

某高层框支剪力墙结构的楼板应力分析

林宝新^{1,2}, 李尚¹

(1. 安徽建筑大学土木工程学院, 合肥 230022; 2. 安徽建筑大学建筑设计研究院, 合肥 230022)

摘要: 以某平面不规则框支剪力墙结构为例, 进行多遇地震下的弹性分析和罕遇地震下的弹塑性分析, 并就楼盖凹陷处以不设拉板、设拉梁和设拉板三种模型分别对上部标准层平面和带转换层平面进行楼板应力分析, 检验其抗震性能。分析表明, 拉板模型结构具有良好的受力性能和变形能力, 各构件能够达到预期的性能目标。

关键词: 凹凸不规则楼板, 带转换层楼板, 抗震性能目标, 楼板应力分析

中图分类号: TU311

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2016)04-001-07

Floor Stress Analysis of a High-rise Frame-supported Shear Wall Structure

LIN Baoxin^{1,2}, LI Shang¹

(1. School of civil Engineering, Anhui Jian zhu University, Hefei, 230022, China;

2. The Archi-tectural Design and Research Institute of Anhui Jian zhu University, Hefei, 230022, China)

Abstract: In this paper, with a frame-supported shear wall of irregular plane as an example, elastic analysis under frequent earthquake and elastic-plastic analysis under rare earthquake have been analyzed. Three models of no-pulling plate, pulling beam and pulling plate at concave department have been established to analyze the floor stress of conversion layer and standard floor. Finally, its seismic performance has been inspected. It shows that the model of pulling plate has good ability of bearing and deformation, and each component can achieve the desired targets of the seismic performance.

Keywords: concave-convex irregular floor; conversion layer floor; seismic performance objectives; floor stress analysis

0 引言

近年来, 随着人们对建筑使用功能和形体等方面要求的不断提高, 上部楼层为住宅或酒店, 底部楼层用于商业的高层建筑得到较多的应用。为了实现这种上部小开间下部大开间的布置, 需要在竖向构件不连续处设置水平转换构件, 转换构件所在楼层即为转换层, 转换层楼板面内需要传递不落地剪力墙巨大的水平剪力; 同时建筑形体的平面不规则性, 尤其是细腰形平面在凹进处的楼板容易在地震作用下因应力集中而被破坏。因楼板在水平地震作用中需协调楼层中竖向构件

的变形, 可见楼屋盖在抗震性能设计中对结构整体性是非常重要的。

国内外研究的不规则性结构往往只针对竖向不规则或平面不规则中的一种, 对既有竖向不规则又有平面不规则导致的复杂楼盖应力研究较少。本文选取的某平面不规则结构, 按文献^[1]和规范^{[2][3]}存在多项不规则类型, 根据《高规》^[2]10.1.5条规定: “复杂高层建筑结构中的受力复杂部位, 尚宜进行应力分析, 并按应力进行配筋设计校核”。本文采用Midas building软件对该结构的局部转换层楼板和上部标准层不带隔层拉梁的楼板进行应力分析。

收稿日期: 2016-02-26

作者简介: 林宝新(1966-), 男, 正高工, 硕士生导师, 主要研究方向为: 工程防灾减灾理论与应用。

1 工程概况

合肥市滨湖某住宅楼，采用钢筋混凝土剪力墙结构，地下1层，地上29层，嵌固端设置于地下室顶板。该工程建筑高度为84.55 m，建筑平面图如图1、图2，左端跨有2层商业，存在局部转换，在⑩轴附近存在局部错层，商业二层与住宅三层顶平。商业一层建筑层高4.5 m，二层高4.2 m，其他楼层都为住宅，层高2.9 m。本工程设防烈度为7度，场地类别为II类，抗震等级为二级，基本风压0.35 KN/m²。

