

考虑荷载长期作用时型钢-混凝土组合梁的变形

李 达^{1,2)} 邓新穗³⁾ 谭文辉¹⁾ 牟在根¹⁾ 隋 军³⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 太原理工大学阳泉学院, 阳泉 045000

3) 广州市市政工程设计研究院, 广州 510060

摘 要 用考虑收缩、徐变和交接面滑移后的组合梁长期挠度计算方法对实际工程中的两根典型组合梁进行了长期挠度计算, 并将岩土工程分析软件 FLAC^{3D} 应用于组合梁的滑移面模拟, 对计算数据、现场实测数据及计算机模拟分析结果进行了分析比较. 实测及计算结果均表明, 用现行规范中的计算方法将使组合梁的长期挠度计算值偏小, 本文的研究方法可以用来计算组合梁的长期挠度. 根据分析结果, 提出了对组合梁在设计及施工时的一些建议.

关键词 型钢混凝土组合梁; 荷载组合; 收缩; 徐变; 滑移
分类号 TU 398.9

对于钢-混凝土组合梁挠度的研究, 目前比较多地考虑了荷载短期效应组合下的情况. 对于荷载长期组合的情况, 我国现行规范^[1] 是通过降低弹性模量的方法来考虑荷载的长期效应, 而将混凝土收缩的影响按降温进行处理, 没有充分考虑收缩、徐变的影响. 文献^[2] 对钢-混凝土组合梁的长期变形问题进行了分析和讨论, 并得出了简支组合梁的长期挠度计算公式, 但是公式中对于混凝土的收缩、徐变模式的取用并未给出实用性建议, 且该公式在不同收缩、徐变模式下计算结果的准确性并没有得到实验或工程实例的验证.

本文通过分析比较, 从目前常见的收缩、徐变以及滑移模式中, 选择更接近于实验结果的计算模式, 推导出考虑徐变、收缩、滑移的钢-混凝土组合梁长期挠度计算公式, 并结合具体的工程实例, 首次利用有限差分模拟工程分析软件 FLAC^{3D} 对组合梁的长期挠度进行模拟, 从实测、模拟和公式计算三个方面对本文的计算公式进行验证, 并对组合梁设计及施工提出了有益的建议.

1 计算模型的建立

在长期使用阶段, 组合梁中的钢梁通常处于弹性工作阶段, 混凝土受压区的压应力与应变的关系虽然并不保持完全线性, 但是压应力仍然处于应力-应变曲线的上升段, 故可以近似认为沿混凝土板截面高度的压应力呈线性分布. 为简化起见, 采用如下假定^[2]:

- (1) 钢梁和混凝土在长期荷载作用下处于弹性工作阶段;
- (2) 混凝土的徐变与其初始应变成比例;
- (3) 钢梁和混凝土翼板具有相同的曲率并分别符合平截面假定.

根据以上假设, 以正弯矩作用下的简支组合梁为研究对象, 可以建立如图 1 所示的分析模型. 图中, ΔM_c 和 ΔM_s 分别表示徐变和收缩引起的混凝土翼板和钢梁截面的附加弯矩, ΔN 为附加轴力, h 、 h_s 和 h_c 分别为组合梁的高度、钢梁的高度和混凝土翼板的高度, d_c 为钢梁截面形心到混凝土翼板形

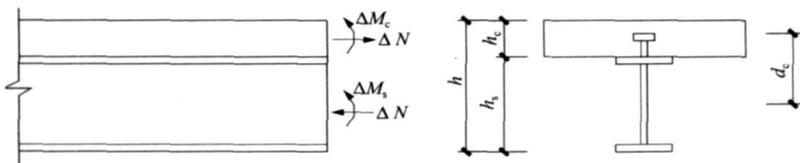


图 1 组合梁分析计算模型

Fig. 1 Built-up beam analysis computation model

心之间的距离.

