

设防地震作用下受拉剪力墙设计方法

孙仁范¹, 曾明², 许璇¹, 魏琰¹, 刘跃伟¹

- (1. 深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 广东深圳 518034;
2. 深圳市华阳国际工程设计股份有限公司, 广东深圳 518038)

摘要: 针对设防地震作用下受拉剪力墙的设计方法, 结合 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》指出了我国目前广泛采用等效弹性方法设计存在的问题, 介绍了弹塑性时程分析法的设计流程、设计软件和地震波选取以及墙铰模型的开裂后刚度取值。对于设防地震下弹塑性时程分析法, 弹塑性模型的初始配筋采用多遇地震作用下的配筋结果, 剪力墙单元可以采用墙铰单元、纤维截面壳单元、S4R 壳单元等模拟, 设计地震动可采用拟合设计反应谱的人工波, 并控制设防地震作用下剪力墙受拉不屈服来调整受拉配筋设计。此外, 设防地震作用下受拉剪力墙是否设置型钢应根据其所受剪力大小确定, 还应复核罕遇地震作用下受弯屈服剪力墙的边缘拉应变。采用工程实例验证了上述方法的可行性, 且偏于安全考虑, 建议采用考虑开裂后抗拉刚度退化至 15% 初始抗拉刚度的墙铰模型进行受拉剪力墙的抗震设计。

关键词: 剪力墙; 设防地震作用; 拉力; 弹塑性时程分析; 抗震设计

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A

Design method for shear walls with heavy tensile force under moderate earthquake

SUN Renfan¹, ZENG Ming², XU Xuan¹, WEI Lian¹, LIU Yuewei¹

- (1. Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China;
2. Shenzhen CAPOL International & Associates Limited, Shenzhen 518038, China)

Abstract: This paper focused on the design method for shear walls with heavy tensile force under moderate earthquake, and pointed out some problems of the equivalent elastic method which was widely used in our country according to the current design code JGJ 3—2010 ‘Technical specification for concrete structures of tall building’. The recommended design flow, design software and design ground motions for the elastoplastic time history analysis method were introduced. The proper residual stiffness of the wall hinge model after cracking was also proposed. For the proposed elastoplastic time history analysis method, the reinforcement of the structure can be determined based on the results from frequently occurred earthquake. Shear wall hinge element, shell element with fiber section or S4R shell element etc. can be used to model the shear walls. The artificial waves fitting the design response spectrum can be used as the design ground motion. Then adjustments of the tensile reinforcement were carried out to achieve the performance objective that shear walls should not yield in tension under moderate earthquake. In addition, whether steel members should be set in the walls should be determined according to their shear force of the walls in tension, and the tensile strain at the edge of the bending yielding shear wall under the rare earthquake should also be checked. The feasibility of this method was verified by a real project. Considering the structural safety, it is suggested that wall hinge model with tensile stiffness degraded to 15% of the initial tensile stiffness after concrete cracking should be used for seismic design.

Keywords: shear wall; moderate earthquake; tensile force; elastoplastic time history analysis; seismic design

作者简介: 孙仁范, 出生于 1962 年, 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事结构抗震设计研究。email: srf@163.com

通信作者: 曾明, 出生于 1986 年, 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事结构抗震设计研究。email: idealzeng@qq.com

收稿日期: 2018 年 7 月

0 引言

对于高宽比较大的高层建筑结构,布置于结构外侧的剪力墙在设防地震作用下容易受拉开裂,因此,受拉剪力墙的合理设计成为了当前亟待解决的热点问题。

2015年《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[1]第12条规定“设防地震时双向水平地震作用下墙肢全截面由轴向力产生的平均名义拉应力超过混凝土抗拉强度标准值时宜设置型钢承担拉力”,但没有明确指出剪力墙拉力如何计算。

虽然JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[2]中明确指出,第3和第4性能水准的结构都应进行弹塑性分析,而相应条文说明“允许采用”或“也可采用”等效弹性方法计算,但是规范并没有介绍应如何进行弹塑性分析,所以目前设防地震设计通常采用等效弹性方法进行计算。

目前关于单片受拉剪力墙的低周往复试验研究^[3-6]表明,拉力将会降低剪力墙的承载力和耗能能力,且主要破坏形式为拉剪破坏,但没有明确给出这类结构的设计方法。因此本文中,对高层建筑结构受拉剪力墙的设计方法进行探讨,指出现行等效弹性方法存在的一些问题,细化规范规定的能反映结构实际受力和变形的弹塑性时程分析法,并将其应用于实际工程中,验证该方法的可行性,以期工程实践及规程修订提供参考。

