

文章编号: 1005-0523(2010)05-0034-04

截面有效抗弯刚度的影响因素分析

张显明, 胡建新

(招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:采用弯矩曲率分析方法,研究了纵筋率、轴压比和混凝土强度对截面有效抗弯刚度的影响,并分析了截面有效抗弯刚度对纵筋率、轴压比和混凝土强度的敏感性。研究结果表明:截面有效抗弯刚度随纵筋率、轴压比和混凝土强度的增加而增大,截面有效抗弯刚度对纵筋率最为敏感,对混凝土强度的敏感性次之,对轴压比的敏感性最小。

关 键 词:桥梁;抗震设计;截面有效抗弯刚度;影响因素

中图分类号:U442.55 **文献标识码:**A

基于强度的抗震设计方法一直是各国抗震规范采用的抗震设计方法,欧洲桥梁抗震设计规范(Eurocode 8)^[1]、美国各州公路及运输工作者协会(AASHTO)规范^[2]及我国《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)^[3]均采用基于强度的抗震设计方法,我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)^[4]采用两水平设防、两阶段设计的思想,即第一阶段采用弹性抗震设计,第二阶段采用延性抗震设计,并引入能力保护设计原则,其第一阶段采用的弹性抗震设计也是基于强度的抗震设计方法。基于强度抗震设计方法的基本思路是利用弹性反应谱计算结构的弹性反应,采用强度折减系数来反映结构进入塑性状态后与弹性状态的差异,通过强度折减系数对弹性反应结果进行折减,从而得到结构的设计地震力。可见,在基于强度的抗震设计方法中,弹性反应谱分析是设计基础,而截面抗弯刚度的合理取值则是设计关键。对于截面抗弯刚度的取值,美国规范和欧洲规范均采用截面有效抗弯刚度,而我国《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)和《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)中的弹性设计阶段采用毛截面刚度,在《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)中的延性设计阶段对延性构件采用截面有效抗弯刚度。郭磊等^[5]对截面抗弯刚度取值对抗震设计结果的影响进行了分析,论述了采用截面有效抗弯刚度进行抗震设计的合理性。截面有效抗弯刚度并不是一个常量,随着截面等效屈服弯矩的变化而变化。有必要对影响截面有效抗弯刚度的因素进行逐一分析。

1 截面有效抗弯刚度的定义

对于钢筋混凝土构件而言,在一定强度的反复荷载作用下,由于混凝土开裂及裂缝的扩展,构件的截面弹性刚度会发生退化。在图 1 所示的钢筋混凝土构件力一位移关系曲线中, P 点为受拉钢筋的首次屈服,对应的屈服力和屈服位移为 F'_y 和 Δ'_y , K_{eff} 为原点 O 和 P 点连线所对应的割线刚度,阴影部分代表受拉钢筋未屈服前的滞回反应。可以看出,在受拉钢筋屈服前,钢筋混凝土构件仍处于弹性范围内,构件在反复荷载作用下的刚度较接近于割线刚度 K_{eff} ^[6-7]。因此,对地震作用这种往复作用而言,取 K_{eff} 近似作为构件的有效截面刚度是合理的。相应地对截面而言,在实际的弯矩一曲率关系曲线图(见图 2)中,定义原点 O 和 P_1 点连线所对应的割线刚度 EI_{eff} 为构件的截面有效抗弯刚度,即

$$EI_{\text{eff}} = \frac{M'_y}{\varphi'_y} = \frac{M_y}{\varphi_y} \tag{1}$$

式(1)中: M'_y 和 φ'_y 分别为受拉钢筋首次屈服点 P_1 对应的屈服弯矩和屈服曲率; P_2 点为理想弹塑性轴力一弯矩一曲率(P - M - φ)曲线对应的等效屈服点,其相应的等效屈服弯矩和等效屈服曲率 M_y 和 φ_y ,其值可根据图 2 中两个阴影面积相等求得^[4,7-10]。

