

DOI:10.116544/j.cnki.cn43-1494/u.20230410001

文章编号:1674-599X(2023)04-0001-08

引用格式:查旭东,钟海阔,吕茂丰,等.旧水泥混凝土路面共振破碎振动影响范围研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):1-8.

Citation:ZHA Xudong,ZHONG Haikuo,LYU Maofeng,et al. Influence range test of vibration for resonant rubblelization in existing cement concrete pavement[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2023,39(4):1-8.

旧水泥混凝土路面共振破碎振动影响范围研究

查旭东¹,钟海阔¹,吕茂丰²,关维溢³

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙,410114;2.中铁五局集团有限公司,湖南长沙,410100;
3.佛山市建盈发展有限公司,广东佛山,528099)

摘要:旧水泥混凝土路面共振碎石化施工中的振动会影响邻近结构物的服役安全,为分析其振动传播特性及安全控制范围,针对某实际工程进行现场共振破碎振动试验,采集不同测线和不同测点处的振动加速度和振动速度的时程数据,并应用快速傅里叶变换对相应的振动响应进行频谱分析,建立振动峰值沿地表横向和地层竖向传播的衰减模型。研究表明:共振破碎振动具有频率高、振幅低的特点,其振动主频为46~50 Hz;振动峰值随横向距离增大呈指数衰减,随竖向深度增大呈反S形曲线衰减;根据建筑物振动安全控制标准,提出了共振破碎振动对邻近结构物影响的地表横向安全距离和地层竖向安全深度分别不小于6.1 m和1.3 m的结论,该研究可为旧水泥混凝土路面共振碎石化施工的安全范围控制提供参考。

关键词:旧水泥混凝土路面;共振碎石化;振动响应;频谱分析;施工安全

中图分类号:U418.8

文献标志码:A

Study on the influence range of vibration induced by resonant rubblelization in existing cement concrete pavement

ZHA Xudong¹,ZHONG Haikuo¹,LYU Maofeng²,GUAN Weiyi³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. China Railway No.5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410100, China; 3. Foshan Jianying Development Co., Ltd., Foshan 528099, China)

Abstract: During construction process of resonance rubblelization in existing cement concrete pavement, the induced vibration will affect the service safety of adjacent structures. In order to analyze the vibration propagation characteristics and the safety control range, the field resonant rubblelization test was carried out. The time-history curves of vibration acceleration and vibration velocity at different measuring lines and different measuring points were collected. The spectrum analysis of vibration signal was performed by the Fast Fourier Transform, and the attenuation models of vibration peak propagating along the transverse surface and vertical stratum were established. The results show that the vibration induced by the resonant rubblelization is characterised by high frequency and low amplitude, and the dominant frequency of vibration is 46~50 Hz. The vibration peak decreases exponentially with the increase of the transverse distance, which decreases in an inversely S-shaped curve with the increase of the vertical depth. According to the vibration safety control standard for buildings, it is proposed that the minimum safe distance of transverse surface and the minimum safe depth of vertical stratum from the adjacent structures are 6.1 m and 1.3 m respectively, which can

收稿日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878077);中铁五局集团有限公司科技项目(2020[12]);佛山市建盈发展有限公司科技项目(FS-XTNH-G-[2018]011)

通讯作者:查旭东(1970—),男,长沙理工大学教授,博士生导师。

provide reference for the control of safe influence range of vibration induced by resonant rubbleization in existing cement concrete pavement.

Key words: existing cement concrete pavement; resonance rubbleization; vibration response; spectrum analysis; construction safety

共振碎石化施工因具有对旧水泥混凝土路面的破碎再生效果好,可较好地控制碎石化层的级配和厚度,还可防止沥青加铺层反射开裂等优点,被广泛应用于国内外旧水泥混凝土路面的沥青加铺改造工程之中^[1-3]。共振碎石化在降低旧水泥混凝土路面板强度的同时,还能降低其变异性^[4],但在施工过程中,共振破碎机产生的振动也会影响、甚至破坏邻近结构物的服役安全,因此,必须严格控制共振破碎振动的安全影响范围^[5-6]。

