

砼路面板脱空检测方法综述

韩 西,* 陈上均, 钟 厉, 王 骑

重庆交通学院 桥梁及结构工程系, 重庆 400074

摘要:首先论述了砼路面板下脱空形成的机理和危害,介绍了现在广泛使用的脱空检测方法,即 FWD 落锤式弯沉仪检测法和 GRP 探地雷达检测法工作原理及应用,也介绍了正在研究当中的瞬态波检测法和基于频率下降率的人工神经网络识别法,最后对各种方法进行了总结,提出了以后需要开展的工作。

关键词:砼路面板;脱空;无损检测

中图分类号:U416.01 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-716X(2006)04-0073-04

砼路面在实际使用过程中,由于车辆荷载的重复作用以及降水的冲刷,板下基础将产生一定的塑性变形和唧泥,致使砼板的局部范围不再与基础保持连续接触,即为板下脱空。大量的试验表明,服务中的砼路面,基础的局部脱空现象是客观存在的。脱空多分布在砼路面的缝边板角下,桥头搭板及明涵台背下以及暗涵上部与路面板之间的区域内。脱空会引起板在低应力状态下的损坏,是引起刚性路面板断板损坏的一个重要原因,因此对板下脱空区进行有效检测和灌浆补强具有重要的现实意义。

1 砼路面板板下脱空形成机理和危害

1.1 脱空形成的机理

1) 由于割缝产生的先天性的脱空

重庆交通学院的易志坚^[1]在提出“过渡层”的概念后,研究了水泥砼路面面层与基层相互作用引起的基本破坏形式,并指出由于割缝后砼面板收缩产生的巨大拉应力,会使面板与基层间产生三种不同形式的裂缝,其中就有导致面板和基层间互相分离的裂缝形式,也就是先天性的脱空,但这样的脱空很微小。

2) 由于车辆长期作用产生的后天性脱空

车轮荷载作用于路面上时,面层板会产生弯沉变形。由于板的弯沉会使路基产生一定的塑性变形,板在荷载驶离后恢复原状,而路基则残留这部分塑性变形不能恢复原状。虽然荷载每次作用后路基所残留的塑性变形量很微小,但数百万甚至数千万次作用后的累积量并不小。根据弹性体板壳理论,荷载

作用于路面板上不同部位时,所产生的弯沉量是不同的,板角隅处大于板边缘处,而板中部的弯沉量最小。由于不同的部位板的弯沉量有差异,路基的累计塑性变形量也就不同:在板角隅下为最大,板边缘下次之,板中部下最小。这样,在板角隅和板边缘处就形成了板底同路基顶面间的空洞,意味着板失去了部分支撑。几乎关于脱空的所有文献都对这种后天性机理进行了说明,陆宏锐^[3]则对这种后天性的脱空机理进行了比较详细的分析和概括。

3) 脱空的发展和加重

水泥砼路面存在接缝(有时还有裂缝),以及由于道路养护不善,在胀缩缝密封胶脱落处或在路面板与路肩的交界处的一些自由边缘,由于路基没有设置排水系统,降水会沿缝隙下渗,并积滞在上述脱空区内。在重载车辆的作用下,车轮使得后板回弹时形成真空,这种负压进一步将水泵入业已形成的原始空隙中,随着砼板下水的累积,基础材料趋向于自由水饱和状态,开始表现为少量的冒水现象;在重型车频繁的作用下,移动荷载引起的水动压力,使得某些未经处治的细粒料和联结较弱的胶结料受到冲刷,并随着水的被挤出而被带出。这些悬浮的液体从路面板的接缝或裂缝处喷出,通常称为唧泥或泵浆。

车轮驶过时,后方板的边缘或角隅向下弯沉,将脱空区内积滞的水挤向前方;而后车轮行驶到前方板上时,又将水挤向后方。积滞水受到挤压的前后流动速度很高,而这样的循环往复,也意味着路基受到不断的冲刷,细粒土不断被带出,造成脱空区不断地

* 收稿日期:2005-07-01;修订日期:2005-09-14

作者简介:韩 西(1964-),男,教授,博士后,主要从事结构动力学分析、振动工程方面研究。

扩大,最终形成板边缘底部的脱空^[2,4]。

文献[5,6]指出了脱空区域的大致形状和规律:水泥砼路面板脱空一般发生在板角和板边处,以板角最为显著;板下脱空区沿板横缝近似对称分布,且为近似的三角楔形体,距板中愈近脱空高度愈小,距板边角愈近脱空高度愈大。

