DOI：10.16285/j.rsm.2016.0589

破碎围岩重载铁路隧道基底结构动力特性现场试验研究

李自强[1,2]，徐湉源[2]，吴秋军[2]，于 丽[2]，王明年[2]，王子健[1]

（1.重庆科技学院 建筑工程学院，重庆 401331；2. 西南交通大学 土木工程学院，四川 成都 610031）

摘 要：通过张家口至唐山付营子隧道现场大型激振试验，模拟研究了 V 级围岩条件下轴重为 250、270、300 kN 重载列车作用时隧道基底结构压力响应，并提出了各测点动压力在轴重下降时的衰减规律。根据现场实测的压力-时程图，分析了各结构面动压力的横向和竖向传递规律。结果表明：双线隧道重载线路因直接受重载列车荷载作用而使半幅测点动压力均大于客车线路，重载线路轨道下方相应测点在不同轴重作用下的动压力均大于其他测点，对比 IV 级围岩表面的试验结果得出破碎围岩条件下重载位置的结构和围岩容易出现压力集中，从而引发结构开裂或围岩空洞。列车荷载在基底结构竖向传递过程中先受到道床结构和仰拱填充的缓冲作用，衰减较大，在仰拱结构中衰减较少，以目前的基底结构设计厚度难以满足轴重提升的需求。

关 键 词：重载铁路；基底结构；现场试验；动力响应

中图分类号：U 451+.5 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 03－0949－08

Field experimental study of basement structural dynamic properties of the heavy-haul railway tunnel in broken surrounding rock

LI Zi-qiang[1,2], XU Tian-yuan[2], WU Qiu-jun[2], YU Li[2], WANG Ming-nian[2], WANG Zi-jian[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In this study, dynamic pressure response of base structure of Fu Yingzi tunnel along Zhangjiakou to Tangshan was simulated through field large-scale excitation test under the class V rock conditions when the heavy haul trains with axle weights of 250 kN, 270 kN, and 300 kN passed. Dynamic pressure attenuation values at measuring points were presented when axle weight was reduced. According to the earth pressure time history chart of field measurement, horizontal and vertical distributions of dynamic pressure of the measuring points in each structural plane were analyzed. The results indicate that dynamic pressure of each measuring point in heavy haul line of double line tunnel is greater than passenger train line, and the dynamic pressure of the corresponding measuring points below the railway track under different axle load of heavy haul trains is greater than other measuring points. Stress concentration is found to appear in the structure and surrounding rock at corresponding heave haul position, which is more likely to cause the structure to crack or hole generation in wall rock under the condition of broken rock compared with the test results on the surface of class IV grade surrounding rock. Train load attenuates drastically due to cushioning of the bed structure and inverted arch filling as it vertically transfers, but there is only small attenuation in inverted arch. Current designed basement structure thickness cannot meet the demand of lifting axle load.

Keywords: heavy-haul railway; base structure; field test; dynamic pressure response

1 引 言

重载铁路具有轴重大、总重大、行车密度和运量特大等特点，重载铁路隧道基底结构与一般隧道相比会受到更大的影响，因此，对重载铁路隧道基底承载力有更高要求[1−2]。重载列车轴重大，动应力

收稿日期：2016-03-28
基金项目：中国铁路总公司科技研究开发计划课题合同（No.2014G005-A）；西南交通大学博士研究生创新基金。
This work was supported by the Program of Science and Technology Department of China Railway Corporation (2014G005-A) and the Doctoral Innovation fund of Southwest Jiaotong University.
第一作者简介：李自强，男，1987 年生，博士，主要从事桥梁和地下工程方面的研究。E-mail: lzq1102dd@163.com
通讯作者：徐湉源，男，1990 年生，博士研究生，主要从事隧道工程方向的研究工作。E-mail: 396212053@qq.com

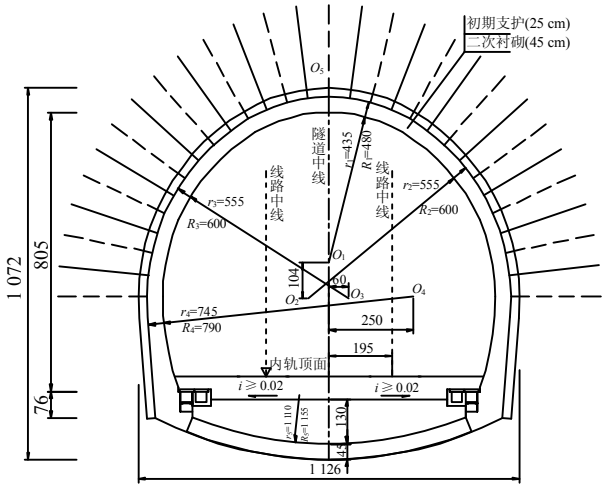
幅值较大，从而引起的结构内力和竖向传递深度均较大。行车密度和运量特大使得重载铁路隧道基底结构承受的荷载较大，静、动力学性能响应显著；重载铁路隧道一旦发生病害，维修难度高、同时会对运输效率和行车安全产生影响。尤其在围岩较为破碎时，病害的发展会加速，可能影响到隧道结构的安全[3−6]。因此，深入研究破碎围岩条件下重载铁路隧道基底结构在重载列车荷载作用下动力响应十分必要。

