

基于有限元的复合水泥混凝土路面 面层层底应力分析与结构设计

胡洪溪¹, 胡朋^{1*}, 赵兴奎², 孙丰哲², 王兵², 马云龙¹

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东东泰工程咨询有限公司, 山东 淄博 256414

摘要:为满足重交通下复合水泥混凝土路面的使用要求,以贫混凝土作为基层材料,以沥青砂浆作为功能层设计水泥混凝土路面。采用软件 ANSYS 对不同路面结构进行力学响应分析。研究表明:基层材料由水泥稳定碎石变为贫混凝土时,水泥混凝土面层层底的荷载应力减小 14.87%,温度应力减小 2.70%,温度-荷载耦合应力减小 10.02%;贫混凝土弹性模量由 12 GPa 增至 16 GPa 时,荷载应力、温度应力、温度-荷载耦合应力分别减小 3.60%、1.09%和 4.14%,应力下降幅度减小;荷载应力、温度应力的数值分析结果与理论计算结果的相对差小于 10%,温度-荷载耦合应力的相对差较大。针对重交通、中等交通量等级设计复合水泥混凝土路面结构,应力校核结果表明,2 种设计路面均满足使用要求。

关键词:复合水泥混凝土路面;贫混凝土;层底应力;路面结构;有限元仿真;交通量

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)04-0039-10

引用格式:胡洪溪,胡朋,赵兴奎,等.基于有限元的复合水泥混凝土路面面层层底应力分析与结构设计[J].山东交通学院学报,2024,32(4):39-48.

HU Hongxi, HU Peng, ZHAO Xingui, et al. Stress analysis and structural design of surface course bottom in composite cement concrete pavement based on finite element method[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(4): 39-48.

0 引言

水泥混凝土路面面层是与车辆荷载和外界环境直接接触的结构层,施工时大多选择抗压强度等级较高的水泥制作相应标号的混凝土,路面施工成本较高^[1-3]。按车辆荷载的传递规律,水泥混凝土面层底部主要承受拉应力^[4-5]。复合水泥混凝土路面面板由高、低 2 种(或多种)抗压强度的水泥混凝土面板复合而成,可充分发挥不同抗压强度的水泥混凝土在不同结构层位的作用,提高路面的耐用性,延长路面的使用寿命^[6-8]。

国外学者在 20 世纪提出文克勒地基水泥混凝土面板各点应力与挠度的计算方法,在 21 世纪初开始研究水泥复合材料^[9]。Michael 等^[10]研究认为复合水泥混凝土的抗压强度、弹性模量等参数比普通水泥混凝土大,且整体质量较小。Azad 等^[11]通过试验研究由低强度核心水泥混凝土和高强度外层水泥混凝土组成的复合水泥混凝土梁,发现复合水泥混凝土梁的抗弯强度主要由外层水泥混凝土厚度决定。Ma 等^[12]将工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)铺设在机场混凝土路面上,研究表明其抗弯强度、疲劳寿命和抗冲击性等性能优异,可有效延缓反射裂缝的发展。Choi 等^[13]研究环境对水

收稿日期:2024-05-20

基金项目:山东省交通科技创新计划项目(2022B17)

第一作者简介:胡洪溪(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设, E-mail:515191256@qq.com。

*通信作者简介:胡朋(1976—),男,山东沂南人,教授,工学博士,主要研究方向为道路工程, E-mail:204021@sdjtu.edu.com。

混凝土路面的作用情况,通过软件 ANSYS 分析认为粗骨料的弹性模量和水泥混凝土干燥收缩作用对路面病害的发展影响最显著。Fei 等^[14]采用水玻璃对竹纤维改性,将改性竹纤维加入水泥基复合材料,提高材料的抗拉强度和整体耐久性。

