

DOI:10.13986/j.cnki.jote.2025.03.001

# 旧水泥路面结构承载能力评估的温度影响分析

孟宪金<sup>1</sup>, 王琪<sup>1</sup>, 李洋<sup>2</sup>

(1. 黄河水利职业技术学院 土木与交通工程学院, 开封 475004;

2. 河南大学, 开封 475001)

**摘要:** 为探究水泥混凝土路面动态弯沉受温度影响的规律,对水泥混凝土路面的结构承载能力作出更准确的评价,采用FWD对水泥混凝土路面在不同温度梯度下的弯沉值进行测量,分析不同温度梯度下水泥混凝土路面的弯沉变化情况,同时探究弯沉变化对水泥混凝土路面的接缝传荷能力、基层顶面当量回弹模量及水泥混凝土面板强度、刚度评估的影响。研究表明:水泥面板内部温度梯度的存在将导致板中、板边、板角弯沉值产生较大变化;水泥面板的最大温度梯度和弯沉最大变化值并不出现在水泥路面路表温度最高或最低的时间段;利用温度梯度对弯沉影响的差异性、延时性和有效性的特点,可在不同的时间段对板中和板边、边角弯沉分别或集中进行测试;水泥面板接缝传荷能力受水泥面板内部的温度梯度影响较大;水泥面板内部温度梯度对弯沉盆面积指数这一参数基本没有影响;水泥面板处于正温度梯度时将导致水泥面层层下结构强度评估结果偏低;可用水泥混凝土面层弯拉弹性模量、接缝传荷系数、弯沉盆面积指数和基层顶面当量回弹模量综合评价水泥混凝土路面的结构承载能力。

**关键词:** 水泥路面; FWD; 弯沉; 温度; 结构承载能力

中图分类号: U 416

文献标志码: A

文章编号: 2096-3432(2025)03-001-06

## Analysis of the Influence of Temperature on the Evaluation of the Structural Bearing Capacity of the Old Cement Concrete Pavement

MENG Xianjin<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China;

2. Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** To explore the law of dynamic deflection of cement concrete pavement affected by temperature and make a more accurate evaluation of the structural bearing capacity of cement concrete pavement, FWD is used to measure the deflection value of cement concrete pavement at different temperatures and analyze. The deflection changes of cement concrete pavement under different temperatures, and the influence of deflection changes on the joint load transfer capacity of cement concrete pavement, the equivalent elastic modulus of the top surface of the base course, and the strength and rigidity of cement concrete slabs are also explored. The research results show that the existence of the internal temperature gradient of the cement panel will cause large changes in the deflection values of the middle, the edge and the corner of the board, the maximum temperature gradient and the maximum deflection value of the cement panel do not appear in the surface temperature of the cement pavement. The highest or lowest time period, using the characteristics of the difference, time delay and effectiveness of the temperature gradient's influence on the deflection, the deflection of the board, the board edge, and the corners can be

收稿日期: 2025-02-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号:52478166)。

作者简介: 孟宪金(1988—),男,硕士,研究方向为路基路面工程。E-mail:MXjin1989@163.com。

tested separately or collectively in different time periods. The load transfer capacity of the cement panel joints is greatly affected by the temperature gradient inside the cement panel; the internal temperature gradient of the cement panel basically has no effect on the parameter of the deflection basin area index, when the cement panel is in a positive temperature gradient, it will cause the cement surface layer to be underneath. The structural strength evaluation result is low, the structural bearing capacity of cement concrete pavement can be comprehensively evaluated by the flexural modulus of elasticity of cement concrete surface course, the joint load transfer coefficient, the deflection basin area index and the equivalent elastic modulus of the base course top surface.