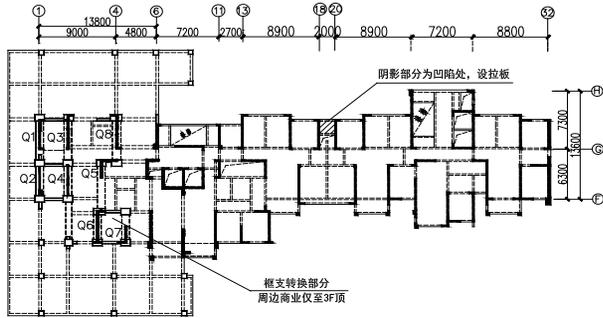


图1 带转换层平面布置图

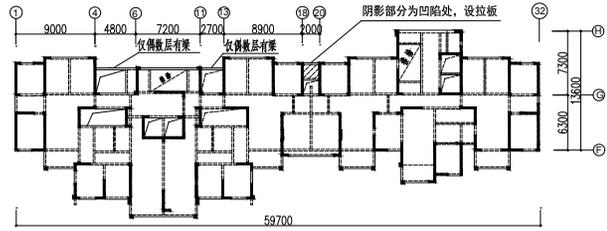


图2 上部标准层平面布置图

2 结构不规则性和抗震性能目标

2.1 结构不规则性

此工程存在四项不规则类型，见表1，其中⑩~⑰轴处平面凹进尺寸7.3 m，与相应边长13.6 m之比为53.6%，根据文献^[1]，属于不规则性超限建筑。

2.2 抗震性能目标

根据“小震不坏，中震可修，大震不倒”^[3]的基本设防目标，本工程将通过小震下的强度设计和大震下的变形验算来实现抗震性能设计要求。根据《高规》^[2]对抗震性能目标的划分，该建筑抗震性能目标定为D级，其中涉及楼板部分按表2控制。

表1 结构不规则性

不规则类型	规范要求	结构分析结果	规则判断
凹凸不规则	平面凹凸尺寸不宜大于相应边长30%等	凹陷超过30%	不规则
楼板不连续	有效宽度小于50%，开洞面积大于30%，错层大于梁高	存在错层	不规则
扭转不规则	考虑偶然偏心的扭转位移比不宜大于1.2，不应大于1.4	位移比大于1.2	不规则
构件间断	上下墙、柱、支撑不连续	存在局部转换	不规则

表2 层间变形和楼板性能目标要求

地震烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震
层间位移角限值	1/1000	1/400	1/140
转换楼板	弹性	大部分混凝土受拉应力≤f _{tk}	楼板钢筋受拉不屈服
标准层楼板	混凝土受拉应力≤f _{tk}	楼板钢筋受拉弹性	楼板钢筋受拉不屈服

3 多遇地震下的弹性分析

3.1 反应谱分析

根据图1、图2设置的拉板模型，本工程使用SATWE程序进行反应谱分析。考虑风荷载和双向地震作用，特征周期0.35 s，周期折减系数取0.95，计算结果如表3。

由表3可以看出，结构周期比T₃/T₁=0.7，小于规范限值0.9；楼层竖向构件最大位移比小于1.4，楼层最大层间位移角小于1/1000；结构最小

表3 多遇地震弹性计算结果

周期	T ₁ =2.6717	T ₂ =2.3666	T ₃ =1.8775
方向	X方向		Y方向
基底剪重比	1.6%		1.67%
楼层最大位移比	1.03 (2F)		1.34 (4F)
最大层间位移角	1/1356 (13F)		1/1325 (22F)
刚度比Y _{e1}	1.61		1.34
刚度比Y _{e2}	2.16		1.22

剪重比大于1.6%；转换层与其相邻上层的侧向刚

度比 γ_{e1} 在 X 向和 Y 向均大于 0.6; 转换层下部结构与上部结构的等效侧向刚度比 γ_{e2} 在 X 向和 Y 向均大于 0.8。计算结果表明, 该结构布置合理, 能够达到“小震不坏”的抗震设防目标。

3.2 弹性时程分析

由于本工程属于特别不规则建筑, 根据《抗规》^[3]5.1.2 条规定需要对其进行弹性时程分析。使用 SATWE 程序, 选用业主提供的三条地震波, 按双向地震输入, 其中主分量峰值加速度取 35 cm/s^2 , 次分量峰值加速度取 29.75 cm/s^2 , 阻尼比 0.05, 三条地震波的加速度曲线如图 3。

