

考虑施工误差影响的 RC 框架结构可靠性分析*

张望喜[†], 刘有, 程超男

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为分析施工误差对 RC 框架结构可靠性的影响,对某钢筋混凝土框架结构工程进行现场测量,获得了梁柱截面尺寸、保护层厚度、箍筋间距和混凝土抗压强度等施工误差的统计分布规律.基于工程结构可靠度的基本理论和承载能力极限状态方程,采用验算点法计算了实际工程中典型的框架梁和框架柱的可靠指标,并详细分析了各施工误差对构件可靠指标和结构可靠性分级的影响,以及影响钢筋混凝土结构框架结构可靠度的参数敏感性.分析结果表明,施工误差对结构构件的可靠性存在不可忽视的影响.本文研究结果有助于工程设计、施工和监管过程中把握施工误差中需严格控制的重点参数和偏差范围.

关键词:RC 框架结构;施工误差;承载能力极限状态;结构可靠度;参数敏感性

中图分类号:TU375.4; TU711

文献标志码:A

Reliability Analysis of Reinforced Concrete Frame Structure Considering the Influence of Construction Error

ZHANG Wangxi[†], LIU You, CHENG Chaonan

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to analyze the influence of construction errors on the reliability of the Reinforced Concrete frame structure, based on the on-site measurement of one real RC frame engineering, the statistical distribution of the construction error, such as the beam column section size, the thickness of protection layer, stirrup spacing and concrete compressive strength et al., was obtained. Based on the basic theory of structural reliability and the bearing capacity limit state equation, the reliability index of the typical frame beam and frame column in the real engineering was calculated by means of the checking point method. The influence of each construction error on the component reliability index and reliability grading of reinforced concrete frame structure was also analyzed, and the parameters sensitivity of the RC frame structure reliability was discovered. The construction errors have unnegligible influence on the reliability of RC frame members. The results are conducive to the control of critical parameters and its error in the design, construction and monitoring of real engineering.

Key words: Reinforced Concrete frame structure; construction errors; bearing capacity limit state;

* 收稿日期:2016-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578228), National Natural Science Foundation of China(51578228); 国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400), The National Key Research and Development Program of China(2016YFC0701400)

作者简介:张望喜(1971—),男,湖北浠水人,湖南大学副教授,工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn

structural reliability; parameter sensitivity

钢筋混凝土结构在其质量好坏的形成过程中,由于存在原材料、施工工艺、施工方法、工作人员操作行为、施工机械、施工环境等诸多因素的不确定性,很容易产生施工误差.施工误差因为会对结构性能产生一定的影响,从20世纪五六十年代开始,我国土木工程师开始进行了一些较为系统的研究和探讨.赵宪忠等^[1]对上海地区不同高层建筑结构的施工误差进行了现场检测,积累了一定的数据,并通过统计分析得出了该地区的施工误差的分布规律.徐茂波等^[2]根据大量现场调查数据,分析了结构施工过程中人为错误的规律,提出人为错误对结构基本参数的影响的数学模型,并对钢筋混凝土梁进行了考虑施工过程中人为错误的可靠度分析.陈虎成^[3]采用误差分析公式,分析和预测了在现有施工水平下的控制参数,利用可靠度思想反算出了结构施工中的最大允许误差,并与规范中最大允许偏差进行了对比.田广宇等^[4]进行了宝安体育场屋盖结构模型试验,模拟了径向锁、环锁、飞柱长度和环梁位形的施工误差,计算分析得到了各施工误差的敏感性.施工误差的存在使得研究者在进行结构分析时所采用的理想设计参数值与结构实际状态所具有的相应设计参数值产生了偏差.这样,结构的实际状态在事实上偏离了理想状态,影响结构的受力性能和可靠性能,使新建成的建筑结构可能没有设计所预期的那么可靠,这对建筑结构的日后使用无疑是一个潜在的危险.研究常见施工偏差的不确定性对建筑结构的可靠性的影响大小,可以在施工中控制影响较大的施工误差,这对于提高施工质量控制的主动性,保证建筑结构所必须的可靠度,帮助工程设计部门在框架结构可靠性计算时考虑施工质量的影响等方面具有重要意义.

本文以一典型钢筋混凝土结构为例,本次计算只针对结构构件,取出有代表性的梁、柱,从梁柱截面尺寸、保护层厚度、箍筋间距和混凝土抗压强度4个方面出发,依据可靠度理论、相关可靠度设计标准和结构设计规范,基于钢筋混凝土结构承载能力极限状态,采用MATLAB编程实现对其可靠指标的计算,并着重分析各个施工误差对结构可靠指标和结构可靠性分级的影响规律,找出此类结构的敏感性参数,用于指导结构施工质量

控制.

1 可靠性分析

1.1 可靠度的基本理论

GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》^[5]对结构极限状态的定义为:整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态为该功能的极限状态.从安全角度出发,建筑结构等土木基础设施在设计使用年限内,其承载能力必须大于作用于其上的各种荷载所引起的效应.可用下式表示:

$$R(X) > S(X) \quad (1)$$

式中: $R(X)$ 为结构抗力; $S(X)$ 为各自作用在结构上的效应; X 为影响结构抗力和效应的各随机变量.由此可定义结构的功能函数为:

$$Z(X) = R(X) - S(X) \quad (2)$$

当结构处于失效状态($Z(X) < 0$)时的概率用 p_f 表示,称为结构的失效概率,而对于结构的可靠度我国的标准GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》^[5]的定义是:结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率.在统计学中结构的可靠和失效为互不相容事件,即结构的可靠概率 p_s 与失效概率 p_f 是互补的,于是就有了 $p_s = 1 - p_f$.虽然上述关于结构失效概率 p_f 表达式的意义非常明确,但在实际应用中利用式(2)求解结构失效概率往往非常困难.因为影响结构抗力和效应的因素很多,很多时候都没有办法明确表示功能函数.本文只针对功能函数处于显式状态的情况.在中国,根据GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》^[5]规定,结构可靠指标与失效概率存在以下关系:

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

式中: β 为结构或构件的可靠指标; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数.