**Key words:** cement pavement; FWD; deflection; temperature; structural bearing capacity

水泥混凝土作为一种刚性材料,经长期车辆荷载的疲劳作用,容易在路面表面和路面内部产生多种病害。路面表面损坏主要表现为抗滑性能下降、平整度下降、路表开裂等;路面内部损坏则主要表现为结构性损坏,包括水泥面板刚度和接缝传荷能力下降、结构层开裂、板底脱空、基层松散等<sup>[1-2]</sup>。

路面表面病害可通过人工路况调查进行分析,对于路面内部的结构性病害,主要是通过落锤式弯沉仪(Falling-Weight-Deflectometer, FWD)进行弯沉测试,再通过后续的弯沉分析和模量反演等手段对路面结构承载能力进行评价。由此可见,水泥混凝土路面在动态荷载作用下的实测弯沉盆为路面结构承载能力分析的基础<sup>[3-4]</sup>。由于水泥混凝土材料本身对温度有一定的敏感性,当水泥面板内部存在较大的温度梯度时,会出现一定程度的板边翘曲或板中拱胀,此时水泥面板未和板下结构层完全接触,将导致实测弯沉盆数值失真。目前,关于水泥面板温度梯度对路面结构承载能力评价影响的相关论文较少<sup>[5-7]</sup>。因此,有必要深入分析水泥混凝土内部温度梯度对FWD实测弯沉盆及相关结构承载能力参数数值的影响,最终准确评价水泥路面结构承载能力。

## 1 弯沉测试

FWD可模拟车辆对路面的瞬时冲击荷载作用,其主要通过落锤从一定高度落下控制作用到路面的荷载大小,并通过搭载的弯沉传感器获得路面在该动态荷载作用下的实测弯沉盆。

选取华东地区某公路水泥路面进行弯沉测试,该路段具体路面结构为:26 cm 水泥混凝土面层+30 cm 水泥稳定碎石基层+土基,该路段目前已通车8 a。弯沉测试时,间隔50 m一个测点,分别测量板中、板边和板角弯沉,分别用于评价水泥路面各结构层强度、水泥面层接缝传荷能力等,其中板中弯沉测试所用荷载为100 kN,板边弯沉测试所用荷载

为50 kN,总测试长度1 km。本次弯沉测试采用设备为Carl Bro PRI2100型FWD,其可测试荷载范围为0~150 kN,承载板直径为300 mm,荷载传感器精度为1%±0.1 kN,脉冲荷载形状为半正弦波,温度传感器精度为0.1℃,搭载的弯沉传感器数量为9个,与荷载中心距离分别为:0、200、300、600、900、1 200、1 500、1 800、2 100 mm。

## 2 实测弯沉盆温度影响分析

采用红外测温设备现场实测水泥路面路表各个时间段的温度情况,按1次/h的频率开展测试,根据测试时当地的气温变化情况(见图1),尽可能多地选取可测试时间段进行水泥路面的弯沉测试,测试时间集中为06:00—21:00,因为这个区间表征1 d之中温度由最低到最高再逐渐下降的过程,此时水泥路面板内部的温度梯度也经历1 d中最大的转变,有利于全面分析不同温度梯度下水泥路面实测弯沉值的变化情况。

