

文章编号:1672-9331(2021)04-0001-08

钢丝网加筋新老路面结合部抗拓宽 路基差异沉降的数值模拟

祝建华¹, 吕茂丰², 查旭东³, 刘浩军³

(1. 衢州市公路港航与运输管理中心, 浙江 衢州 324000; 2. 中铁五局集团机械化工程有限责任公司, 湖南 长沙 410100; 3. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了确定 RoadMesh 钢丝网加筋新老路面结合部的合理层间设置位置, 以抵抗由拓宽路基差异沉降引起的沥青路面上部反弯破坏作用, 依托实际老路拓宽工程, 选取沥青面层之间(方案一)、基层之间(方案二)和基层之间(方案三)3种层间加筋方案, 设定新路肩外缘下方新路基表面产生 10 mm 最大差异沉降脱空值, 通过相应的三维有限元建模和数值模拟, 对比分析了 RoadMesh 钢丝网加筋前后及不同层间加筋方案拓宽沥青路面结构的力学响应。研究结果显示: 结合部附近的路表最大拉应力峰值和双轮轮隙中心路表弯沉值可作为拓宽沥青路面结构抗拓宽路基差异沉降的主要控制指标, 各方案下二者模拟结果的排序均为方案一<方案二<方案三<未加筋, 其中方案一的两个指标比未加筋方案的分别降低了 53.4% 和 60.6%。表明在新老路面结合部用 RoadMesh 钢丝网加筋能够显著提高拓宽沥青路面结构的抗拓宽路基差异沉降的能力, 且加筋层间越靠近路表, 其抗反弯破坏作用的加筋效果越显著, 因此面层之间为最佳加筋层间, 基层之间为适宜的加筋层间。研究结果可供拓宽沥青路面加筋设计参考。

关键词: 钢丝网; 路面加筋; 新老路面结合部; 拓宽路基; 差异沉降; 数值模拟; 反弯破坏作用

中图分类号: U416.02

文献标志码: A

Numerical simulation on resisting widening subgrade differential settlement for joint between new and old pavement reinforced by steel wire mesh

ZHU Jian-hua¹, LYU Mao-feng², ZHA Xu-dong³, LIU Hao-jun³

(1. Quzhou Highway, Port and Fairway Transportation Management Center, Quzhou 324000, China; 2. Railway Group 5 Mechanization of Engineering Limited Liability Company, Changsha 410100, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to determine the reasonable interlayer setting position of joint between new and old pavement reinforced by RoadMesh steel wire mesh to resist the reverse bending failure effect of the top of asphalt pavement caused by differential settlement of widening subgrade, relying on the real old road widening project, three interlayer reinforcement schemes were selected such as between asphalt surface layers (scheme 1), between surface layer and base layer (scheme 2) and between base layers (scheme 3). The 10 mm maximum void value of differential settlement was set at the surface of new subgrade under the outer

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878077); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2010H33); 中铁五局集团有限公司科技项目(2020[12])

通讯作者: 祝建华(1968—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事公路的运营及管养等方面的研究。E-mail: 1968326113@qq.com

edge of new shoulder. Through the corresponding 3D finite element modeling and numerical simulation, the comparative analysis of mechanical response of widening asphalt pavement structure was carried out before and after the RoadMesh steel wire mesh reinforcement and for the different interlayer reinforcement schemes. The results show that the peak value of the maximum tensile stress of pavement surface near the joint and the pavement surface deflection value of double wheel clearance center can be used as the main control indexes of widening asphalt pavement structure for resisting differential settlement of widening subgrade. The order of simulation results for the two indexes under each scheme is scheme 1 < scheme 2 < scheme 3 < unreinforced scheme, and the two indexes of scheme 1 are 53.4% and 60.6% lower than those of the unreinforced scheme, respectively, which indicates that the joint between new and old pavement reinforced by the RoadMesh steel wire mesh can significantly improve the ability of widening asphalt pavement structure to resist differential settlement of widening subgrade. The closer the reinforced interlayer is to the pavement surface, the more significant the reinforcement effect for resisting reverse bending failure effect is. Therefore, the optimum reinforcement interlayer is between surface layers, and the suitable reinforcement interlayer is between surface layer and base layer. The results can provide reference for the reinforcement design of widening asphalt pavement.