为研究列车荷载作用下基底结构的应力分布特征，国内外进行了相应的试验和研究。尹成斐等[7]实测了重载列车对双线铁路隧道填充层表面的影响，并利用数值模拟分析了其他部位的动力响应，研究表明，重载列车动荷载的影响主要集中在基底结构，上部结构在无病害的情况下受到的影响较小；李幸吉[8]对不同轴重下重载铁路隧道基底结构的动压力变化进行研究，通过试验分析得到仰拱的抗冲击性能在其底部脱空时会大大降低；冷伍明等[9]利用大型动三轴试验结果研究了重载铁路路基填料受到围压和含水率的影响，在得到临界动应力表达公式的基础上分析了不同轴重下路基破坏的可能性；薛富春等[10]通过现场激振试验模拟高速列车对富水黄土隧道隧底结构振动特性的影响，得出其振动速度在基底结构中的传递规律；王亮亮等[11]对膨胀土地区高速铁路路堑全封闭基床进行激振试验，研究了新型基床结构的动力特性，得到了动应力、速度和加速度与激振距离、激振频率和基床服役环境的关系。上述研究多通过有限元分析结合室内试验，而现场试验则多集中在高速列车对路基结构的影响。鉴于重载铁路隧道自身条件限制，过去的研究通常因现场测点数量有限而存在局限性，同时尚未实现在隧道内道床上进行激振试验，动压力传递规律并不明确。本文通过张唐线付营子重载铁路隧道现场激振试验，模拟分析了 V 级围岩条件不同轴重下隧道基底结构各结构面上的动压力横向分布情况及竖向传递规律，最后对比分析 IV 级围岩条件下围岩表面动压力分布提出了不同轴重列车作用下 V 级破碎围岩的影响。

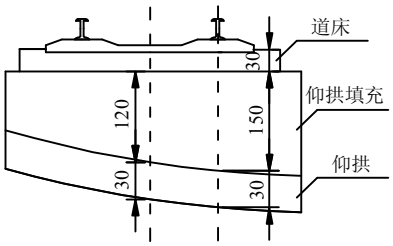
2 现场试验

2.1 工程概况

付营子隧道起讫里程为 DK291+037～DK301+060，隧道长 10 023 m。隧道位于燕山山脉中段，属低山至低中山区。隧道最大埋深约为 502.6 m。隧道所经山脉最高海拔为 991.9 m，最低海拔为 461.1 m，最大高差约为 531 m，地形较陡峭。隧道采用单洞双线方案，采用左、右线路分离式无砟道床型式，左线为重载线路，右线为客运线路。设计衬砌断面图如图 1 所示。将付营子隧道的结构相关参数列入表 1。



(a) 断面示意图



(b) 重载线路特征线竖向厚度

图 1 V 级围岩设计衬砌断面图（单位：cm）

Fig.1 Design lining sectional drawing of class V surrounding rock (unit: cm)

表 1 付营子隧道 V 级试验断面结构参数

Table 1 Test section structure parameters in Fuyingzi tunnel of class V surrounding rock

结构	弹性模量/ GPa	泊松比	重度/ (kN/m^3)
初期支护	28.0	0.16	23.0
二次衬砌	31.0	0.20	23.0
仰拱填充	28.5	0.20	23.0
仰拱	31.0	0.20	23.0
道床	33.5	0.20	25.0

2.2 试验设计

本次激振试验选用西南交通大学 DTS−1 型现场动力试验系统。该设备具有激振试验频率高、调整范围宽、激振力大、加载时间长、系统可靠性高等特点[10]。它能够通过不同的偏心块组合，配合不同的频率范围输出高幅变化的激振力[12−13]，以实现不同轴重的列车荷载模拟。激振试验断面选在 IV 级和 V 级围岩进行，具体试验位置在左侧（重载线

路）道床板表面，在轨枕上对道床进行激振，模拟研究真实情况下列车荷载影响在基底结构中的动压力分布规律，如图 2 所示。



图 2　重载铁路隧道现场激振试验

Fig.2　Field excitation test of heavy haul railway tunnel

列车荷载是单向脉冲应力波[12]，重载列车运营时激振频率与多种因素相关。其中，隧道基底结构主要受到车距和转向架的影响[12−13]。重载列车产生的激振频率为

$$f=\frac{v}{3.6s} \tag{1}$$

式中：f 为激振频率（Hz）；v 为行车速度（km/h）；s 为列车轴距（m）。

激振试验采用的循环加载激振力为正弦波形，其动轮载峰值为

$$P_1=P_2(1+0.004v) \tag{2}$$

式中：P_1 为试验要求的动轮载峰值荷载（kN）；P_2 为设备自重与配重块质量产生的实际轴重荷载（kN）。$2P_2-P_1$ 为保证轮轨之间在振动过程中不发生脱离所取的最小值，即要求 $P_3=2P_2-P_1>0$。激振力为 P_1-P_2（kN）。

