

基于正交试验的沥青路面倒装结构力学响应研究

蔡燕霞^{1,2}, 金生斌³, 侯芸³, 赵宾³, 臧芝树³

(1.交通运输部公路科学研究院,北京市 100088; 2.中路高科(北京)公路技术有限公司;
3.中国公路工程咨询集团有限公司)

摘要: 依托西非某国实体工程,采用法国沥青路面设计软件 Alizé,通过设计正交试验方案,重点研究了各层位厚度和模量对沥青路面倒装结构力学响应影响的变化规律,提出了基于力学响应的倒装类沥青路面结构和材料参数显著性程度。计算结果表明:沥青路面倒装结构中,GNT属“薄弱层”,须严格控制原材料、级配及施工工艺等;GLC层厚度和土基模量对路面结构受力影响显著,尤其是土基顶面压应变和弯沉指标;为加强路基路面整体结构强度,需重视土基影响区和GNT影响区;在进行法规沥青路面倒装结构验算时,应优先考虑各层位厚度,通过不断优化厚度因素,从而实现既满足法规要求又经济合理的目的。

关键词: 道路工程;倒装结构;法规设计;力学响应;正交试验

沥青路面倒装结构是一种在沥青层和半刚性基层之间加入柔性材料(如级配碎石)的结构形式,可延缓或抑制 down-top 反射裂缝。同时使半刚性基层下卧更深,改善了路面受力特征,因此,该结构在中国道路工程中已得到初步应用,且受到了不少关注。

吴善周等采用 Bisar3.0 对倒装结构基于厚度设计的应力特性进行了研究,提出了倒装结构在中国高速公路上的应用条件;刘娇蕾对级配碎石的非线性特征进行了研究,回归得到了回弹模量模型,并对倒装结构的不同参数进行了优化设计;吴玉等分析了半刚性基层、倒装式和组合式3种典型结构的静力学行为,发现倒装式结构对轴重敏感度最低,适当增加沥青碎石厚度可改善其受力状况。以往对倒装式结构的研究主要集中于级配碎石材料特性上,结构组合设计上考虑因素较少,尤其是针对各参数对国外沥青路面倒装结构受力的影响方面,尚未进行系统的优化设计。

该文依托西非某国实体工程,采用法国路面设计软件 Alizé,通过设计正交试验方案,研究各结构和材料参数对倒装结构沥青路面力学行为影响的变化规律,推荐经济合理的倒装结构沥青路面设计方案,以期为该路面结构形式的推广应用提供参考。

1 项目概况

项目位于西非某国首都,道路全长约 61 km,其路面结构严格按照法规(文献[5]、[6])进行设计,倒装结构路面方案为:5 cm 沥青混凝土(BBSG)+8 cm 沥青碎石(GB)+12 cm 级配碎石(GNT)+30 cm 水稳砂土(GLC),计算年限为 20 年,道路类型为 VRNS,重型荷载总数(总质量大于 35 kN 的车辆)为 3.55×10^6 ,交通等级为 TC5,根据弯沉试验,换算土基回弹模量为 175 MPa,相应承载等级为 PF3+。

2 试验方案设计

考虑到影响沥青路面倒装结构的因素众多,如厚度、模量、泊松比、温度、交通量、计算风险等,因此需要选取主要的影响因素进行试验研究,该文将各层位厚度和模量作为主要考虑对象,在该项目路面结构厚度和模量的基础上展开正交分析。

同时根据《Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée(1998 SETRA/LCPC)》规定,选取沥青层底拉应变、水硬性材料层底拉应力和土基顶面竖向压应变作为评价指标,同时结合中国 JTG

D50—2017《公路沥青路面设计规范》，将弯沉作为辅助评价指标进行分析，借助正交试验方法[四因素四水平 $L_{16}(4^4)$ 和五因素四水平 $L_{16}(4^5)$]，评价各因素对沥青路面倒装结构力学响应的影响程度。

