

文章编号:1673-2049(2008)01-0070-06

# 有限扭转对箱形截面短柱轴压受力性能的影响

陈 星,陈以一

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**为研究具有有限扭转的箱形截面短柱轴压受力性能,对其进行了弹性屈曲分析和非线性分析。揭示了初始扭转对轴压短柱中板件的荷载条件、边界条件、局部应力分布特点造成的影响:在弹性状态下,非加载边上存在弯曲约束和横向膜应力,加载边上平行加载方向的截面应力分布不均。指出了箱形截面短柱轴压刚度和极限承载力随相对扭转角增大而增大的一般规律,箱形截面短柱极限承载力对于较小相对扭转角的不敏感性,以及破坏模式同相对扭转角大小的相关性,即很大的相对扭转角会导致破坏模式由局部屈曲转变为局部的强度破坏。

**关键词:**扭转箱形截面短柱;受力性能;轴压极限承载力;有限元分析

中图分类号:TU338

文献标志码:A

## Effect of Finite Twist on Mechanical Behaviors of Box-section Stub-column Under Axial Compression

CHEN Xing, CHEN Yi-yi

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the effect of finite twist on mechanical behaviors of box-section stub-column under axial compression, the elastic buckling analysis and nonlinear analysis were performed. The effects of different twisting angles for stub-column under axial compression on load condition, boundary condition and distribution characteristic of local stresses were indicated. At elastic phase, there were bending constraint and transverse membrane stress on the unloaded edges, and the distribution of stress parallel to loading direction was nonuniform on loaded edges. It was found that axial compressive stiffness and ultimate bearing capacity of box-section stub-column would increase with the increase of relative twisting angle. Finally, different failure modes of large twisting angle were identified, which would change from local buckling to local strength failure. In addition, ultimate bearing capacity of box-section stub-column was also found to be insensitive to small relative twisting angles.

**Key words:** twisted box-section stub-column; mechanical behavior; axial compressive ultimate bearing capacity; finite element analysis

## 0 引 言

由于建筑表现的需要,在制作加工时使箱形截面构件的相邻截面绕其形心相对扭转,制成具有初

始扭转的构件。这种形式的构件在国家体育场(鸟巢)和 2010 年上海世博会建筑物中都有应用。但是,现有研究和设计方法都是针对非加工扭转的规整箱形截面<sup>[1-12]</sup>。由于箱形截面构件抗扭刚度较

收稿日期:2007-11-19

基金项目:“十五”国家科技攻关项目(2004BA904B01)

作者简介:陈 星(1982-),男,四川达州人,工学硕士研究生,E-mail:chenxing\_tj@126.com。

大,受轴压或弯曲时扭转的影响一般较小,所以,以往对此问题的深入研究较少。

初步研究表明,具有初始扭转的箱形截面柱的传力机理、变形模式和承载能力,都与规整箱形截面的特征有区别。为了给这类构件的承载力计算提供依据,本文中笔者研究了具有有限扭转的箱形截面短柱轴压受力性能。研究方法为数值分析,对象为板件宽厚比较大的箱形截面柱。

## 1 计算模型

计算模型截面为正方箱形,外包边长  $b=1\text{ m}$ ,宽厚比  $b/t=100$ ,构件高  $l$  分别取 1、2、3、4 m,绕短柱中轴线扭转,两端截面的扭转角  $\theta$  的取值范围为  $1.00^\circ\sim 40.00^\circ$ 。

设材料为理想弹塑性,弹性模量  $E=2.06\times 10^5\text{ MPa}$ ,屈服强度  $f=235\text{ MPa}$ 。利用有限元软件 ABAQUS 建立壳单元模型,单元选用 S4R。S4R 为 1 阶 4 节点 24 个自由度减缩积分单元。壳单元模型可以精确模拟扭转箱形截面短柱每个部位由于扭转产生的曲率变化。

短柱上下两端铰接,端面设置刚性板,其形心设为参考点。在加载端刚性板的参考点处,约束水平 2 个平动自由度;在反力端的参考点处,约束 3 个平动自由度和扭转自由度;在加载端刚性板参考点处,施加轴压力。

