

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.043

旧水泥路面共振破碎加铺沥青力学响应分析

洪一波¹, 查志松², 刘成², 王刚², 周海生²

(1. 赣州市公路建设服务中心, 江西 赣州 341000; 2. 上海万广建设发展有限公司, 上海市 201110)

摘要: 共振破碎技术是处理旧水泥路面的有效手段, 可消除沥青加铺层的反射裂缝问题, 实现旧板块的原位利用, 能降低工程造价缩短施工工期, 因此而受到了广泛关注。掌握各共振破碎层对结构层的力学响应, 可更大限度的发挥各结构层的功能, 有效防止路面病害的产生。通过 ABAQUS 有限元软件建立含共振破碎层(松散层+嵌锁层)的沥青加铺层结构模型, 分别探究不同松散层、嵌锁层和破碎层的模量和厚度对加铺结构的力学响应。研究发现: 松散层的回弹模量、松散层相对厚度对加铺结构的力学响应影响显著, 而嵌锁层的模量对加铺结构影响较小。应控制上部松散层的模量在 300 MPa 以上, 嵌锁层的模量在 2 500 MPa 以上以及松散层占共振破碎层总厚度 1/3 左右。此外, 在加铺层结构设计时, 将共振破碎层作为双层结构考虑比单层结构更加安全可靠。

关键词: 旧水泥路面; 共振破碎技术; 有限元; 力学响应

中图分类号: U418.8

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0198-06

0 引言

旧水泥混凝土路面碎石化技术将服务能力不足的旧水泥混凝土路面进行破碎并原位再利用, 能有效降低工程造价, 发展至今已三十多年的研究和应用历史, 历经冲击破碎、打裂压稳、共振破碎三个发展阶段^[1-3]。与将旧路面完全翻挖后再重建的方式相比, 碎石化技术对旧混凝土路面实现了一定程度的利用, 直接将具备较好承载和透水能力的破碎混凝土块作为基层或垫层, 避免了移除碎块时对路基产生的不良影响, 也有效的控制了反射裂缝的产生^[4-6]。

共振式破碎技术是利用振动梁振动带动锤头振动, 然后将锤头与路面接触使混凝土产生破碎^[7-8]。共振式破碎技术可以通过控制激振器的频率, 进而控制共振锤头的频率, 使其接近旧混凝土面板的固有频率, 产生共振促使面板内部颗粒间的摩擦力快速降低而更容易崩溃破碎。与其他破碎方式相比, 大幅度提升了破碎效率, 也节约了能量的输出^[9-10]。

我国于 21 世纪初开始引进共振破碎技术与装备, 并开展了一系列的研究。随后, 国内先后在上

海、浙江、江西、四川等地对共振破碎技术进行了实际应用, 加铺路段质量良好^[11-13]。总的来说, 国内关于共振碎石化技术的相关研究面向实际应用的较多, 而原理机理方面研究的较少。面向公路沥青路面设计新规范的加铺技术相关参数有待进一步优化。

本文建立了一个含共振破碎层(松散层+嵌锁层)的沥青加铺层结构模型, 并进行有限元分析, 探究共振破碎层对于加铺路面力学响应的基本规律, 分析不同破碎层状态下路面力学响应的敏感性问题。研究成果可用于指导共振破碎层加铺沥青路面的设计和优化。

1 模型设定与材料属性

使用 ABAQUS 软件建立了施加双圆形均匀垂直荷载作用的弹性层状连续体路面模型进行力学响应分析, 路面模型如图 1 所示。

对模型做出的基本假定如下:

材料属性为路面结构为弹性层状连续体, 材料均设置为线弹性, 并采用参数弹性模量 E 、泊松比 μ 来表征材料属性。

材层间接触状态为各层完全连续, 选取 Tie 约束。

荷载条件取标准轴载 100 kN 的单轴-双轮组轴载作为设计轴载计算, 则单个轮胎上的荷载为 25 kN, 将轮胎接触点简化成半径 δ 为 10.65 cm 的圆形, 不考

