

大吨位铸钢万向铰支座受压力学性能分析

龚超^{1,2}, 王玉银¹, 郭海山³, 张素梅¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, gongchao@foxmail.com; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 100088 北京; 3. 中国建筑股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 为了解目前国内承载能力最大的新型铸钢万向铰支座的受压力学性能, 采用 ANSYS, 针对 6 个主要参数、34 个分析试件对支座受压力学性能以及经济性的影响进行研究. 结果表明: 下支座顶板厚度、加劲肋高度和厚度及材料屈服强度对支座的受压力学性能影响相对较大. 上支座高度对支座性价比影响最大, 最大可达 60% 左右. 下支座顶板厚度、加劲肋高度和厚度对支座性价比的影响较大, 在 10% ~ 15% 范围内. 增大这些尺寸和材料屈服强度可以有效地提高支座的受压力学性能.

关键词: 铸钢支座; 万向铰支座; 大吨位; 有限元分析; 参数分析

中图分类号: TU311.3; TU18; TN713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)04-0017-06

Compression performance of a heavy-duty universal hinged cast steel support

GONG Chao^{1,2}, WANG Yu-yin¹, GUO Hai-shan³, ZHANG Su-mei¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, gongchao@foxmail.com; 2. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., 100088 Beijing, China; 3. China State Construction Engineering Corporation Limited, 100037 Beijing, China)

Abstract: Parametric analysis was carried out by ANSYS to investigate the compression performance of a heavy-duty universal hinged cast steel support with the largest bearing capacity. The influences of 6 parameters (34 specimens) on the mechanical and economical performance of the support were analyzed. Analysis shows that the depth of top plate, the height and the thickness of ribs of the bottom support and yield strength of the material have a great effect on the mechanical performance of the support. The height of upper support has the largest influence on the performance price ratio of the support, which can be up to 60%. The depth of top plate of the bottom support, the height and thickness of the ribs of the bottom support have a medium influences on performance price ratio of the support, which are within the limit of 10% - 15%.

Key words: cast steel support; universal hinged support; heavy-duty; finite element analysis; parametric analysis

随着铸造工艺的提高, 铸钢节点以其适用性和受力合理性越来越受到工程界的关注^[1-4]. 但目前关于铸钢节点的研究刚刚起步, 而且多是针对对于某一具体工程, 缺乏系统深入的研究. 相关规

程 (CECS 235:2008)^[5] 也是刚刚颁布, 由于目前对于铸钢节点的研究应用尚不充分, 规程中对除铸钢相贯管节点和铸钢空心球节点以外的节点形式要求进行有限元分析, 必要时尚应进行足尺试验以保证节点的安全. 由于工程中的节点形式多种多样, 这就给工程应用带来了极大不便, 同时也增加了工程造价.

铸钢支座节点是铸钢节点中的一种, 其中, 铸钢万向铰支座节点由于具有能够释放温度应力并

收稿日期: 2009-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50878066);

“十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAJ0102).

作者简介: 龚超 (1981—), 男, 博士;

张素梅 (1963—), 女, 教授, 博士生导师.

能改善下部构件受力的优点而具有广阔的应用前景。目前已有的铸钢万向铰支座通常抗拉和抗剪承载能力较小(如在坦桑尼亚体育馆工程中采用的铸钢万向铰支座^[6]),而在一些实际工程中提出了对超大抗拉和抗剪承载能力万向铰支座的需求。针对这一需求本文在课题组前期关于目前国内吨位最大的新型铸钢万向铰支座节点设计、足尺试验研究的基础上,针对该型支座进行了受压性能参数分析,对影响支座受压力学性能以及经

济性的各种参数进行了分析。本文关于该支座受压性能的分析可以为该型大吨位铸钢万向铰支座的应用提供依据,并为进一步的研究提供参考。

1 支座介绍

新型大吨位铸钢万向铰支座采用符合德国 DIN17182 标准^[7]的 GS-20Mn5 经调质处理可焊接高韧性的铸钢材料铸造而成,如图 1 所示。支座的构成和受力机理详见文献[8]。

