

浅埋地下洞室上修建高层住宅 的地基处理技术

郑颖人 赵燕明 刘东升

(后勤工程学院 重庆 630041)

摘要 介绍自贡市在具有浅埋地下洞室的山坡上修建 10 层高楼的地基处理方法。地下洞室净跨 8 m, 洞顶上作为地基的覆盖层岩质条件较差, 灰岩与泥岩相间, 厚度仅为 2~5 m, 覆跨比 0.25~0.62。通过工程地质方法的分析及上部结构与岩石地基共同作用的数值计算, 确定将覆盖层厚度用混凝土填高到 6 m, 使覆跨比增至 0.75, 并在岩石与地下洞室衬砌之间进行灌浆处理。楼房修建过程中及修建完成后, 一直在进行地基沉降量测, 实测数据与计算吻合, 确保了工程安全。

关键词 地基处理, 开洞地基, 覆跨比

1 引言

随着我国城市建设的发展, 在建好的浅埋地下铁道、地下建筑上面建筑高层建筑的问题变得十分突出。依照以往的做法, 为确保上部建筑与地下工程的安全, 在原有的地下工程上面再建一个规模较大的跨越结构, 以承受上部建筑的荷载, 保护已建的地下工程。然而这样的做法并不是经济合理的, 因为它没有充分利用原有地下结构和其上岩层的承载能力, 且工程费用高, 施工时间长。因此, 我们提出一种充分利用原有地下结构及其上覆岩层自承力的新的设计思想, 并提出相应的设计方法, 以确保设计安全和经济合理。并在四川省自贡市兴建的一项试验工程中取得了成功。

2 工程概况

自贡市龙凤花园 4 号住宅, 系商品住宅开发片区中的一幢, 建筑面积约 3 000 m²。地处釜溪河北岸, 南邻解放立交桥, 西接龙凤公园, 位于龙凤山隧道南端的浅埋段顶面。上部结构为 10 层薄壁异型框架, 独立钢筋混凝土岩石锚杆基础。地下洞室毛跨 10.5 m, 净跨 8 m, 高 6 m, 衬砌结构为 0.5~0.8 m 厚的 C20 混凝土。地层为侏罗系中下统自流井大安寨段, 倾向东南 145°~155°, 倾角 50°左右。岩性为石灰岩、泥质灰岩、泥岩、钙质泥岩、砂岩等多种软硬不同的岩层组成, 并且有较发育的节理裂隙等不利条件。隧道顶部岩层厚度, 剥除基岩强风化层后约 4~7 m, 局部地段小于 4 m。图 1 和图 2 示出了结构的柱网布置及地质剖面。

