

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.011

冬寒区高速公路面层与基层裂缝的关联性研究

王渊¹, 贾秦龙^{2*}, 范晓燕², 薛洪华², 张文涛¹

(1. 陕西交通控股集团有限公司, 陕西 西安 710009; 2. 中交瑞通路桥养护科技有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为了精准治理寒冷地区半刚性基层路面结构裂缝病害,应用数理统计解析法理论,调查统计2条高速公路66 km路面裂缝数据,通过数据解析研究面层裂缝和基层裂缝的关联性,分析原有基层20 m/道预切缝和破损基层采用沥青稳定碎石换填对裂缝的防治效果。结果表明:路面结构为16 cm沥青面层+36 cm水泥稳定碎石基层,面层横缝中基层反射裂缝占比76%,面层纵缝中贯穿基层纵缝占比14%,基层横缝两侧沿轮迹带方向更易产生纵缝病害,且不断沿纵缝尖端扩展;路面结构为12 cm沥青面层+20 cm水泥稳定碎石基层,面层横纵缝与基层横纵缝一一对应;半刚性基层预切缝中53%的基层预切缝会反射至面层,形成面层横向裂缝;破损基层换填沥青稳定碎石能有效阻止基层裂缝尖端的扩展,消除反射裂缝病害。

关键词:道路工程;半刚性基层裂缝;反射裂缝;龟裂横缝;沥青稳定碎石

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

0 引言

反射裂缝是半刚性基层路面结构典型病害,低温条件下温度的周期性变化引起路面裂缝应力集中导致裂缝迅速扩展^[1],因此,寒冷地区半刚性基层路面结构裂缝更为密集,极大缩短了路面使用寿命^[2]。陕北地区包茂高速公路榆林至靖边段(榆靖段)和青银高速靖边至王圈梁段(靖王段)均为中国早期建设的典型半刚性基层路面,其运营达到15年以上,路面裂缝密集,破损程度严重,目前进入了路面大修期。结合2017和2018年路面大修工程,统计了维修路段路面裂缝的数据,通过数据解析,研究半刚性基层路面面层与基层裂缝的关联性,了解裂缝发展规律,总结裂缝的防治措施,促进路面养护的高质量发展。

1 自然气候及路面结构和交通荷载参数

1.1 自然气候

包茂高速公路榆林至靖边段和青银高速靖边至王圈梁段均位于毛乌素沙漠边缘,属中温带大陆性

气候,半干旱地区,降雨量少而集中,蒸发量大,年降雨量430 mm。气候分区均为冬寒区,年平均气温8~9℃,温差变化强烈,年温差一般为30℃左右,极端最高气温40℃,极端最低气温-32.7℃。

1.2 路面结构参数

榆靖段属于陕西第一条沙漠高速公路,2003年建成通车,靖王段2005年建成通车,其路面结构见表1。

表1 路面结构统计

高速公路路段	沥青面层/ cm	水泥稳定碎 石基层/cm	二灰土底 基层/cm
G20青银高速靖王段	16	36	20
G65包茂高速榆靖段	12	20	36

1.3 交通荷载参数

青银高速靖王段和包茂高速榆靖段均为陕北能源运输的重要通道,历年的交通量如表2所示。

根据交通量统计可知:靖王段和榆靖段交通量主要以货车为主,货车比例最高74.80%,最低50.49%,靖王段平均交通流量略大于榆靖段。根据车辆类型换算成标准轴载BZZ-100,计算靖王段行车道累计当量轴次 $Ne=1.41 \times 10^7$,榆靖段行车道累计当量轴次 $Ne=1.18 \times 10^7$ 。

收稿日期:2022-07-07

作者简介:王渊,男,大学本科,高级工程师.E-mail:19298250@qq.com

*通信作者:贾秦龙,男,硕士,高级工程师.E-mail:798869126@qq.com

表2 2010—2017年交通量统计

年份/ 年	靖王段		榆靖段	
	年平均日交通 量/(pcu·d ⁻¹)	货车比 例/%	年平均日交通量/ (pcu·d ⁻¹)	货车比 例/%
2010	8 881	70.66	9 580	72.66
2011	20 089	71.69	11 356	71.69
2012	7 022	58.50	6 571	74.80
2013	6 240	57.51	5 330	71.04
2014	5 915	57.51	4 678	51.46
2015	5 008	56.51	4 164	50.49
2016	5 245	59.51	5 943	51.80
2017	6 453	58.51	5 711	51.60
平均	8 106	61.30	6 667	61.94

