

基于有限元计算的 水泥路面板底脱空评定指标研究

黄万坦 魏为成

招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067

摘要: 采用 PFWD 检测了水泥混凝土路面板不同位置处的实际弯沉值, 根据横缝不设传力杆的高速公路水泥混凝土路面板脱空发展的一般规律, 确定了板中不脱空对应的弯沉值。通过三维有限元模拟计算, 分析了在不同脱空尺寸下不同位置的理论弯沉, 得到脱空面积与弯沉值的回归计算式, 最终确立了板边、板角脱空的弯沉指标。

关键词: 水泥混凝土路面; 脱空评定; 手持落锤式弯沉仪; 弯沉检测

中图分类号: U412

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2012)03-0021-05

Study on Void Evaluation Index Beneath Concrete Slabs Based on the Finite Element Method

HUANG Wan-tan WEI Wei-cheng

China Merchants Chongqing Communications Research &

Design Institute Co. Ltd, Chongqing 400067, China

Abstract: The deflections at different positions of a cement concrete slab were detected by utilizing PFWD, and based on the general progression law of the voids beneath the cement concrete slabs without dowel bars, the center deflection of a slab without void was determined. By using the finite element method, the deflections at different positions with different void sizes were systematically analyzed, and the authors established the formulas of the void area and deflection, eventually determined the deflection indexes of the slab corners, and edges, for void evaluation.

Key words: Concrete pavement, void evaluation, portable falling weight deflection(PFWD),

收稿日期: 2011-08-31.

作者简介: 黄万坦(1981-), 男, 壮族, 广西德保县人, 本科, 招商局重庆交通科研设计院有限公司工程师, 主要从事道路设计及科研工作。

deflection detection

0 引言

在旧水泥混凝土路面上直接加铺沥青罩面层是改善行驶性能的一种技术手段。但当水泥混凝土板底存在脱空时，在荷载作用下接缝位置处加铺层底将产生应力集中，加快了反射裂缝的发生和发展，最终将导致沥青加铺层过早地开裂、破坏。因此，对于加铺前的水泥混凝土路面，如能评判出板下脱空的位置和面积，在加铺前采取有效的修复措施，可阻止此类病害的发展^[1-8]。

良好的脱空处治效果是建立在对脱空面积和尺寸的准确判定基础之上的，而在现有的研究中，对脱空的具体指标研究较少，为此本文基于实测弯沉和有限元计算，对不同位置处的脱空弯沉指标展开研究。

1 弯沉检测方案

1.1 弯沉检测设备

手持式落锤弯沉仪简称 PFWD，可以用来进行路基、地基、场地等基础填筑表面动力承载能力试验检测。与常规拖车式落锤弯沉仪，也就是简称的 FWD 相比，PFWD 具有更加方便、快速的优点，能够进行路基模量的快速无损检测。因为，水泥混凝土路面模量大，为了提高水泥路面弯沉相对于荷载响应的敏感度，确保测量结果的准确性^[3-6]，需要提高动荷载的标准锤的重量。经过查阅相关资料，将标准锤重由 10 kg 增大至 20 kg，当标准锤落下时作用于路面的是形式为半正弦波的圆形均布冲击荷载，其直径为 30 cm，持续作用时间为 25 ms。冲击荷载作用示意如图 1 所示。

1.2 弯沉检测方案

采用 PFWD 检测水泥混凝土路面板弯沉时主要包括三个步骤，概括为板块编号、实际测试和数据采集。鉴于使用 PFWD 检测的便利性，为了丰富采集数据的内容，并达到充分对混凝土板不同位置

