

MHB 碎石化动力响应 及其对邻近建筑和居民的振动影响*

李萍^{1†}, 念腾飞¹, 张雅莉¹, 毛昱¹, 乔雄^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: MHB 碎石化技术广泛应用于改建工程中旧水泥混凝土路面破碎, 但冲击破碎过程中对邻近建筑和居民的振动影响问题亟待解决. 基于弹性理论和波动理论对冲击荷载下路面板的物理参数衰减规律进行推导分析; 依托山东 S245 省道旧水泥混凝土路面改建工程现场振动监测试验, 并结合 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元数值模拟对不同影响因素下路面板的三向动力响应进行研究, 探寻碎石化邻近建筑物水平安全距离和影响居民舒适度的临界距离. 结果表明: MHB 碎石化施工振动属于冲击型振源, 振动以负幂指数形式衰减, 且计算、实测和数值模拟结果曲线衰减趋势一致; 随着冲程的增大, 碎石化动力荷载峰值出现时间不断提前; 振动速度峰值 1 cm/s 可作为判断邻近建筑安全与否的控制指标; 当重锤下落高度分别为 0.8 m、1.0 m、1.2 m 时, 临近建筑物水平安全距离分别为 14 m、18 m、20 m, 影响居民舒适度的临界距离分别为 24 m、29 m、和 31 m.

关键词: 旧水泥混凝土路面; MHB 碎石化; 动力响应; 振动监测; 安全评价

中图分类号: U418.8; TU312

文献标志码: A

Dynamic Responses and Influence on the Vibration of the Adjacent Buildings and Residents of MHB Rubblization

LI Ping^{1†}, NIAN Tengfei¹, ZHANG Yali¹, MAO Yu¹, QIAO Xiong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: MHB rubblization technology is widely used in the reconstruction of the old cement concrete pavement (PCC) crushing, however, the impact of vibration on the adjacent buildings and residents during the impact crushing process needs to be urgently resolved. The attenuation law of physical parameters of the pavement panel under impact load were deduced and analyzed based on elastic theory and wave theory. Relying on the field vibration monitoring test on the old PCC pavement reconstruction project of Shandong provincial highway S245, and combing with ANSYS/LS-DYNA dynamic finite element numerical simulation, the three-dimensional dynamic response under different influence factors was studied. Then, the level safety distance of rubblization adjacent buildings and the comfortability critical distance of the resi-

* 收稿日期: 2016-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51668041, 51108222), National Natural Science Foundation of China (51668041, 51108222); 甘肃省科技支撑项目(1504GKCA031), Science and Technology Support Program of Gansu Province(1504GKCA031)

作者简介: 李萍(1972-), 女, 江苏靖江人, 兰州理工大学教授, 博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: lzlgliping@126.com

dents were explored. The results show that MHB rubbleization belongs to impact type vibration source, whose vibration is a negative exponential curve in the form of a sharp attenuation, and the results of calculation, measurement and numerical simulation are in agreement with the attenuation trend of the curve. With increasing stroke the peak time load continuously advances. The peak vibration velocity of 1cm/s can be used as a control index for judging the safety of adjacent building. When the hammer drop height is 0.8 m, 1.0 m, 1.2 m respectively, the level safety distance of adjacent building is 14 m, 18 m, 20 m respectively, and the comfortability critical distance of inhabitants is 24 m, 29 m, 31 m respectively.

Key words: old PCC; MHB rubbleization; dynamic response; vibration monitoring; security evaluation

多锤头碎石化(Multiple-Head Breaker, MHB)技术因能有效防止反射裂缝、节约资源、降低路面修复成本等优点,近年来被广泛应用于旧水泥混凝土路面改建工程中^[1-3]。目前,我国已在部分地区引进了MHB碎石化设备和破碎技术。由于碎石化破碎机械冲击能量大,施工过程中巨大的冲击波会对沿线建筑物产生振动影响甚至破坏作用,特别是在人口密集区或是毗邻建筑物的特殊场地施工,振动会对建筑物的安全和人体的舒适度产生影响。如何判定碎石化施工的影响范围和程度,避免对周边环境的不利影响,是安全顺利地使用这项技术的难点^[4-5]。

国内外许多学者就这一问题进行了研究,Go-palakrishnan等^[6-7]认为碎石化现有损坏的混凝土公路是一个绿色、经济、可持续重建的选择,并通过现场无损和破坏性试验证明碎石化的PCC层具有较高的强度;徐柱杰等^[8]依托上海金山路试验段,对碎石化混凝土路面进行模拟和试验,表明碎石化混凝土路面的模量可根据当前的PCC设计规范进行计算;Huang等^[9]基于断裂力学理论,采用八节点等参单元分析了碎石化与非碎石化基层沥青路面应力强度因子差异性,表明碎石化基层沥青路面力学性能要优于非碎石化基层沥青路面。从文献^[6-9]可看出对碎石化的研究大多局限于理论或数值模拟计算,而将现场测试与理论分析、数值模拟结合起来对碎石化影响开展研究的不多。胡昌斌等^[10]、刘荣等^[11]、何陈^[12]通过对旧水泥混凝土路面冲击破碎的动力响应特性的分析,提出路面和其他结构物的安全振动速度和相应确保安全的处理措施和界定标准;闫宗岭等^[13]、Ceylan等^[14]、杨明辉等^[15]通过试验建立了填方路基和挖方边坡的加速度与振中距的函数关系式,确定了碎石化振动对建筑物影响的范围和最小安全距离;卢辉等^[16]就多锤头与共振设备产生的噪音对周围环境影响进行对比分析,给出了

振动衰减规律。上述研究只是根据我国GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、GB 6722—2014《爆破安全规程》等已有的标准,对某一实测或是模拟数据进行分析,以此来给出碎石化振动对周围构筑物的影响范围,并没有考虑机械本身的特征,如行进速度、冲击频率、重锤下落高度等,且很少有文献针对碎石化施工对人体舒适度的影响进行探讨。Filliben等^[17]指出影响人体舒适度的主要因素是振动加速度响应,并对人体不舒适与引起这种不舒适的加速度之间的对应关系进行了研究,但没有给出影响居民舒适度的临界距离。

