

旧水泥砼路面加铺沥青层的三维有限元分析*

陈明¹, 肖杰¹, 杨和平¹, 吴超凡², 张继森²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省交通科学研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410021)

摘要:应用 Abaqus 三维有限元分析软件, 针对旧水泥砼路面进行直接加铺和增设应力吸收层后加铺沥青层两种处理方案, 通过与原未改造路面对比, 结合温度场, 进行不同荷载作用下路面结构接缝弯沉和传荷能力分析, 研究沥青加铺层结构强度和反射裂缝。结果表明, 加铺沥青层后弯沉与传荷能力均有明显改善; 温度场对旧砼路面弯沉和传荷能力的影响远大于荷载作用, 加铺沥青层后弱化; 结构强度指数能评价传荷能力, 但对温度耦合下的超载有局限性; 增设应力吸收层能有效阻止反射裂缝。

关键词:公路; 旧水泥砼路面; 应力吸收层; 接缝弯沉; 接缝传荷

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0089-05

接缝是水泥砼路面结构中最薄弱之处, 其弯沉和应力过大易导致边角破裂、板底脱空、唧泥、错台等病害, 弯沉量和弯沉差也同样影响水泥砼路面行车舒适性。因此, 接缝传荷能力直接影响路面结构设计和性能。砼路面接缝传荷能力靠荷载传递的机构主要分为集料嵌锁、传力杆、传力杆和集料嵌锁三类。随着交通量的增加及道路使用年限的增长, 水泥砼路面出现损坏, 加铺沥青罩面层是一种较普遍且经济高效的维修方法, 但接缝处仍存在隐患, 主要是接缝受到拉伸与剪切作用而产生反射裂缝。单景松研究了旧水泥路面沥青加铺改造中的弯沉, 颜祥程对水泥砼道面加铺层结构接缝传荷能力进行了计算分析, 但都仅考虑了行驶车辆所造成的荷载, 气温和太阳辐射等热荷载对半刚性沥青路面产生的温度场及温度应力同样不可忽视。该文结合湖南省道 S207 长沙县段水泥砼路面提质改造工程, 应用

Abaqus 软件建立三维有限元模型对接缝传荷作用进行模拟, 分析单轮荷载作用下温度因素的影响及在不同轴载下的变化规律, 并根据李祖仲的研究成果评价路面加铺层的结构强度, 对加铺层底部的反射裂缝进行力学分析。

1 路面结构有限元模拟

1.1 路面结构及各层参数拟定

湖南省道 S207 长沙县段水泥砼路面升级改造工程, 原路面结构为 24 cm C30 水泥砼路面+20 cm 水泥稳定碎石(5.5%水泥)基层+15 cm 水泥稳定碎石(4.5%水泥)底基层, 提质改造路面采用直接加铺和增设应力吸收层后加铺两种方案, 根据文献[14]选取各结构层计算参数(见表 1)。

1.2 有限元计算模型

应用 Abaqus 三维有限元分析软件, 采用通用

表 1 路面结构方案

方案类型	结构层	厚度/cm	模量参数/MPa	泊松比
无处理	旧砼板	35	1 500	0.20
	水泥稳定碎石基层	24	31 000	0.15
	SMA-13 沥青玛蹄脂碎石砼(上面层)	4	1 400	0.35
	SBS 改性乳化沥青(粘层)	—	—	—
加铺	ATB-25 粗粒式开级配沥青稳定碎石(下面层)	8	1 200	0.30
	改性沥青应力吸收层	2	500	0.25
	旧砼板	24	31 000	0.15
	水泥稳定碎石基层	35	1 500	0.20

注: 加铺方案根据应力吸收层的有无分为直接加铺和增设应力吸收层后加铺。

* 基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目(201503)

