

短路基处 CPC 层对 AC + CPC 复合式路面 应力变形的影响

刘富强¹, 郑木莲¹, 王 帅², 王 涛³

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100032;

3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要 目的 研究斜向预应力混凝土(CPC)层厚度和模量对短路基处斜向预应力混凝土上覆沥青层(AC + CPC)复合式路面结构荷载应力和变形的影响。方法 以 AC + CPC 复合式路面结构为研究对象, 应用 ANSYS 有限元软件建立 AC + CPC 复合式路面结构三维有限元模型, 分析 CPC 层厚度和模量对短路基处 AC + CPC 复合式路面结构临界荷位处荷载应力和变形的影响。结果 当 CPC 层厚度从 16 cm 增大到 28 cm, CPC 板底的弯拉应力减小 47.4%; 沥青层最大剪应力及层底拉应力分别减小 50.2% 和 18.5%; 基层层底弯拉应力和路表弯沉分别减小 37.6% 和 24.3%。随着 CPC 层模量的增大, 沥青层剪应力和 CPC 层层底拉应力分别增大了 12.4% 和 19.9%; 路表弯沉和基层层底弯拉应力则降低了 7% 和 11%。结论 CPC 层厚度对 AC + CPC 复合式路面结构的应力和变形影响较大。

关键词 短路基; 复合式结构; AC + CPC; 荷载应力和变形

中图分类号 TU997; U416

文献标志码 A

Effects of CPC Layer on Stress and Deflection of AC + CPC Composite Pavement Structure at Short Subgrade

LIU Fuqiang¹, ZHENG Mulian¹, WANG Shuai², WANG Tao³

(1. Key Lab of Highway Engineering of Ministry of Education in Special Region, Chang'an University, Xi'an, China, 710064; 2. CCCC Highway Consultants Co. Ltd., Beijing, China, 100032; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 100044)

Abstract: In order to study effects of CPC slab thickness and modulus on the load stress and deflection of oblique prestressed concrete overlying asphalt layer (AC + CPC) composite

收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078051)

作者简介: 刘富强(1989—), 男, 博士, 主要从事道路工程结构与材料等方面研究。

pavement at short subgrade, the AC + CPC composite pavement was taken as the research object. The three-dimensional finite element model of AC + CPC composite pavement was established by ANSYS finite element software, and the effects of CPC slab thickness and modulus on the load stress and deflection at critical load position of AC + CPC composite pavement were investigated. Results show that: When the thickness of CPC layer increases from 16 cm to 28 cm, the flexural stress at the bottom of CPC slab decreases by 47.4%, maximum shear stress of asphalt layer and the flexural stress at its bottom decrease by 50.2% and 18.5%. However, the flexural stress at the bottom of base layer and the deflection decrease by 37.6% and 24.3%. With the increase of CPC layer's modulus, the shear stress of asphalt layer and the tensile stress at the bottom of CPC layer increase by 12.4% and 19.9% respectively, while the deflection and flexural stress at the bottom of abase layer decrease by 7% and 11%. So the thickness of CPC layer has great influence on the load stress and deflection of pavement structure.

Key words: short subgrade; composite structure; AC + CPC; load stress and deflection

桥梁、隧道、涵洞等是丘陵或山岭区高速公路常见的构造物。在两构造物间容易出现夹一段短路基的情况。由于短路基长度较短,施工场地有限,致使路基和基层等结构层很难充分压实,所以该位置在车辆荷载作用下路面结构受力比较复杂。陈亮亮等^[1]对连续配筋水泥混凝土(CRC)+沥青混凝土(AC)复合式路面的配筋设计方法进行了研究,当AC层的厚度每增加1 cm,配筋率大约降低0.01%。曹明明等^[2]通过研究复合式路面层间剪变特性评价指标,建议采用多指标综合评价层间剪变性能。ZHOU Juanlan等^[3]分析了设置桥头搭板的路桥过渡段的力学响应。Shyue Leong LEE等^[4]对界面用土工织物加固的复合路面抗剪强度进行了评价。Kukjoo KIM等^[5]通过有限元分析了预制预应力混凝土路面结构的性能。孙雅珍等^[6]自主研发设计了一种原理简单的直接拉伸仪器和层间剪切试验仪,对复合式路面层间界面力学特性进行了实验。YU Ling等^[7]对斜向预应力混凝土路面板的厚度、预应力筋的直径和分布角度等进行了计算设计,同时对斜向预应力混凝土的施工流程进行了研究。有相关学者对复合式路面结构的力学响应、温度场、层间抗剪切等性能进行了研究^[8-14],但对短路基处复合式路面的研究相对较少。由于短路基差异沉降量要比