本文综合考虑机械本身的特征,包括行进速度、冲击频率、重锤下落高度等,将现场测试与理论分析、数值模拟结合起来研究MHB碎石化对邻近建筑和居民的振动影响,探寻MHB碎石化邻近建筑物水平安全距离和影响居民舒适度的临界距离。基于修正弹性理论推导冲击荷载下路面板的最大位移和冲击荷载峰值,基于波动理论对冲击荷载作用下路面结构动力响应和质点振动衰减规律进行分析;依托山东S245省道旧水泥混凝土路面改建工程,通过理论计算、现场振动监测试验和ANSYS/LS-DYNA动力有限元数值模拟,研究不同重锤冲程、不同冲击荷载作用位置等影响因素下路面板的动力响应,以期得到可用于分析MHB碎石化施工重锤作用下动力响应问题的计算模型;结合地表质点振动速度峰值的计算值与实测值,确定碎石化振动对周围构筑物的安全影响区域及其对邻近建筑物及居民的振动影响,从而指导MHB碎石化施工。

1 碎石化施工振动理论模型

1.1 落锤冲击力的估算

本文以MHB-400型多锤头破碎机为研究对象,该机技术标准锤击宽度为20.3 cm、翼锤锤击

宽度为 30.5~38.1 cm, 重锤最大下落高度为 1.52 m, 共 8 对 16 个重锤。当重锤与路面接触时, 对路面施加一个冲击力, 冲击力引起锤下介质质点振动, 一点振动带动邻近质点振动, 各质点按相邻顺序依次卷入振动, 从而形成冲击波。其过程可归纳为一个能量转换的过程: 重锤下落、重锤夯击水泥混凝土面板、冲击波传播。重锤自由落体将势能转化为动能, 与路面结构接触后, 将动能的绝大部分转化为路面结构各质点的动能和势能。重锤按照相互间隔的方式冲击地面, 各重锤之间叠加作用效果不是特别显著^[18-19], 在重锤作用力进行简化时可只考虑一对重锤作用, 然后通过对其采用放大系数法进行修正。

1.2 理论简化模型

重锤撞击地表是一个较复杂的力学过程, 为简化分析, 单次重锤作用计算模型的假定及材料参数的选取如下:

- 1) 重锤在下落过程中不计能量损耗;
- 2) 重锤为刚体, 与水泥混凝土面板碰撞中不发生形变;
- 3) 撞击过程中落锤与地表不分离, 且不考虑落锤与地表之间的摩擦作用;
- 4) 仅考虑第一脉冲作用;
- 5) 旧水泥混凝土路面板和地基及土基为均匀、连续、各向同性的线弹性体;
- 6) 各层层间竖向、水平向位移均连续;
- 7) 地基底面各项位移为 0, 侧面水平方向位移为 0;
- 8) 不计路面结构自重。

材料参数: 模型中水泥混凝土板尺寸、弹性模量、泊松比, 按依托工程各指标参数选取; 为反映半空间地基的特性, 地基采用扩大尺寸, 各材料参数指标亦按依托工程各指标参数选取。

将碎石化碰撞过程按如图 1 所示模型简化。

根据牛顿运动定律可列出重锤的运动方程^[18]:

$$m \frac{ds^2}{dt^2} = -F \quad (1)$$

式中: F 为重锤与面板接触时产生的冲击力; m 为重锤质量; s 为面板位移; t 为重锤与面板接触起算的时间。

采用修正的弹性理论及文献[20]可知力 F 与路面板位移 s 的关系为:

$$F = 1.05\lambda_0 \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{m}{\rho_0}\right)^{1/6} s^{3/2} \quad (2)$$

式中: λ_0 为冲击力修正系数, 根据相关文献资料分析及路面材料特性和重锤的叠加效应, 本模型中 λ_0 的取值建议为 1.3; E 、 μ 分别为水泥面板弹性模量和泊松比; ρ_0 为重锤密度。

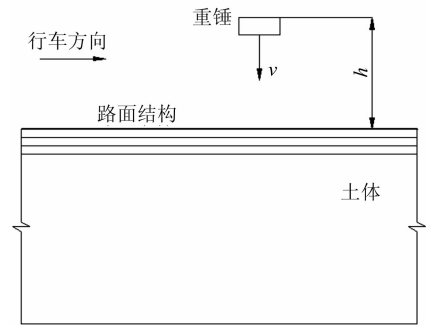


图 1 碎石化冲击路面板模型

Fig. 1 Model of pavement slab under rubblization impact load

记重锤的下落高度为 h , 不考虑撞击过程中能量损失, 即重锤的重力势能完全转化为路面板的动能, 将式(2)代入式(1), 并引入初始条件:

$$s|_{t=0} = 0, \frac{ds}{dt}|_{t=0} = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

可得面板的最大位移 s_0 和作用时间 t_0 、冲击荷载峰值 F_0 分别为:

$$\begin{cases} s_0 = 1.296 \left[\frac{1-\mu^2}{E} (m^5 \rho_0)^{1/6} gh \right]^{2/5} \\ t_0 = 2.691 (2gh)^{-0.5} s_0 \\ F_0 = 1.584 \left(\frac{E}{1-\mu^2} \right)^{2/5} m^{2/3} \rho_0^{-1/15} (gh)^{3/5} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 、 μ 分别为水泥面板的弹性模量和泊松比; ρ_0 为重锤密度; h 为重锤下落高度。

通过分析发现, 力 F 可用三角形荷载近似, 如图 2 所示, 其表达式为:

$$F = \begin{cases} 2F_0 \frac{t}{t_0}, & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2} \\ 2F_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right), & \frac{t_0}{2} < t \leq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

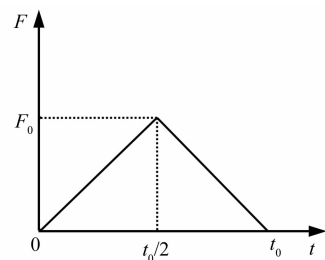


图 2 力 F 图形

Fig. 2 Force F graphics

1.3 冲击荷载作用下路面结构振动分析

MHB 破碎机夯击旧路面板时,路面结构层将随着夯锤重复作用产生振动,研究采用单自由度体系有阻尼的受迫振动为路面结构分析模型,将 MHB 机械对路面施加的冲击荷载 $F(t)$ 用复数形式表示,即

$$F(t) = F_0 \exp(i\omega t) \quad (6)$$

式中: F_0 为冲击荷载峰值; ω 为圆频率; t 为时间.

根据牛顿第二运动定律可以得出路面结构受迫振动的微分方程^[20]:

$$M\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_0 \exp(i\omega t) \quad (7)$$

式中: M 、 c 、 k 分别为路面结构的质量、黏滞阻尼系数和弹性系数.