Key words: steel wire mesh; pavement reinforcement; joint between new and old pavement; widening subgrade; differential settlement; numerical simulation; reverse bending failure effect

在老路拓宽改扩建工程中,老路基及其地基经多年的运营,沉降基本稳定,而拓宽的新建路基及其地基由于自重、行车荷载和压实差异等作用,必然会出现一定的固结沉降和侧向变形等不协调变形现象,导致新老路基之间产生差异沉降。然而,路面结构的抗弯拉能力相对较弱,难以承受这种拓宽路基差异沉降引起的附加应力,容易造成新老路面结合部的路面结构上部产生反弯破坏作用而形成自上而下的纵向开裂。为此,近年来许多学者采用室内外试验、理论分析和数值模拟等方法开展了相关沉降机理和处治技术的研究。范红英等^[1]通过有限元建模,分析了单侧与双侧对称两种拓宽方式对路基沉降的影响;贾宝新等^[2]、李刚等^[3]分析了新老路基差异沉降的影响因素,结果表明提高新地基的压缩模量能有效降低差异沉降;黄写勤等^[4]认为土工格栅较适用于中、高级别路基差异沉降的处治;翁效林等^[5]通过大比尺模型试验得出:在新老路基中铺设土工格栅可减小路面结构层的附加应变;观祖保等^[6]的研究表明,老路拼接位置易发生弯拉破坏,可在路面基层顶面加铺土工格栅来增强路面抗裂能力;李芬

等^[7]比较了土工格栅不同铺设参数的路基位移限制效果;张军辉等^[8]、张军等^[9]模拟分析了湖南省莲株高速公路改扩建工程拓宽路基的差异沉降特性和铺设土工格栅等的加固效果。总体上,新老路基路面结合部采用土工合成材料加筋有利于提高拓宽路面结构的抗拓宽路基差异沉降的能力,但由于土工合成材料的结构特性相对偏柔,只有在大变形的情况下才能充分发挥其加筋作用,而此种条件下路面往往会产生较严重的纵向开裂,难以达到预期的抗差异沉降效果。

近十几年来,一种 RoadMesh 钢丝网路面加筋技术得到了越来越多的应用。RoadMesh 钢丝网是由网孔钢丝、边端钢丝与横向加强钢丝共同机编而成的六边形双绞合钢丝网面结构,成品钢丝网呈卷状,幅宽 3~5 m,幅长 20~50 m。将其沿路面的纵向按幅宽方向横跨新老路面结合部展开后铺设于路面结构层间,并与上覆压实层的混合料一起起到了一种独特的三维网箍加筋作用^[10]。CAFISO 等^[11]的分析表明加设钢丝网能显著改善路面性能;陈勇强^[12]的研究认为双绞合钢丝网加筋对拓宽路面抗路基差异沉降能力有显

著的提升作用;查旭东等^[13]的分析显示 RoadMesh 钢丝网加筋 AC+PCC 复合式路面结构具有良好的抗裂效果;TANG 等^[14]通过多种加筋材料组合试件的室内对比试验,发现 RoadMesh 钢丝网加筋沥青混合料的性能更优。针对新老路面结合部结合不良的问题,黄旭等^[15]、VICTOR 等^[16]的研究表明,RoadMesh 钢丝网加筋技术具有良好的抗裂性能;SUKU 等^[17]的试验显示,RoadMesh 钢丝网加筋的柔性路面结构能减薄基层厚度,并能增强重载条件下基层的性能;XIAO 等^[18]的研究发现,钢丝网的张拉和固定是 RoadMesh 钢丝网施工的关键工序,且基层层之间的加筋效果优于基层之间。综上所述,RoadMesh 钢丝网加筋技术可有效增强沥青路面结构的抗开裂、抗变形、抗车辙和抗疲劳等性能,并在旧水泥混凝土路面沥青加铺及老路拓宽改扩建的新老路面结合部处治等路面加筋工程中得以成功应用。

为进一步探究 RoadMesh 钢丝网路面加筋技术的结构性能,依托实际老路拓宽改扩建工程,在新老路基之间产生一定差异沉降的条件下,通过

三维有限元建模和数值模拟,对比分析 RoadMesh 钢丝网对新老路面结合部加筋前后及不同层间加筋方案的拓宽沥青路面结构的力学响应,从而确定 RoadMesh 钢丝网抗拓宽路基差异沉降反弯破坏作用的合理层间设置位置,以期为拓宽沥青路面加筋设计提供参考。

