

剪力墙转换柱铰接柱脚消能减震设计研究

万恒均¹, 万涛²

(1 四川省建筑设计研究院, 成都 610000; 2 四川大学规划建设处, 成都 610065)

[摘要] 钢筋混凝土框架结构铰接柱脚的消能减震设计问题已取得突破,但是剪力墙的同类问题还待研究。剪力墙平面内刚度很大,不能直接做成基底铰接柱脚,但其刚度可通过转换层来降低。将剪力墙离散成栅栏板柱等独立柱,再采用椭圆球体铰转化为铰接柱脚,从而获得铰接柱脚消能减震设计。提出了球体铰接柱脚位移量的分析计算方法,并结合现行规范限值进行控制,为以后的工程设计及计算提供参考。

[关键词] 剪力墙; 转换层; 栅栏板柱; 椭圆球体铰

中图分类号: TU352.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-848X(2015)S2-0468-04

Design and research of energy dissipation for the hinged heel in transfer column of shear wall

Wan Hengjun¹, Wan Tao²

(1 Sichuan Provincial Architectural Design & Research Institute, Chengdu 610000, China;

2 The Plan & Construction Department of SCU, Chengdu 610065, China)

Abstracts: There has been gain a breakthrough to the design problem of energy dissipation for the hinge heel of reinforced concrete frame, but the same kind problem for the shear wall needs to be researched. The rigid of shear wall is very strong in plan, the shear wall cannot directly adopt the base hinge heel. Its rigidity, however, can be reduced by the conversion transfer story. The shear wall can be separated as independent columns such as palisade slab-column, and then ellipsoid spherical hinge will be turned into spherical hinged heel to achieve the design of energy dissipation for the ellipsoid spherical-hinge. The calculation method of the off-set variables of the rotary spherical-hinged joint was provided, which can be completed under control of the current standardized limited value. All this may be the reference point for later engineering design and calculation.

Keywords: shear wall; transfer story; palisade slab-column; ellipsoid spherical-hinge

0 引言

能使柱脚在基础顶面自由转动的连接,称为铰接柱脚。铰接柱脚在理论力学和结构力学中都是成立的,具有坚实的理论基础。在古老的木结构中的木柱与石墩的连接方式就是铰接柱脚,它的应用已有千年的历史。在地震中铰接柱脚能以柔克刚,消能减震,保证房屋和人员的安全。2008年5·12汶川大地震的震害证明:柱脚破坏在震害中首当其冲,凡刚性连接的柱脚普遍产生了开裂破坏,说明柱脚设计在抗震中的重要性。

铰接柱脚铰点具有变形耗能、摇摆而稳定的动力特性;同时具有柱脚弯矩为零的静力特征,是非常理想的力学计算模型。在现代钢筋混凝土结构中,由于长期受基础嵌固于地面的基本假设的影响,使铰接柱脚长期处于未被认识的状态,在工程设计应用上还待研究。

1 框架结构球面铰接柱脚消能减震设计

关于框架结构的铰接柱脚消能减震设计问题,已基本研究解决^[1]。

2 剪力墙转换柱铰接柱脚消能减震设计

剪力墙平面刚度很大,不能直接做成基底铰接柱脚,但可通过结构转换层来降低剪力墙的刚度,将剪力墙离散成栅栏板柱等独立柱,再采用椭圆球体铰接装置变为铰接柱脚基础,从而获得剪力墙铰接柱脚消能减震设计。

2.1 栅栏板柱

将整片剪力墙通过结构转换层离散成栅栏板柱等独立柱,把剪力墙转化为柱。因转换层栅栏板柱仅有一层,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[2]第6.3.5.1条,可将栅栏板柱最小宽度取300mm,对通常上部为200mm厚的剪力墙,可扩宽为大于等于300mm厚的板柱。板柱长边与短边的边长比取3,则得到板柱的基本尺寸为300×900。板柱基础离缝常用50mm,同样柱铰边缘要比板柱边外扩50mm,则栅栏板柱缝隙宽度为3×50=150mm,其平面基本尺寸如图1所示。