## 2 板件荷载条件和边界条件的改变

文献[1]中指出,求解单向均匀受压简支平板(图 1 中虚线)的弹性屈曲荷载时,简支边的边界条件为挠度  $w=0$ 、弯矩  $M=0$ 。求解其屈曲后强度时,由于应力重分布,还需考虑板平面内的边界约束,其假定是:板弯曲后,板的边缘仍保持直线,矩形板的外形不变;沿板的周边不产生剪切应力;平行于  $x$  方向的 2 条边在  $y$  方向的移动是自由的。

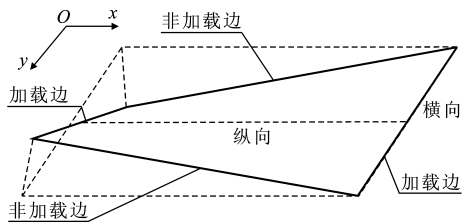


图 1 扭曲板

Fig. 1 Twisting Plate

有初始扭转时,组成箱形短柱的 4 个板件由平板变为空间扭曲板(图 1 中实线),由此导致了板件

荷载条件和边界条件的改变。以构件高  $l=2\text{ m}$ ,相对扭转角  $\theta/l=20.00^\circ\cdot\text{m}^{-1}$  的试件为例,说明这些改变。

### 2.1 附加扭转

短柱 1 条,棱边 42 个节点 ( $L_1\sim L_{42}$  沿  $x$  方向的分布,见图 2)在 2.6% 极限荷载和极限荷载下沿  $y$  方向、 $z$  方向的位移见图 3、4。 $Oxyz$  为整体坐标系。

在轴压力的作用下,沿棱边高度各节点的水平位移是不一致的,其趋势是:离反力端越远,角部面内的相对位移越大,且沿  $y$  向和  $z$  向的位移值基本一致。相同位置处,其他 3 条棱边上节点的  $y$  向、 $z$  向位移与图 3、4 所示的棱边基本相同。这说明随着轴压荷载的增加,截面绕形心旋转产生了附加扭转角  $\theta_{ad}$ 。但该例构件极限状态下的  $\theta_{ad}$  仅为  $0.81^\circ$ ,为初始扭转角的 2%,附加扭转不很明显。

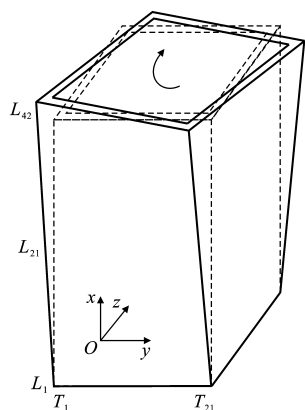


图 2 节点位置

Fig. 2 Node Positions

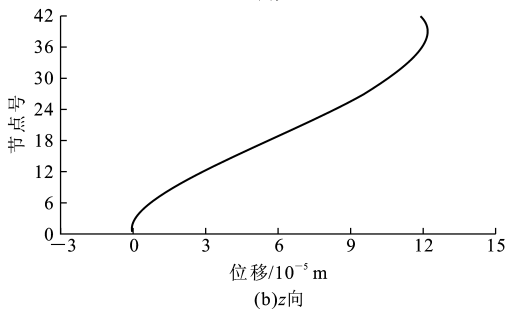
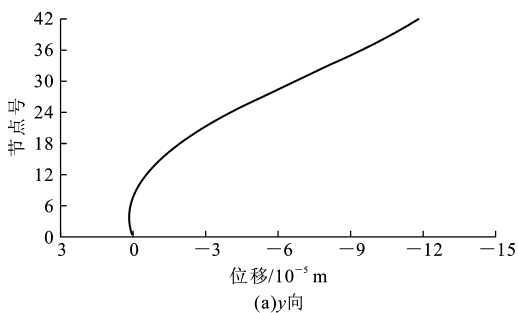


图 3 2.6% 极限荷载时的位移曲线

Fig. 3 Displacement Curves of 2.6% of Critical Load

### 2.2 板件附加弯矩

如图 5 所示,具有初始扭转的短柱,其顶部截面形心相对于底部截面的形心  $O$  虽然重合,但每个板件的中心已从  $O_1$  移动到  $O_2$ 。设柱顶轴压沿柱壁均匀分布,由轴力产生的附加弯矩使每个板件都处于