1 老路拓宽路基路面结构设计方案

依托工程的老路为三级公路,路基宽 7 m,拟将其双侧对称拓宽升级为二级公路,路基宽 10 m。原路面为水泥混凝土路面,拟将其拓宽改造为沥青路面。图 1 所示为依托工程半幅路基路面结构拓宽设计方案。为加强新老路基路面之间良好结合,并考虑到路基较低的实际情况,对结合部的老路采用开挖 1 级台阶的措施进行处理;同时,为防止旧水泥混凝土面板加铺沥青路面的反射开裂,并减小新老路基路面结构之间承载能力的差异,对旧面板采取打裂措施进行处治,对新路床采用水泥稳定砾石土进行加固处治。

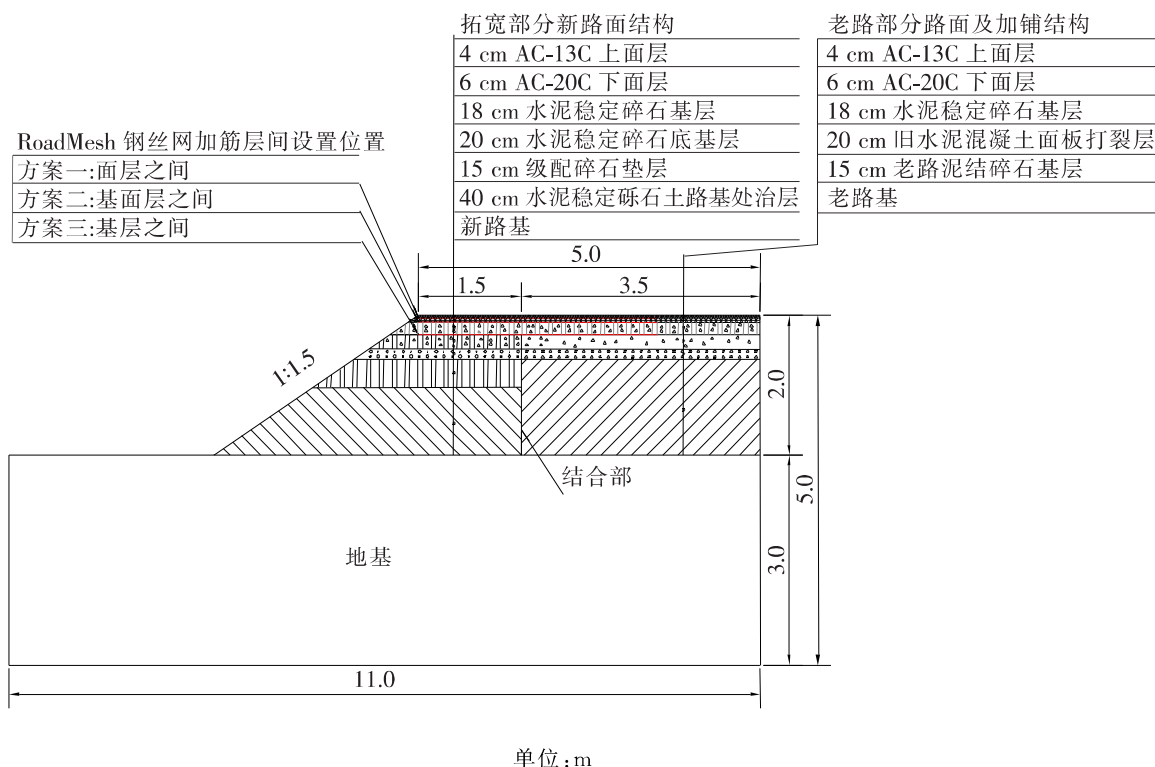


图 1 半幅路基路面结构拓宽设计方案

Fig. 1 Widening design scheme of semi-range subgrade and pavement structure

为方便施工,使老路面的旧水泥混凝土面板打裂层和泥结碎石基层分别与新路面的水泥稳定

碎石底基层和级配碎石垫层等厚且顶面齐平,并在上面整体加铺 AC-13C 上面层、AC-20C 下面层

和水泥稳定碎石基层。同时,为了确定合理的RoadMesh 钢丝网加筋的层间设置位置,对新老路面结合部按从上至下的顺序选取沥青上面层与下面层之间(方案一)、沥青下面层与水泥稳定碎石基层之间(方案二)、水泥稳定碎石基层与底基层之间(方案三)3种层间加筋方案进行加筋。其中,方案三对于老路面也是在水泥稳定碎石基层与旧水泥混凝土面板打裂层之间进行加筋的。

