

# 变质软岩隧道大变形稳定性评价及防治分级研究

Study on Stability Evaluation and Prevention Classification of Large Deformation in Metamorphic Soft Rock Tunnel

吴大勇

(中信建设有限责任公司, 北京 100027)

**摘要:** 为有效评价变质软岩隧道大变形的稳定性, 并合理划分其防治等级, 以上军楞隧道为工程背景, 在开展其大变形特征分析基础上, 先利用尖点突变分析评价隧道大变形段的稳定性, 再通过累计变形判据和变形速率判据开展隧道大变形的防治分级研究。结果表明: 上军楞隧道在大变形分析断面的变形监测成果中, 其水平收敛的变形范围为 142.03 ~ 219.28 mm, 拱顶沉降的变形范围为 153.20 ~ 251.62 mm, 均明显大于变形控制值, 具显著的变形特征。在大变形段的稳定性评价结果中, 相应监测断面条件下水平收敛的  $\Delta$  值均大于拱顶沉降的  $\Delta$  值, 即在隧道大变形段, 拱顶沉降具相对更大的失稳、塌方风险, 且局部位置处的  $\Delta$  值已小于 0, 局部失稳风险较大。在隧道大变形段的防治分级研究结果中, 两类判据的分级结果存在一定差异, 按不利原则, 建议研究的大变形断面均按 IV 级进行防治。因此, 在上军楞隧道施工过程中, 一旦发生大变形, 其稳定性一般相对偏弱, 且具较高的防治等级, 建议严格按照分析方法开展施工预警, 避免造成不必要损失, 为其后续施工提供了一定的技术指导。

**关键词:** 隧道; 大变形; 稳定性; 防治分级

中图分类号: TU735

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0082-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.016

WU Dayong

(Citic Construction Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** In order to effectively evaluate the stability of large deformation in metamorphic soft rock tunnels and reasonably classify their prevention and control levels, the Junling Tunnel is taken as the engineering background. Based on the analysis of its large deformation characteristics, the stability of the large deformation section of the tunnel is first evaluated using sharp point mutation analysis. Then, the prevention and control classification of large deformation in the tunnel is studied through cumulative deformation criteria and deformation rate criteria. The analysis results show that in the deformation monitoring results of the large deformation analysis section of Shangjunleng Tunnel, the deformation range of horizontal convergence is 142.03 ~ 219.28 mm, and the deformation range of arch crown settlement is 153.20 ~ 251.62 mm, both of which are significantly greater than the deformation control values and have significant deformation characteristics. In the stability evaluation results of the large deformation section, the  $\Delta$  values of horizontal convergence under the corresponding monitoring section conditions are all greater than the  $\Delta$  value of arch crown settlement. That is to say, in the large deformation section of the tunnel, the arch crown settlement has a relatively greater risk of instability and collapse, and the  $\Delta$  value at local positions is less than 0, indicating a higher risk of local instability. In the research on the classification of prevention and control of large deformation sections in

tunnels, there are certain differences in the classification results of the two criteria. According to the principle of disadvantage, it is recommended that the large deformation sections studied be prevented and controlled according to level IV. Therefore, in the construction process of Shangjunleng Tunnel, once large deformation occurs, its stability is generally relatively weak and has a high level of prevention and control. It is recommended to strictly follow the analysis method to carry out construction warning, avoid unnecessary losses, and provide certain technical guidance for its subsequent construction.

**Key words:** tunnel; large deformation; stability; prevention and control grading

## 0 引言

近年,隧道工程数量越来越多,且在近年交通建设过程中,受区域地质条件影响,隧道大变形事故时有发生,尤其在变质软岩隧道施工过程中,此类事故的威胁性相对更强,因此,构建变质软岩隧道大变形事故的稳定性评价及防治分级研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。在隧道施工过程中,监控量测是其必要支柱手段,即获取隧道变形数据具有较好的可行性,且变形是各类稳定性、危险性影响因素综合作用的直观反映,进而提出基于隧道大变形数据基础上构建隧道大变形稳定性评价模型和防治分级模型。据宁波等<sup>[3]</sup>研究成果,尖点突变分析适用于岩土领域的稳定评价,且李永靖等<sup>[1,4]</sup>也验证了此方法在隧道工程中的适用性,所以,提出以尖点突变分析构建隧道大变形段的稳定性评价模型。