2 路面裂缝统计分析

2.1 路面裂缝评价标准

分别对路面横向贯通裂缝(以下称为横向裂缝)和横向裂缝与纵向裂缝交叉形成龟裂或横缝沉陷(以下称为龟裂横缝)进行统计。《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)要求横向裂缝间距 ≤ 15 m时即可采用路面结构修复方案,因此横向裂缝以大于65条/km为统计结点。龟裂横缝严重影响了行车舒适性,且局部基层已破损、松散,因此采用龟裂横缝数量以10条/km为统计结点。

2.2 靖王段路面裂缝统计分析

靖王段沥青路面厚度15 cm,全线均加铺了1 cm微表处罩面,路面大修对行、超车道沥青路面全部铣刨,基层病害主要为横向裂缝、局部纵向裂缝以及纵横缝交错基层块裂,面层与基层裂缝差异对比如图1所示。

K1273+205、K1273+308和K1273+110沥青面层行车道轮迹带均已经产生严重的连续纵缝,沥

青面层铣刨后,基层横向裂缝与面层横向裂缝对应,基层纵缝仅位于横缝交叉处。由基层裂缝统计结果可知:靖王段路面结构15 cm沥青面层+38 cm水泥稳定碎石基层,面层纵缝发展深度大多仅存在于沥青面层,基层纵缝一般存在于横纵缝交叉位置。基层纵缝产生的主要原因为基层产生横缝后强度降低,横缝的极限不利位置在行车荷载作用下导致基层疲劳开裂形成纵缝,且纵缝顺裂缝尖端不断扩展^[3]。



(a) K1273+110



(b) K1273+205



(c) K1273+308

图1 面层与基层裂缝对比图

选取靖王段41 km $I_{PQI} < 90$ 路段进行裂缝统计,并根据建设时期的不同施工标段(施工水平有差异)将裂缝调查路段分为两段,分别为下行线K1244+000~K1266+000和下行线K1342+000~K1364+000段,面层和基层裂缝统计数据如表3、4所示。

表3 K1244~K1266裂缝统计分析

序号	桩号	面层横 缝/条	龟裂横 缝/条	基层横 缝/条	基层反射裂 缝占比/%	面层纵向 裂缝/m	基层纵向 裂缝/m	纵缝贯穿基层 占比/%
1	K1244+000~K1245+000	80	11	38	47.50	2 000	56.8	2.84
2	K1245+000~K1246+000	66	8	39	59.09	2 000	62.7	3.14
3	K1246+000~K1247+000	75	13	36	48.00	2 200	30.7	1.40
4	K1247+000~K1248+000	64	7	42	65.63	200	66.2	33.10
5	K1248+000~K1249+000	74	11	27	36.49	1 800	296.1	16.45
6	K1249+000~K1250+000	72	13	41	56.94	1 000	266.0	26.60

