

# PC 箱梁桥非均匀收缩变形分析

黄海东<sup>1,2</sup>, 向中富<sup>1</sup>, 郑皆连<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 广西大学 土木建筑学院, 南宁 530004;

3. 广西壮族自治区交通厅, 广西 南宁 530011)

**摘要:**大跨预应力连续刚构桥后期超限下挠问题, 越来越受到工程界的普遍关注。文中以湿度扩散理论为基础, 研究 PC 箱梁结构非均匀收缩变形计算方法。针对某实桥典型截面建立二维湿度场分析有限元模型, 分析箱梁截面二维湿度场分布规律及时变特征。根据湿度场变形耦合条件研究连续刚构桥主梁干缩变形行为特点。结果表明, PC 箱梁结构非均匀收缩变形显著, 常规方法计算误差较大。考虑箱梁截面非均匀收缩因素后, 跨中下挠累计值较常规方法大 3.1 cm, 表明箱梁截面的不均匀收缩是引起连续刚构桥后期超限下挠的重要原因。

**关键词:**箱梁桥; 湿度扩散理论; 非均匀收缩; 跨中超限下挠

中图分类号: U445.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)04-0060-06

## Analysis of Differential Shrinkage Deflection for PC Box-girder Bridges

HUANG Hai-dong<sup>1,2</sup>, XIANG Zhong-fu<sup>1</sup>, ZHENG Jie-lian<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Department of Architecture and Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Communications Department, Nanning 530011, P. R. China)

**Abstract:** The long term deflection behavior of long-span continuous rigid frame bridges has often attracted the attentions in engineering field. Based on the moisture diffusion theory, the calculation method of differential shrinkage deflection was proposed for PC box-girder bridges. Finite Element Method (FEM) model of 2-D moisture field were established for typical cross sections of a case bridge. And the distribution law and the time-variation characteristics of moisture field were analyzed. Through the deformation coupling condition of moisture field, the drying shrinkage deflection of the bridge was calculated and analyzed. It was found that the differential shrinkage deformation was significant and great error would be with the conventional method. When considering the effect of differential shrinkage, the deflection in mid-span was 3.1cm larger than that of the conventional method. Thus, the differential shrinkage was the main reason for long term deflection of long-span continuous rigid frame bridges.

**Key words:** box girder bridges; moisture diffusion theory; differential shrinkage; excessive deflection in the mid-span

目前, 大跨预应力混凝土连续刚构桥后期超限下挠问题, 越来越受到工程界的普遍关注。国内外

学者对该问题作了大量研究工作, 但主要集中在收缩徐变模型修正、预应力长期有效性问题及箱梁截

收稿日期: 2009-01-18

基金项目: 西部交通建设科技项目: 大跨度桥梁监测、加固、养护成套技术研究(2004 318 814 26)

作者简介: 黄海东(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁加固技术研究, (E-mail) hhdhao@163.com。

郑皆连(联系人), 男, 工程院院士, 博士生导师, 主要从事桥梁结构理论研究, (E-mail) zhengjieliang@163.com。

向中富(联系人), 男, 教授, 主要从事桥梁结构理论研究, (E-mail) xzf6058@cquc.edu.cn。

面开裂等因素的影响方面<sup>[1-2]</sup>。

混凝土的收缩、徐变是混凝土材料本身固有的时变特性,它是引起结构长期变形的重要因素之一,同时也引会引起结构内力的重分布。构件理论厚度反映了混凝土构件的干燥速度,是影响收缩徐变模型的重要参数。连续刚构主梁箱型截面各部位厚度差异显著,顶板、底板及腹板混凝土收缩变形不同步,导致主梁挠曲变形,其效应类似于降温温度梯度荷载作用。而目前普遍采用的收缩徐变预测模型,包括 ACI 209、CEB90、B3、GL2000 等,均以体积表面积比或表面积周长比来计算构件理论厚度,一般计算中,将箱梁各部位的有效厚度进行平均,难以考虑箱梁截面的不均匀收缩影响。文献[3]、[4]针对这一问题展开研究,两者的分析方法相似,即根据箱梁顶、底板厚度差异,分别采用 B3 及 CEB90 模型分别定义箱梁各部位的相关参数,但两者的分析结论却完全相反。文献[3]认为由于箱梁截面非均匀收缩引起的主梁挠曲变形是连续刚构桥下挠的成因,计算结果与实测数据较吻合;文献[4]采用 shell 单元建模,分析了成桥 70 年后的长期变形,认为此种效应对主梁长期下挠影响很小(跨中约占总变形量的 4.6%),可以忽略。两者虽然考虑了箱梁顶、底板厚度差异问题,但按照现有预测模型,仍是对构件理论厚度进行平均。该平均对厚度变化剧烈的顶板显然是不合适的。另外,早期修建的刚构桥,通常在结构层上铺设混凝土调平层,按现有方法,难以考虑其对主梁收缩的影响。