正交试验设计表及相关结果如表 1、2 所示。

表 1 基于厚度参数的力学响应正交试验方案及试验结果

| 序号 | 厚度/cm | | | | 力学响应 | | | |
|----|-------|----|-----|-----|-------------------------|---------------|------------------------|--------------|
| | BBSG | GB | GNT | GLC | GB 层底拉应变/ $\mu\epsilon$ | GLC 层底拉应力/MPa | 土基竖向压应变/ $\mu\epsilon$ | 弯沉/(0.01 mm) |
| 1 | 4 | 6 | 9 | 20 | 163.2 | 0.195 | 349.3 | 30.4 |
| 2 | 4 | 8 | 12 | 25 | 155.6 | 0.141 | 255.9 | 27.0 |
| 3 | 4 | 10 | 15 | 30 | 143.3 | 0.105 | 192.4 | 24.5 |
| 4 | 4 | 12 | 18 | 35 | 130.1 | 0.081 | 148.5 | 22.4 |
| 5 | 5 | 6 | 12 | 30 | 161.2 | 0.128 | 229.9 | 26.2 |
| 6 | 5 | 8 | 9 | 35 | 139.1 | 0.110 | 197.1 | 23.8 |
| 7 | 5 | 10 | 18 | 20 | 142.7 | 0.122 | 230.4 | 26.4 |
| 8 | 5 | 12 | 15 | 25 | 123.9 | 0.106 | 198.0 | 24.0 |
| 9 | 6 | 6 | 15 | 35 | 159.2 | 0.100 | 181.8 | 24.6 |
| 10 | 6 | 8 | 19 | 30 | 147.8 | 0.099 | 183.0 | 24.6 |
| 11 | 6 | 10 | 9 | 25 | 123.4 | 0.129 | 235.7 | 24.9 |
| 12 | 6 | 12 | 12 | 20 | 118.2 | 0.125 | 234.1 | 25.0 |
| 13 | 7 | 6 | 18 | 25 | 157.4 | 0.118 | 218.8 | 26.5 |
| 14 | 7 | 8 | 15 | 20 | 141.7 | 0.134 | 250.1 | 26.8 |
| 15 | 7 | 10 | 12 | 35 | 119.0 | 0.090 | 164.0 | 22.1 |
| 16 | 7 | 12 | 9 | 30 | 104.0 | 0.101 | 184.0 | 22.1 |

表 2 基于模量参数的力学响应正交试验方案及试验结果

| 序号 | 模量/MPa | | | | | 力学响应 | | | |
|----|--------|-------|-----|-------|-----|-------------------------|---------------|------------------------|--------------|
| | BBSG | GB | GNT | GLC | 土基 | GB 层底拉应变/ $\mu\epsilon$ | GLC 层底拉应力/MPa | 土基竖向压应变/ $\mu\epsilon$ | 弯沉/(0.01 mm) |
| 1 | 1 790 | 3 580 | 350 | 1 000 | 125 | 173.0 | 0.128 | 275.6 | 32.9 |
| 2 | 1 790 | 3 780 | 400 | 1 200 | 150 | 156.2 | 0.131 | 235.4 | 28.0 |
| 3 | 1 790 | 3 980 | 450 | 1 400 | 175 | 142.7 | 0.133 | 205.7 | 24.5 |
| 4 | 1 790 | 4 180 | 500 | 1 600 | 200 | 131.4 | 0.135 | 182.8 | 21.7 |
| 5 | 1 990 | 3 580 | 400 | 1 400 | 200 | 157.0 | 0.124 | 195.8 | 23.4 |
| 6 | 1 990 | 3 780 | 350 | 1 600 | 175 | 161.7 | 0.148 | 203.8 | 25.3 |
| 7 | 1 990 | 3 980 | 500 | 1 000 | 150 | 139.5 | 0.111 | 237.9 | 27.6 |
| 8 | 1 990 | 4 180 | 450 | 1 200 | 125 | 140.9 | 0.140 | 248.0 | 30.0 |
| 9 | 2 190 | 3 580 | 450 | 1 600 | 150 | 144.5 | 0.155 | 209.5 | 25.9 |
| 10 | 2 190 | 3 780 | 500 | 1 400 | 125 | 135.3 | 0.152 | 231.9 | 28.7 |
| 11 | 2 190 | 3 980 | 350 | 1 200 | 200 | 161.8 | 0.110 | 205.4 | 24.6 |
| 12 | 2 190 | 4 180 | 400 | 1 000 | 175 | 152.3 | 0.102 | 225.6 | 26.4 |
| 13 | 2 390 | 3 580 | 500 | 1 200 | 175 | 140.9 | 0.116 | 208.5 | 24.5 |
| 14 | 2 390 | 3 780 | 450 | 1 000 | 200 | 149.1 | 0.093 | 206.9 | 24.0 |
| 15 | 2 390 | 3 980 | 400 | 1 600 | 125 | 146.2 | 0.168 | 227.6 | 29.1 |
| 16 | 2 390 | 4 180 | 350 | 1 400 | 150 | 155.0 | 0.143 | 223.7 | 27.7 |