许多学者对旧水泥混凝土路面碎石化施工的振动进行了研究。针对冲击碾压破碎振动研究,刘荣等^[7]分析了旧混凝土路面冲击破碎的动力响应特性,给出了路面和结构物的安全振动速度范围。胡昌斌等^[8]对比分析了冲击碾压的地基振动三维有限元模拟结果与现场地基振动实测结果,计算了距振源不同距离的构筑物动力时程响应,其研究表明:沿道路作用点 10 m 范围内振动加速度衰减显著。针对多锤头碎石化振动研究,阎宗岭等^[9]对其施工的振动特点和影响范围进行了现场监测,建立了填方路基和挖方边坡振动加速度峰值与振中距间的负指数和对数关系衰减模型,确定了多锤头碎石化振动对建筑物的影响范围。李萍等^[10-11]研究了在冲击荷载作用下,路面板与埋置管道振动影响的衰减规律,研究表明:多锤头破碎机冲击荷载在 0~2 m 的埋深内衰减速度很快,其振动随水平距离以负幂函数形式衰减,10 mm/s 振动速度峰值和 0.1g 振动加速度峰值可作为周围建筑物的安全振动参数标准。共振破碎机不同于冲击碾压和多锤头碎石化,因其振动频率高、振幅低的特点,作用于地表的力属于连续激振力^[12-13]。针对共振碎石化振动研究,李豪等^[14]通过现场试验,对比分析了多锤头碎石化与共振碎石化施工过程中振动与噪声对临近环境的影响,研究表明:多锤头碎石化施工振动远大于共振碎石化的,且共振破碎机有明显的振动主频。ZHAO 等^[15]对共振碎石化引起的隧道衬砌结构截面上的振动加速度和振动速度进行了监测,其结果表明:频率在 30~60 Hz 的最大振动速度为 10.3 mm/s,施工过程中衬砌结构的安全性有待进一步评估。对于旧水泥混凝土路面破碎施工影响的安全距离研

究,主要是针对冲击碾压和多锤头碎石化技术,并根据已有的标准对某一实测或模拟数据进行分析,共振碎石化施工中,针对共振破碎机振动频率高、振幅低等特点的振动特性的研究鲜见。因此,本研究拟针对旧水泥混凝土路面共振碎石化施工过程的环境振动进行研究,依托某实际工程,采用动态信号测试分析系统,监测共振破碎时的振动速度、加速度和频率等动力响应数据,研究共振破碎振动沿地表横向和地层竖向传播的衰减规律,依据建筑物的振动安全控制标准,提出共振破碎施工的横向和竖向的安全距离,为旧水泥混凝土路面共振碎石化施工安全控制提供依据。

1 共振破碎振动测试方法

1.1 共振破碎原理

共振碎石化施工主要用于旧水泥混凝土路面加铺沥青层的大修或改造工程。其原理是利用共振破碎机的破碎锤头将产生的高频低幅能量传递到路面。当破碎锤头激振频率达到水泥混凝土面板的共振区时,面板将会产生剧烈的受迫振动,导致内部产生裂纹,将旧面板破碎成粒径大小均匀、尺寸可控的碎块后,再进行碾压,形成粒径大小适中、级配良好的顶面碎粒层和上部松散层及具有较高承载能力的下部嵌锁层,为加铺新的路面结构层提供稳定的基础,防止沥青面层开裂。

共振碎石化施工可以采用共振梁式共振破碎机和全浮动式共振破碎机。其中,全浮动式共振破碎机为中国自行研制的共振破碎设备,由两个等速反向旋转的激振轴作为垂直方向的激振源实现锤头的上下振动。根据本试验实际工程现场施工情况,选用中铁科工集团研制的 GPJ3X-600 型共振破碎机进行试验。

1.2 现场测试方案

依托工程为某城市道路提质改造项目,旧水泥混凝土路面结构为 24 cm 厚的 C30 混凝土面板和 30 cm 厚的水泥稳定砂砾基层,路基土主要为黏性土和杂填土。共振破碎振动影响监测时,以共振破碎机破碎锤头的竖向简谐振动作为激振源,频率范

围为45~50 Hz,工作振幅为10~20 mm,行进速度为3~4 km/h。振动响应测试仪器选用江苏东华测试技术股份有限公司生产的DH5922D型动态信号测试分析系统、1A213E低频压电式加速度传感器和2D001型磁电式速度传感器。

对于共振破碎施工沿水平横向地表的振动监测,在进行破碎试验时,共振破碎机每次的破碎行程距离为60.0 m,在远离共振破碎工作面一侧,垂直于破碎行进方向布置A、B和C 3条平行测线,且3条测线均设置在每一段破碎行程中心点附近,如图1所示。并沿每条测线距破碎锤头由近至远设置5组测试点,每组测试又设置3个测点,如:B测线第一组为 B_{1-1} 、 B_{1-2} 、 B_{1-3} ,第二组为 B_{2-1} 、 B_{2-2} 、 B_{2-3} 等,A、C测线布设以此类推。因每次破碎试验的锤头右移20 cm,对应各测点也右移20 cm。为保证监测安全,距破碎锤头横向水平距离为4.0 m处开始设置每条测线的第一组的第一个测点^[16],其余4组的第一个测点距破碎锤头的横向水平距离依次为4.8、5.6、6.4和7.2 m。试验前将传感器固定在测点表面,并采用动态信号测试分析系统分别采集共振破碎过程中地表振动的加速度和速度时程数据。

