

声振法检测室外水泥混凝土路面脱空试验

彭永恒,李 想,宋宏伟,稽 严

(大连民族大学土木工程学院,辽宁 大连 116650)

摘要 目的 为了及时处理水泥混凝土路面板脱空,准确和快速地判断脱空位置。
方法 笔者借助拾振器和计算机采集系统,通过对大连市区内的水泥混凝土路面进行现场试验,记录并分析水泥混凝土路面脱空与非脱空区域的加速度特性、振动时间和频谱特征,探索水泥混凝土路面脱空与非脱空区域的机械波的振动规律。
结果 脱空区域路面板最大振幅对应的卓越频率在 100 ~ 130 Hz,非脱空区域路面板最大振幅对应的卓越频率在 200 ~ 260 Hz。
结论 水泥混凝土路面板的脱空性与其振动信号参数有密切的相关性。脱空水泥混凝土路面板比非脱空水泥混凝土路面板的加速度大,振动时间长,主频高。

关键词 道路工程;水泥混凝土路面;声振法;加速度;频谱分析

中图分类号 U46 文献标志码 A

Experiment of Detecting Void in Outdoor Cement Concrete Pavement by Sound Vibration Method

PENG Yongheng, LI Xiang, SONG Hongwei, JI Yan

(School of Civil Engineering, Dalian Minzu University, Dalian, China, 116650)

Abstract: In order to deal with the void of cement concrete road slab, quickly and accurately judge the position of the void. In this paper, the vibration pickup and computer acquisition system were used by the author, through carrying out the field experiment of cement concrete pavement in Dalian, the acceleration characteristic, vibration times and frequency spectrum characteristic of the cement concrete pavement void and no void were recorded and analyzed, the vibration law of mechanical wave of cement concrete pavement void and no void were explored. The results show that the void property of cement concrete pavement and its vibration signal parameters have closely relationship. The acceleration of void cement concrete pavement is larger, the vibration time is longer, the frequency is higher than that of no void cement concrete pavement.

Key words: road engineering; cement concrete pavement; sound vibration method; acceleration; spectrum analysis

水泥混凝土路面具有水稳定性好、抗折性能强,与钢筋结合能适应不良地基等优点,越来越多的国家和地区开始兴建水泥混凝土路面^[1-3].水泥混凝土路面板脱空的出现极大地影响了道路的使用年限和承载能力,同时也对行车安全和行车的流畅性与舒适性有着极大的干扰^[4-7].国内外研究成果表明,由于唧泥所导致的板底脱空大量存在于板角和缝边位置,道路的脱空也可能是由于荷载作用、有害化学反应引起.为了更准确地判定板底状况,及时对脱空区域进行治理,进而延长道路的使用寿命和提高服务质量,许多学者在这方面做出了大量工作,并都存在着较强的应用价值^[8-12].目前脱空区检测常采用以下方法:经验法、落锤弯沉仪检测法和探地雷达检测法^[13-15].经验法的优点是直观、运用方便,但是误差大且较为主观,不适用于轻微脱空的检测,使其应用性大大降低.落锤式弯沉仪检测法,其测速快,自动化程度高,但是这种方法不能快速、准确地找到脱空区域的位置.探地雷达检测法的原理是利用 SIR-10H 型探地雷达向水泥混凝土路面发射电磁波,当电磁波穿过路面时,会在路面各层发生透射和反射,根据反射波的时间差来推断路面厚度,该方法虽能快速找到脱空区域的位置,但是还要借助弯沉仪来确定路板底的脱空状况,这种方法的操作繁琐且耗时、耗材.

针对目前研究存在的问题,笔者运用一种操作简便、快速且经济的声振法对水泥混凝土路面板的脱空进行检测.通过选取大连市内两条水泥混凝土路面,观察确定脱空和非脱空位置,测定水泥混凝土路面板的振动信号参数,分析脱空区域路面板的最大加速度、振动时间和主频,得出水泥混凝土路面板脱空状态和路面板振动特性的规律,为水泥混凝土路面的脱空检测提供试验依据.

