

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.127



# 收缩徐变对装配式混凝土叠合梁挠度的影响

唐迪未<sup>1</sup>, 金伟良<sup>1</sup>, 毛江鸿<sup>2</sup>, 赵羽习<sup>1</sup>, 方言<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310012; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:**收缩徐变作用导致混凝土叠合梁挠度增加, 从而影响构件的力学性能。为了研究收缩徐变作用下混凝土叠合梁挠度增加规律, 建立了收缩徐变作用下混凝土叠合梁挠度计算方法, 与数值模拟进行比较, 结果相近。运用该方法对混凝土叠合梁的加载龄期、应力水平进行敏感性分析, 结果表明: 应力水平不同时, 混凝土叠合梁挠度随加载龄期呈现不同变化趋势, 应力水平较低时, 挠度随加载龄期增大而增大, 反之, 挠度随加载龄期增大而减小; 混凝土叠合梁叠合面处的徐变微差相对收缩微差较小, 叠合面处预制和现浇混凝土变形不一致引起的挠度主要由收缩不一致引起。

**关键词:**装配式叠合梁; 收缩徐变; 挠度; 数值模拟; 敏感性分析

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)06-0127-08

## Influence of shrinkage and creep on deflections of assembled concrete composite beams

Tang Diwei<sup>1</sup>, Jin Weiliang<sup>1</sup>, Mao Jianghong<sup>2</sup>, Zhao Yuxi<sup>1</sup>, Fang Yan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310012, P. R. China;

2. Zhejiang University Ningbo Institute of Technology, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** Shrinkage and creep may increase the deflection of concrete composite beams and therefore affect the mechanical properties of components. In order to investigate the increase pattern of the deflection of concrete composite beams under action of shrinkage and creep, a calculation method for the deflection of concrete composite beams induced by shrinkage and creep was established. The comparison between the proposed method and numerical simulation indicates that the results obtained by the two methods are consistent. Based on this method, the sensitivity of loading age and stress level of concrete composite beams was analyzed. The results show that the deflection of concrete composite beams varies with the loading age when the stress level is different. When the stress level is low, the deflection increases with the

收稿日期: 2019-05-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701400); 国家自然科学基金(51820105012); 宁波市自然科学基金(2017A310313)

作者简介: 唐迪未(1992-), 男, 主要从事混凝土结构收缩徐变研究, E-mail: 21612035@zju.edu.cn.

毛江鸿(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: jhmao@nit.zju.edu.cn.

Received: 2019-05-18

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0701400); National Natural Science Foundation of China (No. 51820105012); Natural Science Foundation of Ningbo (No. 2017A310313)

**Author brief:** Tang Diwei (1992-), main research interests: shrinkage and creep of concrete structures, E-mail: 21612035@zju.edu.cn.

Mao Jianghong (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: jhmao@nit.zju.edu.cn.

loading age, whereas the deflection declines with the rising of loading age. Differential creep at the overlap surface of concrete composite beams is much smaller than the differential shrinkage, and the deflection caused by the difference of the precast concrete and cast-in-place concrete at the overlap surface is mainly caused by difference of shrinkage.

**Keywords:** assembled composite beams; shrinkage and creep; deflection; numerical simulation; sensitivity analysis

装配式混凝土结构是指预制混凝土构件通过可靠的连接方式装配而成的混凝土结构<sup>[1]</sup>,具有提高工程质量、减少现场施工作业、减少环境污染等优点<sup>[2]</sup>。混凝土叠合梁是装配式混凝土结构中的主要构件形式,是预制混凝土梁顶部在现场后浇混凝土而形成的整体受弯构件<sup>[1]</sup>。混凝土叠合梁中现浇和预制混凝土的龄期和强度存在差异,会在现浇和预制混凝土之间存在收缩徐变微差<sup>[3]</sup>。收缩徐变微差会造成现浇和预制混凝土之间有微差应力并进一步增大混凝土叠合梁的挠度,从而影响构件的力学性能。

