

移动荷载下桥面防水黏结层剪应力有限元分析

孙建邦, 陈辉强*, 方源仁, 刘大路, 何青蓬

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

摘要: 为了突破传统静荷载作用下不同因素对桥面铺装防水黏结层剪应力影响的局限性, 采用 Abaqus 有限元分析软件, 建立移动荷载作用下桥面防水黏结层的三维仿真模型, 并通过 Utracload 和 Dload 子程序施加移动荷载, 模拟车辆实际行驶过程。分析在移动荷载作用下超载、沥青层模量、沥青层厚度、防水层厚度、车速、水平力系数及层间摩擦系数等因素对分析点(A点)最大剪应力的影响。结果表明: 移动荷载作用下, 防水黏结层最大剪应力出现在车轮正下方, 且剪应力在分析点附近一定范围内近似呈半正弦分布; 防水黏结层最大剪应力与超载、水平力系数及层间摩擦系数等因素呈正相关, 与沥青层厚度及车速等因素呈负相关, 受沥青层模量、防水黏结层厚度等因素变化影响较小。

关键词: 道路工程; 桥面铺装; 防水黏结层; 移动荷载; 有限元分析

近年来, 桥面铺装在中国得到了长足的发展和运用, 防水黏结层作为铺装层与桥面板之间的重要组成部分, 发挥着至关重要的作用。大量研究表明: 防水黏结层的破坏会导致桥面铺装层脱落, 造成桥面铺装结构的破坏, 进而影响桥梁的主体结构。黄晓明等研究发现, 桥面铺装层结构发生的损坏形式主要有推移、车辙和开裂, 防水黏结层的剪切破坏是桥面铺装破坏的根本原因。

随着有限元软件在沥青路面分析中的应用, 大量学者运用有限元软件模拟了沥青路面在静荷载和移动荷载作用下的力学响应过程。郑仲浪通过 Abaqus 有限元软件分析了重载作用下沥青路面层间力学行为, 发现了路面各位置剪应力的分布规律; 姚波等运用有限元软件分析得出剪应力是引起铺装层破坏的主要原因; 单景松通过有限元模拟, 认为车速和水平力系数对路面表层剪应力影响显著。遗憾的是, 对于桥面铺装防水黏结层的有限元分析研究较少, 虽有相关学者运用有限元软件模拟了静荷载对防水层剪应力的影响, 但车辆实际行驶中, 路面将受到垂直力和水平力的共同作用, 若仍用静荷载代替移动荷载存在一定局限性。因此, 该文以桥面防水黏结层为研究对象, 分析在移动荷载作用下超载、沥青层模量、沥青层厚度、防水层厚度、车速、水平力系数及层间摩擦系数等因素对防水黏结层剪应力的影响。

1 弹性系统三维有限元理论

弹性系统动力问题的有限元基本方程为:

$$[K]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [M]\{\ddot{\delta}\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ 分别为系统的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵; $\{\delta\}$ 、 $\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\delta}$ 分别为位移向量、速度和加速度; $\{F(t)\}$ 为动荷载。

(1) 质量矩阵

$$[M] = \int [N]^T \rho [N] dV \quad (2)$$

式中: ρ 为质量密度; N 为形函数矩阵; V 为单元域。

(2) 阻尼矩阵

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3)$$

式中: α 为质量矩阵系数; β 为刚度矩阵系数。

2 移动均布荷载的施加

2.1 分析模型建立

汽车在桥面上行驶时, 车轮作用点路面力学状况复杂, 受竖向力和水平力的共同作用。在进行有限元分析时, 为了便于分析, 假设汽车正常行驶时车轮荷载为垂直均布矩形荷载, 制动时为垂直和水平的均布矩形荷载。为了确保计算模型的准确, 采用尺寸为 10 m