1 声振法

当自然界中的物体受到外界的干扰或者

激励的时候,该物体会发生振动,其中声音和振动联系紧密^[16].声音一般由机械振动所引起,物体的声音辐射和其机械振动所引起的空气介质的振动都会具有反映振动物体的信息(可被听到的声音频率约在 16 ~ 20 kHz).声音频率检测的基本原理是利用声波在介质中传播的特性,将结构的振动或者声波运用传感器转换为电流信号,在对电流信号进行测量与分析,并给出结果.声振法原理如图 1 所示.

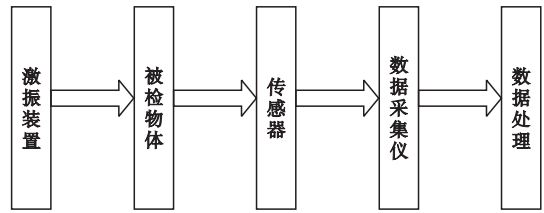


图 1 声振法原理图

Fig. 1 Principle figure of sound vibration method

通过对结构的激励,人们可以根据声音来辨别该处是否有空洞^[17-20].依据有声音必定有振动的原理,声音信号中一定具有关于物体结构的信息,通过对这类信息进行处理,人们可以依据该信息对结构脱空状态进行初步的判断.声振法检测室外水泥混凝土路面板脱空试验就是在路面板上施加一个瞬间的激励,使水泥混凝土路面板发生振动,形成莱姆波,并传到空气中形成声音,通过布置在路面板上的传感器和动态应变分析仪,获得相应的数字信号,并对此信号进行分析,得出水泥混凝土路面板的脱空特性.

2 试验方案设计

2.1 信号采集

试验数据采集装置如图 2 所示.力锤采用刚性材质,加速度传感器采用 941B 型拾振器(见图 3).一般来说,传感器对一定范围内的加速度变化越敏感,输入电压的变化越大,这就比较容易测量到需要的数据,数据的精确度也得到了提高.

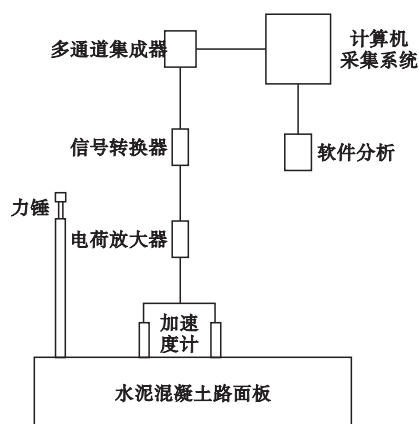


图 2 试验数据采集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental data collection



图 3 拾振器

Fig. 3 Vibration pickup

2.2 路况概况

室外试验现场路段分为两部分,且均为水泥混凝土路面.选取路况如图 4、图 5 所示.

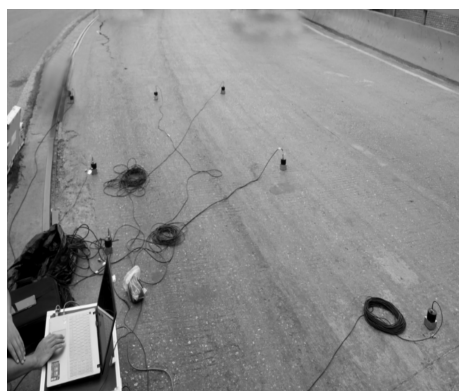


图 4 大连市西岗区某高架桥

Fig. 4 A viaduct of Dalian xigang district



图 5 大连市中山区内某路段

Fig. 5 A road of Dalian zhongshan district

第一段为大连市西岗区某高架桥,由于不能中断交通,因此试验路选择了北行的主车道.第二条路为大连市中山区内某路段.由于这两个路段使用年限均超过 10 a,故路面有很明显的脱空破碎,因此可以直接地观察基层与面层的脱空情况,初步判断这两个路段板底脱空状态.