在以往研究过程中,基于变形构建预警判据已被广泛应用<sup>[5-6]</sup>,岩土领域的预警判据主要依靠累计变形和变形速率进行双判据预警,因此,在隧道大变形段的防治分级模型构建过程中,也将其分级依据设定为累计变形判据和变形速率判据。在累计变形判据构建过程中,认为不同监测点均有一个阈值对应的变形极限值,当隧道变形值越接近此值,其对应监测点的稳定性越差,因此,可以用变形监测值和变形极限值构建累计变形判据评价指标。在变形速率判据构建过程中,若隧道变形速率后续呈减小趋势,说明隧道变形具收敛特征,这有利于自稳,即可利用预测速率和现有速率构建变形速率判据评价指标;欲实现变形速率判据评价指标,需先实现隧道变形预测,根据段中兴等<sup>[7-8]</sup>的研究,长短期记忆神经网络(Long Short Term Memory, LSTM)适用于隧道变形预测,因此,可以其开展隧道变形预测模型构建,但在实际应用过程中,受隧道非线性

性变形特征影响,长短期记忆神经网络的预测结果会存在较大的预测误差,为确保预测精度,再引入混沌理论(Chaos Theory, CT)开展预测误差的补偿预测。

综合上述,以上军楞隧道为工程背景,在开展其大变形特征分析基础上,先利用尖点突变分析评价隧道大变形段的稳定性,再通过累计变形判据和变形速率判据开展隧道大变形的防治分级研究,以期为其后续施工提供一定的理论指导。

## 1 基本原理

### 1.1 尖点突变分析方法

尖点突变分析以变形数据为基础,通过拟合手段判断事物的突变性,已在隧道领域广泛应用,普适性强,因此,通过此方法评价隧道大变形段的稳定性。由尖点突变分析原理,将其标准函数  $V(t)$  表示为:

$$V(t) = t^4 + qt^2 + pt \quad (1)$$

式中:  $q$ 、 $p$  为突变特征参数;  $t$  为时间变量。

式(1)以大变形数据为基础,能合理实现其拟合,即可求得突变特征参数  $q$ 、 $p$ ,并可进一步以其求解突变特征值  $\Delta$ ,计算公式为:

$$\Delta = 8q^3 + 27p^2 \quad (2)$$

若  $\Delta$  值小于 0,说明隧道大变形段存在较大失稳风险,属不稳定状态;若  $\Delta$  值等于 0,无法判断隧道大变形的稳定性;若  $\Delta$  值大于 0,说明隧道大变形具稳定状态。同时,  $\Delta$  值越趋近于 1,其离临界状态越近,因此,当  $\Delta$  值大于 0 时,其值越小,其稳定性相对越弱<sup>[9]</sup>。

欲保证式(2)计算结果的准确性,需先确保式(1)的拟合效果,将拟合度作为评价指标,其值越接近于 1,说明拟合效果越优;为确保突变特征值  $\Delta$  的计算精度,也考虑到隧道大变形的非线性特征,

## 岩土力学

拟合度值应大于 0.9, 否则对数据进行校核、修正。

### 1.2 隧道大变形防治分级体系的构建

将隧道大变形防治分级依据设定为累计变形判据和变形速率判据。

#### 1.2.1 累计变形判据

结合变形极限值  $S_c$  和变形现有值  $S_t$  构建累计变形判据条件下的评价指标  $F$ :

$$F = S_t/S_c \quad (3)$$

$F$  值越接近于 1, 其剩余变形量相对较少, 那么围岩越不稳定。

欲计算评价指标  $F$ , 需先计算  $S_c$  值, 且结合文献 [10] 的研究成果, 将其计算公式设计为:

$$y_t = ae^{-b/t} \quad (4)$$

式中:  $y_t$  为变形时间函数;  $a$ 、 $b$  为拟合参数;  $t$  为时间参数。

上式 (4) 的应用过程为: 以隧道累计变形序列为基础, 通过此式拟合, 能求解  $a$ 、 $b$  参数; 当时间参数  $t$  趋近于无穷时, 即可求得  $y_t$  函数的极大值  $a$ , 即可将其作为  $S_c$  值。