基于湿度扩散理论的混凝土收缩变形分析方法,作为一种精细化分析手段,可以解决混凝土结构非均匀收缩问题<sup>[5-13]</sup>。Carlson 和 Pickett 首先采用湿度扩散方程描述了混凝土干燥收缩过程。Z P Bažant 在混凝土湿度扩散理论基础上,建立了收缩预测模型 BP-KX,将复杂的非均匀收缩问题简化为沿构件厚度方向平均的名义收缩。文献[14]、[15]通过试验研究,得出了混凝土内湿度与混凝土自收缩及干燥收缩变形关系。

该文以混凝土湿度扩散理论为基础,提出了考虑薄壁箱梁结构非均匀收缩效应的计算方法,研究了 PC 箱梁截面二维湿度场分布规律及时变特征,并针对某实桥研究了箱梁截面非均匀收缩的长期变形问题。

## 1 混凝土湿度场理论

### 1.1 混凝土的收缩

混凝土的收缩主要包括四种类型:即塑性收缩、

自收缩、碳化收缩和干燥收缩。其中干燥收缩与自收缩是引起混凝土结构收缩变形的主要因素。自收缩是混凝土在水化过程中,由于内部微结构毛细孔道内的水分消耗,而引起的收缩。自收缩是一种由于水化反应产生的固有收缩,不与外界发生水分转移。干燥收缩是混凝土内外湿度平衡过程中,毛细孔道内部水分运移,引起体积改变而发生收缩。混凝土的收缩受到配合比、养护条件、环境温度、环境湿度及结构几何尺寸等因素的影响。对于普通混凝土,在长期收缩变形中,干燥收缩所占比例较大,自收缩所占比例较小(一般为总收缩量的 10%~20%)。另外自收缩前期发展较快,一般情况下在混凝土浇筑后的一周内,其自收缩完成 90%以上。

### 1.2 混凝土湿度扩散模型

在混凝土在干缩、硬化过程中,构件内部水分含量随时间及空间不断发生变化,最终与环境湿度达到平衡。正是由于混凝土内部湿度的变化引起体积改变,进而导致结构发生收缩变形。针对混凝土湿度扩散问题,国内外学者做了大量的研究工作<sup>[5]、[7-8]</sup>,普遍认为混凝土的湿度扩散现象服从 Fick 定律,瞬态湿度场控制方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla [D(H)\nabla H] - \frac{\partial H_a}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\nabla$  为微分算子,对于三维问题  $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z})$ ;  $H$  为相对孔隙湿度;  $D$  为湿度扩散系数,是对孔隙湿度  $H$  的函数;  $\frac{\partial H_a}{\partial t}$  为混凝土水化过程中的湿度消耗率。

混凝土构件与环境大气接触表面为  $S$ ,则湿度扩散方程边界条件为:

$$D(H)(\frac{\partial H}{\partial n})|_S = f(H_e - H_s) \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial H}{\partial n}$  为干燥表面单位法向湿度梯度;  $H_e$ 、 $H_s$  分别为环境湿度、干燥表面湿度;  $f$  为湿度对流系数。

### 1.3 湿度扩散系数

湿度扩散系数受环境温度、湿度条件影响显著,一般通过试验进行拟合,表达形式很多。该文采用 CEB-FIP90 推荐公式,即:

$$D(H) = D_1 \left( \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + (\frac{1 - H}{1 - H_c})^n} \right) \quad (3)$$