续表 3

序号	桩号	面层横 缝/条	龟裂横 缝/条	基层横 缝/条	基层反射裂 缝占比/%	面层纵向 裂缝/m	基层纵向 裂缝/m	纵缝贯穿基层 占比/%
7	K1250+000~K1251+000	64	8	43	67.19	200	156.0	78.00
8	K1251+000~K1252+000	59	4	40	67.80	200	145.0	72.50
9	K1252+000~K1253+000	46	2	43	93.48	200	138.6	69.30
10	K1253+000~K1254+000	47	2	39	82.98	500	126.0	25.20
11	K1254+000~K1255+000	55	4	46	83.64	400	255.8	63.95
12	K1255+000~K1256+000	77	14	39	50.65	1 200	285.4	23.78
13	K1256+000~K1257+000	77	12	45	58.44	1 800	225.9	12.55
14	K1257+000~K1258+000	61	1	32	52.46	200	159.3	79.65
15	K1258+000~K1259+000	67	6	39	58.21	100	81.5	81.50
16	K1259+000~K1260+000	51	3	40	78.43	200	197.1	98.55
17	K1260+000~K1261+000	48	3	34	70.83	500	281.9	56.38
18	K1261+000~K1262+000	65	7	39	60.00	400	98.7	24.68
19	K1262+000~K1263+000	73	3	46	63.01	300	207.5	69.17
20	K1263+000~K1264+000	55	3	34	61.82	100	22.8	22.80
21	K1264+000~K1265+000	64	5	52	81.25	300	21.8	7.27
22	K1265+000~K1266+000	72	3	53	73.61	200	20.9	10.45
平均值		64.2	6.5	40.3	64.4	727.3	145.6	20.0

表 4 K1342~K1364 裂缝统计分析

序号	桩号	面层横 缝/条	龟裂横 缝/条	基层横 缝/条	基层反射裂 缝占比/%	面层纵向 裂缝/m	基层纵向 裂缝/m	纵缝贯穿基层 占比/%
23	K1342+000~K1343+000	66	5	53	80.30	1 800	71.9	3.99
24	K1343+000~K1344+000	58	5	57	98.28	1 700	106.1	6.24
25	K1344+000~K1345+000	63	11	57	90.48	1 600	164.6	10.29
26	K1345+000~K1346+000	62	8	37	59.68	2 000	144.8	7.24
27	K1346+000~K1347+000	63	7	58	92.06	1 800	221.0	12.28
28	K1347+000~K1348+000	63	8	41	65.08	1 300	12.0	0.92
29	K1348+000~K1349+000	60	9	42	70.00	1 200	55.8	4.65
30	K1349+000~K1350+000	70	6	44	62.86	1 000	138.0	13.80
31	K1350+000~K1351+000	57	11	57	100.00	1 600	30.4	1.90
32	K1354+000~K1355+000	71	9	52	73.24	1 300	8.4	0.65
33	K1355+000~K1356+000	54	14	40	74.07	600	5.5	0.92
34	K1356+000~K1357+000	48	11	43	89.58	200	0.0	0.00
35	K1357+000~K1358+000	47	19	47	100.00	100	73.0	73.00
36	K1358+000~K1359+000	53	7	53	100.00	850	143.1	16.84
37	K1359+000~K1360+000	61	13	57	93.44	200	121.7	60.85
38	K1360+000~K1361+000	63	8	63	100.00	1 200	31.0	2.58
39	K1361+000~K1362+000	58	14	58	100.00	300	99.9	33.30
40	K1362+000~K1363+000	47	9	47	100.00	100	47.0	47.00
41	K1363+000~K1364+000	60	11	60	100.00	100	55.1	55.10
平均值		59.2	9.7	50.8	86.8	997.4	80.5	8.1

由表 3 可知:

(1) 单公里沥青面层横向裂缝最多 80 条, 最少 46 条, 平均 64 条, 裂缝间距 12.5~21 m/条, 平均间距

约 15 m/条。其中, 单公里横向裂缝 ≥ 65 条共 10 km, 占比 45%。单公里龟裂横缝平均 6.5 条, 单公里龟裂横缝数量 ≥ 10 条路段占比 27.3%。

(2) 单公里基层横向裂缝最多53条,最少32条,平均40条,裂缝间距20~31 m/条,平均间距约25 m/条,基层反射裂缝占面层横向裂缝的比例约64.4%。

(3) 平均单公里面层纵缝长度727.3 m,平均基层纵向裂缝长度145.6 m,纵缝贯穿基层占比约20%。

由表4可知:

(1) 单公里沥青面层横向裂缝最多70条,最少47条,平均59条,裂缝间距14~21 m/条,平均间距约17 m/条。其中,单公里横向裂缝 ≥ 65 条共3 km,占比16%。单公里龟裂横缝平均9.7条,单公里龟裂横缝数量 ≥ 10 条路段占比42.1%。