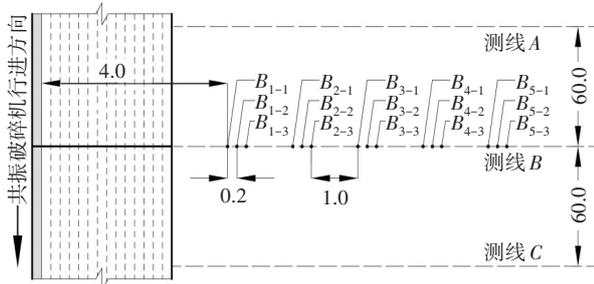


图1 横向地表振动监测点布置(单位:m)

Fig. 1 Layout of monitoring points for transverse surface vibration(unit:m)

进行第一次破碎试验时,从测线A距离共振破碎机的最近一个测点开始进行振动监测,并采集振动数据。再将共振破碎机移至第一次破碎试验的起始位置,并将破碎锤头向右横移20 cm,沿下一条带开始进行第二次破碎试验,对第一组的第二个测点进行振动监测,采集相同距离的振动数据,并依此进行3次破碎试验,获得第一组相同距离的振动监测数据,完成测线A的振动监测试验。然后对测线B、C振动监测步骤亦如此。本次试验共进行了45次破碎行程试验,每条测线获得5组相同距离的监测数据。

对于沿垂直竖向地层的振动监测,沿破碎行进方向钻取4组深度分别为0.2、0.4、0.6和0.8 m的试坑,相同试坑深度钻取2个点并各布置1个测点。

为防止因振动传感器在共振破碎施工的剧烈振动下跳离测点表面,导致影响振动监测数据异常,选用体积和质量较小的振动加速度传感器,并将其固定在试坑底部,如图2所示。分别采集共振破碎中不同深度处的地层竖向振动加速度时程数据。

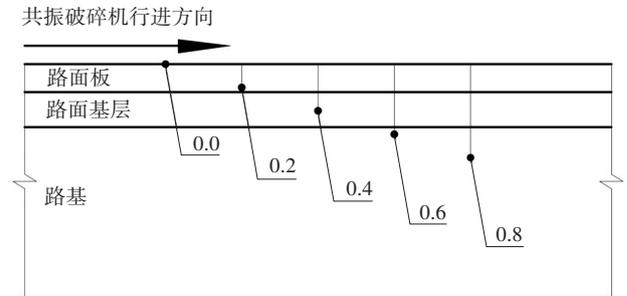


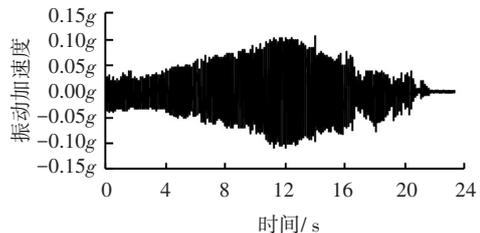
图2 竖向地层振动监测点布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of monitoring points for vertical stratum vibration(unit:m)

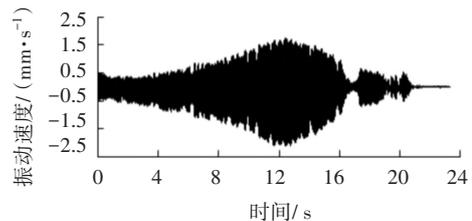
2 振动测试结果分析

2.1 沿地表横向振动分析

绘制在共振破碎过程中地表横向某一测点测得的振动加速度和振动速度响应时程曲线图,如图3所示。从图3可以看出,地表振动响应具有稳态振动的特点,共振破碎机冲击振幅低,但振动频率高、振动波长短。在同一测点,随着共振破碎机向测线靠近,振动加速度和振动速度峰值均逐渐增大,随着与测线距离的增大,振动加速度和速度峰值都逐渐变小;地表振动响应时程曲线峰谷值对称分布,整体呈棒植状。



