

文章编号: 1674-599X(2022)02-0068-07

基于位移反演的隧道初期支护可靠度分析

陈叶辉, 凌同华, 曾婉琳, 刘芳

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究龄期变化和围岩应力释放对隧道初期支护强度和可靠度的影响。采用白阳山非机动车隧道的数据, 对其支护可靠度进行计算及对比分析。先考虑实际隧道开挖过程中应力释放和混凝土硬化的影响, 根据现场监控量测数据, 基于BP神经网络算法进行反演, 得到围岩力学参数和开挖过程中隧道监测点的位移量, 并将反演计算得到的位移值与现场实测值进行对比验证, 并据此对围岩应力变化情况进行分析。再根据衬砌极限抗拉与抗压方程, 计算得到隧道开挖过程中隧道初期支护可靠度的变化规律。研究结果表明: 衬砌应力增长主要发生在施加完成后的初始阶段, 完成施加衬砌2~7 d后可靠度最低, 该期间衬砌最有可能遭到破坏, 且最小可靠度出现在拱腰位置; 如果考虑应力释放及混凝土硬化过程的影响, 衬砌可靠度会更低。该分析结果可为隧道安全施工提供借鉴。

关键词: 隧道; 初期支护; BP神经网络; 可靠度分析

中图分类号: U451

文献标识码: A

Reliability analysis of tunnel initial support based on displacement inversion

CHEN Yehui, LING Tonghua, ZENG Wanlin, LIU Fang

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In the study, the effects of concrete age and stress release of surrounding rocks on the initial support strength and reliability of concrete were investigated. Taking the non-motor vehicle tunnel of baiyangshan as the engineering background, the supporting reliability was calculated and compared. Firstly, considering the influences of stress release of surrounding rock and concrete hardening, the mechanical parameters of surrounding rock and the displacement of monitoring points during excavation process were obtained based on the in-situ monitoring data and BP neural network algorithm. The inversion results were compared to the monitoring data, based on which the variation of stress in surrounding rock was analyzed. Then, the variation of reliability of initial support during excavation was calculated based on the ultimate tensile and compressive formulas of the lining. Test results show that the stress rise of lining mainly occurs in the initial phase after construction, the lowest reliability of lining occurs at the arch waist position in 2-7 days, when the lining is most likely to be destroyed. When considering the effects of stress release and concrete hardening, the reliability will be further lower. This analysis results can provide reference to the safe construction of tunnel.

Key words: tunnel ; primary support; BP neural network; reliability analysis

在隧道施工过程中, 初期支护承受围岩开挖所释放的大部分荷载, 并控制围岩进一步变形, 从而维护隧道开挖面的稳定性^[1]。因此, 保证隧道

施工过程中初期支护的稳定性和可靠性是隧道施工安全的关键^[2]。目前, 依据初期支护的极限状态, 引入概率计算方法, 对初期支护结构可靠性

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078061)

作者简介: 陈叶辉(1996—), 男, 长沙理工大学硕士生。

进行评价, 已经成为隧道结构设计中的重要方法之一。许多学者^[3-5]针对隧道初期支护结构可靠度分析进行了许多研究。分析初期支护的可靠性时, 常采用荷载-结构模式^[6]。假设围岩的压力全部作用在隧道初期支护上, 根据支护在围岩压力作用下的荷载效应和支护自身抗力, 建立极限状态方程, 分析支护结构的可靠度。但是该方法对荷载分布的假定具有主观性, 忽略了实际荷载作用的变异性^[7], 且隧道围岩为非均质不连续体, 其力学参数的取值会影响数值模拟结果的准确性。围岩力学参数反演分析一直是岩土工程研究的热点问题, 对解决岩土试验不足条件下岩土力学参数的取值具有重要意义。利用现场监控的量测位移, 结合反演分析, 可直接获得更能真实反映实际情况的支护内力分布函数, 提高采用荷载-结构法计算值的可靠度^[8]。同时, 初期支护强度随龄期发生的变化及围岩应力的释放不会对支护可靠性造成巨大的影响。混凝土完全硬化前, 强度及弹性模量会随龄期增大, 隧道初次衬砌完成后, 开挖工作面继续向前推进, 围岩的初始应力逐渐释放, 作用在衬砌上的应力逐渐增加^[9], 但一般计算分析中, 忽略了围岩应力释放过程及混凝土强度的时间效应。因此, 本研究拟考虑混凝土强度变化及应力释放影响, 根据隧道施工过程中监测的围岩变形数据, 反演出围岩的相应力学参数。由于支护结构将与围岩共同变形, 依据荷载-结构法模型, 得到支护承载力的极限状态方程, 分析支护可靠度, 以期隧道工程实际初期支护设计提供依据。

