

混凝土力学性能对铁路隧道动力响应与损伤演化影响的数值分析*

李国权

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 随着轨道交通的快速发展,铁路隧道结构长期承受列车高频往复动荷载作用,混凝土材料性能的差异直接影响结构的动力响应与服役寿命。基于 ABAQUS 软件,建立列车-轨道-隧道三维动力耦合模型,系统研究了低强度高韧、标准强度、高强高模 3 组不同力学性能混凝土在移动列车荷载作用下的动力响应特征、损伤演化规律及刚度退化机制。结果表明:材料弹性模量对动位移与动应力具有反向调控作用,高模量虽能有效抑制变形,但因刚度吸收效应会吸引更多动内力,放大疲劳荷载基数;损伤演化模式呈现显著的材料依赖性,低强材料表现为早期广域网状开裂,高强材料则呈局部脆性贯穿特征;全生命周期刚度演化显示,高强材料中前期优势明显,但后期因缺乏塑性耗能机制易发生突发性失稳。

[关键词] 铁路隧道;混凝土;动力响应;刚度退化;疲劳损伤;数值模拟

[中图分类号] U213

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0037-06

Numerical Analysis of Influence of Concrete Mechanical Properties on Dynamic Response and Damage Evolution of Railway Tunnel

LI Guoquan

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: With the rapid development of urban rail transit, railway tunnel structures are subjected to long-term high-frequency reciprocating dynamic loads induced by train operations. The variability in concrete material properties directly influences the structural dynamic response and service life. Based on ABAQUS software, a three-dimensional dynamic coupling model of train-track-tunnel is established. The dynamic response characteristics, damage evolution law and stiffness degradation mechanism of concrete with low strength and high toughness, standard strength and high strength and high modulus under moving train load were systematically studied. The results show that the elastic modulus of the material has a reverse regulation effect on the dynamic displacement and dynamic stress. Although the high modulus can effectively suppress the deformation, it will attract more dynamic internal forces and amplify the fatigue load base due to the stiffness absorption effect. The damage evolution mode shows a significant material dependence. Low-strength materials show early wide-area network cracking, while high-strength materials show local brittle penetration characteristics. The stiffness evolution of the whole life cycle shows that the high-strength material has obvious advantages in the early stage, but it is prone to sudden instability in the later stage due to the lack of plastic energy dissipation mechanism.

Keywords: railway tunnel; concrete; dynamic response; stiffness degradation; fatigue damage; simulation

0 引言

随着轨道交通系统的持续扩展,铁路隧道及其

轨道结构长期承受着由列车运行引发的高频、长周期动荷载作用^[1]。混凝土作为该类结构的关键承载材料,其力学性能因功能需求和配合比设计而异,这种差异从根本上决定了结构在动荷载下的瞬态响应特征及长期服役性能^[2]。传统的静力学分

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 李国权,工程师,E-mail: 648528406@qq.com

[收稿日期] 2026-03-16

析方法已难以满足现代工程对结构动力安全性的精确评估需求。因此,开展不同性能指标下混凝土结构动力响应特性的定量研究,对保障轨道交通基础设施的长久安全与推动高性能材料的优化选型,具有重要的理论与工程意义。

当前,针对铁路结构动力响应的研究,国内外学者多采用解析法、现场监测与数值模拟相结合的手段,并广泛认可采用混凝土损伤塑性模型来表征材料在地震或疲劳荷载下的非线性损伤行为^[3]。然而,现有研究多侧重于列车速度、荷载谱特征、隧道埋深等外部因素对结构动力响应的影响规律,对于材料自身关键力学参数如何影响结构内力传播、损伤萌生与演化过程及整体刚度退化机制,尚缺乏系统深入的定量评价。这使在工程设计阶段,难以直接依据材料力学性能指标来精确预判结构的动力性能边界^[4]。

