

# 盛德大厦改建工程抗震性能研究

韩小雷<sup>1,2</sup>, 陈学伟<sup>1</sup>, 熊爱国<sup>1</sup>, 何伟球<sup>1</sup>

(1 华南理工大学土木与交通学院高层建筑结构研究所, 广州 510640;

2 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

[摘要] 针对广州盛德大厦改建设计后的结构进行抗震性能研究。要求改建设计后的结构满足现行结构规范, 故对原已建部分承载力复核并采取相应的加强改造措施, 以确保其有足够的抗震能力。改建后的结构设计采用基于性能的抗震设计方法, 包括小震弹性计算、中震弹性以及中震不屈服构件验算, 以及罕遇地震下的弹塑性分析。利用 ETABS 和 PERFORM-3D 分析软件进行了整体结构弹性及弹塑性时程分析和推覆分析, 并运用多种分析手段验证不同地震作用下结构的抗震性能, 最后校核了桩基础在地震作用下的承载力。

[关键词] 超限高层改建设计; 基于性能的抗震设计; 弹塑性时程分析

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)04-0088-05

## Seismic performance research of the reconstructing design project of Shengde building

Han Xiaolei<sup>1,2</sup>, Chen Xuwei<sup>1</sup>, Xiong Aiguo<sup>1</sup>, He Weiqiu<sup>1</sup>

(1 Tall Building Structure Research Institute, School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou 510640, China;

2 Key Laboratory of Subtropic Architecture Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The seismic performance research of the reconstructing design structure of Shengde building was presented. As the reconstructing design structure is required to meet the demands of current code, the bearing capacity of the original part was checked and some improving and strengthening measures, which ensure the structure have enough seismic capacity, have been taken. Design and analysis procedures of the reconstructing design structure, which are based on the performance-based seismic design method, consist of elastic analysis under frequent earthquake, elastic analysis and unyield analysis of components under moderate earthquake, and elastio-plasticity analysis under rare earthquake. Analysis of the whole structure model including elastic time history analysis, elastio-plastic time history analysis and pushover analysis were applied by ETABS and PERFORM-3D software. Different seismic performance levels of the whole structure were checked by different analysis methods. In the end, the bearing capacity of pile foundation under earthquake was verified in order to meet the demand of current code.

**Keywords:** reconstructing design of super high-rise building; performance-based seismic design method; elasto-plastic time history analysis

## 1 工程概况

广州盛德大厦超限高层建筑为改建工程, 原结构设计为地下 2 层, 地上 32 层的框架-剪力墙结构, 已建至地上 4 层, 长 × 宽约 36m × 30m, 结构已建部分设计主要依据 89 系列结构规范<sup>[1]</sup>。现在原已建结构的基础上进行新鉴定和改建设计, 且要满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)<sup>[2]</sup> (简称《抗规》) 使用要求, 改建后的结构为部分框支剪力墙结构体系, 结构设计年限 50 年, 长 × 宽仍约 36m × 30m, 主体结构地下 2 层, 地上裙房 6 层, 主楼 37 层 (图 1), 于层 7 通过梁式转换, 主塔楼结构高度为 119.0m, 属于 B 类高度



图 1 盛德大厦效果图

超高层建筑<sup>[3]</sup>, 转换层与标准层结构布置见图 2、3。

## 2 地震作用

工程设计基准期为 50 年, 抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度值为 0.1g, 地震分组为第一组, 场地类别为二类场地, 抗震设防类别为丙类, 结构安全等级为二级, 场地特征周期  $T_g = 0.35s$ 。根据《抗规》并参考《地震安全性评价报告》<sup>[4]</sup>, 各阶段地震作用下分析参数如表 1 所示。

地震分析参数

表 1

地震烈度	小震	中震	大震
地震发生概率 $P$	63%	10%	2%
地震影响系数 $\alpha_{max}$	0.08	0.23	0.50
场地特征周期 $T_g/s$	0.45	0.45	0.45
地面加速度峰值/cm/s <sup>2</sup>	35	110	220