普通路段大得多,设置搭板不能满足使用要求。应用斜向预应力混凝土上覆沥青层的复合式路面(AC+CPC)可有效缓解短路基差异沉降问题。笔者分析了CPC层厚度和模量对短路基处AC+CPC复合式路面结构荷载应力和变形的影响,为AC+CPC复合式路面的设计提供一定的理论指导。

1 短路基的界定及AC+CPC复合式路面结构

1.1 短路基的界定

铁道部建技[2003]97号文^[15]规定:I级铁路桥梁较密集地段,两台尾之间路基长<150 m,且能满足设桥条件时,应以桥代路形式通过。国内公路工程中对于短路基尚没有明确的界定,陕西省交通运输厅对≤200 m的路基,一般建议采用贫混凝土基层上加铺沥青层的路面结构。

短路基所处地形地质条件较为复杂,由于地形地质条件的限制,道路线形变化比较频繁,从而会导致车辆制动频繁。车辆的频繁制动对人体精神、生理均会产生一定的影响,从而影响驾驶员的判断。郑木莲等^[16]对路桥过渡段车内人体舒适性评价方法进行了研究。目前,高速公路车速一般控制在80~120 km/h,然而对于修建在丘陵或山岭区的高速公路,由于地形地貌条件复杂及桥梁、隧

道等构造物较多的特点,基于安全考虑,笔者选取短路基等特殊路段的车速为 70 ~ 80 km/h。为了有效降低短路基因差异沉降对运行车辆舒适性造成的不利影响,在两桥(隧)之间短路基尽可能设置较长的过渡段。当两构造物间路基长度超过 200 m 时,对车辆行驶舒适性产生的影响较小,所以笔者将两桥(隧)之间路基长度少于 200 m 均可视为短路基。

1.2 AC + CPC 复合式路面结构

AC + CPC 复合式路面结构是斜向预应力混凝土上覆沥青层的路面结构形式,其结构形式及 CPC 中预应力筋布置如图 1 所示。斜向预应力混凝土结构层与二灰稳定碎石、水泥稳定碎石等半刚性基层相比有以下优势:①混凝土不需要压实,对施工条件要求不高,可减少由于基层压实不足或不均匀导致的差异沉降变形,以及由此引起面层受力不均产生的损坏现象。②斜向预应力混凝土结构层耐久性好、承载力高,对底基层及路基的要求相对较低。因此,斜向预应力混凝土结构层适宜代替普通半刚性基层,作为短路基路面的主要承重层。③可与路基两端的桥梁等结构物衔接,类似起到“桥头搭板”的作用。④可有效防止水从接缝位置渗入路基,从而加剧路基的差异沉降。

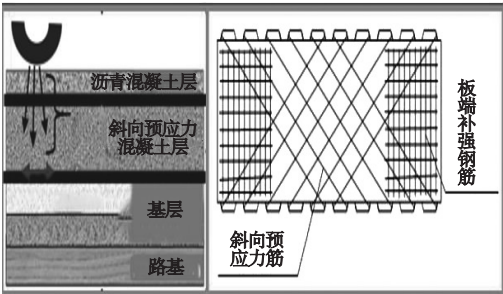


图 1 AC + CPC 复合式路面结构及 CPC 层预应力筋布置示意图

Fig. 1 AC + CPC composite pavement structure and schematic diagram of tendon in the CPC slab

AC + CPC 复合式路面作为一种新型路

面结构,可以综合刚性路面及柔性路面的优势,能够很好发挥其耐久性和承受重载的优势,是一种耐久性 or 长寿命路面结构形式。同时,由于斜向预应力混凝土可以大大减少接缝,其上加铺沥青层时没有像普通水泥混凝土或碾压混凝土等其他类型刚性基层的反射裂缝问题^[17]。