2.3 试验方法

(1) 确定测点.通过观察和锤子的敲击,初步判断水泥混凝土路面板的脱空与非脱空位置(敲击水泥混凝土路面板后脱空和非脱空位置路面板声音不同).

(2) 仪器连接.将拾振器和江苏东华所生产的 32 通道动态记录仪连接好,其中动态记录仪的通道号与传感器编号对应,然后通过数据线将笔记本电脑和动态记录仪连接.

(3) 拾振器的布置.确定好水泥混凝土路面板测点后,用毛刷将测点处的表面灰尘清理干净,而后用工业橡皮泥将拾振器粘贴到待测点上,在安装拾振器时一定要保证传感器和道路平面相互垂直.

(4) 仪器参数的设置.布置好传感器后,打开笔记本电脑和动态记录仪,并在电脑里设置好拾振器的灵敏度系数,采样频率、量程、单位以及工况名称.

(5) 仪器调试.用木棒轻轻敲击其中一个通道的拾振器,当动态记录仪的桥盒指示灯呈现绿色,且笔记本电脑上的软件可以读

取加速度的数据,表明该通道线路正常,随后按照此方法依次检测其他通道的拾振器连接是否正常.仪器调试的作用是在试验前检测拾振器是否与动态记录仪连接好,动态记录仪或者采集软件是否正常工作,为试验的顺利进行做好前期工作.

(6)激励.让一个人负责操作笔记本电脑,点击软件的数据采集,开始记录数据.同时,另一个人用力锤敲击水泥混凝土路面板,力锤敲击的部位选择与传感器布置位置接近处(5 cm),且锤击点距离拾振器每次试验保持一致,其中锤重约 3 kg,落锤高度约为 20 cm.传感器布置位置如图 6、图 7 所示.

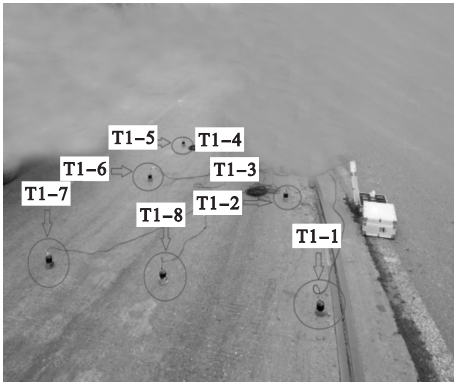


图 6 西岗区某高架桥拾振器布置图

Fig. 6 Vibration pickup arrangement in a viaduct of xigang district

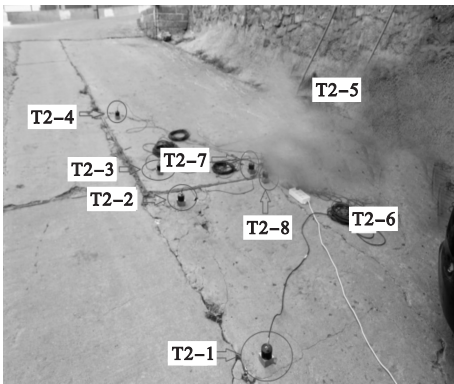


图 7 中山区内某路段拾振器布置图

Fig. 7 Vibration pickup arrangement in a road of zhongshan district

(7)保存数据.每个敲击点敲击三次,记录加速度数据,保存完毕后换另一个测点.

(8)整理试验仪器和清理试验现场.试验结束后应该立即将试验现场设备整理好并放在仪器箱内,而后将道理现场清理干净,以免耽误交通.

(9)数据处理.对每个敲击点的加速度数据取平均值,以减少误差,同时对所测的加速度数据进行时域分析和频域分析,得出其最大加速度、主频和振动时间.

3 试验数据与分析

3.1 试验数据

每一组数据均由 941B 型拾振器所测的数据组成.将大连市西岗区某高架桥试验数据列于表 1,大连市中山区内某路段试验数据列于表 2.

