

沥青路面结构力学分析四款典型专业软件评析

蒋鑫^{1,2,3}, 冯文青^{1,2,3}, 吴朝阳^{1,2,3}, 邱延峻^{1,2,3}

(1.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2.西南交通大学 道路工程四川省重点实验室;
3.西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室)

摘要: 沥青路面结构力学分析多基于弹性层状体系理论或有限单元法、连续有限层法等数值计算方法,业内已涌现诸多专业软件。为进一步明确各款软件的特点,选取 BISAR、MICHPAVE、EverStressFE 和 3D—Move Analysis 共 4 款国外典型沥青路面结构力学分析专业软件,从原理算法、模型建立、计算求解和结果处理等具体实现层面全面开展横向比较,并针对某具体算例,进行了相关讨论。研究结果表明,4 款软件各有所长,在路表弯沉、沥青面层底径向应变、土基顶面垂直应变等方面具有一定的可比性。成果可为分析工具合理选用或计算软件成功开发奠定一定基础。

关键词: 沥青路面; 力学分析; 弹性层状体系; 有限元法; 连续有限层法; 专业软件

沥青路面是高等级公路、城市道路主流路面结构形式之一。运用力学经验法开展沥青路面设计时,必须要获得轮载作用下沥青路面结构某些重点位的应力、应变等关键力学响应,其本质是求取受附加荷载作用、呈水平层状分布体系的附加应力。从早年受垂直集中力的弹性半无限空间体 Boussinesq 解答出发,20 世纪中叶 Burmister 多层弹性力学解答诞生,沥青路

面结构力学分析进入了持续发展的时代。目前沥青路面结构力学分析的主要方法包括弹性层状体系理论、有限单元法(含轴对称有限元法、三维有限元法)、连续有限层法等,同时,为适应上述方法求解复杂、大型问题的需要,并克服大型通用软件过于庞杂、难于使用、针对性欠强等不足,沥青路面结构力学分析专业软件纷纷涌现。比较有代表性的专业软件包括基于弹性层

标准密度偏小,从而使得计算出的压实度偏大,超百现象严重。由于 Superpave 设计方法和马歇尔设计方法之间没有特定的相关性,特别是若多种集料的性状(例如颗粒形状)发生变化,马歇尔法不能及时甄别这种变化对混合料的影响,将对工程造成极大的质量隐患。因此,若采用 Superpave 法设计混合料,建议在质量控制中,也必须采用旋转压实仪进行质量检验。

4 结论

(1) 浸水马歇尔试验与冻融劈裂评价方法(AASHTO T283 和 AASHTO T0729)相关性均不好,相关系数分别为 0.3 和 0.6。

(2) 采用 AASHTO T283 冻融劈裂试验评价 Superpave 沥青混合料抗水损害性能,试验条件与路面

实际服役条件相近,建议劈裂强度比不小于 80%。

(3) 马歇尔压实度超百现象严重,无法真实反映沥青路面的压实状况,建议采用理论压实度评价压实效果。旋转压实仪和马歇尔击实仪成型的试件体积指标不相关,马歇尔击实仪取代旋转压实仪控制施工质量存在风险。

参考文献:

- [1] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [2] AASHTO T283—14 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture—Induced Damage[S].
- [3] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [4] DB32/T 2798—2015 高性能沥青路面施工技术规范[S].

收稿日期:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378440);四川省教育厅科研项目(编号:16ZB0013)

作者简介:蒋鑫,男,博士,副教授.E-mail:xjiang01@163.com

状体系理论研发的 BISAR, 基于轴对称有限元法研发的 MICHPAVE, 基于三维有限单元法研发的 EverStressFE, 基于三维连续体有限层法研发的 3D—Move Analysis 等。这些专业软件各有特色, 已在沥青路面结构力学分析中得到成功应用。其中 BISAR 系 Bitumen Business Group 研发, 1998 年推出基于 WINDOWS 操作系统的 3.0 版本, 文献[6]介绍了 DOS 版本 BISAR 2.0 程序结构组成、计算方法和数值计算, 该软件已被用于分析沥青路面结构层间结合状况、路面结构组合及重载超载荷载作用等。MICHPAVE V1.2、EverStressFE V1.0、3D—Move Analysis 分别系美国 Michigan State University、University of Maine 和 University of Nevada, Reno 开发, 目前在中国国内应用则尚鲜见, 文献[10]、[11]分别报道了 MICHPAVE、EverStressFE 软件在高寒地区典型沥青路面结构、受垂直非均布轮载柔性基层沥青路面结构中的应用; 3D—Move Analysis 则已被应用于考虑荷载非均匀分布、轮胎—路面接触形式和道路状况等对沥青路面结构力学响应的影响分析及路面性能预测研究等方面。