静力分析方法,各层接触条件为完全连续。旧水泥砼板长取5 m、宽取4 m,板间缝宽为1 cm,等间距布设传力杆,传力杆弹性模量为200 GPa、泊松比为0.3。将基层以下等效为Winkler地基或弹性半空间地基,地基反应模量为50 MPa/m,基层底面边界条件按接触功能模块中的Elastic Foundation进行模拟。为使结果精确,旧砼面层及加铺沥青层均细分网格,路面结构有限元模型见图1。

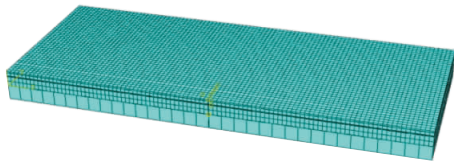


图1 路面结构有限元模型

模型采用单侧双轮荷载,轴重为100 kN,轮压为0.7 MPa。由于轮胎接近于地面更近似于矩形,将轮胎接地面积假设为矩形。按照荷载应力等效原则,将双圆均布荷载换算为矩形荷载,单轮接地面积为19.2 cm×18.6 cm,单侧双轮中心距为31.4 cm,作用于临界荷位,行车荷载见图2。

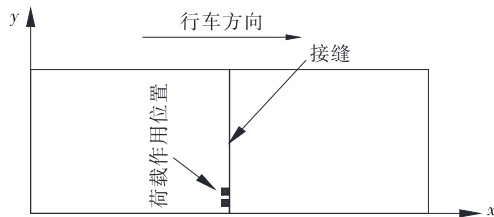


图2 行车荷载示意图

2 接缝传荷能力

2.1 接缝传荷能力系数

根据JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》,测定接缝传荷能力的试验荷载采用设计轴载的一侧轮载,将荷载施加在邻近接缝的路面表面,实测接缝两侧边缘的弯沉值,然后采用下式计算接缝传荷系数 k_j :

$$k_j = \omega_u / \omega_l \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω_u 、 ω_l 分别为未受荷载接缝、受荷载接缝边缘处的弯沉值(mm)。

规范的测定方案正好符合有限元模型,即可通过模拟计算相应弯沉值,进而计算接缝传荷系数。

2.2 加铺沥青层对接缝传荷能力的影响

2.2.1 单独荷载作用下的接缝传荷能力

运用有限元模型对两种加铺方案及原未改造路

面进行模拟,得到接缝处弯沉(见表2)。

表2 各方案下接缝处弯沉

方案类型	弯沉/mm		荷系数/%
	荷载侧	无荷载侧	
无处理	-0.330 1	-0.294 0	89.064
直接加铺	-0.286 8	-0.273 6	95.394
增设应力吸收层	-0.284 7	-0.271 0	95.182

路面接缝的传荷能力与传荷系数呈正相关关系,系数越大,传荷能力越好,路面结构完整性越好。从表2可知:与未处理时相比,直接加铺方案荷载侧与无荷载侧弯沉分别减少13.12%、6.94%,增设应力吸收层后弯沉进一步减小,分别减少13.75%、7.82%;直接加铺与增设应力吸收层相比,接缝传荷系数相差不大,均为95%左右,传荷能力与无处理时相比有较大提升。主要原因是随路面厚度增加,上部荷载对砼板接缝处的影响逐渐变小。

2.2.2 温度场对接缝传荷能力的影响

路面结构不仅受上部行车荷载作用,气温和太阳辐射等热效应对路面产生的影响不可忽视。考虑温度的影响,取夏季某天中的较常见温度值35℃作为路面结构面层表面温度,设为边界条件,逐步向下发生热传导,侧面为绝热边界,计算温度应力时取 $\Delta T=15℃$,各材料的热物理参数见表3。

表3 各材料的热物理参数

材料类型	热传导率/ [J·(m· h·℃) ⁻¹]	密度/ (kg· m ⁻³)	热容量/ [J·(kg· ℃) ⁻¹]	线膨胀系 数/[×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹]
SMA-13	3 600	2 300	1 310	20.0
ATB-25	3 600	2 300	1 310	20.0
改性沥青	3 600	2 300	1 310	20.0
旧砼板	4 680	2 400	970	10.0
碎石基层	4 320	2 200	820	12.5