根据该结构类型, 在各阶段地震作用下的阻尼

作者简介: 韩小雷, 教授, 博士生导师, Email: xlhan@scut.edu.cn。

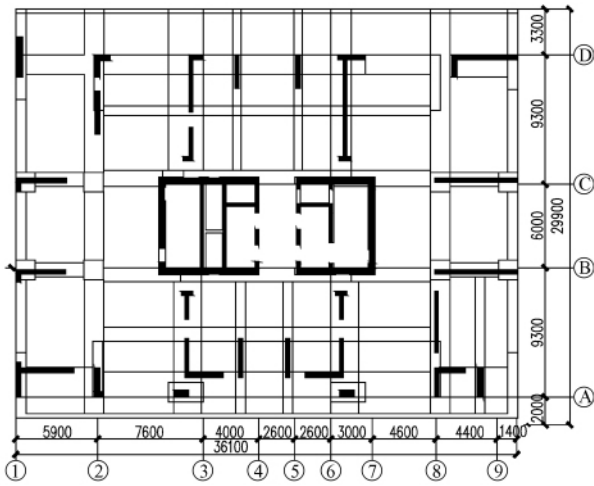


图 2 转换层结构布置图

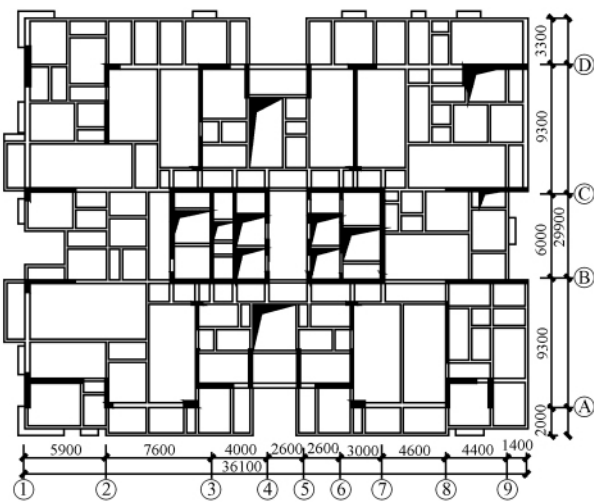


图 3 标准层结构布置图

比确定为 0.05。时程分析选取了 2 组人工波 (GM1, GM2) 及 5 组天然波 (GM3 ~ GM7)<sup>[5]</sup>。建立结构 ETABS 弹性模型,采用 20 组双向天然波样本进行试算,将 40 个地震工况的基底剪力与反应谱的基底剪力进行对比,挑选出满足《抗规》要求的地震波。具体使在每条被选择的地震波作用下,时程分析计算基底剪力结果应大于反应谱法结果的 65%,所有被选择的地震波作用下时程分析的基底剪力结果的平均值应大于反应谱法结果的 80%。

小震作用下所有结构构件都按最不利的荷载组合值进行设计配筋,按现行规范考虑结构构件的内力增大和调整系数的大小,其设计荷载分项系数按规范<sup>[6]</sup>取值。中震作用下,结构构件分别按弹性或不屈服进行性能分析复核。

对大震作用下对主体结构安全起重要作用的构件如框支层落地剪力墙、底部加强区落地剪力墙、转换梁等不应屈服的构件承载力进行复核。考虑到强

剪弱弯的抗震设防概念,对上述重要构件抗剪承载力复核时,调整系数取 1.2;抗弯承载力复核时,调整系数取 1.0。对非加强区墙柱的抗剪承载力按不屈服性能分析复核。对与非顶部加强区、墙柱抗弯性能、框架梁抗剪和抗弯性能等是可屈服的构件,需要根据 ASCE-41<sup>[7]</sup>对结构构件的变形验算,并对构件变形进行控制。

### 3 改造与结构措施

为了使改建后的结构方案能满足现行规范的要求,对原已建结构部分需要进行合理的改造,并对整个结构抗侧力体系采取相应的加强构造措施。

#### 3.1 改建后的主体结构

(1) 抗震等级。地下层 2 ~ 地上层 9 为特一级,层 10 ~ 顶层为一级。

(2) 材料强度。梁板为 C25 ~ C50,柱墙为 C25 ~ C60。

(3) 构件尺寸。梁截面:框架梁为 200 × 600 和 350 × 700,要求剪压比约 0.05 ~ 0.16;转换梁:700 × 2 000, 750 × 2 500, 1 000 × 2 500, 1 400 × 2 000, 1 400 × 2 500, 2 500 × 2 500,要求剪压比约 0.08 ~ 0.15;柱截面:1 400 × 1 400 和 1 400 × 2 500,要求轴压比约 0.45;墙厚:200 ~ 500,要求轴压比约 0.45。

