

# 移动荷载作用下 CRC+AC 复合式路面 三维有限元分析

程焰兵

(湖南中大设计院有限公司,湖南 长沙 410075)

**摘要:**应用 Abaqus 构建 CRC+AC 三维动载模型,通过改变 AC 层厚、底基层模量、土基层模量、车速等变量,以路表弯沉、路面结构应力、钢筋应力为主要评价指标,揭示 CRC+AC 复合式路面的动力响应特性。计算结果显示:当基层、土基层等变量已确定时,CRC+AC 复合式路面结构存在相应最佳 AC 层厚度;提高土基模量和施工质量可以较经济实用地提高 CRC+AC 的受力性能和使用寿命;当选用较大模量底基层材料时,需对 AC/CRC 层间剪应力进行验算;对各动力响应均有一个临界速度,临界速度两侧车速对各动力响应特性的影响趋势相反。

**关键词:**CRC+AC; 三维动载模型; 动力响应; AC/CRC 层间剪应力; 临界速度

## 1 前言

连续配筋混凝土复合式路面(CRC+AC)为由连续配筋混凝土板(CRC)和沥青混凝土(AC)相组合而成的一种新式复合路面,其中 CRC 板是主要承重层,AC 层为表面功能层。该路面结构兼具耐久性和舒适性等优点,是当前长寿命路面结构的重要研究方向。现行有关 CRC+AC 的理论技术研究还不完善,仍需研究。王斌、杨军利用有限元软件探究了连续配筋混

凝土路面在不考虑水平移动荷载情况下的动力响应特性;高玲玲采用 Bisar 程序建立 CRC+AC 模型,对 CRC+AC 层间剪应力影响因素进行了分析;李盛、刘朝晖等通过 Abaqus 有限元软件,以 CRC 层最大主应力为指标,确定了 CRC+AC 临界荷位及结构层厚、模量等变量与 CRC 层荷载应力的关系;CRC+AC 不设横向接缝,当前对该路面的相关研究,也多基于静载无横向裂缝模式,而随着交通量增加,尤其是交叉口车辆频繁启停段,该路面容易产生横向裂缝。该文运用大型通用三维有限元软件 Abaqus,构筑带裂缝的路面结

- \*\*\*\*\*
- [4] Sung-Hee Kim, Joo-Young Park, Jin-Hoon Jeong. Effect of Temperature-Induced Load on Airport Concrete Pavement Behavior[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1):182-187.
- [5] Kasthurirangan Gopalakrishnan, Marshall R. Thompson. Use of Nondestructive Test Deflection Data for Predicting Airport Pavement Performance[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(6):389-395.
- [6] 黄勇,袁捷,谭悦,等. 机场水泥混凝土道面脱空判定及影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012(6).
- [7] 蒋鑫,刘竹君,曾诚,等. 板底脱空对水泥混凝土路面接缝传荷的影响[J]. 中外公路,2017(1).
- [8] 钱朝清. 机场复合道面受多轮荷载作用的力学特性分析

- [J]. 中外公路,2016(3).
- [9] 阳栋,谭立新. A380 轮载作用下刚性机场跑道临界响应研究[J]. 中外公路,2018(2).
- [10] 唐伯明,八谷好高. 东京羽田机场道面 FWD 实测弯沉的温度特性分析[J]. 土木工程学报,1995(1).
- [11] 刘海伦,李萌,杜浩. 机场水泥道面动态弯沉的温度影响分析[J]. 中国民航大学学报,2018(3).
- [12] 李盛,陈尚武,刘朝晖,等. 旧水泥混凝土路面弯沉测试的若干问题研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015(12).
- [13] 程国勇,王翠玲,郭志光. 机场道面脱空范围定量分析模型研究[J]. 公路交通科技,2014(9).
- [14] 王维,韩利斌. 机场道面使用性能预估理论和模型[J]. 中国民航大学学报,2007(2).

