

文章编号: 1000-1964(2004)03-0268-05

广州地铁双线交汇段放坡支护方案优化研究

杨晓杰¹, 邓飞皇¹, 曹伍富¹, 刘玉香¹, 郭志明²

(1 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2 中铁十六局集团有限公司 广州地铁项目部, 广东 广州 510620)

摘要: 运用 FLAC^{3D} 程序, 对广州地铁体育西路站双线交汇处暗挖段放坡支护引起的稳定性问题进行模拟计算, 采用多方案对比淘汰逐步优化的方法进行最佳放坡支护方案选择, 并对按最佳放坡支护方案施工引起的力学行为特性进行了分析研究。研究表明, 土层注浆、管棚超前支护和喷锚对交汇段岩土体和一号线车站结构的稳定性起了十分积极的作用。

关键词: 地铁双线交汇; 数值模拟; 边坡支护; 喷锚; 管棚; 注浆

中图分类号: U 231⁺. 3 **文献标识码:** A

Optimum Design of Slope Support in Interjunction Section of Subway Station in Guangzhou

YANG Xiao-jie¹, DENG Fei-huang¹, CAO Wu-fu¹, LIU Yu-xiang¹, GUO Zhim-ing²

(1. School of Mechanics, Architecture and Civil Engineering, CUMT, Beijing 100083, China;

2. GZ Subway Project Sect., China Railway 16 Bureau Co. Ltd, Guangzhou, Guangdong 510620, China)

Abstract: With the numerical code FLAC^{3D}, some numerical simulations of the stability of rock mass and structure are made for a slope in the interjunction between No. 1 line and No. 3 line of Guangzhou subway. Using the comparison method the optimum scheme for support parameters was selected from 4 schemes. The mechanical behaviors caused by slope cutting and support fixing are studied at last. It is shown that the grouting, pipe edge pole advance tunnel support and shotcrete-bolt have taken great positive effect for the stability of rock mass and structure.

Key words: interjunction of two cross subway lines; numerical simulation; slope support; shotcrete-bolt; pipe edge pole; grouting

随着城市交通的发展和地铁线路的增多, 不可避免地会出现越来越多的地铁双线交汇穿越和可相互换乘的地铁车站, 如北京的复兴门和建国门地铁站、上海的人民公园站等^[1-2]。在早期的地铁车站建设中, 主要涉及单线路车站的建设。目前, 对单线路车站的研究已较多, 而地铁双线交汇车站的影响研究很少。当地铁双线交叉垂直穿越并要在交汇处建成可相互换乘的地铁车站时, 不可避免地涉及到后建站对已建站的时空效应和负面影响问题^[1-3], 这些问题都是迫切需要解决的。正在建设中的广州

地铁体育西路站就是其中典型的一例。

1 工程概况

位于广州天河城旁边的广州地铁体育西路站为地铁一号线与三号线交汇站。东西走向的地铁一号线车站(已在运营中)为两层; 南北走向的三号线车站(正在建设中)为三层, 其中上部两层与一号线车站一、二层同标高并可相互换乘, 第三层需从一号线车站底部以暗挖隧道形式穿越。因此, 三号线车站基坑形成两端明挖中间暗挖的施工布局。明挖

收稿日期: 2003-06-16

作者简介: 杨晓杰(1968-), 男, 山西省万荣县人, 中国矿业大学副教授, 工学博士, 从事岩土工程力学和数值模拟方面的研究。

与暗挖交界处拟采用放坡并加支护处理, 如图 1 所示。为保证暗挖段岩土体在上部结构荷载作用下保持稳定, 并且不影响一号线车站结构的稳定与正常运营, 放坡支护方案的选择、参数的优化成为本工程关注的重点和难点。