根据老路拓宽的路基差异沉降和路基路面结构受力特点,各结构层计算参数的取值见表1。其中,弹性模量按静态模量取值,新建路基路面模量按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)中

表1 各结构层的计算参数

Table 1 Calculation parameters of each structure layer

结构层	厚度 h/cm	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
AC-13C 上面层	4	1 400	0.25
AC-20C 下面层	6	1 200	0.25
水泥稳定碎石基层	18	1 500	0.25
水泥稳定碎石底基层	20	1 300	0.25
级配碎石垫层	15	225	0.25
水泥稳定砾石土路基处治层	40	95	0.25
新路基	97	30	0.35
旧水泥混凝土面板打裂层	20	1 000	0.15
老路泥结碎石基层	15	200	0.25
老路基	137	100	0.35
地基	300	20	0.35

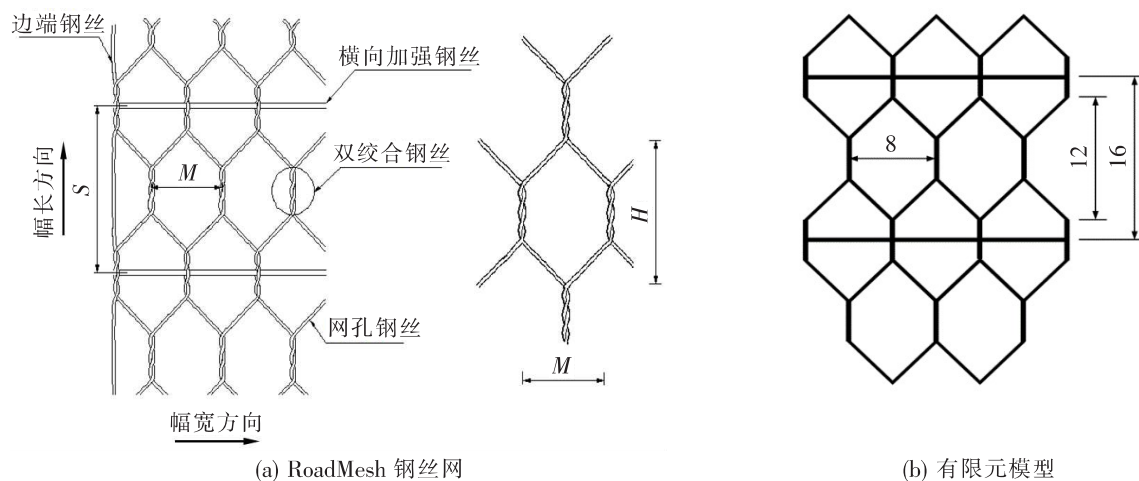
的建议值选取,老路路基路面模量按实测结果结合工程经验取值。

2 RoadMesh 钢丝网加筋拓宽路面结构数值模拟

2.1 三维有限元建模

设定拓宽路基路面结构分析模型的假设条件为线弹性均质体、各向同性、界面连续且不计自重,边界条件为在模型四周竖向外围面施加法向水平位移约束、地基底面施加全约束。考虑双侧对称拓宽,采用 ANSYS 取 1/2 断面进行三维实体建模;路面、路基及地基各结构层模型均采用 SOLID45 弹性固体六面体单元;RoadMesh 钢丝网采用 BEAM4 三维弹性梁单元,整个钢丝网面按实际尺寸构成网状结构层,将钢丝网嵌入相应加筋方案的结构层层间,如图2所示。其中,网孔宽 $M=8\text{ cm}$ 、高 $H=12\text{ cm}$;网孔钢丝直径 $d=2.2\text{ mm}$;横向加强钢丝间距 $S=16\text{ cm}$ 、直径 $D=3.4\text{ mm}$ 。

