

镐头机拆除工况下机场水泥道面的力学行为

袁捷¹, 杜浩¹, 凌建明¹, 朱剑²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 江苏省交通规划设计院, 江苏 南京 210005)

摘要: 以 ABAQUS 作为分析平台, 建立了考虑接缝传荷以及层间接触效应的双板有限元分析模型, 可用于模拟镐头机拆除工况下水泥道面的力学行为。针对机场典型拆除工艺参数及道面结构参数, 系统分析了镐头机拆除工况下拆除板和周边保留板的变形、拉应力以及层间剪应力的分布特征, 揭示了镐头机拆除工况下周边保留板发生破坏的力学机理。分析了面层厚度、接缝传荷能力等参数对拆除时道面力学响应的影响规律, 提出了镐头机拆除施工应注意的问题。

关键词: 水泥道面; 道面拆除; 力学行为; 有限单元法

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

Mechanical Behaviors of Airfield Portland Cement Concrete Slabs in Process of Breaking With Pickaxe Machine

YUAN Jie¹, DU Hao¹, LING Jianming¹, ZHU Jian²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Traffic Planning and Design Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210005, China)

Abstract: Based on finite element method (FEM) software ABAQUS, a two-slab analysis model with a consideration of the joint load transfer and interlayer contact condition is established, in which the model dimension, displacement boundary, load model, material model, joint load transfer are simplified. The model can be used to study the mechanical behavior of Portland cement concrete (PCC) pavement in process of breaking with pickaxe machine. Both deformation and tensile stress and interface shear stress of removal slab and reserved slab are calculated for typical breaking process parameter and pavement structure, the mechanism for destruction of reserved slab is also proposed.

Key words: Portland cement concrete (PCC) pavement; slab removing; mechanical behavior; finite element method

机场水泥道面 (Portland cement concrete, PCC) 局部翻建时将面临既有道面拆除问题, 目前一般采用镐头机方式。由于镐头机工作时, 不可避免地会对周边保留区域的路面和基础造成扰动, 常出现“修好一块, 坏了一片”的工程现象。究其原因, 主要是对镐头机拆除工况下水泥道面的力学行为缺乏理论研究, 进而无法合理地选择诸如镐头机冲击能量、冲点位置、钎杆直径等工艺参数。镐头机破碎锤由锤体、钎杆和机架三部分组成, 以液压为动力源, 直接或间接驱动活塞往复运动, 靠活塞冲程时的动能冲击钎杆, 从而对混凝土产生破碎作用。在镐头机冲击荷载作用下, 水泥道面在很短时间内产生贯穿裂缝并破碎成小块, 由于水泥道面板之间的接缝传荷以及基层传荷作用, 周边保留板也将对冲击荷载产生力学响应。基于此, 笔者采用三维有限元方法分析了镐头机拆除工况下道面被拆除板和保留板的力学行为, 可为完善水泥道面拆除工艺提供重要的理论参考依据。

1 镐头机拆除工况的数值分析模型

1.1 模型尺寸和边界条件

分析模型为 2 块水泥板放置在一定厚度基层上的双板模型。单块板尺寸为 5 m × 5 m × 0.4 m; 基层厚度 30 cm, 长宽与面层相同; 垫层和土基简化为 Winkler 地基。面层和基层施加侧面的法向约束, 考虑层间接触, 参考相关文献^[1-3]将摩擦系数取为 1.5。有限元实体模型及网格划分如图 1 所示。

采用在接缝两侧对应结点设置弹簧单元的方法模拟接缝的剪力传递作用^[4], 总的接缝刚度 q 按 Friberg 方法^[5]进行计算, 并根据 Hammons 提出的结点“贡献面积”方法^[6]进行接缝刚度分配, 弹簧单元设置如图 2 所示, 图中, a 和 b 分别为分析模型中接缝板边方向和板厚方向两相邻弹簧结点距离的一

收稿日期: 2012-08-24

第一作者: 袁捷 (1971—), 男, 副教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为机场场道工程。E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

通讯作者: 凌建明 (1966—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为路基路面及机场工程。E-mail: jmling@tongji.edu.cn

半. 计算结果: 板角弹簧刚度 K_C 为 25.165 MPa, 板边弹簧刚度 K_E 为 50.33 MPa, 板中弹簧刚度 K_I 为 100.66 MPa.

