

# 长期荷载作用下钢-混凝土组合梁设计方法

王庆贺<sup>1</sup>,戴蕊宏<sup>1</sup>,王仕奇<sup>2</sup>,杜威<sup>3</sup>,尤广迪<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 3. 中建铁路投资建设集团有限公司, 北京 100855)

**摘要** 目的 分析翼板混凝土时效变形对钢-混凝土组合梁长期性能的影响, 提出相应的设计方法, 供工程应用参考。方法 结合已有的试验数据, 对现行规范中组合梁长期性能设计方法进行适用性评估; 在此基础上, 充分考虑混凝土收缩、徐变、开裂及组合梁界面滑移等多方面因素的综合影响, 提出并验证单跨与两跨钢-混凝土组合梁长期性能的计算方法。结果 提出的组合梁长期性能设计方法可有效预测单跨组合梁的长期跨中挠度和两跨组合梁的长期中支座负弯矩及跨中挠度, 采用随龄期调整的有效模量法得到的长期跨中挠度预测值与试验值比为 0.976, 预测值与试验值最大相差 16.5%, 而采用规范建议值得到的组合梁预测值与试验值比为 0.782。结论 多跨连续组合梁长期性能受到负弯矩作用范围的影响显著, 提出的计算方法适用于单跨和两跨钢-混凝土组合梁长期性能预测, 该方法能够显著提升预测精度。

**关键词** 组合梁; 收缩徐变; 跨中挠度; 设计方法

中图分类号 TU398.9

文献标志码 A

**引用格式:**王庆贺,戴蕊宏,王仕奇,等. 长期荷载作用下钢-混凝土组合梁设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 276-283. (WANG Qinghe, DAI Ruihong, WANG Shiqi, et al. Design methods of steel-concrete composite beams under long-term loading[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 276-283.)

## Design Methods of Steel-concrete Composite Beams under Long-term Loading

WANG Qinghe<sup>1</sup>, DAI Ruihong<sup>1</sup>, WANG Shiqi<sup>2</sup>, DU Wei<sup>3</sup>, YOU Guangdi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058; 3. China State Railway Investment Construction Group Co. Ltd., Beijing, China, 100855)

**Abstract:** To quantify the influence of aging deformation of concrete on the long-term behavior of steel-concrete composite beams and to propose their design methods, providing a reference for

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808351); 辽宁省教育厅科研计划项目(Injc202007); 沈阳市中青年科技人才项目(RC200143); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019-K-054)

作者简介: 王庆贺(1987—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事混凝土材料长期性能等方面研究。

engineering applications. Based on existing experimental data, evaluate the applicability of the long-term performance design method for composite beams in current specifications. On this basis, fully considering the comprehensive effects of various factors such as concrete shrinkage, creep, cracking, and interface sliding of composite beams, the calculation method of the long-term behavior of simply-supported and double-span steel-concrete composite beams was proposed and verified. The results indicated that the proposed long-term performance design method for composite beams can effectively predict the long-term mid-span deflection of simply-supported composite beams, long-term hogging moment, and mid-span deflections of double-span composite beams. The long-term deflection prediction value obtained by using the aging range of negative bending moment is 0.976 compared to the experimental value, with the maximum error between the predicted and test results of 16.5%. However, the ratio of the long-term predicted value and the test value of the composite beam obtained by the standard recommendations is 0.782. In conclusion, the range of hogging moment zones has a significant influence on the long-term behavior of multi-span continuous composite beams. The calculation method for the long-term performance of single-span and double-span steel-concrete composite beams proposed in this article can effectively enhance its prediction accuracy.

