

某带高位转换的框支剪力墙结构设计

方义庆

(上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041)

摘要 结合无锡蓝庭国际在层8转换的部分框支剪力墙结构设计,分析了带高位转换结构的竖向规则性,发现在转换层处,框支柱、剪力墙存在剪力突变,转换层下一层与转换层刚度比小于50%。结合该工程设防类别及规则性,针对结构和关键构件提出不同的抗震性能设计目标。对转换层及其上下层楼板在各级地震作用下的楼板应力进行了分析,并给出了便于工程应用的转换层楼板配筋计算方法。合理布置结构,避免结构刚度柔软层为承载力薄弱层。弹塑性分析表明,经过合理布置后的结构无明显薄弱层,具有良好的屈服机制。

关键词 高位转换; 转换层层高; 竖向不规则; 转换层楼板设计

中图分类号: TU375, TU318 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013) 01-0027-06

Structural design on a frame-supported shear wall structure with high transfer story

Fang Yiqing

(Shanghai Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: Based on structural design on a frame-supported shear wall structure of Wuxi Lanting Guoji with transfer story at the 8th floor, the vertical regularity of high transfer structure was analyzed. The results show that shear force of the column which supports transfer beam and shear wall mutates near the transfer story; the stiffness ratio of transfer story and the story below was less than 50%. Based on the seismic fortification and regularity of the project, aiming at structure and key elements, different structural seismic performances were presented. The slab stress of transfer story and the story below (above) under different seismic load was analyzed. A calculation method for reinforcement of transfer story slab was proved. Soft story can be avoided to be weak story by reasonable layout of the structure. Results of elasto-plastic analysis indicate that the structure has no obvious weak story, and it has an excellent yield mechanism.

Keywords: high transfer story; storey height of transfer story; vertically irregular; slab design method of transfer story

1 工程概况

无锡蓝庭国际结构体系为部分框支剪力墙结构,地上共31层,地下1层,桩筏基础,基础埋深7.8m。转换层位于层8,转换层顶面标高为30.7m,转换层层高2.2m;转换层(层8)以上为住宅,层高2.9m;转换层(层8)以下为办公,层1层高为4.5m,标准层层高为4m。结构高度为97.55m。结构设计使用年限为50年,安全等级为二级。标准层及转换层结构平面见图1和图2,立面见图3。

抗震设防烈度为6度,抗震设防类别为丙类,场地类别为Ⅲ类。基本风压(100年)为 0.50kN/m^2 ,地面粗糙度类别为C类。

对于底部大空间部分框支剪力墙高层建筑结构在地面以上的大空间层数,《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)^[1](简称高规)规定“8度时不宜超过3层,7度时不宜超过5层,6度时其层数可适当增加”;《江苏省房屋建筑工程抗震设防审查细则》^[2]规定“6度不宜超过8层”。目前大部分文献介绍的项目多为在层5及以下转换的部分框支剪力墙结构^[3,4]。为更加清楚认识高位转换结构的薄弱环节,着重对该结构的竖向规则性和转换层楼