针对上述问题,本文利用 ABAQUS 对郑万高铁某隧道结构建立精细化的列车-轨道-隧道动力耦合分析模型。通过理论推导与试验数据标定,建立混凝土宏观力学性能参数与其本构模型关键指标之间的关系。在此基础上,基于 Hertz 接触理论施加移动列车荷载,系统开展列车动荷载作用下结构的动力响应特征、应力与损伤演化规律及结构整体刚度退化机制 3 个层面的深入分析。重点考察混凝土强度与弹性模量对结构位移场、加速度响应及损伤扩展路径的抑制作用,以期揭示材料性能参数与结构动力响应之间的内在关联及演变逻辑^[5]。

通过对多组模拟工况的系统梳理与归纳,本文旨在量化不同材料力学参数对铁路结构动力损伤演化速率及承载力退化的贡献程度。研究成果不仅可丰富复杂动力环境下混凝土结构的疲劳与损伤演化理论,也能为铁路隧道及轨道结构的材料选型、预防性养护策略制定及全生命周期安全评估提供科学依据。

1 岩壁梁开挖质量多指标评价体系建立

为研究材料力学性能对铁路结构动力响应的影响,本研究通过调控水胶比、骨料级配及高效减水剂掺量,设计了 C-L(低强高韧型)、C-M(标准强度型)与 C-H(高强高模型)3 组力学性能具有显著梯度的混凝土。其中,C-L 组弹性模量较低;C-M 组作为铁路结构中的标准性能参照;C-H 组则通过降低水胶比并掺入矿物掺合料,以获得较高的弹性模量与抗压强度。该梯度设计涵盖了城市轨道交通工程中可能出现的不同材料性能区间,为后续分析材料性能波动对结构动力响应的影响提供具有代

表性和对比性的工况设置。试件力学性能变化如图 1 所示(抗拉视觉放大 10 倍)。

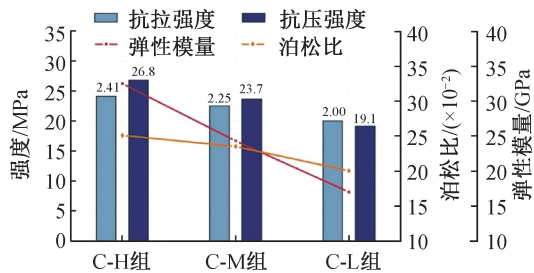


图 1 混凝土材料力学性能变化

Fig. 1 Variation of mechanical properties of concrete

在选择混凝土力学计算模型时,由于混凝土损伤塑性模型(concrete damaged plasticity, CDP)特别适用于模拟混凝土在单调、循环及动态加载条件下的非线性行为,能准确捕捉在列车往复动荷载作用下的混凝土力学性能变化与宏观刚度衰减过程。在获取上述宏观力学参数后,需将其转换为 ABAQUS 有限元软件中 CDP 模型可识别的输入参数。由于 CDP 模型采用非弹性应变驱动损伤演化,因此,在参数输入时,需依据试验测得的本构关系曲线,推导并输入以下 4 组参数:受压应力-受压非弹性应变($\sigma_c - \bar{\varepsilon}_c^{in}$),压缩损伤因子-受压非弹性应变($d_c - \bar{\varepsilon}_c^{in}$),受拉应力-受拉非弹性应变($\sigma_t - \bar{\varepsilon}_t^{ek}$)和拉伸损伤因子-受拉非弹性应变($d_t - \bar{\varepsilon}_t^{ek}$)^[6]。

单轴受压荷载下混凝土的典型理论应力-应变关系如图 2a 所示(σ_{c0}, σ_{cu} 分别为混凝土弹性阶段最大受压应力,混凝土最大受压应力; $\bar{\varepsilon}_{c0}^{el}, \bar{\varepsilon}_c^{el}$ 分别为不考虑损伤的弹性压应变,考虑损伤的弹性压应变; $\bar{\varepsilon}_c^{pl}, \bar{\varepsilon}_c^{in}$ 分别为混凝土受压塑性应变和混凝土受压非弹性应变; E_0 为初始弹性模量; E_c 为受压损伤后的弹性模量; d_c 为压缩损伤因子)。基于此,可通过试验测得的应力应变曲线,结合式(1)~(4),拟合试验受压本构曲线,如图 2b 所示,并分别推导出受压应力-非弹性应变与受压损伤因子-非弹性应变关系。

