

文章编号: 1007-2993(2023)03-0284-07

浅埋连拱隧道中隔墙地基受力变形 及注浆加固研究

田鲁鲁¹ 张智¹ 郭永发²

(1. 云南省建设投资控股集团有限公司, 云南昆明 650501;
2. 中铁二院昆明勘察设计研究院有限责任公司, 云南昆明 650200)

【摘要】 为研究浅埋连拱隧道中隔墙地基受力变形特征及基底注浆加固方法, 依托云南省某拟建高速公路连拱隧道, 采用 MIDAS/GTS 软件进行数值模拟计算和分析。研究结果表明: (1) 在围岩较好、埋深较小时中隔墙基底压力分布随施工过程由“马鞍形”分布逐渐变为“钟形”分布, 最大基底压力出现在先行洞衬砌浇筑后右侧墙趾处, 中隔墙地基总体上处于隆起变形状态; (2) 在围岩较差或埋深较大时中隔墙基底压力分布呈“马鞍形”分布, 最大基底压力出现在后行洞二衬浇筑后中间偏右处, 中隔墙地基总体上处于沉降变形状态; (3) 通过数值分析得到不同埋深、地质条件下的连拱隧道中隔墙地基需要满足的承载力, 并结合现行规范及前人研究成果, 提出了中隔墙岩石地基加固前后地基承载力计算方法。研究成果可为连拱隧道的设计和施工提供参考。

【关键词】 连拱隧道; 中隔墙; 变形; 地基承载力; 地基加固; 数值模拟

【中图分类号】 U 452

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.005

Foundation Force and Grouting Reinforcement of Central Separate Wall in Shallow Buried Multi-arch Tunnel

Tian Lulu¹ Zhang Zhi¹ Guo Yongfa²

(1. Yunnan Construction and Investment Holding Group Co., Ltd., Kunming 650501, Yunnan, China; 2. Kunming Survey Design and Research Institute Co., Ltd., CREEC, Kunming 650200, Yunnan, China)

【Abstract】 In order to study the foundation deformation characteristics of the central separate wall of a shallow-buried multi-arch tunnel and the foundation grouting reinforcement method, the MIDAS/GTS software was used for numerical simulation calculation and analysis based on a proposed expressway multi-arch tunnel in Yunnan Province. The research results show that: (1) When the surrounding rock is good and the buried depth is small, the pressure distribution at the base of the central separate wall gradually changes from the “saddle-shaped” distribution to the “bell-shaped” distribution along with the construction process. The maximum base pressure appears at the toe of the right wall after the lining of the advance tunnel is poured. The foundation of the central separate wall is generally uplifted; (2) When the surrounding rock is poor or the buried depth is large, the pressure distribution at the base of the central separate wall is in a “saddle-shaped” distribution. The maximum base pressure appears at the middle right after the second lining of the rear tunnel is poured. The foundation of the central separate wall is generally in a state of settlement. (3) Through numerical analysis, the required bearing capacity of the partition wall foundation of the multi-arch tunnel under different burial depths and geological conditions is obtained. Combined with the current code and previous research results, a calculation method for the foundation bearing capacity of the central separate wall before and after the rock foundation reinforcement is proposed. The research results can provide reference for the design and construction of multi-arch tunnels.

【Key words】 multi-arch tunnel; central separate wall; deformation; foundation bearing capacity; foundation reinforcement; numerical simulation

基金项目: 云南省重点研发计划(社会发展领域)项目(2018BC008)

作者简介: 田鲁鲁, 男, 1985 年生, 汉族, 江苏连云港人, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道设计及科研工作。E-mail: 270642436@qq.com

0 引言

我国公路建设快速发展,为更好地满足线形、环保及功能等需要,公路建设中连拱隧道建设方案的应用越来越多。连拱隧道由于开挖跨度大,结构型式和施工工法复杂,隧道结构受力状态随施工工序变化频繁,且对周围地层多次扰动,其稳定性直接影响到连拱隧道整体稳定性。李武等^[1]对云南省境内十几座高速公路连拱隧道病害调查显示,裂缝病害主要出现在隧道中墙位置,隧道渗漏水也多出现在这些裂缝处,洞口裂缝密度是洞身的两倍多。中墙作为连拱隧道受力的核心构件,需要承受拉、压、弯、剪、扭作用,这对连拱隧道中墙结构设计和施工提出了很高要求。

