

基于脉冲响应法识别混凝土面板与土体界面脱空试验

王志亮^{1,2}, 张亚东¹, 叶 斌¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 研究了脉冲响应法在识别混凝土面板脱空中的应用. 介绍了混凝土面板脱空危害, 分析了现有检测方法的局限性; 阐述利用脉冲响应法进行混凝土面板脱空无损检测的基本原理和优点; 利用该法进行混凝土面板脱空检测的模型试验研究. 试验中采用在模型土体上现浇的混凝土板, 并在板上布置传感器, 通过力锤敲击混凝土板产生应力波, 利用传感器采集混凝土板的动态响应且进行相应的数据处理和分析, 进而得到混凝土板下方的脱空情况. 检测结果与板下实际脱空情况的对比表明, 运用脉冲响应法检测板下脱空在实践中是可行的, 且效率较高, 操作简便. 为今后检测混凝土面板脱空和评价脱空修复效果提供了一种新途径.

关键词: 混凝土面板; 脱空; 脉冲响应法; M 函数; 动刚度

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

concrete slab. The obtained data were processed and analyzed using the impulse response method, and the positions and ranges of the voids under the concrete slab were further identified. The identification results were compared with the actual void situations under the concrete slab. The impulse response method was proved to be feasible and efficient in detecting the void phenomenon under concrete slab, thus providing a new way to detect void and evaluate the effect of repair.

Key words: concrete pavement; void; impulse response method; M -function; dynamic stiffness

Experimental Study of Detection of Void Between Concrete Slab and Soil Based on Impulse Response Method

WANG Zhiliang^{1,2}, ZHANG Yadong¹, YE Bin¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper focused on the application of the impulse response method to detect void under concrete slab. First, the perniciousness of void under concrete slab was introduced, and the limitations of current detection methods were analyzed. Then, the basic principle and the advantages of the impulse response method were described. After that, model tests on detection of void under concrete slab by using the impulse response method were performed to demonstrate the feasibility of the method. During the experiment, soil was first filled into a test chamber to make a model ground, and a concrete slab was casted on the ground surface. The concrete slab was knocked by a hammer at a certain point to create stress wave. The dynamic responses of the concrete slab were measured by the sensors located at different places on the

土与结构接触面课题涉及诸多土木、水利工程, 主要以土与混凝土的接触面为代表, 如桩与桩侧土体、混凝土防渗墙与土等. 这些混凝土结构在养护及服务期可能出现被称为“脱空”的病害. 脱空是指混凝土结构的局部范围与土体不再保持连续接触的现象. 大量研究表明, 服务中的混凝土结构存在着普遍的脱空现象^[1-4], 它是影响混凝土结构寿命的因素之一. 因此, 测定脱空范围, 对于制定脱空病害治理措施、延长混凝土结构的使用寿命具有重要意义.

在脱空检测手段和评价方法方面, 一方面由于混凝土结构的脱空情况十分复杂; 另一方面现有研究主要集中于检测路面板脱空, 而对于混凝土结构与土体界面间的脱空研究还鲜见, 导致长期以来一直缺乏有效的检测手段. 近年来, 随着计算机和微波等技术的发展, 脱空检测方法得到了长足进步^[5]. 目前在实践中运用较广泛的是探地雷达(GRP)和落锤式弯沉仪(FWD)两种方法. GRP由于测量速度快在无损检测中得到广泛运用, 但是其影响因素比较多, 精度也必然受到影响^[6]. FWD通过对实测弯沉盆的数值来评定混凝土面板的支撑情况, 但其检测效率不高, 且对处于初步形成阶段的较小脱空区的识别

收稿日期: 2015-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(61179062, 51174145, 51379147); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110024)

第一作者: 王志亮(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土动力学. E-mail: cvewzL@tongji.edu.cn

效果不理想^[7]。此外,FWD和GPR使用的设备较为昂贵,使用和维护的成本高,不便于大量推广。因此,需要研究一种操作简便、高效率的混凝土面板脱空检测方法,而脉冲响应法是近年来应用于脱空检测的新型方法。

