

文章编号:1671-6833(2010)03-0070-03

半刚接钢框架系统刚度的可靠性分析

侯颖, 霍达

(北京工业大学 建工学院, 北京 100124)

摘要: 将梯度优化法与有限元法相结合,探讨了隐式功能函数可靠度算法,通过算例对比分析半刚接与刚接钢框架系统刚度的主要失效模式,同时用PNET法探讨了节点转动刚度和P-Δ二阶效应对结构系统刚度可靠度的影响.结果表明,半刚接与刚接钢框架的系统刚度的主要失效模式基本一致,层间位移较大形成了结构系统刚度的主要失效模式;半刚性连接对结构系统刚度可靠度的影响较大,并且增大了P-Δ二阶效应的影响.

关键词: 半刚性节点;钢框架;系统刚度;可靠性;P-Δ二阶效应

中图分类号: TU391;TU311.2

文献标识码: A

0 引言

梁柱连接性能直接影响钢结构在荷载作用下的整体行为.传统的钢框架结构分析和设计都是假定梁和柱的连接是完全刚性,或者是理想铰接.然而根据近几十年的试验研究表明,刚性连接总有一定的柔性,而铰接连接也具有一定的刚性,全部连接形式都处在两者之间,即半刚性连接.目前,常用的梁柱半刚性连接类型有^[1]:腹板单角钢连接、腹板双角钢连接、顶板连接、上下翼缘角钢连接、腹板带双角钢的上下翼缘角钢连接、外伸式/平齐式端板连接、T型钢连接.

近年来,研究工作着重于半刚性钢框架的节点试验和力学分析,然而,在半刚性钢框架被普遍应用于工程实践之前还需要大量的工作,特别是相关的可靠性研究.针对刚度可靠性方面的研究相对匮乏,作者采用PNET方法探讨了半刚接钢框架系统刚度的可靠度,并分析节点转动刚度和几何非线性等因素的影响,为半刚性钢框架的分析和设计奠定了基础.

1 结构的单元刚度矩阵

1.1 半刚性连接的转角-位移关系

半刚性连接梁柱节点的形式很多,各类型节点由于其组成部分参数不同导致节点力学性能差

异很大,国内外的研究者通过半刚性连接节点 $M-\theta$ 关系曲线试验数据的拟合,提出了多个计算模型,如线性模型、多项式模型、B样条模型、幂函数模型和指数函数模型等^[2].笔者用线性化模型来代替非线性 $M-\theta$ 曲线,即 $M = R_{ki}\theta$.

1.2 梁单元刚度矩阵

框架中的柱是连续的,没有任何连接,而框架梁端有半刚性连接.通常用两端带有转动弹簧的梁来考虑梁柱节点的半刚性^[3].设梁单元两端弹簧的转动刚度分别为 R_{kA} 和 R_{kB} ,则弹簧的相对转角 θ_{kA} 、 θ_{kB} 可表示成: $\theta_{kA} = \frac{M_A}{R_{kA}}$, $\theta_{kB} = \frac{M_B}{R_{kB}}$.

由一般结构力学方法得,半刚性梁单元的刚度矩阵为^[4]

$$[k_b] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\alpha_{ii} + 2\alpha_{ij} + \alpha_j) \frac{EI}{L^3} & \alpha_{ii} \frac{EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\alpha_{ii} + \alpha_j) \frac{EI}{L^2} & \alpha_{ii} \frac{EI}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -(\alpha_{ii} + 2\alpha_{ij} + \alpha_j) \frac{EI}{L^3} & -(\alpha_{ii} + \alpha_j) \frac{EI}{L^2} & 0 & (\alpha_{ii} + 2\alpha_{ij} + \alpha_j) \frac{EI}{L^3} & \alpha_{ij} \frac{EI}{L^2} \\ 0 & (\alpha_{ij} + \alpha_j) \frac{EI}{L^2} & \alpha_{ij} \frac{EI}{L} & 0 & -(\alpha_{ij} + \alpha_j) \frac{EI}{L^2} & \alpha_j \frac{EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\alpha_{ii} = \frac{1}{R} \left(4 + \frac{12EI}{LR_{kA}} \right)$, $\alpha_{ij} = \frac{1}{R} \left(4 + \frac{12EI}{LR_{kB}} \right)$,