1 采用等效弹性方法设计存在的问题

目前我国针对高层结构设防地震下的设计采用等效弹性方法,主要按照表1的分析假定^[2]进行计算,并根据计算的拉力结果进行受拉剪力墙的设计。

表1 等效弹性方法分析模型假定
Table 1 Assumptions of equivalent elastic method

类别	模型假定
分析软件	PKPM/YJK
计算方法	振型分解反应谱法(CQC)
剪力墙模拟	弹性壳单元
框架梁	弹性杆元,按规范放大中梁刚度及边梁刚度
连梁	弹性杆元或弹性壳元,连梁刚度折减系数0.3~1.0
阻尼	5%~7%

根据表1及文献[7-8]可知,采用等效弹性方法设计存在以下问题:

1) 地震作用时,沿不同高度楼层连梁的受力和屈服情况并不一致,采用相同的连梁刚度折减系数(以下简称“ β 值”),与实际情况不符。如文献[7]的

框架-核心筒结构拟静力试验中,核心筒四面外墙裂缝立面见图1。由图1可知,连梁裂缝主要出现在结构中下部楼层。

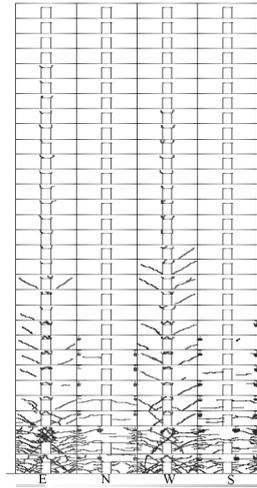


图1 核心筒裂缝立面图

Fig. 1 Elevation of cracks of core tube walls

2) JGJ 3—2010^[2]中指出 β 值“一般不小于0.3”,但具体合理取值不明确。第3和第4性能水准取同一 β 值不一定合理。

3) 等效弹性方法由于不考虑剪力墙开裂后的刚度退化,可能导致设计的底部剪力墙抗弯刚度过大,较难实现强剪弱弯,不利于形成底部塑性区允许开裂的屈服机制^[8](图2)。

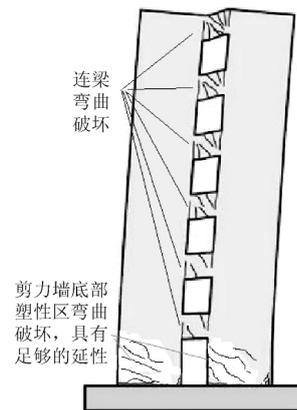


图2 剪力墙底部塑性区允许开裂的屈服机制

Fig. 2 Predicted yield mechanism that cracking of concrete is allowed in plastic zone at bottom of shear walls

4) 采用等效弹性方法,当连梁刚度取值较小时,连梁剪力可能被低估。例如,某地区(8度0.3g,一组,II类场地)实际工程两栋98m高剪力墙结构(标准层平面见图3,所研究构件的尺寸及混凝土等级见表2和表3)。采用表1所示的PKPM软件和分析假定,取不同 β 值的等效弹性方法计算得到的连梁剪力沿楼层分布曲线见图4。考虑双向水平地震作用的荷载组合为

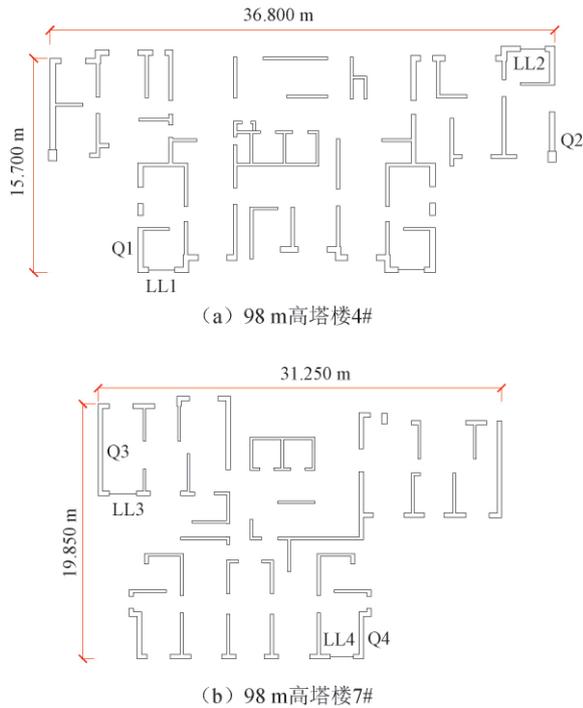


图3 两栋塔楼标准层墙肢布置及墙肢、连梁编号
Fig.3 Typical floor plan of shear walls and numbers of walls and coupled beams of two buildings

表2 墙肢 Q1、Q2 和连梁 LL1、LL2 尺寸及混凝土强度等级

Table 2 Dimensions and concrete strength grades of shear walls Q1, Q2 and coupled beams LL1, LL2