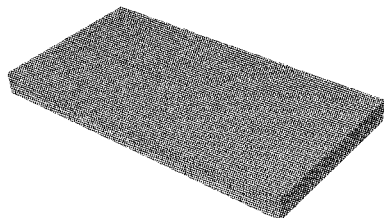


图 1 有限元实体模型及网格划分

Fig.1 Finite element analysis model and mesh

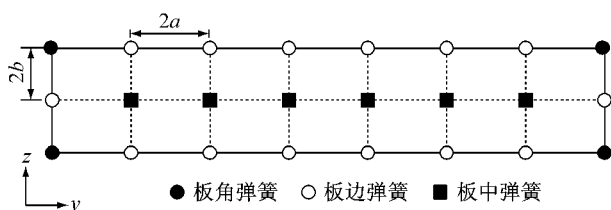


图 2 接缝传荷模型中的结点布置

Fig.2 Location of nodes in load transfer model of joint

1.2 材料参数

假设面层水泥混凝土及基层(如水泥稳定碎石)均为均匀、连续、各向同性的线弹性材料, 相应的表征参数为弹性模量 E 和泊松比 μ , 其取值见表 1.

表 1 材料模型参数取值

Tab.1 Material parameters of model

道面结构层	厚度	材料参数	取值
面层	40 cm	弹性模量/MPa	37 000
		泊松比	0.15
基层	30 cm	弹性模量/MPa	1 500
		泊松比	0.25
垫层及土基		地基反应模量/(MN · m ⁻³)	50

1.3 荷载图示

镐头机作用在水泥道面上的荷载是一随时间、冲锤速度、钎头侵入混凝土位移等因素影响的动力荷载, 且具有明显的冲击荷载特点, 钎头与混凝土之间的冲击荷载可简化为半波正弦曲线, 荷载作用在板边中部, 边缘距接缝 30 cm (图 3—4). 图 3 中, $A(t)$ 为冲击荷载作用值; A_0 为冲击荷载作用峰值;

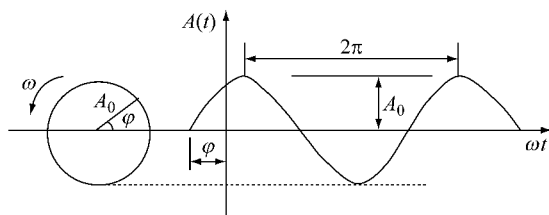


图 3 钎杆简谐振动示意

Fig.3 Simple harmonic motion of drill rod

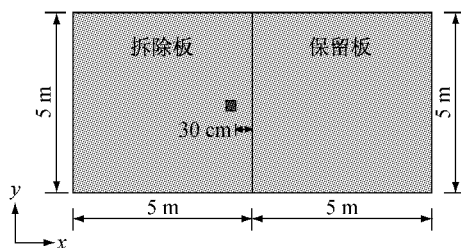


图 4 荷载作用位置

Fig.4 Load position

ω 为圆频率, $\omega = 2\pi/T$, 其中 T 为冲击荷载作用周期; φ 为冲击荷载作用初相位.

由于动力分析不仅过程复杂、繁琐, 而且材料参数取值方面尚存在较大争议. 对于位置固定的荷载, 由动载产生的应力一般均略小于静载情况, 但差异不大. 因此实际研究中往往采用等效静力简化的手段^[7-8]. 本模型将镐头机的冲击荷载简化为静止的恒定荷载, 静荷载大小可通过冲量定理确定:

$$F = (mv_t - mv_0)/t$$

式中: F 为冲击作用力; m 为钎杆质量; v_0 、 v_t 分别为钎杆的初速度和末速度; t 为冲击作用时间.