该文选取 BISAR、MICHPAVE、EverStressFE 和 3D—Move Analysis 共 4 款国外典型专业软件, 从原理算法、具体实现等方面开展横向比较, 并针对某具体算例, 进行相关讨论, 从而为分析工具合理选用或计算软件成功开发奠定一定基础。

1 4 款典型专业软件比较

BISAR 3.0、MICHPAVE V1.2、EverStressFE V1.0 和 3D—Move Analysis V2.1 分别基于弹性层状体系理论、轴对称有限元法、三维有限元法和三维连续有限层法而研发, 研发原理具体如图 1 所示。其中三维连续有限层法视各结构层为连续体, 假定表面荷载具有随时间不变的配置并以恒定的速度移动, 用离散 Fourier 级数展开法将表面荷载分解成二维谐波分量, 使用解析解来计算各结构层对每个谐波的响应, 通过叠加原理用每个谐波分量的响应来评估整体响应。因沥青路面各结构层水平分布, 通常仅需分析若干点位的力学响应, 故相对于有限元法, 该法勿需剖分网格, 同时在考虑移动轮载作用时计算效率更高。

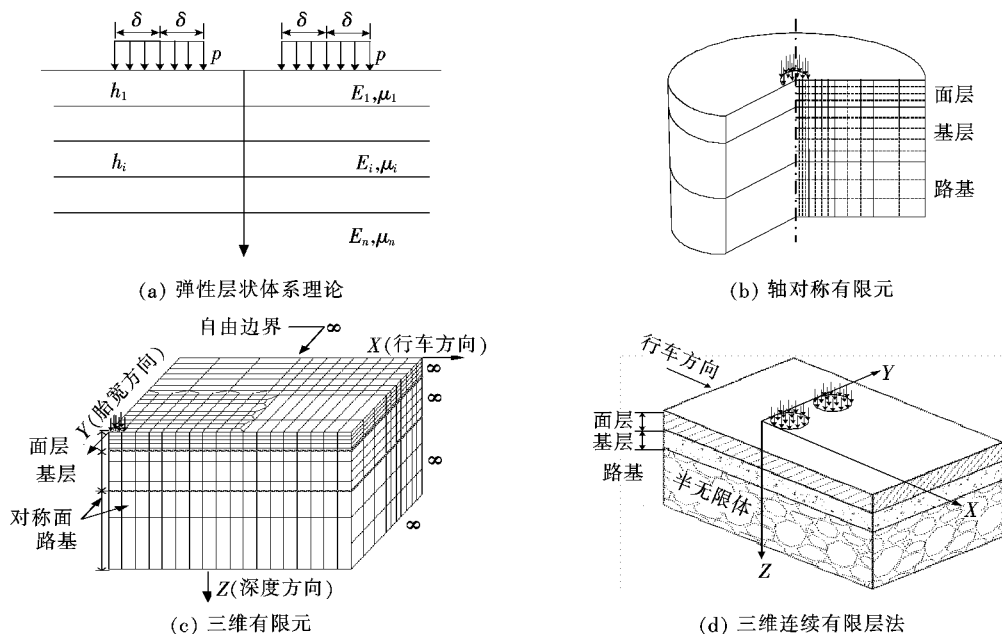


图 1 4 款软件研发原理示意

显然, 不同的研发原理将直接决定这 4 款软件的使用特点、适用场合等。下面将从模型的建立、求解和结果后处理等方面予以详细阐述, 其中模型的建立涉及荷载、结构层、计算点位等, 对于 MICHPAVE 和 EverStressFE, 因采用有限元法, 尚需确定计算范围、

