

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.013

底层柱顶隔震框架结构设计方法

吴应雄^{1,2}

(1.福建福大建筑设计有限公司,福建福州 350002; 2.福州大学 土木工程学院,福建福州 350108)

摘要:目前的建筑结构隔震设计方法主要针对的是基础隔震体系。以《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)第十二章隔震设计条款以及条文说明为依据,并以底层柱顶隔震模型结构的振动台试验结果和数值分析为参考,基于成熟的有限元分析软件,提出了实用的钢筋混凝土底层柱顶隔震框架结构设计方法和建议。考虑到地震的随机性建筑结构所处地区超烈度发生的概率高,确保底层结构的地震安全性,提出了底层结构应满足超设防烈度的必要性。建议实际隔震工程设计,考察隔震上部结构减震效果的同时,应重点对底层结构的动力响应和受力进行详细分析及加强抗震设计。

关键词:层间隔震;底层柱顶隔震;下部结构;设计方法

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0067-06

Design Method of First-Story Columns' Top Isolation Frame Structure

WU Yingxiong^{1,2}

(1. Fujian Fuda Architecture Design Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Currently isolation design method of architectural structure is primarily aimed at base isolation system. Based on chapter XII isolation design terms and provisions described of GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings, further, making the shaking table test results and numerical analysis of the first-story column top isolation structure model as a reference and based on proven finite element analysis software, the functional design methods and recommendations of first-story column top isolation reinforced concrete framework structure was proposed. Considering the randomness of the earthquake, the probability of architectural structure occurring ultra-high intensity was high, and to ensure the seismic safety of underlying structure, the necessity of underlying structure meeting the ultra-design intensity was proposed. The suggestions are in the actual isolation engineering design the damping effect of upper isolation structure should be investigated, at the same time the emphasis should be on the detailed analysis of underlying structure dynamic response and force and strengthening seismic design.

Keywords: story isolation; first-story columns' top isolation; substructure; design method

近年来隔震层设置在底层柱顶是建筑结构低位层间隔震体系的一种主要形式^[1-3]。这类采用底层柱顶隔震的框架结构,相对于采用基础隔震体系,其具有不会明显地降低减震效果,充分利用检修层空间,地坪处不必为隔震层预留空间,建筑构造处理较为简单,便于隔震装置的维护,施工方便、减少地坪层的梁板及基础工程量和进一步节省工程造价等诸多优点^[4-7]。由于底层位于隔震层下部,结构动力反应较基础隔震体系有一定的差异,底层结构安全

性应高于上部结构^[1-3],而现行抗震规范缺乏对底层结构的设计指导,这种局面制约此类工程的应用,且目前的建筑结构隔震设计方法研究主要针对的是基础隔震体系^[7]。

基于此,以《建筑抗震设计规范》^[1](GB50011-2010)(简称《抗规》(10版))第十二章隔震设计条款以及条文说明为依据,并以底层柱顶隔震模型结构的振动台试验结果和数值分析为参考^[7],基于成熟的有限元分析软件^[3],提出了实用的钢筋混凝土底层柱

顶隔震框架结构设计方法和建议,以解决工程应用中的底层结构设计及计算分析等关键的技术问题。

1 一般规定和隔震方案选择

1.1 一般规定

(1) 本设计方法适用于地震设防烈度 7 度及以上地区,刚度较大的多层、高层等各类适合采用现浇钢筋混凝土框架底层柱顶隔震的建筑物。

(2) 底层为架空开放空间和大空间墙体少的各类建筑,因为存在楼层侧向刚度和受剪承载力突变,需要加强结构薄弱层的抗震能力,所以适合采用底层柱顶隔震。

(3) 采用底层柱顶隔震方案应考虑建筑的抗震设防分类,所处地区抗震设防烈度、建设场地条件、使用功能及建筑、结构的布置方案,从结构抗震安全、工程经济及工程项目综合效益等方面进行分析对比,并应符合《抗规》^[1](10 版)第 3.5.1 条的规定,同时应与采用抗震设计的方案进行对比后确定。