上述现象的本质是不同材料随时间产生不同应变,导致构件的应力重分布与变形,该问题在钢-混组合梁结构已有较为深入的研究。在钢-混组合梁结构领域中,钢梁不发生收缩徐变作用,从而限制了混凝土的收缩徐变,造成两者之间存在收缩徐变微差。目前,主要采用有限单元法<sup>[4-5]</sup>、试验研究<sup>[6]</sup>与数值模拟<sup>[7]</sup>研究这方面的现象。Si等<sup>[8]</sup>提出了有效单步单元法分析钢-混组合梁的长期性能,并通过数值研究表明收缩徐变作用会导致变形增加与应力重分布,尤其是在界面处。Gilbert<sup>[9]</sup>研究表明在徐变作用下,未开裂时钢-混叠合板增加的挠度与初始挠度的比值比开裂时更大。Erkmen等<sup>[7]</sup>建立了分步数值解法,并通过算例表明梁的初始曲率对组合梁的时变变形有显著影响。樊健生等<sup>[10-11]</sup>建立了考虑混凝土收缩、徐变以及开裂影响的组合梁长期效应计算模型,并通过研究发现对于承受负弯矩作用的组合梁,混凝土翼板开裂会导致截面刚度降低,挠度增大,同时,使得混凝土应力释放而降低徐变效应的影响。

目前,收缩徐变作用对装配式混凝土叠合梁的影响方面已有相关研究。陈小根<sup>[3]</sup>用平均曲率法推导了收缩徐变微差应力应变的公式,比较了组合截面法、分离截面法与平均曲率法,证明了3种计算方法在实质上相同且计算结果一致,但平均曲率法形

式简单,截面特征的影响比较清楚。之后,陈小根<sup>[12]</sup>提出了时变作用下考虑混凝土有效变形模量的微差应力-应变计算实用公式,并估计了收缩徐变微差极限值。杨维国等<sup>[13]</sup>通过在混凝土结构设计的经典计算公式中引入截面协同工作系数来体现收缩徐变的影响。王文炜等<sup>[14]</sup>进行了预应力作用下新老混凝土组合梁混凝土收缩徐变的试验研究,结果表明,预应力混凝土叠合梁界面间的滑移较小,界面间的粘结可靠,预应力混凝土叠合梁的挠度、沿梁高的混凝土应变、截面曲率及界面间的应变差随着时间的增长逐渐增大。

综上所述,收缩徐变作用下装配式混凝土叠合梁挠度的计算以有限单元法和求解微分方程组为主,其计算过程复杂,不便应用。本文基于平均曲率法<sup>[3]</sup>建立了装配式混凝土叠合梁挠度计算方法,将该方法与数值模拟进行了比较,并结合工程应用分析了预制混凝土加载龄期、叠合面处应力水平对挠度的影响规律。

## 1 考虑收缩徐变作用的混凝土叠合梁挠度计算方法

### 1.1 基本假定

混凝土叠合梁常用截面形式如图1所示。中国相关规范<sup>[15]</sup>中考虑长期作用对挠度增大的影响时推荐了欧洲CEB-FIP<sup>[16]</sup>、美国ACI<sup>[17]</sup>等规范推荐的计算方法,在装配式混凝土叠合梁的挠度计算和有限元分析时,采用CEB-FIP MC90模型,并引入如下假定:

1)在正常使用条件下,混凝土叠合梁挠度分析时混凝土应力-应变关系处于弹性工作阶段。

2)钢筋混凝土构件是由钢筋和混凝土两种材料组成,将钢筋换算为等效混凝土,换算时钢筋的重心位置与换算后等效混凝土的重心位置一致,换算后的受力效果不变。

3)由于叠合梁的翼缘刚度相对腹板刚度较小,

翼缘处预制和现浇混凝土之间的收缩徐变微差对梁的挠度影响较小,忽略其影响,将翼缘预制混凝土等效代换为现浇混凝土。

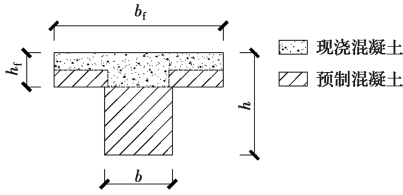


图 1 叠合梁截面形式

Fig. 1 Composite beam cross section

### 1.2 挠度组成

在收缩徐变的作用下混凝土叠合梁挠度会随着时间而增加,其挠度可表示为

$$w = w_0 + w_1 + w_2 \quad (1)$$

式中:  $w_0$  是加荷瞬间叠合梁的初始挠度,即没有收缩徐变作用下的挠度;  $w_1$  是初始挠度在徐变作用下增加的挠度,如图 2 所示;  $w_2$  是预制和现浇混凝土叠合面处的收缩徐变微差而引起的挠度,如图 3 所示。