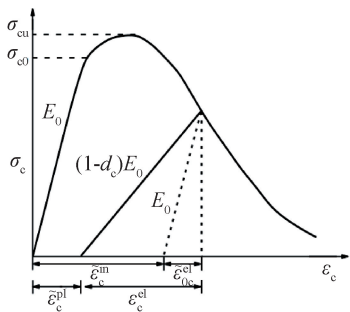
$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \bar{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \bar{\varepsilon}_c^{el} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (2)$$

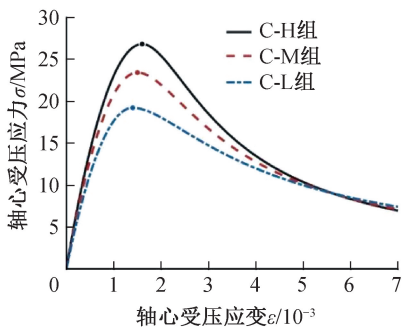
$$\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in} = \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3)$$

$$d_c = -1 \sqrt{\frac{\sigma_c}{E_0 E_c}} \quad (4)$$

单轴受拉荷载下混凝土的典型理论应力-应变关系如图 3a 所示(σ_t 为混凝土弹性段最大受拉应



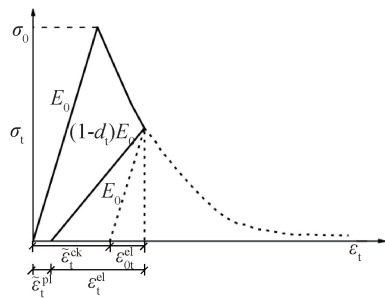
a 单轴荷载受压理论本构曲线



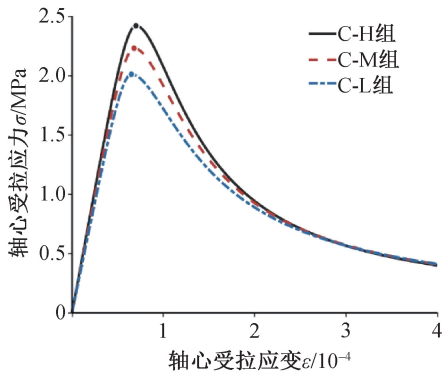
b 试验拟合受压本构曲线

图2 受压荷载下混凝土本构曲线

Fig. 2 Constitutive curve of concrete uniaxial compressive load



a 单轴荷载受拉理论本构曲线



b 试验拟合受拉本构曲线

图3 受拉荷载下混凝土本构曲线

Fig. 3 Constitutive curve of concrete under-tensile load

力; $\bar{\varepsilon}_{0t}^{el}$, $\bar{\varepsilon}_{t1}^{el}$ 分别为不考虑损伤的弹性拉应变, 考虑损伤的弹性拉应变; $\bar{\varepsilon}_t^{pl}$, $\bar{\varepsilon}_t^{in}$ 分别为混凝土受拉塑性应变和混凝土受拉非弹性应变; E_0 为初始弹性模量, E_t 为受拉损伤后的弹性模量, d_t 为拉伸损伤因子)。基于此, 可通过试验测得的应力应变曲线, 结合式 (5)~(8), 拟合试验受拉本构曲线, 如图 3b 所示, 并分别推导出受拉应力-非弹性应变与受拉损伤因子-非弹性应变关系。

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \bar{\varepsilon}_{0t}^{el} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_t^{pl} = \bar{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (7)$$

$$d_t = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_t}{E_0 \varepsilon_t}} \quad (8)$$