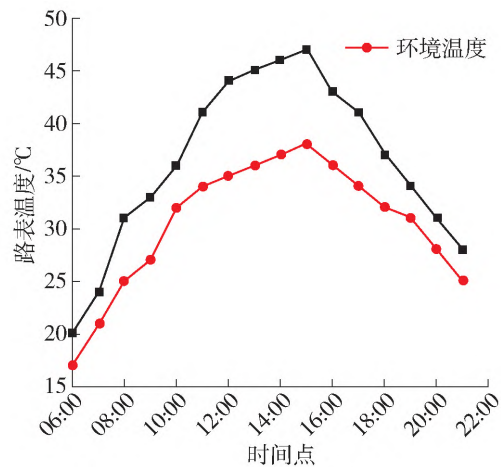


图1 水泥路面路表温度变化情况

从实测中心弯沉值随温度分布情况来看,板中、板边、板角实测中心弯沉值的变化规律和温度梯度变化均有较明显的相关性(温度梯度为温度沿水泥

面板表面至底面的增长率),其中板中弯沉和水泥面板内部温度梯度呈正相关关系,板边、板角弯沉与水泥面板内部温度梯度呈负相关关系。

在测试初期,即06:00—08:00这个时间段,板中中心弯沉值基本稳定在85  $\mu\text{m}$ ,而板边和板角弯沉值开始呈现下降的趋势,由此可推断此时水泥面板的温度梯度逐渐由负温度梯度向0靠近,水泥面板由翘曲逐渐变为贴合基层的状态。09:00开始,板中弯沉值开始变大,随着时间增长,路面表面温度逐渐上升,温度梯度也从0开始增大,水泥面板受温度梯度影响开始拱胀,并在11:00时达到最大值,此时温度梯度及测得的板中弯沉值也到达1 d之中的最大值,随后逐渐下降,到17:00时趋于稳定;同时板边、板角受水泥板拱胀影响,与基层贴合较好,因此该时间段内板边、板角弯沉值分别稳定在46、91  $\mu\text{m}$ 。18:00之后,路表温度快速下降,而路面内部温度下降速率相当较慢,此时水泥面板内部温度梯度由正向负发展,水泥面板逐渐翘曲,导致测量得到的板边、板角弯沉值偏大。

分析可知,水泥面板内部温度梯度的存在将引起水泥面板的拱胀或翘曲,进而导致板中、板边、板角弯沉值随之产生较大变化,变化幅度达35%及以上。同时需要注意的是,水泥面板的最大温度梯度和弯沉最大变化值并不出现在水泥路面路表温度最高或最低的时间段。

根据图2、图3板中、板边、板角实测中心弯沉值随时间的变化情况可知,06:00—09:00,板中弯沉值保持稳定,此时的板边、板角弯沉值一直保持负增长;当板中弯沉值在12:00—16:00保持负增长时,板边、板角弯沉值保持在稳定状态;当板中弯沉稳定时,板边、板角弯沉值逐渐增大并趋于稳定。由此可

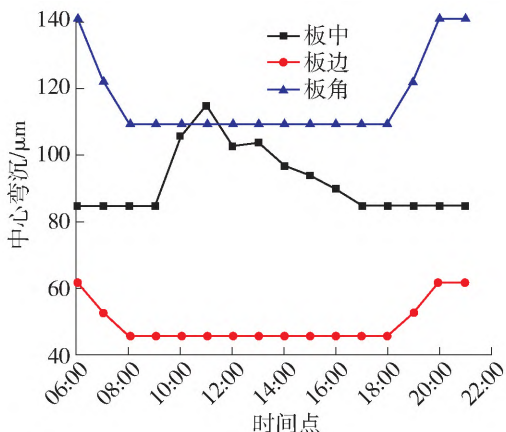


图2 实测中心弯沉值随温度分布情况(板中100 kN、板边和板角为50 kN)

知,板边、板角弯沉值和板中弯沉值随时间的变化并不具有一致性,即水泥面板温度梯度的变化对板中、板边、板角弯沉值的影响具有差异性和延时性,同时结合图2、图3可知,板中、板边、板角弯沉值在08:00—10:00和16:00—18:00这2个时间段内基本保持稳定,即温度梯度较小时,对板中、板边、板角弯沉值影响也较小,利用温度梯度对弯沉影响的差异性、延时性和有效性的特点,可在不同的时间段对板中和板边、边角弯沉分别或集中进行测试。

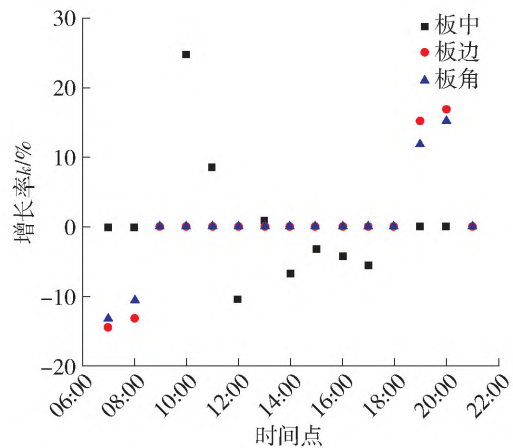


图3 实测中心弯沉值随时间变化的增长率情况  
( $k = (D_m - D_n) / D_n, m = n + 1, n = 1 \sim 8$ )