本文主要研究 V 级围岩，IV 级围岩试验结果仅提取基底围岩部分作为参考比较。根据式（1）、（2）并结合激振设备自身特性，列出 V 级围岩试验断面轴重分别为 250、270、300 kN 的试验参数，如表 2 所示。

表 2　隧道 V 级围岩下对应于不同列车参数的试验参数

Table 2　Test parameters for different train parameters under class V surrounding rock condition

列车参数		激振频率	配重块	结构自重	激振力
列车轴重 / kN	列车时速 / (km/h)	/ Hz	组合	/ kN	/ kN
300	120	14.0	B−05	300	500
270	80	9.0	B−03	270	300
250	110	11.0	B−02	250	280

2.3　围岩概况

本次试验断面为 DK294+100（IV 级围岩）和 DK294+285（V 级围岩）。施工期间付营子隧道对 DK294+065～DK294+410 段围岩进行了 TSP（tunnel seismic prediction）地质超前预报，结果如下：

DK294+085～DK294+217 岩性为流纹质凝灰岩、正长斑岩，围岩强度较前方有大幅度提高，节理裂隙发育，裂隙水不发育。围岩级别推断为 IV 级。

DK294+165～DK294+310 段岩性仍为流纹质凝灰岩、正长斑岩，呈碎块结构。TSP 地质超前预报显示该段 p 波、s 波等急速下降，围岩强度大幅度降低，岩体表现为破碎，节理裂隙不发育，裂隙水不发育。围岩级别推断为 V 级。

由 TSP 地质超前预报可以得出付营子隧道 DK294+285 试验断面围岩条件为 V 级，

根据现场原位直剪试验并结合《铁路隧道设计规范》[14]确定出 IV 级和 V 级围岩各项物理参数如表 3 所示。

表 3　付营子隧道围岩参数

Table 3　Test section parameters of surrounding rock in Fuyingzi tunnel

围岩级别	弹性模量 / GPa	泊松比	重度 / (kN/m^3)	凝聚力 / MPa	摩擦角 / (°)
IV 级	3.6	0.33	22.5	0.450	55
V 级	2.0	0.24	20.3	0.012	38

2.4　传感器布设

鉴于本次测试元件需要满足抗干扰性强、长期耐久性、测试数据稳定等要求；同时除需要在激振试验过程中读取数据动态采集外，还需要实现数据长期、远程采集传输，因此，选用光纤光栅传感器[15]。为了得到列车动荷载作用下重载铁路隧道基底结构的动压力实际传播规律及各部位实时动压力，在无砟道床内部，仰拱填充层及仰拱表面，仰拱与围岩接触部位均安装光纤光栅土压力计，埋设点如图 3 所示。

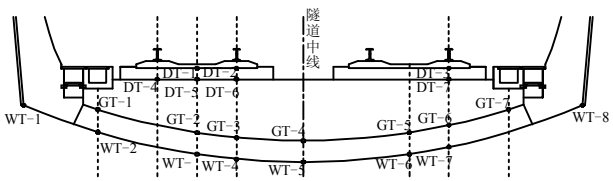


图 3　基底结构传感器布设示意图

Fig.3　Schematic diagram of the sensor layout in basal structure

考虑在付营子隧道激振试验完毕后，传感器需

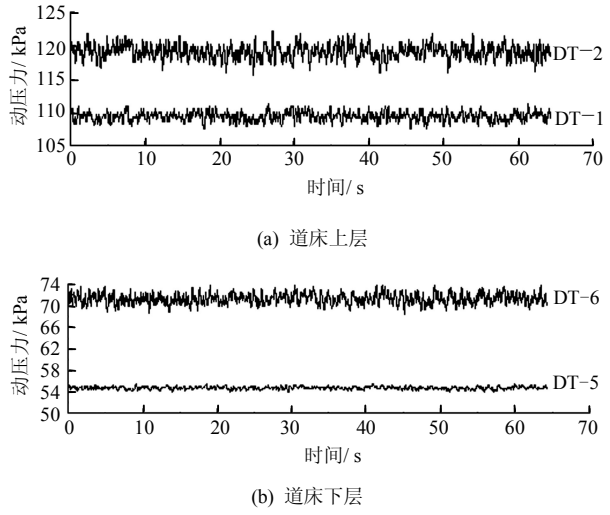
兼顾动力实时监测和长期记录需要，选择传感器量程时，道床上层土压力计（DT-1～DT-3）为 10 MPa，道床与仰拱填充层表面土压力计（DT-4～DT-7）为 5 MPa，仰拱上层土压力计（GT-1～GT-7）和仰拱与围岩间土压力计（WT-1～WT-8）均为 2 MPa，采集频率为 100 Hz，即采样时间间隔为 0.01 s。