1996年1月16日收到初稿。

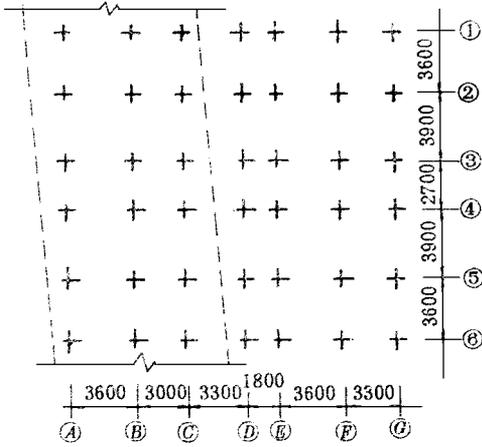


图 1 柱网布置

Fig 1 Pillar distribution

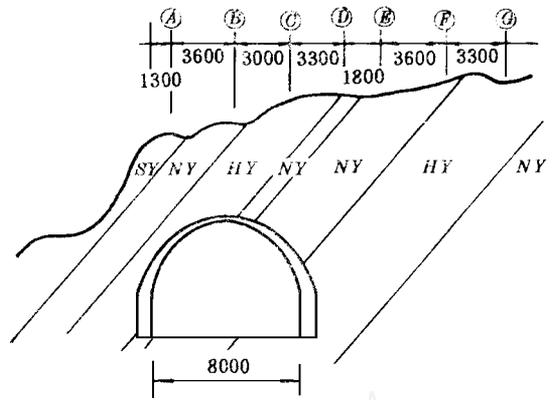


图 2 地质剖面

Fig 2 Geological section

根据地层实际构成情况，勘察部门确定，洞顶岩层不能作为地基持力层。原设计单位为此提出了挖孔桩与水平大梁和钢筋混凝土与岩层复合拱等两个跨越式地基处理方案，其预算造价分别为 46 万元和 43 万元，且施工难度较大，工期较长。建设方遂向重庆地基基础专委会咨询，我们被委托对基础及地基处理部分进行重新设计。

3 地基处理方案

根据地质条件分析，洞顶岩层虽系多岩性互层岩体，但以灰岩为主，岩层倾角也较为有利，区域内没有大的断层、滑坡等不良地现象，岩体是稳定的。据调查，洞顶上方岩石回填不密实，地下支护结构基本不受力。因而我们认为地下结构与上覆岩层还有一定承载余力可以利用。问题是洞顶上方某些部位的有效岩层厚度太薄，在上部建筑荷载作用下可能导致岩层失稳和地下结构破坏；同时由于地基不均匀沉降导致上部框架结构失稳。根据以上分析，我们的设计思想是：加强洞周岩体与支护结构的紧密接触，以发挥支护结构的承载作用；增大洞顶岩层厚度到某一合适的数值，达到既不危及上部建筑与地下结构的安全，又充分利用岩层与地下结构的承载能力的目的。为达到上述目的，一是对洞室衬砌后的空隙区注浆，以确保衬砌和围岩紧密接触；二是通过工程地质类比方法与理论计算方法确定上覆岩层的合理厚度，当实际岩层厚度不足时加填混凝土达到此厚度。

4 上覆岩层合理厚度的确定

4.1 工程地质类比法

多年来，国内对上覆岩层最小安全埋深积累有经验数据。表 1 为国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GBJ86- 85) 列出的围岩分级 III、IV、V 类浅埋洞室采用锚喷支护的覆

跨比条件, 表 2 为铁道部隧道局根据围岩塌落统计提出的判别深浅埋隧道的覆跨比标准。

表 1 浅埋洞室采用锚喷支护条件

Table 1 Thickness-span ratio standard on shallow tunnel

围岩类别(按国标划分)	覆跨比	毛洞跨度	水文地质条件
III	0.5~1	10	无地下水
IV	1~2	10	无地下水
V	2~3	5	无地下水

表 2 判别深浅埋隧道的覆跨比标准

Table 2 Minimum of safe thickness-span ratio

铁路隧道围岩类别	IV	V	IV	III	II	I
相当国标围岩类别	I	II	III	IV	V	VI
覆跨比标准	0.15~0.3	0.3~0.5	0.5~1	1.5~2.5	2.5~3.5	4~6

我们对重庆已建人防工程进行了统计, 当 VI 类围岩覆跨比在 0.41~0.75 时, 结构是安全的。所以, 我们在《重庆市轨道交通朝沙线工程的结构型式与合理埋深专题研究》报告中, 提出 II、III、IV 类围岩的最小安全覆跨比标准分别为 0.3~0.5, 0.5~1, 1~2。

本工程洞室上覆岩层为多岩性互层体, 但以灰岩为主, 各种岩性硬、软相差悬殊, 砂岩、灰岩质地较硬, 而泥灰岩、泥岩质地很软, 尤其是泥岩(拱顶处存在 1 条宽 1~1.5 m 的泥岩带)。岩层受到不同程度风化, 层面较发育, 但倾角较有利, 不存在严重不良工程地质现象。因而, 我们判断洞室围岩属中等稳定的 III 类围岩(国家《锚杆喷射混凝土支护技术规范》)。因此, 我们选择了合理覆跨比为 0.75, 由此初步确定合理深度为 6 m。应当说明, 通常所指的围岩自稳条件与这里研究的情况有所不同, 即岩层上面没有太大的荷载, 而地下衬砌不参加承载。所以在地下衬砌不参加承载, 而岩层上面有较大荷载作用下确定上覆岩层合理深度, 需要通过理论计算确定。

