

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250110003

走滑断层错动下高速铁路隧-轨系统变形及损伤研究*

赵旭¹, 刘轩宇¹, 黄景琦², 赵密¹, 杜修力¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京科技大学
城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 高铁隧道抗震研究的现有工作大多聚焦于衬砌及其与围岩的相互作用, 对板式无砟轨道的损伤以及列车通行功能的评估研究尚不够深入。研究目的是通过引入混凝土塑性损伤本构模型以及轨道不平顺分析方法, 分析走滑断层错动下高铁隧道-轨道系统的损伤演化规律及其对轨道通行能力的影响。利用Abaqus软件建立精细化有限元数值模型, 开展了典型工况的模拟和分析, 揭示了隧道和轨道在地震作用下的损伤机制。研究表明, 隧道的通行功能最先受到影响, 主要表现为轨道不平顺, 这一现象通常会在轨道和衬砌结构出现明显损伤之前发生。当断层错动量达到一定阈值时, 隧道衬砌结构才会遭受严重损伤, 进一步影响其稳定性和安全性。通过数值模拟和分析, 揭示隧道-轨道系统在地震作用下的损伤演进机制, 为强震区高铁隧道系统的地震损伤与变形风险评估提供理论支持和技术指导, 为未来高铁隧道的抗震设计与优化提供了新的思路和方法。

关键词: 高速铁路隧道; 走滑断层; 围岩-隧-轨系统; 损伤演化; 轨道不平顺; 数值模拟

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0360-09

Research on Deformation and Damage of High-speed Railway Tunnel-track System under Strike-slip Fault Dislocation

ZHAO Xu¹, LIU Xuanyu¹, HUANG Jingqi², ZHAO Mi¹, DU Xiuli¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Existing studies on the seismic performance of high-speed railway (HSR) tunnels primarily focus on the lining and its interaction with the surrounding rock, while studies on the damage of slab ballastless tracks and the evaluation of train operational function remain insufficient. This study aims to analyze the damage evolution of the HSR tunnel-track system and its impact on track serviceability under strike-slip fault dislocation by introducing a concrete plastic damage constitutive model and a track irregularity analysis method. A refined finite element model was established using Abaqus software to simulate and analyze typical working conditions, revealing the damage mechanisms of the tunnels and tracks under seismic action. The results indicated that the operational function of the tunnel

* 收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004300)资助

作者简介: 赵旭(1976—), 女, 副教授, 博士。主要从事地下结构方面的研究。E-mail: bjutzx@163.com

通信作者: 黄景琦(1988—), 男, 副教授, 博士。主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: huangjingqi11@163.com

was affected first, primarily manifested as track irregularities, which typically occurred before significant damage in the track and lining structure. Severe damage to the tunnel lining structure occurred only when the fault dislocation reached a certain threshold, further affecting its stability and safety. Through numerical simulation and analysis, this study reveals the damage evolution mechanism of the tunnel-track system under seismic action, providing theoretical support and technical guidance for the assessment of seismic damage and deformation risks of HSR tunnel systems in strong seismic regions of China. It also offers new insights and methods for the future seismic design and optimization of HSR tunnels.

Keywords: high-speed railway tunnel; strike-slip fault; surrounding rock-tunnel-track system; damage evolution; track irregularity; numerical simulation

0 引言

近年来,由活动断层错动引发的地质灾害对基础设施建设产生大量破坏^[1-2],工程师开始重视断层错动对高铁隧道的影响。在穿越活动断层的高速铁路隧道段发生断层错动时,围岩的变形会直接影响隧道衬砌以及无砟轨道结构的受力^[3],导致结构损伤破坏,产生层间离缝以及铁路线路的不平顺^[4]。2022年青海门源兰新高铁大梁隧道遭受断层错动作用的破坏即为典型案例:隧道线产生最大1.8 m的偏移,衬砌混凝土出现大面积剥落掉块,道床板出现隆起和开裂,钢轨出现变形和抬升^[2]。

走滑断层是活动断层的一种典型运动类型,其特点是两侧岩体沿断层面主要发生水平错动^[5]。

在走滑断层的错动影响下,穿断层隧道会在断层破碎带区域出现结构变形、垮塌以及内部结构损伤^[4],目前,国内外学者已采用数值模拟以及模型试验等手段针对跨走滑断层的隧道衬砌响应特征开展了大量研究工作。周光新等^[6]以滇中香炉山输水隧洞为背景工程,通过小尺度物理模型试验总结了不同因素影响下的隧洞破坏形式和破坏机制。M. Sabagh等^[7]通过三维数值模拟研究了断层错动对不同隧道直径、断层错动量的隧道结构的破坏影响,并与离心机试验结果进行了对照。汪振等^[8]建立三维隧道-断层有限元分析模型,研究走滑断层错动下隧道关键断面的变形特征,总结了不同地质条件下的隧道损伤规律。王志岗等^[9]依托太原城市轨道交通一号线为背景工程,结合损伤状态量化指标,分析了城市地铁隧道结构的力学响应和抗断措施。总体来看,目前的研究多集中在断层错动下的隧道衬砌结构损伤分析,而对于隧道衬砌内部的结构分

