

文章编号: 1000 - 582X(2006)03 - 0138 - 05

# 高层结构与岩溶洞穴地基基础共同作用分析

周含川,李正良

(重庆大学 土木工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**岩溶地基是一种复杂地基,在岩溶地基上建设高层建筑需要较准确的分析以提供设计依据。高层建筑与地基基础共同作用的分析方法能比较准确反应结构及地基的受力,而有限元法能有效地进行共同作用分析。为此,利用大型有限元软件 ANSYS对岩溶地区的高层建筑进行共同作用分析,并与不考虑共同作用的常规分析方法进行对比,并探讨了共同作用对上部结构、地基及基础的影响。研究结果表明:对于岩溶地基而言,共同作用对柱产生的次应力较小,但个别角柱次应力较大;剪力墙的次应力较大,而且其布置方式对共同作用有较大影响,此应力随楼层增加衰减很快;对于岩溶地基而言,筏板基础是比较适合的基础形式,在共同作用中起很大作用。

**关键词:**岩溶地基;共同作用分析;有限元;ANSYS

**中图分类号:** TU375; TU457

**文献标识码:** A

随着中国高层建筑的大量修建,高层建筑与地基基础共同作用的问题受到工程界日益关注,特别是对具有复杂地质条件地基的高层建筑进行分析时,基于上部结构与地基基础共同作用原理的分析方法尤为重要<sup>[1-2]</sup>。共同作用分析的核心是考虑在上部结构与地基基础接触部位,上部、地基、基础三者的变形协调。利用有限元方法,通过整体建模(即上部、地基、基础处于同一模型中)进行分析可以较准确地反映高层建筑与地基基础的共同作用<sup>[3-5]</sup>。

## 1 有限元模型建立

此次分析对象是贵州遵义某高层建筑,该建筑结构形式为:上部为框架核心筒结构,第 10层为转换层,转换层以下各层为商业用途,转换层以上为住宅,住宅为跃层即每隔一层有楼板大开洞;基础形式:核心筒下为筏板基础,柱下为独立基础;地基情况:地基主要为岩石,但由于地处岩溶地区,位于核心筒范围内筏板基础下方深度 4~7 m 处有一直径 3~5 m,管状不规则溶洞。

### 1.1 模型的建立及单元选取

对于上部结构模型,梁柱采用空间杆系,筒体、楼板采用壳,基础及地基采用实体单元建模。由于需同时

考虑上部结构、基础、地基,因而模型庞大,让程序自动划分网格可能导致单元数目过多,所以采用人工划分网格。由于对于上部结构、地基、基础整体建模需要保证在上部与基础交接处单元结点的严格重合,同时地基与基础交接处单元结点之间也要严格重合。另外,为了较精细地分析溶洞附近及筏板基础的受力,对该部分采用了较密的网格划分,其余部分采用较稀疏的网格划分,过渡区采用六面体单元的退化形式四面体单元划分。由于上部结构为梁单元或壳单元,每各单元有六自由度,而地基、基础为实体单元,每个结点只有 3个自由度,没有相应的扭转自由度,要实现地基基础与上部结构的刚性连接,在上部与基础相交接的每个点处设置了约束方程。即将梁单元的转角按相邻结点位移差除以相邻结点间距离得到。由于地基中的溶洞形状及位置与上部结构均不对称,无法进行对称简化。溶洞几何形状根据地质勘查资料同时参考网格尺寸大小确定。最终的模型较大,共 11万个单元,模型详见图 1以及图 2,核心筒部分的定位关系及尺寸见图 3。由于需做对比分析,还建立了上部与地基基础分离的模型,即不考虑共同作用的分析模型。

