

软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术研究

李军

(湖南建工交通建设有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 依托某实际工程, 采用 Abaqus 建立三维数值分析模型, 研究不同净距和坡度对软弱围岩偏压小净距隧道中夹岩围岩塑性区发展规律的影响, 并研究中空注浆锚杆长度变化对中夹岩及隧道稳定性的影响, 得到合理加固参数。结果表明: 随着坡度和净距的变化, 中夹岩柱塑性区的表现形式可分为塑性区中心贯通、塑性区边缘贯通和塑性区分离 3 种类型; 塑性区中心贯通产生的围岩塑性变形要比塑性区边缘贯通和塑性区分离的围岩塑性变形严重得多; 当净距小于 10 m 时, 中夹岩柱处于塑性区贯通破坏状态, 需要对中夹岩柱进行加固; 基于锚杆长度变化对锚杆轴力及隧道位移的影响, 锚杆长度取 4 m 较为合理, 对于偏压小净距隧道, 浅埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较小值, 深埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较大值。

关键词: 软弱围岩; 小净距隧道; 地形偏压; 中夹岩; 加固参数; 围岩稳定性

由于软弱围岩具有强度小、变形大的特点, 小净距隧道中夹岩柱厚度较小, 在隧道施工过程中多次受到扰动容易发生塑性破坏, 为了保证中夹岩稳定性, 应采取相应的加固措施对其进行加固处理。确定合理的中夹岩加固范围参数是软弱围岩偏压小净距隧道设计和施工过程中需重点关注的问题, 不仅是保证中夹岩柱加固措施有效性的必要前提, 也是提高施工效率和效益的重要举措。

目前许多学者对偏压小净距隧道中夹岩柱扰动效应及加固保护措施进行了相关研究。何川等、许书生

等、王更峰等、唐陶文等、刘芸等、万民科采用二维弹塑性数值计算方法, 依托实际工程, 研究了不同的加固措施(预应力锚杆加固、小导管注浆、普通锚喷支护及不同组合形式)对小净距中夹岩柱扰动效应的控制效果, 并对几种加固措施进行了适应性比选研究; 杨建平等、黄志义等、章慧健等、张其来等、李君君等、谢俊杰等结合实际工程的施工特点, 基于数值模拟及模型试验方法, 分别研究了支护时机、施工顺序、施工方法对小净距隧道中夹岩稳定性的影响, 为实际工程中夹岩加固方案的制定提供了理论依据。已有研究对于中夹岩加

参考文献:

- [1] 郭健, 阳军生, 陈维, 等. 基于现场实测的炭质板岩隧道围岩大变形与衬砌受力特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019(4).
- [2] 王维富. 炭质板岩地层隧道施工要点及大变形防治措施[J]. 隧道建设, 2010(6).
- [3] 王一鸣, 任登富, 王立川, 等. 三联隧道穿越煤系地层软岩大变形控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013(S1).
- [4] 王立川, 肖小文, 林辉. 某铁路隧道底部结构隆起病害成因分析及治理对策探讨[J]. 隧道建设, 2014(9).
- [5] 王树英, 阳军生, 李习平. 高地应力凝灰岩地层铁路隧道支护结构大变形的原因及其整治[J]. 中国铁道科学, 2014(5).
- [6] 郑波, 吴剑, 吴晓龙. 水压力作用下隧道底部结构裂损机理及其防治[J]. 铁道工程学报, 2017(1).
- [7] 崔连友, 吴剑, 郑波. 雪峰山隧道进口段仰拱填充结构开裂原因探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015(1).
- [8] 康涛, 胡斌, 刘传新. 槽管头隧道病害机理分析及治理方案研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013(S2).
- [9] 丁冬冬, 梁庆国, 徐善常, 等. 软化泥岩对隧道仰拱的受力特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016(10).
- [10] 云南省交通规划设计研究院. 国家高速公路网 G0613 云南省香格里拉至丽江高速公路第 7 标段两阶段施工图设计. 第四册《隧道》[Z], 2015.