3 激振试验结果

付营子隧道 K294+285 试验断面自 2015 年 6 月 4 日开始试验，根据不同激振频率及配重组合共模拟 3 种工况，试验时间共计 206.4 h。在基底结构初始状态下，提取各工况激振作用前 200 次作为模拟单列重载列车引起的道床、仰拱填充（道床下表面）、仰拱和围岩表面的接触压力瞬时动力增量为研究对象。因篇幅限制，文中仅列举道床部分测点的典型动压力-时程曲线，具体分析如下。

3.1 道床动压力

道床左线路动压力-时程曲线如图 4 所示。



(a) 道床上层

(b) 道床下层

图 4 模拟轴重为 270 kN 下道床左线路动压力典型时程图

Fig.4 Typical process diagrams of dynamic pressure in left track line under 270 kN axle load

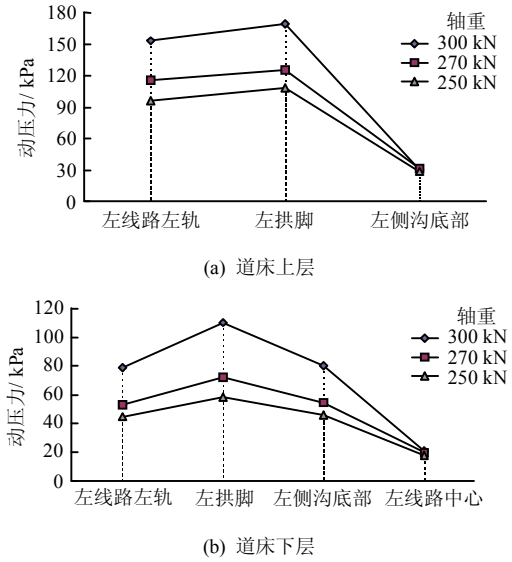
由图可知，激振试验过程中，各工况下测点动压力表现为类似的规律性。从竖向看，道床上层的压力响应较下层更为剧烈；从横向看，重载线路轨道正下方压力响应较线路中心位置更为明显，同时左线路道床各测点压力变化比右线路更为明显，受到列车荷载影响更大。各工况下道床各测点动压力量值见表 4，变化规律如图 5 所示。

由表 4 可知，受激振试验影响的左线路（重载线路）道床各测点动压力明显大于右幅道床。其中，道床上层动压力幅值始终大于道床下层；对于上层动压力而言：各轴重下重载线路轨道下方的动压力量值最大，300 kN 轴重时动压力峰值为 169.200 kPa，270 kN 轴重时为 125.200 kPa，衰减了 26.00%，250 kN 轴重时为 108.200 kPa，较 270 kN 轴重衰减了 13.58%，表明该位置因列车荷载直接作用动力响应最为剧烈；对于下层动压力而言：各轴重下重载线路中心位置动压力最大，300 kN 轴重时动压力峰值为 110.409 kPa，270 kN 轴重时为 72.272 kPa，衰减了 34.54%，250 kN 轴重时为 58.045 kPa，较 270 kN 轴重衰减了 19.69%。

表 4 各工况下道床各测点动压力峰值（单位：kPa）

Table 4 Dynamic pressure peaks of each measuring point in ballast bed under different working conditions (unit: kPa)

动力峰值/ kPa			衰减程度/ %	
工况 1 (轴重为 300 kN)	工况 2 (轴重为 270 kN)	工况 3 (轴重为 250 kN)	工况 2 较工况 1	工况 3 较工况 2
153.200	115.400	95.800	24.67	16.98
169.200	125.200	108.200	26.00	13.58
30.448	31.379	28.448	-3.06	9.34
78.725	52.857	44.275	32.86	16.24
110.409	72.272	58.045	34.54	19.69
79.878	54.489	45.857	31.78	15.84
21.224	19.938	18.020	6.06	9.62



(a) 道床上层

(b) 道床下层

图 5 各工况下道床动压力变化规律

Fig.5 Variations of dynamic pressure of ballast bed under different working conditions

由图 5 可知，在重载列车作用下，随着列车轴重下降，动压力也相应减少，但横向分布规律基本相同。左幅道床因为是重载线路直接受到重载列车作用，动压力随轴重下降的变化较道床右幅更为明显。当模拟轴重由 300 kN 下降到 270 kN 时，动压

力衰减程度大于从 270 kN 模拟轴重下降到 250 kN，表明随着重载列车轴重增加，道床各位置的动压力会越来越大。

3.2　仰拱填充动压力

仰拱上表面各测点动压力量值如表 5 所示，变化规律如图 6 所示。

表 5　各工况下仰拱填充各测点动压力变化（单位：kPa）
Table 5　Dynamic pressure change of each measuring point in invert arch filling under different working conditions (unit: kPa)