**Key words:** composite beam; shrinkage and creep; mid-span deflection; design method

钢 - 混凝土组合梁以其良好的受力性能、快速的施工工艺在工农业建设中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。国内外学者对其短期受力行为做了较为系统的研究,并给出了设计方法<sup>[2-4]</sup>。由于受翼板混凝土收缩徐变的影响,组合梁长期变形随持荷时间增加不断增大,甚至会导致组合梁的服役由正常使用转为极限状态。由此,M. A. Bradford 等<sup>[5]</sup>进行了 4 组单跨钢 - 普通混凝土组合梁长期性能试验研究,发现组合梁的长期挠度约为瞬时挠度的 2.1 ~ 3.7 倍。D. Wright 等<sup>[6]</sup>对比了不同类型混凝土对单跨组合梁长期性能的影响,结果表明,采用普通混凝土的组合梁长期挠度较采用轻骨料混凝土增大了 20%。W. C. Xue 等<sup>[7]</sup>进行了单跨预应力钢 - 混凝土组合梁长期持荷试验研究,发现采用预应力的组合梁长期挠度降低了 35%。I. S. Fan 等<sup>[8]</sup>进行了 2 组持荷时间为 1087 d 的单跨钢 - 混凝土组合梁长期试验,发现受混凝土收缩徐变影响,组合梁长期挠度约为瞬时挠度的 2.4 ~ 2.7 倍。S. Al-Deen 等<sup>[9-10]</sup>进行了 5 组采用部分剪切连接的单跨钢 - 混凝土组合梁长期性能试验,发现由混凝土收缩变

形引起的长期挠度约占组合梁总挠度的 30% 以上。R. I. Gilbert 等<sup>[11]</sup>和 S. Al-Deen 等<sup>[12]</sup>对两跨连续钢 - 混凝土组合梁进行了试验初探,提出了基于截面分析法的两跨连续钢 - 混凝土组合梁的挠度计算方法。

这些学者多采用截面分析法研究钢 - 混凝土组合梁长期性能,计算量大,同时未区分不同楼板类型(收缩分布)对组合梁长期性能的影响。在这一背景下,笔者基于已有的组合梁长期性能试验结果,对规范建立的设计方法进行适用性分析,提出一种综合考虑混凝土收缩、徐变及组合梁界面滑移等多因素影响的钢 - 混凝土组合梁长期性能设计方法,分析不同收缩分布模型对单跨组合梁长期跨中挠度和两跨连续组合梁长期中支座负弯矩及跨中挠度的影响,为组合梁的工程设计提供理论依据。

# 1 现有规范设计方法适用性

## 1.1 现有试验参数与主要结果

表 1 为文献中的 12 组组合梁长期性能试验参数及试验结果。试件包括单跨组合梁和两跨连续组合梁。

表1 文献中的试件参数和结果

Table 1 Test specimen parameters and results in the references

类型	试件编号	楼板类型	钢梁型号	$L/mm$	$b/mm$	$D_c/mm$	$E_c/GPa$	$f_{cm}/MPa$	$t_k/d$	$R_H/\%$	$\delta_{tot,exp}/mm$	$\delta_{tot,pre}/mm$	$\frac{\delta_{tot,pre}}{\delta_{tot,exp}}$
单跨 组合梁	B1 <sup>[5]</sup>	钢筋混凝土楼板	200UB25	5 900	1 000	70	25.1	31.1	260	71	22.54	21.79	0.97
	B3 <sup>[5]</sup>	钢筋混凝土楼板	200UB25	5 900	1 000	70	25.1	31.1	250	71	22.99	22.82	0.99
	LCB1 <sup>[8]</sup>	钢筋混凝土楼板	180×100×4×4	4 000	600	60	31.8	24.5	1087	67	9.57	9.17	0.96
	LCB2 <sup>[8]</sup>	钢筋混凝土楼板	180×100×4×4	4 000	600	60	34.7	34.0	1087	67	9.72	8.93	0.92
	CSB1 <sup>[9]</sup>	组合板	310UB40	8 000	2 000	125	27.3	26.1	125	62	6.22	6.57	1.06
	CSB2 <sup>[9]</sup>	组合板	310UB40	8 000	2 000	125	27.3	26.1	125	62	17.13	18.01	1.05
	CB1 <sup>[10]</sup>	钢筋混凝土楼板	310UB40	8 000	2 000	125	25.5	27.7	461	70	9.62	9.38	0.98
	CB2 <sup>[10]</sup>	钢筋混凝土楼板	310UB40	8 000	2 000	125	25.5	27.7	461	70	32.41	28.04	0.87
两跨 组合梁	CB3 <sup>[10]</sup>	钢筋混凝土楼板	310UB40	8 000	2 000	125	25.5	27.7	222	70	24.58	26.44	1.08
	C1 <sup>[11]</sup>	钢筋混凝土楼板	200UB25	5 800	1 000	70	22.0	27.0	340	57	7.98	7.94	0.99
	C2 <sup>[11]</sup>	钢筋混凝土楼板	200UB25	5 800	1 000	70	22.0	27.0	340	57	4.97	4.74	0.95
	CCB1 <sup>[12]</sup>	钢筋混凝土楼板	310UB40	8 000	2 000	125	27.3	27.7	130	62	18.21	17.85	0.98