表 1 大连市西岗区某高架桥试验数据

Table 1 Test data of a viaduct in Dalian xigang district

通道编号	试验编号	最大加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s
T1 - 1	1	0.853	260	0.026 2
	2	0.842	213	0.025 9
	3	0.866	219	0.026 8
T1 - 2 (脱空)	1	2.948	105	0.049 2
	2	2.940	110	0.048 8
	3	2.945	102	0.049 5
T1 - 3 (脱空)	1	2.866	104	0.044 2
	2	2.870	102	0.044 7
	3	2.872	108	0.044 0
T1 - 4	1	1.769	205	0.037 5
	2	1.764	208	0.037 2
	3	1.773	207	0.037 8
T1 - 5	1	0.745	205	0.037 3
	2	0.740	201	0.037 0
	3	0.749	209	0.037 6
T1 - 6	1	0.794	205	0.031 3
	2	0.789	202	0.031 9
	3	0.797	209	0.031 1
T1 - 7	1	0.672	235	0.041 5
	2	0.679	230	0.030 7
	3	0.671	237	0.036 0
T1 - 8	1	1.764	205	0.038 6
	2	1.768	209	0.038 6
	3	1.761	201	0.038 7

表 2 大连市中山区内某路段试验数据

Table 2 Test data of a road in Dalian zhongshan district

通道编号	试验编号	最大加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s
T2-1	1	1.318	230	0.031 3
	2	1.311	228	0.031 1
	3	1.315	227	0.031 0
T2-2 (脱空)	1	8.710	117	0.053 8
	2	8.705	120	0.053 5
	3	8.712	112	0.053 6
T2-3 (脱空)	1	4.579	120	0.053 5
	2	4.578	125	0.053 4
	3	4.576	123	0.053 2
T2-4	1	2.025	205	0.045 5
	2	2.024	208	0.045 4
	3	2.020	210	0.045 0
T2-5	1	1.056	205	0.046 7
	2	1.052	200	0.046 3
	3	1.054	207	0.046 2
T2-6	1	0.819	205	0.031 3
	2	0.810	210	0.031 0
	3	0.815	202	0.030 9
T2-7	1	0.893	205	0.040 8
	2	0.895	203	0.040 5
	3	0.896	208	0.040 3
T2-8	1	2.148	205	0.039 5
	2	2.146	201	0.039 9
	3	2.145	208	0.039 2

3.2 结果分析

将表 1 和表 2 的脱空区域和非脱空区域试验数据峰值取平均值列于表 3 和表 4.

表 3 不同脱空状态下试验数据平均值
(大连市西岗区某高架桥)

Table 3 Average test data under different void states
(a viaduct in Dalian xigang district)

脱空状态	最大加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s
脱空	2.94	105.67	0.049 2
未脱空	1.77	230.67	0.038 6

表 4 不同脱空状态下试验数据平均值
(大连市中山区内某路段)

Table 4 Average test data under different void states
(a road in Dalian zhongshan district)

脱空状态	最大加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s
脱空	8.71	122.67	0.053 6
未脱空	2.15	228.33	0.045 3

为了更直接地展示大连市西岗区某高架桥和大连中山区某路段试验中脱空区域和非脱空区域试验数据取平均值后峰值的变化规律,将表 3 和表 4 中数据均以柱形图表示(见图 8、图 9),并将所测振动信号的部分加速度时程曲线图和频谱图绘于图 10 ~ 图 13.