收稿日期: 2024-02-04

作者简介: 洪一波(1981—), 男, 本科, 工程师, 从事公路建设管理工作。

通信作者: 查志松(1986—), 男, 本科, 从事土木工程相关工作。电子信箱: 317728568@qq.com

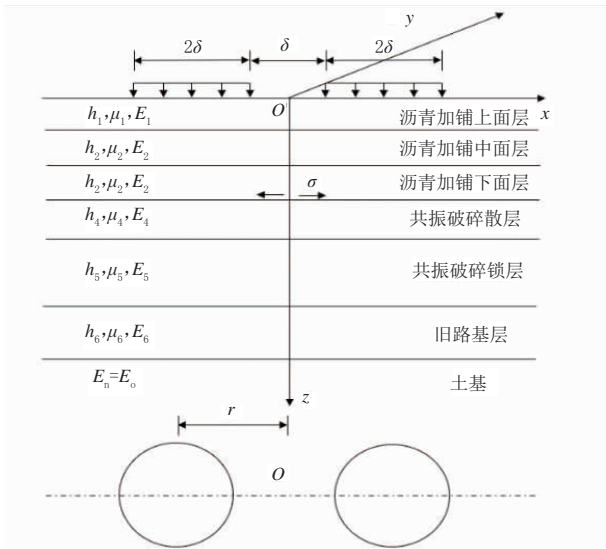


图1 含共振破碎层的路面结构模型

考虑轮胎壁刚度的影响,接地压强取标准胎压 0.707 MPa。

模型及单元类型中,模型为轴对称模型,单元类型采用线性六面体 C3D8R。

模型尺寸为 6 m × 5 m × 5 m 的长方体模型,其中沿道路横向为 x 轴,沿道路纵向为 y 轴,道路深度方向为 z 轴。

边界条件为土基的底面固定,在材料的周边施加水平方向约束。

建立三维的有限元几何模型及其网格划分和荷载如图 2 所示。

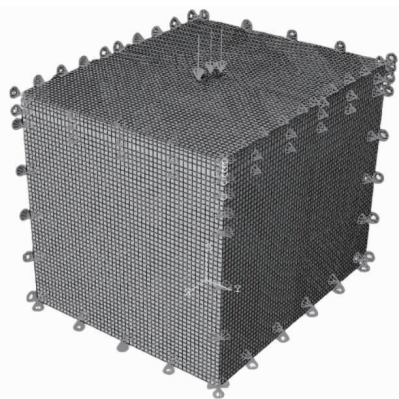


图2 三维有限元模型图

参考国内外现有的共振破碎研究成果并结合国内道路施工的材料经验值,考虑试验路段的沥青加铺层、共振破碎层和半刚性基层的不同工况组合,确定模型材料参数的取值如表 1 所示。通过对共振破碎层模量反演的结果,取沥青上面层 4 cm,模量 1 600 MPa;沥青中面层 6 cm,模量 1 400 MPa;沥青下面层 8 cm,模量 1 200 MPa。旧水泥路面在共振破碎后形成的共振破碎层具有显著的分层现象。共振破碎层的上部为粒径细小(0~30 mm)的碎石,且状

态松散,本文将其定义为松散层;下部则为粒径较大(30~200 mm)的块石,结构紧密且形成了嵌锁结构,本文将其定义为嵌锁层。共振破碎松散层 7 cm,模量 300 MPa;共振破碎嵌锁层 18 cm,模量 7 500 MPa,半刚性基层 30 cm,模量 1 000 MPa;土基模量 60 MPa 作为 G323 与 G319 实验段的模型参数,并将此结构作为本文含共振破碎层加铺路面的典型结构进行分析。

2 各层模量对路面力学响应的影响

2.1 不同松散层模量下的路面力学响应

依次取松散层模量为 200、250、300、350、400 MPa,保持其他结构层厚度和模量参数不变,计算结果见表 1。

表 1 结构材料属性与计算参数

路面结构	结构层材料	厚度 / cm	模量参考值 / MPa	密度 / (t·m ⁻³)	泊松比
沥青加铺层	AC25 上	4	1 600	2.45	0.25
	AC20 中	6	1 400	2.44	0.25
	ATB25 下	8	1 200	2.4	0.25
共振破碎层	松散层	7	300	2.15	0.35
	嵌锁层	18	5 000	2.15	0.35
半刚性基层	水泥稳定土基层	30	2 000	1.75	0.25
土基	—	—	60	1.8	0.40