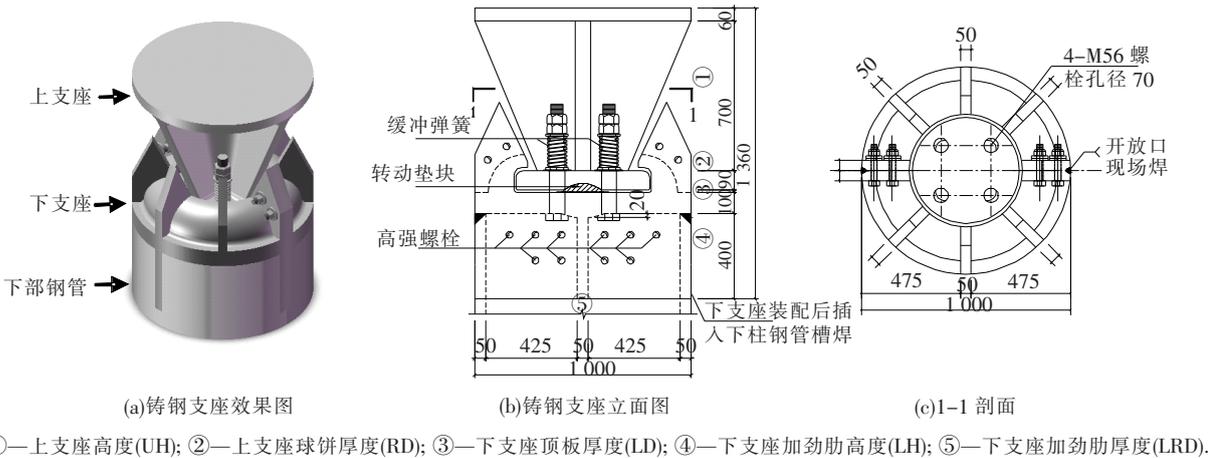


图 1 大吨位铸钢支座示意图(mm)

①—上支座高度(UH); ②—上支座球饼厚度(RD); ③—下支座顶板厚度(LD); ④—下支座加劲肋高度(LH); ⑤—下支座加劲肋厚度(LRD)。

2 有限元建模

利用大型有限元软件 ANSYS 建立大吨位铸钢万向铰支座三维弹塑性有限元模型,有限元模型同时考虑了几何非线性、材料非线性以及接触非线性的影响。

2.1 材料本构模型

有限元分析时,参考 CECS 235:2008^[5]中的相关规定,选用了弹塑性双折线模型,Mises 屈服准则和 Prandtl-Reuss 流动准则^[9]。模型中初始弹性模量取 2.06×10^5 MPa,强化模量取初始弹性模量的 3%,泊松比取 0.3;铸钢支座采用 GS-20Mn5 钢,屈服强度为 300 MPa;转动垫块采用 Q420 钢锻造而成,屈服强度为 420 MPa;下部钢管采用 Q345 钢,屈服强度为 345 MPa。

2.2 几何模型及网格划分

为了提高计算效率,利用模型的对称性建立铸钢支座的 1/4 模型。由于支座构造复杂,且上支座存在实体倒角,在 ANSYS 中无法完成建模。本文采用三维实体建模软件 SOLIDWORKS 建立铸钢支座的实体模型^[10],实体模型导入到 ANSYS 中划分网格。

由于支座构造复杂,采用六面体单元进行网格划分较为困难,因此选用 ANSYS 软件中的 10 节点四面体单元 SOLID92 对模型进行网格划

分^[11-12]。网格划分时利用了 ANSYS 中的智能网格划分功能,单元最大边长不超过 30 mm,区域内单元大小不超过边界上单元大小的 1.5 倍,在接触区域及应力梯度较大区域网格加密,有限元模型网格如图 2 所示。模型网格划分完成后,在接触面上覆盖接触对单元 CONTA174 和 TARGE170,以模拟铸钢支座各个部分之间的接触。为便于加载在加载面上覆盖表面效应单元 SURF154,以施加任意方向荷载。

