

基于变形控制的凝灰岩隧道稳定性评判 基准研究

乔世范,蔡子勇,肖源杰,王超

(中南大学土木工程学院,湖南长沙410075)

摘要 目的 针对绍兴特定地区,建立隧道施工围岩稳定性评判指标及控制基准。
方法 采用数理统计方法,对已有的718个监测断面的拱顶沉降实测数据进行归纳总结,基于不同围岩等级及隧道埋深,从累积拱顶沉降与相对拱顶沉降两方面得到隧道围岩变形评判基准,然后考虑测前位移损失,通过数值模拟方法分析不同工法的拱顶沉降位移释放率,对评判基准结果进行修正。
结果 不同施工方法的拱顶沉降位移释放率从大到小依次为全断面法、台阶法、单侧壁导坑法;累积拱顶沉降相对于设计预留变形量偏小,设计较保守;相对拱顶沉降随埋深变化呈交错变化规律,相同围岩级别的相对拱顶沉降分布区间较集中,随着围岩级别变差,分布区间范围越大。
结论 提出绍兴地区凝灰岩隧道围岩变形评判基准双控指标及建议值,对后期类似地区隧道设计及施工具有重要指导意义。

关键词 隧道工程;双控指标;稳定性判据;变形监测;数值分析

中图分类号 TU457;U455

文献标志码 A

Study on Stability Evaluation Criteria of Tuff Tunnel Based on Deformation Control

QIAO Shifan, CAI Ziyong, XIAO Yuanjie, WANG Chao

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, China, 410075)

Abstract: According to the specific area of Shaoxing, the evaluation index and control standard of surrounding rock stability of tunnel construction are established. Using mathematical statistics method, the measured data of 718 monitoring sections of vault settlement are summarized. Based on different surrounding rock grades and tunnel buried depth, the evaluation criteria of tunnel surrounding rock deformation are obtained from cumulative vault settlement and relative vault settlement. Then, considering the displacement loss before measurement, the release rate of vault settlement displacement of different construction methods is analyzed by numerical simulation

收稿日期:2021-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51878673);中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2017G007-D,2017G008-J);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划重点课题(20192001)

作者简介:乔世范(1975—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事隧道及岩土工程方面研究。

method, the benchmark results were revised. The release rate of vault settlement displacement of different construction methods from large to small is full section method, bench method and side heading method. The accumulated vault settlement is smaller than the design reserved deformation, and the design is conservative; The distribution range of relative vault settlement with the same surrounding rock grade is more concentrated, With the deterioration of surrounding rock grade, the distribution range is larger. This paper puts forward the double control index and recommended value of surrounding rock deformation evaluation standard of tuff tunnel in Shaoxing area, which has important guiding significance for later tunnel design and construction in similar areas.

Key words: tunnel engineering; double control index; stability criterion; deformation monitoring; numerical analysis

围岩变形是隧道开挖稳定性最直观的反应,拱顶沉降作为监控量测的必测项目是隧道稳定性评价的关键控制指标之一。由于工程地质差异、施工方法、开挖断面形状及支护方式多样性等因素影响,围岩变形收敛值波动较大,位移控制基准参差不齐。大量的工程实践和理论研究表明,隧道围岩稳定性一直是工程界广泛关注的热点话题^[1-3],稳定性评判基准的确定一直处于探索阶段。因此,进行特定地区隧道围岩稳定性评价基准研究对隧道设计与施工及工程经验资料积累意义重大。

目前,国内外诸多学者从理论分析、数值模拟到工程应用做了许多探索与研究。穆成林等^[4]基于数学原理及模糊理论对围岩稳定性进行分析评价。房倩等^[5]基于大量实测数据统计分析,提出不同围岩级别下,隧道变形的建议控制值以及变形稳定时间参考值。田明杰等^[6]对现场围岩-支护接触压力及拱顶沉降试验数据进行回归分析及预测,评价隧道施工过程中围岩的稳定性。S. SAKURAI^[7]提出取极限应变量的2%作为隧道围岩稳定性控制临界值。汪波等^[8]提出以拱顶沉降作为主控指标、衬砌裂损作为隧道稳定性的判别标志的安全控制基准。周艺等^[9]将隧道埋深与拱顶沉降作为破碎区软岩隧道以三台阶+预留核心土法的位移控制指标。陈伟庚^[10]、李宁等^[11]对隧道围岩稳定性评判方法进行探讨,确定不同方法的