(1) 沥青层层底径向应力

对于本研究的路面结构模型,当其受到圆形垂直荷载作用时,沿着荷载直径方向的力为径向应力。如图 3 所示,当松散层模量从 200 MPa 至变化 400 MPa 时,在双轮荷载中心的加铺层层底(图 1 中 O 点)出现了拉应力,沿着荷载中心线径向延伸,加铺层底的拉应力逐渐变为压应力。在荷载中心加铺层层底处,拉应力最大值 0.13 MPa。随着松散层模量的增加,层底的最大拉应力值变小,松散层的模量值变化对于沥青加铺层层底应力的变化影响显著。当松散层模量在 350 MPa 以上时,沥青加铺层层底的最大拉应力仅有 0.05 MPa,可见控制松散层碎石的模量可以有效控制沥青加铺层层底的拉应力,应尽量避免过度共振破碎导致松散层模量过低。

(2) 半刚性基层层底径向应力

如图 4 所示,当松散层模量从 200 MPa 变化至 400 MPa 时,整个半刚性基层层底均出现拉应力,松散层模量为 200 MPa 时荷载中心线处的拉应力最大值为 0.13 MPa,随着松散层模量的增加,层底的最大

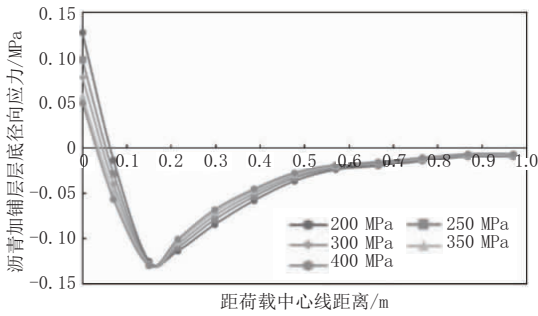


图3 沥青加铺层的层底径向应力分布图

拉应力值变小,松散层的模量值变化对半刚性基层的层底应力的变化影响较小。

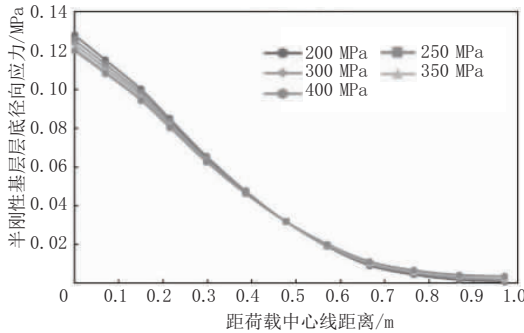


图4 半刚性基层的层底径向应力分布图

(3)路表弯沉

如图5所示,当松散层模量取200 MPa时,沥青加铺层表面的弯沉在双轮荷载的中心线处出现最大值0.046 mm。随着松散层模量的增加,路表弯沉值减小,松散层的模量值变化对弯沉值存在一定的影响,控制松散层的回弹模量可以有效控制路表弯沉值。

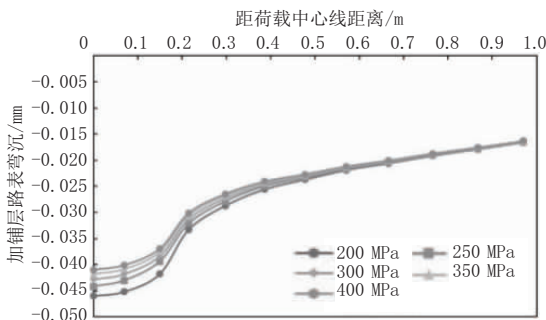


图5 沥青加铺层的路表弯沉分布图

2.2 不同嵌锁层模量下的路面力学响应

依次取嵌锁层模量为1 000、2 500、5 000、7 500、10 000 MPa,保持其他结构层厚度和模量参数不变,计算结果如下。

(1)沥青层层底径向应力

如图6所示,嵌锁层模量在1 000~10 000 MPa范围内变化时,沥青加铺层层底的拉应力变化范围仅有0.01 MPa,可见嵌锁层碎石模量对沥青加铺层应力的影响不显著,可不作为质量控制的主要考虑对象。