(a) 振动加速度时程曲线



(b) 振动速度时程曲线

图3 横向地表振动响应时程曲线

Fig. 3 Time history curves of transverse surface vibration response

提取各测线测点处共振破碎的地表横向振动加速度和振动速度峰值,可得到各测点处平均振动响应峰值,见表1。由表1可知,共振碎石化施工的振动加速度和振动速度峰值沿横向距离传播的衰减趋势基本一致。其中,横向距离为4.0~5.6 m时,振动峰值衰减速度很快,振动加速度和振动速度峰值分别衰减了35.4%和51.2%,而横向距离为5.6~7.2 m时,振动峰值衰减趋势变缓,振动加速度和速度峰值分别衰减了24.5%和27.5%,这是几何阻尼作用导致的,振动波扩散得越远,其单位体积内的能量越少,而距离振源愈近的区域振动响应愈大。比较相同测试距离时振动加速度和振动速度峰值的变化可知,随着横向距离的增大,共振破碎的地表振动速度响应比振动加速度响应更为敏感,表现为在近源时振动速度变化更大,且随着距离的增大衰减也更快,当横向距离从4.0 m增至7.2 m时,振动速度峰值减小了64.6%,而振动加速度峰值只减小了51.3%。

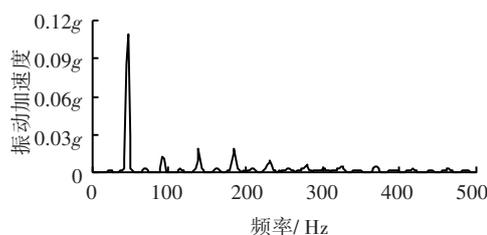
表1 横向地表平均振动响应峰值测试结果

Table 1 Average peak of transverse surface vibration response

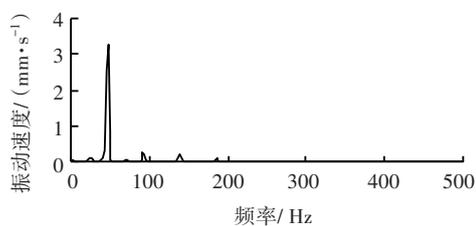
横向水平距离/m	加速度峰值	速度峰值/(mm·s ⁻¹)
4.0	0.158g	2.914
4.8	0.120g	2.068
5.6	0.102g	1.423
6.4	0.087g	1.188
7.2	0.077g	1.032

为校验振动响应时程曲线的衰减规律,对共振破碎振动时程曲线进行频域处理。由于信号处理设备的性能受硬件限制,需要将原始连续长序列振动信号重采样为多段短序列。但是无论采样频率多高,只要信号截断,就不可避免地引起混叠,从而引起频谱泄露,导致误差。为了减少信号采样时频谱泄露造成的误差,可以将信号乘以一个窗函数,使信号在结束时逐步平滑过渡到截断处以减少误差,而不是突然截断,得到更接近真实状况的频谱曲线。因此,采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)作为频域处理函数,采用汉宁窗(Hanning)作为窗函数,将监测到的振动响应时程曲

线进行处理,得到振动加速度和振动速度的功率谱密度曲线,其频谱特性都非常明显。图4为某测点振动响应的时程曲线经频域处理后的振动加速度和振动速度的频谱曲线,振动加速度和振动速度均在46.875 Hz处出现最高波峰,此频率对应的振动能量最大,为振动主频。



(a) 振动加速度频谱曲线



(b) 振动速度频谱曲线

图4 横向地表振动响应频谱曲线

Fig. 4 Spectrum curves of transverse surface vibration response

根据各测点地表振动响应曲线的频谱,得到振动加速度、振动速度与频率的幅值谱曲线的振动主频及对应的振动加速度和振动速度的峰值,见表2。将表1实测时程曲线的振动峰值与表2振动主频对应的振动峰值进行对比,可知:①共振破碎的不同横向距离处地表振动响应的频谱特性非常明显,其主频一致性较强,基本处于46~50 Hz,与共振破碎机施振频率基本一致;②在每个测点的频谱曲线中,在1倍主频91.797 Hz和2倍主频138.672 Hz处均会出现一个较为明显的次峰值,其值为主频对应峰值的1/10~1/5,表明此频率下的振动响应能量较大;③随着测点距离的增大,振动主频对应的振动加速度峰值与振动速度峰值皆呈现衰减的趋势,且均分别小于同水平距离下实测时程数据的峰值;④振动主频对应的振动加速度峰值当横向距离4.0~7.2 m时衰减了60.7%,比实测时程曲线的振动加速度峰值衰减率提高了9.4%,表明衰减程度更大,而振动主频对应的振动速度峰值在监测范围内也衰减了61.4%,比实测时程曲线的振动速度峰值衰减率减

