

圆钢管柱铰接柱脚底板设计探讨

孟宪德，张鑫，顾励

(悉地国际设计顾问有限公司, 上海 200235)

摘要：本文对圆钢管柱铰接无加劲柱脚的底板设计进行研究。汇总在钢柱受压时底板抗弯的承载力计算模型，提出在钢柱受拉时底板抗弯的承载力计算模型。采用数值分析的方法，针对影响节点承载力的主要几何参数，建立 18 个有限元模型进行参数分析，验证了本文提出的钢柱受拉时底板抗弯承载力模型。通过一个节点算例，给出底板承载力验算的详细计算过程及推荐计算公式。

关键词：圆钢管；铰接；柱脚；底板；承载力

中图分类号：*** ** 文献标识码：A

DESIGN OF PINNED CHS COLUMN UNSTIFFENED BASE PLATE

Meng Xiande, Zhang Xin, Gu Li

(CCDI, Shanghai 200235, China)

Abstract: The design model of unstiffened base plate of pinned CHS column is researched in the paper. Various models from reviewed literature are presented. The calculation models when the column is in tension are then established incorporating the observation. Based on the models, the formulas of bearing capacity are recommended. Based on the results of finite element analysis of 18 models which vary with the geometrical parameters, the evaluation on validity of the recommended model is given. Finally a calculate example is given and a calculation equation is proposed.

Keywords: CHS; pinned connection; base plate; bearing capacity.

0 引言

圆钢管柱是工程中经常采用的截面形式，并且对于荷载较小或者规模较小的工程，经常采用外露式铰接柱脚，比如钢平台，刚架，摇摆柱等。为了制作和安装的方便，通常采用图 1 所示的典型节点，特点为在 4 个角部布置 4 颗锚栓，采用无加劲底板。

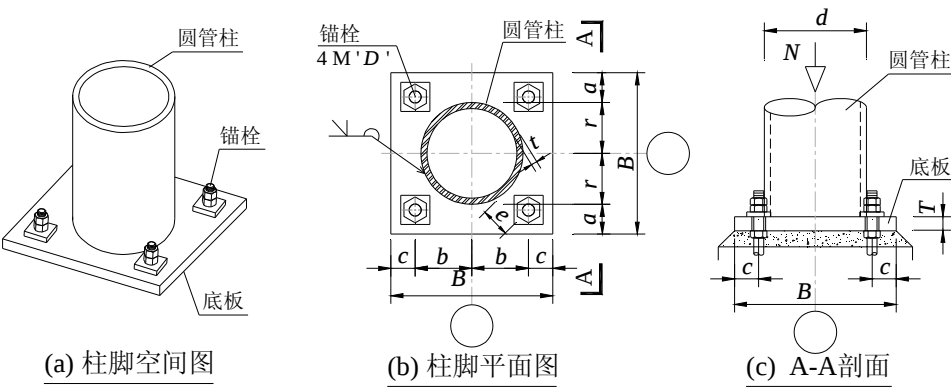


图 1 铰接柱脚详图

Fig.1 Pinned CHS column base

对于图 1 所示的圆钢管柱柱脚底板的设计，不能简单套用设计手册^[1]给出的悬臂板模型、两相邻支承板模型，未见国内的文献给出比较详细的计算方法。AISC^[2]规范给出此种钢柱受压时的底板设计方法，但未给出钢柱受拉时的底板设计方法。

本文汇总了在钢柱受压时底板抗弯的承载力计算模型，提出了在钢柱受拉时底板抗弯的承载力计算模型。采用数值分析的方法，通过参数分析，验证了钢柱受拉时的底板承载力计算模型的合理性和有效性。最后通过一个

算例，给出底板承载力的详细计算过程。

1 底板设计方法

由于底板的刚度是有限的，并且钢管柱对底板的弹性支承，底板下的混凝土反力分布是不均匀的。由于钢管外轮廓与底板形状的不一致性，并且未采用加劲板，柱受压或受拉时的底板屈服是复杂的。由于以上等因素，圆钢管柱方形无加劲底板的承载力较难确定，尚没有统一的计算方法。