适用范围。张长亮^[12]、吴秋军等^[13]通过对大量监测数据统计分析,结合数值模拟提出了隧道围岩稳定性评价的位移判据,取得了较为丰富的成果。

鉴于此,研究者从围岩应变量大小、累积位移量、变化速率及周边位移等多方面提出了围岩稳定性位移评价标准。由于隧道施工地域环境、地质岩性、开挖断面、施工方法及支护形式等多样性,理论与实际往往存在一定差异,实测变形规律缺乏普适性,很难找出较适合于特定地区的隧道围岩位移评判基准,其安全预警值范围有所异同^[14-16]。另外,部分学者基于大量监测数据进行稳定性评判分析,但更多的没有考虑测前位移损失影响,结果相比实际情况要小^[17-19]。因此,笔者以依托工程沿线新建的7座公路隧道为背景,通过现场监测获取的第一手实测数据资料,基于数理统计方法,对隧道围岩变形规律、拱顶沉降与围岩等级及隧道埋深的关联性进行分析总结。然后考虑测前位移损失,通过数值分析方法对监测样本统计结果进行修正,提出了绍兴地区凝灰岩地层双车道公路隧道围岩稳定性评判基准及建议值,为隧道建设稳定性评判积累资料,对后期类似隧道设计及施工提供参考依据。

1 工程概况

杭绍台高速公路绍兴金华段 HST - TJ08 ~ 09 标段位于浙江绍兴境内,沿线共 7

座新建隧道,主线包含两座特长隧道及一座中长隧道,均采用上下分离式双向四车道型式,双洞净距约 28 m,最大埋深约 250 m,连接线包含四座短隧道,均采用单洞单向行车双车道型式,最大埋深约 50 m,主要以第三系玄武岩、白垩系下统馆头组凝灰岩等火山-沉积碎屑岩为主,岩性绝大部分为凝灰岩,受地质构造影响,岩体较破碎。隧道施工过程中多次出现拱部掉块、局部塌方等灾害。根据项目施工图设计资料,隧道设计考虑预留变形量为Ⅲ级围岩 4 cm、Ⅳ级围岩 7 cm、Ⅴ级围岩 10 cm,施工过程根据实际情况进行动态调整。隧道标准横断面如图 1 所示。

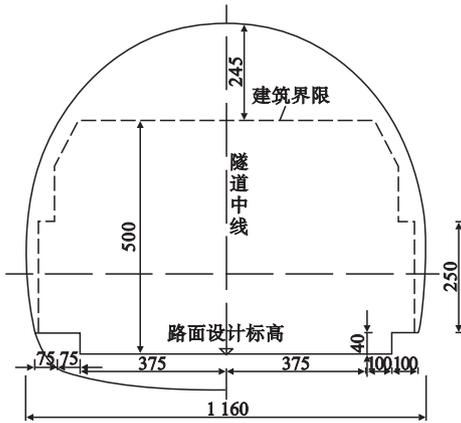


图 1 隧道标准横断面

Fig. 1 Standard cross-section of tunnel

2 隧道开挖位移释放率分析

2.1 模型建立

通过 ABAQUS 软件建立三种施工工法

(全断面法、台阶法、单侧壁导坑法)下的隧道开挖三维计算模型(见图 2)。其中岩体和初支均采用实体单元,接触采用绑定约束,岩体采用摩尔-库伦模型,初期支护采用线弹性模型,重点研究隧道不同开挖方法下的拱顶沉降位移释放率,不考虑二次衬砌施作模拟。模型尺寸边界:水平方向取 3 倍的洞径,竖直方向取隧底以下 4 倍洞径,拱顶以上取地表埋深,不考虑地表起伏变化影响,纵向取 30 m 长度作为开挖深度,建立长×宽×高为 100 m×30 m×90 m 的地层模型。模型约束条件:顶部为自由边界,两侧面水平约束,底面竖向约束,忽略构造应力影响,认为初始地应力为自重应力场。

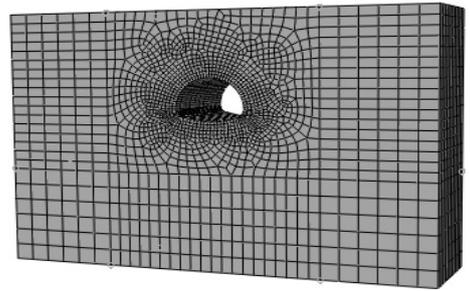


图 2 三维计算模型及参数选取

Fig. 2 Three-dimensional calculation model

2.2 施工工况模拟及参数选取

根据施工组织设计文件及工程地质勘察报告,隧道不同围岩级别对应不同施工工法,具体施工工况模拟见表 1。根据地质勘察资料及《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010),选取计算参数见表 2。