#### 1.2.2 变形速率判据

在变形速率方面, 其值越小越好, 若变形速率后续呈减小趋势, 说明隧道大变形具收敛特征, 其稳定性将会维持现状, 甚至趋于有利方向发展。因此, 提出通过变形预测来构建变形速率判据条件下的评价指标  $R$ :

$$R = V_2/V_1 \quad (5)$$

式中:  $V_2$  为预测速率, 其由外推预测结果计算, 即为 4 期外推预测速率均值;  $V_1$  为现有速率, 其由现状监测结果计算, 即为最新 4 期监测结果的速率均值。

欲求得评价指标  $R$ , 需先求得预测速率  $V_2$ , 且考虑到长短期记忆神经网络适用于非线性预测, 因此, 提出以其构建隧道大变形预测模型。

据 LSTM 原理, 将其运行过程主要包括忘记门处理、输入门处理、输出门处理及重复学习<sup>[11-13]</sup>。

忘记门处理: 筛选历史信息来控制历史记忆, 尽可能剔除无用信息, 并将其门限函数表示为:

$$f_t = \delta(w_{hf}h_{t-1} + w_{xf}X_t + b_f) \quad (6)$$

式中:  $f_t$  为忘记门的门限函数;  $w_{hf}$  为忘记门的输入矩阵;  $w_{xf}$  为忘记门的输出矩阵;  $\delta$  为激活函数;  $h_{t-1}$  为相应节点处的输出值;  $b_f$  为忘记门的偏置量;  $X_t$  为输入向量。

输入门处理: 通过记忆单元的信息强度控制来合理分配信息权重, 以更新神经元状态, 并将其门限函数表示为:

$$i_t = \delta(w_{hi}h_{t-1} + w_{xi}X_t + b_i) \quad (7)$$

式中:  $i_t$  为输入门的门限函数;  $w_{hi}$  为输入门的输入矩阵;  $w_{xi}$  为输入门的输出矩阵;  $b_i$  为输入门的偏置量。

输出门处理: 通过控制记忆单元的输出强度来保证输出值的准确性, 并将其门限函数表示为:

$$o_t = \delta(w_{ho}h_{t-1} + w_{xo}X_t + b_o) \quad (8)$$

式中:  $o_t$  为输出门的门限函数;  $w_{ho}$  为输出门的输入矩阵;  $w_{xo}$  为输出门的输出矩阵;  $b_o$  为输出门的偏置量。

若单向训练精度不满足期望要求, 则通过正、反向重复学习不断优化各门基础参数, 直至满足期望要求。

据文献 [14], LSTM 难以完全刻画隧道大变形特征, 其预测结果中会存在一定预测误差, 提出通过混沌理论实现其补充预测。

据 CT 基本原理, 先通过 Lyapunov 指数法计算混沌特征参数, 若其最大值都大于 0, 那么可利用混沌理论实现 LSTM 误差的预测处理。

当预测误差通过混沌特征检验后, 先对预测误差序列进行相空间重构, 再利用 Lyapunov 指数进行其预测处理, 即以  $\psi_l$  相空间节点为中心, 计算其与相邻相节点间的距离值  $d$ :

$$d = \|\psi_i - \varphi_l\| \quad (9)$$

式中:  $\varphi_l$  为第  $l$  个相节点。

当保证  $d$  值最小时, 即可实现预测误差的补充预测。

据上, 将求解评价指标  $R$  的变形预测模型构建为 LSTM-CT。

#### 1.2.3 防治分级体系的构建

按照论文思路, 提出通过累计变形判据和变形速率判据开展隧道大变形防治分级, 且结合工程实际, 共计将防治等级划分为 4 级, 具体标准见表 1。

表 1 隧道大变形防治分级标准

Table 1 Classification standards for prevention and control of large deformation in tunnels

| 防治等级            | I 级                            | II 级                                    | III 级   | IV 级   |
|-----------------|--------------------------------|---|---|--|
| 位移判据 评价指标 $F_r$ | $F_r \leq 0.65$                | $0.65 < F_r \leq 0.75$                  | $0.75 < F_r \leq 0.85$                          | $F_r > 0.85$   |
| 速率判据 评价指标 $R$   | $R \leq 0.60$                  | $0.60 < R \leq 0.95$                    | $0.95 < R \leq 1.10$                            | $R > 1.10$   |
| 防治建议            | 围岩自稳能力较强, 稳定性无减弱趋势, 正常监测、施工即可。 | 围岩自稳能力一般, 稳定性后续会维持现状或稍有减弱, 需加强现场变形监测管理。 | 围岩自稳能力较差, 稳定性后续具减弱趋势, 需加强监测频率, 并制定加固措施, 适时加固围岩。 | 围岩自稳能力极差, 稳定性后续减弱趋势显著, 需加强监测频率, 并立即停工, 待进行加固措施后才可采取后续施工。 |