根据国家标准^[4], 依据钻孔所揭露岩土资料, 体育西路站暗挖段各岩土层具体划分如表 1 (表中仅列出暗挖段一号线车站底板以下的土层)。

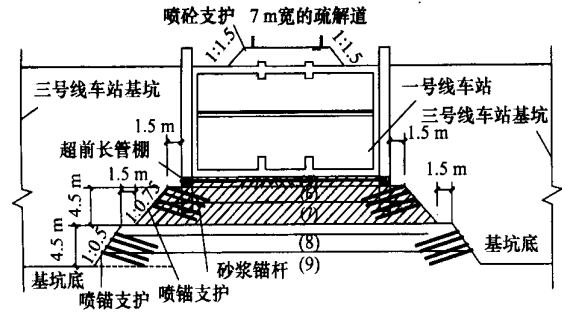


图 1 体育西路站暗挖段剖面图
Fig 1 Section plane of shallow-excavated part

表 1 暗挖段各岩土层状态划分
Table 1 The classify of strata state

层号	岩土名称	岩土特征	开挖后的状态	围岩类别	厚度/m
5-2	粉质黏土	硬塑	具有一定的自稳性	II	2.1
6	岩石全风化层	呈坚硬土状	自稳性较好	II	4.8
7	岩石强风化层	岩石呈碎块状、短柱状	自稳性好, 但易沿裂隙掉块坍塌	III	6.0
8	岩石中风化层	岩质较坚硬, 岩芯呈柱状	自稳性好, 裂隙发育处易掉块	IV	7.0
9	岩石微风化层	岩质坚硬, 岩芯呈长柱状	自稳性好	IV	16.0

2 研究思路和计算模型

FLAC^{3D}是目前世界上优秀的岩土工程数值分析程序之一, 它采用有限差分法, 按时步进行显式迭代求解, 考虑了岩土体的复杂性、可变性, 及非均质、不连续、大变形、大应变、非线性和峰后强度特性等^[5-7], 适合于求解地铁施工开挖等大变形问题。本工程为岩土工程大变形问题, 且充分考虑了支护结构(管棚、锚杆和喷网)的空间分布性, 决定选用 FLAC^{3D}程序, 对体育西路站交汇处暗挖段放坡支护引起的稳定性问题进行数值模拟研究, 采用多方案对比淘汰逐步优化的方法来选择最佳放坡支护方案, 并进一步对按选定的最佳放坡支护方案来施工引起的力学行为特征进行分析。

2.1 研究思路

从设计施工经济性、可行性和可靠性等方面来考虑, 采用从简单到复杂、循序渐进逐步优化的研

究思路, 依次分析研究了以下 4 种方案:

方案一: 一次放坡开挖, 不支护;

方案二: 采用管棚超前支护一号线车站底板, 一次放坡开挖, 对斜坡进行喷锚护坡;

方案三: 采用管棚超前支护一号线车站底板, 二次放坡开挖, 对斜坡进行喷锚护坡;

方案四: 对暗挖段岩土体进行注浆加固, 采用管棚超前支护一号线车站底板, 二次放坡开挖, 对斜坡进行喷锚护坡。

研究过程中, 后一方案是在弥补前一方案不足的基础上对放坡形式和支护方式进行改进和优化而得到的, 直至求得满足工程要求的最佳方案为止; 最后对按最佳方案施工引起的力学行为特征进行了详细分析。

2.2 计算模型

为了分析下部变形对上部结构的影响, 建模时除考虑交汇处暗挖段岩土体外, 还把一号线车站结构也包括在模型中。计算模型沿三号线基坑纵向取 80 m, 沿一号线纵向取 30 m (即为三号线基坑的宽度), 地表以下 40 m 为模型的底部边界。其中, 二次放坡时(方案三、四)模型网格划分如图 2 所示。

