

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.014

# 厚板转换层设置高度对结构抗震性能的影响

李 芳, 李苗苗

(辽宁工程技术大学 建筑与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**为了分析厚板转换层设置高度对结构抗震性能的影响,根据建筑结构抗震设计规范,系统研究了地震作用下结构的破坏机理及计算方法,建立了地震作用下结构的运动方程,采用自振周期、楼层位移及层间位移角作为结构抗震性能指标,基于振型分解反应谱法对各指标进行了研究。结果表明:随着厚板转换层设置高度的增加,结构低阶振型的自振周期增大;楼层位移变大,层间位移角增大,结构整体抗震性能下降。

**关键词:**厚板转换层;自振周期;楼层位移;层间位移角

**中图分类号:**TU973 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0062-04

## Effect of the Level of Thick Plate Transition Layer on Structural Seismic Performance

Li Fang, Li Miaomiao

(College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 12300, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** To analysis the effect of the level of thick plate transition layer on structural seismic performance, according to the code for seismic design of buildings, we systematically studied the failure mechanism and calculation method of structure under earthquake action and built the motion equation of buildings. Natural period of structure, floor displacement and inter-story displacement angle were used as the seismic performance indicators and they were analyzed by mode-superposition response spectrum method. It is shown that with the increase of the thick plate transition layer, the natural period of structure in the low order mode increases, the floor displacement and inter-story displacement angle rise, and the whole structure seismic performance declines.

**Key words:** thick plate transition layer; natural period; floor displacement; inter-story displacement angle

随着社会的发展,人口数目激增,为了解决土地资源紧张和人口数目之间的矛盾,高层建筑应运而生,经过 100 多年的发展,现在的高层建筑正朝着多元化、多功能、多类型的方向发展<sup>[1]</sup>,结构体系日益复杂,对结构设计提出了更高的要求。由于使用功能的要求,不少高层建筑集商业、餐饮、娱乐、办公于一身<sup>[2]</sup>,结构竖向不同楼层段使用功能完全不同,布局各异。这些结构大都是底部布置为商业、餐饮、娱乐设施,需要较大的空间,较大的柱网,上部是一些格局较小的写字间、住宅,需要小柱网,小空间。这种结构形式与常规的结构形式不同,常规结构由于下部受力较大需要布置成小柱网,上部为大柱网。因此对这种结构,需要设置转换层来实现上下柱网的转换,以及上下不同结构形式的转换<sup>[3]</sup>。

常用的转换形式主要有以下几种:梁式转换层、厚板转换层、箱形转换层、桁架式转换层<sup>[4-5]</sup>。厚板式转换结构因其上部墙体及柱网布置灵活,不受轴网布置限制等特点得到了广泛应用。为了满足建筑的不同使用功能,转换层的设置位置也不同,这就导致了结构竖向刚度不连续,而结构竖向刚度不连续会严重影响抗震性能,因此对不同高位转换层进行

抗震分析就显得尤为重要。

目前中国学者已经开始对不同高位转换层进行研究,易广智等<sup>[6]</sup>采用 ANSYS 软件分析了梁式转换层设置高度不同时对结构的受力影响;王森等<sup>[7]</sup>对高位转换层结构的抗震性能和受力特点等进行了研究;徐培福等<sup>[8]</sup>研究了转换层设置高度的提高对框支剪力墙结构抗震性能的不利影响,并提出转换层位置较高的框支剪力墙结构的抗震设计概念,还有许多学者对此方面进行了研究<sup>[9-12]</sup>。本文结合工程实例,利用有限元分析软件 SATWE 建立了不同高位厚板转换层的模型,分析了厚板转换层设置高度对结构自振周期、楼层位移及层间位移角的影响,为实际工程抗震设计提供一定的借鉴。

### 1 地震作用下结构动力学分析

多自由度体系在无阻尼作用下的运动方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

多自由度体系在有阻尼作用下的运动方程<sup>[13]</sup>为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (2)$$