在 21 世纪初,我国将功能复合材料引入水泥混凝土。徐艺坤^[15]将国产纤维和乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(ethylene-vinyl acetate copolymer,EVA)聚合物掺入粉煤灰-微硅灰-水泥胶凝体系,通过改性制备新型水泥路面 ECC 材料。高伟等^[16]构建由 9 块水泥混凝土板组成的有限元验算模型,分析多板协同受力条件下的应力分布。高嫒嫒等^[17]采用解析方法分析影响水泥混凝土路面面板底部裂缝向上扩展的主要因素。王骁帆等^[18]采用软件 ABAQUS 模拟钢筋水泥混凝土路面在环境温度变化下的应力变化,认为钢筋有助于减小路面结构的温度梯度、水泥混凝土路面裂缝的宽度及混凝土面层的最大拉应力。高英力等^[19]将混杂纤维 ECC 加铺在普通水泥混凝土基层上形成复合路面,该路面在抗弯曲疲劳性能和成本方面均优于常规 ECC。马云龙等^[20]采用软件 ABAQUS 构建复合水泥混凝土路面面板模型,以水泥混凝土路面的面板厚度、面板长度和基层厚度为变量,分析影响复合水泥混凝土路面面板底部应力和位移的主要因素,认为复合混凝土路面面板的上层板厚度影响显著。郑直等^[21]基于 Euler-Bernoulli 梁理论,提出可快速分析水泥混凝土路面响应的解析计算方法。朱洪洲等^[22]基于足尺环道试验数据,对比分析半刚性基层与柔性基层水泥混凝土路面温度应力的变化规律。李盛等^[23]提出双层连续配筋水泥混凝土路面结构并应用在城市道路中。已有研究大多围绕刚性水泥混凝土路面-柔性沥青路面进行分析,对 2 种不同抗压强度的水泥混凝土直接复合构成的路面研究较少,对复合路面面层层底应力变化情况缺乏系统研究。

本文采用软件 ANSYS 构建复合水泥混凝土路面面板模型,研究水泥稳定碎石和不同弹性模量的贫混凝土作为基层时,面层层底的荷载应力、温度应力和耦合应力的变化规律,以期提高复合水泥混凝土路面的承载能力,使复合水泥混凝土路面能应用于重载路面。

1 复合水泥混凝土路面建模

1.1 有限元模型参数设置

采用软件 ANSYS 建立复合水泥混凝土路面面板有限元模型,如图 1 所示。以 C50-C40 的复合水泥混凝土结构为面层,以沥青砂浆垫层为功能层,以弹性模量分别为 12、14、16 GPa 的贫混凝土为基层^[24],对比研究以贫混凝土与水泥稳定碎石分别作为基层时面层层底应力的变化情况。为简化计算,贫混凝土材料的其他参数与普通水泥混凝土参数一致。复合水泥混凝土路面面板有限元模型相关参数如表 1 所示。

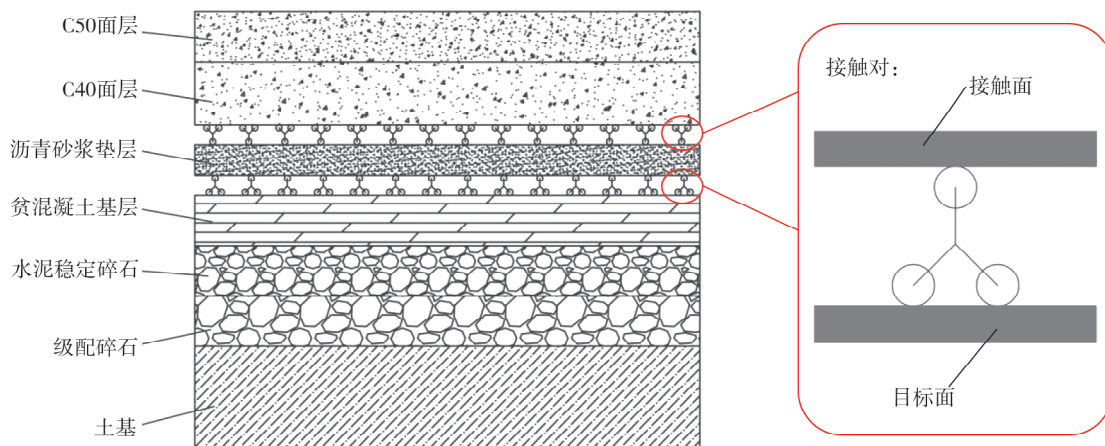


图 1 复合水泥混凝土路面结构及层间接触对设置

表 1 复合水泥混凝土路面面板有限元模型相关参数

结构层	长度/m	宽度/m	厚度/cm	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)
C50 混凝土面层	5.0	4.5	10	34.00	0.15	2.5
C40 混凝土面层	5.0	4.5	20	31.00	0.15	2.5
沥青砂浆垫层	10.4	7.5	3	5.00	0.30	2.4
贫混凝土基层	10.4	7.5	20	12.00,14.00,16.00	0.15	2.5
水泥稳定碎石	10.4	7.5	20	5.00	0.25	2.2
级配碎石	10.4	7.5	20	0.25	0.35	2.2
土基	10.4	7.5	150	0.06	0.40	1.6

1.2 施加荷载与约束

车辆荷载为 100 kN 的标准轴载(单轴-双轮载),接地压强为 0.7 MPa,轮迹形状与位置如图 2 所示。默认网格边长为 10 cm,对轮迹位置、面层和基层的网格进行加密,网格划分如图 3 所示。