中墙是目前连拱隧道研究的热点,但是对中墙地基的研究较少。国内学者采用数值模拟、现场测试和室内模型试验等方法对连拱隧道中墙基底受力、变形特征进行了研究。蒲治戎^[2]结合贵阳遵义中路大断面连拱隧道,运用 ANSYS 有限元程序分析了在 IV 级围岩条件下中隔墙随施工过程的基底受力、变形特性;高登和林孔斌^[3]采用荷载-结构法对扩建连拱隧道中墙受力进行了分析,提出中墙底部应力较大时应进行注浆加固处理以满足地基承载力要求;邱军领等^[4]、杨果林等^[5]通过现场测试分析了连拱隧道中墙底部压力发展和压力分布;袁树成^[6]采用模型试验对某极浅埋连拱隧道中隔墙在中导洞-CRD 法施工过程中受力特征进行了模拟,得到了中隔墙底部接触压力变化规律,并提出了加强中隔墙稳定性措施。虽然连拱隧道中墙地基已有相关研究,但针对各种不同埋深、地质条件下连拱隧道中墙地基的系统性研究还有不足,缺少中墙地基受力、变形的普遍性规律,也没有简单实用的加固前后地基承载力计算方法。

连拱隧道中墙地基的研究成果较少,地勘资料也不能为设计提供详细的计算参数,目前主要依据工程经验进行中墙地基加固设计,急需全面掌握连拱隧道中墙地基受力变形规律,并为设计提供简单实用的中隔墙地基承载力要求和计算方法。为此,依托云南省某拟建高速公路,重点研究在不同埋深、地质条件下浅埋连拱隧道中隔墙地基的力学行为和变形特征,得出较全面的中隔墙地基受力和变形规律,提出相应的地基承载力要求和加固前后地基承载力计算方法。

1 工程背景

云南省某拟建双向四车道高速公路连拱隧道设计时速标准为 80 km/h,中墙采用复合式中墙,中隔

墙地基采用 $\phi 42$ 小导管注浆加固,间距为 80 cm \times 80 cm。内轮廓为半径 5.5 m 的单心圆,衬砌支护参数主要以工程类比法拟定。

IV 级围岩浅埋段和 V 级围岩浅埋段连拱隧道初期支护和二次衬砌参数参数见表 1。

表 1 支护结构及小导管等计算参数

材料	尺寸/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ
锚杆	0.025 \times 0.005 \times 3.5	78.5	210	0.3
中隔墙	1.3 ~ 1.6	23	30	0.25
中导洞初支	0.2	22.7	25.2	0.25
IV 级围岩初支	0.25	22.7	25.2	0.25
IV 级围岩二衬	0.45	23	30	0.25
V 级围岩初支	0.27	22.7	25.2	0.25
V 级围岩二衬	0.6	23	30	0.25

连拱隧道用于 V 级围岩浅埋段衬砌断面见图 1。

2 中隔墙地基受力分析

2.1 计算模型

运用 MIDAS/GTS 有限元分析软件建立二维模型进行连拱隧道施工过程模拟分析。考虑边界效应和计算时效性,计算模型向上取至地面,左右两侧及底部地层范围取 2.5 倍隧道宽度。模型边界条件为左右两侧横向位移约束,上部为自由面,底部为固定约束。计算模型见图 2、图 3。

2.2 基本假定及计算参数

(1) 地层及支护结构的模拟

地层采用遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则的平面实体单元进行模拟,二次衬砌和中隔墙采用理想弹性本构的平面实体单元进行模拟,初期支护采用线弹性本构的梁单元进行模拟,锚杆采用线弹性本构的植入式桁架单元模拟。

(2) 地层参数选取

各级围岩地层分别赋予不同的重度、弹性模量、泊松比、内摩擦角及黏聚力等参数,为方便指导设计及研究规律普遍适用性,IV 级和 V 级围岩分别取现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》^[7]表 A.0.7-1 中各级岩质围岩物理力学参数。各级岩质围岩地层计算参数见表 2。