析较少。

以设有CRTS III型轨道板高速铁路隧道为原型,通过建立考虑混凝土塑性损伤的非线性有限元计算模型,分析在走滑断层发生错动的情况下,高速铁路隧道-轨道系统损伤的演化过程,以及其对铁路线路通行功能的影响,对高速铁路隧道在断层错动灾害下的结构变形及损伤具有重要理论价值和工程意义。

1 走滑断层错动下高速铁路隧道模型

三维精细化的围岩-隧道-轨道结构模型如图1所示。模拟原型为埋深40 m的铺设有CRTS III型轨道板的高速铁路单线曲墙圆拱隧道,围岩与隧道均采用八节点六面体实体单元模拟。其中,围岩均采用摩尔-库伦本构模型,并根据围岩分类法,对上、下盘及断层破碎带分别赋予IV类与V级围岩的力学参数。隧道宽9.5 m,高10.05 m。为了消除边界效应对计算结果的影响,模型的长、宽、高被设置为100 m×100 m×80 m,断层破碎带的宽度为25 m。隧道截面为三心圆拱截面,隧道内部设置有钢筋网,钢筋网在建立时对原型钢筋进行了简化,确保钢筋采用三维的梁单元模拟。

隧道内CRTS III型板式轨道结构由钢轨、WJ-8型扣件、轨道板、自密实混凝土(Self-Consolidating Concrete 简称SCC)和底座板组成^[10]。轨道板与自密实混凝土之间设有“门型”钢筋,固定二者形成复合板,自密实混凝土与底座板之间通过凸台与凹槽的咬合机制连接,凹凸槽的尺寸为1.0m×0.7 m×0.1 m,复合板和底座板之间的隔离层法向采用硬接触,切向由摩擦系数为0.8的摩尔摩擦模拟^[11]。

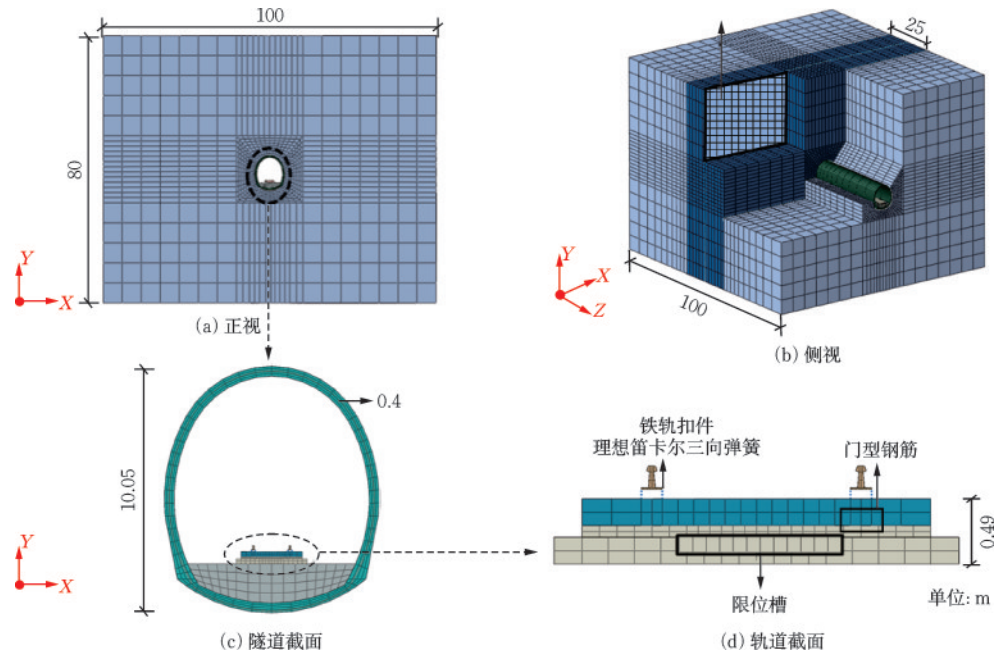


图1 围岩与隧道的三维有限元数值模型

Fig.1 Three-dimensional finite element numerical model of surrounding rock and tunnel

当断层错动发生时,断层上盘静止,而下盘围岩则会产生错动。这种错动会引起断层破碎带内部的位移分布,位移分布主要受以下因素影响:(1)下盘围岩的最大错动量;(2)断层破碎带内部的应力构造;(3)滑动破裂面的位置^[12]。在建模时,假设滑动破裂面处在断层破碎带的正中间,并假设走滑断层沿滑动破裂面发生错动^[13],如图2所示。

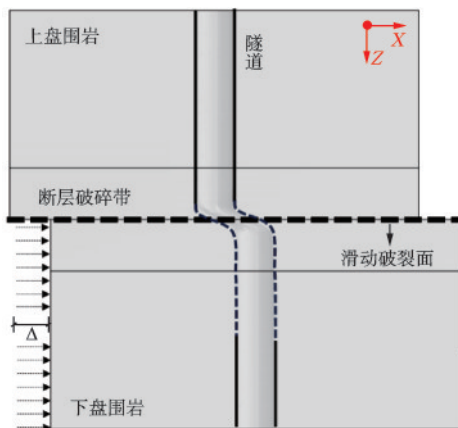


图2 走滑断层错动的有限元模型俯视图

Fig.2 Top view of finite element model of strike-slip fault dislocation

在有限元模型中,预埋钢筋采用三维梁单元建立,板式无砟轨道结构以及钢轨采用八节点六面体实体单元建立,钢轨扣件采用三向笛卡尔弹簧模拟,其横向、纵向和垂向刚度分别为50、15、