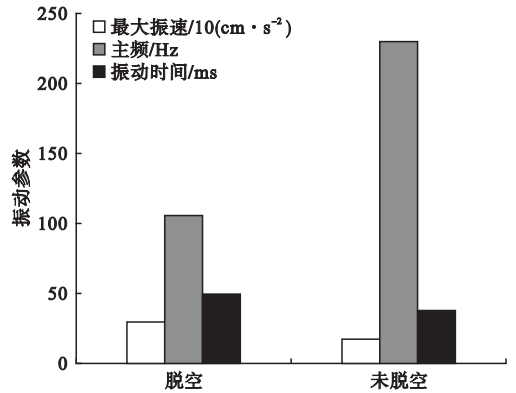


图 8 西岗区某高架桥振动参数对比

Fig. 8 Comparison of vibration parameters of a viaduct in xigang district

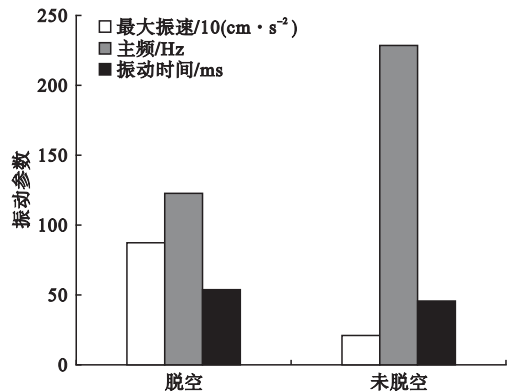


图 9 中山区某路段振动参数对比

Fig. 9 Comparison of vibration parameters of a road in zhongshan district

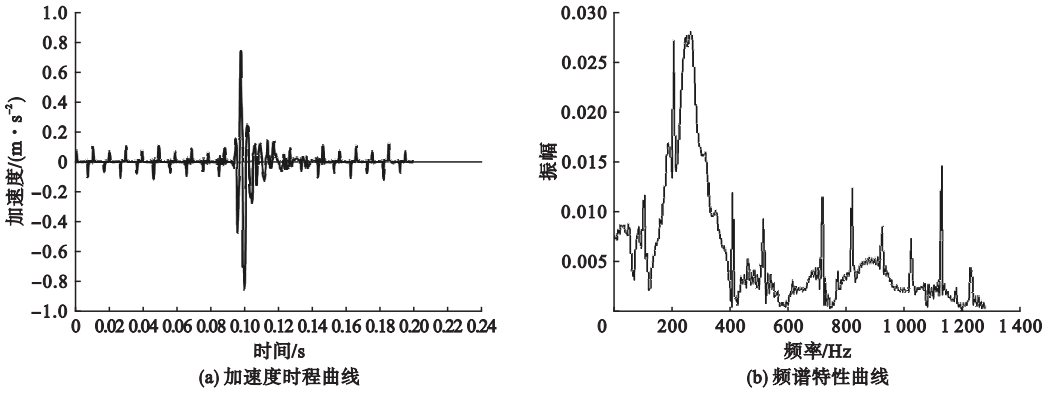


图 10 大连市西岗区某高架桥 T1 - 1 通道(非脱空)时程曲线和频谱特性曲线

Fig. 10 Time history curve and spectrum characteristic curve of channel T1 - 1 (no void) of a viaduct in Dalian xigang district

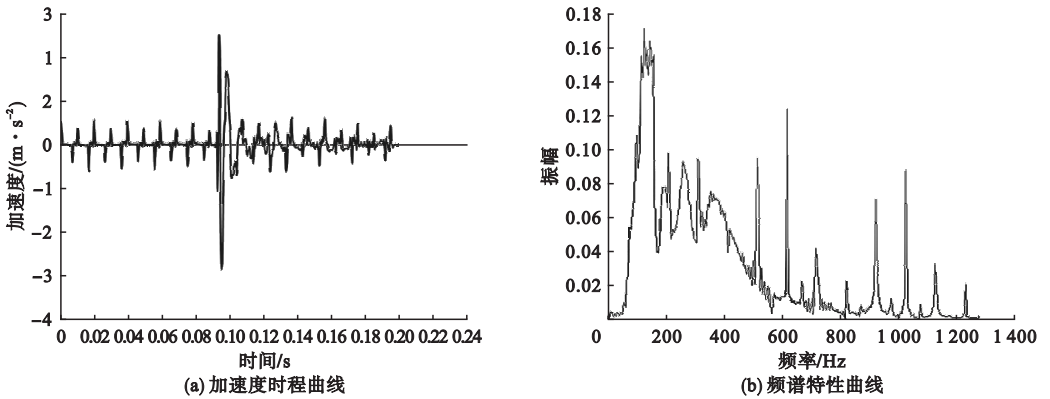


图 11 大连市西岗区某高架桥 T1 - 3 通道(脱空)时程曲线和频谱特性曲线

Fig. 11 Time history curve and spectrum characteristic curve of channel T1 - 3 (void) of a viaduct in Dalian xigang district

