

# 基于湿度扩散理论 T 梁非均匀收缩效应分析

张柳煜<sup>1</sup>, 冯步文<sup>1\*</sup>, 陈汉斌<sup>2,3</sup>, 王龙<sup>1</sup>

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 云南省公路局道桥技术工程公司;  
3. 昭通市宜毕高速公路投资开发有限公司)

**摘要:** 预应力混凝土 T 梁腹板竖向裂缝是工程界普遍关注的问题之一。该文以湿度扩散理论为基础, 研究预应力混凝土 T 梁由于不均匀收缩效应对结构开裂的影响。通过建立三维湿度-结构耦合模型, 分析了 T 梁湿度场及 T 梁不均匀收缩应力分布规律。计算结果表明: T 梁不均匀收缩效应显著, T 梁腹板由于非均匀收缩效应产生较高拉应力, 增加 T 梁腹板开裂风险, 是 T 梁腹板竖向裂缝产生的重要原因之一。

**关键词:** 公路桥梁; 湿度扩散理论; 实体有限元分析; 不均匀收缩效应; T 梁腹板竖向裂缝

近年来, 随着 T 梁桥大规模建设, 该类结构的典型病害也日益凸显。其中 T 梁腹板竖向裂缝更为突出, 由于产生频繁, 且开裂机理不明确, 逐渐引起广大学者的关注。T 梁腹板竖向开裂具有规律性, 轻则深入腹板表面 1~2 cm, 重则贯穿腹板。由文献[1-3]可知, 从常规力学角度不能够很好地解释该类裂缝的成因, 对典型病害产生机理阐述过于宽泛, 以经验结论居多, 多归咎于结构施工质量, 混凝土材料收缩温度等作用。不能定性定量说明各种作用对结构的实际影响。

混凝土收缩徐变是混凝土材料的重要特性。随着时间的推移, 收缩徐变会导致结构产生次效应, 引起结构内力重分布, 是混凝土结构开裂的重要影响因素之一。目前常用的混凝土材料收缩徐变预测模型有 CEB-FIP、GL2000、B3、ACI 等。桥梁结构计算过程中, 结合常用杆系结构分析方法, 以结构构件理论厚度、环境湿度、混凝土强度为指标, 对结构的收缩徐变效应进行分析。但难以考虑由于截面各部位差异产生的不均匀收缩效应; 文献[6-9]均采用不同混凝土预测模型对连续梁桥不均匀收缩效应进行分析, 认为该效应对主梁挠度具有重要影响; 文献[10]、[11]通过公式推导对 T 梁不均匀收缩效应进行分析, 认为不均匀收缩效应是腹板开裂的影响因素之一。但现有混凝土

收缩预测模型存在较多假定, 影响参数单一, 主要用于预测混凝土收缩效应对结构整体的影响, 较难真实反映主梁不均匀收缩效应。

基于湿度扩散理论的混凝土收缩变形分析方法可有效计算混凝土构件非均匀收缩效应。文献[12]、[13]对混凝土自身与干燥收缩一体化问题、混凝土早期及在干湿环境下内部湿度分布及变化规律、混凝土结构非线性收缩应力的计算等问题进行了试验与理论研究; 文献[14]、[15]通过试验及湿度扩散理论对连续刚构桥由于不均匀收缩产生的变形进行了分析, 分析结果得出: 混凝土箱梁非均匀收缩效应对连续刚构桥变形具有显著影响。

该文主要以混凝土湿度扩散理论为基础, 计算 T 梁结构非均匀收缩效应, 研究 T 梁三维湿度场分布规律及时变特征。并在不同影响因素下, 针对混凝土 T 梁腹板竖向开裂影响因素进行研究。

## 1 混凝土湿度扩散理论

混凝土的收缩是其自身的重要特性。多年来, 国内外大量学者对混凝土收缩效应做出了大量研究和探索, 得出了大量有益的研究成果。近年来, 由于高强度混凝土开裂现象普遍, 混凝土收缩现象被进一步关注。

收稿日期: 2020-09-16(修改稿)

基金项目: 云南省交通运输厅科技项目(编号: 云交科[2017](A)05)