取 1/4 周期进行计算 ($t = T/4$), 则 $v_t = 0$, 初速度 v_0 的取值范围根据相关研究成果^[9-10]—般 8~12 m · s⁻¹, 模型中钎杆冲击速度 v_0 取为 10 m · s⁻¹. 镐头机破碎时钎头与混凝土的接触面简化为等面积的矩形, 接触压力在接触面积内均匀分布. 根据镐头机冲击能量的不同, 模型中小型、中型和大型镐头机的荷载参数见表 2.

表 2 镐头机荷载参数

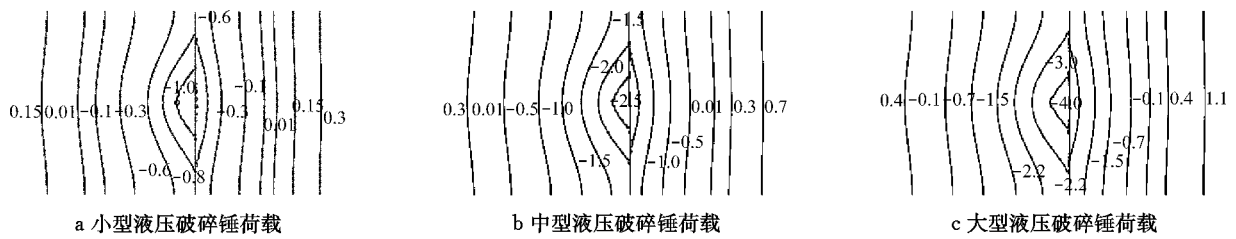
Tab.2 Load parameters of breaking hammer

参数	小型破碎锤	中型破碎锤	大型破碎锤
钎杆直径/mm	60	120	180
冲击频率/Hz	900	660	450
锤体重量/kg	200	600	1 000
钎杆质量 m /kg	15	50	120
荷载作用周期 $T/10^{-3}$ s	1.111	1.515	2.222
$t/10^{-4}$ s	2.78	3.79	5.56
冲击荷载峰值 F /kN	540.0	1 319.3	2 158.3
荷载作用面积 A /mm ²	2 827.43	11 309.73	25 446.90
均布荷载集度 p /MPa	191.0	116.7	84.8

2 不同工况下道面力学响应分析

2.1 道面竖向变形分布特征

分别采用表 1 中小型、中型和大型液压破碎锤的荷载参数(下同), 计算了镐头机作用下道面的变形分布, 拆除板和保留板的道面顶面的竖向位移 U_z 等值线图如图 5 所示.

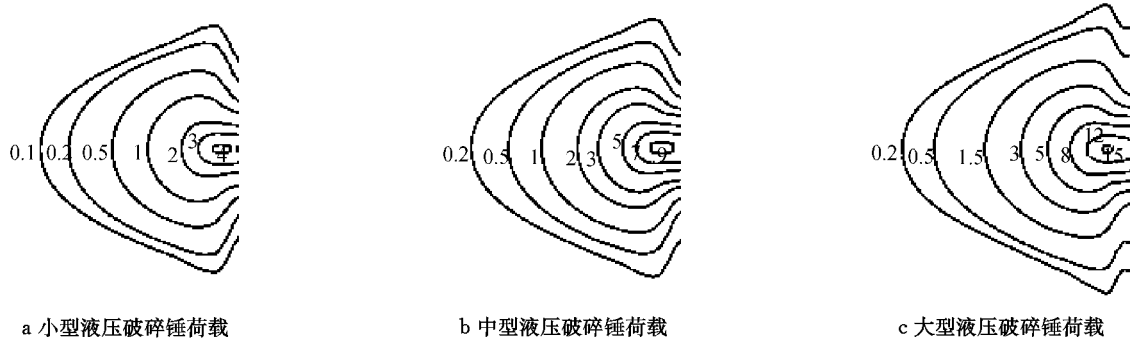
图5 道面板顶面竖向位移 U_z 等值线图(单位:mm)Fig.5 Contour map of vertical displacement U_z on top surface of PCC slab(unit: mm)

可见,拆除板和保留板均存在纵横弯曲现象,随着镐头机冲击能量的增大,板块弯曲现象越明显.拆除板向下位移最大值出现在荷载作用处,不同镐头机作用下分别为 1.30、2.93 和 4.78 mm;保留板最大向下位移出现在板边,分别为 1.06、2.48 和 3.86 mm;向上位移的最大值出现在保留板的板角,分别

为 0.45、0.98 和 1.46 mm. 镐头机冲击道面时,保留板产生翘曲,进而和基层之间形成局部脱空,改变了层间接触状态.