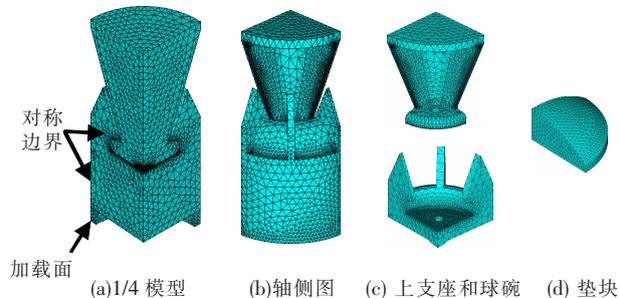


图 2 支座有限元模型图

2.3 约束条件及加载方式

根据铸钢支座的实际受力情况确定模型的边界条件及加载方式,如图 2 所示。边界条件为上支座顶面固定、在对称面上施加对称边界条件,同时耦合下支座底面的竖向位移,以保证铸钢支座只发生水平位移,而不产生转动。加载方式为在下部钢管加载面上施加均布荷载。

2.4 有限元模型验证

由于支座承载力大且结构新颖,为了研究该型支座的性能,文献[13]进行了支座在3种工况(拉剪工况、压剪工况和剪拉工况)下的静力性能足尺试验研究.为了验证有限元模型的正确性,按照支座试验时的边界条件和加载方式建立支座的有限元模型,有限元分析结果和试验结果的对比如文献[8].验证表明本文的建模方法能够较好地模拟铸钢万向铰支座的力学性能.

3 支座受压力学性能参数分析

由于支座要承受整个上部结构的重量,在支座所承受的各种荷载中,竖向压力往往起控制作用,同时由于铸钢支座造价较高,不可能进行大量的试验研究,因而本文采用有限元分析方法对影响支座受压力学性能和经济性的各种参数进行分析.参数分析时以经过试验验证和工程实践检验的铸钢万向铰支座为基准支座,如图1所示.分析上支座高度(UH)、上支座球饼厚度(RD)、下支座顶板厚度(LD)、下支座加劲肋高度(LH)、下支座加劲肋厚度(LRD)和材料屈服强度6个参数对支座受压性能的影响,各分析参数如图1所示(对应各分析参数的基准参数:UH为700 mm、RD为90 mm、LD为100 mm、LH为400 mm、LRD为50 mm、 $f_y = 300$ MPa).在各分析参数的常用范围,共确定34个分析试件.参数分析时,在变化任一个分析参数时,其他参数保持不变.

3.1 考虑用钢量影响的承载力提高系数

由于铸钢材料目前造价相对较高,其经济性问题突出,在保证支座良好力学性能的前提下应尽量减少支座的用钢量,提高支座的性价比.为此定义考虑用钢量影响因素的承载力提高系数 η (可以看作是支座的性能价格比)为

$$\eta = \left(\frac{R_1}{R_0} \right) / \left(\frac{G_1}{G_0} \right) \quad (1)$$

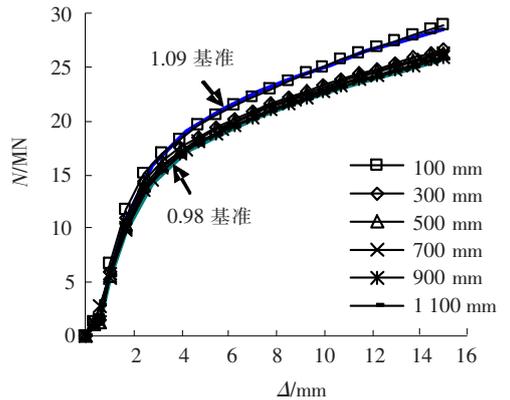
式中 R_1 为相应于位移 Δ 时的承载力, R_0 为位移 Δ 时基准支座的承载力, G_1 为支座用钢量, G_0 为基准支座用钢量.

按照式(1)即可计算出 η 与压缩量 Δ 的关系曲线,用以评价支座的性价比.