式中: $D_1$  为混凝土饱和状态下( $H=1$ )湿度扩散系数最大值;  $H_c$  为  $D(H)=0.5D_1$  时的孔隙相对湿度;  $\alpha$ 、 $n$  为试验常数。当缺少试验资料时,规范中推荐采用参数为:  $\alpha=0.05$ 、 $H_c=0.8$ 、 $n=15$ 、 $D_1=$

$\frac{D_{1.0} f_{ck0}}{f_{ck}}$ . 当  $H < 0.7$  及  $H > 0.85$  时, 湿度扩散系数  $D$  变化幅度很小, 而当  $0.7 < H < 0.85$  时, 湿度扩散系数  $D$  变化变化剧烈。湿度扩散系数最大值  $D_1$  与混凝土标准抗压强度  $f_{ck}$  成反比, 不同强度等级混凝土湿度扩散系数曲线见图 1。当湿度扩散系数取为常数时, 湿度场控制方程退化为线性偏微分方程。

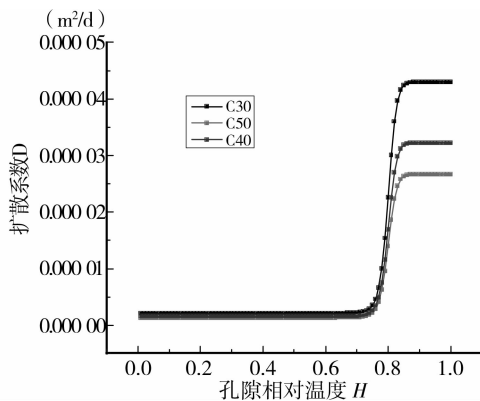


图 1 混凝土湿度扩散系数曲线

#### 1.4 湿度、干缩变形耦合关系

混凝土干燥过程中, 由于内湿度含量降低, 导致结构体积改变, 引起收缩变形。已有研究表明, 内湿度改变量与结构收缩变形间存在非线性关系:

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

式中:  $\epsilon_{sh}^{\infty}$  为收缩极限;  $G(\Delta H)$  为湿度场与应力场耦合关系, 可以通过试验确定。文献<sup>[8]</sup>认为当  $0.6 < H < 1$  时, 混凝土收缩与内湿度改变之间近似存在线性关系:

$$\Delta \epsilon_{sh} = \beta \Delta H \quad (5)$$

式中:  $\beta$  为与内湿度相关的收缩系数。

#### 1.5 有限元计算方法

求解混凝土的湿度扩散问题, 实际上是求解三维非线性对流扩散方程的初边值问题。工程中常采用差分法或有限元法进行求解<sup>[11]</sup>。采用有限元法把求解区域划分为有限个单元并加以集合, 得到湿度扩散方程的矩阵表达式

$$[D] \{H\} + [C] \{\bar{H}\} = \{R\} \quad (6)$$

式中:  $[D]$  为湿度扩散矩阵,  $[D] = \sum_{\Delta v} [B]^T [K] [B] dv + \sum_{\Delta s} \int f \{N\} \{N\}^T ds$ ;  $[C]$  为湿度含量矩阵,  $[C] = \sum_{\Delta v} \int \{N\} \{N\}^T dv$ ;  $\{R\}$  为外湿度流矢量,  $\{R\} = \sum_{\Delta s} \int f H_{en} \{N\} ds - \sum_{\Delta v} \int \{N\} \frac{\partial H_a}{\partial t} dv$

混凝土内湿度扩散问题属于瞬态场问题, 求解过程需要对时间域进行离散化。而离散方式根据欧尔逊常数的取值不同, 可以分为向前差分法、向后差

分法、Crank-Nicolson 法及 Galerkin 法等。该文采用 Euler 向后差分法, 即

$$\{\bar{H}\}_{t+\Delta t} = \frac{\{H\}_{t+\Delta t} - \{H\}_t}{\Delta t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得

$$([D] + \frac{[C]}{\Delta t}) \{H\}_{t+\Delta t} = \frac{[C]}{\Delta t} \{H\}_t + \{R\} \quad (8)$$