作者简介: 张柳煜, 男, 博士, 副教授。E-mail: 595987137@qq.com

\* 通信作者: 冯步文, 男, 硕士研究生。E-mail: 2422440859@qq.com

同时由于失水导致的混凝土收缩机理进一步被揭示,混凝土由于湿度驱动而产生收缩的变形分析也得到进一步探索,使得混凝土收缩效应可以进行定性、定量的精细化分析。

### 1.1 混凝土湿度场计算方法

初始水分布、水泥水化消耗水分(混凝土自身收缩)、水分扩散(混凝土干燥收缩)是混凝土内湿度变化的3个主要原因。湿度场计算与温度场计算类似,普遍认为,混凝土湿度场分布满足Fick定律:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{\partial q_d}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $H$ 为混凝土内相对湿度; $t$ 为时间; $D$ 为湿度扩散系数; $q_d$ 为湿度自消耗函数。

通常采用有限差分法和有限元法进行混凝土内湿度场求解。由于湿度场计算与温度场计算方程、边界及初始条件具有极大的相似性,随着有限元的发展,通常采用通用有限元程序中温度场计算模块对混凝土构件湿度场进行模拟。文献[16]、[17]对模拟过程进行了详细阐述,在此不再赘述。

### 1.2 有限元分析参数取值

#### (1) 湿度扩散系数

湿度扩散系数是混凝土湿度场计算过程中的重要参数,不同的测量方法,不同的回归分析方法,得到的湿度扩散系数计算模型均存在较大的不同。根据大量研究可知:混凝土湿度扩散系数在混凝土整个湿度扩散过程中不是常量,与混凝土内部相对湿度存在较大的联系。随着时间的推移,混凝土内部水化程度加深,水泥石变得更加密实,湿度扩散系数逐渐降低。该文参考CEB-FIP推荐公式,即:

$$\frac{D}{D_{sat}} = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left( \frac{1 - h}{1 - h_c} \right)^n} \quad (2)$$

式中: $D_{sat}$ 为混凝土内部相对湿度100%时的湿度扩散系数,其取值范围: $D_{sat} = 1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$ ;  $h_c$ 为 $D = 0.5D_{sat}$ 时相对湿度;其余值为试验常数,缺少实测值时,CEB-FIP 90推荐参数: $\alpha_0 = 0.05$ ,  $h_c = 0.8$ ,  $n = 15$ 。

#### (2) 湿度交换系数

湿度交换系数 $h_f$ 用来描述混凝土表面湿度与空气湿度的传递速率。交换系数与混凝土表面状况有直接联系,表面粗糙程度、空气温度、相对湿度、相对温度、风速等都对该值存在较大影响,此外,不同混凝土配比,也对该值有较大贡献。

#### (3) 混凝土水分自消耗函数

在混凝土水化过程中,由于水化反应的进行,混凝土内部水分随时间逐渐消耗,但混凝土长期收缩变形过程中,混凝土自身收缩占总体收缩比例较小,为10%~20%,且早期发展较快。根据文献[17]、[18],该文取混凝土水分自耗率函数为:

$$\frac{dq_d}{dt} = \frac{h_{\infty} k_z}{(1 + k_z t)^{n_n}} \quad (3)$$

式中: $h_{\infty}$ 为与混凝土水灰比相关的函数,取值范围为 $-0.5 \sim 0$ ;  $K_z$ 为常数,取值范围为 $0 \sim 0.02 \text{ h}^{-1}$ ;  $n_n$ 为指数,与混凝土养护条件有关,一般取1.2。

#### (4) 干湿变形系数

文献[12]、[13]、[19]、[20]研究表明:混凝土内部湿度变化是混凝土收缩特性的驱动力。随着时间的推移,混凝土内部湿度逐渐降低,混凝土体积发生变化,从而产生混凝土收缩效应。不同学者提出不同的结构湿度变形与湿度的耦合关系,一般地,混凝土内部湿度的改变量与结构变形间关系呈非线性,其函数表达为:

$$\Delta \epsilon_{sh} = G(\Delta H) \epsilon_{sh}^{\infty} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{sh}^{\infty}$ 为收缩极限应变; $G(\Delta H)$ 为湿度场与湿度变形耦合关系,其值范围为 $1\ 000 \times 10^{-6} \sim 3\ 000 \times 10^{-6}$ 。