(4) 建议(3)条采用抗震设计的方案应进行建筑结构在超烈度的大震作用下弹塑性验算,并和隔震设计方案对比,更能凸显隔震结构优越的抗震性能。

(5) 由于地震的随机性,建筑结构所处地区超烈度发生的概率高。建筑结构需要有一定的抵抗超烈度的安全储备^[7],建议底层柱顶隔震结构宜进行在超烈度的大震作用下弹塑性验算。建议超烈度等级取为超过设防烈度 0.5 度或 1 度。

1.2 隔震方案选择

(1) 底层结构为薄弱层判别。如果工程底层架

空或墙体较少,而上部填充墙较多,应根据《抗规》^[1](10 版)第 3.4.3 条第 1 款和 5.5.4 条规定,当底层结构侧向刚度小于上一层的 70% 和受剪承载力小于上一层的 80%,同时底层的屈服强度系数比其他楼层小,可判别底层结构为薄弱层。

(2) 建筑结构应用隔震技术条件。应综合考虑下列因素:1) 建筑及结构的平面和竖向布置规则性;2) 抗震结构刚度大小即基本周期值;3) 隔震上部结构高度和宽度比值;4) 非地震作用产生的总水平力;5) 建筑场地类别等因素。

(3) 选择底层柱顶隔震方案的主要原因。隔震技术应用于框架结构,是综合考虑了基础隔震体系增加了隔震层的梁板及增加荷载扩大了基础,地坪处设置隔震沟,构造及施工较为复杂,工程造价增加等因素。如果采用底层柱顶隔震,则地坪处没有隔震沟,隔震构造主要布置在底层柱顶,施工较为方便,工程造价可进一步节省^[7]。

(4) 底层结构形式选择:1) 底层结构形式通常有框架柱带拉梁和独立柱二种,如图 1 所示。2) 框架柱带拉梁结构形式应用条件:上部结构层数较多荷载较大且高宽比较大、柱网尺寸较大且底层层高较高、拉梁的设置不影响底层的建筑功能。框架柱带拉梁为不带板的平面框架,结构稳定性较好。3) 独立柱结构形式应用条件:上部结构层数少荷载较小且高宽比较小、底层柱子截面不大以及底层高度受到限制。独立柱受力类似于悬臂柱,结构稳定性较框架柱带拉梁差。

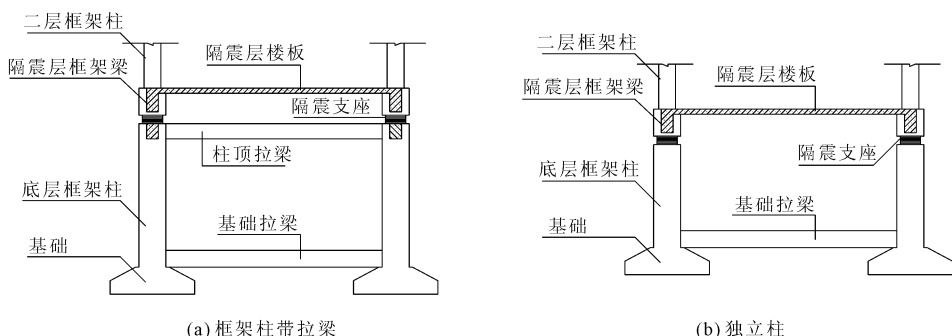


图 1 底层结构形式

2 计算和设计要点

2.1 隔震层设计

(1) 按以下步骤进行隔震支座型号的选择:1) 假定上部结构水平向减震系数为 0.4。按常规结构的计算方法,初步计算由竖向荷载产生的柱子轴力

设计值,水平地震力减少 60%,轴力设计值乘以一定的放大系数(考虑风和水平地震力影响)。2) 将上部结构的各柱底轴力(重力荷载代表值) G_i 分配到各隔震支座上, A_i 为各隔震支座的有效面积,则有

$$G_i/A_i \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中: G_i/A_i 为各隔震支座的竖向压应力设计值;