注: 两类判据按最不利确定防治等级。

## 2 实例分析

### 2.1 工程概况

上军楞隧道左线起点里程 ZK79+015 m, 止点里程 ZK81+510 m, 隧道全长 2 495 m, 最大埋深约 338.886 m; 右线起点里程 K79+026 m, 止点里程 K81+519 m, 隧道全长 2 493 m, 最大埋深约 346.298 m。隧道区属深切割高中山地貌区, 地形起伏大。其中隧道出口位于勐简乡迎门寨村, 临近怕古河, 洞口洞顶有乡道通过。

据现场勘察成果, 区内地层主要为:

层粉质黏土: 褐黄、褐红色, 可塑状, 稍湿, 土质不均匀, 韧性稍差, 局部地段夹有强风化碎块。

全风化半石墨微晶板岩: 灰黑色, 原岩结构, 碎裂结构, 结构为极破碎, 属极软岩。

强风化半石墨微晶板岩: 灰黑色, 原岩结构和构造已基本破坏, 碎裂结构, 产状难以区分, 区域资料显示产状为  $130^\circ \angle 40^\circ$ , 局部裂隙可见方解石充填胶结, 结构为破碎, 属软岩。



(a) 大变形区段 1



(b) 大变形区段 2



(c) 大变形区段 3

图 1 隧道大变形典型照片

Fig. 1 Typical photo of tunnel large deformation

为切实掌握隧道大变形段的变形特征, 开展了现场变形监测, 监测项目包括拱顶沉降和水平收敛, 统计频率为一天一次, 共计统计 27 d 变形数据; 经

因此, 上军楞隧道的围岩具变质软岩特征。

### 2.2 隧道大变形特征分析

上军楞隧道于 2018 年 11 月 14 日开始施工, 在整个隧道施工过程中, 实际揭露围岩情况与原设计地质情况出入较大, 围岩软弱破碎、富水、夹层、孤石, 岩质变化快, 施工难度大, 发生初支大变形 247 次, 因此, 侧面说明此隧道大变形段稳定性分析及防治分级研究是十分必要的。

在隧道大变形中, ZK79+227.6~ZK79+252.6 m (大变形区段 1)、ZK79+434~ZK79+442 m (大变形区段 2) 及 ZK79+485~ZK79+535 m (大变形区段 3) 的代表性较强, 因此, 提出以此 3 段作为后续分析的数据来源, 现场照片如图 1 所示。

据现场调查, 大变形段的围岩褶皱严重, 破碎且有夹层, 多集中在拱顶及拱肩位置, 自稳能力差, 开挖施工过程中掌子面及中导易溜塌, 工字钢扭曲变形、喷射混凝土掉块严重, 围岩较原设计相差极大, 左洞目前水量较大, 设计支护参数不能满足实际围岩变形要求, 进而导致隧道大变形。

统计, 3 个大变形区段典型断面的累计变形值见表 2。在相应大变形区段, 拱顶沉降均不同程度的大于水平收敛, 并综合 3 个大变形区段的变形数据, 其水平

## 岩土力学

收敛的变形范围为 142.03 ~ 219.28 mm, 平均值为 180.42 mm; 拱顶沉降的变形范围为 153.20 ~ 251.62 mm, 平均值为 200.05 mm。

表 2 3 个大变形区段的累计变形值

Table 2 Accumulated deformation values of three large deformation sections

| 变形区段 | 监测里程/m     | 水平收敛/mm | 拱顶沉降/mm |
|------|------------|---------|---------|
| 区段 1 | ZK79 + 300 | 165.27  | 190.43  |
|      | ZK79 + 310 | 152.63  | 206.28  |
|      | ZK79 + 320 | 201.68  | 192.78  |
|      | ZK79 + 330 | 214.81  | 251.62  |
|      | ZK79 + 340 | 188.29  | 191.52  |
|      | ZK79 + 350 | 142.03  | 153.20  |
| 区段 2 | ZK79 + 435 | 181.24  | 205.68  |
|      | ZK79 + 440 | 162.55  | 192.47  |
|      | ZK79 + 490 | 169.46  | 185.92  |
| 区段 3 | ZK79 + 500 | 200.41  | 206.39  |
|      | ZK79 + 510 | 172.38  | 193.46  |
|      | ZK79 + 520 | 219.28  | 240.53  |
|      | ZK79 + 530 | 175.43  | 190.32  |