动压力峰值/ kN			衰减程度/ %	
工况 1 (轴重为 300 kN)	工况 2 (轴重为 270 kN)	工况 3 (轴重为 250 kN)	工况 2 较工况 1	工况 3 较工况 2
26.957	18.070	14.456	32.97	20.00
39.200	27.940	20.352	28.72	27.16
46.132	32.892	26.314	28.70	20.00
27.965	18.576	14.861	33.57	20.00
16.789	10.752	7.602	35.96	29.30
11.038	8.727	6.982	20.94	20.00
2.299	1.709	1.367	25.66	20.01

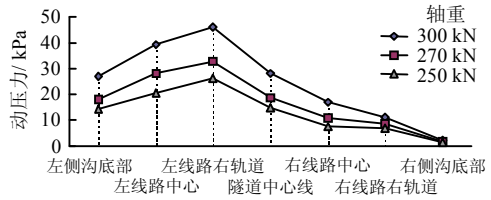


图 6　各工况下仰拱上表面各位置实测动压力幅值
Fig.6　Measured dynamic pressure amplitude of each position in the upper surface of invert arch under different working conditions

由表 5 可知，因为激振试验的影响，仰拱表面左幅动压力基本大于右幅。其中左线路（重载线路）右轨道下方相应位置的动压力相对最大，模拟轴重 300 kN 时达到 46.132 kPa，250 kN 时达到 26.314 kPa；表明该位置仍受到模拟列车荷载的影响最为明显。随着模拟轴重的减小，仰拱表面各测点动压力虽量值不同，但衰减程度较为接近，表明随着竖向深度的增加，重载列车荷载影响开始减弱；仰拱表面动压力随轴重减小衰减规律仍表现为动压力衰减程度大于轴重衰减。

由图 6 可知，各工况下仰拱表面动压力横向分布规律基本相同，表现为左幅明显大于右幅，随着与激振位置的距离增加，动压力也逐渐减弱。试验表明，重载列车会加剧重载线路对应竖向位置上仰拱表面的动压力量值，使压力集中在作用位置下方而使左右分布不对称，长期受到重载列车荷载的反复循环作用，容易形成相应的病害，影响仰拱结构安全。

3.3　围岩动压力

3.3.1 V 级围岩表面动压力分布

V 级围岩表面各测点动压力量值如表 6 所示，变化规律如图 7 所示。

表 6　各工况下围岩各测点动压力变化（单位：kPa）
Table 6　Dynamic pressure change of each measuring point in surrounding rock under different working conditions (unit: kPa)

动压力变化/ kN			衰减程度/ %	
工况 1 (轴重为 300 kN)	工况 2 (轴重为 270 kN)	工况 3 (轴重为 250 kN)	工况 2 较工况 1	工况 3 较工况 2
4.929	3.150	2.720	36.09	13.65
10.661	7.563	7.050	29.06	6.78
9.556	6.789	8.431	28.96	−24.19
20.150	14.605	12.684	27.52	13.15
10.661	7.163	9.730	32.81	−35.84
8.496	5.247	5.198	38.24	0.93
6.339	4.137	2.310	34.74	44.16
4.748	3.324	1.659	29.99	50.09

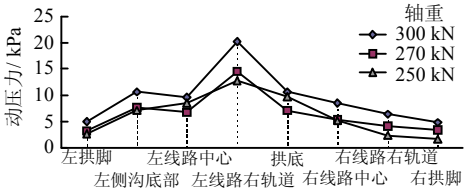


图 7　各工况下围岩各位置动压力幅值
Fig.7　Dynamic pressure amplitude of each position in the surrounding rock under different working conditions

由表 6 可知，对于仰拱与围岩之间的动压力而言，左幅围岩表面动压力仍因激振试验作用而使得量值整体大于右幅。其中不同轴重下左线路（重载线路）右轨道下方位置的动压力最大，模拟轴重为 300 kN 时，该位置动压力达到 20.150 kPa，模拟轴重为 250 kN 时达到 12.684 kPa，表明该位置受到列车荷载影响最大。当轴重由 300 kN 下降到 270 kN 时，围岩表面左幅测点动压力衰减程度基本表现为由左线路右轨至左拱脚逐渐增大，表明重载列车轴重增加会直接加剧轨道下方围岩的动力响应。当轴重由 270 kN 下降到 250 kN 时，围岩表面各测点动压力中左线路中心和拱底位置出现一定程度的反向增长，而左线路（重载线路）右轨下方的动压力仍下降，表明当重载列车轴重下降到 250 kN 时，会减弱围岩表面的压力集中现象，使围岩表面重载线路轨道位置动压力重新分布到相邻位置，在一定程度上加剧了重载线路侧围岩表面的受力。

