

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.026

引用格式:孙祁究,马贵红,王健舟,等.基于位移反分析的深埋隧道围岩应力释放率分析[J].公路与汽运,2025,41(2):124-127+134.

Citation:SUN Qijiu, MA Guihong, WANG Jianzhou, et al. Analysis of stress release rate of surrounding rock with deep buried tunnel based on displacement inverse analysis[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(2): 124-127+134.

基于位移反分析的深埋隧道围岩应力释放率分析

孙祁究, 马贵红, 王健舟, 何慧丽

(中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:以某软弱围岩公路隧道为工程背景,根据施工动态监控量测数据拟合顶部下沉位移曲线,推算二次衬砌施作时间;将二次衬砌施作时间运用于地层结构开挖模型中,利用位移反分析法对围岩弹性模量进行反演;提取最优数值模型顶部下沉值,利用影响线原理求解,得出最终围岩应力释放率。由顶部沉降双曲线拟合分析得出二次衬砌施作时间为隧道开挖23 d后;利用位移反分析确定数值模型中弹性模量最优解为1.15 GPa,与实测值的误差仅1.3%,较符合实际;结合影响线原理对计算公式进行换算,得出岩土体应力释放率为74%,围岩、初期支护和二次衬砌分别承担释放应力的26%、36%、38%。

关键词:隧道;围岩应力释放;位移反分析;影响线原理;地层结构法

中图分类号:U456

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0124-04

深埋隧道中的荷载计算常采用经验公式,由于地质岩土体性质复杂多变,施工过程中会时刻进行现场监控量测,根据监控量测结果动态调整隧道施工工艺,经验公式存在一定局限^[1]。荷载计算的不确定性时常对设计与施工带来诸多困难,其中围岩应力释放及围岩-结构相互作用是地层-结构模型的研究重点,应力释放的前提是初始地应力,地层结构法与荷载结构法的关键在于如何在数值模拟中实现初始地应力的精准把控^[2]。隧道掘进过程中开挖临空面产生径向位移,其中包含弹塑性变形,开挖后不久即施作初期支护,初期支护与岩土体共同变形,基本稳定后施作二次衬砌,以满足隧道使用阶段的耐久性要求。整体支护结构的形成一定程度上限制了岩土体变形与应力释放,但也共同承担和全部释放荷载,初始地应力逐渐从岩土体自身承载能力转向初期支护与二次衬砌,二者如何进行荷载分担及何时施作二次衬砌成为隧道施工的研究重点^[3]。

隧道施工是一个动态调整过程,施工工艺可根据实际进行重新制定,为确保施工过程的安全、稳定,须对隧道围岩应力释放率展开研究。徐东强等以实际隧道工程为例,结合H-B准则建立有限差分数值模型,以不同应力释放率模拟隧道处于不同埋深,对二次衬砌施作时间进行了分析^[4]。陈素侠等建立仿真模型对不同应力释放率下围岩弹塑性应变

能、破坏区范围等岩爆滞后特性进行了研究^[5]。陈京贤等建立有限元数值模型,分析了不同围岩应力释放率下回填土隧道的施工稳定性^[6]。孙亚奇等建立数值仿真模型,分析了围岩等级、开挖形状、开挖尺寸、隧道埋深与侧压力系数等因素影响下围岩应力释放率^[7]。卞跃威等在均匀静水压条件下将应力释放引入圆形隧道黏弹性解中,认为由于应力是逐步释放,边界条件随开挖面及监测断面距离变化而变化,可将边界条件表示成时间函数^[8]。管德清等基于断裂力学理论,考虑残余应力及加载过程中应力释放对接头疲劳性能的影响,分析了不等厚对接接头疲劳寿命预测方法^[9]。陈叶辉等考虑隧道开挖中应力释放和混凝土硬化的影响,采用BP神经网络算法对现场监控量测数据进行反演,得到围岩力学参数和开挖中监测点的位移量,分析围岩应力的变化,并根据衬砌极限抗拉和抗压方程计算得到隧道开挖中初期支护的可靠度,分析龄期和围岩应力释放对隧道初期支护强度和可靠度的影响^[10]。许多学者对不同条件下隧道岩土体应力释放进行了研究,但实际工程往往存在偏差,经验公式只能借鉴,要精准把控施工进度确保施工安全,必须在实际开挖过程中进行动态调整。本文以某深埋隧道软弱围岩区段为分析背景,根据动态监控量测结果拟合位移曲线,分析二次衬砌施作时间,并将二次衬砌施

作时间带入仿真模型中,利用位移分析法反演岩土体弹性模量,结合影响线原理分析围岩应力释放率。

1 工程简介

某软弱围岩公路隧道的建筑限界见图 1。双车道内轮廓为三心圆+仰拱,顶部与腰部分别采用半径 550 cm、825 cm 的单心圆,仰拱半径为 1 560 cm,拱脚与仰拱采用半径为 100 cm 的圆弧进行平滑连接。为避免应力集中,建筑限界净空设为 49.4 m²,路面设计标高至顶部高度为 7.14 m。隧道总跨度为 10.9 m。

