

# 同板动弯沉差脱空判别方法和标准

王芳, 王选仓, 刘凯

(长安大学公路学院, 西安 710064)

**摘要:**针对目前脱空判别方法在实际工程应用中的不足,为了准确定量地判定水泥板底脱空,提出了采用同板板边中点—板中弯沉差和板角—板中弯沉差为判别指标的脱空判定方法。采用 ANSYS 有限元法建立了板边脱空和板角脱空三维模型,模拟 FWD 加载效果,计算了在不同脱空深度、脱空面积和传荷能力下的板边中点、板中、板角弯沉值,得出了板边、板角与板中的弯沉差范围;以烟威高速公路为依托,对 FWD 弯沉检测数据进行统计分析,参考理论计算和钻芯取样结果,给出了同板弯沉差判别标准和传荷能力修正系数,并通过试验路验证了所提标准的可行性,结果表明:ANSYS 有限元理论模拟值符合工程实际,所提标准板边弯沉差的准确度为 88.5%,板角弯沉差的准确度为 84.6%。该方法是在同一条件下进行分析评定,消除了大部分弯沉影响因素引起的变异性,可以分级评定脱空严重程度,更好地指导水泥路面养护维修。

**关键词:**水泥路面;动弯沉差;脱空;判别方法;有限元法

**中图分类号:**U416.216 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0075-08

## Determination Method and Criterion for Voids by Dynamic Deflection Difference in the Same Cement Slab

WANG Fang, WANG Xuan-cang, LIU Kai

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064)

**Abstract:** Aiming at the lack of the current determination method for voids in practical engineering applications, in order to accurately quantify the voids beneath cement slab, the determination method was proposed with slab edge - slab center deflection difference and slab corner - slab center deflection difference in the same cement slab for voids. Three-dimensional models were set up using the ANSYS finite element method for voids beneath slab corner and slab edge. And the load was simulated with FWD test results. Thereafter, the deflection values were calculated in slab center, slab corner, slab edge under different void depth, void area and load transfer capacity. And the range of deflection difference was obtained. With Yantai-Weihai expressway, detection data for deflection using Falling Weight Deflectometer were statistically analyzed. And the criteria and correction factors of load transfer capacity were given with simulation and samples analysis. The feasibility of criteria was verified by actual test data. It is found that the simulation values and the test values are in good agreement. The accuracy of void determination by slab edge - slab center deflection difference and slab corner - slab center deflection difference are 88.5% and 84.6%, respectively, which meet the engineering requirements. The voids were determined under the same

收稿日期:2009-11-27

基金项目:国家交通部西部交通建设科技项目(200531881213)

作者简介:王芳(1983-),女,博士生,主要从事道路工程研究,(E-mail)wf7110807@163.com。

王选仓(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)wxc2005@163.com。

conditions with the elimination of deflection variability.

**Key words:** cement pavements; dynamic deflection difference; voids; determination methods; finite element method

脱空是水泥混凝土路面的主要破坏形式,对水泥路面板的受力极为不利,脱空后路面会迅速断裂、破碎,影响行车质量,缩短路面使用寿命<sup>[1-2]</sup>。因此,准确、定量的判定脱空状况是对脱空板体进行处治的重要的前期工作,直接关系到处治的质量和效益。应用落锤式弯沉仪 FWD 作为无损检测设备在水泥路面板底脱空评定中已取得了很多成果,例如美国国家协作公路研究计划提出的板角弯沉图法<sup>[3-4]</sup>、Shahin M Y 提出的比较分析法<sup>[5]</sup>、AASHTO 设计体系的截距法<sup>[6]</sup>、张起森提出的弯沉盆变算法<sup>[7]</sup>,这些方法过于经验化,受弯沉检测变异性的影响较大;基于弯沉指数的判别方法<sup>[8]</sup>、模量反算法<sup>[9-12]</sup>、模糊评定法<sup>[13]</sup>、神经网络法<sup>[14]</sup>等,这些方法计算复杂,不利于实际操作。规范<sup>[15]</sup>中仅给出了贝克曼梁弯沉检测的判别标准,且以上方法在实际工程中都存在一定的不足,因此需对脱空评定方法进一步研究。该文根据弹性地基理论计算和现场实测数据,提出采用同一块水泥板的板边中点或板角与板中的弯沉差进行脱空判别的方法,并通过大量实测弯沉数据和现场钻芯取样,进行修正。