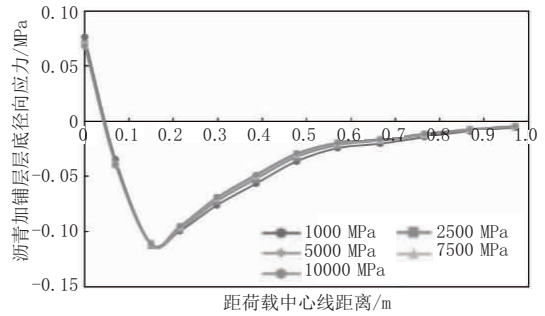


图6 沥青加铺层的层底径向应力分布图

(2)半刚性基层层底径向应力

如图7所示,当嵌锁层模量从1 000 MPa变化至10 000 MPa时,整个半刚性基层底层底均出现拉应力,荷载中心线处的拉应力最大值为0.115 MPa。嵌锁层的模量值变化对半刚性基层的层底应力的变化影响也不显著。

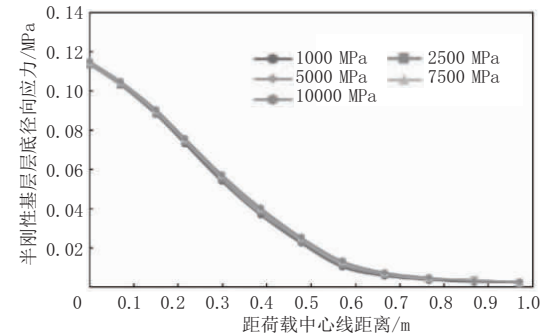


图7 半刚性基层的层底径向应力分布图

(3)路表弯沉

如图8所示,沥青加铺层路表弯沉值在双轮荷载的中心线处出现最大值0.045 mm。嵌锁层的回弹模量在2 500 MPa及以上时,弯沉值变化不大,当嵌锁层模量为1 000 MPa时,路面弯沉有显著的增加,可见共振破碎施工过程中不宜过度破碎嵌锁层,容易致使模量过低而影响加铺路面的弯沉值。

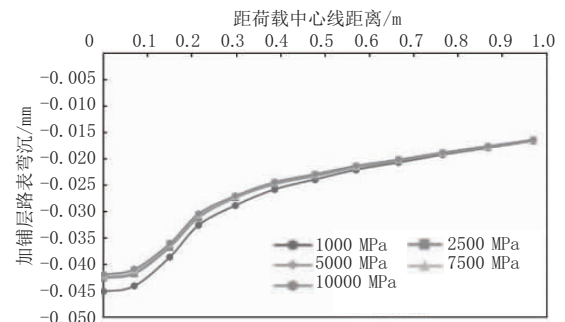


图8 沥青加铺层路表弯沉分布图

2.3 不同破碎层模量下的路面力学响应

为探究不同破碎层模量下的路面力学响应,本节依次取破碎层模量为700、1 050、1 400 MPa,厚度为25 cm,保持其他结构层厚度和模量参数不变进行计算,并对比了对应单层结构模量1 050 MPa的双层结

构(7 cm 松散层 275 MPa+18 cm 嵌锁层 7 500 MPa)下的力学参数响应。

(1) 沥青层层底径向应力

如图 9 所示,采用单层结构进行计算时模量取 700~1 400 MPa 沥青加铺层底面均出现了压应力,而采用双层结构计算时沥青加铺层底面出现拉应力约为 0.04 MPa。可见,单层结构计算的沥青层层底径向应力结果更小,但从设计的角度出发应当考虑结构最不利情况的状态,因此,采用双层结构设计来控制沥青层的层底径向应力会更加安全。

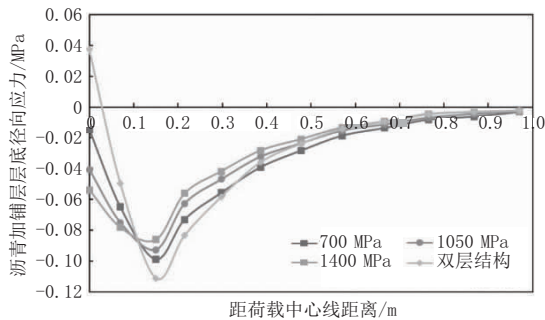


图 9 沥青加铺层层底径向应力分布图

(2) 半刚性基层层底径向应力

如图 10 所示,当破碎层模量由 700 MPa 变化至 1 400 MPa 时,半刚性基层层底均出现拉应力,随着破碎层模量的增加,层底的最大拉应力值变小。总体而言,破碎层模量变化对半刚性层的层底应力的影响不显著,双层结构的层底最大应力略高于 1 050 MPa 破碎层的层底最大应力。