### 3 水泥混凝土面层结构承载能力评估

由图2、图3及前文分析可知,水泥路面面板随着1 d中温度的变化,内部的温度梯度大致会经过“负—零—正—零—负”这样一个阶段<sup>[8]</sup>,基于此,考虑到温度梯度的变化对路面弯沉的影响,分别选取各温度梯度内的代表性弯沉数据进行水泥混凝土路面的结构承载能力分析,分别为06:00—07:00(负温度梯度)、08:00—09:00(零温度梯度)、10:00—11:00(正温度梯度)、17:00—18:00(零温度梯度)、19:00—20:00(负温度梯度),依次编号为1~5。

水泥混凝土面层结构承载能力主要与水泥面板刚度和强度有关,而板中实测弯沉盆主要是用于进行水泥面板刚度的计算及路面各结构层的模量反演。观察图4可知,随着水泥面板内部温度梯度的变化,板中实测弯沉盆在水泥面板温度梯度为正值时,实测弯沉盆各弯沉传感器数值增大;水泥面板温度梯度为负值或零时,实测弯沉数值基本保持稳定。

水泥混凝土路面的接缝是影响水泥面层荷载传递和行车舒适度的重要部位,而准确获得接缝传荷系数,是评价路面使用性能和疲劳性能的重要指标,

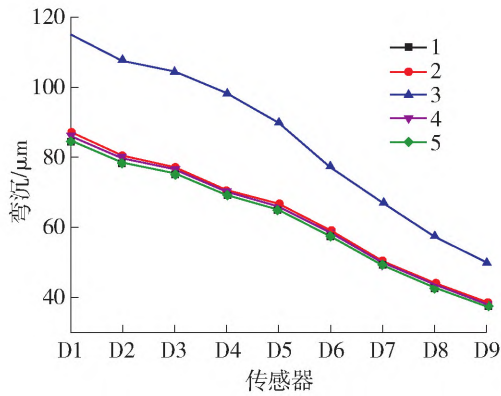


图4 水泥面板不同温度梯度下板中典型弯沉盆

因此接缝传荷系数也是表征水泥路面结构承载能力的重要指标之一<sup>[8]</sup>。

接缝传荷系数见式(1)<sup>[9]</sup>：

$$d_{je} = (d_3/d_2) \times 100 \quad (1)$$

式中,  $d_{je}$  为接缝传荷系数(%) ;  $d_3$  为距离承载板中心 300 mm 处的传感器弯沉值(0.01 mm) ;  $d_2$  为距离承载板中心 200 mm 处的传感器弯沉值(0.01 mm)。

### 3.1 水泥混凝土板刚度

AASHTO 设计指南中提出用弯沉盆面积指数 (AREA) 对水泥混凝土路面板的好坏进行评价<sup>[12-13]</sup>, 其计算见式(2)：

$$AREA = 6 \times [1 + 2(d_3/d_1) + 2(d_4/d_1) + (d_5/d_1)] \quad (2)$$

式中, AREA 为距离承载板中心 900 mm 范围内的弯沉盆面积指数 ;  $d_1$  为承载板中心弯沉值 ( $\mu\text{m}$ ) ;  $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$  为距承载板中心 300、600、900 mm 处的弯沉值 ( $\mu\text{m}$ )。

计算弯沉盆面积时, 要求承载板直径为 300 ~ 305 mm。

根据式(2) 计算得到部分板块的 AREA 如表 1 所示, 初步观察发现弯沉值的大小与 AREA 之间的相关性不明显, 结合表 2 中各传感器弯沉值与 AREA 的皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient) 可知, 各温度梯度下各传感器弯沉值与 AREA 之间的皮尔逊相关系数绝对值均在 0.25 以下, 并无较明显的相关性。特别是通过观察  $d_1$  与 AREA 的皮尔逊相关系数, 可发现  $d_1$  的大小与水泥板的刚度并没有直接的联系, 对于水泥混凝土路面, 弯沉值的大小与水泥混凝土面层的刚度并没有较为直接的相关性, 即在采用 AREA 进行水泥面板刚度评价时, 基本不需要考虑水泥面板温度梯度对弯沉盆面积指数的影响, 无需对其进行修正。