## 1 同板弯沉差脱空判别方法的提出

弯沉检测经验和研究表明:水泥混凝土路面结构、水泥混凝土板厚度、相邻板体的传荷能力、基层的强度及类型、边坡坡度、测试季节、测试时间等因素对弯沉的影响非常大,致使弯沉值变异性很大。由此可见,仅采用单个弯沉值作为判别脱空的依据是不准确也不科学的,它随着各影响因素而变化。

但如果采用同一水泥混凝土板的板边或板角与板中弯沉差进行比较分析来评定路面板脱空状况,显然可以消除上述部分因素的影响,例如路面结构、板厚、基层强度及类型、边坡坡度等,若标准制定中考虑传荷能力的影响,则采用同板板边中点或板角与板中弯沉差来判定脱空的准确性和有效性更高,其基本原理为当实测板边中点或板角与板中弯沉差大于理论计算值时,即认为存在板底脱空,如图 1。同板弯沉差可表示为:

$$\Delta W_{\text{边}} = W_{\text{边}} - W_{\text{中}} \text{ 或 } \Delta W_{\text{角}} = W_{\text{角}} - W_{\text{中}} \quad (1)$$

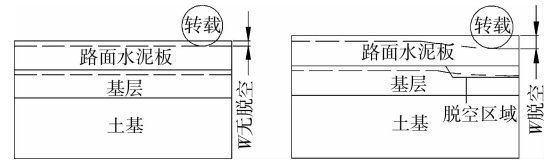


图 1 脱空判别示意图

制定此方法的判别标准,首先选择一段典型路段,采用落锤式弯沉仪分别加载检测该路段板边中点、板角和板中弯沉值,根据式(1)计算同板弯沉差  $\Delta W_{\text{边}}$  和  $\Delta W_{\text{角}}$ ,综合考虑路面调查的唧泥、错台、裂缝、板角破碎情况,并选择部分代表性板块进行钻芯或雷达检测修正,从而更加准确的判定此处的脱空状况,通过理论计算和实测数据分析,给出该路段的弯沉差判别标准。

## 2 基于弯沉理论计算的脱空判别标准

据调查,脱空一般发生在横缝边、板角隅处,故分脱空发生在板边与板角 2 种情况讨论。根据弹性地基上有限尺寸薄板理论,视路面结构为弹性层状体系,建立空间三维模型,进行有限元计算。1)采用烟台-威海高速公路的路面结构,面板  $5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,厚度  $24 \text{ cm}$ ,材料参数选取参考相关规范<sup>[16]</sup>,见表 1,土基采用扩大基础,4 个方向分别向外扩大  $1 \text{ m}$ 。2)接缝宽度  $10 \text{ mm}$ ,厚度同水泥板厚,采用不同模量的虚拟接缝材料来模拟<sup>[17]</sup>,用接缝两侧相邻弯沉的比值定义。3)荷载模拟 FWD 的实际检测效果,重锤质量  $200 \text{ kg}$ ,承载板直径为  $30 \text{ cm}$ <sup>[15]</sup>,将 FWD 圆形均布荷载等效为  $26.6 \text{ cm} \times 26.6 \text{ cm}$  的正方形,轮胎压力  $P = 0.7 \text{ MPa}$ 。荷载分别作用在板中、横缝边中部、板角。4)取脱空深度分别为  $0.2 \text{ mm}$ 、 $0.4 \text{ mm}$ 、 $0.6 \text{ mm}$ 、 $0.8 \text{ mm}$ 、 $1.0 \text{ mm}$ 、 $5.0 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm}$ 、 $15 \text{ mm}$ 。5)板边脱空模型为长方体,沿行车方向的脱空长度是垂直于行车方向的一半(见图 2,  $L_2$  的长度是  $L_1$  的一半),脱空沿板长长度  $L_2$  分别为  $20 \text{ cm}$ 、 $40 \text{ cm}$ 、 $60 \text{ cm}$ 、 $80 \text{ cm}$ 、 $100 \text{ cm}$ 。6)板角脱空模型为等腰直角三角形棱柱(见图 3),直角边长  $L_1$  分别为  $30 \text{ cm}$ 、 $60 \text{ cm}$ 、 $90 \text{ cm}$ 、 $120 \text{ cm}$ 、 $150 \text{ cm}$ 。