1.2 验算点法

目前,随着研究的不断深入,分析结构可靠度的方法有中心点法、一次二阶矩法、验算点法、响应面法和蒙特卡罗法等.一次可靠度的方法包含了中心点法、一次二阶矩法及验算点法.中心点法不需进

行过多的数值计算,缺点是计算出的结果与实际情况相差较大;一次二阶矩法是将非正态随机变量进行正态随机变换及进行非线性功能函数的近似线性化,适应性和精度均较好;验算点法是基于一次二阶矩理论的基本方法提出的^[6].它能将非正态的随机变量加以考虑,进而能够在计算工作量增加不多的情况下,可靠指标 β 有一个精度较高的结果,求得满足“验算点”的设计值.本文采用的方法是一次可靠度方法中的验算点法.

1.2.1 功能函数

本文主要针对承载能力极限状态进行可靠度分析.对于柱而言主要考虑的是柱大偏心和柱小偏心受压承载力极限状态;对于梁而言主要考虑受弯承载力极限状态和受剪承载力极限状态.

1)柱大偏心受压构件承载力极限状态功能函数为:

$$Z = \left[\alpha_1 b x f_c \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s' (h_0 - a') \right] - (G + Q)e \quad (4)$$

式中: x 为混凝土受压区高度; a' 为受压钢筋合力点至受压区边缘的距离; G, Q 分别为经过荷载导算后的恒荷载均值和活荷载均值.由轴向作用力的平衡可得:

$$x = [(G + Q) - f_y A_s' + f_y A_s] / (\alpha_1 b f_c) \quad (5)$$

2)柱小偏心受压构件承载力极限状态功能函数为:

$$Z = [\alpha_1 b f_c h_0^2 \xi (1 - 0.5\xi) + f_y A_s' (h_0 - a')] - (G + Q)e \quad (6)$$

$$\xi = \left[(G + Q) - f_y A_s' - \frac{f_y A_s \beta_1}{\xi_b - \beta_1} \right] / \left[\alpha_1 b f_c h_0 - \frac{f_y A_s}{\xi_b - \beta_1} \right] \quad (7)$$

3)梁受弯承载力极限状态功能函数为:

$$Z = \left[f_y A_s \left(h_0 - \frac{f_y A_s}{2\alpha_1 b f_c} \right) \right] - \frac{l_0^2}{8} (G + Q) \quad (8)$$

4)梁受剪承载力极限状态功能函数为:

$$Z = (0.7 f_t b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0) - 0.5(G + Q) l_n \quad (9)$$

1.2.2 可靠度的计算

利用验算点法计算结构或构件的可靠指标时,当功能函数中存在非正态随机变量,首先需要将非正态随机变量当量正态化.正态当量化要满足两个

条件:在验算点 x_i^* 处 X_i 和 X_i 的累积分布函数和概率密度函数分别对应相等,即

$$F_{X_i}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - u_{X_i}}{\sigma_{X_i}}\right) = F_{X_i}(x_i^*) \quad (10)$$

$$f_{X_i}(x_i^*) = \frac{1}{\sigma_{X_i}} \varphi\left(\frac{x_i^* - u_{X_i}}{\sigma_{X_i}}\right) = f_{X_i}(x_i^*) \quad (11)$$

根据当量正态化条件,可得到当量正态化变量的均值和标准差.由公式(10),(11),解得

$$u_{X_i} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \sigma_{X_i} \quad (12)$$

$$\sigma_{X_i} = \frac{\varphi\{\Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]\}}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (13)$$

式中: x_i^* 为验算点坐标值; $F_{X_i}(\cdot)$ 和 $f_{X_i}(\cdot)$ 分别为随机变量 X_i 的累计分布函数和分布密度函数; $\Phi(\cdot)$ 和 $\varphi(\cdot)$ 分别为标准正态分布函数和分布密度函数.

在 1.2.1 节中提到的功能函数式中,恒载效应不拒绝正态分布,活载效应随机变量的分布可以通过监测数据估计,抗力的分布类型未知,在本文计算中假定为正态分布,因此,只需要对活载效应随机变量当量正态化.本文的随机变量为 b, f_c, a', s, G, Q ,为了下文描述方便,我们用 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$ 表示.

假设 $Z = g_x(X) = 0$ 为结构的极限状态方程,再设 $x^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*, x_7^*)$ 为极限状态面上的一点,即 $g_x(x^*) = 0$,在 x^* 处将 Z 按 Taylor 级数展开使功能函数线性化,得到如下公式:

$$Z_L = g_x(x^*) + \sum_{i=1}^7 \frac{\partial g_x(x^*)}{\partial X_i} (X_i - x_i^*) \quad (14)$$

则可得到结构的可靠度指标为:

$$\beta = \frac{u_{ZL}}{\sigma_{ZL}} = \frac{g_x(x^*) + \sum_{i=1}^7 \frac{\partial g_x(x^*)}{\partial X_i} (u_{X_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[\frac{\partial g_x(x^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (15)$$