作者简介:万恒均,高级工程师,一级注册结构工程师, Email: 171437134@qq.com。

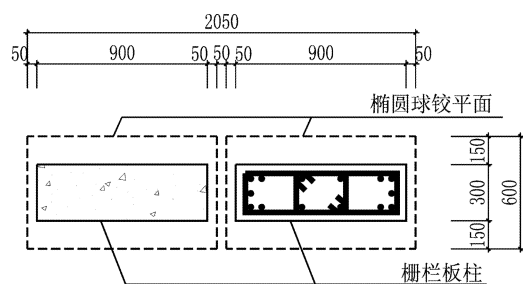


图1 栅栏板柱及椭圆球铰平面图

2.2 带壁T形柱

双向剪力墙离散后,在交叉节点处形成T形带壁柱,为了便于形成柱脚铰点,带壁柱最大的突出长度,控制取柱最小尺寸300mm,带壁柱的柱身为栅栏板柱。

2.3 转角L形柱

L形柱用于剪力墙的转角部位,转角柱每边突出长度,一般按300mm取用。或者,为了避免L形异形柱,直接采用600×600的普通方柱。

2.4 联排电梯井隔墙厚度

由于电梯井净空尺寸的工艺要求,隔墙厚度不能外扩,只能把两端作成300×200的带壁柱,中间用200mm宽的过梁抬墙。

2.5 栅栏板柱脚椭圆球体铰设计

栅栏板柱是长方形平面,要将其做成转动的铰点,柱铰找型选用椭圆形球体。为了克服板柱狭长、椭圆球体因过分扁平而容易失稳的缺陷,可对板柱球铰宽度尽量扩宽,来调整椭圆球体长短轴比例关系。

用上下两片双曲面钢板来作柱铰。柱铰的双曲面由两向圆曲线迭加而成:即由X向圆弧线沿Y向圆弧线为母线的轨迹移动复合而成双曲扁壳。椭圆球体铰就是由倒置的两片双曲扁壳构成。

2.5.1 栅栏板柱的椭圆球体铰构造

若将栅栏板柱柱铰宽度(Y向)扩大后定为600mm,把铰底做成半圆球面,即 $R_y = 300\text{mm}$;柱铰的长度(X向),在包络板柱前提下取 $L = 50 + 900 + 50 = 1000\text{mm}$,再取X向圆弧曲线的矢高 $f = 300\text{mm}$ (即令圆弧线的矢高与圆弧线半径相等),则X向的曲率半径(图2)可表达为:

$$R_x^2 = (R_x - f)^2 + 500^2$$

解得: $R_x = 580\text{mm}$

由双向圆弧线 $R_y = 300\text{mm}$, $R_x = 580\text{mm}$ 生成双曲扁壳,构成栅栏板柱柱脚椭圆球铰钢模(图3)。其中 R_y 为球铰的埋置深度, R_x 为球铰的宽度。

2.5.2 带壁T形柱的椭圆球体铰构造

带壁T形柱的椭圆球铰平面取与其几何图形相

近的梯形平面。参照栅栏板柱,取铰点总宽度为800mm,则球体半径 $R_y = 400\text{mm}$;铰点总长度为1000mm,再取X向圆弧曲线矢高 $f = 400\text{mm}$,同理可得X向曲率半径为 $R_x = 500\text{mm}$,见图4。

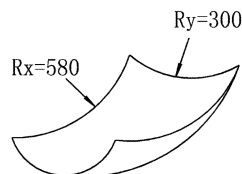
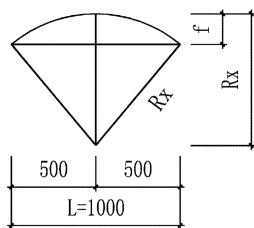


图2 X向圆弧曲线曲率半径 图3 椭圆球铰透视图

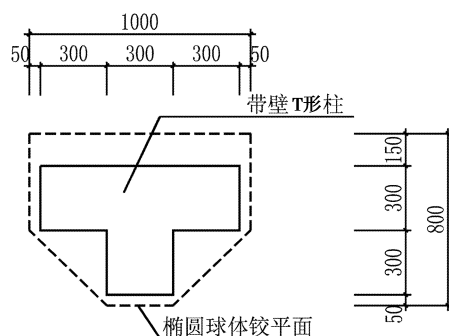


图4 带壁T形柱椭圆球体铰平面布置

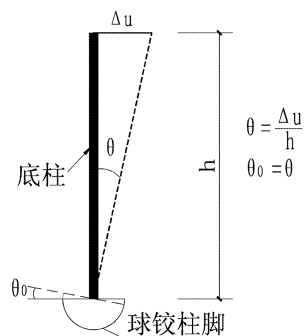
2.5.3 椭圆球铰的工作原理

椭圆球体铰有长短轴两个圆心,由于铰点两向圆弧形的切线高度相等,存在共同的切线点,切线共点就具有共同的转动中心,故双心椭圆球铰的转动位移角可按单心考虑。由于双曲面钢板本身具有很好的刚度,钢板的厚度可取10mm。