表 1 不同施工工况模拟

Table 1 Simulation of different construction conditions

施工工况	围岩级别	开挖方法	施工模拟流程
工况一	Ⅲ	全断面法	初始地应力平衡→全断面掘进 2.5 m→施作初期支护→依次循环支护掘进→开挖完成
工况二	Ⅳ	台阶法	初始地应力平衡→上台阶掘进 2.5 m→施作上台阶初期支护→下台阶掘进 2.5 m→施作下台阶初期支护→上、下台阶循环支护掘进→开挖完成
工况三	Ⅴ	单侧壁导坑法	初始地应力平衡→左侧壁掘进 2.5 m→施作左侧初期支护→右上台阶掘进 2.5 m→施作初期支护→右下台阶掘进 2.5 m→施作初期支护→依次循环支护掘进→开挖完成

表2 围岩及支护结构参数

Table 2 Parameters of surrounding rock and support structure

名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	泊松 比	弹性模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	喷层厚 度/cm
Ⅲ围岩	2.4	0.28	8	1.1	45	—
Ⅳ围岩	2.2	0.32	4	0.5	36	—
Ⅴ围岩	1.8	0.40	1.5	0.1	23	—
初期支护	2.2	0.20	20	—	—	15

2.3 结果分析

对全断面法、台阶法、单侧壁导坑法三种不同施工工法下的考虑有无支护条件的隧道

开挖模拟分析,鉴于篇幅限制,笔者分别取隧道开挖完成后拱顶沉降位移云图(见图3)。

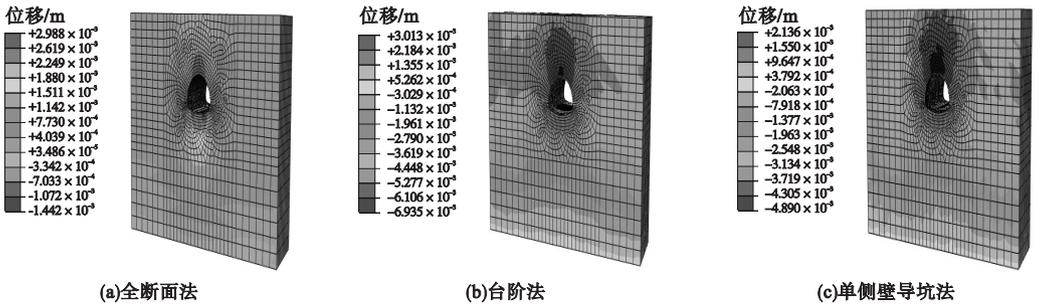


图3 不同施工方法开挖完成后拱顶沉降位移云图

Fig. 3 Contour plots of vault settlement displacement after excavation by different construction methods

通过获取不同工法在有无支护条件下的隧道开挖拱顶沉降值:

径,位移释放基本达到稳定,待开挖完成后,位移释放率为25.8%。③不同方法的拱顶沉降位移释放率从大到小排序依次为全断面法、台阶法、单侧壁导坑法。

$$\lambda = \frac{u_0}{u_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: λ 为位移释放率; u_0 为隧道开挖支护作用下拱顶沉降量,mm; u_s 为隧道毛洞开挖拱顶沉降量,mm。

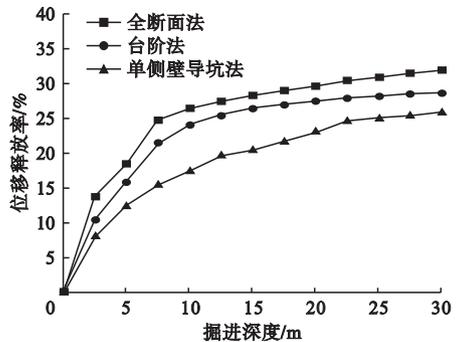


图4 拱顶沉降位移释放率随隧道掘进深度的变化曲线

Fig. 4 Curves of vault settlement displacement release rate with tunnel excavation depth

计算得到拱顶沉降位移释放率随隧道掘进深度的变化曲线如图4所示。由图4可知:①隧道采用全断面法以及台阶法施工,隧道开挖断面大,爆破扰动影响强烈,围岩内部损伤劣化,裂隙扩展,岩体强度降低,在开挖前期,围岩应力大量释放,拱顶沉降位移增长较快,当开挖掘进深度达到10m,即约1.0倍洞径,位移释放逐渐趋于平稳,待开挖完成后,全断面法位移释放率为31.8%,台阶法位移释放率为28.5%。②对于单侧壁导坑法施工,考虑多次弱爆破扰动叠加效应及临时支护抗力联合作用,拱顶沉降位移释放渐进增长,当开挖掘进深度达22.5m,即约2.0倍洞