收稿日期:2012-12-26

基金项目:辽宁工程技术大学研究生科研资助项目(Y201201202)

作者简介:李芳(1988-),女,硕士生,主要从事钢筋混凝土理论与应用技术研究,(E-mail)taiyoucailexia@126.com。

研究自由振动时,不考虑阻尼的影响。此时体系不受外界作用,可令  $\ddot{x}_g = 0$ ,则由式(1)得多自由度自由振动方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (3)$$

根据方程(3)的特点,可设方程的解为  $\{x\} = \{\varphi\} \sin(\omega t + \varphi)$

其中  $\{\varphi\} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$

式中,  $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为常数,是每个质点自由振动的振幅。

由振型的正交性值,  $\{\varphi_1\}, \{\varphi_2\}, \dots, \{\varphi_n\}$  相互独立,  $n$  维向量  $\{x\}$  可以表示为  $n$  个独立向量的线性组合,则体系地震位移反应向量  $\{x\}$  可表示为

$$\{x\} = \sum_{j=1}^n q_j \{\varphi_j\} \quad (4)$$

其中,  $q_j (j = 1, 2, \dots, n)$  称为振型正则坐标,当  $\{x\}$  一定时,  $q_j$  具有唯一解。

将式(4)代入多自由度体系在有阻尼作用下的运动方程(2)得

$$\sum_{j=1}^n ([M]\{\varphi_j\}\ddot{q}_j + [C]\{\varphi_j\}q_j + [K]\{\varphi_j\}q_j) = -[M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (5)$$

将上式两边左乘  $\{\varphi_i\}^T$  得

$$\sum_{j=1}^n (\{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_j\}q_j + \{\varphi_i\}^T [C]\{\varphi_j\}q_j + \{\varphi_i\}^T [K]\{\varphi_j\}q_j) = -\{\varphi_i\}^T [M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (6)$$

注意到振型关于质量矩阵和刚度矩阵的正交性,并设振型关于阻尼矩阵也正交,即

$$\{\varphi_i\}^T [C]\{\varphi_j\} = 0 (i \neq j) \quad (7)$$

则式(6)成为

$$\{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_i\}\ddot{q}_i + \{\varphi_i\}^T [C]\{\varphi_i\}\dot{q}_i + \{\varphi_i\}^T [K]\{\varphi_i\}q_i = -\{\varphi_i\}^T [M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (8)$$

将体系动力特征方程两边左乘  $\{\varphi_i\}^T$

$$\{\varphi_i\}^T [K]\{\varphi_i\} = \omega_i^2 \{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_i\} \quad (9)$$

则可得

$$\omega_i^2 = \frac{\{\varphi_i\}^T [K]\{\varphi_i\}}{\{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_i\}} \quad (10)$$

$$\text{令 } 2\omega_i \xi_i = \frac{\{\varphi_i\}^T [C]\{\varphi_i\}}{\{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_i\}} \quad (11)$$

$$\gamma_i = \frac{\{\varphi_i\}^T [M]\{1\}}{\{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_i\}} \quad (12)$$

则将式(8)两边同除以可得  $\{\varphi_i\}^T [M]\{\varphi_i\}$  可得

$$\ddot{q}_i + 2\omega_i \xi_i \dot{q}_i = -\gamma_i \ddot{x}_g \quad (13)$$

式(13)与单自由度体系的运动方程相同,这说明原来  $n$  自由度体系的  $n$  维运动微分方程,被分解为  $n$  个单自由度体系的运动微分方程。 $n$  个单自由度体系的自振频率为原来多自由度体系各阶自振频率。

根据杜哈密积分,可得式(13)的解为

$$q_i(t) = -\frac{1}{\omega_i D} \int_0^t \gamma_i \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi_i \omega_i (t-\tau)} \sin \omega_i D(t-\tau) d\tau = \gamma_i \Delta_i(t) \quad (14)$$