小了3.2%,表明速度衰减曲线更平缓,所以振动主频对应的振动加速度峰值和振动速度峰值随横向距离变化的衰减水平非常接近。

表2 横向地表振动主频及其对应的振动响应幅值的峰值

Table 2 Dominant frequency of transverse surface vibration and its corresponding maximum amplitude of vibration response

横向距离/m	振动主频/Hz	加速度峰值	速度峰值/(mm·s)
4.0	48.828	0.112g	1.123
4.8	48.828	0.089g	0.825
5.6	46.875	0.066g	0.604
6.4	46.875	0.056g	0.512
7.2	46.875	0.044g	0.433

2.2 地层竖向振动分析

某竖向深度测点处在共振破碎过程中地层振动加速度响应时程曲线如图5所示。从图5可以看出,竖向深度方向的振动响应时程曲线的波峰尖而旁瓣较小,随着共振破碎机向试坑渐近,振动加速度峰值快速增大,随着与试坑距离的增大,峰值渐小;地层振动响应时程曲线整体对称,峰值曲线呈陀螺型。

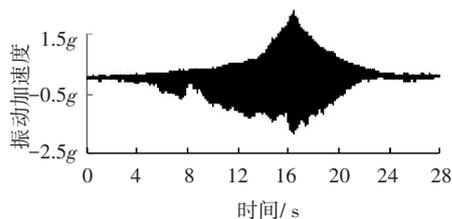


图5 竖向地层振动响应时程曲线

Fig. 5 Time history curve of vertical stratum vibration response

根据各试坑处监测的振动响应时程曲线,可提取相应的振动加速度峰值,同时通过频谱分析可得到振动加速度与频率的幅值谱曲线,并获得振动主频及对应的振动加速度峰值,结果见表3。由表3可知:①共振破碎在垂直竖向的地层振动强度对深度变化比较敏感,表现为各深度试坑的测点振动加速度峰值随着深度的增加而快速衰减,深度为0.0~0.8 m时峰值衰减了92.1%;②共振碎石化竖向地层振动响应的频谱特性具有较明显的规律性;深度为0.0~0.2 m时振动主频快速减小,减少达51.0%,但深度为0.4~0.8 m时振动主频趋于平稳,其主要原因是共振破碎机振动频率接近水泥混凝土路面板的固有频率,从而激发锤头下端路面板

局部范围产生共振,导致板块崩溃瓦解,即深度在0.0~0.24 m时水泥混凝土路面板出现了混凝土板块共振而破碎崩溃现象。由于颗粒体积、质量的减小引起振动主频升高,而在0.24~0.80 m时水泥稳定砂砾基层与土基并未产生共振,所以未发生或较少发生结构性破坏,其受迫振动的主频为49 Hz左右,与共振破碎机施振频率基本一致;③各测点振动主频对应的加速度峰值随着深度的增加而减小,但在0.2 m深度处有小幅上扬,较0.0 m处的振动加速度峰值提高了21.4个百分点,其主要原因是0.2 m深度接近水泥混凝土路面板底部,板底将发生破碎,振动响应增大,即该处存在一个振动加速度的回升区。

表3 竖向地层振动响应峰值及主频测试结果

Table 3 Test results of peak value and dominant frequency of vertical stratum vibration response

竖向垂直深度/m	加速度峰值	振动主频/Hz	对应加速度峰值
0.0	13.004g	103.516	0.632g
0.2	11.068g	50.718	0.767g
0.4	9.028g	48.828	0.559g
0.6	4.482g	49.805	0.401g
0.8	1.032g	48.828	0.149g

3 振动影响范围分析

3.1 振动安全控制标准

目前,还没有定量评价碎石化、冲击压实等施工产生的非爆破振动对周围结构物影响的统一规范或标准,大多采用地基质点振动加速度峰值或振动速度峰值来评价结构物的振动效应。根据《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)及国内外相关建议,打桩、振动冲击等基础施工对建筑结构在时域范围内的容许振动值,得出结论:当振动频率 f 为50 Hz时,速度最大值 v_{\max} 为6 mm/s,加速度最大值 a_{\max} 为 0.98 m/s^2 。旧水泥混凝土路面共振碎石化施工属于高频低幅稳态振动,其振动主频平稳,常为46~50 Hz,其对横向地表和竖向地下结构物的影响可以参照打桩、振动冲击等基础施工对建筑结构影响的容许振动值。因此,本试验作为判别结构物与振源之间的安全距离的振动参数为:①振动加速度最大值

≤ 0.98 m/s²; ② 共振破碎振动主频为 50 Hz 左右。
 ③ 振动速度峰值上限为 6 mm/s。当依据振动加速度和振动速度所确定的振动影响安全距离不一致时,为
 确保施工安全,取两者间距离较大的为安全距离。