单元类型、网格剖分、边界条件等。

1.1 模型建立

1.1.1 荷载

BISAR 软件既可考虑垂直力, 亦可考虑水平力 (水平力与路表倾角可自行指定), 轮胎—路面接触面

形状必须为圆形,最大轮载数量可达 10 个,以模拟多轴、多轮组。圆形分布轮载的大小、分布半径、接触应力等三者中只有两者独立,可通过轮载与荷载圆半径、接触应力与轮载、接触应力与荷载圆半径等 3 种模式予以输入,而具体作用位置(即轴距、轮距等)则通过设定圆心处的整体坐标而确定。该软件还专门设置了“Use Standard Dual Wheel”选项,如勾选该选项,软件将默认直接设置为 Shell 路面设计方法所使用的标准双轮荷载,即单圆荷载为 20 kN、接触圆半径为 10.5 cm,圆一圆的中心距为 31.5 cm。同时软件还可通过“Retrieve”选项,抽调之前已保存的模型数据中的轮载信息。显然,BISAR 软件无法直接指定轮轴构形,如是单轴双轮组还是双轴双轮组,轴距轮距如何等,需通过轮载个数、相对平面位置等实现。

MICHPAVE 软件基于轴对称有限元,故仅可考虑单圆荷载,无法考虑更复杂的轮轴组合,只需输入轮载、接触应力即可,软件将自行通过必要计算给出接触圆半径。因软件自动将轴对称圆柱坐标的原点设于圆形垂直均布轮载的圆心,故亦无需设定轮载的作用位置。同时该软件无法考虑水平力作用。

EverStressFE 软件可直接设定轮轴组合情况,包括轴数(单、双)、轮数(单、双)、轴距、轮距、单轮荷载大小、接触应力等。软件还可自行选择设定轮胎一路面接触面形状及尺寸,如是圆形满布、矩形满布、用户自定义(考虑面积折减的矩形分布),还可加载特定格式的轮载数据文件(后缀名为 .node)。该软件在轮载方面最大的特色是内嵌有胎面设计器(Tread Designer),可相当方便地设定胎面走向花纹的条数、各条走向花纹的宽度、在各走向花纹内分布力峰值及沿轮胎长度方向(行车方向)的分布形式(保持恒定、抛物线形还是半正弦波形等)。使用者甚至可自行先按一定格式编辑生成后缀为 node 的轮载数据文件,然后导入软件进行运算。

3D—Move Analysis 软件可通过 6 种方式定义荷载,分别是:9 种预定义的荷载工况、用户可选的预定义轮轴构形(均布压力)、用户可选的轮胎配置和接触应力、包括车辆动力学的半挂车、特殊的非公路车辆(End Dump Truck and Fork Lift)及用户输入轮胎配置和接触应力分布。该软件荷载方面的突出特色是:内嵌了多种轮载数据库,同时因基于连续有限层法,可充分考虑轮胎一路面接触面形状、接触应力非均布、各种轮轴组合及动态荷载系数等。

1.1.2 结构层

BISAR 最多可考虑 10 层,其中由上至下最后一层土基视为半无限空间体,毋需输入厚度,其他各层可单独指定厚度;各结构层均视为线弹性体,需输入弹性模量、泊松比。层间可设定为完全连续或者部分连续,如为部分连续,则需通过设定标准弹簧柔度或缩减弹簧柔度的具体数值描述层间部分连续状况。

MICHPAVE 最多可考虑 6 层,其中沥青面层只能看作线弹性体,粒状材料、黏性土可分别用 $K-\theta$ 模型、双线性模型描述其回弹模量的应力依赖性。直接视各结构层之间完全连续,不能考虑层间部分连续。最下一层为土基,其厚度推荐取 15~30 cm。

EverStressFE 软件最多可考虑 4 层,每层均视为线弹性体,需设定各层厚度、弹性模量和泊松比,其中最下一层土基的厚度宜通过一定的试算确定,以尽量避免边界条件的影响。在层间界面状况描述方面,该软件可在第 1 与第 2 层之间、第 2 与第 3 层之间设置为完全连续,或者部分连续,如是部分连续,软件将通过设定界面刚度(Interface Stiffness,单位: N/mm^3)反映层间结合状况。当为 4 层体系时,软件将默认第 3 层与第 4 层之间为完全连续。

3D—Move Analysis 最多可考虑 10 层,每层均视为线弹性体,各层需设定厚度、弹性模量、泊松比和材料重度(注:考虑移动荷载时方需输入重度),其中考虑移动荷载时沥青面层可视为率相关材料,即黏弹性材料。土基厚度设定数值为 0 时视为半无限空间体。直接视各结构层之间完全连续,不能考虑层间部分连续情况。