底板的设计方法常见有两种：悬臂板模型、有效宽度模型。悬臂板模型一般采用塑性设计方法，假定底板下混凝土压应力均匀分布，假定塑性铰线分布，给出承载力计算公式，美国 AISC^[2]采用此方法，AISC 规范的典型模型如图 2 所示。有效宽度模型一般采用弹性设计方法，假定混凝土压应力均匀分布在柱截面下的有限宽度内，其余区域不予考虑，假定有效范围内的底板为刚性，给出承载力计算公式，欧洲 Eurocode 3^{[3][5]}采用此方法，Eurocode 3 的典型模型如图 3 所示。AISC 规范的悬臂板模型不仅适用于 H 形截面而且适用于圆管和矩形管截面的底板，Eurocode 3 的有效宽度模型仅仅适用于 H 形截面的计算方法，Kevin Clowie 等^[5]对有效宽度模型进行了修正，扩大至圆管和矩形管底板。

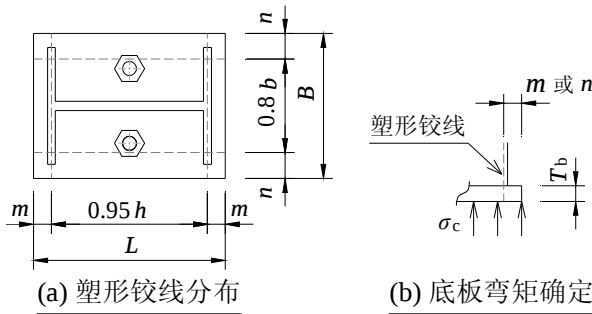


图 2 悬臂板模型

Fig. 2 Cantilevered plate model

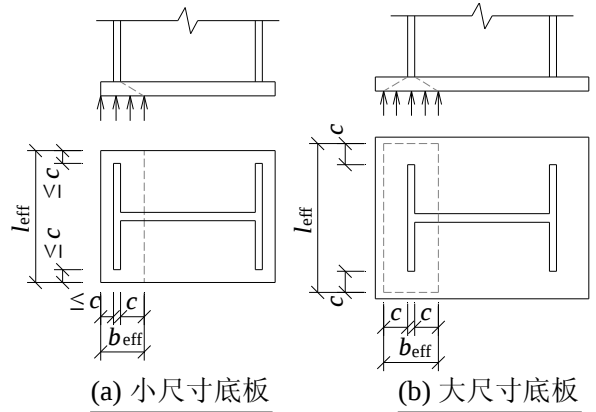


图 3 有效宽度模型

Fig. 3 Assumed rigid area model

圆钢管柱脚受压时，AISC（LRFD-荷载抗力分项系数法）计算过程详见式（1）。

$$M_r \geq M_s \quad (1a)$$

$$M_s = s_c \frac{l^2}{2} \quad (1b)$$

$$M_r = ff_y \frac{T_b^2}{4} \quad (1c)$$

$$s_c = \frac{N}{BL} \quad (1d)$$

$$l = \max(m, n) \quad (1e)$$

$$m = \frac{L - 0.8d}{2} \quad (1f)$$

$$n = \frac{B - 0.8d}{2} \quad (1g)$$

其中， M_r 为单位板宽弯矩承载力， M_s 为单位板宽弯矩内力。 f 为抗力折减系数，取 0.9。其余各参数如图 4 所示。

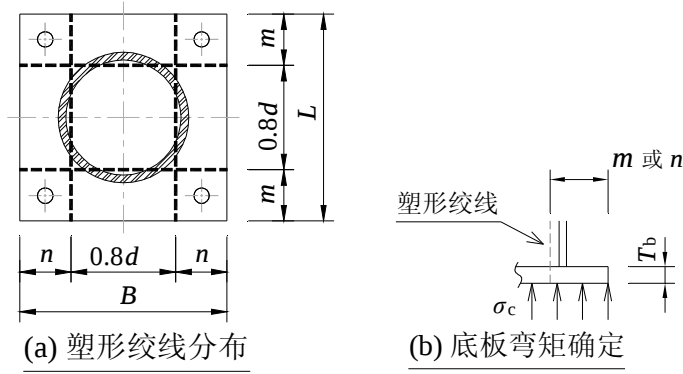


图 4 圆钢管柱悬臂板模型

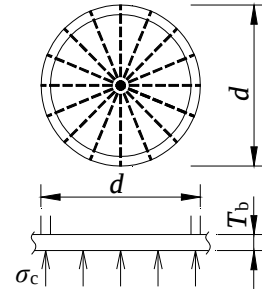


图 5 柱内底板屈服线

Fig. 4 Cantilevered plate model for CHS

Fig. 5 Yield line pattern of plate in the CHS