的脱空情况充分了解的目的，对混凝土板进行多位置多点弯沉检测。检测位置如图 2 所示，包括板中、板角和板边共计 9 个点的弯沉测试。

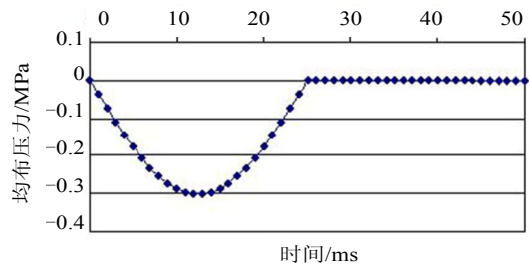


图 1 PFWD 脉冲荷载作用图式

Fig. 1 Pulse load schema of PFWD

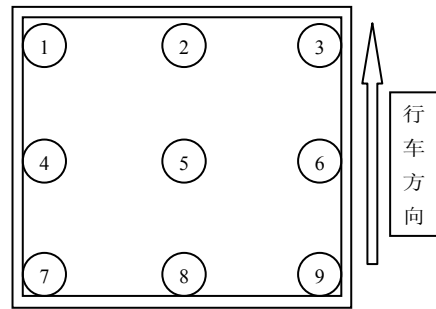


图 2 PFWD 弯沉检测测点布置示意

Fig. 2 Deflection measuring point settlement of PFWD

此外，为了提高检测数据的准确性并保证有较高的可靠度，对同一点需要进行 3-4 次的检测，并去掉首次检测的数据，且对余下数据取平均值，以降低整体测量的误差。

2 路面板底脱空指标分析

2.1 板底脱空发展一般规律

根据已有研究成果^[3]，不设传力杆水泥混凝土路面板底脱空基本规律是：板角最容易脱空，沿着行车方向的前板板底脱空区小于后板；板边脱空发展滞后于板角，并且横向板边脱空区大于纵向板边；除板块断裂外，板中基本不脱空。

2.2 板中弯沉统计分析

对检测的 216 块路面板板中的弯沉数据进行统

计分析，做出相应的分布范围和累积频率图，如图 3 所示。

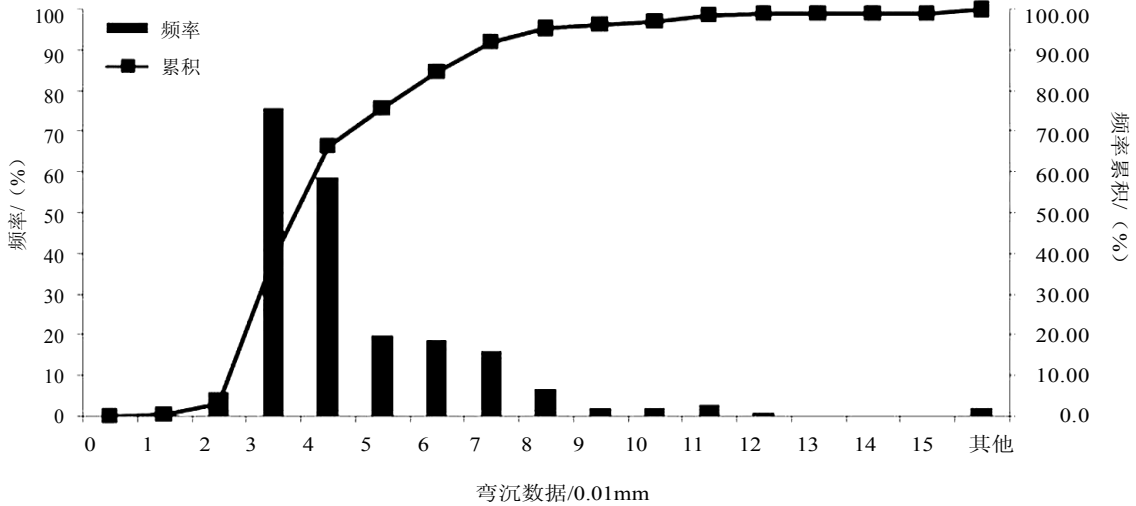


图 3 板中弯沉实测数据频率分布和累计分布

Fig. 3 Measured data frequency distribution and cumulative distribution of the deflection of the plates

从累计分布曲线可以看出，95%的板中实测弯沉数据小于 8 (0.01mm)，而板中弯沉大于 8 (0.01mm) 的板块都是断板。因此，可初步确定板中不脱空对应弯沉为 8 (0.01mm)，以此为基础通过反复试算，确定用于板边板角弯沉分析的有限元模型。