35 kN/mm^[14],扣件每0.63 m设置一组。轨道板内的钢筋采用埋入的接触方式嵌入结构中,而底座板与隧道仰拱在实际施工中会采取预埋连接钢筋的方式以增强结构整体性,故采用绑定的接触关系^[15]。轨道结构参数见表1。

表1 轨道结构参数

Table 1 Track structural parameters

轨道结构	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	长×宽×高/ m
轨道板	0.2	2 500	36 500	5.6×2.5×0.21
SCC	0.2	2 450	32 500	5.6×2.5×0.1
底座板	0.2	2 450	32 500	5.6×2.9×0.21
限位槽	0.2	2 450	32 500	1.0×0.7×0.1
铁轨	0.3	7 800	206 000	—

2 混凝土塑性损伤模型

为了研究隧道衬砌和轨道结构的损伤特性,采用了混凝土塑性损伤本构模型(CDP)^[16]。混凝土在受到拉伸和压缩时具有不同的力学行为和损伤表现,使用拉损伤因子 d_t 和压损伤因子 d_c 描述混凝土刚度退化现象,损伤因子的取值为0~1,具体为:

拉损伤因子计算方法如(1~2)式:

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}, \quad \rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \\ \varepsilon_{t,r} &= f_{t,r}^{0.54} \times 65 \times 10^{-6}, \quad \alpha_t = 0.312 f_{t,r}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

而压损伤因子计算方法如(3~4)式:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}, \quad \rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}}, \quad n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \\ \varepsilon_{c,r} &= (700 + 172 \sqrt{f_{c,r}}) \times 10^{-6} \\ \alpha_c &= 0.157 f_{c,r}^{0.785} - 0.905 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, ρ_t, ρ_c 和 n 是过程量; E_c 是混凝土初始弹性模量; α_t 和 α_c 是曲线下降段参数, $f_{t,r}$ 和 $f_{c,r}$ 是混凝土单轴抗拉、抗压强度代表值; $\varepsilon_{t,r}$ 和 $\varepsilon_{c,r}$ 分别是与 $f_{t,r}$ 和 $f_{c,r}$ 相应的峰值拉应变与压应变, x 是压应变与对应的峰值应变的比值。

混凝土在单轴压缩和拉伸下的应力-应变曲线计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= (1-d)E_0(\varepsilon - \tilde{\varepsilon}^p) \\ \sigma_c &= (1-d_c)E_0\varepsilon_c \\ \sigma_t &= (1-d_t)E_0\varepsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

基于以上公式得出的结果, 可以得出混凝土在拉伸和压缩下的开裂应变:

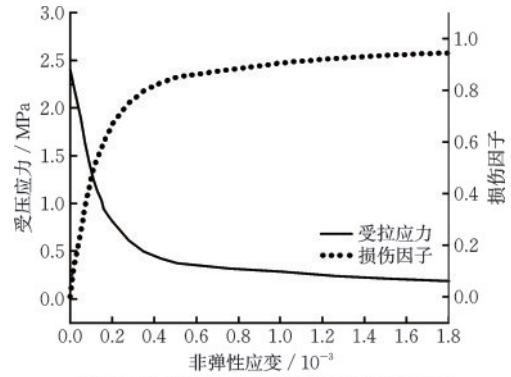
$$\tilde{\varepsilon}^{ck} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_0} \quad (6)$$

而对于破损混凝土, 等效塑性应变可定义为:

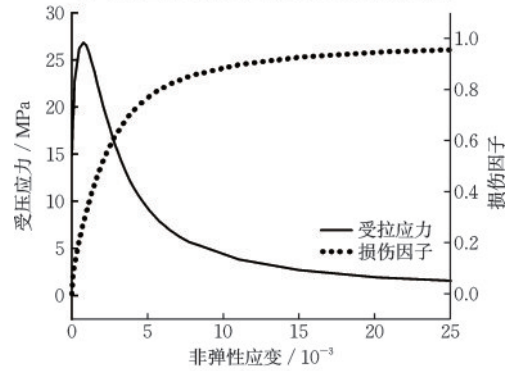
$$\tilde{\varepsilon}^{pl} = \tilde{\varepsilon}^{ck} - \frac{d}{(1-d)} \cdot \frac{\sigma}{E_0} \quad (7)$$

隧道衬砌、底座板、自密实混凝土和轨道板分别使用 C35、C40、C40、C60 混凝土。根据以上公式可求得塑性损伤参数曲线, 受篇幅限值, 这里仅展示 C40 强度等级的混凝土塑性损伤参数曲线如图 3 所示。

Z. Wang 等^[17] 根据混凝土结构正常使用的最大允许裂缝宽度, 给出其所对应的拉损伤因子 d_t 为 0.949, 并提出在损伤演化系数 d_c 和 d_t 分别在 0.237 4 与 0.268 4 以内时, 衬砌结构处于轻微损坏, 内部出现细微裂纹, 通过短期维修可使其功能保持不变。具体损伤等级见表 2。