注: $L$ 为组合梁单跨跨度; $b$ 为混凝土翼板宽度; $D_c$ 为混凝土翼板的厚度; $E_c$ 为混凝土的弹性模量; $f_{cm}$ 为混凝土的抗压强度; $t_k$ 为持荷时间; $R_H$ 为环境相对湿度; $\delta_{tot,pre}$ 为总挠度预测值; $\delta_{tot,exp}$ 为总挠度试验值。

1.2 规范设计方法的适用性分析

《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[13]</sup>建议采用折减模量法,其中混凝土长期弹性模量 $E_c$ 取瞬时弹性模量 $E_c$ 的50%,以更准确地评估混凝土徐变对组合梁长期挠度的影响,但该规范忽略了混凝土收缩变形对组合梁长期挠度的影响。

在负弯矩作用下,连续组合梁的翼板混凝土会发生开裂,故文献[13]建议中支座两侧0.15 $L$ 内,仅考虑钢筋与钢梁对组合梁抗弯刚度的贡献。

规范ACI 318<sup>[14]</sup>是美国的混凝土结构设计标准,其中提出了长期持荷系数 $\xi$ ,该系数的主要目的是详细描述混凝土收缩徐变对组合梁长期总挠度 $\delta_{tot}$ 的影响:

$$\delta_{tot} = [1 + \xi / (1 + 50\rho')] \delta_{inst}.$$

(1)

式中: $\delta_{inst}$ 和 $\delta_{tot}$ 分别为瞬时挠度与长期总挠度; $\xi$ 为长期持荷系数,可参考文献[14]的计算方法; $\rho'$ 为组合梁受压区的配筋率。

图1对比了采用规范设计方法的组合梁长期挠度计算值与试验值。

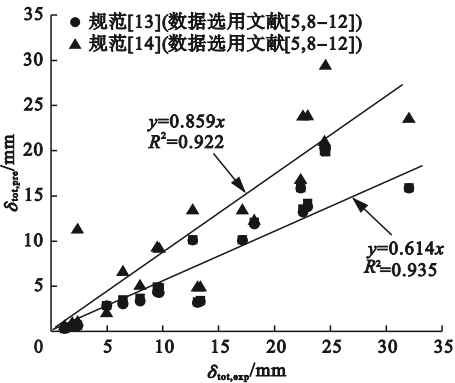


图1 两个规范计算值与试验值的对比

Fig. 1 Comparison between calculated values and test values from two specifications

由图1可以发现,采用文献[13]中设计方法得到的计算值与试验值比为0.614,判定系数 $R^2$ 为0.935,这说明不应忽略混凝土收缩变形对组合梁长期挠度的影响;采用文献[14]设计方法得到的计算值与试验值比为0.859,判定系数 $R^2$ 为0.922,计算值与试验值比的区间为0.36~1.19,变异系数为0.936,采用该方法得到的预测结果受瞬时挠度影响较大,预测结果存在较大的离散性,使用长期持荷系数并不能准确地反映混凝土收

缩和徐变对组合梁长期性能的实际影响。

## 2 组合梁的长期性能设计方法

### 2.1 组合梁长期性能力学模型

依据文献,提出钢-混凝土组合梁长期设计方法基于以下假设:①混凝土产生线性徐变<sup>[15]</sup>;②钢材应力-应变关系服从线弹性分布<sup>[16]</sup>;③组合梁符合平截面假定<sup>[17]</sup>;④钢筋混凝土楼板采用均匀收缩模型,组合楼板采用非均匀收缩模型<sup>[19]</sup>。

单跨钢-混凝土组合梁的长期抗弯刚度可采用文献[13]建议的计算方法。多跨连续组合梁的正弯矩区段的长期刚度采用考虑滑移效应的折减刚度法进行计算,负弯矩区段的长期刚度仅考虑钢梁与钢筋对组合梁抗弯刚度的贡献。