[σ] 为橡胶隔震支座的压应力限值。3) 适当考虑增大隔震层的位移及减少隔震支座的型号, 即适当考虑采用较大直径的隔震支座。也可以一根柱布置两个及以上支座, 通常隔震支座的直径型号不宜多于 3 种, 直径宜不小于 500 mm。4) 考虑隔震支座受耦合地震效应的影响, 对边、角柱的轴力设计值乘以放大系数 1.20^[8]。5) 根据选定的隔震支座型号, 验算隔震层总受压承载力设计值应满足下式:

$$1.1G \leq \sum [\sigma]A_i \quad (2)$$

式中: $\sum [\sigma]A_i$ 为全部隔震支座承担的上部结构的轴力; G 为上部结构的总重力荷载代表值。

(2) 隔震支座直径经初步确定后, 根据隔震支座连接钢板的构造尺寸, 确定底层柱截面尺寸, 柱子可以采用变截面形式。

(3) 通过以上步骤, 可初步确定隔震支座的型号和布置, 还应确定隔震层的水平刚度和阻尼比等参数, 再将这些参数代入计算模型中, 进行隔震结构的动力分析计算。当上部结构的水平向减震系数满足假设要求, 且各隔震支座位移都小于水平位移限值, 隔震支座的布置才可基本确定。

2.2 结构分析方法和结构构件单元模拟

根据《抗规》^[1](10 版)第 12.2.2 条第 2 款规定: 一般情况下, 隔震结构宜采用时程分析计算。设计计算应说明: 1) 采用哪种有限元软件进行时程分析; 2) 钢筋混凝土梁、柱和楼板以及隔震支座采用哪种单元模拟; 3) 通常, 普通橡胶隔震支座(LNR)采用线弹性恢复力模型, 带铅芯橡胶隔震支座(LRB)采用双向耦合非线性的恢复力模型。

2.3 地震波选用及有效性验算

《抗规》^[1](10 版)12.2.2 的第 2 款规定, 建筑结构隔震计算分析, 应符合下列规定: 输入地震波的反应谱特性和数量应符合第 5.1.2 条规定, 其中模拟的加速度时程曲线(人工波)应根据建设场地地质条件生成。

将几条地震波的峰值加速度调至设防烈度多遇地震的水平, 输入非隔震结构, 得出底层的最大层间剪力, 同利用振型分解反应谱法计算结构在设防烈度多遇地震下的底层的层间剪力进行对比, 以验证所选的地震波的合理性。

2.4 地震作用和地震反应计算

(1) 基本周期和阻尼比的对比。首先建立设置隔震层与不设隔震层, 满足对比条件的隔震与非隔震这两种结构模型, 进行结构在设防烈度多遇(罕

遇)地震作用下的时程分析, 得到结构的基本周期对比。在多遇(罕遇)地震作用下, 取隔震支座 100% (250%)剪应变所对应的水平等效刚度和阻尼比。

(2) 上部结构水平向减震系数。进行隔震与非隔震结构模型的隔震层(非隔震结构为二层)以上结构在设防烈度多遇地震作用下的时程分析, 列出各层层间剪力的比值。水平向减震系数即为最大的层间剪力的比值。隔震上部结构地震作用计算可取水平地震影响系数的最大值即水平向减震系数乘以设防烈度的水平地震影响系数最大值, 得到上部结构地震作用换算烈度。

(3) 换算烈度和上部楼层的最小地震剪力。结构隔震设计的目标是提高建筑结构的安全度, 而非降低工程造价, 建议隔震后结构的换算烈度不宜小于 7 度(0.1 g)。各楼层的水平地震剪力应符合《抗规》^[1](10 版)第 5.2.5 条对本地区设防烈度的最小地震剪力系数规定。