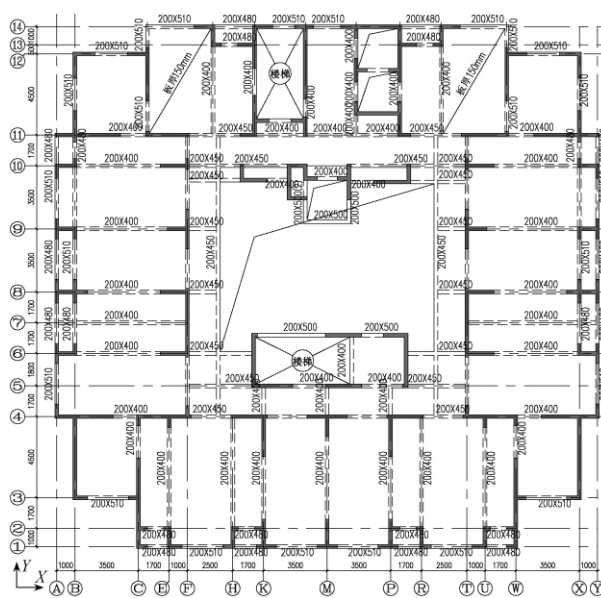


图1 标准层结构平面图

板进行分析,并给出适合工程应用的转换层楼板配筋计算方法。

作者简介:方义庆,硕士,一级注册结构工程师,Email: fangqing859@sina.com。

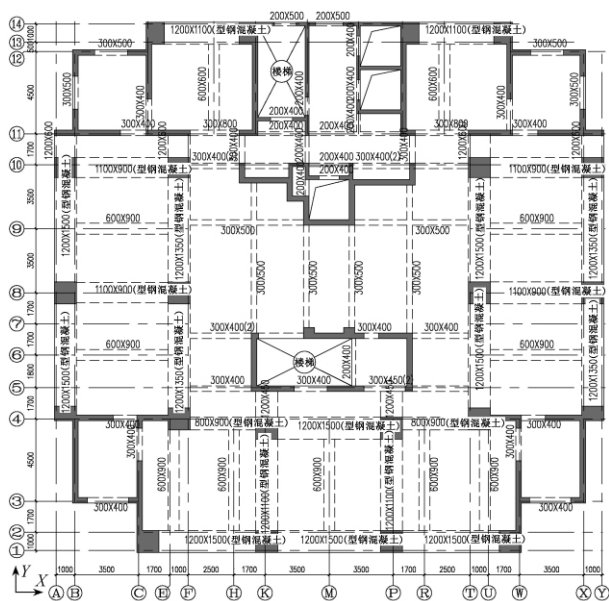


图2 转换层结构平面图

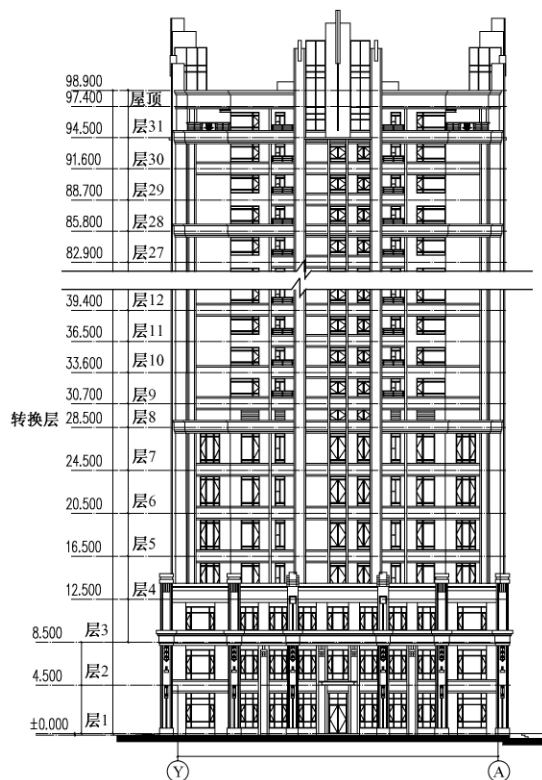


图3 立面图

2 结构布置

2.1 转换层层高确定

方案阶段,经建筑、结构、设备三专业讨论后,共提出3种方案:1) 方案1: 设置设备转换层(兼结构转换层),转换层层高2.2m(建筑专业允许最大高度),转换层顶面标高为30.7m;2) 方案2: 不单独设置设备转换层,将设备转换在吊顶内完成,结构转换层层高6.2m(将层7及层8合并),转换层顶面标高