引入待定系数 Z , 假设式(7) 非齐次微分方程特解为 $z_p(t)$.

$$z_p(t) = Z \exp(i\omega t) \quad (8)$$

若记

$$\psi = \sqrt{(k - M\omega^2)^2 + c^2\omega^2} \quad (9)$$

由于阻尼的存在,路面结构振动位移滞后于激振力,滞后相位角记为 φ , 则联立式(7)(8)(9) 可得:

$$Z = \frac{F_0}{\psi} \exp(-i\varphi) \quad (10)$$

式中: $\varphi = \arctan \frac{c\omega}{k - M\omega^2}$, 从而可以得到

$$z_p(t) = \frac{F_0}{\psi} \exp[i(\omega t - \varphi)] \quad (11)$$

由此可得出路面结构振动的振幅 A , 即

$$A = \frac{F_0}{\psi} \quad (12)$$

将式(11) 对时间取微分, 则得振动速度和加速度分别为:

$$\dot{z}_p(t) = i\omega \frac{F_0}{\psi} \exp[i(\omega t - \varphi)] = i\omega z_p(t) \quad (13)$$

$$\ddot{z}_p(t) = (i\omega)^2 \frac{F_0}{\psi} \exp[i(\omega t - \varphi)] = -\omega^2 z_p(t)$$

若定义 $\Gamma = Z/\delta_{st}$ 为振幅放大系数(或振幅比), 其中 $\delta_{st} = F_0/k$, 则有

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (14)$$

式中: 频率比 $r = \omega/\omega_n$, 无阻尼固有频率 $\omega_n = \sqrt{k/M}$; 阻尼比 $\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2M\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{Mk}}$, c_c 为临界

阻尼比. 相应的滞后相位角 φ 可以表示为:

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta r}{1 - r^2} \quad (15)$$

1.4 质点振动衰减规律

1) 振幅衰减规律^[21]: 振源下地面质点振动衰减主要从振幅、波速以及加速度方面进行评价, 振幅衰减规律为:

$$\begin{cases} A_r = A_0 \left[\frac{r_0}{r} \xi + \sqrt{\frac{r_0}{r}} (1 - \xi) \right] \exp[-\alpha f(r - r_0)] \\ \alpha = \frac{1}{f(r_0 - r)} \ln \left[\frac{A_r}{A_0} \cdot \frac{1}{\frac{r_0}{r} \xi + \sqrt{\frac{r_0}{r}} (1 - \xi)} \right] \end{cases} \quad (16)$$

式中: r 为距振动面源中心的距离, m; A_r 为距振动面源中心 r 处, 地基土表面的振幅, m; A_0 为面源振幅, m; f 为振源频率, Hz; ξ 为与振源面积有关的几何衰减系数, 无量纲; r_0 为振源基础的当量半径, $r_0 = \sqrt{S/\pi}$, S 为振源基础底面积; α 为土的能量吸收系数.

2) 波速衰减规律: 若以振动速度大小衡量振动波随距离衰减, 则可采用经验公式(17) 确定, 即

$$v = u(r/W)^{-n} \quad (17)$$

式中: v 为质点峰值振动速度; r 为离振源距离; W 为振源能量; u 为单位距离的速度值; n 为常数, 介于 1 ~ 2 之间.

若已知夯锤冲程大小, Mayne 建议采用式(18) 来计算振源距离 r 处质点的峰值速度, 即

$$v = 0.2(2gh)^{1/2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-1.7} \quad (18)$$

式中: g 为重力加速度; h 为落锤的高度; r/r_0 为经夯锤半径归一化后的距离.

3) 加速度衰减规律: 由振动加速度幅值来衡量振动波的衰减, 则距振源 r 处的振动加速度值可近似表示为:

$$a_r = a_0 \exp(-\beta r) \quad (19)$$

式中: a_0 为加速度峰值; β 为土的几何衰减系数. 变换式(19) 可得

$$r = \frac{1}{\beta} \ln \frac{a_0}{a_r} \quad (20)$$

根据振动波的划分界限, 即 $a > g$ 为强震区, $0.3g < a < g$ 为次震区, $0.04g < a < 0.3g$ 为波动区, 则根据式(20) 可估算振动波的影响范围, 土的几何衰减系数 β 的取值见表 1^[22].

由此即可得到距振源不同位置质点振动情况,

进而估算施工安全距离.

表 1 几何衰减系数 β

Tab. 1 Geometric attenuation factor

土类	振动基础半径或当量半径 r_0/m							
	≤ 0.5	1	2	3	4	5	6	≥ 7
一般黏性土或砂土	0.85~0.99	0.7	0.6	0.55	0.45	0.40	0.35	0.15~0.25
饱和软土	0.85~0.99	0.65~0.70	0.50~0.55	0.45~0.50	0.35~0.40	0.30~0.35	0.25~0.30	0.10~0.20
岩石	0.90~0.99	0.85~0.90	0.80~0.85	0.75~0.80	0.70~0.75	0.65~0.70	0.60~0.65	0.40~0.50

2 算例分析

2.1 依托工程概况

山东省 S245 省道改建工程店韩线山亭区店子至格上段,全长 23.068 km,路基宽度为 11.5 m,路面宽 10 m,设计时速为 60 km/h,设计荷载等级为公路 II 级.该公路开裂与断板现象严重,多处板角出现脱空现象,采用 400 cm 宽的 MHB 机械对水泥混凝土路面板进行破碎处理,破碎机冲击频率为 30~35 次/min,行进速度为 0.022 6 m/s.重锤分别从

0.8 m、1.0 m 和 1.2 m 处冲击水泥路面板.主要参数如下:水泥面板尺寸为 5 m×4 m×0.25 m,重度为 24 kN/m³,弹性模量 E 为 30 GPa,泊松比 μ 为 0.15,弹性系数 k 为 30 000 kN/m,重锤密度 ρ_0 为 7 850 kg/m³.

2.2 理论计算分析

根据式(4)计算得到了重锤冲击路面不同下落高度下面板的最大位移、重锤与面板的作用时间以及冲击荷载峰值;根据式(12)和(13)可计算出不同下落高度下面板的振幅、速度和加速度.计算结果见表 2.

表 2 重锤冲击路面计算结果

Tab. 2 Theoretical calculation results with pavement slab underweight drop for impact loads

下落高度 h/m	最大位移 s_0/cm	作用时间 t_0/s	冲击荷载峰值 F_0/kN	峰值荷载对应的时间 t_1/s	振幅 A/mm	速度 $v/(cm \cdot s^{-1})$	加速度 a/g
0.8	3.80	0.002 58	5 763.48	0.001 29	2.23	24.880	2.773
1.0	4.15	0.002 53	6 589.17	0.001 27	2.55	28.445	3.171
1.2	4.47	0.002 48	7 350.88	0.001 24	2.85	31.733	3.537

从表 2 可看出,冲程从 0.8 m 增大到 1.2 m,冲击荷载峰值增大了 27.54%,峰值荷载对应时间延迟了 0.000 05 s,最大位移增大了 17.63%,振幅、速度、加速度分别增加了 27.80%、27.54%、27.55%,可见随冲程的增大,最大冲击荷载、路面最大位移、振幅、速度、加速度均不断增大,且峰值荷载出现时间不断提前.