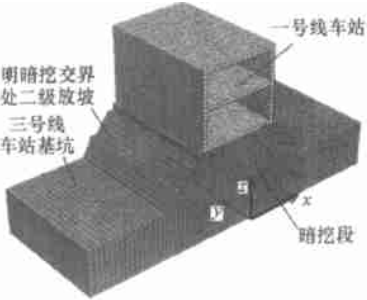


图 2 计算模型
Fig 2 Calculating model

模型分两部分来考虑边界条件: 第一部分为岩土体部分, 边界条件为: 四周边界设定为沿 y 轴取向的边固定 x 位移, 沿 x 轴取向的边固定 y 位移, 底面固定 z 位移, 上表面的基坑明挖部分为自由边界; 第二部分为一号线车站结构部分, 边界条件为: 沿线路纵向两端固定 xyz (考虑此段结构要与两端的延伸结构相连接), 两侧自由, 顶部自由, 底部置于其下的岩土体上。

计算荷载主要考虑明挖完成后一号线车站内的各种静动荷载及其上覆土的重力作用, 一号线地铁列车通过时的振动作用本文不予考虑。

对支护结构的模拟, 管棚采用 pileSEL 构件, 锚杆采用 cableSEL 构件, 喷射混凝土与钢筋网一并考虑采用 shellSEL 构件。

破坏准则采用莫尔-库仑模型, 计算参数见表 2

表 2 一号线结构及地层物理力学参数
Table 2 Physical and mechanics parameters of No. 1 structure

地层类型	体积模量/M Pa	剪切模量/M Pa	密度/(kg · m ⁻³)	内聚力/kPa	摩擦角/(°)	厚度/m
一号线车站结构砼	391.71	322.17	2 500	550	30	/
硬塑粉质黏土层	16 667	7.692	2 000	22	18	2.1
岩石全风化层	37.51	17.31	2 000	36	25	4.8
强风化砂岩	66.67	50.0	2 200	100	28	6.0
中风化砂岩	277.78	208.33	2 200	250	28	7.0

3 方案选择与优化

3.1 方案一分析

从传统理论上来说, 一次放坡开挖不进行任何支护是最经济工艺最简便的一种方式, 本文将作为考虑方案之一. 本方案采用 1:0.7 的坡度, 计算过程中对一号线车站结构倾斜、底板中心处和边坡顶部的位移变形情况进行了模拟记录, 所得位移曲线如图 3 所示. 由图可知, 三个记录点的变形在超过允许值后仍呈加速状态, 整个模型不能达到稳定. 因此, 该方案不能满足要求, 必须对暗挖段放坡开挖进行支护.

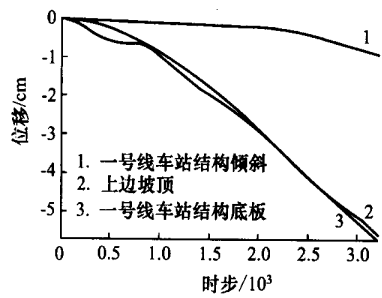


图 3 方案一位移倾斜曲线

Fig 3 The displacement curves in the No. 1 scheme

3.2 方案二分析

从方案一的分析得知, 一号线底部的 5-2 硬塑粉质黏土层和斜坡最容易进入塑性变形产生破坏, 故需对此两处进行支护处理. 在 5-2 土层中从一号线底梁下面(不接触)垂直贯穿地打入一排 $\phi 21@400$ 长 24 m 管棚超前支护一号线车站结构, 再进行放坡开挖, 并在开挖的过程中在斜坡面上采用 $\phi 8@200 \times 200$ 的钢筋网, 150 mm 厚 C20 的喷砼, $\phi 2@400 \times 400$ 的长 4 m 的中空注浆锚杆进行喷锚护坡. 由模拟计算结果知, 一号线车站底板和坡顶的最大沉降量分别为 3.7 cm 和 4.0 cm, 超

过了允许值, 局部剪切破坏情况如图 4 所示. 由图可知, 局部剪切破坏的危险点处于斜坡中上部, 说明一次放坡支护难以满足要求.

