

文章编号:1005-0523(2018)06-0013-10

合肥地铁隧道地层组合分类及暗挖适用性研究

裴子钰¹,周仕波²,杨新安¹,黄彬¹,陈翔¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2. 合肥城市轨道交通有限公司,安徽 合肥 230001)

摘要:地铁隧道的施工与所穿越的地层条件联系紧密。通过对现有的合肥轨道交通1~5号线地质勘探资料和工程资料的整理总结,结合合肥地区地形地貌特征,采用统计分析、数值模拟和现场实测的方法,对合肥地区的暗挖工程地质条件进行较深入地研究。研究表明:对合肥地区工程地质层组进行总体概化可以遵循“以地层的沉积年代为主,以岩土的工程适用特征为辅”的划分原则;按照地层断面特征将合肥地铁隧道可能穿越的地层组合归纳为A~D 4种类型,其中A类地层组合对隧道施工最为有利,B类地层组合对围岩变形的控制能力优于C、D类地层组合。以上结果可为合肥地铁沿线地质条件分析及暗挖隧道施工提供指导性的建议。

关键词:合肥地铁;浅埋暗挖;岩土层划分;地层组合;数值模拟

中图分类号:U45

文献标志码:A

地铁对解决城市交通堵塞,改变城市布局,实现城市环境和交通综合治理起着至关重要的作用,因此,目前国内许多大城市都在发展以地铁为主的城市快速轨道运输系统。合肥市轨道交通建设也正按计划有序向前推进,截止2017年底,已有2条运营线和3条在建线。除局部区间为高架或地面线外,大部分地铁线路均位于地下,区间隧道多采用盾构法施工,联络通道及车站通道则采用暗挖法施工。

合肥城市地质条件较为复杂,区内地表大都为第四系所覆盖,其中以上更新统黏土分布为最广,第四系沉积物厚度、分布受地貌和基底控制。地铁隧道主要穿越黏性土、粉土、粉砂、淤泥质土等工程地质层,部分区间穿越深部的砂砾石层甚至基岩。工程地质层的水平向展布和垂直向组合以及线路起伏造成的埋深变化,共同导致各区段隧道穿越的地层类型多样^[1],其中横断面地层组合的不同从根本上决定了地铁隧道在施工期面临的岩土工程问题也不同。目前已有学者对合肥市的工程地质条件及典型土层的工程特性进行了分析总结^[2-4],部分学者在以上研究的基础上,对岩土体的工程地质分区进行了研究^[5-7],其中王国强^[8]将合肥市地基土划分为良好场地区、较好场地区、中等场地区和较差场地区,对各区地质条件及其对建筑物的适宜性和地基承载力进行了评价。但是,这些研究基本是为地基加固和基础工程服务的,而非为隧道工程服务,此外,现有的合肥地区地层特性的研究与实际工程应用结合不够紧密,不足以为日益复杂的地铁隧道工程的设计与施工提供指导意见。

本文根据合肥轨道交通1~5号线的地质勘探资料和前期工程资料、其他工程勘探资料等,从地铁线路的角度,对合肥市轨道交通1~5号线进行了工程地质分析,总结了其共性的特征与规律,对合肥地区暗挖隧道工程的地质环境特点与主要工程地质问题进行了分析,从地层结构与组合特征、地质环境特点、主要工程地质问题等方面对合肥地区的暗挖工程地质条件进行了较深入地研究。

收稿日期:2018-06-06

作者简介:裴子钰(1994—),女,硕士研究生,研究方向为地下结构与岩土工程。

通讯作者:杨新安(1964—),男,教授,博士,研究方向为交通隧道与地下工程。

1 工程地质层组的划分

1.1 合肥地层概况及地层编号说明

合肥地区属华北地层区鲁西地层分区的长丰小区(中新世沉积区),为巨厚的中、新生代陆源碎屑岩堆积区。地表绝大部分为第四系棕黄、褐黄色黏土、粉质黏土所覆盖,在河流中下游有近代冲积层分布。第四纪地层占区域陆地面积的94%,自上而下分为黄油坊组、肥西组、下蜀组和南淝河组。其中下蜀组分布最广,占陆地面积63.5%;次为南淝河组,成因以冲积为主^[9]。

综合合肥轨道交通1~5号线的地质勘探资料可以发现,每条线所采用的地层编号不尽相同。从地铁线路的角度进行地质分析时,沿用的是每条线各自的地层编号,从市域角度进行地质分析时,若能将每条线的地层编号统一起来,则能更方便、直观地对合肥市的浅部地层的工程地质条件与特征进行深入分析。