截面有效抗弯刚度随等效屈服弯矩和等效屈服曲率而变化,因此,影响截面等效屈服弯矩和等效屈服

曲率的因素将直接影响截面有效抗弯刚度,对截面有效抗弯刚度的影响因素分析转化为各影响因素条件下的截面弯矩—曲率分析。

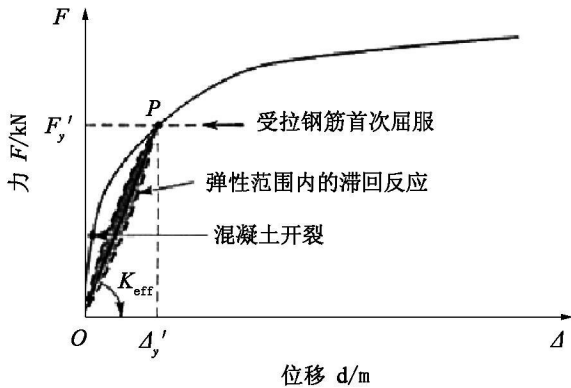


图 1 力—位移关系

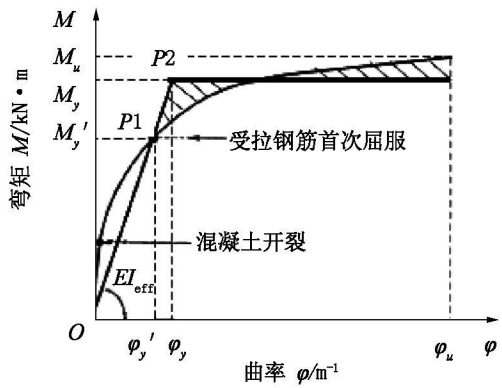


图 2 截面弯矩—曲率关系

2 纵筋率对截面有效抗弯刚度的影响

截面纵筋率 ρ 定义如下

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} \quad (2)$$

式(2)中: A_{st} 为截面纵筋总面积; A_g 为毛截面面积。纵筋率对截面有效抗弯刚度的影响主要是通过对截面屈服弯矩的影响而产生的。为了研究纵筋率对截面有效抗弯刚度的影响,分别选取纵筋率为 0.006, 0.01, 0.02, 0.03 和 0.04 的几种圆形截面(采用纵筋截面积 A_{st} 保持不变,通过调整截面尺寸来达到给定纵筋率的方法),纵筋采用 8Φ16 mm,混凝土为 C40,混凝土强度采用标准强度 26.8 MPa,弹性模量为 32.5 GPa。分别计算了轴压比 $\zeta=0.1$, $\zeta=0.2$ 和 $\zeta=0.3$ 三种情况下的截面有效抗弯刚度值 EI_{eff} ,并将截面有效抗弯刚度 EI_{eff} 与截面毛截面抗弯刚度 EI_c 的比值绘于图 3 中。

由图 3 可以看出,截面有效抗弯刚度随着纵筋率的增加而增大,纵筋率在 0.006~0.04 之间时,截面有效抗弯刚度与纵筋率间的关系近似成线性增长关系。当纵筋率为 0.006(《公路桥梁抗震设计细则》规定的最小纵筋率)时,对于常见的轴压比介于 0.1~0.2 之间的构件截面,其截面有效抗弯刚度仅为截面毛截面抗弯刚度的 30%左右;而当纵筋率为 0.04(《公路桥梁抗震设计细则》规定的最大纵筋率)时,对于常见的轴压比介于 0.1~0.2 之间的构件截面,其截面有效抗弯刚度能达到截面毛截面抗弯刚度的 55%左右。

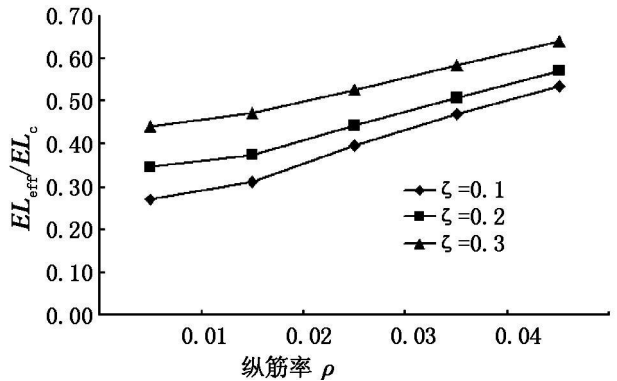


图 3 纵筋率对 EI_{eff} 的影响

3 轴压比对截面有效抗弯刚度的影响

为了研究轴压比对截面有效抗弯刚度的影响,分别选取纵筋率为 0.01 和 0.02 的两种圆形截面(采用纵筋截面积 A_{st} 保持不变,通过调整截面尺寸来达到给定纵筋率的方法),纵筋采用 8Φ16 mm,混凝土为 C40,混凝土强度采用标准强度 26.8 MPa,弹性模量为 32.5 GPa。分别计算了上述两种纵筋率情况下,轴压比 $\zeta=0.05\sim0.35$ (轴压比增量 $\Delta\zeta=0.025$)时的截面有效抗弯刚度值 EI_{eff} ,并将截面有效抗弯刚度 EI_{eff} 与截面毛截面抗弯刚度 EI_c 的比值绘于图 4 中。