(4) 隔震后结构在换算烈度的罕遇地震作用下验算: 1) 对隔震与非隔震这两种结构模型在换算烈度的罕遇地震作用下进行时程分析, 应给出各楼层层间位移、层间位移角及其对比, 宜给出两种结构模型加速度响应及对比。2) 建立结构模型进行分析中, 底层柱的计算参数应考虑有: 读取并获得各个支座在上部结构隔震后换算烈度的罕遇地震作用下的内力进行计算(其中弯矩值应叠加竖向荷载引起的 $P-\Delta$ 效应及剪力引起的附加弯矩); 初定底层柱截面及计算高度。3) 在换算烈度的罕遇地震作用下观察隔震上部结构层间位移角变化是否均匀, 层间位移角的最大值宜满足小于 $1/200$ ^[7-9], 并以非隔震结构层间位移角最大值相比较, 表明隔震结构的优越抗震性能; 隔震层考虑扭转影响后的最大水平位移宜小于水平位移限值的 75%, 即与文献[9]设计要求相当, 隔震支座面压小于《抗规》^[1](10 版)要求且不产生拉应力。如果符合要求, 可表明隔震层设计、隔震支座型号及布置合理。

(5) 隔震后结构在超烈度的罕遇地震作用下验算: 1) 为检验结构在超烈度大震作用下的安全性, 宜进行隔震与非隔震结构模型在超烈度罕遇地震作用下的时程分析, 主要列出各层层间位移和层间位移角。2) 在超烈度罕遇地震作用下: 隔震上部结构的层间位移角最大值宜满足小于 $1/100$ ^[7-9], 参考文献[9], 尽可能满足小于 $1/200$; 并与非隔震结构层间位移角最大值相比较, 说明隔震结构的优越抗

震性能;隔震层考虑扭转影响后的最大水平位移小于水平位移限值,隔震支座面压小于《抗规》^[1](10版)要求且不产生拉应力。如果符合要求,可表明隔震层设计、隔震支座型号及布置合理。重点考察底层层间位移角,最大值宜小于 1/550,即底层结构处于弹性工作状态。

3 隔震层设计和建议

(1) 底层柱顶隔震,通常隔震层采用隔震橡胶支座,风作用产生的水平力较大时,隔震层宜采用抗风装置与隔震橡胶支座形成复合隔震装置,铅芯隔震橡胶支座的数量的减少意味着结构减震效果更好。

(2) 隔震层刚度中心宜与上部结构质量中心两者尽可能重合。如两者偏心较大应调整带铅芯隔震支座的布置,并按《抗规》^[1](10版)计录两者偏心产生的扭转变形的不利影响。隔震层的偏心率不应过大,参考日本和台湾的“设计规范”规定,隔震层的偏心率应小于 3%^[9]。

(3) 选用多种规格的隔震支座时,应考虑适当增大隔震层的位移及减少隔震支座的型号。

(4) 隔震层的水平地震剪力应符合本地区设防烈度的最小地震剪力系数规定。铅芯支座数量综合考虑上部结构水平向减震系数、隔震层总屈服剪力和抗风承载力设计值。为了保证隔震层具有足够的抗扭刚度,将铅芯隔震支座对称布置在隔震层周边外围^[10]。

(5) 隔震设计中,应画出隔震支座布置图及隔震型号和规格及力学性能参数表。隔震型号和规格表中应列出型号、橡胶剪切模量、竖向承载力设计值、水平屈服力、竖向压缩刚度、屈服后水平刚度、剪应变分别为 50%,100%,250%的水平等效刚度和等效阻尼比、最大水平位移限值等;力学性能参数表中应列出型号、有效直径、有效高度、内部橡胶层数、橡胶层厚度、橡胶总厚度、内部钢板层数、钢板层厚度、铅芯直径、第一形状系数、第二形状系数等;同时图中应按《抗规》^[1](10版)列出隔震支座的出厂抽样检测数量及合格要求。