以合肥轨道交通1号线和4号线为例,1号线地勘称 Q_3^{al+pl} 为第四纪晚更新世冲洪积层,4号线地勘称 Q_3^{al+pl} 为第四系晚更新统冲洪积层。第四系是第四纪形成的地层,更新统是更新世形成的地层,又可分为下更新统、中更新统和上更新统,即第四系上更新统地层对应第四纪晚更新世地层。将1~5号线各岩土层的代号汇总如表1所示。

表1 各岩土层代号汇总

Tab.1 Summary of various geotechnical codes

线路名称	人工填土层 (Q^m)	第四系全新 统地层(Q_4)	第四系上新 统地层(Q_3)	第四系中更 新统地层(Q_2)	第三纪 基岩 E_{dn}	白垩纪 基岩 K_2	侏罗纪 基岩 L_3
1 号线	①	② (al+pl)	③④ (al+pl)		⑤	⑥	
2 号线	<1>	<2> (al+pl)	<3> (al+pl)<4>(el)		<5> <6>	<7> <8>	<9> <10>
3 号线	(0)	(1) (al+pl)	(2) (al)	(3) (el)		(6)	(7)
4 号线	①	② ③④⑤ (1) (al)	⑥ ⑦ (al+pl) (el)		⑧	⑨	⑩
5 号线	①	④ (al)	⑥ ⑦ (al+pl) (el)		⑧	⑨⑩	⑪

1.2 层组划分方法与划分结果

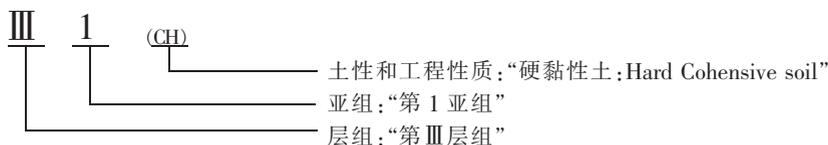
在轨道交通工程中,当场地区岩土层较多、成因类型复杂、空间分布变化大时,对整个场地工程地质层组进行总体概化是十分必要的。通过工程地质层组的划分,可以全面客观地反映全区的地质结构和主要工程地质层的分布规律、力学性质,更好地为工程方案的设计与施工服务^[10]。

为此,作者提出:合肥地区工程地质层组的划分按照“以地层的沉积年代为主,以岩土的工程适用特征为辅”的原则,给出隧道工程建设影响深度50 m范围的工程地质层组划分方法。

轨道交通1~5号线沿线穿越多个地貌单元,分别为南淝河河床及河漫滩、南淝河一级阶地、南淝河二级阶地。不同地貌单元内揭示的地层情况有所不同,因此在进行层组划分时,应将地貌特征作为划分原则之一。结合合肥轨道交通1~5号线实际情况,对沿线工程所揭露的地层,按以下原则划分工程地质层组:

- 1) 根据沉积年代划分工程地质层组;
- 2) 根据成因类型、地貌特征及工程特性划分亚组。

通过代码串可以很直观地总览沿线地层的基本工程特性和组合特征。工程地质层组代码串表示为:层组(罗马数字)—亚组(阿拉伯数字)—土性和状态(英文字母缩写),例如Ⅲ1(CH):



根据表1各岩土层代号汇总表可以看出,轨道交通4,5号线的地层编号已基本统一。根据上文中1~5号线工程地质层组的划分,结合4,5号线的地层编号,对合肥市轨道交通沿线所揭露的地层统一划分工程地质层组,如表2所示。