2 AC + CPC 复合式路面结构模型

2.1 AC + CPC 复合式路面结构计算参数

AC + CPC 复合式路面采用弹性半空间地基上的斜向预应力混凝土弹性薄板上覆弹性沥青层的结构体系,路面结构参数如表 1 所示。

表 1 路面结构计算参数

Table 1 Parameters of pavement structure

路面结构层	厚度/ cm	弹性模量/ MPa	泊松比
沥青层	10	1 200	0.25
斜向预应力 混凝土层	24	31 000	0.15
水泥稳定碎石	36	2 000	0.20
土基	700	30	0.35

2.2 模型尺寸和临界荷位

2.2.1 模型尺寸

选取 CPC 板长为 10.8 m,改变其宽度大小,然后对 AC + CPC 复合式路面结构模型进行收敛性分析,不同宽度下的 CPC 层层底拉应力和路表弯沉如表 2 所示。从表 2 可以看出,当板长一定时,宽度变化对路表弯沉影响不大,宽度达到 5.4 m 时层底弯拉应力已经收敛不再变化,鉴于模型网格划分的方便,选取 CPC 板宽为 5.4 m。当板宽一定时,长度变化对路表弯沉影响不大,长度达到 10.8 m 时层底弯拉应力已经收敛不再变化,考虑模型网格划分的方便及实际模型尺寸,选取 CPC 板长为 31.2 m。

表2 不同CPC板宽度和长度下的CPC层
层底拉应力和路表弯沉

Table 2 Tensile stress of CPC slab and deflection
under different width and length

宽度变化			长度变化		
宽/m	拉应力/ MPa	路表弯 沉/mm	长/m	拉应力/ MPa	路表弯 沉/mm
3.6	1.38	0.717 7	6.6	1.242	0.721
4.2	1.38	0.717 7	7.2	1.273	0.733
4.8	1.383	0.716 9	9.6	1.306	0.742
5.4	1.384	0.714 5	10.8	1.384	0.757
6.0	1.384	0.714 5	15.6	1.386	0.742
—	—	—	31.2	1.385	0.740

2.2.2 临界荷位

AC + CPC 复合式路面结构一般不设置接缝,但与其他结构物连接处仍需设置接缝,接缝位置为路面的薄弱位置。确定模型长宽高为31.2 m×5.4 m×7.7 m,在纵缝边缘中部、横缝边缘中部、板角及板中位置进行标准轴载的加载试算。不同加载位置路面结构应力和变形计算结果如图2所示。从图2可以看出,板角位置的弯沉值最大,较纵缝中部和横缝中部位置分别增大了62.5%和41.3%;CPC层层底的弯拉应力最大,特别是板的纵缝边缘中部和横缝中部位置,所以临界荷位为CPC板的纵缝边缘中部位置。

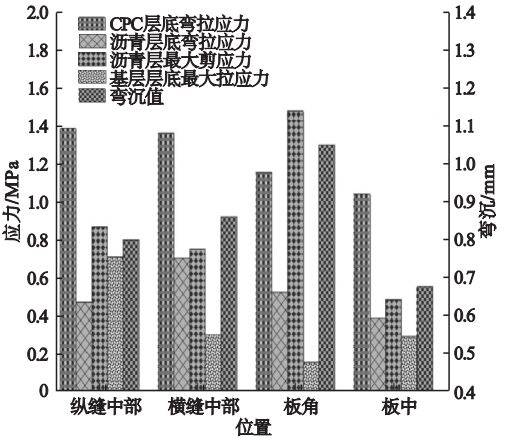


图2 不同位置的应力和弯沉

Fig. 2 Stress and deflection in different position

2.3 AC + CPC 复合式路面结构模型的建立

2.3.1 预应力筋

AC + CPC 复合式路面结构中布置有双层斜向预应力筋,CPC 结构层预应力筋用LINK8 单元来模拟(见图3),杆单元受力分布均匀。预应力筋的直径为13.2 mm,弹性模量195 000 MPa,极限抗拉强度1 470 MPa。笔者在建模分析过程中采用整体式初始应变法进行计算分析。