2.3 施工过程的模拟方法

使用单元的激活和钝化功能来模拟隧道土体开挖和结构支护,地层的初始应力由自重引起,开挖过程中地应力逐步释放以模拟围岩时空效应。考虑中隔墙在中导洞全部贯通后才施作,此时中导洞开挖引

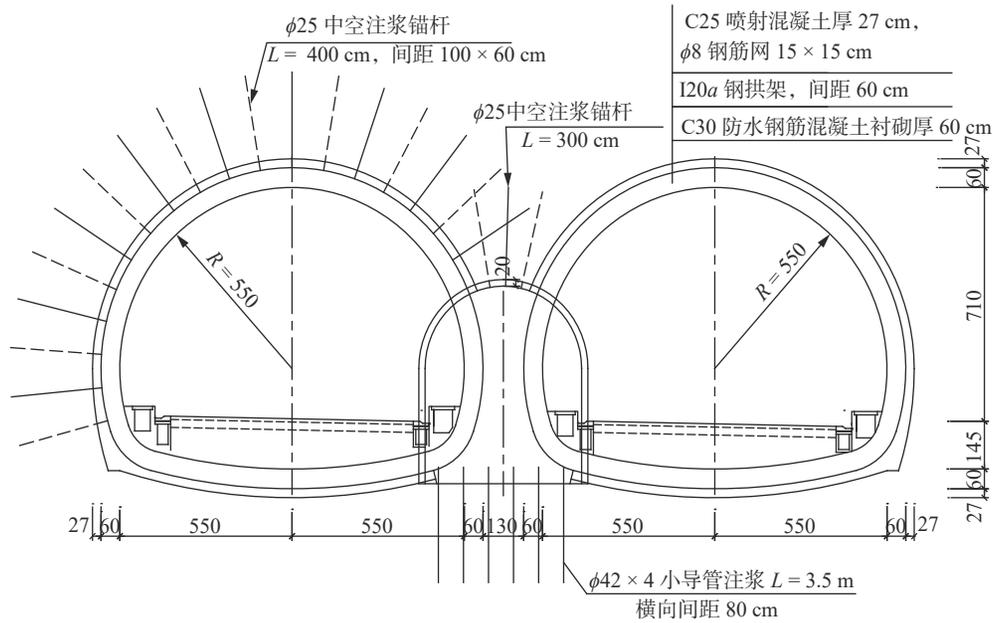


图1 连拱隧道V级围岩浅埋段衬砌断面图(单位:cm)

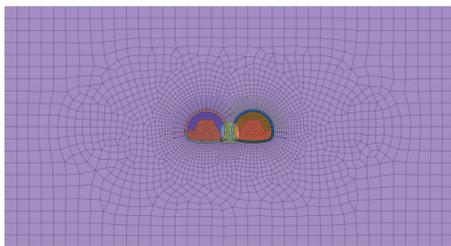


图2 计算模型(拱顶30m埋深工况)

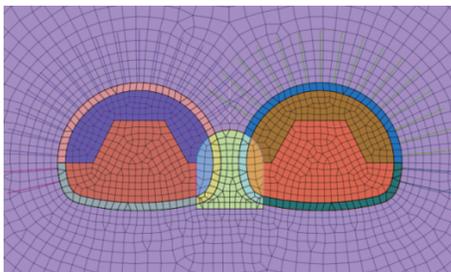


图3 计算模型局部放大图

表2 各级岩质围岩地层计算参数

地层	工况	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	$\varphi/(\text{°})$	c/MPa
IV级围岩	低值	22.5	1.3	0.3	27	0.2
	中值	23.5	3.65	0.325	33	0.45
	高值	24.5	6	0.35	39	0.7
V级围岩	低值	17	0.3	0.35	20	0.05
	中值	19.75	0.7	0.4	23.5	0.125
	高值	22.5	1.1	0.45	27	0.2