当湿度扩散系数  $D$  为常系数时, 方程(6)为线性瞬态问题, 可以由式(8)求解每一时间步的  $H$  值。由于混凝土湿度扩散系数  $D$  为相对孔隙湿度  $H$  的函数, 即在任意时间步内湿度扩散系数  $D$  随相对孔隙湿度  $H$  的改变而发生改变。因此方程(6)为非线性方程, 计算中采用 New-Raphson 迭代法求解。

## 2 箱梁截面非均匀收缩对桥梁变形的影响分析

### 2.1 桥梁概况

某桥建于 1997 年, 主桥为 140+240+140 m 预应力混凝土连续刚构, 主梁为三向预应力结构, 采用单箱单室截面, 顶板宽 22 m, 底板宽 11.5 m。箱梁混凝土等级为 C50。

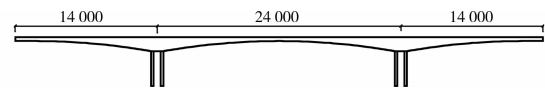


图 2 某桥立面布置图

该桥服役期已接近 10 年。该桥主跨跨中最大下挠为 31.7 cm, 边跨最大下挠为 3.96 cm。大桥管养部门多年连续观测资料表明, 大桥跨中点的下挠持续发展, 特别是近 5 年, 每年的下挠量约为 2 cm。

### 2.2 2-D 湿度场分析

在 2-D 湿度场分析中, 箱梁与大气接触的干燥表面设置 convection 单元, 内部混凝土采用 conduction 单元。铺装及调平层的施加考虑了实际施工情况, 即当铺装及调平层施工前, 箱梁顶板为干燥边界, 而当铺装及调平层施工完成后, 铺装顶面成为新的干燥边界。对于根部截面铺装及调平层激活时间为 1 号节段浇筑后 300 d, 跨中截面处铺装及调平层激活时间为中跨合拢后 50 d。考虑到结构的对称性, 有限元模型取 1/2 箱梁宽度, 见图 3。

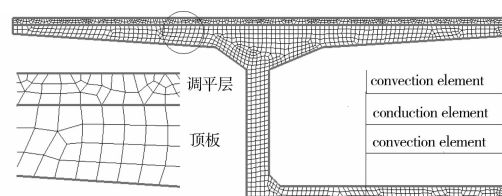


图 3 箱梁截面有限元网格

环境湿度取为当地年平均湿度 60%，施加到各干燥表面。分析中考虑了扩散系数随湿度变化的非线性因素，计算了从节段混凝土浇筑到干燥 6 000 d 的湿度变化情况。

分析结果表明，混凝土在干燥过程中，内湿度沿垂直干燥界面方向传递，距离边界越近，干燥速度越快。以顶板为例，在第 6 000 d 时承托与腹板交界处(厚度为 100 cm)孔隙相对湿度  $H=0.85$ ，而翼缘附近(厚度为 25 cm)孔隙相对湿度降低为 0.66，如图 4 所示。孔隙相对湿度沿板厚方向呈现非均匀分布。干燥期为 1 000 d 时，跨中截面底板干燥截面 5 cm 深度范围内，相对湿度相差 30%。对于顶板上缘，由于调平层及混凝土铺装层的存在，一方面封闭