表2 各工程地质层组的岩土层组成与划分
Tab.2 The formation and division of rock and soil layers

层组	亚组	土体基本特征	土体状态	地貌特征
I (人工填土层 Q^m)	I	褐灰-灰黄,以粉质黏性土为主	软塑~可塑或松散~稍密	南淝河河床及河漫滩、南淝河一二级阶地
	II _{1(CS)}	灰褐-深灰,高压缩性,以粉质黏土为主	软塑~流塑	南淝河河床及河漫滩
II (第四纪全新世沉积层 Q_4^1)	II _{2(CM)}	灰色-灰黄,中压缩性,以粉质黏土为主	软塑~可塑	南淝河河床及河漫滩
	II _{3(SM)}	灰褐-褐黄,稍湿~湿,中压缩性,局部夹薄层粉土	稍密~中密	南淝河河床及河漫滩
IV (第四纪河流相全新世沉积层 Q_4^{al})	IV _{1(CM)}	灰色-灰黄,中压缩性,以粉质黏土为主	软塑~可塑	南淝河一二级阶地坳沟
	IV _{2(CS)}	黄褐-灰褐,中~低压缩性,局部夹粉质粘土透镜体	可塑~硬塑	南淝河一级阶地
	IV _{3(SD)}	褐黄-灰黑,饱和,局部夹黏性土、粉土薄层	中密~密实	南淝河一级阶地
VI (第四纪晚更新世冲洪积层 Q_3^{al+pl})	VI _{1(CH)}	褐黄-灰黄,中~低压缩性,具弱~中膨胀性	硬塑~坚硬	南淝河二级阶地
	VI _{2(SD)}	灰黄-褐黄,稍湿~湿,中压缩性,局部夹薄层中砂及粉土	中密~密实	南淝河二级阶地
VII (第四纪晚更新世残积地层 Q_3^{cl})	VII _{1(CH)}	灰白-灰黄-褐黄-紫红,欠均匀,中~低压缩性,局部夹薄层粉土、粉砂及风化岩屑	可塑~硬塑	南淝河一二级阶地
	VII _{2(SD)}	灰白-灰黄-褐黄-紫红,饱和,不均匀,局部为中砂或粗砂,夹黏性土。	中密~密实	南淝河一二级阶地
VIII (下第三纪基岩 E_{dn})	VIII	主要为棕红、棕褐砂质泥岩、泥岩及泥质砂岩,全~中风化,质地软弱,风化后呈土状	全、强、中风化	南淝河河床及河漫滩、南淝河一二级阶地
IX (白垩纪基岩 K_2, K_{1k})	IX	主要为棕褐、棕红色砂质泥岩及泥岩,全~中风化,质地疏松,风化后呈土状	全、强、中风化	南淝河河床及河漫滩、南淝河一二级阶地
X (侏罗纪基岩 J_3)	X	主要为紫红、灰红砂质泥岩、泥岩及砂岩,全~中风化,质地疏松,风化后呈土状	全、强、中风化	南淝河河床及河漫滩、南淝河一二级阶地

1.3 层组划分的合理性分析

以重点物理学参数统计规律的变异性为基准,分析合肥地区工程地质层组划分的合理性,说明将岩土参数变化幅度相对较小的区段划分为同一层组是较为合理的^[11]。国标勘察规范^[12]也指出岩土参数的标准差可以作为参数离散性的尺度,变异系数可以评价岩土参数的变异特征。为此,将岩土体的物理学指标的变异系数 δ 作为参数离散性的尺度,以参数的变异性大小为评价标准,确定层组划分的合理性。

通过对本次划分的各层组岩土体实验指标离散性统计分析,对照 Ingles 报道的范围和建议的标准^[13]可以看出,各亚组内物理学指标的离散性相对较小(见表3)。这反映出同一亚组中土的工程地质性质差异性较小,同时,也间接说明了该工程地质层组划分方案的合理性。

表3 部分层组岩土体物理力学指标的变异系数
Tab.3 Variation coefficient of geotechnical parameters for some strata groups

物理力学指标	Ingles 的建议		层组	
	报道的范围	建议的标准	IV _{2(CH)}	VI _{1(CH)}
黏性土粘聚力	0.20~0.50	0.30	0.16	0.20
内摩擦角	0.20~0.50	0.30	0.08	0.04
压缩模量	0.02~0.42	0.30	0.16	0.09
孔隙比	0.13~0.42	0.25	0.02	0.05
重度	0.01~0.10	0.03	0.01	0.02

注:表中各数字均为第1列各参数的变异系数,无量纲。

2 合肥地铁隧道地层组合分布及特征

合肥地区属于江淮丘陵的一部分,区内地形呈微波状起伏,岗冲相间,南淝河自西向东绕城而过,区内总的地势呈西北高、东南低。新构造运动以来,第四系沉积受流水侵蚀—堆积作用,区域河流地貌特征明显,由于南淝河以及自北向南汇来的两条南淝河支流—四里河、板桥河长期的流水侵蚀、堆积作用,区域河流地貌特征明显以河谷为中心向两侧延展,依次为河漫滩、一级阶地、二级阶地。

各工程地质层的水平向展布和垂直向组合以及线路起伏造成的埋深变化,共同导致各区段隧道穿越的地层组合不同。通过对合肥地铁勘察资料及施工资料的分析总结,按穿越的地层情况的不同将1~5号线的地层组合分为A、B、C、D 4种类型,并根据岩层的埋深及地下20 m深度(目前地铁隧道主要涉及的层位)内工程地质层的强度和稳定性,对4类地层组合进一步细分为1,2两级,以脚标区分,如表4所示。

