

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

彭永恒,李 想,袁森林,涂争光,陈 爽

(大连民族大学土木工程学院,辽宁 大连 116650)

摘 要 目的 研究声振法检测水泥混凝土路面板角隅脱空动力响应. 方法 针对水泥混凝土路面板角隅脱空,采用试验和数值仿真结合的方法,通过利用传感器采集和分析室内试验中水泥混凝土路面板的应变和加速度. 同时结合试验情况建立水泥混凝土路面板角隅脱空有限元模型,对路面板进行数值仿真分析,并与试验解进行对比. 结果 随着水泥混凝土路面板角隅脱空面积的增大,路面板最大振幅对应的频率降低了23%,振动时间提高了63%以上,板的振动加速度和应变提高了1倍以上,其中板底应变大于板顶应变,且不同落锤高度也对试验结果有一定影响. 结论 角隅脱空水泥混凝土路面板的最大加速度、应变和振动时间明显大于非脱空水泥混凝土路面板,而最大振幅对应的频率小于非脱空路面板;角隅脱空试验解与数值解对比表明数值解是可行的,二者互相验证.

关键词 道路工程;水泥混凝土路面板;角隅脱空;声振法;数值仿真分析

中图分类号 TU 997;U46

文献标志码 A

Sound Vibration Method Detect Test and Numerical Simulation Analysis of Cement Concrete Pavement of Corner Void

PENG Yongheng, LI Xiang, YUAN Senlin, TU Zhengguang, CHEN Shuang

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

Abstract: In order to study sound vibration method to detect the dynamic response of cement concrete pavement. Aiming at the corner void of the cement concrete pavement, the method of combining experiment and numerical simulation was used, the strain and acceleration of cement concrete pavement were collected and analyzed by using sensors in the laboratory experiment, at the same time, the finite element model of cement concrete pavement was established based on the test case, the numerical simulation of the road panel was analyzed, and compared with the experimental solution. The results show that with the area of cement concrete pavement of corner void increasing,

收稿日期:2017-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51478089);中央高校基本科研项目(wd01132, wd01140)

作者简介:彭永恒(1956—),男,教授,主要从事路面结构静动力学方面研究.

the corresponding frequency of the maximum amplitude of pavement plate decreases 23% ,the vibration time gradually improves more than 63% ,the vibration acceleration and strain of the plate gradually improve more than 1 times,the bottom strain of plate is greater than the top strain of plate ,and the heights of different drop hammer also have some effect on the test results. The maximum acceleration ,strain and vibration time of the cement concrete pavement plate are significantly higher than no void cement concrete pavement ,and the frequency of the maximum amplitude corresponding is less than no void cement concrete pavement. The comparison of the test solution and the numerical solution show that the numerical solutions are feasible ,the two verify each other.

Key words:road engineering;cement concrete pavement plate;corner void;sound vibration method;numerical simulation analysis

路况调查数据显示,最近几年水泥混凝土路面角隅处断裂现象较为多见,这直接影响道路的使用寿命与承载能力^[1-6].大量实例表明,目前水泥混凝土路面板脱空现象极为普遍,它直接影响着水泥混凝土路面的使用寿命,因此测定水泥混凝土路面板动响应,判断脱空位置,对于治理水泥混凝土路面板脱空病害,延长水泥混凝土路面使用寿命具有重要意义^[7-12].造成脱空的产生原因是多方面的,国内外学者普遍认为最有可能的原因是水泥混凝土路面在使用过程中由于唧泥、雨水的冲刷、重载车辆的作用、路堤与路基不均匀的沉降等所造成的板底脱空,水泥混凝土路面板的受力状态被改变,导致水泥混凝土路面板角隅处发生断裂,并且相继开展了对于水泥混凝土路面板脱空的研究.刘湘龙等^[13]运用振动测试仪,记录和分析了不同脱空状态的振动状态,获得了不同脱空状态下水泥混凝土路面板的振动特性.刘卫东等^[14]运用声振法,针对水泥混凝土路面板,分析了脱空和非脱空状态下水泥混凝土路面板最大振幅对应的频率.目前在工程实际中对水泥混凝土路面板脱空检测应用最广泛的就是落锤弯沉仪检测法和探地雷达检测法^[15-17],但是这两种方法检测的影响因素较多,且仪器价格昂贵,维护和使用成本较高,不利于推广应用.