楼层	混凝土强度等级	Q1、Q2 厚度/mm	LL1、LL2 截面高度/mm
1~4	C50	400	650
5~6	C50	350	
7~12	C45	350	
13~17	C40	350	
18	C40	300	
19~24	C35	300	
25	C30	300	
26~33	C30	250	

注: 连梁截面宽度与墙厚相同。

表3 墙肢 Q3、Q4 和连梁 LL3、LL4 尺寸及混凝土强度等级

Table 3 Dimensions and concrete strength grades of shear walls Q3, Q4 and coupled beams LL3, LL4

楼层	混凝土强度等级	Q3、Q4 厚度/mm	LL3、LL4 截面高度/mm
1~4	C50	400	650
5~6	C50	350	
7~10	C45	350	
11~12	C45	300	
13~18	C40	300	
19~20	C35	300	
21~25	C35	250	
26	C30	250	
27~33	C30	200	

注: 连梁截面宽度与墙厚相同。

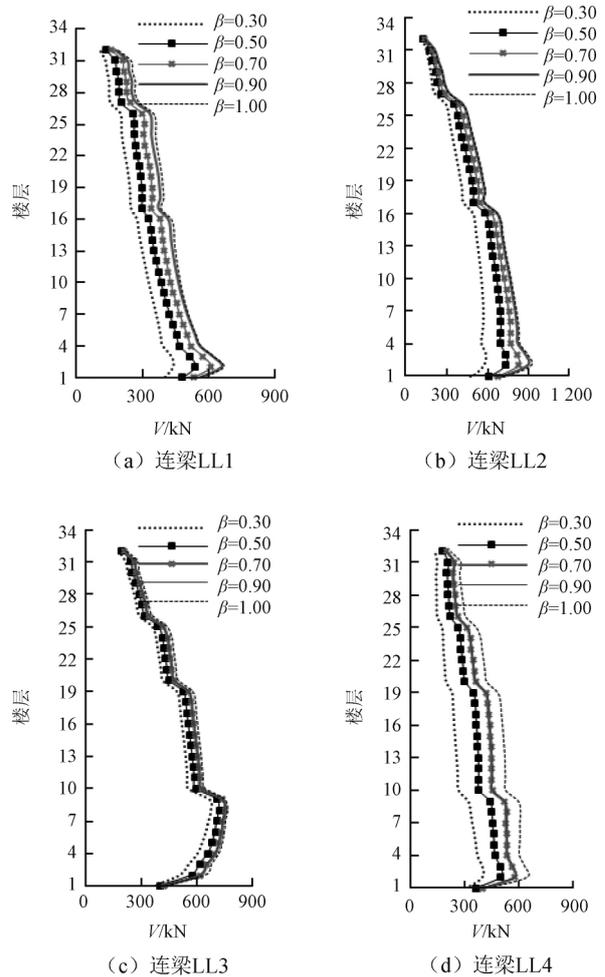


图4 不同 β 值时连梁剪力沿楼层高度分布曲线
Fig.4 Distribution curves of shear force of coupled beams along different floors with different β values

$L_D + 0.5L_L + \text{Max}\{\sqrt{S_x^2 + (0.85S_y)^2}, \sqrt{S_x^2 + (0.85S_y)^2}\}$ 。
其中 L_D 为恒载作用 L_L 为活载作用 S_x 为 X 向地震作用 S_y 为 Y 向地震作用。

对于第二层连梁 LL1 ~ LL4, 当 $\beta=0.3$ 时的剪力分别为 $\beta=1$ 时的 65%、63%、78% 和 63%, 这将可能导致连梁抗剪配筋不足, 使得连梁在地震作用下发生脆性剪切破坏。

5) 在设防地震作用下, 剪力墙可能出现全截面受拉, 其拉应力甚至超过混凝土开裂应力 f_{tk} , 导致混凝土开裂, 此时按弹性等效方法分析得到的墙肢拉力偏大较多。

2 弹塑性时程分析法的应用

在设防地震作用下, 由于受拉剪力墙混凝土开裂, 剪力墙受拉刚度将会明显降低, 而采用等效弹性方法则是假定其刚度不变, 与实际不符。而且 JGJ

3—2010^[2]中明确规定了设防地震抗震性能设计(第3水准和第4水准)时应采用弹塑性分析方法,但未具体说明应如何应用弹塑性方法进行设计。针对受拉剪力墙,本文中采用弹塑性时程分析法进行设计,并对设计流程、设计软件、设计地震动和剪力墙受拉开裂后刚度的取值进行分析。