3 现场振动监测试验

3.1 测试方案及测点布置

在依托工程桩号 K14+000~K15+500 段布设测点,进行碎石化振动分析.振动测振仪采用中国科学院成都中科测控公司生产的 TC-4850 爆破测振仪.试验过程中测点位置由近及远沿直线排列,监测

时在距振源不同位置的地面上布置传感器,采用测振仪记录地表处速度时程曲线,通过分析曲线得到路面破碎振动的衰减规律.

本次测试 MHB 破碎机均沿路面边缘破碎作业,共进行 3 种不同方案的地表振动监测,每种方案有 3 组平行试验,现场振动测试如图 3 所示.方案 1 中破碎机重锤冲程 h 为 0.8 m,监测断面编号为 1#~3#;方案 2 中冲程 h 为 1.0 m,对应的断面编号为 4#~6#;方案 3 中对应的冲程 h 为 1.2 m,监测断面编号为 7#~9#.各断面沿行车方向间距均为 2.5 m,土质条件一致.1#~3# 断面测点布置一致,如图 4 所示;4#~9# 测点布置一致,如图 5 所示.试验中三相速度传感器的布置方向是指向振源的方向为 x 轴,平行于道路的方向为 y 轴,竖向为 z 轴.



图3 地表振动测点布置图

Fig. 3 Surface vibration measurements layout

3.2 监测结果分析

以8#断面测点1和测点5速度时程曲线(如图

6所示)为例进行分析.从图6可看出,冲击和响应具有瞬态振动的特点,重锤单次冲击振速幅值高,衰减迅速,但冲击间隔小,对路面板的锤击次数多,振动累积效应严重;同一测点的 x 轴、 y 轴和 z 轴振动是有差别的,且距离振源越近差别越大,在振源附近 x 轴和 y 轴方向的波速值比较接近且小于 z 轴的波速,随着距离的增大振动不断衰减,三者之间差别逐渐缩小;测点1在3个方向上第一次出现振速峰值的时间分别为0.139 s、0.148 s和0.122 s,而测点5对应时间分别为0.274 s、0.279 s和0.263 s,相比于测点1的时间有一定的延迟;测点5三个方向振速峰值分别为测点1处的6.12%、5.01%、3.50%,这是振动波在土体中传播和衰减的结果.

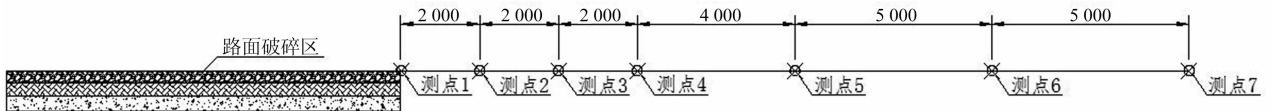


图4 1#~3#断面测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Vibration measurements layout for sections 1 to 3

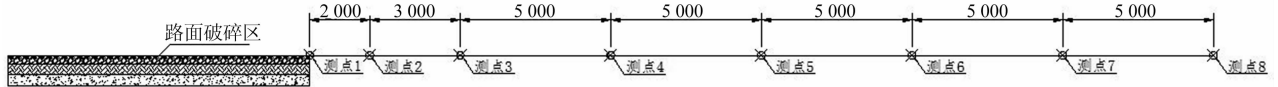
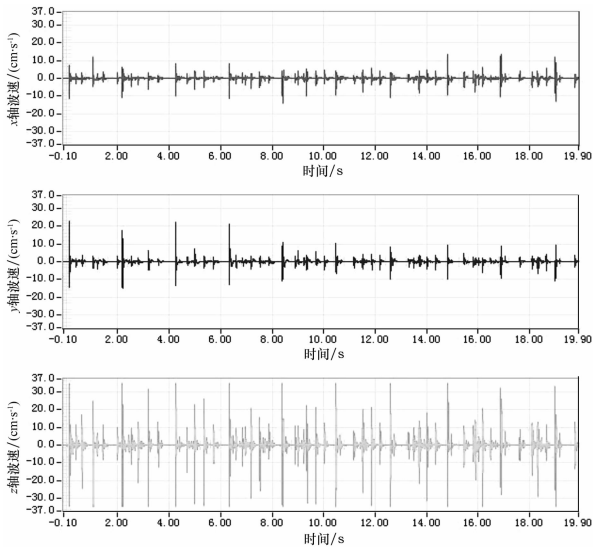
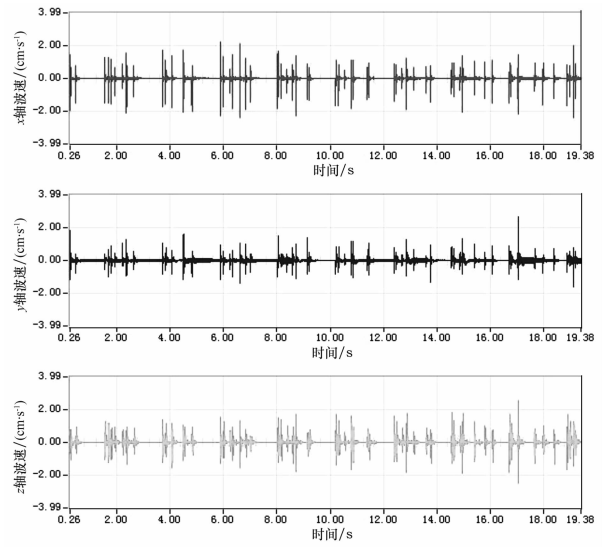


图5 4#~9#断面测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 5 Vibration measurements layout for sections 4 to 9



(a)8#断面测点1 振动速度时程曲线



(b)8#断面测点5 振动速度时程曲线

图6 监测断面测点振动速度时程曲线

Fig. 6 Vibration velocity time-history curves for measuring point of monitor section

取各方案下测点的平均振动速度峰值来研究振动波的衰减规律,以振中距为横坐标,平均振速峰值

为纵坐标,绘制地表质点振动速度随距离变化关系曲线,如图7所示.