1 可靠度计算方法

1.1 围岩参数智能反演

人工神经网络由一系列处理模块经特定的方式组建而成, 通过调整模块间的联结方式, 能实现对任意非线性模式的识别。而反分析则是一个通过由输出来确定输入的复杂非线性过程。因此, 运用神经网络进行反分析是进行智能反分析的有效途径^[10]。

误差反向传播集法 (error back propagation training, 简称为BP) 具有适应性强、稳定性好等优点, 在岩土工程领域中被广泛使用。采用BP神

经网络进行位移反分析的步骤为:

1) 结合有限元分析, 建立前期训练样本, 确定待反演的围岩力学参数, 构建合理的数值模型。按正交试验要求, 划分各待反演参数的水平, 代入模型计算, 用各计算参数及相应的计算结果建立训练样本集与检验集。

2) 选择恰当的网络结构, 带入建立好的参数训练集进行训练, 建立计算参数与计算位移之间的映射关系, 并利用检验集检验模型映射效果。

3) 使用训练完成的神经网络进行计算, 将支护监测收敛值和沉降值代入网络模型进行反分析, 最后得到相应的数值模型参数。

1.2 可靠度计算

1.2.1 极限状态方程

依据荷载-结构模型, 当支护承受荷载无法继续承受荷载时, 支护达到其承载能力的极限状态。按照支护承载力极限状态, 考虑抗力 R 和荷载 S 两个随机变量, 建立最简单的功能函数 Z 的极限状态方程:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1)$$

根据隧道衬砌的抗压及抗拉极限状态建立可靠度方程:

$$Z = \begin{cases} \phi \alpha f_c(t) b h - N(t), & e \leq 0.2h \\ 1.75 \phi f_t(t) b h^2 + N(t) h - 6M(t), & e \geq 0.2h \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z 为结构功能函数; ϕ 为构件的纵向弯曲系数 (一般设为1); α 为轴力的偏心影响系数; f_c 混凝土抗压强度; b 为截面宽度; $N(t)$ 为轴力, $M(t)$ 为弯矩; h 为截面厚度; e 为偏心距, f_t 为混凝土抗拉强度值。

其中,

$$\begin{aligned} a &= 1 + 0.648 \frac{e}{h} - 12.569 \left(\frac{e}{h} \right)^2 + 15.444 \left(\frac{e}{h} \right)^3 \\ Z &= \phi \alpha f_c(t) b h - N(t), \quad e = \frac{M}{N} \end{aligned} \quad (3)$$

根据文献[11-12], C20喷射混凝土的抗压强度与该混凝土的龄期、弹性模量和抗压强度呈线性关系, 其表达式为:

$$f_c = f_{c,28} (1 - e^{-at}) \quad (4)$$

C20混凝土抗拉强度与时间拟合曲线公式为:

$$f_t = 0.12 [\ln(t) + 5] f_{t,28} \quad (5)$$

式中: $f_{t,28}$ 为C20喷射混凝土养护至第28 d的抗压

强度; ν 为时间常数, 取值为 0.18。 $f_{t,28}$ 为混凝土 28 d 的抗拉强度值。

1.2.2 蒙特卡洛方法

可靠度指标的计算公式为:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (6)$$

式中: β 为可靠度指标, μ_z 为功能函数 Z 的均值, σ_z 为功能函数 Z 的变异系数。

已知功能函数及其基本随机变量的概率分布, 采用蒙特卡洛方法计算结构的可靠度。该方法的基本原理是通过模拟产生随机变量 X 的大量随机样本来实现对该随机变量的抽样, 用所抽得样本计算功能函数 $Z=g(X)$, 并求出相应的均值和方差, 再根据 Z 的分布, 得到可靠度指标值。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

白阳山非机动车隧道位于浙江省金华市武义县境内, 隧道全长为 663.0 m, 全断面净空面积为 56.0 m², 开挖的最大跨度为 8.5 m。由于隧道内部主要为风化石英岩, 属 IV 级围岩, 自稳能力差、易破碎。考虑到安全性和经济性, 采用全断面开挖法进行施工。