(6) 隔震层受压承载力验算建议和要求:1) 隔震层具有足够的竖向承载能力,上部结构传递到隔震层的总重力荷载代表值与隔震层总受压承载力设计值之比应大于 1.1 倍,宜大于 1.2 倍。2) 上部结构必须考虑竖向地震作用时,参照《抗规》(10版)和《叠层橡胶支座隔震技术规程》^[10](CECS 126:2001)

(简称《隔震规程》)4.3.2 条 4 款规定。3) 隔震支座应进行在换算烈度的罕遇地震作用下压、拉应力验算。压应力验算内力组合为:1.3×罕遇地震内力值+1.2×重力荷载代表值,隔震支座极大应力不应超过 30 MPa;拉应力验算内力组合为:1.3×罕遇地震内力值+1.0×重力荷载代表值,隔震支座最大拉应力不应大于 1 MPa。4) 隔震支座宜进行在超烈度的罕遇地震作用下压、拉应力验算。压、拉应力验算内力组合和隔震支座最大压、拉应力要求同(3)条。5) 《抗规》^[1](10版)规定隔震支座在罕遇地震的水平和竖向地震同时作用下,拉应力不应大于 1 MPa,极大应力不应大于 30 MPa。

(7) 隔震层抗风水平承载力验算建议和要求:1) 隔震层抗风装置的水平承载力验算。隔震层抗风承载力验算应满足: $\gamma_w V_{wk} \leq V_{rw}$,公式的符号意义参见《隔震规程》4.3.4 条。一般情况下,取受风面较大的方向进行验算,因为风荷载分项 γ_w 系数为 1.4 考虑的是体型系数较大值,所以要满足抗风承载力验算必须布置较多的铅芯隔震支座,这样使得水平向减震系数大,结构隔震效果差,因此宜采用单独设置的抗风装置。2) 风荷载标准值产生的总水平力验算。一般情况下,取受风面较大的方向进行验算,不宜超过结构总重力的 10%。

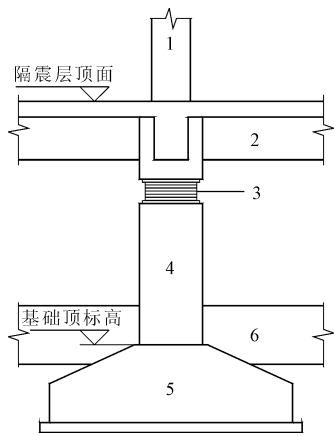
(8) 在罕遇地震作用下隔震支座的最大水平位移值设计建议:取隔震层最小直径的隔震支座进行验算,同时应考虑建筑物距发震断层的近场影响系数,参照《抗规》(10版)和《隔震规程》^[11]第 4.2.8 条。设计计算如果采用单向地震动输入,那么输出的罕遇地震作用下的最大水平位移值尚需乘以考虑偏心产生扭转的放大系数 1.15;如果采用的是双向地震动输入,则不必放大。

(9) 隔震支座弹性恢复力验算设计建议和要求:设计应考虑隔震层的屈重比,即隔震支座的水平屈服荷载设计值比上部结构传递到隔震层的总重力荷载代表值。控制隔震层的屈重比主要是为了保证隔震层的抗风要求,避免隔震结构在风荷载作用下,隔震层发生位移,影响建筑正常使用。屈重比是一个参考指标,《抗规》(10版)对此并未明确给出限值和范围,屈重比应大于上部结构剪重比的下限值^[10]。

4 上部结构设计与计算

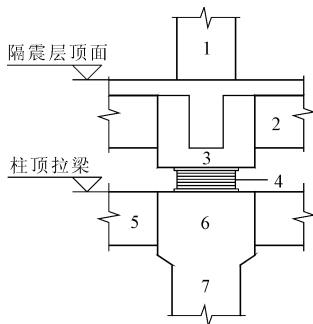
(1) 上部结构计算分析。隔震支座设置于底层

柱柱顶,隔震层作为上部结构的固端支座,为便于荷载的统计和传递,隔震层作为一个楼层归入上部结构计算。隔震层的柱子计算高度简化取该层计算高度为框架梁高度 + 隔震支座高度^[10],如图 2 和图 3 所示。