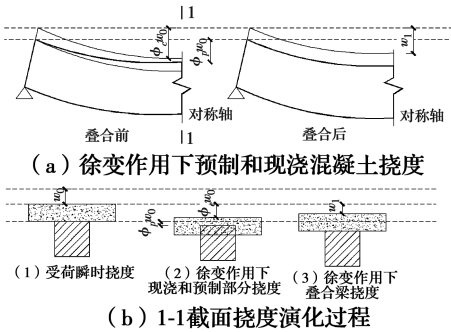


图 2 徐变作用下预制和现浇混凝土的挠度演化过程

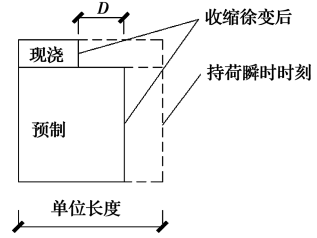
Fig. 2 Deflection evolution process of precast and cast-in-place concrete under the action of creep

### 1.3 徐变作用下荷载挠度的变化值

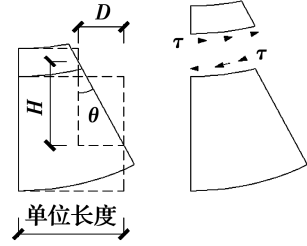
荷载作用下混凝土叠合梁会产生初始挠度  $w_0$ , 徐变作用下该挠度会增加,挠度演化过程如图 2 所示,叠合前,预制混凝土产生挠度值为  $\phi_p w_0$ , 现浇混凝土产生挠度值为  $\phi_c w_0$ , 当预制和现浇混凝土叠合后,两者共同变形产生挠度  $w_1$ 。由于抗弯刚度越大,变形越小,预制和现浇混凝土叠合时各自产生的变形量与抗弯刚度成反比,因此,叠合时预制混凝土产生如式(2)所示变形。

$$w_p = \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} (\phi_c - \phi_p) w_0 \quad (2)$$

预制混凝土叠合时产生的变形  $w_p$  加上  $\phi_p w_0$



(a) 收缩徐变微差  $D$



(b) 收缩徐变微差引起的曲率  $\theta$

图 3 收缩徐变微差及其引起的曲率

Fig. 3 Differential shrinkage and creep and the curvature caused by it

即得混凝土叠合梁的初始挠度在徐变作用下增加的挠度  $w_1$ 。

$$w_1 = \left( \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \phi_p + \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \phi_c \right) w_0 \quad (3)$$

式中:  $\phi_p$  为预制混凝土的徐变系数;  $\phi_c$  表示现浇混凝土徐变系数;  $E_1 I_1$  表示等效代换后现浇混凝土的抗弯刚度;  $E_2 I_2$  表示等效代换后预制混凝土的抗弯刚度。

### 1.4 收缩徐变微差引起的挠度

收缩徐变微差的定义如图 3 所示,预制混凝土和现浇混凝土持荷时会在叠合面处产生相同变形,由于预制和现浇混凝土的混凝土强度等级和加载龄期不同,产生的收缩徐变应变不同,其差值为收缩徐变微差  $D$ 。

沿梁长取一单位长度微段如图 3 所示,由于现浇和预制混凝土之间存在收缩徐变微差  $D$ ,为了满足变形协调条件,在叠合面处会产生剪应力,并在横截面之间会产生一微小角度  $\theta$ ,  $\theta$  即为该单位微段的曲率。依据材料力学中梁的挠度和跨中曲率的关系,  $D$  引起的挠度与混凝土叠合梁跨中处  $\theta$  的关系为

$$w_2 = (\alpha \theta_c + 0.125 \theta_s) L^2 \quad (4)$$

$$\theta_c = D_c / H \quad (5)$$

$$\theta_s = D_s / H \quad (6)$$

$$D_c = (\phi_{cc}(t) - \phi_{pc}(t)) \epsilon_0 \quad (7)$$

$$D_s = (\epsilon_{csh}(t) - \epsilon_{csh}(t_0)) - (\epsilon_{psh}(t) - \epsilon_{psh}(t_0)) \quad (8)$$