其中  $\omega_i D = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$

显然,  $\Delta_i(t)$  是阻尼比为  $\xi_i$ 、自振频率  $\omega_i$  的单自由度体系的地震位移反应<sup>[14]</sup>。

将式(14)代入式(3),即得到多自由度体系地震位移反应的解

$$\{x(t)\} = \sum_{j=1}^n \gamma_j \Delta_j(t) \{\varphi_j\} = \sum_{j=1}^n \{x_j(t)\} \quad (15)$$

## 2 基于振型分解法的地震作用模拟分析

### 2.1 工程概况及结构模型

工程为某市一高层商住楼,框架结构,6跨15层,跨距4.5 m,转换层设在第5层,转换层以下梁截面为250 mm×700 mm,柱截面为900 mm×900 mm,转换层板厚1 000 mm,层高4.2 m,其余楼层层高3.6 m,转换层以上梁截面为200 mm×450 mm,柱截面为700 mm×700 mm。混凝土强度等级为C30,钢筋为II级钢。抗震设防烈度为6度,场地类别为II类,框架抗震等级为3级,设计使用年限为50 a。

为了分析不同高位转换层对结构性能的影响,将原结构定义为模型2,建立模型1和模型3与其对比。模型1:6跨15层,每层层高3.6 m,跨距4.5 m,柱截面为700 mm×700 mm,不设转换层,梁截面为200 mm×450 mm,C30混凝土,II级钢。模型3:转换层设在第10层,其余情况同模型2。

本文利用PKPM软件建立3种结构的模型,为实现上部竖向构件与厚板的连接,需要在转换厚板上布置100 mm×100 mm虚梁。转换层层高的输入与普通结构不同,由于厚板厚度大,自身刚度大,为了准确模拟上下层的受力,将厚板的板厚平均分给与其相邻2层的层高,即取转换层的层高为转换层净空加上一半板厚,上一层层高为其原有自然层高加上一半板厚。运用有限元设计与分析软件SATWE对3个结构进行模拟分析,3个结构的模型见图1。

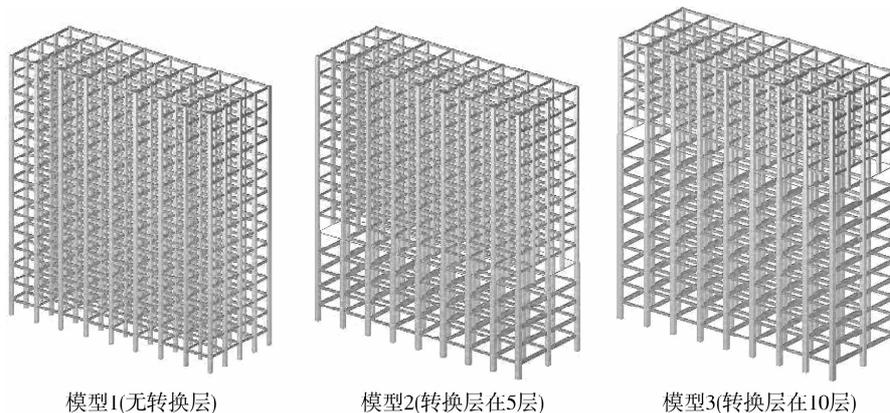


图1 结构整体有限元模型

## 2.2 转换层设置高度对结构自振周期的影响

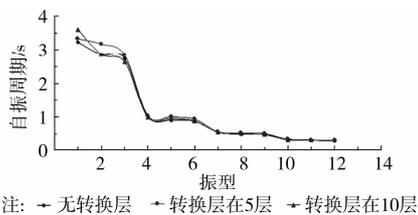
结构自振周期是结构固有的属性和特征,自振周期能用来判别结构的刚度,自振周期越大,结构的刚度越小,反之,自振周期越小,结构的刚度越大,自振周期与振型是结构抗震分析的基础,因此对结构自振周期的研究很重要。《高规》规定,“抗震计算时,宜考虑平扭藕联计算结构的扭转效应,计算振型数应使振型参与质量不小于总质量的 90%”<sup>[15]</sup>。