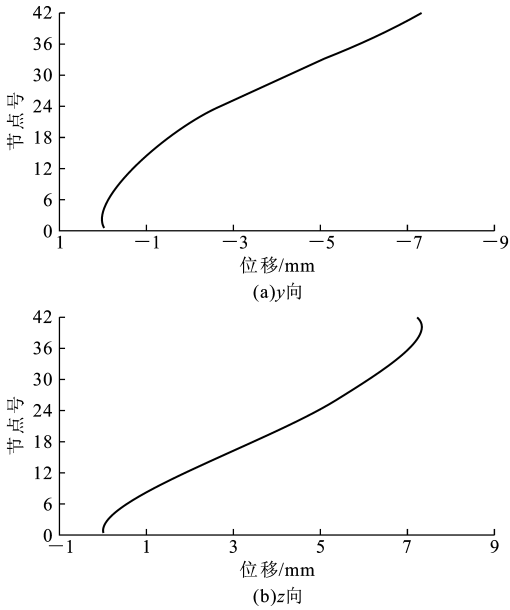


图 4 极限荷载时的位移曲线

Fig. 4 Displacement Curves of Critical Load

双向压弯状态。从图 5 可以看出,板①因偏心距  $d_1$  产生了绕  $z$  轴的附加弯矩  $M_z$ ,偏心距  $d_2$  产生了绕  $y$  轴的附加弯矩  $M_y$ ,后者使板件受到面外的弯曲。

2.2.1  $M_z$  的影响

四边简支的受压平板,屈曲前平行加载方向的截面应力保持均匀,屈曲后应力分布不均匀,边部应力大,中部应力小。而有限扭转后组成箱形截面短柱的扭曲板,由于  $M_z$  的存在,其加载边平行加载方向的截面应力分布从加载开始就是不均匀的。

图 6 为 2.6% 极限荷载和极限荷载时,加载边上 21 个节点( $T_1 \sim T_{21}$ )平行加载方向的截面应力分布。在短柱处于弹性时和进入塑性后,截面应力的分布都很不均匀,应力分布模式接近。

2.2.2  $M_y$  的影响

$M_y$  会使板面外受弯。图 7 为 2.6% 的极限荷载作用下,扭曲板挠度的等值线图。在  $M_y$  的作用下,即使在弹性状态扭曲板也会鼓起,中部的挠度明显大于两侧的棱边部分,这一变形称为“鼓起”。在构件端部,沿板的横向(图 7 中虚线),各节点的面外挠度大小不一,较大挠度的这个区域,平行加载方向的截面应力也较大(图 7 中点划线)。由于端部的约