(a) 混凝土受压应力-应变关系及损伤演化曲线



(b) 混凝土受拉应力-应变关系及损伤演化曲线

图 3 C40 混凝土塑性损伤参数曲线

Fig.3 Plastic damage parameter curves of C40 concrete

表 2 拉损伤因子-破坏状态

Table 2 Tensile damage factor-failure state

破坏状态	无破坏	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
d_t	0	0~0.237 4	0.237 4~0.949	0.949~1.0

3 结构损伤分析

3.1 走滑断层错动对隧道衬砌损伤的影响

图 4 展示了不同走滑断层错动量下隧道衬砌的压损伤云图。从图中可以清晰地观察到衬砌不同位置压损伤的分布和演化过程: 拱顶区域是压损伤最先开展也是最终损伤最严重的区域, 在错动量逐

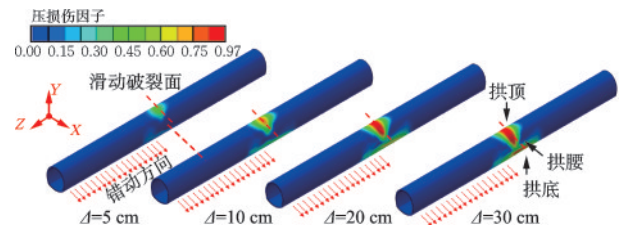


图 4 隧道衬砌压损伤因子云图

Fig.4 Contour plots of compressive damage factor (d_c) of tunnel lining

渐增大至 30 cm 的过程中,滑动破裂面处的拱顶压损伤系数增加最为明显,损伤区域由拱顶逐渐扩展至拱肩、拱脚与拱底,而拱腰部分则受影响很小,这是受隧道截面控制产生的应力分布,三心圆拱的设计分散了拱腰区域的应力,因此受压损伤较小。

走滑断层错动作用下,隧道衬砌的受压损伤主要集中在断层破碎带内部,而断层破碎带以外的隧道衬砌几乎未受到显著损伤(压损伤系数小于 0.05)。在断层破碎带内部,压损伤高度集中于滑动破裂面处的隧道衬砌。这是因为滑动破裂面两侧的围岩产生相对位移会对隧道衬砌产生剪切效应,这种剪压应力的影响使得该区域容易发生挤压—剪切破坏。

图 5 展示了不同走滑断层错动量下隧道衬砌的拉损伤云图。从图中可以清晰地观察到衬砌不同位置的损伤的分布和演化过程:在错动量 Δ 从 5~30 cm 的变化过程中,拉损伤首先出现在滑动破裂面两侧的隧道衬砌拱腰部位,这一区域也是拉损伤最严重的部位。走滑断层刚开始错动的时候,拱腰区域的拉损伤因子最大为 0.268 4,仅为轻微损伤的状态。当 $\Delta=20$ cm 时拉损伤因子最大可达 0.949,当 $\Delta=30$ cm 时大面积范围的隧道衬砌拉损伤因子达到 0.949,这代表滑动破裂面附近的隧道衬砌因为拉伸裂缝的出现而达到严重损伤状态。相对而言,拱底和拱顶区域的拉损伤因子较小,而滑动破裂面附近的衬砌因受到较大的张拉应力而易发生拉损伤。另外,衬砌区域内拉损伤的发展要快于压损伤因子,这与混凝土结构的抗压性能优于抗拉性能有关。

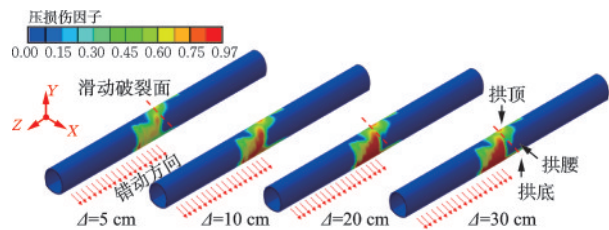


图 5 隧道衬砌拉损伤演化因子云图

Fig.5 Contour plots of tensile damage evolution factor (d_t) of tunnel lining

同样,衬砌的拉损伤集中于断层破碎带内部,并且主要在滑动破裂面两侧拱腰区域。以滑动破裂面为界,断层错动导致的相对位移差异在隧道衬砌中引发方向显著的弯矩,进而在拱腰区域产生较大的拉应力,在此影响下,滑动破裂面两侧的

隧道衬砌容易发生弯曲受拉破坏。

3.2 CRTS III 型板式轨道结构损伤过程

图 6 给出了走滑断层错动下的底座板的受拉、受压损伤因子分布图,其中虚线标出了滑动破裂面的位置。由图可知,在相同错动量下,底座板的受压损伤的分布范围与损伤因子大小要明显低于受拉损伤,具体原因为:底座板的损伤主要归因于隧道衬砌受断层错动的影响,而在这种影响的传递过程中,弯曲作用引起的拉应力要强于剪切作用伴随的压应力,因此,在错动量较小时,底座板受到的损伤类型以受拉损伤为主。