### 2.2 楼板混凝土的收缩和徐变模型

#### 2.2.1 混凝土的收缩模型

钢-混凝土组合梁的翼板设计存在两种主要的结构形式,即钢筋混凝土板和组合板,在钢筋混凝土板中,随横截面高度的增加,混凝土的收缩表现为均匀分布;相反,在组合板中,由于底部压型钢板的存在,混凝土处于封闭状态,使其在截面不同高度上呈现出非均匀的收缩分布。文献[18]建议组合板中混凝土的顶部收缩应变 $\varepsilon_{sh,top}$ 与底部收缩应变 $\varepsilon_{sh,bot}$ 分别取均匀收缩应变 $\varepsilon_{sh,m}$ 的1.2倍与0.2倍。

混凝土的总收缩应变 $\varepsilon_{sh,m}$ 由自生收缩应变 $\varepsilon_{ca}$ 与干燥收缩应变 $\varepsilon_{cd}$ 两部分组成<sup>[19]</sup>:

$$\varepsilon_{sh,m}(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t). \quad (2)$$

式中: $t$ 为组合梁混凝土的服役龄期; $t_s$ 为翼板混凝土的养护龄期。

#### 2.2.2 混凝土的徐变模型

在翼板设计中,使用钢筋混凝土板和组合板时,混凝土在不同截面高度上表现出与收缩分布相似的徐变分布,即钢筋混凝土板表现为均匀的徐变分布,而组合板则呈非均匀的徐变分布。可采用环境相对湿度作为钢

筋混凝土板的相对湿度,而组合板顶面相对湿度 $R_{H,top}$ 采用环境相对湿度 $R_H$ ,底面相对湿度 $R_{H,bot}$ 采用90%的饱和水汽湿度<sup>[21]</sup>。文献[19]给出了混凝土徐变系数 $\varphi(t, t_0)$ :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0). \quad (3)$$

式中: $\varphi_0$ 为混凝土名义徐变系数; $\beta_c(t, t_0)$ 为混凝土徐变随时间发展系数,可参照文献[19]建议的计算公式。

随着服役龄期的增加,翼板混凝土的徐变变形逐渐增大。为了衡量混凝土徐变变形对组合梁长期性能的影响,采用了龄期调整的有效模量法:

$$E_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)}. \quad (4)$$

式中: $E_c(t, t_0)$ 为随龄期调整的混凝土有效模量; $E_c(t_0)$ 为 $t_0$ 时刻混凝土的弹性模量; $t_0$ 为瞬时加载龄期; $\chi(t, t_0)$ 为混凝土的老化系数。

### 2.3 组合梁的长期性能计算方法

钢-混凝土组合梁受长期荷载、混凝土收缩变形及徐变变形三部分影响。基于此,提出单跨钢-混凝土组合梁的长期挠度计算方法:

$$\delta_{mid}(t) = \frac{5qL^4}{384E_s I_{eq}} + \frac{\varepsilon_{sh}(t, t_s) A_c E_c(t, t_0) y_m L^2}{8E_s I_{eq}}. \quad (5)$$

式中: $L$ 为组合梁的单跨跨度; $A_c$ 为混凝土翼板的面积; $E_s$ 为钢梁的弹性模量; $y_m$ 为组合截面中性轴与翼板混凝土截面重心轴的距离; $\varepsilon_{sh}(t, t_s)$ 为混凝土截面重心轴处的收缩变形; $I_{eq}$ 为组合梁正弯矩区段的刚度,可采用文献[13]建议的计算方法。

对两跨连续的钢-混凝土组合梁长期弯矩分布进行深入而详细地分析,以全面了解其结构性能。通过分析组合梁固定端的剪力对弯矩分布的影响,得到两跨连续钢-混凝土组合梁的随龄期发展的负弯矩区段长度占单跨长度的比值 $x$ :

$$x = \frac{2M_{mid}(t)}{qL^2}. \quad (6)$$



由此,得到两跨连续的钢-混凝土组合梁中支座负弯矩的计算表达式:

$$M_{\text{mid}}(t) = M_{\text{mid},1}(t) + M_{\text{mid},2}(t). \tag{7}$$

$$M_{\text{mid},1}(t) = \frac{qL^2}{2} - \frac{3qL^2[(1-x)^4(y-1)+1]}{8[(1-x)^3(y-1)+1]}. \tag{8}$$

$$M_{\text{mid},2}(t) = \frac{3[(1-x)^2(y-1)+1]}{2[(1-x)^3(y-1)+1]} \times \varepsilon_{\text{sh}}(t,t_s)A_cE_e(t,t_0)y_m. \tag{9}$$