鉴于此,为了更准确地判定板底状况,及时对脱空进行治理,从而避免对水泥混凝土路面板脱空修复所用的人力、物力和财力浪费的问题,针对目前水泥混凝土路面存在的问题,笔者提出一种新的检测方法,通过利用传感器采集和分析室内试验中水泥混凝土路面板在冲击荷载作用下的应变和加速度,同时结合试验情况建立水泥混凝土路面板角隅脱空有限元模型,对路面板进行数值仿真分析,并与试验解进行对比验证,为水泥混凝土路面的检测提供一种可靠的方法.

1 试验概况

1.1 原材料

试验采用石灰岩碎石为粗集料,参照《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2014)确定级配,主要技术性能指标见表1.试验所采用的水泥均为32.5级硅酸盐水泥,物理力学性能见表2.试验采用湘江河砂作为细集料,主要技术性能指标见表3.

表1 粗集料的主要技术性能指标

Table 1 Main technical performance indexes of coarse aggregate

粒径范围/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%
9.5~19	2 650	1 475	9.0
4.5~9.5	2 660	1 485	8.4

表2 水泥的物理力学性能指标

Table 2 Physical and mechanical properties of cement

标准稠度 用水量/%	细度 0.08 mm 筛余/%	凝结时间/min		安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
26.1	2.1	250	390	合格	4.1	6.5	20.2	38.3

表3 细集料的主要技术性能指标

Table 3 Main technical performance indicators of fine aggregate

细度模数	含泥量/%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	空隙率/%	吸水率/%
2.8	1.8	2 680	1 490	44.8	1.9

1.2 面层与基层的设计

1.2.1 配合比设计

参考文献[18],假设混凝土的密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$,通过计算取面层与基层的混凝土设计配合比分别为水泥 429 kg、水 185 kg、砂 536 kg、碎石 1 250 kg 和水泥 350 kg、水 155 kg、砂 515 kg、碎石 1 380 kg.

1.2.2 浇筑路面板

参考文献[18]确定水泥混凝土路面板几何尺寸,根据脱空面积的变化要求和相似原理,按照一定比例缩放后拟定试验尺寸,面层尺寸为 $1\,000\text{ mm}\times750\text{ mm}\times40\text{ mm}$,每块约重 72 kg.浇筑时需配置钢筋,并设置吊环.

基层试体模型的尺寸为 $1\,300\text{ mm}\times$

$1\,050\text{ mm}\times60\text{ mm}$.制作 3 块有角隅脱空区域的基层,每块基层约重 196.56 kg.脱空区域的平面大小有以下几种情况:(a) $200\text{ mm}\times150\text{ mm}$;(b) $300\text{ mm}\times250\text{ mm}$;(c) $400\text{ mm}\times350\text{ mm}$.浇筑时需配置钢筋,为了方便移动,设置吊环.装基层模板、预埋用以设置脱空的木制矩形模板,并浇筑基层、养护.

为考虑板与板之间相互作用,试验采用 4 块水泥混凝土路面板,其中一块路面板为基层角隅处脱空,其他三块完好,并在面层上接缝处布置拉杆和传力杆,水泥混凝土路面板如图 1 所示.