该工程主要采用复合式衬砌结构, 隧道的初期支护结构由锚杆、喷射混凝土和钢架共同组成。

根据白阳山非机动车隧道施工方法, 编制了相应的监测方案。在隧道拱顶及周边测点的基础上, 增加了拱肩部位测点, 对隧道 RTK0+700 断面进行拱顶、拱肩及拱腰位置的变形监测。隧道断面测点位置如图 1 所示。

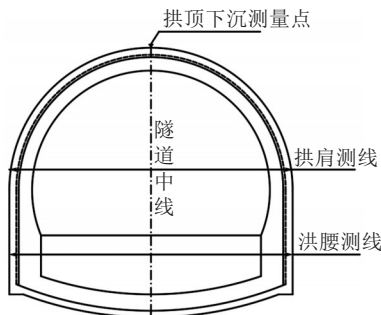
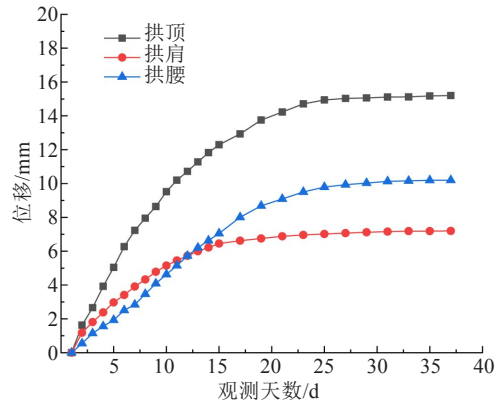


图1 隧道监控量测断面测点布置示意

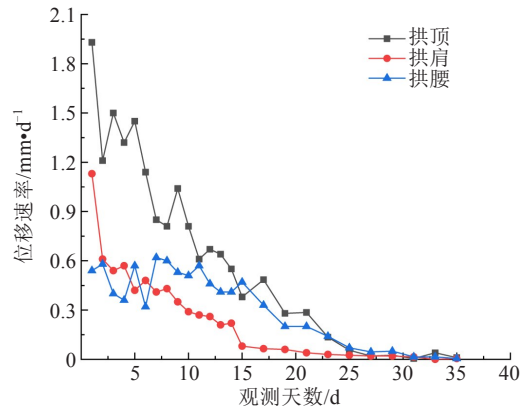
Fig. 1 Schematic diagram of measuring point layout of tunnel section

2.2 监控量测分析

选取白阳山非机动车隧道 RTK+700 断面进行反演分析, 现场实测的围岩变形监测数据如图 2 所示。



(a) 隧道位移



(b) 隧道位移速率

图2 隧道监控量测曲线

Fig. 2 Curve of monitoring in tunnel

通过对监测数据进行回归分析, 掌握围岩位移的变化趋势, 推断围岩的最终位移数据, 将其用于衬砌应力反演, 并进行可靠度分析, 预测围岩可靠性。使用对数、指数及双曲线等函数对围岩变形的监测数据进行回归分析^[13]。

对隧道拱顶的垂直沉降及隧道周边的净空收敛进行回归分析, 得到各测点位移的回归函数。

拱顶:

$$y = \frac{t}{0.5019 + 0.0367t} \quad (7)$$

拱肩:

$$y = 9.233e^{\left(\frac{-8.97}{t}\right)} \quad (8)$$

拱腰:

$$y = 3.62 \ln(t) - 2.81 \quad (9)$$

2.3 围岩力学参数反演及衬砌受力分析

2.3.1 围岩参数反演

利用 ABAQUS 有限元分析软件对 RTK0+700 段面开挖和支护情况进行三维模拟, 并计算量测位置的沉降值及收敛值。利用 Mohr-Coulomb 弹塑性材料, 模拟隧道围岩的受力及变形情况。混凝土喷层为实体单元, 锚杆采用植入式杆单元, 模型上部为自由边界。隧道有限元计算模型如图 3 所示。

隧道模型宽度取为隧道实际开挖宽度的 4 倍, 底部边界与隧道的距离为开挖宽度的 3 倍, 模型顶部与隧道拱顶距离为 25.0 m。对模型前、后及左、右边界采取法向约束, 底部边界采取完全约束。采用分段开挖模拟方式, 每次开挖 2.5 m, 共计 12 个开挖分析步, 1 个地应力平衡分析步, 最终开挖至洞径的 3 倍距离处。