为30.7m;3) 方案3: 单独设置设备转换层,设备转换层层高为2.2m,但结构转换层位于下一层,结构转换层层高4.8m,转换层顶面标高为29.3m。

方案3与方案1相比,转换层是刚度软弱层,如果要做到转换层与其上一层侧向刚度比为60%以上,需要将落地剪力墙加厚2.4倍(按照剪切刚度估算,标准层有55%剪力墙落地),即使做到60%,转换层仍然是刚度软弱层,因此首先可排除方案3。而方案1可以避免转换层为刚度软弱层,经计算落地墙加厚1.4倍即可满足转换层与其上一层刚度比为1的要求,节约了结构造价。方案1、方案2相比各有优点: 方案1容易满足转换层与其上一层刚度比要求,但同时存在转换层下一层与转换层刚度比难以满足高规4.4.2条要求的问题。方案2转换层(层高6.2m)与其上一层(层高2.9m)刚度相比容易形成刚度软弱层,且刚度软弱层与结构转换层为同一层,楼层地震剪力在转换层处突变(地震剪力急剧增大,见图4)。另外,建筑、设备专业希望设置单独的设备层,因此,最终选择方案1。

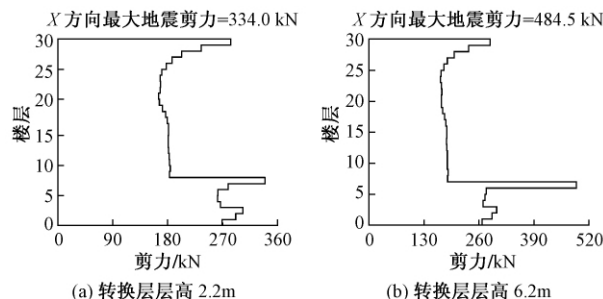


图4 最大楼层地震剪力曲线

2.2 剪力墙布置

利用平面中的楼梯间、电梯井及设备管井做成落地剪力墙,并在框支层组合成筒体布置形式。同时利用建筑四个角部房间,做成落地剪力墙筒。

在满足轴压比的条件下,尽量缩短不落地墙墙肢的长度,以弱化转换层以上结构刚度。剪力墙主要截面及采用材料见表1。

主要构件截面及材料

表1

构件	转换层以上剪力墙	框支柱	框支梁	落地剪力墙
截面尺寸/mm	200	1 200 × 1 200	1 200 × 1 300	300 ~ 350
材料	C30 ~ C40	C40 钢筋 Q345	C40 钢筋 Q345	C40

2.3 框支框架

框支柱采用型钢混凝土构件,其优点为:1) 在转换层处,框支柱和剪力墙承担的剪力存在突变,采用型钢混凝土构件,增加了框支柱的抗剪承载力,同

时增加了框支柱的延性; 2) 同样轴压比条件下, 大大减小了柱截面, 增加了建筑使用面积。框支柱主要截面尺寸及采用的材料见表 1。

框支梁主梁采用宽梁, 梁宽同框支柱宽, L 形、T 形剪力墙尽量落在框支主梁上, 尽量避免次梁转换。框支梁截面一般为受剪控制, 为满足建筑、设备转换的空间要求, 选择了型钢混凝土构件。

3 竖向不规则分析

3.1 最大楼层地震剪力曲线

为全面认识高位转换时最大楼层地震剪力曲线, 对比了不同转换层层高时 CQC 计算分析结果。

图 4 为转换层在层 8(转换层层高 2.2m) 和转换层在层 7(转换层层高 6.2m)、转换层顶面标高均为 30.7m、结构构件布置相同时, 采用 CQC 计算得到的最大楼层地震剪力曲线。

从两种转换层层高对应的最大楼层地震剪力曲线可看出: 1) 转换层以下最大楼层地震剪力均大于转换层以上楼层, 主要是因为转换层以下各层楼层质量大于转换层以上标准层质量; 2) 转换层层高为 6.2m 时, 转换层楼层地震剪力突变, 存在急剧增大的现象, 产生突变一是因为该层质量大, 二是因为该层侧向刚度较低, 各振型对应的该层水平相对位移较大。因最终选择方案 1, 故下面主要针对方案 1 进行论述。

3.2 楼层侧向刚度比

现行规范、规程中存在多种侧向刚度比算法, 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[5] (简称抗震规范) 采用层剪力与层位移比值, 广东省高规补充规定^[6] 采用层间位移角比值, 上海市抗震规程^[7] 采用剪切刚度。从因层高变化引起的刚度比差异来看, 采用抗震规范算法得到的结果更为不利, 突出了层高变化可能引起结构薄弱层。给出了不同算法下的刚度比的比较, 以抗震规范算法为主要标准, 其他作为参考值。