大量研究表明,对称拓宽的路基表面沉降沿横断面方向呈“余弦曲线”分布,即路基中心位置的沉降最小,随着距中心位置距离的增大,沉降逐渐增加,直至新路肩外缘下方的路基表面达到峰值,然后向边坡坡面延伸并逐渐减小。为了模拟新老路基之间的差异沉降,分析时忽略老路基的沉降,即假设结合部老路基侧的表面沉降值为0,新路肩外缘下方的新路基表面沉降脱空值最大,为 10 mm ,且二者之间的沉降呈直线分布。



单位:cm

图2 RoadMesh 钢丝网及其有限元模型

Fig. 2 RoadMesh steel wire mesh and its finite element model

据图 1 所示的 1/2 断面可知,老路宽 $b=7\text{ m}$,新路宽 $B=10\text{ m}$,两侧各拓宽 $w=1.5\text{ m}$;路基路面填高 $F=2\text{ m}$,边坡坡率 $n=1:1.5$;地基厚 $h=3\text{ m}$;成卷的 RoadMesh 钢丝网幅宽为 3.5 m ,按相应的层间设置位置,将其沿路面纵向展开并横跨结合部,沿幅宽方向分别在新、老路面的下承层顶面各铺设 1.5 和 2.0 m ,钢丝网的弹性模量和泊松比分别取 $E=200\text{ GPa}$ 和 $\mu=0.30$ 。据此,为保证计算精度并提高计算效率,经收敛性分析比较,取拓宽公路纵向长 $Z=6\text{ m}$ 和地基宽 $X=11\text{ m}$ 进行三维有限元实体建模及单元映射网格划分。其中,单元尺寸沿纵向为 0.1 m ;沿横向在路表为 0.1 m ,并从结合部到路堤坡脚外地基层逐步变疏至 0.5 m ;沿竖向根据结构层的厚度组合,由面层分层的 0.02 m 逐步变疏至地基分层的 1 m 。

行车荷载采用双圆垂直均布标准轴载 BZZ-100,即接地压强、荷载半径和双轮中心距分别为 $p=0.7\text{ MPa}$, $\delta=10.65\text{ cm}$ 和 3δ 。通过数值模拟可知,最不利荷位为最大沉降脱空位置的新路肩路表处。考虑到行车道布置和行车安全距离的要求,将荷载作用的双轮中心连线横向布置于路表,且轮隙中心点距新路肩外缘的距离为 0.5 m ,即距路中心的水平距离为 4.5 m ;纵向位于模型中心 3.0 m 处。具体模型如图 3 所示,图中红色部分为标准轴载,黄线为新老路基路面结合部,白色虚线为方案三基层之间 RoadMesh 钢丝网层间加筋位置。

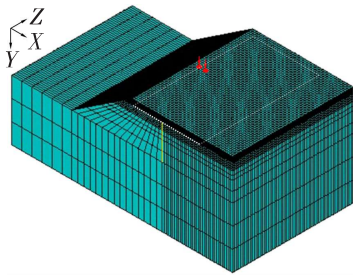


图 3 三维有限元实体建模及网格划分

Fig. 3 Solid modeling and meshing for 3D finite element

2.2 数值模拟结果分析

为对比分析 RoadMesh 钢丝网加筋新老路面结合部的抗拓宽路基差异沉降能力,根据拓宽沥青路面结构的受力特点,选取路表的竖向位移 l 和最大拉应力 σ_{s0} ,以及上面层、下面层和基层的层底最大拉应力 σ_{s1} , σ_{s2} , σ_{s3} 5 个力学响应作为评价指标。由此,根据 ANSYS 数值模拟结果,可得到

不同加筋方案下 5 个指标沿双轮中心连线的横向分布曲线,如图 4 所示。其中, L 为计算点距路基中心线的距离,竖线为新老路面结合部。各方案下 5 个评价指标的峰值见表 2。