利用变形协调条件, 可得出考虑滑移、徐变后的附加曲率为:

$$\Delta\psi = \frac{\varphi(t, t_0)\epsilon_{c0} + \epsilon_{sh}}{d_c + \frac{1}{d_c} \left(\frac{E_{c1}I_c + E_sI_s + E_{c1}I_c + E_sI_s}{E_sA_s} \right)} \quad (1)$$

式中, $\varphi(t, t_0)$ 、 ϵ_{sh} 和 E_{c1} 分别为混凝土的徐变系数、收缩应变和长期弹性模量, t 和 t_0 分别为施加应力时的混凝土龄期和计算时的混凝土龄期, ϵ_{c0} 表示混凝土翼缘上表面的初始应变; I_s 和 I_c 分别为钢梁截面和混凝土翼板的惯性矩, E_s 和 E_{c1} 分别为钢梁截面和混凝土翼板的弹性模量。

进一步考虑滑移的影响, 可得最终的长期曲率表达式为:

$$\psi = \Delta\psi + \psi_s \quad (2)$$

其中, ψ_s 为考虑滑移效应时钢-混凝土组合梁的短期曲率或初始曲率。通过曲率, 就可以用结构力学的方法计算组合梁的挠度。

上述公式中涉及到徐变、收缩以及滑移的计算模式的选取。对于收缩, 目前主要有模式规范 CEB-FIP MC90、澳洲规范 (简称 AS3600-1988)、美国混凝土学会 (ACI) 209 委员会以及美国 BP 模式等多种计算方法; 对于徐变, 主要的计算模式有 CEB-FIP MC90、AS3600-1988、(ACI)209、BP 以及朱伯芳教授于 1985 年提出的用幂指数函数模式等。文献[3]中, 作者在澳大利亚悉尼理工大学土木学院做了大量混凝土试件收缩与徐变实验, 对 ACI、CEB (1970)、CEB (1978)、AS1481 (澳洲老规范) 及 AS3600 规范加以比较。由文献中列出的实验结果来看, 徐变应变由 AS3600-1988 及 ACI 方法求出的值比较接近, 而收缩应变由澳洲规范方法求的值与实验值最为接近。因此, 本文的和均采用了澳洲规范方法进行计算, 即:

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{sh}(t) = K_1 \epsilon_{sh, obs} \quad (3)$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{cp}(t) = K_2 K_3 \varphi_{cp, b} \quad (4)$$

式中系数可参见文献[3]。

长期弹性模量采用龄期调整的有效模量法, 其中老化系数 $\chi(t, t_0)$ 采用孙宝俊在文献[4]中给出的公式:

$$E_{c1} = E_{\varphi(t, t_0)} = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t, t_0)\varphi(t, t_0)} \quad (5)$$

式中, E_c 为混凝土的弹性模量。

$$\chi(t, t_0) = \frac{1}{1 - 0.91 \exp[-0.686\varphi(t, t_0)]} - \frac{1}{\varphi(t, t_0)} \quad (6)$$

对于组合梁的滑移模式, 国内单位给出的滑移模式的影响系数比较多^[5-9], 计算过于复杂。美国

钢结构学会钢结构规范 AISC-LRFD99 给出的考虑滑移影响时组合梁有效弹性刚度的计算公式^[10], 英国钢结构协会 (SCI) 出版的《钢结构设计手册》则提供了一个可直接用来计算组合梁有滑移时挠度的公式^[11]。清华大学聂建国等在文献[12]则提出了折减刚度法。文献[13]中, 作者对国内外的滑移模式分别用解析解作了计算比较, 分析表明折减刚度法并不适用于剪切连接程度较低的组合梁, 因而它无法推广用来做部分剪切连接组合梁的挠度估算。但它在完全剪切连接阶段考虑了滑移效应, 其计算值比 LRFD 等提出的实用公式更为合理。总之, 由于本文研究的组合梁, 设计时均考虑为完全剪力连接, 因此滑移计算模式采用了文献[12]建议的折减刚度法。