为满足转换层上部与下部结构等效侧向刚度比要求, 落地墙加厚 100mm, 经 SATWE 计算, 刚度比满足高规附录 E 要求, 见表 2。图 5 为 X 向侧向刚度分布图(采用层剪力与层位移比值算法)。结合表 2 和图 5 可看出:

(1) 转换层层高为 2.2m 时, 仅转换层侧向刚度较大, 其他层层刚度相对一致。

(2) 转换层上一层(层高及结构构件与标准层均相同) 层刚度相对略大, 主要因为: 1) 采用层剪力与层位移比值算法, 相同层剪力条件下, 与层位移相关; 2) 转换层处框支框架的剪切变形制约了落地剪

力墙的弯曲变形, 减小了转换层上一层层间位移角(弯曲变形引起)。

(3) 依据文 [5] 第 3.4.1 条、第 3.4.2 条及条文说明, 采用层剪力与层位移比值算法, 当 γ_7 小于 50% 时, 为特别不规则结构, 仅这一项就需进行超限审查。

刚度比计算 表 2

刚度比算法	转换层层高 2.2m		
	γ_8	X 向 Y 向	1.68 1.52
层剪力与层位移比值	γ_7	X 向 Y 向	0.43 0.45
	γ_8	X 向 Y 向	1.51 1.44
剪切刚度	γ_7	X 向 Y 向	0.57 0.56
	γ_8	X 向 Y 向	1.20 1.06
层间位移角比值	γ_7	X 向 Y 向	0.73 0.80
	剪弯刚度 γ_E	X 向 Y 向	0.541 4 0.541 0

注: γ_8 为转换层与其上一层刚度比, γ_7 为转换层下一层与转换层刚度比, 剪弯刚度 γ_E 为转换层上部与下部结构等效侧向刚度比。

3.3 楼层受剪承载力

图 6 为 X 向楼层抗剪承载力分布, 可以看出, 转换层下部楼层抗剪承载力明显高于转换层以上楼层。其主要原因: 1) 落地墙加厚至 300mm, 转换层以上基本为 200mm; 2) 框支柱采用型钢混凝土; 3) 转换层以下竖向构件全部采用 C40 混凝土; 4) 提高底部加强部分剪力墙抗震等级。

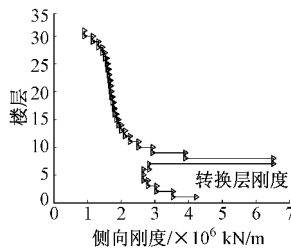


图 5 转换层层高 2.2m 时 X 向侧向刚度分布

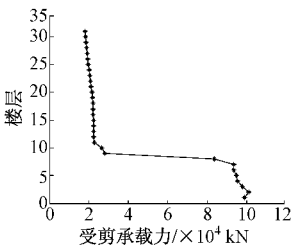


图 6 转换层层高 2.2m 时 X 向抗剪承载力分布

综合图 5 和图 6 可知: 1) 转换层既不是刚度软弱层, 也不是承载力薄弱层; 2) 刚度软弱层不是承载力薄弱层。

3.4 剪力墙与框支框架承担剪力及传力途径分析

计算分析中均采用弹性楼板假定, 以考虑楼板平面内的变形及平面外的刚度。

框支柱、剪力墙剪力分布见图 7, 由图可见, 在转换层处, 框支柱、剪力墙存在剪力突变, 主要因为:

高位转换时,落地墙已经呈现出明显的弯曲变形,框支框架为剪切变形,框支框架制约剪力墙的弯曲变形,从而引起了转换层处框支柱、剪力墙剪力分配突变,当转换层层高较低时,加剧了这一现象。为了对比转换层层高的影响,补充了转换层层高 6.2 m 时(转换层标高、结构构件布置相同)的框支柱、剪力墙剪力分布图。