式中: $M_{\text{mid},1}(t)$ 为长期荷载 $q$ 作用下引起的组合梁中支座负弯矩; $M_{\text{mid},2}(t)$ 为混凝土收缩变形下引起的组合梁中支座负弯矩; $x$ 为组合梁负弯矩区段长度占单跨长度的比值; $y$

$$\delta_{\text{mid},1}(t) = \frac{qL^4(y-1)(3x^4-6x^3+3x^2)}{48yE_sI_{\text{eq}}} + \frac{M_{\text{mid},1}(t)L^2(36x^2-16x^3-24x)(y-1)}{48yE_sI_{\text{eq}}} + \frac{5M_{\text{mid},1}(t)L^2-0.375qL^4}{48E_sI_{\text{eq}}}. \tag{11}$$

$$\delta_{\text{mid},2}(t) = \frac{[5M_{\text{mid},2}(t)-6\varepsilon_{\text{sh}}(t,t_s)A_cE_e(t,t_0)y_m]L^2}{48E_sI_{\text{eq}}} + \frac{M_{\text{mid},2}(t)L^2(y-1)(36x^2-16x^3-24x)}{48yE_sI_{\text{eq}}} + \frac{\varepsilon_{\text{sh}}(t,t_s)A_cE_e(t,t_0)y_mL^2(y-1)(12x^2-16x^3)}{48yE_sI_{\text{eq}}}. \tag{12}$$

式中: $\delta_{\text{mid},1}(t)$ 为长期荷载 $q$ 作用下引起的两跨连续组合梁跨中挠度,mm; $\delta_{\text{mid},2}(t)$ 为混凝土收缩变形作用下引起的两跨连续组合梁跨中挠度,mm。

3 设计方法验证

3.1 单跨钢-混凝土组合梁

3.1.1 不同混凝土抗压强度

图2(a)为在不同混凝土抗压强度条件下单跨组合梁长期跨中挠度预测结果<sup>[8]</sup>。试件LCB1与LCB2采用的混凝土强度等级分别为C20与C30,试件的瞬时挠度预测值为3.87 mm与3.82 mm,试验值分别为3.94 mm与3.61 mm,预测值与试验值分别相差1.8%与5.8%;加载龄期为1 087 d时,试件LCB1与LCB2的跨中挠度预测值分别为9.17 mm与8.93 mm,试验值分别为9.57 mm与9.72 mm,预测值比试验值分别

为组合梁负弯矩区段与正弯矩区段的刚度比值,可采用文献[21]建议的计算方法。

分析可知,中支座负弯矩 $M_{\text{mid}}(t)$ 与负弯矩作用范围 $x$ 存在耦合作用,故需联合式(7)~式(10)对两跨连续组合梁的中支座负弯矩 $M_{\text{mid}}(t)$ 与负弯矩作用范围 $x$ 进行计算。将计算得到的负弯矩范围 $x$ 分别导入式(9)~式(10)得到相应的中支座负弯矩,对两跨连续组合梁的内力进行计算,在此基础上,建立了两跨连续组合梁的跨中挠度 $\delta_{\text{mid}}(t)$ 的计算方法:

$$\delta_{\text{mid}}(t) = \delta_{\text{mid},1}(t) + \delta_{\text{mid},2}(t). \tag{10}$$

低4.2%与8.1%。

3.1.2 不同栓钉间距

图2(b)为不同栓钉间距的组合梁长期跨中挠度预测值与试验值<sup>[5]</sup>。试件B1的栓钉间距为200 mm、试件B3的栓钉间距为600 mm。加载龄期为260 d时,试件B1的跨中挠度预测值为21.79 mm,试验值为22.54 mm,预测值相较试验值低3.3%;加载龄期为260 d时,试件B3的跨中挠度预测值为22.82 mm,试验值为22.99 mm,预测值相较试验值低0.7%。

3.1.3 不同荷载等级

图3(a)为组合梁长期跨中挠度预测值与文献[9]试验值的对比。试件CB1承受荷载为0,CB2承受荷载为13.4 kN/m,CB3承受荷载19.8 kN/m。加载至222 d时,试件CB1的跨中挠度预测值和试验值分别为8.48 mm和8.67 mm,相差2.2%;试件CB2结