#### 3.2 结构抗侧力体系

(1) 核心筒剪力墙布置:长 × 宽约为 15.6 m × 7.0 m,墙厚为 200 mm (次要内墙) ~ 500 mm (主要外墙)。核心筒剪力墙布置加强措施:1) 在与转换梁交接处,增设端柱,并设置比现行系列规范中框支柱更为严格的构造措施,要求端柱轴压比小于 0.50,配筋率约 2.0%,配箍率约 1.8%;2) 核心筒角部尽量增设角柱,并设置比现行系列规范中框支柱更为严格的构造措施,要求端柱轴压比小于 0.50,配筋率 2.0%,配箍率 1.8%;3) 在转换层平面处,核心筒周边设置 1 000 (500) mm × 2 500 mm 的环形加强梁,以进一步协调主要转换梁与核心筒的内力传递。

(2) 框支柱布置:要求原结构方案设计中的框架柱均按现行规范要求进行了加固和改造,并设置比现行规范中框支柱更为严格的构造措施。改造后的柱截面主要为 1 400 × 1 400, 1 400 × 2 500。混凝土强度等级 C60,要求轴压比小于 0.50,配筋率约 2.0%,配箍率约 1.8%。

#### 3.3 结构竖向构件加固与改造

1) 典型框支柱的加固、改造示意图见图 4;2) 核心筒剪力墙加固、改造示意图见图 5;3) 对塔楼平面凹进位置,设置 200 厚现浇混凝土楼板,双层双向配筋,有效保证结构平面的规则性。

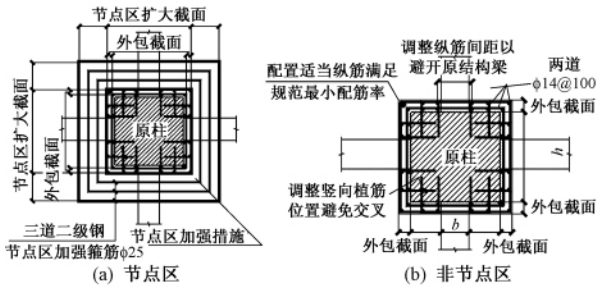


图 4 典型框支柱加固、改造示意图

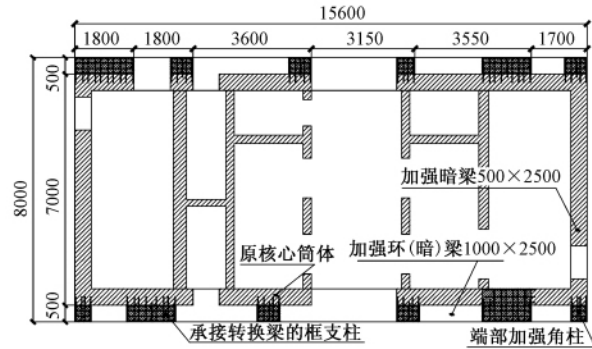


图 5 典型核心筒剪力墙加固、改造示意图

4 结构分析与抗震性能

改建设计后的结构方案中主要超限与特殊情况如下:1)高位转换—竖向构件不连续,层7为结构转换层,部分竖向抗侧力构件不连续,并超出规范5层转换的要求;2)扭转不规则。结构最大扭转位移比X方向为1.23(26层),Y方向为1.34(首层),大于规范的允许值1.20,属于I类扭转不规则;3)结构楼高37层,高度超过原设计32层,且按89系列规范设计并建成至地上4层,原结构设计满足89系列国家结构规范,并比89系列规范略有提高,但不满足现行规范的构造要求。

针对以上超限以及特殊情况,对结构整体及构件抗震性能提出了更为严格的控制指标<sup>[8]</sup>,具体如下:1)除转换层外的结构层间位移角在小震和大震作用下分别控制在1/1400和1/200以内,小于现行规范的1/1000和1/100;2)转换层结构层间位移角在小震和大震作用下分别控制在1/3500和1/600以内;3)框支柱轴压比0.50,小于现行规范的0.60;4)严格控制已建结构重要抗侧构件的承载力,并对其进行有效的加固、改造,保证其在大震作用下仍处于不屈服状态,以降低墙柱对延性的需求。

改建后的结构设计与分析中采用了基于性能的抗震设计方法。参考ASCE-41中的相关规定,根据延性(非延性)构件的性能水平的阶段,可把结构的性能水平分为以下四个阶段:充分运行阶段(简称OP)、基本运行(简称IO)、生命安全(简称LS)、接