3 基于法规力学响应的倒装结构沥青路面计算结果分析

针对正交试验结果,借助统计学手段(直观+方差),基于法规(法国规范)力学响应,研究不同参数对倒装类结构受力的影响规律。对每一层位相同影响因素水平下的试验结果分别求取平均值,通过改变不同层位以及不同因素的试验水平,以此研究法规体系下各力学响应随不同层位不同因素水平的变化趋势;同时,基于方差分析的显著性检验,最终可得到倒装类结构各层位各影响因素的显著性差异,为设计经济合理的倒装类沥青路面结构提供理论及数据支持。

3.1 厚度参数对结构受力的影响

图 1、2 分别为不同沥青层底拉应变、拉应力随厚度的变化规律。

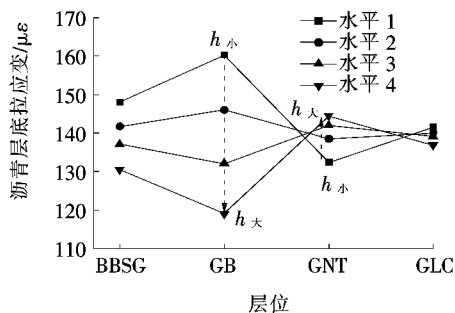


图 1 沥青层底拉应变随厚度变化规律

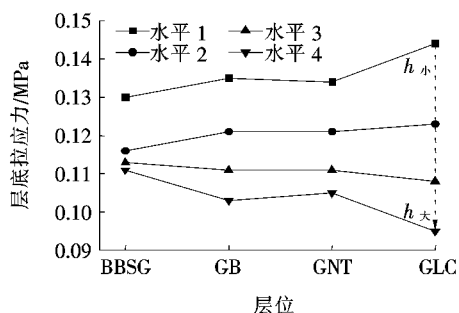


图 2 沥青层底拉应力随厚度变化规律

从图 1 可以看出:沥青层底拉应变随不同层位厚度的变化而呈现不同的显著特性,具体为:GB>BBSG>GNT>GLC,其中沥青层底拉应变随 GB、BBSG 和 GLC 厚度的增加而减小,随 GNT 厚度增加而增大。产生该现象的原因主要是由沥青路面倒装结构特点决定的,GNT“薄弱层”处于刚度均较大的两个层位之间,GNT 层模量较小使得支撑 GB 层的刚度较小,导致 GB 层变形较大,同时 GNT 层下面的 GLC 层模量

较高又约束了 GNT 层的形变,若要减小沥青层底拉应变,防止出现疲劳开裂现象,宜增加 GB 层的厚度,通过增加 GLC 厚度不能抑制疲劳破坏的产生。

由图 2 可知:随着各结构层厚度的增加,水硬性材料层底拉应力逐渐减小,且 GLC 层厚度的影响最大,波动范围为 0.095~0.144 MPa,涨幅 34%,这表明水硬性材料 GLC 层厚度增加,其下卧越深,应力扩散作用越小,使得层底拉应力减小。