了裸梁顶板上缘的干燥面；另一方面，新浇筑混凝土调平层内湿度向顶板扩散，一定程度上延缓了箱梁顶板上缘附近混凝土的干燥速度，如图 5(a)。

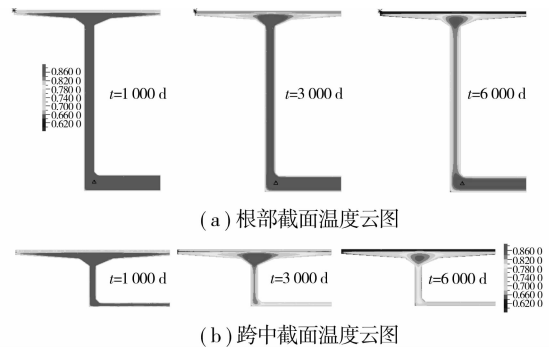


图 4 箱梁截面 1 000~6 000 d 湿度变化云图

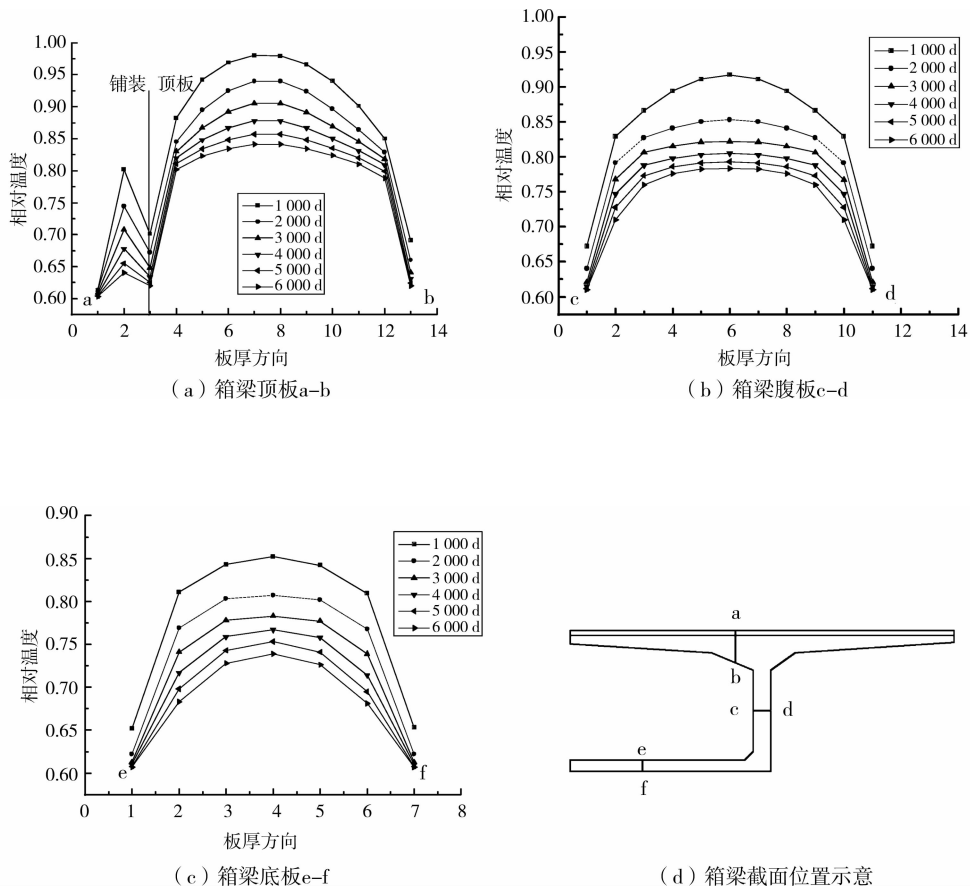


图 5 跨中截面箱梁各部位湿度分布

箱梁各部位的干燥速度随干燥时间的延长而逐渐减缓，前 1 000 d 内速度较快，2 000 d 后干燥速度逐渐变缓。另外干燥速度受结构厚度的影响显著，对于跨中截面，在干燥期 2 000 d 内，底板干燥速度远快于顶板，而 2 000 d 后，两者速度相近。对于根部截面，由于顶底板厚度差异较大，在干燥期

2 000 d 内，顶板干燥速度远快于底板，当顶板干燥速度显著降低后(3 000 d)，底板干燥速度仍呈匀速发展(见图 6)。由于箱梁截面各部位干燥速度存在差异，箱梁截面出现非均匀收缩，从而使上部结构主梁在发生轴向收缩变形的同时还产生挠曲变形。