起的围岩主要变形已完成,因此在数值模拟过程中对分隔墙浇筑前地层位移清零处理。中导洞—上下台阶预留核心土法施工工序如图4所示。

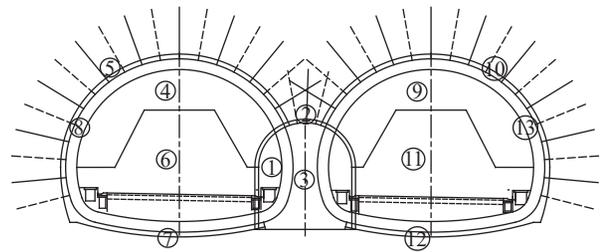


图4 中导洞—上下台阶预留核心土法施工工序

通过以下步骤模拟采用中导洞—上下台阶预留核心土法施工连拱隧道的过程:①中导洞土体开挖;②中导洞初期支护;③中隔墙浇筑;④左洞上台阶土体开挖;⑤左洞上台阶初期支护及拆除中导洞左侧拱腰初期支护;⑥左洞核心土及下台阶土体开挖,拆除中导洞左侧边墙初期支护;⑦左洞下台阶初期支护;⑧左洞二次衬砌浇筑;⑨右洞上台阶土体开挖;⑩右洞上台阶初期支护及拆除中导洞右侧拱腰初期支护;⑪右洞核心土及下台阶土体开挖,拆除中导洞右侧边墙初期支护;⑫右洞下台阶初期支护;⑬右洞二次衬砌浇筑。

2.4 计算结果分析

选取表2中IV级围岩、V级围岩地层参数高、中、低值共六种不同地质条件,在10m、20m、30m、40m和50m隧道拱顶埋深工况下进行数值模拟计算。

(1) 中隔墙基底压力分析

选取两种代表性工况——30m埋深条件下IV级围岩地层参数中值工况和30m埋深条件下V级围岩地层参数中值工况,进行中隔墙基底压力分析。中隔墙基底压力与中隔墙所受地基反力相等,通过调

取连拱隧道中隔墙基底岩体应力计算结果,可以得到各工序中中隔墙基底压力分布情况(见图5)。

从图5可以看出,30 m埋深V级围岩地层参数中值工况:工序③中隔墙浇筑后,基底压力为“马鞍形”分布,随着左洞开挖,中隔墙开始承受上部地层荷载,基底压力逐渐增大,并由对称“马鞍形”分布逐渐变为右侧大左侧小的偏压“马鞍形”分布,基底最大压力值为2.119 MPa,出现在工序⑩右洞二衬浇筑后中隔墙基底右侧墙趾处。中隔墙基底压力分布特

征与文献[5]实测中墙基底压力分布一致。30 m埋深IV级围岩地层参数中值工况:工序③中隔墙浇筑后,基底压力为“马鞍形”分布,随着左洞开挖,中隔墙开始承受上部地层荷载,基底接触压力逐渐增大,中隔墙基底压力重新分布,基底左侧压力逐渐向基底中间转移,由对称“马鞍形”分布逐渐变为左侧“钟形”分布右侧“马鞍形”分布,最终变为完整的“钟形”分布。基底最大压力值为1.748 MPa,出现在工序⑧左洞二衬浇筑后中隔墙基底右侧墙趾处。

