

陈头岗停车场C区塔楼在罕遇地震下的动力弹塑性分析

何亮

广州地铁设计研究院股份有限公司

摘要：论文以陈头岗停车场上盖开发项目C区塔楼为例，简要阐述了罕遇地震作用下超高层塔楼的动力弹塑性时程计算分析。有限元计算结果表明本塔楼在大震作用下，结构首层楼板、结构二层（转换层）楼板基本完好，仅在转换层楼板的局部角落出现轻微的损伤；紧邻转换层往上的第三层楼板基本完好，仅在第三层楼板的局部角落出现轻度的损伤；标准层楼板局部出现重度损伤，结构损伤满足既定性能目标要求，设计方案合理可行。

关键词：超高层；罕遇地震；动力弹塑性；性能目标
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.10.078

一、项目概况

（一）总平概况

广州地铁二十二号线陈头岗停车场位于石壁村北侧，待施工的东晓南放射线南侧，待施工的南大干线北侧。停车场的功能定位是保障地铁线路正常运营的综合场地，主要起到地铁车辆的停放、保养以及检修的相关工作。陈头岗停车场地块按功能大致可分为出入段线区（A1、A2区），咽喉区（B区）及库房区（C1-C2区）、白地（D区），如图1。

广州地铁二十二号线陈头岗停车场上盖开发项目规划总用地面积242093.5平方米，总建筑面积：879030平方米；计算容积率建筑总面积：583447平方米，上盖物业开发包括商业、高层住宅等，另盖板范围还有小学、中学、幼儿园及公建配套等上盖建筑，本次分析范围是C1区8#9#13#楼、C2区6#7#10#11#12#楼高层住宅，其中C1区8#9#13#三栋塔楼地上总建筑面积为62068（不含车库）+26812（库房区车库）=88880平方米，无地下建筑。C2区6#7#10#11#12#五栋塔楼地上总建筑面积为：100667.3（不含车库）+30087.3（库房区车库）=130754.6平方米，无地下建筑。

库房区C区停车场盖板裙房两层，建筑设计层数关系：以盖上住宅大堂入户层为0.00，0.00以下分别为结构二层住宅车库和结构首层地铁列车停车场（备注：建筑名称首层为盖上以上的第一层，对应结构三层（塔楼架空层）。以下设计，层名均以结构计算层命名）。首层盖板及以下梁板、竖向构件及基础已与列车停车场同步实施完成，转换层墙柱底钢筋已完成预留并浇筑泡沫混凝土保护（上盖施工时凿除泡沫砼用接驳器连接既有纵筋继续施工），具体如图2。C区盖板以及上部塔楼组成了大底盘多塔结构体系^[1-2]。

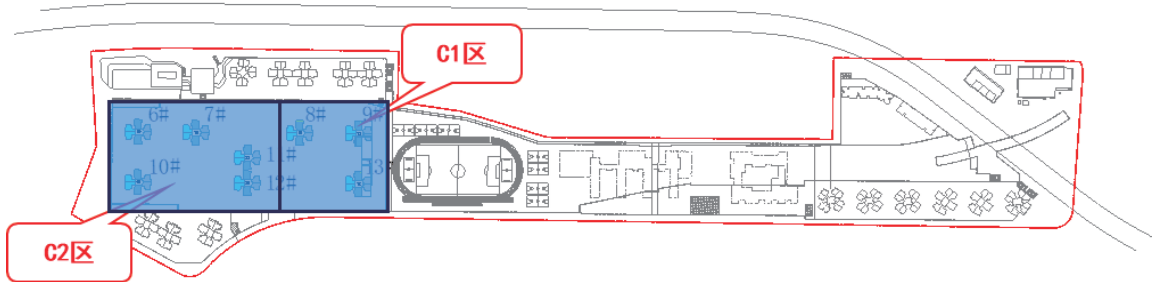


图1 陈头岗停车场总平面布置图

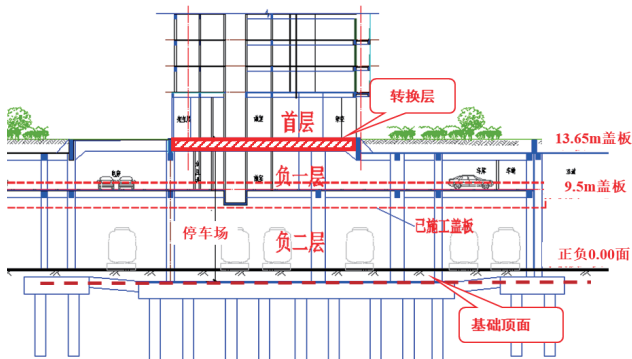


图2 楼层关系剖面示意

（二）结构体系与结构布置

建筑户型条件如下：C1区8#9#13#、C2区

6#7#10#11#12#楼为同一B1户型单塔。上述8栋塔楼，主体结构高度为113.740m>100m，不带地下室，场地位于7度区，结构体系属于部分框支剪力墙结构体系，属于B级高度的高层建筑。