(2) 单公里基层横向裂缝最多60条,最少37条,平均51条,裂缝间距17~27 m/条,平均间距约20 m/条,基层反射裂缝占面层横向裂缝的比例约86.8%,其中7 km路段基层横向裂缝和面层横向裂缝一一对应。

(3) 平均单公里面层纵缝长度997.4 m,平均基层纵向裂缝长度80.5 m,纵缝贯穿基层占比约8.1%。

下行线K1244~K1266段和K1342~K1364段在建设时期为不同施工标段,因此路面病害表现形式也有所差异,针对基层横缝占面层横缝比例和基层纵缝占路面纵缝比例进行对比分析,结果如表5、6所示。

表5 基层横缝占面层横缝比例分析

基层横缝占面层横缝比例/%	K1244~K1266 长度/km	K1342~K1364 长度/km
<50	3	0
50~60	6	1
60~70	6	2
70~80	3	3
80~90	3	2
>90	1	11

表6 基层纵缝占面层纵缝比例分析

基层纵缝占面层纵缝比例/%	K1244~K1266 路段长度/km	K1342~K1364 路段长度/km
<10	4	10
10~20	3	4
20~30	5	0
30~40	1	1
40~50	0	1
50~60	1	1
60~70	3	1
70~80	3	1
80~90	1	0
>90	1	0

由表3、4可知,K1244~K1266段和K1342~K1364段面层单公里横向裂缝的平均数量为64条/km和59条/km,两者差异并不大。但是由表5中基层横缝占面层横缝比例数据分析可知,K1244~K1266段基层横缝占面层横缝比例50%~70%路段长度12 km,具有代表性。K1342~K1364段基层横缝占面层横缝比例90%路段长度11 km,具有代表性。

由表3、4可知,K1244~K1266段和K1342~K1364段基层纵缝的平均数量为145.6 m/km和80.5 m/km,前者单公里基层纵缝数量约为后者的2倍。由表6中基层纵缝占面层纵缝比例数据分析:K1244~K1266段基层纵缝占面层纵缝比例30%以下路段长度12 km,60%~80%路段长度6 km,具有代表性。K1342~K1364段基层纵缝占面层纵缝比例10%以下路段长度10 km,具有代表性。

分别对K1244~K1266段和K1342~K1364段裂缝分布代表性路段采用 $\phi 150$ 钻芯取样,并对基层芯样进行劈裂强度试验。试验结果见表7。

表7 裂缝分布典型路段基层芯样强度试验结果

起止桩号	基层横缝 占面层横 缝比例/%	基层纵 缝长 度/m	芯样桩号	芯样 高度/ mm	破坏 荷载/ kN	劈裂 强度/ MPa
K1248~ K1249	36.5	296	K1248+020	147.7	45.3	1.28
K1255~ K1256	50.6	285	K1255+100	150.3	47.3	1.31
K1350~ K1351	100.0	30	K1350+050	146.6	112.6	3.21
K1360~ K1361	100.0	31	K1360+200	157.2	128.0	3.40

基层劈裂强度试验结果表明:K1248+020和K1255+100基层芯样劈裂强度分别为1.28 MPa和1.31 MPa,K1350+050和K1360+200基层芯样劈裂强度分别为3.21 MPa和3.40 MPa。基层劈裂强度降低时,基层横缝占面层横缝比例减小,面层低温收缩横缝增多,且面层纵向疲劳裂缝更易贯穿基层;基层劈裂强度增大时,基层横缝占面层横缝比例增大,甚至面层横缝和基层横缝一一对应,基层纵向裂缝减少。