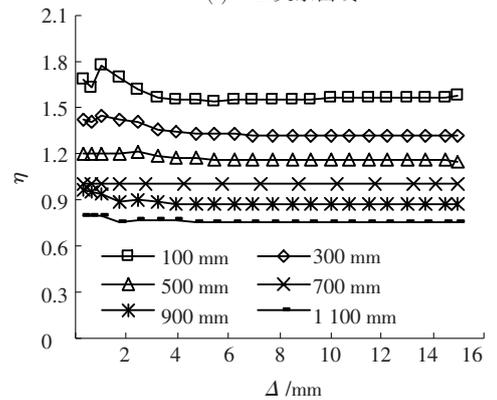
3.2 上支座高度(UH)

分析了上支座高度在100~1100 mm之间变化时,对支座受压力学性能和经济性的影响.图3(a)为支座的压力-压缩量($N-\Delta$)关系曲线,图3(b)为 $\eta-\Delta$ 关系曲线.为便于比较,图3(a)中同时给出了2条界限辅助线,如图中的

“1.09 基准”表示各位移下对应于基准支座承载力的1.09倍的荷载-位移曲线,用于表示各参数变化对支座承载力的提高量或降低量(相对于基准支座).由图3(a)可见,除100 mm以外,当UH为300~1100 mm时,上支座高度对支座受压力学性能没有明显的影响.由图3(b)可见,上支座高度变化对支座的性价比有较大影响,随着上支座高度的减小,支座的性价比逐渐提高.当UH为100 mm时,相比于原支座即UH为700 mm时的情况,支座的性价比提高了60%左右,这是由于上支座高度变化对支座的用钢量影响较大的原因.从以上分析可见:1)上支座高度减小,支座承载力和刚度提高,有助于实现强结点、弱构件;2)减小上支座高度有助于减小铸钢材料用量,节省造价.因而支座设计时,在构造允许的情况下建议尽量减小上支座高度.



(a) $N-\Delta$ 关系曲线



(b) $\eta-\Delta$ 关系曲线

图3 不同UH对支座受压力学性能和经济性的影响

3.3 上支座球饼厚度(RD)

由于支座受压时荷载通过上支座球饼和垫块的接触来传递,故需要分析RD变化对支座受压力学性能的影响.分析时变化上支座球饼厚度并同步变化下支座球碗高度.RD初始值为90 mm,按20 mm的模数变化,取RD为50~130 mm.RD变化对支座受压力学性能以及经济性的影响如图4所示.

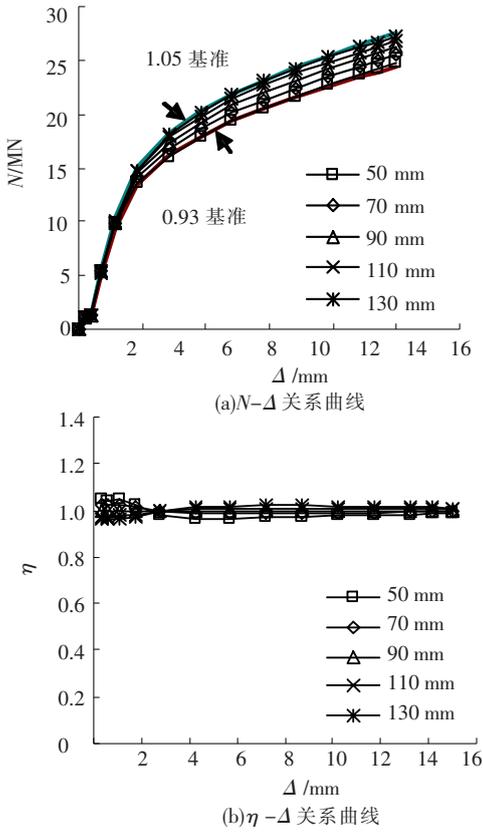


图 4 不同 RD 对支座受压力学性能和经济性的影响

从图 4 可见 RD 为 50 ~ 130 mm 时,上支座球饼厚度变化对支座受压力学性能略有影响,上支座球饼厚度越大支座的承载力和后期刚度越大.相对于基准支座,随着上支座球饼厚度变化,支座的承载力变化在 -7% ~ 5% 之间.由于上支座球饼厚度变化对支座的用钢量影响较小,上支座球饼厚度变化对支座的经济性没有明显的影响.