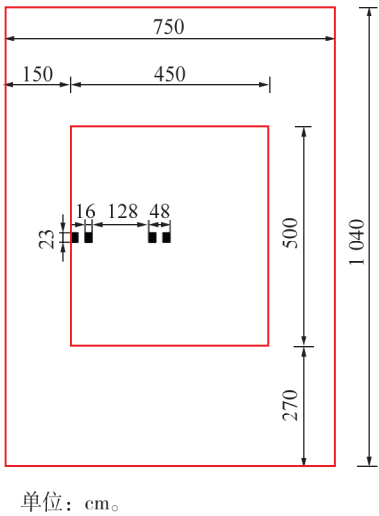


图 2 有限元模型尺寸

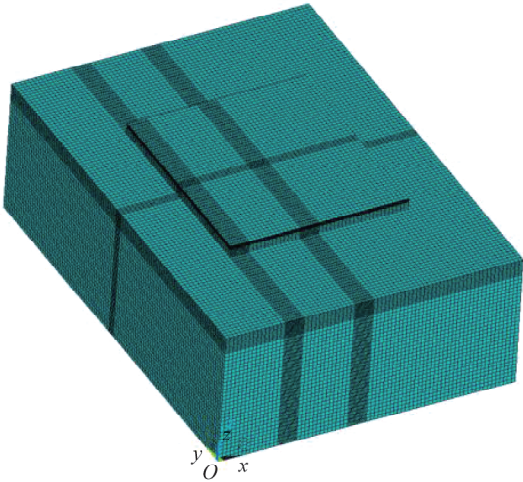


图 3 有限元模型网格划分

分别在贫混凝土基层与沥青砂浆垫层、沥青砂浆垫层与 C40 混凝土面层间设置接触单元,接触对设置如图 1 所示,其余各结构层间均设置为完全连续状态。对土基底面施加固定支撑,约束 x (垂直于行车方向)、 y (行车方向)、 z (竖向)3 方向的自由度;约束土基、基层和功能层四周的法向自由度;不对水泥混凝土面层施加约束,令其四边可自由变形。

2 不同基层弹性模量下面层层底应力分析

2.1 面层层底荷载应力分析

仅考虑车辆荷载作用,不同弹性模量的贫混凝土基层路面行车方向应力的计算结果如图 4 所示。由图 4 可知:轮迹位置(水泥混凝土面层板纵缝中部)是应力集中的关键区域,在车辆荷载作用下,此位置的面层应力显著增大,应力过大导致局部凹陷。增大基层的弹性模量可在一定程度上解决此问题,随贫混凝土基层弹性模量的增大,整个路面结构的应力减小。路面结构应力的变化主要集中在面层部分,后续仅选取复合水泥混凝土面层层底作为研究对象,分析应力变化特征。

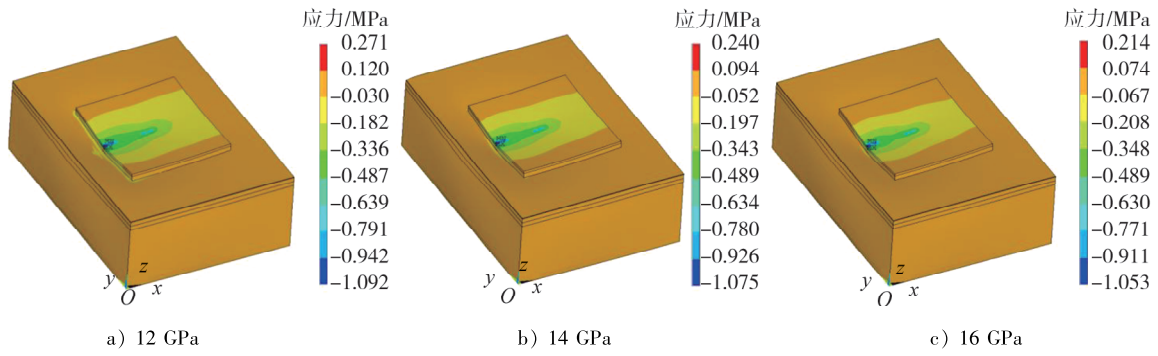


图 4 不同弹性模量贫混凝土基层路面行车方向应力

面层复合板以 N/m 为单位的截面弯曲刚度 $\tilde{D}_c$ 的数值^[25]

$$\{\tilde{D}_c\} = \frac{\{E_{c1}\}\{h_{c1}\}^3 + \{E_{c2}\}\{h_{c2}\}^3}{12(1 - \nu_{c2}^2)} + \frac{(\{h_{c1}\} + \{h_{c2}\})^2}{4(1 - \nu_{c2}^2)} \left(\frac{1}{\{E_{c1}\}\{h_{c1}\}} + \frac{1}{\{E_{c2}\}\{h_{c2}\}} \right)^{-1},$$