3 监测数据样本分析

根据现场施工进度,自2016年11月份开展现场监测工作,截止2019年9月份,现

场采集了大量的监测数据,剔除部分监测断面错误或奇异数据,现对沿线7座隧道的718个断面拱顶沉降监测数据进行统计分析,其中Ⅲ级围岩255个样本,Ⅳ级围岩397个样本,Ⅴ级围岩66个样本。

3.1 不同围岩级别累计拱顶沉降分析

对718个断面拱顶沉降监测数据样本进行统计分析,结果如图5所示。

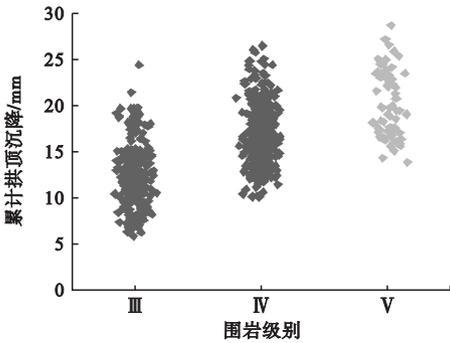


图5 累计拱顶沉降样本统计

Fig. 5 Statistics of accumulated vault settlement samples

从图5可以看出,不同围岩级别条件下,拱顶沉降累计值不同,随着隧道围岩等级变差,拱顶沉降累计值呈增大趋势;围岩变形存在相对稳定收敛域,相邻围岩级别之间没有明显的界限,剔除个别孤立点,Ⅲ级围岩稳定收敛区间为5~20 mm,Ⅳ级围岩稳定收敛区间为10~27 mm,Ⅴ级围岩稳定收敛区间为15~30 mm;累积拱顶沉降相比设计预留变形量要小,设计偏保守,现场施工方法合理,支护措施及时有效。

3.2 不同围岩级别相对拱顶沉降分析

3.2.1 Ⅲ级围岩统计分析

对255个Ⅲ级围岩监测样本的相对拱顶沉降进行统计分析,分布情况如图6所示。

从图6可以看出,Ⅲ级围岩监测数据样本的相对拱顶沉降均小于0.30%,平均值为0.14%,据此划分为三个分布区间($<0.10%$, $0.10% \sim 0.20%$, $\geq 0.20%$)进行分析,发现相对拱顶沉降分布区间近似正态分布,主要集中在 $<0.20%$ 区间之内,保证率 $\geq 91%$ 。

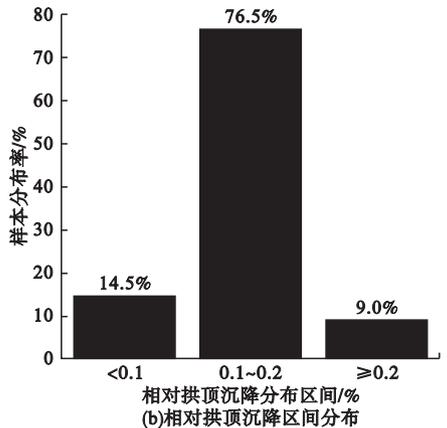
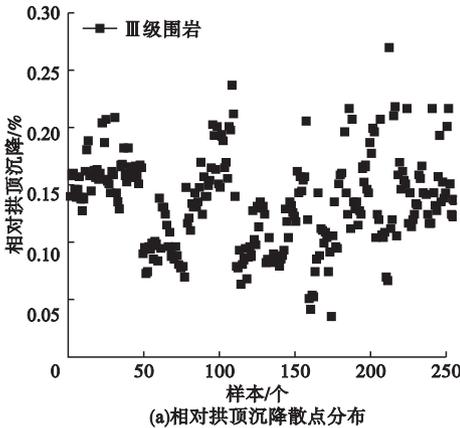


图6 Ⅲ级围岩监测样本相对拱顶沉降统计结果

Fig. 6 Statistical results of relative vault settlement of grade III surrounding rock monitoring samples

3.2.2 Ⅳ级围岩统计分析

对397个Ⅳ级围岩监测样本的相对拱顶沉降进行统计分析,分布情况如图7所示。从图7可以看出,Ⅳ级围岩监测数据样本的相对拱顶沉降均小于0.55%,平均值为0.34%,据此划分三个分布区间($<0.30%$,

$0.30% \sim 0.40%$, $\geq 0.40%$)进行分析,发现相对拱顶沉降分布区间近似正态分布,主要集中在 $<0.40%$ 区间之内,保证率 $>84%$ 。