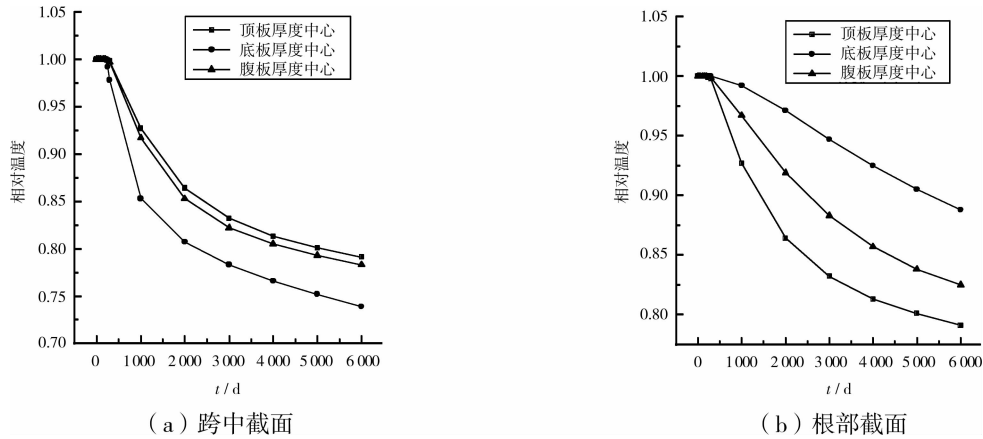


图 6 箱梁截面各部位厚度中心处湿度时程曲线

### 2.3 结构三维干缩变形分析

以湿度场分析结果为基础,通过式(5)建立耦合关系,并进行结构干缩变形分析。考虑到两主墩高差不大,故取半宽度、半跨径的 1/4 桥梁结构有限元分析模型,见图 7。

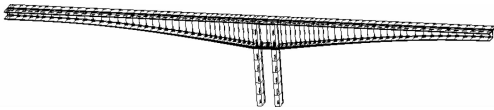


图 7 结构有限元网格

三维湿度场分析中,由于结构体系复杂及扩散系数的高度非线性,导致计算工作量过于庞大。为简化计算,模型中扩散系数近似取为常数。根据文献<sup>[12]</sup>的研究,扩散系数合理取值在可以满足计算精度要求的同时,极大的减少计算工作量。文中以二维非线性湿度场计算结果为基础,采用参数反演的方法确定扩散系数的合理取值,保证线性与非线性湿度场分析结果达到最佳逼近。三维湿度、变形分析中,主要参数取值见表 1。

表 1 材料参数取值

材料参数 $D/(m^2 \cdot d^{-1})$	$f/(m \cdot d^{-1})$	环境湿度 $H_e$	收缩系数 $\beta$	$E/(MPa)$
取值	1.12E-05	0.0003	0.6	1.20E+03
				3.45E+04

计算中分析比较了梁单元法、文献[4]法及考虑湿度扩散的计算方法。其中,梁单元法中,主梁采用梁单元建模,收缩模型采用《桥规》(JTGD62—2004);文献[4]法中,采用三维实体单元建模,分别计算顶、底板及腹板平均理论厚度,再定义各自的收缩模型参数。由于混凝土的收缩,边跨支点处主梁产生跨径方向收缩变形。三种方法中,采用本文方法计算的轴向收缩变形最大,较文献[4]法计算值大 1.7 cm(成桥后 6 000 d),而梁单元法最小,见图 8。

不难看出,对于薄壁箱梁结构,将箱梁各部位理论厚度进行算术平均的方法,轴向收缩变形明显偏小,而考虑箱梁各部位理论厚度差异后(文献[4]法),计算精度有所提高,但对于厚度突变处(如承托区域)仍存在误差。

连续刚构桥属于高次超静定结构,主梁轴向收缩及箱梁截面不均匀收缩均会引起跨中挠曲变形。通过比较三种计算方法的跨中截面挠曲变形发现,采用文献[4]方法计算的挠曲变形最小,为 1.7 cm(成桥后 6 000 d),而该文方法计算值为 4.97 cm,见图 9。其原因主要在于文献[4]方法将厚度变化剧烈的顶板进行平均,一定程度上夸大了顶板的收缩变形,进而使整个箱梁截面产生向上的挠曲变形趋势。