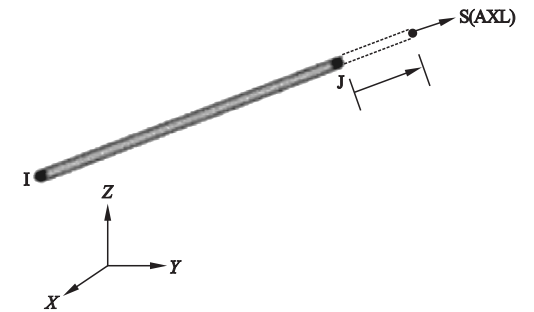


图3 杆单元图

Fig. 3 Rod unit

2.3.2 层间接触模型

AC + CPC 复合式路面结构中设置了滑动层,具有一定的摩擦系数,层间接触条件既不是连续的也不是光滑的,模拟层间接触可以采用接触单元的方式。

建立合适的层间接触模型,可以提高AC + CPC 复合式路面结构分析的精确性^[18]。ANSYS 有限元分析软件可以提供多种接触单元,对于AC + CPC 复合式路面结构可以采用刚柔面接触单元,斜向预应力混凝土板当做刚性目标面,采用Targe170来模拟目标面,接触面采用Conta174来模拟^[19-21]。目标单元和接触单元形成接触对。把斜向预应力混凝土板底作为目标面,把基层顶面作为接触面,用Targe170和Conta174来模拟,接触面处设置摩擦系数,摩擦系数一般取0.8。

2.3.3 荷载加载方式

行车荷载采用标准轴载BZZ-100,在建模过程中将模型简化为二维,把当量圆荷载简化

为线荷载,把双圆均布荷载转化为矩形的均布荷载,矩形边长为 20 mm,接地压强为 0.625 MPa,轴载间距为 180 mm。加载面的布置和轮载作用等效转化为矩形图如图 4 所示。

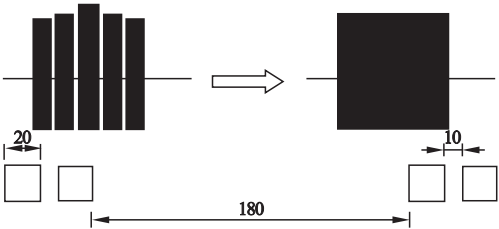


图 4 加载面、轮载等效矩形图

Fig. 4 Equivalent rectangle diagram of loading surface and wheel load

2.3.4 模型建立与计算

预应力筋模型及模型网格划分如图 5 所示。

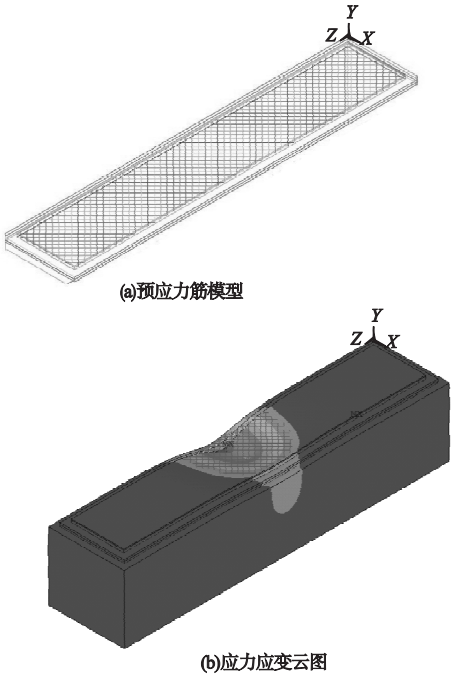


图 5 预应力筋模型及应力应变云图

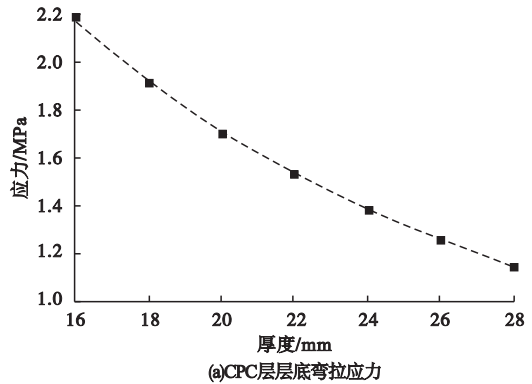
Fig. 5 Prestress model of tendon and stress-strain