脉冲响应法(impulse response method,IRM)也被称为瞬时动态响应法或声波移动方法。它是一种无损检测方法,起源于上世纪60年代法国用于评估现场钻孔灌注桩完整性的强制振动法。随着上世纪80年代便携式计算机和数据采集设备的发展,脉冲响应法开始被应用于更多的领域。Davis和Dunn^[8]利用脉冲响应法通过对比实测数据与理想桩的响应预测桩中存在的缺陷;Davis和Hertlein^[9]则结合了脉冲响应法、平行地震测试、音波检测法和超声波脉冲速度等无损方法来评估放射性废物处置库中混凝土结构的完整性;Vivek和Michael等^[10]利用脉冲响应法得出机场跑道动刚度随服务时间降低的结论;Davis等^[11]将脉冲响应法运用于混凝土隧道衬砌的快速评价中;Gucunski等^[12]则将脉冲响应法运用于路面封底的评价;Hola等人^[13]将脉冲响应法运用于混凝土楼板的质量评价中。

本文基于脉冲响应法原理,试验研究了其在识别混凝土面板脱空中的应用。试验主要是通过模型箱内土体上现浇混凝土面板,并在板上布置传感器,通过力锤敲击面板产生应力波,利用传感器采集混凝土板的动态响应信号,并进行相应的数据处理和分析,进而得到混凝土板下方的脱空情况。与实际结果比较,吻合较好。该项研究可为今后检测混凝土面板脱空和评价脱空修复效果提供一种新途径。

1 脉冲响应法识别脱空的原理

脉冲响应法是利用低应变率的力锤敲击混凝土面板产生应力波,通过传感器和数据采集仪收集路面板的动态响应信息来进行脱空判别(如图1)。其基本原理是:将数据采集仪采集到的速度时程曲线和力锤的力时程曲线分别通过快速傅里叶变换转化为频域解,再将速度的频域解与力的频域解相除即可得到传递函数—— M 函数。 M 函数的频谱图包含很多信息:面板的完整性、支撑情况的好坏、覆盖层的剥离和混凝土中的蜂窝等^[10]。同时,还可以通过对 M 函数曲线分析得到动刚度 k_d ,其为 M 函数在频率范围为 $0\sim 80$ Hz内斜率的倒数。动刚度 k_d 可以反映系统的整体刚度,并被用于脱空的判别。图2显示

了在4 cm板的板中心敲击一次后得到的典型数据处理过程,其中图2d中线段AB斜率的倒数,即为动刚度 k_d 。

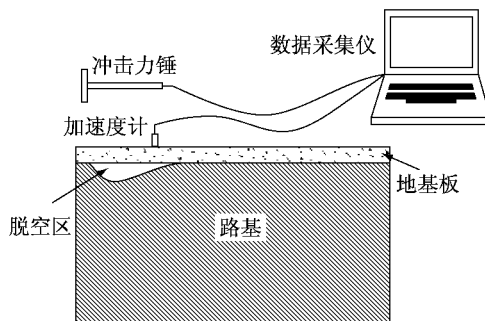


图1 脉冲响应法应用示意图

Fig.1 Schematic of impulse response method

脱空情况可由以下3个方面进行评价:① M 函数曲线在 $0\sim 80$ Hz频率范围内斜率越大,即 k_d 越小,表示系统柔度越大、刚度越小,则地基支撑情况较差,即脱空可能性越大;②若 M 函数曲线在 $0\sim 80$ Hz频率范围内越不规则,也表示脱空的可能性越大。这是因为混凝土面板脱空后几乎所有的脉冲波都被反射,因此会加强其振动响应的衰减;③ M 函数在 $0\sim 80$ Hz区间内的峰值也可以作为脱空的判据,峰值越大则出现脱空可能性越大。

一般认为,运用脉冲响应法检测脱空时板厚应小于 0.6 m^[14]。因为当板厚大于 0.6 m时,系统的刚度将受板自身而非支撑条件控制。

2 模型试验概述

试验中采用特制的钢质模型箱,其尺寸为 0.9 m \times 0.9 m \times 0.75 m,为减小试验中反射波对试验结果的影响,填土之前在四周围绕模型箱内侧布置1层泡沫板,并在泡沫板上划7道线用以分层填土。试验土样为从上海虹桥机场附近获取的第②层粉质黏土。主要过程如下:晒土并去除土中石子等杂物;用碎土机粉碎晒干后的土;通过击实试验确定最优含水率;将土以最优含水率配比并分层填土压实;在填土表面现浇混凝土板;用力锤敲击混凝土板并记录数据。为模拟现实中混凝土面板的工况,本模型试验中对养护后的混凝土面板先用圆柱形圆杆在其表面碾压,然后再进行试验(图3)。