本文在振型分析中计算了前 12 阶振型,无转换层时结构振型参与质量系数 X 方向为 94.40%,Y 方向为 94.11%,转换层在 5 层时振型参与质量系数 X 方向为 93.70%,Y 方向为 93.09%,转换层在 10 层时振型参与质量系数 X 方向为 94.29%,Y 方向为 93.95%,均满足不小于总质量 90%的要求,模态周期分布较为合理,3 种模型的前 12 阶周期与自振频率见表 1。

表 1 3 种模型的自振周期与自振频率

振型	无转换层		转换层在 5 层		转换层在 10 层	
	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz
1	3.228 6	0.309 7	3.326 3	0.300 6	3.605 8	0.277 3
2	2.858 1	0.349 9	3.172 5	0.315 2	2.860 9	0.349 5
3	2.736 0	0.365 5	2.844 7	0.351 5	2.626 4	0.380 7
4	1.013 6	0.986 6	1.037 3	0.964 0	0.990 4	1.009 7
5	0.903 8	1.106 4	1.003 2	0.996 8	0.958 2	1.043 6
6	0.873 5	1.144 8	0.932 6	1.072 3	0.876 2	1.141 3
7	0.547 7	1.825 8	0.566 3	1.765 8	0.547 3	1.827 1
8	0.494 4	2.022 7	0.521 2	1.918 6	0.515 4	1.940 2
9	0.485 1	2.061 4	0.511 5	1.955 0	0.476 7	2.097 7
10	0.347 7	2.876 0	0.342 2	2.922 3	0.323 1	3.095 0
11	0.316 7	3.157 6	0.323 4	3.092 1	0.311 5	3.210 2
12	0.315 5	3.169 6	0.313 1	3.193 9	0.289 3	3.456 6

3 种模型的自振周期曲线见图 2。



注: + 无转换层 - 转换层在 5 层 · 转换层在 10 层

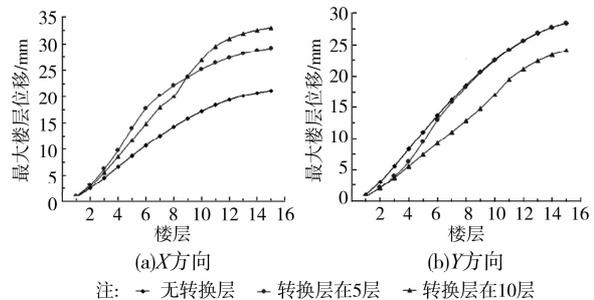
图 2 3 种模型的自振周期

从图 2 所示 3 种模型的自振周期可以看出,地震作用下低阶振型时,3 种模型的周期波动比较大。第 1 阶振型,转换层在 10 层时结构周期最大,刚度最小,第 2、3 阶振型时,转换层在 5 层时结构的周期最大,刚度最小。由此可以得出,转换层的设置高度对低阶振型的影响较大,设置高度越高,结构的自振周期越大,刚度越小,转换层设置高度对高阶振型的影响较小。

## 2.3 转换层设置高度对楼层位移的影响

楼层位移是结构抗震性能的重要指标之一,最大楼层位移越大,说明结构水平方向的刚度越小,抵抗水平地震的性能越差。结构的抗震性能与结构的变形密切相关,楼层位移是结构变形的直观表述,因此通过对最大楼层位移的分析,可以较好地研究结构的抗震性能。双向地震作用下结构的最大楼层位移曲线见图 3。