在模拟混凝土硬化过程中, 采用控制混凝土层弹性模量随场变量变化的方法。假设每段开挖支护模量变化时间为 2 d, 则开挖完成时监测断面混凝土硬化为 24 d。

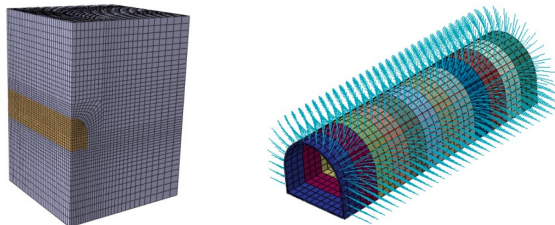


图3 隧道计算模型示意

Fig. 3 Schematic diagram of tunnel calculation model

由于围岩参数的变异性及随机性, 无法对其进行全面试验。因此, 根据正交均匀设计原则, 选择具有代表性的因素及水平进行试验。在模拟隧道开挖过程中, 重点关注弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角 4 个参数。根据该工程已知的地质条件, 结合相关的设计规范, 可以确定各参数的取值范围, 见表 1。将每个参数均匀划分为 5 个水平, 共计 20 种组合方式。部分训练样本见表 2, 将其代入有限元模型, 计算不同参数组合下模型的监测点位移, 再将参数及对应的计算位移值作为输出和输入对初始神经网络模型进行训练。同时, 按照训练样本建立 10 个测试样本, 测试神经网络的映射效果。

表1 参数取值范围表

Table 1 Parameter range

参数	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
取值范围	1.0~2.4	0.30~0.46	0.1~0.3	20~40

表2 部分神经网络训练样本表

Table 2 Part of neural network training sample

样本序号	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	测点位移值/mm		
					拱顶	拱肩	拱腰
1	1.25	0.350	200	28	10.2	4.9	7.1
2	1.75	0.350	150	20	3.6	0.7	3.3
3	1.00	0.400	200	26	16.8	10.1	10.9
4	1.50	0.375	200	20	7.4	4.2	5.5
5	1.00	0.375	150	22	16.3	4.8	10.7
6	1.75	0.375	250	24	4.0	2.7	3.6
7	1.50	0.425	250	22	12.5	7.1	8.5
8	2.00	0.400	50	20	3.6	1.2	3.3
9	1.25	0.400	250	20	14.9	7.8	9.9
10	2.00	0.375	200	24	3.3	2.6	3.1

先将监测断面各测点位移代入神经网络进行计算, 得到弹性模量为 1.05 GPa, 泊松比为 0.392, 黏聚力为 152.6 kPa, 摩擦角为 23.5°。再将这些参数代入建立的有限元模型, 计算各测点位移, 实际测量得到的位移值和有限元模型计算得到的位移值见表 3。由表 3 可知, 实测位移值与计算位移值的最大相对误差为 5.5%, 模型计算结果与实测位移结果吻合较好, 表明反演分析结果是可靠的。

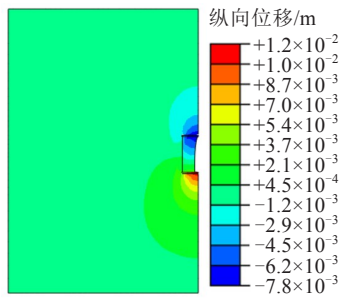
表3 计算位移与实测位移表

Table 3 Table of calculated and measured displacement

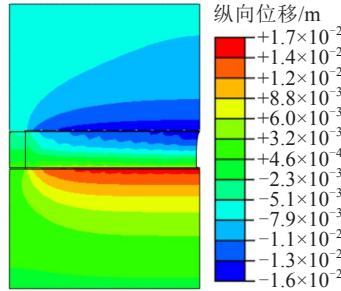
量测项目	实测位移	计算位移	误差
拱顶沉降	15.2	16.0	5.0%
拱肩收敛	7.2	7.6	5.5%
拱腰收敛	10.2	10.7	4.6%

2.3.2 位移及应力分析

监测断面开挖至 3 倍洞径外时, 隧道纵向位移如图 4 所示, 隧道开挖过程中支护各位置位移变化曲线如图 5 所示。位移变化计算值与位移实际监测值的发展规律相似。支护完成后, 拱顶位置下沉量持续增长, 在第 12 个开挖步后仍保持稳定, 拱肩和拱腰的收敛主要发生在第 1~5 开挖步, 围岩位移在支护完成的初始阶段发展较快, 拱顶受力以竖向应力为主, 较其他位置稳定时间更长。表明: 开挖对竖向应力影响更大。