收稿日期: 2018-04-10

作者简介: 孙建邦, 男, 硕士研究生, E-mail: sunjiangbang713@163.com

* 通信作者: 陈辉强, 男, 硕士, 副研究员, E-mail: chqlxj@126.com

×5m×1m(长×宽×高)的模型进行分析计算。

2.2 Utracload 和 Dload 子程序

Abaqus 除了提供标准的有限元分析程序之外,还提供了具有良好开放性的二次开发平台,借助该平台所提供的用户子程序接口,来定义生成非标准的分析程序来满足用户对 Abaqus 本身所没有包括的实际特定问题的分析要求,用户可以通过子程序以代码的形式来扩展主程序的功能,可以实现定义材料特性、接触条件、荷载条件、边界条件以及与其他第三方应用软件进行数值交换等功能。该文所使用的 Utracload 和 Dload 子程序,便是为了实现移动荷载的施加,限于篇幅,子程序代码省略。

2.3 有限元分析过程

选取纵向轮迹带中点为受力分析点(图 1 中 A 点),荷载从 B 点经 A 点移动到 C 点,如图 1 所示,分析在荷载移动过程中 A 点防水黏结层最大剪应力的力学响应。移动荷载大小为 100 kN,荷载作用时间为 0.1 s,荷载移动速度为 30 m/s(即 108 km/h)。

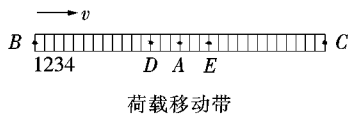


图 1 轮迹带

2.4 分析参数

采用 Abaqus 有限元进行移动荷载下桥面结构应力响应分析时,各层材料参数如表 1 所示。

表 1 各层材料计算参数

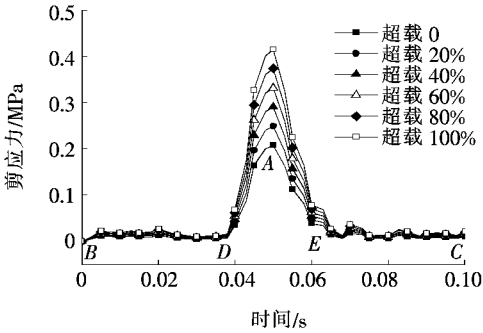
结构层	厚度/ cm	模量/ MPa	泊松比	阻尼矩阵 系数 α	阻尼矩阵 系数 β
沥青层	10	1 000	0.30	0.4	0.005
防水黏结层	0.05	200	0.30	0.4	0.005
桥面板	100	30 000	0.15	0.4	0.005

3 有限元分析结果与讨论

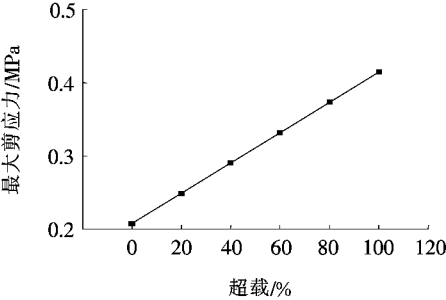
3.1 移动荷载下超载对防水层剪应力的影响

超载是车辆实际运行中时有发生的情况,超载对防水黏结层的破坏主要表现为剪切破坏。为了研究超载对防水层剪应力的影响,模拟路面在超载 0%、20%、40%、60%、80%和 100%情况下 A 点防水层剪

应力随荷载作用时间的变化规律。分析过程中除超载条件不同外,其余参数分别为:沥青层厚度 10 cm,沥青层模量 1 000 MPa,防水层厚度 0.05 cm,车速 30 m/s,水平力系数 0。不同超载条件下荷载从 B 点行驶到 C 点过程中 A 点剪应力分布如图 2 所示。



(a) 剪应力-时间



(b) 最大剪应力-超载

图 2 不同超载下剪应力随时间的变化规律

从图 2(a)中可以看出:各超载条件下 A 点剪应力随时间变化趋势相同。当荷载从 B 点行驶到 D 点(0.04 s)和 E 点(0.06 s)行驶到 C 点时,A 点剪应力接近于 0,说明荷载在该范围内行驶时对 A 点剪应力无影响;当荷载从 D 点经 A 点到 E 点行驶过程中,A 点剪应力从 0 增加到 τ_{\max} ,然后又下降到 0,呈近似半正弦分布,当荷载作用到 A 点时,A 点剪应力取得最大值 τ_{\max} 。说明在车辆实际运行中,防水层最大剪应力出现在车轮正下方。