3.2.3 Ⅴ级围岩统计分析

对66个Ⅴ级围岩监测样本相对拱顶沉降进行了统计分析,分布情况如图8所示。

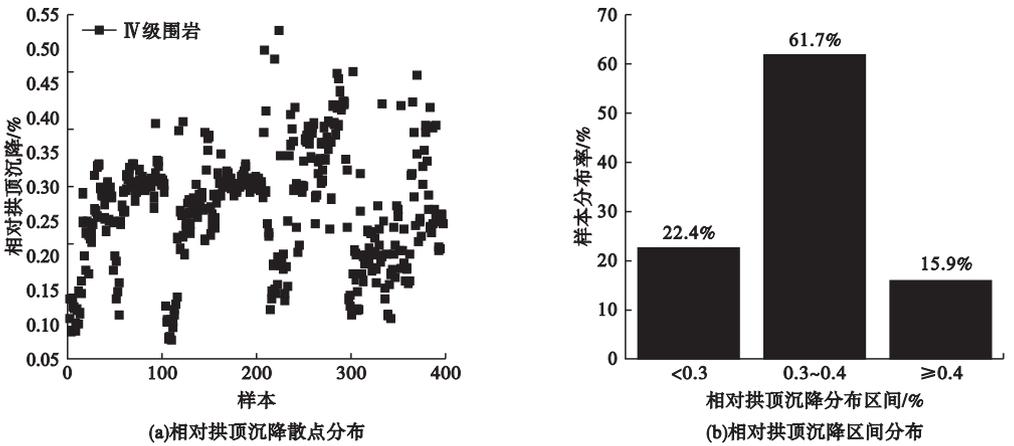


图7 IV级围岩样本相对拱顶沉降统计结果

Fig. 7 Statistical results of relative vault settlement of grade IV surrounding rock monitoring samples

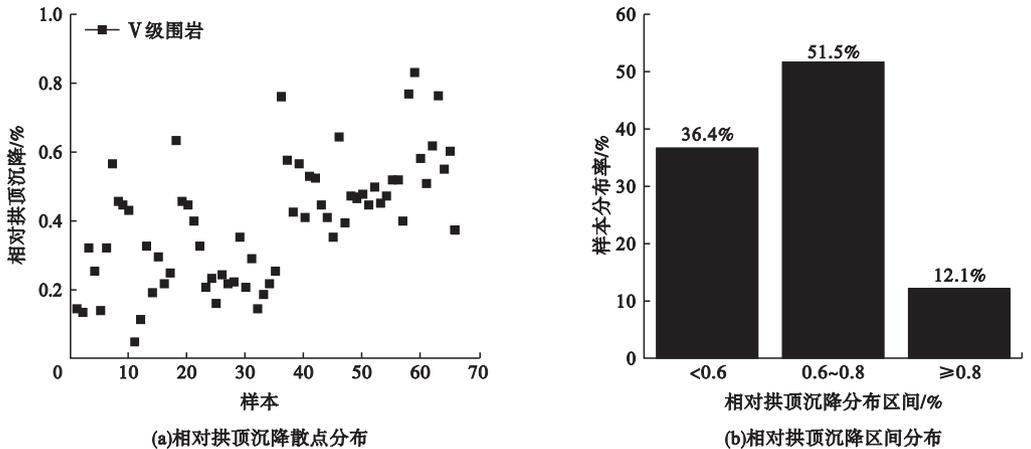


图8 V级围岩样本相对拱顶沉降统计结果

Fig. 8 Statistical results of relative vault settlement of grade V surrounding rock monitoring samples

从图8可以看出,V级围岩监测数据样本相对拱顶沉降均小于1.0%,平均值为0.67%,据此划分三个分布区间($<0.60%$, $0.60\% \sim 0.80%$, $\geq 0.80%$)进行分析,发现相对拱顶沉降分布区间近似正态分布,主要集中在 $<0.80%$ 区间之内,保证率 $>87%$ 。

3.3 不同隧道埋深相对拱顶沉降分析

由于V级围岩绝大多数分布在隧道进出口段,隧道埋深较浅,且分布范围较窄,样本数较少,不便于进行样本区间讨论,在此不作分析。笔者针对Ⅲ级、Ⅳ级围岩拱顶沉降监测数据样本,考虑沿线隧道的最大埋置深度,将其埋深划分为五个区间($<50\text{ m}$, $50\text{ m} \sim 100\text{ m}$, $100\text{ m} \sim 150\text{ m}$, $150\text{ m} \sim 200\text{ m}$ 及

$200\text{ m} \sim 250\text{ m}$)进行统计,分析相对拱顶沉降与隧道埋深的关系。得到不同埋深条件下相对拱顶沉降分布如图9~图10所示。