由图 7 可知，在不同轴重的重载列车作用下，围岩表面各测点动压力横向分布规律基本类似，均

表现为左线路（重载线路）右轨道位置动压力相对最大并由该位置逐渐向两侧逐渐减少，这种分布规律与仰拱上表面相应测点的动压力横向分布相同。试验表明，重载列车荷载会加剧围岩表面轨道相应位置的动压力，轴重增长到 300 kN 时，这种动力影响会越来越大。

3.3.2 围岩级别影响

将 IV 级围岩监测断面 DK294+100 底部围岩表面动压力分布列与 V 级围岩进行对比，以此说明围岩条件对其表面动压力分布的影响，见表 7。

表 7 IV 级和 V 级围岩表面各测点动压力变化

Table 7 Dynamic pressure change of each measuring point at the surface of class IV and V surrounding rocks

测点位置	300 kN			270 kN			250 kN		
	VI 级围岩动压力/ kPa	V 级围岩动压力/ kPa	增长率/ %	VI 级围岩动压力/ kPa	V 级围岩动压力/ kPa	增长率/ %	VI 级围岩动压力/ kPa	V 级围岩动压力/ kPa	增长率/ %
左拱脚	3.028	4.929	62.78	2.786	3.150	13.07	2.433	2.720	11.80
左侧沟底部	7.421	10.661	43.66	5.295	7.563	42.83	5.083	7.050	38.70
左线路中心	8.054	9.556	18.65	6.587	6.789	3.07	5.734	8.431	47.04
左线路右轨道	18.475	20.150	9.07	13.548	14.605	7.80	10.271	12.684	23.49
拱底	5.845	10.661	82.40	5.054	7.163	41.73	4.051	9.730	140.19
右线路中心	4.964	8.496	71.15	4.896	5.247	7.17	3.562	5.198	45.93
右线路右轨道	4.398	6.339	44.13	4.528	4.137	−8.64	2.417	2.310	−4.43
右拱脚	2.987	4.748	58.96	3.215	3.324	3.39	1.352	1.659	22.71

根据表 7 可知，V 级围岩条件下围岩表面动压力较 IV 级围岩均有不同程度的增长。横向分布规律类似：左幅重载线路受到列车荷载直接作用仍使围岩表面动力高于右幅客运线路，其中左线路轨道竖向位置上动压力最大，而围岩等级变差，该位置动土压力增长幅度相对较小。

围岩级别降低，轴重为 300 kN 时，重载线路轨道下方动土压力增幅较小，仅为 9.07%；拱底位置的增幅较大，为 82.40%。轴重为 270 kN 时，重载线路轨道下方动土压力增幅为 7.80%；拱底位置的增幅较大，为 41.73%。轴重为 250 kN 时，重载线路轨道下方动土压力增幅为 23.49%；拱底位置的增幅较大，为 140.19%。试验表明：围岩变差，250、270 kN 轴重条件下的重载列车荷载传递到围岩表面时引起轨道动土压力的增幅相对不大，但其相邻测点动土压力的增加幅度较大。表明围岩变差，重载列车荷载会引起轨道位置相邻测点的受力增加，这种影响对于拱底尤为明显；当轴重达到 300 kN 时，重载列车对基底围岩的荷载作用影响范围更广。

3.4 动压力竖向传播规律

3.4.1 特征检测线动压力竖向传播规律

将 V 级围岩条件下左线路中心、左线路右轨道、右线路右轨道 3 条竖向特征检测线上各结构表面动压力幅值的竖向分布如图 8 所示。

由图 8 可知，在不同轴重影响下，3 条特征竖向监测线的动压力传播规律基本类似，整体表现为左幅因激振试验直接作用各测点动压力大于右幅，右幅道床在激振试验过程中虽没有直接受到列车荷载作用，但在列车振动影响下动压力仍出现一定程度增长，相比左幅量值较小。3 种工况均显示轴重下降，各特征检测线上测点的动压力也下降。此外，列车荷载在竖向传递过程中，道床和仰拱填充结构的缓冲作用下，动压力出现较大程度的衰减，当传

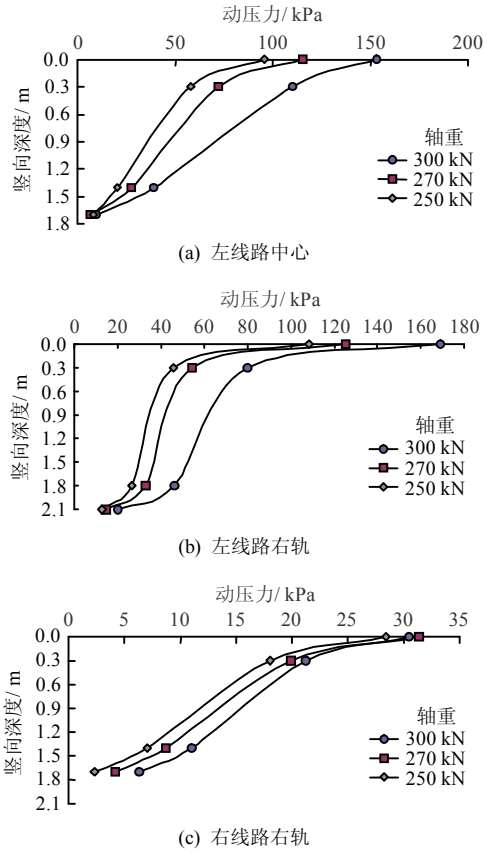


图 8 各工况下特征位置动压力幅值竖向传播规律

Fig.8 Dynamic pressure amplitude vertical propagation of feature location under different conditions