式中: $\{E_{c1}\}$ 为以 MPa 为单位的面层复合板上层的弯拉弹性模量 E_{c1} 的数值, $\{h_{c1}\}$ 为以 m 为单位的面层复合板上层的厚度 h_{c1} 的数值, $\{E_{c2}\}$ 为以 MPa 为单位的面层复合板下层的弯拉弹性模量 E_{c2} 的数值, $\{h_{c2}\}$ 为以 m 为单位的面层复合板下层的厚度 h_{c2} 的数值, ν_{c2} 为面层复合板下层的泊松比。

以 m 为单位的等效厚度 $\tilde{h}_c$ 的数值

$$\{\tilde{h}_c\} = 2.42 \sqrt{\{\tilde{D}_c\} / (\{E_{c2}\}\{d_x\})},$$

式中 $\{d_x\}$ 为以 m 为单位的面层复合板中性轴至下层底部的距离 d_x 的数值。

考虑本研究建立路面模型的特性,选择双层板模型计算面层应力,面层临界荷位以 MPa 为单位的荷载应力 σ_{ps} 的数值

$$\{\sigma_{ps}\} = 1.45 \times 10^{-3} \{r_g\}^{0.65} \{\tilde{h}_c\}^{-2} (\{m_s\}\{g\})^{0.94} / (1 + \{D_b\} / \{\tilde{D}_c\}),$$

式中: $\{r_g\}$ 为以 m 为单位的总相对刚度半径 r_g 的数值, $\{m_s\}$ 为以 kg 为单位的设计轴载的单轴质量 m_s 的数值, $\{g\}$ 为以 m/s^2 为单位的重力加速度 g 的数值, $\{D_b\}$ 为以 N/m 为单位的下层板截面弯曲刚度 D_b 的数值。

以水泥稳定碎石或贫混凝土为基层,分析 4 种弹性模量水平下路面面层层底应力,研究不同弹性模量下行车方向应力、垂直行车方向应力和等效应力的变化规律,计算理论计算应力 σ_1 与等效应力 σ_2 的相对差 E_1 ,结果如表 2 所示。

表 2 面层层底荷载应力分析

基层弹性模量/GPa	行车方向应力/MPa	垂直行车方向应力 MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	$E_1/\%$
5	0.485	0.632	1.271	1.368	7.09
12	0.245	0.536	1.082	1.147	5.67
14	0.220	0.519	1.061	1.126	5.77
16	0.193	0.508	1.043	1.109	5.95

由表 2 可知:基层由水泥稳定碎石转换为弹性模量为 12 GPa 贫混凝土时,行车方向应力、垂直行车方向应力和等效应力分别减小 49.48%、15.19% 和 14.87%;贫混凝土基层的弹性模量由 12 GPa 增至 16 GPa 时,行车方向应力、垂直行车方向应力和等效应力分别减小 21.22%、5.22% 和 3.60%。行车方向的应力主要受车轮荷载的直接影响。基层材料弹性模量增大时,车轮荷载沿行车方向的传递路径分布更均匀,应力集中减少,行车方向上的应力显著降低。理论计算应力与等效应力的相对差为 5.67% ~

7.09%,可认为数值分析结果真实。

路面结构的刚度是确保重载交通道路耐久性和减少维护需求的关键因素。根据仿真计算结果,基层材料变为贫混凝土后,面层层底的应力显著减小,表明提高基层材料的弹性模量可有效提高路面结构的整体刚度,更好地分散荷载,减少面层的应力集中。重载交通的水泥混凝土路面应选择弹性模量较高的基层材料,提高路面的整体刚度和承载能力。但弹性模量增大到一定程度后,对路面面层层底应力减小的贡献降低,在基层材料选择和路面结构设计时应综合考虑成本效益和工程实际情况。

2.2 层底温度应力分析

采集济南市某路段水泥混凝土路面表面1 d内不同时刻的温度,如图5所示。根据文献[25]要求,可在布设温度场时采用温度梯度进行模拟,为避免极端高温下的误差,提高计算稳定性,结合图5选取40℃作为代表温度,温度梯度为83℃/m,假设其在面层内由上到下线性衰减至15℃。根据图5的实测温度与文献[25]中的温度梯度,计算得到的路面面层与基层温度分布云图如图6所示。面层以下的结构受地基和基层影响,温度变化较小,可认为这部分结构的温度保持不变。此方法简化计算,能反映实际情况,便于理解温度对路面结构性能的影响。计算温度应力时,模型各结构层的材料热力学参数如表3所示,网格划分和路面模型尺寸与荷载应力分析时相同。