斜向预应力混凝土板是规则的矩形板体,采用边界为正交的六面体单元进行分析,在 ANSYS 有限元建模过程中选取 solid45 单元。沥青层和基层都采用和混凝土相同的六面体单元进行建模。复合式路面结构的模型边界条件:①在经过收敛性分析之后地基取

有限尺寸;②对地基地面施加固定约束,各点的自由度为零,地基四周垂直面受到水平方向的约束;③沥青层和基层的四周垂直面为水平方向约束,基层和地基之间为光滑接触;④斜向预应力混凝土板的四周设为完全自由边界;⑤在斜向预应力混凝土板和基层之间设置接触单元,层间摩擦系数取 0.8。

3 CPC 层厚度对 AC + CPC 复合式路面结构临界荷位处荷载应力和变形的影响

通过改变 CPC 层厚度,分析路面各结构层的力学响应和弯沉值变化,进而分析 CPC 层厚度对各结构层荷载应力和变形的影响。当 CPC 层厚度从 16 cm 按照 2 cm 的增量变化到 28 cm,CPC 层的模量为 31 000 MPa,沥青层模量 1 200 MPa,基层模量 2 000 MPa,土基模量 30 MPa 时,进行有限元计算(见图 6)。从图 6 可以看出,随着 CPC 层厚度的增加,CPC 层层底弯拉应力、沥青层层底拉应力、沥青层最大剪应力、基层层底弯拉应力及弯沉均呈现较明显的下降趋势。当 CPC 层厚度从 16 cm 增大到 28 cm,CPC 层层底的弯拉应力减小了 47.4%,路表弯沉减小了 24.3%,沥青层最大剪应力及层底拉应力分别减少了 50.2% 和 18.5%,基层层底弯拉应力减小了 37.6%。CPC 层厚度的变化对路面结构的荷载应力影响较大,CPC 层厚度的增加能有效减小路面受到的荷载应力。



(a)CPC层层底弯拉应力

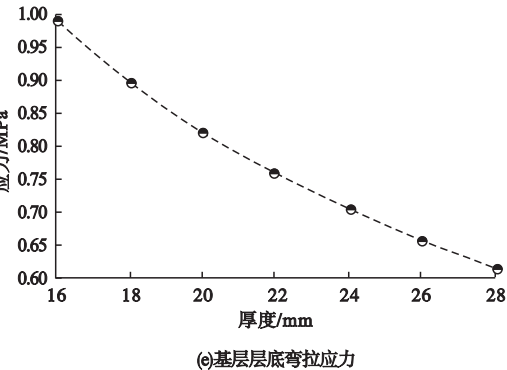
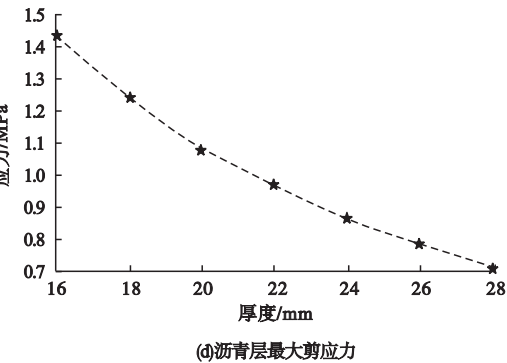
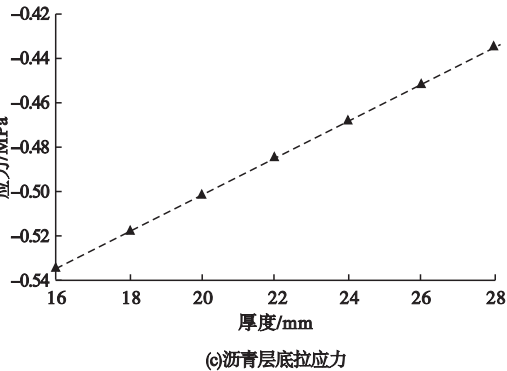
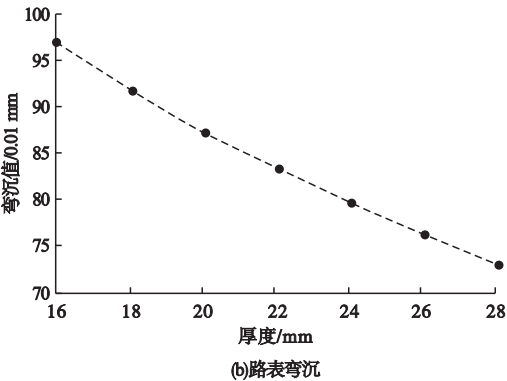