框支柱、剪力墙承担的剪力在转换层处急剧突变,需转换层楼板传递,增加了转换层及其下一层楼板的负担,对楼板的构造及计算分析见第 4.3 节。

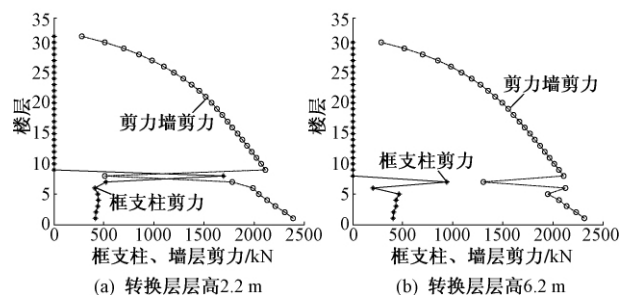


图 7 框支柱、剪力墙剪力分布

4 结构设计

4.1 结构抗震性能化目标

因该结构仅为丙类设防的办公和公寓,综合考虑结构的规则性和造价因素,该结构最终的性能目标为:整体结构满足基本抗震设防目标,提高关键结构构件(框支框架、转换层楼板)的抗震性能目标。具体抗震性能目标见表 3。

抗震性能目标 表 3

地震水准	小震	中震	大震
抗震设防水准	小震不坏	中震可修	大震不倒
抗震性能水准	完好	修复后使用	生命安全
允许层间位移角	1/1 000	1/250	1/120
转换层及上下层楼板	弹性	弹性	不屈服
框支梁、框支柱	弹性	弹性	受剪截面控制

4.2 主要抗震措施

(1) 框支框架。为了提高框支框架的抗震性能目标,框支框架采用型钢混凝土构件。框支柱、框支梁按照中震弹性设计,并对框支柱、框支梁进行大震作用下抗剪截面验算。将其抗震等级调整为一。

(2) 落地剪力墙。控制落地剪力墙承担的地震倾覆力矩大于总地震倾覆力矩的 50%。底部加强部位剪力墙抗震等级为一。

(3) 转换层处楼板。转换层及其下一层楼板板厚 200 mm,转换层上一层板厚 150 mm。控制板最小配筋率不小于 0.25%,且不小于计算要求。

4.3 转换层楼板设计

4.3.1 楼板应力分析

表 4 为各级地震及风荷载作用下转换层及上下层楼板最大主应力 σ_1 (采用 PMSAP 软件计算),由表可见,转换层及其下一层楼板应力较大,与图 7 分析结果吻合。

楼板应力 / MPa 表 4

荷载作用	风荷载	小震	中震	大震
转换层	0.72	0.45	1.34	3.13
转换层下一层	0.71	0.46	1.38	3.24
转换层上一层	0.49	0.26	0.77	1.80

4.3.2 楼板配筋计算

现行规范没有具体的楼板抗震配筋计算方法。为了实现楼板的抗震性能目标,给出了适用于工程应用的配筋计算方法。计算配筋不应小于最小配筋率要求。

(1) 中震弹性计算

依据抗震规范可得:

$$R \geq \gamma_{RE} [1.2(S_{GK} + 0.5S_{QK}) + 1.3S_{Ehk}] \quad (1)$$

式中 γ_{RE} 取 0.85。

将式(1)中 $1.2(S_{GK} + 0.5S_{QK})$ 近似等效为恒荷载 + 活荷载基本组合 $1.2(1.2S_{GK} + 1.4S_{QK})/1.3$ 或 $1.2(1.35S_{GK} + 1.4 \times 0.7S_{QK})/1.3$, 则可以将式(1)写成下式:

$$A_s \geq (0.85 \times 1.2/1.3) A_{s1} + 1.1A_{s2} \quad (2)$$

式中: A_{s1} 为竖向荷载作用下的配筋面积; A_{s2} 为地震作用下的配筋面积,依据文 [8] 的第 5.2.8 条及条文说明,受拉钢筋的配筋量可根据主拉应力的合力进行计算,具体可参考行业标准《水工混凝土结构设计规范》[9],因此,可由地震作用下楼板应力分析结果计算得到配筋面积 A_{s2} :

$$A_{s2} = KT/f_y = 1.3\omega h/f_y \quad (3)$$

式中: K 为承载力安全系数; T 为钢筋承担的拉力设计值; h 为板厚; ω 为截面主拉应力在配筋方向投影面积的总面积扣除其中拉应力值小于 $0.45f_t$ 的面积后的图形面积。