式中: $\theta_c$ 为跨中截面处徐变微差引起的曲率; $\alpha$ 与荷载形式相关,三分点加载时 $\alpha$ 为23/216; $\theta_s$ 为跨中截面处收缩微差引起的曲率; $D_c$ 为跨中截面徐变微差; $D_s$ 为跨中截面收缩微差; $H$ 为预制混凝土和现浇混凝土微差应力中性轴之间距离,可通过平均曲率法<sup>[3]</sup>计算; $L$ 为跨度; $\varphi_{cc}(t)$ 为计算时刻现浇混凝土徐变系数; $\varphi_{pc}(t)$ 为计算时刻预制混凝土徐变系数; $\epsilon_0$ 为跨中叠合面处初始应变; $\epsilon_{csh}(t)$ 为计算时刻现浇混凝土收缩应变; $\epsilon_{psh}(t)$ 为加载时刻现浇混凝土收缩应变; $\epsilon_{psh}(t_0)$ 为计算时刻预制混凝土收缩应变,为加载时刻预制混凝土收缩应变。

## 2 考虑收缩徐变作用的混凝土叠合梁挠度数值模拟

### 2.1 数值模拟

用 ANSYS 15.0 进行数值模拟,徐变模拟以用户子程序 usercreep 二次开发<sup>[18]</sup>的方式将混凝土徐变本构模型引入 ANSYS,该方法可以计算每一个时间步内徐变导致的应力-应变重分布以及应力-应变重分布后产生的徐变应变,流程如图 4 所示,徐变应变更新公式为

$$\Delta\epsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)}{E} \cdot \Delta\varphi(t) \quad (9)$$

式中: $\Delta\epsilon_c(t)$ 为徐变应变增量; $\Delta\varphi(t)$ 为徐变系数增量。混凝土徐变本构模型编程时采用向前差分法<sup>[19]</sup>逼近徐变本构曲线,湿度取 65%,根据图 5 所示梁截面尺寸 C35 混凝土翼板处构件理论厚度取 113.33 mm, C30 混凝土翼缘处构件理论厚度取 80 mm,腹板处构件理论厚度取 133.33 mm。

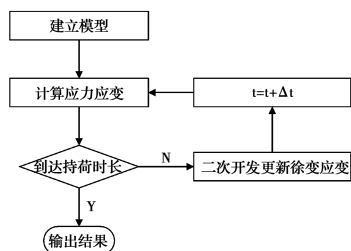


图 4 二次开发流程图

Fig. 4 Secondary development flow chart

收缩应变模拟时用温度应变来等效,采用温度和混凝土线膨胀系数共同随时间变化的方法。整个混凝土叠合梁区域设置与时间成正比关系的温度场,每一个温度点的线膨胀系数值采用式(10)计算

$$\alpha(t) = \frac{\epsilon_{sh}(t_0) - \epsilon_{sh}(t)}{T} \quad (10)$$

式中: $\epsilon_{sh}(t_0)$ 为加载时刻的收缩应变; $\epsilon_{sh}(t)$ 为计算时刻的收缩应变; $T$ 表示温度。只要温度点取得足够密,即可模拟出混凝土随时间收缩的过程。

梁截面尺寸与配筋如图 5 所示,保护层厚度 25 mm,梁长 2 000 mm,采用三分点加载,三分点处荷载各为 10 kN,三分点间距 600 mm,采用 solid 186 单元模拟混凝土,link 8 单元模拟钢筋,两种混凝土之间不产生滑移,钢筋和混凝土之间不产生滑移,混凝土容重为 24 kN/mm<sup>3</sup>,在梁底距离端部 100 mm 的支座处采用线约束,一端为固定铰支座,一端为滑动铰支座,梁采用映射网格,梁和钢筋的网格宽度均为 5 mm。有限元模型如图 6 所示,模拟所得应力云图如图 7 所示。