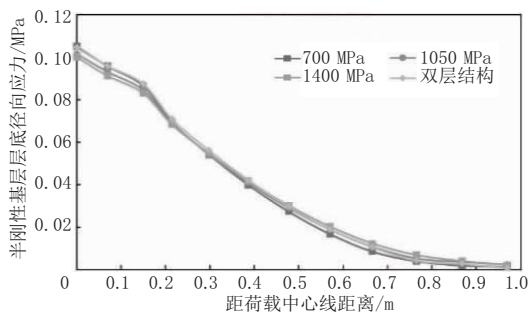


图 10 半刚性基层层底径向应力分布图

(3) 路表弯沉

如图 11 所示,随着破碎层模量的增加,路表弯沉值减小,破碎层的模量值变化对弯沉值存在显著的影响,控制破碎层总体的回弹模量可以有效控制路表弯沉值。双层结构的路表弯沉值略大于单层结构模量取 1 050 MPa 时的弯沉值。

对比破碎层单层结构与松散-嵌锁双层结构可知,两种划分方式计算所得的半刚性基层层底应力与路表弯沉值结果相近,双层结构的沥青层层底拉应

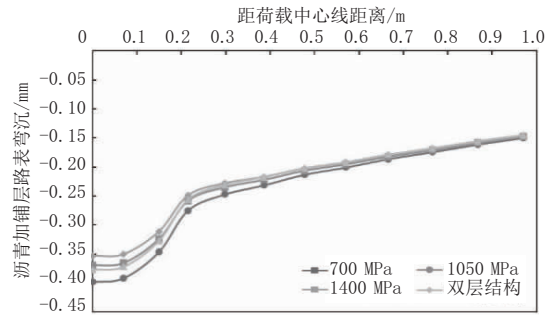


图 11 沥青加铺层路表弯沉分布图

力计算值远大于单层结构。按照双层结构模型进行设计,控制结构的力学指标会更加安全可靠。

3 各层厚度对路面力学响应的影响

3.1 不同嵌锁 / 松散层相对厚度下的路面力学响应

在实际施工中,共振破碎层的总厚度往往取决于旧水泥混凝土板的厚度,不易发生改变,调节共振破碎设备可以控制松散层与嵌锁层的相对厚度。为探究不同相对厚度下的路面力学响应,本文保持破碎层的总厚度 25 cm 不变,依次取松散层厚度为 4、7、10、13 cm,相应的嵌锁层厚度为 21、18、15、12 cm,保持其他结构层厚度和模量参数不变,计算结果如下。

(1) 沥青层层底径向应力

如图 12 所示,当松散层厚度为 4 cm 时,在双轮荷载中间区域内沥青层层底为压应力,而厚度大于 7 cm 则层底为拉应力。随着松散层厚度的增加,层底的最大拉应力值变大,松散层厚度为 10 cm 和 13 cm 时的最大拉应力值相近。松散层的厚度变化对于沥青加铺层层底应力的变化影响较显著,控制松散层厚度在 7 cm 及以下可以使沥青加铺层层底的应力值保持在较低的范围。

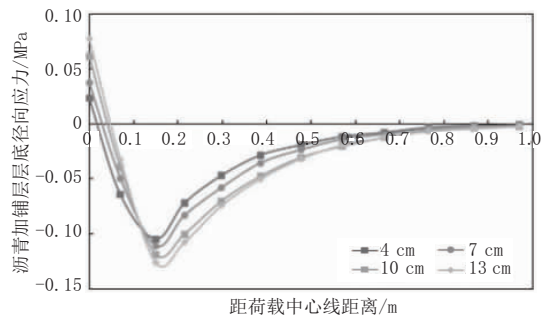


图 12 沥青加铺层层底径向应力分布图

(2) 半刚性基层层底径向应力

如图 13 所示,当松散层厚度从 4 cm 变化至 13 cm 时,整个半刚性基层层底均出现拉应力,荷载中心线处的拉应力最大值接近 0.12 MPa,随着松散层厚度的增加,层底的最大拉应力值变大,但总体而言松散层厚度的变化对半刚性基层层底应力的变