2.2 拆除板应力分布特征

分别计算了镐头机作用下拆除板拉应力分布,底面拉应力 $\sigma_{\text{拉}}$ 等值线图如图 6 所示.

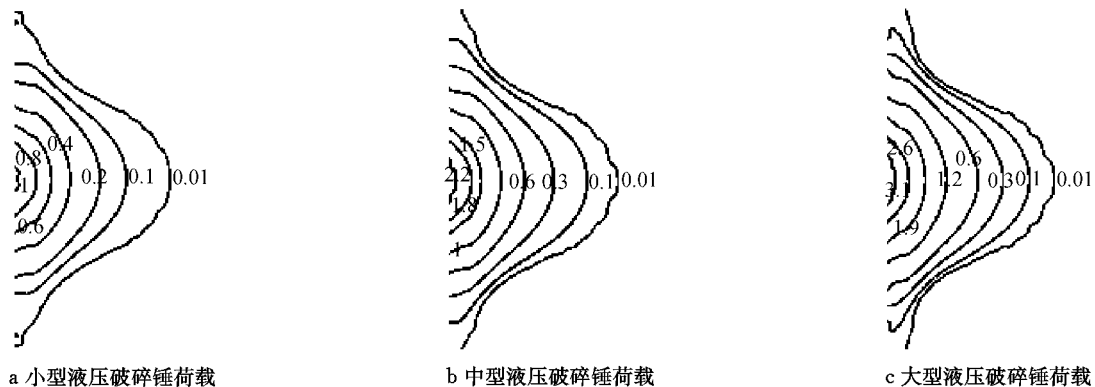
图6 拆除板底面拉应力 $\sigma_{\text{拉}}$ 等值线图(单位:MPa)Fig.6 Contour map of tensile stress $\sigma_{\text{拉}}$ on bottom surface of removal slab (unit: MPa)

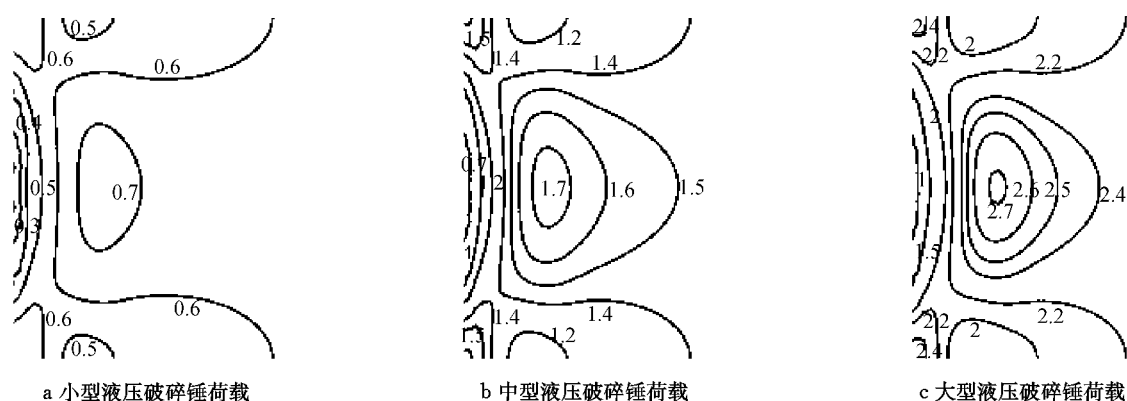
结果表明拆除板的最大拉应力均出现在板底,不同镐头机作用下的最大拉应力分别为 4.2、9.5 和 15.3 MPa,且以横向力为主(产生纵缝).机场水泥混凝土的设计弯拉强度一般为 5.0 MPa 左右,实际可达到 8~9 MPa,可见采用小型镐头机进行道面拆除效果不佳(与实际情况一致);而中型和大型镐头

机则可轻易将板块拆除.