由式(15)可知,可靠度指标 β 是验算点坐标 x^* 的函数,不能直接求解.而由文献[7]可知,验算点坐标与可靠度指标具有以下关系:

$$x_i^* = u_{X_i} + \beta \sigma_{X_i} \cos \theta_{X_i}, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (16)$$

式中:

$$\cos \theta_{X_i} = -\frac{\partial g_x(x^*)}{\partial X_i} \sigma_{X_i} / \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[\frac{\partial g_x(x^*)}{\partial X_i} \sigma_{X_i} \right]^2},$$

$$i=1,2,3,4,5,6,7 \quad (17)$$

将式(15)(16)(17)联立可求解可靠度指标 β 和验算点坐标值,但过于麻烦,本文按以下步骤进行迭代计算求解:

1)取初始验算点, $x^{*(0)} = (x_1^{*(0)}, x_2^{*(0)}, x_3^{*(0)}, x_4^{*(0)}, x_5^{*(0)}, x_6^{*(0)}, x_7^{*(0)})$,一般可设 $x^{*(0)} = (ux_1, ux_2, ux_3, ux_4, ux_5, ux_6, ux_7)$;

2)计算 u_{x_i} 和 σ_{x_i} , 替换 u_{x_7} 和 σ_{x_7} ;

3)利用式(17)计算 $\cos\theta_{x_i}, i=1,2,3,4,5$;

4)利用式(15)计算 β ;

5)利用式(16)计算新的验算, $x^{*(1)} = (x_1^{*(1)}, x_2^{*(1)}, x_3^{*(1)}, x_4^{*(1)}, x_5^{*(1)}, x_6^{*(1)}, x_7^{*(1)})$;

6)以新的 x^* 重复步骤2)至5),直至前后两次 $\|x^*\|$ 之差 $<$ 允许误差 ϵ 则停止运算.此时求出的 β 值为要求的可靠度指标.

2 误差的测量和统计方法

截面尺寸的测量方法是用钢尺直接在梁或柱的两端和中间分别测量截面尺寸,量取6个数据,取它们的平均值作为本根梁的截面尺寸;箍筋间距的测量方法是在梁和柱中间用钢筋探测仪连续确定6根钢筋的位置,用钢尺测量出箍筋间距,取其平均值作为本根构件的箍筋间距;保护层厚度的测量方法是在梁的两端和中部、柱的两端和中部均匀选取6个点,首先用钢筋探测仪测量出保护层厚度,然后在所测的部位任选一处,用电锤打到钢筋表面,用游标卡尺量取保护层的厚度,若其大小与钢筋探测仪测出的保护层厚度相差不大,则取钢筋探测仪测出的6个数据的平均值作为该构件的保护层厚度;混凝土抗压强度的测量方法是用非破损检验测试法中的回弹法,每个构件取10个测区,每个测区回弹16个值,同时采用酚酞酒精滴定法对相应区域混凝土表面进行碳化深度的测量,具体的检测事宜和数据的后期处理都是根据JGJ/T 23—2021《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》进行.

为了为便于对不同名义的施工误差进行统一比较和分析,本文均取用 $r=a/a_k$ (a 为实测值, a_k 为设计值)对数据进行分析整理.先统计出实测数据

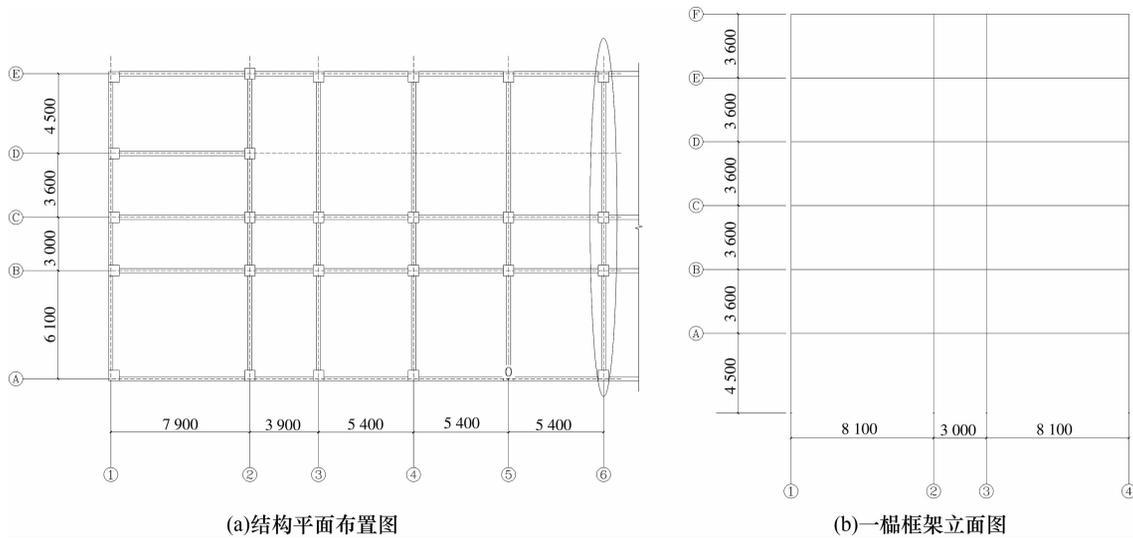
的均值和标准差,再结合概率论与数理统计的知识,做 χ^2 拟合检验,根据实测值与设计值的比值 a/a_k 的大小分别将上述实测数据各分成相应的子区间,以实测值与设计值的比值 a/a_k 做横坐标,以其出现的频数做纵坐标,绘出偏差的直方图及其走势曲线^[8].