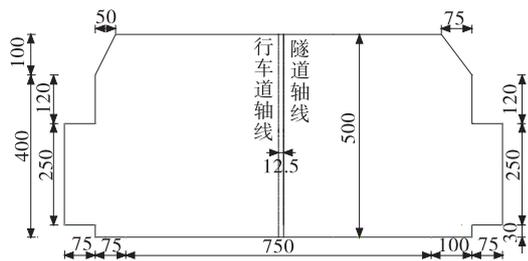


图 1 隧道建筑限界示意图(单位:cm)

所在地区岩土体性质为 V 级软弱围岩,自身承载能力较差且变形较大。因此,采用“上下+仰拱”台阶法进行开挖。每天进尺 1.0 m,每月按照进尺 30 m 安排施工进度,上下台阶间距为 3 m,并进行超前支护,包括超前小导管、中空注浆锚杆。超前小导管每隔 4 根钢架设一环,环向间距为 0.3 m。初期支护采用长度为 3.5 m 的 $\phi 20$ mm 中空锚杆、 $\phi 6.5$ mm 钢筋网(0.25 m \times 0.25 m)、0.28 m 厚 C25 喷射混凝土(预留变形量为 7 cm);二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土,腰部与仰拱厚度均为 0.50 m。

该隧道施工难点主要为进出口的开挖稳定性。为此,选择隧道进口断面作为特征断面进行分析,对特征断面采用精准全站仪结合其他工具进行监控量测,测点布置见图 2。本文主要以顶部沉降位移作为控制标准,仅对顶部沉降位移进行线性拟合分析。

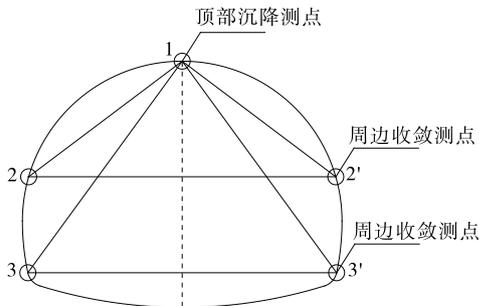


图 2 隧道特征断面测点布置

2 顶部沉降实测数据处理与分析

根据文献[11],采用双曲线函数对特征断面顶部沉降位移数据进行拟合分析的相关性较高且计算精度满足要求,函数通用表达式为 $y = T(aT + b)^{-1}$,其中 y 为顶部累积沉降, T 为监控量测时间, a 、 b 为回归系数。将对应监控量测数据导入 Origin 数据处理软件进行拟合分析,得出顶部沉降数据曲线与拟合曲线(见图 3)。

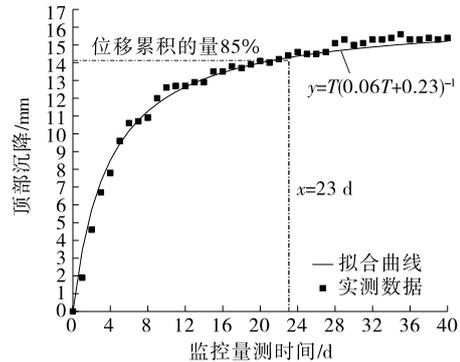


图 3 隧道特征断面顶部沉降数据曲线与拟合曲线

从图 3 可以看出:双曲线函数拟合曲线与特征断面顶部实测沉降数据曲线的变形趋势相同,表明利用双曲线函数对顶部沉降数据进行拟合接近实际情况。时间趋近于无穷的条件下,计算得最终顶部沉降为 16.7 mm。参考文献[12],各项位移达到预计总位移的 80%~90%时即可施作二次衬砌。本文选取该范围的中间值 85%确定该隧道进口区段的二次衬砌施作时间,当累积顶部沉降位移至 14.3 mm 时达到预计沉降量的 85%,确定二次衬砌施作时间为隧道开挖 23 d 后。根据进口区段每天进尺,得出二次衬砌施工断面距开挖掌子面的距离为 23 m,满足相关规范对 V 级软弱围岩施工安全步距的要求[13]。

3 基于位移反分析的围岩参数反演

位移反分析的控制基准是合理模型的选取。由于实际工程中岩土体的多变性,模拟均不能完美进行适配,通过位移动态监测进行反向求解,得出岩土体物理力学参数的方法相对简单、快捷。理想弹塑性本构模型在仿真模拟中应用较广泛,其主要力学参数包括弹性模量、黏聚力、泊松比、内摩擦角等,其中围岩弹性模量的改变对数值模拟的影响最大,且岩土体弹性模量在开挖进程中难以进行准确试验。