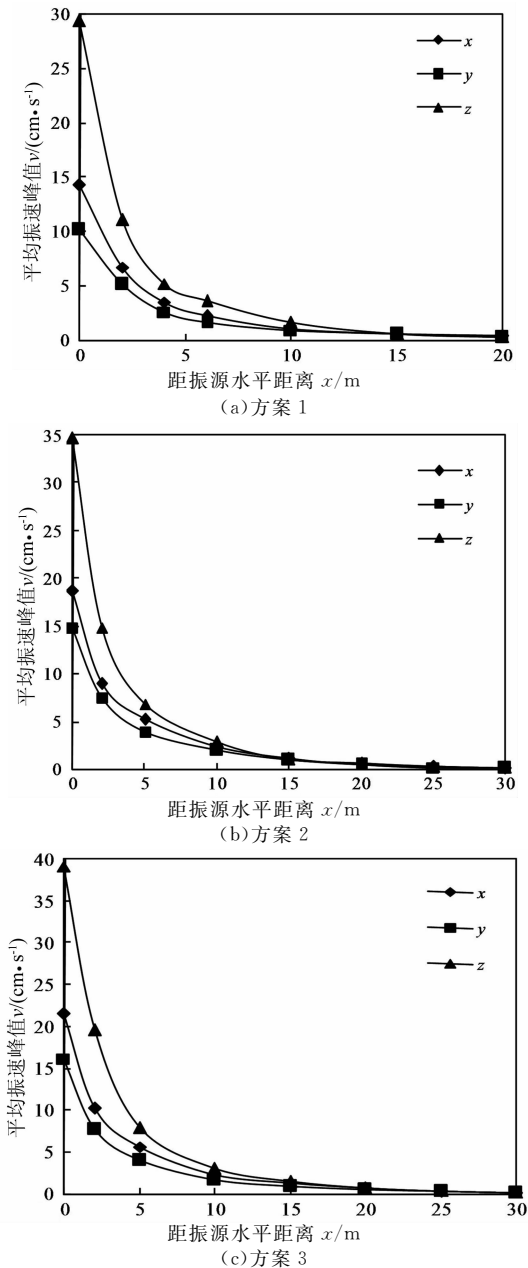


图 7 地表振动速度与水平距离的关系曲线图
Fig. 7 Graphs of vibration velocity vs. horizontal distance

由图 7 可看出, 1) 碎石化施工振动在 3 种方案下的衰减趋势一致, 呈负幂指数曲线形式急剧衰减, 在 5 m 以内衰减速度很快, 5~15 m 内振动衰减趋势变缓, 15 m 以外振动衰减幅值变化不大, 这是由于振动波的能量会因几何扩散而分散到空间中, 振动波传得越远其单位体积内的能量越少, 故距振源距离越近的地方振动越大; 2) 比较同一测点 3 个方向的振速峰值大小发现, z 向振速峰值在振源附近明显大于其他方向, 可以说此时振动是以竖向振动为主, 但在距离振源 10 m 以后 3 个方向振速峰值逐渐接近, 故竖向振动速度可以作为衡量振动作用下

邻近结构物安全与否的指标之一。

在研究振动问题时, 质点的加速度也是不可忽略的一部分, 根据现场测试的速度峰值和主频大小, 按公式 $a_0 = 2\pi f v$ 即可推导出加速度的峰值 a_0 , 其加速度的衰减符合式 (19). 这里仅列出不同冲程下 z 向加速度峰值随水平距离变化关系如图 8 所示, 可以看出加速度随距离变化趋势与速度一致。

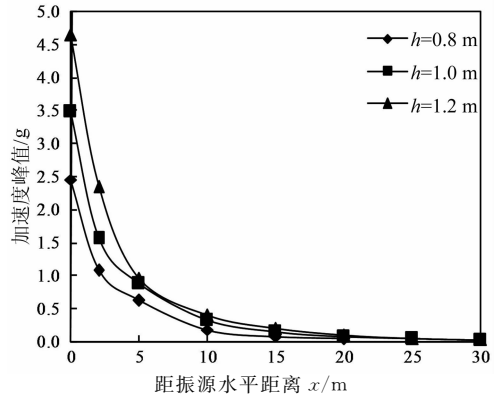


图 8 不同冲程下加速度峰值变化曲线
Fig. 8 Peak changes curve of acceleration under different strokes

4 碎石化施工振动影响的数值模拟

4.1 计算模型与参数

路面结构模型由旧水泥路面面层、基层和路基组成. 在有限元分析中, 结合上述山东省省道路面修筑工程, 计算模型的假定及材料参数的选取如下:

1) 假设各结构层为均质、连续、各向同性的线弹性材料, 各结构层之间为面面接触, 只按单块路面板作受力分析.

2) 路面板四周为自由边界; 基层和土基四周水平方向约束, 土基底部竖直方向约束.

3) 模型尺寸: 路面板长、宽、厚分别为 5 m×4 m×0.25 m. 为反映半空间地基的特性及冲击波在其中的传播衰减规律, 地基采用扩大尺寸, 基层长、宽、厚取 50 m×50 m×0.2 m, 土基长、宽、深分别为 50 m×50 m×15 m.

4) 重锤及路面结构参数见表 3.

表 3 材料参数
Tab. 3 Materials parameters

材料类型	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)	摩擦角 / (°)	屈服应力 /MPa
重锤	2 100 000	0.30	7 850	—	—
面层	30 000	0.15	2 500	35.5	3.40
基层	1 250	0.25	2 300	40	1.25
土基	25	0.35	1 750	35	0.85

4.2 冲击振源模拟及工况说明

研究通过改变重锤与路面板接触时的初速度,来模拟重锤在不同冲程下的冲击力.根据式(21)得到速度 v 与冲程 h 之间的关系为:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (21)$$

式中: m 为重锤质量; g 为重力加速度; h 为冲程; v 为速度.

根据式(21),重锤一路面板接触初速度 v 与各冲程 h 之间对应关系见表4.

表4 重锤一路面板接触初速度与冲程之间的对应关系
Tab.4 Initial velocity vs. stroke when impact of weight drop contacting pavement slab

冲程 h/m	冲锤一路面板接触初速度 $v/(m \cdot s^{-1})$
0.8	3.96
1.0	4.43
1.2	4.85

根据碎石化施工沿道路纵向中线及板边2种行驶路线拟定4种典型的冲压位置.工况1为冲击荷载作用于路面板中央,工况2为冲击荷载作用于路面板纵向边缘中部,工况3为冲击荷载作用于路面板横向边缘中部,工况4为冲击荷载作用于板角.建立不同工况下的有限元模型,模拟MHB破碎机对旧水泥混凝土路面冲击时路面结构的动力响应.计算模型有限元网格划分如图9所示.