式(2)可以将竖向荷载作用下的配筋直接与水平地震作用下的配筋叠加,给实际工程应用带来了方便和可操作性,可以满足工程计算精度。

(2) 大震不屈服计算

依据抗震规范可得:

$$R_k \geq S_{GK} + S_{QK} + S_{Ehk} \quad (4)$$

转换层楼板配筋一般均为双层双向,且上部与下部配筋相同,依据文 [8],则有:

$$A_{s1} = (M/f_y)(h_0 - a_s') \quad (5)$$

由 $f_{yk} = 1.1f_y, M = 1.3M_k$, 可得:

$$\begin{aligned} A_{s1} &= 1.3 \times 1.1 (M_k / f_{yk}) (h_0 - a_s') \\ &= 1.3 \times 1.1 A_{sk1} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(4)及式(6)可得:

$$A_{sk} = A_{sk1} + A_{sk2} = A_{s1} / (1.3 \times 1.1) + A_{sk2} \quad (7)$$

式中: A_{sk1} 为采用竖向荷载作用标准值及材料标准值计算得到的配筋面积; A_{sk2} 为采用地震作用标准值及材料标准值计算得到的配筋面积, 依据文[6], 可由地震作用下楼板应力分析结果计算得到配筋面积 A_{sk2} :

$$A_{sk2} = \omega h / f_{yk} \quad (8)$$

如该工程转换层楼板大震不屈服验算中, 竖向荷载作用下配筋面积 A_{s1} 为 159mm^2 , 另根据式(8)得到 A_{sk2} 为 443mm^2 (单层单向计算), 根据式(7)得 A_{sk} 为 544mm^2 , 实际配筋 $12@150$ 双层双向布置 (大于最小配筋率 0.25%)。

4.4 型钢混凝土框支柱柱脚设计

因结构嵌固端以下只有一层地下室, 型钢混凝土柱均采用埋入式柱脚, 适用于钢骨柱长(宽)不大于 1000mm , 见图 8, 需要特别说明的有: 1) 筏板上部纵筋(受压区)遇型钢时截断, 弯锚 $15d$, 四周采用洞口加强; 2) 筏板下部纵筋(受拉区)截断处理同上部纵筋, 另柱脚柱帽纵筋同筏板底部纵筋, 并锚入筏板, 下部纵筋传力连续; 3) 根据钢骨柱柱脚底板承受荷载进行抗冲切验算, 配置抗冲切弯起钢筋。