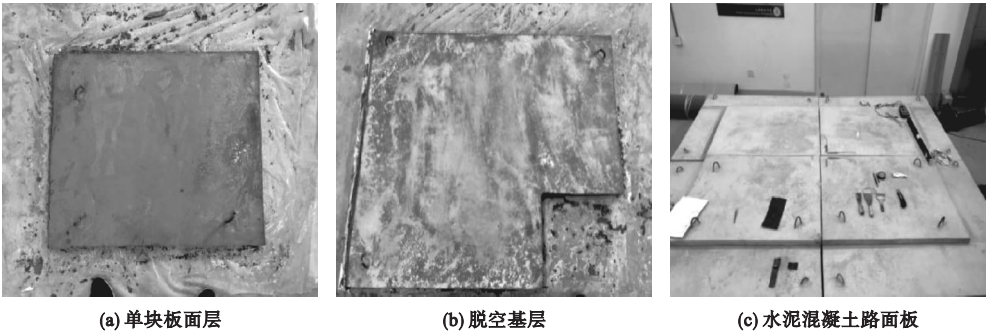


图1 水泥混凝土路面板平面图

Fig. 1 Planar graph of cement concrete pavement

1.3 试验仪器

试验仪器主要有特制落锤、动态数据采集系统、加速度传感器、应变计.试验过程中,振动传感器和应变计分别与数据采集系统相连接,数据采集仪可以将电流信号进行采集

和存储,然后通过计算机上的软件对数据进行分析,得出加速度时程曲线与应变时程曲线.试验采集装置组成如图 2 所示.

力锤采用刚性材质,加速度计采用中国地震局工程力学研究所生产的 941B 型拾振

器,为了提高拾振器的灵敏度,将工业橡皮泥抹在拾振器的底部,使拾振器和水泥混凝土路面板紧贴. 试验应变片和加速度传感器布置形式如图3所示,图中 TK 代表脱空,FTK 表示非脱空.