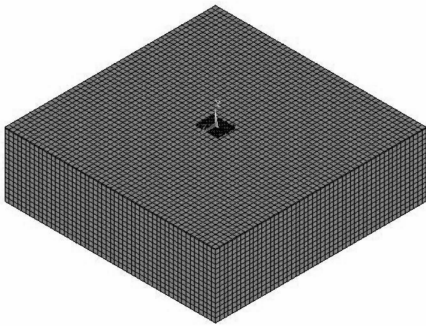


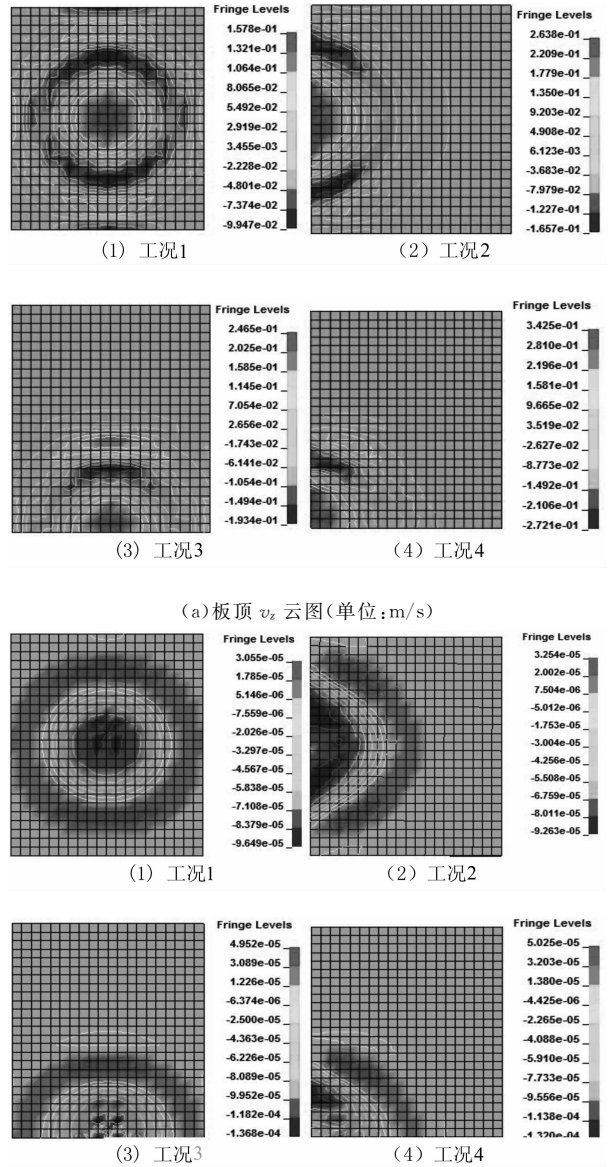
图9 有限元模型网格划分图示

Fig.9 Mesh for pavement structure model

4.3 路面结构动力响应分析

以冲程为1.2m时4种工况下路面结构力学动力有限元数值模拟结果为例分析冲击荷载作用在路面板不同位置时路面受力变形特征.

重锤以4.85m/s初速度冲击路面板时,振动能量以接触点为中心向四周传播.以0.0125s时刻4种工况下路面板板顶的振速和位移云图为例进行分析,如图10所示.取路面板横向为 x 轴,纵向为 y 轴,垂直路面板方向为 z 轴.



(b)板顶 U_z 云图(单位:m)

图10 路面板动力响应云图

Fig.10 Dynamic responses contours for pavement slab

从图10(a)可以看出在重锤与路面板作用瞬间,4种工况下均在重锤冲击位置处 v_z 最大,振动波以冲击点为中心向四周散开,能量随距离增大不断减小;4种工况下冲击点的 v_z 分别为15.78 cm/s、26.38 cm/s、24.68 cm/s、34.25 cm/s,可见同一冲程下重锤作用于板角位置时冲击作用最为显著,其次为板纵向边缘中部,工况1的振速峰值仅为工况4时的0.46倍,可见重锤作用于板中心位置时对路面板的振动作用最小,这说明当荷载作用于板角位置时,路面板最容易破碎.

从图10(b)可以看出,接触点处位移下沉量最大,在距振源一定距离位移出现正值,这说明随着时间的变化,4种工况路面板均自重锤作用位置向四

周产生翘起变形,路面板存在纵横弯曲现象,且沿纵向更为明显;数值计算结果显示,冲击荷载作用下,路面板在3个方向均有不同程度的弯曲,但是在水平方向(x 、 y 方向)位移值一般很小,路面板以竖直方向位移 U_z 为主。

4.4 路面板易碎标准

由4.3节分析可知,重锤冲击位置(后称A点)是路面板受振动影响最大的部位,通过对路面振动的全时程全位置分析发现,当冲击位置为板角、冲程为1.2 m,在0.000 25 s时,路面板的竖向应力和速度最大,最大应力值可作为路面板的破碎标准。4种工况下该位置的应力和振速时程曲线如图11所示。

从板角进行破碎,逐步向板中推进。

5 振动影响分析与评价

5.1 质点振动实测值、数值模拟与计算值对比分析

为了分析各种工况下质点振动速度的计算值与实测值的差异,以测点距振源距离为横坐标, z 向振动速度为纵坐标,分别绘制振速随水平振距变化曲线,如图12所示。从图12可得以下结论:

1)同一冲程下计算得到的振速峰值在振源附近的值较小,而实测得到的值较大,这是由于在计算过程中仅考虑了一对重锤作用于路面板的情况,而实际振动是由多组重锤互相间隔冲击路面板所引起的,对路面板的冲击荷载有累加效应。

2)计算、实测和数值模拟的曲线得出的振速峰值有一定的差别,但振动衰减趋势基本一致,呈负幂指数形式衰减,且在5 m以内衰减迅速。但实测曲线的衰减速率大于计算曲线,原因是土基并非理想的弹性介质,并且在理论计算中和模型建立中忽略了断板和脱空的影响,且实际振动波在传播的过程中存在各种能量损失。

3)冲程为1.0 m时振源处质点振动速度的现场测试、理论计算和数值模拟结果分别为34.66 cm/s、28.445 cm/s和31.24 cm/s,说明现场实测结果略大于理论计算和数值模拟结果,这是由于计算模型中仅考虑了一对重锤对水泥混凝土路面板的冲击作用,而实际破碎是由多组重锤以间隔形式冲击所致。若以1 cm/s作为邻近建筑的安全振动控制指标,则三者的振动控制距离比较接近。这说明本文所采取的计算模型可以用于分析碎石化施工中重锤作用下的动力响应问题;