表 1 有限元计算参数

结构层	厚度/ m	弹性模量 / MPa	泊松比	温度梯度 / ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	导热系数 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	线膨胀系数 / ( $1 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
水泥板	0.24	30 000	0.15	-0.3	2.0	$1.0 \times 10^{-5}$
水泥稳定碎石	0.30	1 000	0.30	-0.02	1.4	$1.0 \times 10^{-5}$
土基	9	100	0.35	—	1.0	$0.5 \times 10^{-5}$

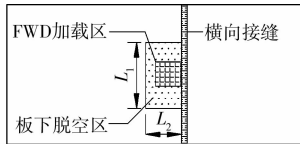


图 2 板底脱空计算模型

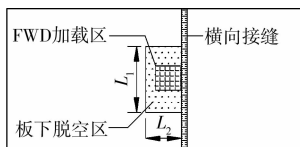


图 3 板角脱空计算模型

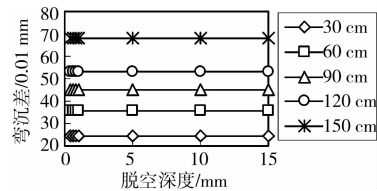


图 4 板角弯沉值与脱空深度的关系曲线

计算不同脱空深度、面积和传荷能力的板中弯沉  $W_Z$ 、板边中点弯沉  $W_B$ 、板角弯沉  $W_J$  和两者之差  $\Delta W_{BZ}$ 、 $\Delta W_{JZ}$ 。图 4 是板角脱空,传荷能力为 0,5 种脱空面积的脱空深度与弯沉关系图。

由图 4 可见,脱空深度对弯沉的影响很小,这是因为板底脱空,水泥板近似于悬臂梁,水泥板受力处于非接触状态,在施加相同荷载作用时,不管板底脱空深度有多深,水泥板的竖向变形不变,所以脱空深度对弯沉值几乎没有影响。鉴于此,在计算过程中选取脱空深度为 10 mm,板边脱空、板角脱空时不同传荷能力的弯沉值见表 2、表 3。

表 2 板边脱空时弯沉计算值/0.01 mm

脱空面积/ $\text{cm}^2$	传荷能力	0	30%	55%	80%	90%	100%
0	$W_Z$	17.42	17.78	18.03	18.20	18.27	18.34
	$W_B$	27.96	25.47	24.08	23.80	23.60	23.38
	$\Delta W_{BZ}$	10.53	7.69	6.05	5.59	5.33	5.04
$20 \times 40$	$W_Z$	18.42	18.82	19.11	19.32	19.28	19.36
	$W_B$	34.86	31.54	29.76	28.98	28.82	28.36
	$\Delta W_{BZ}$	16.44	12.72	10.65	9.65	9.54	9.00
$40 \times 80$	$W_Z$	18.49	18.86	19.16	19.36	19.30	19.43
	$W_B$	39.40	36.16	33.90	33.02	32.49	32.31
	$\Delta W_{BZ}$	20.91	17.30	14.73	13.66	13.19	12.88
$60 \times 120$	$W_Z$	18.61	19.01	19.34	19.55	19.48	19.59
	$W_B$	46.36	41.11	39.57	38.66	37.85	37.04
	$\Delta W_{BZ}$	27.74	22.10	20.23	19.11	18.37	17.45
$80 \times 160$	$W_Z$	18.83	19.24	19.59	19.78	19.74	19.82
	$W_B$	53.69	47.90	45.48	43.67	43.13	42.10
	$\Delta W_{BZ}$	34.86	28.67	25.89	23.89	23.39	22.28
$100 \times 200$	$W_Z$	19.05	19.44	19.82	19.99	19.94	20.05
	$W_B$	59.03	51.93	49.07	47.50	46.64	45.98
	$\Delta W_{BZ}$	39.98	32.49	29.25	27.52	26.69	25.93
$150 \times 300$	$W_Z$	19.24	19.63	20.02	20.19	20.14	20.25
	$W_B$	82.64	72.70	68.70	64.61	64.36	62.07
	$\Delta W_{BZ}$	63.40	53.07	48.68	44.42	44.22	41.82