A 点剪应力在影响范围内随着超载幅度的增大而增大。从图 2(b)中可以看出:分析点 A 点最大剪应力与超载呈线性增加关系,超载每增加 20%,最大剪应力增加 20%,当超载 100%时,最大剪应力约为超载 0%时的 2 倍,表明超载对防水层的剪切破坏影响显著。

3.2 移动荷载下沥青层模量对防水层剪应力的影响

沥青层模量影响着路面结构内力响应的传递,移动荷载通过路面将应力传递于防水黏结层,影响着防水黏结层的受力情况。为了研究沥青层模量对防水层

剪应力的影响,模拟路面在沥青层模量 800、1 000、1 200 和 1 400 MPa 下 A 点防水层剪应力随荷载作用时间的变化规律。除模量条件不同外,其余分析参数为:沥青层厚度 10 cm,防水层厚度 0.05 cm,超载 0%,车速 30 m/s,水平力系数 0。不同沥青层模量下荷载从 B 点行驶到 C 点过程中 A 点剪应力分布如图 3 所示。

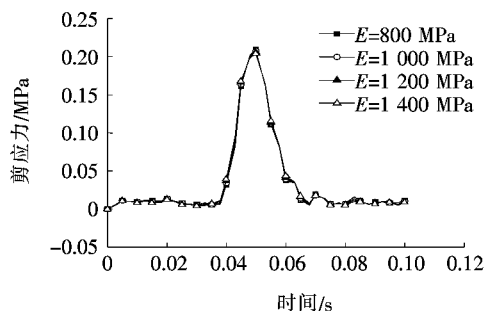


图 3 不同模量下剪应力随时间的变化规律

从图 3 可以看出:不同沥青层模量下 A 点防水层剪应力随移动荷载作用变化趋势与超载作用下剪应力随时间变化趋势相同,且同样在 A 点取得最大值。此外,不同沥青层模量在同一时刻(0.04~0.06 s)所对应的剪应力变化不大,剪应力—时间曲线基本重合,这表明沥青层模量为 800~1 400 MPa 时对防水层剪应力几乎没有影响。

3.3 移动荷载下沥青层厚度对防水层剪应力的影响

弗吉尼亚理工学院和州立大学王林萍通过有限元软件 Ansys 研究了桥面铺装层的静态和动态应力,仿真结果表明:上面层路面的厚度为 3.5~4.5 cm,下层为 5~7 cm。为了研究沥青厚度对防水层剪应力的影响,分别选取 6、10、14 和 18 cm 的沥青层厚度作为研究对象,分析 A 点防水层剪应力随荷载移动的变化规律。除沥青层厚度不同外,其余参数为:沥青层模量 1 000 MPa,防水层厚度 0.05 cm,超载 0%,车速 30 m/s,水平力系数 0。分析结果如图 4 和表 2 所示。

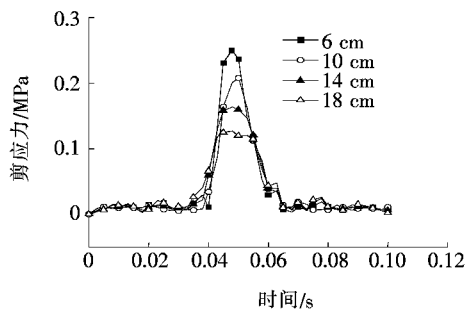


图 4 不同沥青层厚度下剪应力随时间的变化规律

表 2 不同沥青层厚度下 A 点最大剪应力

沥青层厚度/cm	最大剪应力/MPa	沥青层厚度/cm	最大剪应力/MPa
6	0.25	14	0.16
10	0.20	18	0.13

从图 4 可以看出:① 当荷载移动到 A 点时防水层剪应力最大,在 0.04~0.06 s 范围内剪应力呈近似半正弦分布;② 不同于超载的是,在 0.04~0.06 s 范围边缘,不同沥青层厚度下 A 点防水层剪应力变化趋势并不明显,原因有待进一步探究。