4.2 理论计算

理论计算采用了两种算法与程序。

(1) 根据上部建筑产生的荷载, 计算地基的受力与位移, 以明确地下结构与上覆岩层能否承载, 地表的不均匀沉降是否过大, 导致上部结构失稳。

根据该建筑地质勘察报告, 地基岩石的力学参数按表 3 选用。上部建筑的荷载按均布形式作用于基底表面, 其集度为 200 kN/m^3 。开洞地基按平面应变模型计算, 采用有限元平面非线性分析程序进行计算, 考虑岩石的弹塑性及低抗拉特性。

计算主要考查不同覆跨比条件下, 开洞地基结构体系的稳定性态(包括强度与变形两方面)。主要比较拱顶地表下沉、塑性区大小与位置及拱顶拉裂区。计算结果见表 4。

表 3 地基岩石力学参数

Table 3 Mechanical parameters of rock

介质	代号	E / MPa	μ	c / MPa	$\Phi / ^\circ$	R_t / MPa	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$
泥岩	NY	300	0.3	0.01	30	0.3	6
砂岩	SY	1 200	0.25	2.5	44	1.0	24
衬砌回填层		1 000	0.3	1.0	30	0.3	24
灰岩	HY	1 200	0.25	1.5	43	0.6	25
钙质泥岩	NY	310	0.28	0.11	33	0.4	26
C20 混凝土	C	25 500	0.2	1.35	35	3.0	24

(表中参数取地质报告范围中的低值)

表 4 最小安全覆跨比标准

Table 4 Calculating results by FEM

覆跨比	拱顶地表 下沉/m	拱顶下 沉/mm	塑性区 单元数	支护结构受 拉区单元数	拉裂区 单元数	地表沉降最 大局部倾斜	相邻柱最大 沉降差/mm
0.375	5.01	4.25	2	3	0	0.40%	1.03
0.5	3.87	3.56	2	2	0	0.34%	0.87
0.625	3.93	3.30	1	2	0	0.33%	0.85
0.75	3.99	3.06	0	10	0	0.32%	0.84

(覆跨比为 0.375 时, 系纯岩石覆盖层; 覆跨比大于 0.375 时, 拱顶 3 m 以上为混凝土填平区)

超浅埋地下洞室顶板岩体作为建筑物地基在上部建筑荷载作用下是否处于稳定状态, 主要有两方面的控制标准: 一是开洞地基的强度条件, 主要看是否有连通的塑性区存在及拱顶是否有拉裂区出现或严格控制两者的出现; 二是受开洞影响时, 地基表面是否出现较大的不均匀沉降(对上部框架结构按沉降差控制, 对上部砌体结构按局部倾斜控制)。本工程因未做详细钻探, 原有地下工程也没有详细设计及施工资料, 不定因素较多, 且国内外未见类似的处理方法报道。为安全起见, 洞室围岩严格控制塑性区及拉裂区的出现。变形条件按国家《地基础设计规范》有关沉降差的限制标准控制。结果表明, 当洞室覆跨比取 0.75 时, 两方面条件均满足。因此, 我们所提出的地基处理方案是有理论依据的。此外, 由变形计算结果还可以看出, 由于混凝土材料的弹模相对较高, 混凝土填平层的出现使得地表下沉和拱顶下沉均有较大的降低。随着填平层的增厚, 拱顶地表下沉并不随着减少, 而是反而有所增大, 但拱顶下沉和不均匀沉降却随之降低。这表明, 增厚垫层前, 顶板岩体中的拱效应已经出现, 增大填平层厚度使这种拱效应变得更加突出了。这从衬砌结构拱部的受拉区减小也可得到反映。

