

文章编号: 1000-7598(2009)08-2517-06

多遍冲击碾压混凝土路面时路基的动力响应分析

胡昌斌, 阙云

(福州大学 土木工程学院, 福州 350002)

摘要: 采用三维动力弹塑性有限元, 考虑冲击压路机沿面板纵向中线及板边行驶来冲击碾压破碎旧水泥混凝土板, 对路基在不同冲击遍数下的变形、受力等力学响应进行了分析。研究发现, 土基在3个方向均承受压应力, 板角荷载作用位置路基竖向变形最大, 板中变形最小。板中路线路基竖向变形总体小于板边路线。随着距冲击点距离减小, 土体竖向变形逐渐增大, 并存在有明显的波动滞后现象和残余变形。随着冲击遍数的增加, 土基最大竖向变形逐渐变大; 第3遍冲击完后已出现明显的塑性区; 随着冲击遍数的增加, 土基中土压力逐渐增大, 但渐趋稳定。虽然冲击遍数增加, 但土压力增大范围仅限于土基一定深度内。

关键词: 冲击碾压; 水泥混凝土路面; 动力有限元法; 路基

中图分类号: U 416.1

文献标识码: A

Dynamic response of subgrade under impact compacted load with multiple times

HU Chang-bin, QUE Yun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The dynamic deformation and stress characteristics of subgrade under two impact loading routes with different compact times are analyzed based on three dimensional elastoplastic dynamic FEM. The results indicate that the three dimensional compressive stresses exist in the affected scope of subgrade underneath the slab. Vertical deformation of subgrade under slab corner is maximum; and vertical deformation of subgrade under slab corner is minimum. By comparison vertical deformation of subgrade, vertical deformation of subgrade is generally lower. Vertical deformation of subgrade increases with distance far away from impact point. And vertical deformation of subgrade exists obviously residual deformation, wave and hysteresis phenomenon. Vertical deformation of subgrade increases with increasing of compact times; and there exists plastic zone after the third compact time. Soil pressure increases with increasing of compact times; but increasing tendency tends to be stable. The range of increasing soil pressure is limited to certain depth of subgrade.

Key words: impact compacted; cement concrete pavement; dynamic finite element method; subgrade

1 引言

近年来, 采用冲击压路机改建旧水泥混凝土路面新技术, 以其良好的实用性和明显的经济效益, 引起了公路养护部门的关注。冲击压路机是一种具有高冲击能量的压实机械, 该压路机一改传统压路机的圆形轮为多边形压实轮(如图1所示), 且冲击能量大, 单击能量在25~30 kJ之间, 冲击力可达2 500~3 000 kN。采用冲击压路机冲击压实旧水泥混凝土板, 可以快速破碎压实稳固旧混凝土路面板,

而且环保再生利用旧水泥混凝土路面板, 并对旧路基进行补充压实, 较传统路面改建方法, 修复质量更高。

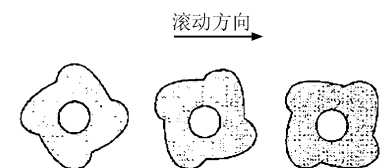


图1 四楞形冲击式压路机压实轮滚动冲击示意图
Fig.1 Impact principle sketch of impact roller

收稿日期: 2008-06-12

基金项目: 福建省高等学校新世纪人才计划基金项目 (No. TW2006-27)。

第一作者简介: 胡昌斌, 男, 1974年生, 博士, 博士后, 副教授, 主要从事道路工程、土动力学方面的研究。E-mail: huchb@sohu.com

由于冲击压实技术在我国的应用时间较短,很多理论问题仍有待研究解决。近几年,国内学者^[1-4]开展了有关冲击压实冲击碾压破碎旧水泥混凝土路面技术工作机制的理论研究,但这些研究主要是基于静力弹性有限元理论分析方面。在实际工程中,冲击压实施工需反复冲击碾压破碎多遍才能达到工程要求效果,冲击荷载作用点位置在不断变化移动,且冲击破碎旧水泥混凝土路面瞬间冲击荷载会随时间变化,同时路面板和土基在强大的冲击荷载下会出现显著的塑性力学行为特征。因此,基于动力学分析理论,考虑材料的塑性力学行为,研究冲击压实改建旧水泥混凝土路面的工作机制,相比静力分析将更接近实际,也将更具理论价值。