A 点防水层剪应力随着沥青层厚度增大而减小。从表 2 可以看出:沥青层厚度每增加 4 cm,最大剪应力与初始沥青厚度 6 cm 相比,分别减小 20%、36%、48%,同时考虑桥面铺装的安全原则和经济原则,拟取沥青铺装层厚度为 10~14 cm。

3.4 移动荷载下防水层厚度对防水层剪应力的影响

除外在因素的影响,防水层本身具有一定的抗剪强度。为了研究防水层厚度对防水层剪应力的影响,模拟路面在防水层厚度 0.5、1、1.5 和 2 mm 情况下 A 点防水层剪应力随荷载作用时间的变化规律。除防水层厚度条件不同外,其余分析参数为:沥青层厚度 10 cm,沥青层模量 1 000 MPa,超载 0%,车速 30 m/s,水平力系数 0。不同防水层厚度下荷载从 B 点行驶到 C 点过程中 A 点剪应力分布如图 5 所示。

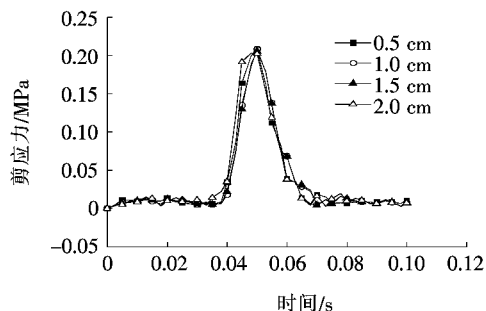


图 5 不同防水层厚度下剪应力随时间的变化规律

从图 5 可以看出:不同防水层厚度下 A 点防水层剪应力随移动荷载作用时间的变化趋势与超载作用下剪应力随时间的变化趋势相同,且同样在 A 点取得最大值。不同防水层厚度在同一时刻(0.04~0.06 s)所对应的剪应力变化不大,剪应力—时间曲线基本重合,这表明防水层厚度 0.5~2 mm 对防水黏结层剪应力几乎没有影响。

3.5 移动荷载下车速对防水层剪应力的影响

车辆实际运行中,车速变化频繁,相关研究表明:

车速变化对路面结构的应力响应具有一定影响。为了研究车速对防水层剪应力的影响,模拟路面在车速 10、20 和 30 m/s 情况下防水层剪应力随荷载作用时间的变化规律。分析过程中除车速条件不同外,其余分析参数为:沥青层厚度 10 cm,沥青层模量 1 000 MPa,防水层厚度 0.05 cm,超载 0%,水平力系数 0。此外,当车速为 10、20 m/s 时,因荷载作用时间相同(0.1 s),故此时荷载作用位移分别为 1、2 m。分析结果如图 6 所示。车速取 10、20、30 m/s 时 A 点最大剪应力分别为 0.3、0.23、0.21 MPa。

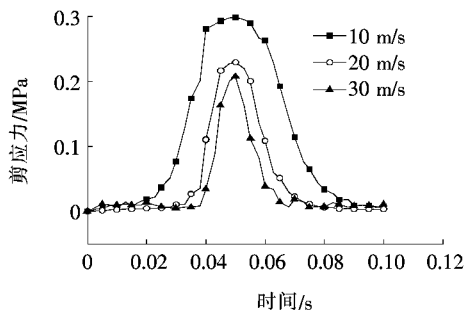


图 6 不同车速下剪应力随时间的变化规律

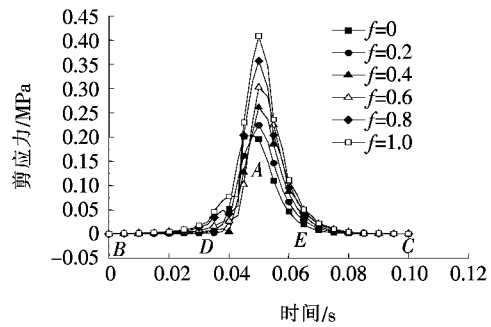
由图 6 可见:3 条曲线除变化周期不同外,A 点防水层剪应力变化趋势与超载作用下剪应力随时间的变化趋势相同,且同样在 A 点取得最大值,说明在车辆实际运行中,防水层最大剪应力出现在车轮正下方。