2.3 板底脱空评定的力学模型

2.3.1 假设条件

力学建模分析的假设条件如下^[8]：

(1) 板中不脱空，板中弯沉是路面结构整体强度的反映；

(2) 板角是脱空最容易发生的区域，板边次之，板角和板边的弯沉是路面结构强度和脱空严重程度的反映；

(3) 温度对水泥路面路表弯沉的影响很小，可以忽略；

(4) 同一路段、同一板块的路面各结构层强度是一样的，忽略施工等原因造成的强度差异。

2.3.2 有限元模型

(1) 依托工程概况

本研究以界首-阜阳-蚌埠高速公路为依托工程。界阜蚌高速公路全长 187 km。是皖西北地区重要的东西向干线公路，东与合徐高速公路相接，西连河南漯河-界首高速公路，是我国中西部地区通往东部沿海地区的又一条大动脉。

(2) 路面结构及参数模型

根据界阜蚌高速公路旧水泥混凝土路面钻芯检测的结果，结合原始设计资料，并《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002) 的要求为参照标准，提出最终的有限元分析模型如图 4 所示。

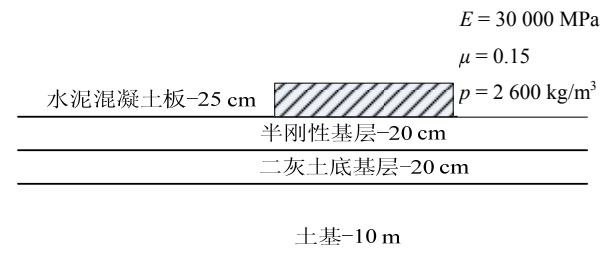


图 4 路面结构尺寸及材料参数

Fig. 4 Dimensions and material parameters of the pavement structure

(3) 水泥混凝土面板平面尺寸模型

力学建模分析时，模型越大边界引起的计算误差就越小，但计算工作量也成倍增加；模型尺寸选择过小，则可能会导致分析模型严重失真，计算得出的结果不具有任何的参考意义。因而，在选择模型尺寸时，要综合考虑计算工作量和分析模拟的准确性。通过对不同平面尺寸的模型分别进行试算，最终确定了分析所采用的平面尺寸为 10 m×20 m，模型的平面尺寸布置如图 5。

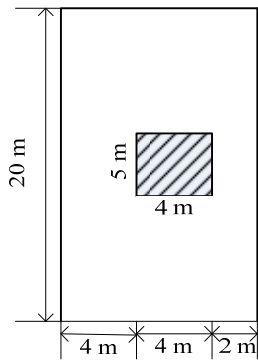


图 5 路面模型平面尺寸

Fig. 5 Plane dimension of the road model

根据旧路路况调查的结果，界阜蚌高速公路一期工程路面板尺寸为 5m×4m 和二期工程路面板尺寸为 5m×4.5m 两种。为了使计算结果具有普遍性，在对有限元分析时水泥混凝土路面板尺寸采用一期工程的 5m×4m 尺寸。

(4) 荷载模型

PFWD 作用的脉冲荷载模型如图 1 所述。

(5) 边界条件、接触状态和单元格模型

由于模型平面尺寸较大，同时为了与实际路面结构受力状态相符，模型的边界条件为：模型底部所有自由度全部约束，模型的前后端面约束 X 方向位移，模型的一个侧面，约束 Y 方向的位移。

接触状态为：各结构层之间是连续的。

由于力学模型用于路面弯沉分析的，关注变量是模型的最大位移，而不用过多的关注模型的应力状态，采用三维八节点线性减缩积分单元 (C3D8R)，既能保证位移计算的精度，又能大幅降

低计算的工作量，从而提高计算分析的效率。

2.4 板边弯沉有限元计算分析

根据板中弯沉分析确定的有限元模型，计算分析了不同脱空尺寸组合下的板边理论弯沉，如表 1 所示：

表 1 板边弯沉分析结果

脱空尺寸 (宽×长) / m	弯沉 / 0.01mm
0.14×0.14	14.2
0.28×0.14	15.1
0.14×0.28	15.1
0.28×0.28	15.1
0.42×0.14	15.6
0.28×0.42	15.7
0.42×0.42	15.9