2.1 设计流程

采用弹塑性时程分析法对受拉剪力墙进行设防地震下的设计流程如图5所示。

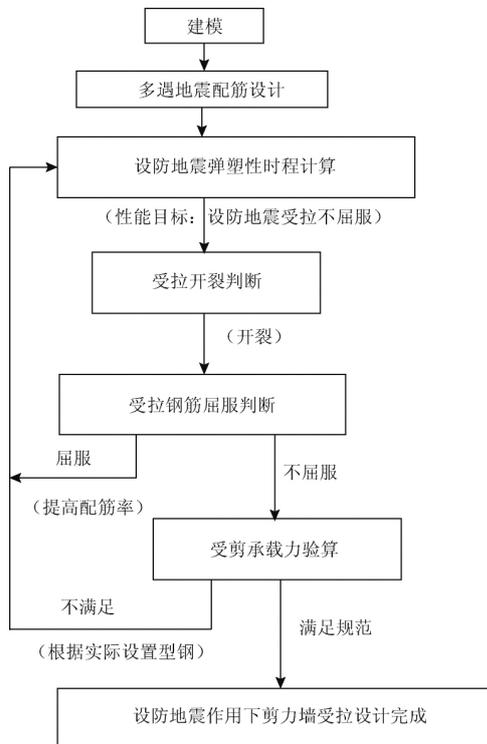


图5 受拉剪力墙设防地震下的弹塑性时程分析法设计流程

Fig. 5 Advised design flow of elasto-plastic time history analysis method of shear walls with heavy tensile force under moderate earthquake

首先对剪力墙按等效弹性方法进行多遇地震作用下的配筋设计,然后采用多遇地震下的配筋模型作为弹塑性分析初始模型进行设防地震作用下的弹

塑性时程分析,并进行剪力墙的受拉判断。当剪力墙性能目标为设防地震下受拉不屈服时,若剪力墙全截面的拉力超过 $f_{yk}A_s$,则应加大剪力墙的竖向配筋量,重新进行弹塑性分析;若剪力墙拉力小于 $f_{yk}A_s$,则进行抗剪验算。通过上述设计可达到在设防地震作用下剪力墙全截面受拉时钢筋不屈服。其中,受拉开裂按全截面拉力是否超过剪力墙的开裂荷载来判断。

当受拉剪力墙因抗剪不足配置型钢后,可考虑型钢与钢筋共同承担剪力墙所受拉力。此时,剪力墙抗拉所需配置的钢筋面积为全部受拉钢材截面积减去型钢的截面积。

最后还应进行罕遇地震作用下弹塑性时程校核。如果在罕遇地震作用下,剪力墙全截面受拉钢筋不屈服,则钢筋承担全部拉力;若剪力墙受拉钢筋屈服,则受剪承载力会降低,应适当配置型钢承担剪力。由于一般不允许剪力墙受剪屈服,而受剪屈服判断则根据剪力墙所受剪力是否超过受剪承载力来判断。其中,罕遇地震作用下,当剪力墙受弯屈服时,应控制剪力墙边缘钢筋最大拉应变,参考文献[9],偏于安全考虑,建议控制在0.035以下。

2.2 设计软件

对于剪力墙,采用的分析模型大致分为两类,一类是基于材料非线性的微观单元模型,如PERFORM-3D的Shear Wall单元^[10]和ABAQUS的分层壳S4R单元^[11],另一类是基于构件非线性的宏观单元,例如Midas Gen的墙铰模型^[12]。采用这3种软件进行整体弹塑性分析时各构件所采用的力学模型对比见表4。

由表4可知,3种软件主要差异在于剪力墙的模拟方法和拉应力超过 f_{tk} 的处理方法。在PERFORM-3D和ABAQUS中,剪力墙受拉的力学模型主要采用混凝土和钢筋材料的受拉本构来考虑,并通过纤维截面积分来反映整个构件的开裂后行为。图6为墙铰模型拉力-轴向变形关系。对于Midas Gen的墙铰模型,剪力墙开裂后行为通过折减受拉刚度来实现,即受拉开裂后剪力墙的受拉刚度为图6中的 $\alpha_1 K_0$ 。

表4 3种软件的弹塑性分析模型

Table 4 Mechanical models of three softwares for elasto-plastic analysis

分析软件	计算方法	初始配筋	剪力墙	框架梁	连梁	阻尼/%	拉应力超过 f_{tk} 的处理方法
PERFORM-3D	直接积分法	多遇地震配筋	纤维截面壳单元 ^[10]	两端集中塑性铰的杆件单元	两端集中塑性铰的杆件单元	5	混凝土受拉开裂后退出工作,剪力墙抗拉刚度仅剩钢筋刚度
Midas Gen	直接积分法	多遇地震配筋	墙铰模型(图6)	两端集中塑性铰的杆件单元	两端集中塑性铰的杆件单元	5	剪力墙开裂后折减受拉刚度
ABAQUS	直接积分法	多遇地震配筋	S4R壳单元 ^[11]	纤维截面杆件单元B32	S4R壳单元	5	考虑混凝土受拉损伤退化