AISC 所给的计算方法仅适用于圆钢管外部悬臂底板的设计，ASI^[4]给出圆钢管内部的底板屈服铰线计算公式，单位板宽弯矩内力 M_s ：

$$M_s = \frac{s_c d^2}{24} = s_c \frac{(d/2\sqrt{3})^2}{2} \quad (2)$$

当钢柱受拉时，通常假定由锚栓来传递拉力，锚栓受拉引起底板受弯，最常见的模型如图 6 所示的屈服铰线：由锚栓孔往外按照 45° 扩散，延伸至钢柱的腹板/翼缘边沿，假定在扩散角范围内的腹板/翼缘边沿为有效屈服线，不考虑其他的加劲作用：

$$M_{ts} = N_t b_t \quad (3a)$$

$$M_{tr} = ff_y b_l \frac{T_b^2}{4} = ff_y (2b_t + d_0) \frac{T_b^2}{4} \quad (3b)$$

其中， N_t 为锚栓拉力。

图 6 所示的模型适用于 H 型截面和矩形截面等直线边轮廓的截面，且锚栓在直线边一侧。当钢柱为圆钢管时，屈服线将变复杂，ASI^[4]给出两颗锚栓时的计算模型，如图 7 所示。

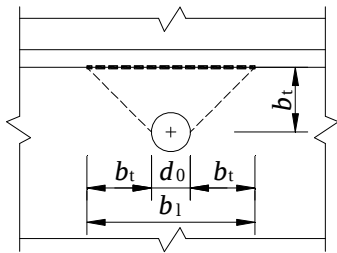


图 6 受拉底板屈服线

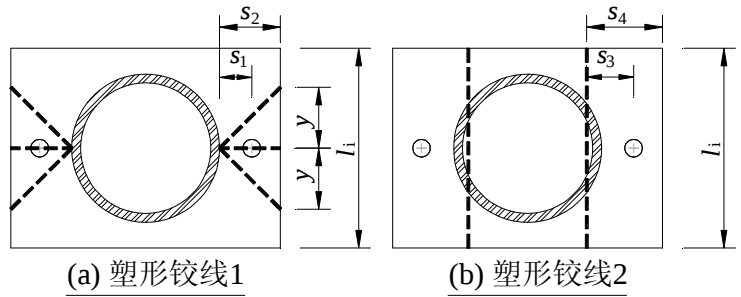


图 7 圆钢管底板受拉屈服铰线

Fig. 6 Cantilevered plate model

Fig. 7 Cantilevered plate model for CHS column

当底板为 4 颗锚栓，且锚栓位于角部时，ASI 的模型已不适用。根据拉力的传递路径，如图 8(a)、(b)所示的模型（以下简称“模型 1”、“模型 2”）应该较贴近实际。根据图 6 所示的屈服线模型，结合 AISC 给出的悬臂板模型，图 8(c)所示的模型（以下简称“模型 3”）应该更为合理，并且偏于安全。

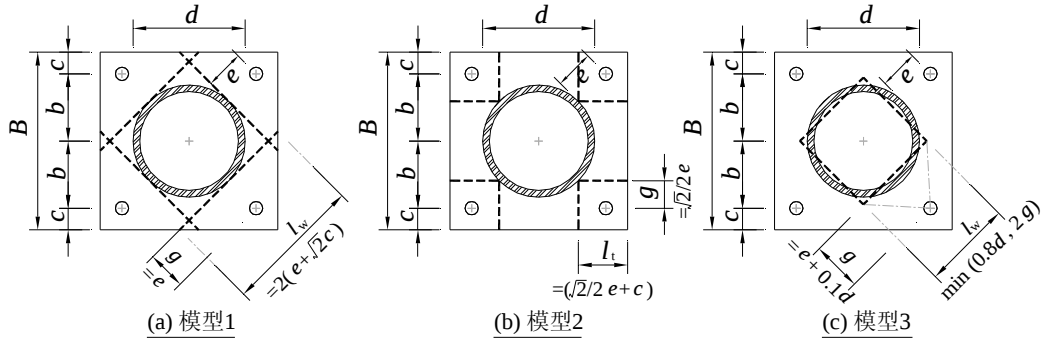


图 8 底板屈服铰线模型

Fig. 8 Cantilevered plate model for CHS column

模型 1:

$$M_{ts} = N_t g = N_t (\sqrt{2}b - d/2) \quad (4a)$$

$$M_{tr} = ff_y l_w \frac{T_b^2}{4} = ff_y (2(\sqrt{2}b - d/2 + \sqrt{2}c)) \frac{T_b^2}{4} \quad (4b)$$