模型中土体的最优含水率为20%,试验中采用了两种不同厚度的混凝土面板,尺寸分别为 0.5 m \times 0.5 m \times 0.04 m和 0.5 m \times 0.5 m \times 0.02 m。混凝土

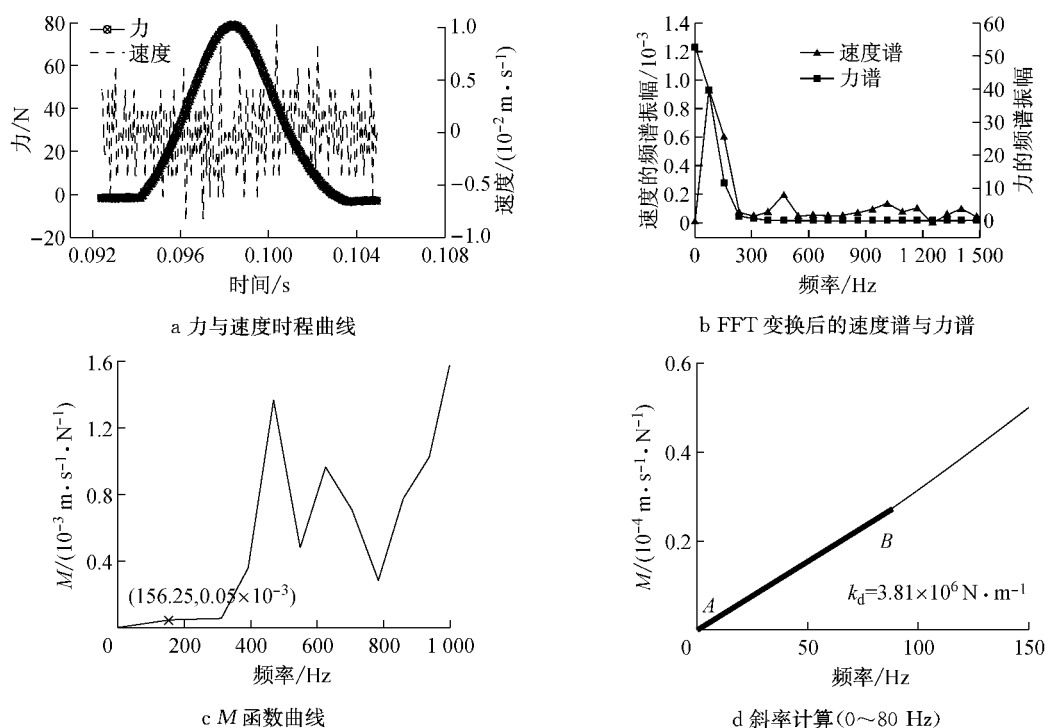
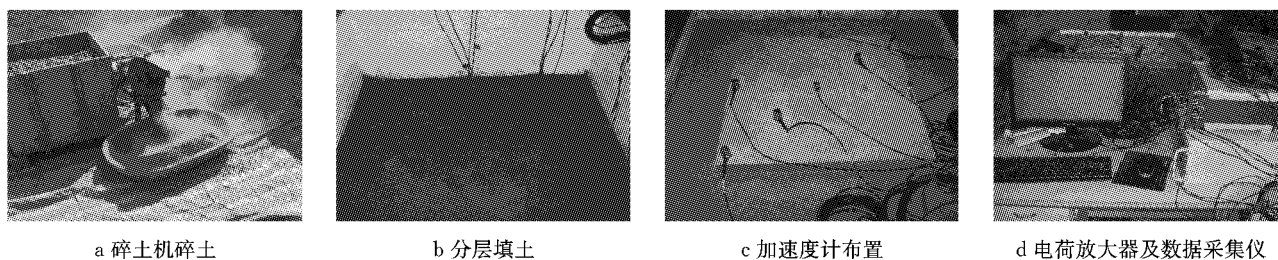
图2 M 曲线及 k_d 计算过程Fig.2 Calculation process of M response function and k_d 

图3 试验主要操作过程图

Fig.3 Main operating process of test

土板的弹性模量 $E=29 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.15$,密度 $\rho=2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.实验过程中利用力锤敲击混凝土面板某一点位产生应力波,通过加速度计、电荷放大器和数据采集仪记录混凝土板上相应位置的响应数据,传感器布置如图4所示.所用电荷放大器带有积分功能,可以选择加速度、速度或者位移输出,以满足不同试验目的.

