

DOI:10.11918/202209090

隧底富水围岩脱空条件下重载铁路隧道动力响应

王登科, 骆建军, 王官清, 李飞龙, 侯艳娟

(城市地下工程教育部重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘要: 为研究隧底围岩脱空对水-力耦合作用下重载铁路隧道动力响应特性的影响, 采用现场试验与数值模拟相结合的方法, 分别以竖向位移、孔隙水压力和竖向动应力作为评价指标, 分析了不同脱空形状(椭圆、余弦和矩形)下富水隧底结构的动力响应规律, 提出了一种符合实际的脱空形状, 确定了富水隧底围岩的脱空阈值。研究表明: 随着脱空宽度的增加, 隧道底部结构动力响应不断增大, 且脱空宽度超过一定值后动力响应变化加剧, 这种现象在脱空区域尤为明显; 3种脱空形状下, 以矩形脱空动力响应最大, 椭圆形脱空次之, 余弦形脱空最小; 其中, 椭圆形脱空最符合实际, 该脱空下基底动力响应是无脱空情况下的4.2倍, 隧道底部围岩脱空阈值为0.6 m。研究结果可为富水重载铁路隧道行车安全及脱空病害整治提供依据。

关键词: 重载铁路隧道; 富水软弱地层; 水-力耦合; 隧底围岩脱空; 动力响应

中图分类号: U25

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)07-0033-10

Dynamic response of heavy-duty railway tunnel under the condition of water-rich surrounding rock void of the tunnel bottom

WANG Dengke, LUO Jianjun, WANG Guanqing, LI Feilong, HOU Yanjuan

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the effects of surrounding rock void of the tunnel bottom on dynamic response characteristics of the heavy-duty railway tunnel under the hydro-mechanical coupling effect. The method of combining field test and numerical simulation was adopted. Taking the vertical displacement, pore water pressure, and vertical dynamic stress as evaluation indicators, the dynamic response law of water-rich tunnel bottom structure under different cavity shapes (ellipse, cosine and rectangle) was analyzed. A practical void shape has been proposed, and the threshold value of the tunnel bottom surrounding rock void in the water-rich tunnel was determined. The results show that with the increase of the void width, the dynamic response of the tunnel bottom structure increases continuously, and the dynamic response changes intensify when the void width exceeds a certain value, this phenomenon is especially obvious in the void area. Among the three void shapes, the rectangular void has the largest dynamic response, followed by the elliptical void, and the cosine void is the smallest. Among them, the elliptical void is the most realistic. The dynamic response of the base under this void is 4.2 times that of the case without void, and the threshold value of surrounding rock void of the tunnel bottom is 0.6 m. The research results can provide a basis for the safety of water-rich heavy-duty railway tunnels and the treatment of voiding diseases.

Keywords: heavy-duty railway tunnel; water-rich soft stratum; hydro-mechanical coupling; tunnel bottom surrounding rock void; dynamic response

重载铁路以其高效率、低成本的特点受到世界各国广泛的关注和推广。由于重载列车轴重大、密度大、运输量大, 运行过程中对隧道基底结构的影响也就较大^[1]。据不完全统计, 中国重载铁路病害率达76.83%, 是一般铁路隧道的2.5倍, 且主要集中在隧道底部^[2]。基底脱空是隧道病害的表现形式之一, 隧道基底富水时, 基底围岩的含水量会从最佳

状态转变为饱和状态, 在循环动荷载作用下可能导致细颗粒过量抽送, 从而使仰拱与围岩接触状态发生改变, 久而久之, 形成脱空^[3-4]。隧底下方一旦出现空洞, 基底结构的应力状态将类似于简支梁, 较大的动应力和变容易导致基底结构开裂, 甚至引起车辆晃动, 严重影响行车安全。

因此, 开展列车荷载和地下水耦合作用下基底

收稿日期: 2022-09-21; 录用日期: 2023-02-28; 网络首发日期: 2023-06-25

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/23.1235.T.20230621.1732.002.html>

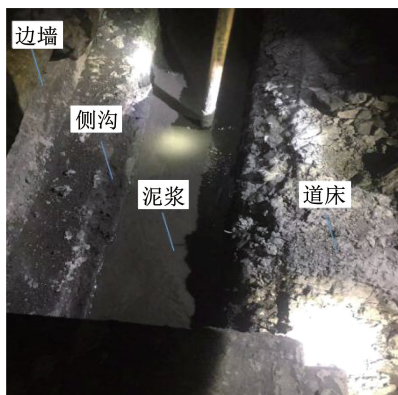
基金项目: 中央高校基本科研业务费(2022JBZY041); 国家自然科学基金(52278387)

作者简介: 王登科(1993—), 男, 博士研究生; 骆建军(1971—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 骆建军, jjluo@bitu.edu.cn

围岩脱空对隧道基底结构的动力响应研究具有重要意义。

目前,国内外学者针对脱空条件下重载铁路隧道基底结构的动力响应这一领域开展了大量研究。文献[5]建立了列车-隧道-围岩的三维动力学耦合模型,研究了不同脱空宽度下仰拱结构的动力响应并预测其疲劳寿命,得到基底极限脱空宽度为 2 m。文献[6]采用室内试验与离散元模拟相结合的方法,分析了不同轴重和围岩条件下重载铁路隧道底部围岩劣化范围和深度,得到 20 cm 为围岩最大劣化深度。文献[7]采用数值模拟的方法,研究了基底不同脱空宽度和深度下仰拱结构的动力响应,得出脱空宽度不超过 2 m 可满足隧道使用年限要求。文献[8]采用数值模拟与弯曲疲劳试验相结合的方法,对脱空条件下基础结构的疲劳性能进行了研究,量化了空洞条件下隧底结构的疲劳损伤演化特征。文献[9]通过数值模拟研究了基底脱空对仰拱结构的影响,得到基底脱空时仰拱中心为拉应力最大值,边墙连接处为压应力最大值。文献[10]通过模型试验揭示了铁路底部翻浆冒泥的机理,得到底土中高孔隙水压力的消散导致了泥浆的抽吸,进而形成底部空洞。文献[11-12]通过现场监测和模型试验,对隧道基底不同土质下(黏性土、卵石土、砂质土)基底围岩脱空演变规律进行了研究,得到黏性土受列车荷载和地下水的影响最大。文献[13]以大瑶山隧道为例,将基底脱空分为内侧单边脱空、两侧对称脱空和中间扩展脱空,并指出当脱空宽度达到 1.2 m 时,基底结构将破坏。