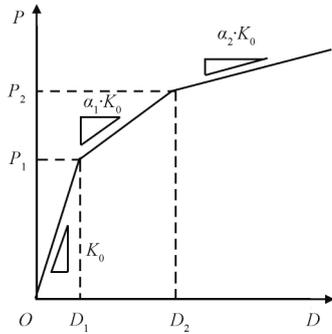


图6 墙铰模型拉力-轴向变形关系

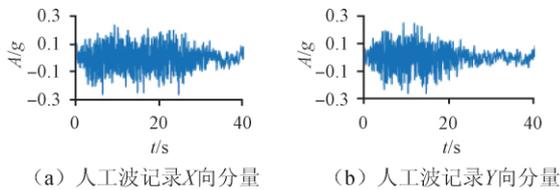
Fig. 6 Tensile force-axial deformation relationship of shear wall hinge model

PERFORM-3D 纤维模型计算得到的剪力墙拉力较小^[13] 而 ABAQUS 的 S4R 分层壳元则与之相近。

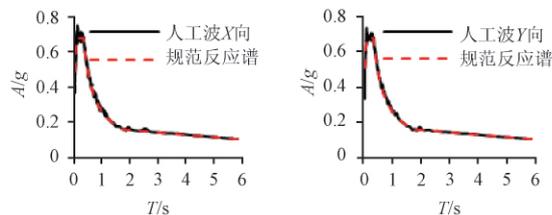
2.3 地震波选取

日本建筑法规规定对 60 m 以上建筑均采用弹塑性时程分析法进行设计,并规定了相应地震波选取原则^[14];美国抗震性能设计规程也将弹塑性时程分析法作为抗震性能设计的主要方法^[15-16]。结合国外规程和我国规范^[2],本文中采用弹塑性时程分析法进行设计时,选择的 3 组地震波应满足我国规范的要求:地震波拟合的反应谱谱值与规范反应谱在结构主要周期点相差应在 20% 以内,并且基底剪力应满足规范要求。

以第 1 节所述 7#塔楼为例,选取两组天然波及一组人工波作为输入地震波,本文中给出一组人工波(图 7)的分析结果,其余工况下分析结果与其相似。该组人工波进行弹性时程分析得到的楼层剪力不小于规范反应谱振型分解反应谱法(即等效弹性方法取 $\beta=0.3$)得到的结果(图 8)。在重力工况 $L_D + 0.5L_L$ 保持不变情况下,按规范要求输入地震波。



(a) 人工波记录X向分量 (b) 人工波记录Y向分量



(c) 人工波X向分量拟合反应谱 (d) 人工波Y向分量拟合反应谱

图7 人工波记录及其拟合反应谱曲线

Fig. 7 Curves of an artificial wave records and its response spectrum compatible with design response spectrum

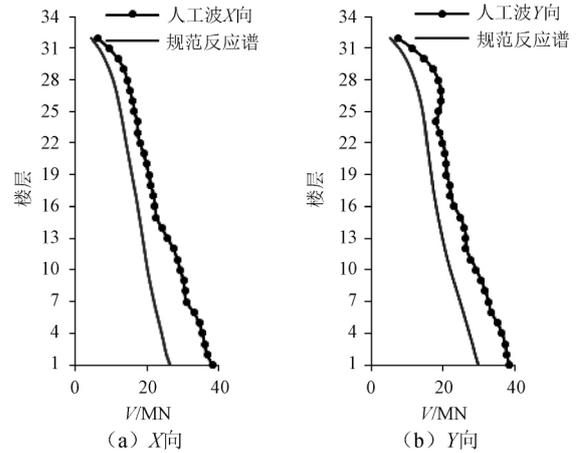


图8 7#塔楼人工波下弹性时程分析的楼层剪力分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of story shear of tower 7# by elastic time-history analysis using artificial wave

由图 7 中可知,所选一组人工波的拟合反应谱谱值与规范反应谱非常接近。由图 8 可以看出,所选人工波弹性时程分析得到的楼层剪力比规范反应谱略大,可用于设防地震弹塑性设计。

2.4 开裂后刚度的取值建议

从图 6 的墙铰模型可知,当剪力墙受拉开裂后,剪力墙刚度明显减小,剪力墙受拉开裂后的刚度取值成为了问题关键。本文中参考文献[17]的试验结果(图 9),确定钢筋混凝土构件轴心受拉开裂后的刚度为初始刚度的 10.5%。为了获得更加安全的设计,建议墙铰模型的开裂后刚度取为初始刚度的 15%。