模型 2:

$$M_{ts} = N_t g = N_t (b - \sqrt{2}d/4) \quad (5a)$$

$$M_{tr} = ff_y (2l_t) \frac{T_b^2}{4} = ff_y (2(b - \sqrt{2}d/4 + c)) \frac{T_b^2}{4} \quad (5b)$$

模型 3:

$$M_{ts} = N_t g = N_t (\sqrt{2}b - 2d/5) \quad (6a)$$

$$M_{tr} = ff_y l_w \frac{T_b^2}{4} = ff_y \min(0.8d, 2(\sqrt{2}b - 2d/5)) \frac{T_b^2}{4} \quad (6b)$$

采用图 8 所示的三种模型与真实的塑性铰线分布是否吻合，假定是否合理和精确，应进行研究，下一节给出相应的研究。

2 数值分析研究

有限单元计算已广泛应用于节点的承载力分析中，与试验结果比较，表明其具有良好的精度，采用此方法进行参数分析是一种快捷、实用的方法^{[6][7]}。本文采用有限单元的方法建立此种节点的参数模型，根据有限元参数分析结果，得到节点承载力与底板尺寸的关系，验证上一节建立的底板计算模型。

参数分析采用非线性分析，考虑材料非线性与几何非线性，给出节点承载力和变形的全过程曲线。在参数分析中，忽略底板混凝土约束、螺栓约束、焊缝尺寸等的影响，直接在锚栓中心采用滑动铰约束；忽略弯矩、剪力等内力，在柱端施加轴拉力进行分析。

立柱截面直径取 300mm，厚度 14mm；模型的长度 L 取 600mm(=2×d)，立柱端部（加载端）设置刚性区。模型简图如图 9 所示。

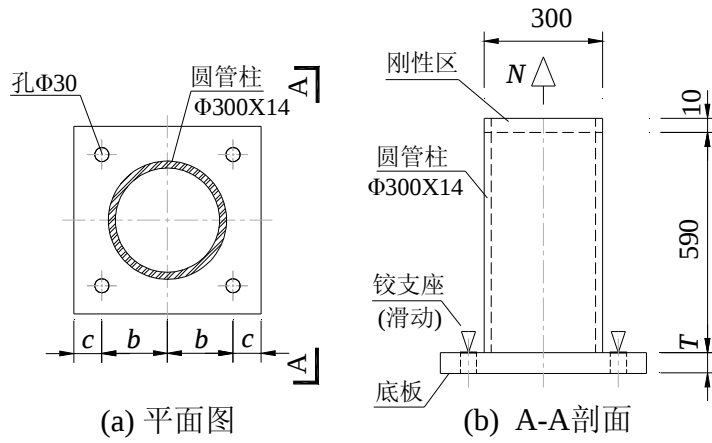


图9 参数模型简图

Fig. 9 Parameter model diagram

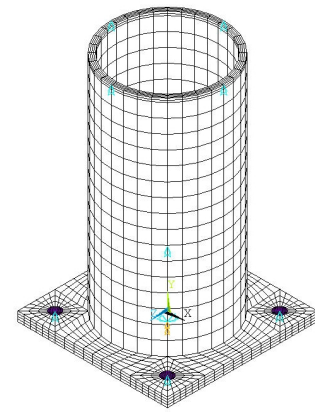


图10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

材料本构关系采用双折线模型，钢材屈服强度 f_y 为 235N/mm^2 ，弹性模量 E 为 $2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ，屈服后的折线模量 E_t 为 $(1/2000)E$ 。折线模型 E_t 取值较小，便于与计算模型比较，又兼顾分析的收敛性。

参照工程中常用尺寸，选取基本可以覆盖常用底板的参数范围： T : 20mm、25mm、30mm； b : 150mm、175mm、200mm； c : 50、75mm。采用各数据点全覆盖的方法，建立 18 个参数模型，来考察节点塑性承载力与底板厚度 T 、锚栓与柱边距离 e 、锚栓边距 c 的关系。