2.3 保留板应力分布特征

分别计算了镐头机作用下保留板的应力分布.结果表明保留板的顶面都为拉应力区,底面也有一部分拉应力区,保留板底面和顶面的拉应力 $\sigma_{\text{拉}}$ 等值线图分别如图 7 和图 8 所示.

图7 保留板底面拉应力 $\sigma_{\text{拉}}$ 等值线图(单位:MPa)Fig.7 Contour map of tensile stress $\sigma_{\text{拉}}$ on bottom surface of reserved slab (unit: MPa)

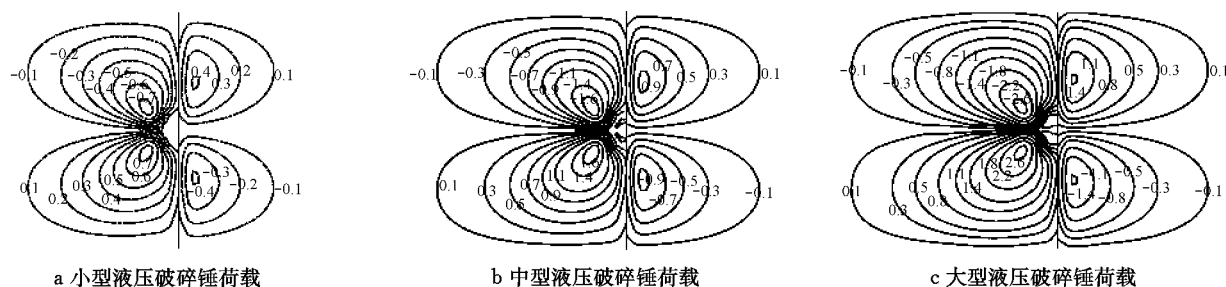
图8 保留板顶面拉应力 $\sigma_{\text{顶}}$ 等值线图(单位:MPa)Fig.8 Contour map of tensile stress $\sigma_{\text{顶}}$ on top surface of reserved slab (unit: MPa)

可见,保留板拉应力的最大值均出现在板底,不同镐头机作用下板底最大拉应力分别为 1.1、2.4 和 3.3 MPa,而板顶的最大拉应力分别为 0.7、1.7 和 2.7 MPa.随着镐头机冲击能量的增大,保留板将承受较大的拉应力水平,这一水平的应力虽然不至于直接破坏保留板,但是有可能在保留板内部(特别是板底)形成损伤.为了减少镐头机拆除时对于保留板的损伤,不能仅考虑拆除效率而使用很大的冲击能量,特别是第

一次冲击时,应在保证拆除效率的前提下,应尽可能选择冲击能量较小的液压破碎锤进行施工.

2.4 层间剪应力分布特征

分别计算了镐头机作用下道面板及基层的层间剪应力分布,层间剪应力 τ 等值线图如图 9 所示.不同镐头机作用下拆除板与基层的层间剪应力最大值分别为 0.7、1.7 和 2.7 MPa;保留板与基层的层间剪应力最大值分别为 0.4、0.9 和 1.4 MPa.

图9 道面板与基层的层间剪应力 τ 等值线图(单位:MPa)Fig.9 Contour map of interface shear stress τ between PCC slab and subbase (unit: MPa)

当半刚性基层与水泥板结合良好时,层间粘结强度一般在 1.0~2.0 MPa 之间^[11].因此,当使用中型或大型液压破碎锤拆除时,拆除板不仅由于板底拉应力而破碎,且与基层的层间剪应力也较大,会造成水泥板与基层的局部脱离,提高了镐头机拆除作业效率(与实际情况一致).然而,镐头机的冲击能量过大,也会造成保留板与基层的层间剪应力较大,尤其当水泥板与基层的结合较弱时,容易引起保留板与基层的局部脱离,影响保留区域道面结构的荷载响应,进而影响到道面的使用性能和寿命.

3 结构参数对道面拆除时力学响应的影响

3.1 面层厚度

选取 20、24、28、32、36、40 和 44 cm 七种厚度的水泥板,分析面层厚度对镐头机作用下道面力学响应的影响,计算中其他道面结构参数不变,荷载选用中型液压破坏锤.(下同)计算结果如图 10 所示.