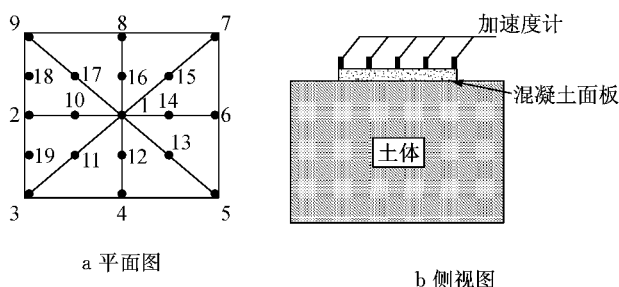


图4 测点总布置图

Fig.4 Deployment of measuring points

3 模型试验的结果与对比

3.1 厚度4 cm 板的结果分析

由于试验中使用力锤敲击,敲击点位置会有一定偏差,故在模型试验中对各点进行多次敲击.采集得到的数据处理结果也说明了这一点,同一点敲击得到的 k_d 离散度在10%左右.对同一点在上述计算方法基础上采用多次试验平均的方式,分别得到了各点处 M 函数曲线 $0 \sim 80 \text{ Hz}$ 频率范围内的峰值以及动刚度 k_d ,列于表1,并在图5中标出各点具体数值,其中括号内数值为试验结果,其余为点号.

由表1及图5可以看出: M 函数在 $0 \sim 80 \text{ Hz}$ 频率范围内的峰值以及动刚度 k_d 的变化有较好的一致性. M 函数峰值由中心往四周逐渐增大, k_d 值则由中心往四周逐渐减小.这说明了脱空情况主要出

现在板的四周;动刚度 k_d 在由对角线连线划分的4部分范围内,除了上述由内到外在数值上逐渐减小的现象以外,还可以看出数值大小的分布图形近似

为一抛物曲面,如图6a所示,也即最终脱空区呈4个抛物面分布.图5表明9号点的峰值最大而动刚度最小,说明该点的脱空情况最为严重.

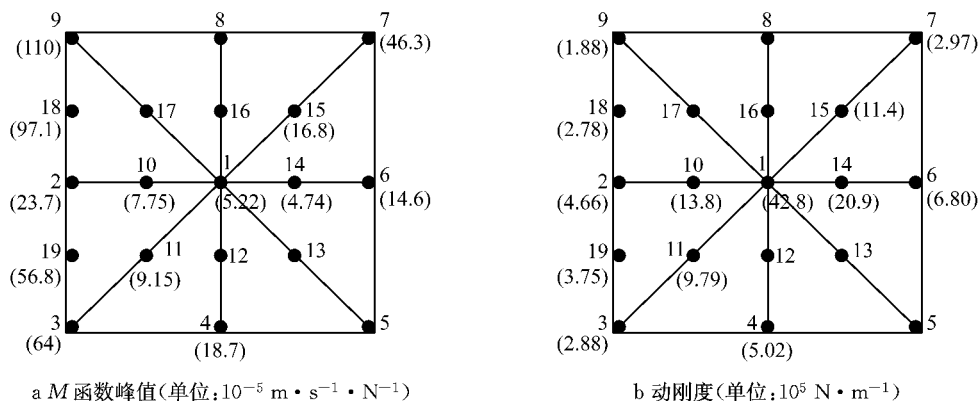


图5 4 cm板0~80 Hz范围内 M 函数峰值和动刚度分布图

Fig.5 Peak of M function and k_d of slab with a thickness of 4 cm between 0 and 80 Hz

表1 M 函数相关计算结果(4 cm厚板)

Tab.1 Calculation results of M function(with a thickness of 4 cm)