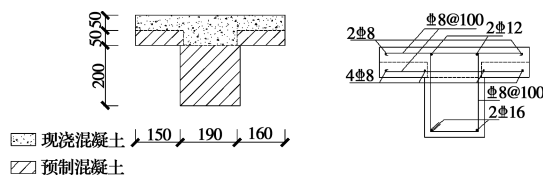


图 5 叠合梁截面尺寸与配筋

Fig. 5 Section size and reinforcement of composite beams

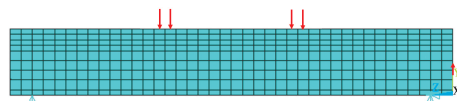


图 6 混凝土叠合梁支座和荷载布置图

Fig. 6 Supports and load arrangement of concrete composite beams

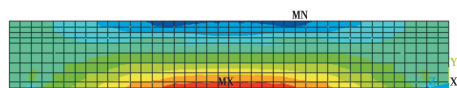


图 7 混凝土叠合梁模拟应力图

Fig. 7 Simulation stress of concrete composite beams

### 2.2 数值模拟和理论计算的对比

用式(11)计算的徐变挠度系数进行结果对比。

$$\varphi = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (11)$$

采用平均曲率法计算式(11)中各系数,混凝土叠合梁的截面特征参数如表 1 所示。

表 1 混凝土叠合梁截面特征参数

Table 1 Characteristic parameters of cross section of concrete composite beams

$h_f/\text{mm}$	$A_1/\text{mm}^2$	$I_1/10^6\text{mm}^4$	$h/\text{mm}$	$A_2/\text{mm}^2$	$I_2/10^6\text{mm}^4$	$H/\text{mm}$
100	52061	42.78	300	42 278	145.46	206

代入式(3)和式(4),得

$$w_1 = (0.764\varphi_p + 0.236\varphi_c)w_0 \quad (12)$$

$$w_2 = (23\theta_c/2156 + 0.125\theta_s)L^2 \quad (13)$$

现浇和预制混凝土的加载龄期设置如下:现浇混凝土的加载龄期为 28 d,考虑到预制混凝土比现浇混凝土至少提前浇筑一个月,由于施工现场进度的不确定性,预制混凝土加载龄期分别取 68、98、128、158 d。计算结果和数值模拟结果的对比如图 8 所示。持载 365 d 时,预制混凝土加载龄期为 68、98、128、158 d 时,计算值和模拟值的误差分别为 1%、7%、10%、13%,与模拟值相比,计算值偏大,且误差随着预制混凝土加载龄期的增大而增大,这是因为数值模拟时钢筋对混凝土徐变应变的约束作用使变形减小,而理论计算时,假设式(2)中把钢筋等效换算为混凝土时会忽略钢筋对混凝土徐变应变的约束作用。

通过理论计算与数值模拟的对比发现,计算值比模拟值偏大,但对于工程应用而言,其差值在允许范围内且偏安全,此外,对于工程应用而言,理论计算方法更为简单方便。下面研究收缩徐变作用下混凝土叠合梁挠度计算方法的工程应用。

### 3 工程应用研究

基于计算公式分析预制混凝土加载龄期、预制混凝土跨中叠合面处截面初始应力对装配式混凝土叠合梁挠度的影响规律,为便于称呼,将预制混凝土跨中叠合面处截面初始应力称为叠合面处设计应力。算例叠合梁的基本参数与上文相同。

#### 3.1 预制混凝土加载龄期、叠合面处设计应力对收缩微差和徐变微差的影响分析

改变预制混凝土的加载龄期,根据式(7)、式(8)计算现浇和预制混凝土的徐变微差和收缩微差,结果如图 9 所示。图 9 (a)、(b)中表明徐变微差和收缩微差都会随着预制混凝土加载龄期的增大而增大,但收缩微差的值比徐变微差大一个量级。同时改变预制混凝土加载龄期和叠合面处设计应力,如图 9 (c)所示,收缩微差不随叠合面处设计应力变化,徐变微差随着叠合面处设计应力的增大而增大,且徐变微差相对收缩微差较小。在弹性工作阶段,混凝土叠合梁叠合面处应力不会大于预制混凝土的开裂应力,预制混凝土加载龄期 365 d 且持荷 365 d 时,收缩微差与徐变微差基本达到最大值,所以,图 9 包含了混凝土叠合梁叠合面处设计应力、徐变微