从图 10 可以看出,面层厚度对拆除板、保留板及基层的力学响应影响非常显著.随着面层厚度的增大,道面板的应力明显降低.面层厚度为 44 cm 时,拆除板的底面最大拉应力也有 8.0 MPa,机场水泥混凝土面层的最大厚度一般不超过 44 cm,故采用中型液压破碎锤已能破碎各种厚度的水泥板.当面层厚度小于 30 cm 时,保留板的底面拉应力峰值超过 5.0 MPa,与基层的层间剪应力峰值也能达到 2.0 MPa,极易引起保留板的破坏,因此若不采取相关保护措施,中型液压破碎锤不适合拆除厚度 30 cm 以下的水泥混凝土道面.

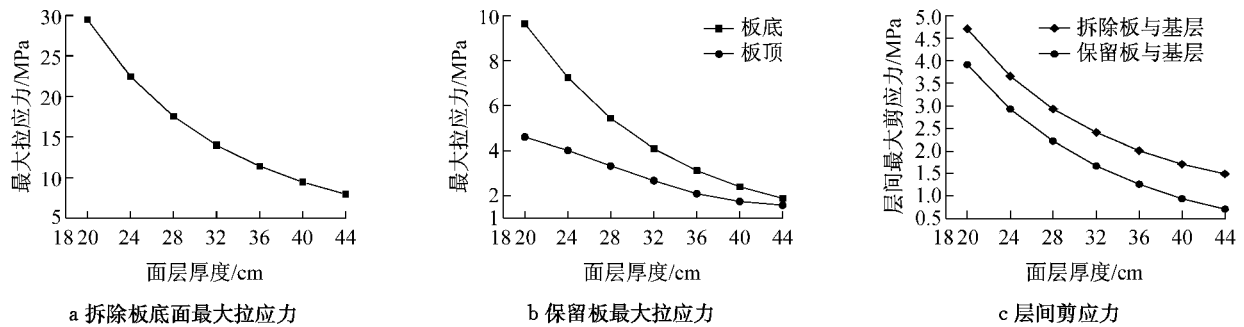


图 10 面层厚度对道面力学响应的影响

Fig.10 Effect of surface thickness on pavement mechanical response

3.2 接缝传荷刚度

调整接缝传荷刚度 q 为基础模型的 1/4、1/2、1、2 和 4 倍(即 251.65、503.3、1 006.6、2 013.2 和

4 026.4 MPa),荷载参数和其他道面结构参数均保持不变,分析接缝传荷刚度对镐头机作用下道面力学响应的影响,计算结果如图 11 所示。

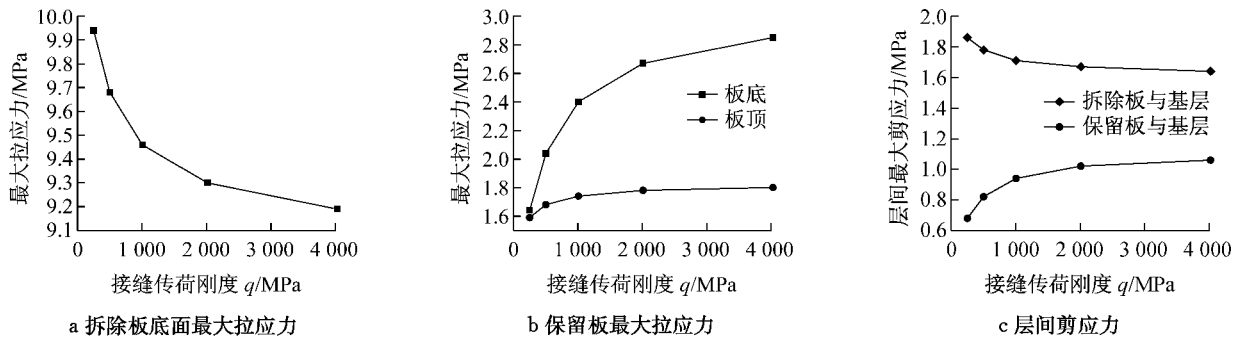


图 11 接缝传荷能力对道面力学响应的影响

Fig.11 Effect of load transfer on pavement mechanical response