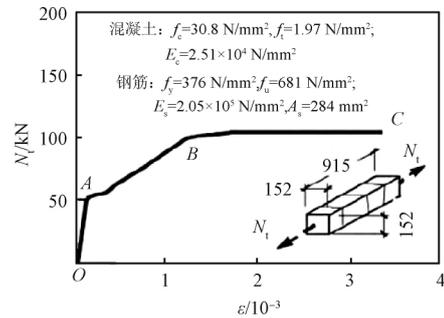


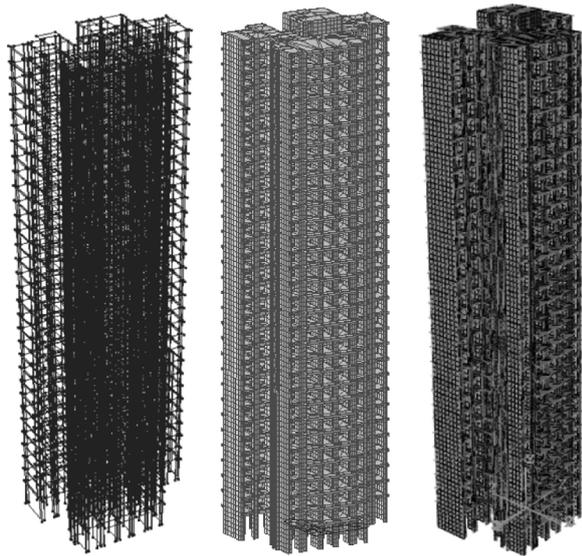
图9 轴心受拉构件试验结果

Fig. 9 Test results of axial tensile members

3 工程实例

3.1 层间位移角对比

针对第 1 节所述 7#塔楼,本文中根据表 4 的分析模型假定分别采用 PERFORM-3D、Midas Gen 和 ABAQUS 建立了三维弹塑性模型,见图 10。模型所采用的材料、单元本构见表 4。弹塑性时程分析得到的层间位移角对比结果见图 11。



(a) PERFORM-3D模型 (b) Midas Gen模型 (c) ABAQUS模型

图 10 3 类软件的弹塑性时程分析模型

Fig. 10 Models for elastoplastic time history analysis of three kinds of software

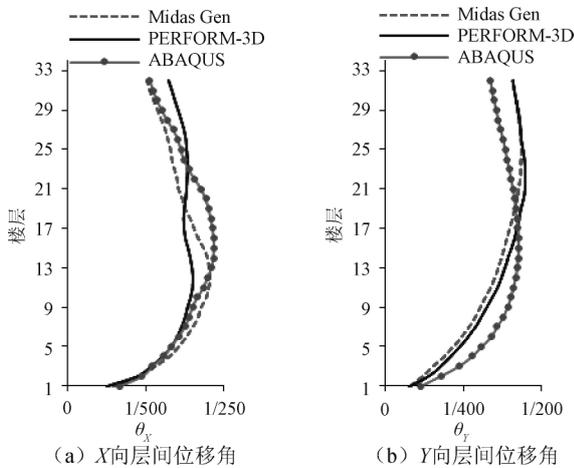


图 11 人工波作用下的层间位移角曲线

Fig. 11 Curves of inter-story drifts under artificial wave

从图 11 可知,在人工波作用下,3 类分析软件计算得到的层间位移角曲线吻合较好,说明 3 类分析软件计算得到的整体反应是一致的。

3.2 墙肢拉力对比

计算得到的剪力墙 Q3、Q4(图 3)中沿底部 12 层的拉力分布见图 12。由图 12 可知,PERFORM-3D、ABAQUS 和 Midas Gen 分析软件计算得到的剪力墙拉力均小于等效弹性方法得到的拉力结果,特别是对于墙肢 Q3,3 类分析软件计算得到的拉力分别为等效弹性方法的 39%、45% 和 74%。其中,由于 PERFORM-3D 和 ABAQUS 中均采用基于材料的微观单元模型,计算得到的拉力结果较为接近;而采用 Midas Gen 计算的拉力较采用 PERFORM-3D、

ABAQUS 的大,特别是对于墙肢 Q3,采用 Midas Gen 计算的拉力结果分别是采用 PERFORM-3D、ABAQUS 计算结果的 1.9 倍和 1.6 倍。

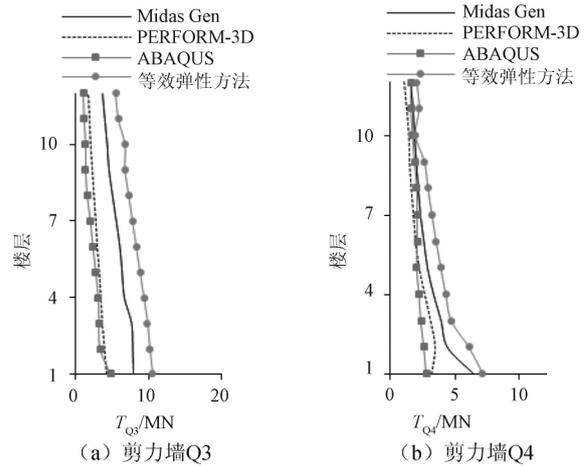


图 12 剪力墙拉力对比

Fig. 12 Tensile forces of shear wall obtained by three softwares

由于 PERFORM-3D 和 ABAQUS 分析软件中均采用纤维材料模型,剪力墙在受拉过程中沿截面高度方向存在应力梯度,其边缘混凝土纤维可能由于拉应力较大而先发生受拉屈服,导致计算得到的剪力墙合力明显小于墙铰模型计算得到的结果。