递到仰拱结构时，动压力衰减的程度减小。对比 3 条曲线图可知，对于 V 级破碎围岩条件下双线重载铁路隧道而言，重载线路轨道因直接承受列车荷载使得竖向位置上各测点的动力响应最为剧烈，同时衰减也最为明显。

3.4.2 轨道竖向附加动压力规律

鉴于重载线路轨道竖向位置上动压力响应最为剧烈，将 V 级围岩条件下不同轴重作用下左线路右轨道竖向特征检测线上各结构表面动压力与自重应力的关系列入表 8。

表 8　V 级围岩基底结构附加动压力与自重应力关系对比

Table 8　Comparison between additional dynamic stress and gravity stress under the basement structure in class V surrounding rock

竖向深度 / m	300 kN			270 kN			250 kN		
	动压力 / kPa	自重应力 / kPa	动静应力比	动压力 / kPa	自重应力 / kPa	动静应力比	动压力 / kPa	自重应力 / kPa	动静应力比
0.0	169.200	0.0	/	125.200	0.0	/	108.200	0.0	/
0.3	79.878	7.5	10.65	54.489	7.5	7.27	45.857	7.5	6.11
1.8	46.132	42.0	1.10	32.892	42.0	0.78	26.314	42.0	0.63
2.1	20.150	48.9	0.41	14.605	48.9	0.30	12.684	48.9	0.26

由表 8 可知，深度增加，列车附加动荷载相对基底结构自重应力作用效果逐渐减弱。当列车荷载传递到围岩表面时，轴重为 250、270、300 kN 时重载列车在底部围岩表面上产生的动压力与基底结构自重应力之比为 0.26、0.30、0.41。结合《重载铁路设计规范》[16]中规定附加动应力应小于自重应力 0.2 倍的规定，表明 V 级破碎围岩条件下，当前基底结构的厚度难以满足轴重提升的要求。

4　结　论

（1）通过现场激振试验，对处于破碎围岩条件下双线铁路隧道进行不同轴重重载列车进行模拟研究。由试验结果可知：在 250、270、300 kN 轴重的重载列车荷载作用下，各结构表面各测点动压力均表现为列车直接作用侧更大，其中线路轨道下方因直接受到激振作用而使该竖向检测线上各测点的动压力最大，同时随深度的增加而逐渐减小。表明重载列车作用下轨道正下方的结构易受到更大的动压力作用，极易出现相应病害。

（2）在 250、270、300 kN 模拟轴重的重载列车影响下，道床结构上下表面的动压力最大，当轴重由 300 kN 减小到 270 kN 时，道床上层列车作用侧动压力衰减度约为 25%，道床下层动压力衰减度约为 33%；当轴重由 270 kN 减少到 250 kN 时，道床下层列车作用侧动压力衰减度约为 15%，道床下层动压力衰减度约为 17%。对于仰拱表面，300 kN 轴重减少到 270 kN 时，列车作用侧动压力衰减度约为 28%～35%；270 kN 轴重减少到 250 kN 时，列车作用侧动压力衰减度约为 20%～29%。对于围岩表面，300 kN 轴重减少到 270 kN 时，列车作用侧动压力衰减度约为 27%～36%；270 kN 轴重减少到 250 kN 时，列车作用侧动压力衰减度约为 6%～13%。试验表明，轴重增加，基底结构内各结构层表面动压力增长速度更快，表明随重载列车轴重增加，基底结构受到动压力影响会越来越大。

（3）在 250、270、300 kN 轴重影响下，仰拱表面和围岩表面测点的动压力横向分布规律基本类似，其中线路轨道下方相应测点的动压力最大并逐渐向两侧递减，当轴重由 270 kN 减小到 250 kN 时，围岩表面测点轨道下方相邻测点即线路中心和拱底位置的动压力出现一定程度的反向增长，表明轴重下降动压力会分担到围岩表面其他位置；反之，轴重增加会加剧轨道下方相应位置的动压力容易使破碎围岩形成空洞影响结构安全。

（4）围岩条件变差（IV 级降为 V 级时），在 250、270、300 kN 轴重下，列车荷载会引起围岩表面重载线路侧轨道相邻位置动压力的增加；当轴重达到 300 kN，破碎围岩条件下，围岩表面各测点动压力整体增加，表明列车荷载对基底围岩影响范围更广。

（5）重载列车荷载作用下，线路中心、轨道下方动压力传递规律主要有两个特征，一是经过道床结构和仰拱填充的缓冲出现较为明显的衰减；二是在仰拱结构内部传递过程中衰减程度较小。V 级破碎围岩条件下，不同轴重的重载线路轨道竖向位置上，底部围岩表面上产生的动压力与基底结构自重应力之比显示以目前基底结构的设计厚度难以满足重载铁路轴重提升的需求。

参 考 文 献

[1] 李宏. 国外重载铁路综述[J]. 铁道工程学报, 2000, 17(4): 32－34.
LI Hong. Comprehensive description of heavy haul

railways abroad[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2000, 17(4): 32－34.