(2) 根据上部框架结构与开洞地基的共同作用, 算得地基表面的不均匀沉降, 以验证上部结构是否安全。

开洞地基上框架结构的内力和位移不仅与上部结构所受荷载大小以及上部结构的刚度有关, 而且与地基的整体刚度有关。在对上部结构进行位移和内力分析时, 不应将上部结构与地基分开来进行考虑。这是因为洞室的存在对地基的整体刚度有较大的削弱, 从而对上部结构的位移和内力也产生相应的影响。在这种情况下, 应视结构、地基、洞室为一整体, 考虑三者之间的相互作用和共同工作。为此, 利用杆系结构有限元分析上部框架结构, 利用边界元法分析开洞地基, 在结构与地基交界面上引入位移和力的协调条件联接上部结构和下部地基, 从而对整个结构系统进行分析求解。基于这一共同工作原理, 本文作者研制了相应的计算程序 FEBEM, 并用以求解该项工程问题。

共同工作计算简图如图 3 所示, 上部结构的材料性质及梁柱尺寸按设计要求确定, 楼面荷载取 $20\text{kN}/\text{m}^2$, 对地基岩体通过加权平均求其等效弹模。加固前为 $1\ 250\ \text{MPa}$, 加固后为 $4\ 500\ \text{MPa}$ 。现利用上部结构与地基共同工作的 FEBEM 程序分别就地基加固前和加固后的情况进行计算, 并用平面框架 FRAME 程序就刚性支座的情况进行计算, 部分计算结果列于表 5~ 7 中。

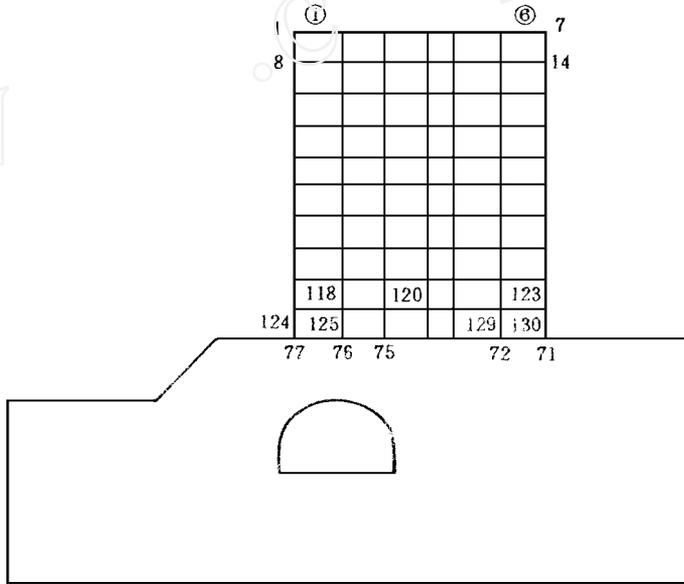


图 3 共同工作计算简图

ig 3 Diagram for interaction between superstructure and substructure

地基加固前上部结构支座沉降如表 5 所示。由于地下洞室的存在, 降低了地基的局部刚度, 从而使离洞室较近的支座 (75, 76 号节点) 沉降最大。边柱下支座的沉降相对较小, 这是因为边柱轴力相对较小, 且受洞室刚度削弱的的影响也较小的缘故。加固后, 地基的整体刚度得到增强, 上部结构支座的整体沉降也大为减小, 但最大沉降发生的位置仍在离洞较近的 75, 76 号节点处, 这仍与该两点上柱子轴力较大、离洞室位置较近有关。

地基刚度大小对上部结构内力的影响主要反映在结构下部几层内力的影响上, 所以对底层内力的影响最为突出。这是由于地基刚度变化所产生的上部结构基础沉降差主要是由结构下部几层的刚度来平衡, 因而使这几层结构的内力有较大的变化。对上部几层, 这种