负载情况分为单独荷载、单独温度场和温度与荷载耦合,无处理路面和两种加铺沥青方案的传荷系数见表4。

由表4可知:耦合温度场之后,无处理路面的荷载侧与无荷载侧弯沉分别增加173.86%、206.73%,直接加铺路面分别增加27.09%、32.38%,增设应力吸收层路面分别增加26.45%、31.77%,弯沉量均显著增大,特别是无处理的原路面;3种工况的温度与荷载耦合情况与单独荷载情况相比接缝传荷系数分别增加10.693%、3.975%和4.012%。主要原因在于

表 4 各方案下的传荷系数

方案类型	负载情况	弯沉/mm		荷系数/%
		荷载侧	无荷载侧	
无处理	荷载	-0.330 1	-0.294 0	89.064
	温度场	-0.620 8	-0.621 4	—
	温度与荷载耦合	-0.904 0	-0.901 8	99.757
直接加铺	荷载	-0.286 8	-0.273 6	95.394
	温度场	-0.110 2	-0.110 2	—
	温度与荷载耦合	-0.364 5	-0.362 2	99.369
增设应力吸收层	荷载	-0.284 7	-0.271 0	95.182
	温度场	-0.103 6	-0.103 6	—
	温度与荷载耦合	-0.360 0	-0.357 1	99.194

温度场产生的温度应力作用于砼板不同于上部荷载存在偏载的情况,接缝两侧板均发生等量翘曲,单独温度场作用时接缝两侧的弯沉值(见图 3)能验证这一点。传荷系数有一定提升,弯沉量有大幅度增加,说明温度耦合对接缝的影响远大于单独荷载作用。另外,加铺沥青层后温度场对接缝的影响较之无处理路面变小,主要原因在于随着厚度的增加,表面温度由表面传热到内部存在着热量损失,接缝处产生的温度应力大大减小。

接缝传荷能力虽可一定程度上体现结构的强度和稳定性,但弯沉量也不可忽视,温度与荷载耦合情况下接缝传荷系数均大于单独荷载情况,弯沉量也

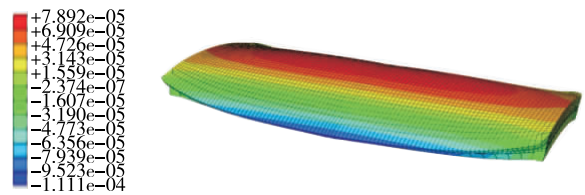


图 3 直接加铺路面弯沉云图(单位:m)

一样,说明温度耦合荷载对路面的危害较大。

2.3 不同荷载作用对接缝传荷能力的影响

取不同轴载(100~240 kN)按 20 kN 逐步递增,研究不同荷载作用对路面接缝传荷能力的影响,结果见图 4~7。

由图 4~6 可知:3 种方案下,无论是单独荷载作用还是温度耦合作用,弯沉值均显著增大,说明超载对于各种情况的路面影响均显著;弯沉值随着轴载的变化呈典型的线性关系,单独荷载作用下接缝两侧有一定弯沉差,温度与荷载耦合情况下接缝两侧弯沉变化曲线基本吻合,弯沉差很小,但弯沉量远大于前者。

由图 7 可知:单独荷载作用下,3 种方案的接缝传荷系数基本没有改变,与周正峰得出的接缝传荷能力与荷载大小无关的结论吻合,但仅局限于单独荷载情况;温度耦合荷载作用下,3 种方案的接缝传荷系数呈下降趋势。单独荷载情况下,加铺沥青层后接缝传荷能力明显上升,直接加铺与增设应力吸