3.3.1 Ⅲ级围岩统计分析

对202个Ⅲ级围岩监测样本的相对拱顶沉降进行了统计分析,分布情况如图9所示。从图9可以看出,Ⅲ级围岩监测数据样本的相对拱顶沉降存在收敛域,剔除个别孤立点,样本总体集中在 $0.03\% \sim 0.22\%$,随着隧道埋深增加,相对拱顶沉降变化整体呈上涨趋势,相邻埋深段呈相互交错变化。

3.3.2 Ⅳ级围岩统计分析

对340个Ⅳ级围岩监测样本的相对拱顶沉降进行了统计分析,分布情况如图10所示。

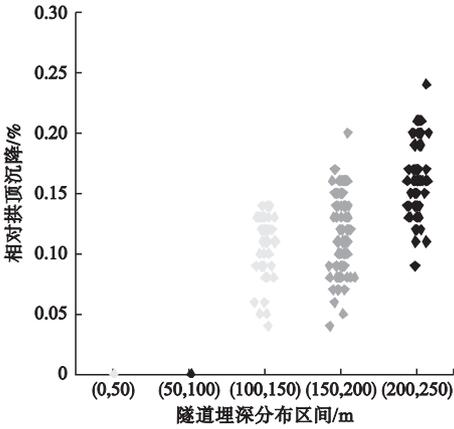


图9 不同隧道埋深的相对拱顶沉降样本统计结果

Fig.9 Statistical results of relative vault settlement samples with different tunnel depths

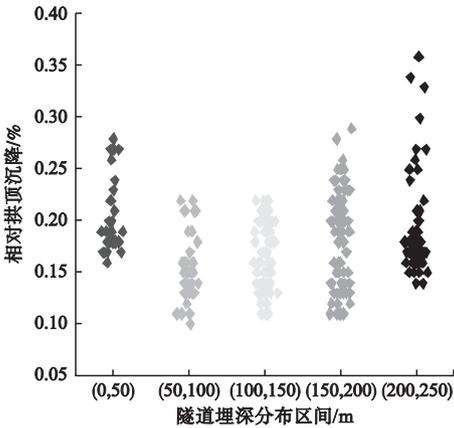


图10 不同隧道埋深的相对拱顶沉降样本统计结果

Fig.10 Statistical results of relative vault settlement samples with different tunnel depths

表4 不同隧道埋深的相对拱顶沉降分布(双车道公路隧道)

Table 4 Relative vault settlement distribution of different tunnel depths(two lane highway tunnel)

围岩级别	相对拱顶沉降/%				
	$H \leq 50$	$50 < H \leq 100$	$100 < H \leq 150$	$150 < H \leq 200$	$200 < H \leq 250$
III	—	—	0.03 ~ 0.15	0.03 ~ 0.18	0.08 ~ 0.22
IV	0.15 ~ 0.30	0.10 ~ 0.25	0.10 ~ 0.25	0.10 ~ 0.30	0.12 ~ 0.40

注:依托工程III级围岩隧道实际埋深H均大于100m,埋深小于100m范围内没有监测数据。

表5 累积拱顶沉降及相对拱顶沉降修正

Table 5 Cumulative vault settlement and relative vault settlement correction

围岩级别	累积拱顶沉降修正/mm	相对拱顶沉降修正/%				
		$H \leq 50$	$50 < H \leq 100$	$100 < H \leq 150$	$150 < H \leq 200$	$200 < H \leq 250$
III	7 ~ 26	—	—	0.04 ~ 0.20	0.04 ~ 0.24	0.11 ~ 0.29
IV	13 ~ 35	0.19 ~ 0.39	0.13 ~ 0.32	0.13 ~ 0.32	0.13 ~ 0.39	0.15 ~ 0.71
V	19 ~ 38	—	—	0.57 ~ 1.32	—	—

从图10可以看出,IV级围岩监测数据样本的相对拱顶沉降存在收敛域,总体集中在0.10%~0.40%,随着隧道埋深变化而相对拱顶沉降变化规律并不明显,相邻的埋深段没有明显的界限,呈相互交错变化。

4 隧道围岩稳定性评判基准

4.1 监测样本分析总结

依托工程实例,根据隧道不同围岩级别和不同埋深条件,累积拱顶沉降及相对拱顶沉降监测样本统计分析结果见表3、表4。

表3 累积拱顶沉降及相对拱顶沉降分布(双车道公路隧道)
Table 3 Cumulative vault settlement and relative vault settlement distribution(two lane highway tunnel)

围岩级别	累积拱顶沉降/mm	相对拱顶沉降/%	备注
III	5 ~ 20	0.05 ~ 0.25	保证率 > 80%, 埋深 $H \leq 250$ m
IV	10 ~ 27	0.15 ~ 0.55	
V	15 ~ 30	0.45 ~ 1.00	