表 3 板角脱空时弯沉计算值/0.01 mm

脱空面积/cm <sup>2</sup>	传荷能力	0	30%	55%	80%	90%	100%
0	$W_z$	17.42	17.78	18.03	18.20	18.27	18.34
	$W_j$	36.92	34.29	32.35	30.77	30.05	29.53
	$\Delta W_{JZ}$	19.49	16.51	14.32	12.56	11.79	11.19
1/2×30×30	$W_z$	17.71	17.82	17.99	18.34	18.46	18.65
	$W_j$	42.11	37.51	35.56	34.06	33.64	32.91
	$\Delta W_{JZ}$	24.40	19.69	17.57	15.72	15.18	14.26
1/2×60×60	$W_z$	17.80	17.87	18.08	18.40	18.52	18.71
	$W_j$	53.50	49.04	46.99	44.82	43.65	42.29
	$\Delta W_{JZ}$	35.69	31.16	28.91	26.42	25.13	23.58
1/2×90×90	$W_z$	17.89	17.93	18.13	18.45	18.63	18.76
	$W_j$	62.78	56.03	53.09	50.12	49.93	48.82
	$\Delta W_{JZ}$	44.89	38.10	34.95	31.67	31.30	30.05
1/2×120×120	$W_z$	17.98	18.04	18.19	18.51	18.72	18.88
	$W_j$	70.95	63.11	59.69	56.65	56.03	55.05
	$\Delta W_{JZ}$	52.97	45.07	41.50	38.14	37.31	36.17
1/2×150×150	$W_z$	18.07	18.17	18.28	18.65	18.77	18.96
	$W_j$	86.43	78.19	72.64	68.69	68.21	67.12
	$\Delta W_{JZ}$	68.37	60.02	54.36	50.04	49.44	48.15

可见,板边未脱空时弯沉差小于 10(0.01 mm),板角未脱空时弯沉差小于 20(0.01 mm)。弯沉值与传荷能力之间呈指数关系,不同传荷能力之间弯沉差的倍数关系见表 4。因为随着传荷能力的变化,板中弯沉值的变化不大,而板角弯沉值比板边中点弯沉值在数值上和变化趋势上都较大,故不同传荷能力的板角一板中弯沉差的倍数比板边中点一板中弯沉差的倍数大。由于脱空面积和脱空深度是吻合的,脱空较轻时,脱空深度较小,脱空面积也较小,弯沉和应力较小,对水泥路面的使用影响很小,而重度脱空时,脱空面积和深度都较大,在荷载和温度作用下,水泥板会发生断板危害。根据钻芯取样结果,将板边脱空面积小于  $60 \times 120 \text{ cm}^2$ ,板角脱空面积小于  $1/2 \times 60 \times 60 \text{ cm}^2$  定为轻度脱空,脱空面积超过  $150 \times 300 \text{ cm}^2$  及  $1/2 \times 150 \times 150 \text{ cm}^2$  定为重度脱空,介于两者之间的为中度脱空。由表 2、3 可见,传荷能力为 0 时,板边中点一板中弯沉差分别为:轻度脱空 10~27(0.01 mm),中度脱空 27~40(0.01 mm),重度脱空  $>40(0.01 \text{ mm})$ ;板角一板中弯沉差分别为:轻度脱空 20~35(0.01 mm),中度脱空 35~53(0.01 mm),重度脱空  $>53(0.01 \text{ mm})$ 。其他传荷能力的弯沉差范围可按表 4 的倍数关系推算。

表 4 不同传荷能力之间弯沉差的倍数关系

传荷能力	0	30%	55%	80%	90%	100%
板边一板中弯沉差倍数	1.00	0.80	0.70	0.65	0.63	0.60
板角一板中弯沉差倍数	1.00	0.85	0.77	0.70	0.67	0.65

### 3 基于实测 FWD 动弯沉值的脱空判别标准

对烟台—威海高速公路 K176+650~K178+550 段行车道,采用 Dynatest 8000 型落锤式弯沉仪 FWD 进行弯沉检测,见图 5。烟威高速公路为双向 4 车道,根据实际调查,板边脱空一般发生在行车道板底,超车道板底相对较少;板角脱空大多发生在与纵缝相邻的超车道和行车道板底,而发生在接近中间带的超车道板角、或接近停车道的行车道板角底部的可能性极小,故选取检测点位为同板板中、板边、板角及邻板板边,见图 6。分别在各个测点启动落锤装置,测定该点的弯沉值,即 FWD 的  $D_0$  值。板边脱空时,FWD 可依次连续测量各个板的板中(测点 1)弯沉值和板边中点(测点 2)弯沉值,测定板角(测点 3)弯沉值时 FWD 需同时位于超车道和行车道上,测试期间注意控制和尽可能少影响交通。板中作为不脱空点,分析它与同板板边、板角的弯沉