2 铁路动力有限元模型的建立与验证

为真实模拟铁路列车运行过程中列车-轨道-隧道之间的动力相互作用, 建立全尺寸三维动力分析模型。模型由钢轨、道床、隧道管片及深厚围岩土体 4 部分组成, 能较全面地反映列车动荷载在轨道系统内部及其向周边土体传播的全过程^[7]。

2.1 模型几何尺寸与单元划分

隧道结构的土体计算域在横向及深度方向均取隧道直径的 10 倍以上, 确保边界效应不会对模型

计算结果产生干扰^[8]。对受力复杂、响应剧烈的钢轨、道床及隧道区域采用八节点六面体线性减缩积分单元 C3D8R 进行模拟; 对于远场土体区域, 采用渐变的过渡网格, 以兼顾计算精度与求解效率。该模型能有效捕捉振应力从轨下结构向隧道衬砌及围岩逸散的完整演化过程^[9]。

2.2 列车动荷载的施加

动荷载的准确模拟是保障动力分析结果可靠性的关键。本研究建立了考虑轴重分布的列车模型。轮轨相互作用力基于 Hertz 非线性接触理论计算确定, 以反映轮轨接触刚度的非线性特征。列车运行速度设定为 80km/h, 荷载沿钢轨纵向匀速移动, 从而使隧道结构在时域内经历完整的加载、峰值和卸载循环过程, 对结构施加循环荷载, 为分析长期服役性能, 采用基于损伤等效的循环跳跃 (cycle-jump) 外推策略, 以模拟百万次级别的高频循环动荷载作用。相较于传统的固定点节点力时程加载方式, 这种移动荷载施加方法能更客观地反映铁路运营过程中结构受力的时空非对称特性, 为后续分析不同材料性能下的结构损伤演化提供了合理的动力输入条件^[10]。

2.3 模型验证

有限元计算模型如图 4 所示。在相同工况条件

下,将模型计算得到的结果与已有文献中的计算数据进行对比分析。结果表明,模型预测的位移峰值、加速度幅值及振动主频等关键动力响应指标与已有文献计算结果吻合良好,以 C-M 组计算结果为例,在板中和板端静荷载作用下,轨道结构的最大垂向加速度、最大垂向位移计算结果与本文计算结果误差较小,同时各结构的计算应力云图与目前已有文献的应力图高度一致;动荷载作用下轨道结构的位移及加速度也与本文模型计算结果误差较小,表明建立三维动力耦合模型能较准确地模拟铁路运营引起的结构力学响应。

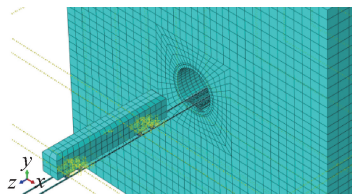


图 4 列车-轨道-隧道动力耦合分析模型
Fig. 4 Dynamic coupling analysis model of train-track-tunnel system

3 材料性能对结构动力性能的影响

基于已验证的三维动力有限元模型,针对 C-L, C-M, C-H 3 组不同力学性能的混凝土材料,系统对比分析其在列车移动荷载作用下的动力响应特征、损伤演化规律及刚度退化机制,旨在揭示材料性能参数对铁路隧道结构动力行为的影响规律。

3.1 动力响应特征分析

当列车以 80km/h 的速度通过时,隧道底部结构将同时承受瞬态冲击与高频振动。提取模型计算的隧道拱底竖向位移时程曲线如图 5 所示。

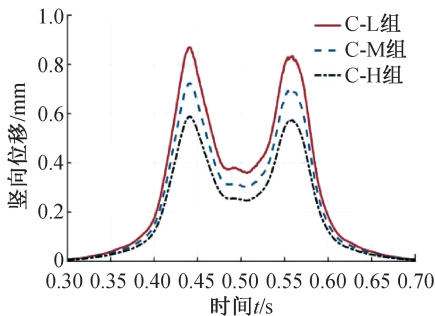


图 5 隧道拱底竖向位移时程曲线
Fig. 5 Vertical displacement time-history curve of tunnel arch bottom