4)10 m以后计算得到的结果与实测结果比较接近,说明以振速作为判断邻近结构物安全与否的标准时,用2种方法得到的振动控制点比较吻合,故本文提出的计算方法在实际工程中是可行的。

5.2 振动对邻近建筑的影响

结合地表质点振动速度峰值的计算值与实测值,确定碎石化振动对周围构筑物(一般民用建筑)的安全影响区域以振动速度峰值为1 cm/s、加速度峰值0.1 g作为可接受指标。采用回归分析法拟合不同测试方案下各质点振动速度峰值、加速度峰值,可以得出当冲程分别为0.8 m、1.0 m、1.2 m时,距路边缘分别大于14 m、18 m、20 m时,地面质点加速度峰值小于0.1 g、振动速度峰值在1 cm/s以内。

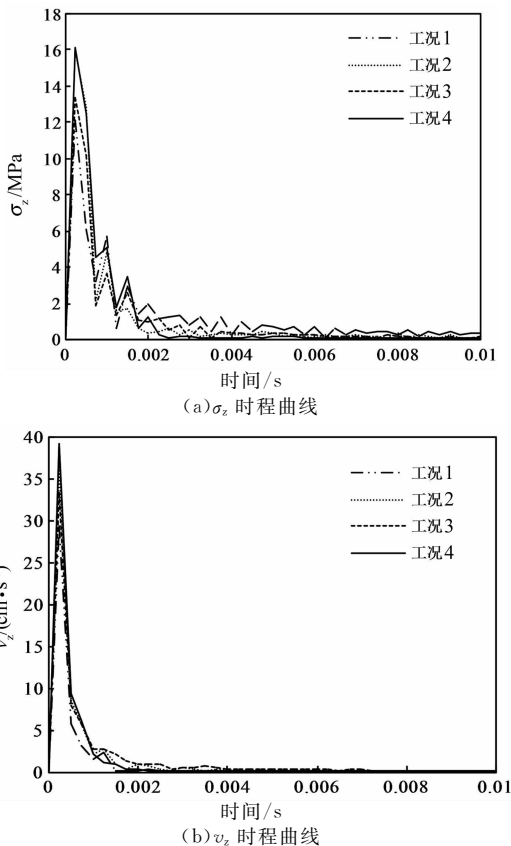


图11 重锤与路面板接触位置(A点)时程曲线

Fig. 11 Time-history curves for point A when weight drop contacting pavement slab

从图11可看出,重锤与路面板接触点竖向应力时程曲线与振动速度变化规律相似,在冲击瞬间均达到最大值,随着时间的增大不断衰减;冲击位置对路面板的破坏程度影响显著,作用点位于板角时的破坏最严重。

综合以上分析可知,重锤锤击位置对路面结构振动影响较大,当重锤作用于路面板中央时冲击范围较大;当作用于板角时,对路面结构的冲击效果最明显,路面板最容易破碎,因此在施工过程中通常先

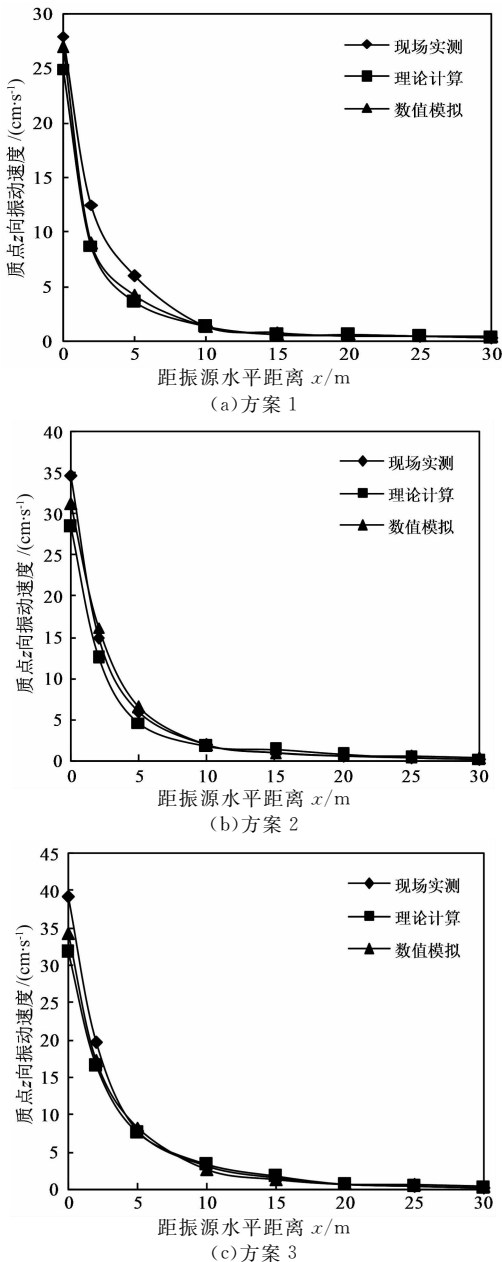


图 12 质点振动计算值、实测值和数值模拟对比曲线
Fig. 12 Comparison of theoretical calculation result, site observation result and numerical simulation result

可以看出随着冲程的增大, 碎石化施工对邻近建筑物影响范围也不断增大, 在上述安全范围以外可认为碎石化影响很小. 在上述范围内的建筑物, 施工过程中应尽可能采取避让、减小锤击频率、降低冲程、设置隔振沟等方法来降低振动影响.

5.3 振动对人体舒适度的影响

根据 Filliben 等人给出的人体感受与振动加速度的对应关系得到的施工振动对人体舒适度影响情况见表 5^[17]. 可知当 $h=0.8$ m 时, 振动在 12 m 以内人体是难以忍受的, 距离小于 24 m 的振动使人体感到不适; $h=1.0$ m 时, 人体难以忍受的振动距

离为 15 m, 在 29 m 以内的振动影响人体舒适度; $h=1.2$ m 时, 人体忍受极限距离为 17 m, 31 m 是影响人体舒适程度的临界距离. 因此在居民区施工要按照不同工况考虑振动对居民舒适度的影响.

表 5 碎石化施工对人体舒适度的影响

Tab. 5 Influence of the body comfort under rubblelization

	临界距离/m				
	>0.15 g	0.05~0.15 g	0.015~0.05 g	0.005~0.015 g	<0.005 g
$h=0.8$ m	<12	12~18	18~24	24~30	>30
$h=1.0$ m	<15	15~22	22~29	29~35	>35
$h=1.2$ m	<17	17~24	24~31	31~37	>37
人体感受	难以忍受	非常不适	不适	可感觉	难以感觉

6 结论和建议

1) 碎石化施工振动属于冲击型振源, 冲击和响应具有瞬态振动的特点, 且振动呈负幂指数曲线形式急剧衰减; 同一测点的 x 轴、 y 轴和 z 轴方向振动是有差别的, 且距离振源越近, 差别越大, 随着离振源距离的增大, 由于振动的衰减, 差别逐渐缩小.