收稿日期:2020-01-10(修改稿)

作者简介:程焰兵,男,硕士,工程师. E-mail:736562105@qq.com.

构三维模型,搭载 Dload、Utracload 子程序来施加竖向荷载、水平荷载,以路表弯沉、路面结构应力、钢筋应力为主要评价指标,对 CRC+AC 在移动荷载下的动力响应特性进行分析,以便为 CRC+AC 复合式路面设计和施工提供参考依据。

2 分析模型

2.1 模型介绍

参考国内外相关资料,模型中路面宽度  $X$  取 3.75 m,路基深度  $Y$  取 5 m,行车方向  $Z$  取 6.387 m,横向裂缝间距为 1.6 m,钢筋网位于混凝土板中间位置,网格尺寸因离荷载作用区远近由大到小。采用 Abaqus/Standrad(隐式)求解器进行有限元计算。

2.2 材料和边界条件

模型与材料参数假定如下:

(1) 模型材料属性假定为各向同性,材料阻尼由 Rayleigh 阻尼确定、层间状态假定为完全连续。

(2) 裂缝宽度取 0.5 mm、纵向钢筋采用  $\phi 16$  螺纹钢,配筋率为 0.65%,横向钢筋采用  $\phi 10$  螺纹钢,配筋率 0.1%,选取三维桁架杆单元(T3D2)模拟纵横向钢筋,选取三维线性八节点减缩积分单元(C3D8R)模拟其他路面结构单元,钢筋单元以嵌入方式插入混凝土单元。

(3) 刹车时作用于路面的制动力由公式  $Q=P\varphi$  计算,其方向同车辆移动方向一致。其中  $Q$  为水平荷载; $P$  为垂直荷载; $\varphi$  为轮胎同路面间的附着系数,该文取正常制动情况, $\varphi=0.2$ 。

(4) 选用弹性半空间地基模型,模型尺寸取有限大小,同时限制模型  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三向位移。该文基础模型参数见表 1。

表 1 基础模型参数

层位	弹性模量/MPa	厚度/cm	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
AC	1 500	6	2 400	0.25
水泥混凝土	30 000	24	2 643	0.20
钢筋	200 000	—	7 800	0.28
底基层	1 200	20	1 900	0.25
土基	50	450	1 800	0.35

2.3 车辆荷载

刹车荷载由垂直荷载和水平荷载组成,为方便建模计算,行车荷载选用 BZZ-100,轮压 0.7 MPa,双轮中

心距  $D=32\text{ cm}$ ,荷载作用面积简化为  $22.8\text{ cm}\times 15.7\text{ cm}$  矩形,通过加载 Dload 和 Utracload 子程序实现车辆荷载移动,移动荷载带长 2.28 m,由 4 排小矩形方格组成,每个轮载面积由 3 个小矩形组成,如图 1 所示。

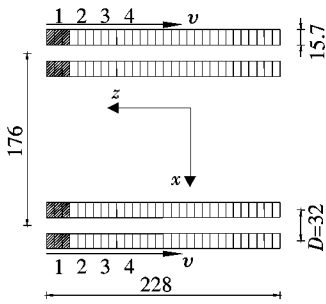


图 1 移动荷载带示意图(单位:cm)

3 计算分析

现有实体项目建设经验及相关科研成果表明: CRC+AC 复合式路面主要破坏形式包括 CRC 与 AC 层间剪切破坏、CRC 板边冲断破坏、纵向钢筋拉断破坏,针对常见病害,结合现行规范及研究成果,以轮隙中心处 AC 面层弯沉、轮载中心处 AC/CRC 层间剪应力、轮载中心处 CRC 及底基层层底弯拉应力、钢筋应力为计算指标。

以 AC 层厚、底基层模量、土基层模量、车速为变量,研究 CRC+AC 在动载作用下的动力响应规律,变量取值见表 2。

表 2 变量取值

AC 层厚/ cm	底基层 模量/MPa	土基层 模量/MPa	车速/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )
6	800	30	60
8	1 000	50	80
10	1 200	70	100
12	1 400	90	120