(a) 监测断面开挖



(b) 开挖至洞径距离3倍处

图4 隧道开挖纵向位移云图

Fig. 4 Longitudinal displacement contours during tunnel excavation

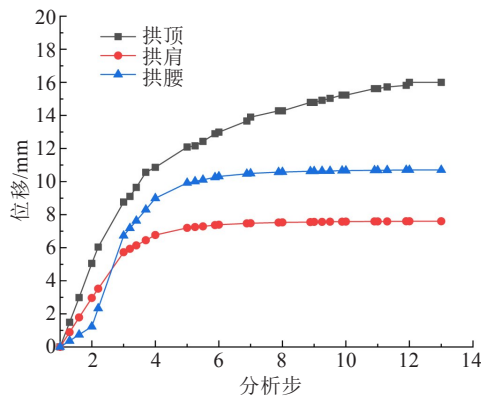


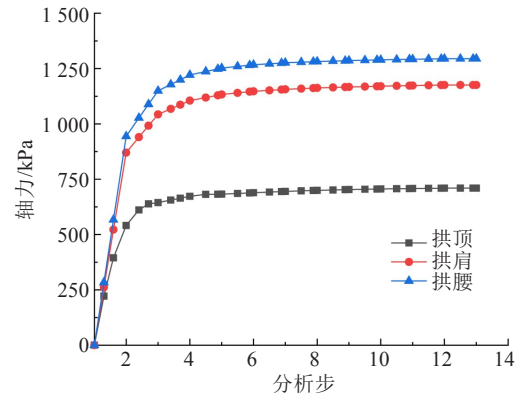
图5 位移变化曲线

Fig. 5 Variation curves of displacement

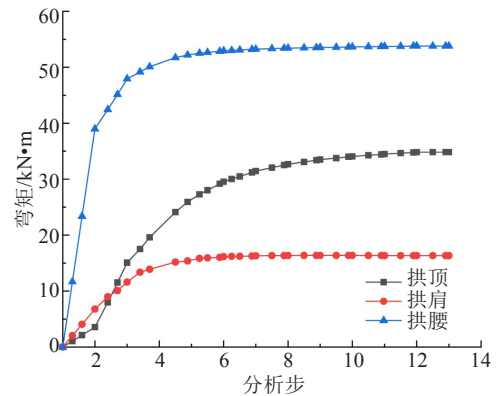
在实际开挖过程中, 围岩应力逐步释放。随着开挖面的推进, 作用于支护上的荷载逐渐增加, 开挖至3~5倍洞径距离后, 荷载作用方能稳定。因此, 分析初期支护的可靠性时, 考虑荷载作用的空间效应和时间效应更能贴合实际情况。

断面各监测点的支护轴力及弯矩随分析步的变化情况如图6所示。从图6中可以看出, 位移变化是衬砌内力变化的直接体现, 支护承受轴力的增加主要发生在第2个开挖分析步, 即完成监测断面支护时。拱顶处的最大轴力为709.6 kPa, 拱肩处的最大轴力为1 175.7 kPa, 拱腰处的承受轴力最

大为1 294.7 kPa, 在第5个开挖分析步之后保持稳定。弯矩则是衬砌产生位移的直接原因, 拱肩及拱腰位置的弯矩与轴力的变化情况相似, 最大弯矩分别为16.34、53.79 kN·m, 拱顶位置的弯矩增长持续时间较长, 在第12个开挖步后稳定在34.82 kN·m附近。



(a) 轴力



(b) 弯矩

图6 轴力、弯矩变化曲线

Fig. 6 Variation curves of axial force and bending moment

喷射混凝土的早期硬化会影响支护自身受力, 支护也会反作用于围岩, 影响围岩的应力释放。因此, 对比分析支护受力与围岩位移在支护硬化与不硬化时两种不同情况下的变化。

混凝土在硬化与不硬化两种情况下, 拱顶沉降及轴力变化曲线如图7~8所示。从图7~8中可以看出, 由于硬化喷射混凝土早期应力增长更缓慢, 与不硬化喷射混凝土情况对比, 达到最终强度后的应力更大。同时, 混凝土硬化支护产生的位移始终大于混凝土不硬化支护产生的。考虑硬化时, 混凝土支护最终位移量为16.0 mm; 不考虑硬化时, 混凝土支护最终位移量为14.5 mm。