因此,将弹性模量作为变量,采用最小二乘法缩小其取值范围并将动态变化参数代入数值分析中。位移反分析流程见图 4,利用 FLAC^{3D} 软件中 Fish 语言实现循环命令。

建立 ZK0+000(进口断面)—040 的地层-结构模型,模拟上下台阶法开挖与支护全过程。根据工程地质勘探资料,该区段隧道所在地区大部分为 V 级围岩,少部分为 IV 级围岩(遇地下水时进行降级处理)。围岩和支护结构的力学参数见表 1。

开挖模拟影响范围一般设为隧道结构尺寸的

表 1 围岩和支护结构的力学参数

围岩和支护结构名称	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
围岩	0.8~1.6	2 250	0.32	0.11	32
初期支护 C25 混凝土	27.8	2 650	0.20	—	—
锚杆	31.8	2 950	0.16	—	—
二次衬砌 C35 钢筋混凝土	37.6	2 700	0.20	—	—

3~6 倍,模型整体尺寸设置为 110 m×110 m×40 m(纵向与监测时间一致),岩土体与二次衬砌采用实体单元 Zone 模拟,初期支护采用支护结构单元 Liner 模拟,锚杆采用锚索单元 Cable 模拟,右边一半隧道模型的网格划分与施工模拟见图 5。模型上端为自由边界,下端为固定约束,四周为法向位移约束。经过 5 次岩土体参数循环模拟计算,得出二次衬砌施作时间为隧道开挖 23 d 后,进而确定出合理的围岩弹性模量。位移反分析结果见表 2。

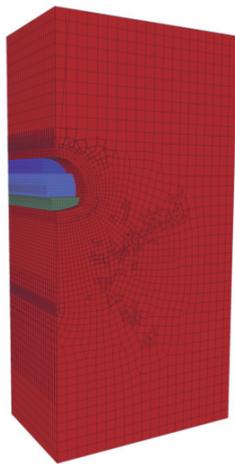


图 5 隧道网格划分与施工模拟(右半部分)

由表 2 可知:弹性模量为 1.15 GPa 时,其余参数不变,顶部沉降模拟值为 15.6 mm,监控量测值为 15.4 mm,两者误差为 1.3%,模拟结果基本符合实

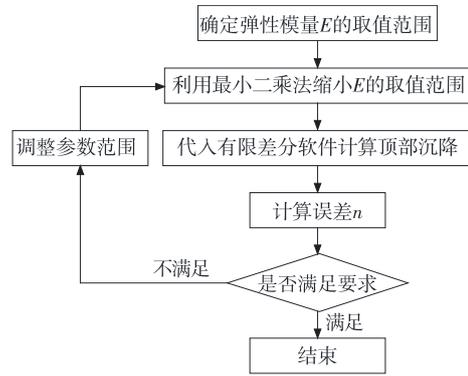


图 4 位移反分析流程

际。因此,将弹性模量 1.15 GPa 作为软弱围岩实际力学参数,求解深埋隧道围岩应力释放率。

表 2 位移反分析结果

弹性模量/GPa	计算弹性模量/GPa	监测顶部沉降/mm	模拟顶部沉降/mm	模拟沉降的误差/%
0.80~1.60	0.80	15.4	17.3	12.3
	1.60		11.6	24.7
1.00~1.40	1.00	15.4	16.3	5.8
	1.40		13.9	9.7
1.10~1.30	1.10	15.4	15.8	2.6
	1.30		14.8	3.9
1.10~1.20	1.10	15.4	15.8	2.6
	1.20		15.1	1.9
1.15~1.20	1.15	15.4	15.6	1.3
	1.20		15.1	1.9

4 隧道围岩应力释放率分析

4.1 应力释放与影响线原理

隧道施工必定伴随应力释放,初始地应力释放后由支护结构承担。假定初始地应力为 σ_0 ,应力逐渐过渡至初期支护和二次衬砌,且部分岩土体发挥自身承载能力。应力释放率定义为开挖缺失部分岩土体支撑替换为支护结构支撑,计算过程如下:

$$\sigma_r = \sigma_0 - \sigma_s; \sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} \quad (1)$$

$$\alpha_r = \frac{\sigma_{s1} + \sigma_{s2}}{\sigma_0} \quad (2)$$

式中: σ_r 为围岩自身承载应力; σ_s 为整体支护承载应力; σ_{s1} 为初期支护承载应力; σ_{s2} 为二次衬砌承载应力; α_r 为应力释放率。