3.2 横向地表振动对结构物影响

根据表 1 的共振破碎横向地表振动响应峰值测试结果,可绘制振动加速度峰值及振动速度峰值随横向距离的变化关系,如图 6 所示。通过回归分析对比,可优选指数函数,来建立共振破碎地表横向
 振动响应传播的衰减关系模型。

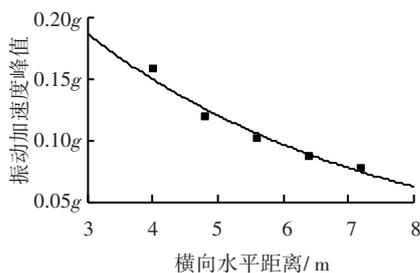
振动加速度衰减模型:

$$a_{mL} = 0.360\exp(-0.219L), (n = 5, R^2 = 0.973) \quad (1)$$

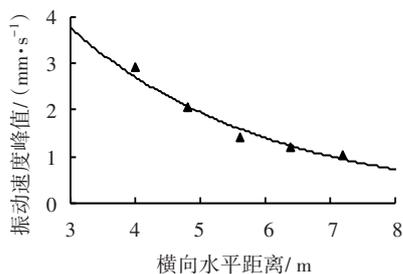
振动速度衰减模型:

$$v_{mL} = 10.099\exp(-0.329L), (n = 5, R^2 = 0.972) \quad (2)$$

式中: a_{mL} 为地表振动加速度峰值, m/s²; v_{mL} 为地表振动速度峰值, mm·s⁻¹; L 为测点与振源间的横向水平距离, m; n 为测点数, 个; R^2 为判定系数。



(a) 振动加速度峰值衰减曲线



(b) 振动速度峰值衰减曲线

图 6 地表振动响应峰值随横向水平距离变化关系

Fig. 6 Relationship between surface vibration response peak and transverse horizontal distance

这 2 个模型的判定系数 R^2 均超过 0.97, 且指数部分的系数均为负值, 表明共振破碎产生的地表振动响应的振动加速度和振动速度的峰值与振源的横向水平距离之间均具有显著的指数函数负相关性, 即距离振源越近, 其振动响应衰减越快。为保证共振

碎石化施工安全性, 建立横向水平距离 L 与地表振动加速度峰值 a_{mL} 及速度峰值 v_{mL} 之间的关系模型, 其表达式为:

$$L = k_1 \ln a_{mL} + b_1 \quad (3)$$

$$L = k_2 \ln v_{mL} + b_2 \quad (4)$$

式中: k_1 、 b_1 、 k_2 、 b_2 分别为模型参数。

取 95% 的置信水平, 得到式 (3) 与式 (4) 中距离 L 与 a_{mL} 、 L 与 v_{mL} 之间的回归结果, 见表 4。由表 4 可知, 式 (3) ~ (4) 的判定系数 R^2 均超过 0.97, 表明横向距离 L 与 a_{mL} 及 v_{mL} 之间具有显著的对数函数关系。

表 4 横向距离与振动响应峰值的回归结果

Table 4 Regression results of transverse horizontal distance with vibration response peak

参数	回归值	置信上限	置信下限	R^2
k_1	-4.031	-3.723	-4.340	0.977
b_1	-3.509	-2.774	-4.244	
k_2	-2.976	-2.758	-3.195	0.979
b_2	6.991	7.160	8.822	

当采用加速度最大值 0.98 m/s² 作为共振破碎地表振动对临近结构物的安全控制标准, 且置信水平为 95% 时, 由式 (3) 的振动衰减模型可计算得到, 对应的安全距离的置信区间为 5.48 ~ 6.06 m; 当以振动速度峰值上限 6 mm/s 作为控制标准, 且置信水平为 95% 时, 由式 (4) 的衰减模型得到对应的安全距离置信区间为 0.89 ~ 2.43 m。考虑到振动加速度指标的标准应更高, 所以取地表横向振动影响的安全距离不应小于 6.1 m。

共振碎石化施工为条带状作业, 涉及的临近结构物较多, 可提前对振动影响安全距离范围内的结构物进行标识, 必要时设置隔振沟或应力释放渠, 以避免路侧结构物被共振破碎施工产生的振动影响, 引发安全事故。

3.3 地层竖向振动对结构物影响

按照表 3 共振破碎竖向地层振动响应峰值测试结果, 可绘制振动加速度峰值随竖向垂直深度传播的变化, 如图 7 所示。共振破碎区地层振动加速度峰值随深度的增加呈现反 S 形曲线减小, 通过回归分析对比, 可优选相应的衰减模型为:

$$a_{mH} = \frac{13.192}{1 + \exp(8.912H - 4.171)}, (n = 5, R^2 = 0.988) \quad (5)$$