1.1.3 计算点位

BISAR 最多可指定 10 个计算点位,这些计算点位可通过输入整体坐标体系下的三维坐标而确定,针对恰好位于层间结合界面的点位,软件还需用户确定是上层底,还是下层顶;MICHPAVE 则需通过指定水平剖面 and 垂直剖面的方式实现计算点位的选择,至少需设定一个垂直剖面,即对称轴(荷载圆中心线)必须指定;强烈建议水平剖面选择在径向单元中心以及层间界面处,垂直剖面也选择在各单元中心,对于层间界面,结果后处理时会分别给出某深度处界面以上、以下的具体数值。EverStressFE 在前处理阶段则完全不需要指定计算点位,对于层间界面,该软件可在结果后处理时加以选择,确定究竟是上层底还是下层顶。3D—Move Analysis 需输入空间坐标指定位点,点位个数不限,还可以通过在垂直于行车方向某横剖面上划

分格栅点的方式确定欲计算的点位。对于处于层间界面的点位,上层底计算时直接输入层深,下层顶输入层深+0.001 m。

1.1.4 其他

MICHPAVE 基于轴对称有限元法,模型范围径向为荷载圆半径 a 的 10 倍,模型垂向最下一层土基厚度一般推荐取 15~30 cm。在网格剖分方面,MICHPAVE 均采用四节点矩形单元,其中径向 10 倍荷载圆半径范围内被划分为 4 个区域,在每个区域内,所有单元的水平尺寸相同,软件默认 $0\sim 1a$ 、 $1a\sim 3a$ 、 $3a\sim 6a$ 、 $6a\sim 10a$ 分别被等分为 4、4、3、2 个单元。垂向各结构层内所有单元的垂向尺寸相同,每层垂向依该层厚度确定垂向单元剖分数量,其中顶层(沥青面层)至少需剖分 4 个单元,其他各层至少需剖分 2 个单元,垂向最大单元总数不超过 24。边界条件方面,模型的左侧为对称轴,右侧 $10a$ 处设定为径向位移约束、垂向

自由;底侧软件引入了特别的柔性边界条件。

为减小计算机时、节约储存空间,EverStressFE 则需考虑 1/4 对称性,针对单轴单轮、单轴双轮、双轴单轮、双轴双轮,其计算模型如图 2 所示。模型水平方向、深度方向的范围需通过一定的试算确定。采用 20 节点六面体单元予以离散,如考虑了层间部分连续,软件将引入特殊的 16 节点界面单元(厚度为 1 mm)。在网格剖分方面,可选择简单网格或局部细化网格形式,如是简单网格,则针对平面,仅需确定轮胎宽度方向、行车方向的单元均分数量;如是局部细化方式,则先确定细化区域的位置、范围,然后在此区域内分别确定 X 、 Y 向单元均分数量,细划区域与粗划区域之间为渐变过渡区域。深度方向,依各结构层厚度分别确定等分单元的数量。模型边界方面,模型的左侧、前侧均为对称面,模型的后侧、右侧、底侧依模拟无限域还是有限域而确定,可实现有限元与无限元的耦合。

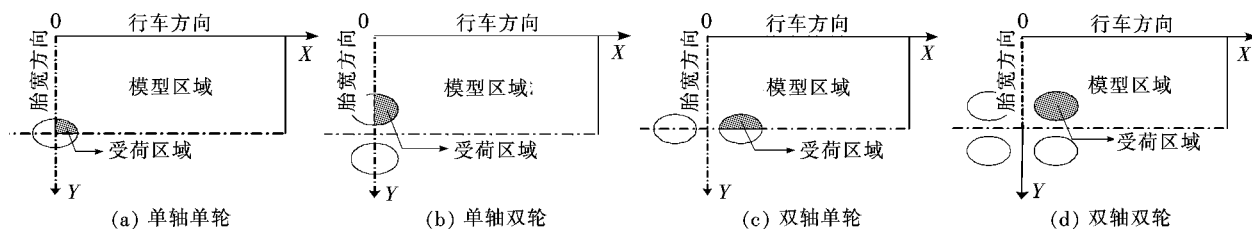


图2 EverStressFE 软件模型的 1/4 对称性(以圆形荷载为例)