(a) 翻浆冒泥



(b) 衬砌渗漏水

图 1 重载铁路隧道主要病害

Fig. 1 Main types of damage for heavy-duty railway tunnels

总体来看,国内外学者对脱空情况下重载铁路隧道基底动力响应的研究取得了一定的进展。文献均提到脱空是地下水与列车荷载的耦合作用,但在研究列车荷载作用下隧底围岩脱空对隧底结构影响时,却未将地下水考虑其中。同时上述研究中,将空洞形状都简化为矩形,而实际情况下基岩脱空的形状是很不规则的^[14]。鉴于此,本文结合已有相关研究,采用现场试验和数值模拟相结合的方法,分别以竖向位移、孔隙水压力和竖向动应力为评价指标,更为系统地研究了不同空洞形状(椭圆形、余弦形、矩形)下富水基底结构的动力响应特性,提出了较为符合实际的脱空形状,确定了富水软弱地层中隧道基底围岩的脱空阈值。

1 现场实测

1.1 测点工程概况

测点隧道位于山西境内,隧道岩性以长石砂岩、泥岩及砂质泥岩为主。隧道内Ⅳ、Ⅴ级围岩占到 70.4%,水文地质条件复杂,地表水和地下水十分发育,且呈补给关系,局部地段,节理裂隙普遍发育,为地下水的补给以及渗透提供了良好的条件。该隧道为单洞双线重载铁路隧道,全部采用复合式衬砌。经现场调研,隧道自开通运营以来出现了不同类型的病害,其中以衬砌渗漏水、翻浆冒泥及基底吊空最为严重(图 1),这些病害发生在隧道洞口和洞中地下水发育地段,以上行重车线最为严重,约有 285 m 发生了不同程度的病害。目前,列车通过该段时需降速行驶,基底病害已严重影响列车行车安全。

1.2 传感器布设

选择隧道Ⅴ级围岩断面进行现场动应力测试,由于列车动荷载主要影响重载线路轨道正下方区

域^[15],因此,部分传感器被直接埋设在重载线路轨道正下方,以确定动荷载的竖向传播规律。其余传感器埋设在基底填充层表面,以研究动荷载的横向

分布,传感器布设如图 2 所示。本次测试主要对 27 t 轴重的重载列车以 80 km/h 的速度通过隧道时的基底竖向动应力进行监测。为丰富试验数据,本次试验共采集了 60 次通过监测点的重载编组列车。

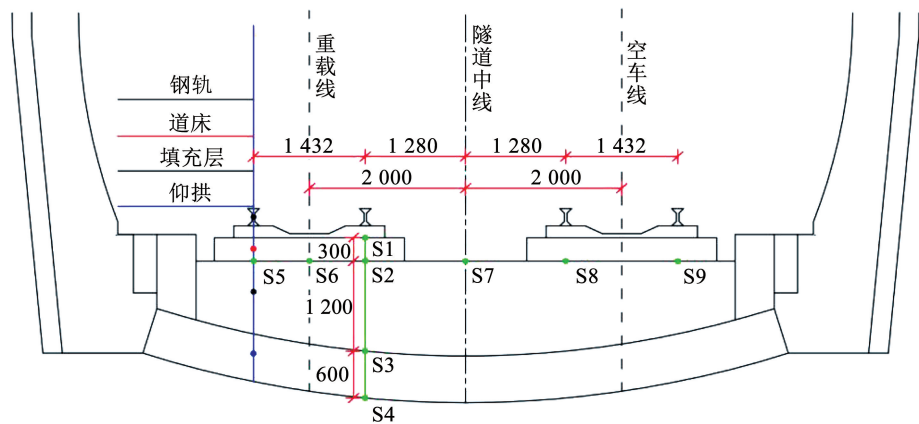


图 2 监测点布置 (mm)
Fig. 2 Layout of monitoring points (mm)

1.3 实测结果分析

为更清楚观察现场实测竖向动应力时程曲线的规律性,选取前 12 s 内的时程曲线如图 3 所示。由图 3 可得,当列车通过隧道时,各测点竖向动应力分布规律基本一致,且均为压应力。提取测点 S1 ~ S9 竖向动应力峰值并绘制成如图 4 所示的变化规律。由图 4 可知,竖向动应力沿隧道基底竖向呈衰减趋势,测点 S1 处竖向动应力峰值为 150.8 kPa,衰减至

S4 处为 15.7 kPa,衰减率为 89.6%。由于受重载列车的影响,隧道左线填充层表面各测点的竖向动应力峰值明显高于右线。左线中心处竖向动应力峰值最大,为 105.1 kPa,这是因为列车荷载作用在两条轨道上,振动荷载传递到填充层表面时会引起应力叠加。动荷载在填充层表面呈现以隧道左线中心为轴,向两侧逐渐扩散的规律。