为有效控制路基的过量变形和保证路基路面整体的强度,防止沥青路面出现沉陷和车辙变形,需展开土基顶面压应变和弯沉特性研究(图 3、4)。

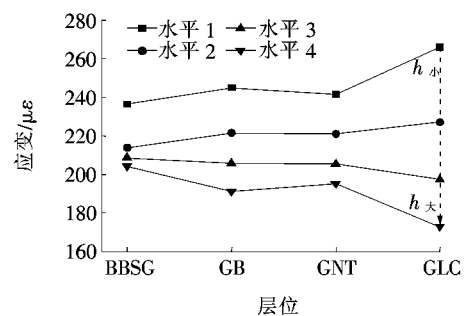


图 3 土基顶面压应变随厚度变化规律

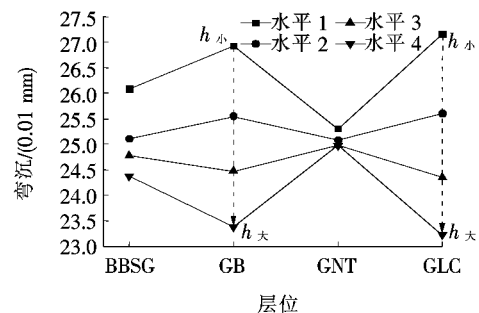


图 4 弯沉随厚度变化规律

从图 3、4 可知:随着各层位材料厚度的增加,土基顶面压应变和弯沉均逐渐减小,且厚度对土基顶面压应变和弯沉的影响程度分别为:GLC>GB≈GNT>BBSG 和 GLC≈GB>BBSG>GNT。上述规律显示,适当增大 GLC 层的厚度,可有效降低土基顶面压应变和弯沉指标,使其满足法规要求,从而保证路基路面的整体强度;同时控制弯沉指标的另一途径为适当增加 GB 层的厚度,亦可达到弯沉降低的目的。

另外,GNT 层厚度的增加,虽使弯沉有一定程度的降低,但超过某一厚度后,弯沉基本保持不变,由此可见,若要控制弯沉指标,增加 GNT 层厚度起到的作用是有限的。

3.2 模量参数对结构受力的影响

图 5、6 分别为沥青层底拉应变、弯拉应力随各层

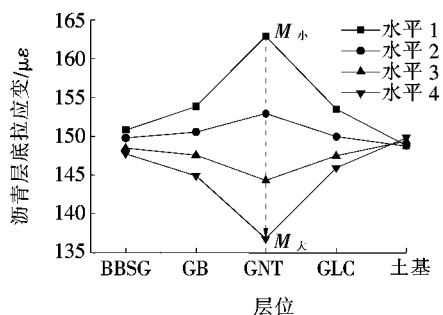


图 5 沥青层底拉应变随模量变化规律

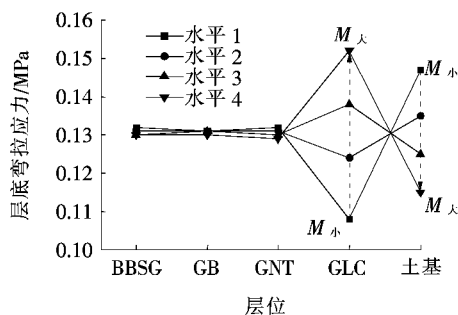


图 6 沥青层底弯拉应力随模量变化规律

模量的变化规律。

从图 5 可知:随着各层位模量的增加,沥青层底拉应变逐渐减小,其中 GNT 的影响最显著,当该层模量较小时层底拉应变在各层位中最大,而模量较高时,沥青层底拉应变又降到最低;而沥青层底拉应变随土基模量的变化微乎其微。造成该现象的原因类同于 GNT 厚度对沥青层底拉应变的影响,GNT 层模量较小时是一“薄弱层”,会使得 GB 层失去支撑,导致变形过大,可当模量较高时,会有效地降低沥青层底拉应变,由此可见,提高 GNT 的模量是控制沥青路面倒装结构疲劳开裂的重要措施,对原材料特性、级配以及压实度均应采取严格的控制措施以保证 GNT 的高模量及高质量。

由图 6 可知:GLC 模量和土基模量对层底弯拉应力的影响最大,其余层位的模量对该指标影响不大,基本保持为 0.13 MPa,其主要原因就是模量突变造成的。GNT 模量和土基的模量远小于 GLC 模量,加之 GNT 层不承受拉应力,增加了其下面 GLC 层的弯拉应力,而土基模量变化敏感时会使 GLC 层失去底部支撑从而增加层底弯拉应力。