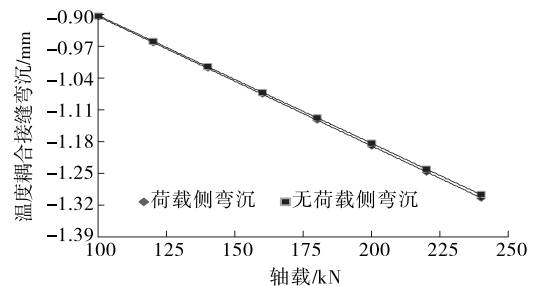
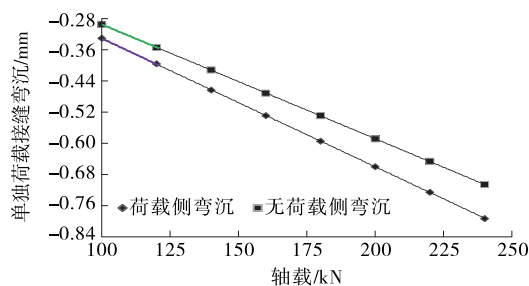


图 4 未处理路面接缝弯沉

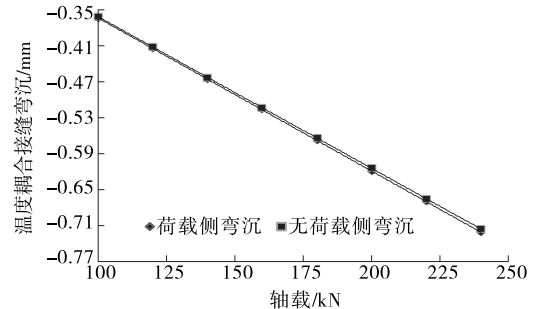
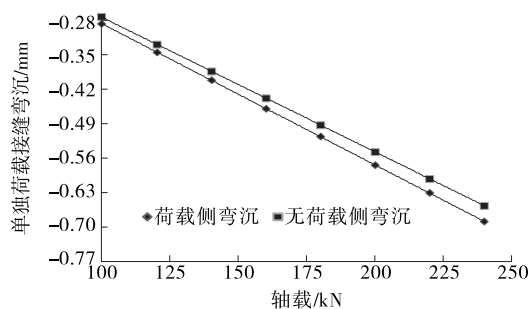


图 5 直接加铺路面接缝弯沉

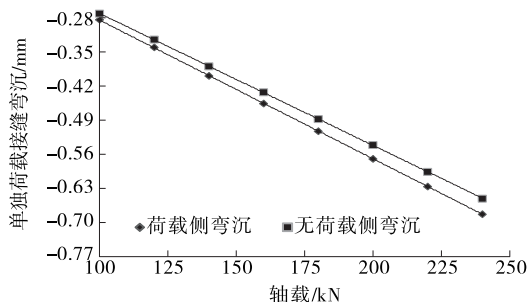


图6 增设应力吸收层加铺路面接缝弯沉

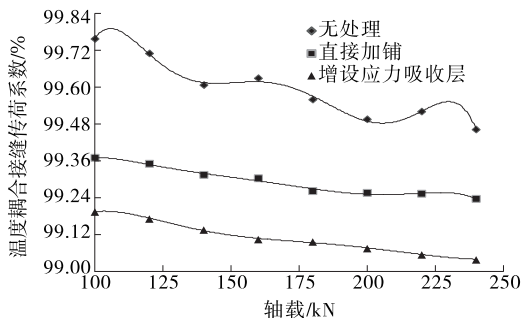
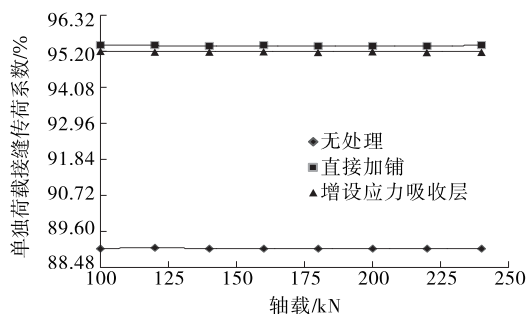
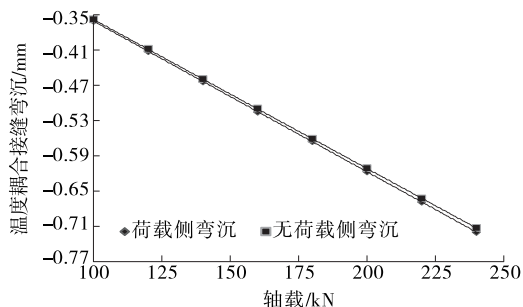