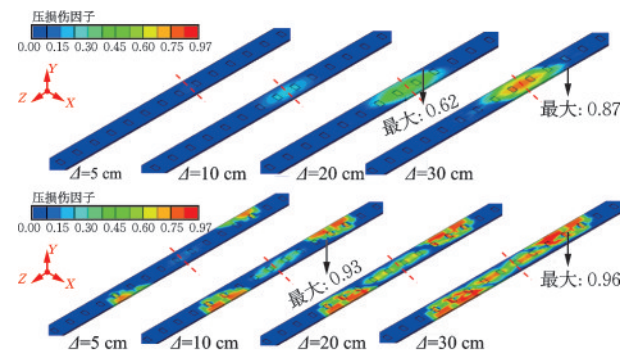


图 6 底座板压、拉损伤演化因子云图

Fig.6 Contour plots of compressive damage factor (d_c) and tensile damage evolution factor (d_t) of base plate

走滑断层错动作用下,压损伤严重的区域与隧道衬砌接近,主要出现在滑动破裂面的位置,而拉损伤严重的区域则出现在断层破碎带两端以及滑动破裂面两端,当错动量 $\Delta=12$ cm 时,断层破碎带两端的底座板拉损伤超过 0.949,部分区域严重破坏。

图 7 给出了走滑断层错动下的复合板的受拉、受压损伤因子分布图。自密实混凝土与轨道板组成的

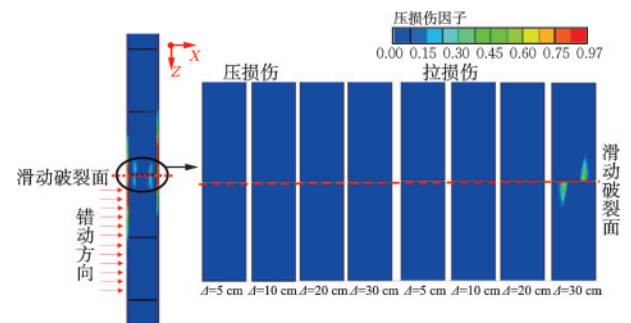


图 7 复合板压、拉损伤演化因子云图

Fig.7 Contour plots of compressive damage factor (d_c) and tensile damage evolution factor (d_t) of composite plate

复合板受损程度相对较轻,在错动量小于 30 cm 时,基本处于完好无损状态,这归因于自密实混凝土层下方的凸台与底座板上方的凹槽相互嵌合。在走滑断层发生错动时,这种嵌合结构会出现松动,极大地降低了应力传递效率,有效防止了多层轨道板上部结构的严重破坏。

3.3 层间离缝发展过程

轨道板为多层板式结构,各层之间并不是完全固定,在走滑断层错动影响下易发生层间离缝损伤,由于轨道板与自密实混凝土之间使用门型钢筋相连,底座板与仰拱通过 L 型钢筋连接,形成较为紧密的结构体系,所以离缝现象常出现在自密实混凝土与底座板的接触面,主要表现为 SCC 板和底座板之间的离缝^[18]。

根据《高速铁路线路维修规则》^[19],自密实混凝土层的离缝等级被划分为 I 级和 II 级,在不同等级的判定标准中规定了容许的离缝最大深度、宽度和长度,具体规定见表 3。

表 3 自密实混凝土层层间离缝损伤等级

Table 3 Damage levels of interlayer delamination in self-compacting concrete

层间离缝	评定等级及限值	
	I	II
宽度	1.0	1.5
深度	50	100
长度	100	300

单位:mm

为定量分析自密实混凝土与底座板之间的离缝规律,提取二者间离缝宽度发展的云图,如图 8 所示,以观察其离缝发展模式。

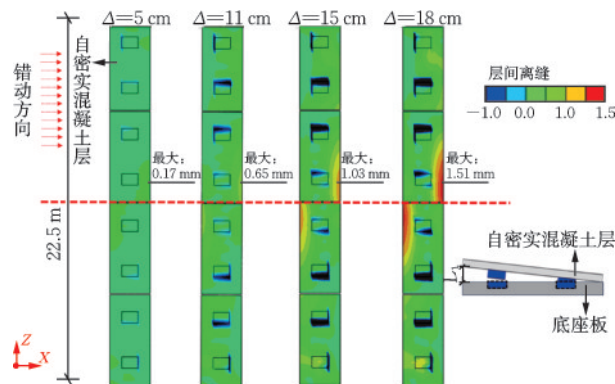


图 8 自密实混凝土层与底座板层间离缝分布

Fig.8 Distribution of interlayer delamination between self-compacting concrete and base plate

层间离缝现象首先在滑动破裂面两端的自密实混凝土板边缘显现,错动量较小时板间的离缝并不显著,为 0.3~0.4 mm。随着走滑断层错动量的逐步增加,滑动破裂面两侧围岩对隧道的挤压逐步增大,进而导致层间离缝的逐渐增大,但离缝开展趋势和分布的保持不变,离缝开展位置依旧沿滑动破裂面中心对称。当错动量 $\Delta=15$ cm 时,滑动面两侧离缝宽度达到 I 级伤损限值所规定的 1 mm,此时离缝的宽度和深度也迅速超过 I 级限值。