图 7、8 分别为土基顶面压应变、弯沉随各层模量的变化规律。

从图 7 可以看出:当 BBSG、GNT、GLC 和土基模量增大时,土基顶面压应变降低,而 GB 模量增大时土

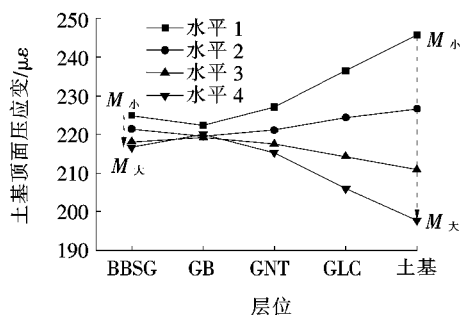


图 7 土基顶面压应变随模量变化规律

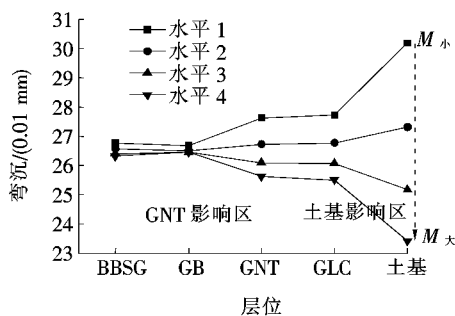


图 8 弯沉随模量变化规律

基顶面压应变先减小后增大,临界点为模量水平 3(即 3 980 MPa),另外,土基顶面压应变随不同层位模量的显著性程度为:土基>GLC>GNT>BBSG>GB。结合图 6 可知:通过增加土基模量、提高路基承载等级,可实现土基顶面压应变和层底弯拉应力的降低,有效控制路基沉陷和反射裂缝等病害的产生。而对于土基顶面压应变随 GB 模量的变化规律,其原因是模量较小时,随模量的增加,GB 层刚度增加,产生的变形减小,使得最终的顶面压应变减小,而当模量增加到一定程度后,可能是因为 GB 层已接近板体,与其下面 GNT 层模量差别较大导致的。

由图 8 可知:层位下卧越深对弯沉指标的影响越大,显著性程度为:土基>GLC≈GNT>GB≈BBSG,其中土基模量的影响最大,而面层 BBSG 和 GB 模量的影响最小。该规律显示,为有效控制不同层位模量对弯沉指标的影响,需重视土基影响区和 GNT 影响区(该影响区指土基和 GNT 模量变化时弯沉指标变化较大),提高土基和 GNT 模量,从而保证路基路面的整体强度。

3.3 试验结果正交分析

通过方差分析对表 1、2 的正交试验结果进行基于厚度和模量的力学响应影响探讨,寻找影响沥青路面倒装结构设计指标的最敏感因素,其结果如表 3、4 所示。

表 3 不同层位厚度对设计指标的影响结果

| 材料 | 沥青层底 弯拉应 变/ $\mu\epsilon$ | 水稳定性 层底弯拉 应力/MPa | 土基顶 面压应 变/ $\mu\epsilon$ | 弯沉/ (0.01 mm) |
|--------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| BBSG | 86.320 * | 0.001 | 6.493 | 27.250 * |
| GB | 497.949 * | 0.001 | 16.731 * | 118.931 * |
| GNT | 43.334 * | 0.001 | 12.792 * | 1.216 |
| GLC | 5.925 | 0.003 | 50.720 * | 147.056 * |
| 显著性程 度/因素 | $h_{GB} > h_{BBSG}$ $> h_{GNT}$ | — | $h_{GLC} >$ $h_{GB} > h_{GNT}$ | $h_{GLC} > h_{GB}$ $> h_{BBSG}$ |