3 实例运用

基于上述可靠度计算方法和实测统计方法,选取了一个6层的钢筋混凝土框架结构,首层层高为4.5 m,其他层高均为3.6 m,建筑面积为14 126 m².该工程设计使用年限50年,环境类别一类;建筑结构安全等级为二级,抗震设防烈度6度,设计基本地震加速度为0.05 g,设计地震分组为第1组;场地类别二类,特征周期 $T_g=0.35$ s;地面粗糙度B级,50年一遇基本风压0.45 kN/m².经PKPM软件设计,柱混凝土强度等级为C30,梁、板混凝土强度等级为C25;梁、板、柱受力钢筋均采用HRB400,其余采用HPB300.柱截面尺寸为600 mm \times 600 mm,配置的受拉钢筋面积为 $A_s=1\ 017$ mm²,受压钢筋面积为 $A_s=1\ 256$ mm²,梁截面尺寸为250 mm \times 500 mm,计算跨度为 $l_0=7.5$ m,净跨度 $l_n=6.9$ m,纵筋截面面积 $A_s=2\ 154$ mm²,箍筋采用双肢箍A8@100.图1为该工程的结构平面布置图和一根框架立面图.

3.1 统计分布规律

本工程共有框架柱230根,框架梁380根.由于工程量过大,共选取了206根框架柱和312根框架梁的截面尺寸、260根构件的箍筋间距和303根构件的保护层厚度、92根框架梁和92根框架柱的混凝土抗压强度进行了现场测量.为了便于分析和对 χ^2 进行拟合检验,取200根框架柱和300根框架梁的截面尺寸、260根构件的箍筋间距、300根构件的保护层厚度、90根梁和90根柱的混凝土抗压强度的实测数据进行统计分析并绘出偏差的频率直方图及其走势曲线,分别如图2,图3,图4和图5所示.具体各变量的统计分布规律见表1.

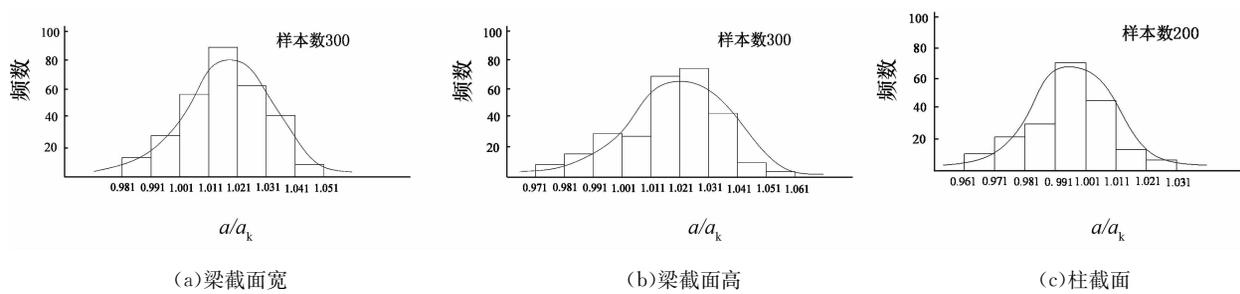


(a)结构平面布置图

(b)一榀框架立面图

图 1 结构平面布置图与一榀(⑥轴)框架立面图

Fig.1 Plane layout of structure and elevation of a plane framework(at the 6th axis)



(a)梁截面宽

(b)梁截面高

(c)柱截面

图 2 截面尺寸偏差的统计分布图

Fig.2 Sectional size deviation distribution

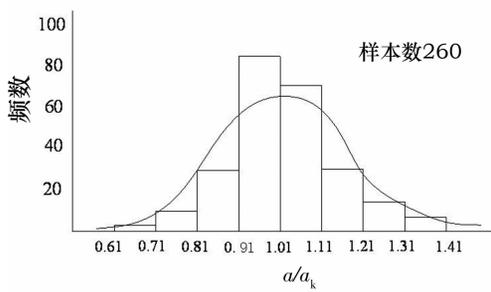


图 3 箍筋间距统计分布图

Fig.3 Stirrup spacing deviation distribution

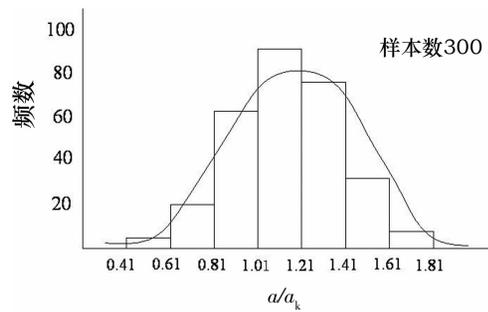
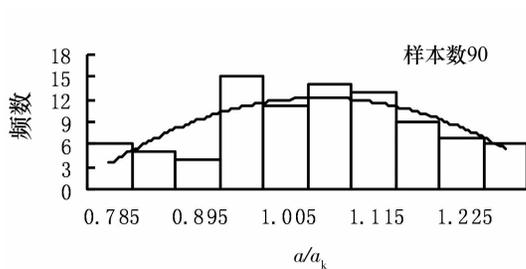
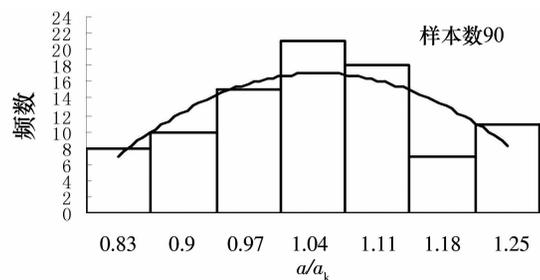