图7 各方案下的传荷系数

收层区别不大;温度耦合荷载情况下,传荷系数由大到小依次为无处理、直接加铺和增设应力吸收层,说明温度对传荷能力的影响远大于荷载,并在加铺沥青层后弱化。

3 加铺层结构计算强度

一般而言,在旧水泥砼路面加铺沥青层结构中,旧水泥砼层较之上层结构可视为刚性基层,其结构强度代表整个加铺层结构的强度,故只需对旧水泥砼路面面板结构进行强度评定。根据 JTG H20—2007《公路技术状况评定标准》,采用式(2)计算路面强度,以接缝传荷系数代替路面结构强度系数,进而计算沥青加铺层的结构强度指数(见表5)。

$$OLSSI = 100 / (1 + a_0 e^{a_1 k_1}) \quad (2)$$

式中: a_0 、 a_1 为模型参数, $a_0 = 15.71$, $a_1 = -5.19$ 。

表5 各方案下结构强度指数

方案类型	负载情况	结构强度指数/%	方差/($\times 10^{-5}$)
无处理	荷载	86.63	2.97
	温度耦合	91.79	163.11
直接加铺	荷载	89.99	2.40
	温度耦合	91.68	37.46
增设应力吸收层	荷载	89.90	0.95
	温度耦合	91.60	47.95

由表5可知:在不同荷载作用下,单独荷载作用时结构强度指数与均值的方差最大值仅为 2.97×10^{-5} ,表明单独荷载作用时超载对路面结构强度指数基本无影响;而温度耦合荷载作用时结构强度指数与均值的方差最大值达 163.11×10^{-5} ,说明温度耦合情况下不同荷载对传荷能力有影响,用该指数评价结构强度存在一定局限性。

4 反射裂缝

在旧砼路面加铺沥青层结构中,接缝的一系列作用会对加铺层产生一定影响,包括由荷载引起的剪切型反射裂缝及由温度产生的弯拉型反射裂缝。不同荷载下加铺层底面接缝上部位置处的最大主应力 σ_1 、有效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{max} 见表6。

由表6可知:无论何种情况,随着轴载的增大,加铺层底面最大应力和最大剪应力显著增大,对反射裂缝的形成和扩张起着一定促进作用。超载对加铺路面结构的稳定性存在严重危害。

直接加铺沥青层底面最大主应力为拉应力,单独荷载作用与温度耦合作用相比区别明显,最大剪应力甚至远小于后者,说明反射裂缝主要由于温度应力所造成;增设应力吸收层后,加铺层底面最大主应力为压应力,主要原因是下层应力吸收层代替了受拉,单独荷载下的最大主应力略小于温度耦合荷

表6 加铺层底部应力

荷载/kN	不同加铺方案下加铺层底部应力/MPa											
	直接加铺						增设应力吸收层					
	荷载			温度耦合			荷载			温度耦合		
	σ_1	σ_e	τ_{\max}	σ_1	σ_e	τ_{\max}	σ_1	σ_e	τ_{\max}	σ_1	σ_e	τ_{\max}
100	0.086	0.223	0.114	0.257	1.412	0.772	-0.085	0.294	0.152	-0.194	0.264	0.148
120	0.103	0.270	0.137	0.277	1.567	0.853	-0.102	0.353	0.183	-0.229	0.306	0.170
140	0.120	0.315	0.160	0.297	1.721	0.934	-0.119	0.412	0.213	-0.260	0.351	0.193
160	0.137	0.360	0.183	0.317	1.877	1.015	-0.136	0.471	0.244	-0.289	0.341	0.186
180	0.154	0.405	0.206	0.337	2.035	1.096	-0.153	0.530	0.274	-0.317	0.377	0.240
200	0.171	0.450	0.228	0.358	2.193	1.177	-0.170	0.589	0.305	-0.344	0.487	0.264
220	0.188	0.495	0.251	0.377	2.351	1.259	-0.187	0.648	0.335	-0.371	0.532	0.289
240	0.205	0.540	0.274	0.399	2.509	1.340	-0.204	0.706	0.366	-0.397	0.578	0.313