3.3 设计结果对比

7#塔楼按《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[1]的要求并根据等效弹性方法进行受拉剪力墙在设防地震作用下的设计,将会导致受拉剪力墙需要设置较多型钢(图 13,黑色表示设置型钢的墙肢),而根据弹塑性时程分析法进行受拉剪力墙的设防地震设计,剪力墙受拉不需增设型钢(图 14)。

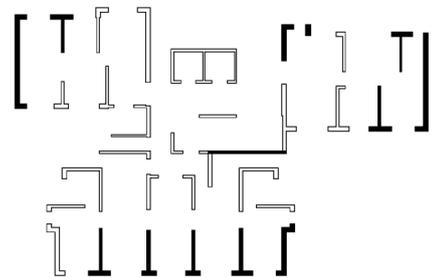


图 13 按等效弹性方法设置型钢的平面布置
Fig. 13 Plan of shear wall with steel obtained by equivalent elastic method

图 14 中的型钢是根据该墙肢受剪而配置的。本工程采用弹塑性时程分析方法进行设计共节约用钢量约 60 t,该地块 5 栋剪力墙结构共节省用钢量约 500 t,缩短工期约 60 d。

典型剪力墙内型钢及纵筋布置见图 15。由于型

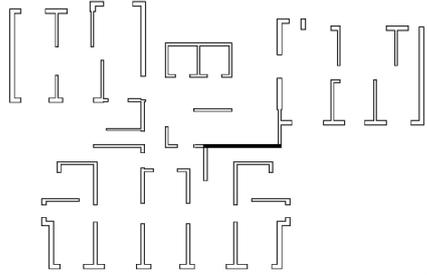


图 14 按弹塑性时程分析法设置型钢的平面布置
Fig. 14 Plan of shear wall with steel obtained by elasto-plastic time history analysis method

钢剪力墙施工时,钢筋需要在型钢钢板上穿孔或焊接才能绑扎或锚固。因此,由于抗拉在剪力墙中大量增设的型钢不仅给施工增加了较大难度(类似项目的施工情况见图 16),还严重影响了施工进度。对比图 13 和图 14 可知,采用弹塑性时程法分析所增设的型钢较少,从而减小了因不合理增设型钢给施工增加的难度。

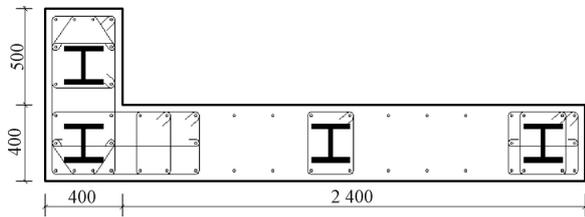


图 15 典型剪力墙内型钢及纵筋布置示意图
Fig. 15 Plan of typical shear wall with steel and longitudinal reinforcement



图 16 类似工程增设较多型钢的施工现场
Fig. 16 Construction site of more steels used in similar projects

4 结论及设计建议

1) 对于设防地震作用下剪力墙受拉设计时,等效弹性方法难以确定合适的连梁刚度折减系数值。当该折减系数取值为 0.3 时,受拉墙体的拉力依然偏大,应予以修正。即设防地震作用下采用等效弹性

方法设计时,连梁剪力、墙体拉力和剪力等取值应予以调整。

2) 受拉剪力墙的设防地震设计应按 JGJ 3—2010 中 3.11.3 条第 3 款和第 4 款规定采用弹塑性分析方法进行。

3) 由于墙铰模型与纤维模型计算得到的剪力墙拉力结果相差较大,并且纤维模型计算结果偏小,因此,为了偏于安全,现阶段建议采用墙铰模型进行弹塑性分析计算,并参考其纤维模型计算结果,为设计提供依据。

4) 采用墙铰模型进行受拉剪力墙设防地震设计时,应考虑剪力墙受拉开裂后刚度的退化,建议采用开裂后抗拉刚度为 15% 的初始抗拉刚度进行设防地震弹塑性设计。

5) 受拉剪力墙配置型钢与配置钢筋对抗拉而言作用相似,但仅配置钢筋的剪力墙,由于不需要穿孔和焊接,而且钢筋分布均匀,较设置型钢抗拉更为合理。

6) 根据剪力墙的受剪情况配置了型钢,在设计时应考虑型钢与钢筋共同承担拉力。

致谢:海南省超限审查专家张明提供了剪力墙施工相关的素材,深圳市欧博工程设计顾问有限公司何远明工程师提供了 ABAQUS 的相关素材,在此深表谢意!