由图 4 可以看出,截面有效抗弯刚度随着轴压比的增加而增大,轴压比在 0.05~0.35 之间时,截面有

效抗弯刚度与轴压比间的关系近似成线性增长关系。当轴压比小于 0.25 时,截面有效抗弯刚度随轴压比的增加而增加的幅度相对较小,而当轴压比大于 0.25 后,截面有效抗弯刚度随轴压比的增加而增加的幅度则要大些。此外,由图 4 还可以看出,在不同纵筋率下,轴压比对截面有效抗弯刚度的影响是不同的,随着纵筋率增大,轴压比对截面有效抗弯刚度的影响趋于减小。

4 混凝土强度对截面有效抗弯刚度的影响

在研究混凝土强度对截面有效抗弯刚度的影响时,选取轴压比 $\zeta=0.1, 0.2$ 和 0.3 的三种截面,其纵筋率 ρ 均为 0.02 。计算了上述 3 种截面在混凝土强度等级分别为 C35, C40, C45, C50 和 C55 (混凝土强度取相应的标准强度值)时的截面有效抗弯刚度值 EL_{eff} ,并将截面有效抗弯刚度 EL_{eff} 与截面毛截面抗弯刚度 EL_c 的比值绘于图 5 中。

由图 5 可以看出,截面有效抗弯刚度随着混凝土强度的增加而增大,对于强度等级为 C50 以下混凝土,强度对截面有效抗弯刚度的影响相对较小;而对于强度等级大于 C50 时,强度对截面有效抗弯刚度的影响会增大。此外,强度对截面有效抗弯刚度的影响与轴压比相关,轴压比较小时其影响幅度较小,而轴压比大时其影响幅度较大。

5 截面有效抗弯刚度对各影响因素的敏感性

前面分别单独对纵筋率、轴压比和混凝土强度三个因素对截面有效抗弯刚度的影响进行了分析,下面将进一步研究截面有效抗弯刚度对上述三个因素的敏感性。

由上述分析可知,截面有效抗弯刚度均随纵筋率、轴压比和混凝土强度的增加而增加,截面有效抗弯刚度与其中任意因素的关系均可近似为线性关系。因此,可以对各因素对截面有效抗弯刚度的影响关系曲线进行一元线性拟合,在拟合曲线的方差接近的情况下,各因素影响曲线斜率的大小反映截面有效抗弯刚度对该因素的敏感性。

通过一元线性拟合,得出纵筋率、轴压比和混凝土强度对截面有效抗弯刚度的影响曲线拟合曲线分别如下

$$\left. \begin{aligned} \rho: y &= 0.0593x + 0.2814, R^2 = 0.9899 \\ \zeta: y &= 0.0166x + 0.3710, R^2 = 0.9788 \\ C: y &= 0.0355x + 0.3674, R^2 = 0.9805 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: ρ 表示纵筋率; ζ 表示轴压比; C 表示混凝土强度。由式(3)可以看出,纵筋率、轴压比和混凝土强度对截面有效抗弯刚度的影响拟合曲线的斜率分别为 0.0593, 0.0166 和 0.0355,且各自方差差别较小。由此可知,在纵筋率、轴压比和混凝土强度三个影响因素中,截面有效抗弯刚度对纵筋率最为敏感,对混凝土强度的敏感性次之,对轴压比的敏感性最小。