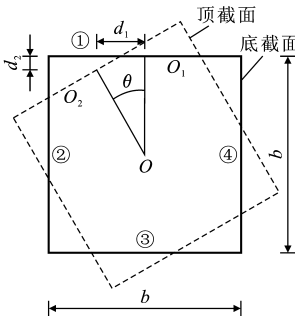


图 5 附加弯矩

Fig. 5 Additional Moments

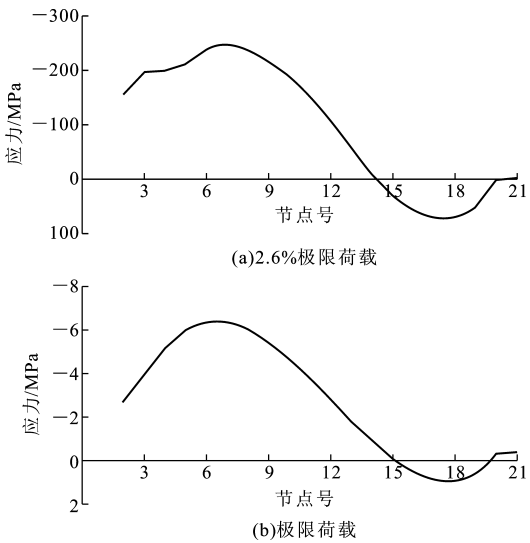


图 6 短柱的应力分布

Fig. 6 Stress Distributions of Stub-column

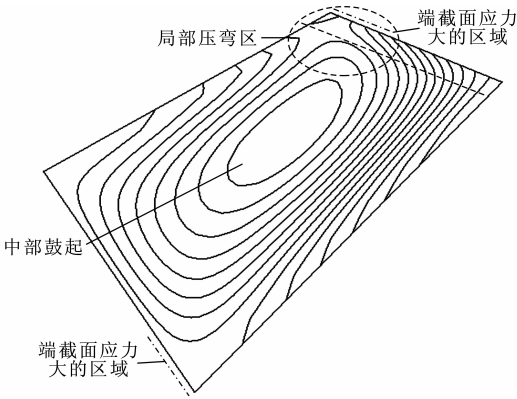


图 7 板挠度的等值线

Fig. 7 Contours of Deflection of Plate

束,端截面节点挠度为 0,则在靠近端部的位置形成了一个附加弯矩很大的区域,这个区域受力很不利。下文称之为“局部压弯区”。板鼓起后,由于其棱边仍保持直线,板上会出现横向膜应力,但此膜应力同简支平板屈曲后的膜应力不同,前者是弹性状态下变形产生的,后者是平板屈曲后变形产生的。

2.3 非加载边的弯曲约束

文献[4]中指出,箱形截面的轴心压杆,如各板件等宽等厚,则各板件都可认为是均匀受压的四边简支板,计算屈曲应力时,板件之间没有嵌固作用。而有限扭转改变了板件非加载边的边界条件,使非加载边上存在一定的弯曲约束。

综上所述,有限扭转后,箱形截面短柱每个板件的荷载条件和边界条件在弹性下就产生了如下改变:①构件有进一步增大扭转的趋势;②附加弯矩  $M_z$  使加载边平行加载方向的截面应力分布不均匀,

附加弯矩  $M_y$  使板件面外受弯,板件中部挠度大于两侧棱角部分,非加载边上出现横向膜应力;③板件的非加载边上存在弯曲约束。

### 3 屈曲分析

用特征值屈曲分析估计结构的弹性屈曲荷载,其 1 阶模态对应着最小屈曲荷载。图 8 为不同长宽比、不同相对扭转角构件对应的最小屈曲荷载。

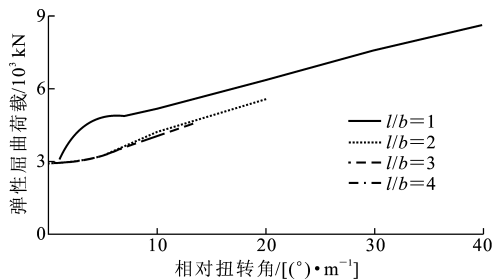


图 8 弹性屈曲荷载

Fig. 8 Elastic Buckling Loads

四边简支板的弹性屈曲荷载为

$$P_{crx} = \frac{4\pi^2}{b^2} \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

近似取箱形截面短柱弹性屈曲荷载为  $N_{cr} = 4P_{crx}b$ , 代入各数据得  $N_{cr} = 2.98 \times 10^3$  kN。由图 8 可知,有限元数值同理论解差别在 1.3%~3.7%之间,这表明所建模型的屈曲分析结果基本可靠。

由图 8 还可知,在  $l/b$  不变时,随着相对扭转角  $\theta/l$  的增大,最小屈曲荷载值变大。其原因非加载边的约束增强以及从加载起即存在横向膜应力。

图 9 为  $l=2$  m、 $\theta/l = 20.00^\circ \cdot m^{-1}$  试件的第 1 阶模态,4 个波峰没有位于板  $a-a$  轴(图 9 中虚线)上,而是分居两侧,与四边简支平板的屈曲模态对称于  $a-a$  轴不同,这表明初始扭转影响了屈曲模态。