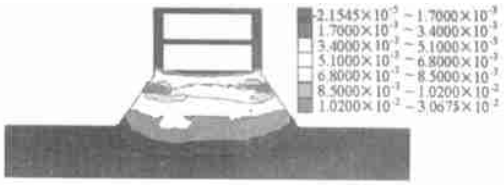


图 4 方案二局部剪应变增量等值线

Fig 4 Contour of shear strain increment in No. 2 scheme

3.3 方案三分析

方案二在斜坡中上部会首先出现局部剪切破坏, 为弥补其不足, 本方案拟采用二次放坡, 上边坡高为 4.5 m, 坡度为 1:0.75; 下边坡高为 4.5 m, 坡度为 1:0.5; 上下台阶宽均为 1.5 m (图 1). 在 5-2 土层中从一号线底梁下面(不接触)垂直贯穿地打入一排 $\phi 21@400$ 长 24 m 管棚超前支护一号线车站结构, 再进行放坡开挖, 并在开挖的过程中在斜坡面上采用 $\phi 8@200 \times 200$ 的钢筋网, 150 mm 厚 C20 的喷砼, $\phi 2@400 \times 400$ 的长 4 m 的中空注浆锚杆进行喷锚护坡. 计算所得的位移曲线如图 5 所示, 底板沉降量约为 3.5 cm, 依然略大于允许值, 虽然整体受力较均匀, 但上边坡依然产生了较大的塑性变形. 因此, 需进一步优化方案.

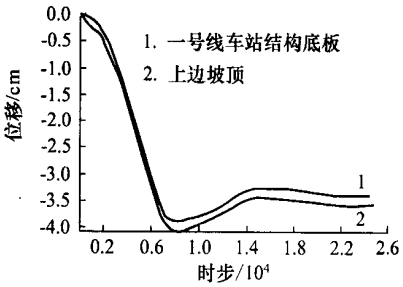


图 5 方案三沉降变形曲线

Fig 5 The displacement curves in No. 3 scheme

3.4 方案四分析

按方案三计算依然不能得到满意的结果, 因此, 应采取进一步的措施. 本方案在方案三的基础上(即坡高、坡率和台阶宽度与方案三对应相同, 如图 1 所示), 对暗挖段岩土体进行注浆加固, 且采用表 3 的支护方式进行支护. 注浆方案采用袖套管法进行微劈裂注浆; 为保持浆液的稳定性和足够的强度, 浆液采用水泥浆, 水灰比为 1:1; 并加有三乙醇胺与食盐的复合外加剂(分别为水泥重的 0.04% 与 0.4%)^[8]. 按此方案计算所得结果显示, 整体受力较均匀, 一号线车站底板最终沉降量在 1.89~2.0 cm 之间(图 6), 并且由于支护方式参数的优化, 使成本得到有效控制. 可见, 土层注浆、管棚超

前支护和喷锚护坡对交汇段岩土体和一号线车站结构的稳定性起了十分积极的作用

表 3 方案四所采用支护方式
Table 3 The support parameters in scheme 4

构件	参 数
管棚	$\phi 21@400$ 长 24 m, 一排, 从一号线底梁下面(不接触)垂直贯穿
喷锚	150 mm 厚 C20 砼, 钢筋网 $\phi @200 \times 200$, $\phi 2@1\,000 \times 1\,000$ 中空注浆锚杆, 长 5 m

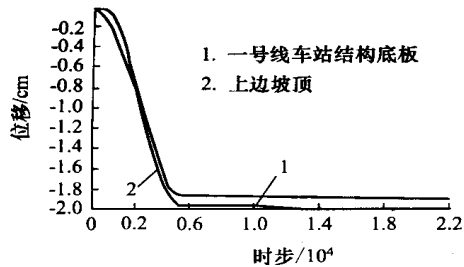


图 6 方案四位移沉降曲线
Fig 6 The displacement curves in No. 4 scheme

3.5 方案选定

通过上述 4 个方案的计算分析可知,不同的放坡形式及支护方式都对暗挖段岩土体和一号线车站结构的变形和应力状态产生不同影响,最终方案的选定应充分考虑各方面因素.采用 FLAC^{3D} 程序计算的不同的放坡形式和支护方式下的一号线车站底板沉降情况和暗挖段的应力应变状态结果列于表 4.从表中的对比可看出,方案四变形量最小,应力应变状态最为理想.