3.1 AC 层厚因素

在标准轴载作用下,保持底基层模量 1 200 MPa、土基层模量 50 MPa、车速 80 km/h 不变,改变 AC 层厚时,相应路面动力响应影响规律如图 2 所示。

由图 2 可以看出:AC 层厚增加,对路表弯沉、钢筋应力、AC/CRC 层间剪应力减小的作用逐步减弱,其中对弯沉影响较小,平均减小幅度在 0.5% 以内;而随着 AC 层厚的增大,CRC 及底基层层底拉应力先减

小后增大。这表明在基层、土基层等变量已确定时,对 CRC+AC 复合式路面结构而言存在一个最佳 AC 层厚度,单纯通过增加 AC 层厚度来提高路面性能和使用寿命的做法不可行也不经济,该文模型对应 AC 层最佳厚度为 8 cm。

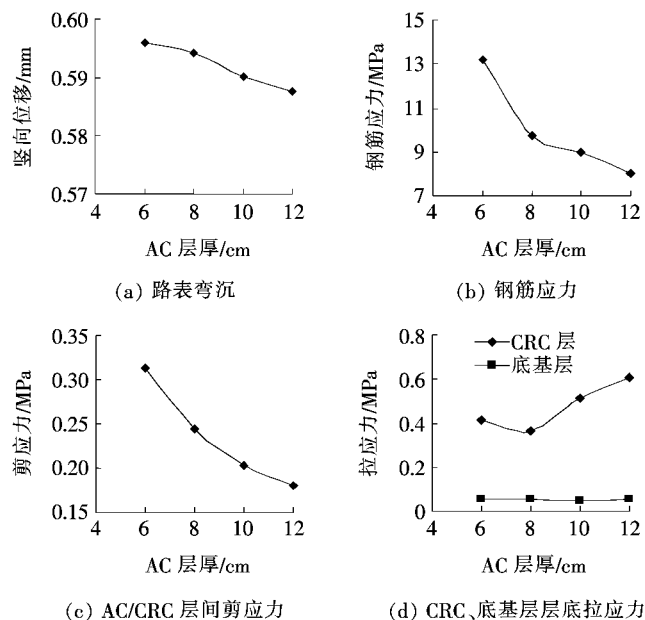


图 2 CRC+AC 动力响应与 AC 层厚的关系

### 3.2 底基层模量因素

在标准轴载作用下,保持 AC 层厚为 6 cm、土基层模量 50 MPa、车速 80 km/h 不变,改变底基层模量时,相应路面动力响应的影响规律如图 3 所示。

