

东莞市某超高层住宅结构超限设计

梁添

广西万科企业管理有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]某住宅项目结构高度 214.60m, 超 B 级高度限值。文中从结构布置及选型、超限判断和性能目标、结构抗震分析等方面详细论述。通过对超限高层建筑的抗震性能系统分析, 验证了关键构件在设定地震水准下的性能实现路径。综合验证结构整体实现中震“性能水准 3”抗震设防目标, 为同类超限工程提供理论支撑与实践依据。

[关键词]结构 B 级高度; 超限判断; 性能设计; 设防烈度; 罕遇地震

DOI: 10.33142/ect.v3i6.16865

中图分类号: TU241

文献标识码: A

Over Limit Design of a Super High-rise Residential Structure in Dongguan City

LIANG Tian

Guangxi Vanke Enterprise Management Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract: The structural height of a residential project is 214.60m, exceeding the B-level height limit. The article provides a detailed discussion on structural layout and selection, over limit judgment and performance objectives, as well as structural seismic analysis. Through systematic analysis of the seismic performance of over limit high-rise buildings, the performance implementation path of key components under the set seismic level has been verified. Comprehensively verify the overall achievement of the seismic fortification goal of "performance level 3" for medium earthquakes, and provide theoretical support and practical basis for similar over limit projects.

Keywords: structure B-level height; over limit judgment; performance design; fortification intensity; rare earthquake occurrence

1 项目概述

本项目位于东莞市东城街道。地上共设有 3 栋超高层塔楼及 3 层商业裙房, 本文对其中 1#楼进行分析论述。本项目 1#塔楼屋面高度为 214.60m, 地下 3 层, 地上 59 层, 首层层高 5.15m, 标准层层高 3.4m。平面尺寸为 52.4m×24m,

高宽比 8.9。结构三维模型示意图见图一。抗震设防烈度为 6 度 (0.05g), 场地类别: II 类, 基本风压: 0.35kN/m^2 (用于舒适度分析); 0.55kN/m^2 (用于结构变形验算); 0.605kN/m^2 (用于构件承载力设计, 按基本风压的 1.1 倍), 地面粗糙度类别: C 类, 结构体型系数: $1.4^{[1]}$ 。