影响十分微小可以不予考虑。

加固后结构底层柱轴力的变化总体上呈中柱轴力增加，边柱轴力减小的趋势，这是因为地基刚度的增加减小了支座沉降的盆形趋势。从表 5~ 表 7 的计算结果可以看出，随着地基刚度的增加，地基整体沉降和沉降差减小，从而使得上部结构的位移和内力都向刚性支座情况下上部结构的位移和内力靠近。这种现象一方面反映了计算结果的正确性，另一方面也说明了传统的刚性支座假设只能在地基刚度较大时才能适用。对软弱地基或开洞地基，刚性支座的计算结果会产生较大的误差，上部结构位移和内力大小均与刚性支座计算结果很接近，从而可认为原上部结构基于刚性支座模型所进行的设计是安全的。

按以上分析，当有效深度在 6 m 以上时，桩基直接置于中风化岩层上，有效深度不足 6 m 时，清除表土层和强风化岩层后用混凝土填平至 6 m，桩基置于混凝土表面上。

表 5 基础沉降量

Table 5 Ground settlement cm

节点号	71	72	73	74	75	76	77
加固前	0.55	0.82	1.04	1.15	1.33	1.32	1.00
加固后	0.15	0.23	0.29	0.32	0.37	0.37	0.28
刚性支座	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 6 底层柱轴力变化

Table 6 Axial force of first floor columns kN

	124	125	126	127	128	129	130
加固前	176.58	209.52	184.97	201.13	219.53	147.93	203.86
加固后	163.18	219.04	189.12	197.91	222.65	140.70	210.91
刚性支座	157.60	223.11	190.78	196.49	224.02	147.93	213.79

表 7 底层梁弯矩变化

Table 7 Bending moment of first floor beams kN · m

	116		119		120		121		122		123	
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
加固前	15.31	-1.04	5.94	-4.66	5.06	-7.07	0.51	-5.74	5.69	-8.89	2.47	-11.43
加固后	10.61	-4.06	5.67	-5.38	5.99	-6.29	2.28	-3.93	6.74	-7.88	4.75	-8.62
刚性支座	8.70	-6.41	5.58	-5.67	6.30	-5.79	3.00	-3.19	7.14	-7.49	5.67	5.67

5 地基的设计与施工

5.1 压力注浆

在整个房基范围内，对洞室衬砌后的空隙区实施压力注浆。共设计 99 个注浆孔，施工

中缩减为 79 孔, 注浆间距在 1.5~3 m 之间。先在 和 轴线以外做注浆帷幕, 待其初凝后再实施由两端向中间推进的顺序注浆, 终止压力为 0.2 MPa。采用从地表到衬砌空隙区钻孔注浆, 既要求衬砌后回填层砂浆密实, 并达到浆砌片石的力学指标; 又要求改善层面与结构面的粘结状况, 提高岩层的整体性。注浆效果采用全范围声波测试及局部取芯试验。检测表明, 注浆效果良好, 回填区片石已被高标号水泥砂浆致密胶结, 岩层整体性提高。

5.2 混凝土填平处理

按前述混凝土填平处理原则, 填平范围为 A-D 轴线与 - 轴线之间。混凝土填平设计厚度为 1~2 m, 个别地段超过 2 m。施工时彻底清除表土层和强风化层, 软弱岩层部位可局部加深清除, 不强求场地平整, 但必须保证混凝土设计厚度。为加强混凝土垫层的整体性和下面岩层软硬不一而引起的不均匀沉降的能力, 在混凝土垫层底部一定标高处设置一道 $\Phi 20@300 \times \Phi 16@1000$ 的构造钢筋网, 其中 , , 轴线下 1800 范围内横向钢筋加密为 $\Phi 20@190$ 。此外, 为防止混凝土的温度伸缩, 在混凝土层的顶部和中部设置两层构造钢筋网。