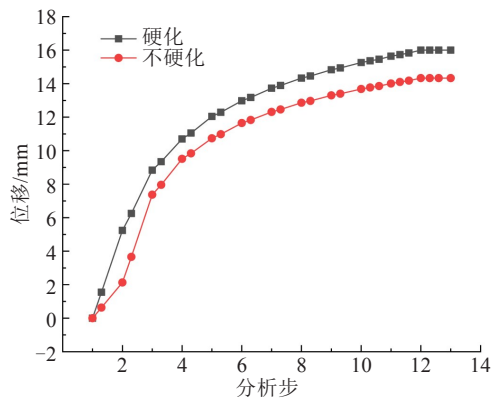


图7 混凝土硬化与不硬化拱顶沉降变化曲线

Fig. 7 Arch settlement curve of hardened and non-hardened

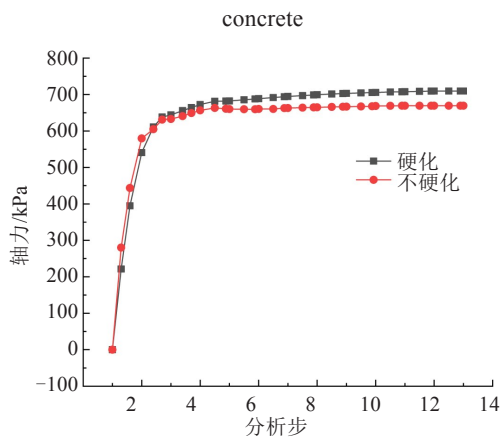


图8 混凝土硬化与不硬化轴力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of axial force of hardened and non-hardened concrete

2.4 可靠度结果分析

参考公路隧道规范及相关文献^[14], 主要变量的统计分布见表4。其中, 模量增量=(钢架截面积×钢架弹模)/喷混层截面积。

表4 主要参数统计表

Table 4 Statistical distribution of parameters

参数	均值	变异系数	分布
喷混层厚度/cm	20.00	0.10	正态
喷混弹性模量/GPa	21.20	0.10	正态
喷混28d抗压强度/MPa	12.80	0.14	正态
喷混28d抗拉强度/MPa	1.17	0.14	正态

衬砌变形量较小时, 衬砌处于弹性状态, 可认为衬砌产生的变形与所受的应力形成映射关系。通过对比弹性状态下衬砌实测位移与各分析步得到的计算位移量, 得到相应分析步所对应的时间, 以及衬砌应力随时间变化的过程。支护轴力随时间变化的对应关系如图9所示。

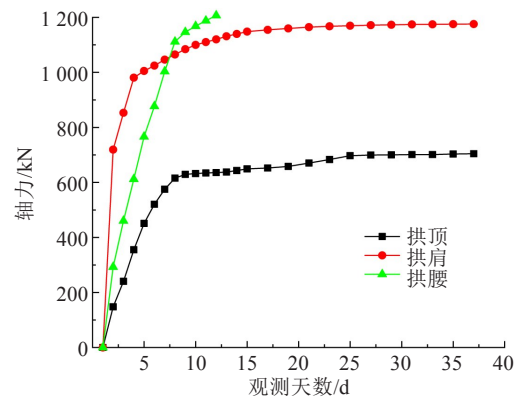


图9 轴力随时间变化曲线

Fig. 9 Axial force versus time curve

结合蒙特卡洛方法, 采用式(2)~(3)计算拱顶测点、拱肩测点和拱腰测点位置的支护可靠度, 计算结果如图10所示。从图10中可以看出, 可靠度在2~5 d达到最小值后开始上升, 最终趋于平稳。衬砌最不利的位置出现在支护下测点处, 此处可靠度达到最小值0.9。

喷射混凝土层强度早期较低, 围岩应力释放速度较混凝土强度增长速度更快。因此, 在支护施加完成后的2~7 d内, 支护最有可能发生失稳, 变形较快。2~7 d后, 抗力增长开始占据优势, 支护可靠度逐渐增加, 当抗力增长及应力释放趋于平稳后, 可靠度保持不变。