冲击碾压改建旧水泥混凝土路面时对路基会产生补充压实作用,这是该技术的一个显著特点,但由于冲击碾压作用力大,也会对沿线路基下埋置的涵洞等构造物产生显著的动力影响作用。因此,研究冲击碾压施工时旧路基的力学行为,对深入了解冲击碾压改建水泥混凝土路面的力学机制、确保施工安全均具有重要的理论价值和实践意义。

因此,基于以上分析,本文采用三维动力弹塑性有限元分析方法,重点针对冲击压路机在不同施工路线、不同冲击遍数下路面板下路基的动力力学响应特性进行分析,并对在不同施工路线和冲击遍数下路基的变形、受力特征进行了探讨,具体如下。

2 冲击压路机

本理论分析以美国 Impactor2000 四楞冲击压路机(图2)为研究对象,该机技术高度为 1.956 m,宽度为 2.565 m,长度为 5.842 m,冲击轮重 8.6 t;正常工作冲击频率为 2 Hz 左右;施工行走速度为 11~13 km/h,压实功率为 30 kJ。为加强破碎效果,冲击轮上焊有钢趾,进行分析冲击轮具体几何尺寸见图2。

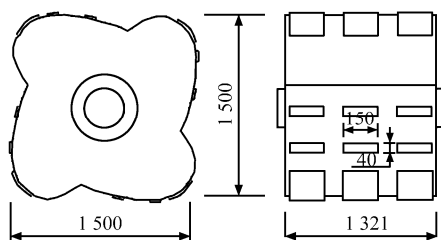


图2 Impactor2000 冲击压路机冲击轮几何尺寸
(单位: mm)

Fig.2 Dimensions of Impactor2000 roller (unit: mm)

3 模型与参数选取

3.1 模型尺寸及边界条件

路面结构分为路面板、基层、土基三部分。路面结构计算模型根据福州水泥混凝土路面典型结构建立。面板为水泥混凝土,基层为水泥稳定类基层,土基为一般黏性土路基。

(1)路面板尺寸 长(沿路线方向)×宽×厚为 5 m×4 m×0.25 m。

(2)基层及土基范围 基层、土基长、宽等同,长×宽为 35 m×34 m,计算模型中基层厚 0.2 m,土基厚为 15 m。

(3)模型边界条件 不考虑混凝土路面板接缝间的传荷作用,但考虑与面板相邻路面板及硬路肩的水平约束,计算时路面板和基层四周边界设置水平约束。为消除有限元计算带来的回波效应,有限元分析模型中土基底部及四周设弹簧阻尼器单元,引入集中黏弹性人工边界模拟辐射阻尼。具体有限元模型设置情况见图3。

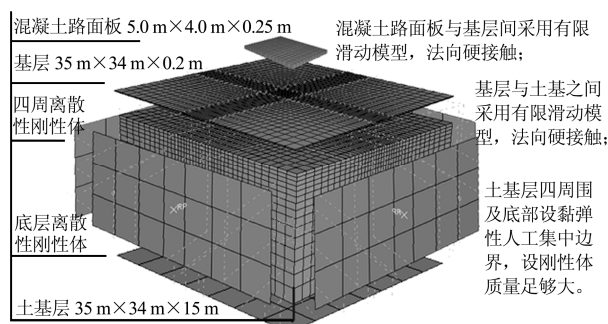


图3 路面结构有限元模型组合

Fig.3 Finite element model of pavement structure

3.2 混凝土与土的本构模型

冲击碾压破碎旧水泥混凝土路面是一个重复加载的动态过程,混凝土塑性损伤模型是基于拉、压各向同性塑性的连续线性损伤模型,可用于单向加载、循环加载以及动态加载等场合,描述混凝土的非线性力学行为,并具有良好的计算收敛性。因此,本文使用塑性损伤模型描述混凝土的行为。

土的变形规律很复杂,本文采用 Drucker-Prager/Cap 模型,可以得到包括单调荷载的问题,相对精确的结果,能够体现土中的一些典型工程特性,如路径的相关性、极限强度、塑性剪胀或压实的能力,且符合 Drucker 对于稳定性和唯一解的要求,计算存储节省稳定等。