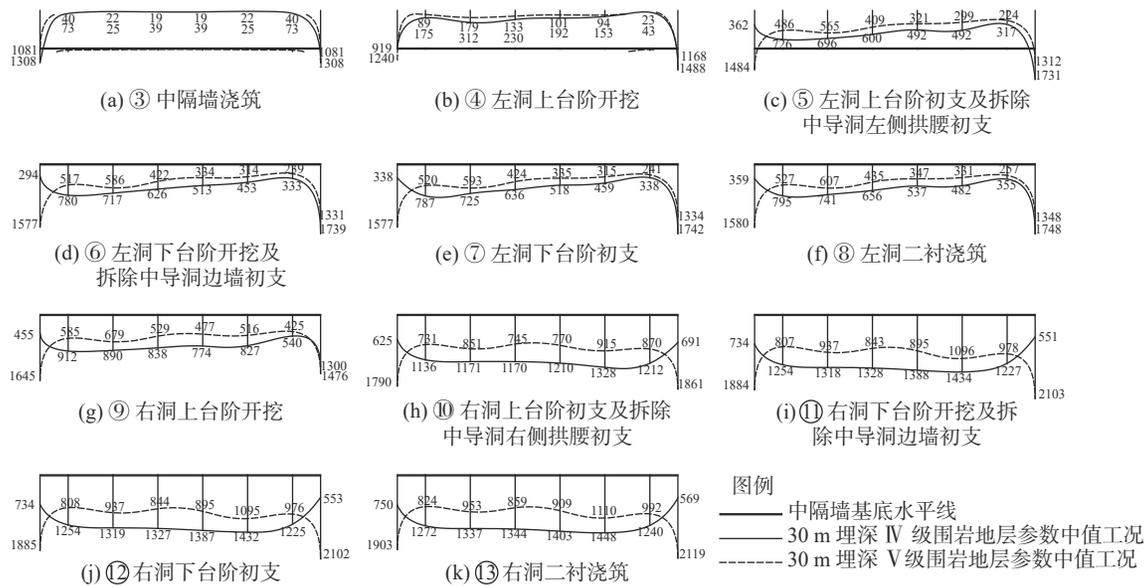


图5 中隔墙基底压力分布(单位:MPa)

经对30种工况计算结果比较分析(限于篇幅,其他工况不逐一展示),围岩较好、埋深较小工况中隔墙基底压力分布及发展同30 m埋深IV级围岩地层参数中值工况,基底压力分布随施工过程由“马鞍形”分布逐渐变为“钟形”分布,最大基底压力出现在先

行洞衬砌浇筑时右侧墙趾处;在围岩较差或埋深较大时中隔墙基底压力分布呈“马鞍形”分布,最大基底压力出现在后行洞二衬浇筑时基底中间偏右处。对不同地层、埋深条件下中隔墙基底最大压力值和发生时的施工工序进行统计,结果如表3所示。

表3 各工况连拱隧道中隔墙基底最大压力值

拱顶埋深/m	基底最大压力值/MPa					
	IV级围岩			V级围岩		
	$\varphi=27^\circ$ $c=200$ kPa $E=1.3$ GPa	$\varphi=33^\circ$ $c=450$ kPa $E=3.65$ GPa	$\varphi=39^\circ$ $c=700$ kPa $E=6$ GPa	$\varphi=20^\circ$ $c=50$ kPa $E=0.3$ GPa	$\varphi=23.5^\circ$ $c=125$ kPa $E=0.7$ GPa	$\varphi=27^\circ$ $c=200$ kPa $E=1.1$ GPa
10	1.338⑧	1.251⑧	1.196⑧	1.539⑬	1.302⑬	1.144⑬
20	1.844⑧	1.886⑧	1.903⑧	2.110⑬	1.880⑬	1.584⑬
30	1.648⑧	1.748⑧	1.828⑧	2.529⑬	2.119⑬	1.772⑬
40	1.819⑬	1.785⑬	1.844⑬	3.206⑬	2.225⑬	1.609⑬
50	2.213⑬	2.175⑬	2.217⑬	2.799⑬	2.407⑬	1.593⑬

注:带圈数字表示对应施工步骤编号。

从表3可以看出,当围岩较好、埋深较小时,基底最大压力出现在工序⑧,而其他工况下基底最大压

力出现在工序⑬,下面进行简要机理分析。在围岩较差工况时地基相对刚度小,中隔墙基础表现为刚性

基础的地基反力分布特征,基底最大压力出现在基底两侧边缘,在隧道开挖过程中基础两侧边缘基底塑性区持续发展,基底边缘最大应力也随着隧道开挖持续增大,最终在工序⑬产生基底最大压力。在围岩较好、埋深较小工况时地基相对刚度大,中隔墙基础表现出一定的柔性基础特性,在隧道开始开挖时所受荷载较小,基底最大压力出现在基础两侧,在不对称开挖偏心荷载叠加作用下,在工序⑧偏心荷载最不利时基础边缘产生最大基底压力,并随着右洞开挖荷载偏心距减小及地应力重分布,基底压力从集中于基础边缘逐渐向中部均匀分布发展,工序⑬基底最大压力