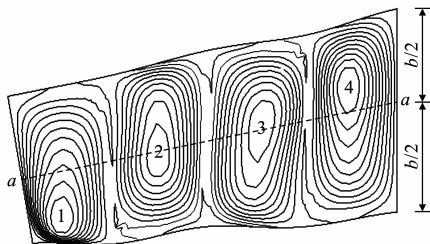


图 9 第 1 阶模态

Fig. 9 The First Mode

### 4 有限扭转下的短柱承载能力

轴压下平直薄板失稳属于稳定分岔问题。在有限初扭转时,组成箱形截面短柱的 4 块板件具有初

始扭曲。对于这类情况,线性分析通常会过高估计结构的稳定承载能力,因此有必要进行非线性分析。

本文中分析考虑了大挠度和材料弹塑性,不考虑残余应力等因素的影响。采用有限元软件 ABAQUS 中一般静态分析的位移控制算法。运算时增量步控制在目标位移的 1%~2%。图 10 为不同长宽比下,不同相对扭转角的轴压荷载-压缩位移曲线。

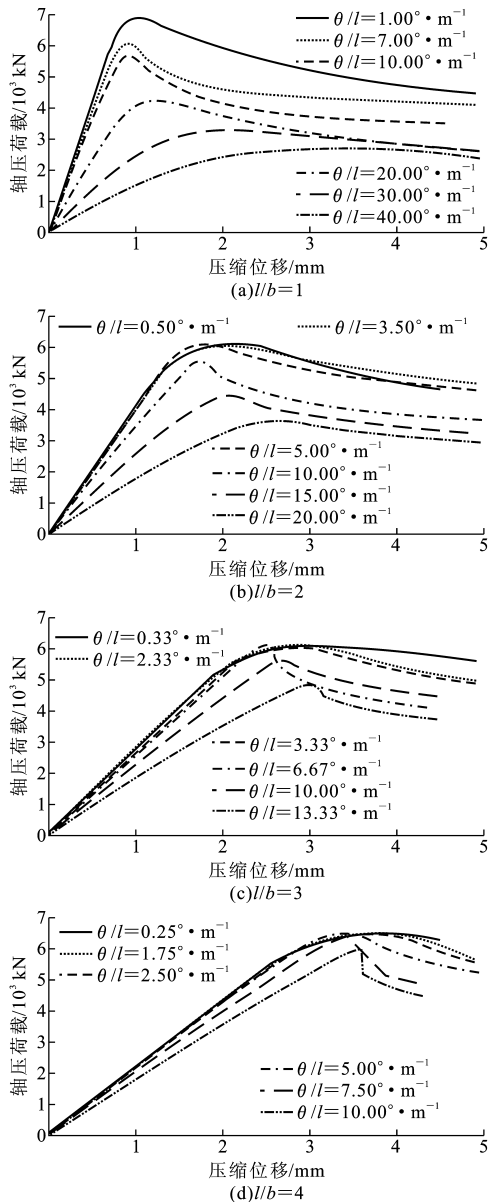


图 10 短柱荷载-位移曲线

Fig. 10 Load and Displacement Curves of Stub-column

从图 10 可以看出:①  $\theta/l$  较小时,扭转对短柱轴压刚度影响很小,当  $\theta/l$  变大到一定程度后,轴压刚度明显下降, $l/b=1$  时, $\theta/l$  为  $40.00^\circ \cdot m^{-1}$  的短柱较  $\theta/l$  为  $1.00^\circ \cdot m^{-1}$  时下降 81%,图 11 中表现了一般规律;②随  $\theta/l$  增大,极限承载力下降,此规律与