3 个大变形区段的变形特征显著, 明显大于变形

表 3 隧道大变形段的稳定性评价结果

Table 3 Stability evaluation results for large deformation sections of tunnels

| 监测里程         | 监测项目 | 拟合结果                          |       | 突变特征参数 |       |          | 稳定状态类型 |
|--------------|------|-------------------------------|-------|--------|-------|----------|--------|
|              |      | 拟合方程                          | 拟合度   | q 值    | p 值   | Δ 值      |        |
| ZK79 + 330 m | 水平收敛 | $y = t^4 - 29.15t^2 + 86.27t$ | 0.951 | -29.15 | 86.27 | 2 792.56 | 稳定     |
|              | 拱顶沉降 | $y = t^4 - 27.05t^2 + 76.55t$ | 0.937 | -27.05 | 76.55 | -123.05  | 失稳     |
| ZK79 + 435 m | 水平收敛 | $y = t^4 - 29.63t^2 + 89.85t$ | 0.943 | -29.63 | 89.85 | 9 865.44 | 稳定     |
|              | 拱顶沉降 | $y = t^4 - 30.19t^2 + 91.68t$ | 0.932 | -30.19 | 91.68 | 6 810.96 | 稳定     |
| ZK79 + 520 m | 水平收敛 | $y = t^4 - 28.65t^2 + 83.79t$ | 0.955 | -28.65 | 83.79 | 1 428.11 | 稳定     |
|              | 拱顶沉降 | $y = t^4 - 28.62t^2 + 83.29t$ | 0.964 | -28.62 | 83.29 | -237.09  | 失稳     |

### 2.4 隧道大变形段的防治分级研究

按 1.2 节思路, 通过累计变形判据和变形速率判据开展隧道大变形的防治分级研究。

#### (1) 累计变形判据的结果

通过计算, 3 个监测断面在累计变形判据条件下的结果见表 4。在变形极限值拟合过程中的拟合度最小值为 0.929, 说明其求解过程较优。结合变形现有

表 4 累计变形判据条件下的结果

Table 4 Results under cumulative deformation criterion conditions

| 监测里程         | 监测项目 | 拟合方程                        | 拟合度   | 变形极限值/mm | 变形现有值/mm | 评价指标 $F_r$ | 防治等级 |
|--------------|------|-----------------------------|-------|----------|----------|------------|------|
| ZK79 + 330 m | 水平收敛 | $y = 255.73 \exp(-32.16/t)$ | 0.942 | 255.73   | 214.81   | 0.84       | Ⅲ级   |
|              | 拱顶沉降 | $y = 273.50 \exp(-36.25/t)$ | 0.934 | 273.50   | 251.62   | 0.92       | Ⅳ级   |
| ZK79 + 435 m | 水平收敛 | $y = 255.27 \exp(-32.02/t)$ | 0.950 | 255.27   | 181.24   | 0.71       | Ⅱ级   |
|              | 拱顶沉降 | $y = 250.83 \exp(-28.46/t)$ | 0.929 | 250.83   | 205.68   | 0.82       | Ⅲ级   |
| ZK79 + 520 m | 水平收敛 | $y = 243.64 \exp(-27.20/t)$ | 0.930 | 243.64   | 219.28   | 0.90       | Ⅳ级   |
|              | 拱顶沉降 | $y = 255.88 \exp(-31.72/t)$ | 0.945 | 255.88   | 240.53   | 0.94       | Ⅳ级   |

控制值 120 mm, 已具较大潜在失稳风险, 侧面验证需开展后续大变形稳定性评价及防治分级研究。

在 3 个大变形区段各选取一个变形量最大的监测里程进行分析, 即以 ZK79 + 330、ZK79 + 435 和 ZK79 + 520 m 作为后续分析的数据来源, 分析内容包括水平收敛和拱顶沉降。