近倒塌(简称CP)。

根据工程结构各部分体系受力与变形特征,参考美国规范FEMA356,ASCE-41及我国《建筑工程抗震性态设计通则》(CECS160:2004),并结合我国的工程实践经验,设定如下的性能目标和变形限值:1)结构构件性能目标的设定如表2所示;2)结构构件大震作用相应性能目标下的变形限值的设定如表3所示。

结构构件性能目标 表 2

构件	小震	中震	大震
首层及框支层框支柱	OP	OP	IO
首层及框支层落地剪力墙	OP	OP	IO
底部加强区落地剪力墙	OP	OP	IO
转换梁	OP	OP	IO
底部加强区剪力墙	OP	IO	LS
底部加强区连梁	OP	IO	LS
非底部加强区连梁	OP	LS	CP

大震作用下主要结构构件相应性能

目标下的变形限值 表 3

构件类型	LS 限值转角	CP 限值转角
底部加强区剪力墙(抗弯)	0.007	-
底部加强区连梁(抗弯)	0.025	0.05
非底部加强区连梁(抗弯)	0.025	0.05

4.1 小震与中震作用下的结构响应

小震下的分析采用2007年版SATWE和ETABS 9.1.2进行弹性计算。中震作用下的结构重要构件采用美国Imbsem Software Systems公司开发的截面分析程序XTRACT V3.0.1进行构件承载力计算。

在整体结构分析中采用相同的分析参数,两种程序的计算结果基本一致,主要的计算指标如表4所示。弹性分析阶段同时选取7条地震波作用进行弹性时程分析,部分分析结果(X向层间位移角曲线、X向楼层剪力曲线)如图6,7所示。

小震作用下结构整体性能分析 表 4

分析方法	振型分解反应谱分析			
	SATWE		ETABS	
分析软件	SATWE		ETABS	
结构总质量/t	81 556.1		83 235.7	
自振周期 T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> /s	2.79	2.69	2.37	2.76
扭转周期/平动周期	0.85		0.80	
最大扭转位移比	1.23(层26)		1.34(首层)	
方向	X向	Y向	X向	Y向
最大层间位移角	1/1 513	1/1 622	1/1 486	1/1 701
基底剪力/kN	9 856	9 319	9 829	9 849
基底弯矩/kN·m	520 310	555 216	542 449	574 975
地震剪力与层间位移比值	0.93		0.92	
层间位移角比值法(下/上)	1.10		0.98	

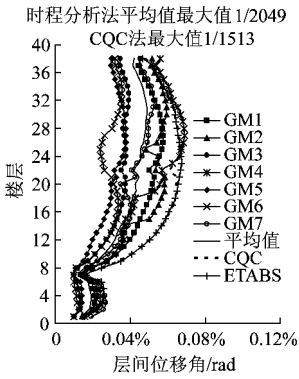


图 6 X 向层间位移角曲线

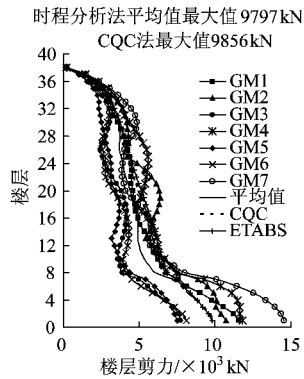


图 7 X 向楼层剪力曲线

从图可见,两个分析程序所得的结果比较吻合,不同的地震波作用下结构的内力有着较明显的区别,但其平均效应均小于振型分解反应谱法下的结构内力,故工程以振型分解反应谱法分析结果作为设计依据。分析结果表明结构层间位移角小于 1/1 400,满足设定的控制指标要求。

中震作用下的结构承载力复核采用 ETABS 以及 PKPM 进行,分别进行了中震不屈服和中震弹性的复核<sup>[9]</sup>。根据安评报告提供的参数,地震影响参数最大值为 0.23。计算结果表明,处于中震作用下的结构基本上处于弹性阶段。框支柱和转换梁无超筋信息,承载力满足中震弹性内力组合需求和中震弹性性能目标要求;框支层落地剪力墙最大剪应力水平为 0.047,没有出现抗剪超限且无超筋信息,构件承载力满足中震弹性内力组合需求和中震弹性性能目标要求。底部加强区剪力墙最大剪应力水平为 0.072,剪力墙抗剪无超筋信息,满足中震弹性性能要求,剪力墙抗弯满足中震不屈服性能目标要求。底部加强区的剪力墙连梁以及非底部加强区的连梁抗剪均满足中震不屈服性能目标要求。但非底部加强区的连梁抗剪承载力不满足中震不屈服,提取其内力并采用截面分析软件 XTRACT 近似估算其变形,分析表明非底部加强区连梁变形满足生命安全 LS 性能目标对应的限值。结构满足设定的中震作用下的性能目标要求。