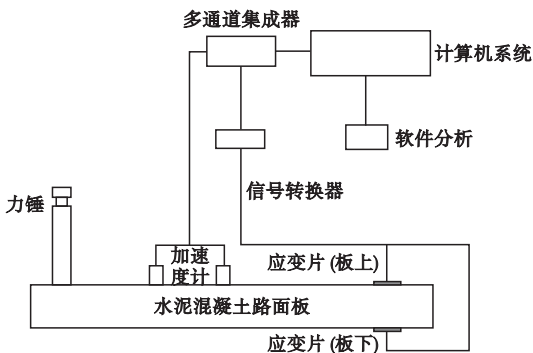


图2 试验采集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test collection

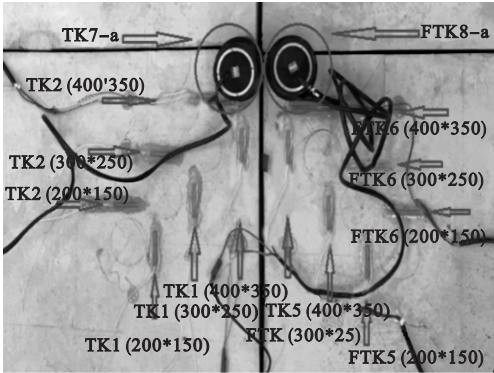


图3 传感器布置图

Fig. 3 Sensor layout

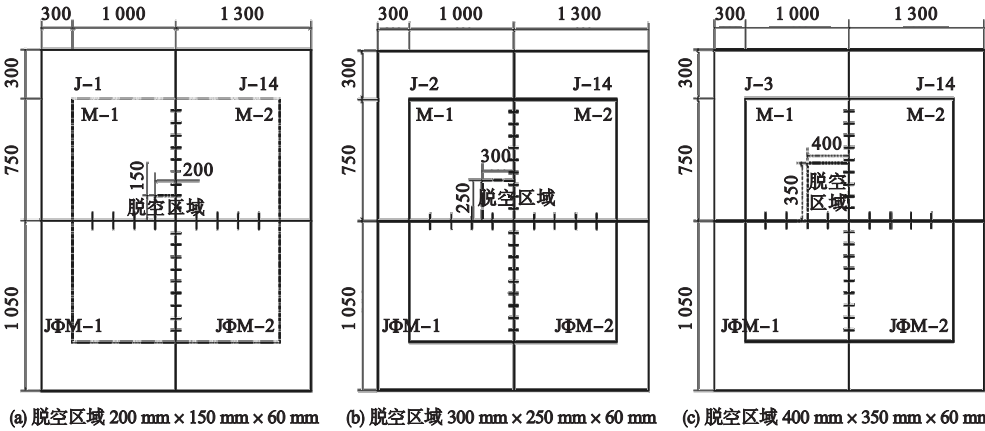


图4 角隅脱空试验工况

Fig. 4 Working conditions of corner void

1.4 试验方案

试验假设每块试体的长宽高完全一样,刚度和密度也一致,除去角隅处脱空,试体其他位置的基层和面层接触性较好. 对于同一脱空面积,落锤高度分别为 10 cm、15 cm、20 cm,锤击位置作用在该脱空区域中心,锤击点距离加速度传感器和应变计每次试验保持一致,每个高度在某一敲击点敲击五次,以减小试验采集数据的误差,提高试验的准确度,随后在相对应的另一侧非脱空水泥混凝土路面板进行相同的试验,而后更换脱空基层,重复进行试验. 具体工况见图4、图5.

2 试验结果及分析

将声振法检测水泥混凝土路面板角隅脱空试验数据列于表4~表6. 由于不同脱空面积的加速度时程曲线和频谱特性曲线的形式相类似,仅峰值呈现递增和递减的趋势,故笔者仅将脱空区域为 300 mm × 250 mm × 60 mm 的水泥混凝土路面板加速度时程曲线和频谱特性曲线列于图6~图8.

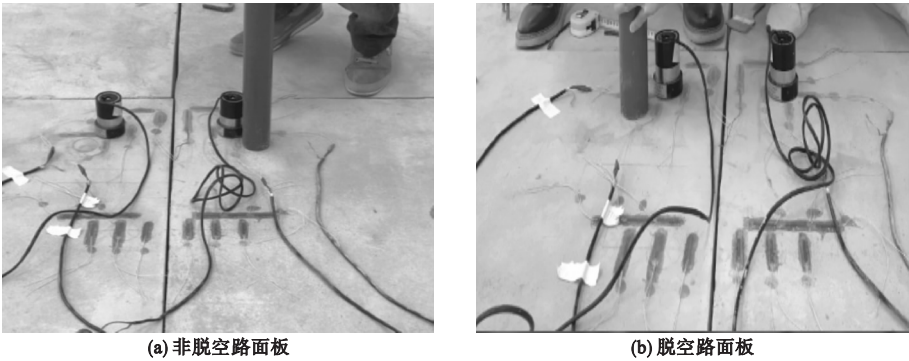


图5 不同脱空状态的声振法检测水泥混凝土路面板角隅脱空试验

Fig.5 Acoustic vibration method detecting corner void test of cement concrete pavement under different void states

表4 不同脱空状态下试验数据平均值(200 mm×150 mm×60 mm)

Table 4 Average values of test data under different void states(200 mm×150 mm×60 mm)

脱空状态	最大加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s	板上表面应变	板下表面应变
TK-10	4.78	43.67	0.113 8	130.16	193.84
TK-15	5.55	46.81	0.119 4	192.21	270.50
TK-20	11.19	47.42	0.125 4	281.54	524.24
FTK-10	3.88	55.95	0.116 6	19.88	—
FTK-15	5.45	59.28	0.111 2	23.42	—
FTK-20	13.43	60.77	0.149 2	34.76	—

注:TK-10表示在脱空区域施加落锤高度为10 cm的锤击.

表5 不同脱空状态下试验数据平均值(300 mm×250 mm×60 mm)

Table 5 Average values of test data under different void states(300 mm×250 mm×60 mm)

脱空状态	最大加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s	板上表面应变	板下表面应变
TK-10	9.52	41.36	0.178 8	177.91	195.01
TK-15	10.95	45.87	0.193 4	311.11	440.83
TK-20	16.24	46.42	0.192 0	407.01	816.58
FTK-10	6.20	50.85	0.148 0	20.16	—
FTK-15	10.07	52.46	0.125 2	23.13	—
FTK-20	11.84	57.76	0.156 8	26.76	—

表6 不同脱空状态下试验数据平均值(400 mm×350 mm×60 mm)

Table 6 Average values of test data under different void states(400 mm×350 mm×60 mm)