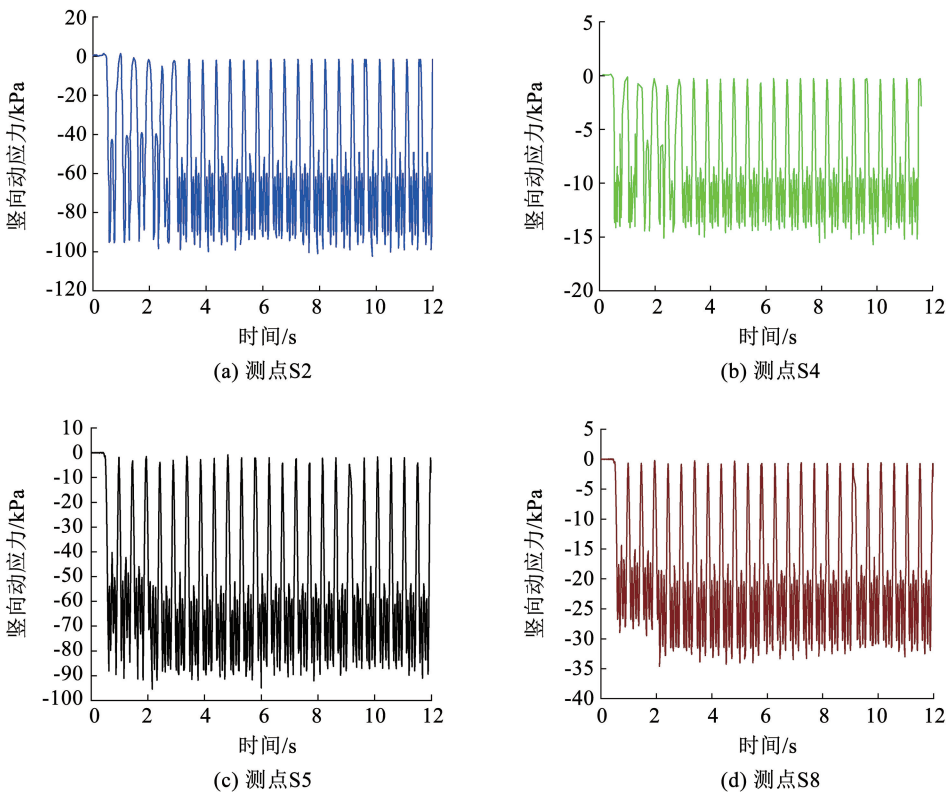


图 3 竖向动应力时程曲线
Fig. 3 Time-history curve of vertical dynamic stress

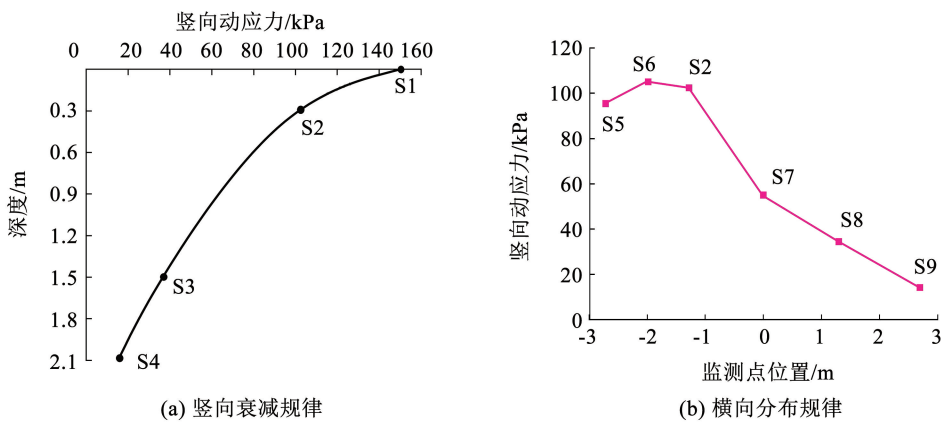


图 4 竖向动应力分布规律

Fig. 4 Distribution law of vertical dynamic stress

2 模型的建立

因现场测试条件的限制,隧道动力响应特性的研究经常用到数值模拟的方法^[16-17]。本文采用有限差分软件 FLAC3D 进行三维数值模拟,建立的数值模型如图 5 所示,模型沿隧道轴线方向长度取两节重载列车长度约为 30 m,宽度自隧道轴线向两侧各取 3 倍洞径约为 30 m,高度自隧道轴线上取至地表,向下取 3 倍洞径约为 30 m。计算模型整体尺寸为(*X* 方向)60 m×(*Y* 方向)30 m×(*Z* 方向)48 m。本文中隧道结构和围岩均采用实体单元模拟,为了准确描述模型中波的传播,在划分网格时,模型单元的尺寸应小于输入波中最高频率所对应波长的 1/10~1/8^[18]。

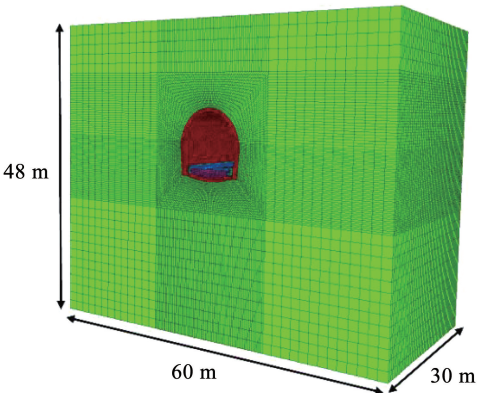


图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model

数值模型的局部放大如图 6 所示,为对比分析建立脱空形状为椭圆、余弦和矩形的数值模型。

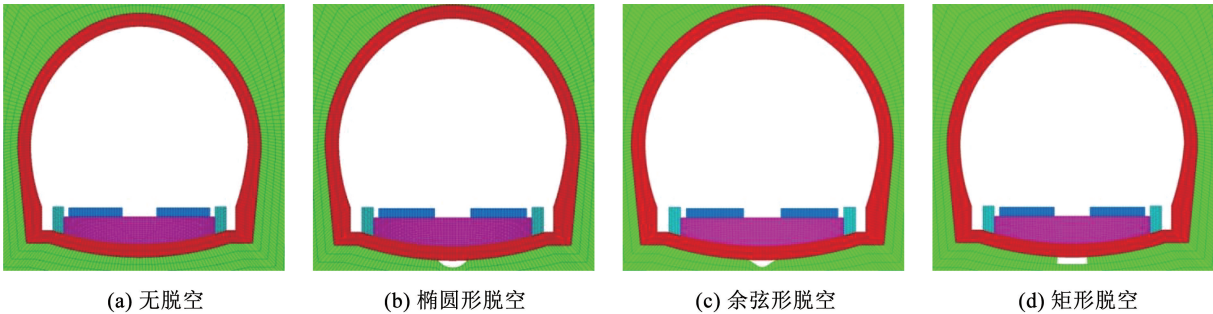


图 6 模型局部放大

Fig. 6 Partial magnification of model

参考铁路隧道设计规范^[19],计算模型中隧道结构及周围地层的物理力学参数见表 1。其中,围岩内摩擦角为 25°,黏聚力为 55 kPa,渗透系数为 1.078×10^{-4} cm/s,孔隙度为 0.45。围岩在静力计算时采用 Mohr-Coulomb 模型,动力计算时采用 Byrne 模型^[20],隧道结构的道床、填充层、仰拱、初支及二衬均采用线弹性模型。静力计算时,模型上表面为自由边界,其余表面均设置法向约束;动力计算时,为减小振动波在结构边界上的反射问题,除模型顶面为自由边界外,模型四周和底部均采用静态边

界条件;动力分析中阻尼采用瑞利阻尼。

表 1 物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters			
结构	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
V 级围岩	0.40	0.35	1 850
道床	33.5	0.2	2 700
填充层	28.5	0.2	2 300
仰拱	31.0	0.2	2 600
二次衬砌	31.0	0.2	2 600
初期支护	28.5	0.2	2 500

水-力耦合计算的实现过程为:在进行动力计算之前首先模拟出稳定的渗流场,然后在此基础上进行动力分析。稳定渗流场平衡状态的计算首先关闭力学进程(SET mech off),打开流体进程(SET flow on)进行单渗流计算,建立初始孔压场。而后关闭流体进程,打开力学进程,将土体原先的摩尔-库伦模型替换为 Byrne 模型并赋予相应的模型参数,最终进行动力与渗流的耦合计算。

2.1 列车动荷载的施加

目前广泛采用由经验公式拟合的激励力函数来模拟列车荷载,该方法既将轮轨力在线路上的移动叠加效应考虑其中,又考虑了钢轨的分散作用以及轨道不平顺等影响因素,可全面探讨列车轴重、车速等因素的影响。激振力函数^[21]为

$$P(t) = k_1 k_2 [p_0 + p_1 \sin \omega_1 t + p_2 \sin \omega_2 t + p_3 \sin \omega_3 t]$$
(1)