表 4 4 种放坡支护方案的计算结果对比
Table 4 Results comparing between four schemes

方案	车站底板沉降/cm	应力应变状态
一	不能稳定	车站结构和岩土体应力高集中、应变量大
二	4.0	斜坡中上部发生局部剪切破坏
三	3.5	整体受力较均匀,但依然产生了较大的塑性变形
四	1.89	整体应力应变较均匀,均在允许范围内

为进一步证明方案四的可靠性,特分析了一号线车站底板在 x 方向某截面的沉降变形情况,如图 7 所示.由图可知,底板中心处沉降最小,累积沉降量为 1.89 cm;底板两侧沉降最大,累积沉降量为 2.0 cm 左右.二者间不均匀沉降差为 1.1 mm,对结构的稳定性影响不大,在允许范围内.

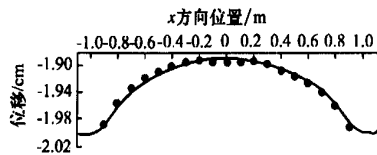


图 7 一号线车站底板沉降曲线
Fig 7 Displacement curve of the No. 1 structure floor

以上从两方面证明了方案四的可行性和可靠性,因此,最终决定选择方案四作为本工程的放坡支护方案.

4 施工力学行为分析

在选定方案四(即对暗挖段岩土体进行注浆加固,采用管棚超前支护一号线车站底板,二次放坡开挖,对斜坡进行喷锚护坡)作为工程的放坡支护方案后,对按此方案施工可能引起的力学行为特性作了进一步的分析研究.

4.1 位移变形过程分析

及时进行管棚超前支护、注浆加固和采用喷锚护坡后不同计算时步下的位移变化过程如图 8 所示.由图 8a 中的管棚和锚杆作用处位移变形颜色云可知,当岩土体位移变形开始发生时,支护结构马上起到承担荷载并阻止变形进一步发生的作用;随着时间的推移,位移变形进一步加大,支护结构也随岩土体发生少许的变形(见图 8b);支护结构和暗挖段岩土体共同阻止位移变形的进一步发生,有效地防止了一号线车站的倾斜沉降(见图 8c);直到最后稳定的状态(见图 8d),支护结构和暗挖段岩土体发生了共同作用,起到了很好的支护效果,暗挖段岩土体和一号线车站结构均较快达到稳定状态,并且岩土体和上部结构产生的变形都在允许范围内,从而保证了暗挖段岩土体的稳定和一号线的正常运营.

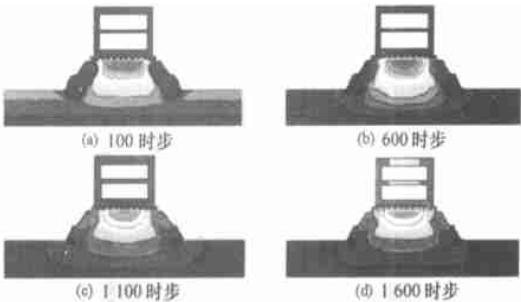


图 8 位移变化过程
Fig 8 The changing process of displacement

4.2 应力分析

在选定方案四作为工程的放坡支护方案后,达到稳定时的最大主应力等值图如图 9 所示.