固往往只能结合具体依托工程进行规律性研究与加固措施效果分析,而对于加固范围参数量化的研究甚少,目前对于加固范围参数的取值大多凭借经验,往往会给工程带来经济性的浪费或者安全隐患,因此有必要对其开展相关研究。

该文基于实际工程,采用 Abaqus 建立数值分析模型,研究不同净距和坡度对软弱围岩偏压小净距隧道中夹岩围岩塑性区发展规律的影响,并研究中空注浆锚杆长度变化对中夹岩变形影响,得到合理加固参数。

1 工程概况

某隧道为高速公路双向四车道隧道,隧道开挖高度 10.44 m,单洞开挖宽度 13.31 m。隧道进口段为小净距段,围岩等级为 V 级,围岩强度低,隧道小净距长度 140 m,最小净距 6.5 m,隧道小净距段地面最大坡度 45°,左洞较右洞埋深浅,存在明显的地形偏压,现场隧道施工采用上下台阶法,开挖时先开挖浅埋洞,再开挖深埋洞,隧道施工风险较大,中夹岩强度低,变形较大,需要对中夹岩进行加固处理。隧道二衬采用 C30 钢筋混凝土,厚度为 0.5 m,初期支护采用 $\phi 6$ mm 钢筋网(20 cm \times 20 cm)+26 cm C25 混凝土+I20a 钢拱架,纵向间距 0.5 m,隧道拱部、边墙及中夹岩柱采用 $\phi 25$ mm 中空注浆锚杆进行加固,中夹岩区域锚杆长度 5.5 m,其余区域锚杆长度 4.5 m,隧道支护横断面如图 1 所示。

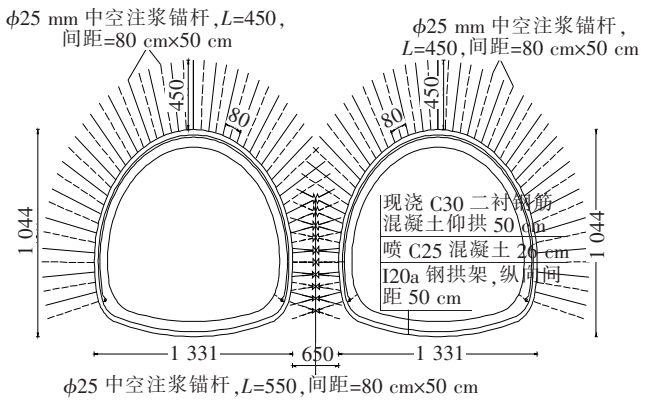


图 1 隧道支护横断面(单位:cm)

2 有限元模型建立

基于 Abaqus 建立三维数值分析模型(图 2),模型

宽度 120 m,高度 100 m,纵向深度 100 m,围岩选取实体单元模拟,定义模型的上边界为自由边界,对模型左右边界 x 方向、模型底部 y 方向的位移进行约束,前后方向 z 方向进行约束。设置坡度和净距工况如表 1 所示,计算参数见表 2。

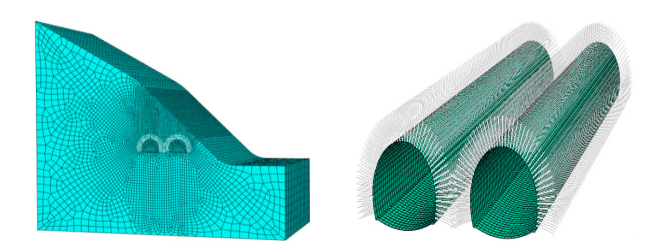


图 2 有限元模型

表 1 V 级围岩计算工况

| 净距/m | 偏压坡度/(°) | | | | | | |
|------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 55° | 60° |
| 2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 6 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | — |
| 8 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 10 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 12 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 16 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 18 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 20 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

注:✓表示计算工况。

表 2 计算参数(V 级围岩)

| 弹性模量/GPa | 泊松比 | 密度/(kg \cdot m ⁻³) | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 抗拉强度/MPa |
|----------|------|----------------------------------|---------|----------|----------|
| 2 | 0.35 | 1 800 | 0.2 | 27 | 0.2 |

3 计算结果分析

提取不同计算工况下中夹岩塑性区结果见图 3。由图 3 可知:

(1) 当净距较大而坡度较小时,以净距 >18 m 的工况为例,两洞开挖各自引起的塑性区没有相交区域,将其称为塑性区分离;当 10 m $<$ 净距 <18 m 时,在洞顶上方的中夹岩柱部位出现塑性区贯通,但该部位是塑性变形量值很小的塑性区边缘位置,最大等效塑性

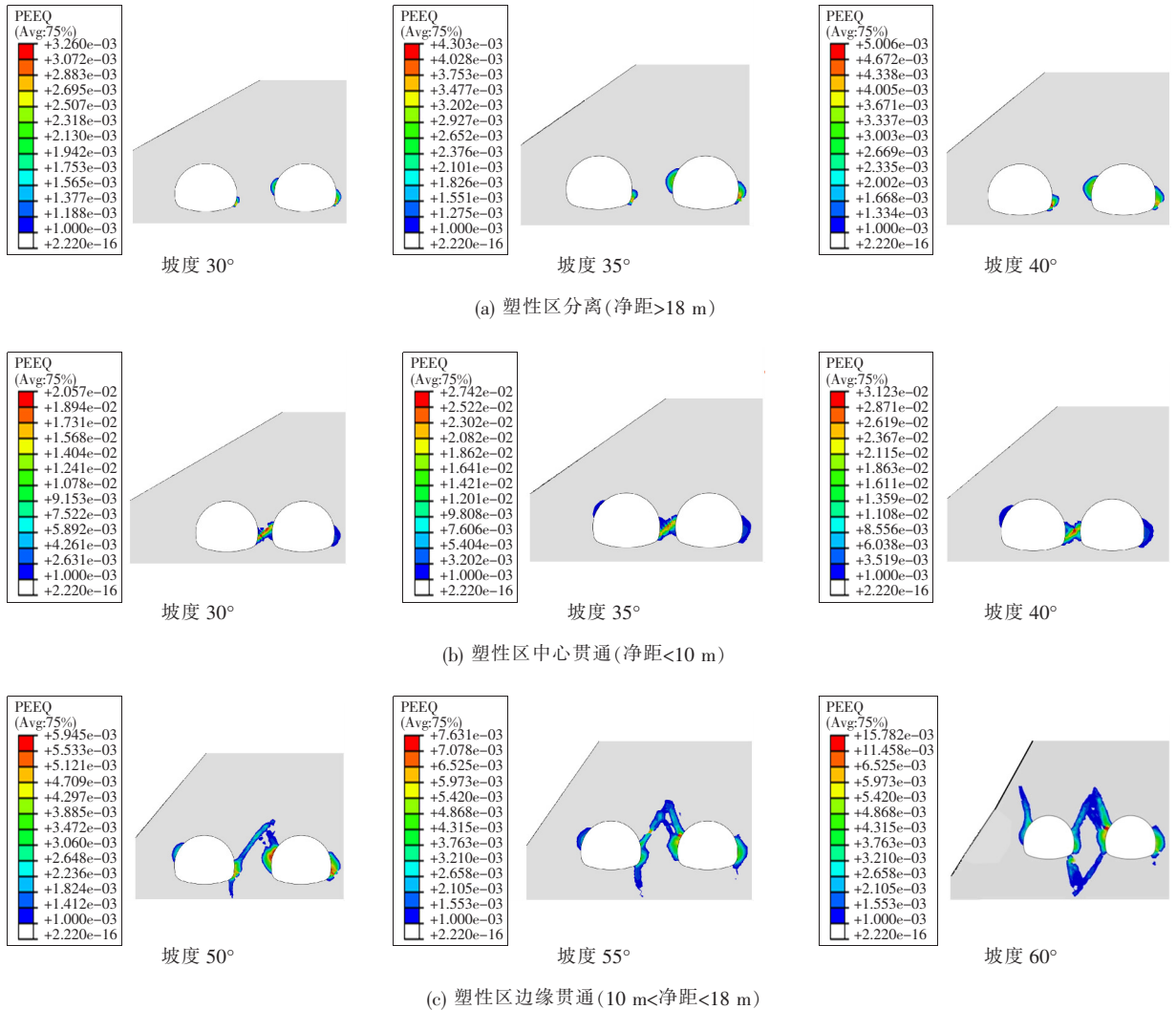


图 3 塑性区变化(单位:m)