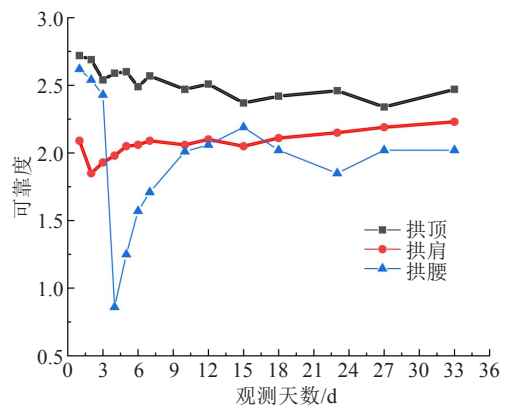


图10 各测点可靠度随时间变化

Fig. 10 Variation of reliability with time at each measuring point

支护各位置的稳定可靠度与开挖过程的最小可靠度的对比情况见表5。由表5可知, 支护稳定时的可靠度均小于开挖过程中的最小可靠度, 这种情况在拱腰位置尤为突出。结果分析表明: 由于围岩的应力释放及混凝土硬化会使衬砌的可靠度降低。因此, 在对初期支护可靠度进行分析时,

应考虑混凝土硬化及围岩应力释放这两个因素的影响。

表5 不同时期可靠度对比表

Table 5 Comparison of reliability in different periods

位置	拱顶	拱肩	拱腰
稳定可靠度	2.47	2.23	2.02
最小可靠度	2.37	1.85	0.86

3 结论

本研究以白阳山非机动车隧道的开挖为例,对隧道开挖过程中初期支护的可靠度进行了研究,得到结论为:

1) 利用监控量测位移,反演得到围岩力学参数,进而分析开挖过程中衬砌内力的变化,发现衬砌应力在其施作完成后的初始阶段增长更快。对比分析混凝土硬化与不硬化两种情况下的受力情况发现,与混凝土不硬化条件下衬砌的位移对比,混凝土硬化衬砌的最终位移更大。相较于混凝土不硬化衬砌,混凝土硬化衬砌早期的弹性模量较低,轴力增长较慢,达到最终强度后受力会更大。

2) 支护施加后2~7 d,衬砌最有可能发生失稳,隧道围岩变形率较大。表明:加强支护初期的变形监测,能有效了解衬砌的支护状态,并预测其变化趋势。

3) 通过混凝土强度随龄期变化的规律及围岩应力释放对可靠度的影响,结果表明:初期支护的可靠度在达到最终稳定前会出现极小值,拱腰位置的变化尤为明显。因此,在衬砌初期支护可靠度分析时,应重视该影响因素。

参考文献(References):

- [1] 苏兴矩.隧道初期支护可靠度稳定性动态评价研究[J].现代隧道技术,2018,55(3):140-145. (SU Xingju. Dynamic evaluation of reliability and stability of the primary support of a tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018,55(3):140-145. (in Chinese))
- [2] 凌同华,谢伟华,周凯,等.基于敏感性分析的浅埋偏压隧道支护参数优化[J].交通科学与工程,2016,32(3):68-73. (LING Tonghua, XIE Weihua, ZHOU Kai, et al. Tunnel-supporting parameter optimization of shallow-buried and unsymmetrically load based on the sensitivity analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32 (3):68-73. (in Chinese))
- [3] 朱彦鹏,陈思阳,欧华文,等.隧道初期衬砌支护系统的可靠度分析[J].兰州理工大学学报,2011,37(4):125-129. (ZHU Yanpeng, CHEN Siyang, OU Huawen, et al. Reliability analysis of initial tunnel lining support system [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(4):125-129. (in Chinese))
- [4] 韩佳明,谷拴成,任建喜,等.公路隧道III级围岩初期支护的可靠性分析[J].济南大学学报(自然科学版),2012,26(4):407-411. (HAN Jiaming, GU Shuancheng, REN Jianxi, et al. Reliability analysis of primary support for grade III surrounding rock in highway tunnels[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2012,26 (4):407-411. (in Chinese))
- [5] 徐帮树,杨为民,王者超,等.公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J].岩土力学,2012,33(1):248-254. (XU Bangshu, YANG Weimin, WANG Zhechao, et al. Study of initial support safety evaluation about shape steel reinforced shotcrete in highway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 248-254. (in Chinese))
- [6] 李洪建,林志,满银.裂缝对衬砌结构承载力影响与评价方法研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):27-32. (LI Hongjian, LIN Zhi, MAN Yin. Study on the bearing capacity and the evaluation method of the cracked lining structure[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(2):27-32. (in Chinese))
- [7] 朱永全,景诗庭.隧道荷载:结构模型的位移随机反分析[J].铁道工程学报,1996,13(2):95-99. (ZHU Yongquan, JING Shiting. Stochastic back analysis of tunnel deformation on load-structure model[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996, 13(2): 95-99. (in Chinese))
- [8] 王浩,畅翔宇,张一鸣,等.高速铁路隧道围岩力学参数反演研究[J].铁道工程学报,2020,37(9):47-53. (WANG Hao, CHANG Xiangyu, ZHANG Yiming, et al. Inversion analysis of mechanical parameters of surrounding rock in high-speed railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020,37(9):47-53. (in Chinese))
- [9] 常燕庭.喷射混凝土早期材料性质对支护效果的影响[J].长江科学院院报,1992,9(3):8-16. (CHANG Yanting. The influences of the early age properties of shotcrete on tunnel lining[J]. Journal of Yangtze River Scientific (下转第108页)