三维湿度场计算属于求解三维非线性对流扩散方程的初边值问题。根据有关参考文献计算时近似认为混凝土干湿变形系数为常量。预应力混凝土T梁采用C50混凝土,根据文献[17]相关混凝土试验,计算参数取值如表1所示。

## 2 预应力混凝土T梁非均匀收缩效应分析

### 2.1 模型概况

取30 m预应力混凝土T梁桥一片中梁为分析对

表1 有限元计算参数取值

$\alpha_0$	$h_c$	$D_{sat} /$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	$n$	环境湿 度/%	干湿变形 系数	$k_z /$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$h_{\infty}$
0.05	0.8	$3.6 \times 10^{-6}$	15	60	$1.2 \times 10^{-3}$	0.003 5	-0.055

象。截面梁高 200 cm, 两侧翼板厚 18 cm, 腹板厚为 20 cm。计算过程中考虑桥面 10 cm 现浇混凝土铺装层对 T 梁结构湿度场分布的影响, 并假定 30 d 时完成现浇混凝土铺装层。通过表 1 中各参数建立湿度场有限元分析模型, 分析混凝土浇筑后 10 年 T 梁内湿度场分布及变化规律。有限元模型如图 1、2 所示。其中 S1、Z1、Z2、X1 为计算结果选择的特征点。其中 S1 点为 T 梁顶板特征点, 反映 T 梁顶板湿度及应力变化规律, Z1、Z2 为 T 梁腹板特征点, 反映 T 梁腹板表面及内部的湿度及应力变化规律, X1 为马蹄特征点, 反映马蹄内部湿度及应力变化规律。



图 1 T 梁普通钢筋模型

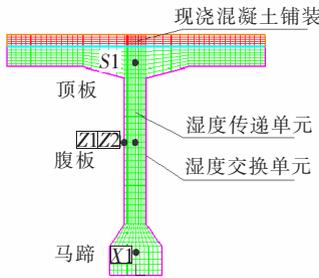


图 2 跨中截面有限元模型

2.2 混凝土湿度场分析

混凝土湿度场计算为瞬态问题, 计算过程中采用欧拉向后积分法。通过建立上述有限元模型, 对比分析不同参数下, T 梁混凝土湿度场随时间的分布情况。以 700 d 为例, T 梁湿度分布如图 3 所示。

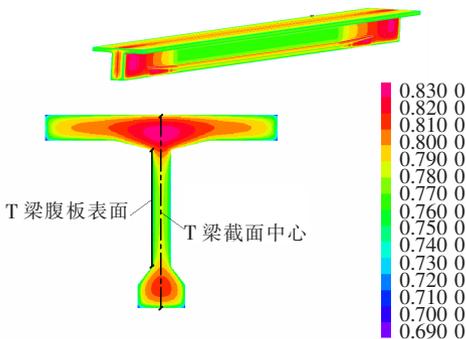


图 3 700 d 时混凝土湿度场分布

根据图 3 可知: T 梁湿度分布存在较大的不均匀性, 梁端腹板较厚, 混凝土内水分散失较慢, 跨中腹板较薄, 水分散失较快; 由于 T 梁顶板、腹板、马蹄尺寸

的差异, 湿度分布也存在较大差异, 从截面中心比较, 腹板水分散失最快, 从腹板横向比较, 腹板表面水分散失最快。

(1) 考虑混凝土水分自消耗对湿度场分布的影响 (图 4、5)

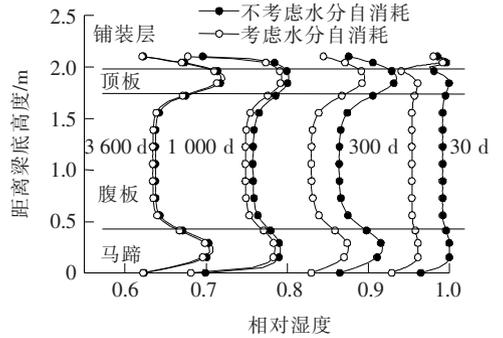


图 4 T 梁截面中心相对湿度随高度变化(考虑自消耗)