本文采用 ANSYS 有限元软件进行分析，采用实体单元模型，实体单元采用 SOLID45 单元类型。有限元模型细部如图 10 所示。

参数分析采用位移控制加载方法，以便于得到较完整的荷载一位移曲线，在模型端部施加 10mm 的位移。同时控制等效塑性应变不大于 0.08^[8]，采用此数值是因为钢结构的断裂尚无统一的准则，对于塑性应变不大于 0.08 的准则，是简单易操作，且较多学者能够接受的准则。

根据上述参数模型，得到图 11 所示的分析结果。图中，“位移 δ ”表示模型加载端的位移，“轴力 N ”表示加载端的轴拉力，而非锚栓拉力。图 12 给出部分参数模型的最后荷载步的等效塑性应变云图。

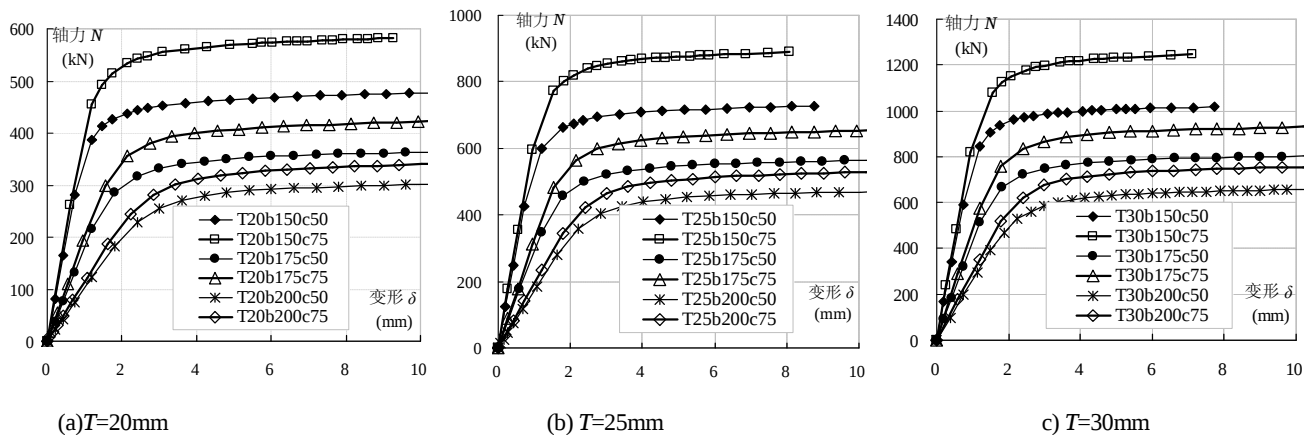
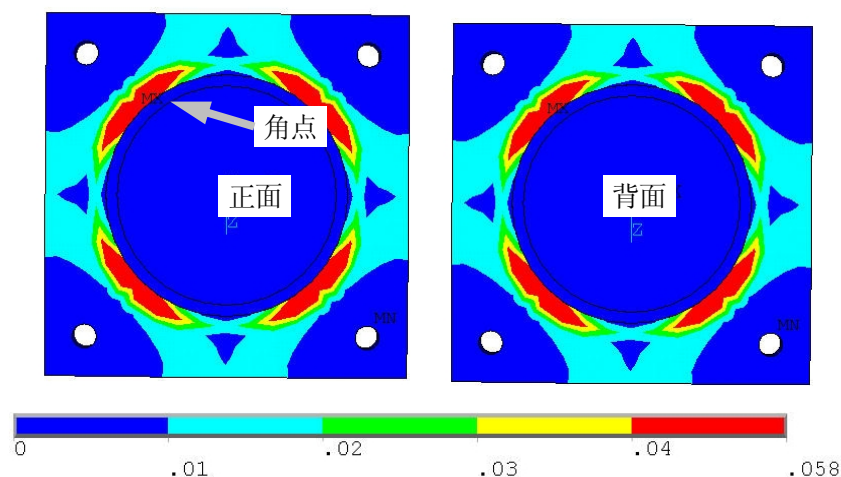
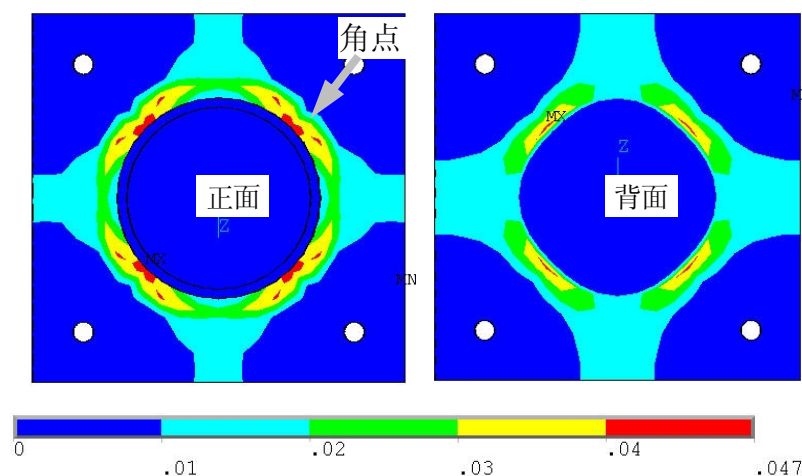