### 2.3 隧道大变形段的稳定性评价

按照论文思路, 通过尖点突变分析开展隧道大变形段的稳定性评价, 结果见表 3。不同断面在不同监测项目上拟合度范围介于 0.932 ~ 0.964 之间, 均大于 0.9, 满足 1.1 节的拟合精度要求; 对比而言, 在相应监测断面, 水平收敛的  $\Delta$  值均大于拱顶沉降的  $\Delta$  值, 说明在大变形段, 拱顶沉降具相对更大的失稳、塌方风险; 在突变性特征参数  $\Delta$  值中, ZK79 + 330 和 ZK79 + 520 m 的拱顶沉降具小于 0 的  $\Delta$  值, 说明此两断面的拱顶沉降具较大的失稳风险, 其余监测断面或监测项目的  $\Delta$  值均大于 0, 说明其具稳定状态。

值计算得到评价指标  $F_r$  的范围介于 0.71 ~ 0.94 之间, 其中, ZK79 + 435 m 断面的水平收敛具相对最小的  $F_r$  值, 对应防治等级为 Ⅱ级; ZK79 + 330 m 断面水平收敛、ZK79 + 435 m 断面拱顶沉降的  $F_r$  值分别为 0.84 和 0.82, 对应防治等级为 Ⅲ级; 其余断面的相应监测项目均为 Ⅳ级。对比而言, 在相应监测断面, 拱顶沉降的  $F_r$  值要不同程度的大于水平收敛的  $F_r$  值,

说明在累计变形判据条件下,拱顶沉降的剩余变形量相对很小,并具更强的防治必要性。

### (2) 变形速率判据的结果

变形速率判据是基于 LSTM-CT 的变形预测构建的,为验证此模型的合理性,提出以 ZK79+330 m 断面进行示例性预测过程分析。

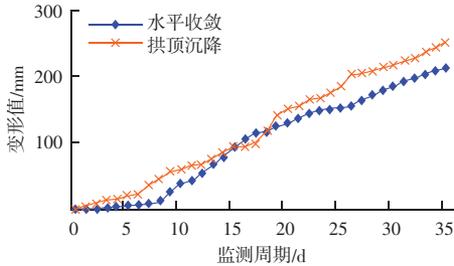


图2 ZK79+330 m 断面的变形时间曲线

Fig. 2 Deformation time curve of ZK79+330m section

经统计,得到 ZK79+330 m 断面的变形时间曲线如图 2 所示。ZK79+330 m 断面的两类监测项目随

时间变化呈持续增加趋势,只是增加速率具较大的波动性,造成累计变形曲线呈明显的起伏特征。

在 ZK79+330 m 断面的预测过程中,将前 30 期数据作为训练集,后 5 期数据作为验证集,且为对比混沌理论对误差补充预测的效果,对其处理前后的预测结果均进行统计,结果见表 5。在相应监测项目条件下,对应验证节点处的相对误差值在 LSTM-CT 的预测结果中更小,且在 LSTM 的预测结果中,水平收敛的相对误差均值为 3.10%,拱顶沉降的相对误差均值为 3.03%;在 LSTM-CT 的预测结果中,水平收敛的相对误差均值为 2.10%,拱顶沉降的相对误差均值为 2.06%。因此,对比而言,通过混沌理论对预测误差的补充预测,能有效提高预测精度,且 LSTM-CT 的预测精度已很高,说明此模型实现隧道大变形的外推预测是可行的。

表 5 ZK79+330 m 断面的预测结果

Table 5 Prediction results of ZK79+330 m cross section

| 监测周期 /d | 水平收敛 /mm | LSTM 的预测结果 |          | LSTM-CT 的预测结果 |          | 拱顶沉降 /mm | LSTM 的预测结果 |          | LSTM-CT 的预测结果 |          |
|---------|----------|------------|----------|---------------|----------|----------|------------|----------|---------------|----------|
|         |          | 预测值 K/mm   | 相对误差 P/% | 预测值 K/mm      | 相对误差 P/% |          | 预测值 K/mm   | 相对误差 P/% | 预测值 K/mm      | 相对误差 P/% |
| 31      | 193.79   | 187.69     | 3.15     | 189.63        | 2.15     | 223.38   | 216.44     | 3.11     | 218.85        | 2.03     |
| 32      | 199.41   | 193.31     | 3.06     | 195.26        | 2.08     | 228.63   | 221.64     | 3.06     | 223.90        | 2.07     |
| 33      | 205.35   | 199.37     | 2.91     | 201.16        | 2.04     | 236.40   | 229.24     | 3.03     | 231.36        | 2.13     |
| 34      | 209.94   | 203.18     | 3.22     | 205.53        | 2.10     | 244.77   | 237.33     | 3.04     | 239.78        | 2.04     |
| 35      | 214.81   | 207.98     | 3.18     | 210.28        | 2.11     | 251.62   | 244.25     | 2.93     | 246.56        | 2.01     |