进一步,错动量 Δ 超过 18 cm 时,离缝宽度超过 II 级伤损等级。同时可见,离缝在深度和长度方向的严重程度显著超过宽度方向的变化。当走滑断层错动量增大到底座板与自密实混凝土板间的离缝宽度超过 1 mm 时,离缝长度和深度已大幅超出规定的限值。因此,判断损伤是否达到限值的关键在于监测离缝宽度的变化:当错动量达到 15 cm 时,损伤超过 I 级限值;当错动量达到 18 cm 时,损伤超出 II 级限值。

4 走滑断层错动对轨道不平顺的影响

高速铁路要求轨道几何状态必须保持极高平顺性,否则行车舒适性和安全性将受到影响^[20],因此,为了保证轨道在高速列车运行下保持良好状态,必须加强对轨道不平顺的管理。轨道不平顺是指轨道几何形状、尺寸和空间位置的偏差,具体可表现为水平、高低、轨向和轨距不平顺。

《高速铁路线路维修规则》^[19]中记录的我国轨道静态不平顺管理标准分为作业验收、计划维修、临时补修、限速(不大于 160 km/h)4 级,见表 4。静态管理准则用于评估轨道在空间中绝对几何位置

表 4 200~250 km/h 线路轨道静态几何不平顺容许偏差管理值

Table 4 Allowable deviation management values of static track geometric irregularities of 200~250 km/h lines

项目及偏差等级	单位:mm			
	作业验收	计划维修	临时补修	限速 (不大于 160 km/h)
轨向	2	4	7	9
高低	2	5	8	11
水平	2	5	8	10
轨距	+1	+4	+6	+8
	-1	-2	-4	-6

的变化。其中,高低偏差和轨向偏差的限值基于10 m弦测量的最大矢度值确定,其测量原理如图9所示,AB为测量基准,ab为变形后的轨道,在轨道上选取间距为10 m的两点并拉一根直线(弦),测量弦中点与轨道之间的偏差程度 D_1 ^[21]。通过10 m弦沿轨道纵向连续测量,得到的最大矢度值即作为评价轨道不平顺程度的指标,该值越大,表明轨道不平顺越严重。

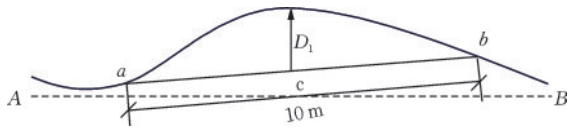


图9 10 m弦测法示意

Fig.9 Schematic diagram of 10 m chord measurement

走滑断层错动下高速铁路轨道的轨道不平顺具体如图10所示,可知在走滑断层错动下最主要的平顺为高低不平顺与轨向不平顺,而轨距和水平不平顺大小可以忽略不计。其中,轨向不平顺沿纵向的分布可大致划分为三个区段:受断层错动影响产生强制位移的下盘围岩段、变形剧烈的断层破碎带段,以及变形趋于平稳的上盘围岩段。这一分布趋势则与W. Chen等^[22]关于走滑断层错动下的轨向不平顺的研究结果一致。

轨向与高低偏差的10 m弦测量的最大矢度值沿轨道纵向距离分布如图11所示,通过与静态几何不平顺容许偏差管理值对比可知,高低偏差始终处于Ⅱ级(计划维修)限值范围内,说明走滑断层错动对高低偏差的影响较小,轨道在高低方向上的平顺状态保持良好。

然而,轨向偏差的情况则不同。当错动量 $\Delta=6$ cm的时候,轨向偏差仍在Ⅰ级限值内,这表明轨道的几何形态基本保持在优良状态,能够满足正常的运营要求。随着错动量的增加,轨向偏差开始超出限值。当错动量 $\Delta=10$ cm时,轨向偏差超出了Ⅱ级限值,这意味着轨道的几何形态已经开始恶化,需要进行维修以恢复其正常状态。而当错动量 Δ 进一步增加到14 cm时,轨向偏差超出了Ⅲ级限值,此时轨道的状态已经较为严重,需要立即进行临时补修以确保行车安全。

在错动量 $\Delta=16$ cm的时,轨向偏差超出了Ⅳ级限值的限速要求。这意味着在这种情况下,列车的运行速度需要限制在160 km/h以下,以防止因轨道不平顺而引发的安全事故。这表明,轨道的几何形态已经严重影响到列车的正常运行。