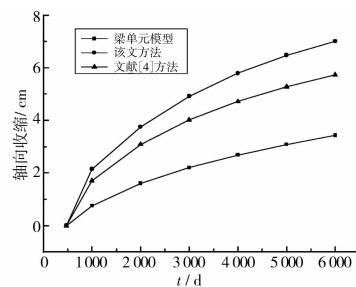


图 8 边跨支点处轴向收缩变形

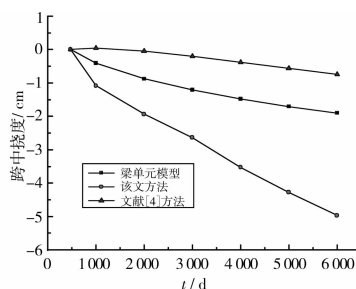


图 9 跨中截面处收缩下挠变形

导致预应力混凝土连续刚构桥后期下挠的原因包括混凝土的收缩徐变及预应力的长期损失等。按

目前常规计算方法,不考虑箱梁截面非均匀收缩效应时,成桥 6 000 d 后,跨中下挠累计值为 9.6 cm,而按该文方法考虑箱梁截面非均匀收缩效应后,跨中下挠累计值增大为 12.7 cm,见图 10。由于该桥运营 10 年后跨中下挠达到 31.7 cm,按该文方法考虑箱梁截面非均匀收缩后,计算值较常规方法有一定增加,但跨中变形量仍有较大差距。可以认为由于箱梁非均匀收缩是引起连续刚构桥后期下挠的主要原因之一。

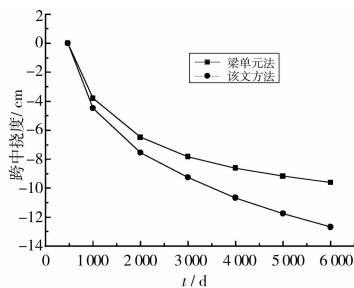


图 10 成桥后跨中截面处累计下挠

### 3 结 论

通过建立非线性湿度场有限元模型,分析了 PC 箱梁截面二维湿度场分布规律及时变特征,通过湿度场变形耦合条件,研究了连续刚构桥主梁干缩变形行为特点,具体结论如下:

1) 相对孔隙湿度沿板厚方向呈现非均匀分布,距离干燥边界越近,干燥速度越快。混凝土干燥速度受板厚度影响显著,板厚度越大,干燥速度越慢。

2) 调平层及混凝土铺装层封闭了裸梁顶板上缘的干燥面,同时新浇筑混凝土调平层内湿度向顶板扩散,一定程度上延缓了箱梁顶板上缘附近混凝土的干燥速度。

3) 通过对比分析发现,考虑箱梁截面非均匀收缩因素后,连续刚构桥主梁轴向收缩变形及主跨挠曲变形较常规方法计算值差异显著。可见,对于薄壁箱梁结构,对各部位板厚进行算术平均时计算收缩变形误差较大。

4) 对工程实例而言,考虑箱梁截面非均匀收缩因素后,成桥 6 000 d 时,跨中下挠累计值较常规方法增大 3.1 cm,可见对于大跨径薄壁箱梁桥,其截面非均匀收缩产生的挠曲变形不容忽视。

#### 参考文献:

[1] 楼庄鸿. 大跨径梁式桥的主要病害[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 84-87.  
LOU ZHUANG-HONG. Main faults in large span

beam bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 84-87.

[2] 谢峻, 王国亮, 郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 47-50.

XIE JUN, WANG GUO-LIANG, ZHENG XIAO-HUA. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(1): 47-50.

[3] VLADIMÍR KŘÍSTEK, ZDENĚK P. BAŽANT, MILOŠZICH. Box girder bridge deflections [J]. ACI concrete international, 2006, 28(1): 55-63.

[4] PETER F TAKACS. Deformations in concrete cantilever bridges observations and theoretical modeling [D]. Norway: The Norwegian University of Science and Technology, 2002.