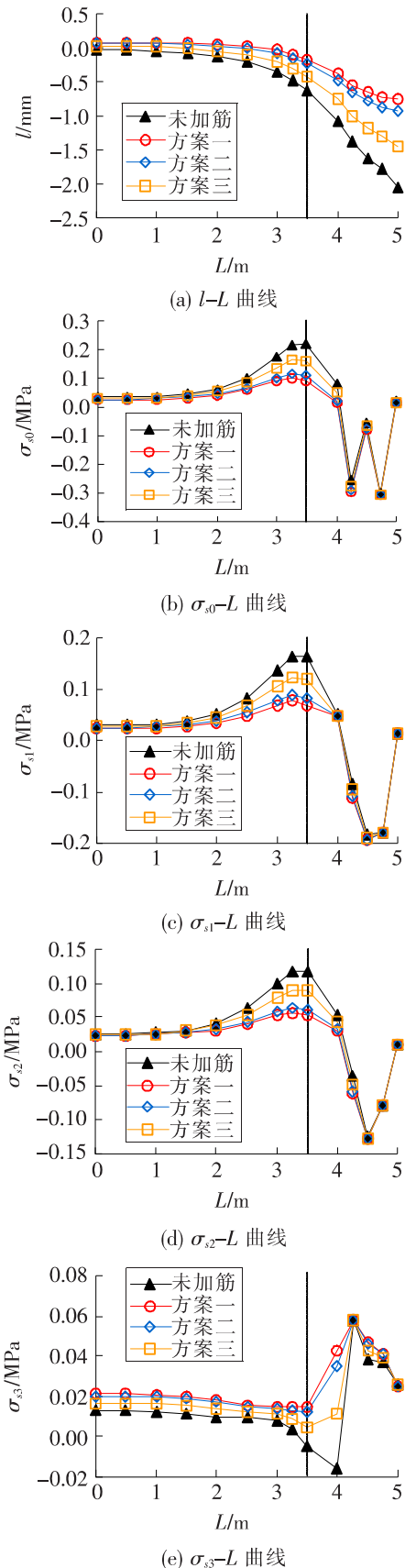


图 4 不同方案下各评价指标的横向分布曲线

Fig. 4 Transverse distribution curves of each evaluation index for different schemes

表2 各方案下5个评价指标的峰值

Table 2 Peak values of 5 evaluation indexes for each scheme

加筋方案	路表弯沉 l_0/mm	$\sigma_{s0,\text{max}}/\text{MPa}$	$\sigma_{s1,\text{max}}/\text{MPa}$	$\sigma_{s2,\text{max}}/\text{MPa}$	$\sigma_{s3,\text{max}}/\text{MPa}$
方案一	0.640 2	0.101 8	0.077 3	0.056 0	0.057 9
方案二	0.774 2	0.117 0	0.088 9	0.064 2	0.057 9
方案三	1.176 3	0.162 8	0.123 7	0.088 7	0.058 0
未加筋	1.623 0	0.218 3	0.162 8	0.117 4	0.058 0

从图4和表2可以看出:

1) 在4种方案下各评价指标沿横向的变化规律基本一致,其中路表、上面层层底和下面层层底的最大拉应力变化曲线的形状较接近,并在结合部附近出现明显的路面上部受拉的反向弯拉情形,而在轮载下方的新路面面层均呈受压状态,且3种钢丝网加筋方案的最大拉应力峰值均出现在结合部靠老路一侧3.25 m处,而未加筋方案的峰值出现在结合部3.5 m处。同时,各方案下路表最大拉应力峰值分别约为上面层和下面层层底最大拉应力峰值的1.3和1.8倍,约为基层层底最大拉应力峰值的1.5~4.0倍。究其原因,主要是拓宽路基差异沉降造成新路面底部与新路床表面之间产生脱空,在行车荷载作用下,拓宽沥青路面结构处于悬臂梁状态,并受反向弯拉作用,造成路面顶部出现较大的附加弯拉应力,特别是结合部附近相当于悬臂梁的根部,新老路基路面结构之间的刚度差异和沉降差异致使产生应力集中现象,使得结合部附近沥青路面结构的内部应力变化较显著,容易导致新老路面结合部产生自上而下的纵向开裂破坏。据此可知,4个最大拉应力指标中,路表拉应力峰值最大,表明其可作为控制拓宽路基差异沉降引起拓宽沥青路面反弯破坏作用的关键指标。

2) 各方案的基层层底最大拉应力峰值均出现在荷载作用范围内(4.25 m处),且相差很小,同时结合部的最大拉应力也较小。表明该处接近反弯作用的中性面而受钢丝网加筋作用的影响较小,整个沥青路面结构从上至下由反向弯拉状态逐渐过渡到基层以下的正向弯拉状态。