由上图可以看出,无转换层的结构楼层位移增长平缓;转换层在 5 层时,结构从 4 层到 6 层位移曲线比较陡峭,斜率



注: + 无转换层 - 转换层在 5 层 · 转换层在 10 层

图 3 结构最大楼层位移曲线

较大,即位移增量较大;转换层在 10 层时,结构从 9 层到 11 层位移有一定幅度的增大。这说明结构不设转换层时竖向刚度连续,因此变形也连续。结构转换层设在 5 层或 10 层时,转换层部位的刚度比较大,在地震发生时吸收较多的地震能量产生比其他楼层较大的位移与变形,因此在进行设计时要对转换层部位适当加强,使其有足够的刚度,避免形成薄弱层。3 个模型 X 方向顶层位移分别为 21.16、29.19、33.01 mm,Y 方向顶层位移分别为 28.41、28.40、24.15 mm。可以看出,无转换层的结构 X 方向的刚度大于 Y 方向,模型 2 与模型 3 由于设置了厚板转换层,致使结构刚度发生了改变,X 方向的刚度小于 Y 方向。

在双向地震作用下,X 方向为结构运动的主方向,由上图可以看出,转换层设在 10 层时楼层位移最大,转换层在 5 层时次之,无转换层时楼层位移最小,表明随着转换层设置高度的增高,结构的楼层位移增大,并且在转换层部位楼层

位移达到最大。

## 2.4 转换层设置高度对结构层间位移角的影响

层间位移角是结构变形的另一直观描述,也是抗震性能指标之一,我国规范规定了层间位移角的限制,来保证结构有足够的刚度,避免产生过大的变形,影响结构的承载力及正常使用<sup>[16]</sup>。层间位移角越大结构的水平刚度越小,抗震性能越差,反之,抗震性能越好。地震作用下 3 种模型的层间位移角见图 4。

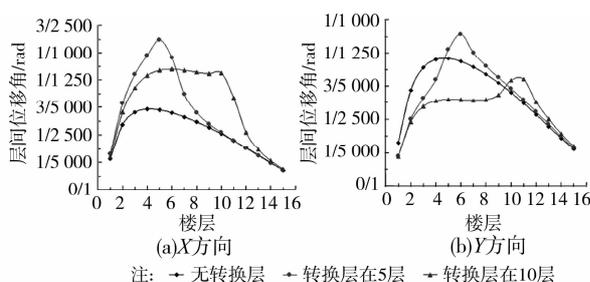


图 4 结构最大层间位移角曲线

由上图可以看出无转换层时层间位移角曲线比较平滑,转换层设在 5 层、转换层设在 10 层时层间位移角在转换层部位发生突变,最大层间位移角发生在转换层部位。设置转换层后层间位移角从底层向上开始逐渐增大,到转换层部位时达到最大,随着楼层的继续增高,层间位移角又开始慢慢减小,这与楼层刚度分布是一致的。从图上可以看出,无论是 X 方向还是 Y 方向,转换层在 10 层的层间位移角在转换层以下时均比转换层在 5 层的小,在转换层以上时均比转换层在 5 层的大,这说明随着转换层设置高度的增加,在转换层以下层间位移角有变小的趋势,在转换层以上层间位移角有增大的趋势。

## 3 结 论

利用有限元分析软件 SATWE 建立了转换层设置高度不同的 3 种模型,采用振型分解反应谱法对结构进行地震作用的计算,以自振周期、楼层位移及楼层位移角作为分析结构抗震性能指标,通过分析得出以下结论:

1) 在地震荷载作用下,转换层的设置高度对结构低阶振型的影响较大,设置高度越高,结构的自振周期越大,设置高度越低,结构的自振周期越小,转换层设置高度对高阶振型的影响较小,带转换层与无转换层结构相比高阶振型下的自振周期变化不大。

2) 随着转换层设置高度的增大,结构的楼层位移增大,并且在转换层部位楼层位移最大。转换层部位的刚度比较大,在地震发生时吸收较多的地震能量产生比其他楼层较大的位移与变形,因此在进行设计时要对转换层部位适当加强,使其有足够的刚度,避免形成薄弱层。

3) 随着转换层设置高度的增加,在转换层以下层间位移角有变小的趋势,在转换层以上层间位移角有增大的趋势。

### 参考文献:

[1] 张敏,凌志彬.带拱式转换层高层结构弹塑性分析[J].广西大学学报:自然科学版,2012,37(6):853-855.  
Zhang M, Ling Z B. Elastoplastic analysis of high-rise buildings with arch transition floor[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2012, 37(6): 853-855.