1—上部柱子;2—隔震层;3—隔震支座;4—独立柱;
5—基础;6—基础梁

图 2 底层柱顶隔震结构构件布置图



1—上部框架柱;2—隔震层梁板;3—上支墩;4—隔震支座;
5—柱顶拉梁;6—下支墩;7—底层框架柱

图 3 底层柱顶隔震支座节点构造

(2) 上部框架结构的抗震等级要求应依据《抗规》(10 版)第 12.2.7 条第 2 款要求确定。

(3) 隔震层顶部框架梁和楼板结构设计。上部结构按换算烈度进行常规设计,并以隔震层为完全嵌固端。依据《抗规》^[1](10 版)第 12.2.8 条 1、2 款要求,隔震层楼盖设计应采用刚度较大的现浇肋梁楼盖,隔震层结构平面布置中宜设计多道次梁来增大楼板的刚度。框架梁作为上部柱子的固端条件^[10],框架梁线刚度(考虑梁翼缘宽度的有利影响)应大于相应方向的二层框架柱线刚度 2 倍以上。

5 下部结构设计计算

5.1 独立柱设计

依据《抗规》^[1](10 版)第 12.2.9 条要求,独立柱采用换算烈度的罕遇地震内力进行截面强度设计。独立柱通过隔震支座和上部结构联系在一起,在换算烈度的多遇地震作用下隔震层刚度较大,为了简化独立柱受力计算并确保其安全,按悬臂柱进行受力分析。

独立柱的边、角柱在罕遇地震作用下容易产生严重破坏,以及根据文献[8]的研究结论,对独立柱的角柱、边柱内力取值考虑隔震支座受耦合地震效应的影响,乘以放大系数 1.20。

独立柱设计考虑如下措施:(1) 柱子截面尺寸应满足受力要求;(2) 柱子截面尺寸需满足搁置隔震支座的构造要求;(3) 柱长细比宜接近 5;(4) 柱子轴压比宜小,使其具有较好的延性;(5) 独立柱抗震等级《抗规》^[1](10 版)没有具体规定,根据文献[8]的建议,独立柱抗震等级不小于二级。

独立柱设计内力取值过程如图 4 所示。

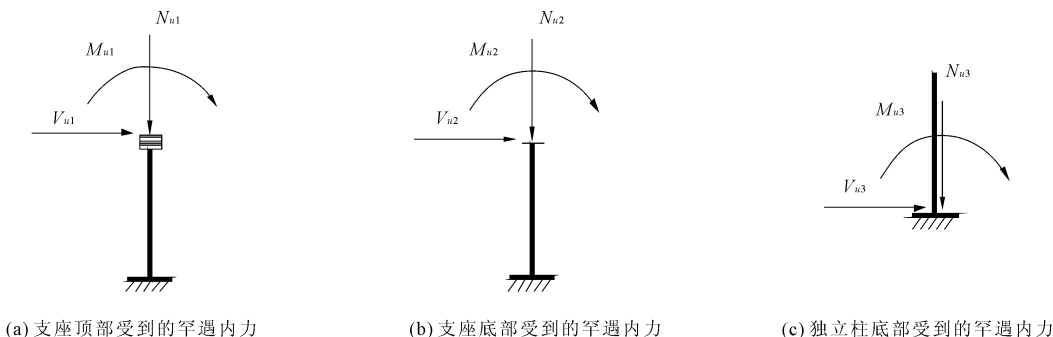


图 4 独立柱设计内力取值图示

图 4 中, M_{u1} 、 N_{u1} 、 V_{u1} 表示上部结构在换算烈度的罕遇地震作用下,传至隔震支座顶部的弯矩、轴力、剪力; M_{u2} 、 N_{u2} 、 V_{u2} 表示在受到 M_{u1} 、 N_{u1} 、 V_{u1} 的作