2 实例计算

北京银泰中心工程位于北京市朝阳区建国门外大街与东三环的交汇处, 北邻东长安街和大北窑地铁站, 东邻东三环路, 南邻正在建设中的建外 SOHO 工程, 是一个集写字楼、五星级酒店和豪华服务式公寓等于一体的特大型现代化建筑群, 见图 2。



图 2 银泰大厦图

Fig.2 Yintai building

北京银泰中心工程占地 3.5 hm^2 , 总建筑面积 35.75 万 m^2 , 地下建筑面积约 $86\,408 \text{ m}^2$, 东西长 218.2 m , 南北宽 99 m , 由北楼、东楼、西楼三座高层塔楼组成。地下 4 层, 北楼地上 63 层, 东、西楼地上 44 层。北塔楼 (A 座) 为钢结构。东、西塔楼 (B、C 座) 墙、柱五层以上为钢筋混凝土、钢梁组合楼板混合结构, 五层及以下为型钢混凝土结构, 内外筒间采用典型的钢-混凝土筒支组合梁及压型钢板组合楼板作为竖向承重构件。因此本文选取银泰大厦西塔楼 (C 座) 的筒支组合梁作为测试对象。

组合梁的跨度荷载及材料指标见表 1, 其截面见图 3。

表 1 梁跨度、荷载和材料指标

Table 1 Beam span, load and material target

梁号	跨度/ m	一年内荷载/ (kN·m ⁻¹)	一年后荷载/ (kN·m ⁻¹)	钢梁	栓钉	混凝土	预起拱/ mm
GL-1	11.385	8.67	16.10	Q345B	ML15	C40	20
GL-2	9.810	8.45	15.88	Q345B	ML15	C40	20

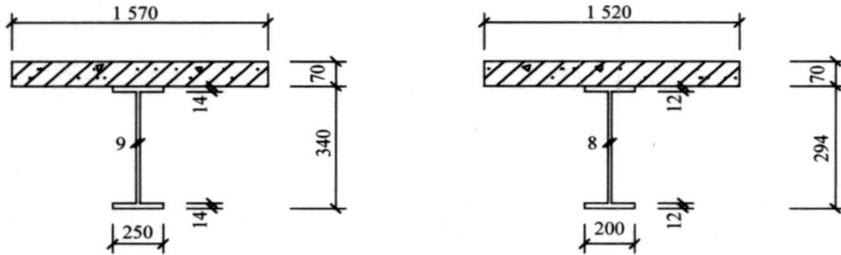


图 3 钢梁截面图 (单位: mm)

Fig.3 Steel girder profile charts (unit: mm)

2.1 现场实测与计算

该大厦 C 座九层 (梁顶标高 39.240 m) 浇筑于 2005-07-25 夜间, 从 7 月 12 日至 12 月 13 日, 笔者对该层的两根典型简支组合梁 (GL-1、GL-2) 进行了浇筑前及浇筑后共 10 次挠度测量, 用本文建立的

计算模型对两根钢梁进行了相应点的挠度计算, 结果见表 2. 同时对两根梁分别用本文的方法和现行钢结构规范的计算方法进行了一年后长期挠度计算, 结果见表 3.

表 2 一年内组合梁跨中挠度计算及实测数据

Table 2 Built-up beams midspan deflection computation and measured data in the first year