图11 圆管柱参数分析结果

Fig. 11 The parametric analysis results



(a) 模型 T20b175c50 的等效塑性应变



(b) 模型 T25b200c75 的等效塑性应变

图 12 参数分析结果

Fig. 12 The parametric analysis results

根据图 11 所示的轴力-变形曲线，汇总得到表 1 所示的各参数模型的底板塑性承载力 N_p （4 颗锚栓拉力之和），所取的数值为图 11 所示的曲线末端的数值。根据式（4）、式（5）、式（6）分别得到模型 1、模型 2、模型 3 的的塑性承载力计算值 N_{p1} 、 N_{p2} 、 N_{p3} 。为了与参数分析的数据进行比较，式中的 f 改为 f_y ，折减系数 f 改为 1.0。

表 1 分析结果 (kN)

Tab. 1 The parametric analysis results (kN)

序号	模型编号	分析值 N_p	计算值 N_{p1}	计算值 N_{p2}	计算值 N_{p3}	$(N_{p1}-N_p)/N_p$	$(N_{p2}-N_p)/N_p$	$(N_{p3}-N_p)/N_p$
1	T20b150c50	477	402	402	245	-16%	-16%	-49%
2	T20b150c75	583	509	509	245	-13%	-13%	-58%
3	T20b175c50	362	324	324	177	-10%	-10%	-51%
4	T20b175c75	421	393	393	177	-7%	-7%	-58%
5	T20b200c50	306	288	288	139	-6%	-6%	-55%
6	T20b200c75	339	338	338	139	0%	0%	-59%
7	T25b150c50	727	628	628	383	-14%	-14%	-47%
8	T25b150c75	889	795	795	383	-11%	-11%	-57%
9	T25b175c50	560	507	507	276	-9%	-9%	-51%
10	T25b175c75	651	613	613	276	-6%	-6%	-58%

11	T25b200c50	468	450	450	216	-4%	-4%	-54%
12	T25b200c75	527	528	528	216	0%	0%	-59%
13	T30b150c50	1016	904	904	551	-11%	-11%	-46%
14	T30b150c75	1245	1145	1145	551	-8%	-8%	-56%
15	T30b175c50	801	730	730	398	-9%	-9%	-50%
16	T30b175c75	930	883	883	398	-5%	-5%	-57%
17	T30b200c50	654	648	648	312	-1%	-1%	-52%
18	T30b200c75	753	761	761	312	1%	1%	-59%

由图 11 可知：锚栓离柱边越远，底板承载力越小；锚栓中心与底板边线的距离越大，底板承载力越大；底板越厚，底板的承载力越大。

由图 12 可知：塑性应变不均，越靠近锚栓的柱边角点（对角锚栓的连线与钢柱截面外轮廓线的交点）塑性应变较大，远离角点塑性应变变小；塑性应变带（塑性铰线）为经过角点且弯向锚栓中心的曲线，不是模型 1 的直线，不是模型 2 的折线，而是介于“模型 1”和“模型 2”之间的曲线。

由表 1 可知：“模型 1”与“模型 2”的结果相同；“模型 1”和“模型 2”得到的结果与数值分析得到的结果吻合较好，误差较小；“模型 3”普遍比数值分析的结果偏小 50%左右，偏于安全；边沿 c 越大，偏小越大。采用“模型 3”是比较合理的：结果偏于安全，可避免角点塑性应变过大；计算简便，没有繁琐的计算过程；与 AISC 的悬挑板模型的参数保持一致。缺点是没有充分利用在锚栓中心与底板边线之间区域的承载力。建议采用“模型 3”来进行底板承载力的计算。