3.3 材料参数

计算模型材料物理参数主要依据福州市水泥混

凝土路面实际情况和对应试验结果, 并参考相关资料^[1-2, 5-10]确定。混凝土面板采用 C35 混凝土材料力学参数, 并参考福州地区旧水泥混凝土路面结构设计参数选取。对应混凝土材料拉伸硬化参数, 按 ABAQUS 软件提供的对应相同模量的混凝土材料拉伸硬化曲线列表选取。有限元计算模型中具体涉

及各结构层物理力学参数见表 1、2。

表 1 混凝土材料的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of concrete						
弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	剪胀角 $\psi/(\circ)$	初始屈服 压应力 σ_{c0}/MPa	极限压应力 σ_{u0}/MPa	屈服拉应力 σ_{t0}/MPa
31200	0.15	2.5	36.31	13.0	24.1	2.9

表 2 基层与土基基本材料参数列表

Table 2 Material parameters of the base and subgrade

土层	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa	α	R	K	模型硬化参数 C_{ap}/MPa	
基层	1 250	0.25	2.3	41.3	1 530	0.0	0.33	1.0	2.7	0.0
									3.5	0.02
土基	25	0.35	1.75	36.5	60	0.0	0.33	1.0	1.2	0.0

3.4 冲压荷载模型

本文采用冲量定理法确定冲击碾压荷载。取整个冲击过程中加载与卸载时间相同, 采用三角形脉冲形式, 根据冲击压路机机械参数与现场动土压力测试试验测得冲击作用时间, 依据钢轮上钢趾分布尺寸(图 1), 钢轮与面板接触面积简化为两长条矩形, 面积为 $2A=2\times(\text{长}\times\text{宽})=2\times(132.1\text{ cm}\times 31.2\text{ cm})$, 计算得到冲击荷载峰值为 $2.64\times 10^6\text{ N}$ 。

4 施工路线及工况

拟定冲击压路机沿纵向板中线和纵向板边缘两条施工线路。根据冲击压路机的工作特性以及冲击轮的规格尺寸, 假定冲击压路机冲击板的第 1 点在横向板边缘, 每冲击一遍, 单块板可以被冲击 3 次, 冲击点作用位置分别为各线路的板边、板中、板边, 如图 4 所示。