[2] 方翁武. 25 t/30 t 轴重的重载机车动力学性能对比研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
FANG Weng-wu. Comparative research on dynamic performance of 25 t/30 t axle load heavy haul locomotives[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[3] 耿志修, 李学峰, 张波. 大秦线重载列车运行仿真计算研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 88－93.
GENG Zhi-xiu, LI Xue-feng, ZHANG Bo. Simulation study of heavy haul train operation on Datong-Qinhuangdao railway[J]. **China Railway Science**, 2008, 29(2): 88－93.

[4] 胡亚东. 我国铁路重载运输技术体系的现状与发展[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(2): 1－10.
HU Ya-dong. Current status and development trend of technology system for railway heavy haul transport in China[J]. **China Railway Science**, 2015, 36(2): 1－10.

[5] 张银花, 周清跃, 陈朝阳. 重载铁路高强钢轨的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010 31(4): 20－25.
ZHANG Yin-hua, ZHOU Qing-yue, CHEN Zhao-yang. Test study on the high strength rails of heavy haul railway[J]. **China Railway Science**, 2010, 31(4): 20－25.

[6] 李自强, 王明年, 于丽, 等. 重载铁路隧道基底结构的动压力响应[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 71－76.
LI Zi-qiang, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Dynamic pressure response of foundation base structure in heavy haul railway tunnel[J]. **China Railway Science**, 2016 37(1): 71－76.

[7] 尹成斐, 付兵先, 马伟斌. 重载列车作用下隧道结构的动应力分析[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 47－52.
YIN Cheng-fei, FU Bing-xian, MA Wei-bin. Analysis on dynamic stress of tunnel structure under heavy train[J]. **China Railway Science**, 2013, 34(3): 47－52.

[8] 李幸吉. 重载铁路隧道动态测试及仰拱抗冲击性能试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
LI Xing-ji. Dynamic monitoring and experimental study on impact resistance of inverted arch of heavy-haul railway tunnel[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.

[9] 冷伍明, 刘文劼, 赵春彦, 等. 重载铁路路基压实粗颗粒土填料动力破坏规律试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 640－646.
LENG Wu-ming, LIU Wen-jie, ZHAO Chun-yan, et al. Experimental research on dynamic failure rules of compacted coarse grained soil filling in heavy haul railway subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 640－646.

[10] 薛富春, 马建林, 颜利平, 等. 客运专线富水黄土隧道隧底振动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 203－207.
XUE Fu-shun, MA Jian-lin, YAN Li-ping, et al. Vibration characteristics test for a water-rich loess tunnel of a passenger dedicated line[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, 29(2): 203－207.

[11] 王亮亮, 杨果林, 房以河. 高速铁路膨胀土路堑全封闭基床动力特性现场试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 640－645.
WANG Liang-liang, YANG Guo-lin, FANG Yi-he, et al. In-situ tests on dynamic character of fully-enclosed cutting subgrade of high-speed railways in expansive soil areas[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 640－645.

[12] 白皓, 苏谦, 黄俊杰, 等. 非埋式桩板路基动力特性原位激振试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3753－3759.
BAI Hao, SU Qian, HUANG Jun-jie, et al. In-situ forced vibration tests on dynamic characteristics of non-embedded pile-board subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3753－3759.

[13] 姜领发, 熊署丹, 陈善雄, 等. 列车荷载作用下高铁路基速度传递规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 265－269.
JIANG Ling-fa, XIONG Shu-dan, CHEN Shan-xiong, et al. Model test study of velocity transfer law of high-speed railway subgrade under train load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.1): 265－269.

[14] 铁道第二勘察设计院. TB10003−2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd. TB10003−2005 Code for design on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[15] 田杨, 蔡力钢, 刘志峰, 等. 重型龙门数控机床−基础系统承载变形[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(1): 9－17.
TIAN Yang, CAI Li-gang, LIU Zhi-feng, et al. Bearing deformation of heavy-duty CNC machine tools & foundation system[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2016, 42(1): 9－17.

[16] 铁道第三勘察设计院. TB10625−2017 重载铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
China Railway Sanyuan Engineering Group Co. Ltd. TB10625−2017 Code for designing heavy haul railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.