式中: a_{mH} 为地层振动加速度峰值, m/s^2 ; H 为测点距振源的竖向垂直深度, m 。

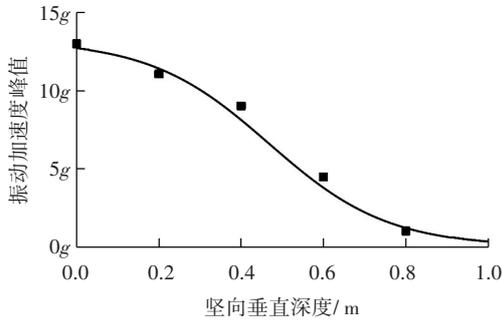


图7 地层振动加速度峰值随竖向垂直深度变化关系

Fig. 7 Relationship between stratum vibration acceleration peak and vertical depth

式(5)的判定系数 R^2 超过0.98,表明共振破碎的地层振动加速度峰值与振源竖向垂直深度之间具有显著的反S形曲线相关性。从图7可以看出,竖向深度在0.4~0.6 m时,其衰减速率最快,为22.73g/m,而在0~0.2 m时,其衰减速率较慢,为9.68g/m;距振源竖向深度大于1 m后,随着垂直深度的增加,振动加速度峰值逐渐趋近于0;共振破碎的地层振动影响主要存在于破碎区地下0~1 m,其衰减速率明显快于横向地表振动响应衰减速率,这是由于地层存在几何阻尼衰减和土体材料阻尼衰减,在近源处几何阻尼衰减起到主体作用,传播时振动面变大导致能量分布稀疏,同时由于土体材料颗粒间的摩擦与相对运动造成振动能量耗散,从而振动响应快速衰减。

式(6)为竖向垂直深度 H 与地层振动加速度峰值 a_{mH} 之间的关系模型,据式(6)计算95%置信水平下各参数的置信区间,结果见表5。

$$H = k_3 \cdot \ln\left(\frac{b_3}{a_{\text{mH}}} - 1\right) + c \quad (6)$$

式中: k_3 、 b_3 、 c 分别为模型参数。

表5 竖向垂直深度与加速度峰值的回归结果

Table 5 Regression results between vertical depth and acceleration peak

参数	回归值	置信上限	置信下限	R^2
k_3	0.116	0.130	0.102	0.980
b_3	13.223	13.465	12.981	
c	0.468	0.506	0.430	

当以振动加速度 $\leq 0.1g$ 作为共振破碎振动对地下结构物的安全影响控制指标时,由式(6)可得到

对应安全距离的置信区间为0.85~1.22 m,即可推断地层振动影响安全深度不应小于1.3 m。对于存在地下管网或检查井等其他结构物路段,若埋深在竖向安全影响范围外,可直接进行共振破碎施工作业,否则应在施工前做好调查与标记,考虑到隔振措施复杂且造价较高,共振破碎时可采取漏振的措施处理。

4 结论

1) 旧水泥混凝土路面共振破碎引起的振动在横向地表范围具有稳态振动特征,振动响应时程曲线呈棒槌状,且频谱特征非常显著,振动响应主频集中在46~50 Hz,且在1倍主频与2倍主频处均出现次波峰;横向地表振动加速度峰值及速度峰值与横向水平距离之间均呈显著的指数函数负相关性,横向距离4.0~5.6 m范围的振动响应衰减显著,且速度峰值随横向距离衰减更为明显。

2) 共振破碎的竖向地层振动响应时程曲线呈陀螺形,振动响应的主频因路基路面材料不同有所变化,最终稳定在49 Hz左右;地层振动加速度峰值与竖向垂直深度之间具有显著的反S形曲线负相关性,竖向地层振动响应衰减速率高于横向地表振动衰减速率。

3) 可取最大振动加速度为 0.98 m/s^2 、最大振动速度为 6 mm/s 作为共振破碎振动影响范围的安全控制标准,相应的破碎区临近结构物离振源的水平距离应不小于6.1 m,地下结构物埋深应不小于1.3 m。

参考文献(References):

[1] 赵冰,贺剑辉,关宏信,等.不同碎石化效果下沥青加铺结构断裂力学分析[J].交通科学与工程,2015,31(1):14-20.
ZHAO Bing, HE Jianhui, GUAN Hongxin, et al. Fracture mechanics analysis of asphalt overlay structure under different rubblization degrees [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(1): 14-20.