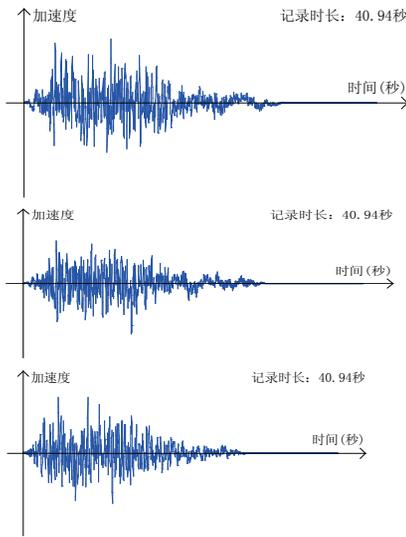


图3 地震波加速度曲线

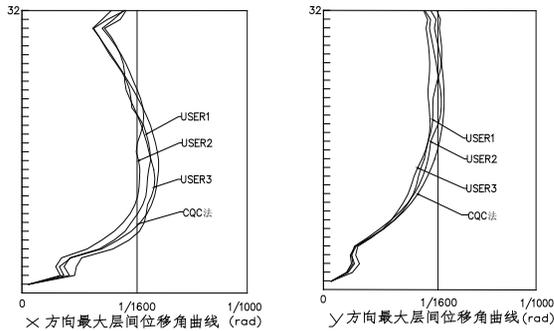


图4 弹性时程分析层间位移角

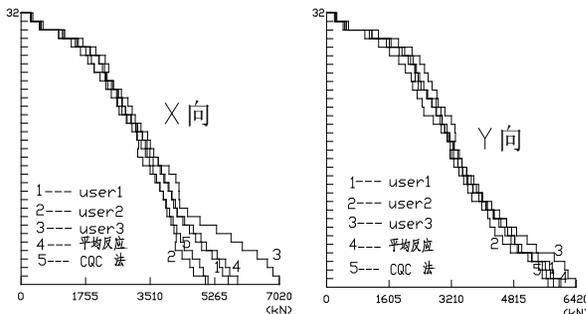


图5 弹性时程分析楼层剪力包络图

表4 时程分析法和反应谱法基底剪力的比较结果

地震波	X 向	V_x/V_{ax}	Y 向	V_y/V_{ay}
User1	5629.1	1.15	5515.1	0.99
User2	4845.3	0.99	5523.6	0.99
User3	7059.0	1.44	6517.5	1.17
三者平均值	5844.5	1.19	5852.0	1.05
规范反应谱法	4904.85	1	5559.65	1

注: V_x 、 V_y 表示地震波在 X、Y 向的基底剪力值, V_{ax} 、 V_{ay} 表示反应谱法计算所得到的 X、Y 向基底剪力值。

计算结果如表 4 所示, V_x/V_{ax} 、 V_y/V_{ay} 为由地震波计算所得基底剪力与反应谱法计算所得基底剪力的比值, 均大于 0.65, 且三条地震波计算所得基底剪力的平均值与反应谱法计算结果的比值大于 0.8, 三条地震波满足《抗规》^[3]5.1.2 条规定。由图 4 可以看出, 三条地震波在 X、Y 方向的层间位移角均小于 1/1000, 满足规范要求。实际设计中选择时程分析法的包络值和振型分解反应谱法两者的较大值进行设计。

4 楼板应力分析

4.1 钢筋混凝土板的受力机理

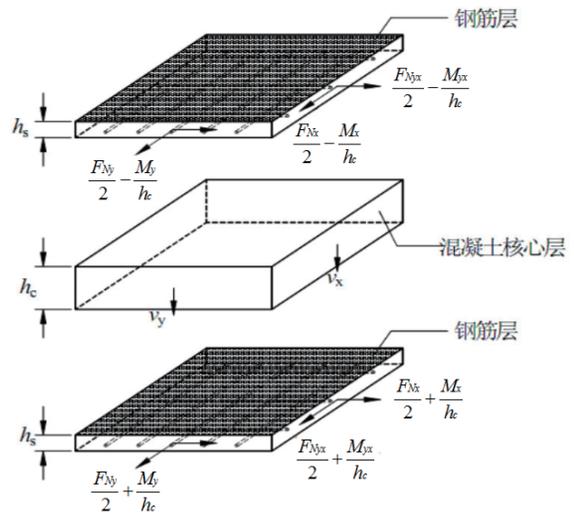


图6 夹心模型示意图

楼板在地震作用中要把水平力传递和分配给竖向抗侧力构件, 并协调楼层中竖向构件的变形, 因此楼板需要有足够的刚度作为保证。本工程使用 Petti.M^[5] 所提出的夹心单元对钢筋混凝土楼板进行截面的强度设计。夹心单元把楼板分为上下两个钢筋层和中间的混凝土核心层, 假定钢筋层承受轴力 F_{Nx} 、 F_{Ny} 、 F_{NyX} 和弯矩 M_{Nx} 、 M_{Ny} 、 M_{NyX} , 混