3) 与未加筋方案相比,除基层层底最大拉应力峰值外,3种钢丝网加筋方案的其他4个评价指标值均降低明显,方案一、方案二和方案三的双轮轮隙中心路表弯沉(4.5 m处的竖向位移)分别减小了60.6%,52.3%和27.5%,路表最大拉应力峰值分别减小了53.4%,46.4%和25.4%,上面层层底最大拉应力峰值分别减小了52.5%,45.4%和24.0%,下面层层底最大拉应力峰值分别减小了52.3%,45.3%和24.4%。表明在新老路面结合部采用RoadMesh钢丝网加筋能有效起到分散荷载的作用,钢丝网加筋层间位置越靠近路表,拓宽沥青路面结构的各力学响应值的降幅越大,加筋抗反弯效果越好,即抗拓宽路基差异沉降引起路表反弯破坏作用的能力越强。

综上所述,RoadMesh钢丝网加筋新老路面结合部的最佳层间设置位置为面层之间。如此设置可有效地使拓宽沥青路面结构的应力重分布,进而增强新老路面结合部抗拓宽路基差异沉降的能力,同时基层之间也具有良好的加筋效果,但基层之间的加筋效果相对较差。在实际工程应用中,钢丝网上覆层的总厚度一般应不小于5 cm,故适宜的加筋层间位置为沥青中、下面层之间或沥青下面层与上基层之间。图1所示的依托工程实际采用了基层之间的加筋方案(方案二),通过在试验段进行铺筑,并与聚酯长丝土工布、自黏式玻纤格栅和钢塑复合土工格栅3种土工合成材料加筋方案及未加筋方案进行对比验证。多年的跟踪观测显示,RoadMesh钢丝网加筋新老路面结合部试验段的拓宽沥青路面未出现反弯开裂破坏,使用性能优良,加筋效果优于土工合成材料加筋方案及未加筋方案,值得推广应用。

3 结论

根据实际老路拓宽改扩建工程的沥青路面结构设计方案,考虑3种层间加筋方案及未加筋方案,通过三维有限元建模和数值模拟,对比分析了RoadMesh钢丝网加筋新老路面结合部的抗拓宽路基差异沉降能力,并得到以下结论:

1) 新老路基之间发生差异沉降后,行车荷载会使拓宽沥青路面结构上部处于反向弯拉受力状态,且最大拉应力出现在结合部附近的路表位置,从而易导致新老路面结合部的拓宽路面结构产生自上而下的纵向开裂破坏,故可采用结合部附近的路表最大拉应力峰值和双轮轮隙中心路表弯沉值作为拓宽路面结构抗拓宽路基差异沉降的主要控制指标。

2) RoadMesh钢丝网层间加筋可有效起到分散荷载的作用,减小拓宽沥青路面结构的应力和变形,且越靠近路表,加筋抗反弯破坏作用的效果越明显,故抗差异沉降的最佳加筋层间设置位置为面层之间,其次为基层之间,基层之间相对较差。因此,在实际老路拓宽工程的应用中,在满足施工要求的条件下,应尽量将RoadMesh钢丝网沿纵向横跨新老路面结合部,铺设于上部路面结构层的层间,以充分发挥其抗拓宽路基差异沉降的能力。

〔参考文献〕

- [1] 范红英,折学森,边汉亮,等.高速公路拓宽方式对路基沉降的影响[J].交通运输工程学报,2012,12(1):13-18,37.
FAN Hong-ying, SHE Xue-sen, BIAN Han-liang, et al. Influence of widening modes on subgrade settlement of expressway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 13-18, 37.
- [2] 贾宝新,刘丰溥,赵良,等.公路改扩建导致新老路基差异沉降的因素分析[J].安全与环境学报,2020,20(1):69-72.
JIA Bao-xin, LIU Feng-pu, ZHAO Liang, et al. Influential factors analysis of the new and old roadbed on the differential settlements due to the highway recon-

struction and extension[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 69-72.