3.4 下支座顶板厚度 (LD)

在确定上支座顶板最小厚度时按规程^[5]要求取 20 mm.下支座顶板原厚度为 100 mm,取 LD 为 20 ~ 160 mm.下支座顶板厚度变化对支座受压力学性能以及经济性的影响如图 5 所示.

从图 5(a)可见下支座顶板厚度越大支座的承载力和后期刚度越大.相比于 LD 为 100 mm 时,LD 为 20 mm 时,承载力降低了 12%;LD 为 160 mm 时,承载力提高了 5%.从图 5(b)可见 LD 为 20 ~ 160 mm 时,支座的性价比随下支座顶板厚度的增大而降低,这是由于下支座顶板厚度变化对支座的用钢量影响较大.

从以上分析可见,支座顶板厚度变化对支座的承载力和刚度影响较大.同时随着下支座顶板厚度的增大支座的经济性下降,因而从经济性的角度考虑下支座顶板厚度不宜过大.

3.5 下支座加劲肋高度 (LH)

下支座加劲肋原高度为 400 mm,按 100 mm

的模数变化,取 LH 为 100 ~ 600 mm.分析时暂不考虑支座组装对加劲肋高度的要求.下支座加劲肋高度变化对支座受压力学性能以及经济性的影响如图 6 所示.