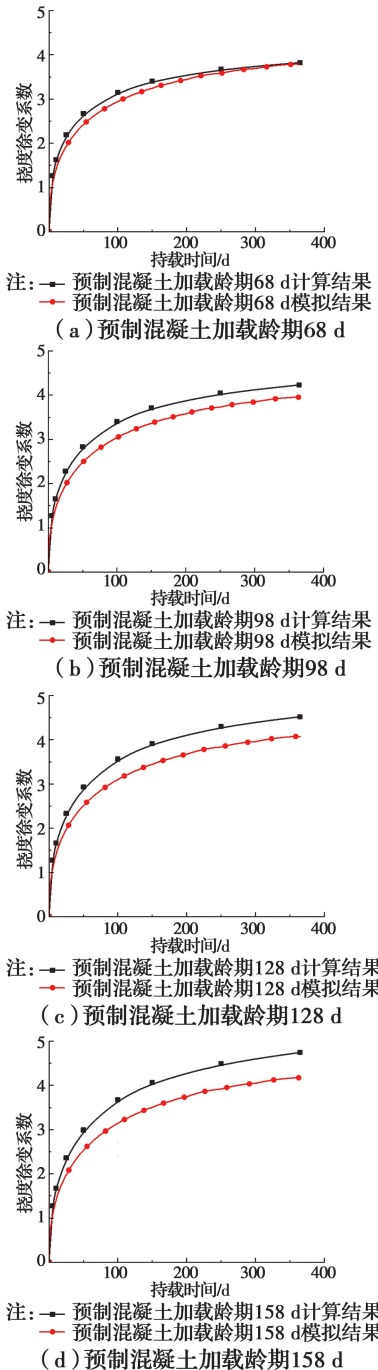


图 8 计算结果与模拟结果对比图

Fig. 8 Comparisons between calculated results and simulated results

差与收缩微差的基本情况。其中,徐变微差与收缩微差的最大比值为 0.183,表明徐变微差相对收缩微差较小,当跨中叠合面处设计应力很小时,混凝土叠合梁挠度计算时可以忽略徐变微差的影响。

#### 3.2 预制混凝土加载龄期和叠合面处设计应力对挠度的影响分析

由图 8 可知,计算结果和模拟结果中叠合梁的徐变系数都随着预制混凝土加载龄期的增大而增

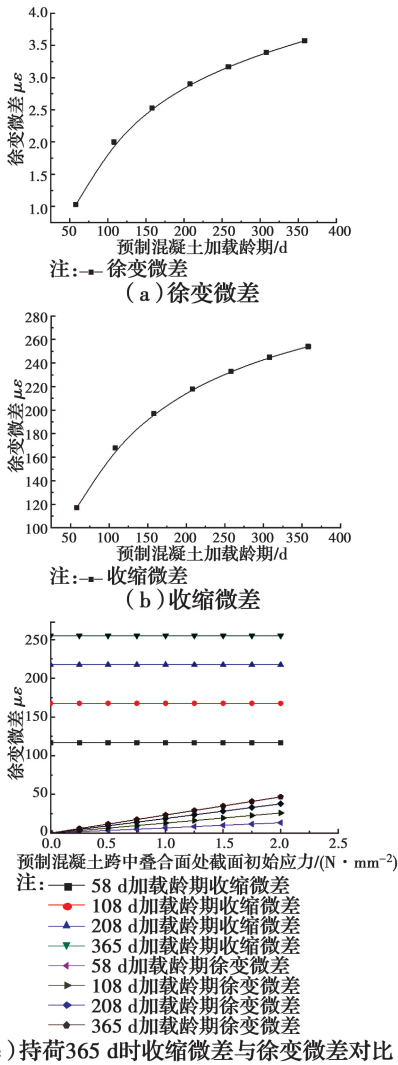


图9 收缩微差与徐变微差的对比  
Fig. 9 Comparison of differential shrinkage and differential creep

大。基于装配式混凝土叠合梁挠度计算方法,对加载龄期与叠合面处设计应力进行敏感性分析。令现浇混凝土加载龄期不变,改变预制混凝土加载龄期和叠合面处设计应力,结果如图10所示。 $\sigma_0$ 为表1情况下叠合面处设计应力, $\sigma$ 为不同荷载下叠合面处设计应力。图10(a)~(c)中 $w_1$ 随着预制混凝土加载龄期的增大而减小,这是因为 $\psi_c$ 随着预制混凝土加载龄期的增大而减小,而现浇混凝土加载龄期不变 $\varphi_p$ 不变; $w_2$ 随着预制混凝土加载龄期的增大而增大,这是因为 $D$ 会随着预制和现浇混凝土加载龄期差值的增大而增大。图10(a)中, $w_1$ 与 $w_2$ 之和随着预制混凝土加载龄期的增大而增大,图10(b)中, $w_1$ 与 $w_2$ 之和几乎不随预制混凝土加载龄期变化,图10(c)中, $w_1$ 与 $w_2$ 之和随着预制混凝土加

载龄期的增大而减小,这是因为混凝土叠合梁初始挠度在徐变作用下增加的挠度 $w_1$ 受应力影响大,收缩徐变微差引起的挠度 $w_2$ 受应力影响小,所以,在不同应力水平下,挠度随加载龄期变化呈现不同趋势。