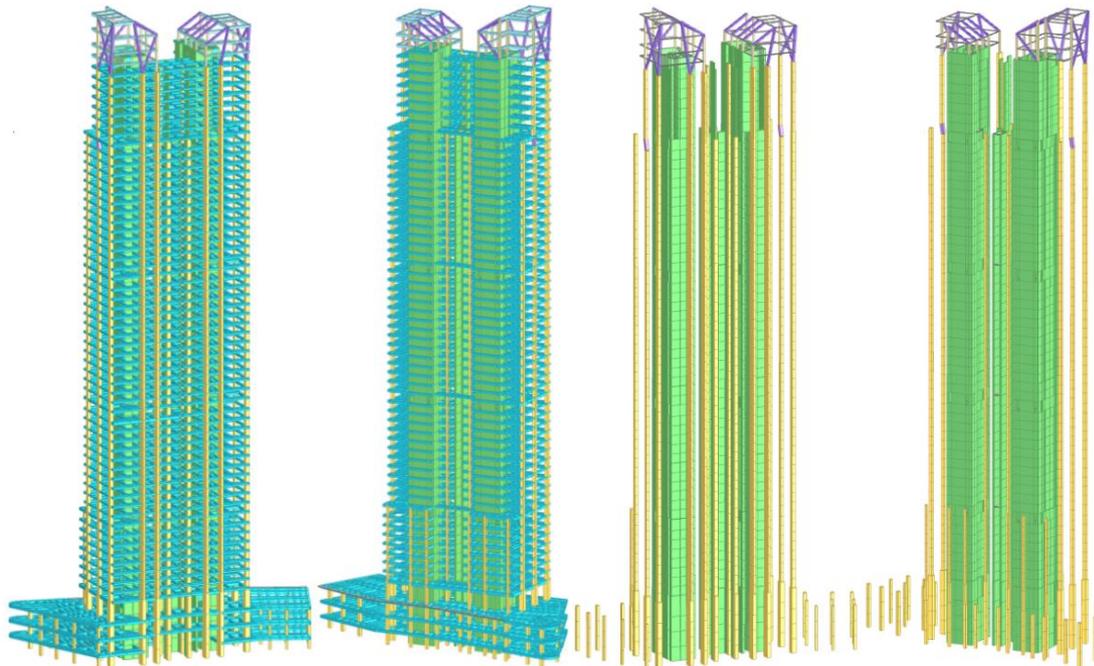


图 1 结构三维模型示意图

2 结构布置及选型

塔楼平面尺寸：52.2m×29.2m，长宽比：1.78，结构高宽比为 8.9，结构类型为框架-剪力墙结构。剪力墙主要集中在东西两侧及中间部位，东西两侧剪力墙形成两个筒体，中间部位剪力墙依据建筑隔墙位置均匀布置，主要沿 Y 方向布置，少许沿 X 方向分布首先布置在核心间部分。层数越高，墙厚逐渐减薄。塔楼框架柱沿四周均匀布置，由于建筑户型需要，中区及高区标准层的框架柱有所减少，在南侧较为明显。建筑平面南北向的结构高宽比较大，南侧框架柱截面长向沿南北方向布置，且截面尺寸基本保持不变，以提高结构的抗侧刚度和抗倾覆能力。52 层东西两侧分别设有一根转换斜柱，斜柱截面尺寸为 1000×1000。斜柱下节点相连的 Y 向拉梁为型钢混凝土梁，混凝土截面尺寸为 600×600，型钢截面尺寸为 H300×150×20×20。其余内外框架梁为钢筋混凝土梁，梁高在 600~800mm 之间。

塔楼在 13 层及 53 层存在平面体型少量收进，13 层以下为低区，13 层（含）至 53 层为中区，53 层及以上为高区。主要构件为混凝土剪力墙、型钢混凝土框架柱、混凝土框架柱、混凝土斜柱、型钢混凝土框架梁等。

塔楼楼层高度 100m 以下标准层（6~11 层、14~23 层、26~27 层）除核心筒和局部楼板外的楼板为叠合板，叠合板最小厚度 140mm（60mm 预制层+80mm 现浇层）。除叠合板外，其余楼板均采用现浇混凝土结构。核心筒板厚 130mm，其他板厚依据板跨布置为 100mm~220mm。楼梯均采用现浇混凝土结构，梯板分布筋及平台板钢筋双向均须锚入周边剪力墙，满足锚固长度，增加该部分结构整体工作性能。

3 超限判断和性能目标

3.1 超限判断

根据《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》的要求^[2]，对塔楼可能存在的超限项目进行逐一检查。本工程为多塔大底盘结构，大底盘裙房有 3 层。因各塔楼已计入“尺寸突变（多塔）”不规则项，所以针对本工程扭转不规则项位移比分析时，多塔 1~3 层的位移比结果记入大底盘，大底盘位移比最大值 1.33。各塔楼位移比考察对象为 4 层及以上结构楼层。塔楼结构体系为框架-剪力墙结构。本项目超限内容如下：高度超限，本项目 1#塔楼地面以上至结构屋面高度为 214.60m，超过了现有规范的 B 级高度限值；尺寸突变，1#、2#、3#塔楼在底部由三层裙房组成整体，裙房与塔楼之间未设置永久缝，为多塔结构；局部不规则，在 52 层存在转换斜柱，首层大堂处存在跃层柱。