脱空状态	最大加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	主频/Hz	振动时间/s	板上表面应变	板下表面应变
TK-10	18.05	39.23	0.238 0	292.85	738.37
TK-15	18.96	44.39	0.195 0	404.27	673.63
TK-20	20.79	36.84	0.186 0	595.37	998.66
FTK-10	2.77	50.63	0.135 6	19.16	—
FTK-15	4.15	64.70	0.129 6	23.64	—
FTK-20	7.48	71.29	0.153 2	36.15	—

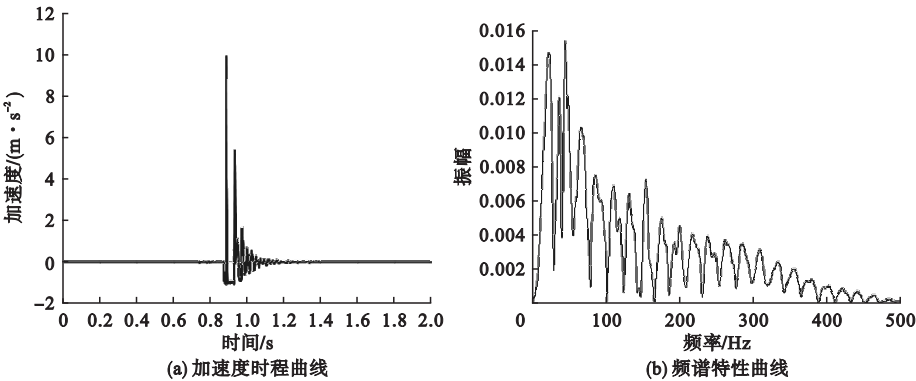


图6 落锤高度为10 cm 加速度时程曲线和频谱曲线

Fig. 6 Acceleration time history curve and spectral characteristic curve of the drop hammer height 10 cm

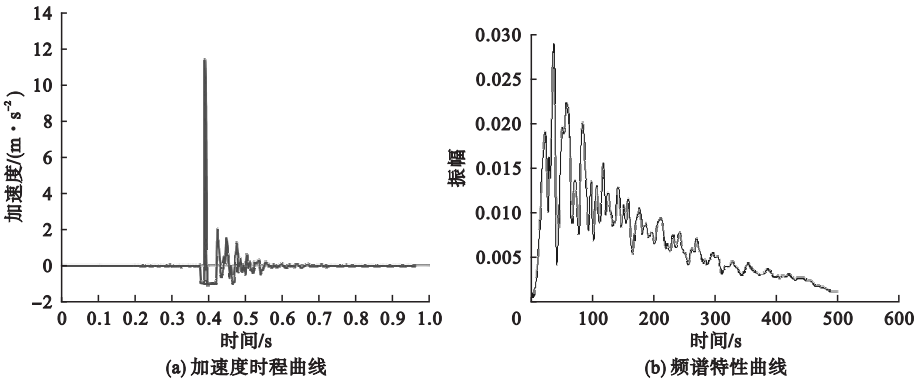


图7 落锤高度为15 cm 加速度时程曲线和频谱曲线

Fig. 7 Acceleration time history curve and spectral characteristic curve of the drop hammer height 15 cm

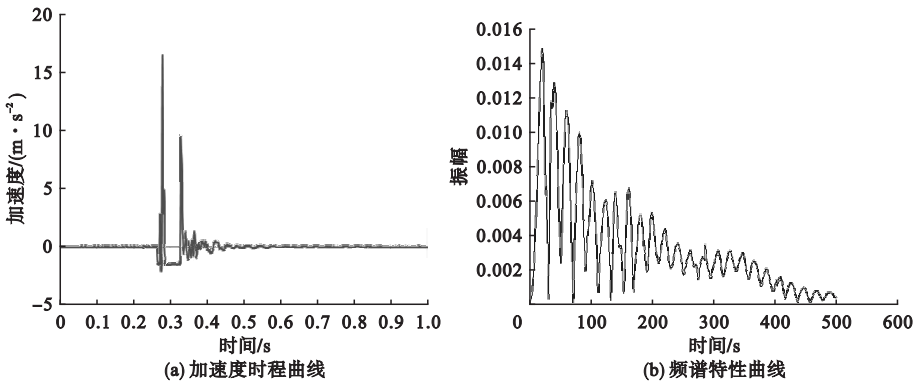


图8 落锤高度为20 cm 加速度时程曲线和频谱曲线

Fig. 8 Acceleration time history curve and spectral characteristic curve of the drop hammer height 20 cm