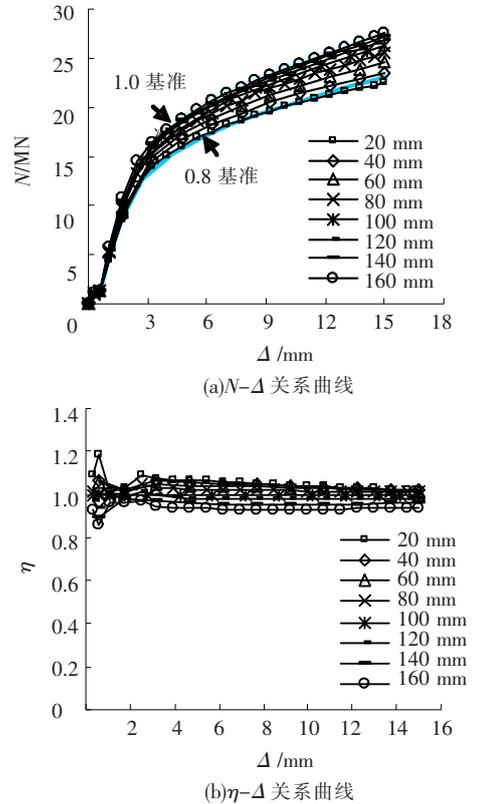


图 5 不同 LD 对支座受压力学性能和经济性的影响

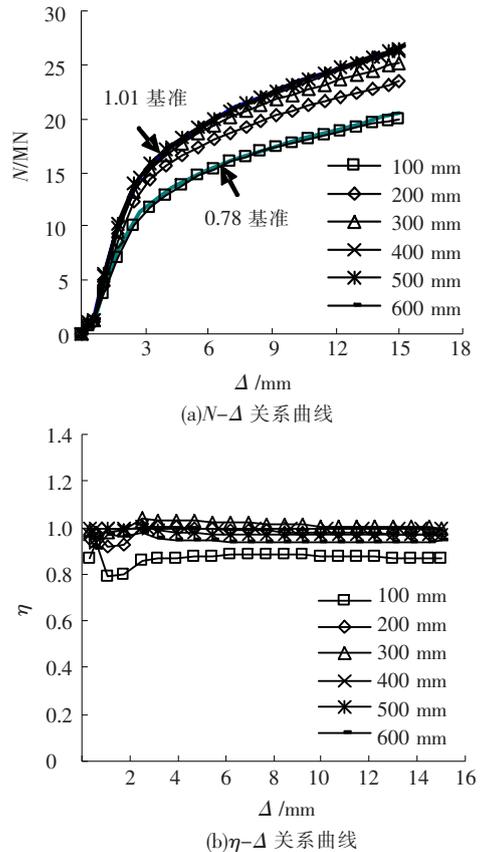


图 6 不同 LH 对支座受压力学性能和经济性的影响

从图6(a)可见下支座高度变化对支座的受压性能影响较大,下支座加劲肋高度越大支座的承载力和后期刚度越大.相比于LH为400 mm时,LH为100 mm时支座的承载力降低了22%左右;而LH为600 mm时承载力仅提高了1%.这是由于下支座加劲肋高度较小时,下支座加劲肋的传力作用类似于交叉梁,而梁高对梁的抗弯承载力影响较大,故LH由100 mm增加到400 mm时对支座的性能影响较大;LH继续增加时,下支座加劲肋的跨高比减小,逐渐由浅梁变为深梁通过拱作用传力,故LH由400 mm变化到600 mm时对支座的性能影响较小.从图6(b)可见LH为100~300 mm时,支座的性价比随LH的增大而增大;LH为300~600 mm时,支座的性价比随LH的增大而降低.

从以上分析可见,LH小于400 mm时,下支座加劲肋高度变化对支座的承载力和后期刚度影响较大.LH为300 mm时支座性价比最大.综合考虑支座的受力性能和经济性,下支座加劲肋高度宜取300~400 mm.

3.6 下支座加劲肋厚度(LRD)

在确定下支座加劲肋最小厚度时按规程^[5]要求取20 mm.下支座加劲肋原厚度为50 mm,取LRD为20~110 mm.下支座加劲肋厚度变化对支座受压力学性能以及经济性的影响如图7所示.

由图7(a)可见,LRD为20~110 mm时,下支座加劲肋厚度变化对支座的受压性能影响较大,下支座加劲肋厚度越大支座的承载力和后期刚度越大.相比于LRD为50 mm时,LRD为20 mm时支座的承载力降低了17%;LRD为110 mm时,承载力提高了8%.由图7(b)可见,当LRD为20~50 mm时,支座的性价比随LRD的增大而增大;LRD为50~110 mm时,支座的性价比随LRD的增大而减小,变化幅度在10%之内.

从以上分析可见,当LRD小于70 mm时,下支座加劲肋厚度变化对支座的承载力和后期刚度影响较大.LRD为50 mm时支座的性价比最大.综合考虑支座的受力性能和经济性,下支座加劲肋厚度宜取50~70 mm.

3.7 材料屈服强度(f_y)

考虑到支座处于三向受力复杂应力状态且支座最大壁厚大于50 mm,结合规程3.1.7条^[5]关于各类可焊接铸钢节点铸件的材料与材性要求,可选的铸钢材料有ZG230-450H、ZG275-485H、G20Mn5N/G20Mn5QT,依据规程^[5]附录A.1.1和

A.1.2取 $f_y = 230 \sim 300$ MPa.铸钢材料屈服强度变化对支座受压力学性能以及经济性的影响如图8所示.

可见,随着材料屈服强度的提高,支座的承载力和后期刚度逐渐提高;材料屈服强度对支座初始刚度没有影响,这是由于材料屈服强度对其弹性模量没有影响.