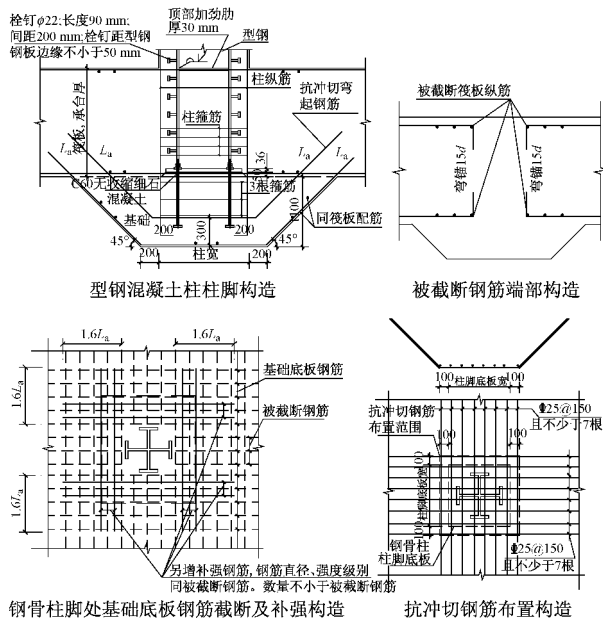


图 8 埋入式柱脚

5 结构弹塑性分析

为判断结构是否满足预期的抗震性能目标和进一步认识结构可能存在的薄弱环节, 对结构进行了

静力弹塑性分析。

该工程虽位于 6 度区, 但考虑到结构规则性与结构所处的位置无关, 且实际地震作用超过设防烈度的不在少数, 如汶川地震、玉树地震等, 为增加对该工程的弹塑性认识, 补充计算 7 度大震作用下的结构破坏状态 (因该结构在 6 度大震时, 结构基本处于部分连梁屈服阶段, 难以看出后面塑性发展情况, 为此, 尽管规范没有要求, 也补充计算了 7 度大震作用下的结构破坏状态, 旨在观察结构屈服机制)。分析结果表明:

(1) 该结构完全可以达到抗震规范要求的基本抗震设防目标。依据《建筑地震破坏等级划分标准》(建设部 90 建抗字第 377 号), 6 度大震时该结构处于“轻微破坏”至“中等破坏”状态间, 连梁及局部剪力墙进入屈服状态。结构达到了预期的抗震性能目标。

(2) 各级地震作用下, 楼层层间位移角见图 9 和表 5, 由图可见, 结构不存在明显的薄弱层。刚度柔软层并不是结构承载力薄弱层, 无塑性变形集中现象。各级地震作用下, 最大层间位移角均出现在层 15 左右。

(3) 结构弹塑性发展情况表明该结构具有良好的屈服机制, 基本构架了结构多道防线, 并起到耗能

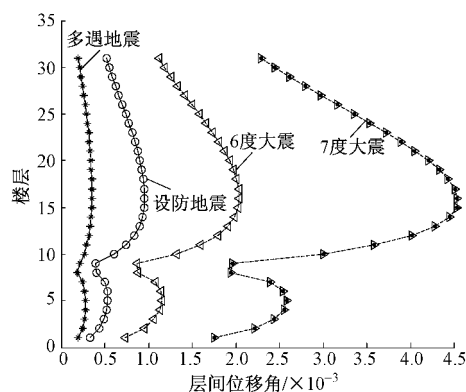


图 9 层间位移角

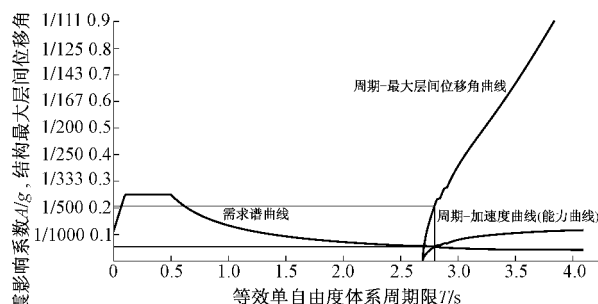


图 10 抗倒塌验算图

所在地区: 全国; 场地类型: III; 设计地震分组: 一; 抗震设防烈度: 6 度大震; 地震影响系数最大值 $A_{max}/g: 0.250; T_g/s: 0.500$; 弹性状态阻尼比: 0.050 ; 能力曲线与需求曲线的交点 $T/s, A/g: 2.796, 0.054$; 性能点最大层间位移角: $1/482$; 性能点基底剪力 $kN: 13452.9$; 性能点顶点位移 $mm: 151.9$; 性能点附加阻尼比: $0.023 \times 0.70 = 0.016$; 与性能点相对应的总加载步数: 28.1。

各级地震作用下结构弹塑性发展情况 表 5

地震作用	小震	中震	6 度大震	7 度大震
层间位移角	1/2 828	1/1 129	1/482	1/218
构件状态	均为弹性	个别连梁屈服	部分连梁、个别墙屈服	多数连梁, 部分墙屈服

作用,结构的抗倒塌验算图见图 10。

6 结论

(1) 最大楼层地震剪力曲线表明,转换层及以下楼层地震剪力一般较大,转换层层高较大时,层地震剪力在转换层处急剧增大。

(2) 高位转换时,框支柱、剪力墙承担的剪力在转换层位置急剧变化,剪力传递不直接,增加转换层及其下一层楼板的负担,应对楼板进行分析并加强,文中给出了转换层楼板配筋计算方法。