图 4 保护层厚度偏差统计分布图

Fig.4 Protective layer thickness deviation distribution



(a)框架梁



(b)框架柱

图 5 混凝土抗压强度偏差统计分布图

Fig.5 Deviation distribution of concrete compressive strength

表1 施工误差的统计分布规律

Tab.1 Statistical distribution of construction errors

检验项目	实测平均值	验收规范允许偏差范围	变异系数	假设分布
梁截面宽度偏差	3.25 mm	8 mm	0.013	正态分布
梁截面高度偏差	-4.39 mm	8 mm	0.016	正态分布
柱截面尺寸偏差	1.85 mm	8 mm	0.010	正态分布
箍筋间距偏差	7.34 mm	20 mm	0.210	正态分布
保护层厚度偏差	4.57 mm	5 mm	0.150	正态分布
梁混凝土抗压强度	30.1 N/mm ²	25 N/mm ²	0.204	正态分布
柱混凝土抗压强度	34.1 N/mm ²	30 N/mm ²	0.137	正态分布
恒荷载 G	1.06(均值与标准值之比)		0.070	正态分布
活荷载 Q	0.698(均值与标准值之比)		0.228	极值 I 型

3.2 极限承载力状态可靠度计算

3.2.1 框架柱(大偏心受压)

取本工程的6轴交D轴的第5层柱进行分析,经荷载导算,作用的恒荷载标准值 $G_k=1\ 369\text{ kN}$,活荷载标准值 $Q_k=684\text{ kN}$,轴心力作用点到受拉钢筋合力作用点的距离 $e=590\text{ mm}$.经计算该柱为大偏心受压构件.这里采用大偏心受压承载力极限状态方程,即公式(4)和公式(5)进行可靠度的计算.从表2可以看出,考虑施工误差后的结构可靠度指标明显下降,其中考虑误差时可靠度指标下降4.5%,表明考虑施工误差是有必要的.单独考虑柱截面尺寸偏差时可靠度指标下降2.5%;单独考虑保护层厚度偏差时可靠度指标下降1.4%;单独考虑抗压强度偏差时可靠度指标下降5.41%.表明对于大偏心的柱而言,混凝土强度偏差对结构可靠度的影响最大,柱截面尺寸次之,保护层厚度的影响最小.

表2 大偏心受压柱在各施工误差下的可靠度指标

Tab.2 Reliability index of large eccentric compression columns under different construction errors

施工误差名称	可靠度指标 β
柱截面高度偏差	3.42
保护层厚度偏差	3.46
混凝土抗压强度偏差	3.32
未考虑施工误差	3.51
同时考虑各种施工误差	3.35

3.2.2 框架柱(小偏心受压)

取本工程的6轴交D轴一层柱进行分析,经荷载导算,作用的恒荷载标准值 $G_k=3\ 332\text{ kN}$,活荷载标准值 $Q_k=1\ 961\text{ kN}$,轴心力作用点到受拉钢筋合力作用点的距离 $e=143\text{ mm}$.经计算该柱为小偏心受压构件.采用小偏心受压承载力极限状态方程,即公式(6)和公式(7).从表3可以看出,考虑施工误差后的结构可靠度指标明显下降,其中考虑施工误

差时可靠度指标下降6.87%,比大偏心受压柱受到的影响要大.单独考虑柱截面尺寸偏差时可靠度指标下降2.5%;单独考虑保护层厚度偏差时可靠度指标下降1.4%;单独考虑抗压强度偏差时可靠度指标下降5.41%.表明对于小偏心的柱而言,混凝土强度偏差对结构可靠度的影响最大,柱截面尺寸的影响也较大,保护层厚度的影响最小.

表3 小偏心受压柱在各施工误差下的可靠度指标

Tab.3 Reliability index of small eccentric compression columns under different construction errors

施工误差名称	可靠度指标 β
柱截面尺寸偏差	3.36
保护层厚度偏差	3.45
混凝土抗压强度偏差	3.29
未考虑施工误差	3.49
同时考虑各种施工误差	3.25

3.2.3 框架梁

取本工程的6交B-D轴框架梁进行分析,经荷载导算,作用的恒荷载标准值 $G_k=25.28\text{ kN/m}$,活荷载标准值 $Q_k=11.70\text{ kN/m}$.对于梁,本文将对其受弯和受剪截面承载力可靠度进行分析,受弯和受剪极限承载力方程分别为公式(8)和(9).经计算分析可知(表4),各施工误差使得结构的可靠度降低,对于梁受弯可靠度而言,混凝土抗压强度偏差的影响最大,截面高度偏差次之,其次是保护层厚度和截面高度;对于梁受剪可靠度而言,箍筋间距的影响最大,混凝土抗压强度次之,其次是截面高度和保护层厚度的偏差,梁截面宽度的影响很小,可忽略.同时考虑各施工误差时,受弯可靠度比未考虑施工误差时下降7.18%,受剪可靠度比未考虑施工误差时下降9.21%,表明施工误差对梁而言,对抗剪可靠度的影响更大.

表 4 框架梁在各施工误差下的可靠度指标

Tab.4 Reliability index of frame beam under each construction error

施工误差	受弯可靠度	受剪可靠度
梁宽偏差	3.41	3.46
梁高偏差	3.35	3.42
箍筋间距偏差	3.38	3.23
保护层厚度偏差	3.40	3.44
混凝土抗压强度偏差	3.25	3.32
未考虑施工误差	3.42	3.47
同时考虑各种施工误差	3.23	3.29

3.3 施工误差的随机变量敏感性分析

本节分别就施工误差的均值和标准差对可靠度的影响做了详细剖析.这里考虑的误差都是对结构的不利情况.我们假定均值或标准差在一定范围内变动,当均值大小变化时,假定标准差大小不变;标准差大小变化时,均值大小不变^[9-11].本节的框架柱和梁的参数选取和上一节相同,我们计算了均值(标准差)在(85%,115%)之间变动时结构构件的可靠度指标,并将之绘成可靠度随误差变化的关系曲线,见图 6—图 13.