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{R}.$$

收稿日期:2009-12-15;修订日期:2010-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50378007)

作者简介:侯颖(1974-),女,宁夏人,北京工业大学建工学院博士研究生,主要从事结构可靠性分析方面的研究,

E-mail:yinghoumail@163.com.

$$R = \left(1 + \frac{4EI}{LR_{kA}}\right) \left(1 + \frac{4EI}{LR_{kB}}\right) - \left(\frac{EI}{L}\right)^2 \left(\frac{4}{R_{kA}R_{kB}}\right) \quad (2)$$

当 $R_{kA} = R_{kB} = +\infty$ 时,上式即为刚接钢框架单元的一阶弹性刚度矩阵。

1.3 考虑几何非线性的单元刚度矩阵

考虑 $P-\Delta$ 效应的梁柱单元刚度矩阵可表示为两个矩阵 $[k_0]$ 和 $[k_g]$ 的总和。其中, $[k_0]$ 是一阶单元刚度矩阵, $[k_g]$ 几何刚度矩阵为

$$[k_g] = \frac{N}{L} \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ 0 & \frac{6}{5} & & & & \text{SYM} \\ & & \frac{L}{10} & \frac{2L^2}{15} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & -\frac{6}{5} & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{6}{5} & \\ & & \frac{L}{10} & -\frac{L^2}{30} & 0 & -\frac{L}{10} & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N 以受拉力为正,受压力为负。

2 结构刚度失效模式可靠度分析

笔者定义框架的柱顶水平位移、层间相对位移、梁挠度的变形值 δ_i 超过其任一允许值 δ_i^* 时,结构刚度失效。根据《钢结构设计规范》(GB50017-2003)^[5] 关于钢框架结构变形的限值规定,在风荷载标准值作用下,多层框架柱顶水平位移不宜超过 $H/500$,层间相对位移不宜超过 $h/400$,梁挠度不宜超过 $1/360$ 。

由于结构刚度失效模式功能函数考虑了几何非线性的影响及外荷载和节点转动刚度的随机性,其显式无法得到,则相应的极限状态函数 $g_i(X) = \delta_i^* - \delta_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为随机变量 X 的隐函数, δ_i^* 为变形限值。因此,首先将 X 转化为相互独立的标准正态随机变量 Y :

$$Y = TX + B$$

极限状态方程 $g_i(X)$ 相应地成为 $G_i(Y)$, 将 $G_i(Y)$ 在设计验算点 Y^* 处 Taylor 展开^[6-7], 并取至一次项,有

$$G_i(Y) = G_i(Y^*) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial G_i(Y^*)}{\partial Y_j} (Y_j - Y_j^*) \quad (4)$$

设计验算点 Y^* 可采用如下的迭代公式得到:

$$Y_{j+1} = \left(Y_j^T \alpha_j + \frac{G(Y_j)}{\|\nabla G(Y_j)\|} \right) \alpha_j \quad (5)$$

$$\alpha_j = - \frac{\nabla G(Y_j)}{\|\nabla G(Y_j)\|}$$

由于结构功能函数 $G(Y)$ 为隐式函数,梯度向量 $\nabla G(Y)$ 可由下式得到:

$$\nabla G(Y) = (T^{-1})^T \nabla g_i(\delta^*, \delta) = (T^{-1}) T [J_{\delta^*} \nabla g_{\delta^*}(\delta^*, \delta) + J_{\delta} \nabla g_{\delta}(\delta^*, \delta)] \quad (6)$$

式中: T 为变换矩阵; $\nabla g_i(\delta^*, \delta)$ 、 $\nabla g_{\delta^*}(\delta^*, \delta)$ 、 $\nabla g_{\delta}(\delta^*, \delta)$ 分别为结构极限状态函数对于 x 、 δ^* 、 δ 的梯度向量; J_{δ^*} 、 J_{δ} 分别是 δ^* 和 δ 对 x 的 Jacobian 矩阵。