B1户型高层住宅采用部分框支剪力墙结构，塔楼以外的裙房采用框架结构，以剪力墙、框架作为抗侧力体系。上部结构计算的嵌固端为基础顶面。由于盖下停车场轨道限制，垂轨向剪力墙落地受限制，仅电梯井、楼梯间及其他两片剪力墙已实施落地。由于二级开发阶段上盖物业开发户型有调整，已预留的落地剪力墙不再全部适用于新户型，仅有电梯井剪力墙延伸至高层住宅的屋顶，其余剪力墙均需要进行转换，转换层设置在裙房顶板，采用梁式转换。从竖向荷载直接传递路径是否被切断角度考虑，落地剪力墙按从基础贯通至塔楼屋顶计

算。转换层结构平面布置图见图3，标准层结构平面布置图见图4。

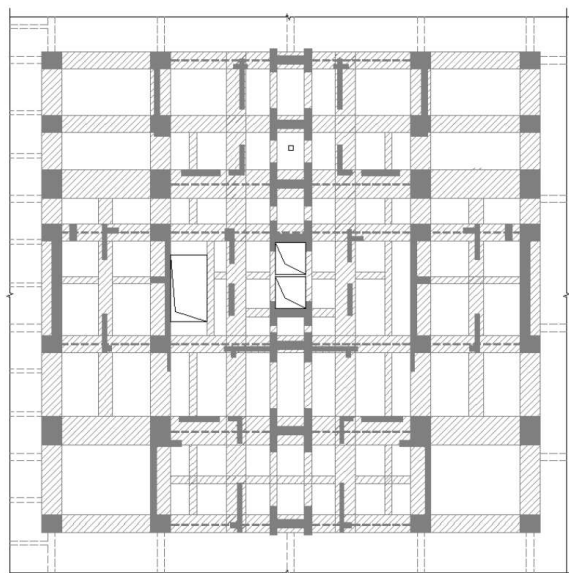


图3 转换层结构平面布置图

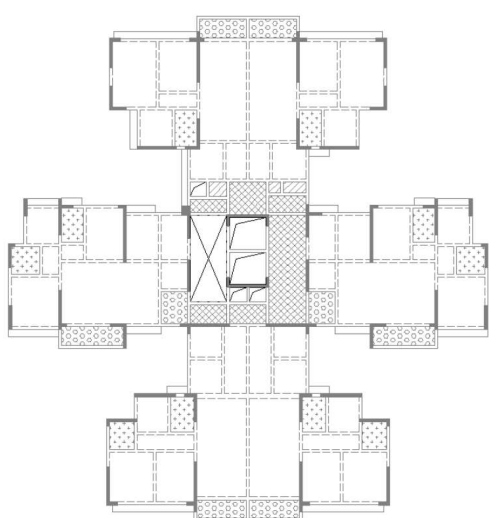


图4 标准层结构平面布置图

(三) 地质概况及基础设计

根据区域地质资料，从上至下有填土、粉质黏土、全风化岩、强风化岩、中风化岩和微风化岩。本建筑场地类别为III类。根据地质资料及结构受力特点，基础采用钻孔桩（已施工），直径为800mm、1000mm、1200mm、1400mm、1600mm等，单桩承载力分别为3600~16000kN，桩长8~40m，持力层大部分位于中风化岩，持力层局部位于微风化岩。高层住宅由于未设置

地下室，基础埋深不满足《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ3-2010）中12.1.8条的要求，高层住宅塔楼范围承台面-3.0m，其余范围承台面-1.5~-1.9m，塔楼墙柱承台间设置基础梁，单塔下的基础设计如图5所示。