另外,3D—Move Analysis 含有英制、国际单位制两种单位制,使用上优越于仅采用国际单位制的 BISAR 和 EverStressFE,以及仅采用英制单位的 MICHPAVE。MICHPAVE、3D—Move Analysis 可直接应用于路面性能预测,不过前者仅含疲劳和车辙深度预测模型,且仅局限于由沥青混凝土(AC)面层+基层+土基组成的 3 层体系或由沥青混凝土(AC)面层+基层+底基层+土基组成的 4 层体系;后者预测模型相对更为丰富,配有 NCHRP 1—37A 和 VESYS 两个路面性能预测模型,其中 NCHRP 1—37A 包含沥青混凝土面层 Top down 开裂、Bottom up 开裂、车辙,基层车辙、底基层车辙、土基车辙 6 种损伤模式,VESYS 包含疲劳开裂、结构层车辙、系统车辙、粗糙度 4 种破坏模式。

1.2 模型求解

BISAR 模型建立好后,保存数据,点击 F5 或者菜单 Results—Calculate,即可进行计算。

MICHPAVE 模型的求解由初始化、若干迭代(对于非线性材料)和形成结论等部分组成,达到非线性求解收敛所需的迭代次数由所分析路面断面的属性、轮

载大小确定,更弱的断面需要更多的迭代次数以达到收敛。允许的最大迭代次数为 25,计算过程中分析阶段和前阶段所需时间等信息将显示在屏幕上。

对于 EverStressFE,当模型建好后,保存数据,选择“Solve Current Model”,点击“Solve”,即可求解,屏幕上将快速动态显示求解过程;需要特别指出的是,通过选择“Work with Batch List”,软件可实现批量按序求解多个模型,这对于大规模平行运算大有裨益。

3D—Move Analysis 模型建立好后可直接点击“Run Analysis”,软件界面的右上侧进度条显示计算进程。计算结束后“Run Analysis”会变成“New Run/Modify Inputs”,即可查看相关计算结果。

1.3 结果输出

BISAR 将通过 Block Report、Detailed Report 等形式展现计算成果,其中 Block Report 方式中,一个系统的输入和输出都编辑在一页内,输出将给出每个计算点位的 3 个法向应力、3 个法向应变和 3 个法向位移。而 Detailed Report 将以一页一个计算点位更详尽的信息给出计算成果。

MICHPAVE 的计算结果将以文本文件的形式存

储于硬盘上,将给出最后的位移、应力和应变。包括:按照 1.1.3 节所确定的各水平剖面在径向各单元中心处,垂向剖面在垂向单元中心处、层间界面处的径向位移、垂向位移、径向应力、切向应力、垂向应力、剪切应力、径向应变、切向应变、垂向应变、剪切应变;给出技术信息,包括总的单元数、节点数、方程数、半带宽、达到平衡的迭代次数、沿着底部边界弹簧的弹性模量、弹簧的泊松比、收敛相对误差,每层等效回弹模量,有限元网格单元列表,各单元最后的回弹模量列表,因 Mohr-Coulomb 破坏和拉伸破坏的单元列表等;软件还将给出疲劳寿命和车辙深度数据等。

EverStressFE 的计算成果可以曲线图、等值线图 and 变形后网格图等展现,其中曲线图需指定平面点位的坐标,软件将给出对应该点位垂直向下的 3 个法向应变、3 个切向应变和 3 个位移分量沿深度的分布;等值线图将给出以上共 9 个力学响应在 Y-Y 剖面、Y-Z 剖面、X-Z 剖面上的分布;变形后网格图将依据一定的位移比例,给出变形后的网格图。软件还给出了在对称轴上一些特殊点位的相关力学响应,从而便于

运用这些力学响应开展性能预测。

3D-Move Analysis 的计算结果输出形式为文本和表格,计算移动荷载力学响应时还可给出时程曲线。其中文本结果的输入和结果输出分别存储于 Temp 和 OutputFiles 文件中,每个计算点位 3 个法向的位移、应力、应变结果分别对应有相应的输出文件。