3.2 抗震性能目标

按照抗震规范的要求，进行多遇地震、设防地震和罕遇地震的抗震验算^[3]。抗震设防性能目标级，根据本工程

结构受力特点，对不同构件在不同地震下设定抗震目标如下表 1。

表 1 抗震性能目标

地震水准		控制项次	多遇地震	设防地震	罕遇地震	
最低抗震性能要求			第 1 水准	第 3 水准	第 4 水准	
构件性能	关键构件	底部加强区剪力墙	抗弯	弹性*	弹性	不屈服
			抗剪	弹性*	弹性	不屈服
		底部加强区框架柱	抗弯	弹性*	弹性	不屈服
			抗剪	弹性*	弹性	不屈服
		转换斜柱、相连框架梁、相邻层框架柱	抗弯	弹性*	弹性	不屈服
			抗剪	弹性*	弹性	不屈服
	普通竖向构件	一般部位剪力墙	抗弯	弹性*	不屈服	允许部分屈服
			抗剪	弹性*	弹性	满足最小截面验算
	一般部位框架柱	抗弯	弹性*	不屈服	允许部分屈服	
		抗剪	弹性*	弹性	满足最小截面验算	
	耗能构件	连梁	抗弯	弹性*	部分抗弯屈服	允许部分屈服
			抗剪	弹性*	不屈服	满足最小截面验算
		框架梁	抗弯	弹性*	部分抗弯屈服	允许部分屈服
			抗剪	弹性*	不屈服	满足最小截面验算
	楼板	与斜柱相连的相关范围楼板	抗拉钢筋弹性	抗拉钢筋弹性	抗拉钢筋不屈服	
抗剪钢筋弹性			抗剪钢筋弹性	抗剪钢筋不屈服		
除上一项的其他楼板		抗拉钢筋弹性	抗拉钢筋不屈服	抗拉钢筋不屈服		
		抗剪钢筋弹性	抗剪钢筋不屈服	抗剪钢筋不屈服		
最大层间位移角		1#塔楼 1/577	-	1#塔楼 1/100		

注：表中弹性*与弹性的区别为前者需要考虑与抗震等级相关的调整系数，后者不需要。

4 结构抗震分析

4.1 单塔结构多遇地震及风作用下的弹性分析

4.1.1 弹性计算结果

为了确保分析结果的准确性，小震弹性分析采用两个软件进行计算相互复核，分别为北京盈建科股份有限公司的 YIK-A(4.3.0)、北京迈达斯技术有限公司 Midas/gen。结构整体计算结果如下表 2：

4.1.2 弹性时程分析

根据抗震规范的要求，选择 5 组天然波和 2 组人工波进行多遇地震下的弹性时程分析^[4]。经计算，1#塔楼时程分析的各条波与规范谱基底剪力之比的最小值：X 向为

82%；Y 向为 79%；最大值：X 向为 109%；Y 向为 101%；时程分析各条波平均值与规范谱基底剪力之比：X 向为 96%；Y 向为 95%；即各条波与规范谱的基底剪力比均处于 65% 到 135% 之间（即 COC+35%），且平均值处于规范谱的 80% 到 120% 之间，满足规范的各项要求。根据计算结果，7 条波平均值 X 向比规范谱的计算结果小 4%，Y 向比规范谱的计算结果小 5%，即弹性时程分析的计算结果与规范谱的计算结果基本一致，小震设计可仅按照规范谱进行。

表 2 主要计算结果

模型		1#塔楼		
计算程序		YJK	Midas/gen	
楼板刚度假定		刚性楼盖	刚性楼盖	
周期折减系数		0.85	0.9	
总重量（万吨）		14.49	14.66	
计算振型数		28	28	
结构自振周期		T1=5.69（X 向）	T1=5.76（X 向）	
		T2=5.35（Y 向）	T2=5.31（Y 向）	
		T3=2.91（扭转）	T3=2.88（扭转）	
		T1=1.64（X 向）	T1=1.64（X 向）	
		T2=1.19（Y 向）	T2=1.17（Y 向）	
		T3=0.91（扭转）	T3=0.91（扭转）	
第一扭转周期/第一平动周期		0.511	0.50	
振型质量参与系数	X 向	96.19%	96.25%	
	Y 向	95.14%	94.75%	
首层地震力（kN）	X 向	8097	7959	
	Y 向	9232	9067	
首层地震力倾覆力矩（kN·m）	X 向	866868	852276	
	Y 向	883949	933828	
最大层间位移角 <所在楼层>	地震	X 向	1/1770	1/1756
			<30F>	<30F>
		Y 向	1/1939	1/2000
	风		<46F>	<46F>
		X 向		
		Y 向	<46F>	<43F>
地震偶然偏心扭转位移比	X 向	1.10	-	
		<4F>	-	
	Y 向	1.13	-	
		<4F>	-	