应变位于隧道开挖轮廓面附近,而没有出现在塑性区贯通位置,将其称为塑性区边缘贯通。在净距较小时,以净距 $<10\text{ m}$ 的工况为例,深埋洞和浅埋洞的塑性区相互贯通,且其塑性区贯通位置处于两洞开挖引起的塑性变形量较大的塑性区中心位置,最大等效塑性应变均位于贯通区域内,此时表现为塑性区中心贯通。

(2) 塑性区边缘贯通其实质是在从塑性区中心贯通到塑性区分离的一种过渡形态,只出现在坡度大、偏压严重的情况下。随着净距的增加,这些塑性区边缘贯通最后都将变成塑性区分离形式;塑性区中心贯通产生的围岩塑性变形要比塑性区边缘贯通和塑性区分离的围岩塑性变形严重得多。因此,应作为小净距隧道中夹岩加固处理的重点。

为了进一步分析净距变化对中夹岩围岩稳定性的影响,运用岩石抗剪安全系数 K ,对各特征点按式(1)进行强度验算,以安全系数允许值 $[K]\geq 1.2$ 作为中

夹岩柱围岩稳定性判别条件。

$$K = \frac{c \cdot \cos\varphi - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin\varphi}{\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (1)$$

式中: K 为抗剪安全系数; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; σ_1, σ_3 为最大、最小主应力。

中夹岩特征点布置如图 4 所示,提取不同小净距下中夹岩 A、B、C 共 3 个特征点抗剪安全系数计算结果如图 5 所示。

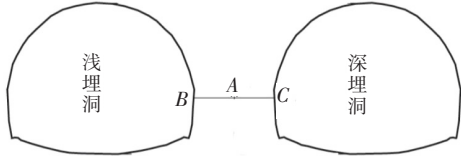


图 4 中夹岩柱特征点布置图

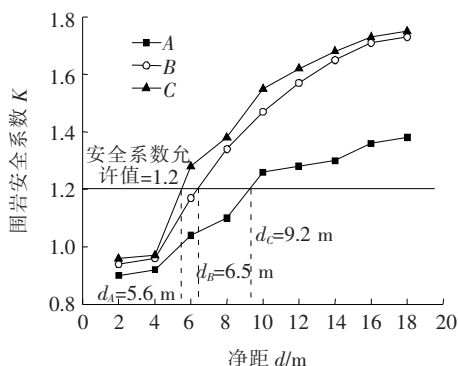


图5 特征点围岩抗剪安全系数变化曲线

由图5可知:围岩抗剪安全系数随净距增加而逐渐增大,各特征点的变化规律基本一致,增大速度越来越小,最终将趋于稳定。A、B、C 所对应的净距分别为 5.6、6.5、9.2 m 时,中夹岩柱特征点抗剪安全系数达到临界值 1.2,中夹岩中中心位置抗剪安全系数小于深埋洞与浅埋洞边缘安全系数。当净距小于 10 m 时,中夹岩柱抗剪安全系数小于允许值,中夹岩柱处于塑性区贯通破坏状态,需要对中夹岩柱进行加固,以保证中夹岩的稳定性,当净距大于 10 m,中夹岩柱抗剪安全系数大于允许值,中夹岩柱未出现剪切破坏,可不对中夹岩进行加固。

4 锚杆长度对中夹岩柱加固效果的分析

由前文分析可知,当净距为 5.6 m 时,中夹岩柱稳定性达到临界状态,为了更好地体现锚杆长度的加固效果,提取净距为 5.6 m 时,隧道中夹岩柱在未加固情况下的塑性区分布图见图 6。A、B、C 特征点位置围岩抗剪安全系数分别为 0.98、1.12、1.2。

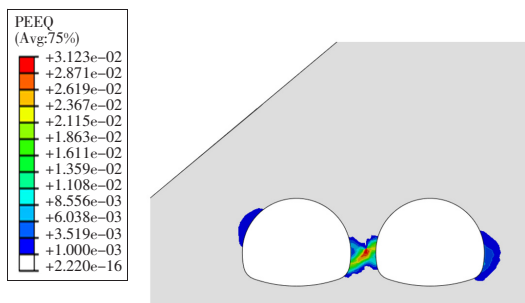


图6 未加固情况下隧道塑性区分布(单位:m)