注: * 代表该层位厚度对设计指标影响显著;各厚度临界值为9.28 mm。

表 4 不同层位模量对设计指标的方差分析

| 材料 | 沥青层底 弯拉应 变/ $\mu\epsilon$ | 水稳定性 层底弯拉 应力/MPa | 土基顶 面压应 变/ $\mu\epsilon$ | 弯沉/ (0.01 mm) |
|--------------|--|-------------------------|--|--|
| BBSG | 0.059 | 0 | 0.104 | 0.02 |
| GB | 0.484 | 0 | 0.016 | 0.006 |
| GNT | 4.101 * | 0 | 0.207 | 0.367 |
| 土基 | 0.349 | 3.333 * | 1.348 | 0.452 |
| GLC | 0.008 | 1.667 | 3.325 * | 4.156 * |
| 显著性程 度/因素 | $M_{GNT} > M_{GB}$ $> M_{土基} >$ $M_{BBSG} > M_{GLC}$ | $M_{土基} >$ M_{GLC} | $M_{GLC} > M_{土基}$ $> M_{GNT} >$ $M_{BBSG} > M_{GB}$ | $M_{GLC} > M_{土基}$ $> M_{GNT} >$ $M_{BBSG} > M_{GB}$ |

注: * 代表该层位模量对设计指标影响显著;各厚度临界值为 3.29 mm。

由表 3、4 可知:影响倒装结构沥青路面力学指标变化的厚度因素显然大于模量因素,因此,在进行倒装结构优化设计时可优先考虑调整各层位厚度,通过不断优化厚度因素,从而达到既满足法规设计要求又经济合理的目的。

同时在厚度调整有限的情况下,也可加强 GNT 和土基的材料组合设计,提高施工质量,以有效抑制或延缓沥青路面疲劳开裂和路基沉陷等病害的产生。除此以外,为防止水硬性材料出现反射裂缝,不可一味追求水硬性材料的高模量,以保证其强度符合法规要求即可。

4 倒装类沥青路面结构优化设计建议

经过上述对该国沥青路面倒装结构的正交分析发现,在验算倒装结构时,并不是一味追求高厚度、高

模量,应合理进行路面结构组合设计,优化路面结构厚度和模量,从而达到优化设计的目的。在该项目路面结构、材料、交通、环境等参数确定的情况下,通过法规路面结构验算获得的各设计指标容许值[其中 $\epsilon_{t,ad}(GB3)=152 \times 10^{-6}$ 、 $\sigma_{t,ad}(GLC)=0.261$ MPa 和土基顶面压应变 $\epsilon_{z,ad}=421.7 \times 10^{-6}$]进行该地区此类路面结构优化设计,以提出优化设计建议值,其结果如表 5 所示。

表 5 基于厚度和模量参数的倒装类沥青路面结构优化设计建议

| 结构层 | 厚度 h /cm | 模量 M /MPa |
|------|------------|---------------|
| BBSG | ≥ 4 | $\geq 1\ 790$ |
| GB3 | ≥ 8 | 3 780~4 180 |
| GNT | 9~18 | ≥ 450 |
| GLC | 20~35 | $\geq 1\ 200$ |
| 土基 | — | 125~200 |

5 结论

(1) 在沥青路面倒装结构中,GNT 是“薄弱层”,应严格控制原材料、级配设计及施工工艺等;通过增加 GB 层厚度,或提高 GNT 层模量的措施,一方面可有效抑制或延缓倒装结构沥青路面疲劳裂缝的产生;另一方面可有效降低弯沉,增强路面结构整体强度。

(2) 对于沥青层底拉应变而言,GB 厚度和 GNT 模量对路面结构受力影响显著;而 GLC 模量是影响水硬性材料层底弯拉应力的主要因素;另外,对土基顶面压应变和弯沉指标影响显著的因素为 GLC 厚度和土基模量。

(3) 为有效控制不同层位模量对弯沉的影响,需严格控制土基影响区和 GNT 影响区,提高土基和 GNT 模量,从而保证路基路面的整体强度。

(4) 在进行法规倒装结构沥青路面优化设计时,可优先考虑调整各层位厚度,通过不断优化厚度,从而达到既满足法规要求又经济合理的目的。

参考文献:

[1] 吴善周,钟梦武.倒装结构在高速公路上的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2008(S1).

[2] 刘娇蕾.倒装基层沥青路面结构行为分析[D].西南交通大学硕士学位论文,2016.