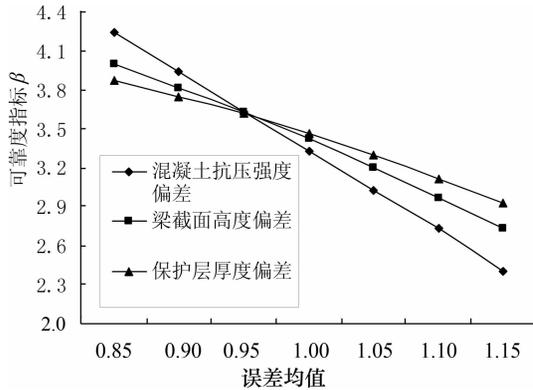


图 6 大偏心受压柱的可靠度对误差均值的敏感度
Fig.6 Sensitivity of the reliability of the large eccentric compression columns to the mean of the error

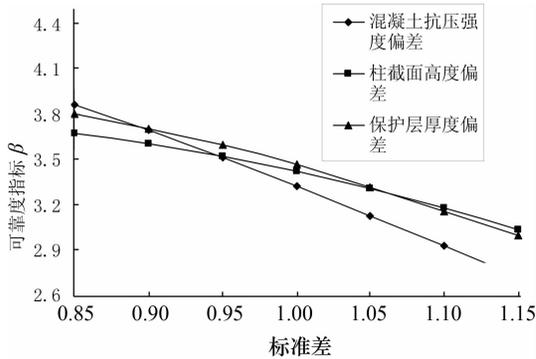


图 7 大偏心受压柱的可靠度对误差标准差的敏感度
Fig.7 Sensitivity of the reliability of the large eccentric compression column to the standard deviation of the error

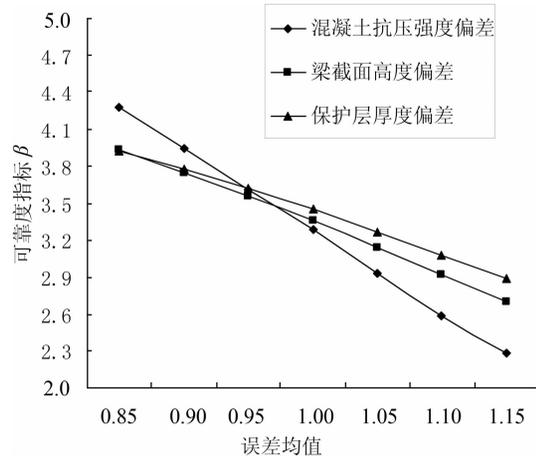


图 8 小偏心受压柱的可靠度对误差均值的敏感度
Fig.8 Sensitivity of the reliability of the small eccentric compression columns to the mean of the error

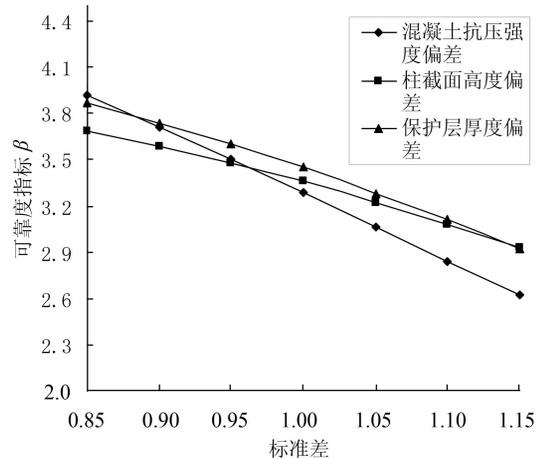


图 9 小偏心受压柱的可靠度对误差标准差的敏感度
Fig.9 Sensitivity of the reliability of the small eccentric compression column to the standard deviation of the error

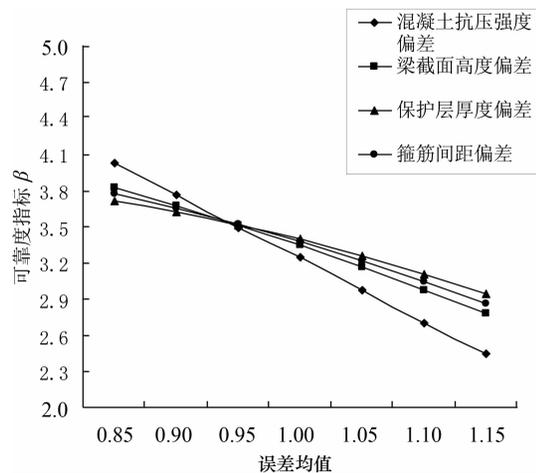


图 10 梁的受弯可靠度对误差均值的敏感度
Fig.10 Sensitivity of the beam's flexural reliability to the mean of the error