参 考 文 献

- [1] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点(建质[2015]67号)[Z].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2015.
- [2] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.(Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 方小丹,韦宏,姚正钦.钢管高强混凝土剪力墙受拉性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(5):1-11.(FANG Xiaodan, WEI Hong, YAO Zhengqin. Experimental research on tension behavior of shear wall with steel tube-confined high-strength concrete [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 1-11. (in Chinese))
- [4] 王铁成,赖天宇,赵海龙,等.钢筋混凝土剪力墙拉剪受力性能试验[J].建筑结构,2017,47(2):64-69.(WANG Tiecheng, LAI Tianyu, ZHAO Hailong, et al. Tensile-shear mechanical performance test of reinforced concrete shear wall [J]. Building Structure, 2017, 47(2): 64-69. (in Chinese))
- [5] 徐紫鹏,林海,信瑛佩,等.受拉钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验与数值模拟研究[J].建筑结构,2017,47(14):80-87.(XU Zipeng, LIN Hai, XIN Yingpei,

- et al. Seismic performance test and numerical simulation study of reinforced concrete shear wall under tensile loading. [J]. Building Structure ,2017 47(14) : 80-87. (in Chinese)
- [6] 任重翠,肖从真,徐培福. 钢筋混凝土剪力墙拉剪性能试验研究[J]. 土木工程学报 2018 51(4) : 1-15. (REN Chongcui , XIAO Congzhen , XU Peifu. Experimental study on tension-shear performance of reinforced concrete shear wall [J]. China Civil Engineering Journal , 2018 , 51 (4) : 1-15. (in Chinese))
- [7] 徐培福,薛彦涛,肖从真,等. 高层型钢混凝土框筒混合结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构 2005 35(5) : 3-8. (XU Peifu , XUE Yantao , XIAO Congzhen , et al. Experimental study on seismic performance of high-rise SRC hybrid structures [J]. Building Structure 2005 35(5) : 3-8. (in Chinese))
- [8] MOEHLE Jack. Seismic design of reinforced concrete building [M]. San Francisco: McGraw-Hill Education ,2015: 756-757.
- [9] MOEHLE J , BOZORGNIA Y , JAYARAM N , et al. Case studies of the seismic performance of tall buildings designed by alternative means [R]. Berkeley , California: Pacific Earthquake Engineering Research Center 2011.
- [10] Computers and Structures Inc. (CSI) . Components and elements for PERFORM-3D and PERFORM-COLLAPSE [M]. Berkeley , California: Computers and Structures Inc. 2011: 124-134.
- [11] 汪大绥,李志山,李承铭,等. 复杂结构弹塑性时程分析在 ABAQUS 软件中的实现 [J]. 建筑结构 , 2007 37(5) : 92-95. (WANG Dasui , LI Zhishan , LI Chengming , et al. Nonlinear elasto-plastic time history analysis for complex structures in ABAQUS [J]. Building Structure ,2007 37(5) : 92-95. (in Chinese))
- [12] 北京迈达斯技术有限公司. Midas Gen 分析与设计原理 [M]. 北京: 北京迈达斯技术有限公司 ,2008. (Beijing Midas Technologies Co. , Ltd. Midas Gen analysis and design [M]. Beijing: Beijing Midas Technologies Co. , Ltd ,2008. (in Chinese))
- [13] 王森,魏琰,孙仁范,等. 动力弹塑性分析在建筑抗震设计中应用的若干问题 [J]. 建筑结构 ,2014 44(6) : 14-17. (WANG Sen , WEI Lian , SUN Renfan , et al. Application problems of dynamic elasto-plastic analysis in the seismic design of buildings. [J]. Building Structure ,2014 44(6) : 14-17. (in Chinese))
- [14] 日本地震工学会基于性能的抗震设计研究委员会. 基于性能的抗震设计现状与课题 [M]. 王雪婷,译. 北京: 中国建筑工业出版社 ,2012: 214. (Performance-Based Seismic Design Research Committee of the Seismic Engineering Society of Japan. Performance based seismic design-current situation and task [M]. Translated by WANG Xueting. Beijing: China Architecture & Building Press ,2012: 214. (in Chinese))
- [15] LATBSDC. An alternative procedure for seismic analysis and design of tall buildings located in the Los Angeles region: 2014 edition with 2015 supplements [R]. Los Angeles , California: Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council 2015.
- [16] TBI Guidelines Working Group. Guidelines for performance based seismic design of tall buildings [R]. Berkeley , California: Pacific Earthquake Engineering Center , University of California , 2010.
- [17] 顾祥林. 混凝土结构基本原理 [M]. 上海: 同济大学出版社 ,2004: 47-48. (GU Xianglin. Basic principles of concrete structures [M]. Shanghai: Tongji University Press ,2004: 47-48. (in Chinese))