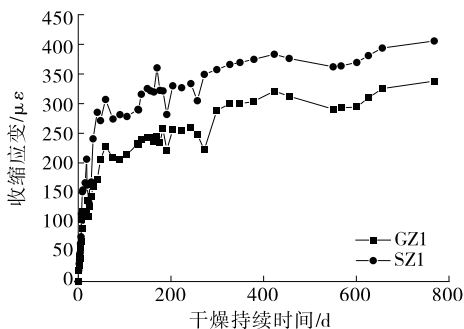


图7 钢筋混凝土柱 GZ1 与素混凝土柱 SZ1 收缩应变实测值的比较

由表4和图7可知:钢筋混凝土柱 GZ1 的收缩应变实测值均小于素混凝土柱 SZ1 的实测值,表明配筋对混凝土收缩变形有约束作用,GZ1 的收缩应变最大值为  $336 \mu\epsilon$ ,与 SZ1 相差 16.83%;从整体上看,两者随时间发展的规律一致,即前期收缩应变变化迅速,270 d 后逐渐趋于平稳。

为近似考虑配筋对混凝土收缩的约束作用,引入配筋率影响收缩修正系数  $\gamma(t-t_s)$ ,它为钢筋混凝土柱收缩应变与素混凝土柱收缩应变的比值,按下式计算:

$$\gamma(t-t_s) = \begin{cases} 1.066/(1+n' \cdot \rho), & \rho \neq 0 \\ 1.0, & \rho = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $n'$ 取 20; $\rho$ 为配筋率。

在自然暴露环境下,配筋影响下公式拟合值与试验推算值的比较见图8。

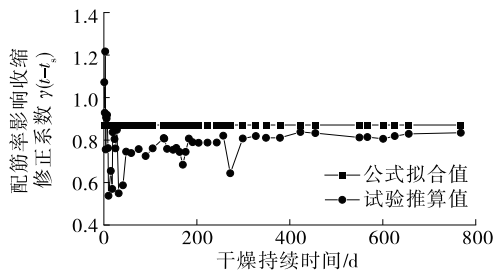


图8 公式拟合  $\gamma(t-t_s)$  与试验推算值的比较

由图8可知:试验推算的配筋对混凝土收缩效应的约束在前期有所波动,随着干燥持续时间的增长,逐渐趋于稳定。

在自然暴露环境下,若在配筋混凝土构件中考虑配筋对混凝土收缩应变  $\epsilon_{cs}(t, t_s)$  的约束作用,则式(2)修正为:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \gamma(t, t_s) \cdot \xi(t, t_s) \cdot \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t, t_s) \quad (6)$$

### 3.2 算例验证

以文献[24]中3组钢筋混凝土收缩构件为例对上述混凝土收缩应变修正预测模型进行验证。构件的长×宽×高均为  $1\,000\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ ,配筋率分别为 0.38%、0.76%、1.71%,构件中心均开一个直径为 110 mm 的孔(见图9)。 $m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{砂}):m(\text{碎石}):m(\text{水}):m(\text{外加剂})=384.0:96.0:706.0:1\,059.0:159.0:5.7$ 。构件养护 5 d 后进行混凝土收缩试验,试验温度和湿度分别为  $-5.0 \sim 35.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、20.0%~90.0%。用埋设在构件内部的振弦式应变传感器测试其纵向收缩。构件养护 28 d 后,其立方体抗压强度及弹性模量分别为 79.6 MPa、46.6 GPa。

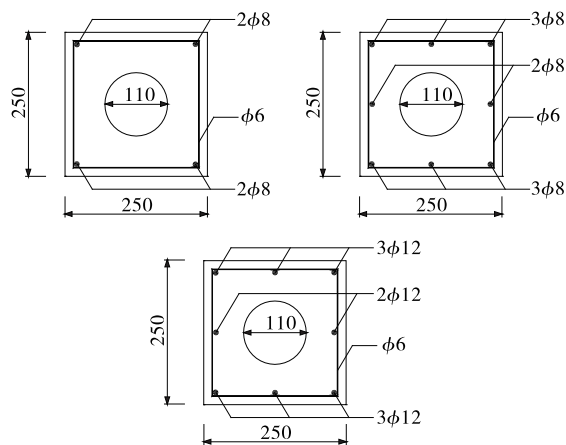


图9 配筋混凝土收缩构件示意图(单位:mm)