表4 地层组合分类
Tab.4 The classification of stratum combination

类型	亚区	基岩埋深/m	岩土层组成	地下水特征	分布	地铁隧道断面地层
A类良好地层组合	A ₁	<20	人工填土(I)、第四纪晚更新世冲洪积层(VII _(CH))与下伏基岩(VIII、IX或X)组成	地下水位埋深一般都大于5~10 m, 贫水	市区中部及其以北、以西地区	黏土-岩石复合地层或全断面岩层
	A ₂	>20			市区南部及其东北部	全断面黏土层
B类较好地层组合	B ₁	<20	人工填土(I)、第四纪河流相全新世沉积层(IV _{2(CH)})、第四纪晚更新世冲洪积层(VII _(CH))与下伏基岩(VIII、IX或X)组成	地下水位埋深2~5 m, 地下水较贫乏	市区中部	黏土-岩石复合地层或全断面岩层
	B ₂	>20			市区东南部	黏土夹薄层粉土、砂土层或全断面黏土层
C类中等地层组合	C ₁	<20	人工填土(I)、第四纪河流相全新世沉积层(IV _{1(CH)})、第四纪晚更新世冲洪积层(VII _(CH))与下伏基岩(VIII、IX或X)组成	地下水位埋深1~2 m, 丰水季节丰富	零星分布在市区中部	黏土-岩石复合地层或全断面岩层
	C ₂	>20			零星分布在市区东南部	全断面黏土层
D类较差地层组合	D ₁	<20	人工填土(I)、第四纪全新世沉积层(III _(CH) 、II _{2(CH)} 、II _{3(CH)})与下伏基岩(VIII、IX或X)组成	地下水位埋深小于1~2 m, 地下水丰富	市区北部以及西北部的南淝河两岸	砂粉土-岩石复合地层或全断面岩层
	D ₂	>20			市区东部以及东南部的南淝河两岸	黏土-砂粉土复合地层或全断面砂粉土层

A类良好地层组合,广泛分布于南淝河二级阶地中硬土区。褐黄、灰黄色黏土、粉质黏土,局部地段下部夹薄层粉土、粉砂层或残积土层,土质均匀,厚度大,中~低压缩性,具弱~中膨胀性,下伏为第三纪、白垩纪或侏罗纪基岩。

B类较好地层组合,主要分布在南淝河的一级阶地中硬土区及构造剥蚀低山硬质岩区,地层由上至下为全新统的黏土、粉质黏土,局部夹粉土、砂土层以及上更新统的黏土、粉质黏土,地层分布均匀,具有较高的强度,中等的压缩性,下伏为第三纪、白垩纪或侏罗纪基岩。

C类中等地层组合,主要分布于二三级阶地坳沟新近沉积土及素填土区,表层1~3 m厚为软塑~可塑状态的中黏性土或主要成分为黏土的填土,其下为上更新统黏土,局部地段下部夹薄层粉土、粉砂层或残积土层。下伏为第三纪、白垩纪或侏罗纪基岩。

D类较差地层组合,主要分布在河漫滩或被掩埋的南淝河古河道中,河床下部有软塑~流塑状淤泥质土分布,表层全新统黏土以下呈粉质黏土、粉土、粉细砂交互沉积,地层层序变化大,下伏为第三纪、白垩纪或侏罗纪基岩。

根据合肥轨道交通1~5号线沿线地层组合的分布以及合肥市域范围内的地貌特征,以蜀山区人民政府为市域中心,以董铺水库、大蜀山和南淝河为标志物,划分后的地层组合分布如图1所示。

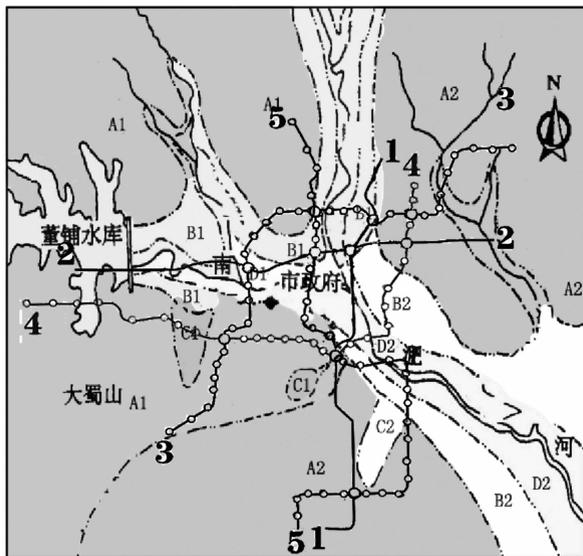


图1 合肥市域范围地层组合分布

Fig.1 The distribution of stratum combination within the area of Hefei

3 典型地层组合的暗挖适用性分析

3.1 暗挖适用性的数值分析

地层组合划分的目的是合理利用天然地层,规划不同的工程地质质区及选择合理的隧道布置层位。根据岩土分布规律及工程特性对地铁隧道和车站的暗挖施工的适宜性进行评价,为地铁线路的规划选址、方案比较及初步设计服务。