支护体系整体表现为弹性特性且受围岩释放应力作用将产生一定弹性变形,相较于复杂多变的岩土体,支护体系材料与截面参数较容易获取,且综合混凝土原理可将支护结构当作弹性地基梁进行分析,进而利用影响线原理建立力学关系,得出式(3)所示应力与位移关系表达式。将支护结构简化为简支梁,以抗弯刚度 EI 为计算常量(与横截面大小相关),将变形挠度等效为顶部沉降($\Delta = y$),通过位移反分析并利用影响线原理得出荷载集度($q = \sigma$)。

$$\sigma = 384 y_{\max} EI / (5l^4) \quad (3)$$

式中: y_{\max} 为支护最终沉降量; I 为惯性矩, $I = bh^3/12$; b 为截面宽度; h 为截面高度; l 为隧道跨度。

利用式(3)对初期支护和二次衬砌承担的应力进行计算并代入式(1),换算得出基于影响线原理的应力释放率公式如下(仅适用于顶部沉降位移):

$$\alpha_r = \frac{1}{1 + 5\sigma_r l^4 / [384(y_{1\max} E_1 I_1 + y_{2\max} E_2 I_2)]} \quad (4)$$

式中:下标 1 代表初期支护;下标 2 代表二次衬砌。

4.2 基于模拟沉降的应力释放率分析

利用上述数值模型进行施工开挖模拟,开挖 23 d 后施作二次衬砌,弹性模量取反演得出的 1.15 GPa,其余岩土体与支护参数与表 1 相同。模拟过程为进口特征断面开始施工至 40 m 纵向挖通。开挖完成后提取初期支护和二次衬砌顶部沉降、顶部岩土体竖向应力,结果见图 6、图 7。

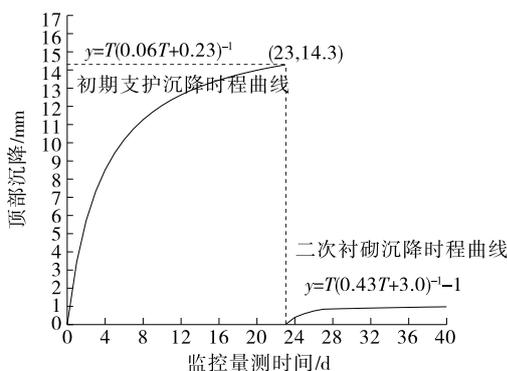


图 6 隧道特征断面支护结构顶部沉降时程曲线

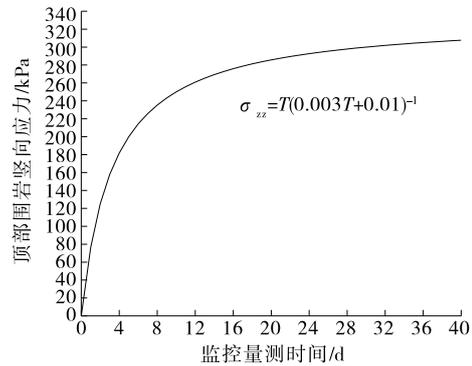


图 7 隧道特征断面岩土体竖向应力时程曲线

由图 6、图 7 可知:隧道开挖 23 d 后,初期支护顶部沉降为 14.3 mm,施作二次衬砌后发生相应沉降变形,随着开挖施工的进一步进行,特征面位移逐渐稳定(变形速率趋近于零),初期支护和二次衬砌预计总沉降值分别为 16.7 mm、2.3 mm。时间趋近于正无穷时,岩土体顶部竖向应力峰值达到 333.3 kPa。实际监测结果表明,断面开挖 23 d 后累积顶部沉降为 14.7 mm,与数值模拟的误差仅为 2.8%,两者较接近,验证了数值模拟的可靠性。

将相应顶部沉降与竖向应力带入式(3)进行计算,按照影响线原理进行分析,初期支护顶部沉降等效为初期支护均布荷载(462 kPa),二次衬砌顶部沉降等效为二次衬砌均布荷载(490 kPa),围岩最终顶部竖向应力为 333.3 kPa。将相应位移与应力带入式(4)进行计算,得出应力释放率为 74%,其中二次衬砌承担释放应力的 38%,初期支护和岩土体协同承担释放应力的 62%(初期支护和岩土体分别承担释放应力的 36%、26%)。相关规范要求二次衬砌荷载分担比例不应小于 30%,该隧道支护设计与施工满足要求。

5 结论

本文以某深埋隧道软弱岩土体区段为分析背景,根据监控量测顶部沉降拟合分析得出二次衬砌施作时间,将二次衬砌施作时间应用于仿真分析,利用位移反分析法反演确定岩土体弹性模量,结合影响线原理求解出应力释放率。主要结论如下:

(1) 顶部沉降拟合曲线与实际变化趋势相同,双曲线拟合接近于实际;由 85% 预计总位移值的判定准则确定二次衬砌合理施作时间为隧道开挖 23 d 后(距开挖掌子面 23 m),满足规范要求。

(下转第 134 页)