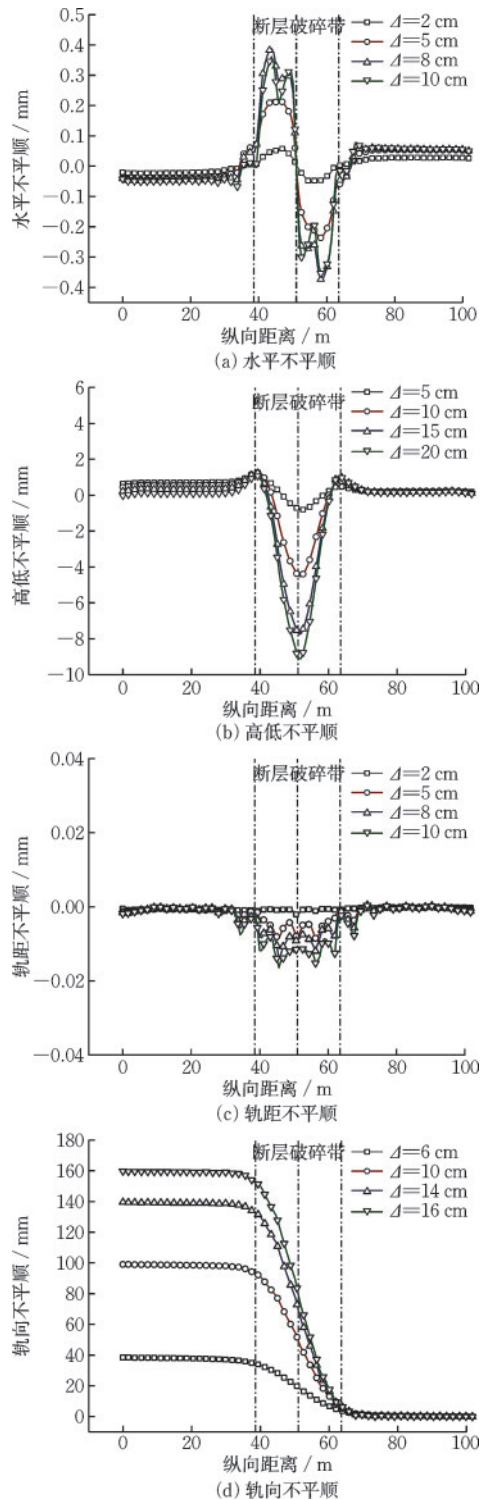


图10 走滑断层错动下轨道不平顺

Fig.10 Track irregularities under strike-slip fault dislocation

考虑到轨道本身在运营过程中存在着初始不平顺^[23],断层错动产生的不平顺将与初始不平顺相互叠加,从而更容易使轨道几何形态超出限值。因此,建议在错动量较小时即进行维修与限速管理,以预防轨道状态恶化,确保行车安全。

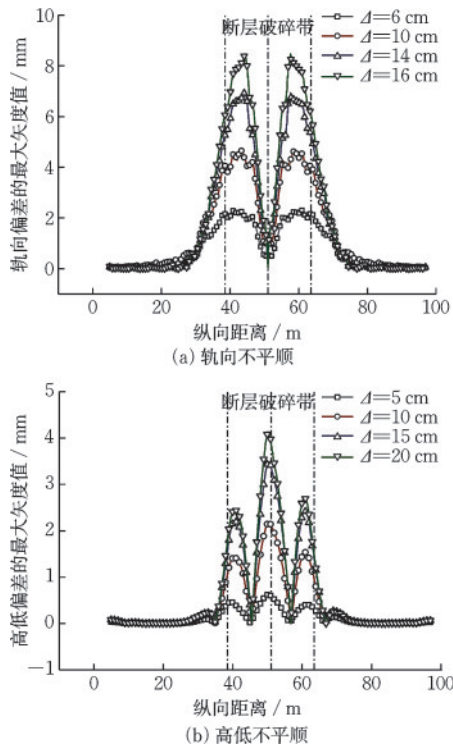


图11 走滑断层错动下轨道不平顺(10 m弦测法)

Fig.11 Track irregularities under strike-slip fault dislocation (10 m chord measurement)

5 结 论

(1) 在走滑断层错动作用下,高速铁路隧道衬砌的压损伤和拉损伤均集中于断层破碎带内部。压损伤主要集中在滑动破裂面附近的拱顶和拱底区域,由于这些部位受剪压应力影响显著,易发生挤压-剪切破坏;而拉损伤则以滑动破裂面两侧的衬砌拱腰为主,主要由弯矩产生的拉应力超过混凝土抗拉强度而引发弯曲受拉破坏。

(2) 在走滑断层错动下,轨道板的塑性损伤集中于破碎带内部的底座板,尤其是围岩性质改变的区域,由于层间离缝的产生,复合板收到的损伤较轻。

(3) 走滑断层错动对轨道不平顺的影响主要表现在轨向与高低不平顺上,轨距与水平不平顺可忽略不计。

(4) 在对高速铁路隧道在断层错动下的损伤进行评估时,传统方法以结构强度极限(如混凝土开裂、剥落)作为判据,需待结构出现明显损伤后才能触发运维响应。而本文评估方法通过监测轨道不平顺(如 $\Delta=14$ cm时轨向偏差等级超Ⅲ级)和层间离缝($\Delta=15$ cm超Ⅰ级),可在线路运行能力降低节

段预警,使运维介入时机从“结构修复”提前至“功能维护”。

(5) 隧道结构的破坏晚于轨道结构的破坏和轨道通行能力降低。然而目前,现行规范中并未针对走滑断层错动对轨道结构及轨道通行功能的影响给出详细的规定。因此,应针对结合走滑断层错动对轨道结构和通行能力的影响,进一步开展穿断层高速铁路隧道抗错动方面的研究。

参考文献:

- [1] 崔光耀,王明年,于丽,等.汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究[J].土木工程学报,2013,46(11):122-127.
Cui G Y, Wang M N, Yu L, et al. Study on the characteristics and mechanism of seismic damage for tunnel structures on fault rupture zone in Wenchuan seismic disastrous area[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 122-127. (in Chinese)
- [2] 张威,李明,姬云平,等.青海门源M6.9地震典型隧道破坏特征分析与启示[J].地震工程学报,2022,44(3):661-669.
Zhang W, Li M, Ji Y P, et al. Analysis and enlightenment of typical failure characteristics of tunnels caused by the Menyuan M6.9 earthquake in Qinghai Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 661-669. (in Chinese)
- [3] 陈鹏涛,漆泰岳,梁孝,等.地铁振动下盾构隧道道床剥离病害演化规律研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):797-806.
Chen P T, Qi T Y, Liang X, et al. Study on the evolution of detachment disease of shield tunnel track bed under metro vibration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 797-806. (in Chinese)
- [4] Zhang K, Ren J, Ye W, et al. The influence of uneven frost heave and thermal conditions on the deformation and damage of slab track in seasonally frozen regions [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 157: 107881.
- [5] 肖坤泽,童亨茂.走滑断层研究进展及启示[J].地质力学学报,2020,26(2):151-166.
Xiao K Z, Tong H M. Progress on strike-slip fault research and its significance [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 151-166. (in Chinese)
- [6] 周光新,盛谦,崔臻,等.走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞破坏机制模型试验[J].岩土力学,2022,43(1):37-50.

- Zhou G X, Sheng Q, Cui Z, et al. Model test of failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active fault under strike-slip fault dislocation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 37-50. (in Chinese)
- [7] Sabagh M, Ghalandarzadeh A. Numerical modelings of continuous shallow tunnels subject to reverse faulting and its verification through a centrifuge [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 128: 103813.
- [8] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1876-1884.
- Wang Z, Zhong Z L, Zhao M, et al. Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1876-1884. (in Chinese)
- [9] 王志岗, 陶连金, 史明, 等. 穿越活动断裂带的城市地铁隧道抗断性能及损伤状态量化指标研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(6): 1772-1786.
- Wang Z G, Tao L J, Shi M, et al. Investigation of fracture resistance and quantitative damage state indices of urban metro tunnels crossing active fault zones [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(6): 1772-1786. (in Chinese)
- [10] 高亮, 赵磊, 曲村, 等. 路基上CRTSⅢ型板式无砟轨道设计方案比较分析 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(6): 848-855.
- Gao L, Zhao L, Qu C, et al. Analysis on design scheme of CRTSⅢ slab track structure on roadbed [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(6): 848-855. (in Chinese)
- [11] 王成晓. CRTSⅢ型板式无砟轨道力学特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- Wang C X. Study on mechanical characteristics of CRTSⅢ type slab ballastless track [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [12] 赵颖, 郭恩栋, 王琼, 等. 走滑断层地震地表断裂位错估计方法研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(5): 1403-1408.
- Zhao Y, Guo E D, Wang Q, et al. Estimate method of dislocation to seismic surface rupture under strike-slip fault [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1403-1408. (in Chinese)
- [13] Yang H, Wang M, Yu L, et al. A refined nonlinear theoretical model for mechanical analysis of tunnels subjected to strike-slip faulting with multiple fault planes [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17(8): 5018-5037.
- [14] 蔡小培, 罗必成, 常文浩, 等. 严寒地区CRTSⅢ型板式无砟轨道变形与损伤 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(12): 92-97.
- Cai X P, Luo B C, Chang W H, et al. Research on deformation and damage of CRTSⅢ slab track in severe cold regions [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(12): 92-97. (in Chinese)
- [15] Guo W, Ye Y, Hu Y. Seismic damage analysis of bridge-CRTSⅢ slab ballastless track system on high-speed railway [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 161: 107416.
- [16] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59-67.
- Nie J G, Wang Y H. Comparative study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 59-67. (in Chinese)
- [17] Wang Z, Tao L, Shi M, et al. Response and seismic resilience of metro tunnels under normal fault dislocation evaluated based on the quantitative method of concrete damage state [J]. *Structures*, 2024, 70: 107794.
- [18] Cai X, Zhang Q, Zhang Y, et al. Deformation law and control limit of CRTSⅢ slab track under subgrade frost heave [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3520.
- [19] 国家铁路局. 高速铁路线路维修规则: 国铁设备监规〔2023〕15号 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.
- [20] 陈果, 翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟 [J]. *西南交通大学学报*, 1999, 34(2): 138-142.
- Chen G, Zhai W M. Numerical simulation of the stochastic process of railway track irregularities [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1999, 34(2): 138-142. (in Chinese)
- [21] 张建, 程朝阳, 李颖, 等. 轨道几何动静态检测分析 [J]. *中国铁路*, 2022(8): 180-185.
- Zhang J, Cheng C Y, Li Y, et al. Dynamic and static detection and analysis of track geometry [J]. *China Railway*, 2022(8): 180-185. (in Chinese)
- [22] Chen W, Wu P, Xu L, et al. Response of prefabricated-polyurethane reinforced ballasted track to dislocation in tunnels through active fault zone [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2024, 12(6): 1064-1084.
- [23] 康熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(7): 687-696.
- Kang X, Liu X B, Li H Y, et al. PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(7): 687-696. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)