表1 各相关传感器弯沉值及弯沉盆面积

温度梯度	$d_1/\mu\text{m}$	$d_3/\mu\text{m}$	$d_4/\mu\text{m}$	$d_5/\mu\text{m}$	AREA
1	86	68	61	59	28.3
2	85	67	60	58	28.0
3	115	93	84	79	28.6
4	84	68	60	59	28.2
5	85	67	60	57	27.9

表2 各温度梯度下各传感器弯沉值与弯沉盆面积指数的相关性

温度梯度	$d_1$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$\mu\text{m}$
1	0.132	-0.073	0.214	0.158	
2	0.235	0.171	0.035	-0.183	
3	0.176	0.233	-0.107	0.224	
4	-0.127	0.192	0.246	0.048	
5	0.083	-0.221	0.154	0.179	

### 3.2 水泥路面各结构层强度

基于水泥路面在不同温度梯度下测得的板中弯沉盆, 结合路面各结构层的厚度、泊松比等参数进行路面各结构层的模量反演, 同时为验证模量反演结果的准确性, 在弯沉测试点位取芯进行室内试验, 结合试验结果和式(3) 即可获得水泥混凝土面层的弯拉弹性模量<sup>[9]</sup>, 最终获得的模量结果如表 3、图 5 所示。

$$E_r = 10^4 / (0.09 + 0.96/f_r) \quad (3)$$

式中,  $E_r$  为水泥混凝土层的弯拉弹性模量 (MPa) ;  $f_r$  为水泥混凝土层弯拉强度标准值 (MPa)。

表3 不同温度梯度下路面各结构层模量反演结果

温度梯度	水泥混凝土面层	水稳基层	土基
1	30 034	12 521	79
2	29 585	12 799	81
3	29 968	10 630	49
4	30 216	13 041	80
5	29 814	12 741	83
平均值	29 923	12 346	74
标准差	238	977	14
变异系数	0.01	0.08	0.19

观察表 3 可知, 不同温度梯度下反演得到的水泥混凝土层的弯拉弹性模量相近, 而正温度梯度时,

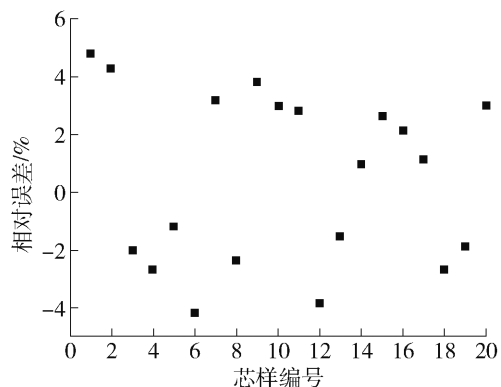


图5 水泥混凝土层取芯室内试验和反演弯拉弹性模量对比

水稳基层和土基的反演模量值明显低于平均值,下降幅度分别为 17%、40%。由此可见,尽管水泥混凝土面层温度梯度的存在并不会影响水泥混凝土面层的模量反演结果,但对基层和土基的模量反演结果有着较大的影响。

观察图 5 可知,水泥混凝土面层在取芯和反演 2 种方式下获得的模量结果的相对误差均在 5% 以内,可见模量反演的结果能较好地反映水泥路面各结构层真实的强度状况。

由水泥混凝土弯拉弹性模量( $E_r$ )与弯沉盆面积指数(AREA)对点的趋势图(见图 6)及对应关系图(见图 7)可看出, $E_r$ 与 AREA 的变化趋势基本保持一致,其数值变化趋势有较高的相似度。同时可看到, $E_r$ 与 AREA 存在较好的线性关系,且相关系数  $R^2 = 0.9606$ 。可看出,随着水泥面板强度的增加,其刚度也会变大,此时板体传递荷载的能力越强,计算得到的 AREA 就会越大,因此,用  $E_r$  与 AREA 指标综合评价水泥混凝土板的结构承载能力是比较好的,与水泥面板的实际状况相契合。