#### 4.2 大震下的弹塑性分析

考虑到结构的重要性,采用抗震设计非线性软件 PERFORM-3D 进行弹塑性时程分析及推覆分析。其工程分析结果得到广大工程界的认可,但前后处理不适宜复杂的高层结构的建模,笔者开发了 PERFORM-3D 复杂结构建模前处理程序 ETP V1.1 程序<sup>[10]</sup>。ETP 能够详细读取 ETABS 或 SAP2000 程序的几何模型、构件截面及弹性材料信息,还能够提

供图形界面实现很方便地输入梁、柱及剪力墙的截面配筋与材料非线性属性设置,再经过数据处理导入 PERFORM-3D 程序中,从而实现复杂高层结构的非线性模型的建模。

为了真实考虑结构实配钢筋的影响,整个弹塑性分析模型的钢筋按结构初步设计配筋进行输入。工程采用 7 条地震波,分别按 0°和 90°进行双向弹塑性时程分析,并以平均值结果进行结构抗震性能评估。

根据计算结果可知,构件变形响应与整体响应一样表明结构处于弱非线性状态。梁构件小部分处于 LS 及 CP 状态,柱及剪力墙大部分构件处于 IO 状态(图 8),典型构件的变形满足性能指标的要求。该结构在大震作用下仍处于弱非线性状态的主要原因:1)改建后的结构设计规定了更为严格的抗震性能指标;2)对原已建部分根据现行规范进行了加强改造,其配筋量可实现中震不屈服。

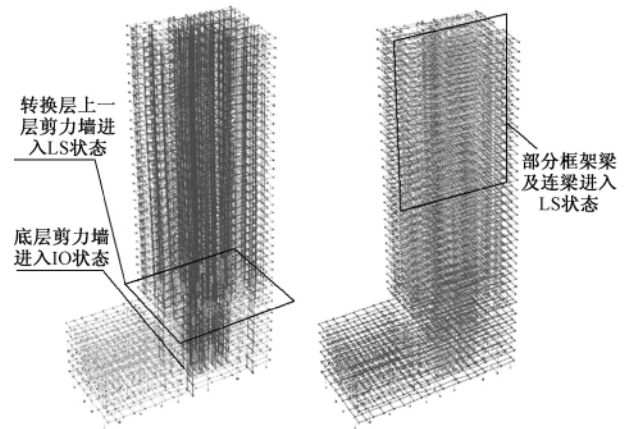


图 8 GM4 地震波工况下构件变形性能图

基于该弹塑性分析模型,在倒三角形荷载作用下进行了推覆分析作为弹塑性时程分析的参考<sup>[11]</sup>,结构 X 向推覆能力谱验算结果如图 9 所示。能力曲线与需求谱曲线的交点坐标:38 700 kN, 397.5 mm;需求层间位移角:1/202;与需求点相对应的加载步/总加载步:20/100。分析结果表明大震作用下的结构变形性能满足需求谱需求,结构达到大震作用下的抗倒塌性能目标。