3 椭圆球铰接柱脚位移计算分析

实现铰接柱脚消能减震设计的核心是能求出地震发生时,铰接柱脚的转动位移量,并把它控制在允许范围内。

采用SATWE(2010版)程序不能直接得到铰接柱脚转动位移量。但底层框架的层间位移角 θ 与球面铰接柱脚的转动位移角 θ_0 有几何对等关系(图5)。

图5 θ_0 的几何关系图

底柱层间位移角: $\theta = \frac{\Delta u}{h}$

双曲面铰接转动位移角: $\theta = \theta_0 = \frac{\Delta u}{h}$

式中: Δu 为底层层间水平位移; h 为底层层高; θ 为底层层间位移角; θ_0 为双曲面铰接柱脚转动位移角。

转角位移控制值按《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[3]表 3.7.3 楼层层间最大位移与层高之比的限值进行控制。

对于框架: $\frac{\Delta u}{h} \leq 1/550$

对于剪力墙: $\frac{\Delta u}{h} \leq 1/800$

表 3.7.5 层间弹性位移角限值:

对于框架: $[\theta_p] \leq 1/50$

对于剪力墙结构: $[\theta_p] \leq 1/100$

4 铰接柱脚房屋适用高度和高宽比

铰接柱脚房屋属框架结构体系,其房屋适用高度和高宽比应符合《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[3]A 级高度钢筋混凝土乙类和丙类高层建筑的最大适用高度和适用的最大高宽比的规定,见表 1、2。

框架、A 级高度钢筋混凝土高层建筑的

最大适用高度/m 表 1

非抗震设计	抗震设计烈度				
	6 度	7 度	0.20g	0.30g	9 度
70	60	50	40	35	—

注:抗风结构应控制风荷载作用的水平荷载标准值产生的总水平力不宜超过结构总重力的 10%^[2]或宜采用底部剪力法,房屋高度不超过 40m。

框架、钢筋混凝土高层结构适用的最大高宽比 表 2

非抗震设计	抗震设计烈度		
	6 度、7 度	8 度	9 度
5	4	3	—

注:山区吊脚楼建筑,每阶的高宽比应符合规范要求。

5 铰接柱脚底层的层间刚度有大幅度削弱现象

由于底柱的铰点下移至柱脚,比刚性柱计算铰点在柱中下移 $L/2$ (L 表示层间高度),造成底层层间刚度降低约 50% (图 6)。

层间相对刚度: $I = J/L$, 其中 $J = bh^3/12$, 则铰接柱脚 $I_1 = 2J/L$; 铰接柱脚 $I_0 = J/L$ 。

可知,铰接柱脚的底层层间刚度降低 50%,需用增加杆件单元刚度来弥补。对提高单刚最直接有效的办法是增加截面高度 h ,据测算, h 若提高约 30%,单元刚度就可翻倍。为了节省材料,截面作成薄壁工

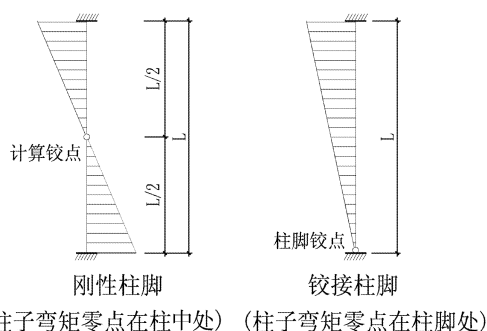


图 6 不同柱脚铰点位置示意图

字形柱,效果更佳。

例:将 600×600 的框架底柱,在截面积基本相等的情况下,改造成加强柱。采用 $600 \times 800 \times 200$ 的工字形柱,柱子单刚可提高 2.8 倍。工字形柱的上、下端需作成实心截面,其构造如图 7 所示。