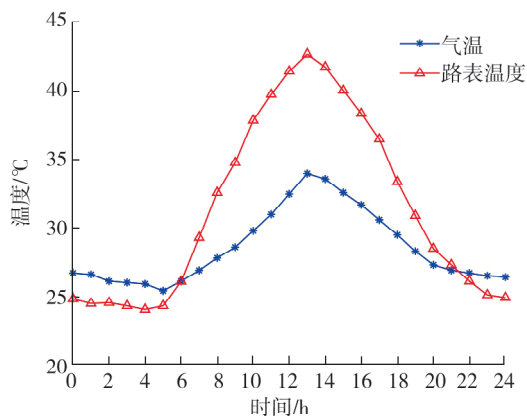


图5 水泥混凝土路面路表温度与大气温度

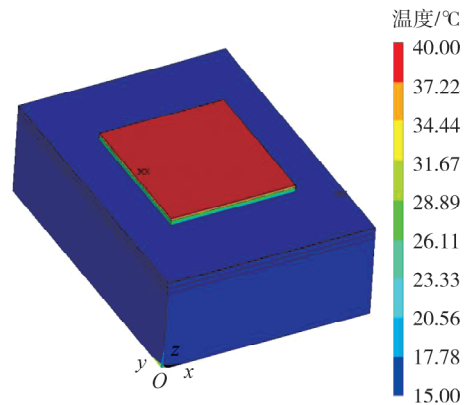


图6 路面面层与基层温度分布

表3 材料热力学参数

结构层	厚度/cm	线膨胀系数/($10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$)	质量热容/($\text{kg} \cdot \text{K}$)	热导率/($\text{m} \cdot \text{K}$)
C50 混凝土面层	10	1.0	879	1.8
C40 混凝土面层	20	1.0	879	1.8
沥青砂浆垫层	3	1.5	900	1.4
贫混凝土基层	20	1.0	879	1.8
水泥稳定碎石	20	2.0	817	1.2
级配碎石	20	2.0	817	1.2
土基	150	0.6	1 020	1.0

对复合水泥混凝土路面面板有限元模型施加温度场后,求解模型的温度应力,将分析类型从热力转为结构,读取热力分析结果,对模型进行静态分析,计算得到不同弹性模量的贫混凝土基层路面行车方向的温度应力,结果如图7所示。

由图7可知:温度分布不均匀,水泥混凝土路面面板翘曲变形,受相邻面板、面层与基层间的摩擦等因素约束,产生温度应力;水泥混凝土面板板顶温度高于板底时,温度梯度为正,面层层顶的变形高于层底,面层隆起,面层层底承受拉应力。

水泥混凝土复合板以MPa为单位的最大温度应力 $\sigma_{t,\max}$ 的数值^[25]

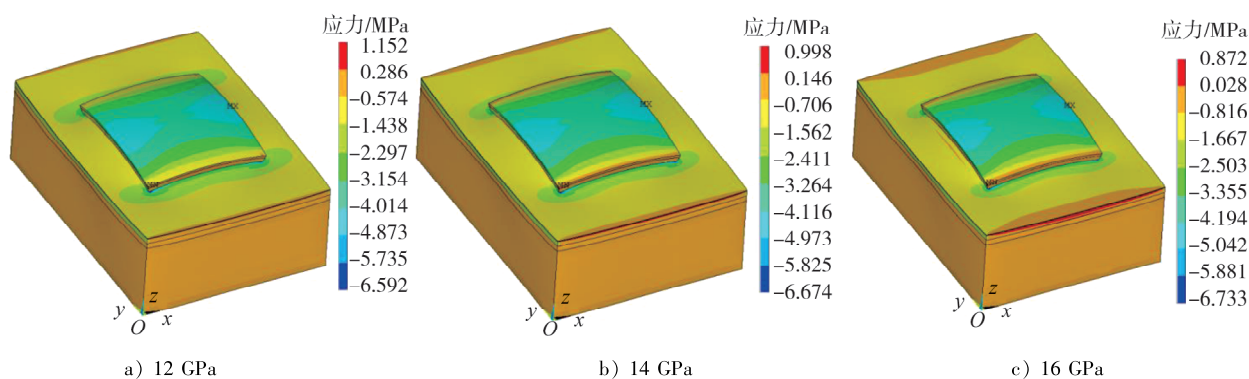


图 7 不同弹性模量贫混凝土路面行车方向的温度应力

$$\{\sigma_{t,\max}\} = 0.5\alpha_c T_g \{E_{c2}\} (\{h_{c1}\} + \{h_{c2}\}) B_L \zeta,$$