混凝土核心层承受剪力 V_x, V_y , 见图 6, 钢筋层主拉应力计算公式:

$$\sigma_1 = \frac{1}{h_s} \left(\frac{F_{N1}}{2} + \frac{M_1}{h_c} \right) \quad (1)$$

式 (1) 中, h_s, h_c 分别表示钢筋层和混凝土核心层的厚度; F_{N1} 表示与主应力方向相同的轴力, M_1 表示主弯矩。

4.2 标准层楼板应力分析

该工程的上部标准层在④~⑥轴和⑪~⑬轴处隔层设有拉梁, 见图 2, 经过计算和对比此处拉梁对整体楼板应力影响不大, 但标准层在纵向平面中间部位有凹进, 形成细腰形平面, 在地震作用下容易因应力集中使附近楼板开裂、破坏。现拟对凹进处进行三种情况的模拟: (a) 不设拉板, (b) 设拉梁, (c) 设拉板, 并使用 Midas Building 程序^[11] 对应力较大楼层 (计算层 13) 进行楼板应力分析。计算层 13 的楼板采用壳元假定, 其他楼层的楼板定义为刚性楼板, 考虑双向地震作用。为了研究和对比, 多遇地震和罕遇地震作用下的楼板应力按标准组合取值, 设防地震作用下的楼板应力按基本组合取值。

4.2.1 多遇地震下的楼板应力分析

有地震作用效应组合公式: $\sigma_{k,s} = \sigma_G + 0.5\sigma_L + \sigma_E$ (2)

抗裂公式: $\sigma_{1k,s} \leq f_{tk}$ (3)

式中, $\sigma_{k,s}$ 为小震作用效应组合应力矢量标准值, 下标 1 表示主拉应力; σ_G 为重力作用的应力矢量, σ_L 为活荷载作用的应力矢量, σ_E 为 X 向双向地震作用的小震工况应力矢量。

计算结果表明, 在多遇地震下 93% 以上的楼板应力小于 C30 混凝土轴心抗拉强度标准值 2.01 Mpa, 楼板混凝土核心层不开裂, 其中凹陷处楼板应力见表 5。

4.2.2 设防地震下的楼板应力分析:

有地震作用效应组合公式:

$$\sigma_D = 1.2\sigma_G + 0.6\sigma_L + 1.3 \times \xi_D \times \sigma_E \quad (4)$$

$$\sigma_I \leq (f_y A_s / S) / \gamma_{RE} h_s \quad (5)$$

式中, σ_D 为中震作用效应组合的应力矢量设计值。 ξ_D 为中震放大系数, 对于 7 度设防区, $\xi_D = 2.86$; A_s 为楼板钢筋的截面面积; S 为楼板钢筋间距; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数, 取 0.85; h_s 为钢筋层的厚度。