式中: p_0 为车轮静载; p_1 、 p_2 、 p_3 均为振动荷载; k_1 为轮轨作用的叠加系数,取值为 1.2 ~ 1.7; k_2 为轮轨作用的分散系数,取值为 0.6 ~ 0.9。

令列车簧下质量为 M_0 ,则相应的列车振动幅值为

$$p_i = M_0 a_i \omega_i^2, i = 1, 2, 3$$
(2)

式中: a_i 为典型矢高; ω_i 为对应车速下不平顺振动波长的圆频率,分别对应表 2 中典型值。

$$\omega_i = 2\pi v / L_i, i = 1, 2, 3$$
(3)

式中: v 为列车运行速度; L_i 为典型波长,分别与表 2 中控制条件的 3 种情况相对应。

表 2 英国轨道几何不平顺管理值^[21]

Tab. 2 British track geometric irregularity management values^[21]

控制条件	波长/m	正矢/mm
行车平顺性	50.00	16.00
	20.00	9.00
	10.00	5.00
	5.00	2.50
作用到线路上的动力附加荷载	2.00	0.60
	1.00	0.30
	0.50	0.10
波形磨耗	0.50	0.10
	0.05	0.005

计算列车荷载时,应采用单边静轮重,重载列车的簧下质量 M_0 取 1 200 kg,根据式(1)得到 27 t 轴

重下,列车运行速度为 80 km/h 时的列车荷载时程曲线如图 7 所示。

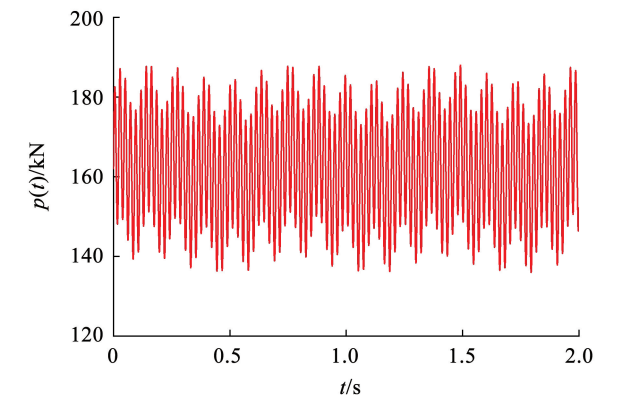


图 7 列车荷载时程曲线
Fig. 7 Time-history curve of train load

2.2 模拟工况

根据文献[22 - 23]的室内试验结果,参考铁路路基底部围岩脱空形状^[24],本文将重载铁路隧道基底围岩脱空形状分为图 8 所示的椭圆、余弦和矩形 3 种类型。选取 A、B、C、D、E 点分别代表轨下仰拱上表面、仰拱中心上表面、轨下仰拱下表面、围岩脱空边缘处及仰拱中心下表面作为分析监测点。文献[7]表明,基底围岩脱空高度对结构动力响应影响很小,且高度最大不超过 20 cm。因此,本文不考虑脱空高度的影响,高度统一取 10 cm,脱空宽度在 3 种脱空形状下分别取 0、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 和 1.8 m 共计 21 个工况。

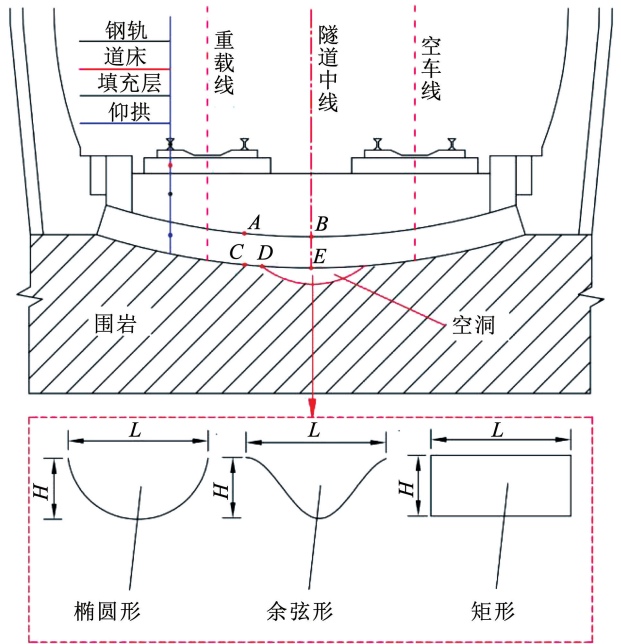


图 8 3 种基底围岩空洞形状

Fig. 8 Three types of basement surrounding rock cavity shapes

3 模型的验证

为验证数值模型的可靠性,提取 27 t 轴重荷载作用下数值模拟的基底测点 S1 ~ S9 的竖向动应力峰值并绘制成图 9 所示的曲线对比图。由图 9 可知,同一工况下,数值计算得到的动应力峰值与现场实测结果相差不大,总体偏差在 2% ~ 10% 之间。需要说明的是,实测数据与仿真结果存在一定差异,这是由于两者的作用位置和作用方式不同所致。现

场试验时,列车直接作用于钢轨表面,动载荷受轨道不平顺值等诸多因素的影响。而数值模拟直接作用于道床表面,列车载荷近似为式(1)。这也会使两者的动态应力时程曲线不同。但两者的峰值比较接近,且竖向动应力沿基底深度的衰减曲线基本一致(图 9(a)),水平分布规律基本一致(图 9(b))。这表明本文所采用的数值模型是可靠的,这一观点已在文献[15,25-26]中得到了验证。

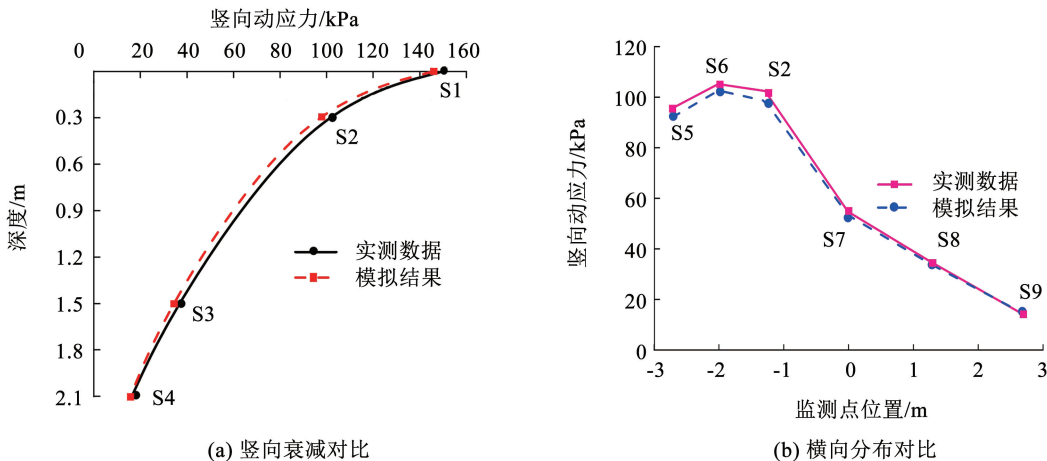


图 9 现场试验与数值模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of dynamic field test and numerical simulation results