2.3 榆靖段路面裂缝统计分析

选取榆靖段25 km $I_{PQI} < 90$ 路段进行了裂缝统计,徒步记录了面层横向裂缝和龟裂横缝病害数量,

如图 2 所示。

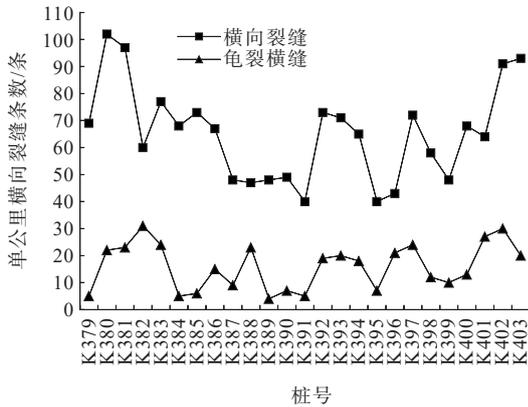


图 2 单公里横向裂缝统计图

由图 2 可知：

(1) 单公里沥青面层横向裂缝最多 102 条, 最少 40 条, 平均 65 条, 裂缝间距 10~25 m/条, 平均间距约 15 m/条。其中, 单公里横向裂缝 ≥ 65 条共 16 km, 占比 64%。

(2) 单公里龟裂横缝平均 16 条, 其中, 单公里龟裂横缝 ≥ 10 条共 17 km, 占比 68%, 单公里龟裂横缝 ≥ 20 条共 11 km, 占比调查路段的 44%。

榆靖段沥青路面厚度仅 12 cm, 沥青面层铣刨后基层病害表现为与面层病害一一对应的特征。路面轮迹带纵向裂缝基本全部贯穿基层, 龟裂横缝裂缝开裂形状与基层裂缝开裂形状一致。面层与基层裂缝关联性对比如图 3、4 所示。



K401+700 铣刨前 K401+700 铣刨后

(a) K401+700



K402+030 铣刨前 K402+030 铣刨后

(b) K402+030

图 3 面层与基层裂缝对比图



图 4 K394 基层横缝缝口松散

基层裂缝病害的主要原因分析：

(1) 沥青路面结构较薄时(12 cm 厚), 重载交通下, 沥青面层结构抗剪能力较差, 纵向裂缝贯穿面层, 且纵向裂缝不断向下发展, 易贯穿基层, 表现为面层纵缝与基层裂缝一一对应。

(2) 沥青面层较薄, 面层裂缝几乎全部贯穿面层, 雨水由裂缝下渗, 毛细水作用下导致基层松散、破损。项目区干旱少雨, 年降雨量小于 500 mm, 夏季暴雨频率较高, 几乎无连续降雨过程, 但由于面层横、纵向裂缝较多, 基层水损害仍然较为严重, 基层裂缝缝口松散, 连片分布。

3 基层裂缝处置探讨

基层裂缝一般采取加铺抗裂材料、裂缝高聚物注浆、挖补换填基层、基层预切缝等手段进行处置^[4-5]。本次针对基层预锯缝和破损基层换填沥青稳定碎石处置效果进行分析探讨。

3.1 基层预切缝防治效果实例

榆靖段建设时期基层间距 20 m 预留一道预切缝。K281+080~K281+320 段面层铣刨后统计基层 13 条预切缝, 7 条预切缝反射至面层, 6 条预切缝未反射至面层, 即有 53% 基层预切缝反射至面层形成面层反射裂缝, 如表 8 所示。预切缝形成的反射裂缝长直且面层与基层裂缝上下对应, 面层灌缝后基层基本无破损类病害。

表 8 基层预切缝反射至面层情况统计

序号	基层预切缝桩号	反射至面层情况	序号	基层预切缝桩号	反射至面层情况
1	K281+080	未反射	8	K281+220	未反射
2	K281+100	反射	9	K281+240	未反射
3	K281+120	反射	10	K281+260	反射
4	K281+140	未反射	11	K281+280	反射
5	K281+160	未反射	12	K281+300	反射
6	K281+180	反射	13	K281+320	反射
7	K281+200	未反射			

蒋应军等^[6]研究了早期半刚性基层预切缝的防裂机理,对基层采用预切缝处理使基层有规则断开,以释放基层内的温缩应力,防止了由于基层开裂导致的反射裂缝病害。

3.2 基层换填沥青稳定碎石效果实例

路面定期养护中基层块裂、松散维修挖除原上基层换填沥青稳定碎石。根据图5可知:基层换填沥青稳定碎石后可以完全消除基层裂缝病害,且阻断了相邻基层裂缝的扩展。



图5 沥青稳定碎石换填基层效果图

基层换填沥青稳定碎石处置效果实例与胡杰^[7]和王雪莲等^[8-9]的沥青稳定碎石抗裂机理研究成果非常吻合,沥青稳定碎石收缩系数较小,其大粒径与多孔隙结构充分吸收了裂缝释放应变能,有效地阻断了裂缝尖端的扩展路径。