由图6可知:该工程在中夹岩未采取加固措施下,隧道施工过程中中夹岩产生位移较大,中夹岩最大位移为 31.2 mm,且中夹岩柱特征点抗剪安全系数均小

于 1.2,出现塑性区中心贯通破坏,为了有效地控制中夹岩塑性区范围的扩展,现场应对中夹岩进行加固。

确定锚杆长度成为加固方案的关键问题,不同锚杆长度下锚杆轴力、中夹岩位移、浅埋侧和深埋侧拱顶沉降及衬砌结构安全系数计算结果如图 7~10 所示。

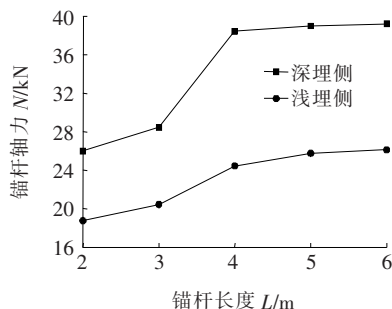


图7 锚杆长度对轴力的影响

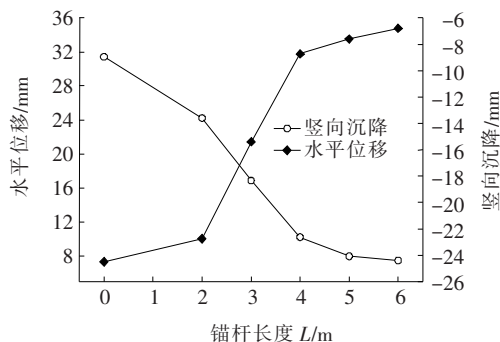


图8 锚杆长度对位移的影响

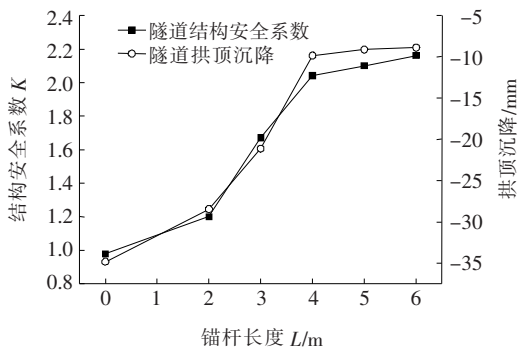


图9 锚杆长度对浅埋侧隧道结构的影响

由图7~10可知:

(1) 当锚杆长度小于 4 m 时,锚杆轴力随着锚杆长度增大而增大较为明显,当锚杆长度大于 4 m 时,锚杆轴力随长度增大而变化较小,且最终趋于稳定;增大锚杆长度对中夹岩位移控制效果较为明显,随着锚杆长度的增大,中夹岩位移逐渐减小,且最终趋于稳定,在锚杆长度为 4 m 时,继续增大锚杆长度对减小中夹岩位移效果不明显;基于锚杆长度变化对锚杆轴

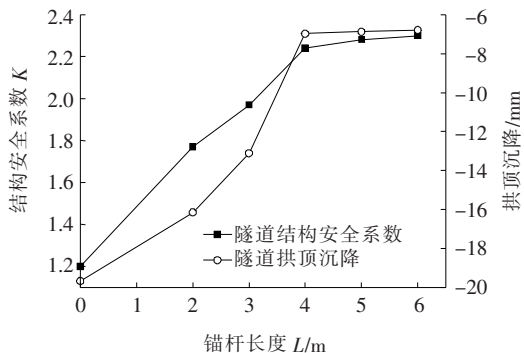


图 10 锚杆长度对深埋侧隧道结构的影响

力及中夹岩位移的影响,锚杆长度取 4 m 较为合理。

(2) 深埋洞侧锚杆轴力要远大于浅埋侧,且随锚杆长度变化更为显著,深埋侧锚杆受力较浅埋侧锚杆受力更为不利,这是由于地形存在偏压效应,导致深埋侧围岩压力比浅埋侧要大,锚杆受力呈现不对称性,因此,对于偏压小净距隧道,其支护参数可以进行合理的调整,对于浅埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较小值,深埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较大值,以使浅、深埋两洞受力更加合理。