未超过工序⑧。而在围岩较好、埋深较大工况时,较大埋深对中隔墙基底地基承载力有一定提高,限制了基底两侧的塑性变形,基底压力分布发展表现出与围岩较差工况相似的特征。

(2) 中隔墙地基竖向变形分析

同样选取两种代表性工况——30 m埋深条件下Ⅳ级围岩地层参数中值工况和30 m埋深条件下Ⅴ级围岩地层参数中值工况,进行中隔墙地基竖向变形分析,通过调取中隔墙基底地层竖向变形计算结果,可以得到施工过程中中隔墙地基竖向变形分布情况,如图6所示。

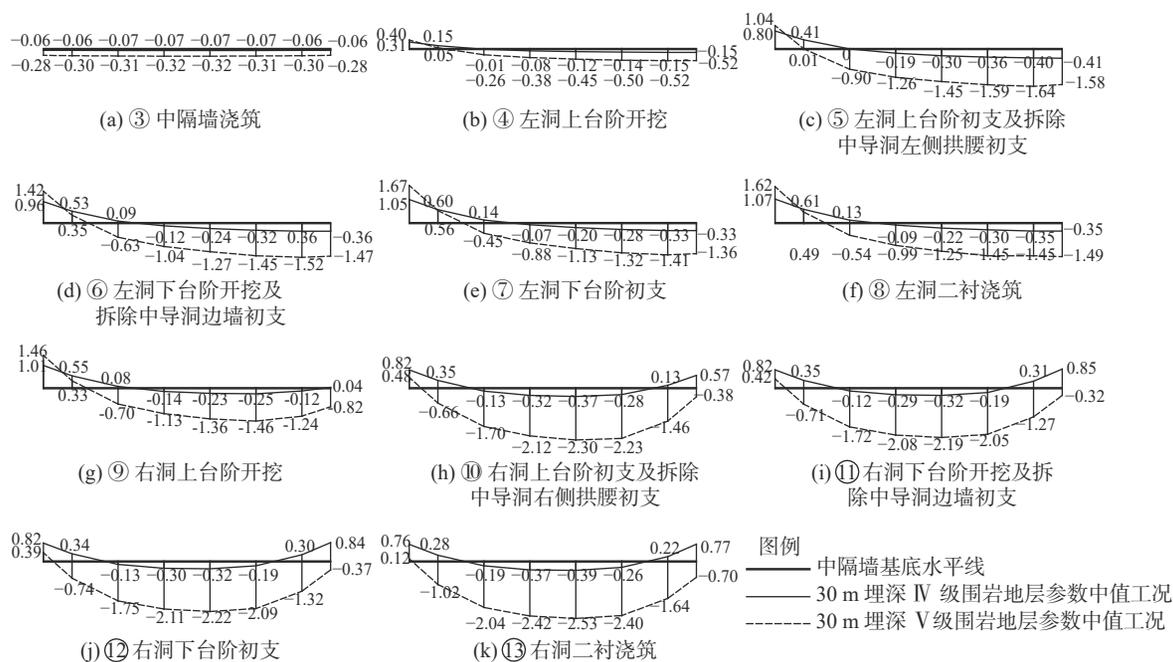


图6 中隔墙基底地基竖向变形分布(单位:mm)

从图6可以看出,两种工况下地基竖向变形发展在形态上基本一致。左洞开挖引起中隔墙基础左侧墙趾上翘右侧墙趾下沉,中隔墙基础向右偏转,随着右洞开挖,中隔墙基础偏转得到纠正,在右洞施工结束后,中隔墙基础稍微右偏,中隔墙在施工工程中一直呈现向右偏压状态。30 m埋深Ⅴ级围岩地层参数中值工况中隔墙基础在施工工程中总体上处于沉降变形状态,基底地基最大沉降变形值为2.53 mm,出现在工序⑬右洞二衬浇筑后中隔墙基底中间偏右处,该工况基底地基竖向变形特征及发展与文献[4]数值计算结果基本一致;30 m埋深Ⅳ级围岩地层参数中值工况中隔墙基础在施工工程中总体上处于隆起变形状态,基底地基最大隆起变形值为1.67 mm,出现在工序⑦左洞下台阶初支后中隔墙基底左侧墙趾处。