可见,接缝刚度增大不利于拆除板的破碎,但影响较小,拆除板的底面拉应力变化幅度在 0.8 MPa (10%)以内。而保留板的底面拉应力峰值增加了 1.2 MPa,增长幅度超过 70%。因此,实际施工时宜通过切缝或锯断传力杆(或拉杆)等手段来减弱道面的接缝传荷能力,以减小对保留道面的影响。

3.3 基层厚度及地基强度

选取 15、20、25、30、35 和 40 cm 六种基层厚度以及 30、50 和 70 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ 三种地基反应模量进行分析(图 12 和图 13),可见随着基层厚度和地基强度的增加,拆除板及保留板的最大拉应力均略有降低,幅度不超过 10%,因此可认为基层厚度与地基强度对道面拆除时力学响应的影响基本可以忽略。

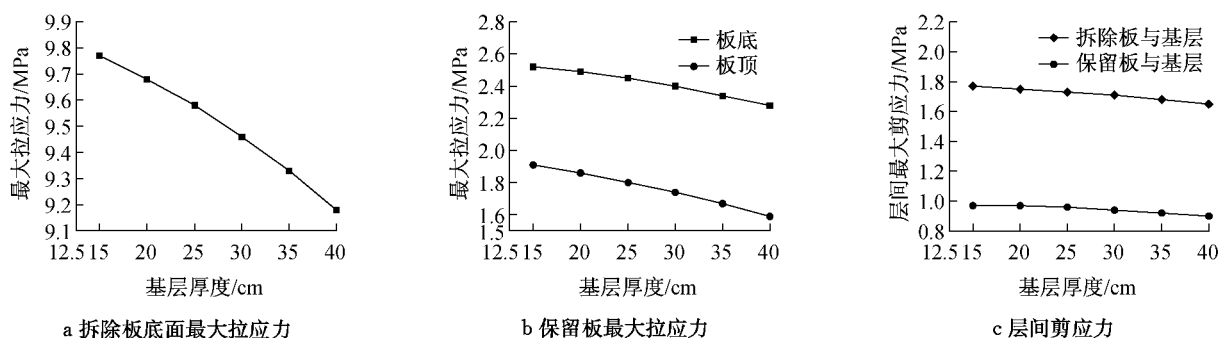


图 12 基层厚度对道面力学响应的影响

Fig.12 Effect of base thickness on pavement mechanical response

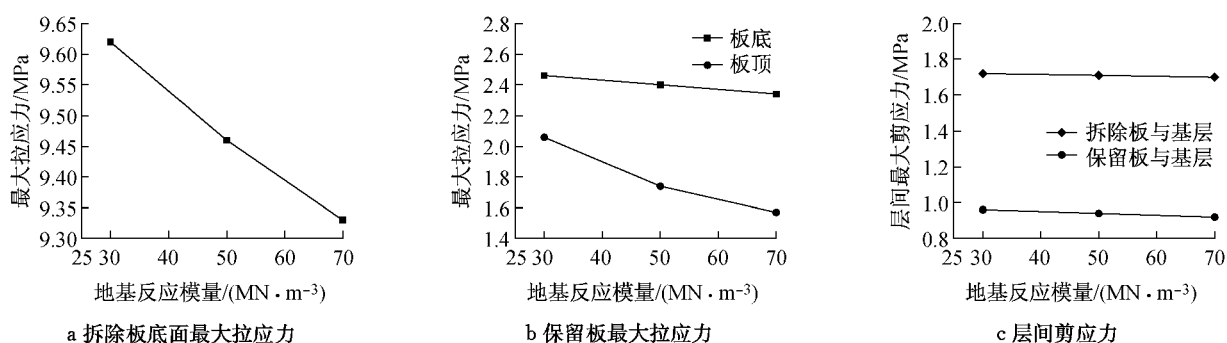


图13 地基强度对力学响应的影响

Fig.13 Effect of foundation strength on pavement mechanical response

4 结语

(1)以 ABAQUS 作为分析平台,通过对模型尺寸、位移边界条件、层间接触条件、荷载模型、材料模型、接缝传荷模型等进行合理简化,建立了考虑接缝和基层传荷效应的双板有限元分析模型,可用于模拟镐头机拆除工况下水泥道面的力学行为。