点号	0~80 Hz 内峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$)	k_d /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	5.22×10^{-5}	4.28×10^6
2	2.37×10^{-5}	4.66×10^5
3	6.40×10^{-4}	2.88×10^5
4	1.87×10^{-4}	5.02×10^5
6	1.46×10^{-4}	6.80×10^5
7	4.63×10^{-4}	2.97×10^5
9	1.10×10^{-3}	1.88×10^5
10	7.75×10^{-5}	1.38×10^6
11	9.15×10^{-5}	9.79×10^5
14	4.74×10^{-5}	2.09×10^6
15	1.68×10^{-4}	1.14×10^6
18	9.71×10^{-4}	2.78×10^5
19	5.68×10^{-4}	3.75×10^5

图7为计算得到的3号点处 M 函数曲线.对比图7与图2c(1号点处 M 函数曲线)可知:首先,3号点的0~80 Hz以内的斜率明显大于1号点处,即 k_d 小于1号点处,这与表1中结果一致;其次,3号点 M 函数曲线中0~80 Hz范围内的峰值明显大于1号点.即第1节中介绍判别脱空方法中的判据③.这从另一方面说明了3号点处脱空可能性较1号点大.限于篇幅,其他点处 M 函数曲线不一列出.

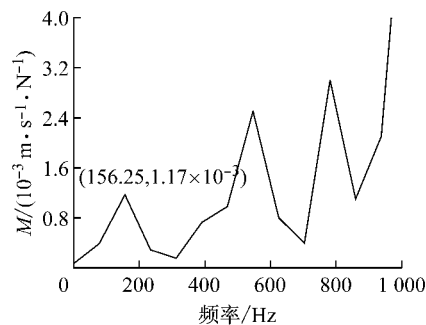


图7 3号点 M 函数曲线

Fig.7 M function curve of point 3

在实际应用中,对于判别为脱空的位置,可以通过点加密的方式进一步确定脱空范围,为后续的注浆或者封底等修复手段提供参考,且在修复脱空后,还可以利用本方法评估修复效果的好坏.

3.2 厚度2 cm板的结果分析

2 cm厚板的试验方法及试验过程与4 cm厚板完全相同,仅改变了混凝土板的厚度以分析板厚对检测结果的影响.表2和图8为厚度2 cm现浇板的试验结果.图9为2 cm厚板移除后观察到的实际脱空情况.对比图6b和图9,可看到两种不同厚度板下

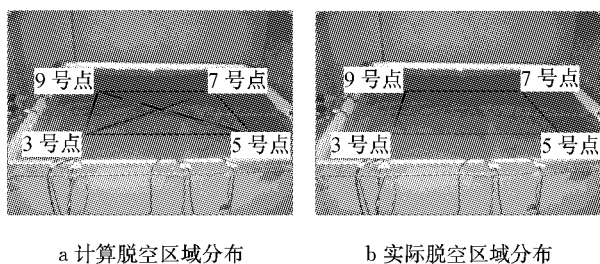


图6 4 cm厚板计算结果及实际脱空分布

Fig.6 Calculated result and practical distribution of void of concrete slab with a thickness of 4 cm

图6b为试验结束后将上面的混凝土面板移除后,通过直接观察判定的板下实际的脱空情况.从图中可以看出,脱空基本集中在边角处,而角隅处更为明显,尤其以9号点的脱空情况最为突出.这说明脉冲响应法的判别结果与实际情况基本符合,证明了脉冲响应法检测结果的可靠性.

的实际脱空情况相差不大,都主要出现在板角隅处。

表2 M 函数相关计算结果(2 cm 厚板)

Tab.2 Calculation results of M function(with a thickness of 2 cm)

点号	0~80 Hz 内峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$)	k_d /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	6.69×10^{-5}	2.46×10^6
2	5.71×10^{-4}	1.61×10^5
3	1.30×10^{-3}	7.65×10^4
4	4.82×10^{-4}	8.54×10^4
6	6.19×10^{-4}	6.74×10^4
7	1.70×10^{-3}	3.90×10^4
9	1.80×10^{-3}	1.20×10^4
10	1.37×10^{-4}	4.17×10^5
11	9.93×10^{-5}	2.65×10^5
14	1.45×10^{-4}	1.37×10^5
15	1.40×10^{-3}	6.41×10^4
18	1.50×10^{-3}	2.62×10^4
19	7.23×10^{-4}	7.07×10^4