差,再考虑传荷能力的影响,以此作为板底是否脱空判别的依据。例如,分别施加荷载测得板 1 的测点 1、2、3 的弯沉值  $W_{11}$ 、 $W_{12}$ 、 $W_{13}$ ,计算同板板 1 的弯沉差  $W_{12} - W_{11}$  和  $W_{13} - W_{11}$ ,即为同板板边或板角与板中的弯沉差。图 6 仅为示意图,实际测试过程中先用经验法判断是否存在脱空,再选择测试位置;若某一混凝土板有两个板角处出现脱空,则依次判定,板边脱空判定类推。

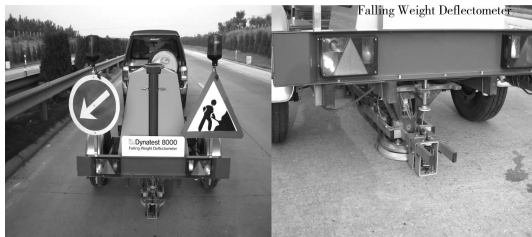


图 5 动弯沉检测照片

### 3.1 接缝传荷能力判定

按照设计规范<sup>[16]</sup>规定,根据接缝两侧边缘的实测弯沉值计算接缝的传荷系数,分为 4 个等级,见表

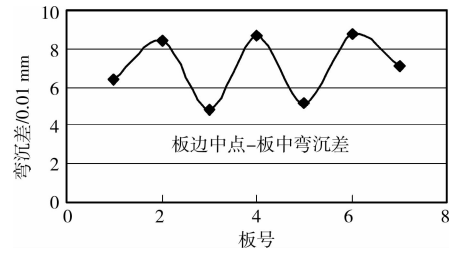


图 6 弯沉检测位置图

5。将荷载施加在邻近接缝的路面表面(图 6 中板 1 测点 2 上),在板 2 的测点 2 上布置传感器,测定接缝两侧板 1 测点 2 和板 2 测点 2 的弯沉值  $W_{12}$  和  $W_{22}$ ,即 FWD 的  $D_0$  值和  $D_{30}$  值(距荷载中心 30cm 处的传感器读数),  $W_{22}/W_{12} = k_1$ ,即为板 1 的接缝传荷系数。检测结果见表 6,经统计有 75% 的板传荷能力为中,25% 为次。

表 5 接缝传荷能力分级标准

等级	优良	中	次	差
接缝传荷系数 $k_j/\%$	>80	56~80	31~55	<31

表 6 接缝传荷能力汇总表

板号	传荷能力/%	评价	板号	传荷能力/%	评价	板号	传荷能力/%	评价
B107	73.91	中	B125	27.63	次	B138	42.86	次
B108	70.00	中	B126	64.29	中	B144	62.16	中
B109	66.67	中	B129	70.83	中	B145	72.00	中
B110	64.00	中	B130	56.86	中	B149	66.67	中
B111	68.18	中	B131	42.86	次	B150	52.46	次
B112	70.59	中	B132	47.83	次	B151	59.38	中
B113	61.54	中	B133	77.50	中	B152	65.38	中
B117	60.53	中	B134	54.29	次	B156	61.11	中
B118	56.82	中	B135	48.68	次	B157	61.36	中
B119	33.33	次	B136	63.89	中	B160	47.17	次
B121	59.26	中	B137	68.42	中	B161	59.21	中
B122	57.14	中						

### 3.2 动弯沉检测分析

#### 1) 未脱空板实测弯沉值分析

非脱空板为 B107—B113,传荷能力均为中,板中弯沉值在 17.6~28.8(0.01 mm)之间,板边中点弯沉值 26.3~37.6(0.01 mm),板角弯沉值 31.2~38(0.01 mm),弯沉差见图 7、图 8。