在干燥持续时间为 323 d 时,配筋混凝土构件的收缩应变实测值与式(6)计算结果的比较见表6。

表5 配筋混凝土构件收缩应变实测值与计算值的比较

配筋率/%	收缩应变/ $\mu\epsilon$		预测值与实测值的误差/%
	修正模型预测值	实测值	
0.38	237.4	230.1	3.17
0.76	221.7	203.0	9.21
1.71	190.3	184.2	3.31

由表6可知:配筋混凝土构件的收缩应变实测值与修正模型预测值的最大误差为 9.21%,在可控范围内。说明式(5)、式(6)对分析配筋对混凝土构件收缩效应具有较好的预测前瞻性。

## 4 结论

(1) 素混凝土柱的收缩速率在干燥持续时间 270 d 以前较快,收缩应变占总收缩应变的 87.43%;

270 d 后收缩速率逐渐趋于缓和,收缩应变仅占总收缩应变的 12.57%。

(2) 与收缩试验结果相比, JTJ 023—85 模型的预测值偏小, 两者相差 20.08%; ACI 209R—1992 和 GL—2000 模型的预测值偏大, 分别高于实测值 87.24%、60.92%; JTG 3362—2018 和 CEB—FIP—1990 模型的预测值与实测值相近, 分别与实测值相差 10.68%、13.58%, 较准确。

(3) 引入混凝土收缩修正系数  $\xi(t-t_s)$  和配筋率影响收缩修正系数  $\gamma(t-t_s)$  对 JTG 3362—2018 预测模型进行修正, 修正后模型预测值与实测值的最大误差为 9.21%, 预测精度提高, 配筋率影响收缩修正系数  $\gamma(t-t_s)$  对分析配筋对混凝土构件收缩效应具有较好的预测前瞻性。

#### 参考文献:

- [1] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(2): 159—167.
- [2] OJDROVIC R P, ZARGHAMEE M S. Concrete creep and shrinkage prediction from short-term test [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(2): 169—177.
- [3] SILVA R V, DE BRITO J, DHIR R K. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 327—339.
- [4] BOSHOF W P, COMBRINCK R. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 48: 34—39.
- [5] GILBERT R I, BRADFORD M A, GHOLAMHOSEINI A, et al. Effects of shrinkage on the long-term stresses and deformations of composite concrete slabs [J]. Engineering Structures, 2012, 40: 9—19.
- [6] 高原, 张君, 韩宇栋. 混凝土超早期收缩试验与模拟 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1088—1094.
- [7] 于清新, 刘君云. 超载车辆对砼梁桥病害的影响及对策分析 [J]. 公路与汽运, 2021(6): 137—140+144.
- [8] 王国杰. 自密实混凝土圆环约束收缩试验研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(12): 173—180.
- [9] 沈青青. 预应力砼连续刚构桥加固设计及效果分析 [J]. 公路与汽运, 2022(2): 114—116+119.
- [10] SHAFIGH P, GHAFARI H, BIN MAHMUD H, et al. A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes [J]. Materials & Design, 2014, 60: 320—327.
- [11] 马宝玉, 兑关锁, 阳生有. 基于多项材料细观力学的混凝土干缩量预估 [J]. 工程力学, 2014, 31(12): 104—111.
- [12] AL-SALEH S A. Comparison of theoretical and experimental shrinkage in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 72: 326—332.
- [13] 曹国辉, 胡佳星, 张锴, 等. 混凝土徐变预测模型修正分析 [J]. 建筑结构, 2014, 44(5): 45—49.
- [14] 徐腾飞, 向天宇, 杨成, 等. 预应力混凝土梁长期变形的随机性分析 [J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 111—116.
- [15] 罗俊礼, 徐志胜, 熊伟. 再生骨料高性能混凝土收缩徐变对比试验研究 [J]. 工业建筑, 2014, 44(1): 79—83+8.
- [16] WYRZYKOWSKI M, TRTIK P, MÜNCH B, et al. Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 73: 238—245.
- [17] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(10): 1026—1037.
- [18] ZHANG W Y, ZAKARIA M, HAMA Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 500—510.
- [19] 杨健辉, 汪洪菊, 王建生, 等. 高强混凝土收缩徐变试验及模型比较分析 [J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 120—125.
- [20] 郑怡, 张耀庭. 石灰岩质机制砂混凝土收缩徐变性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 59—65.
- [21] 曹国辉, 张锴, 胡佳星, 等. 钢管膨胀混凝土收缩应变计算模型 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1094—1099.
- [22] 张锴, 曹国辉, 胡佳星. 配筋对混凝土长期收缩应变影响的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31(4): 78—81+147.
- [23] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [24] 潘钻峰, 吕志涛, 孟少平. 配筋对高强混凝土收缩徐变影响的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 11—16+23.