4.2 设防烈度及罕遇烈度地震作用下构件承载力验算（等效弹性法）

中震分析皆采用 YJK 软件进行线弹性计算，结果后处理采用结构抗震性能设计软件 PBSD 进行分析。塔楼各

类构件均有效达成预设抗震性能目标：底部加强区剪力墙满足中震抗弯弹性及抗剪弹性、大震抗剪不屈服（抗弯设计取小震与中震包络值，抗剪取小震与大震包络值）；一般部位剪力墙满足中震抗弯不屈服与抗剪弹性（抗剪取小震与中震包络值）；所有剪力墙中震拉应力均严格限制于 $2f_{tk}$ 以内，局部 $<f_{tk}$ 区域采用增加竖向分布筋率构造加强。框架柱体系中，底部加强区满足中震双弹性及大震抗剪不屈服，一般部位及裙房相关柱满足中震抗弯不屈服与抗剪弹性，且柱构件抗弯/抗剪设计均仅需采用小震内力结果。转换体系中斜柱、相邻框架柱及相连梁均满足中震双弹性与大震抗剪不屈服，其抗弯/抗剪设计亦仅需依据小震内力。梁构件方面，普通框架梁满足中震抗剪不屈服（抗剪取小震与中震包络值），连梁满足中震抗剪不屈服（抗剪取小震内力）。综合验证表明，结构整体实现在中震作用下性能水准 3 的抗震设防目标。

4.3 罕遇地震作用下非线性时程分析及抗震性能评估

本工程采用三维非线性结构分析软件 PERFORM-3D 进行罕遇地震下的动力弹塑性分析。本工程选择两组天然波（TRB1、TRB2）和一条人工波（RGB）进行弹塑性时程分析。对于以上 3 组地震波，将地震波转换后的反应谱与规范规定的反应谱进行对比，如图 2 所示。从上图看出，地震波的加速度反应谱在结构各周期点上与规范反应谱吻合较好^[4]。

为了验证模型的构件组成、总质量和刚度的准确性及对结构的基本动力特性做出初步判断，在进行弹塑性时程分析之前首先对模型进行了模态分析，见表 3。从上表可以看出，两种软件计算的周期及总质量代表值接近（差异比值均小于 5%），表明 PERFORM-3D 计算模型是准确的，可以用来进行罕遇地震作用下的动力弹塑性时程分析。

表 3 两种软件模态分析的主要结果对比

项次	YJK	PERFORM-3D	差异比
总质量代表值（吨）	144845	146890	1.41%
T1（s）	5.70	5.73	0.60%
T2（s）	5.36	5.31	-0.99%
T3（s）	2.91	3.04	4.27%
T4（s）	1.64	1.68	2.14%
T5（s）	1.19	1.21	1.85%
T6（s）	0.91	0.95	4.40%

在所选 3 组地震波作用下，结构的层间弹塑性位移角见图三。1#塔楼的三组地震时程结果取包络时的最大层间塑性位移角：X 方向 1/271（第 29 层）；Y 方向 1/268（42 层）。均小于规范限值[1/100]，满足要求。

按照规范要求，构件的抗震性能评估为三个地震工况包络作用下的结果。损伤图结果采用 PBSD 进行后处理。塔楼构件性能水准满足预期的抗震性能目标，在罕遇地震作用下各项控制指标可满足性能水准 4 的抗震性能目标。