[2] FITTS G L. Rubblization using resonant frequency equipment: Transportation research circular No. E-C087 [R]. New York: Transportation Research Board, 2006: 20-30.

[3] WEST R, GU F, BOWERS B. Benefits of rehabilitating concrete pavements with slab fracturing and asphalt

- overlays [R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2020.
- [4] 关维溢,吕瑞东,杨峻峰.旧水泥混凝土路面共振碎石化及沥青加铺技术应用[J].广东公路交通,2022,48(4):1-6.
GUAN Weiyi, LYU Ruidong, YANG Junfeng. Application of resonant rubblization for old cement concrete pavement and asphalt overlay technology [J]. Guangdong Highway Communications, 2022, 48(4): 1-6.
- [5] KHATRI W A, MEHTEL M A, GHAMDI S A, et al. Rubblization: A practical, cost effective and sustainable option for repairing deteriorated airfield pavement in the empty quarter desert of Saudi Arabia [J]. Open Journal of Civil Engineering, 2021, 11(2): 216-234.
- [6] 李建法.高速公路水泥混凝土路面改造工程共振机械碎石化施工技术与应用[J].公路,2011,56(7):53-58.
LI Jianfa. Construction technology and application of resonant mechanical crushing in expressway cement concrete pavement reconstruction project [J]. Highway, 2011, 56(7): 53-58.
- [7] 刘荣,刘效尧,黄晓明,等.旧混凝土路面冲击破碎动力响应和安全振速标准[J].公路交通科技,2005,22(12): 23-26.
LIU Ying, LIU Xiaoyao, HUANG Xiaoming, et al. Old PCC pavement impacting break dynamic resonance and safety vibration velocity standard [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 23-26.
- [8] 胡昌斌,阙云.冲击碾压改建旧水泥混凝土路面施工时的地基振动特性[J].振动与冲击,2010,29(11): 124-130.
HU Changbin, QUE Yun. Subgrade vibration characteristics during PCC pavement rehabilitation with impact roller [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11): 124-130.
- [9] 阎宗岭,高艳龙,冯学钢.水泥混凝土路面MHB法碎石化环境影响分析与评价[J].公路交通科技,2008,25(8):47-51.
YAN Zongling, GAO Yanlong, FENG Xuegang. Analysis of influence of cement pavement rubblizing by MHB on ambient environment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 47-51.
- [10] 李萍,念腾飞,张雅莉,等.MHB碎石化动力响应及其对邻近建筑和居民的振动影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):89-99.
LI Ping, NIAN Tengfei, ZHANG Yali, et al. Dynamic responses and influence on the vibration of the adjacent buildings and residents of MHB rubblization [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 89-99.
- [11] 李萍,张雅莉,念腾飞,等.碎石化施工对邻近地下管道的振动影响[J].兰州理工大学学报,2016,42(4): 134-138.
LI Ping, ZHANG Yali, NIAN Tengfei, et al. Influence of rock-crushing during pavement construction on vibration of adjacent buried pipelines [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(4): 134-138.
- [12] 李吉祥,范晨光,李彦达.共振碎石机振动机理及参数研究[J].公路交通科技,2020,37(11): 15-21.
LI Jixiang, FAN Chenguang, LI Yanda. Study on vibration mechanism and parameters of resonance stone crusher [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(11): 15-21.
- [13] 李盛,马永波,刘朝晖,等.共振碎石化控制参数和结构模量研究[J].内蒙古公路与运输,2019(1): 1-4.
LI Sheng, MA Yongbo, LIU Zhaohui, et al. Study on control parameters and structural modulus of resonance crushing [J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2019(1): 1-4.
- [14] 李豪,张中云,周启兆,等.旧水泥混凝土路面碎石化技术对周围环境影响的研究[J].公路,2011,56(11): 180-185.
LI Hao, ZHANG Zhongyun, ZHOU Qizhao, et al. Study on the influence of crushing technology of old cement concrete pavement on surrounding environment [J]. Highway, 2011, 56(11): 180-185.
- [15] ZHAO Y, FENG S J, PENG M Z, et al. In-situ experimental analysis of acceleration response of mountain tunnel lining to rubblization-induced vibrations [C]// Proceedings of GeoShanghai 2018 international conference: Tunnelling and underground construction. Singapore: Springer Nature Singapore, 2018: 319-328.
- [16] 杨峻峰.旧水泥混凝土路面板固有频率测试及共振碎石化技术应用[D].长沙:长沙理工大学,2020.
YANG Junfeng. Research on natural frequency test and application of resonance rubblization technology for existing cement concrete pavement slab [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)