4 结果与分析

4.1 位移响应分析

图 10 为测点 D 典型工况的位移时程曲线,位移峰值随脱空宽度的变化规律见图 11。由图 10 可知,在加载瞬间,由于振动荷载的冲击作用,测点位移迅速上升到最大值,随后轻微回弹至某一水平并呈周期性变化。且随着脱空宽度的增加,测点各部位竖向位移的大小和振动幅值均有所增大。由

图 11 可知,脱空形状为椭圆形和矩形时,在脱空宽度为 0.9 m 时发生突变,随后位移变化加剧;脱空形状为余弦形时,在脱空宽度为 1.2 m 时发生突变。3 种脱空形状下,仰拱上表面测点位移最大处均发生在仰拱中心,脱空形状为椭圆、余弦和矩形时,脱空宽度从 0 m 增加到 1.2 m,位移从 0.72 mm 分别增加到 1.84、1.06、1.92 mm,分别增大了 1.12、0.34、1.2 mm,可见,矩形和椭圆形的脱空形状对隧道基底结构的影响更大。

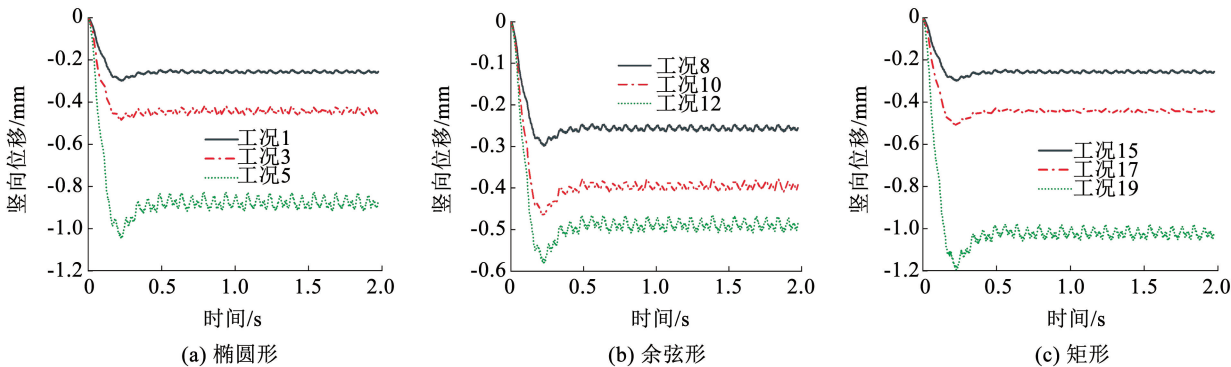


图 10 竖向位移时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of vertical displacement

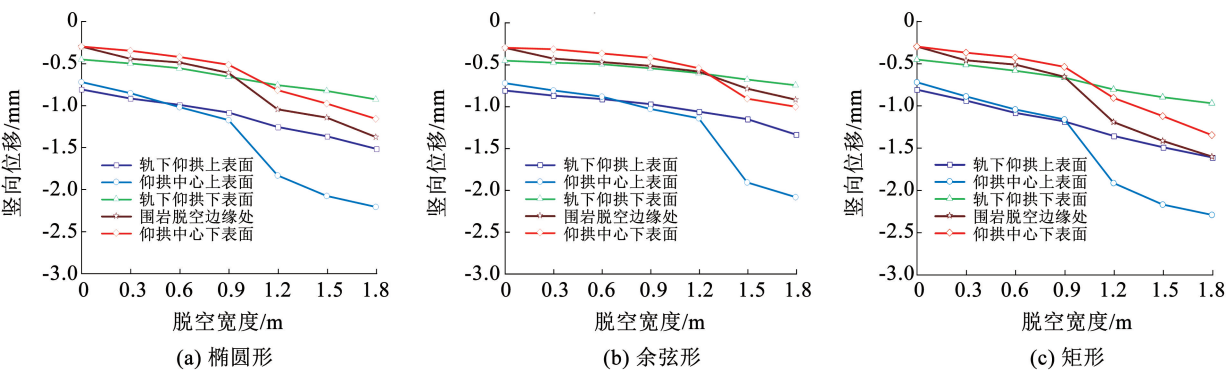


图 11 竖向位移与脱空宽度关系

Fig. 11 Relationship between vertical displacement and void width

4.2 超静孔隙水压力响应分析

图 12 为点 D 典型工况的超静孔隙水压力时程曲线,测点超静孔隙水压力峰值随脱空宽度的变化规律见图 13。由图 12 可知,各工况下测点超静孔隙水压力峰值均出现在列车振动荷载作用瞬间(约 0.16 s 处),随后很快恢复至某一水平(约 0.5 s 处),并做周期性运动,表现出明显的振动冲击特征。随着脱空宽度的增加,仰拱下表面测点超孔压

峰值和振动幅值均有所增大。由图 13 可知,测点 C 处超孔压随脱空宽度增加呈指数型增长,测点 D 处超孔压随脱空宽度增加呈现先缓慢增加,达到某一值后急剧增加的特点。脱空形状为椭圆形和矩形时,测点 D 处的超孔压在脱空宽度为 0.6 m 时产生突变,之后变化逐渐加剧;脱空宽度从 0 m 增加到 0.9 m 时,最大超孔压由 6.2 kPa 增加到 12.4、12.8 kPa,增幅约为 2 倍。