将表2和图8的结果与表1和图5的结果对

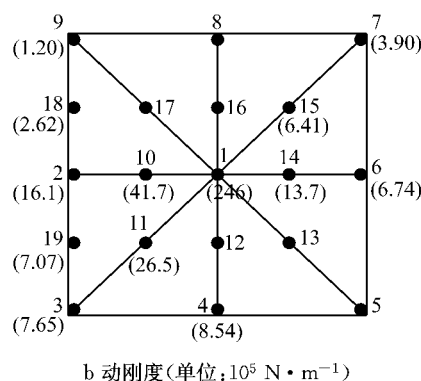
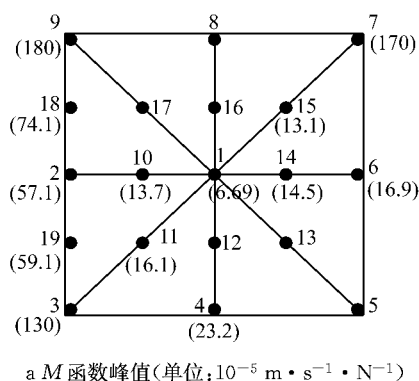


图8 2 cm 板 0~80 Hz 范围内 M 函数峰值和动刚度分布图

Fig.8 Peak of M function and k_d of slab with a thickness of 2 cm between 0 and 80 Hz

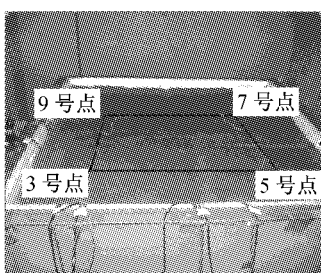


图9 2 cm 厚板实际脱空情况

Fig.9 Practical distribution of void of concrete slab with a thickness of 2 cm

4 结论

(1) 脉冲响应法简单易行,设备的使用受场地限制较小. 该法测试结果可较好地判别出现浇筑混凝土板养护后脱空区主要出现在板边、角隅处,且脱空区近似呈四抛物曲面分布。

(2) M 函数值的绝对大小不仅与脱空情况有

比,表明:在脱空情况相似的情况下,2 cm 厚板幅值明显较 4 cm 板中相对应点的数值大;而 k_d 则正好相反,2 cm 厚板 k_d 明显较 4 cm 板中相对应点的数值小. 说明 M 函数值的绝对大小不仅与板的脱空情况有关,还与板的厚度有关系. 因此,在利用脉冲响应法检测脱空时,一般不能应用测试值的绝对大小来进行直接判断,而需要比较不同点处测试值的相对大小,综合分析以后来确定板下出现脱空的可能性;两种不同厚度板的试验结果虽然在数值大小上有差异,但是分布的规律基本一致, k_d 值都是由中心往四周逐渐减小,形成以 1 号点为中心,对角线为边界的 4 个抛物曲面,说明 2 cm 厚度的混凝土板的脱空区也主要分布在板的四周,这与混凝土板移除后观察到的实际脱空情况也基本一致,见图 9 所示,同时也说明减小混凝土板厚度并没有影响判别结果。

关,而且还与板的厚度有关,但是研究发现板的厚度对于脱空现象的判别结果产生的影响并不显著。

(3) 在目前技术条件下,脉冲响应法所测得的脱空区还只是一个模糊的区域,虽然可以通过加密点的方式来提高精度,但是想要得到精确的脱空区域面积及空穴的深度尚需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨峰,彭苏萍,刘杰,等. 衬砌脱空雷达波数值模拟与定量解释[J]. 铁道学报, 2009, 30(5):92.
YANG Feng, PENG Suping, LIU Jie, et al. Simulation of lining void area by radar waves and explanatory strategy[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 30(5):92.
- [2] 王少君,马晓力,吴超凡. 水泥混凝土路面病害发展过程研究[J]. 公路, 2008(7): 97.
WANG Shaojun, MA Xiaoli, WU Chaofan. Study on the disease developing process of concrete pavement[J]. Highway, 2008 (7): 97.

(下转第 191 页)