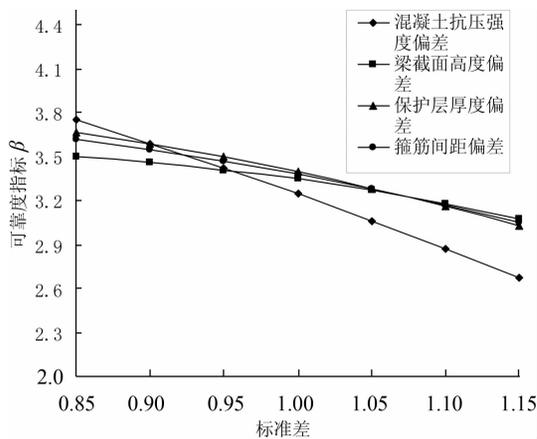


图 11 梁的受弯可靠度对误差标准差的敏感度
Fig.11 Sensitivity of the beam's flexural reliability to the standard deviation of the error

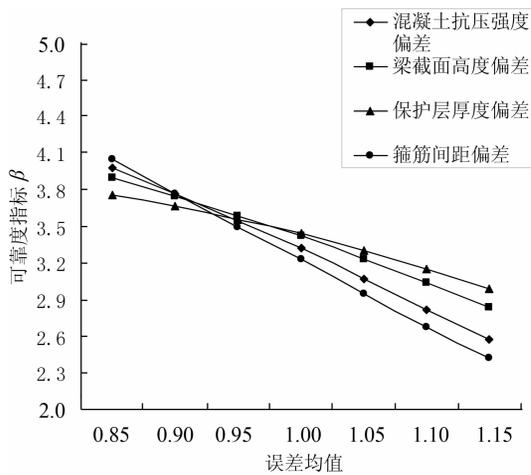


图 12 梁的受剪可靠度对误差均值的敏感度
Fig.12 Sensitivity of the shear reliability of the beam to the mean of the error

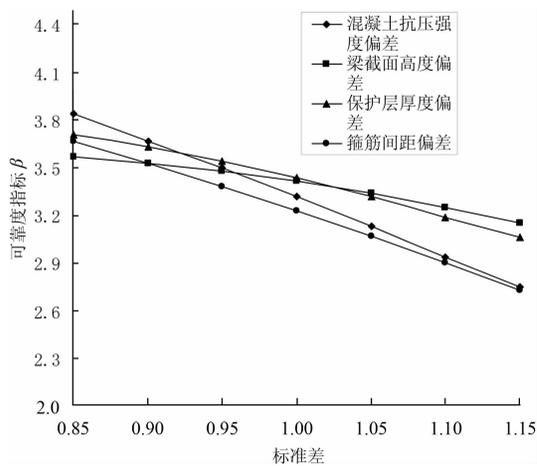


图 13 梁的受剪可靠度对误差标准差的敏感度
Fig.13 Sensitivity of the beam to the standard deviation of the error

由计算结果可见,对于框架柱而言:1)大偏心柱和小偏心柱的可靠度变化规律基本一致,都是随

着误差的均值或标准差的增大而减小,且小偏心柱对误差的敏感程度更大.2)在柱的可靠度对误差均值的敏感度中,对混凝土抗压强度的误差最敏感,其次是梁高的误差,最后是保护层厚度的误差.3)在柱的可靠度对误差离散性的敏感度中,混凝土抗压强度的误差最敏感,其次是保护层厚度的误差,最后是梁高的误差.表明存在施工误差的情况下,保护层厚度的施工误差的离散性对柱截面承载力可靠度的影响也是不容忽视的.4)对于大偏心压柱而言,当混凝土抗压强度偏差均值增大 5%时,可靠性等级由 a_u 降低到 b_u ,进一步增大到 10%时,可靠性等级降低到 c_u .而当标准差增大 15%时,结构的可靠性等级也由 a_u 降低到 c_u ;截面尺寸和保护层厚度偏差均值增大 15%时,可靠性等级由 a_u 降低到 b_u ,其标准差的变化对可靠性分级的影响相对来说较小.对于小偏心压柱而言,影响更加明显,当混凝土抗压强度偏差均值增大 5%时,可靠性等级由 a_u 降低到 c_u ,进一步增大到 10%以上时,可靠性等级降低到 d_u ,结构可能处于濒危状态.其标准差增大 10%时,结构的可靠性等级也由 a_u 降低到 c_u ;截面尺寸和保护层厚度偏差对可靠度分级的影响也很小^[12].

对于框架梁而言,由计算结果可见:1)梁的受弯可靠度和受剪可靠度随误差的变化规律基本一致,都是随着误差的均值或标准差的增大而减小,且受弯可靠度对误差的敏感程度更大.2)在梁受弯可靠度对误差均值的敏感度中,对混凝土抗压强度的误差最敏感,其次是梁高的误差,最后是箍筋间距的误差和保护层厚度的误差;在梁受弯可靠度对误差离散性的敏感度中,对混凝土抗压强度的误差最敏感,其次是保护层厚度的误差,最后是箍筋间距的误差和梁高的误差.3)在梁受剪可靠度对误差均值的敏感度中,对箍筋间距的误差最敏感,其次是混凝土抗压强度的误差,最后是梁高的误差和保护层厚度的误差;在梁受剪可靠度对误差离散性的敏感度中,对混凝土抗压强度的误差最敏感,其次是箍筋间距的误差,最后是保护层厚度的误差和梁高的误差.4)对于梁而言,当混凝土抗压强度偏差均值每增大 5%,其抗弯可靠性等级降低一个等级,增大 15%时,可靠性等级降低到 d_u ,其标准差增大 15%时,结构的可靠性等级也由 a_u 降低到 c_u ;截面尺寸、保护层厚度偏差、箍筋间距影响相对来说较小,均值增大 15%时,可靠性等级由 a_u 降低到 b_u ;而其抗剪可靠度等级影响因素中,除了混凝土抗压强度偏差影响很大,箍筋间距偏差也影响很大.当箍