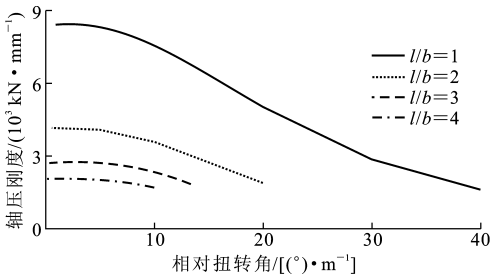


图 11 初始轴压刚度

Fig. 11 Initial Axial Compressive Stiffnesses

屈曲荷载随  $\theta/l$  增大而增大的结果不同,图 12 中进一步表达了这一规律。

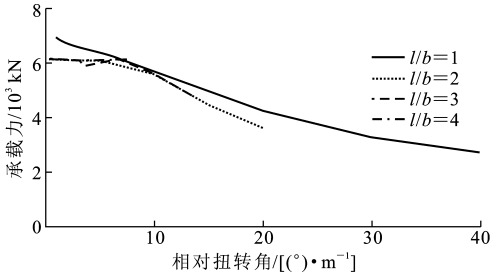


图 12 轴压承载力

Fig. 12 Axial Compressive Bearing Capacities

图 13 为  $l/b=2$  时,弹性状态下,不同相对扭转角的构件,在相同荷载下非加载边的弯矩。弯矩取构件中部 1 m 长度范围内的平均弯矩。从图 13 可以看出,随着相对扭转角的增大,非加载边的弯曲约束增强。

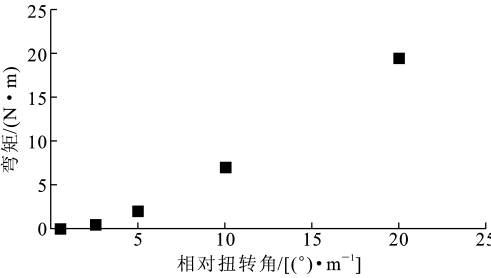


图 13 非加载边上的弯矩

Fig. 13 Moments on Unloaded Edges

分析结果表明:轴压短柱因有限扭转带来的非加载边弯曲约束、横向膜应力和加载边上平行加载方向的截面应力分布不均等因素,对轴压构件的传力机理和极限承载力产生了复杂的影响,前 2 个因素有利于承载力的提高;由线弹性分析可知,第 3 项是不利因素,压弯状态带来的几何非线性和材料非线性是线弹性分析不能体现的,这是造成弹性屈曲分析和非线性分析结果差异的主要原因。

## 5 破坏模式

有限扭转改变了箱形截面短柱每个板件的荷载条件和边界条件,从而对构件的塑性发展部位和抗力来源产生了影响。轴压短柱出现了 3 种破坏模式:①相对扭转角不大时,加载边截面应力分布不均匀现象不明显,弹性下非加载边的横向膜应力和弯曲约束也不大,随着轴力的增大,板件的抗弯刚度降低,降低到一定程度后,发生局部失稳,继而出现屈曲后强度,板件的屈曲及屈曲后强度控制了短柱的承载力,这种常见的模式称为屈曲型;②相对扭转角很大时,板中部的鼓起现象明显,尽管板中部的横向膜应力降低了中部的应力水平,但端部的局部压弯区控制了承载能力,在发生板件的局部屈曲前,局部压弯区出现强度破坏,这种破坏模式称为强度型,如图 14 所示,在局部压弯区的 Mises 应力很高(深色区域);③当相对扭转角较大时,既有屈曲型的特点,也有强度型的特点,这种破坏模式称为混合型。

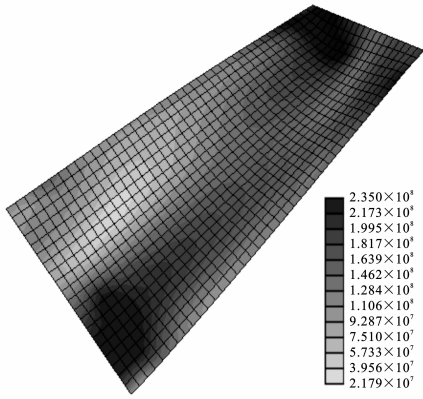


图 14 强度型破坏时 Mises 应力分布(单位:Pa)

Fig. 14 Distribution of Mises Stress Corresponding to Strength Failure (Unit:Pa)

扭曲板中部的鼓起,对构件的承载性能有显著影响。它导致在弹性状态下就出现了横向膜应力,但中部的鼓起和加载边截面应力不均匀分布也导致了端部局部压弯区的产生。相同荷载下,中部的鼓起随相对扭转角增大而增大。当破坏模式为屈曲型时,横向膜应力及其他有利因素在一定程度上抵消了由于板件形心偏移造成的附加弯矩等不利因素的影响,故屈曲型破坏模式对应的承载力不随相对扭转角增大而减小。当破坏模式为强度型时,虽然横向膜应力也随之变大,但破坏发生在端部,中部鼓起导致局部压弯区受力更为不利,则强度型对应的承载力随相对扭转角增大而减小。