根据可靠指标的定义,可靠指标 β 就是原点到设计验算点 Y^* 的距离:

$$\beta = \sqrt{Y^{*T} Y^*} \quad (7)$$

因此结构系统的刚度失效可由各主要失效模式组成的串联模型模拟。寻找主要失效模式,进行失效模式相关性分析,采用 PNET 法,计算系统刚度可靠度。

3 算例分析

3.1 计算模型

分析半刚性节点框架结构,梁柱截面参数见表1。其结构形式和荷载状况如图1所示。荷载和节点转动刚度是随机变量服从正态分布,竖向荷载变异系数为0.1,水平荷载变异系数为0.15,节点转动刚度变异系数为0.15。

表1 梁柱截面参数

Tab. 1 Section parameter of beam and column

梁截面面积/ ($\times 10^{-4} \text{m}^2$)	梁截面惯性矩/ ($\times 10^{-8} \text{m}^4$)	柱截面面积/ ($\times 10^{-4} \text{m}^2$)	柱截面惯性矩/ ($\times 10^{-8} \text{m}^4$)
63.66	13 700	120.4	20 500

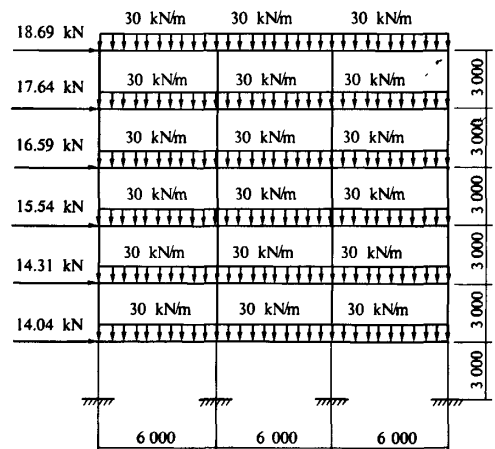


图1 结构荷载分布图

Fig. 1 Loads on the frame

3.2 刚接与半刚接钢框架系统刚度的主要失效模式

在结构可靠性分析方面,寻找结构系统的主要失效模式是非常关键的环节,因为大多数失效模式对系统失效概率贡献极微,只有寻找到主要失效模式才能快速准确地对整个系统做出可靠性评估.当梁柱连接转动刚度 $R_k = 1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 时,对算例进行分析,半刚接框架梁挠度最小可靠指标达到 8.209,相对刚接下降了 21%,作为次要失效模式省去;柱顶水平位移可靠指标为 3.427,相对刚接下降了 36%,作为主要失效模式考虑;二层层间相对位移可靠指标(见图 2)为 2.077,相对刚接下降了 42%,作为主要失效模式考虑.可见刚接与半刚接钢框架系统刚度主要失效模式基本一致.

3.3 不同转动刚度下的结构系统刚度可靠度

这里探讨半刚性连接转动刚度取不同的值时,对结构系统刚度可靠度的影响.仍取上述算例为研究对象,计算结果见图 3.

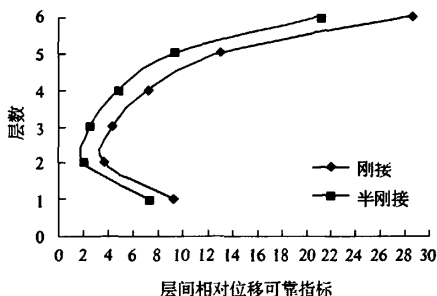


图 2 层间相对位移可靠指标

Fig. 2 Reliability index of interstorey drift

从图 3 中可以看出,当 $R_k = 1 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 时,系统可靠指标为 3.441;当 $R_k = 4 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 时,系统可靠指标 β 为 0.589,相对降低了 82%,可见合理选择梁柱连接方式对提高结构系统刚度可靠度起到事半功倍的作用.