化影响较小。

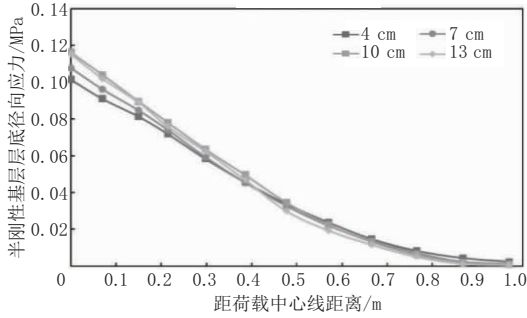


图 13 半刚性基层层底径向应力分布图

(3)路表弯沉

如图 14 所示,松散层厚度为 10 cm 与 13 cm 时,沥青加铺层表面的弯沉的最大值均为 0.042 mm。但当松散层厚度小于 10 cm 时,松散层的厚度越小对应的路表弯沉值越小。当松散层厚度占共振破碎层总厚度约 1/3 时,路表弯沉和层底应力值均处于相对良好的范围;当松散层厚度达到总厚度 1/2 左右时,加铺结构的路表弯沉与层底应力均会显著增加;当松散层厚度较薄(小于总厚度的 1/3),从弹性层状连续体理论计算的角度来看,加铺结构的承载能力将会更强更有利,但考虑到松散层还起到分散应力、消除反射裂缝、避免水损坏等作用,因此不宜将松散层设置的过薄。基于力学响应分析的结果,本文认为松散层占共振破碎层总厚度 1/3 左右为最佳的厚度。

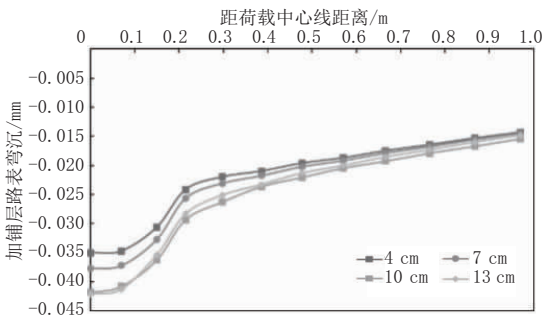


图 14 沥青加铺层路表弯沉分布图

3.2 不同破碎层厚度下的路面力学响应

为探究不同破碎层厚度下的路面力学响应,依次取破碎层总厚度为 20、25、30 cm,取破碎层模量为 1 050 MPa,保持其他结构层厚度和模量参数不变进行计算,并与 7 cm 松散层 +18 cm 嵌锁层的双层结构进行对比。

(1)沥青层层底径向应力

如图 15 所示,采用单层结构计算时沥青加铺层底面均会出现压应力,而采用双层结构计算时沥青加铺层底面出现拉应力,且破碎层总厚度的变化对于沥青层底的应力影响不显著。

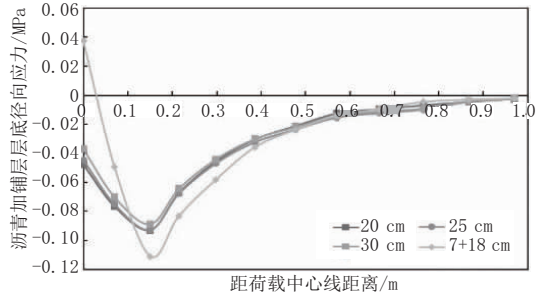


图 15 沥青加铺层层底径向应力分布图

(2)半刚性基层层底径向应力

如图 16 所示,破碎层厚度取 20 cm 和 30 cm 时,半刚性层的层底应力都较大,而厚度取 25 cm 时半刚性层的层底应力最小,可见控制破碎层的总厚度处于 25 cm 左右对于结构最有利。25 cm 的双层结构的层底最大应力略高于 25 cm 的破碎层单层结构。

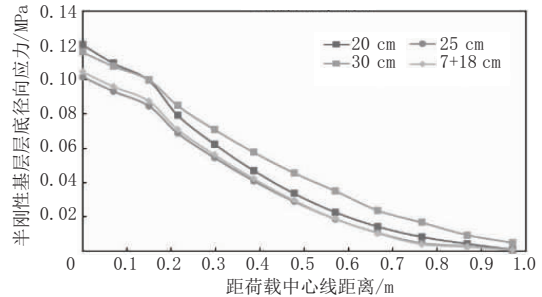


图 16 半刚性基层层底径向应力分布图

(3)路表弯沉

由图 17 可知,破碎层厚度取 25 cm 时路表弯沉值最小,而厚度取 30 cm 时路表弯沉显著增大,同样可以认为将破碎层的总厚度控制在 25 cm 左右对于结构最有利。25 cm 的双层结构的路表弯沉值略高于 25 cm 的破碎层单层结构。