4.2 监测样本变形修正

考虑隧道施工过程中测前位移损失,根据前文对不同围岩级别相应采用不同施工方法的拱顶沉降位移释放率数值模拟分析结果,对隧道累积拱顶沉降及相对拱顶沉降监测样本结果进行修正见表5。

4.3 与国内外规范规程比较分析

调研国内外相关隧道规范、规程中的拱

顶相对沉降位移控制基准值,与文中建议值比较分析,结果见表6。

表6 国内外规范中拱顶相对沉降控制基准

Table 6 Relative settlement control standard of vault in domestic and foreign codes

名称	相对拱顶沉降(埋深 ≤ 300 m,双车道公路隧道或双线铁路隧道)/%		
	Ⅲ	Ⅳ	V
公路隧道设计规范 ^[14]	0.20 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20	0.60 ~ 1.60
公路隧道非接触监控量测规程 ^[15]	0.05 ~ 0.25	0.10 ~ 0.60	0.10 ~ 0.80
铁路隧道设计规范 ^[16]	0.12 ~ 0.30	0.30 ~ 0.80	0.80 ~ 1.40
铁路隧道监控量测技术规程 ^[17]	0.04 ~ 0.15	0.08 ~ 0.40	0.14 ~ 1.10
铁路隧道喷锚构筑法技术规范 ^[18]	0.04 ~ 0.15	0.08 ~ 0.40	0.14 ~ 1.10
日本铁路隧道设计规范 ^[19]	≤ 0.06	0.06 ~ 1.88	> 1.88
法国铁路隧道设计规范 ^[19]	0.40 ~ 1.20	2.00 ~ 4.00	2.00 ~ 4.00
文中建议	0.04 ~ 0.30	0.15 ~ 0.70	0.60 ~ 1.30

从表6可以看出:①各类规范给出的不同围岩级别相对拱顶沉降界限值存在一定的差别,国外规范相对国内对不同围岩级别控制区间范围要大,国内规范中铁路隧道相比公路隧道控制基准更严格;②随着围岩级别变差,拱顶相对沉降控制基准区间范围变大,表明隧道施工围岩条件越差,其施工难度越大,对围岩变形控制越难;③基于现场监测样本统计分析,Ⅳ级及以上围岩修正后的结果与《公路隧道非接触监控量测规程》(DB34/T 1087—2009)偏差较小,V级围岩与《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005)中拱顶相对沉降控制基准较接近,可以作为评价围岩稳定性的依据。需要指出的是,该评判基准适应于隧道埋深在250 m以内,主要采用台阶法施工的双车道凝灰岩公路隧道。

5 结论

(1)考虑测前位移损失,通过对不同工法在有支护条件下的拱顶沉降进行模拟分析,待开挖完成后,得到全断面法位移释放率为31.8%,台阶法位移释放率为28.5%,单侧壁导坑法位移释放率为25.8%,拱顶沉降位移释放率从大到小排序依次为全断面法、台阶法、单侧壁导坑法。

(2)不同围岩级别条件下,随着隧道围岩等级变差,累积拱顶沉降整体呈增大趋势,相对于设计预留变形量要小,设计偏保守。相对拱顶沉降没有明显的埋深界限,整体呈

相互交错变化规律,随着围岩级别变差,相对拱顶沉降分布区间越大,对围岩变形控制越难。

(3)提出绍兴凝灰岩地区双车道公路隧道围岩稳定性评判双控指标及建议值,其中累积拱顶沉降控制基准:Ⅲ级围岩收敛域在7~26 mm,Ⅳ级围岩收敛域在13~35 mm,V级围岩收敛域在19~38 mm。相对拱顶沉降控制基准:Ⅲ级围岩分布区间0.04%~0.30%,Ⅳ级围岩分布区间0.15%~0.70%,V级围岩分布区间0.60%~1.30%。

(4)笔者只针对全断面法、台阶法及单侧壁导坑法三种施工方法的位移释放率进行探讨,关于其他地质条件下隧道施工所涉及的位移释放率还需要进一步研究。另外,对于隧道稳定性评判指标的适用性以及各指标之间的重要程度将成为后续的一个研究方向。

参考文献

- [1] CONG L, LI S C, ZHOU Z Q, et al. Numerical analysis of surrounding rock stability in super-large section tunnel based on hydro-mechanical coupling model [J]. Geotechnical & geological engineering, 2019, 37(3): 1297 - 1310.
- [2] TANG Z L, LIU X L, XU Q J, et al. Stability evaluation of deep-buried TBM construction tunnel based on micro-seismic monitoring technology [J]. Tunneling and underground space technology, 2018, 81(1): 512 - 524.
- [3] 许梦飞,姜谔男,李兴盛.海底岩溶隧道损伤-渗流耦合机制及其应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,35(6):1027 - 1035.
(XU Mengfei, JIANG Annan, LI Xingsheng.