图6 AC+CPC复合式路面结构层荷载应力及弯沉值与CPC层厚度的关系

4 CPC层模量对AC+CPC复合式路面结构临界荷位处荷载应力和变形的影响

改变CPC层模量,分析路面各结构层的力学响应和弯沉值变化,进而分析CPC层模量对AC+CPC复合式路面结构各结构层荷载应力和变形的影响。当CPC层模量从21 000 MPa按照2 000 MPa的增量变化到33 000 MPa,CPC层厚度为24 cm,沥青层模量1 200 MPa,基层模量2 000 MPa,土基模量30 MPa时,进行路面结构计算(见图7)。从图7可以看出,随着CPC层模量的增大,沥青层剪应力和CPC层层底拉应力有一定程度的增大,分别增大了12.4%和19.9%;路表弯沉和基层层底弯拉应力则分别降低了7%和11%。由此可知斜向预应力混凝土板模量过大,会使得其层底拉应力过大,易导致结构破坏。在进行AC+CPC复合式路面结构设计时,要防止CPC层模量过大的情况,

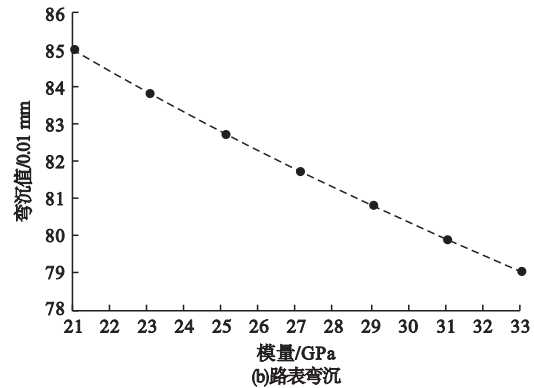
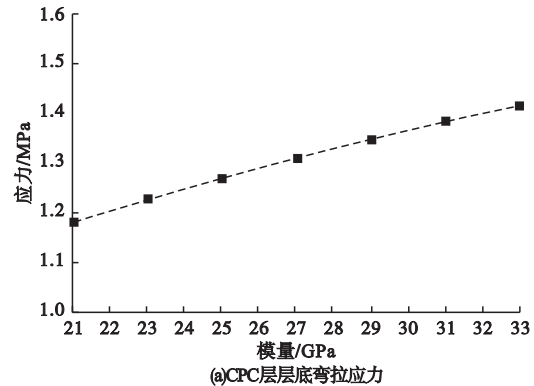


Fig. 6 Relationship of load stress, deflection and CPC thickness in AC+CPC composite pavement