1.2 砼板下脱空的危害

由于板下脱空的存在,致使车辆荷载在板体内产生最大弯拉应力的位置发生了变化,而且产生的最大弯拉应力值随脱空区的范围扩大而急剧增大。唐伯明^[7]在研究中指出,板中荷载下,地基脱空对路表荷载响应的影响较小,但当脱空发生在板的边、角部位时,荷载响应受基础脱空的影响非常显著:当砼板均匀支承时,板角荷载下面板的最大拉应力 $\sigma_{\text{角}}$ 一般仅为板边荷载下板底最大拉应力 $\sigma_{\text{边}}$ 的1/3左右;但当地基局部脱空时, $\sigma_{\text{角}}$ 激增,甚至大于相同脱空尺寸下的 $\sigma_{\text{边}}$ 。因此可以说地基脱空是使用中砼路面板角破坏的一个重要因素。也同时指出,当接缝的传力状况较差时,随脱空尺寸的增大,传荷能力下降很快,这势必影响板的正常和充分使用,使其容易损坏。

赵茂才等^[5,6]通过研究也指出板下脱空的存在及双轴载(重载)和超载汽车的共同作用,是致使脱空路面板产生早期断裂的根本原因。计算表明,对脱空范围超过1.2m的水泥砼路面板,若不进行加固治理,很快就会产生早期断裂。同时也指出,由于板下脱空的存在,水泥砼板的使用寿命也会迅速降低,是导致路面板产生早期纵、横向断裂以及低应力下断裂的重要因素。并通过灵敏度分析发现,板厚的增加能有效延长脱空水泥砼路面板使用寿命,因此建议提高水泥砼路面板的设计厚度。

另外,由于脱空产生的唧泥和错台现象也大大降低了行车的安全性和舒适性。

2 现有脱空检测方法介绍

2.1 基于经验的脱空检测法

在没有专门的仪器设备进行脱空检测时,一般就根据经验对脱空的大致情况进行定性的判断;以及在使用专门设备进行定量判断以指导灌浆时,也依据经验方法对脱空区进行定性地寻找。常用的板底脱空区的判断方法有:①重型车辆通行时,人处于相邻板处能感觉到垂直位移和板块翘动;②板角相邻两条缝的填缝材料产生严重剥落的破坏;③相邻板出现错台5mm以上时,位置较低板一般有脱空存在;④板的接缝和裂缝产生唧泥的位置;⑤板的接缝两侧弯沉差大于0.06mm处;⑥人工使用大锤敲打

板块时有脱空的回响声^[4]。

2.2 基于落锤式弯沉仪(FWD)脱空检测法

早在上世纪70、80年代,国外对刚性路面板下脱空课题的研究颇为重视。文献[8]的研究表明,在当时准确地进行砼板下脱空状况的评定是很困难的,只能从外观调查进行评判。文献[9]指出一般判定地基是否脱空多采用经验方法,文献[10]提出了由板角弯沉断面图进行脱空评定的方法,即由FWD(或其它动力弯沉仪)实测“一定荷载作用下砼路面的板角弯沉,并绘制成弯沉断面图;当实测弯沉值大于标准板角弯沉值时,则认为砼板下存在脱空”;但此方法存在两点不足之处:①标准板角弯沉值难以确定,②如果各接缝的荷载传递情况变化较大时,这一弯沉断面法将导致错误的结论。并且,加拿大的Wu, s-s^[11]的试验研究结果表明:当只用弯沉一个指标来评定脱空时,该方法并不可靠,评定结果与实际情况不一致。

1990年唐伯明^[7]在道路试验槽内制作了三块长300cm,宽250cm,厚18cm,并在板之间设置了拉杆,在板边和板角位置设置了脱空区域。其主要结论为:①随脱空尺寸的增大,实测弯沉值明显增大,但其弯沉盆的形状并无多大变化,随脱空尺寸的增大,整个弯沉盆近似的向下平移、盆变深,即弯沉盆与坐标轴包围的面积不断增大;②地基脱空对路表弯沉盆的影响是显著的,但改变接缝的传力装置(切断传力杆),对弯沉盆有同样的影响效果,可见要将两者的影响区分开来是不容易的。作者通过有限元理论分析,结合FWD在南京机场跑道检测的应用情况,建立了一种简洁实用的脱空评定方法——比较分析法:①进行缝边板角处的FWD弯沉测定,以获取板角弯沉,接缝传荷系数;②根据上述的 δ 、 E 及已知的面板厚度,可求得地基反应模量及接缝的传力杆系数 C_w ,并计算出 K/K_j 之值;如果 $K < K_j$,则说明砼板角下存在脱空,因为大量的试验研究表明:当砼面板均匀支承时,应有 K 接近于 K_j ;③根据 K 、 C_w 及 K/K_j ,可以初估砼路面缝边板角处地基的脱空尺寸。