式中: α_c 为水泥混凝土的线膨胀系数, T_g 为公路所在地 50 a 一遇的最大温度梯度, B_L 为面层复合板的温度应力系数, ζ 为面层复合板的最大温度应力修正系数。

通过仿真计算得到 4 种不同弹性模量基层的路面结构关于行车方向、垂直行车方向和等效应力的变化规律, 计算理论计算应力 σ_4 与等效应力 σ_3 的相对差 E_2 , 结果如表 4 所示。

表 4 面层层底温度应力分析

基层弹性模量/GPa	行车方向应力/MPa	垂直行车方向应力/MPa	σ_3 /MPa	σ_4 /MPa	$E_2/\%$
5	0.652	0.693	1.222	1.113	9.79
12	0.629	0.672	1.189	1.099	8.19
14	0.605	0.657	1.181	1.090	8.35
16	0.599	0.649	1.176	1.082	8.69

由表 4 可知: 基层从水泥稳定碎石转换为弹性模量为 12 GPa 的贫混凝土时, 行车方向、垂直行车方向应力和等效应力分别减小 3.53%、3.03% 和 2.70%; 贫混凝土基层的弹性模量从 12 GPa 增至 16 GPa 时, 行车方向应力、垂直行车方向应力和等效应力分别减小 4.77%、3.42% 和 1.09%。理论计算结果与数值分析结果的相对差为 8.19%~9.79%, 可认为仿真分析结果真实。

随基层材料弹性模量的增大, 温度应力减小。水泥稳定碎石的线膨胀系数与贫混凝土不同, 相同温度变化下, 材料的体积变化不同, 温度应力的分布和大小有一定差异。弹性模量较大的贫混凝土具有更好的热传导性能, 热量分布更均匀, 应力集中减少。基层弹性模量增大, 整体刚度提高, 路面结构在温度变化时的稳定性和抗变形能力增强, 因热胀冷缩引起的应力集中和变形减小。相较于荷载应力变化, 温度应力的整体变化幅度较小, 说明基层抗压强度和刚度的变化对面层温度应力造成的影响相对有限。

2.3 耦合状态下层底应力分析

采用 2.2 节的温度应力模型, 在路表布设行车荷载, 网格划分、层间接触设置等方式与分析荷载应力时相同, 分析面层层底的荷载-温度耦合应力。路面结构层底行车方向的耦合应力云图如图 8 所示。

由图 8 可知: 水泥混凝土路面受车辆荷载与温度耦合作用时, 面层层底的受拉区成为最不利受力位置, 易在此处产生破坏, 尤其夏季的白天, 温度梯度最大时, 面层层底的温度应力达到峰值, 此时温度-荷载应力的耦合作用最大。

分析 4 种路面结构面层层底在行车方向、垂直行车方向和等效耦合应力的变化规律, 计算理论计算应力 σ_6 与等效应力 σ_5 的相对差 E_3 , 结果如表 5 所示。