根据上文总结的4类地层组合类型,结合以往线路暗挖工程采用的断面型式,通过数值模拟的方法比较不同地层组合的暗挖适用性。为了避免相近土层重复计算带来的麻烦,更好地比较各地层组合间的暗挖适用性,以合肥轨道交通5号线为研究对象,在沿线选取各地层组合的典型断面进行计算分析。选取的地层断面为A-1,A-2,A-3,B,C,D,其中将A类良好地层组合根据基岩埋深的不同细分为3小类。隧道断面选取合肥轨道交通2号线潜山路站暗挖主体结构中的最大断面,超前支护采用 $\Phi 42 \times 3.25$ mm注浆小导管,初期支护采用厚350 mm的C25喷射混凝土以及钢筋网和格栅钢架,二衬采用厚500 mm的C35钢筋混凝土,开挖工法采用CRD工法。6种计算模型统计如表5所示。

表5 计算模型

Tab.5 Calculation model

序号	断面型式	支护形式及加固措施	地层断面	隧道穿越土层	埋深/m
1	正线隧道	超前支护: $\Phi 42 \times 3.25$ mm 注浆小导管, 初期支护:厚350 mm的C25喷射混 凝土以及钢筋网和格栅钢架, 二衬:厚500 mm的C35钢筋混凝土	A-1	⑥2 黏土	16.0
2			A-2	⑥2 黏土、⑨1 风化岩	19.0
3			A-3	⑩2、⑩3 风化岩	19.0
4			B	④3 粉质黏土、⑥2 黏土	15.4
5			C	③3 粉质黏土、⑥2 黏土	12.0
6			D	②5、⑦4 粉质黏土、粉砂	17.0

由于模型数量较多,为简化计算工作,统一采用二维模型进行计算,二维有限元计算按平面应变问题进行模拟,用平面应变单元模拟围岩和二次衬砌,喷射混凝土和钢拱架采用梁单元模拟。边界条件是:左右边界限制其水平自由度,下边界限制其竖向自由度,上边界为自由面。二维有限元模型采用四边形单元进行映射网格划分,计算模型见图2。

考虑到二维有限元模型的局限性,在数值模拟过程中未考虑超前大管棚和小导管的梁效应,只考虑了超前注浆加固作用,超前注浆加固作用通过在开挖前增加隧道上半断面一定区域的计算参数在模拟中体现。在正线隧道模型中,小导管注浆加固厚度取0.6 m。在模拟过程中,岩土体、支护结构和注浆加固区等物理力学参数如表6所示。

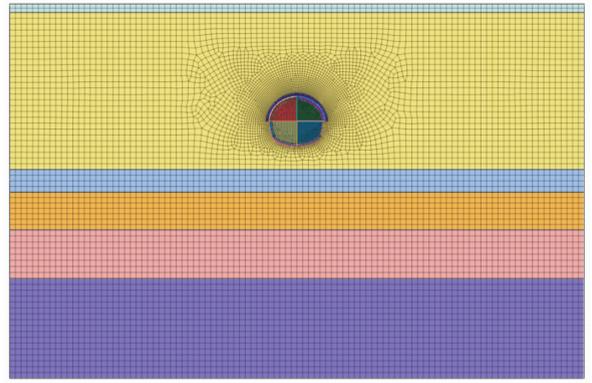


图2 正线隧道计算模型
Fig.2 Calculation model of tunnel

表6 岩土体材料计算参数
Tab.6 Calculation parameters of rock and soil

围岩	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①2 素填土	18.0	9.00	0.30	12	8
②3 粉质黏土	19.0	25.8	0.32	22	15
②5 粉砂夹粉质黏土	19.6	29.1	0.29	12	24
③2 黏土	17.4	13.5	0.34	18	12
③3 粉质黏土	18.5	24.9	0.31	25	14
④1 黏土	19.1	39.06	0.30	43	13
④2 黏土	19.3	46.2	0.28	54	15
④3 粉质黏土	19.5	39.69	0.29	42	17
⑥2 黏土	19.6	50.91	0.28	66	16
⑥3 粉质黏土	19.7	44.97	0.28	54	18
⑦2 粉质黏土	20.1	44.46	0.28	48	18
⑦4 粉细砂	19.9	45.6	0.28	9	28
⑧1 全风化	19.6	49.59	0.29	58	17
⑧2 强风化	21.2	-	0.23	-	-
⑧3 中风化	22.4	-	0.20	-	-
初期支护	25.0	28 000	0.30	-	-
二次衬砌	25.0	31 500	0.30	-	-
小导管注浆	22.0	900	0.30	300	35
大管棚注浆	19.0	600	0.32	22	15