5.3 基础结构与地基的连接

基础结构形式为柱下独立钢筋混凝土基础。从混凝土垫层顶部做起, 底板尺寸为 1800×1800 , 上部以 800×800 短柱伸至地坪标高, 并以拉梁纵横拉结; 下部以 8 根 $\Phi 22$ 锚杆锚入混凝土垫层以下 2 m 深的基岩中(中柱基础下锚杆为 4 根), 它还起到防止混凝土垫层与基岩的滑移作用。混凝土垫层顶面至拉梁顶间为架空, 以减小作用在地基上的荷载。

5.4 边坡处理

由于地形条件, 基岩 A 轴线外侧需设边坡挡墙, 挡墙采用板肋式钢筋混凝土锚杆挡墙结构, 以维护边坡稳定。挡墙结构板厚为 200, 肋宽 1800, 肋厚因位置不同而变化, 并分别以两排共 8 根 $\Phi 28$ 锚杆与基岩拉结。

6 现场监控量测

为确保工程安全, 决定在施工期及使用期前 3 年内对该房进行定期检查和地表沉降量测。施工期中和施工结束以后, 对工程地基、结构及边坡进行了全面检查, 未发现有裂缝及任何位移沉降等异常现象。

地表沉降测点布置见图 4。每修建两层后量测一次。施工结束以后, 测到的最终位移为 1~3 mm。最大沉降在地下洞室上方地表面测点 Z4-4。量测结果与计算结果基本吻合, 表明工程是安全的, 设计是成功的。

7 结语

本工程对开洞地基的处理改变了以往采用跨越结构的传统做法, 体现了充分利用地下

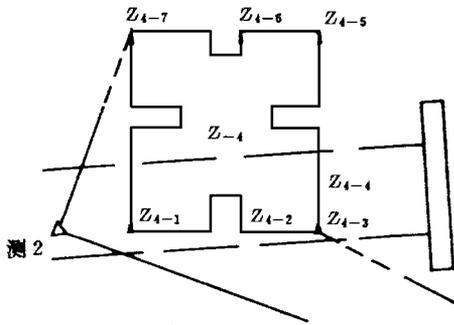


图 4 沉降观测点布置

Fig 4 Distribution of observation points

结构本身及洞顶岩层自承能力的新构想, 缩短了工期。本工程设计方法先进、实用, 既有开创性, 又有科学依据。一方面基于已建工程实践, 采用工程类比法, 提出了维护岩体自稳的新的经验数据; 另一方面, 应用最新的力学手段, 采用了上部结构与开洞地基共同作用的数值分析方法, 终于使这项探索性的工程尝试获得了成功。

参 考 文 献

- 1 后勤工程学院科研报告《重庆轻轨交通朝一沙线工程的结构形式与合理埋深专题研究》1993
- 2 郑颖人等 地下工程锚喷支护设计指南 北京: 铁道工业出版社, 1988
- 3 赵燕明 上部结构—带形基础—开洞地基相互作用问题的简化计算 后勤工程学院学报, 1993, (2): 64- 73
- 4 Liu Dongsheng & Zheng Yingren Analysis of interaction between frame structure and soil with cavern by coupling FEM and BEM. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. 1994, 381- 386

TREATMENT ON SUBGRADE UNDER TEN-STORY BUILDING WITH SHALLOW UNDERGROUND OPENING

Zheng Yingren Zhao Yanming Liu Dongsheng
(Logistics Engineering College of P. L. A. , Chongqing 630041)

Abstract The practice on disposing to the subgrade under ten-story building with shallow underground opening is introduced. The net span of the opening is 8 m. The covered rock mass over the opening is not good in quality, and its thickness is only 2~ 5 m. The thickness-span ratio of overburden is 0.25~ 0.62. In the light of the analysis by engineering geology method and numerical calculation on the interaction between the superstructure and rock ground, the improvement for subgrade is made as follows:

- (1) make up the overburden thickness to 6 m with concrete and raise the thickness-span ratio up to 0.75;
- (2) grout within the rock mass around the opening

In and after the course of the building construction, the ground settlement has been measured, and the measured data are consistent with calculation values, which ensures the safety of the engineering.

Key words ground treatment, ground with opening, thickness-span ratio