时间/ d	GL-1					GL-2				
	收缩	徐变	滑移	合计	实测	收缩	徐变	滑移	合计	实测
7	8.57	5.32	20.90	34.79	27.61	8.01	5.01	19.46	32.48	24.50
23	13.14	6.89	20.90	40.93	33.23	12.37	6.55	19.46	38.38	31.29
36	14.92	7.55	20.90	43.37	35.68	14.10	7.21	19.46	40.77	32.83
51	16.26	8.08	20.90	45.24	38.86	15.41	7.74	19.46	42.61	35.77
65	17.15	8.46	20.90	46.51	40.13	16.29	8.10	19.46	43.85	36.79
84	18.14	8.82	20.90	47.86	40.35	17.17	8.48	19.46	45.11	38.04
98	18.56	9.04	20.90	48.50	41.32	17.69	8.69	19.46	45.84	38.67
121	19.24	9.31	20.90	49.45	42.51	18.35	8.98	19.46	46.79	39.87
140	19.68	9.50	20.90	50.08	43.47	18.80	9.58	19.46	47.84	40.93

表 3 一年后组合梁跨中挠度计算数据

Table 3 Built-up beams midspan deflection computation and measured data after a year

时间/ a	GL-1		GL-2	
	本文公式	现行规范	本文公式	现行规范
1	80.87	45.04	77.39	42.08
3	83.29	45.04	79.91	42.08
10	84.73	45.04	81.44	42.08
20	85.23	45.04	81.79	42.08
30	85.48	45.04	82.19	42.08

2.2 数值模拟分析

本文用岩土工程分析软件 FLAC^{3D}[14] 对组合梁的滑移面进行了数值模拟. FLAC^{3D} 提供了可选择的结构面模型来模拟滑移面或分离面, 可以指定结构面的切向、法向刚度和破坏强度, 从而结构面可以用来模拟断层、节理或摩擦边界. 因此, 利用 FLAC^{3D} 软件的这些特点, 可以很好地模拟组合梁交接滑移面, 而不必再用弹簧单元等有限元模型对滑移面进行代换模拟. 本文用 FLAC^{3D} 模拟滑移面时, 采用文献[6]的建议, 赋予滑移面沿梁长等值刚度 $k = N_v^c$,

$N_v^c = 0.43 A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7 A_s \gamma f$, 其中, A_s 为型钢的截面积, f_c 为混凝土的抗压设计强度, f 为钢材的抗拉设计强度, γ 为钢材的材料常数. 考虑到滑移面可能会发生“掀起”, 故不考虑法向刚度. 徐变、收缩根据其应变等效为相应的沿梁长的外力来模拟.

组合梁挠度变形模拟见图 4 和图 5. 图 6 和图 7 为根据计算、模拟及实测值所做的 GL-1 长期挠度分析图.

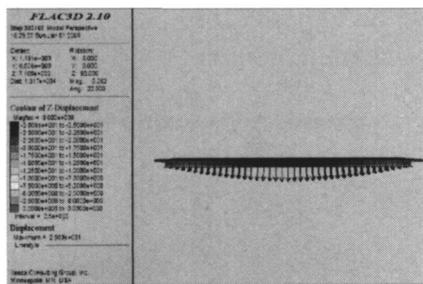


图 4 GL-1 挠度模拟图

Fig. 4 GL-1's deflection simulation chart

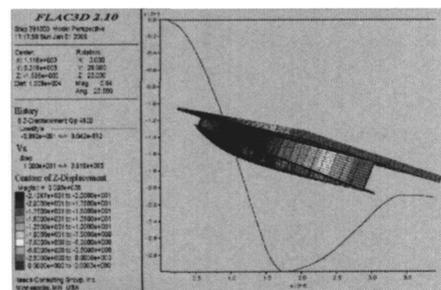


图 5 GL-2 挠度模拟图

Fig. 5 GL-2's deflection simulation chart

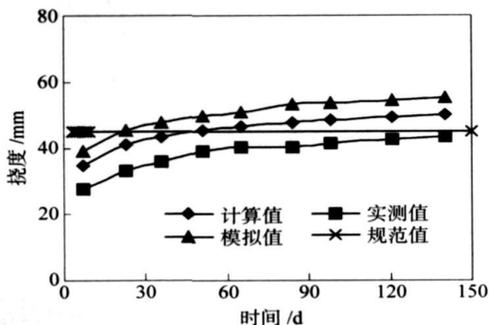


图 6 一年内 GL-1 计算、实测和模拟挠度值随时间变化图

Fig. 6 Changes of computation, actual and simulation deflection values with time in the first year