1) 围岩变形及地表沉降。计算后提取 6 个断面各工况的地表、拱顶、隧底的变形值绘制成如图 3~图 5 所示。各断面的地表、拱顶、仰拱变形最终值统计见表 7。

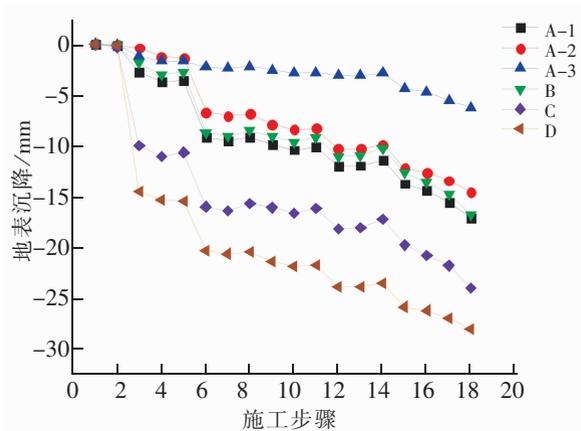


图 3 正线隧道地表沉降

Fig.3 Surface deformation of the main tunnel

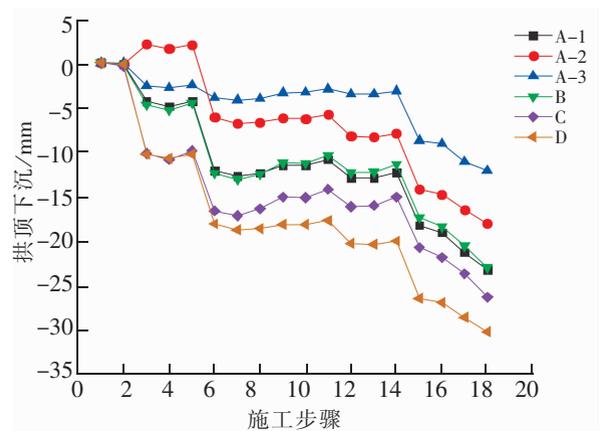


图 4 正线隧道拱顶下沉

Fig.4 Crown deformation of the main tunnel

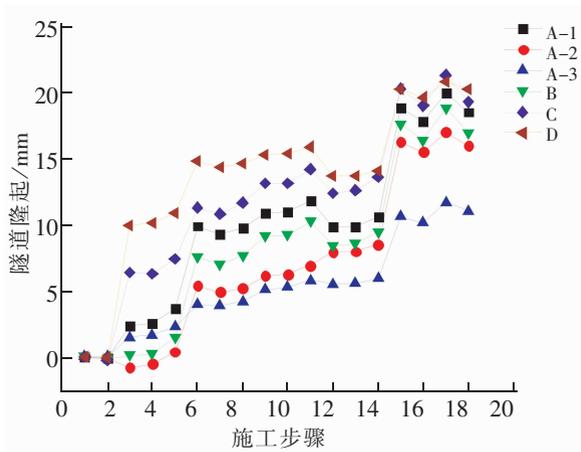


图 5 正线隧道仰拱变形

Fig.5 Inverted arch deformation of the main tunnel

表 7 各断面地表、拱顶、仰拱变形最终值
Tab.7 The ultimate value of the deformation of surface, crown and inverted arch

断面	地表沉降/mm	拱顶沉降/mm	隧道隆起/mm
A-1	-17.1	-23.3	18.4
A-2	-14.5	-18.1	15.9
A-3	<u>-6.21</u>	<u>-12.1</u>	<u>11.0</u>
B	-21.8	-23.1	16.8
C	-24.0	-26.4	19.2
D	-28.1	-30.3	20.1

在隧道施工过程中,围岩变形、地表沉降量不断增大。左侧上、下导洞开挖产生了较大的变形,之后变形基本稳定,直至临时支撑拆除过程再次产生了较大的变形。此外,初支与临时支撑的施加对控制围岩变形、地表沉降有显著效果。

计算所得隧道施工产生的最大地表沉降、拱顶沉降及隧道隆起量及对应地层断面分别为: -2.81 cm (D), -2.83 cm (D), 2.08 cm (B); 隧道施工产生的最小地表沉降、拱顶沉降及隧道隆起量及对应地层断面分别为: -0.621 cm (A-3), -1.21 cm (A-3), 1.10 cm (A-3)。

结合施工过程中各断面围岩变形及地表沉降过程及对应的最大值,可以得出:地层断面 A-3 对隧道施工最为有利,产生的围岩变形与地表沉降均明显小于其余各断面;不同地层断面对拱顶变形和地表沉降的影响规律基本一致,地表沉降受地层断面性质影响较大,地层断面 B, C, D 的地表沉降最大值为 $-2.81 \sim -2.18$ cm, 明显大于地层断面 A, 各断面拱顶变形最大值为 $-2.83 \sim -1.81$ cm; 仰拱隆起受下卧地层性质影响较大,最大值为 $1.10 \sim 2.08$ cm。