(3) 当锚杆长度小于 4 m 时,隧道拱顶沉降及安全系数随着锚杆长度增大而变化较为明显,当锚杆长度大于 4 m 时,隧道拱顶沉降及安全系数随长度增大而变化较小,且最终趋于稳定;增大锚杆长度对减小拱顶沉降及增大隧道结构安全性效果较为明显,基于锚杆长度变化对锚杆轴力、中夹岩位移、隧道拱顶沉降及安全系数的影响,锚杆长度取 4 m 较为合理。

5 中夹岩注浆加固效果分析

现场最终采取 $\phi 25$ mm 中空注浆锚杆加固措施对中夹岩进行加固,间距为 80 cm(环向)×50 cm(纵向),浅埋侧中夹岩锚杆长度取 4 m,深埋侧锚杆长度取 4.5 m,并对现场隧道的水平和竖向位移及锚杆轴力进行监测,现场位移监测点(O、A、B、C、D、E 点)布置如图 11 所示,其中 B、D、E 点为竖向位移监测点, O、A、C 点为中夹岩柱水平位移监测点,水平位移测试采用预埋测斜管进行测试, A、C 点位置锚杆轴力采用锚杆轴力计,隧道施工监测时间为 2017 年 3 月到 2017 年 8 月,各监测点量测数据如图 12~14 所示。

由图 12~14 可知:

(1) 隧道位移及锚杆轴力随着施工时间增大先增

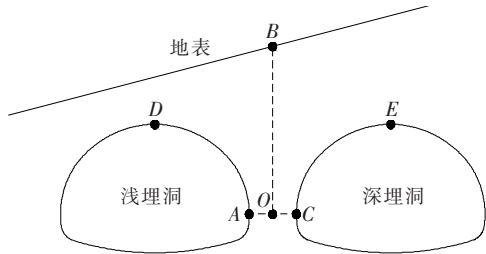


图 11 中夹岩现场监测点布置

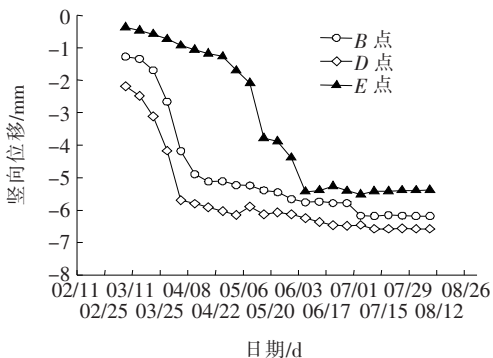


图 12 监测点竖向位移

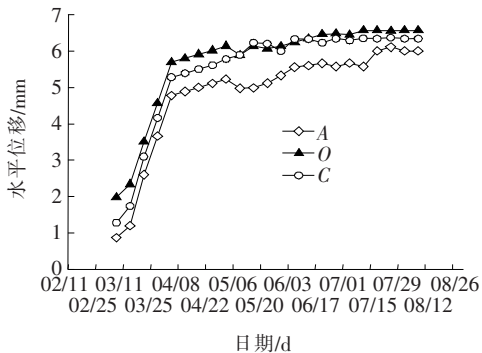


图 13 监测点水平位移(位移朝浅埋侧为正)

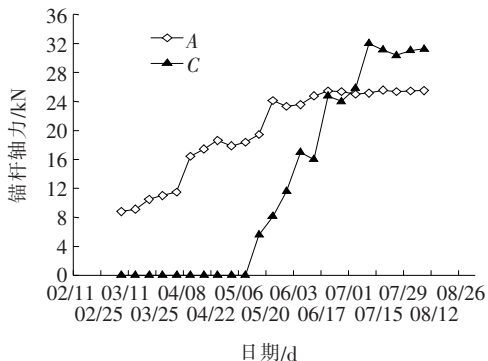


图 14 锚杆轴力监测结果

大,最终趋于稳定,中夹岩中部水平位移要大于边缘位移,随着隧道的施工中夹岩柱整体往浅埋侧偏移,且浅埋侧水平位移与竖向位移要大于深埋侧位移。

(2) 隧道施工完成时隧道最大拱顶沉降为 -6.57 mm,中夹岩柱最大水平位移为 6.8 mm,锚杆最大轴力为 34.14 kN,相比未加固情况下的中夹岩最大水平位移(31.4 mm)、拱顶沉降(-34.7 mm)显著减小,说明在整个隧道段施工过程中,现场采用的加固措施有效地控制了中夹岩的变形。