\* 收稿日期: 2005 - 11 - 10

作者简介:周含川(1977-),男,云南昭通人,重庆大学硕士研究生,主要从事结构工程的研究。

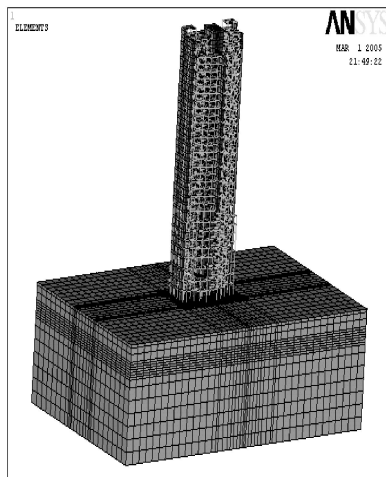


图 1 共同作用有限元整体模型

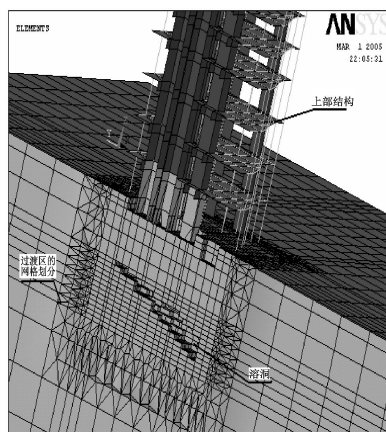


图 2 共同作用有限元整体模型局部

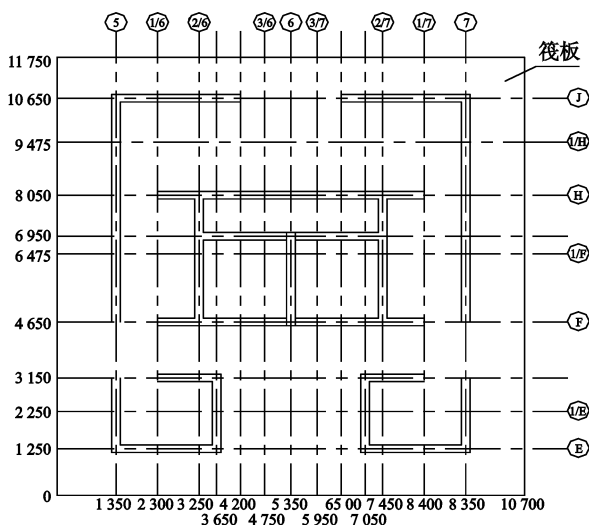


图 3 剪力墙定位图

上部结构中梁与柱均采用梁单元,其中梁采用 Beam4,柱采用 Beam44 单元,筒体及板采用壳单元 Shell181;基础为钢筋混凝土板,采用实体单元 Solid65,钢筋为整体式模型;地基主要为石灰岩,采用实体单元 Solid45.

## 1.2 基本假定及参数修正

由于要对整个结构统一建模,模型复杂而且尺度也较大.对于钢筋混凝土梁、柱、板的模拟时采取钢筋分离模型的方式是不现实也是没有必要的.采取整体模型,即从刚度等效的原则上去考虑钢筋混凝土中钢筋的作用.

对于框架梁,采用 Beam4 单元,梁的惯性矩由程序经过输入的截面尺寸自动导算,但是考虑到配筋的情况以及梁在使用阶段的带裂缝工作,对梁弹性模量  $E$  进行了修正,这样即使梁的抗弯刚度同实际情况相符又节省了输入工作量.(配筋梁的等效刚度以及开裂刚度公式按照文献 [6] 中公式计算);对于框架柱,由于柱沿 2 个主轴 2 个方向都需要计算惯性矩,故采用直接输入截面实常数的 Beam44 单元.惯性矩计算与梁类似;剪力墙通过修正弹性模量整体等效考虑钢筋作用;楼板由于住宅跃层存在大开口,没有采用平面内无穷刚性的假定.

边界条件的确定:理想情况下,地基是半无限体,但根据圣维南原理,实际上在长、宽、深 3 个方向各选取了大约 3 倍建筑物投影尺寸的研究范围,地基轮廓底面取固定支座,地基轮廓侧面取约束住  $x, y$  方向位移,而不约束  $z$  方向的位移,以使地基在自重应力下的沉降不受约束.这样的约束条件与实际情况相比误差不大.

岩溶地区岩体中存在大小不一的孔隙以及节理,因而对岩石参数进行了经验性折减用于岩体计算参数.

分别考虑弹性本构模型与弹塑性本构模型.弹塑性模型中筏板基础屈服准则为 William - Wamke 五参数准则,地基采用 Drucker - Prager 准则.考察了地基基础的塑性发展.

## 2 结果对比

### 2.1 共同作用对柱的影响

底层 / $\otimes$ 范围 0.85 ~ 1.10,平均值为 1.01; 2层 / $\otimes$ 范围 0.80 ~ 1.02,平均值为 1.02; 3层 / $\otimes$ 范围 0.96 ~ 1.06,平均值为 1.02; 4层 / $\otimes$ 范围 0.98 ~ 1.04,平均值为 1.02; 5层 / $\otimes$ 范围 0.99 ~ 1.03,平均值为 1.02.值得注意的是,有一角柱底层 / $\otimes$  1.76, 2层 / $\otimes$  1.3, 3层 / $\otimes$  1.2, 4层 / $\otimes$  1.1, 底层 / $\otimes$  1.1. 该柱位于建筑物角部,且柱到 9 层结束,情况较特殊(注:符号  $\otimes$  表示考虑共同作用的计算结果;符号  $\odot$  表示不考虑共同作用的计算结果).