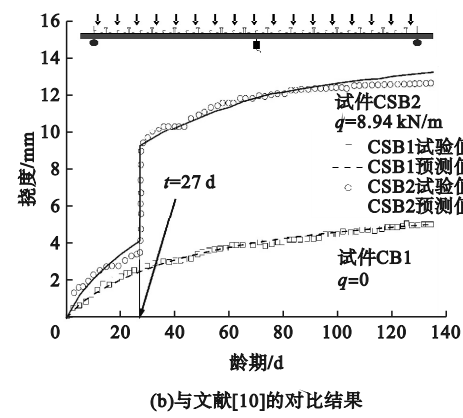
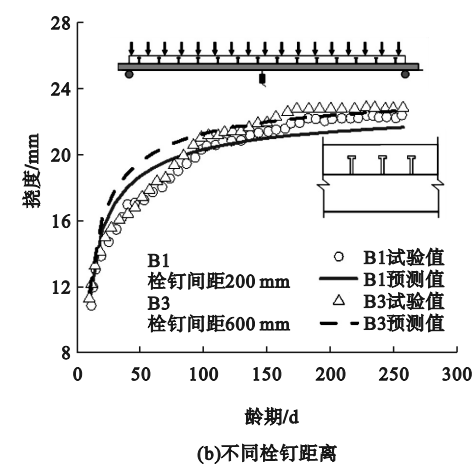
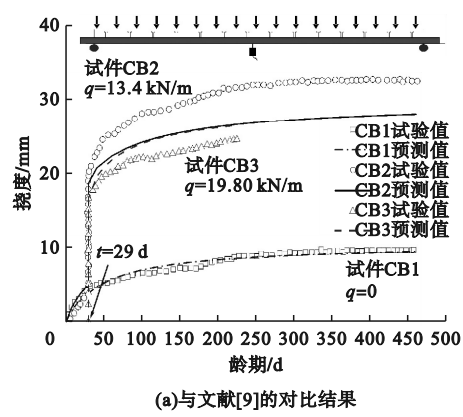
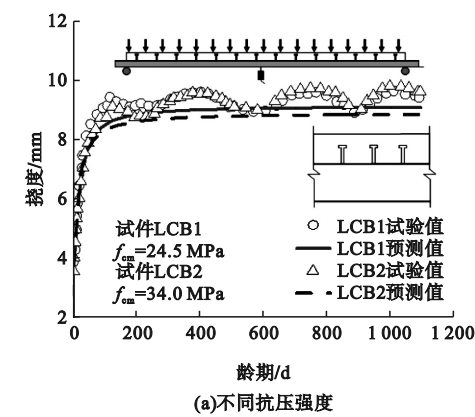


图2 不同抗压强度与不同栓钉距离的结果对比

Fig. 2 Comparison of results with different compressive strengths and bolt distances

果分别为 26.59 mm 和 31.58 mm,相差 15.8%; 试件 CB3 结果分别为 26.44 mm 和 24.58 mm,相差 7.0%。至 461 d 时,试件 CB1 的跨中挠度预测值和试验值分别为 9.38 mm 和 9.62 mm,预测值低 2.5%;CB2 的结果分别为 28.04 mm 和 32.41 mm,预测值低 13.5%。

图 3(b) 为组合梁长期跨中挠度预测值与文献 [10] 试验值的对比。试件 CSB1 与 CSB2 承受荷载分别为 0 和 8.94 kN/m。2 组试件的混凝土翼板采用组合板,此时混凝土沿截面高度方向呈现非均匀收缩与非均匀徐变分布。加载龄期为 134 d 时,试件 CSB1 与 CSB2 的跨中挠度预测值为 6.57 mm 与 18.01 mm,试验值分别为 6.22 mm 与 17.13 mm,预测值比试验值分别高 5.6% 与 5.1%。

图3 不同荷载等级的结果对比  
Fig. 3 Comparison of results for different load levels

3.2 两跨连续钢-混凝土组合梁

3.2.1 中支座负弯矩

图 4(a) 为不同加载龄期两跨连续钢-混凝土组合梁中支座负弯矩预测值与试验值<sup>[11]</sup>。加载龄期为 0 时,预测值与试验值分别为 28.07 kN·m 与 31.30 kN·m,预测值比试验值低 10.3%;加载龄期为 340 d 时,预测值与试验值分别为 52.37 kN·m 与 62.70 kN·m,预测值比试验值低 16.5%。