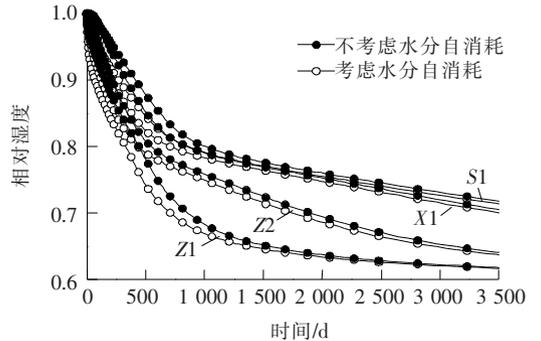


图 5 不同特征点处相对湿度随时间变化(考虑自消耗)

由图 4 可知: 由于 T 梁各部分厚度不同, 混凝土湿度分布不同, 腹板湿度下降最快, 明显快于顶板及马蹄; 现浇层混凝土浇筑后, 经短暂时间和顶板混凝土湿度扩散后湿度呈均匀分布。由图 4、5 可知: 水分自消耗对混凝土湿度分布总体影响较小, 浇筑早期的影响大于后期。

(2) 不同湿度交换系数对湿度场分布的影响

湿度交换系数对混凝土内水分的消耗有着重要贡献。取  $h_f = 1 \times 10^{-5}$ 、 $1 \times 10^{-4}$  m/h 两种不同湿度交换系数对 T 梁混凝土湿度场分布进行分析。结果如图 6、7 所示。

由图 6、7 可知: 不同湿度交换系数对 T 梁湿度分布有显著影响。由于湿度交换系数不同, 混凝土腹板表面(Z1 点)变化最剧烈, 时间为 300 d 左右时, 较高湿度扩散系数工况该点湿度已接近平均环境湿度 0.6, 而较低扩散系数工况仍保持较高的 0.78。由于交换系数增大, 混凝土内水分散失加快, 早期湿度梯度增大, 混凝土更快达到环境湿度。

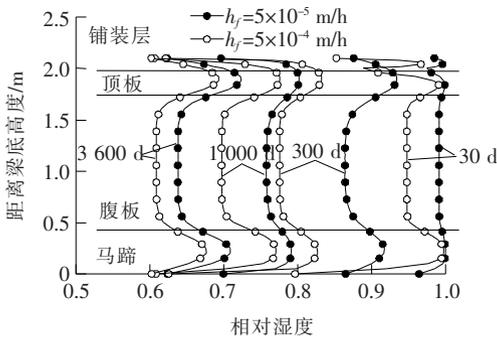


图 6 T 梁截面中心相对湿度随高度变化(考虑  $h_f$  变化)

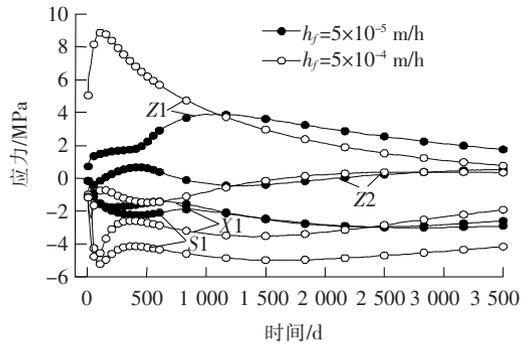


图 9 不同位置应力随时间变化(考虑  $h_f$  变化)

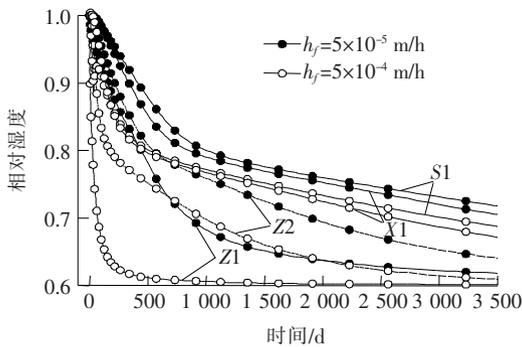


图 7 不同位置相对湿度随时间变化(考虑  $h_f$  变化)

2.3 结构湿度变形应力分析

根据湿度场与结构场间耦合关系,建立 T 梁结构场计算模型,进行结构应力分析。计算过程中取干湿变形系数为常数,考虑不同湿度交换系数对结构应力分布的影响及普通钢筋对 T 梁不均匀收缩的影响。

(1) 湿度交换系数对结构应力的影响

根据上述分析可知,湿度交换系数的取值对 T 梁内湿度分布影响较大,取不同湿度交换系数下结构应力进行分析。分析过程中假定混凝土为均匀弹性材料,并取压应力为负值,拉应力值为正值。结果如图 8、9 所示。