[2] 董堃,孙颖.高层建筑梁式转换层结构实用设计方法探讨[J].工

业建筑,2009,39(Sup1):264-269.

Dong K, Sun Y. Discussion on the practical design method of girder transfer floor for high-rise building [J]. Industrial Construction, 2009, 39(Sup1): 264-269.

[3] 张敏,凌志彬.大震作用下带拱式转换层高层结构动力弹塑性分析[J].北京交通大学学报,2011,35(6):34-36.

Zhang M, Ling Z B. Dynamic analysis of elastoplastic performance of tall building with arch transfer floor subjected to severe earthquake[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(6): 34-36.

[4] 靳晓燕.带厚板转换层高层建筑结构抗震性能分析[D].上海:同济大学,2007.

[5] 张敏,梁炯丰.拱式转换层结构竖向受力分析[J].工业建筑,2008,38(5):46-53.

Zhang M, Liang J F. Analysis of arch transfer floor subjected to vertical loading [J]. Industrial Construction, 2008, 38(5): 46-53.

[6] 易广智,沈蒲生,朱建华.转换层位置对框架结构受力性能的影响分析[J].建筑结构,2008,38(6):80-81.

Yi G Z, Shen P S, Zhu J H. Influence of different transfer girder heights on behaviors of frame structure[J]. Building Structure, 2008, 38(6): 80-81.

[7] 王森,魏琰.不同高位转换层对高层建筑动力特性和地震作用影响的研究[J].建筑结构,2002,32(8):54-58.

Wang S, Wei L. Study on the dynamic characteristics and seismic effect of different high conversion layer in high-rise building [J]. 2002, 32(8): 54-58.

[8] 徐培福,王翠坤,郝锐坤.转换层设置高度对框支剪力墙结构抗震性能的影响[J].建筑结构,2000,30(1):38-42.

Xu P F, Wang C K, Hao R K. Effect of the level of transfer floor on frame-supported shear wall seismic performance [J]. Building Structure, 2000, 30(1): 38-42.

[9] Dai G L, Tong X D, Huang X H, et al. Application of laminated vierendeel truss in high-position transfer story structure [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005, 6(2): 49-53.

[10] Li J H, Su R K L, Chandler A M. Assessment of low-rise building with transfer beam under seismic forces[J]. Engineering Structures, 2003, 25(12): 1537-1549.

[11] 潘国雄,陈旭能.某高层商住楼的厚板转换层设计[J].建筑结构,2010,40(7):27-29.

Pan G X, Chen X N. Design of the thick plate transition layer in a high-rise building [J]. Engineering Structures, 2010, 40(7): 27-29.

[12] 谷倩,肖楠,蔡全智,等.箱形转换层位置对高层结构抗震性能影响[J].武汉理工大学学报,2010,32(2):38-42.

Gu Q, Xiao N, Cai Q Z. Influence of the elevation of box-shaped transfer storey on seismic behaviour of high-rise structures [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(2): 38-42.

[13] 杨克家,梁兴文.带加强层高层建筑结构地震作用的简化算法[J].地震工程与工程振动,2011,31(3):141-142.

Yang K J, Liang X W. A simplified method for calculating earthquake action on high-rise structures with strengthened stories[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3): 141-142.

[14] 李国强,李杰,苏小卒.建筑结构抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.

[15] JGJ3-2002 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.

[16] 张守筠.大跨度型钢混凝土转换层结构设计方案的对比如分析[D].重庆:重庆大学,2010.

(编辑 薛婧媛)