2.2 共同作用对剪力墙的影响

共同作用对剪力墙的影响见表 1.

表 1 底层剪力墙单元应力强度对比

1轴 /⊙	11轴 /⊙	5轴 /⊙	7轴 /⊙	J轴 /⊙	2/G轴 /⊙	1/F轴 /⊙	E轴 /⊙
1.199	1.198	1.213	1.229	1.384	1.028	0.977	0.875
1.535	1.534	0.875	0.864	1.294	1.077	0.933	1.047
1.148	1.154	0.955	0.942	1.240	1.102	1.012	1.089
1.202	1.243	1.022	1.006	1.325	1.149	0.996	1.088
1.430	1.437	1.119	1.110	1.308	1.014	0.889	1.286
1.644	1.662	1.132	1.121	1.207	0.931	0.878	1.469
1.167	1.174	0.970	0.982	1.291	1.058	0.978	
0.924	0.942			1.428	1.085	0.990	
					1.063		
					1.017		

从表 1 可以看出:

1轴与 11轴, 5轴与 7轴处于对称位置, 从上面表格中也可以看出对称性, 然而地基中的溶洞形状不规则, 所在位置也与建筑对称轴有偏移 (见图 1、图 2). 这说明了地基刚度比较大, 虽然有溶洞存在, 但对上部结构影响不是很大.

本例中溶洞的走向是倾斜的, J轴线处溶洞顶板最薄, 大约 4 m, E轴处较厚, 大约 6.5 m. 从横向各轴线的 /⊙可以看出, 溶洞顶板较薄处共同作用更明显, 随着溶洞顶板的深度增加而变小.

/⊙范围 0.92~1.66, 均值为 1.20, 这说明了总的说来, 共同作用对剪力墙的影响较大. 设计时应根据共同作用分析结果对常规设计进行调整.

同时, 还分析了 2~5层剪力墙中的共同作用, 2层 /⊙范围 0.95~1.25, 平均值为 1.02; 3层 /⊙范围 0.95~1.05, 平均值为 0.99; 4层 /⊙范围 0.96~1.03, 平均值为 0.99; 5层 /⊙范围 0.94~1.01, 平均值为 0.988. 从上面数据可以看出共同作用在随层数增加衰减很快, 而且到除了底层均值明显大于 1, 随着层数增加, 均值变小, 且变得小于 1.

2.3 共同作用对筏板基础的影响

考虑共同作用时筏板基础单元中应力对比见图 4-8.