(3) 当转换层侧向刚度大,致使转换层下存在刚度软弱层时,可以通过合理布置结构,避免该层同时成为刚度软弱层和承载力薄弱层,以建立合理的屈服机制。弹塑性分析表明,本工程刚度柔软层未出现塑性变形集中现象,结构无明显结构薄弱层。

(4) 结构弹塑性全过程分析可以认识结构最大的抗震能力。在不增加造价前提下,建立合理的屈服机制,既可构架多道防线,又可起到耗能作用。

(5) 宜单独设置设备转换层(兼结构转换层),一般设备转换层层高不高,可以避免在转换层出现

刚度柔软层。

(6) 对于 6 度以上地区存在高位转换时,应进一步进行更加深入的分析、研究。

致谢:衷心感谢陈绩明总工程师在设计过程中的指导。

参 考 文 献

- [1] JGJ 3—2002 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,2002.
- [2] 江苏省房屋建筑工程抗震设防审查细则 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [3] 徐斌,苗启松,王月仙,等. 北京天亚花园框支剪力墙结构体系设计研究 [J]. 建筑结构,2006,36(6):24-27.
- [4] 贾锋. 常熟华府世家箱形转换层结构设计 [J]. 建筑结构,2007,37(8):20-22.
- [5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] DBJ/T 15-46—2005 广东省实施《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002) 补充规定 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [7] DGJ 08-9—2003 建筑抗震设计规范 [S]. 上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2010.
- [8] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [9] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

(上接第 16 页)

剪力系数是否符合最小地震剪力系数的规定。按抗震规范要求,本工程可不进行竖向地震作用的计算。

6 构造措施

1) 在基础顶面设置隔震支座,在底层增设板厚为 150mm 的梁板式楼盖,双层双向配筋。隔震支座

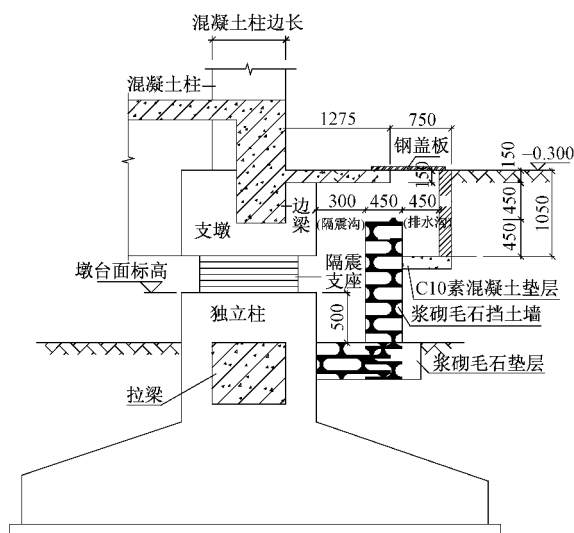


图 5 隔震沟示意图

连接示意图 4; 2) 为了增加隔震层的刚度和隔震支座的稳定性,在支座下适当位置增设连系梁; 3) 在建筑物周围设置隔震沟,楼电梯结构上下脱开,为结构在地震作用下预留变形空间,隔震沟示意图 5; 4) 要求设备管道穿过隔震层时,采用柔性连接。

7 结语

工程在上部结构与基础之间设置隔震层,通过合理选择和布置橡胶(铅芯)隔震支座,有效地减小了建筑物的水平地震作用,达到了预期的设计目标。本工程作为抗震救灾项目,取得了一定的社会效益。

参 考 文 献

- [1] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S]. 2008 年版. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 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.
- [3] 孙相峰,潘文. 叠层橡胶垫基础隔震建筑结构设计方法与应用 [J]. 世界地震工程,2007,23(4):39-42.
- [4] 孙相峰,潘文. 多层隔震结构两阶段设计方法 [J]. 世界地震工程,2008,24(3):25-28.