混凝土弹性模量直接决定了结构的初始抗变形能力。C-L 组的峰值位移最大,达到 0.85mm; C-M 组次之,为 0.71mm;而 C-H 组凭借较高的初始刚度,峰值位移降低至 0.58mm,较 C-L 组降低了约

31.8%。然而,位移响应的减小伴随着动应力水平的升高,提取管片拱底最大主应力时程数据发现,随着材料弹性模量的提升,结构产生的动应力响应显著放大。这是由于在动力土-结构相互作用体系中,刚度较大的构件会吸引更多内力,形成刚度吸收效应。C-H 组虽然限制了绝对变形,但其承受的瞬态拉应力峰值较 C-L 组高出约 22%。这种“高刚度、高应力”的能量分配机制,使高强度材料在长期服役过程中面临更高的疲劳荷载基数,为疲劳损伤的演化埋下了潜在风险。

3.2 应力与损伤演化规律研究

在移动列车荷载的循环作用下,结构内部的应力场分布受材料强度的显著调控。数值模拟结果表明,最大主应力主要集中于道床与隧道的连接部位及拱底内侧区域。C-L 组由于材料抗拉强度较低,其受拉区应力较早达到极限抗拉强度,导致在较少的荷载循环次数后即开始萌生损伤。3 组模型损伤开始和损伤逐步发展后的受拉损伤因子分布如图 6 所示。由图 6 可知,在相同荷载作用下,C-L 组最先发生塑性损伤,而此时 C-M 组和 C-H 组无塑性损伤发生。随着荷载损伤发展,C-L 组的损伤区域已沿环向扩展,呈现出低门槛、广蔓延的损伤特征;而 C-H 组的损伤则高度集中在荷载作用点正下方的局部范围内,展现出较强的抗损伤扩展能力。

进一步分析损伤演化速率发现,虽然 C-H 组对损伤扩展有较强的抵抗力,但其也表现出更显著的脆性演化特征。虽然该组材料开裂时间较晚,但一旦应力超过其抗拉强度阈值,损伤因子的增长速率显著高于 C-L 组。这种高阈值、高增长的演化模式源于高强材料断裂能释放的局部化特性,即在达到峰值应力后,裂缝快速贯通导致刚度急剧下降。这一现象说明,采用高强混凝土结构时,服役期间应重点关注突发性脆性裂缝扩展风险;而对于常规强度混凝土,则应更关注长期动荷载作用下的疲劳损伤累积过程。

3.3 结构刚度退化机制评价

为量化评估不同材料方案的长期服役性能,定义结构有效刚度 k_{eff} 为荷载峰值与相应位移峰值的比值,并提取其在动荷载循环下的衰减曲线,如图 7 所示。分析刚度退化曲线的三阶段特征,可归纳材料性能对结构全生命周期的影响规律。

1) 初期剧降阶段:在加载初期,C-L 组的微裂缝发展最活跃,刚度在较短时间内迅速下降约 15%,表明低模量材料难以有效抵抗列车荷载的初始冲击扰动。C-M 组与 C-H 组的初期刚度衰减相对平