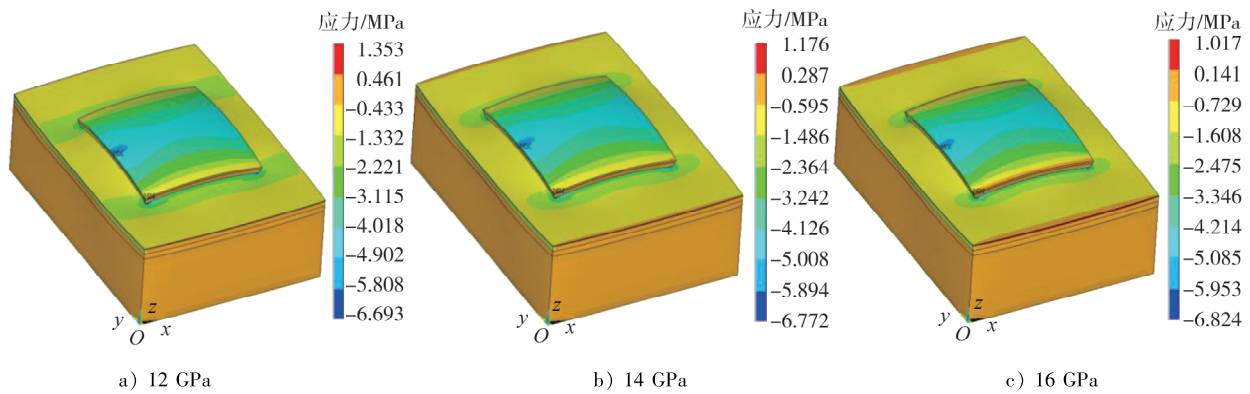


图8 不同基层弹性模量下层底行车方向的耦合应力云图

表5 面层层底耦合应力分析

基层弹性模量/GPa	行车方向应力/MPa	垂直行车方向应力/MPa	σ_5 /MPa	σ_6 /MPa	$E_3/\%$
5	1.969	2.131	3.862	3.225	19.75
12	1.654	1.919	3.475	2.919	19.05
14	1.608	1.875	3.392	2.881	17.74
16	1.571	1.854	3.331	2.848	16.96

由表5可知:基层材料由水泥稳定碎石转换为贫混凝土时,层底的耦合应力随之减小,行车方向耦合应力、垂直行车方向耦合应力和等效耦合应力分别减小15.99%、9.95%和10.02%;贫混凝土的弹性模量从12 GPa增至16 GPa时,层底的耦合应力随之降低,行车方向耦合应力、垂直行车方向耦合应力和等效耦合应力分别减小5.02%、3.39%和4.14%。

在高温重载环境下,路面材料受温度和荷载的双重影响,需有足够的抗压强度承受重载,以及良好的热稳定性抵抗高温引起的变形和损伤。基层材料由水泥稳定碎石变为贫混凝土时,基层弹性模量增大,承载能力增强,可更均匀地分散上层荷载;贫混凝土对温度变化的敏感性较低,温度引起的膨胀和收缩效应减弱,温度变化对面层层底应力的影响减小;刚度较高的贫混凝土可更有效地抵抗因温度变化和荷载共同作用产生的耦合应力。贫混凝土的弹性模量由12 GPa增至16 GPa时,耦合应力降低幅度较小,说明材料的弹性模量超出一定范围后,弹性模量的增大对降低路面应力的贡献减小。

面层层底耦合应力的相对差较大,均大于15%,原因是温度-荷载耦合的理论计算方法与有限元仿真算法不同。文献[25]中的耦合应力是可靠系数与荷载应力和温度应力之和的乘积,以此考虑不确定性,方法快速且易于实施,但无法准确反映在考虑多种因素相互作用时的复杂应力状态。有限元分析法通过模拟材料的物理行为和结构响应,考虑温度场的非均匀分布和由此产生的热应力和热变形,此方法更精细、全面,充分表达和预测路面结构在实际工作环境中的行为。有限元分析在计算上更复杂,耗时较多,所提供的详细信息对确保路面设计的可靠性和耐久性至关重要。在实际工程应用中,有限元分析的结果可用于验证和优化基于规范的设计,确保设计安全、经济。

3 不同交通量等级下水泥混凝土路面的结构设计

重交通路面车辆作用次数较大,一般的路面结构无法满足使用要求,选用贫混凝土基层-复合混凝土面层的结构形式,考虑到成本效益及施工便利性,选择弹性模量为12 GPa的基层贫混凝土。针对不同交通情况设计2种路面结构为:重交通路面基层为贫混凝土,中等交通路面基层为水泥稳定碎石,厚度均为20 cm;面层皆为C50-C40结构,厚度分别为10、20 cm;面层与基层间设置厚3 cm的沥青砂垫层;底基层均为厚20 cm的级配碎石。

3.1 疲劳应力

根据水泥混凝土路面面层层底荷载应力与温度应力,可计算荷载疲劳应力与温度疲劳应力,荷载疲劳应力

$$\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} ,$$

式中: k_r 为考虑接缝传递荷载能力的应力折减系数; k_f 为考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数,交通量等级为重交通时,累计作用次数为 1×10^7 , $k_f = 2.506$,最大轴载为 180 kN,交通量等级为中等交通时,累计作用次数为 1×10^6 , $k_f = 2.198$,最大轴载为 150 kN; k_c 为考虑计算理论与实际差异及动载等因素影响的综合系数,一级公路的 $k_c = 1.10$, $k_r = 0.87$ 。

温度疲劳应力

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{t,max} ,$$

式中 k_t 为温度疲劳应力系数。

最大轴载在面层板临界荷位处产生的最大荷载应力 $\sigma_{p,max} = k_r k_c \sigma_{t,pm} \circ$

荷载疲劳应力与温度疲劳应力的计算结果如表 6 所示。由表 6 可知:重交通路面易产生荷载疲劳损伤,中等交通路面易产生温度疲劳损伤。重交通路面的温度疲劳应力和最大温度应力比中等交通路面低,原因是贫混凝土具有较大的弹性模量和更好的热传导性能,有助于减少温度应力集中。重交通路面的荷载疲劳应力和最大荷载应力均高于中等交通路面,路面结构在荷载作用下承受的应力更大,易产生疲劳损伤。