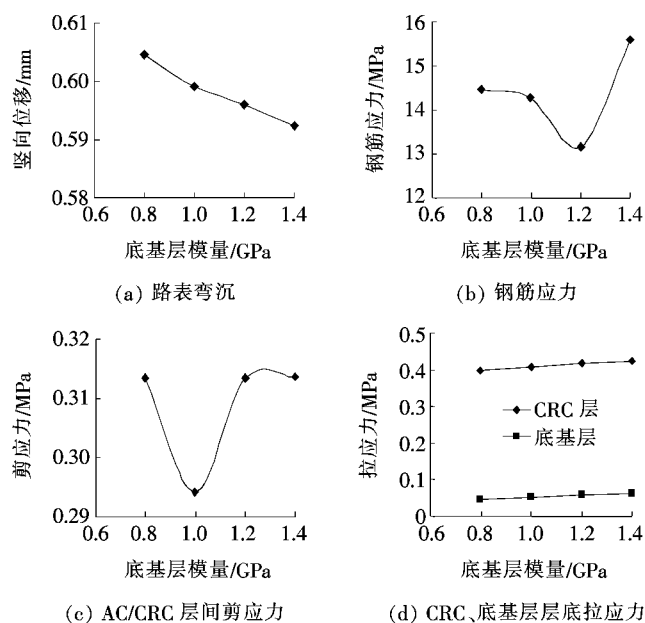


图 3 CRC+AC 动力响应与底基层模量的关系

由图 3 可以看出:路表弯沉随底基层模量的增加而小幅降低,幅度在 0.8% 以内;随着底基层模量逐步增加,钢筋应力和 AC/CRC 层间剪应力呈现先减小后增大趋势,CRC 层以及底基层的拉应力呈小幅增大趋势。因 AC 层与 CRC 层模量相差较大,CRC+AC 复合式路面结构常因 AC/CRC 层间抗剪能力不足而引起滑移剪切破坏,这表明在采用模量较大的底基层材料时,需对 AC/CRC 层间剪应力进行验算,以确保满足材料的容许抗剪强度要求。

### 3.3 土基层模量因素

在标准轴载作用下,保持 AC 层厚为 6 cm、底基层模量 1 200 MPa、车速 80 km/h 不变,改变土基层模量时,相应路面动力响应的影响规律如图 4 所示。

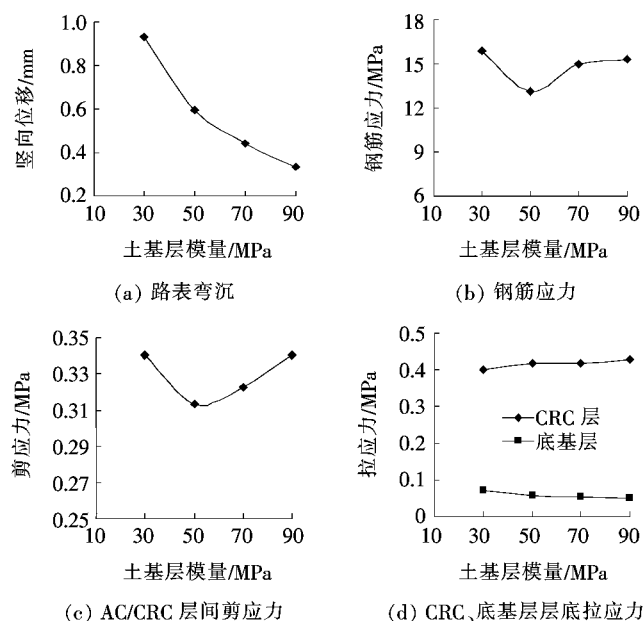


图 4 CRC+AC 动力响应与土基层模量的关系

由图 4 可以看出:路表弯沉值随土基层模量的增加而显著降低,平均降低幅度为 29%,这与实际观测到的路面变形情况相似;土基层模量、底基层模量与钢筋应力及 AC/CRC 层间剪应力的关系类似,增加土基层模量总体来看可以小幅度减小 CRC 及土基层拉应力。由以上分析可知,提高土基模量和施工质量可以较经济实用地提高 CRC+AC 的使用性能和寿命。

### 3.4 车速因素

在标准轴载作用下,保持 AC 层厚为 6 cm、底基层模量 1 200 MPa、土基层模量 50 MPa 不变,改变行车速度时,相应路面动力响应的影响规律如图 5 所示。

由图 5 可以看出:存在一个临界车速,在临界速度两边,车速增加对各动力响应指标的影响趋势相反,该

文对应临界速度为 80 km/h;车速对 CRC 层拉应力影响最大,当车速由 60 km/h 变为 120 km/h 时,CRC 层拉应力增大了 84%。综合考虑驾驶安全性以及高速行驶对路面的动力冲击,建议对车辆进行限速,以降低行车荷载对路面产生的冲击破坏。