经对30种工况计算结果比较分析,围岩较差或埋深较大工况中隔墙地基竖向变形分布及发展与30 m埋深Ⅴ级围岩地层参数中值工况相似,表现为中隔墙基础在施工工程中总体上处于沉降变形状态,地基最大沉降变形值出现在工序⑬右洞二衬浇筑后中隔墙基底中间偏右处;围岩较好、埋深较小工况中隔墙基底竖向变形分布及发展与30 m埋深Ⅳ级围岩地层参数中值工况相似,表现为中隔墙基础在施工工程中总体上处于隆起变形状态,地基最大隆起变形值出现在工序⑦左洞下台阶初支后中隔墙基底左侧墙趾处。

3 中隔墙地基承载力检算及注浆加固

3.1 加固前岩石地基承载力计算方法

加固前岩石地基承载力可根据《建筑地基基础设计规范》^[8]中岩石地基承载力特征值计算公式进行

估算, 见式(1)。

$$f_a = \Psi_r \cdot f_{rk} \quad (1)$$

式中: f_a 为岩石地基承载力特征值, MPa; f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值, MPa; Ψ_r 为折减系数, 无经验时, 对完整岩体可取 0.5, 对较完整岩体可取 0.2 ~ 0.5, 对较破碎岩体可取 0.1 ~ 0.2。

岩石饱和单轴抗压强度标准值 f_{rk} 可按《岩土工程勘察规范》^[9] 第 3.2.2 条根据岩石坚硬程度取值, 两者对应关系见表 4。

表 4 对应坚硬程度的岩石饱和单轴抗压强度范围

岩石饱和单轴抗压强度 f_{rk} /MPa				
坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
>60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	<5

因此, 地基承载力特征值可根据岩体完整程度和岩石坚硬程度定性判断估算, 得到的岩石地基承载力特征值范围如表 5 所示。

表 5 岩石地基承载力特征值 f_{ak}

岩石地基承载力特征值 f_{ak} /MPa					
岩体完整程度	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
完整	>30	30 ~ 15	15 ~ 7.5	7.5 ~ 2.5	<2.5
较完整	>12	12 ~ 6	6 ~ 3	3 ~ 1	<1
较破碎	>6	6 ~ 3	3 ~ 1.5	1.5 ~ 0.5	<0.5

可从表 3 查到不同埋深、地质条件下连拱隧道中隔墙基底最大压应力 p_{\max} , 按式(2)检算中隔墙地基承载力。对于岩体完整程度为破碎和极破碎时, 可根据具体地质情况确定折减系数 Ψ_r , 也可采用岩基荷载试验和平板荷载试验直接测定地基承载力。

$$p_{\max} \leq f_a \quad (2)$$

3.2 注浆加固后岩石地基承载力计算方法

当 $p_{\max} > f_a$ 时, 地基承载力不满足要求, 需要进行地基加固处理。采用小导管注浆加固方案, 加固后地基应满足式(3)的要求。

$$p_{\max} \leq f_{aj} \quad (3)$$

式中: f_{aj} 为注浆加固后地基承载力特征值, MPa。

许宏发等^[10]通过对不同学者获得的注浆前后岩体强度的试验值进行非线性拟合分析, 提出了岩体注浆加固体强度增长率的经验公式, 见式(4)、式(5)。

$$\xi_c = \frac{3.2543}{(2.45 + \log_{10}\eta)^2} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{f_{rk}}{q_c} \quad (5)$$

式中: ξ_c 为注浆后岩体单轴抗压强度增长率; η 为原岩体与浆液结石强度比; q_c 为浆液结石强度, MPa, 水灰质量比为 0.75 时, q_c 取 12.37 MPa, 水灰质量比为 1 时, q_c 取 7.32 MPa, 水灰质量比为 1.2 时, q_c 取 5.03 MPa。

注浆加固后岩体单轴抗压强度标准值 f_{jk} 可按式(6)计算。

$$f_{jk} = (1 + \xi_c) \cdot f_{rk} \quad (6)$$

式中: f_{jk} 为注浆加固后岩体单轴抗压强度标准值, MPa。

注浆加固后岩石地基承载力特征值由式(7)确定。

$$f_{aj} = \Psi_r \cdot f_{jk} \quad (7)$$

3.3 连拱隧道中隔墙地基承载力检算实例

某高速公路连拱隧道概况: 全隧均为 V 级围岩, 拱顶最大埋深约 30 m, 岩层重度 $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi=23.5^\circ$, 黏聚力 $c=125 \text{ kPa}$, 弹性模量 $E=0.7 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.4$, 围岩为强风化较软岩, 岩体较破碎, 饱和单轴抗压强度标准值 $f_{rk} = 16 \text{ MPa}$ 。试检算中隔墙地基是否需要加固处理。