2.3 结果分析

(1) 从图中可见, 模拟值均大于计算值. 这是由于数值模拟时滑移面输入的是等值刚度, 即只考

虑了栓钉本身的抗剪能力, 而忽略了混凝土板与钢梁的摩擦力, 因此计算机模拟结果相对公式计算值和实测值都要偏大.

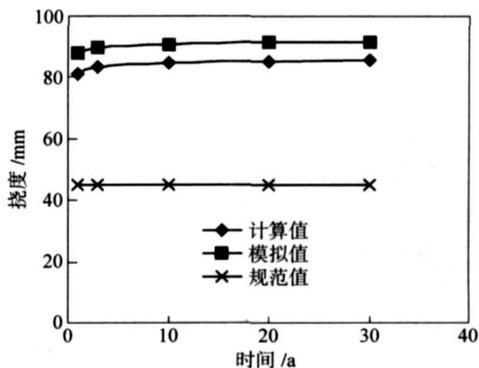


图 7 一年后 GL-1 计算、模拟挠度值随时间变化图

Fig. 7 Changes of computation, actual and simulation deflection values with time after a year

(2) 图中的实测值与计算值的误差, 主要有以下几个方面的原因:

(a) 本文测量区间(7月25日-12月13日)现场温度从 34°C 降温至 -3°C , 温差很大, 温度变化对组合梁的长期挠度会有不小的影响. 有关这一问题, 还有待进一步研究.

(b) 工程中采用的 BD-40 型闭口肋型钢承板比其他板型的组合楼板具有更大的楼板有效高度, 因而在实际受力过程中参与组合梁受压翼缘工作的混凝土也比其他板型多; 而本文中组合梁的混凝土翼缘板厚度(70 mm)是按照钢结构规范的要求取值的, 这样取值将不考虑肋高部分混凝土的参与, 同时压型钢板的作用也没有计入, 从而使最终的挠度计算结果偏大.

(c) 混凝土翼缘内的钢筋会增加组合楼板的整体性, 提高翼缘板的刚度, 还可以阻止混凝土的收缩, 但要准确计算这些钢筋的作用是很困难的. 因此在本文的计算中未考虑这些钢筋对组合梁挠度的影响, 这会使计算结果较测量结果偏大.

此外, 由于翼缘板宽度取值、剪力连接件抗剪刚度的取值、“坑凹”效应以及测量误差等因素的影响都将使实测值与计算值和模拟值产生一定的误差.

3 结论

本文对常见的收缩、徐变以及滑移模式进行了分析比较, 并结合工程实例利用 FLAC^{3D} 分析软件对组合梁的长期挠度进行模拟, 从实测、模拟及公式计算三个方面对本文的计算公式进行验证, 得出如下初步结论和建议:

(1) 模拟值、实测值和计算值在 140 d 的数据均已接近或超过现行规范的计算值. 从一年后的变化趋势来看, 现行规范的长期挠度计算值偏小, 相当于 10 年时点的模拟计算值的 50%.

(2) 本文在对组合梁长期挠度的分析中, 探讨了交接面滑移对组合梁长期挠度的影响. 经过公式计算和计算机模拟对比可知, 即便对于设计为完全剪力连接的组合梁, 其交接面滑移引起的变形仍然很大. 因此交接面剪力连接件的合理设置是控制组合梁长期挠度的有效手段.

(3) 用本文的公式和计算机模拟分别探讨了混凝土收缩和徐变对长期挠度的影响. 结果表明, 收缩引起的变形值要大于徐变引起的变形值, 尤其对于使用荷载较小的组合梁, 收缩引起的变形值要远大于徐变引起的变形值, 而且收缩的影响主要发生在浇筑混凝土后的 3~4 个月内. 因此, 对于常见的公共建筑中使用荷载较小的组合梁, 减小浇筑初期混凝土的收缩变形, 是组合梁的长期挠度控制的有效手段.