- [3] 李刚,郭艳玲.高速公路改扩建新旧路基差异沉降影响因素分析[J].公路交通科技,2021,38(7):22-28.
LI Gang, GUO Yan-ling. Analysis on influencing factors of differential settlement of new and old subgrade in expressway reconstruction and extension [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(7): 22-28.
- [4] 黄写勤,高志伟,王选仓.高速公路拓宽路基差异沉降处治措施[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(8):71-75.
HUANG Xie-qin, GAO Zhi-wei, WANG Xuan-cang. Treatment measures for subgrade differential settlement of highway widening [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(8): 71-75.
- [5] 翁效林,张超,李常乐,等.差异沉降对路面结构附加变形影响的大比尺模型试验[J].中国公路学报,2013,26(4):1-6.
WENG Xiao-lin, ZHANG Chao, LI Chang-le, et al. Large scale test on additional deformation of pavement widening with differential settlement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 1-6.
- [6] 观祖保,杨挺.老路拼接中土工格栅治理路面结构阻裂作用分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):263-267.
GUAN Zu-bao, YANG Ting. Pavement crack resistance effect analysis of geogrid treatment in old road widening [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 263-267.
- [7] 李芬,唐韬.高速公路加宽工程中土工材料力学性能研究[J].公路与汽运,2019(5):79-82.
LI Fen, TANG Tao. Research on mechanical properties of geotechnical materials in expressway widening engineering [J]. Highways & Automotive Applications, 2019(5): 79-82.
- [8] 张军辉,吴厚铭,周平.拓宽路基差异沉降监测及数值分析[J].交通科学与工程,2020,36(1):14-19.
ZHANG Jun-hui, WU Hou-ming, ZHOU Ping. Widening subgrade differential settlement monitoring and numerical analysis [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 14-19.
- [9] 张军,黄淼,李友云,等.全风化花岗岩路基改扩建差异沉降处治分析[J].公路工程,2020,45(5):220-227.

- ZHANG Jun, HUANG Miao, LI You-yun, et al. Analysis on differential settlement treatment of reconstruction and extension of fully weathered granite subgrade[J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 220-227.
- [10] 查旭东, 谢耿, 吕彩忠. 沥青路面双绞合钢丝网加筋技术[J]. 中外公路, 2011, 31(3): 63-67.
- ZHA Xu-dong, XIE Geng, LYU Cai-zhong. Reinforced technology of asphalt pavement with double twisted steel wire mesh[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(3): 63-67.
- [11] CAFISO S, GRAZIANO A D. Monitoring and performance of AC pavements reinforced with steel mesh[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2009, 2(3): 82-90.
- [12] 陈勇强. 双绞合钢丝网加筋新老路面结合部抗差异沉降分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012: 62-64.
- CHEN Yong-qiang. Analysis of differential settlement resistance for joint section between new and existing pavement reinforced with double twisted steel wire mesh[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012: 62-64.
- [13] 查旭东, 朱凯, 汤涛. RoadMesh 钢丝网加筋 AC+PCC 复合式路面结构力学分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(1): 1-9.
- ZHA Xu-dong, ZHU Kai, TANG Tao. Mechanical analysis of AC+PCC composite pavement structure reinforced with RoadMesh steel mesh[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2015, 12(1): 1-9.
- [14] TANG T, ZHA X D, XIAO Q M, et al. Laboratory characterization and field validation of RoadMesh reinforced asphalt pavement in China[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(3): 299-313.
- [15] 黄旭, 查旭东, 吴翠. RoadMesh 钢丝网加筋新老路面结合部抗裂性能数值模拟[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 1-7.
- HUANG Xu, ZHA Xu-dong, WU Hui. Numerical simulation on crack resistance of reinforced joint between new and existing pavement with RoadMesh steel mesh[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(1): 1-7.
- [16] VICTOR U, ALEKSANDER I. Evaluation of performance of the RoadMesh reinforcement pavement at trial stretch on Chita-Khabarovsk autoroad[J]. Lecture Notes in Civil Engineering, 2019, 29: 45-55.
- [17] SUKU L, MAHAJAN R, BABU G L. Experimental and field investigation of road mesh reinforcement in flexible pavements[J]. Indian Geotechnical Journal, 2020, 50(2): 184-195.
- [18] XIAO Q M, ZHA X D, HU H W, et al. Construction technology and treatment effect of RoadMesh reinforcement in joint section between new and existing asphalt pavement[C]//11th International Conference on Road and Airfield Pavement Technologies. Kuala Lumpur: Universiti Putra Malaysia, 2019.