图 4(b) 为不同荷载的中支座负弯矩预测值与试验值对比结果<sup>[12]</sup>。在试件仅承受自重  $g$  的情况下,组合梁中支座负弯矩的预测值为 32.98 kN·m,而试验值为 31.89 kN·m,预测值相较试验值高出 3.4%;当试件承受自重  $g$  与均布荷载  $q$  时,组合梁中支座负弯矩的预测值为 6.42 kN·m,而试验值为 7.44 kN·m,

预测值相较试验值低 13.7%。

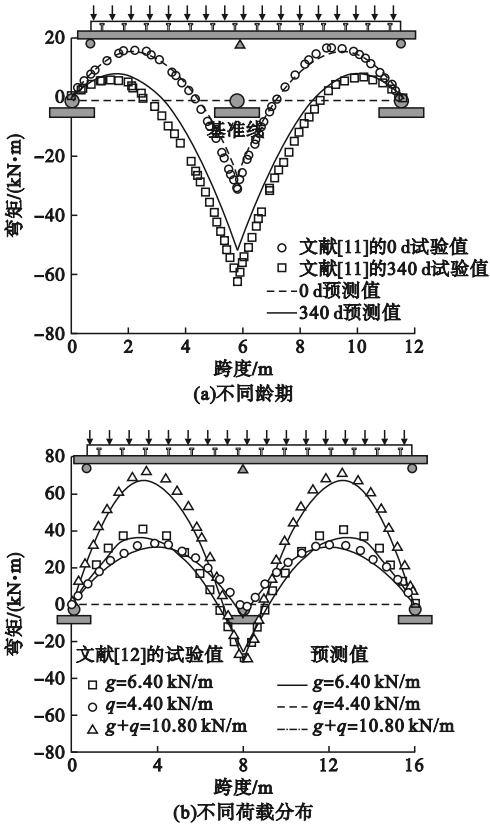


图4 弯矩分布与文献[11-12]结果对比  
Fig. 4 Comparison of predicted bending moment distribution and reference results [11-12]

3.2.2 跨中挠度

图5为两跨连续钢-混凝土组合梁的长期跨中挠度预测值与试验值。负弯矩作用范围 $x$ 分别采用式(6)与规范建议值0.15计算。加载龄期为340 d时,试件C1的预测值分别为4.74 mm与2.82 mm,试验值为4.97 mm,预测值比试验值分别低4.6%与40.5%;试件C2的预测值分别为7.94 mm与6.10 mm,试验值为7.98 mm,预测值比试验值分别低0.5%与23.6%;加载龄期为130 d时,试件CCB1预测值分别为17.85 mm与17.99 mm,试验值为18.21 mm,预测值比试验值分别低2.0%与1.2%。试件CCB1的长期附加挠度仅为瞬时挠度的0.4倍,此时由混凝土收缩徐变引起的组合梁应力重分布现象不明显,故负弯矩作用范围 $x$ 对试件CCB1的跨

中挠度影响较小。

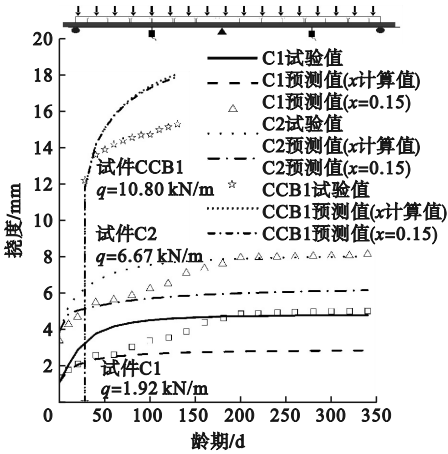


图5 跨中挠度与文献[11]、文献[12]结果对比  
Fig. 5 Comparison of predicted mid span deflection values and reference results [11]、[12]

4 结 论

(1)提出了一种基于随龄期调整的有效模量法综合考虑混凝土收缩、徐变和开裂等因素的钢-混凝土组合梁长期性能设计方法,该设计方法在预测单跨组合梁长期跨中挠度、两跨组合梁长期中支座负弯矩及跨中挠度方面表现出显著的有效性,与试验值相比,预测值的最大差异为16.5%。

(2)针对多跨组合梁进行设计时,需考虑负弯矩作用范围对组合梁长期性能的影响,采用随龄期发展的负弯矩作用范围得到的长期挠度预测值与试验值比为0.976;而采用规范建议值0.15得到的组合梁长期跨中挠度预测值与试验值比仅为0.782。