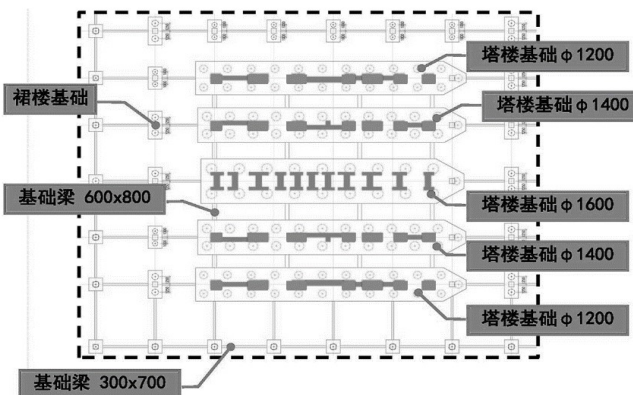


图5 C区8#楼基础平面示意图

二、动力弹性分析理论依据

(一) 弹塑性分析概述

根据广东省标准《高层建筑混凝土结构技术规程》（DBJ15-92-2013）中的第5.1.15条相关规定，本塔楼可采用PKPM-SAUSAGE（2016版）软件进行罕遇地震作用下高层建筑的弹塑性时程分析^[3]。

(二) 弹塑性时程分析的目的

1) 通过模拟，对整体结构在地震作用下的反应进行性能评估，分析并判定整体结构在地震作用下的最大弹塑性层间位移角是否满足既定的性能目标要求。

2) 由于分析过程是通过软件模拟，因此无法得到对真实结构的精准分析结果，但是弹塑性时程分析的意义在于得到一个相对能够满足工程需求的计算结果，以提供相关信息给设计人员做决策使用。针对本项目而言，也就是找到罕遇地震下的结构体系的潜在破坏机制，并找到相关的薄弱位置，从而通过对薄弱位置的加强处理，以便本项目的结构整体达到规范既定的性能目标要求^[4-6]。

(三) 构件性能目标

根据广东省标准《高层建筑混凝土结构技术规程》（DBJ15-2013）的相关要求，结构的抗震性能总共可以分为五个水准，这五个水准所对应的结构构件的损坏程度分别可以列举为：“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”和“比较严重损坏”。规范对第4性能水准构件以及结构损坏情况规定如表1。

三、罕遇地震下动力弹塑性分析

(一) 计算模型建模

选用C2区7#单塔模型进行分析，效果图如图6。

表1 罕遇地震下结构构件的第4性能水准预期下的震后性能状况表

地震烈度	结构抗震性能水准	结构宏观损坏程度	各部位损坏情况			继续使用的可能性	C级模板最大层间位移角限值
			关键构件	普通竖向构件	耗能构件		
罕遇地震	第4性能水准	中度损坏	轻度损坏	部分构件中度损坏	中度损坏、部分构件损坏比较严重	修复或加固后继续使用	1/125

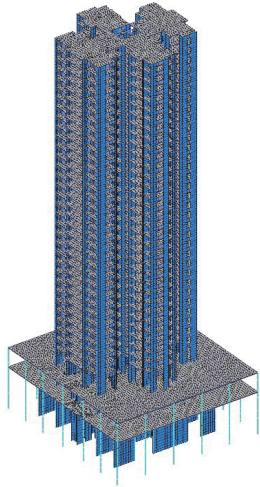


图6 C2区7#sausage计算模型示意图

(二) 地震波选择

地震波名称: 1: ArtWave-RH2 (1号地震波)

2: TH083_KOBE JAPAN 1-16-1995 AMAGASAKI, (2号地震波)

3: TH097_LOMA PRIETA 10-18-1989 HOLLTSTER CITY HALL, (3号地震波)

模型个构件配筋率输入如表2。

表2 模型构件配筋率表

构件	楼层	配筋率
剪力墙	1~2层	1.5% (竖向筋)+1.6% (水平筋)
剪力墙	3~4层	1.0% (竖向筋)+1.5% (水平筋)
剪力墙	5层及以上	按小震设计结果配筋
转换柱	1~2层	B方向 (0.6%)、H方向 (0.35%)
转换梁 (按壳元)	2层	1.5% (竖向筋)+1.85% (水平筋) (局部转换梁设窄翼缘型钢)
框架梁	3层及以上	按小震设计结果配筋
楼板	1层	0.3% (X向)+0.3% (Y向)
楼板	2层	转换区域: 1.0% (X向)+1.0% (Y向) 非转换区域: 0.3% (X向)+0.3% (Y向)
楼板	3层	0.3% (X向)+0.3% (Y向)
楼板 (核心筒区域)	4层及以上	0.25% (X向)+0.25% (Y向)
楼板 (非核心筒区域)	4层及以上	0.2% (X向)+0.2% (Y向)