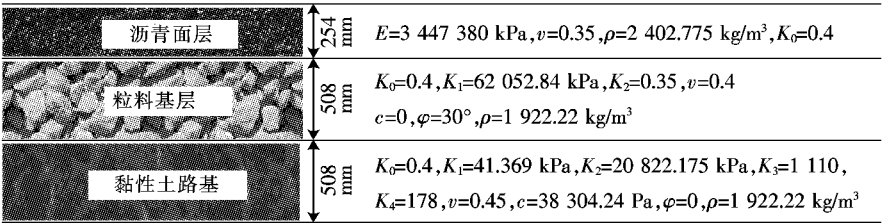
表 1 为以上 4 款软件在前处理、输出方式等方面的横向对比。

2 算例分析与讨论

文献[2]提供了一个运用 MICHPAVE 进行计算的算例,下面将以此为准对 4 款软件开展横向比较。该算例取单圆轮载 40.033 98 kN,接触应力 689.476 kPa,路面结构层共 3 层,由上至下依次为沥青面层、粒料基层和黏性土路基,其中沥青面层、粒料基层和黏性土路基分别视为线弹性模型、K-θ 模型和双线性模型。图 3 为该算例路面各结构层厚度及材料参数,各变量符号的具体物理含义详见文献[2]。

表 1 4 款软件的比较

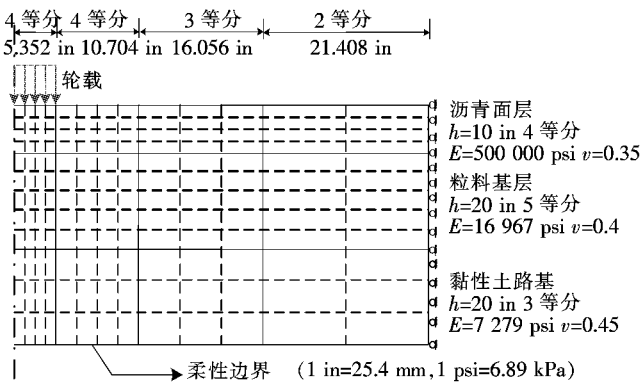
软件名称	前处理				输出方式	备注	
	荷载			结构层数			
	应力	接触面形式	轮载个数				
BISAR	垂向力 水平力	圆形	≤10	≤10	≤10 个点位,需输入点位坐标	文本	线弹性,可考虑层间结合状况
MICHPAVE	垂向力	圆形	单轮	≤6	径向和垂向剖面点	文本	可考虑粒料、黏性土的非线性
EverStressFE	垂向力	圆形 矩形 用户自定义	可单双轴、单双轮组或用用户自定义	≤4	无需指定计算点位	等色图和曲线	线弹性,可考虑荷载非均布、层间结合状况
3D—Move Analysis	垂向力 水平力	圆形 矩形 椭圆形 用户自定义	内嵌轮载数据库或用用户自定义	≤10	横剖面上划分格栅点或输入点位坐标	文本或时程曲线	可考虑荷载移动、非均布及沥青面层黏弹性,开展路面性能预测



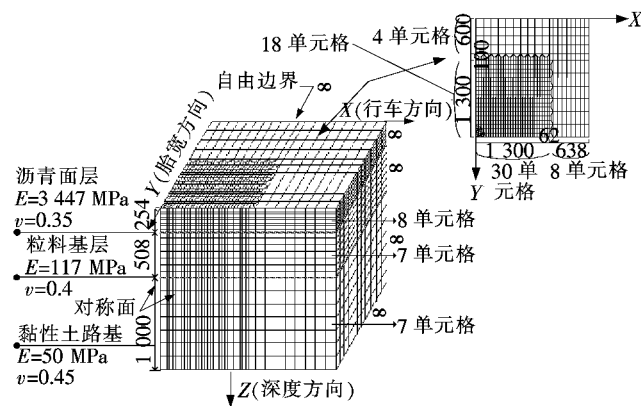
注: K_0 为静止土压力系数; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为材料回归系数; E 为弹性模量; ν 为泊松比; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; ρ 为密度。