2) 支护结构内力。将 6 个断面的初期支护轴力和弯矩最大值及其位置统计整理见表 8。

表 8 各断面初期支护轴力和弯矩最大值及其位置

Tab.8 The maximum and its position of the axial force and bending moment of each section

断面	轴力		弯矩	
	最大值/kN	位置	最大值/(kN·m)	位置
A-1	-1.27E+03	拱脚	4.40 E+02	仰拱
A-2	-1.26E+03	拱脚	4.20 E+02	仰拱
A-3	-1.19E+03	拱肩	2.30 E+02	仰拱
B	-1.23E+03	拱脚	4.33 E+02	仰拱
C	-9.86E+02	拱脚	3.63 E+02	仰拱
D	-1.00E+03	拱脚	3.32E+02	仰拱

矿山法施工隧道主要荷载由结构初期支护承担。由表 8 可知,除断面 A-3 最大轴力产生于拱肩外,其余各断面最大轴力均产生于拱脚;各地层断面最大弯矩均产生于隧道底部。各断面产生的初期支护轴力最大值基本接近,为 $-1.27E+03 \sim -9.86E+02$ kN;弯矩最大值受地层断面性质影响较大,其量值为 $2.30E+02 \sim 4.40E+02$ kN·m。

综上所述,A 类良好地层组合对隧道施工最为有利,产生的围岩变形与地表沉降均小于其他地层组合;B 类较好地层组合对围岩变形的控制能力较好,但初期支护的弯矩和轴力极值较大,实际施工中二衬可紧跟初支进行施作,以分担部分围岩压力。C、D 类地层组合对围岩变形的控制能力一般,但初支内力相对较小,其中 C 类中等地层组合上部素填土、新近沉积土的厚度较大、均匀性较差;而 D 类较差地层组合,分布有粉土、粉细砂层,在暗挖施工时要注意降水和支护,可采用不同的地层预加固、预支护技术,以提高地层自稳能力。

3.2 暗挖适用性的现场实试验证

已建的合肥轨道交通 2 号线是目前合肥市采用暗挖技术最多的线路,有正线隧道、联络线和车站通道多种类型,其中车站通道主要包括怀宁路站 1 号口、4 号口,科学大道站 3 号口以及长丰南路站 2 号口,各车站通道的相关参数统计见表 9,地表沉降、拱顶下沉及管线变形的监测结果累计值见表 10。

表 9 车站通道参数

Tab.9 Parameters of the station passages

车站通道	埋深/m	断面尺寸/m	地层组合	施工方案
怀宁路站 1 号口	4.3~7.0	6.5×5.1	A-1	
怀宁路站 4 号口	5.0~7.0	6.5×5.1	A-3	超前支护;大管棚 +超前小导管
科学大道站 3 号口	5.2~6.0	8.2×5.5	A-2	施工工法;4 部 CRD
长丰南路站 2 号口	4.4~4.8	6.4×6.0	B	

表 10 各车站通道变形监测累计值

Tab.10 Deformation monitoring cumulative value of each station passage

车站通道	地表沉降/mm	拱顶下沉/mm	管线变形/mm
怀宁路站 1 号口	17.46	11	18
怀宁路站 4 号口	10.13	6	10
科学大道站 3 号口	11.87	9	13
长丰南路站 2 号口	24.41	15	20

4个车站通道的地表沉降、拱顶下沉和洞周收敛的监测结果均符合变形控制标准,表明在A、B两种地层组合中采用浅埋暗挖法施工是可行的。另外,各通道在进行暗挖施工时都采用了大管棚加小导管联合的超前支护方式,对拱顶下沉的控制效果很好,但大管棚成孔时的应力释放导致部分通道的地表沉降值偏大^[14]。除长丰南路站2号口外,数值计算与现场监测的地表沉降累计最大值较为接近,且与地层组合的对应规律也一致,即地层组合A-3的地表沉降最小,地层组合B的地表沉降最大。

数值计算结果与实测结果具有较好的一致性,二者相互补充和验证了A、B地层组合的暗挖适用性,C、D地层组合的暗挖适用性还有待实际工程的进一步验证。

4 结论

1) 提出了对合肥地区50 m深度范围的工程地质层组“以地层的沉积年代为主,以岩土的工程适用特征为辅”的划分原则,用以评价暗挖隧道工程建设的工程地质条件。

2) 统一了合肥轨道交通1~5号线的地层编号,并针对岩土层划分过多的问题,对沿线的工程地质层组进行了总体概化。对照Ingles报道的范围和建议的标准,层组划分结果合理。