从上述图表可知,不同脱空状态下声振法检测水泥混凝土路面板角隅脱空试验中,水泥混凝土路面板角隅脱空面积的大小显著影响着路面板的动响应,随着脱空面积的增大路面板最大振幅对应的频率逐渐降低,振动时间逐渐延长,板的振动加速度和应变逐渐增大,其中板底应变大于板顶应变,其中对于最大加速度,在脱空区域,随着脱空区域面积的增大,最大加速度逐渐增加,且加速度按照2倍的速度增加。

同一脱空面积,随着落锤高度的增加水泥混凝土路面板的加速度和应变逐渐增大而

振动时间和主频变化不大.板底有脱空相对于无脱空而言,最大加速度和振动时间均较大,主频则明显降低.本次的频率采集范围是0~500 Hz,从频谱特性曲线上可以发现,水泥混凝土路面板振动频率数值主要集中在0~200 Hz,从200 Hz以后,整体呈现下降趋势,且水泥混凝土路面板角隅脱空主频值约介于30~48 Hz;而水泥混凝土路面板角隅非脱空主频值约介于50~70 Hz.从理论上分析,水泥混凝土道路属于刚性构件,板底的脱空相当于降低了它原有的刚度,所得的应变也明显大于非脱空区域的应变大小,因此造成了振动主频的降低,振动时间的延长和振动加速度的减小,这与实验结果相符,说明本次试验所得数据有很高的参考价值.

综合试验结果不难发现,水泥混凝土路面板动响应与角隅脱空状态具有良好的相关性,可以通过声振法检测路面板动响应来判断水泥混凝土路面板角隅脱空.

3 ADINA 有限元数值仿真分析

3.1 有限元模型的建立

根据试验模型的几何尺寸建立脱空区域为300 mm×250 mm×60 mm的为角隅脱空的水泥混凝土路面板数值仿真模型,并在面层的纵缝和横缝处布置传力杆和拉杆,基层和面层选用3-D 实体单元,钢筋选用 rebar 单元,有限元模型如图9所示.模型基本参数见表7.

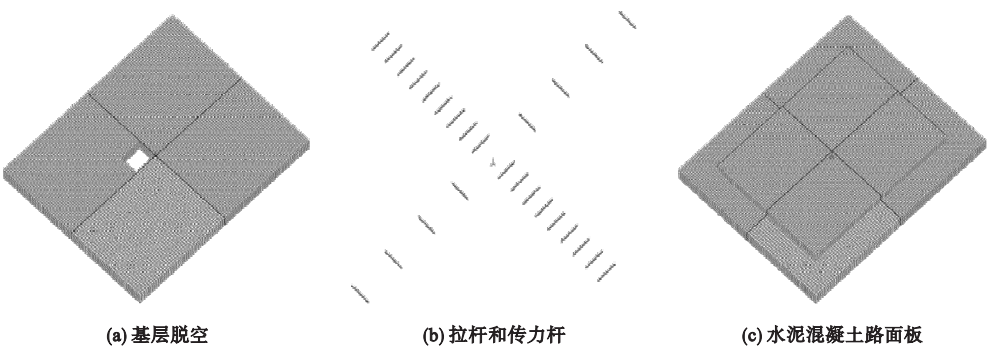


图9 水泥混凝土路面板有限元模型

Fig. 9 Finite element model of cement concrete pavement

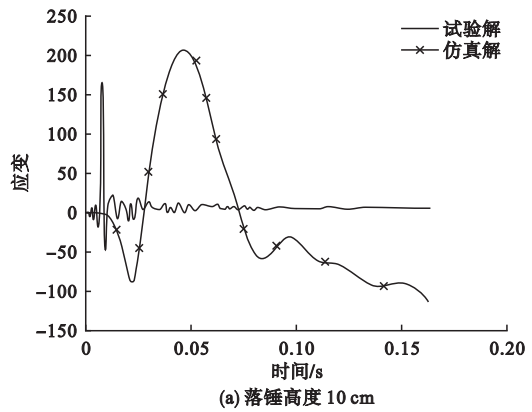
表7 水泥混凝土路面材料参数表
Table 7 Material parameters of cement concrete pavement