A 点防水层剪应力随着车速增大迅速减小。初始速度为 10 m/s 时,速度每增加 10 m/s,最大剪应力相比初始速度 10 m/s 分别减小 23.3%、30%,同时考虑车速对防水层的剪切破坏及行车安全,建议车辆实际运行中过桥速度控制在 80~100 km/h。

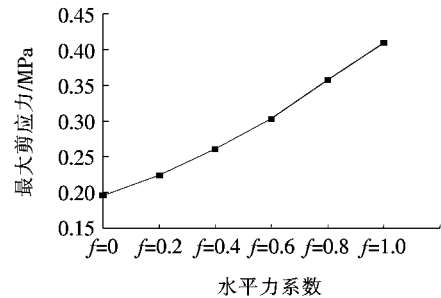
3.6 移动荷载下水平力系数对防水层剪应力的影响

王保实等研究表明:在移动荷载作用下,制动刹车将产生较大的水平荷载。水平力系数表征了制动刹车的剧烈程度,水平力系数越大,表示车辆刹车状态越剧烈。为了研究水平力系数对防水层剪应力的影响,模拟路面在水平力系数 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 情况下 A 点防水层剪应力随荷载作用时间的变化规律。分析过程中除水平力系数不同外,其余分析参数为:沥青层厚度 10 cm,沥青层模量 1 000 MPa,防水黏结层厚度 0.05 cm,超载 0%,车速 30 m/s。分析结果见图 7。

由图 7(a)可见:① 当荷载移动到 A 点时防水层剪应力最大,仍然在 0.04~0.06 s 范围内剪应力呈近似半正弦分布,说明在车辆实际运行中,防水层最大剪应力出现在车轮正下方;② 随着水平力系数增大,A



(a) 剪应力-时间



(b) 最大剪应力-水平力系数

图 7 不同水平力系数下剪应力随时间的变化规律

点防水层剪应力逐渐增大。由图 8(b)可以看出:水平力系数 0.4 和 1.0 时,最大剪应力增加为原来的 1.3 倍和 2.1 倍,表明车辆实际运行中,防水层最大剪应力受制动刹车和紧急制动刹车影响显著。

3.7 移动荷载下层间摩擦系数对防水层剪应力的影响

层间接触状态指的是沥青铺装层和桥面板之间的结合状态,它取决于防水层材料和桥面板之间的界面处理方式,研究过程中假设沥青层和桥面板之间的摩擦系数 μ 在 0~1 之间。为了研究不同层间摩擦系数对防水层剪应力的影响,模拟路面在摩擦系数 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 情况下 A 点防水层剪应力随荷载作用时间的变化规律。分析过程中除超载条件不同外,其余参数分别为:沥青层厚度 10 cm,沥青层模量 1 000 MPa,防水层厚度 0.05 cm,超载 0%,车速 30 m/s,水平力系数 1.0。分析结果如图 8 和表 3 所示。

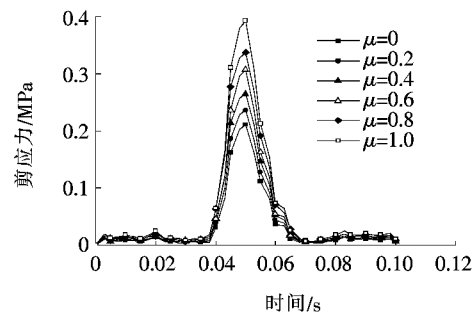


图 8 不同摩擦系数下剪应力随时间的变化规律(A 点)

表 3 不同摩擦系数下 A 点最大剪应力

摩擦系数 μ	最大剪应力/ MPa	摩擦系数 μ	最大剪应力/ MPa
0	0.21	0.6	0.31
0.2	0.24	0.8	0.34
0.4	0.27	1.0	0.39

由图 8 可以看出:不同层间接触状态下,防水层最大剪应力仍然出现在车轮正下方,且荷载移动过程中,A 点最大剪应力仍然呈现出半正弦波的变化趋势;由表 3 可以看出:A 点防水层最大剪应力随着摩擦系数的增大而增大,表明层间接触状态越好,防水层受到的最大剪应力越大, $\mu=1$ 时的最大剪应力约为 $\mu=0$ 时的 1.86 倍,表明层间接触状态对防水层最大剪应力影响显著。