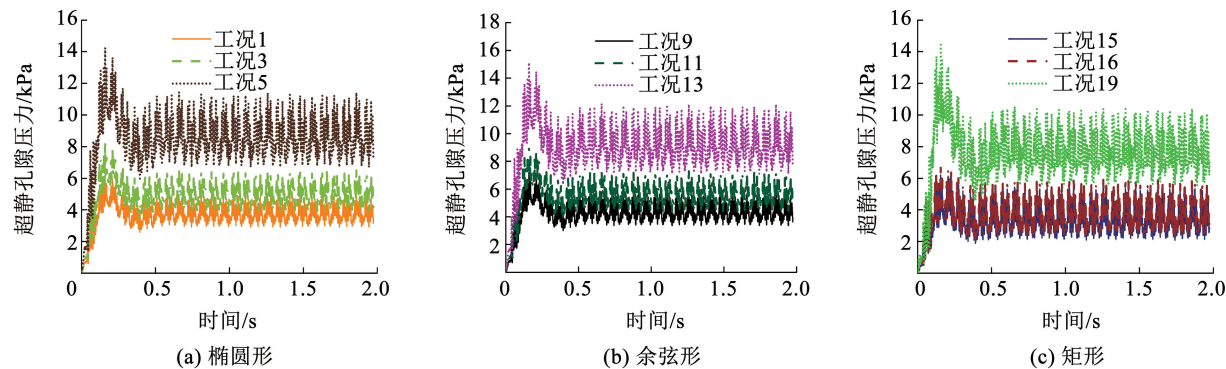


图 12 超静孔隙水压力时程曲线

Fig. 12 Time-history curve of excess pore water pressure

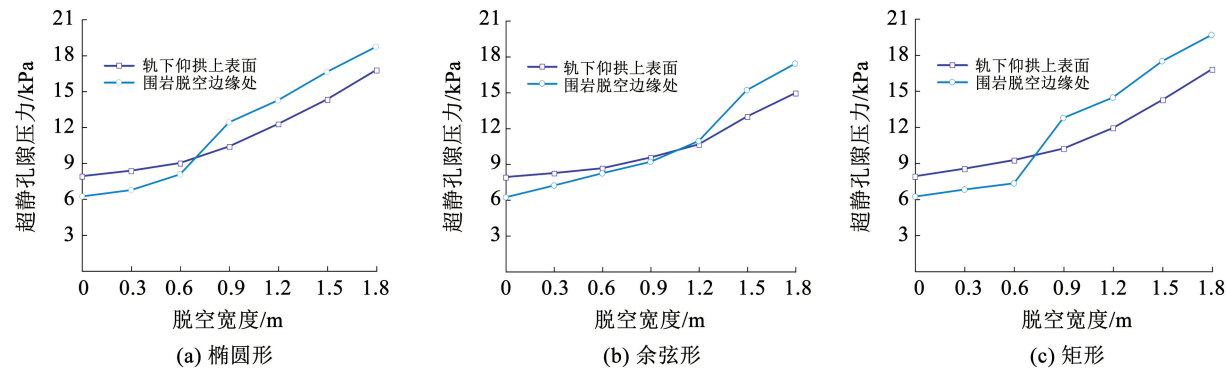


图 13 超静孔隙水压力与脱空宽度关系

Fig. 13 Relationship between excess pore water pressure and void width

4.3 动应力响应分析

图 14 为各测点竖向动应力峰值随脱空宽度的变化规律,由图 14 可知,轨下仰拱上下表面测点竖向动应力随脱空宽度的增加呈线性变化,其余测点

由于处于脱空位置处,在脱空达到一定程度后测点动应力产生突变。整体来看,椭圆形和矩形脱空在脱空宽度达到 0.6 m 时产生突变,脱空形状为余弦时,在脱空宽度为 0.9 m 时产生突变。以椭圆形脱

空为例,在仰拱上表面,脱空宽度为 0~1.2 m 时,测点 A 动应力最大,脱空宽度为 1.2~1.8 m 时,受基底脱空的直接影响,测点 B 处动应力最大;仰拱下表面在脱空宽度大于 0.9 m 后,测点 D 处动应力最

大,这说明测点 D 可能发生了瞬态冲击和应力集中。在测点 D 处,脱空宽度从 0 m 增加到 0.9 m 时,最大动应力由 7.9 kPa 增加到 22.3 kPa,增幅约 2.8 倍。

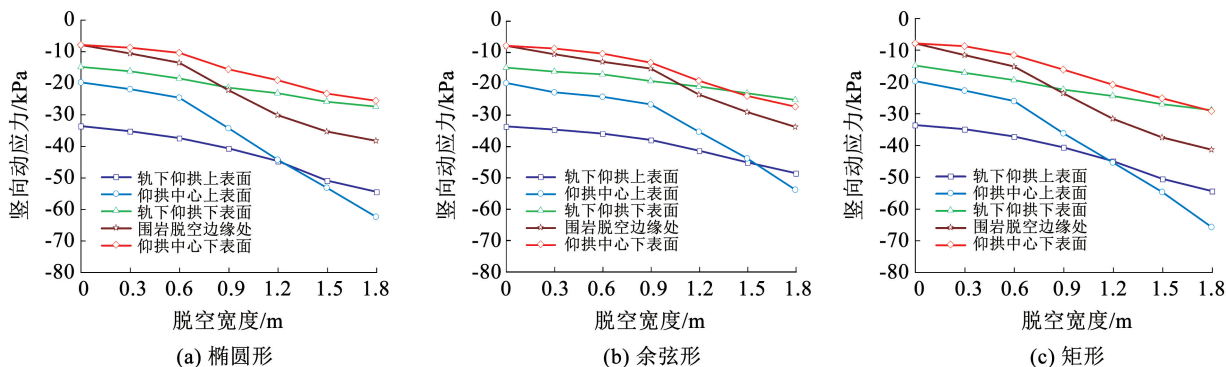


图 14 竖向动应力与脱空宽度关系

Fig. 14 Relationship between vertical dynamic stress and void width

4.4 不同脱空形状下动力响应对比分析

选取测点 D 进行不同脱空形状下的动力响应对比如图 15 所示。由图 15 可知,椭圆与矩形脱空的动力响应分布规律基本一致,测点竖向位移在脱空宽度为 0.9 m 时发生突变,测点超静孔隙水压力与竖向动应力在 0.6 m 时发生突变,这说明与竖向位移响应相比,测点超静孔隙水压力、竖向动应力响应对基底状况更加敏感。随脱空宽度的增加,椭圆形和矩形脱空的动力响应普遍大于余弦形。以脱空宽度为 1.8 m 为例,无脱空、椭圆形、余弦形和矩形脱空的竖向最大位移分别为 0.3、1.38、0.92、1.6 mm;最大超静孔隙水压力分别为 6.2、18.72、

17.4、19.68 kPa;最大竖向动应力分别为 7.9、38.37、33.86、41.47 kPa。可以看出,采用矩形脱空时,脱空边缘处动力响应最大,与无脱空相比其动力响应增幅达到了 5 倍,表明该类型脱空对仰拱的应力状态最不利。余弦形脱空在 3 种脱空形状下动力响应最小。椭圆形脱空的动力响应程度与矩形相差不多,且据现场调研,实际隧道基底脱空中,以椭圆形脱空居多,很难形成矩形脱空。文献[22-23]室内试验结果表明,激振荷载和地下水共同作用下,隧底仰拱围岩脱空多呈椭圆形。这一试验结果与本文所得结论相契合,因此,可以认为,椭圆形脱空是简化的 3 种类型中较为符合实际的形式。