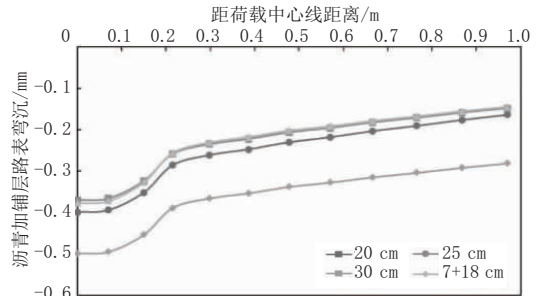


图 17 沥青加铺层路表弯沉分布图

4 结论

本文建立含共振破碎层(松散层 + 嵌锁层)的沥青加铺结构模型,探究了共振破碎层的模量和厚度对加铺结构的力学响应,得到结论如下:

(1)松散层回弹模量对轮载作用区域的路表弯沉和加铺层的层底应力影响较大。对旧路面进行共振破碎时,应当尽量控制上部松散层的模量在 300 MPa

以上,避免过度破碎而导致加铺层层底的拉应力过大。

(2)嵌锁层回弹模量对加铺层层底应力和半刚性基层的层底应力影响较小,设计时可不作为主要的考虑因素。值得注意的是,若嵌锁层模量过小,依旧会对路表弯沉造成不利影响,因此应尽量保持嵌锁层的模量在 2 500 MPa 以上,不宜过度破碎导致嵌锁层模量较低。

(3)松散 / 嵌锁层相对厚度的对路表弯沉和加铺层的层底应力影响较大。基于力学响应分析的结果,松散层占共振破碎层总厚度 1/3 左右时为最佳的厚度,此时的弯沉值和层底拉应力均处于较安全的范围。

(4)双层结构和单层结构的半刚性层层底应力与路表弯沉值结果近似,双层结构的结果略大于单层结构。但单层结构计算所得的沥青层层底应力为压应力,无需考虑其安全性。所以从设计的角度出发,采用划分为松散层 + 嵌锁层的双层结构进行加铺层设计会更加安全与可靠。

参考文献:

[1] 王旭娇.水泥路面改造阶段的共振碎石化技术分析[J].交通世界, 2023(36):103-105.
 [2] 王治滨.城市白改黑道路共振碎石化基层施工技术研究[J].工程机械与维修, 2022(6):258-260.

[3] 胡伟锋,李国梁,张蕾,等.旧水泥路面共振碎石化处理改造沥青路面施工技术探究[J].中国公路, 2022(11):172-175.
 [4] 陈超.城市道路平交口旧砼路面共振碎石化 BRA 改性沥青加铺技术应用研究[D].长沙:长沙理工大学, 2022.
 [5] 徐韧.共振碎石化技术在七莘路道路大修工程中的应用[J].上海公路, 2021(2):36-40,66.
 [6] 李吉祥,范晨光,李彦达.共振碎石机振动机理及参数研究 [J].公路交通科技, 2020,37(11):15-21.
 [7] American Concrete Pavement Association, Rubblizing of Concrete Pavements: A Discussion of its Use [Z].Technical Information, Concrete Pavement Engineering and Research, 1998.
 [8] Heckel L B. Rubblizing with Bituminous Concrete Overlay-10 Years' Experience in Illinois[J].concrete pavements, 2002 (137): 1-65.
 [9] Robot B,Wayne J. State-of-the-Practice: Rubblization of Heavy Load Concrete Airfield Pavements[J].Airfield Pavement, 2003:424-435.
 [10] Harrell M J, Gillen S L, Yaede J. Validation of Staged Construction Pavement Design with the Falling Weight Deflectometer[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2591(3):19-22.
 [11] 王荣.旧水泥混凝土路面碎石化施工工艺与设计参数研究[D].上海:同济大学, 2008.
 [12] 万伟.道路白加黑碎石化技术研究[D].武汉:华中科技大学, 2008.
 [13] 王静.水泥混凝土碎石化施工技术与适用结构层研究[D].西安:长安大学, 2012.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com