图 3 路面各结构层厚度及材料参数

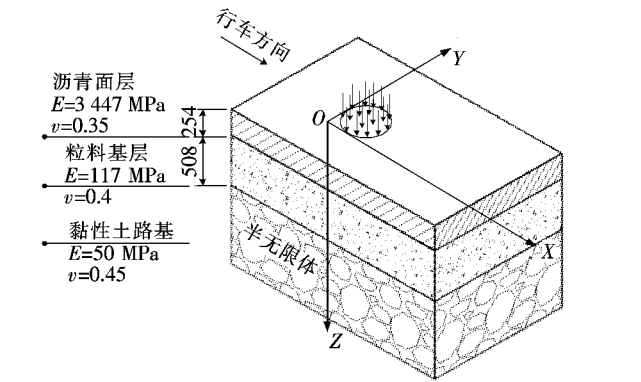
鉴于 3D-Move Analysis 的静态分析和 BISAR、EverStressFE 都只能将全部结构层视为线弹性体,为更好地开展横向平行比较,遵照文献[2]所描述的等效回弹模量的计算方法,先通过 MICHPAVE 非线性分析得到粒料基层和黏性土路基的等效回弹模量,分别为 117、50 MPa,然后将这些等效回弹模量作为弹性模量分别代入 4 款软件开展线弹性分析。MICHPAVE、EverStressFE、3D-Move Analysis 的分析模型见图 4。



(a) MICHPAVE



(b) EverStressFE

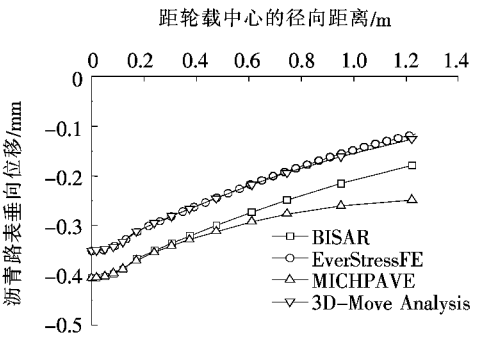


(c) 3D-Move Analysis

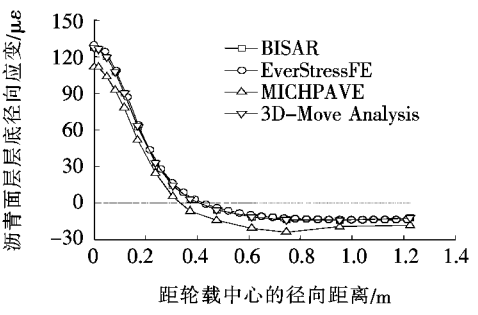
图 4 数值分析模型(尺寸单位:mm)

图 5(a)、(b)、(c)分别为采用 4 款软件计算得到

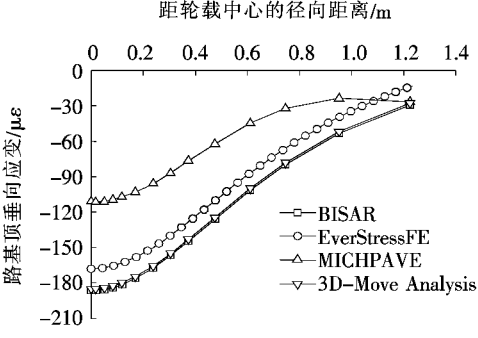
的沥青路表垂向位移、沥青面层底径向应变、土基顶面垂向应变比较结果。由图 5 可见:在轮载和路面结构相同的前提下,4 款软件计算结果的宏观规律相对较接近,路表垂直向下位移、路基顶面垂向应变均随距轮载中心距离的增大而减小,沥青面层底径向应变由拉应变调整为压应变。其中路表弯沉 BISAR、EverStressFE 和 3D-Move Analysis 的计算结果曲线近乎平行,EverStressFE 和 3D-Move Analysis 结果曲线几乎完全重合,径向距离小于 0.3 m 时 BISAR 和 MICHPAVE 结果相当接近,大于 0.3 m 后二者有所差异。沥青面层底径向应变的结果亦非常接近,MICHPAVE 所获结果小于其他 3 款软件计算结果,由拉应变调整为压应变的位置四者大致相同;随着距轮载中心的距离增大,除 MICHPAVE 之外,土基顶