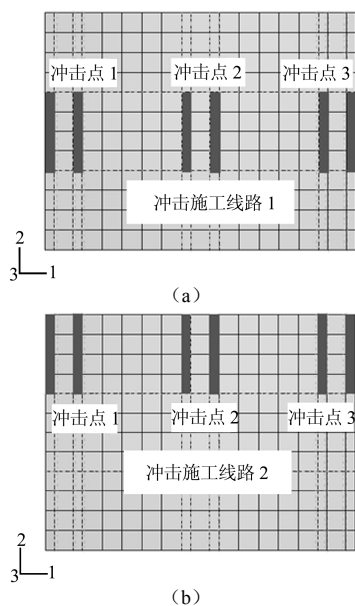


图 4 破碎路线及轮压位置工况示意图

Fig.4 Description of impacting route and roller location

本文约定: 沿路前进方向为纵向(X 或 1 方向), 与路前进方向垂直方向为横向(Y 或 2 方向), 沿路面板深度方向为竖向(Z 或 3 方向)。

以下通过三维有限元分析, 来对冲击碾压对旧路基的动力作用效应与规律进行研究。

5 土基变形特征分析

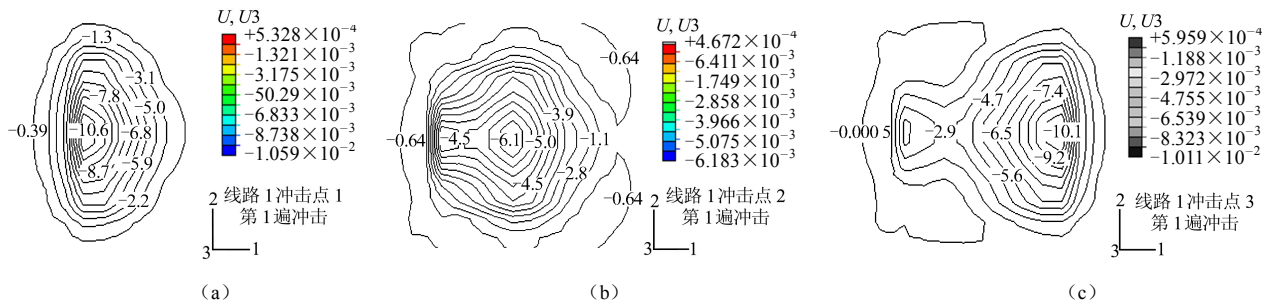
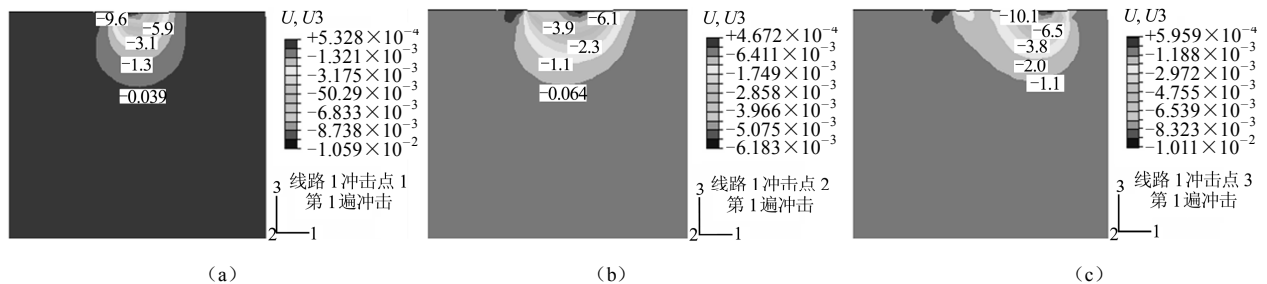
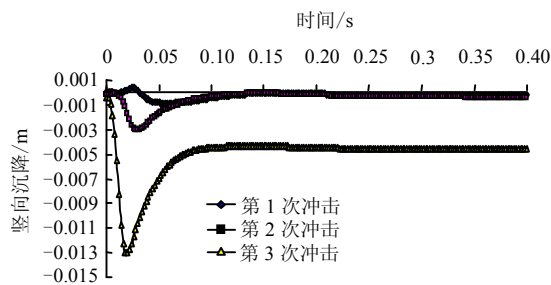
动力有限元分析结果表明, 土基在 3 个方向均承受压应力, 土基表面变形基本与路面板与基层相一致。经过基层的缓冲, 土基层的垂直方向位移分布较基层与混凝土面板而言更加均匀。

可以发现, 各冲击位置中板角荷载作用位置的路基竖向变形最大值最大, 板中最小, 横缝和纵缝板边作用位置居前面二者之间。板中路线路基竖向变形总体小于板边路线。

图 5 为冲击压路机沿施工线路 1 破碎旧水泥混凝土面板时, 破碎第 1 遍过程中土基中的竖向变形等值线。图 6 为从土基中荷载作用点下平行 XZ 面内 U_z 等值线。由图可知, 随着冲击压路机的前行, 土基表面最大竖向变形均发生在冲击轮作用的下方, 土基表面的竖向变形中心一直随冲击轮的前进而移动, 其最大值也随着冲击轮作用于板的位置不同而变化。

沿板中路线第 1 遍 3 次冲击, 板边处冲击点(第 1 和第 3 冲击点)路基竖向位移明显大于板中位置, 第 3 冲击点与第 1 冲击点大体相当, 但第 3 冲击点略大。3 次冲击板中荷载位置、路基顶面沉降相对均匀。

为观察在冲击过程中土基中的竖向变形变化, 取土基顶面一点作为监测点, 监测其变形随时间的变化, 如图 7 所示。该监测点位于对应混凝土路面第 2 条施工线路(板边路线)第 3 冲击点板角下方

图5 冲击破碎1遍后土基 U_z 分布云图 (单位: m)Fig.5 Contours of U_z on subgrade with one time of compaction (unit: m)图6 土基载荷作用点下平行 XZ 面内 U_z 分布云图 (单位: m)Fig.6 Contours of U_z on subgrade in parallel XY plane (unit: m)图7 对应板角下方土基顶面一点竖直变形时程曲线
Fig.7 Time history curve of vertical displacement on subgrade under corner of slab