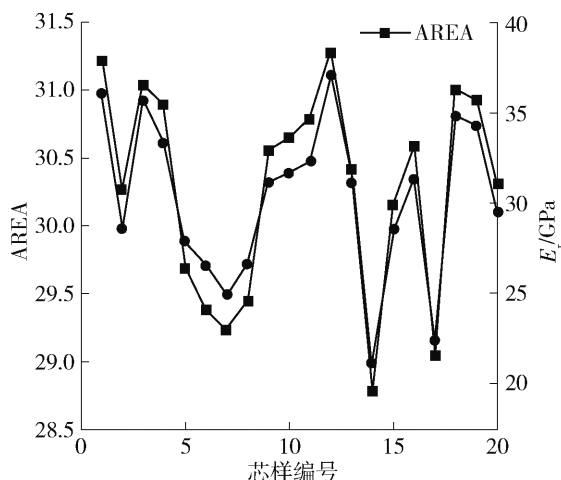


图6  $E_r$  与 AREA 对点的数值变化趋势图

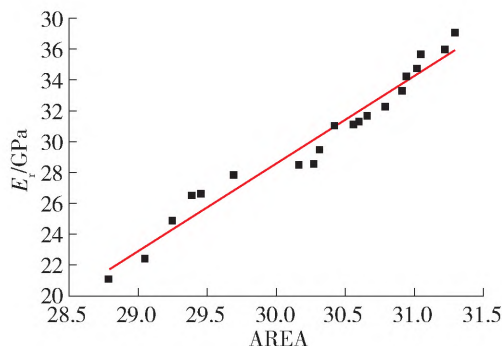


图7  $E_r$  与 AREA 的相关关系图

### 3.3 接缝传荷能力

由图 8 可知,水泥面板内部处于不同温度梯度时,其接缝传荷能力也处于不同的水平<sup>[10]</sup>,随着水泥面板内部温度梯度的升高,各测试点位的接缝传荷能力也逐渐增大,从负温度梯度到正温度梯度,其接缝传荷能力增幅达 25% 及以上,可见水泥面板接缝传荷能力受水泥面板内部的温度梯度影响较大,在不同时间点测试可能会获得截然不同的接缝传荷系数评估结果,最终导致对水泥路面使用性能和水泥面层荷载传递能力的错误评估<sup>[11-14]</sup>。

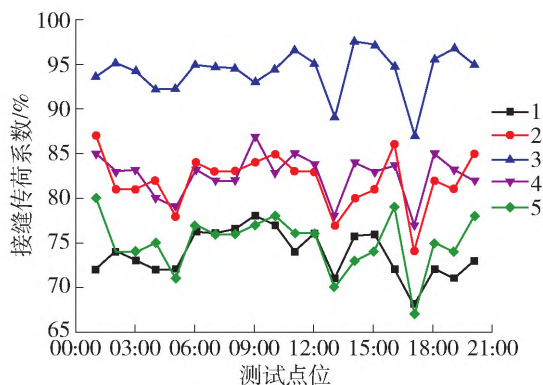


图8 不同温度梯度下水泥路面接缝传荷能力

## 4 水泥面层层下结构承载能力评估

基层顶面当量回弹模量( $E_r$ )是表征水泥面层以下结构层的结构承载能力的重要参数<sup>[14-15]</sup>,目前对于  $E_r$  这一参数的获取,主要有规范法和模量反演法 2 种手段进行计算,其中规范法计算过程如式(4)(5)所示<sup>[9]</sup>:

$$E_r = 100e^{(3.60 + 24.03D_1 - 15.63SI)^{0.222}} \quad (4)$$

$$SI = (D_1 + D_3 + D_4 + D_5) / D_1 \quad (5)$$

式中, $E_r$ 为基层顶面的当量回弹模量标准值(MPa); $SI$ 为路面结构的荷载扩散系数; $D_1$ 为荷载中心处的弯沉值(0.01 mm); $D_3$ 、 $D_4$ 、 $D_5$ 为距离荷载

中心 300、600、900 mm 处的弯沉值(0.01 mm)。

模量反演方法主要是采用模量反演软件,根据水泥路面各结构层的厚度、泊松比、初始模量范围等参数即可进行模量反演,区别于普通模量反演结构层位设置的是,在进行水泥路面各结构层模量反演时,将基层及以下结构层当做一层进行当量基层的模量反演。