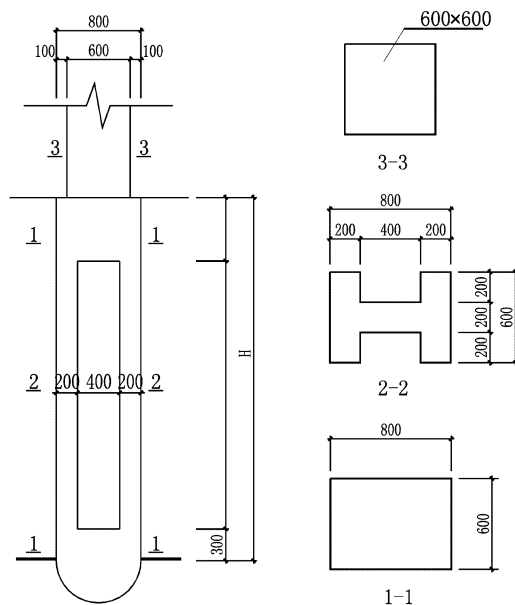


图 7 铰接柱脚底层工字钢加强柱示意

6 结论

(1) 铰接柱脚设计是设计概念革新及设计方法的重大突破。刚性柱脚的抗震是坚固设防,主旨是“抗”,用钢筋混凝土材料去抵抗地震能量。铰接柱脚的御震是以柔克刚,主旨是“消”,用结构变形去耗散地震能量。从“抗”到“消”是设计概念的转变。铰接柱脚能使房屋沿基础顶面自由转动的功能,可自动避让地震伤害,是房屋抗震设计理念的新发展,是设计方法的重大革新。

(2) 日本对钢筋混凝土框架的隔震技术,是将柱脚断开,然后在每个框架柱下设置橡胶隔震支座。在结构体系上属于铰接柱脚范畴,但采用橡胶-钢板隔震支座来支承整个建筑物重量的代价较高:采用铅芯隔震支座的承载应力为 $10 \sim 12 \text{ MPa}$ ^[2],而 C40 混凝土

抗压强度设计值 $f_c = 19.1 \text{ MPa}$ ^[4],两者相差近一倍。说明隔震支座底柱支承面积比混凝土底柱大;需用的隔震支座数量多;且隔震构件的价格不菲。若采用直接柱铰硬着陆的球铰柱脚方法,则具有明显的性价比优势。对于刚性柱脚框架的消能减震,需逐层设置消能阻尼器来耗能,如设置八字形消能阻尼支撑等。显然没有一次性的球铰柱脚简捷省事。球面铰接柱脚有消能减震的功能,能保障地震中房屋与人员的安全,构造简单易行,是消能减震技术的新发展。

(3)铰接柱脚弯矩为零,可有效地减少框架柱的截面尺寸及钢筋用量;基础设计变为中心受压构件,省去了刚性柱脚嵌固端必须设置的地圈拉梁结构层;铰点不用考虑柱脚截面组合弯矩设计值的增大系数,及底柱节点对箍筋体积配箍率增大的要求。在高烈度地震区,铰接柱脚降低了截面设计的难度。总之,把结构最危险的底柱柱脚断面转化为变形消能的铰点,安全可靠。

(4)用上下两片曲面钢板,作成柱脚可以自由转动的铰接装置,形成铰接柱脚,达到消能减震,简单有效。

(5)铰接柱脚具有消能减震的动力特点,在力学上也具有柱脚弯矩为零的静力特征,是理想的力学计

算模型,有强大的生命力,铰接柱脚可与刚性柱脚相辅相成,互为补充,可形成两条腿走路,灵活选择。

(6)我国西部地区处于地震活跃带,震灾频发,地震中房屋破坏严重,灾后重建任务繁重。近七年来就有四川汶川大地震、青海玉树地震、云南鲁甸地震、四川芦山地震等进行了灾后重建。灾后重建中对国家重点设防项目,如学校、医院等公共建筑,总想选择抗震性能好的隔震设计或消能减震设计来建造抗震安全的房屋,却因抗震构件价格偏高而放弃。采用铰接柱脚消能减震方法,只需用两片钢板作铰点就可搞定。铰接柱脚,在抗震设计中价廉物美,有广阔的推广应用价值。甚至非抗震设计也可享受球铰柱脚的优良资源,作成铰接结构。

参 考 文 献

- [1] 万恒均,万涛. 钢筋混凝土框架球面铰接柱脚消能减震设计研究[J]. 建筑结构,2014,44(S2):412-414.
- [2] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.