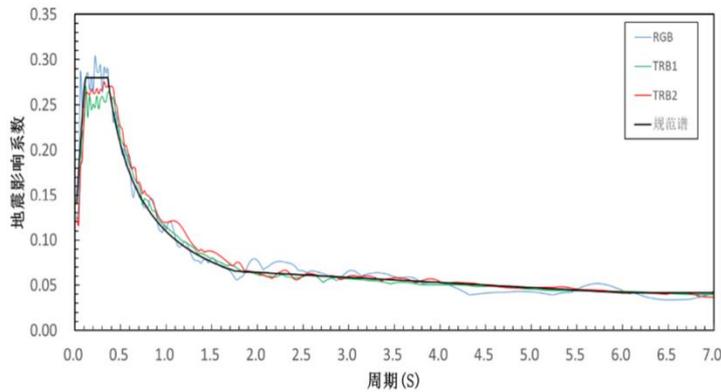


图2 所选地震波拟合的反应谱曲线与规范反应谱曲线的对比

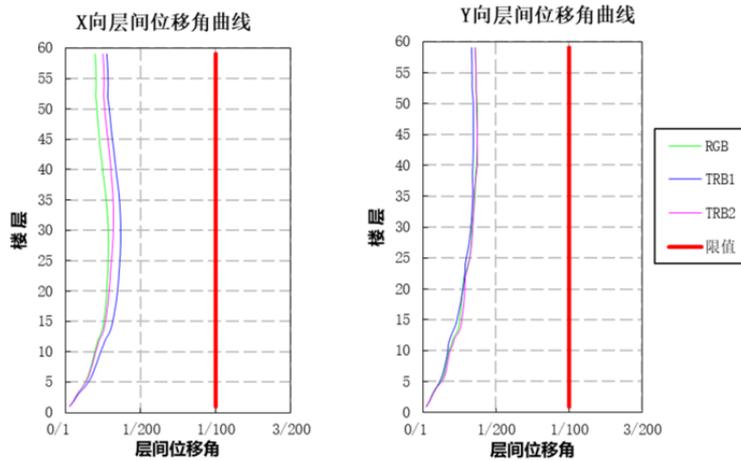


图3 层间位移角曲线

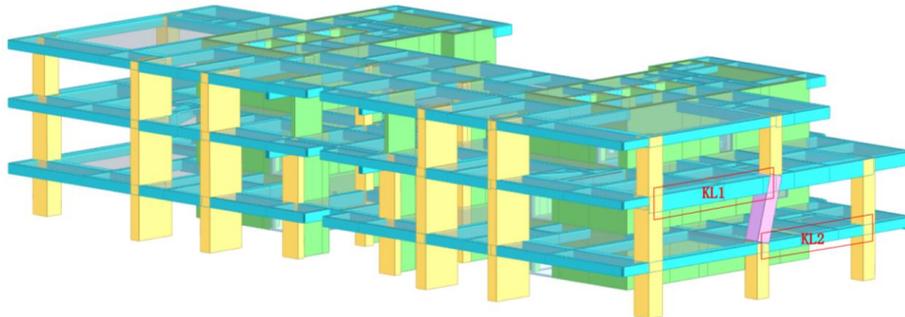


图4 52层三维模型图

4.4 斜柱转换分析

本工程塔楼在52层的东西两侧均设有斜柱，52层三维模型图见图4。图中与斜柱上节点相连的Y向框架梁K1为C30混凝土梁，截面 1000×1000 ；与斜柱下节点相连的Y向框架梁KL2为型钢混凝土梁，混凝土标号C30，混凝土截面 600×600 ，型钢标号Q355，型钢截面 $H300 \times 150 \times 20 \times 20$ 。

因斜柱轴力较大，会在52层、53层Y方向产生较大的水平力。针对该问题，需在不考虑楼板贡献的情况下，即模型中与斜柱相连的周边楼板板厚为0，板自重按照附加恒载输入，分析复核与斜柱相连的混凝土梁及相关范围

楼板的应力水平。斜柱节点传力分析见图5，计算结果显示，对于斜柱上下节点，在包络组合工况下，模型中节点的传力基本平衡。与斜柱上节点相连的Y向框架梁KL1在包络组合下混凝土梁的拉应力为0.481，远远小于C30混凝土抗拉强度设计值（ 1.43MPa ）^[5]，与斜柱下节点相连的Y向框架梁KL2在包络组合下且不考虑混凝土的作用，型钢的应力比为0.17，有较大富余。

采用Midas/GEN建立全楼弹性楼板模型，计算楼板在竖向荷载及水平荷载作用下的应力及内力，并进行配筋构造设计。除楼板开洞及竖向构件附近局部楼板出现应力集中的情况，其余楼板均满足其性能目标的要求。