材料	弹性模量/ 10^{10} Pa	泊松比	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
水泥混凝土	2.6	0.27	2 400
钢筋	2.0	0.30	7 800

3.2 数值仿真分析

通过 ADINA 有限元数值仿真软件,将试验所采集的加速度时程曲线作为外部荷载施加到水泥混凝土路面板相应位置,并通过仿真计算得出与试验采集的水泥混凝土路面板应变值所处位置相同的应变仿真解,并将

仿真解与实验解进行对比,结果如图10所示,并将试验解和仿真解的应变峰值与误差列于表8.



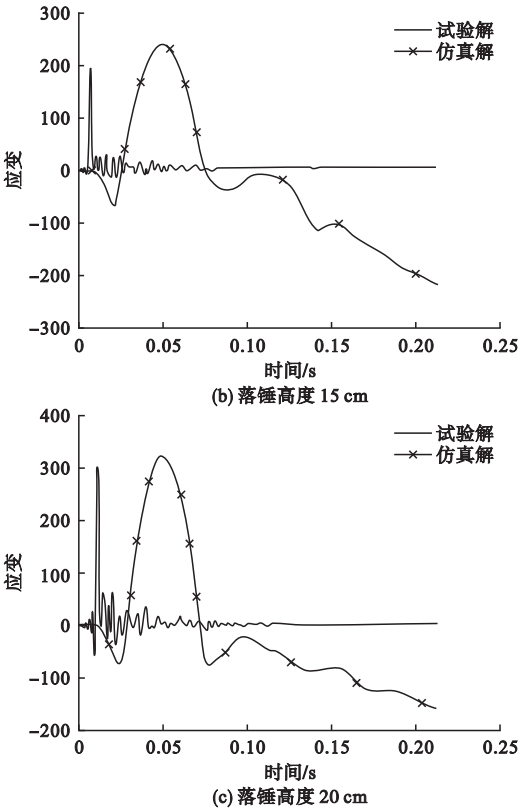


图 10 角隅脱空应变时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of corner void strain time history curve

表 8 角隅脱空 (300 mm × 250 mm × 60 mm) 应变峰值对比

Table 8 Strain peak comparison of corner void (300 mm × 250 mm × 60 mm)

落锤高度/cm	试验解	仿真解	误差/%
10	165.5	204.8	23
15	194.0	235.9	21
20	295.3	322.9	9

注:误差 = |试验解 - 仿真解| / 试验解 × 100%。

从图 10 和表 8 中可以看出,角隅脱空试验解应变时程曲线和理论解应变时程曲线的波形有一定的差异,这主要是因为水泥混凝土路面板有限元模型在单元剖分时存在误差,其约束条件与试验有一定区别,且仿真模型加速度的输入位置与实验情况有误差,这导致仿真解和实验解波形有一定的差异,但是二者的峰值相差不大,均在 25% 以内,表明仿真解是可行的,且仿真解是上限解,具有

一定的参考价值。

4 结 论

(1)随着水泥混凝土路面板角隅脱空面积的增大,路面板最大振幅对应的频率逐渐降低,振动时间逐渐延长,板的振动加速度和应变逐渐增大,其中板底应变大于板顶应变,且不同落锤高度也对试验结果造成一定影响。

(2)角隅脱空水泥混凝土路面板的最大加速度、应变和振动时间明显大于非脱空水泥混凝土路面板,而最大振幅对应的频率小于非脱空路面板。初步试验结果表明声振法判断水泥混凝土路面板角隅脱空的标准如下:水泥混凝土路面板角隅脱空主频值约介于 30 ~ 48 Hz;水泥混凝土路面板角隅非脱空主频值约介于 50 ~ 70 Hz。

(3)角隅脱空试验解与仿真解对比表明数值解是可行的,具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 高顺平. 水泥混凝土路面板底脱空工作状态分析及脱空评定技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
(GAO Shunping. Void beneath slab of cement concrete pavement working condition analysis and pavement evaluation method research [D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2014.)