表 6 荷载疲劳应力与温度疲劳应力分析 单位:MPa

路面结构类型	荷载疲劳应力	最大荷载应力	温度疲劳应力	最大温度应力
重交通	2.874	2.306	0.59	1.233
中等交通	2.532	1.964	0.98	1.701

3.2 结构校核

设计水泥混凝土路面结构时,以行车荷载和温度梯度综合作用不产生疲劳断裂作为设计标准,以最终轴载和最大温度梯度综合作用不产生极限断裂作为验算标准。疲劳状态的计算公式为:

$$\gamma_r (\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r , \tag{1}$$

式中: γ_r 为可靠度系数, $\gamma_r = 1.2$; f_r 为水泥混凝土标准弯拉强度。

极限状态的计算公式为:

$$\gamma_r (\sigma_{p,max} + \sigma_{t,max}) \leq f_r \circ \tag{2}$$

由式(1)(2)计算路面设计极限状态,代入表 6 的数据后,计算结果如表 7 所示。

表 7 不同路面结构的极限应力

路面结构类型	疲劳应力校核/MPa	极限应力校核/MPa	f_r /MPa	是否满足要求
重交通	4.16	4.25	5.00	满足
中等交通	4.21	4.39	4.50	满足

相对保守地取重交通路面的轴载累计次数为 1×10^7 次,贫混凝土基层路面的极限应力与水泥混凝土标准弯拉强度间有一定差距,说明轴载累计作用次数增大时,路面结构也能满足路面使用要求;中等交通路面的极限应力与标准弯拉强度较接近。在计算温度应力时,按温度梯度与面层厚度估算上、下面层温差,实际路面上、下表面间的温差更低,计算得到的温度应力大于实际温度应力。2 种交通情况下的路面结构均可满足正常使用要求。

4 结论

采用软件 ANSYS 建立复合水泥混凝土路面模型,上、下层水泥混凝土路面联合作用共同承担车辆荷

- [19] 高英力,卜涛,冷政,等. 混杂纤维 ECC-混凝土复合路面板弯曲疲劳特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(7):2309-2320.
- [20] 马云龙,岳贤君,胡朋. 复合水泥混凝土路面板底应力及位移仿真[J]. 山东交通学院学报,2022,30(3):93-101.
- [21] 郑直,郭乃胜,孙雅珍,等. 考虑层间滑移的水泥混凝土路面结构力学响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023,53(4):655-663.
- [22] 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.
- [23] 李盛,杨帆,刘萌,等. 新型双层 CRCP 结构及在城市道路中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(4):983-989.
- [24] 马云龙. 彩色复合水泥混凝土路面结构及材料组成研究[D]. 济南:山东交通学院,2023.
- [25] 中华人民共和国交通运输部,中交公路规划设计院有限公司. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

Stress analysis and structural design of surface course bottom in composite cement concrete pavement based on finite element method

HU Hongxi¹, HU Peng^{1}, ZHAO Xingkui², SUN Fengzhe²,
WANG Bing², MA Yunlong¹*

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Dongtai Engineering Consultants Co., Ltd., Zibo 256414, China

Abstract: To meet the usage requirements of composite cement concrete pavements under heavy traffic, a design scheme is proposed that uses lean concrete as the base material and asphalt mortar as the functional layer for the cement concrete pavement. The software ANSYS is used to perform mechanical response analysis on different pavement structures. The research results indicate that when the base material is changed from water-stabilized crushed stone to lean concrete, the load stress at the bottom of the cement concrete surface layer decreases by 14.87%, the temperature stress decreases by 2.70%, and the temperature-load coupling stress decreases by 10.02%. As the elastic modulus of lean concrete increases from 12 GPa to 16 GPa, the reduction in stress becomes less pronounced, with load stress, temperature stress, and temperature-load coupling stress decreasing by 3.60%, 1.09%, and 4.14%, respectively. The numerical analysis results for load stress and temperature stress show that the relative difference with theoretical calculations is less than 10%, while the relative difference for temperature-load coupling stress is larger. For the design of composite cement concrete pavement structures for heavy traffic and moderate traffic volume levels, the stress verification results indicate that the two designed pavements meet the usage requirements.

Keywords: composite cement concrete pavement; lean concrete; bottom stress; pavement structure; finite element simulation; traffic volume

(责任编辑:王惠)