中隔墙地基承载力检算及地基加固措施制定如下:

(1)根据围岩地层物理力学参数, 查表 3 可知, 该工点中隔墙基底最大压力 $p_{\max}=2.119 \text{ MPa}$ 。当地层参数、埋深条件与表 3 不一致时, 可采用内插法求得基底最大压力。

(2)按式(1)计算加固前岩石地基承载力特征值 $f_a = (0.1 \sim 0.2) \times 16 = 1.6 \sim 3.2 \text{ MPa}$, 缺少地区经验, 取较小值 $f_a=1.6 \text{ MPa}$ 。

(3)地基承载力检算: $p_{\max} > f_a$, 不满足要求, 需要对中隔墙地基进行加固处理。

(4)地基拟采用 $\phi 42$ 小导管注浆加固处理, 浆液采用普通硅酸盐水泥砂浆, 水灰质量比 1 : 1, 取浆液结石强度 $q_c = 7.32 \text{ MPa}$, 按式(4)一式(7)计算, 则有:

$$\eta = \frac{f_{rk}}{q_c} = \frac{16}{7.32} = 2.186$$

$$\xi_c = \frac{3.2543}{(2.45 + \log_{10}2.186)^2} = 0.418$$

$$f_{jk} = (1 + 0.418) \times 16 = 22.688 \text{ MPa}$$

$$f_{aj} = 0.1 \times 22.688 = 2.269 \text{ MPa}$$

$$p_{\max} = 2.119 \text{ MPa} < f_{aj} = 2.269 \text{ MPa}$$

检算结果表明,采用水灰质量比 1:1 的水泥砂浆小导管注浆后,中隔墙地基满足基底承载力要求。

4 结论

依托云南省某拟建高速公路连拱隧道,采用 MIDAS/GTS 软件对浅埋Ⅳ级围岩和浅埋Ⅴ级围岩条件下连拱隧道中导洞—上下台阶预留核心土法施工时中隔墙地基受力及变形特征进行了系统分析,主要结论如下:

(1)连拱隧道在围岩较好、埋深较小时,中隔墙基底压力分布随施工过程由“马鞍形”分布逐渐变为“钟形”分布,最大基底压力出现在先行洞衬砌浇筑后右侧墙趾处,中隔墙基础总体上处于隆起变形状态。

(2)连拱隧道在围岩较差或埋深较大时,中隔墙基底压力分布呈“马鞍形”分布,最大基底压力出现在后行洞二衬浇筑后中间偏右处,中隔墙地基总体上处于沉降变形状态。

(3)通过数值分析得到不同埋深、地质条件下连拱隧道中隔墙基底最大压力值,并结合现行规范及前人研究成果,提出了中隔墙岩石地基加固前后地基承载力的计算方法,可为连拱隧道中隔墙地基设计提供参考。

参考文献

- [1] 李武,朱合华.连拱隧道典型裂缝、渗漏水病害调查与分析研究[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2006,26(2):20-25.
- [2] 蒲治戎.大断面连拱隧道中隔墙力学行为及稳定性研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [3] 高登,林孔斌.扩建连拱隧道初期支护及中墙受力研究[J].公路交通技术,2018,34(S1):12-17.
- [4] 邱军领,赖金星,郭春霞,等.黄土连拱隧道中墙力学特征现场测试与分析[J].现代隧道技术,2019,56(2):134-143.
- [5] 杨果林,葛云龙,彭伟,等.连拱隧道复合式曲中墙受力现场监测分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2019,47(1):55-59.
- [6] 袁树成.极浅埋连拱隧道中隔墙受力特征模型试验研究[J].现代交通技术,2018,15(5):31-35.
- [7] JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [8] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [9] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 许宏发,耿汉生,李朝甫,等.破碎岩体注浆加固强度估计[J].岩土工程学报,2013,35(11):2018-2022.

收稿日期:2022-02-07