对板边弯沉和脱空尺寸进行回归分析得到两者之间的线性回归关系式，相关系数大于 0.96，相关性良好，如图 6 所示：

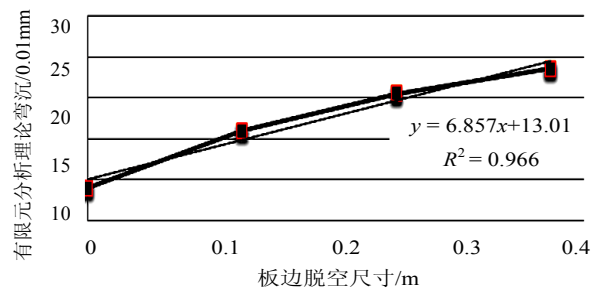


图 6 板边脱空尺寸-理论弯沉关系

Fig. 6 Relationship between board side void size and the theoretical deflection

图 6 表明，当板边不脱空时，板边理论弯沉为 13.01 (0.01mm)。

2.5 板角弯沉有限元计算分析

同理，通过有限元计算得到不同脱空尺寸组合下的板角理论弯沉如表 2 所示。

由此得到板角弯沉和脱空尺寸的线性回归关系式，相关系数达到 0.988，具有较好的相关性，如图 7 所示：

表2 板角弯沉分析结果

脱空尺寸 (高×宽×长)/m	理论弯沉 (0.01mm)
0.5×0.14×0.14	19.95
0.5×0.28×0.28	22.19
0.5×0.42×0.42	25.88
0.5×0.56×0.56	28.93

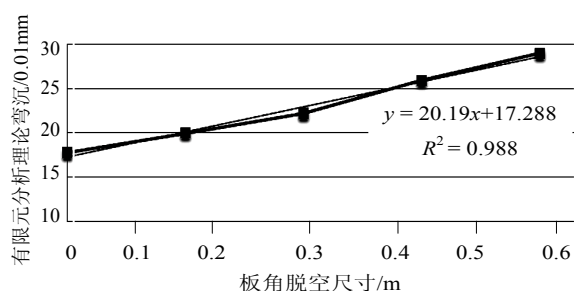


图7 板角脱空尺寸-理论弯沉关系

Fig.7 Relationship between plate angle void size and the theoretical deflection

图7表明,当板底不脱空时,板角理论弯沉为17.29 (0.01mm)。

通过板中弯沉实测及有限元模拟计算,得出板中、板边和板角脱空的弯沉指标分别为8.0、13.01和17.29 (0.01mm)。目前资料表明,PFWD弯沉测

试不可避免存在一定的误差,但是,总体变异系数都可以控制在10%以内,因此,本研究最终确定板中、板边和板角脱空的弯沉指标分别为9.0、13.5和18.0 (0.01mm)。当采用PFWD测得板中、板边和板角的弯沉值分别大于所确定的相应指标时,可以认为在这些位置处水泥混凝土板底存在脱空现象。由于PFWD检测弯沉值快速简便,而且本研究所确定的弯沉值和板底脱空尺寸之间具有较好的相关性,因此本研究所确定的脱空指标具有较高的工程实际应用价值。

3 结论

(1)通过对界阜蚌高速水泥混凝土路面板中、板边和板角弯沉的分析,板中、板边和板角的脱空发展程度是各不相同的,板中一般不脱空,板角最容易脱空;对于不同位置的板边和板角,其脱空程度与行车荷载的反复作用位置和方向有密切关系。

(2)根据水泥混凝土路面的脱空规律,应用数理统计方法可确定出板中不脱空对应的临界弯沉,由此确定有限元分析模型推导出板边和板角的临界弯沉,并通过实测弯沉大致推断脱空面积。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张娟, 张留俊, 尹利华. 水泥混凝土板底脱空检测方法研究[J]. 公路, 2008, 7(7): 101-103.
- [3] 周玉明, 谈至明, 刘伯莹. 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(3): 341-345.
- [4] 薛忠军, 王佳妮, 张肖宁等. 动荷载作用下板底脱空对水泥板弯沉的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 37-41.
- [5] 邱丽章, 王端宜. 水泥混凝土路面板底脱空的弯沉判别研究[J]. 公路, 2006, 11(11): 5-9.
- [6] 张宁, 钱振东, 黄卫. 水泥混凝土路面板下地基脱空状况的评定与分析[J]. 公路交通科技, 2004, 21(1): 4-7, 21.
- [7] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.
- [8] 陈文, 廖卫东, 朱继东等. 旧混凝土路面板底脱空的有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(12): 23-25.

(中文编辑: 吴继屏)