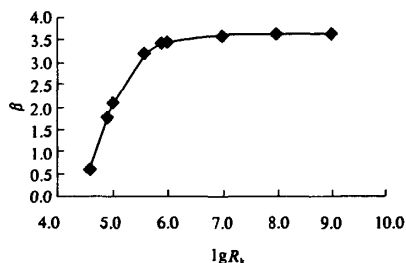


图 3 可靠指标与 $\lg R_k$ 的关系曲线

Fig. 3 Curve of reliability index - $\lg R_k$

3.4 不同转动刚度下的二阶效应对结构系统刚度可靠度的影响

半刚性连接转动刚度取不同的值时,考虑几何非线性对结构系统刚度可靠度的影响,计算结果见图 4. 其纵坐标 μ 定义为

$$\mu = \frac{\text{半刚接框架不考虑二阶效应的系统可靠指标}}{\text{半刚接框架考虑二阶效应的系统可靠指标}}$$

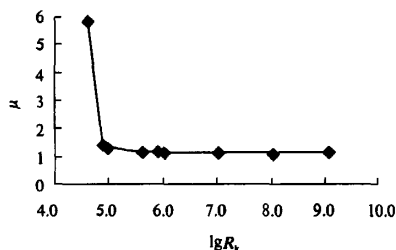


图 4 μ 与 $\lg R_k$ 的关系曲线

Fig. 4 Curve of μ - $\lg R_k$

从图 4 可以看出,节点转动刚度不同时,几何非线性对系统刚度可靠度的影响程度也是不同的.当 $R_k = 4 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 时, μ 为 5.77,可见节点转动刚度变小时,结构系统刚度可靠度降低很多,几何非线性对系统刚度可靠度的影响较大.

4 结论

(1) 笔者将梯度优化法与有限元法相结合,探讨了隐式功能函数可靠度算法.

(2) 算例分析表明,半刚接与刚接钢框架的系统刚度的主要失效模式基本一致,层间位移较大形成了结构系统刚度的主要失效模式.

(3) 节点转动刚度对结构系统刚度可靠度的影响较大,合理选用梁柱连接方式将会对改善结构系统刚度可靠度起到事半功倍的效果.

(4) 节点转动刚度不同时,几何非线性对系统刚度可靠度的影响程度也是不同的,当节点转动刚度较小时,系统刚度可靠度降低很多,几何非线性对其影响较大.

参考文献:

- [1] KISHI N, CHEN W F. Moment - rotation relations of semi rigid connections with angles [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(7): 1813 - 1834.
- [2] LEE S, MOON T. Moment - rotation model of semi - rigid connections with angles [J]. Engineering Structures, 2002, 24(2): 227 - 237.

(下转第 86 页)

Influence of Aggregate Gradation on Pavement Performance of Open - graded Large Stone Asphalt Mixes

FÚ Qi - lin¹, CHEN Shuan - fa², CHEN Hua - xin²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to analyze the influence of aggregate gradation on pavement performance of open - graded large stone asphalt mixes (OLSM), the numerical calculation method of varying I is used to design aggregate gradation of OLSM, and based on the results of immersion large - scale Marshall test, freeze - thaw split test, rutting test and bending test at low temperature, the relationships between the porosity, strength, water stability, high temperature stability, and low - temperature crack resistance of OLSM and aggregate gradation are analyzed in this paper. Research shows that with the value of I decreasing and content of coarse aggregate increasing, the porosity of OLSM increases, the strength, water stability and high temperature stability of OLSM decrease, and low - temperature crack resistance of it increases first and then decreases. Based on the technical requirements, the reasonable aggregate gradation of OLSM is recommended.

Key words: road engineering; open - graded large stone asphalt mixes (OLSM); aggregate gradation; pavement performance

(上接第 72 页)

- | | |
|---|--|
| <p>[3] LI T Q, CHOO B S, NETHERCOT D A. Connection element method for the analysis of semi - rigid frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 32(2): 143 - 171.</p> <p>[4] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.</p> | <p>[5] GB 50017 - 2003 钢结构设计规范[S].</p> <p>[6] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.</p> <p>[7] 佟晓利, 赵国藩. 一种与结构可靠度分析几何法相结合的相应面法[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 51 - 57.</p> |
|---|--|

Reliability Analysis of System Stiffness of Semi - rigid Steel Frame

HOU Ying, HUO Da

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Gradient optimization method is combined with finite element method to solve reliability problem with implicit performance function. By giving examples, dominant failure modes of system stiffness of semi - rigid steel frame are analyzed and compared with that of its corresponding rigid frame. The PNET method is adopted to discuss the effect of connection stiffness and P - Δ effect on the reliability of system stiffness of semi - rigid frame. The results show that dominant failure mode of system stiffness of semi - rigid steel frame is the interstorey drift and the same as that of its corresponding rigid frame; the semi - rigid connections have an important effect on the reliability of structural system stiffness and increase the effect of P - Δ effect on system reliability.

Key words: semi - rigid joint; steel frame; system stiffness; reliability; P - Δ second order effect