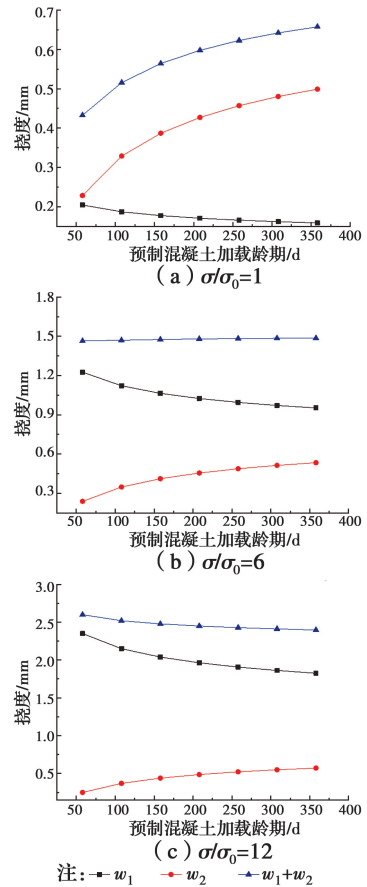


图10 持载365 d时预制混凝土不同加载龄期下的挠度  
Fig. 10 Deflection under different loading age of precast concrete age at 365 days

预制混凝土加载龄期为58、358 d时的 $w_1$ 不相同,令其差值为 $\Delta w_1$ ,同理,预制混凝土加载龄期为58、358 d时的 $w_2$ 不相同,令其差值的为 $\Delta w_2$ ,不同应力水平下 $\Delta w_1$ 和 $\Delta w_2$ 的关系如图11所示。 $\Delta w_1$ 随加载龄期增大而减小, $\Delta w_2$ 几乎不随加载龄期变化;当 $\sigma/\sigma_0$ 小于6.25时, $\Delta w_2$ 的影响更大,当 $\sigma/\sigma_0$ 大于6.25时, $\Delta w_1$ 的影响更大,说明当 $\sigma/\sigma_0$ 小于6.25时,挠度随加载龄期增大而增大,当 $\sigma/\sigma_0$ 大于6.25时,挠度随加载龄期增大而减小。

将应力水平、预制混凝土加载龄期与挠度增加值 $w_1+w_2$ 的关系绘制成表2,表中规律与图11一致。工程应用时,可计算不同应力下挠度增加值与预制混凝土加载龄期的关系,在装配式结构施工时,

选择合适的装配时机以减小收缩徐变微差对挠度的影响。

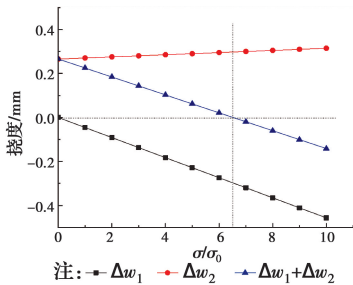


图 11 不同应力水平下的挠度变化

Fig. 11 Change of deflection at different stress levels

表 2 应力水平与预制混凝土加载龄期不同时  $w_1 + w_2$  值对照表

Table 2 Contrast table of values under different stress levels and precast concrete loading age mm

应力( $\sigma/\sigma_0$ )	加载龄期/d						
	58	108	158	208	258	308	358
0	0.23	0.32	0.38	0.42	0.45	0.47	0.49
1	0.43	0.52	0.56	0.60	0.62	0.64	0.66
2	0.64	0.71	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82
3	0.84	0.90	0.93	0.95	0.96	0.98	0.99
4	1.05	1.09	1.11	1.12	1.14	1.14	1.15
5	1.26	1.28	1.29	1.30	1.31	1.31	1.32
6	1.46	1.47	1.47	1.47	1.48	1.48	1.48
7	1.67	1.66	1.65	1.65	1.65	1.65	1.64
8	1.87	1.85	1.83	1.83	1.82	1.81	1.81
9	2.08	2.04	2.02	2.00	1.99	1.98	1.97
10	2.29	2.23	2.20	2.18	2.16	2.15	2.14

## 4 结论

1) 基于平均曲率法分析收缩徐变微差的影响, 提出了考虑收缩徐变作用的装配式混凝土叠合梁挠度计算方法。将收缩徐变作用下混凝土叠合梁挠度的理论计算结果和模拟结果进行对比, 表明理论计算比数值模拟的结果略大, 但在允许范围内且偏安全, 且理论计算方法更加简单方便, 较适合于工程应用。