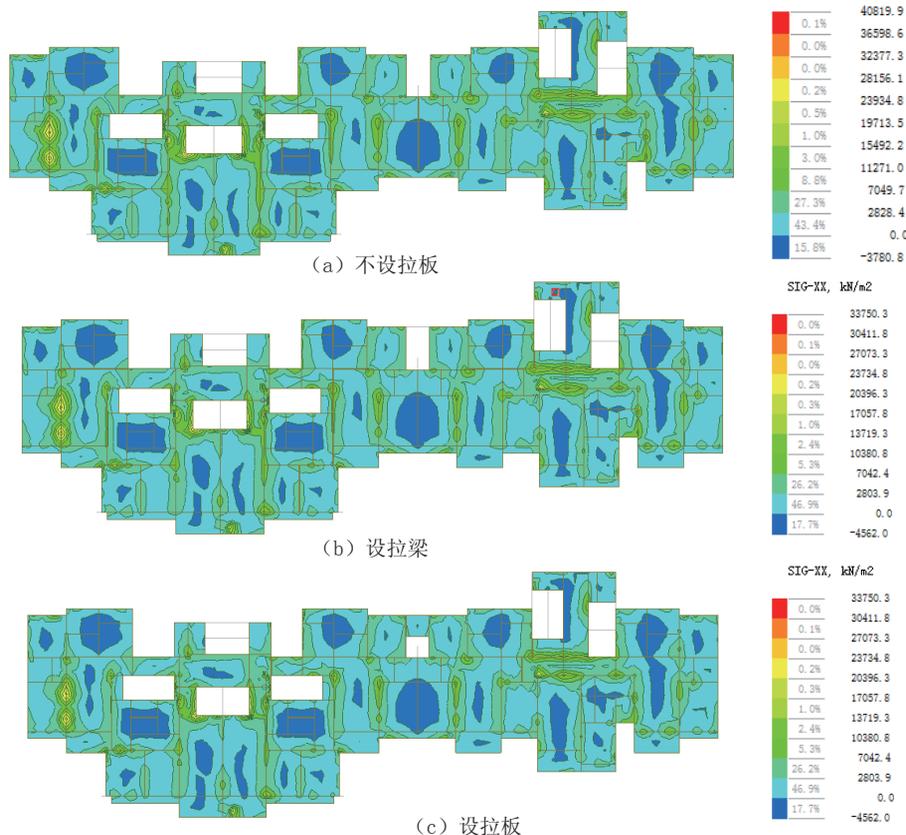


图 7 层 13 设防地震下楼板应力云图

计算结果如图 7 所示，设防地震作用下楼板在竖向构件附近、电梯筒口周围和板带有效宽度较小区域具有较大的应力集中，其中凹陷处楼板应力见表 5，电梯口周围区域应力最大达到 17 Mpa。楼板混凝土强度等级为 C30，实配钢筋双层双向 $\Phi 8@150$ 。

$$(f_y A_s / s) / \gamma_{ER} h_s = (360 \times 50.2 \times 2 / 150) / (0.85 \times 8 \times 2) = 17.7 \text{ Mpa}$$

根据式 (5) 可知，中震主拉应力设计值小于混凝土楼板纵向钢筋强度的设计值，楼板钢筋受拉弹性。

4.2.3 罕遇地震下的楼板应力分析

大震时结构往往进入塑性状态，理论上，叠加原理已经不在适用，应该用塑性变形衡量性能水准。但是，楼板是强度构件，即使在大震时，抗震设计也并不希望楼板出现塑性铰。工程设计仍使用强度公式近似地作截面估计，俗称大震不屈服。

有地震作用效应组合公式：

$$\sigma_{k,m} = \sigma_G + 0.5\sigma_L + \xi_M \times \sigma_E \quad (6)$$

式中， $\sigma_{k,m}$ 为有地震作用效应组合时，大震应力矢量标准值； ξ_M 是大震放大系数，是非线性分析得到的大震底部剪力与 CQC 法得到的底部剪力的比值，本文取 ξ_M 为 4.6。