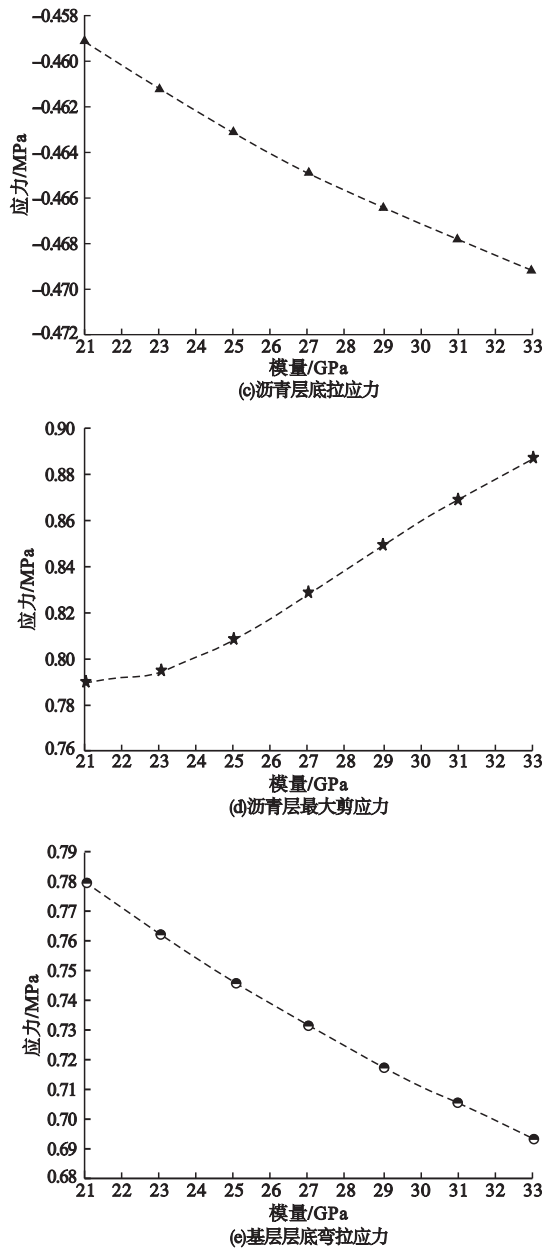


图 7 AC + CPC 复合式路面结构层荷载应力及弯沉值与 CPC 层模量的关系

Fig. 7 Relationship of stress, deflection and CPC modulus in AC + CPC composite pavement

增强各结构层模量变化的协调性,从而使得复合式路面结构具备最佳的受力状态,延长路面结构的使用寿命。

5 结 论

(1) CPC 层厚度的变化对短路基处

AC + CPC 复合式路面结构的荷载应力影响较大。当 CPC 层厚度从 16 cm 增大到 28 cm, CPC 板底的弯拉应力减小了 47.4%,路表弯沉减小了 24.3%,沥青层最大剪应力及层底拉应力分别减少了 50.2% 和 18.5%,基层层底弯拉应力减小了 37.6%。

(2) 随着 CPC 层模量的增大,沥青层剪应力和 CPC 层层底拉应力分别增大了 12.4% 和 19.9%;路表弯沉和基层层底弯拉应力则分别降低了 7% 和 11%。

(3) 在该复合式路面结构设计时,合理选择 CPC 层厚度和模量,增大 CPC 层厚度有益于复合式路面结构的受力,从而延长路面结构的使用寿命;然而 CPC 板模量过大,会使得其层底拉应力过大易导致结构破坏,故须选择合适的混凝土模量。

参考文献

[1] 陈亮亮,权磊,许芸熙,等. CRC + AC 复合式路面配筋率设计指标研究[J]. 公路, 2017 (1): 1-7.
(CHEN Liangliang, QUAN Lei, XU Yunxi, et al. Research on design criteria of steel content for CRC + AC pavement [J]. Highway, 2017 (1): 1-7.)

[2] 曹明明,陆阳,石希信,等. 复合式路面层间剪变特性评价指标[J]. 公路工程, 2018, 43 (6): 140-145.
(CAO Mingming, LU Yang, SHI Xixin, et al. Evaluation indicator on interlaminar shear properties of composite pavement [J]. Highway engineering, 2018, 43 (6): 140-145.)

[3] ZHOU J L, ZHENG M L, WANG C T, et al. Dynamic response analysis of road-bridge transition section without slab[J]. International journal of pavement research and technology, 2017 (10): 526-535.

[4] LEE S L, MANNAN M A, IBRAHIM W H W. Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface [J]. Geotextiles and geomembranes, 2020, 48: 230-235.

[5] KIM K, TIA M, GREENE J. Evaluation of structural behavior of precast prestressed concrete pavement with finite element analysis [J]. Journal of the transportation research board. 2016, 2590, 84-93.