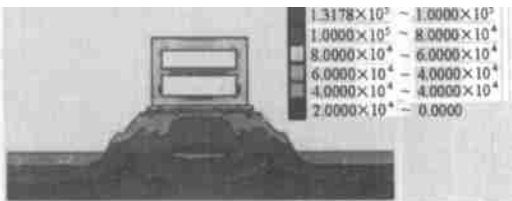


图 9 最大主应力分布
Fig 9 Distributing of max prin stress

暗挖段岩土体应力分布相对较均匀,斜坡附近仅产生很小的塑性软化区,最大主应力主要集中在管棚周围,一号线车站结构应力集中较小,保证了整体稳定性

4.3 应变分析

应变分布如图 10 所示,应变量较小,且主要集中在管棚周围很有限的范围内 因此保证了暗挖段岩土体和一号线车站结构的安全稳定

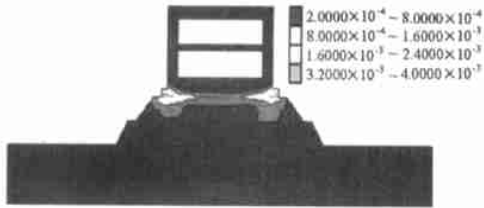


图 10 应变分布图

Fig 10 Distributing of strain

4.4 支护结构受力

图 11 为计算达稳定时管棚和锚杆受力状态 由图可知,由管棚和喷锚组成的支护体系起到了很好的承担荷载阻止岩土体变形的作用 管棚由于承担一号线的重力荷载阻止周围岩土体的沉降倾斜变形,形成了中间受力大,而两端受力相对较小的受力状态 图中显示上台阶的锚杆受力大于下台阶锚杆受力,是因为上台阶暗挖段岩土体截面较小而要承担一号线车站结构荷载,故在岩土体中产生较大应力 由此引起较大变形,而锚杆则要阻止岩土体的变形,因此上台阶锚杆也就产生了较大的反作用力,从而形成了如图所示的锚杆受力状态



图 11 管棚和锚杆受力状态

Fig 11 The force state of supporting system

5 结 论

放坡支护方式对地铁双线交汇处暗挖段岩土体和一号线车站结构的影响分析中,采用方案四的放坡支护方式最为理想 土层注浆、管棚超前支护和喷锚对交汇段岩土体和一号线车站结构的稳定性起了十分积极的作用 在放坡开挖方式和支护方

法上采取合理有效的措施,最大限度地减小开挖对暗挖段岩土体和一号线车站结构的扰动

在实际工程施工中具体做法是:当基坑开挖到地下二层即一号线车站底板标高时,采用袖筏管对底板下部的暗挖段岩土体进行注浆加固,要注意控制注浆压力,防止压力过大而使地层鼓起影响一号线车站结构或压力过小而不能达到很好的注浆效果 注浆完成后往下开挖 1 m 后应立即在底板下部(5-2 地层)不接触一号线车站底板地水平打入管棚进行超前支护 然后随挖随喷锚护坡,做到支护及时跟上及时封闭 同时,采用信息化施工,即在一号线车站结构和暗挖段岩土体周围布设位移变形观测点,在施工过程中进行严密的监测,随时进行信息反馈,以指导下一步施工,做到万无一失

此方案在工程中的应用已取得了明显的效果,暗挖段岩土体保持稳定,各部位变形位移量均在控制范围内,有效地保证了上部一号线车站结构的安全稳定与正常运营 工程结果与以上分析相吻合

参考文献:

- [1] 张庆贺,朱合华,庄 荣,等 地铁与轻轨[M] 北京:人民交通出版社,2002
- [2] 陶龙光,巴肇伦 城市地下工程[M] 北京:科学出版社,1996
- [3] 施仲衡 地下铁道设计与施工[M] 陕西:陕西科学技术出版社,1997
- [4] GB 50307-1999,地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范[S]
- [5] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{3D} Version 2.0 online manual table of contents[M] USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997
- [6] 寇晓东,周维垣,杨若琼. FLAC^{3D} 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 6-10
- [7] 姜 逸. FLAC^{3D} 二次开发及其在大型洞群和边坡分析中的应用研究[D]. 北京:清华大学水利水电工程系, 2001
- [8] 邝健政,咎月稳,王 杰,等 岩土注浆理论与工程实例[M] 北京:科学出版社,2001

(责任编辑 王玉浚)