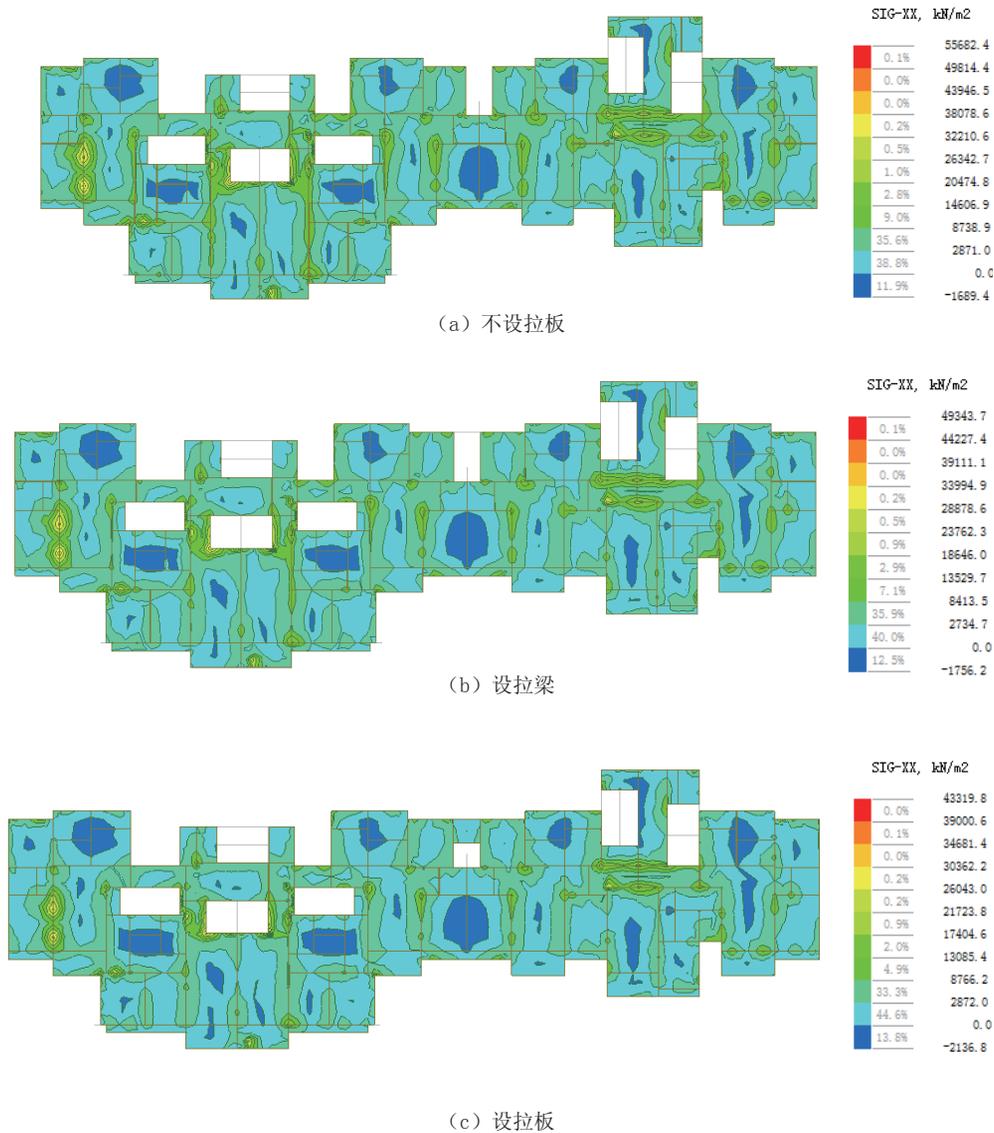


图 8 层 13 罕遇地震下楼板应力云图

表 5 不同工况各地震作用下的轴⑮~⑳凹陷处楼板应力

工况	多遇地震	设防地震	罕遇地震
不设拉板	1.8 Mpa	8.4 Mpa	12.6 Mpa
设拉梁	1.6 Mpa	7.1 Mpa	9.7 Mpa
设拉板	1.4 Mpa	5.4 Mpa	6.5 Mpa

计算结果如图 8 所示, 罕遇地震下楼板大多出现拉应力, 凹陷处楼板应力见表 5。不设拉板的凹陷处楼板应力高达 12.6 Mpa, 设连梁的凹陷处楼板应力为 9.7 Mpa, 设拉板的凹陷处的楼板应力明显缓解, 只有 6.5 Mpa。

根据上述结果, 为避免细腰形平面在在地震作用中因应力集中使楼板破坏, 本工程在平面中部凹进处增设拉板。

4.3 转换层楼板应力分析

在框支剪力墙结构中, 转换层楼板是重要的传力构件, 不落地剪力墙的剪力需要通过转换层楼板传递到落地剪力墙上, 为了保证楼板能有效的传递面内相当大的剪力, 现采用 midas building 程序对该工程的转换层(计算层 4)进行楼板应力分析。