用下并叠加由隔震支座的水平位移引起的附加弯矩值(竖向荷载引起的 $P - \Delta$ 效应以及剪力引起的附加弯矩(隔震支座的 1/2 高度 $\times V_{u1}$)); M_{u3} 、 N_{u3} 、 V_{u3}

表示底层柱底部在受到 M_{u2} 、 N_{u2} 、 V_{u2} 的作用再叠加底层柱在设防烈度的罕遇地震作用下自身引起的罕遇内力值。

5.2 底层框架柱带拉梁的平面框架设计

依据《抗规》^[1](10 版)第 12.2.9 条要求,底层框架柱及其拉梁采用换算烈度的罕遇地震内力进行截面强度设计。框架柱通过隔震支座和上部结构联系在一起,每根框架柱应有双向拉梁约束,拉梁根据其刚度与底层框架柱按平面框架进行内力计算和分配弯矩。

底层框架柱设计的考虑与措施同独立柱。框架柱和拉梁抗震等级《抗规》^[1](10 版)没有具体规定,根据文献[8]的建议,框架柱和拉梁抗震等级均不小于二级。

5.3 隔震支座节点设计

依据《抗规》^[1](10 版)第 12.2.8 条第 2 款要求:隔震支座与上部结构、基础之间的连接件及其预埋件,应能传递在换算烈度的罕遇地震下隔震支座的最大水平剪力。考虑结构的关键节点具有抵抗超烈度地震的可能,节点设计内力值宜取在超烈度罕遇地震作用下的数值。隔震支座节点设计内容应包含:支座上下支墩、连接螺栓和钢板、预埋钢板和锚筋等,如图 3 所示。

6 结 语

(1) 提出了实用的钢筋混凝土底层柱顶隔震框架结构设计方法和步骤及设计建议。实际工程的隔震设计可以通过阐明的设计方法和步骤来进行计算分析。

(2) 基于底层结构安全性应高于上部结构及由于地震的随机性,建筑结构所处地区超烈度发生的概率高,提出了底层结构应进行超烈度验算的必要性和建议。

(3) 建议实际隔震工程设计,考察隔震上部结

构减震效果,应重点对底层结构的动力响应和受力进行详细分析及加强抗震设计。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 周福霖. 工程结构隔震减震研究进展[M]. 北京:地震出版社, 2004.
- [3] 黄囊云. 层间隔震减震结构的理论分析和振动台试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
- [4] Kamada T, Fujita T. Current Status of Seismic Isolation and Vibration Control to Buildings[C]//Cultural Heritage and Industrial Facilities in Japan. Proceedings of the 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures. Istanbul, Turkey. 2007.
- [5] Chang K C, Hwang J S, Wang S J, et al. Analytical and experimental studies on seismic behavior of buildings with mid-story isolation[C]//Proceedings of the 2009 ATC&SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, Osaka, 2009.
- [6] Chang K C, Hwang J S, Chan T C, et al. Application, R&D and Design rules for Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems for Buildings and Bridges in Taiwan[C]//10th World Conference on Seismic Isolation. Isolanbul: Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2007.
- [7] 吴应雄. 钢筋混凝土底层柱顶隔震框架结构试验及设计方法研究[D]. 福州:福州大学, 2012.
- [8] 党育, 杜永峰, 李慧. 基础隔震结构设计及施工指南[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [9] 傅金华. 日本抗震结构及隔震结构的设计方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 吴应雄. 低位层间隔震技术在某框架结构的应用研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 806-813.
- [11] 中国工程建设标准化协会. 叠层橡胶支座隔震技术规程:CECS126-2001[S]. 北京:中国工程建设标准化协会, 2001.