## 6 结 语

(1)有限扭转改变了箱形截面短柱单个板件的荷载条件、边界条件和变形特点,使构件在处于弹性时就存在附加扭转、非加载边的弯曲约束和横向膜应力,加载边上平行加载方向的截面应力分布不均。

(2)对于本文特定的研究对象,特征值分析会高估稳定临界力。

(3)箱形截面轴压短柱的承载能力同相对扭转角相关。可能有3种破坏模式:屈曲型、强度型和混合型,由相对扭转角控制。

(4)当相对扭转角很小时,轴压短柱的屈曲临界荷载与极限承载力对扭转角并不敏感,可以近似采用平直薄板箱形截面短柱的计算结果。

### 参考文献:

### References:

- [1] 陈 骥. 钢结构稳定理论与应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.  
CHEN Ji. Theory and Application of Stability of Steel Structure[M]. Beijing:Scientific and Technical Documents Publishing House,1994.
- [2] 刘 涛. 箱形截面构件相关稳定承载力及滞回性能研究[D]. 北京:清华大学,2005.  
LIU Tao. Research on the Ultimate Load-carrying Capacity and Hysteretic Behavior of Box-section Beam-column Considering Interactive Buckling[D]. Beijing:Tsinghua University,2005.
- [3] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
CHEN Shao-fan. Guide to Stability Design of Steel Structure[M]. 2nd ed. Beijing:China Architecture and Building Press,2004.
- [4] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].  
GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures[S].
- [5] ROGER L B, FREDERICK S M. Structural Steel Designer's Handbook [M]. 3rd ed. New York:McGraw-Hill Professional,2005.
- [6] 朱俞江,童根树. 箱形截面压弯构件的平面外稳定计算[J]. 钢结构,2003,18(5):11-15.

- ZHU Yu-jiang, TONG Gen-shu. Calculation of Out-of-plane Stability of Bending Members with Box Sections[J]. Steel Construction,2003,18(5):11-15.
- [7] 刘国桥. 薄壁箱形结构的稳定研究[J]. 工业建筑,2005,35(增1):404-406.  
LIU Guo-qiao. Study on Stability of Thin-walled Box Steel Structures[J]. Industrial Construction,2005,35(S1):404-406.
- [8] 朱慈勉,沈祖炎,陈 栋. 薄壁箱形截面柱的承载力计算[J]. 同济大学学报:自然科学版,1997,25(3):268-273.  
ZHU Ci-mian, SHEN Zu-yan, CHEN Dong. Capacity Calculation of Thin-walled Box-section Columns[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1997, 25(3):268-273.
- [9] 徐秀丽,王曙光,刘伟庆,等. 薄壁箱梁截面抗扭参数的简化计算方法[J]. 中国公路学报,2007,20(2):72-76.  
XU Xiu-li, WANG Shu-guang, LIU Wei-qing, et al. Simplified Calculation Method for Torsion Parameters of Thin-walled Box Girder Section[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(2):72-76.
- [10] 刘世忠,吴 辉. 薄壁箱梁内力影响面的实用计算方法[J]. 中国公路学报,2007,20(4):71-75.  
LIU Shi-zhong, WU Hui. Practical Calculating Method on Inner Force Influence Field of Thin-wall Box Girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4):71-75.
- [11] 祝明桥,方 志,胡秀兰,等. 配筋钢纤维高强混凝土薄壁箱梁纯扭试验研究[J]. 中国公路学报,2005,18(3):43-47.  
ZHU Ming-qiao, FANG Zhi, HU Xiu-lan, et al. Experimental Research on the Reinforced Steel Fiber High-strength Concrete Pure Torsional Thin-walled Box Girder[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(3):43-47.
- [12] 曹国辉,方 志. 钢筋混凝土连续宽箱梁受力性能试验[J]. 中国公路学报,2006,19(5):46-52.  
CAO Guo-hui, FANG Zhi. Mechanical Behaviors Test of RC Continuous Box Girder with Wide Flange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5):46-52.