转换层楼板设计板厚 180 mm, 混凝土强度等级为 C60, 多遇地震和罕遇地震作用下的楼板应力云图如图 9 所示: 在多遇地震下, 不落地剪力墙附近的楼板拉应力约为 2.7 Mpa, 小于 C60 混凝土抗拉强度标准值 2.85 Mpa, 混凝土核心层不开裂; 在罕遇地震下, 大多数楼板出现拉应力, 其中 12% 的楼板应力超过 5.9 Mpa。

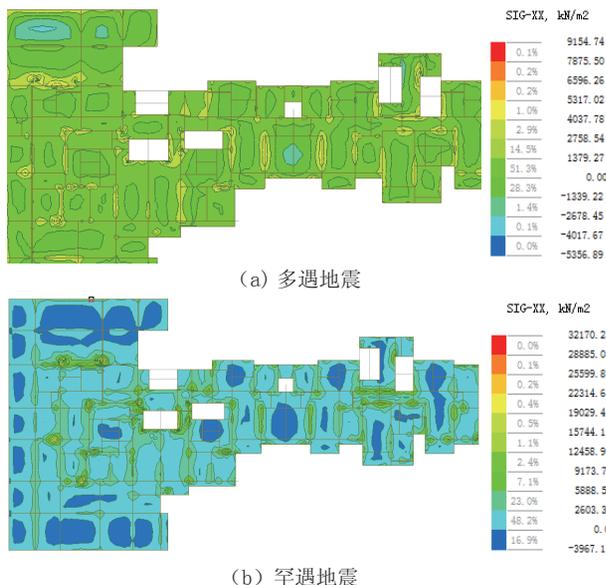


图 9 转换层楼板应力云图

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》^[2] 第 10.2.24 条的要求, 转换层楼板的剪力设计值应符合下列公式:

$$V_f \leq 0.1\beta_c f_c b_f t_f / \gamma_{RE} \quad (7)$$

$$V_f \leq f_y A_s / \gamma_{RE} \quad (8)$$

式中: V_f 为不落地剪力墙传递到落地剪力墙上按刚性楼板计算所得转换层楼板的剪力设计值; β_c 为混凝土强度影响系数; b_f 为转换处楼板验算截面的宽度; t_f 为转换层楼板的厚度; A_s 为穿过落地剪力墙的转换层楼盖的全部钢筋的截面面积。本工程转换层楼板的厚度为 180 mm, 楼板的验算截面宽度为 13800 mm, 楼板混凝土强度等级为 C60, β_c 取 0.933, γ_{RE} 取 0.85, 楼板实配钢筋双层双向 $\Phi 10@150$, 转换梁实配纵筋 20 $\Phi 25$ 。不落地剪力墙的 Y 向剪力值如表 6。

表 6 不落地剪力墙的 Y 向剪力值

不落地剪力墙	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
剪力/kN	188	875	1147	616	832	67	250	333

$$V_f = 1.5 \sum_{i=1}^8 Q_i = 1.5 \times 4308 = 6462 \text{ kN}$$

将以上数值代入式 (7)、(8) 得:

$$V_f \leq (0.1 \times 0.933 \times 27.5 \times 13800 \times 180) / 0.85 = 7498 \text{ kN}$$

$$V_f \leq 360 \times (13800 / 150 \times 78.5 \times 2 + 20 \times 491 \times 4) / 0.85 = 22753 \text{ kN}$$

由上可知楼板的抗剪设计满足规范要求; 楼板在转换处的平均应力 $V_f / (t_f \times b_f) = 2.6 \text{ Mpa}$, 小于 C60 混凝土的抗拉强度标准值 2.85 Mpa, 混凝土核心层不开裂, 满足抗震性能要求。

5 罕遇地震下的弹塑性分析

5.1 静力弹塑性分析

本工程属不规则超限高层, 采用 midas Building 软件对结构做罕遇地震下的静力弹塑性分析。选用重力荷载代表值作为静力弹塑性分析的初始荷载, 选择推覆方向的第一振型作为荷载工况, 采用位移控制法进行增量控制, 选用计算配筋, 超配系数为 1.15, 对该工程结构的 X、Y 方向进行推覆分析。

5.2 结构整体分析

该结构 X、Y 向的能力曲线如图 11、图 12 所示, 能力曲线和需求曲线相交所得到性能点处 X、Y 向层间位移角分别为 1/218 和 1/366, 均小于

1/140。性能点处 X 向底部剪力 22580 kN, 为小震弹性时基底剪力的 4.6 倍, 剪重比 7.31%; Y 向基底剪力 23030 kN, 为小震弹性时基底剪力的 4.1 倍, 剪重比 6.91%, 满足“大震不倒”的设防要求。