(三) 计算结果分析

1) 基底剪力及层间位移角

本项目塔楼模型在罕遇地震波下的基底剪力为CQC法计算基底剪力的4.76~6.91倍之间, 平均值X方向为5.95倍, Y方向为5.72倍, 基底剪力的放大比值基本处在4~6倍之间, 满足规范的基本要求。

本项目塔楼模型在罕遇地震波下的最大层间位移角处在1/137~1/232之间, 满足规范的1/125限值要求, 其中塔楼转换层的x向层间位移角处在1/3745~1/4263之间, 塔楼转换层的y向层间位移角处在1/879~1/1477之间, 转换层位移角均远小于规范要求, 结果表明转换层的构件基本处于弹性阶段。

2) 结构损伤情况总结

本项目塔楼模型在3条罕遇地震波的动力时程分析下, 出现的构件塑性损伤分布表现出基本类似的情况, 现对各方向模型各选出X, Y向层间位移角最大的地震波动力弹塑性分析结果进行结构损伤情况描述, 选取其中的1号罕遇地震波工况为例进行分析, 其中剪力墙构件和转换层结构构件的钢筋屈服以及混凝土损伤情况示意如图7所示。

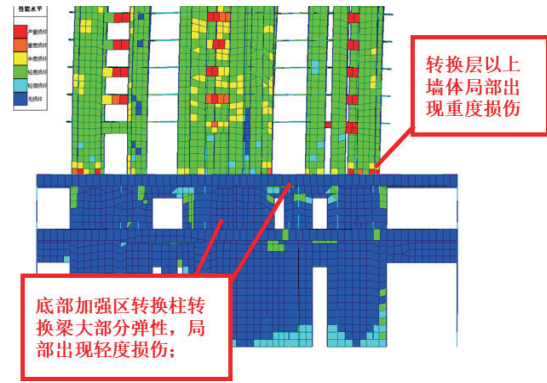


图7 罕遇地震下塔楼整体损伤示意图

四、结语

根据以上分析, 陈头岗停车场上盖开发项目C2区B1户型单塔在罕遇地震下的动力弹塑性分析结果如下:

(1) 在罕遇地震作用下, 塔楼模型转换层以上部位的剪力墙均有不同程度的损伤; 其中连梁的损伤要大于墙体的损伤, 塑性较主要出现在连梁的位置, 可见塔楼布置的连梁充分发挥了既定耗能的作用, 充分实现了规范要求的强墙肢弱连梁的性能目标。

(2) 在罕遇地震作用下, 塔楼模型转换层基本完好, 局部转换层的竖向构件 (X方向和Y方向的柱子及剪力墙) 出现轻微和轻度损伤, 而此时转换层上部的局部墙体构件已出现中度损伤。此结果表明: 在罕遇地震作用下, 转换层以上墙体的破坏时间要先于转换层墙体的破坏, 同一时刻转换层以上墙体的破坏程度也要大于转换层墙体。

(3) 在罕遇地震作用下, 结构首层楼板、结构二层 (转换层) 楼板基本完好, 仅在转换层楼板的局部角落出现轻微的损伤; 紧邻转换层往上的第三层楼板基本完好, 仅在第三层楼板的局部角落出现轻度的损伤; 标准层楼板局部出现重度损伤, 结构损伤满足既定性能目标的要求。

综上所述, 本项目塔楼结构的整体抗震性能良好, 能与预期塑性化过程吻合, 计算结果能够达到预定的罕遇地震作用下性能目标要求。

参考文献

[1] 吕西林. 建筑结构抗震设计理论与实例 [M]. 同济大学出版社, 2002.
 [2] 张朕磊. 某高宽比超限住宅抗震设计与分析 [J]. 结构工程师, 2018, (2): 23-32.
 [3] 胡青松, 潘东辉. 无锡恒隆广场塔楼A在罕遇地震下的动力弹塑性分析 [J]. 建筑结构, 2012 (s2): 65-71.
 [4] 卓杰, 孙华华, 张红永. 河南省科技馆新馆超限结构抗震动力弹塑性分析 [J]. 结构工程师, 2022, 38 (2): 74-80.
 [5] 孙新. 考虑砌体填充墙作用的框架结构动力弹塑性分析 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (1): 100-102.
 [6] 王洋, 井彦青, 李建峰, 等. 日照海韵广场1#塔楼结构动力弹塑性分析 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (22): 26-31, 42.