据上,通过 LSTM-CT 开展其他监测断面的大变形预测,并结合式(5)计算评价指标  $R$ ,结果见表 6。ZK79+435 m 断面拱顶沉降、ZK79+520 m 断面水平收敛的评价指标  $R$  值大于 1,说明其累计变形还会呈加速变形特征。结合表 1 中判据,ZK79+330 m 断面水平收敛、ZK79+520 m 断面拱顶沉降在变形速率判据条件下的防治等级为 II 级;ZK79+435 m 断面拱顶沉降的防治等级属 IV 级,其余监测断面的监测项目的防治等级属 III 级。

### (3) 防治等级的综合评价

在前述累计变形判据和变形速率判据分析结果基础上,再进一步综合开展隧道大变形段的防治分级评价,结果见表 7。两类判据在不同监测断面或不同监测项目上的防治等级划分结果存在一定差异,其中,按不利原则,3 个监测断面的拱顶沉降均属 IV 级防治,水平收敛的防治等级属 III 级~IV 级;对比而

言,拱顶沉降的防治等级相对略高,即此隧道在发生大变形时,更易出现拱顶塌方失稳。

表 6 变形速率判据条件下的结果

Table 6 Results under the condition of deformation rate criterion

| 监测里程             | ZK79+330 m |       | ZK79+435 m |      | ZK79+520 m |      |
|------------------|------------|-------|------------|------|------------|------|
|                  | 水平收敛       | 拱顶沉降  | 水平收敛       | 拱顶沉降 | 水平收敛       | 拱顶沉降 |
| 速率 $V_1$ /(mm/d) | 5.25       | 7.06  | 5.25       | 4.82 | 6.03       | 6.38 |
| 速率 $V_2$ /(mm/d) | 3.99       | 6.92  | 5.04       | 5.45 | 6.21       | 5.74 |
| 评价指标 $R$         | 0.76       | 0.98  | 0.96       | 1.13 | 1.03       | 0.90 |
| 防治等级             | II 级       | III 级 | III 级      | IV 级 | III 级      | II 级 |

表 7 隧道大变形防治等级的综合评价结果

Table 7 Comprehensive evaluation results of prevention and control levels for large deformation in tunnels

| 监测里程   | ZK79+330 m |       | ZK79+435 m |       | ZK79+520 m |      |
|--------|------------|-------|------------|-------|------------|------|
|        | 水平收敛       | 拱顶沉降  | 水平收敛       | 拱顶沉降  | 水平收敛       | 拱顶沉降 |
| 位移判据结果 | III 级      | IV 级  | II 级       | III 级 | IV 级       | IV 级 |
| 速率判据结果 | II 级       | III 级 | III 级      | IV 级  | III 级      | II 级 |
| 最终防治等级 | III 级      | IV 级  | III 级      | IV 级  | IV 级       | IV 级 |

在隧道出现大变形时,建议按 IV 级进行防治,即围岩自稳能力极差,稳定性后续减弱趋势显著,需加强监测频率,并立即停工,待进行加固措施后

## 岩土力学

才可采取后续施工。

### 3 结论

通过变质软岩隧道大变形稳定性评价及防治分级研究, 所得结论主要为:

(1) 在研究断面中, 当隧道出现大变形时, 水平收敛的变形范围为 142.03 ~ 219.28 mm, 平均值为 180.42 mm; 拱顶沉降的变形范围为 153.20 ~ 251.62 mm, 平均值为 200.05 mm。因此, 其变形值已明显大于变形控制值 120 mm, 变形特征显著, 开展其稳定性评价及防治分级研究显得尤为重要。

(2) 通过尖点突变分析的稳定性评价, 得出水平收敛的  $\Delta$  值均大于拱顶沉降的  $\Delta$  值, 说明在大变形段, 拱顶沉降具相对更大的失稳、塌方风险。

(3) 在隧道大变形段的防治分级结果中, 两类判据的分级结果存在一定差异, 按不利原则, 建议研究的大变形断面均按 IV 级进行防治。

### 参 考 文 献

- [1] 李永靖, 王松, 刘维青, 等. 某隧道穿越富水断层破碎带围岩大变形成因分析及稳定性预测 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (5): 84-90.
- [2] 胡涛涛, 钱兴邦, 涂鹏, 等. 基于优化支持向量机的高地应力炭质板岩隧道大变形灾变预测 [J]. 兰州大学学报 (自然科学

版), 2022, 58 (5): 607-615.