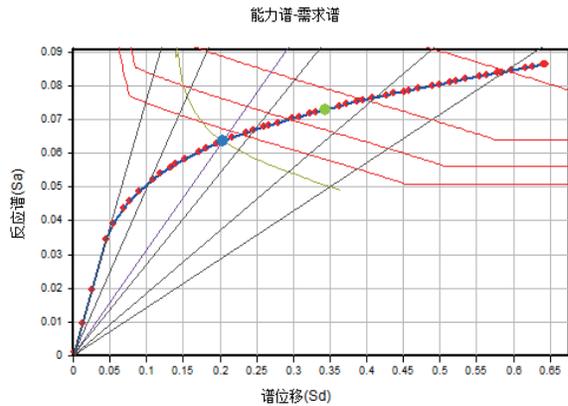


图 11 X 向的能力曲线

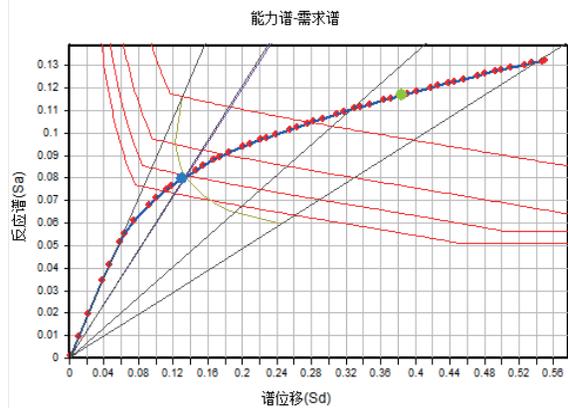


图 12 Y 向的能力曲线

6 抗震加强措施和结论

6.1 抗震加强措施

(1) 在各标准层平面中部凹进处增设 120 mm 厚的拉板, 提高该范围内楼板配筋率且板筋双层双向拉通。

(2) 转换层楼板厚度设为 180 mm, 均采用双层双向配筋, 并提高配筋率至 0.25%, 以保证水平力传递。

(3) 加强凹进处竖向构件的截面配筋。

6.2 结论

(1) 在多遇地震作用及风荷载作用下, 结构构件处于弹性状态, 各项计算指标均能达到规范要求; 在罕遇地震作用下, 结构层间弹塑性位移角满足规范要求, 结构具有较好的抗震能力。

(2) 标准层楼板在凹进处增设拉板, 缓解了楼板的应力集中, 解决了部分超限问题^[1]。

(3) 转换层楼板抗剪满足规范要求, 可以传递不落地剪力墙的剪力。

(4) 楼板的截面配筋满足设防地震的性能目标要求。

参考文献:

- [1] 住建部. 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点 [Z].
- [2] JGJ3-2010 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.
- [3] GB50011-2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 林宝新, 王健. 合肥某高层住宅剪力墙结构的抗震性能分析 [J]. 合肥工业大学学报, 2013(06):727-732.
- [5] PETER MARTI. Design of Concrete Slabs for Transverse Shear [J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(2):180-190.
- [6] 扶长生, 鞠进. 楼板不规则及其对结构抗震设计的影响 [J]. 建筑结构, 2010(06):85-89.
- [7] 林宝新, 陈明, 许加义. 基于 MIDAS 的某带端部转换剪力墙结构的抗震性能分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2015(06):822-827.
- [8] 扶长生, 刘春明, 李永双, 等. 高层建筑薄弱连接混凝土楼板应力分析及抗震设计 [J]. 建筑结构, 2008(03):106-110+37.
- [9] GB50010-2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 结构大师非线性分析技术手册 [Z]. 北京: 北京迈达斯技术有限公司.
- [11] 结构大师分析设计原理 [Z]. 北京: 北京迈达斯技术有限公司.
- [12] 张晓. 某带中庭转换的高层剪力墙抗震性能分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2015.
- [13] 许加义. 某高层剪力墙带框支部分静力弹性和弹塑性分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2015.