4 结论

(1) 防水黏结层最大剪应力与超载、水平力系数及层间摩擦系数等因素呈正相关。超载每增加 20%,最大剪应力增加 20%,当超载 100%时,最大剪应力约为未超载时的 2 倍,表明超载对防水层的剪切破坏影响显著;水平力系数 0.4 和 1.0 时,最大剪应力增加为原来的 1.3 倍和 2.1 倍,表明车辆实际运行中,防水层最大剪应力受制动刹车和紧急制动刹车影响显著;摩擦系数 $\mu=1$ 时的最大剪应力约为 $\mu=0$ 时的 1.86 倍,表明层间接触状态对防水层最大剪应力影响显著。

(2) 防水黏结层最大剪应力与沥青层厚度及车速等因素呈负相关。沥青层厚度每增加 4 cm,最大剪应力与初始沥青厚度 6 cm 相比,分别减小 20%、36%、48%,同时考虑桥面铺装的安全原则和经济原则,拟取沥青铺装层厚度为 10~14 cm;速度每增加 10 m/s,最大剪应力与初始速度 10 m/s 相比,分别减小 23.3%、30%,同时考虑车速对防水层的剪切破坏及行车安全,建议车辆实际运行中过桥速度控制在 80~100 km/h。

(3) 沥青层模量 800~1 400 MPa 和防水层厚度 0.5~2 mm 对防水黏结层的剪切破坏几乎没有影响。

(4) 荷载在 0~0.04 s 和 0.06~0.1 s 范围内行驶时对 A 点剪应力无影响,在 0.04~0.06 s 范围内行驶

时,A 点剪应力从 0 增加到 τ_{\max} ,然后又下降到 0,呈近似半正弦分布,当荷载作用到 A 点时,A 点剪应力取得最大值 τ_{\max} 。说明在车辆实际运行中,防水层最大剪应力出现在车轮正下方。

参考文献:

- [1] 张争奇,陶晶,张思桐.桥面铺装环氧沥青防水粘结层性能试验与评价[J].长安大学学报:自然科学版,2011(4).
- [2] 李爱芳.新型水性环氧防水粘结层在贵州山区水泥混凝土桥面铺装中的应用研究[D].东南大学硕士学位论文,2016.
- [3] 黄晓明.水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J].交通运输工程学报,2014(1).
- [4] 郑仲浪.重载车辆作用下沥青路面层间力学行为研究[D].长安大学博士学位论文,2010.
- [5] 单景松,黄晓明,廖公云.移动荷载下路面结构应力响应分析[J].公路交通科技,2007(1).
- [6] Yao B, Qian Z D. Analysis of Dynamic Response of Deck Pavements for Long-Span Steel Box Girder Bridge[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2007, 3(1):25-28.
- [7] 廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].南京:东南大学出版社,2008.
- [8] Rosas S E, Mensah K, Weinstein R B, et al. Numerical Analysis of Fracture Process in Pavement Slabs[J].Canadian Journal of Civil Engineering, 2012, 39(5): 506-514.
- [9] 程焰兵.移动荷载下 CRC+AC 复合式路面结构的动力响应研究[D].湖南大学硕士学位论文,2015.
- [10] 李仕华,王修山.动载作用下半刚性沥青路面力学响应分析[J].中外公路,2016(5).
- [11] Wang L, Hou Y, Zhang L, et al. A Combined Static and Dynamics Mechanics Analysis on the Bridge Deck Pavement[J].Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 209-220.
- [12] 王保实.移动荷载作用下半刚性基层沥青路面结构的动力响应研究[D].西安建筑科技大学硕士学位论文,2011.
- [13] 赵艳玲,李庆杰,刘永超.层间结合条件对半刚性基层沥青路面路用性能的影响研究[J].中外公路,2017(5).
- [14] 黄刚,李妍,汪涛.一种橡塑高黏沥青的研发[J].中外公路,2018(1).