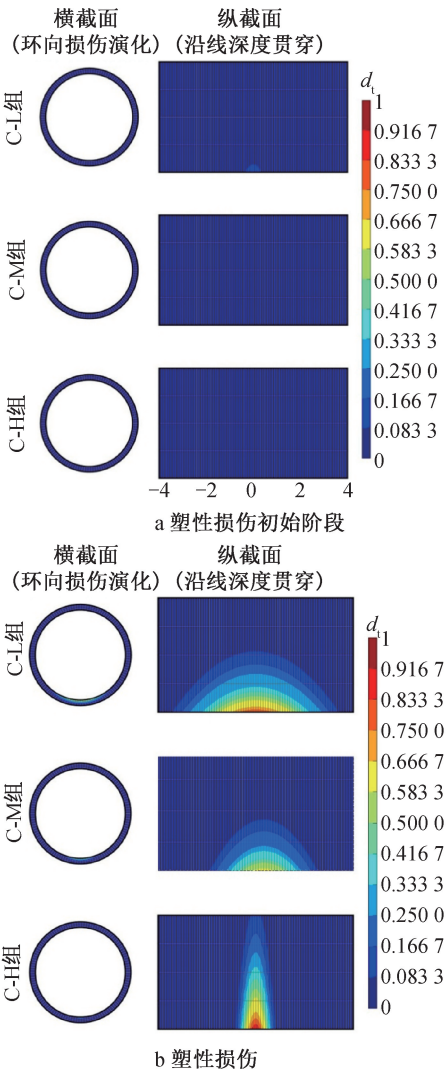


图 6 不同材料组结构塑性损伤因子分布
Fig. 6 Distribution of plastic damage factor in different material groups

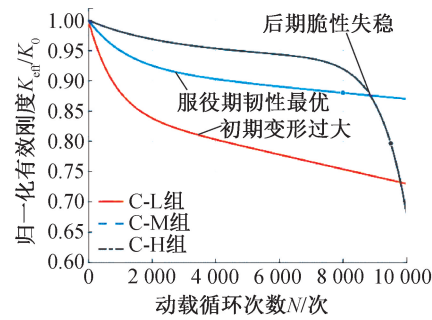


图 7 结构有效刚度随动载循环次数的退化规律
Fig. 7 Degradation law of structural effective stiffness with number of dynamic loading cycles

缓,体现了较高初始刚度的优势。

2) 中期稳定阶段:随着循环次数的增加,3 组材料的刚度退化速率均有所减缓,进入相对稳定的损伤发展阶段。此阶段 C-H 组凭借较高的初始刚度,其剩余刚度绝对值仍保持最高。

3) 后期失稳阶段:值得关注的是 C-H 组虽然在循环中前期剩余承载力较高,但随着循环次数的持续增加,其刚度退化曲线在后期出现明显的断崖式下降。这是由于高模量材料在高频往复荷载作用下,内部微裂纹缺乏足够的塑性变形机制来耗散能量,最终引发疲劳脆性破坏。相比之下,C-L 组与 C-M 组的刚度退化曲线在后期表现出相对缓降的特征,延性特征更明显。

综上分析,在铁路高频往复偏载环境中,追求高弹性模量或超高强度并不能无限延长结构服役寿命,反而可能因应力集中和脆性断裂风险而加剧局部损伤。C-M 组在控制初期刚度衰减与延缓后期疲劳失稳之间取得了最佳平衡,为隧道结构在全生命周期内保持力学性能与几何稳定性提供了较优的材料选择策略。

4 结语

针对铁路列车高频往复荷载作用下隧道结构的动力服役安全问题,基于精细化三维动力有限元模型与混凝土 CDP 本构,系统研究了不同力学性能混凝土的动力响应特征、疲劳损伤演化规律及全寿命周期刚度退化机制,得出以下主要结论。

- 1) 瞬态动力响应中的刚度吸收效应上,混凝土弹性模量对结构的动位移与动应力具有反向调控作用。提升刚度虽能有效抑制瞬态下沉,但因刚度吸收效应会吸引更多动内力,形成低变形、高应力的能量分配模式,放大结构承受的疲劳荷载基数。
- 2) 疲劳损伤演化的材料特征上,材料强度与延性共同决定损伤演化模式:低强材料呈现发生早、蔓延快的表层网状开裂;高强材料表现为高阈值、易贯穿的局部脆性断裂,其隐蔽性与突发性对隧道防渗构成重大隐患。

3) 结构刚度退化与失稳机制上,动荷载下结构刚度演化呈现三阶段特征。低强材料初期退化迅速;高强材料中前期优势明显,但后期因缺乏塑性耗能机制易发生突发性脆性失稳。材料韧性与刚度的协同优化比单一追求高强度更重要。