2) 重锤锤击位置对路面结构振动影响较大. 当重锤作用于路面板中央时冲击范围较大; 当作用于板角时对路面结构的冲击效果最明显, 路面板最容易破碎. 因此在施工过程中通常先从板角进行破碎, 逐步向板中推进.

3) 不同重锤下落高度对环境的影响不同, 下落高度越大对地表各质点的振动影响越大; 重锤在不同下落高度下的振动响应衰减规律是相同的, 即在振源附近的衰减很快, 离振源越远衰减越慢. 因此在实际施工过程中可以通过调整重锤的下落高度来控制振动对周边环境的影响.

4) 数值模拟结果与试验数据及计算结果比较吻合, 质点竖向振速峰值随距离衰减趋势一致, 但现场实测结果略大于理论计算和数值模拟结果. 这是由于在受力计算时, 仅考虑了一对重锤作用于路面板的情况, 而实际施工过程中重锤对路面板有荷载的累加效应. 若以 1 cm/s 作为邻近建筑的安全振动控制指标, 则三者的振动控制距离接近.

5) 碎石化施工振动会影响邻近建筑物的安全和居民的舒适度. 当重锤下落高度 h 分别为 0.8 m、1.0 m、1.2 m 时, 临近一般民用建筑物的安全距离分别为 14 m、18 m、20 m, 在距振源 24 m、29 m、31 m 内影响居民的舒适度.

参考文献

- [1] GE Z S, LI H, HAN Z T, *et al.* Properties of cold mix asphalt mixtures with reclaimed granular aggregate from crushed PCC pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77(15):404-408.
- [2] BEMANIAN S, SEBAALY P. Cost-effective rehabilitation of Portland cement concrete pavement in Nevada[J]. *Transportation Research Record*, 1999, 46(1):377-378.
- [3] CHEN C, WILLIAMS R C, MARASINGHE M G, *et al.* Assessment of composite pavement performance by survival analysis[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2015, 141(9):04015018.
- [4] KIM S, GOPALAKRISHNAN K, CEYLAN H. Structural characterization of Iowa's rubblized PCC pavements[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 138(4):406-413.
- [5] YAO J L, WENG Q H. Causes of longitudinal cracks on newly rehabilitated jointed concrete pavements[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2012, 26(1):84-94.
- [6] GOPALAKRISHNAN K, KIM S, CEYLAN H. Non-destructive evaluation of in-place rehabilitated concrete pavements[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, 16(4):552-560.
- [7] GOPALAKRISHNAN K. Knowledge-based evolving connectionist systems for condition evaluation of sustainable roadways: a feasibility study[J]. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*, 2011, 1(2):125-141.
- [8] 徐柱杰, 凌建明, 黄琴龙, 等. 旧水泥混凝土共振碎石化路面模量分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(9):1195-1198.
- XU Z J, LING J M, HUANG Q L, *et al.* Analysis of modulus of rubblized concrete pavement based on resonant technique[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(9):1195-1198. (In Chinese)
- [9] HUANG X M, ZHANG Y H, LI C, *et al.* Stress intensity factor analysis of PCC slab after rubblization by FEA[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2006, 1(1):23-26.
- [10] 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 C B, QUE Y. Subgrade vibration characteristics during PCC pavement rehabilitation with impact roller[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(11):124-130. (In Chinese)
- [11] 刘荣, 黄晓明, 刘效尧. 冲击破碎混凝土路面的三维叠层模型[J]. *交通运输工程学报*, 2005, 5(1):11-13.
- LIU Y, HUANG X M, LIU X Y. 3-D overlay model of broken concrete pavement[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(1):11-13. (In Chinese)
- [12] 何陈. 旧水泥混凝土路面破碎化技术及其振动评价分析[D]. 兰州: 兰州理工大学土木工程学院, 2011:34-40.
- HE C. Old PCC pavement cracking technology and analysis of its vibration [D]. Lanzhou: College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, 2011:34-40. (In Chinese)
- [13] 闫宗岭, 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 Z L, GAO Y L, FENG X G. 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. (In Chinese)
- [14] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, KIM S. Structural evaluation of rubblized concrete pavements in Iowa[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Boca Raton: CRC Press, 2009:869-878.
- [15] 杨明辉, 尧奕, 赵明华. 高填方路堤段桩网复合地基承载机理及桩土应力比计算方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(5):92-98.
- YANG M H, YAO Y, ZHAO M H. Pile-net composite foundation bearing mechanism and the method to calculate the pile-soil stress ratio in high embankment [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(5):92-98. (In Chinese)
- [16] 卢辉, 苏卫国, 张肖宁. 冲击压实旧水泥混凝土路面的现场振动测试[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(11):94-97.
- LU H, SU W G, ZHANG X N. Field measurement of vibration of existing cement concrete pavement with impact compaction [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2005, 33(11):94-97. (In Chinese)
- [17] FILLIBEN J J, SIMIU E. Tall building response parameters: sensitivity study based on orthogonal factorial experiment design technique[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(2):160-164.
- [18] 范喜生, 陆来, 李丽. 落锤撞击作用下地表面振动问题的初步分析[J]. *振动与冲击*, 1996, 15(3):22-27.
- FAN X S, LU L, LI L. Elementary analysis of the vibration of earth surface collided by a free-falling hammer[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1996, 15(3):22-27. (In Chinese)
- [19] KSAIBATI K, MILEY W, ARMAGHANI J. Rubblization of concrete pavements [J]. *Transportation Research Record*, 1999, 5(7):10-13.
- [20] 加林. 弹性理论的接触问题[M]. 王君健, 译. 北京: 科学出版社, 1958:140-151.
- Галин Л А. Contact problem of elastic theory[M]. Translated by WANG J J. Beijing: Science Press, 1958:140-151. (In Chinese)
- [21] GB 50040—1996 动力机器基础设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1996:86-88.
- GB 50040—1996 Dynamic machine foundation design specification[S]. Beijing: China Planning Press, 1996:86-88. (In Chinese)
- [22] 李欣业, 张明路. 机械振动[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2009:148-161.
- LI X Y, ZHANG M L. Mechanical vibration[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009:148-161. (In Chinese)