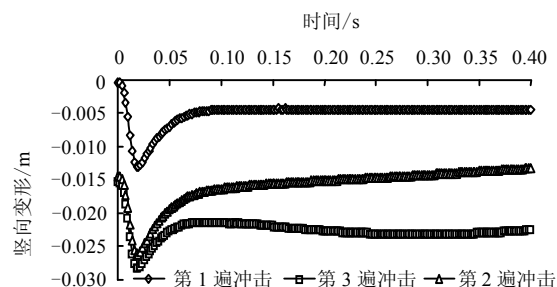
土基顶面的一点。图中所示为冲击压路机沿施工线路2(板边路线)破碎第1遍冲击过程中总共3次冲击时,板角对应路基顶面点的竖向变形-时程变化。

由图中可以看到,随着冲击点距该监测点的距离减小,该点的竖向变形逐渐增大。在第1次冲击时,该点距离冲击点最远,竖向变形最大值在3次冲击中最小,并且有明显的波动与滞后现象,竖向变形最大值发生在冲击完后约0.03 s后,并慢慢地恢复,最终竖向变形不大;在第2次冲击时,竖向变形没有明显的波动性,但仍然有滞后性,最大竖向变形约发生在冲击完0.01 s后,并且最大竖向变形较第1次冲击时大,但同第1次冲击一样,竖向变形很快恢复,最终变形不大;在第3次冲击时,此时冲击点位于监测点的正上方,竖向变形没有明显的波动性和滞后性,几乎在冲击完成的瞬间,竖

向变形达到最大值。冲击完后,虽然竖向变形也有近2/3恢复,但仍存在明显的残余变形。

另外,这里单从3次冲击过后竖向变形与恢复的速度分析,第1次冲击从竖向变形由0到最大值再到稳定分别用时约0.05 s和0.09 s,第2次用时约0.03 s和0.08 s,第3次用时约0.02 s和0.06 s。由此可以看出,随距离冲击载荷作用点的距离减小,该点的动力反应越接近载荷的性质。

图8为随着冲击遍数的增加,监测点竖向变形-时程曲线。由图可见,随着冲击遍数的增加,土基最大竖向变形逐渐变大;第2遍冲击破碎后与3遍破碎后变形最大值虽然相差不大,但最终变形相差很多,在第3遍冲击完后,已经有了明显的塑性区,这与路面混凝土开始破碎而导致传递到路基上的荷载逐渐增大直接相关。

图8 不同冲击遍数土基顶面监测点竖直变形时程曲线
Fig.8 Time history curve of vertical displacement at top of subgrade with different compaction times

6 土基受力特征分析

土基中的应力分布与土基的变形分布相对应,这里重点对随着冲击破碎遍数的增加土基中的应力变化特征进行分析。图9为沿线路2第1遍冲击破碎时,冲击载荷作用于各冲击点时土基中土压力分

布等值线。由图中可以看出,土基中最大土压力位置随冲击压路机的前进而变化,最大土压力一般位于冲击轮作用点正下方或附近。此外,随着冲击点变化,土基中最大土压力也发生变化,当冲击点作用在板边或板角时土基中土压力较大而冲击点在板中时,土压力最大值较小。