载作用,最大剪应力则基本无变化。

5 结论

(1) 加铺沥青层后接缝处弯沉减小,传荷能力上升,能有效提升路面结构强度与稳定性。

(2) 对于无处理路面,温度场对接缝处弯沉和传荷能力的影响远大于荷载,加铺沥青层后其影响变小。

(3) 超载作用下各种情况的弯沉均显著增大,单独荷载下接缝传荷能力与荷载大小无关,但温度耦合荷载作用下呈下降趋势;结构强度指数评价温度耦合下的路面强度存在一定局限性。

(4) 随着荷载的增大,反射裂缝的产生和扩展更容易,温度耦合荷载对反射裂缝的影响远大于单独荷载作用;增设应力吸收层能阻止反射裂缝。

参考文献:

[1] 周正峰.水泥混凝土路面接缝传荷能力的研究现状和发展趋势[J].公路,2011(7).

[2] 周正峰,凌建明,袁捷.机场水泥混凝土道面接缝传荷能力分析[J].土木工程学报,2009,42(2).

[3] 颜祥程.机场水泥混凝土道面加铺层结构接缝传荷能力分析[J].公路,2015(8).

[4] 周富杰.防治反射裂缝的措施及其分析[D].上海:同济大学,1998.

[5] 单景松,郭忠印.旧水泥路面沥青加铺改造中弯沉指标研究[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(4).

[6] 郭寅川,王礼根,申爱琴,等.甘肃半刚性沥青路面结构的温度场及温度应力三维有限元分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2016,35(3).

[7] 李祖仲,雷彤,陈全,等.水泥混凝土路面沥青加铺层结

构强度计算方法探索[J].公路,2017(4).

[8] 孙永超,肖杰,吴超凡,等.S207 长沙县段旧水泥混凝土路面改造方案设计[J].湖南交通科技,2017,43(1).

[9] 张弛,王雪,崔卜心,等.水泥混凝土路面传力杆布设方式仿真模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(4).

[10] Kenji Himenok,Tsuyoshi Kamijima,Taluya Ikeda,et al.Distribution of tire contact pressure of vehicles and its influence on pavement distress[A].8th International Conference on Asphalt Pavement[C].1996.

[11] 罗勇,袁捷.三维有限元法对水泥混凝土道面接缝传荷作用的模拟方法研究[J].公路交通科技,2013,30(3).

[12] 严作人.层状路面体系的温度场分析[J].同济大学学报:自然科学版,1984,12(3).

[13] 崔学民.超载作用下沥青混凝土路面的受力特性分析[J].公路,2012(2).

[14] 姚祖康.公路设计手册:路面[M].第三版.北京:人民交通出版社,2006.

[15] 周湘亮.桥面维修加铺沥青层结构的安全性分析[J].公路与汽运,2017(4).

[16] 袁耀波.基于不同基层弹性模量的沥青路面加铺厚度设计案例分析[J].公路与汽运,2017(4).

[17] 杨振丹.半刚性基层沥青路面加铺层设计方法研究[J].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[18] 杨焯.两种沥青路面的力学响应及结构层寿命对比分析[J].公路与汽运,2018(3).

[19] 王昌茂.旧混凝土路面加铺沥青层层间力学性能分析与设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.

[20] 张传义.旧水泥砼路面沥青罩面层结构性能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.