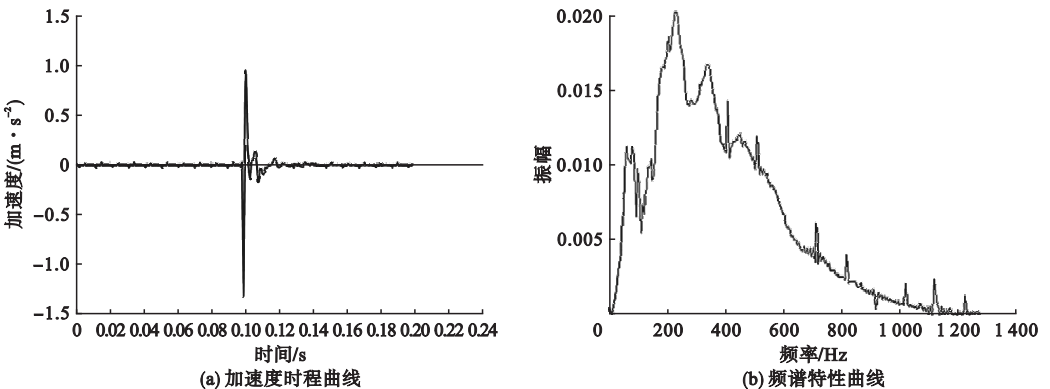


图 12 大连市中山区某路段 T2 - 1 通道(非脱空)时程曲线和频谱特性曲线

Fig. 12 Time history curve and spectrum characteristic curve of channel T2 - 1 (no void) of a road in Dalian zhongshan district

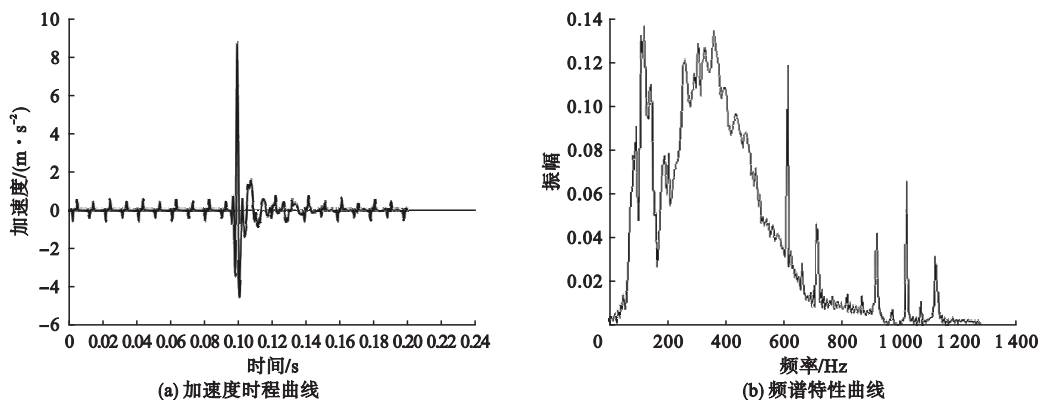


图 13 大连市中山区某路段 T2-2 通道(脱空)时程曲线和频谱特性曲线

Fig. 13 Time history curve and spectrum characteristic curve of channel T2-2 (void) of a road in Dalian zhongshan district

从表 3、表 4 和图 8、图 9 中可以看出,大连市西岗区某高架桥脱空区域最大振速为 2.94 m/s^2 ,是非脱空区域的 1.66 倍,振动时间为 0.049 2 s,是非脱空区域的 1.27 倍,而主频为非脱空区域的 0.46 倍.大连中山区某路段也是呈现脱空区域路面的最大加速度明显大于非脱空区域,振动时间长于非脱空区域,主频小于非脱空区域.这是因为水泥混凝土路面属于刚性结构,当基层脱空后,该结构刚度会明显降低,故路面板振动时间变长、振动主频降低、面层振动加速度减小.