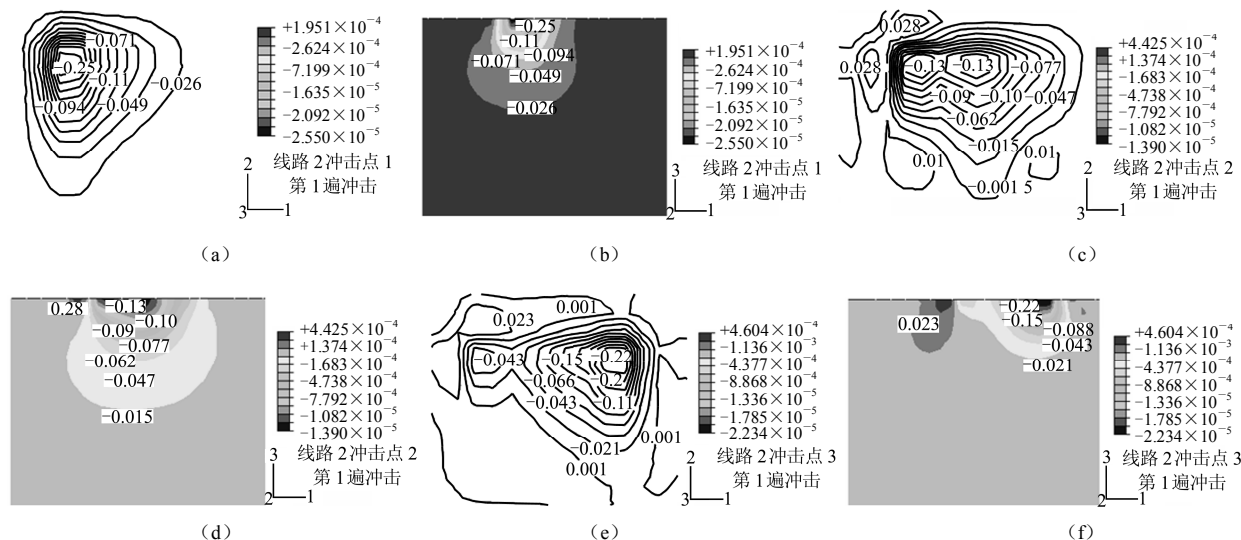


图9 第1遍冲击各冲击点对应的土基附加应力分布(单位:MPa)

Fig.9 Additional stress distribution of subgrade with first compaction time (unit: MPa)

为了便于分析冲击载荷作用后土压力在土基中的分布,将冲击压路机沿线路2破碎时第1冲击点冲击后0.01、0.05、0.2、0.4 s后土基中附加土压力沿土基深度分布绘于图10。

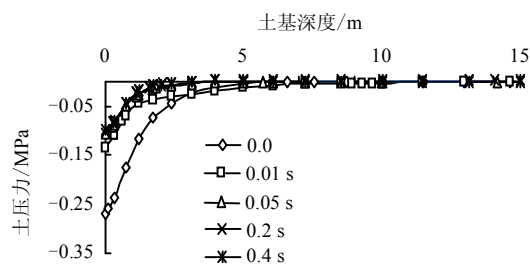


图10 线路2第1冲击点在不同冲击时间下土基附加土压力沿土基深度分布

Fig.10 The distribution of additional earth pressure with depth of subgrade along impact route 2 with different compaction times

由图可以看出,土基中土压力随时间变化很快。在冲击瞬间,土基中2 m深处的土压力大约为50 kPa,在5 m深处基本衰减到0;冲击0.01 s后,深2 m处的土压力迅速减小到30 kPa,但由于应力波的传播,5 m深处土压力略大于冲击瞬间0时刻

的土压力;冲击后0.05 s后,在土基深0.6 m处土压力大小约为50 kPa,2 m处基本衰减到0。

图11为线路2第1冲击点在不同冲击遍数时土基土压力沿土基深度变化。由图可见,随着冲击遍数的增加,土基中土压力逐渐增大,这与第3遍冲击碾压下路面混凝土开始破碎而导致传递到路基上的荷载逐渐增大不无关系。这也说明,冲击碾压改建水泥混凝土路面施工中,路面破碎在前,路基的补充压实在后到第3遍施工,冲击碾压破碎作用与路基压实作用开始同时并存,相互耦合影响。也可以看到,3遍后土压力有趋于稳定的趋势。

观察不同遍数下土压力的分布特征发现,土压力在土基分布中有一个拐点。在拐点之前,土压力变化显著;在拐点后面土压力变化趋缓;在土基深4 m处,随着冲击遍数的增大,土压力变化并不明显。这也说明,随着冲击遍数的增加,土压力增大仅限于土基一定深度内,约4 m左右,在4 m以下增长幅度不大。这个现象和这个距离对于确定涵洞的竖向安全距离有很重要的启示,也就是说,进行冲击碾压时,土压力剧烈变化的范围仅限于土基一定深度内,对于埋置在拐点以下深度的涵洞由于受到很小的影响,施工时能够保证其结构安全。