2) 混凝土叠合梁中徐变微差相对收缩微差较小, 收缩徐变微差引起的挠度主要由收缩作用引起, 当叠合面处设计应力很小时, 为简化计算可以忽略徐变微差的影响。

3) 通过敏感性分析发现, 不同应力水平下混凝土

叠合梁挠度随加载龄期变化呈现不同趋势, 应力水平较低时, 混凝土叠合梁挠度随预制混凝土加载龄期的增大而增大, 反之, 挠度随加载龄期的增大而减小。

## 参考文献:

[1] 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
 Technical standard for assembled buildings with concrete structure: GB/T 51231-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[2] 王俊, 赵基达, 胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报, 2016(5): 1-8.  
 WANG J, ZHAO J D, HU Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016(5): 1-8. (in Chinese)

[3] 陈小根. 简支矩形予应力混凝土迭合梁收缩徐变微差试验研究[J]. 武汉建材学院学报, 1981(4): 55-84.  
 CHEN X G. An Experimental research on the differential shrinkage and creep of simply supported rectangular prestressed concrete composite beams[J]. Journal of Wuhan Building Materials College, 1981(4): 55-84. (in Chinese)

[4] AYOUB A. A force-based model for composite steel-concrete beams with partial interaction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(3): 387-414.

[5] ČAS B, SAJE M, PLANINC I. Non-linear finite element analysis of composite planar frames with an interlayer slip [J]. Computers & Structures, 2004, 82: 1901-1912.

[6] LIU X, BRADFORD M A, CHEN Q, et al. Finite element modelling of steel-concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2016, 108: 54-65.

[7] ERKMEN R E, BRADFORD M A. Time-dependent creep and shrinkage analysis of composite beams curved in-plan [J]. Computers & Structures, 2011, 89(1/2): 67-77.

[8] SI X T, AU F T K. An efficient method for time-dependent analysis of composite beams [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1863-1870.

[9] GILBERT R I. Time-dependent stiffness of cracked reinforced and composite concrete slabs [J]. Procedia

- Engineering, 2013, 57: 19-34.
- [10] 樊健生, 聂建国, 王浩. 考虑收缩、徐变及开裂影响的组合梁长期受力性能研究(I)——试验及计算[J]. 土木工程学报, 2009(3): 8-15.  
FAN J S, NIE J G, WANG H. Long-term behavior of composite beams with shrinkage, creep and cracking (I): experiment and calculation[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(3): 8-15. (in Chinese)
- [11] 樊健生, 聂鑫, 李全旺. 考虑收缩、徐变及开裂影响的组合梁长期受力性能研究(II)——理论分析[J]. 土木工程学报, 2009(3): 16-22.  
FAN J S, NIE X, LI Q W. Long-term behavior of composite beams with shrinkage, creep and cracking (II): theoretical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(3): 16-22. (in Chinese)
- [12] 陈小根. 装配整体预应力结构收缩徐变微差问题探讨[J]. 工业建筑, 1984(6): 36-42.  
CHEN X G. Discussion on the differential shrinkage and creep of the whole prestressing assembly structure [J]. Industrial Construction, 1984(6): 36-42. (in Chinese)
- [13] 杨维国, 许红叶. 考虑收缩徐变影响的新旧混凝土叠合梁非线性分析实用方法[J]. 力学与实践, 2017(4): 379-383.  
YANG W G, XU Y H. Practical nonlinear analysis method of new-old concrete composite beams with shrinkage and creep[J]. Mechanics in Engineering, 2017(4): 379-383. (in Chinese)
- [14] 王文炜, 翁昌年, 杨威. 新老混凝土组合梁混凝土收缩徐变试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008(3): 505-510.  
WANG W W, WEN C N, YANG W. Experimental study on creep and shrinkage of old and new concrete composite beams[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008(3): 505-510. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for design of concrete structures; GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [16] Model code for concrete structures;CEB-FIP-1990[S]. London:Thomas Telford,1990.
- [17] Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures; ACI 209R-1992 [S]. Detroit: American Concrete Institute, 1992.
- [18] 师访. ANSYS 二次开发及应用实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.  
SHI F. ANSYS secondary development and application example [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [19] 陆春阳, 苏庆田, 黄生富. 有限元计算中混凝土徐变应力分析方法比较[C]//第18届全国结构工程学术会议论文集1册, 广州, 2009.  
LU C Y, SU Q T, HUANG S F. Comparison of concrete creep analysis methods In FEM simulation[C]// The 18<sup>th</sup> National Conference on Structural Engineering (Volume 1). Guangzhou, 2009. (in Chinese)

(编辑 胡玲)