6 结论与建议

(1) 随着坡度和净距的变化,中夹岩柱塑性区将会表现为塑性区中心贯通、塑性区边缘贯通和塑性区分离3种类型;塑性区中心贯通产生的围岩塑性变形要比塑性区边缘贯通和塑性区分离的围岩塑性变形严重得多,应作为小净距隧道中夹岩加固处理重点。

(2) 当净距小于 10 m时,中夹岩柱抗剪安全系数小于允许值,中夹岩柱处于塑性区贯通破坏状态,需要对中夹岩柱进行加固,以保证中夹岩稳定性;当净距大于 10 m,中夹岩柱抗剪安全系数大于允许值,可不对中夹岩进行加固。

(3) 基于锚杆长度变化对锚杆轴力、中夹岩位移、隧道拱顶沉降及安全系数的影响,锚杆长度取 4 m较为合理,对于偏压小净距隧道,浅埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较小值,深埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较大值。

(4) 现场加固措施实施后隧道施工完成时隧道最大拱顶沉降为 -6.57 mm,中夹岩柱最大水平位移为 6.8 mm,相比未加固情况下的中夹岩柱位移和隧道拱顶沉降显著减小,现场采用的加固措施有效地控制了中夹岩及隧道沉降变形。

参考文献:

[1] 晏启祥,何川,姚勇,等.软岩小净距隧道施工力学效应研

究[J].地下空间与工程学报,2005(5).

- [2] 许书生,曾祥国,姚安林,等.小净距隧道开挖工艺对围岩稳定性的影响[J].四川建筑科学研究,2009(3).
- [3] 王更峰,熊晓晖,张永兴,等.大跨小净距隧道合理开挖方法与支护参数对比研究[J].公路交通科技,2011(3).
- [4] 唐陶文,傅鹤林,张加兵,等.分岔隧道中夹岩柱围岩应力及最小厚度研究[J].铁道科学与工程学报,2016(8).
- [5] 刘芸,周玉兵.软岩小净距隧道中夹岩柱分区及加固方法研究[J].地下空间与工程学报,2013(2).
- [6] 万民科.浅埋偏压小净距隧道施工技术及其力学特性研究[D].中南大学硕士学位论文,2013.
- [7] 杨建平,陈卫忠,郭小红.小净距公路隧道支护时机对围岩稳定性影响研究[J].岩土力学,2008(2).
- [8] 黄志义,叶冬明,王金昌.软弱围岩下小净距隧道中岩柱加固方法分析[J].世界科技研究与发展,2010(2).
- [9] 章慧健,仇文革,冯冀蒙.小净距隧道夹岩力学特征分析[J].岩土工程学报,2010(3).
- [10] 张其来,金立丰.大偏压小净距隧道施工方法分析[J].公路工程,2016(4).
- [11] 李君君,石文广,骆宪龙,等.高边坡节理发育岩体条件下小净距隧道施工的数值模拟[J].公路工程,2015(5).
- [12] 李君君,王海彦,吕学科,等.柱状节理偏压小净距公路隧道稳定性研究[J].中外公路,2017(2).
- [13] 谢俊杰,邓杰夫,凌同华.藻溪隧道反压拱施工和优化分析[J].中外公路,2016(5).
- [14] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].
- [15] 李树忱,李术才,徐帮树.隧道围岩稳定分析的最小安全系数法[J].岩土力学,2007(3).
- [16] 吴德兴,李伟平,谢宝超,等.陡坡偏压小净距隧道施工扰动空间效应研究[J].铁道科学与工程学报,2016(5).
- [17] 王鹏,杜文涛,汤明,等.复杂岩溶区特大断面小净距隧道洞口塌方处治技术[J].中外公路,2019(2).
- [18] 李松,陈秋南,黄林华.软弱围岩浅埋小净距隧道合理净距影响因素探讨[J].中外公路,2019(3).