[3] 吴玉,蒋鑫,梁雪娇,等.轮载作用下典型沥青路面结构力

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.011

水泥路面板加铺沥青面层后板底脱空检测及评价方法

肖春发, 罗卫, 粟宋来, 谢鰲

(湖南省建筑科学研究院, 湖南 长沙 410002)

摘要: 由于水泥路面板加铺沥青面层这种特定路面结构形式, 原水泥板脱空检测评价方法已不适用, 该文针对多处采用钻芯法确定的板底脱空位置提前进行跟踪观测, 统计其路面表观病害、渗水状况、动力响应等特征, 寻找规律, 对脱空评价指标进行量化, 提出一套适合水泥路面板加铺沥青面层后板底脱空的检测及评价方法, 并在实际工程中应用。

关键词: 水泥路面板; 沥青面层; 板底脱空; 检测评定

旧路改造中对水泥路面板常采用加铺沥青面层(以下称“白加黑”)的方式进行, 其板底也存在脱空现象, 在行车荷载及雨水作用下, 造成面层严重裂缝、唧泥、坑槽甚至整个板体断裂等病害。多种板底脱空检测评价方法如人工目测法、贝克曼梁弯沉测定法、FWD 截距法、FWD 斜率法、声振检测法、雷达检测法、承载板测定法、物元分析法、地震波法等在水泥路面检测中被大量采用, 但“白加黑”刚性体与黏弹性体两种不同性状的路面结构组合在一起, 其受力模式与单独的水泥面板相比已发生了改变, 原水泥板的脱空评价方法已不适用, 需要建立一套适用于“白加黑”路面板底脱空的检测评价方法。

1 “白加黑”路面板底脱空检测方法改进

对“白加黑”路面板底状况的调查, 最直接有效的方法是钻芯法, 板底层位松散、不成型、黏结性能不佳、不平整等现象, 即说明脱空。这种有损检测方法效率低、钻取后将对路面结构产生不利影响, 不可能每块板普及。对采用钻芯法确定的板底脱空位置的观察, 发现脱空位置的路面有一个共同的特点, 即裂缝严重(或唧泥), 灌水后下渗速度较快并在灌水后车辆荷载作用下有唧泥现象, 而板边板角动力响应表现为路面结构

- 学行为分析[J].西南交通大学学报, 2017(3).
- [4] 盛骤, 谢式千. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [5] SETRA. Catalogue des Structures Type de Chaussées Neuves (1998 SETRA/LCPC) [S]. PARIS SETRA, LCPC, 1998.
- [6] SETRA. Conception et Dimensionnement Des structures de Chaussees Guide Technique[S]. PARIS SETRA, 1994.
- [7] 沈金安. 国外沥青路面设计方法汇总[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [8] 刘军勇, 李刚, 张留俊, 等. 基于法国标准的沥青路面结构设计[J]. 公路工程, 2010(5).
- [9] 王乐宇. 中外沥青路面结构设计参数对比研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2015.
- [10] 雷宇, 李刚. 柔性基层沥青路面各层模量变化对沥青路面设计指标的影响[J]. 中外公路, 2009(3).
- [11] 邵财泉. 中外沥青路面设计方法对比研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2015.
- [12] 王为义, 陈景雅, 吴非, 等. 柔性基层模量及厚度对倒装式路面结构受力影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2016(3).
- [13] 李刚, 王崇涛, 丁小军, 等. 基于法国规范的土方、垫层和路面综合设计方法[J]. 中外公路, 2009(4).
- [14] 蒋智禹. 倒装式沥青路面结构的力学性能研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2012.
- [15] 王乐宇, 廖公云, 李植淮, 等. 中法沥青路面结构设计参数重要性对比分析[J]. 中外公路, 2015(5).
- [16] 樊强. 基于层位功能的组合式基层沥青路面结构及其混合料设计研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2016.
- [17] 王浩, 陈华鑫, 叶丹燕, 等. 基于正交试验的沥青路面结构力学响应参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2017(5).

收稿日期: 2019-10-12(修改稿)

作者简介: 肖春发, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 36519013@qq.com