- [3] 宁波, 刘玉健, 王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42 (5): 515-519.
- [4] 吴大勇. 小寨山隧道洞口段塌方成因分析及变形预测 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37 (9): 79-86, 95.
- [5] 周涛, 邹进贵, 郭际明. 隧道变形监测与智能预警方法研究 [J]. 测绘通报, 2022 (增刊 2): 91-94.
- [6] 李晓斌. 软岩隧道大变形预警分级研究及发展趋势 [J]. 地质与勘探, 2021, 57 (5): 1149-1157.
- [7] 段中兴, 杜婉欣. 基于 GWO-LSTM 模型的隧道车流量预测与照明调节研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (3): 157-165.
- [8] 王锋. 基于 SSA-LSTM 模型的软岩隧道变形特征智能预测及应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (1): 56-66.
- [9] 邓小鹏. 基于信息分解的滑坡变形稳定性评价及预警分析 [J]. 人民长江, 2021, 52 (5): 101-107.
- [10] 鞠兴华, 刘禹阳. 基于多元信息融合的基坑预警分级研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2021, 52 (1): 129-136.
- [11] 侯守江. 基于多元算法融合的软岩隧道围岩变形预测模型及应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (6): 151-164.
- [12] 赵楠, 李洁. 基于 LSTM-SVM 的隧道围岩位移预测 [J]. 公路, 2021, 66 (6): 404-407.
- [13] 吕擎峰, 李钰, 牛荣, 等. 基于深度学习的特殊岩土隧道围岩变形预测研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31 (6): 1590-1600.
- [14] 周兰庭, 柳志坤, 徐长华. 基于 WA-LSTM-ARIMA 的混凝土坝变形组合预测模型 [J]. 人民黄河, 2022, 44 (1): 124-128.

(上接第 68 页)

- [1] 王神经网络的深基坑围护结构水平位移预测研究 [J]. 都市轨道交通, 2022, 35 (3): 80-88.
- [4] 李涛, 杨依伟, 周予启, 等. 深基坑内支撑拆除时支护结构水平位移计算方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (增刊 1): 3021-3032.
- [5] 王娟, 王兴科. 软土地区基坑侧位移变形预警及预测 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (8): 91-96, 103.
- [6] 王才生, 张维东, 裴涛涛, 等. 28 m 超深地铁车站基坑实测数据分析 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (增刊 1): 787-795.
- [7] 陈明杰, 李平杰, 金延儒, 等. 临水深基坑素咬合止水桩土石围堰深层水平位移预测 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 2): 2568-2575.
- [8] 马广臣, 杨杰, 程琳, 等. 基于 DPSO-ANFIS 的大坝变形预测模型 [J]. 水利水运工程学报, 2021 (6): 116-123.
- [9] 刘开云, 魏博, 刘保国. 边坡变形时序分析的进化-自适应神经

模糊推理模型 [J]. 北京交通大学学报, 2012, 36 (1): 56-62.

- [10] 朱靛. 基于 MF-DFA 法和 PSO-ELM 模型的基坑变形规律研究 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (3): 53-58.
- [11] 张坤勇, 苏政凯, 聂美军, 等. 基于 ISSA-ELM 的土体参数反演与变形预测方法 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32 (5): 1434-1448.
- [12] 刘银涛, 任超. 基于 SSA-ELM 算法的基坑地表沉降预测 [J]. 桂林理工大学学报, 2024, 44 (3): 471-475.
- [13] 王景春, 宋培林, 王炳华, 等. 基于 EMD-PSO-ELM 的基坑变形时变序列预测研究 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (9): 103-108.
- [14] 王雪妮, 韩国锋. 地铁车站深基坑的变形预测及稳定性研究 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (10): 77-81, 87.
- [15] 陈艳茹. 基于遗传算法和极限学习机的智能算法在基坑变形预测中的应用 [J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38 (6): 941-947.