4) 地下工程材料设计建议方面,铁路隧道材料选型应向刚度匹配与抗疲劳韧性协同的理念转变,使初始模量与周边土体相协调,并通过骨料优化、纤维掺入等方式提升断裂能与延性。建议采用性能平衡型配合比方案,以兼顾初期变形控制与后期疲劳延寿,确保结构全生命周期的安全稳定性。

参考文献:

[1] 陈志宁,赵红光,李逸涛,等. 复杂地层中地铁交叠车站列车荷载作用下结构动力响应特性[J]. 城市轨道交通研究,

2025,28(7):72-79.

CHEN Z N, ZHAO H G, LI Y T, et al. Structural dynamics response characteristics of metro overlapping stations under train loads in complex strata[J]. Urban mass transit,2025,28(7):72-79.

[2] 陈诗泉,谢恩慧,高全青. 骨料对超高性能混凝土静力受压弹性模量的影响[J]. 公路,2026,71(3):326-331.

CHEN S Q, XIE E H, GAO Q Q. Effect of aggregate on elastic modulus of ultra-high performance concrete under static compression[J]. Highway,2026,71(3):326-331.

[3] 刘楚瑶,罗梓轩,杨柳,等. AI 赋能的混凝土材料基因数据库智能设计及应用[J]. 硅酸盐学报,2026,54(3):909-921.

LIU C Y, LUO Z X, YANG L, et al. AI-powered intelligent design of concrete material gene database [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2026,54(3):909-921.

[4] 陈宇良,林泽宇,张士前,等. 复合受扭下扭转比对焊接栓钉型钢混凝土柱滞回性能影响研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报,1-15[2026-03-16].

CHEN Y L, LIN Z Y, ZHANG S Q, et al. Effect of torsion-bending ratio on hysteretic behavior of welded stud steel reinforced concrete columns under combined torsion [J/OL]. Journal of railway science and engineering, 1-15 [2026-03-16].

[5] 张曼,任娟娟,邓世杰,等. 基于混合优化算法的轨道板混凝土受拉疲劳本构参数反演[J]. 铁道科学与工程学报,2026,23(4):1653-1665.

ZHANG M, REN J J, DENG S J, et al. Inversion of tensile fatigue constitutive parameters of track slab concrete based on a hybrid optimization algorithm [J]. Journal of railway science and engineering, 2026,23(4):1653-1665.

[6] 张田. 典型混凝土模型在单调和循环荷载下数值模拟应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2020.

ZHANG T. Evaluation and application of typical material models used in fe modelling under monotonic and cyclic loading conditions [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.

[7] 张天,付兵先,姚建平,等. 运营铁路隧道围岩膨胀特性与基底上拱力学行为研究[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(3):140-153.

ZHANG T, FU B X, YAO J P, et al. Research on the swelling characteristics of surrounding rock and mechanical behavior of floor heave in operational railway tunnels [J]. China railway science, 2025,46(3):140-153.

[8] 杨燕,刘上春,马永浪,等. 隧道内 CRTS I 型双块式无砟轨道轨枕离缝修复技术研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(S1):196-202.

YANG Y, LIU S C, MA Y L, et al. Research on repair technology of sleeper separation of CRTS I double block ballastless track in tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2019, 56 (S1): 196-202.

[9] WANG Y Q, CAI X P, LIU W L, et al. Seismic-induced damage characteristics of high-speed railway ballastless tracks: a comprehensive nonlinear numerical simulation method [J]. Engineering structures, 2025, 343:121248.

[10] 任娟娟,赵华卫,李潇,等. 减振 CRTS III 型板式无砟轨道路隧过渡段动力分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6):1047-1054.

REN J J, ZHAO H W, LI X, et al. Dynamic performances of CRTS III prefabricated slab track with anti-vibration structure in subgrade-tunnel transition section [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016,51(6):1047-1054.