图 4-8

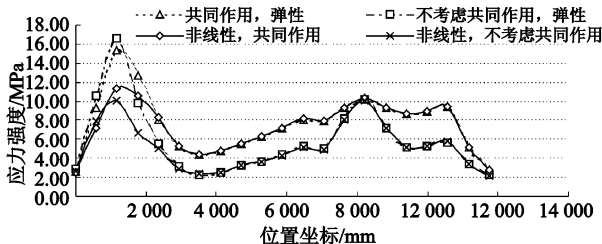


图 4 5轴线筏板单元部应力强度

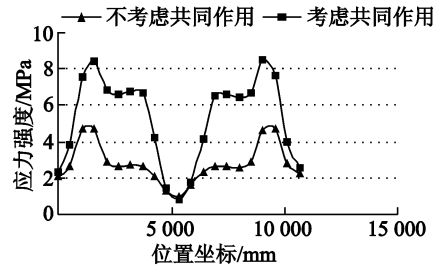


图 5 J轴线处筏板单元应力强度图

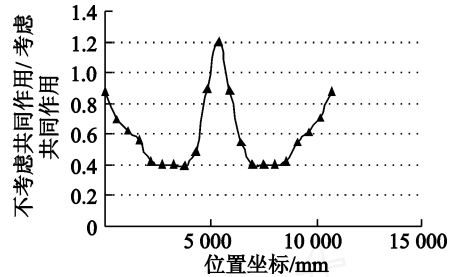


图 6 J轴线处筏板单元应力强度对比图

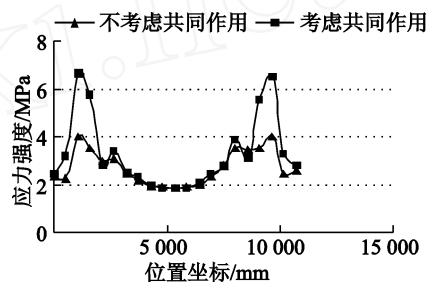


图 7 1/H轴线处筏板单元应力强度

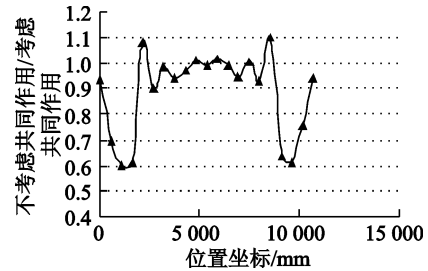


图 8 1/H轴线处筏板单元应力强度对比图

从位置坐标大概 3000~11000处可看到, 考虑共同作用的筏板应力比无共同作用时明显大, 比值从 1.0~1.9. 这是由于 5轴线处的上部剪力墙刚度大, 筏板可视为上部结构的一部分, 通过自身刚度贡献调整地基的受力、变形, 从而引起筏板的应力增大. 前面分析中从柱、剪力墙的应力对比也可看出类似情况<sup>[6-7]</sup>, 只不过共同作用对筏板的受力影响最明显.

位置坐标 1200附近可以看到, 弹性结果大于非线性结果, 该处在平面位置上处于筒体角部. 这是由于该处局部进入屈服, 应力进行了调整. 分析结果表明其余地方很少出现塑性区.

J轴上剪力墙不连续, 在位置坐标上 5000 mm左右有长度为 2300 mm 的范围内没有剪力墙, 从上面应

力图中可以明显的看到共同作用对剪力墙应力强度影响很大,而且对应于没有剪力墙的部位共同作用很小,这说明了剪力墙的分布对共同作用有很大影响。

应力对比图上可明显看到端部有两波谷,这是由于受到相交的横向剪力墙的影响。又由于该轴不在剪力墙下,从对比图上可以看到,曲线是围绕 1 而波动的,这从另外一个侧面反映了剪力墙刚度的影响。

#### 2.4 共同作用对溶洞顶部及底部的影响

溶洞顶部应力强度 1.2~2.8 MPa,而且并无应力集中现象;溶洞底部应力强度 0.4~2.0 MPa,也无应力集中现象。溶洞顶部及底部都有较明显的卸载现象。

#### 2.5 共同作用对沉降的影响

考虑共同作用时筏板基础沉降对比见图 9-10。

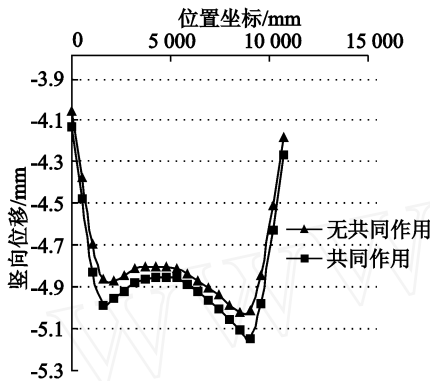


图 9 1/H 轴线处竖向位移

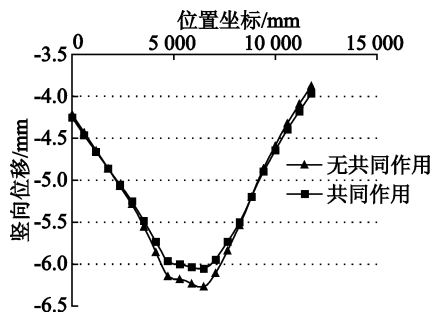


图 10 6 轴线处竖向位移

本例分析中,筏板的沉降比较小,3.6~6.3 mm,6 轴线中部有剪力墙,可以看出有剪力墙的地方共同作用明显,同样 1/H 轴线位移图上两波谷分别对应 5 轴及 7 轴剪力墙。

同时采用不同岩体参数对沉降进行计算,除了沉降量绝对值上的改变,规律是基本不变的。

### 3 结论

由以上分析可知:

1) 溶洞顶板应力较小,应力强度为 1.2~2.8 MPa,且无应力集中及突变现象;溶洞顶板沉降较

小,最大沉降 6.3 mm;溶洞虽然在形状及位置不对称,但不论是筏板应力还是沉降图均比较对称,说明稳定性好,无倾覆危险;岩溶地基具有化学不稳定性,但是在建筑物设计期限(50 a)内是稳定的;综上所述,该建筑并无由于岩溶导致的安全性问题。