(2)镐头机用于拆除道面板时其相邻板的力学响应与镐头机的冲击能量大小呈正相关,表现为板角存在一定程度的翘曲位移,宜造成保留板与基层之间出现局部脱空问题。保留板的应力响应水平虽不至于直接破坏道面,但有可能形成损伤,因此,不能仅考虑拆除效率而使用很大的冲击能量。

(3)分析表明面层厚度对镐头机作用下道面力学响应的影响很大,拆除施工前应首先调查清楚面层水泥板的厚度,根据面层厚度选择合适的镐头机。面层厚度小于 30 cm 时,应选择小型液压破碎锤;面层厚度大于 30 cm 时,选用中型液压破碎锤即可,一般情况下不应使用大型液压破碎锤。

(4)减小接缝传荷能力对拆除板的影响较小,但有利于保留板的受力。切缝划定拆除边界时应有足够的深度,以切断传力杆或拉杆,减小镐头机对保留板块的扰动。

参考文献:

- [1] Rufino D, Roesler J. Effect of slab-base interaction on measured concrete pavement responses [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(5):425.
- [2] Tarr S M, Okamoto P A, Sheehan M J, et al. Bond interaction between concrete pavement and lean concrete base [J]. Transportation Research Record, 1999, 1668:9.
- [3] 姚祖康. 公路设计手册——路面[M]. 3版. 北京:人民交通出版社, 2006.

版社, 2006.

YAO Zukang. A handbook of highway designing—pavement [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2006.

- [4] Ioannides A M, Korovesis G T. Aggregate interlock: a pure-shear load transfer mechanism [J]. Transportation Research Record, 1990, 1286:14.
- [5] Ioannides A M, Alexander D R, Hammons M I, et al. Application of artificial neural networks to concrete pavement joint evaluation [J]. Transportation Research Record, 1996, 1540(1):56.
- [6] Hammons M I. Development of an analysis system for discontinuities in rigid airfield pavements [R]. Vicksburg: United States Army Waterways Experiment Station, 1997.
- [7] 孙晓亮, 胡昌斌. 四楞冲击压路机破碎旧水泥混凝土路面力学机理研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2):281.
- [8] 孙晓亮, 胡昌斌. 四楞冲击压路机破碎旧水泥混凝土路面力学机理研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2):281.
- [9] 孙晓亮, 胡昌斌. 四楞冲击压路机破碎旧水泥混凝土路面力学机理研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2):281.
- [10] 胡昌斌, 林欣. 不同工况下冲击破碎旧路面板的力学效果对比研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3):443.
- [11] 胡昌斌, 林欣. 不同工况下冲击破碎旧路面板的力学效果对比研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3):443.
- [12] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [13] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [14] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [15] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [16] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [17] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [18] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [19] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [20] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [21] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [22] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [23] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [24] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [25] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [26] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [27] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [28] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [29] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [30] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [31] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [32] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [33] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [34] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [35] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [36] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [37] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [38] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [39] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [40] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [41] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [42] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [43] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [44] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [45] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [46] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [47] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [48] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [49] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [50] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [51] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [52] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [53] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [54] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [55] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [56] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [57] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [58] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [59] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [60] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [61] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [62] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [63] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [64] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [65] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [66] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [67] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [68] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [69] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [70] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [71] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [72] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [73] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [74] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [75] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [76] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [77] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [78] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [79] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [80] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [81] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [82] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [83] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [84] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [85] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [86] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [87] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [88] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [89] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [90] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [91] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [92] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [93] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [94] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [95] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [96] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [97] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [98] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [99] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.
- [100] 瞿叶高, 卜长根, 程志强, 等. 冲击锤钻凿系统纵向冲击数值模拟 [J]. 金属矿山, 2008(12):34.