从图 10 ~ 图 13 可以看出,由于试验现场不能中断交通,所以过往车辆对地面产生的振动形成了加速度曲线图中上下波动小曲线.两次不同地点的试验结果呈现大致相同的规律,而且具有极高的相关性.在相同落锤高度下,脱空区域的振动波形与之相对应的非脱空区域的振动波形之间存在着的差异.另外,对时域信号进行 FFT 转换可以得到信号中的频率成分以及幅值,从频域对信号进行描述,横坐标为频率,纵坐标显示峰值,通过对两段路的试验数据进行分析与统计得到最大峰值所对应的频率,脱空区域的主峰频率值小于非脱空区域的主峰频率值.本次试验的频率采集范围是 $0 \sim 1\,200 \text{ Hz}$,从频谱图可以看出,频率主要集中在 $0 \sim 300 \text{ Hz}$,其中脱空区域的主峰频率值小于非脱空区域的主

峰频率值,脱空区路面板振动卓越频率主要介于 $100 \sim 130 \text{ Hz}$,而非脱空区路面板振动卓越频率主要介于 $200 \sim 240 \text{ Hz}$.综合大连市内两路段试验结果可知,水泥混凝土路面板的脱空性与其振动信号参数有密切的相关性.通过测试振动板的主频、最大振速、振动时间可以检测水泥混凝土路面板底脱空.

4 结 论

(1)水泥混凝土路面板的脱空性与其振动信号参数有密切的相关性(最大加速度、主频和振动时间),通过试验证明了声振法检测水泥混凝土路面脱空的可行性,这也从实际上证明了声振法检测水泥混凝土路面板脱空原理的正确性.

(2)板底脱空越严重,板体振动的等效刚度也就越低,其振动时的频率也就越低,振动的时间也就越长,振动加速度越大.

(3)当水泥混凝土路面板振动卓越频率介于 $200 \sim 260 \text{ Hz}$ 时,板底无脱空;卓越频率介于 $100 \sim 130 \text{ Hz}$ 时,板底脱空.

参考文献

- [1] 彭永恒,李想,袁森林,等.声振法检测水泥混凝土路面板角隅脱空试验与数值仿真分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(4):630-638.
(PENG Yongheng, LI Xiang, YUAN Senlin, et al. Sound vibration method detect test and