[6] 孙雅珍,刘畅,王金昌,等. 复合式路面层间界面力学特性试验研究[J]. 公路, 2016 (4): 36-40.
(SUN Yazhen, LIU Chang, WANG Jingchang,

- et al. Experimental study on mechanical properties of interlayer interface of composite pavement [J]. Highway, 2016 (4): 36-40.)
- [7] YU L, YANG X, YAN X H, et al. Design and construction of oblique prestressed concrete pavement; a case study in China [J]. Applied science, 2018, 8: 607.
- [8] 王浩, 胡松山, 任少傅. 薄层橡胶沥青复合式路面层间抗剪特性试验 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2018, 38(4): 29-38.
(WANG Hao, HU Songshan, REN Shaobo. Shear resistance test of thin layer rubber asphalt pavement interlayer [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2018, 38(4): 29-38.)
- [9] DAS A, BHUYAN M, KHATTAK M, et al. Mitigating reflective cracking in composite pavements through the use of a ductile concrete interlayer [J]. Construction and building materials, 2020, 259: 120383.
- [10] 张洪伟, 赵晓亮, 李喆. 复合式路面结构中黏结层材料的黏结力评价 [J]. 公路, 2014 (12): 26-28.
(ZHANG Hongwei, ZHAO Xiaoliang, LI Zhe. Evaluation of cohesive force for adhesive layer materials sticky white with black pavement structure [J]. Highway, 2016 (12): 26-28.)
- [11] 任少傅, 王浩, 邹晓龙, 等. 复合式路面沥青面层车辙和侧向推移试验研究 [J]. 公路, 2019 (11): 6-13.
(REN Shaobo, WANG Hao, ZOU Xiaolong, et al. Experimental study on rutting and lateral slippage of asphalt layer on composite pavement [J]. Highway, 2019(11): 6-13.)
- [12] 张明杰, 祁文洋. 复合式路面与半刚性路面力学响应的对比 [J]. 石油沥青, 2016, 30(6): 16-19.
(ZHANG Mingjie, QI Wenyang. The mechanical response comparison of composite pavement and semi-rigid pavement [J]. Petroleum asphalt, 2016, 30(6): 16-19.)
- [13] 朱春福, 程培峰, 赵广宇. 荷载和温度耦合作用下“白加黑”复合式路面沥青加铺层的受力分析 [J]. 中外公路, 2020, 40(2): 40-45.
(ZHU Chunfu, CHENG Peifeng, ZHAO Guangyu. Stress response of "white + black" composite pavement asphalt overlay under the coupling action of load and temperature [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(2): 40-45.)
- [14] DEILAMI S, WHITE G. Review of reflective cracking in composite pavements [J]. International journal of pavement research and technology, 2020, 13(5): 524-535.
- [15] 王涛. 基于斜向预应力混凝土复合式路面的短路基桥头跳车处治技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
(WANG Tao. Research on the treatment technology of bridge-head jumping of short subgrade based on cross-tensioned prestressed concrete composite pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [16] 郑木莲, 孟建党, 张世铎, 等. 路桥过渡段上车内人体舒适性评价方法 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2012, 32(3): 1-6.
(ZHENG Mulian, MENG Jiandang, ZHANG Shiduo, et al. Evaluation method of human comfort in vehicle at transition section between bridge abutment and embankment [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2012, 32(3): 1-6.)
- [17] THIELE D J, TADROS M K, BENAK J V. Bridge evaluation repair and rehabilitation [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [18] 冉武平, 张玉, 李爽. 沥青路面层间接触状态研究进展 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2019, 38(8): 45-52.
(RAN Wuping, ZHANG Yu, LI Shuang. Research progress on interlayer contact state of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science). 2019, 38(8): 45-52.)
- [19] 包龙生, 樊乾玉, 兰皓, 等. 基于层间接触的空心板梁及桥面铺装在双轴移动荷载下的力学响应分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2020, 36(3): 491-499.
(BAO Longsheng, FAN Qianyu, LAN Hao, et al. Analysis of mechanical response of bridge deck pavement under two axis moving load based on interlayer contact [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 491-499.)
- [20] 王亦麟. 软土地基桥头跳车处理探讨 [J]. 公路交通科技, 2000, 17(1): 28-30.
(WANG Yilin. Discussion on the treatment of bridge jumping in the soft land tomb [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2000, 17(1): 28-30.)
- [21] 丁彦昕. 浅议公路桥头跳车的成因与防治 [J]. 公路交通科技, 2002, 19(5): 92-98.
(DING Yanxin. Causes and prevention of bumping at bridge-head [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2002, 19(5): 92-98.)
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)