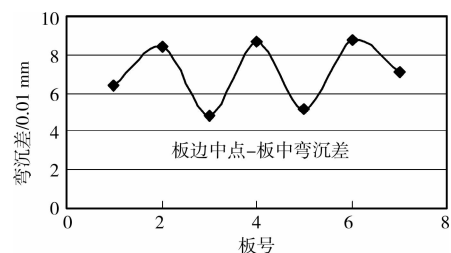


图 7 非脱空板板边中点—板中动弯沉差

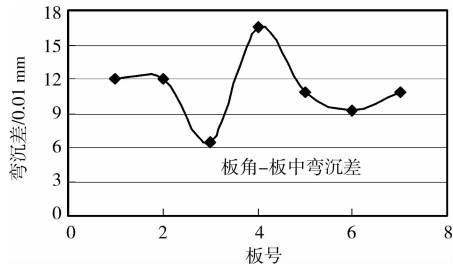


图 8 非脱空板板角—板中动弯沉差

对于非脱空板,其板边中点与板中的弯沉差在 4.8~8.8 (0.01 mm) 之间,与理论计算值比较,有 3 块板的实测弯沉差超过传荷能力为中的最大值 6.05 (0.01 mm),处于传荷能力为差的范围。板角与板中的弯沉差在 6.4~16.6 (0.01 mm) 之间,与理论计算值比较,仅有 1 块板的弯沉差超标,处于传荷能力为差的范围。

### 2) 脱空板实测弯沉值分析

脱空板 B117~B161,板中弯沉值范围 17.2~30.8 (0.01 mm),板边中点弯沉值 40.8~74.4 (0.01 mm),板角弯沉值 41.6~77.2 (0.01 mm),弯沉差见图 9、图 10。

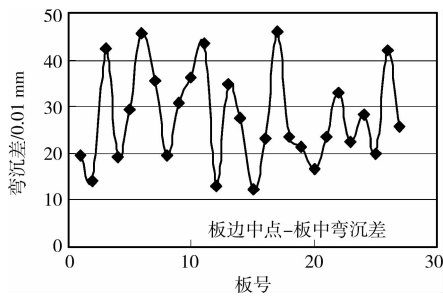


图 9 脱空板板边中点—板中动弯沉差

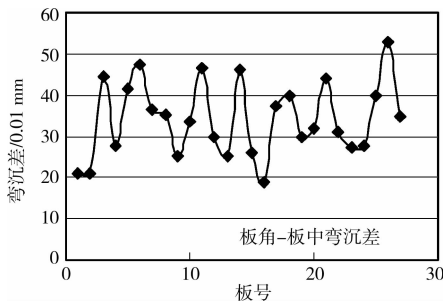


图 10 脱空板板角—板中动弯沉差

1) 对于脱空板,其板边中点与板中的弯沉差在 12.4~46 (0.01 mm) 之间。选取部分脱空板进行钻芯取样检测,发现弯沉差在 10~25 (0.01 mm) 之间的板脱空范围和深度较小,将其定为轻度脱空,弯沉差 >40 (0.01 mm) 的板脱空范围和深度都比较大,将其定为重度脱空,介于两者之间的板为中度脱空。  
2) 板角与板中的弯沉差在 18.8~52.8 (0.01 mm) 之

间。选取部分脱空板进行钻芯取样检测,发现弯沉差在 20~35 (0.01 mm) 之间的板脱空范围和深度较小,将其定为轻度脱空,弯沉差 >50 (0.01 mm) 的板脱空范围和深度都比较大,将其定为重度脱空,介于两者之间的板为中度脱空。

### 3.3 动弯沉差判别标准

对比有限元 ANSYS 计算的理论弯沉值和实际测试值,二者相差一般在 8% 以内,个别实测数据具有变异性,予以剔除。所以理论计算符合工程实际,并且对于轻、中、重不同弯沉差范围的划分基本一致。

根据理论计算和实测数据分析,考虑接缝传荷能力的影响,采用板边中点—板中动弯沉差和板角—板中动弯沉差为指标,给出脱空判别标准推荐值及传荷能力修正系数,见表 7 和表 8。

表 7 动弯沉判别标准推荐范围/0.01mm

脱空程度	板边与板中弯沉差	板角与板中弯沉差
未脱空	<10	<20
轻度脱空	10~25	20~35
中度脱空	25~40	35~50
重度脱空	>40	>50