[5] ZHEN LI, MIGUEL A. PEREZ LARA, J E BOLANDER. Restraining effects of fibers during non-uniform drying of cement composites [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 1643-1652.

[6] ZACHARY C. GRALSEY, DAVID A. LANGE, MATTHEW D. D'AMBROSIA. Internal relative humidity and drying stress gradients in concrete [J]. Materials and Structures, 2006, 39: 901-909.

[7] ROGER P. WEST, NIALL HOLMES. Predicting moisture movement during the drying of concrete floors using finite elements [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19: 674-681.

[8] H SADOUKI, J G M. VAN MIER. Simulation of hygral crack growth in concrete repair systems [J]. Materials and Structures, 1997, 30: 518-526.

[9] VIKTOR GRIBNIAK, GINTARIS KAKLAUSKAS, DARIUS BACINSKAS. Shrinkage in reinforced concrete structures: A computational aspect [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2008, 14(1): 49-60.

[10] YUN LEE, SEONG-TAE YI, MIN-SU KIM, JIN-KEUN KIM. Evaluation of a basic creep model with respect to autogenous shrinkage [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 1268-1278.

[11] HYO-GYOUNG KWAK, SOO-JUN HA, JIN-KWUN KIM. Non-structural cracking in RC walls Part I. Finite element formulation [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 749-760.

(下转第 97 页)

- comfort conditions in Spanish office buildings with passive climate control[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3):502-508.
- [5] PEDER WOLKOFF. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(14):2659-2668.
- [6] GANT S E, KELSEY A. Factors influencing the indoor transport of contaminants and modeling implications[R]. Health & Safety Laboratory, 2006.
- [7] KEMPERS L J T M. A comprehensive thermodynamic theory of the cross-effect in isothermal diffusion in a multicomponent gas, liquid or solid [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2001, 115(14):6342-6350.
- [8] LHOST O, PLATTEN J K. Large-scale convection induced by soret effect[J]. *Physical Review A*, 1989, 40(11):6415-6418.
- [9] ILYA I, RYZHKOV. On the cross-diffusion and soret effect in multicomponent mixtures [J]. *Microgravity Sci Technol*, 2008, 10:1007.
- [10] PEDER WOLKOFF, SOREN K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality[J]. *Environment International*, 2007, 33(6):850-857.
- [11] TARGO KALAMEES, MINNA KORPI, et al. The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finnish detached houses[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(8):1643-1650.
- [12] WU CHENG CHIH, GRACE W M, et al. Fluence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1):245-253.
- [13] JORGENSEN R B. Sorption of VOCs on material surfaces as the deciding factor when choosing a ventilation strategy [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(5):1913-1920.
- [14] LIN CHI CHI, YU KUO PIN, et al. Evaluation of impact factors on VOC emissions and concentrations from wooden flooring based on chamber tests [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3):525-533.
- [15] SEO JANGHOO, SHINSUKE KATO, et al. Performance test for evaluating the reduction of VOCs in rooms and evaluating the lifetime of sorptive building materials[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(1):207-215.

(编辑 胡 玲)

(上接第 65 页)

- [12] MEHRAN KHOSHBAKHT, MARKW LIN, JUSTIN B BERMAN. Analysis of moisture-induced stresses in an FRP composites reinforced masonry structure [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2006, 42: 414-429.
- [13] 朱岳明,刘有志,曹为民,等. 混凝土湿度和干缩变形及应力特性的细观模型分析[J]. *水利学报*, 2006, 36(10): 1163-1168.
- ZHU YUE-MING, LIU YOU-ZHI, CAO WEI-MIN, et al. Analysis of concrete moisture dry shrinkage and stress based on mesoscopical model[J]. *ShuiLi XueBao*, 2006, 36(10):1163-1168.
- [14] JIN-KEUN KIM, CHIL-SUNG LEE. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29:1921-1927.
- [15] 许华胜,蒋正武. 高性能混凝土中自身相对湿度变化与自收缩的研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2004 26(2): 121-125.
- XU HUA-SHENG, JIANG ZHENG-WU. Study on autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance concrete [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2004, 26(2):121-125.

(编辑 胡 玲)