- numerical simulation analysis of cement concrete pavement of corner void [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(4): 630 - 638.)
- [2] 李想, 彭永恒. 板底脱空对水泥混凝土路面板动力响应分析[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(12): 1923 - 1929.
(LI Xiang, PENG Yongheng. Dynamic response analysis of void under slab to cement concrete pavement[J]. Journal of Beijing university of technology, 2017, 43(12): 1923 - 1929.)
- [3] 吕韬, 梁莉, 刘祥友, 等. 层间接触状况对水泥混凝土路面的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 547 - 551.
(Lü Tao, LIANG Li, LIU Xiangyou, et al. Influence of interface contact condition on concrete pavement response[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2011, 7(3): 547 - 551.)
- [4] AMEEN M, RAGHU B K. Modeling of concrete cracking-A hybrid technique of using displacement discontinuity element method and direct boundary element method[J]. Engineering fracture mechanics, 2012, 35(9): 1054 - 1059.
- [5] OOI E T, SONG C, LOI F T, et al. Automatic modeling of cohesive crack propagation in concrete using polygon scaled boundary finite elements [J]. Engineering fracture mechanics, 2012, 93(10): 13 - 33.
- [6] SARKAR S, MAHADEVAN S, MEEUSSEN J C L, et al. Numerical simulation of cementitious materials degradation under external sulfate attack[J]. Cement and concrete composites, 2010, 32(3): 241 - 252.
- [7] WADKAR A, CLEARY D, GUO E. Load-transfer efficiencies of rigid airfield pavement joints based on stresses and deflections [J]. Journal of materials in civil engineering, 2011, 23(8): 1171 - 1179.
- [8] 李想, 彭永恒. 轮载和水耦合作用下水泥混凝土路面板脱空动力响应分析[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2018, 35(3): 351 - 356.
(LI Xiang, PENG Yongheng. Dynamic response analysis of cement concrete pavement undercoupling action of tire load and water [J]. Journal of natural science of Heilongjiang university, 2018, 35(3): 351 - 356.)
- [9] TOMOKI S, HIROYASU O, SHOHEI M, et al. Damage evaluation for concrete bridge deck by means of stress wave techniques[J]. Journal of bridge engineering, 2012, 10: 121 - 127.
- [10] YAN Zhonghong, TAO Ting, JIANG Zhongwei, et al. Discrete frequency slice wavelet transform[J]. Mechanical systems and signal processing, 2017(96): 457 - 460.
- [11] MURGAN I, CANDEL I, IOANA C, et al. Flow velocity profiling using acoustic time of flight flow metering based on wide band signals and adaptive beam-forming techniques [J]. Earth and environmental science, 2016, 49(6): 456 - 460.
- [12] CHEN Yingpin, PENG Zhenming, CHENG Zhuyuan, et al. Seismic signal time-frequency analysis based on multi-directional window using greedy strategy[J]. Journal of applied geophysics, 2017, 143: 116 - 128.
- [13] 彭永恒, 李想. 基于板底脱空的水泥混凝土路面动力特性分析[J]. 黑龙江大学学报自然科学版, 2016, 33(2): 244 - 250.
(PENG Yongheng, LI Xiang. The dynamic characteristics analysis of based void under slab the cement concrete pavement[J]. Journal of natural science of Heilongjiang university, 2016, 33(2): 244 - 250.)
- [14] 汪翔, 李野. 基于有限元分析的水泥混凝土面板脱空的验证模型[J]. 上海公路, 2011(2): 13 - 17.
(WANG Xiang, LI Ye. Verification model of pavement cement concrete slab based on finite element analysis[J]. Shanghai highways, 2011(2): 13 - 17.)
- [15] 肖林峻, 李丽民, 韩振中. 用有限元法评定混凝土路面板下地基脱空[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(1): 73 - 78.
(XIAO Linjun, LI Limin, HAN Zhenzhong. Judgment and evaluation of foundation void under concrete pavement slab by finite element method[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2010, 30(1): 73 - 78.)
- [16] 张宏, 凌建明, 袁捷, 等. 基于板底脱空的水泥混凝土路面结构理论分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 1677 - 1679.
(ZHANG Hong, LING Jianming, YUAN Jie, et al. Theory analysis of cement concrete pavement structure based on existence of disengaging under slab[J]. Journal of tongji university (natural science), 2012, 40(11): 1677 - 1679.)
- [17] 邱丽章, 王端宜. 水泥混凝土路面脱空及其检测方法[J]. 中南公路工程, 2007, 32(3): 106 - 108.
(QIU Lizhang, WANG Duanyi. Voids under the concrete slabs and the detective methods [J]. Journal of central south highway engineering, 2007, 32(3): 106 - 108.)
- [18] 程涛. 不同脱空形式下水泥混凝土路面破坏应力分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(4): 515 - 518.
(CHENG Tao. Mechanical analysis of damage of the cement concrete pavement with different void forms[J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2009, 32(4): 515 - 518.)
- [19] 周玉民. 水泥混凝土路面脱空状态下的荷载应力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 341 - 345.
(ZHOU Yumin. Loading stresses in cement concrete pavement slab with void underneath [J]. Journal of tongji university (natural science), 2007, 35(7): 341 - 345.)
- [20] 廉向东. 基于板底脱空的水泥混凝土路面动水压力试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 100 - 103.
(LIAN Xiangdong. Research on hydrodynamic pressure of void under concrete pavement[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2011, 33(5): 100 - 103.)