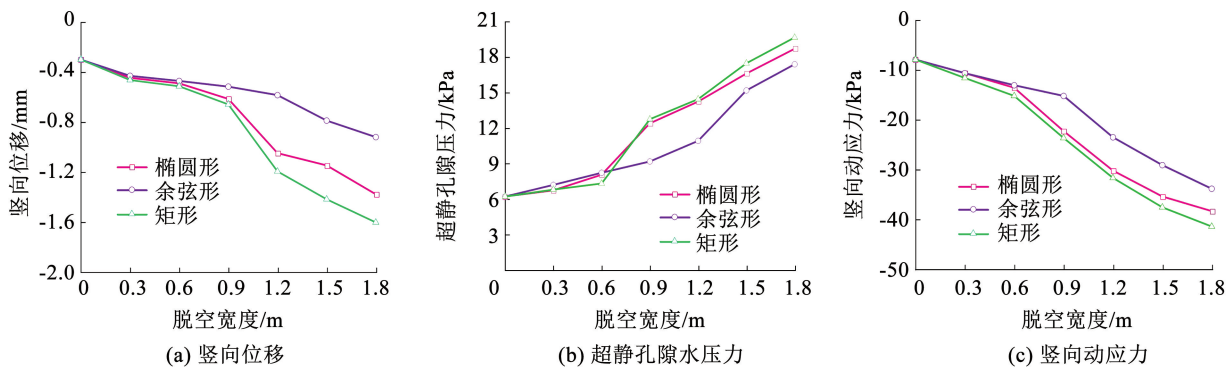


图 15 D 点(围岩脱空边缘处)不同脱空宽度下的动力响应

Fig. 15 Dynamic response at point D (at the void edge of surrounding rock) with different void width

4.5 指数分析

图 16 研究了脱空形状为椭圆形时,不同脱空宽度和列车轴重(25、27、30 t)下 D 点的动力响应特性。总的来说,随着脱空宽度的增加,25 t 和 27 t 轴重列车荷载下测点动力响应几乎同步逐渐增大,而 30 t 轴重下则急剧增大。随着列车轴重的提高,基

底动力响应也随之增大,列车轴重由 25 t 增加到 27 t 时,测点竖向位移、超静孔隙水压力和竖向动应力的增长率分别为 8.91%~16.67%、7.23%~19.70% 和 17.72%~27.74%;列车轴重由 27 t 增加到 30 t 时,增长率分别为 16.82%~26.92%、18.40%~33.56% 和 28.31%~46.1%。可以看

出,列车轴重的提高及基底脱空宽度的增加对基底动力响应影响巨大,尤其对基底竖向动应力的影响,最大增幅达到了 46.1%。根据图中测点动力响应发生突变时的位置,建议重载铁路隧道富水基底脱

空宽度达到 0.6 m 时,立即采取相应措施对隧道基底脱空进行整治,防止基底病害的进一步扩大,保证重载铁路隧道的运营安全。

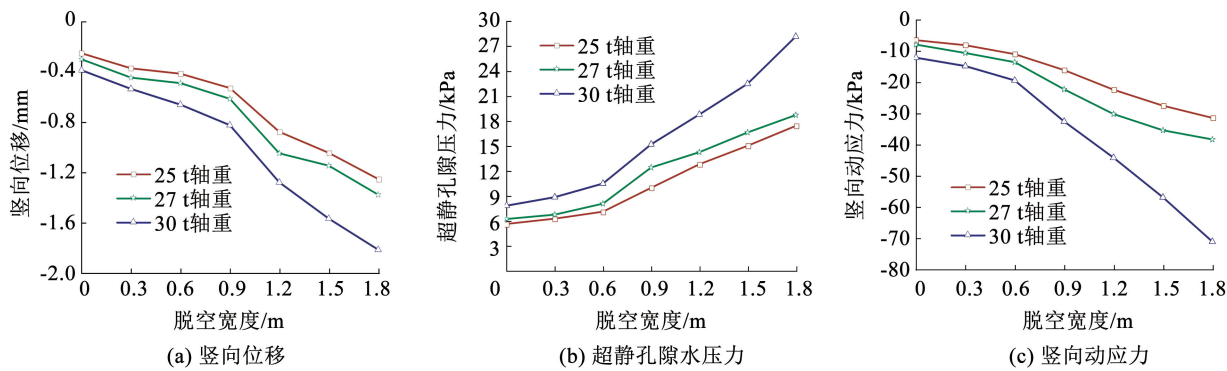


图 16 不同脱空宽度和列车轴重下测点 D 的动力响应

Fig. 16 Dynamic response of measuring point D under different void widths and train axle loads

5 结 论

- 1) 水-力耦合作用下,基底仰拱与围岩界面会发生恶化,形成脱空,随着细粒损失的逐步发展,隧道基底围岩脱空可简化为椭圆形、余弦形、矩形 3 种类型。
- 2) 从动力响应随围岩脱空宽度变化的分布特征及结合现场实际情况来看,建议采用简化的椭圆形状来描述隧底围岩脱空,该脱空下隧底动力响应是无脱空情况下的 4.2 倍。
- 3) 重载列车轴重的提高对基底动力响应影响巨大,尤其是当列车轴重由 27 t 提升到 30 t 时,基底动力响应会加速增大,最大增幅达到了 46.1%。
- 4) 在脱空宽度大于 0.6 m 的情况下,超静孔隙水压力和竖向动应力峰值发生突变急剧增大,富水地层重载铁路隧道基底围岩脱空宽度达到 0.6 m 时,应立即采取相应措施对隧道底部围岩脱空进行整治。

参考文献

[1] LI Ziqiang, WANG Mingnian, YU Li, et al. Study of the basement structure load under the dynamic loading of heavy-haul railway tunnel [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21 (11): 1362

[2] 邹文浩, 张梅, 刘艳青, 等. 30 t 轴重下重载铁路隧道基底结构的应力分布及动力响应[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5): 50

ZOU Wenhao, ZHANG Mei, LIU Yanqing, et al. Stress distribution and dynamic response of base structure for heavy haul railway tunnel under 30 t axle load[J]. China Railway Science, 2016, 37(5): 50

[3] LIU Kaiwen, SU Qian, YUE, Fei, et al. Effects of suffusion-induced contact variation on dynamic responses of saturated roadbed considering hydro-mechanical coupling under high-speed train loading [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113: 103095

[4] LAZAORENKO G, KASPRZHITSKILL A, KHAKIEV Z, et al. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: a review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 111