结构整体弹塑性时程分析与推覆分析的部分计算指标对比如图 10,11 所示。两种分析结果的对比表明,结构在推覆分析和弹塑性时程分析下的整体变化趋势

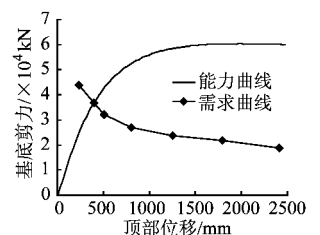


图 9 X 向推覆能力谱验算图

一致及对应数值相近,即大震作用下的结构整体弹塑性时程分析结果是可信的。

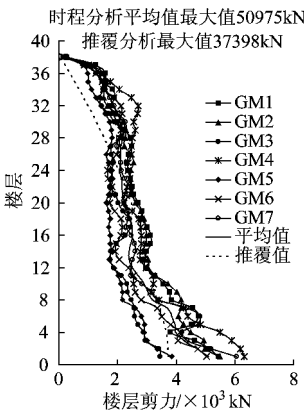


图 10 X向结构  
楼层剪力曲线图

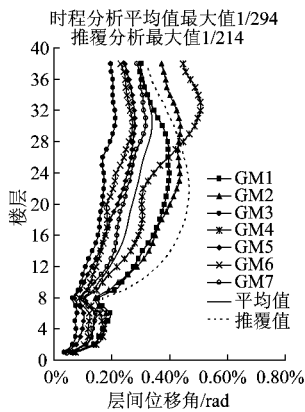


图 11 X向结构  
层间位移角曲线图

### 4.3 不屈服构件承载力分析

对于结构中起关键作用的构件,如框支层落地剪力墙、转换梁、连梁等单独进行构件性能分析。以典型框支柱 KZZ6 为例说明构件性能分析的过程,结果如表 5 所示。屈服承载力采用 XTRACT 程序计算,结果如图 12 所示。框支柱抗剪及抗弯承载力满足设定的性能目标要求。

KZZ6 承载力复核 表 5

	编号	响应最大值	需求比		响应最大值	需求比
	抗剪承载力 复核 /kN	GM1	2 180		0.028	抗弯承载力 复核 /kN·m
GM2		2 346	0.030	22 400	0.806	
GM3		1 735	0.023	13 870	0.500	
GM4		2 240	0.029	21 000	0.755	
GM5		1 790	0.023	14 100	0.507	
GM6		2 200	0.029	16 200	0.583	
GM7		2 070	0.026	17 000	0.612	
均值		2 080	0.027	17 481	0.629	

注:抗剪屈服承载力 77 031kN;抗弯屈服承载力 27 800kN·m。

### 4.4 基础校核

工程原设计采用扩底人工挖孔灌注桩,单桩承载力容许值(相当于现行规范特征值)16 000~20 000kN。根据原地质勘察报告、挖孔桩成孔验收记录,桩身完整性-反射波法,基桩钻孔抽芯检测报告桩身质量等资料,结合工程经验,偏于保守仅考虑桩端阻力对单桩承载力的贡献,经校核新确定的单桩承载力特征值都能满足改建结构设计方案在现行规范下的要求。

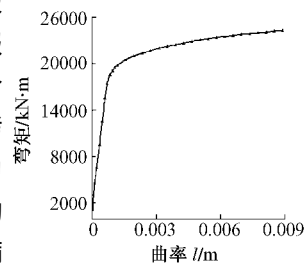


图 12 KZZ1 抗弯  
承载力计算

## 5 结论

盛德大厦改建设计工程需在原已建部分结构的基础上进行合理的改造并采取更为严格的抗震性能控制指标措施,以满足改建方案在《抗规》下的抗震能力要求。通过该工程基于性能的抗震设计,可以得以下结论:

(1)小震作用下结构弹性分析可以看出,结构层间位移角等满足设定的性能控制指标要求并小于结构规范限值。通过中震弹性和中震不屈服的内力组合对主要竖向和转换梁等构件分析,可以判定结构能够满足既定的性能目标。

(2)通过大震作用下整体结构弹塑性时程分析与推覆分析结果对比,可知结构整体的弹塑性时程分析结果是可信的。

(3)大震作用下结构构件变形图和层间位移角满足设定的相应性能目标以及从结构整体的推覆曲线最大值都可以看出,结构具有很好的抗侧性能。

(4)合理改造与加固后的改建结构设计方案具有很好的抗震能力,满足《抗规》要求。

### 参 考 文 献

- [1] GBJ11—89 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [2] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 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,2002.
- [4] 广州市盛德广场工程场地地震安全性评价报告[R]. 广州:广东省地震工程实验中心,2009.
- [5] 陈学伟,韩小雷,文健,等. 中洲二期观光门架结构设计[J]. 建筑结构,2010,40(10):44-50.
- [6] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [7] ASCE/SEC41-46 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings [S]. USA: American Society of Civil Engineers, 2007.
- [8] 韩小雷,陈学伟,何伟球,等. 盛德大厦结构可行性研究报告[R]. 广州:华南理工大学高层建筑结构研究所,2009.
- [9] 韩小雷,何伟球,陈学伟,等. 天朗海峰国际中心结构可行性报告[R]. 广州:华南理工大学高层建筑结构研究所,2008.
- [10] 陈学伟,韩小雷,林生逸,等. 中洲中心二期结构抗震性能分析[J]. 建筑结构学报,2010,31(1):101-109.
- [11] 韩小雷,陈学伟,林生逸,等. 基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析及工程应用[J]. 建筑结构,2010,40(2):13-16.