参考文献

[1] HAN C X, ZHANG J C, ZHOU D H, et al. Computing creep secondary internal forces in continuous steel concrete composite beam constructed through segmented pouring [J]. Journal of structural engineering, 2020, 146 (3): 04020003.  
[2] NIE J G, CAI C S, WANG T. Stiffness and capacity of steel-concrete composite beams with profiled sheeting [J]. Engineering structures, 2005, 27(7): 1074-1085.  
[3] 张建伟, 刘方方, 卡卓乍, 等. 钢-压型钢板再

- 生粗骨料混凝土组合梁受弯性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 86-92.  
(ZHANG Jianwei, LIU Fangfang, KAZOZA E, et al. Experimental study on flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete composite beams with closed-section steel deck [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2015, 47(12): 86-92.)
- [4] 张玉杰, 刘爱荣, 陈炳聪. 钢-混凝土组合梁中高强螺栓连接件的抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 411-417.  
(ZHANG Yujie, LIU Airong, CHEN Bingcong. Experimental study on shear behavior of high-strength bolt connection in steel-concrete composite beam [J]. Journal of building structures, 2019, 40(S1): 411-417.)
- [5] BRADFORD M A, GILBERT R I. Time-dependent behaviour of simply-supported steel-concrete composite beams [J]. Magazine of concrete research, 1991, 43(157): 265-274.
- [6] WRIGHT D, VITEK L, RAKIB N. Long-term creep and shrinkage in composite beams with partial connection [J]. Proceedings of the institution of civil engineers structures and buildings, 1992, 94(2): 187-195.
- [7] XUE W C, DING M, HE C, et al. Long-term behavior of prestressed composite beams at service loads for one year [J]. Journal of structural engineering, 2008, 134(6): 930-937.
- [8] FAN J S, NIE J G, LI Q, et al. Long-term behavior of composite beams under positive and negative bending. I: experimental study [J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(7): 849-857.
- [9] AL-DEEN S, RANZI G, VRCELJ Z. Full-scale long-term and ultimate experiments of simply-supported composite beams with steel deck [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(10): 1658-1676.
- [10] AL-DEEN S, RANZI G, VRCELJ Z. Full-scale long-term experiments of simply supported composite beams with solid slabs [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(3): 308-321.
- [11] GILBERT R I, BRADFORD M A. Time-dependent behavior of continuous composite beams at service loads [J]. Journal of structural engineering, 1995, 121(2): 319-327.
- [12] AL-DEEN S, RANZI G, VRCELJ Z. Long-term experiments of composite steel-concrete beams [J]. Procedia engineering, 2011, 14: 2807-2814.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [14] ACI 318 Committee. Building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19) and commentary: ACI 318R-19 [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [15] AL-DEEN S, RANZI G, VRCELJ Z. Long-term experiments of composite beams and connections [J]. Magazine of concrete research, 2012, 64(9): 849-861.
- [16] RANZI G, ZONA A. A steel-concrete composite beam model with partial interaction including the shear deformability of the steel component [J]. Engineering structures, 2007, 29(11): 3026-3041.
- [17] FAN J S, NIE J G, LI Q, et al. Long-term behavior of composite beams under positive and negative bending. II: analytical study [J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(7): 858-865.
- [18] Concrete steel-concrete construction in buildings: AS/NZS 2327: 2017 [S]. Sydney: Standards Australia, 2017.
- [19] British Standards Institution. Eurocode 2: Design of concrete structures; part 1: general rules and rules for buildings; BS EN 1992-1-1 [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [20] 王庆贺, 梁永泽, 张欢, 等. 考虑荷载分布的多跨连续钢-再生混凝土组合板长期性能研究 [J]. 工程力学, 2021, 38(2): 198-210.  
(WANG Qinghe, LIANG Yongze, ZHANG Huan, et al. Time-dependent behavior of multi-span continuous steel-RAC composite slabs considering the loading distribution effects [J]. Engineering mechanics, 2021, 38(2): 198-210.)
- [21] 王庆贺, 王仕奇, 谷凡, 等. 考虑收缩徐变影响的两跨钢-混凝土连续组合梁长期性能预测方法 [J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 50-58.  
(WANG Qinghe, WANG Shiqi, GU Fan, et al. Prediction procedures for long-term behavior of double-span steel-concrete composite beams considering shrinkage and creep effects [J]. Journal of architecture and civil engineering: 2023, 40(2): 50-58.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)