表 8 动弯沉值脱空判别传荷能力修正系数

传荷能力	优	良	中	差
板边修正系数/%	60~65	65~70	70~80	80~100
板角修正系数/%	65~70	70~77	77~85	85~100

通过对广东、广西、福建、江苏、河南、山东、河北、吉林、黑龙江等地 28 条高等级公路实际弯沉值和弯沉差的调研,发现水泥板厚度在 22~25 cm 之间,板中弯沉值在 10~25 (0.01 mm),无脱空时板边板角弯沉值在 20~40 (0.01 mm),弯沉差在 10~15 (0.01 mm);脱空时板边板角弯沉值在 40~130 (0.01 mm),弯沉差 15~100 (0.01 mm)。实际数据说明了计算结果和所提标准的正确性,代表了目前一般水泥混凝土路面的弯沉值。所提标准是一个范围,还可根据具体情况略加浮动(上下浮动各 10%),又由于同板弯沉差判别方法的提出消除了大部分因素对弯沉值的影响,故该法适用于大部分水泥混凝土路面脱空评定。

## 4 试验路脱空检测验证

对烟威试验路 K176+650~K178+550 段行车道,采用 FWD 检测弯沉值。通过对实测板中、板边中点、板角弯沉中的代表性数值,如最小值、最大值、

平均值、高频值等分析,在全段挑选了具有代表性的26块板进行钻芯检测,接缝传荷能力评价同上,其

传荷能力评价、弯沉检测和钻芯检测结果见表9和图11。

表9 FWD弯沉检测结果/0.01 mm

板号	$W_Z$	$W_B$	$W_J$	$\Delta W_{BZ}$	$\Delta W_{JZ}$	脱空	传荷	板号	$W_Z$	$W_B$	$W_J$	$\Delta W_{BZ}$	$\Delta W_{JZ}$	脱空	传荷
B91	29.6	66.8	94.8	37.2	65.2	重度	中	B240	19.2	61.2	74.8	42.0	55.6	重度	中
B103	25.2	42.4	57.2	17.2	32.0	轻度	中	B246	29.6	62.8	103.6	33.2	74.0	重度	次
B104	24.0	41.2	55.6	17.2	31.6	轻度	中	B247	26.0	38.8	50.8	12.8	24.8	轻度	中
B107	28.4	33.6	34.8	5.2	6.4	未	中	B251	21.2	62.8	86.0	41.6	64.8	重度	中
B108	27.6	34.4	41.0	6.8	13.4	未	中	B259	23.2	57.2	67.6	34.0	44.4	中度	中
B140	30.4	35.2	37.2	4.8	6.8	未	优良	B260	25.2	52.2	63.8	27.0	38.6	中度	中
B155	22.8	40.2	54.0	17.4	31.2	轻度	中	B263	26.0	38.0	52.8	12.0	26.8	轻度	中
B156	18.4	34.4	42.0	16.0	23.6	轻度	中	B269	26.4	32.4	41.1	6.0	14.7	未	中
B159	22.0	30.4	34.8	8.4	12.8	未	中	B357	17.6	63.2	64.8	45.6	47.2	重度	次
B165	25.2	55.6	66.0	30.4	40.8	中度	次	B363	25.2	37.6	38.8	12.4	13.6	未	中
B169	29.6	70.4	94.8	40.8	65.2	重度	次	B374	22.8	39.6	49.6	16.8	26.8	轻度	中
B234	23.6	58.4	69.2	34.8	45.6	重度	中	B375	26.0	33.2	39.2	7.2	13.2	未	中
B235	23.2	50.4	59.2	27.2	36.0	中度	中	B379	27.2	33.6	38.8	6.4	11.6	未	中



图11 脱空钻芯取样

根据表7、8提出的脱空判别标准判定检测路段的脱空情况,并将判定结果与实际脱空状况对比分析,以其验证所提标准的可行性。结果表明:采用板边中点—板中弯沉差进行判别时 B159、B259、B363判断错误,准确度88.5%;采用板角—板中静弯沉差时 B103、B104、B155、B259判断错误,准确性84.6%。可见,采用同板弯沉差判别方法可以满足工程精度的要求,并可根据评定的脱空严重程度,判定对水泥路面是采取养护措施还是小修、中修或大修,更好地指导水泥路面养护维修。

## 5 结语

在深入分析FWD脱空判别方法的基础上,结合理论分析和实际动弯沉检测数据,提出了采用同板板边中点—板中弯沉差和板角—板中弯沉差为判别指标的脱空判定标准,并验证了所提标准的准确性,主要结论如下:

1)采用有限元理论模拟,计算在不同脱空深度、脱空面积和传荷能力下的板边中点、板中、板角弯沉值,得出了不同传荷能力下的板边中点或板角与板

中的弯沉差范围,并提出理论分级脱空判别标准。

2)根据动弯沉实测数据的统计分析和理论计算,提出采用板边中点—板中弯沉差和板角—板中弯沉差为判别指标的方法,并给出了动弯沉差判别标准和传荷能力修正系数。

3)在试验路段挑选了26块板进行钻芯检测,将所提标准判别结果与路面实际脱空状况进行对比验证,结果表明:板边弯沉差的准确度达88.5%,板角弯沉差的准确度达84.6%。

4)提出的同板板边或板角与板中弯沉差的脱空判别方法,是在同一路面结构、破坏程度、温度等条件下进行的对比和分析,且更加贴近实际地提出接缝传荷修正系数,确定了标准范围,消除了诸多因素对弯沉的影响。

## 参考文献:

- [1] JUN ZHANG, VICTOR C LI. Influence of supporting base characteristics on shrinkage-induced stress in concrete pavements [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007 (11/12):455-455.
- [2] 何兆益,谢强,梁莉. 板角脱空条件下悬臂板模型的有限差分分析[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(2):95-99.  
HE ZHAO-YI, XIE QIANG, LIANG LI. Finite difference analysis on cantilever slab model with void beneath the cement concrete slab corner [J]. Journal of

- Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2):95-99.
- [ 3 ] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Evaluation on Rigid Pavement on Rigid Overlay Design Procedures [R]. Washington DC:Federal Highway Administration, 1983.
- [ 4 ] DARTER M I. Joint repair methods for Portland cement concrete pavement, national cooperative highway Research program [R]. Washington DC: Transportation Research Board,1986.
- [ 5 ] SHAHIN M Y. Use of the falling weight deflectometer for the non-destructive deflection testing of jointed concrete airfield pavement overlay [C]//The 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 23-25 April, 1985, Purdue University, USA.
- [ 6 ] AASHTO. Guide for design of pavement structures [S]. Washington DC, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [ 7 ] 张建华,应荣华,张起森.用 FWD 进行板下地基脱空状况的评定[J].湖南交通科技,2003(1):113-114.  
ZHANG JIAN-HUA, YING RONG-HUA, ZHANG QI-SEN. Determination method for void beneath old pavement slabs by FWD [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2003(1):113-114.
- [ 8 ] 赵军,唐伯明,谈志明.基于弯沉指数的水泥混凝土路面板角脱空识别[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(3):335-339.  
ZHAO JUN, TANG BO-MING, TAN ZHI-MING. Identification of void beneath cement concrete slab corner based on deflection index [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(3):335-339.
- [ 9 ] 孙立军,八谷好高,姚祖康.水泥混凝土路面板模量反算的一种新方法—惰性弯沉法[J].土木工程学报,2000,33(1):83-87.  
SUN LI-JUN, BAGU HAO-GAO, YAO ZU-KANG. A new modulus backcalculation method of cement concrete pavement -inert deflection method [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1):83-87.
- [10] 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.  
ZHA XU-DONG, WANG BING-GANG. Backcalculation of modulus for pavements based on homotopy method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1):1-5.
- [11] 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.  
WANG TAO. Void identifying of rigid pavement based on genetic algorithm [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3):23-26.
- [12] 徐海宾,张敏霞,褚怀宝. FE-SBFE 在路面结构层模量反算中的应用[C]//崔京浩.第 16 届全国结构工程学术会议论文集:第 II 册,太原:太原理工大学,2007.
- [13] 陈瑜,张起森.基于 FWD 检测结果旧路地基脱空状况的模糊评定[J].公路交通科技,2005,22(6):46-49.  
CHEN YU, ZHANG QI-SEN. Fuzzy evaluation of the cavity beneath old pavement slabs based on FWD test data [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(6):46-49.
- [14] 彭永恒,任瑞波,罗跃纲,等.刚性路面脱空声识别集成神经网络方法[J].中南公路工程,2005,30(3):15-18.  
PENG YONG-HENG, REN RUI-BO, LUO YUE-GANG, et al. Void acoustic identifying of rigid pavement based on integrated neural network [J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(3):15-18.
- [15] JTJ 073.1-2001,公路水泥混凝土路面养护规范[S].北京:中华人民共和国交通部,2001.
- [16] JTG D 40-2002,公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:中华人民共和国交通部,2002.
- [17] 肖兴强.水泥混凝土路面板底脱空和接缝传荷能力的关系[D].成都:西南交通大学,2007.

(编辑 胡英奎)