- [10] 王越敬. 基于 LSTM-ARIMA 混合模型的股价相关系数预测模型研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020. (WANG Yuejing. Prediction model of stock price correlation coefficient based on ARIMA-LSTM hybrid model. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese))
- [11] 卢生巧, 黄中祥. 基于深度学习的短时交通流预测模型[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 74-80. (LU Shengqiao, HUANG Zhongxiang. Prediction model of short-term traffic flow based on CNN-GRU deep learning[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 74-80. (in Chinese))
- [12] 黄红梅. 应用时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. (HUANG Hongmei. Application of time series analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese))
- [13] 薛艳茹. 基于时间序列分析的散杂货港口吞吐量短期预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (XUE Yanru. Short-term prediction of bulk cargo port throughput based on time series analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [14] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [15] GRAVES A, SCHMIDHUBER J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures[J]. Neural Networks, 2005, 18(5-6): 602-610.
- [16] NAKHAEI F, IRANNAJAD M. Application and comparison of RNN, RBFNN and MNLR approaches on prediction of flotation column performance[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(6): 983-990.
- [17] CHUNG J, GULCEHRE C, CHO K, et al. Gated feedback recurrent neural networks[C]//International Conference on Machine Learning. 2015: 2067-2075.
- [18] 伊恩·古德费洛, 约书亚·本吉奥, 亚伦·库维尔. 深度学习[M]. 赵申剑, 黎彧君, 符天凡, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2017. (IAN G, YOSHUA B A C. Deep learning[M]. Translation by ZHAO ShenJian, LI Huojun, FU Tianfan, et al. Beijing: Posts & Telecom Press 2017. (in Chinese))

(上接第 74 页)

- Research Institute, 1992, 9(3): 8-16. (in Chinese))
- [10] 刘勇健, 李子生. 岩土工程位移反分析的智能反演综述[J]. 地下空间, 2004(1): 84-88, 141. (LIU Yongjian, LI Zisheng. Review of intelligent back exercise of displacement back analysis in geo-technical engineering [J]. Underground Space, 2004(1): 84-88, 141. (in Chinese))
- [11] 张德华, 刘士海, 任少强. 隧道喷射混凝土强度增长规律及硬化速度对初期支护性能影响试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1707-1713. (ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Experimental study of effects of strength increase and hardening rate of shotcrete on its early supporting performances in tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1707-1713. (in Chinese))
- [12] 陈萌, 毕苏萍, 刘立新, 等. 商品混凝土轴心抗拉强度与受拉弹性模量的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(2): 186-189. (CHEN Meng, BI Suping, LIU Lixin, et al. An experimental study on axial tensile strength and tensile elastic modulus of commercial concrete[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(2): 186-189. (in Chinese))
- [13] 李秀芳, 柯玉军, 徐长峰, 等. 公路隧道监控量测数据的回归分析及其运用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(1): 178-182. (LI Xiufang, KE Yujun, XU Changfeng, et al. Regression analysis and application of highway monitoring data[J]. Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition), 2013, 9(1): 178-182. (in Chinese))
- [14] 王勇, 崔涛. 基于当量正态化法的隧道锚喷支护可靠度分析[J]. 公路与汽运, 2014(3): 226-229. (WANG Yong, CUI Tao. Reliability analysis of tunnel bolting and shotcreting support based on equivalent normalization method[J]. Highways & Automotive Applications, 2014(3): 226-229. (in Chinese))