6 结论

(1) 截面有效抗弯刚度随着纵筋率的增加而增大,近似成线性增长关系。纵筋率在 0.006~0.04 之间

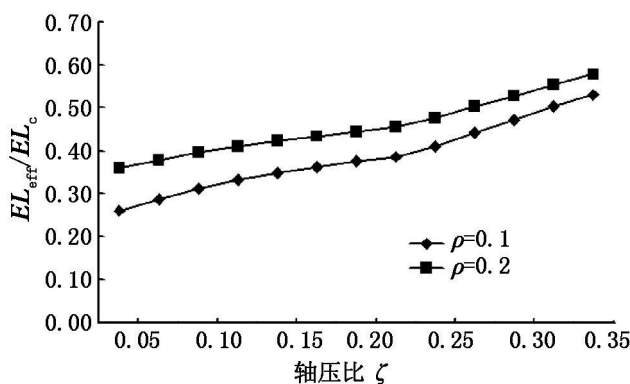


图 4 轴压比对 EL_{eff} 的影响

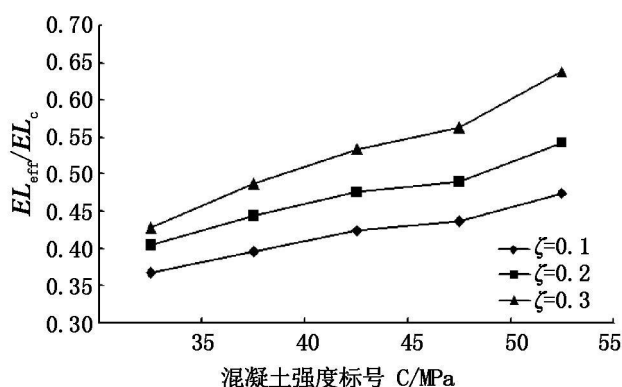


图 5 混凝土强度对 EL_{eff} 的影响

时,对于常见的轴压比介于 $0.1\sim 0.2$ 之间的构件截面,其截面有效抗弯刚度约为截面毛截面抗弯刚度的 $30\%\sim 55\%$ 。

(2) 截面有效抗弯刚度随着轴压比的增加而增大。当轴压比小于 0.25 时,截面有效抗弯刚度随轴压比的增加而增加的幅度相对较小,而当轴压比大于 0.25 后,截面有效抗弯刚度随轴压比的增加而增加的幅度则要大些。此外,在不同纵筋率下,轴压比对截面有效抗弯刚度的影响是不同的,随着纵筋率增大,轴压比对截面有效抗弯刚度的影响趋于减小。

(3) 截面有效抗弯刚度随着混凝土强度的增加而增大。对于强度等级为 $C50$ 以下混凝土,强度对截面有效抗弯刚度的影响相对较小;而对于强度等级大于 $C50$ 时,强度对截面有效抗弯刚度的影响会增大。此外,强度对截面有效抗弯刚度的影响与轴压比相关,轴压比较小时其影响幅度较小,而轴压比较大时其影响幅度较大。

(4) 在纵筋率、轴压比和混凝土强度三个影响因素中,截面有效抗弯刚度对纵筋率最为敏感,对混凝土强度的敏感性次之,对轴压比的敏感性最小。

参考文献:

- [1] CEN Eurocode 8. Design of Structures for Earthquake Resistance[S]. CEN Eurocode 8, 2002.
- [2] AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design[S]. American Association of State Highway and Transportation officials (AASHTO), 2007.
- [3] 交通部公路规划设计院,国家地震局工程力学研究所,同济大学等. JTJ004-89 公路工程抗震设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1989.
- [4] 重庆交通科研设计院. JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [5] 郭磊,李建中,范立础. 桥梁结构抗震设计中截面刚度的取值分析[J]. 同济大学学报,2004,32(11):1 423-1 427.
- [6] PANLY T, PRIESTLY M J N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings[M]. New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [7] PANLY T. An estimation of displacement limits for ductile systems[J]. Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 583-599.
- [8] PRIESTLY M J N, KOWALSKY M J. Aspects of drift and ductility capacity of rectangular cantilever structural walls[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1998, 31(2): 73-85.
- [9] PRIESTLY M J N, SEIBLE F, CALVI E M. Seismic Design and Retrofit of Bridges[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [10] PRIESTLY M J N. Displacement-based approaches to rational limit states design of new structures[A]//Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: Balkema A A, 1999: 317-333.

An Analysis of Influence Factors of Section Effective Bending Stiffness

Zhang Xianming, Hu Jianxin

(China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: Moment-curvature analysis method is used to study the influence of longitudinal reinforcement ratio, the axial compression ratio and the strength of concrete for effective bending stiffness of section, and the sensitivity of the effective bending stiffness of section to longitudinal reinforcement ratio, the axial compression ratio, and the strength of concrete. Research results show that the effective bending stiffness of section will increase if longitudinal reinforcement ratio, the axial compression ratio and concrete strength increases, and that longitudinal reinforcement ratio is the most sensitive to effective bending stiffness of section, the concrete strength is second, and the axial compression ratio is the minimum.

Key words: bridge; seismic design; effective bending stiffness of section; influence factor

(责任编辑 刘棉玲)