筋间距偏差均值增大5%时,结构的可靠性等级由 a_u 降低到 b_u ,增大15%时,可靠性等级降低到 c_u 。当其标准差增大到15%时,结构的可靠性等级由 a_u 降低到 b_u ,表明箍筋间距偏差的均值和标准差都是不容忽视的,应予以合理控制^[12]。

4 结 论

本文通过研究施工误差和结构可靠度的关系,利用可靠度的基本理论,对某具体钢筋混凝土框架结构进行了具体分析,利用该项目的施工误差现场测量数据,对框架梁和柱的承载能力极限状态进行可靠性分析计算,得到以下结论:

1)通过现场实测,工程框架结构的截面(外围)尺寸、保护层厚度、箍筋间距、混凝土抗压强度均存在一定施工误差。箍筋间距和保护层厚度的施工偏差离散性较大,部分实测结果偏离验收规范允许限值。

2)通过对考虑施工误差时的可靠度计算可知,对于框架柱,可靠度影响最大的参数是混凝土抗压强度的施工误差,其次是截面尺寸误差,保护层厚度的施工误差对柱截面承载力可靠度的影响不大;对于框架梁的受弯截面承载力可靠度影响最大的参数是混凝土抗压强度和梁截面高度施工误差,混凝土抗压强度的影响稍大于梁截面高度误差,截面宽度误差对可靠度的影响很小,可忽略;对于框架梁的受剪截面承载力可靠度,箍筋间距的施工误差对其影响最大,混凝土抗压强度次之,最后是截面高度和保护层厚度。

3)通过可靠度指标受施工误差影响的敏感性分析,得到了可靠度指标对各施工误差参数的敏感程度以及施工误差参数的变化对结构可靠性分级的影响规律,获取了钢筋混凝土框架结构施工质量误差控制的重点参数,依次为:混凝土抗压强度、箍筋间距、截面高度、保护层厚度。通过重点参数的施工误差控制,为实现设计目标可靠度提供保障。

参考文献

- [1] 赵宪忠,顾祥林,沈祖炎.高层建筑混凝土结构施工误差分析[J].工程力学(增刊),1996:674-678.
ZHAO Xianzhong, GU Xianglin, SHENG Zhuyan. Construction error analysis of tall building concrete structure [J]. Engineering Mechanics(S), 1996:674-678. (In Chinese)
- [2] 徐茂波,刘西拉.钢筋混凝土梁的人为错误影响分析[J].工程力学,1992,9(2):60-67.
XU Maobo, LIU Xila. Human error analysis of reinforced concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 1992, 9(2): 60-67. (In Chinese)
- [3] 陈虎成.悬臂浇筑预应力砼桥梁基于可靠度思想的施工误差控制分析[D].上海:同济大学土木工程学院,2004:7-8.
CHEN Hucheng. Construction error control analysis based on reliability theory of cantilever casting prestressed concrete bridge[D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2004: 7-8. (In Chinese)
- [4] 田广宇,郭彦林,张博浩,等.宝安体育场车辐式屋盖结构施工误差敏感性试验及误差限值控制方法研究[J].建筑结构学报,2011,32(3):11-18.
TIAN Guangyu, GUO Yanlin, ZHANG Bohao, et al. Experiment on sensitivity to construction tolerance and research on tolerance control criteria in spoke structural roof of Baoan Stadium[J]. Journal of Architectural Structure, 2011, 32(3): 11-18. (In Chinese)
- [5] GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
GB 50068—2001 Unifide standard for reliability design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (In Chinese)
- [6] 贡金鑫,仲伟秋,赵国藩.工程结构可靠性基本理论的发展与应用(1)[J].建筑结构学报,2002,23(4):2-9.
GONG Jinxin, ZHONG Weiqiu, ZHAO Guofan. Developments and applications of reliability theories for engineering structures(1)[J]. Journal of Architectural Structure, 2002, 23(4): 2-9. (In Chinese)
- [7] 贡金鑫.工程结构可靠度计算方法[M].大连:大连理工大学出版社,2003:58-60.
GONG Jinxin. Calculation method for reliability of engineering structure[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003: 58-60. (In Chinese)
- [8] 程超男.施工误差对钢筋混凝土框架结构可靠度的影响[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2009:51-61.
CHENG Chaonan. Influence of construction error on reliability of reinforced concrete frame structures[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2009: 51-61. (In Chinese)
- [9] 邓铁军.施工方案评审的可靠性分析方法[J].湖南大学学报:自然科学版,2001,28(1):88-92.
DENG Tiejun. Reliability analysis method for evaluation of construction scheme[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2001, 28(1): 88-92. (In Chinese)
- [10] 陈华建.混凝土结构及构件对随机变量的敏感性分析[D].武汉:武汉理工大学土木工程与建筑学院,2007:25-38.
CHEN Huajian. Sensitivity analysis of concrete structures and components to random variables[D]. Wuhan: School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2007: 25-38. (In Chinese)
- [11] 胡长林,张风波.基于蒙特卡罗法的混凝土桥梁可靠度随机变量敏感性分析[J].中国水运,2014,14(10):329-331.
HU Changlin, ZHANG Fengbo. Reliability analysis of concrete bridges based on monte carlo method[J]. China Water Transport, 2014, 14(10): 329-331. (In Chinese)
- [12] GB 50292—2015 民用建筑可靠性鉴定标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
GB 50292—2015 Standard for appraisal of reliability of civil buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (In Chinese)