(a) 沥青路表垂向位移



(b) 沥青面层底径向应变



(c) 路基顶面垂向应变

图 5 力学响应比较

面所表现的垂向压应变均呈非线性减小,BISAR 和 3D—Move Analysis 结果曲线非常接近。

当然,4 款软件具体结果有所差异,除了受单位制换算所致误差外,尚受到以下因素影响:BISARA、3D—Move Analysis 这两款软件受使用者主观影响较小,其计算结果主要受制于软件自身;而针对 MICHPAVE、EverStressFE 这两款有限元软件,除了受软件自身影响之外,尚受使用者主观影响较大,如:MICHPAVE 软件自身虽已约定径向范围只能考虑 10 倍荷载圆半径,底侧、右侧、左侧分别为柔性边界、径向位移约束、对称轴,模型采用四节点矩形单元予以离散,但模型垂向最下一层土基厚度、径向与垂向各区域的单元剖分一定程度上受到使用者影响,宜在软件允许的前提下,尽量将土基厚度取为最深(30 cm),且按照最密集、单元总数达到上限的标准剖分网格;EverStressFE 软件自身已约定采用 20 节点六面体单元离散,模型左侧、前侧均为对称面,但模型的具体三维几何尺寸,其右侧、后侧、底侧的边界条件,单元疏密分布等可由使用者相对灵活地设定,宜适当加大模型范围、加密网格,科学设定右侧、后侧、底侧的边界条件,以获得更高的计算精度。

总之,4 款软件计算所获力学响应分布趋势总体相同、具体数值比较接近,在开展沥青路面结构力学分析时,这几款典型软件无疑都是非常优秀、可供选择的计算工具。

3 结论与建议

4 款软件理论基础不同,各有特色,在实际应用中可参考表 1,分别从以下几点考虑:

(1) 从路面结构层角度出发:如路面结构层层数较多,应考虑 3D—Move Analysis、BISAR 或者 MICHPAVE;如需考虑粒料、黏性土的非线性,则只能选择 MICHPAVE;如需考虑层间非完全连续,则应选择 BISAR、EverStressFE。

(2) 从轮载角度出发:如需考虑多个轮载,则应选择 BISAR、EverStressFE、3D—Move Analysis;如需考虑水平力,则只能选用 BISAR;如需考虑垂向轮载分布的非均匀性、接触面形状非圆形,则 EverStressFE 和 3D—Move Analysis 是很好的选择,如考虑移动轮载,则 3D—Move Analysis 是唯一的选择。

(3) 从后处理角度出发:EverStressFE 的后处理多以曲线、等色图等体现,其直观性要适当优越于另外 3 个软件,BISAR、3D—Move Analysis 和 MICHPAVE 软件以文本形式输出的结果方便用于第三方软件对结果进行可视化处理。

(4) 算例表明,4 款软件在开展沥青路面结构线弹性分析时计算结果相对接近,MICHPAVE、EverStressFE 基于有限单元法研发,计算模型范围、单元剖分、边界条件等对计算结果的精度影响较大,使用时需谨慎确定。

参考文献:

- [1] Bitumen Business Group. BISAR 3.0 User Manual [M]. Bitumen Business Group, 1998.
- [2] Harichandran, R. S., Baladi, G. Y. Michpave User's Manual [M]. East Lansing: Michigan State University, 2000.
- [3] William, G. D. EverStressFE1.0 Software for 3D Finite—Element Analysis of Flexible Pavement Structures [Z]. Orono: The University of Maine, 2009.
- [4] Nitharsan, R. Development of Windows—Based Version of the 3D—Move Analysis Software for Pavement Response Analysis [D]. Reno: University of Nevada, 2011.
- [5] Zafir, Z., Siddharthan, R., Sebaaly, P. E. Dynamic Pavement Strains from Moving Traffic Loads [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1994, 120 (5): 821—842.
- [6] 王凯. 层状弹性体系的力学分析与计算 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2016.
- [7] 黄优, 刘朝晖, 李盛, 等. 不同层间结合状态下刚柔复合式路面的剪应力分析 [J]. 公路交通科技, 2015 (6).
- [8] 吴玉, 蒋鑫, 梁雪娇, 等. 轮载作用下典型沥青路面结构力学行为分析 [J]. 西南交通大学学报, 2017 (3).
- [9] 邹静蓉, 张治强, 李涛. 普通干线公路半刚性基层沥青路面破坏机理及控制措施 [J]. 公路交通科技, 2018 (5).
- [10] 梁雪娇. 轮载作用下高寒地区沥青路面结构力学响应及损伤分析 [D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2017.
- [11] 曾诚. 非均布垂直轮载作用下柔性基层沥青路面结构力学行为研究 [D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2015.
- [12] 黄志义, 陈雅雯, 颜可珍. 非均布移动荷载作用下黏弹性沥青路面动力响应分析 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017 (3).
- [13] 颜可珍, 赵晓文, 石挺巍, 等. 荷载接触形式对路面结构力学指标的影响分析 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017 (4).