较高次应力,其中,顶板与马蹄以受压为主(-3~ -4 MPa),腹板表面以受拉为主(4~9 MPa)。由于湿度交换系数不同,混凝土表面水分散失速率不同,湿度梯度间存在较大差异。当湿度交换系数较大时,早期湿度梯度明显较大,应力峰值出现时间较早(200~300 d),计算拉应力峰值较大(9 MPa);当湿度交换系数较小时,应力峰值出现时间推后(1 000~1 200 d),计算拉应力峰值明显减小(4.5 MPa)。通过降低混凝土表面粗糙程度,将混凝土振捣密实等措施来改善混凝土湿度交换系数,可降低非均匀收缩效应。

(2) 普通钢筋对结构应力分布的影响

根据 30 mT 形梁上部构造通用图可知:顶板、腹板、马蹄配筋率分别为 0.92%、0.28%、3.23%。由于 T 梁不同部位配筋率不同,普通钢筋对混凝土收缩发展具有约束作用,截面内部仍然会导致混凝土不均匀收缩而产生自收缩应力。计算时取湿度交换系数  $h_f = 1 \times 10^{-4}$  m/h。计算结果如图 10、11 所示。

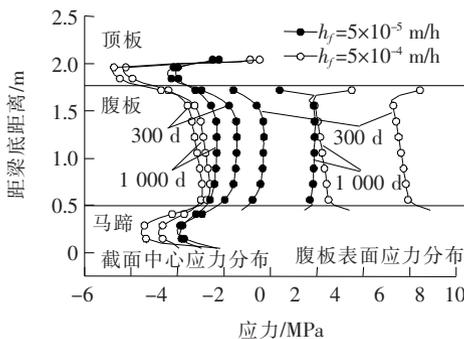


图 8 T 梁截面应力随高度变化(考虑  $h_f$  变化)

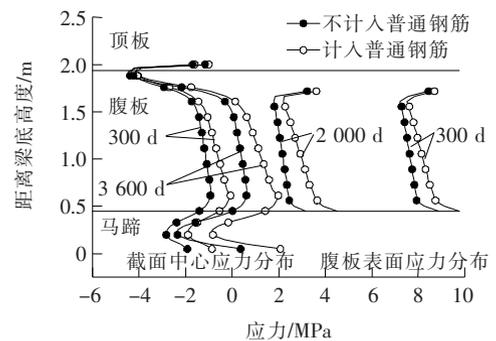


图 10 T 梁截面应力随高度变化(考虑普通钢筋)

由图 8、9 可知:T 梁内应力分布与湿度场分布相似,存在不均匀性。预应力 T 梁由于非均匀收缩产生

由图 10、11 可知:普通钢筋对混凝土收缩存在一定的约束作用,由于各部位配筋率不同,其交界部位将产生额外的约束应力。对于腹板(Z1、Z2 点),由于普通钢筋的约束,随着时间变化,表面计算拉应力逐渐大于不考虑普通钢筋工况,最终差值达 0.9 MPa(3 600 d)。相反,对于顶板及马蹄(S1、X1 点)由于普通钢筋

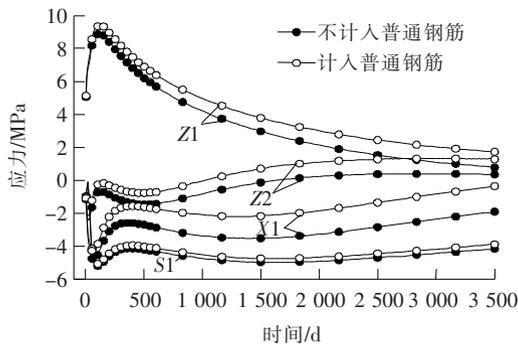


图 11 不同位置应力随时间变化(考虑普通钢筋)

的约束作用,两部位压应力逐渐低于不考虑普通钢筋工况,最终差值达 1.6 和 0.3 MPa(3 600 d)。

### 3 结论

基于湿度扩散理论,通过建立湿度场及结构场耦合模型,对混凝土 T 梁三维湿度场分布及变化规律进行了分析,并以湿度场分布为基础,对混凝土 T 梁由于混凝土不均匀收缩效应进行了分析,可得如下结论:

(1) T 梁内部湿度分布存在不均匀性。T 梁梁端腹板较厚,跨中腹板较薄,梁端干燥速率低于跨中;由于 T 梁顶板、腹板、马蹄尺寸存在差异,干燥速率存在差异,腹板干燥最快。

(2) 混凝土水分自消耗对 T 梁长期湿度场分布影响较小;表面湿度交换系数影响较大。

(3) 根据湿度场分布不均匀性,T 梁截面存在较明显的不均匀收缩效应。T 梁顶板及马蹄由于不均匀收缩呈受压状态,腹板呈部分受拉状态,其中腹板表面存在较高拉应力,开裂风险较高,将导致腹板竖向开裂。

(4) 湿度交换系数对 T 梁应力峰值的大小及出现时间均存在较大影响,通过加强混凝土振捣、增加混凝土密实性、降低混凝土腹板表面粗糙度等措施可有效改善 T 梁非均匀收缩产生的次应力。

(5) 由于 T 梁各部位配筋率不同,普通钢筋对混凝土非均匀收缩的约束作用使 T 梁产生约束应力,该约束效应对腹板有不利影响。

### 参考文献:

[1] 陈娟娟,刘杰. T 梁承托处裂缝产生的原因及影响分析[J]. 中外公路,2019(1).  
 [2] 于天来,姚爽. 钢筋混凝土 T 梁桥加固效果分析[J]. 中外公路,2016(4).

[3] 李琳,张正亚,吕毅刚. 预应力混凝土 T 梁抗弯承载能力试验研究与 Ansys 数值模拟[J]. 中外公路,2016(3).  
 [4] 符德省. 预应力混凝土连续 T 形梁腹板竖向裂缝的特征及成因分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016(3).  
 [5] 杨敏,宋泽冈,李均进. 先简支后连续预应力混凝土 T 梁裂缝成因分析及预防措施[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016(4).  
 [6] 黄胜前. 大跨度预应力混凝土箱梁桥开裂的形变机理研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2014.  
 [7] 汪剑,方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析[J]. 土木工程学报,2008(1).  
 [8] VLADIMIR K. R. STEK, ZDENĚK P. B. A. ZANT, MILOŠ ZICH. Box Girder Bridge Deflections[J]. ACI Concrete International, 2006, 28(1):55-63.  
 [9] PETER F. TAKACS. Deformations in Concrete Cantilever Bridges Observations and Theoretical Modeling[D]. Norway: The Norwegian University of Science and Technology, 2002.  
 [10] 谢峻,潘宝林,周毅姝. 截面收缩徐变非一致性分布与 T 梁桥腹板竖向开裂的时变相关性[J]. 公路交通科技,2017(11).  
 [11] 张国辉,李大茂,谢峻,等. 预应力混凝土 T 梁桥腹板竖向裂缝成因分析与处治[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017(1).  
 [12] 侯东伟. 混凝土自身与干燥收缩一体化及相关问题研究[D]. 清华大学博士学位论文,2010.  
 [13] 高原. 干湿环境下混凝土收缩与收缩应力研究[D]. 清华大学博士学位论文,2013.  
 [14] 黄海东,向中富,郑皆连. PC 箱梁桥非均匀收缩变形分析[J]. 土木建筑与环境工程,2009(4).  
 [15] 黄海东,向中富,郑皆连. 混凝土结构早期非均匀收缩试验[J]. 中国公路学报,2010(3).  
 [16] 王永宝,贾毅,赵人达. 基于 ANSYS 的混凝土内湿度场计算方法[J]. 西南交通大学学报,2017(1).  
 [17] 龚灵力. 自密实混凝土性能及混凝土多场耦合时变性分析研究[D]. 浙江大学博士学位论文,2010.  
 [18] KIM J. K., LEE C. S. Moisture Diffusion of Concrete Considering Selfdesiccation at Early Ages[J]. Cement and Concrete Research,1999,29(12):1 921-1 927.  
 [19] Bazant Z. P., Baweja S. Justification and Refinement of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage: Statistics and Sensitivity[J]. Materials and Structures, 1995, 28(7):415-430.  
 [20] Bazant Z. P. Prediction of Concrete Creep and Shrinkage: Past, Present and Future[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001,203(1):27-38.