沥青路面上面层修复和重建时间短、成本低,而下面的结构层出现破坏,传统维修需将上部所有结构拆除重建,不管其是否破坏,导致维修时间长、费用高^[10-11]。笔者认为在合理的养护时机对半刚性基层路面反射裂缝及次生病害采用切缝和基层换填沥青稳定碎石联合方案处置,并重铺或加铺沥青上面层,可有效减少甚至消除半刚性基层反射裂缝病害,从而延缓甚至避免路面结构大修,获得最大养护投资效益。

4 结论

在自然环境与交通荷载基本相同的条件下,应用数据统计解析法研究冬寒区高速公路半刚性基层路面结构面层与基层裂缝的关联性,得出以下结论:

(1) 路面结构为16 cm 沥青面层+36 cm 水泥稳定碎石基层时,面层横缝中基层反射裂缝占比76%。基层强度降低时,基层横缝占面层横缝比例减少,面层低温收缩横缝增加;面层纵缝中贯穿基层纵缝约占比14%,基层横缝两侧沿轮迹带方向更易产生纵缝病害,且不断沿纵缝尖端扩展。

(2) 路面结构为12 cm 沥青面层+20 cm 水泥稳定碎石基层时,面层横缝与基层横缝一一对应,面层纵向裂缝全部贯穿基层,面层龟裂横缝的裂缝形状与基层裂缝形状一致。

(3) 半刚性基层预切缝中约53%的基层预切缝会反射至面层,形成面层横向裂缝,但横缝顺直,灌缝后不易发展成龟裂横缝;破损基层换填沥青稳定碎石,能有效阻止基层裂缝尖端的扩展,消除反射裂缝病害。

(4) 包茂高速公路榆靖段和青银高速公路靖王段均为半刚性基层路面结构,榆靖段采用的基层预切缝较好地控制了横向反射裂缝的产生及发展,但由于路面结构偏薄,重载交通下,路面基层较早地出现结构破坏。靖王段路面基层和面层均相对较厚,但基层水泥含量较大、强度高,路面反射裂缝相对较多,日常养护中良好的灌缝避免了基层的水损坏,路面铣刨后,基层整体性好、病害少,及时的面层功能修复即可确保路面的良好使用性能。

参考文献:

- [1] 郑健龙,关宏信.温缩型反射裂缝的热粘弹性有限元分析[J].中国公路学报,2001,14(3):1-5.
- [2] 李新宏.温度作用下半刚性基层道路反射裂缝的应力分析与处理方法研究[J].公路,2017,62(6):54-60.
- [3] 栾利强.半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J].土木工程学报,2017,50(9):118-128.
- [4] 叶向前,邹晓翎,何虹霖,等.半刚性基层沥青路面低温开裂成因研究综述[J].中外公路,2020,40(4):62-67.
- [5] 黄允江,汪婧,刘平,等.半刚性基层沥青路面反射裂缝处治新方法探讨[J].公路交通技术,2016,32(4):43-48.
- [6] 蒋应军,薛航,薛辉,等.半刚性基层预锯缝及铺土工布的路面防裂措施[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(2):6-9.
- [7] 胡杰.沥青稳定碎石基层抗裂机理研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [8] 王雪莲,黄晓明,卞国剑.LSPM对防治半刚性基层沥青路面反射裂缝机理分析[J].公路交通科技,2016,33(7):12-18.
- [9] 王雪莲,黄晓明,卞国剑.基于数值模拟的半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展路径分析[J].公路,2018,63(5):1-6.
- [10] 郑健龙.基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J].中国公路学报,2014,27(1):1-7.
- [11] 冯伟,刘朝晖,柳力,等.半刚性基层沥青路面车辙有限元模拟及灰关联分析[J].中外公路,2021,41(6):60-65.