3 算例

某工程的圆钢管柱铰接柱脚，如图 1 所示，参数：柱截面 $\Phi 219 \times 8$ ，柱脚底板 $b=130\text{mm}$ ， $c=50\text{mm}$ ，厚度 $T_b=25\text{mm}$ ，立柱与底板的钢材材质 Q345B，锚栓尺寸 M30，锚栓材质 Q235，布置 4 颗，轴压力 $N=600\text{kN}$ ，轴拉力 $N=300\text{kN}$ 。对底板的厚度进行验算：

（1）轴压工况：

悬臂部分的底板：

$$\text{混凝土压应力 } s_c = \frac{N}{BL} = 4.6\text{N/mm}^2$$

$$\text{悬臂板长度 } l = \max(m, n) = 92.4\text{mm}$$

$$\text{单位板宽承载力 } M_r = f_y \frac{T_b^2}{4} = 4.15 \times 10^4 \text{ N.mm/mm}$$

$$\text{悬臂底板单位板宽弯矩 } M_{so} = s_c \frac{l^2}{2} = 1.96 \times 10^4 \text{ N.mm/mm}$$

$$\text{钢管内底板单位板宽弯矩 } M_{si} = \frac{s_c d^2}{24} = 9.19 \times 10^3 \text{ N.mm/mm}$$

$M_r \geq M_s$ ，底板承载力满足要求。

（2）轴拉工况：

$$M_{ts} = N_t g = N_t (\sqrt{2}b - 2d/5) = 7.2\text{kN.m}$$

$$M_{tr} = f_y l_w \frac{T_b^2}{4} = f_y \min(0.8d, 2(\sqrt{2}b - 2d/5)) \frac{T_b^2}{4} = 7.3\text{kN.m}$$

$M_{tr} \geq M_{ts}$ ，底板承载力满足要求。

4 结论

- (1) 汇总了铰接柱脚底板在钢柱受压时的计算模型，提出了在钢柱受拉时基于悬臂板模型的计算模型。
- (2) 通过参数分析，验证了圆钢管铰接柱脚底板计算模型的合理性和有效性。本文推荐文中的模型 3：结果偏于安全，可避免角点塑性应变过大；计算简便，没有繁琐的计算过程；与 AISC 的悬挑板模型的参数保持一致；缺点是没有充分利用在锚栓中心与底板边线之间区域的承载力。
- (3) 本文通过一个典型算例，给出了底板设计的详细过程。并由算例可知，本文推荐的钢柱受压时的底板计算模型和本文提出的钢柱受拉时的底板计算模型，应用简洁，适用范围大。

参考文献：

- [1] 李星荣, 魏才昂, 丁峙崐等. 钢结构连接节点设计手册[M]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] AISC, Design Guide 01: Base Plate and Anchor Rod Design [S], Second Edition, 2006
- [3] Eurocode 3: Design of steel structures BS En1993-1-8 Part 1.3 Design of Joints [S], 2005
- [4] Gianluca Ranzi, Peter Kneen. Design of Pinned Column Base Plates, Steel Construction[J], 2002, 36 (2): 1-53
- [5] Kevin Cowie, Clark Hyland, Nandor Mago. Column base plate design -lapping strip method. 7th Pacific Structural Steel Conference[C], Long Beach, California, 2004.3
- [6] 孟宪德, 陈以一, 杜纯领. 圆钢管销铰连接中端板的受力性能和强度计算. 建筑结构[J]. 2009.39(5):80-83
- [7] 孟宪德, 龙坪, 张鑫等. 多高层钢结构支撑与框架的连接节点设计探讨. 工业建筑[J]. 2012.42(10):151-155
- [8] 孟宪德, 陈以一, 王伟. X 形圆钢管相贯节点平面外受弯滞回模型研究. 土木工程学报[J]. 2012.45(8):8-14

作者信息：

孟宪德（1976.3-），男，博士，一级注册结构工程师，高级工程师。主要从事结构设计方面的研究，侧重于钢结构。

邮箱：meng.xiande@ccdi.com.cn

通讯地址：上海市康健路 138 号 CCDI 大厦，200235

手机：13816871099