- Damage-seepage coupling mechanism and its application in submarine karst-tunnel [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(6): 1027 - 1035.)
- [4] 穆成林, 黄润秋, 裴向军, 等. 基于组合赋权 - 未确知测度理论的围岩稳定性评价[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1057 - 1063. (MU Chenglin, HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, et al. Evaluation of rock stability based on combined weighting-unascertained measurement theory [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2016, 38(6): 1057 - 1063.)
- [5] 房倩, 粟威, 张顶立, 等. 基于现场监测数据的隧道围岩变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1884 - 1897. (FANG Qian, SU Wei, ZHANG Dingli, et al. Tunnel deformation characteristics based on on-site monitoring data [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(9): 1884 - 1897.)
- [6] 田明杰, 牟智恒, 仇文革. 基于BP神经网络的隧道稳定性分析研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊2): 260 - 266. (TIAN Mingjie, MOU Zhiheng, QIU Wenge. Analysis of tunnel stability based on BP neural network [J]. China civil engineering journal, 2017, 50(S2): 260 - 266.)
- [7] SAKURAI S. Displacement measurements associated with the design of underground openings [J]. Proc. of int. sympo. on field measurements in geomechanics, Zurich, 1983 (2): 1163 - 1178.
- [8] 汪波, 杨意, 何川, 等. 破碎千枚岩隧道施工期位移安全控制基准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2287 - 2297. (WANG Bo, YANG Yi, HE Chuan, et al. Safety control criteria of displacement during construction of broken phyllite tunnels [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(11): 2287 - 2297.)
- [9] 周艺, 何川, 邹育麟, 等. 破碎软岩隧道施工期位移控制值的确定及其应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 33 - 40. (ZHOU Yi, HE Chuan, ZOU Yulin. Establishment and application of the deformation during the value for soft rock tunnel in break zone [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2013, 40(3): 33 - 40.)
- [10] 陈伟庚, 傅鹤林, 严石生, 等. 基于赣深高铁隧道监测数据的位移控制基准研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(增刊1): 173 - 179. (CHEN Weigeng, FU Helin, YAN Shisheng, et al. Study on displacement control standard based on monitoring data of Ganshen high-speed railway tunnel [J]. Chinese safety science journal, 2019, 29(S1): 173 - 179.)
- [11] 李宁, 张承客, 刘乃飞. 围岩稳定性评判方法适用范围探讨[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 382 - 389. (LI Ning, ZHANG Chengke, LIU Naifei. Applicability of stability criterion for tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(2): 382 - 389.)
- [12] 张长亮. 基于监控量测与数值分析的隧道围岩稳定性判定方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008. (ZHANG Changliang. Study on the method for determination the tunnel surrounding rocks stability based on monitoring measurements and numerical analysis [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.)
- [13] 吴秋军, 王明年, 刘大刚. 基于现场位移监测数据统计分析的隧道围岩稳定性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊2): 359 - 364. (WU Qiujun, WANG Mingnian, LIU Dagang. Research on stability of tunnel surrounding rocks based on statistical analysis of on-site displacement monitoring data [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(S2): 359 - 364.)
- [14] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范: JTG D70—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Chongqing Communications Research and Design Institute. Code for design of highway tunnels: JTG D70-2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2004.)
- [15] 安徽省交通投资集团有限责任公司. 公路隧道非接触监控量测规程: DB34/T1087—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (Anhui Communications Investment Group Co. Ltd. Specification for non-contact monitoring and measurement of highway tunnels: DB34/T1087—2009 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2009.)
- [16] 铁道部第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范: TB10003—2005 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. (Second Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Code for design of railway tunnels: TB10003—2005 [S]. Beijing: China Railway Press, 2009.)
- [17] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路隧道监控量测技术规程: TB10121—2007 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007. (China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd. Technical specification for monitoring and measuring railway tunnels: TB10121—2007 [S]. Beijing: China Railway Press, 2007.)
- [18] 铁路专业设计院. 铁路隧道喷锚构筑法技术规范: TB10108—2002 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (Railway Design Institute. Technical specification for shotcrete anchor construction method of railway tunnel: TB10108—2002 [S]. Beijing: China Railway Press, 2002.)
- [19] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Baoshu. Key points of tunnel engineering design [M]. Beijing: People's Communications Press, 2003.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)