[2] 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.)

[3] 岳宏亮,张春会,赵全胜,等. 考虑层间粘结的水泥路面荷载应力数值模拟[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(3): 253 - 257.
(YUE Hongliang, ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng, et al. Numerical modeling of loading stress of concrete pavement with interlayer bonding[J]. Journal of Hebei university of science and technology, 2013, 34 (3): 253 - 257.)

[4] SARKAR S, MAHADEVAN S, MEEUSSEN JCL, et al. Numerical simulation of cementi-

- tious materials degradation under external sulfate attack[J]. Cement and concrete composites, 2010, 32(3): 241–252.
- [5] 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.
 - [6] 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.
 - [7] 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.
 - [8] 周玉民, 谈至明. 水泥混凝土路面角隅应力分析[J]. 工程力学, 2010, 3(27): 106–110.
(ZHOU Yumin, TAN Zhiming. Analysis of near-corner stresses in concrete pavement structure[J]. Engineering mechanics, 2012, 93(10): 13–33.)
 - [9] RUFINO D, ROESLER J. Effect of slab-base interaction on measured concrete pavement responses[J]. Journal of transportation engineering, 2006, 132(5): 425–434.
 - [10] GRAEFF A G, PILAKOUTAS K, NEOCLEOUS K, et al. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibers recovered from post consumer tyres[J]. Engineering structures, 2012, 45(12): 385–395.
 - [11] ZHENG Wenzhong, OUYANG Zhiwei. Influence of key factors on deflection of bonded prestressed concrete simply supported slabs subjected to fire[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010, 17(5): 615–621.
 - [12] XUE Yanqing, HUANG Xiaoming. Fatigue reliability quantitative analysis of cement concrete for highway pavement under high stress ratio[J]. Journal of southeast university(english edition), 2012, 28(1): 94–99.
 - [13] 刘湘龙, 姚佳良. 地震波法检测混凝土路面脱空的试验研究[J]. 公路, 2016, 2(2): 28–34.
(LIU Xianglong, YAO Jialiang. Test and study of detecting void beneath cement concrete pavement by seismic wave method[J]. Highway, 2016, 2(2): 28–34.)
 - [14] 刘卫东, 王大鹏, 彭鹏. 声振法判定水泥混凝土路面脱空的试验研究[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2011, 25(3): 29–34.
(LIU Weidong, WANG Dapeng, PENG Peng. An experimental research on acoustic-vibration testing in cement concrete pavement[J]. Journal of Heilongjiang institute of technology(natural science), 2011, 25(3): 29–34.)
 - [15] 黄勇, 袁捷, 谭悦, 等. 机场水泥混凝土道面脱空判定及影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 861–866.
(HUANG Yong, YUAN Jie, TAN Yue, et al. Identification of void beneath airport cement concrete pavement and its influence[J]. Journal of tongji university(natural science), 2012, 40(6): 861–866.)
 - [16] 薛彦卿, 黄晓明, 石小武, 等. 含脱空水泥混凝土路面交通荷载下的疲劳损伤机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 199–204.
(XUE Yanqing, HUANG Xiaoming, SHI Xiaowu, et al. Fatigue damage mechanism of cement concrete pavement with void under traffic load[J]. Journal of southeast university(natural science edition), 2014, 44(1): 199–204.)
 - [17] 李晶晶, 张擎, 陈忠达. 水泥路面改性环氧磨耗层骨料形状特征分析与评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 1055–1064.
(LI Jingjing, ZHANG Qing, CHEN Zhongda. Aggregate shape analysis and evaluation of modified epoxy wear layer for cement pavement[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2017, 33(6): 1055–1064.)
 - [18] 中交公路规划设计院. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTGD40—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(CCCC Highway Consultants. Specifications of cement concrete pavement design for highway: JTGD40—2011[S]. Beijing: People's Transportation Press, 2011.)