2) 对比弹性及弹塑性结果。除了在核心筒角部局部筏板下地基单元以及柱下地基单元局部出现发展较小的塑性区域,其余呈现弹性。结果表明该例主要表现为弹性。

3) 分析共同作用时上部结构次应力规律;地基的次应力规律;地基变形对比,结论如下:

a 对于岩溶地基中的高层建筑,共同作用对柱的影响总体来说影响较小。柱中应力比  $\gamma \in 0.85 \sim 1.10$ ,局部角柱达 1.7。柱中应力的随层数增加的差异衰减较快,对本例,4 层以上就可以不考虑共同作用对柱的影响,设计中也只需考虑调整底部几层的柱配筋。同时需注意对局部角柱进行较大调整。

b 对于岩溶地基中的高层建筑,共同作用对剪力墙的影响较大,剪力墙中应力强度比  $\gamma \in 0.96 \sim 1.66$ 。共同作用对剪力墙结构影响随层数增加的差异衰减很快,底部比值大多大于 1,随着层数增加,比值很多处出现小于 1 的情况。这是由于剪力墙作为一个深受弯构件表现出的特性,与柱中规律不同。剪力墙共同作用产生的次应力主要体现于下部几层,设计时应着重调整底部几层的剪力墙及柱配筋。

c 筒体以其强度的刚度在共同作用中发挥主导作用,从本分析的结果图上大多可以看出地基、基础中应力、变形、共同作用效应与剪力墙布置的对应关系。筒体结构的布置形式直接影响了地基及其基础的应力状态,在可能的情况下设计时应主动根据地基中的溶洞位置调整筒体布置方式。

d 筏板基础形式较适合岩溶地区,筏板不但本身能调整上部结构不均匀荷载,也能调整地基中不均匀岩质对上部的影响。而且,筏板与筒体一起组成空间刚度很大的整体,筏板的存在弥补了由于筒体开洞及布置方式导致的刚度下降。筏板在共同作用中发挥了重要作用,所以筏板在共同作用中次应力大,本分析中考虑共同作用的等效应力与不考虑共同作用时的比值最大为 2.5 倍。设计中应根据共同作用分析结果,在常规设计的分析结果上增加筏板基础的厚度并加强配筋。

e 此次研究中,溶洞的形状不规则,位置不对称

(见图 2). 但从上部结构及筏板的次应力结果看, 对称性还是比较明显. 这说明了如果溶洞埋藏不是很浅 (本例中洞顶至顶板 4 ~ 7 m), 岩体不是很破碎时, 岩体的应力扩散及传递能力还是较好的. 这说明只要结合适当的分析、设计、施工措施, 岩溶地区的高层建筑是可行的.

f 对比不同岩体参数时沉降分析表明, 除了沉降量绝对值上的改变, 规律是基本不变的, 说明了地基参数对本例不敏感.

#### 参考文献:

[1] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑地基基础 [M]. 上海: 同济大学

出版社, 1996

[2] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.

[3] 阴可, 张永兴, 丁志诚. 高层建筑岩石洞室地基稳定性分析 [J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(1): 18 - 20.

[4] 陈希昌. 高层建筑上部结构与基础及地基共同作用问题研究 [D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1997.

[5] 袁聚云, 赵锡宏, 董建国. 高层空间剪力墙结构与地基 (弹塑性模型) 共同作用的研究 [J]. 建筑结构学报, 1994, 15(2): 60 - 69.

[6] 过镇海. 钢筋混凝土原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[7] 武建勋, 任胜谦. 多高层建筑的共同作用中的差异衰减 [J]. 工程力学, 2001, (增): 417 - 421.

## Analysis on Superstruct-foundation-soil Interaction on Karst Region

ZHOU Han-chuan, LI Zheng-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Karst region is a kind of complicated groundsill. To design tall-buildings built on karst subgrade, precise analyse result is needed. The method based on superstruct-foundation-soil interaction theory can precisely calculate the intemal force of structural, foundation and groundsill. The method of finite element is an effective way to solve the problem. Finite element analysis software ANSYS is used to analyze superstruct-foundation-soil interaction on Karst Subgrade. Through comparing methods based on superstruct-foundation-soil interaction with traditional analysis method (in this condition, superstruct-foundation-soil interaction is not taken into account), the interactional effect to structure, foundation and rock are discussed. Through the analysis, several conclusion can be drawn as follows: The side stress of column is small for buildings on Karst region, but the side stress of comer columns is much larger than the others. The side stress of shear wall is great and the location of shear wall is significant for the interaction. Slab foundation is effective for Karst region, it plays a great role on interaction.

**Key words:** karst region; superstruct-foundation-soil interaction analysis; finite element analysis; ANSYS

(编辑 姚 飞)