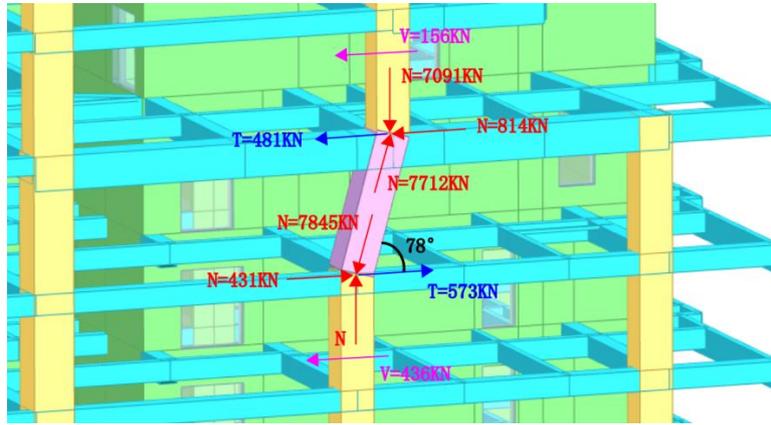


图5 斜柱节点传力分析

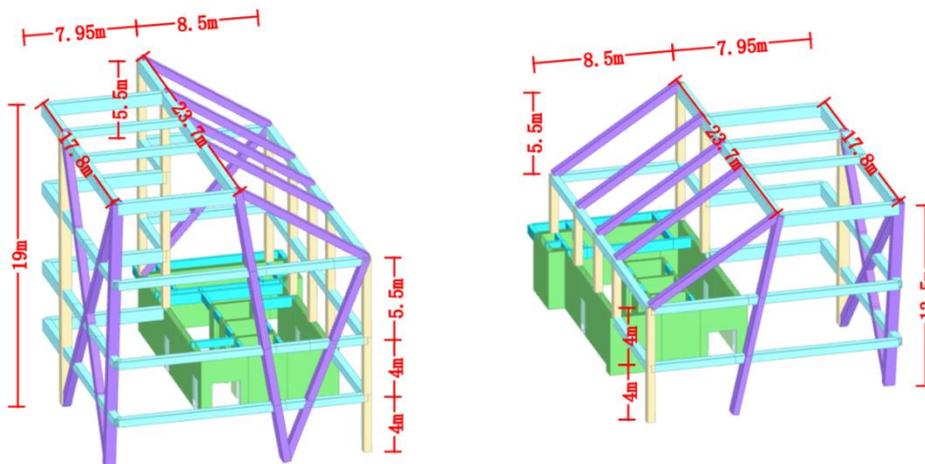


图6 屋架结构三维模型图及建筑尺寸示意

4.5 屋架结构设计

本项目 1#塔楼屋架结构分为东西两部分，西侧屋架高度为 19m，东侧屋架高度为 13.5m。平面尺寸均为 $16.45 \times 23.7\text{m}$ 。屋架结构三维模型图及建筑尺寸示意图如图 6。屋架结构为钢结构，其中钢柱及钢支撑落于屋面层墙柱上。擦窗机等设备放置于东西两个屋架内，屋架四周设置幕墙格栅板用于遮挡设备机房。最大水平位移差工况下最大位移差为 73mm，最大层间位移角为 $1/260$ ，小于钢结构限值 $1/250$ ，组合包络工况下钢构件的最大应力比为 0.8，满足规范要求^[6]。

5 结论

本研究通过系统的分析与精细化设计，确保了目标复杂高层建筑结构的安全性与抗震性能满足规范要求。为确保结构计算结果的可靠性，通过多模型校核、关键构件性能化设计及针对超限部位、特殊节点与转换区域的定量控制及专项构造措施，系统性地提升了结构的整体性能，有效保障了其在设计基准期内面对地震、风荷载等多种作用时的安全性、适用性与耐久性。针对承担主要抗侧力的关键构件（剪力墙及外框柱），严格实施小震及中震作用下的包络设计，确保其完全满足“小震弹性、中震抗剪弹性

抗弯弹性”的性能目标要求。

综上所述，本研究成功达成了预设的抗震性能目标。

[参考文献]

- [1] 建筑结构荷载规范:GB 50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 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[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015.
- [3] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].2016年版,北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- [5] 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [6] 钢结构设计标准:GB 50017-2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

作者简介:梁添,毕业院校:同济大学,所学专业:土木工程,一级注册结构工程师,当前就职单位:广西万科企业管理有限公司,职务:结构设计管理。