表 4 基层顶面当量回弹模量计算解和反演解

MPa			
温度梯度	$E_c$	$E_t$ 计算值	$E_t$ 反演值
1	30 147	522	398
2	29 734	510	410
3	30 028	344	262
4	29 973	516	426
5	29 477	522	411
平均值	29 872	483	381

由表 4 可知,当水泥面板处于正温度梯度时,其基层顶面当量回弹模量无论是计算值还是反演值,较均值相比,均降低了 30% 及以上,可见水泥面板处于正温度梯度时将导致水泥面层层下结构强度评估失真。

同时,观察水泥面层模量反演结果可知,采用两层路面结构设置反演得到的水泥面板弯拉弹性模量与经室内试验得到的模量相近,可见反演的准确度较好,采用公式法计算得到的基层顶面当量回弹模量值偏高,导致对水泥板下结构层强度状况的评估过于乐观。

## 5 结论

1) 水泥面板内部温度梯度的存在将导致板中、板边、板角弯沉值产生较大变化,变化幅度  $\geq 35\%$ ; 水泥面板的最大温度梯度和弯沉最大变化值并不出现在水泥路面路表温度最高或最低的时间段。

2) 利用温度梯度对弯沉影响的差异性、延时性和有效性的特点,可在不同的时间段对板中和板边、边角弯沉分别或集中进行测试。

3) 水泥面板接缝传荷能力受水泥面板内部的温度梯度影响较大,从负温度梯度到正温度梯度,其接缝传荷能力增幅达 25% 及以上。

4) 对于水泥混凝土路面,弯沉值的大小与水泥混凝土面层的刚度并没有较为直接的相关性,即在采用弯沉盆面积指数进行水泥面板刚度评价时,基

本不需要考虑水泥面板温度梯度对弯沉盆面积指数的影响,无需对其进行修正。

5) 水泥混凝土面层温度梯度的存在并不会影响水泥混凝土面层的模量反演结果,而将导致水泥面层层下结构强度评估结果偏低。

6) 模量反演的结果能较好地反映水泥路面各结构层真实的强度状况,可用  $d_{je}$ 、 $E_r$ 、AREA 和  $E_t$  等指标综合评价水泥混凝土路面的结构承载能力。

## 参考文献:

- [1] 李柯,龙小勇,蔡良才,等. 水泥混凝土道面预防性养护评价指标体系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1993-2003.
- [2] 钟彪,王向峰,李燕. 水泥混凝土路面预防性养护路况标准与时机决策[J]. 公路, 2020, 36(2): 283-287.
- [3] 李盛,陈尚武,刘朝晖,等. 旧水泥混凝土路面弯沉测试的若干问题研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4713-4718.
- [4] 冯润华,刘思铨,刘煜. 共振碎石化后沥青加铺层应力与疲劳断裂分析[J]. 公路, 2023, 68(5): 11-18.
- [5] 陈望平,刘安刚,唐钰杰,等. 动水压力下水泥混凝土路面基层溶蚀脱空研究[J]. 混凝土, 2022(8): 174-178.
- [6] 吴文亮,赵为天,熊春龙,等. 机场水泥混凝土道面实测弯沉值的温度影响分析[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 85-90.
- [7] 朱洪洲,张瑞,吴小军,等. 不同基层类型水泥混凝土路面温度应力的差异[J]. 公路交通科技, 2023, 40(3): 8-16.
- [8] 王旭昊,刘泽鑫,李虎成,等. 预制式水泥混凝土路面研究现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3457-3467.
- [9] JTG D40—2011, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [10] 乔明,史斌,陶卓辉,等. 水泥板底脱空与接缝传荷能力影响因素及评价指标分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(6): 75-83.
- [11] 李盛,张海涛,孙煜,等. 在役水泥路面劣化行为与延寿技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(3): 25-47.
- [12] 孙芹兰,周正华. 水泥混凝土路面力学特性分析[J]. 公路, 2019, (10): 53-58.
- [13] 张震东,高原,马大为,等. 多次模拟弹射荷载作用下水泥混凝土路面动态响应[J]. 兵工学报, 2022, 43(7): 1706-1717.
- [14] 岳爱军,王伟,李旺明,等. 旧混凝土路面碎石化层的承载力检测与评价[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 33-36.