因此,基于FWD的脱空检测方法,其对应的地基弹性模量的反演成了关键性的问题,它直接影响到对脱空状态的判定。因此,许多学者都在这一领域内开展了一系列的研究工作。

东南大学的张宁^[12]在大量分析缝边、板角实测荷载—弯沉曲线特征的基础上,提出了以传荷状态临界荷载及其对应弯沉为判定指标的脱空评定方法,编制了适合工程实际应用的脱空评定系统软件,并在宁杭公路句容段,应用上述脱空评定系统软件

对其中的几块板进行了评定以检验该软件的实际使用效果;随后,张宁^[13]又以重复荷载下的接缝工作特性为基础,通过对第一传荷状态临界荷载及其对应弯沉影响因素的分析,提出以第一传荷状态临界荷载与对应弯沉为指标的脱空评定模型与评定方法,使评定工作在单板系统基础上进行,排除了接缝传荷状况不确定的影响。最后,给出脱空尺寸与弯沉典型回归关系式,从而能够利用其对水泥砼路面板下脱空进行快速评定。

张建华等^[14]通过对旧水泥砼路面状况调查和检测,应用 FWD 实测弯沉盆,用几种不同的方法来评定砼路面板的脱空状况。评定结果表明,用 FWD 结合有限元分析能对板下地基脱空状况进行较为准确的评定。

姬亦工等^[15]系统地研究了粘弹性层状地基上板的动力响应及结构材料参数识别方法。在一次样条半解析法求解粘弹性地基动力柔度系数的基础上,应用子结构法求解了粘弹性层状地基上板的动力响应。应用快速傅立叶变换将落锤式弯沉仪(FWD)所记录的荷载和时程反应曲线转化为频域内的一系列稳态振动。进而利用系统识别技术在频域内反算结构材料参数。数值分析结果表明,该方法能有效地识别结构参数。

查旭东^[16]根据三层 BP 神经网络模型和弹性层状体系理论,结合 JILS FWD 研究了层状体系路面的模量反算。通过理论和实测弯沉盆的反算,比较了精确网络与噪音网络的反算能力,从而提出了人工神经网络实现模量反算的关键技术。噪音网络与国内外常用反算程序的比较结果表明,神经网络法的反算结果具有良好的精度和可靠性。随后,他根据最优化问题的权值条件^[17],将模量反算转化为非线性映射求零点的问题,结合数值微分计算弯沉对模量的一阶和二阶偏导数,建立了基于同伦方法反算路面模量的数学模型;并采用 LI-YORKE 算法求解微分方程初值问题跟踪同伦曲线,获得模量的反算结果,在此基础上编制了相应的模量反算程序,通过对 3 种路面结构的落锤式弯沉仪(FWD)的实测弯沉盆进行模量反算,并与国内外其它反算程序比较,验证了同伦方法反算结果的精度和可靠性。同时,通过选取不同初始值进行反算比较,验证了同伦方法的大范围收敛性和反算结果的稳定性。结果表明,采用同伦方法进行路面模量反算有效地解决了常规最优化算法的初始值和局部收敛的问题,是一种精度高、速度快、效率高、结果稳定且大范围收敛的模量反算方法。

王陶^[17]利用有限单元法建立了可考虑接缝和

地基脱空的刚性路面位移计算模型。模拟生物进化过程,基于落锤式弯沉仪(FWD)实测板中弯沉盆数据,利用遗传算法建立了反演路面结构层模量的方法,最终提出了判定刚性路面板角(边)脱空面积的迭代方法。

2.3 基于探地雷达(GPR)的脱空检测法

雷达技术在路面厚度探测中的试验研究开始于 90 年代。1992 年 - 1994 年美国联邦公路局(FHWA)组织实施了一项攻关课题研究,名为“战略公路研究计划 - SHRP”;他们对 GPR 在道路工程中的应用进行了深入的研究,在分层探测、路下空洞、道路厚度、覆盖层脱粘、桥面风化等方面获得了成功,由此诞生了高速公路探地雷达,并委托 GSSI 公司开发生产 SIR - 10H 型高速公路地下界面探测雷达。1994 年 W.M. Kim Roddis 等人对美国 Kansas 州的 11 种不同种类的道路用探地雷达进行了分层探测工作,为道路质量评价和道路维护提供了建议,所测结果与 Kansas 交通局对 73 个点钻孔取样的结果相比,偏差仅为 $\pm(5\% - 10\%)$ 。