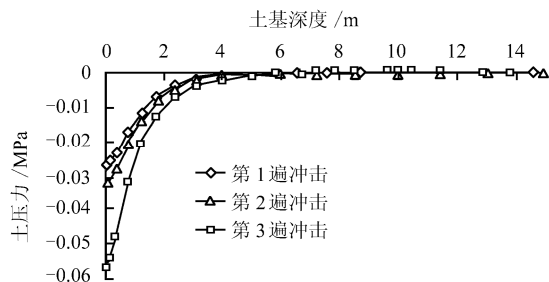


图 11 线路 2 第 1 冲击点在不同冲击遍数下土基附加土压力沿土基深度分布

Fig.11 The distribution of additional earth pressure with depth of subgrade along impact route 2 with different compaction times

7 结 论

(1) 土基在 3 个方向均承受压应力, 各冲击位置中, 板角荷载作用位置路基竖向变形最大值最大, 板中最小, 横缝和纵缝板边作用位置居前面二者之间。板中路线路基竖向变形总体小于板边路线。随着冲击压路机的前行, 土基表面最大竖向变形均发生在冲击轮作用的下方, 土基表面的竖向变形中心一直随冲击轮的前进而移动, 其最大值也随着冲击轮作用于板的位置不同而变化。

(2) 随着距冲击点距离减小, 土体竖向变形逐渐增大。在冲击作用下, 土体竖向变形有明显的波动与滞后现象; 冲击完后, 土体存在明显的残余变形。距离冲击荷载作用点的距离越小, 土体动力反应越接近载荷的性质。随着冲击遍数的增加, 土基最大竖向变形逐渐变大; 在第 3 遍冲击完后, 已经有了明显的塑性区。

(3) 土基中最大土压力位置随冲击压路机的前进而变化, 最大土压力一般位于冲击轮作用点正下方或附近。当冲击点作用在板边或板角时土基土压力较大, 而冲击点作用在板中时, 土压力较小。冲击后土基中土压力随时间变化很快,

(4) 随着冲击遍数的增加, 土基中土压力逐渐增大。这也说明, 冲击碾压改建水泥混凝土路面施工中, 路面破碎在前, 路基的补充压实在后, 到第 3 遍施工, 冲击碾压破碎作用与路基压实作用开始同时并存, 相互耦合影响。土压力在土基分布中有一个拐点, 在拐点之前, 土压力变化显著; 在拐点后面, 土压力变化趋缓。这说明随着冲击遍数的增加, 土压力增大仅限于土基一定深度内。

(5) 本文计算时土采用的是 Drucker-Prager/Cap 静力本构模型, 土模量为静模量, 在模拟冲击压实际情况时可能产生一定误差, 下一步将通过与现场试验对比进一步检验结果。

参 考 文 献

- [1] 唐学军, 苏卫国. 冲击压实旧混凝土路面路基的力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 804—808.
TANG Xue-jun, SU Wei-guo. Analysis on mechanical behaviors of existing cement-concrete pavement and soil subgrade in the process of impact compaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 804—808.
- [2] 唐学军, 苏卫国. 路基刚度对冲击压实混凝土路面力学行为的影响分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 121—126.
TANG Xue-jun, SU Wei-guo. Influence of subgrade modulus on the mechanical behavior of existing impact-compacted concrete pavement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(4): 121—126.
- [3] 刘莹, 黄晓明, 刘效尧. 冲击破碎混凝土路面的三维叠层模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 11—18.
LIU Ying, HUANG Xiao-ming, LIU Xiao-yao. 3-D overlay model of broken concrete pavement[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(1): 11—18.
- [4] 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, 2007, 35(2): 281—281.
SUN Xiao-liang, HU Chang-bin. Study on mechanical behaviors of existing cement-concrete pavement in the process of impact compaction with quadrilateral impactor roller[J]. *Journal of Fuzhou University*, 2007, 35(2): 281—281.
- [5] LEE J, FEMVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892—900.
- [6] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6: 773—782.
- [7] LUBLINER J, OVLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25: 299—329.
- [8] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27: 937—956.
- [9] 蔡袁强, 陈超, 徐长节. 强夯加固回填土地基的三维数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1108—1112.
CAI Yuan-qiang, CHEN Chao, XU Chang-jie. Three-dimensional numerical simulation of dynamic compaction of backfilled soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1108—1112.
- [10] 吕国仁, 崔新壮. 旧路改建高速公路中地基强夯效应测试与工艺参数分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2542—2546.
Measurement of dynamic compaction effect and analysis of technical parameters in reconstruction of old road to expressway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2542—2546.