(4) 通过计算及实测说明, 本文所研究组合梁的施工预起拱值(均为 20 mm)太小, 不能起到有效抵消长期变形的作用, 且预起拱值与钢梁的跨度并无关联, 建议增大钢梁的预起拱值, 施工起拱与跨度的关系可取为 $l/300$. 并且提议规范中增加长期荷载作用下产生的挠度允许值的有关条文.

(5) 用 FLAC^{3D} 数值模拟软件可以很好地处理组合梁中钢梁与混凝土交接面的连接问题, 不仅可以模拟等刚度的连接件, 还可以利用 FLAC^{3D} 软件内置的 FISH 语言, 对软件进行二次开发来模拟剪力随滑移变化的情况, 而且还可以利用 FLAC^{3D} 的

桩单元来直接模拟组合梁的抗剪栓钉连接件. 这使 FLAC^{3D} 软件的应用得到拓展, 也为组合梁滑移的数值模拟提供了新的思路和方法.

参 考 文 献

- [1] GB50017—2003 钢结构设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2003
- [2] 聂建国, 刘明, 叶列平. 钢-混凝土组合结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [3] 潘立本, 张苏俊. 混凝土收缩与徐变的试验研究. 河海大学学报, 1997, 25(5): 84
- [4] 孙宝俊. 混凝土徐变理论的有效模量法. 土木工程学报, 1993, 26(6): 66
- [5] 蒋丽忠, 余志武, 李佳. 均布荷载作用下钢-混凝土组合梁滑移及变形的理论计算. 工程力学, 2003, 20(2): 133
- [6] 余志武, 蒋丽忠, 李佳. 集中荷载作用下钢-混凝土组合梁界面滑移及变形. 土木工程学报, 2003, 36(8): 1
- [7] 王连广. 钢与混凝土组合结构理论与计算. 北京: 科学出版社, 2005
- [8] 王连广, 许伟, 李立新. 滑移效应影响下的组合梁变形计算公式. 沈阳建筑工程学院学报, 2000, 16(4): 254
- [9] 孙文彬. 部分剪力连接钢-混凝土简支组合梁的滑移性能分析. 长沙交通学院学报, 2001, 17(4): 55
- [10] American Institute of Steel Construction. Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: AISC, 1999
- [11] Owens G W, Knowles P R, Dowling P J. Steel Designers Manual. The Steel Construction Institute (SCI). 5th ed. Cambridge: Blackwell Science Ltd, 1992
- [12] 聂建国, 沈聚敏, 余志武. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法. 土木工程学报, 1995, 12: 11
- [13] 方立新, 宋启根, 孙逊. 组合梁考虑滑移效应时的挠度实用算法探讨. 工程力学, 1999(增刊): 123
- [14] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南. 北京: 人民交通出版社, 2005

Deflection of composite steel-concrete beams under long-term load combination

LI Da^{1,2)}, DENG Xinsui³⁾, TAN Wenhui¹⁾, MU Zaigen¹⁾, SUI Jun³⁾

1) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Yangquan College, Taiyuan University of Technology, Yangquan 045000, China

3) Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China

ABSTRACT Long-term deflection computations of two typical built-up beams in a actual project were carried out by a built-up beam long-term deflection computational method considering contraction, creep and composition plane slipping. The crag earth project analysis software FLAC^{3D} was used to the built-up beam slip-surface simulation, and the calculated, measured and computer simulated data were compared subsequently. The results show that the proposed method is fit for calculating the long-term deflection. Some advices are also proposed for the design and construction of composite beams.

KEY WORDS steel and concrete composite beam; load combination; shrinkage; creep; slip