GPR 工作时,雷达发射机产生高频电磁脉冲的发射信号,发射信号经由空气到达路面时,一部分信号会透射路面继续向下传播,另一部分信号会被路面反射回来。这样,透射的电磁波在路面结构中继续传播,每遇到不同的结构层,就会在层间界面发生透射和反射。各层间界面的反射波即可合成为回波信号,反射回波由雷达接收天线接收,并采用采样技术将其化为数字信号进行处理^[20]。若遇到板下脱空,进行脱空识别主要利用空洞对其反射信号的影响。空洞上下两个表面就构成了两个反射界面:砼 - 空气、空气 - 基层, GPR 确定出两条反射波的时间差即可得到空洞深度,一般在测量路面厚度的时候一并进行检测。

路用雷达(GPR)检测速度可达 80km/h,取样点数按每 0.2m 取一点,一般对路面车道的行车左右轮迹分别进行检测,检测效率相对比较高。在检测过程中,雷达天线不断发射信号并接收反射信号,仪器自动记录测点桩号位置,这些信息均存储在计算机中。但是, GPR 检测结果数据记录的雷达天线发射信号与接收信号的信息需经过专门的雷达软件进行处理,才能得到路面结构层厚度及脱空结果。根据 2001 年 3 月,河南省道路检测中心利用 GPR 对郑汴(郑州 - 开封)高速公路进行了路面检测,除了比较精确地检测路面厚度,也对脱空厚度进行了比较精确地识别,并指出,对脱空的识别,应该进一步定义出脱空边界,使用户能直接得到需处理基层的面积大小^[21]。

此外,文献[22-26]都对探地雷达(GPR)在路面厚度及板下脱空检测方面的应用进行了研究.

3 今后工作展望

现有的脱空方法中,经验法是最简单,也比较容易采用的,但其只是对脱空状态的一种定性的判断;基于 FWD 弯沉数据反演的的方法虽然能够定量地检测脱空区的面积,但其对于处在发展阶段的小脱空区作用还不是很大,并且其检测效率不是很高;基于 GPR 的检测方法,虽然快速,检测效率高,但对于脱空的面积却没有定量的说明,只能指出检测到的某个点所对应的区域存在脱空;基于瞬态瑞雷信号反演的检测,目前也只是对脱空区的一个定性的说明,还达不到指导灌浆的效果;基于频率下降率等模态信息的人工神经网络方法,也处于研究阶段,得到的也是定性意义上的结论,因此作为新一代的技术,某些地方还需要进一步改善与研究.

1)地基脱空是砼路面(道面)的主要破损型式之一,有关脱空的评定应当是砼路面结构评价与修复的重要研究内容,对脱空识别,应该进一步定义出脱空边界,使用户直接得到需要处理的基层面积.

2)应用动力学方法将开辟路面板脱空检测新的途径,如瞬态信号法和模态信息法,虽然目前只得到了定性的结果,但它们已经开创了脱空检测专门化、简便化、普及化的先河,势必成为今后脱空检测方法以及仪器设备开发的一个热点方向.

参考文献:

- [1] 易志坚,唐伯明,李祖伟,等.水泥砼路面面层与基层相互作用引起的基本破坏形式及重要影响[J].重庆交通学院学报,2001,20(增刊):34-37.
- [2] 陆宏锐,孟庆毅.水泥砼路面板下脱空的机理研究[J].森林工程,2000,16(4):57-58.
- [3] 田波.水泥砼路面脱空的检测及对策[J].华东公路,2002,2(1):58-62.
- [4] 黄志坚.水泥砼路面板底脱空区的施工研究[J].交通科技,2004(3):23-25.
- [5] 赵茂才.水泥砼路面板下脱空对使用寿命的影响分析[J].公路交通科技,2004,21(2).
- [6] 谭起民,喻洋.水泥砼路面板下脱空的危害[J].森林工程,2004,20(4):46-47.
- [7] 唐伯明.刚性路面板脱空状况的评定与分析[J].中国公路学报,1992,5(1):40-44.
- [8] Federal Highway Administration, Evaluation On Rigid Pavement Overlay Design Procedures[R]. NO. FHWA/RD-83/090.
- [9] 陶向华.探地雷达(GPR)在路面工程质量检测中的应用[J].郑州工业大学学报,2001,22(4):63-66.
- [10] M.I. Darter et al. Joint Repair Methods for Portland cement pavements[R]. National Cooperative Highway Research Program Report 281,1985.
- [11] Wu.s-s, Concrete Stabilized by Subsenling: A Performance Report, Transportation Research Record[R]. Transportation Research Board No.1307,1991.
- [12] 张宁.水泥砼路面脱空评定系统[J].华东公路,1997,(6):32-35.
- [13] 张宁.水泥砼路面板下地基脱空状况的评定与分析[J].公路交通科技,2004,(01).
- [14] 张建华.用 FWD 进行板下地基脱空状况的评定[J].湖南交通科技,2003,29(1):113-114.
- [15] 姬亦工.基于落锤式弯沉仪(FWD)动态数据的路面模量反演方法[J].土木工程学报,2002,35(3):31-36.
- [16] 查旭东,王秉纲.基于人工神经网络的路面模量反算[J].交通运输工程学报,2002,2(2):12-15.
- [17] 查旭东,王秉纲.基于同伦方法的路面模量反算研究[J].中国公路学报,2003,16(1):1-5.
- [18] 王陶.基于遗传算法的刚性路面脱空判定[J].中国公路学报,2003,16(3):23-26.
- [19] AASHTO. Guide for design of pavement structures[S]. Washington DC; American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- [20] 龚佑清.探地雷达在旧路评定中的应用[J].公路与汽运,总第 93 期:43-45.
- [21] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [22] 吕绍林,戴前伟.高速公路路面厚度的快速无损检测[A].1999 年中国地球物理学会会刊[C].合肥:安徽科学技术出版社,1999.
- [23] 杨天春,吕绍林,伍永贵.地质雷达检测道路结构的理论及应用分析[J].中南工业大学学报,2001,32(2):118-121.
- [24] 吕绍林,戴前伟,杨天春.雷达检测高速公路路面厚度研究[A].何继善.防灾减灾工程理论与实践[M].长沙:中南工业大学出版社,2001:29-32.
- [25] CHEN Yu, ZHANG Qi-sen, Application of functional-link neural network in evaluation of sublayer suspension based on FWD test, J. CENT. SOUTH UNIV. TECHNOL., 2004,11(2).
- [26] 林允聪.透地雷达检测路面脱空与灌浆加固的应用效果[J].物探与化探,2001,25(3):231-235.

(下转 101 页)

6 结 语

为了提高评价精度,可以在选取公因子时,使累计贡献率(中心化处理后的指标数据矩阵的特征值从大到小的累计值与评价指标个数的比值)接近100%.

参考文献:

- [1] 刘运通.道路交通安全指南[M].北京:人民交通出版社,2004,119,119-126,128-142.
- [2] 任福田,刘小明.论道路交通安全[M].北京:人民交通出版社,2001,166-171.
- [3] 朱顺应,王 红.公路网规划技术评价指标相关性分析[J].系统工程理论与实践,2002,22(12):131-135.
- [4] 朱顺应,王 红.公路交通与经济发展适应性客观模糊评价[J].重庆交通学院学报,2004,23(1):36-41.
- [5] Richard A. Johnson and Dean W. Wichern.实用多元统计分析[M].北京:清华大学出版社,2001,388-425.

A kind of factor analysis method to road safety evaluate

ZHU Shun-ying, WANG Hong

School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: To improve precision in road traffic safety macroscopic evaluation, the relativity among the chosen evaluation indexes should be avoid; and to avoid the subjectivity, the impersonal weight as the importance of different indexes should be done. The paper discussed that it regarded common factor in factor analysis method as replaced indexes and the scored value as the new indexes' values. So the new index weights were calculated according to the explained extent of original evaluation data. Then objective evaluation was done with linear weight method to what we would evaluate. At last, we made a contrast with other methods and studied the application, and discovered different conclusions compared with other methods.

Key words: road safety evaluation; factor analysis method; objective weight

(上接 76 页)

Review for void detective methods of the concrete pavement

HAN Xi, CHEN Shang-jun, ZHONG Li, WANG Qi

Department of Bridge & Structure Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: The causes and harm of void in the cement concrete pavement were analyzed in this paper. The work principle and application of some the pavement void detective methods such as FWD (Falling weight deflectometer) and GRP (Ground penetrating radar) being widely employed at present were summarized. The neural network technique based on frequency descent rate having advantage in detection the pavement void was discussed. It was also given that remarkable success of transient vibration was used in detection the pavement. The prospect of various methods being used in nondestructive detection the pavement was set forth at last.

Key words: cement concrete pavement; void; detection