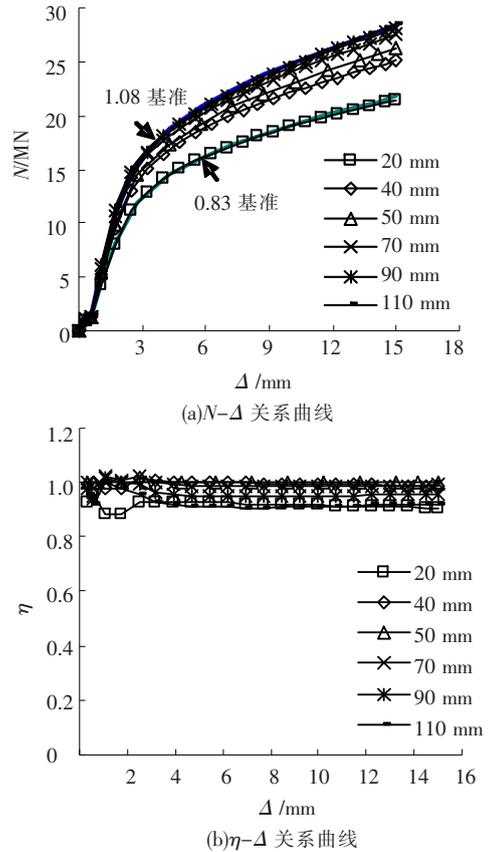


图7 不同LRD对支座受压力学性能和经济性的影响

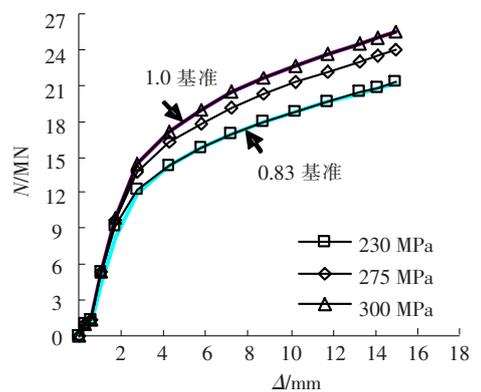


图8 不同 f_y 对支座受压力学性能的影响

4 结论

1) 通过上支座高度、上支座球饼厚度、下支座顶板厚度等6个参数34个分析试件,对支座受

压力学性能以及经济性的影响分析,发现所建模型能够较好地模拟铸钢万向铰支座的受压力学性能,有限元分析结果和试验结果吻合较好.

2)下支座顶板厚度、下支座加劲肋高度、下支座加劲肋厚度和材料屈服强度对支座的受压力学性能影响相对较大.随着上述参数的取值增加,支座的承载力和后期刚度均有所增大.

3)上支座高度对支座性价比影响最大,最大可达60%左右.下支座顶板厚度、下支座加劲肋高度、下支座加劲肋厚度对支座性价比的影响较大,在10%~15%之间.支座的性价比随着上支座高度和下支座顶板厚度的增大而减小;下支座加劲肋高度和下支座加劲肋厚度分别在300 mm和50 mm时支座的性价比达到最大,而当参数取值偏离上述临界值时,支座性价比降低.

参考文献:

- [1] 刘锡良,林彦.铸钢节点的工程应用与研究[J].建筑结构进展,2004,6(1):12-19.
- [2] DE OLIVEIRA J C, WILLIBALD S, PACKER J, *et al.* Cast steel nodes in tubular construction-canadian experience[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Tubular Structures. Balkema: Taylor and Francis, 2006:523-529.
- [3] SCHOBER H. Steel castings in architecture and engineering [C]//NASCC Proceedings. Baltimore: American Institute of Steel Construction, 2003:1-23.
- [4] 蔡建国,冯健,顾洪波,等.大型铸钢节点的工程应用和分析[J].钢结构,2008,23(4):13-17.
- [5] CECS235:2008.铸钢节点应用技术规程[S].北京:工程建设标准化协会,2008.
- [6] 北京市建筑设计研究院7S1工作室.坦桑尼亚国家体育场万向支座设计及试验分析研究[J].建筑结构,2006,36(增刊):59-61.
- [7] DIN17182-1992. General-purpose steel castings with enhanced weldability and higher toughness-technical delivery conditions [S]. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1992.
- [8] GONG Chao, WANG Yuyin, ZHANG Sumei. Shear performance analysis of a heavy-duty universal hinged cast steel support [J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2010, 17(2):149-156.
- [9] LAWRENCE K. ANSYS tutorial release 11 [M]. Mission: Schroff Development Corporation, 2007.
- [10] LOMBARD M. Solid works 2009 bible [M]. Indianapolis: Wiley, 2009.
- [11] MOAVENI S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS [M]. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [12] NAKASONE Y, YOSHIMOTO S. Engineering analysis with ANSYS software [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [13] 张素梅,龚超,王玉银,等.新型大吨位铸钢支座静力性能试验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(5):589-595.

(编辑 魏希柱)