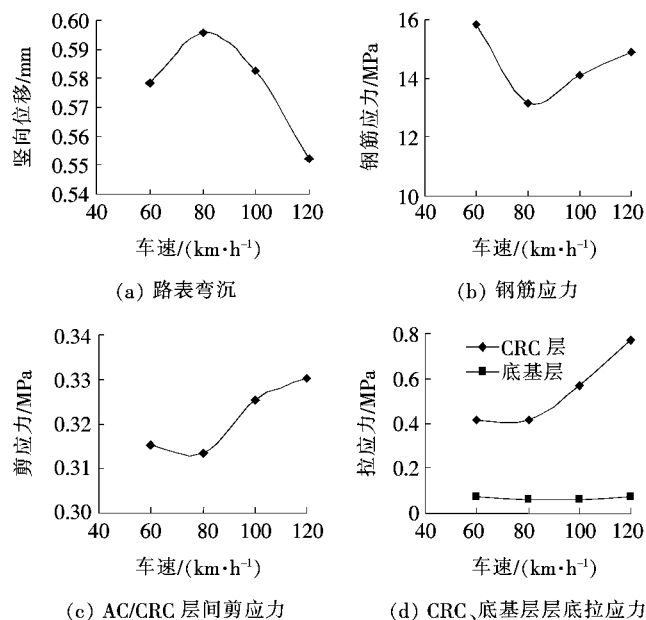


图 5 CRC+AC 动力响应与车速的关系

## 4 结论

(1) 提高土基层模量能显著降低路表弯沉;同时提高土基层模量和施工质量可以较经济实用地提高 CRC+AC 的受力性能和使用寿命。

(2) 超过最佳 AC 层厚后,将不利于项目经济性、并需对 CRC 层底拉应力进行验算,该文模型对应最佳 AC 层厚为 8 cm,在进行路面结构设计时需确定合理的 AC 层厚。

(3) 当选用底基层材料模量较大时,需对 AC/CRC 层间剪应力进行验算,以确保满足抗剪强度要求。

(4) 对各动力响应均对应一个临界速度,该文对应速度为 80 km/h,临界速度两侧车速对各动力响应

特性的影响趋势相反。为减小对路面的冲击破坏,严禁超速行驶。

## 参考文献:

- [1] 胡熠鑫.连续配筋混凝土复合式路面设计与工程应用[D].长沙理工大学硕士学位论文,2014.
- [2] JTGD40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [3] JTGD50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [4] 王斌,杨军.移动荷载作用下连续配筋混凝土路面三维有限元分析[J].东南大学学报(自然科学版),2008(5).
- [5] 高玲玲.连续配筋混凝土复合式沥青路面层间剪应力影响因素分析[J].中外公路,2017(3).
- [6] 李盛,刘朝晖,李宇峙.CRC+AC 复合式路面荷载应力分析[J].公路,2013(4).
- [7] 邓凤祥,李盛.CRC+AC 复合式路面结构层厚度对力学性能的影响分析[J].公路,2014(1).
- [8] 刘小兰,张献民.车辆动荷载下沥青路面的路基应力研究[J].中外公路,2019(3).
- [9] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS User Subroutines Reference Manual[M]. Providence Rhode Island, USA: ABAQUS Inc, 2006.
- [10] 廖公明,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.
- [11] 马新,郭忠印,杨群.移动荷载作用下沥青路面动态响应三维有限元分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009(4).
- [12] 黄仰贤.路面分析与设计[M].1版.北京:人民交通出版社,1998.
- [13] 刘朝晖.连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面研究[D].长沙理工大学博士学位论文,2007.
- [14] 肖川,宋文霞,夏玮,等.动载作用下的半刚性基层沥青混凝土路面力学响应分析[J].公路,2014(7).
- [15] 李盛,刘朝晖,李宇峙.连续配筋混凝土复合式沥青路面层间剪应力及结构[J].公路交通科技,2012(8).
- [16] 刘朝晖,郑健龙,华正良.CRC+AC 刚柔复合式路面结构与工程应用[J].公路交通科技,2008(12).
- [17] 曾梦澜,蒙艺,钟梦武,等.CRC+AC 复合式路面层间剪应力分析研究[J].湘潭大学学报(自然科学版),2012(2).
- [18] 尤晓晖.现代道路路基路面工程[M].北京:清华大学出版社,2016.