[5] ZHANG Zhiqiang, ZENG Bowen, DAI Chaolong, et al. Study on structural service performance of heavy-haul railway tunnel with voided base [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 3510979

[6] LI Ziqiang, LI Zheng, HUANG Weiwei, et al. Tunnel bottom cavity laws of heavy-haul railway tunnel under train load and groundwater in weak surrounding rock condition [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 26(3): 1451

[7] 杨洪普, 张志强, 李元军. 重载铁路隧道基底脱空条件下服役状态影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 444

YANG Hongyu, ZHANG Zhiqiang, LI Yuanjun. Study on the influence of service state of heavy haul railway tunnel under the condition of basement void [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 444

[8] LIU Cong, LEI Mingfeng, PENG Limin, et al. Cavity influence on fatigue performance of heavy haul railway Tunnel's bottom structure [J]. Construction and Building Materials, 2020, 251(8): 118886

[9] 刘宁, 彭立敏, 施成华. 基岩脱空条件下仰拱结构疲劳寿命的计算方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(5): 921

LIU Ning, PENG Limin, SHI Chenghua. Fatigue life calculation method of tunnel base structure under the conditions of bedrock void [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(5): 921

[10] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure [J]. Engineering Geology, 2014, 171: 45

[11] LI Zheng, CHEN Kunping, LI Ziqiang, et al. Deterioration and cavity of surrounding rocks at the bottom of tunnel under the combined action of heavy-haul load and groundwater: an experimental study [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 779578

[12] LI Zheng, LI Ziqiang, CAI Ruyi, et al. Refined model analysis of basement rock degradation mechanism of heavy-haul railway tunnel [J]. Underground Space, 2021, 6(3): 342

- [13] 丁祖德, 彭立敏, 黄娟, 等. 基底脱空条件下铁路隧道行车安全性分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(9): 104
DING Zude, PENG Limin, HUANG Juan, et al. Running safety in railway tunnel with base voids[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(9): 104
- [14] 黄勇. 重载铁路长大隧道基底病害监测及整治方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015
HUANG Yong. Research on monitoring system and reinforcement treatment of heavy haul railway long tunnel's bedding diseases[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015
- [15] DU Mingqing, SU Jie, WANG Xuchun, et al. Dynamic response and crack propagation law of tunnel invert with initial damage[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 104939
- [16] PENG Xinyan, YU Pengcheng, ZHANG Yingbin, et al. Applying modified discontinuous deformation analysis to assess the dynamic response of sites containing discontinuities[J]. Engineer Geology, 2018, 246: 349
- [17] ZHANG Yingbin, CHEN Guangqi, ZHENG Lu, et al. Effects of near-fault seismic loadings on run-out of large-scale landslide: a case study[J]. Engineer Geology, 2013, 166: 216
- [18] YAN Qixiang, XU Yajun, ZHANG Weilie, et al. Numerical analysis of the cracking and failure behaviors of segmental lining structure of an underwater shield tunnel subjected to a derailed high-speed train impact[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72: 41
- [19] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017
National Railway Administration. Code for design of railway tunnels: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017
- [20] RAGOZZINO E. Seismic response of deep quaternary sediments in historical center of L'Aquila City (central Italy)[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 87: 29
- [21] WANG Dengke, LUO Jianjun, LI Feilong, et al. Dynamic response and service life of tunnel bottom structure considering hydro-mechanical coupling effect under the condition of bedrock softening[J]. Materials, 2022, 15(18): 6496
- [22] 华阳. 重载铁路隧底围岩劣化对隧道结构受力影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018
HUA Yang. The effect on the tunnel structure caused by surrounding rock deterioration at tunnel's bottom of heavy load railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018
- [23] 傅支黔, 段儒禹, 聂大丰, 等. 不同土质围岩条件下隧底围岩脱空规律与结构受力特征研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 306
FU Zhiqian, DUAN Ruyu, NIE Dafeng, et al. Cavity laws and structural stress characteristics of tunnel bottom surrounding rock under different soil surrounding rock conditions[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(3): 306
- [24] LIU Kaiwen, SU Qian, YUE Fei, et al. Effects of suffosion-induced contact variation on dynamic responses of saturated roadbed considering hydro-mechanical coupling under high-speed train loading[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113: 103095
- [25] WANG Dengke, LUO Jianjun, WANG Guanqing, et al. Dynamic response of the tunnel bottom structure considering groundwater influence under heavy-haul train loading[J]. Structures, 2022, 46: 1469
- [26] WANG Dengke, LUO Jianjun, LI Feilong, et al. Research on dynamic response and fatigue life of tunnel bottom structure under coupled action of train load and groundwater[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 161: 107405

(编辑 魏希柱)

(上接第 8 页)

- [8] 尚想平, 马亮. 基于多次灰度模型的医务人员绩效考核评价方法研究[J]. 生产力研究, 2021(8): 104
SHANG Xiangping, MA Liang. Research on evaluation method of medical staff performance appraisal based on multiple gray scale model[J]. Productivity Research, 2021(8): 104
- [9] 任宏, 晏永刚, 周韬, 等. 基于云模型和灰关联度法的巨项目组织联盟合作伙伴评价研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 147
REN Hong, YAN Yonggang, ZHOU Tao, et al. Research on partner evaluation of mega-project organization alliance based on cloud model and grey relational degree method[J]. Journal of Civil Engineering, 2011, 44(8): 147
- [10] 纪伦. 高校实验教师绩效综合测评体系的构建[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(7): 31
JI Lun. Performance in universities based on double gray model[J]. Research and exploration in laboratory, 2020, 37(7): 31
- [11] 谭忆秋. 沥青与沥青混合料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 52
TAN Yiqiu. Asphalt and asphalt mixture[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 52
- [12] 王大庆. 细集料几何特征参数的表征及对沥青混合料性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
WANG Daqing. Characterization of geometric characteristic parameters of fine aggregate and study on its influence on the properties of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [13] 陈华鑫, 陈控发, 王秉纲. 细集料对沥青混合料体积和高温特性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(1): 25
CHEN Huaxin, CHEN Suanfa, WANG Binggang. Effect of fine aggregate on volume and high temperature characteristics of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1): 25
- [14] 张磊. 粗集料级配及形貌对沥青混合料结构和性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
ZHANG Lei. Investigation about impacts of coarse aggregate gradation and morphology on asphalt mixture structure and performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
- [15] 纪伦, 李俊, 张磊, 等. 沥青混凝土中粗集料形貌特征分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 61
JI Lun, LI Jun, ZHANG Lei, et al. Analysis of the morphology characteristics of coarse aggregate in asphalt concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 61

(编辑 魏希柱)