3) 根据合肥市岩土工程地质特征,按横断面的不同将合肥地铁隧道可能穿越的地层组合归纳为A类良好地层组合(二级阶地中硬土区)、B类较好地层组合(一级阶地中硬区及构造剥蚀低山硬质岩区)、C类中等地层组合(一二级阶地拗沟新近沉积土及素填土区)及D类较差地层组合(河漫滩及掩埋古河道区)4种类型。

4) A类地层组合对隧道施工最为有利;B类地层组合对围岩变形的控制能力较好,但初期支护的弯矩和轴力极值较大;数值计算与现场实测验证了A、B地层组合的暗挖适用性。C、D类地层组合对围岩变形的控制能力一般,但初支内力相对较小;C、D类地层组合分布有新近沉积土、粉细砂层等软弱土层,其暗挖适用性还有待实际工程的进一步验证。

参考文献:

- [1] 卜令方,汪明元,金忠良.杭州地铁盾构隧道的地层组合结构及主要岩土工程问题[J].浙江建筑,2016,33(12):16-20.
- [2] 郭兆清.合肥滨湖新区工程地质类型与特性分析[J].工程与建设,2015(2):236-238.
- [3] 郭兆清,刘毅.合肥轨道交通1号线沿线的工程地质特性分析[J].工程与建设,2014(2):173-175.
- [4] 张万涛.合肥地区粘性土及白垩纪砂岩工程特性分析[J].山西建筑,2013,39(22):57-58.
- [5] 贾维瑞.合肥软岩风化层划分及评价研究[C]//中国地质学会.第六届全国工程地质大会论文集,中国地质学会:中国地质学会,2000:3.
- [6] 吴君虎,丁永坚.合肥浅层岩体工程特性与不同岩体复合部位的工程处理浅析[J].安徽建筑,2012,19(2):114-116.
- [7] 汤明玉.合肥市开发区工程地质条件综合评述[J].上海国土资源,1999,20(2):34-36.
- [8] 王国强.合肥市岩土体工程特征及地基划分[J].岩石力学与工程学报,1999,18(6):694-698.
- [9] WAN YUSHENG, CHENG ZHENYU, ZHOU JIANXIONG, et al. Provenance of jurassic sediments in the Hefei Basin, east-central China and the contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Shan[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2005, 231(3): 279-294.
- [10] 李晓昭, 罗国煜, 龚洪祥, 等. 土体工程地质层组的划分[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 759-763.
- [11] 周文海, 李永东. 基于岩土参数统计分析的地层划分研究[J]. 土工基础, 2017(4): 481-485.
- [12] 北京市勘察设计研究院, 北京市建筑设计研究院. DBJ11-501-209 北京地区建筑地基基础勘察设计规范[S]. 北京: 北京市规划委员会, 2009-05-11.

- [13] LI XIAO ZHAO, LUO GUO YU JIANG HUANG. Urban geoenvironmental variation issues caused by geotechnical engineering disturbances[C]//Proceedings of International Symposium on High Altitude and Sensitive Ecological Environmental Geotechnology, Nanjing: Nanjing University Press, 1999: 23-29.
- [14] 王康, 孙榕正, 杨新安. 充填型浅巨岩溶隧道溶洞处理技术研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3): 23-28.

Study on Classification of Stratum Combination and Application of Shallow Tunneling Method in Hefei Metro Tunnel

Pei Ziyu¹, Zhou Shibo², Yang Xin'an¹, Huang Bin¹, Chen Xiang¹

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The construction of metro tunnel is closely related to the geological conditions. Through summarizing the geological exploration data and the engineering data of the planned Hefei metro line 1~5, the distribution of geomorphic feature in Hefei area was also taken into consideration to study the geological conditions of shallow tunneling engineering of Hefei metro in depth. Three different methods including statistical analysis, numerical model and field measurement had been adopted to make the research more comprehensive and rigorous. The results indicate that the overall generalization of the engineering geological layer, namely, unifying and simplifying the serial number of strata by engineering geology, can be followed by the principle that “the sedimentary age of stratum is given to the priority with the application of geotechnical engineering as the complement” in Hefei area. According to the characteristics of stratigraphic section, the stratum combinations which Hefei metro tunnel might cross can be classified as A~D, among them A stratum combination is the most favorable for the tunnel construction, B stratum combination's ability to control the deformation of surrounding rock is superior to C and D stratum combination. The above results can provide guidance for the analysis of geological condition and the construction of Hefei metro tunnel.

Key words: Hefei metro; shallow tunnel method; the division of rock-soil layer; stratum combination; numerical simulation