

# 移动荷载作用下桩承式加筋路堤的动力特性

刘飞禹, 余 炜, 杨风云, 张孟喜

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

**摘要:**为了研究桩承式加筋路堤在移动荷载作用下的特性,采用 FLAC 3D 软件建立了移动荷载作用下道路的三维动力流固耦合分析模型,对桩承式加筋路堤和天然路堤在移动荷载作用下的竖向变形、桩土应力比、超孔隙水压力、加速度等进行了对比分析,并研究了不同轴载对路堤竖向变形的影响。分析结果表明:移动荷载作用下,桩承式加筋路堤通过桩体土拱效应和格栅张拉膜效应的联合作用,其路面竖向变形、桩土应力比、超孔隙水压力、加速度均比天然路堤的结果明显减小;随着轴载的增加,桩承式加筋路堤路面竖向变形不断增大。

**关键词:**移动荷载;桩承式加筋路堤;三维流固耦合;动力分析

中图分类号:TU435 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)03-0016-05

## Dynamic Behavior of Geogrid-Reinforced Pile-Supported Embankments under Moving Load

LIU Feiyu, YU Wei, YANG Fengyun, ZHANG Mengxi

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the dynamic behavior of geogrid-reinforced pile-supported embankments (GRPS) under moving load, a three-dimensional coupled mechanical and hydraulic model was built by FLAC 3D. The results from two cases including unreinforced and no-pile embankments, and geogrid-reinforced pile-supported embankments were presented. The behaviors of vertical displacement, pile-soil stress ratio, excess pore water pressure, and vertical acceleration under two cases were compared and discussed. Additionally, studies on the effect of speed and weight of the moving load were performed. It is indicated that the value of vertical displacement, pile-soil stress ratio, excess pore water pressure, and vertical acceleration of GRPS decrease evidently compared with those of unreinforced and no-pile embankment, which is caused by the soil arching effect and the reinforcement effect. It is also shown that the greater the axle load value is, the less the beneficial effect of GRPS on the vertical displacement. With the increase of the moving speed of the load, the vertical displacement increases.

**Key words:** moving load; geogrid-reinforced pile-supported embankments; three-dimensional coupled mechanical and hydraulic model; dynamic analysis

作为一种经济、有效的软土地基处理方法,桩承式加筋路堤已引起广泛关注<sup>[1-4]</sup>。Quang 等<sup>[5]</sup>研究了桩承式加筋路堤中设置斜桩对路堤整体稳定性的加强作用。Huang 等<sup>[6]</sup>研究了桩承式加筋路堤在静荷载作用下的承载力性能。Jenck 等<sup>[7]</sup>采用

二维模型试验和平面应变有限元分析,研究了影响桩承式加筋路堤的相关参数。芮瑞等<sup>[8]</sup>通过对刚性桩加固软土地基的对比研究,揭示了不同处理方式桩顶平面沉降变形的特性。但以上研究都是针对静力特性的。

收稿日期:2011-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808119);国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA032303-2)

作者简介:刘飞禹(1976-),男,博士,副教授,主要从事加筋土的动力响应研究,(E-mail)flyingrainliu@gmail.com。

随着高速公路和铁路的快速发展,动荷载作用下路堤的工作性能越来越受到重视<sup>[9-10]</sup>。但对桩承式加筋路堤动力特性的研究,目前主要集中在现场监测和试验方面,理论研究还很少。肖宏等<sup>[11]</sup>通过现场试验,研究了桩承式加筋路堤在机车荷载作用下的动应力、变形和加速度等的响应。Chebli 等<sup>[12]</sup>通过现场试验,研究了路基中横向和竖向加速度随时间及频率的变化规律。

然而,由于移动荷载作用下桩承式加筋路堤的现场试验比较复杂,影响结果的因素很多,导致目前很多现场试验的结论并不统一,有的甚至相互矛盾,因此有必要采用数值分析的方式进行系统的研究。

## 1 数值建模

### 1.1 几何模型及边界条件

图1为本文桩承式加筋路堤计算模型的尺寸及网格划分图。假设行驶中的汽车的中轴线与路面中轴线重合,轮距为2 m。利用对称性,路堤在横向取一半进行计算,综合考虑桩间距、车轴间距以及电脑的计算能力等因素,路堤纵向长度取12 m。模型的边界条件如图2所示,地下水位设于软土地基表面处。为了减小波在边界面处的反射所带来的计算误差,在模型底部设置静态边界,模型四周设置自由场边界。要模拟天然路堤(无桩无筋),只需在上述模型中去掉桩体与土工格栅单元即可。

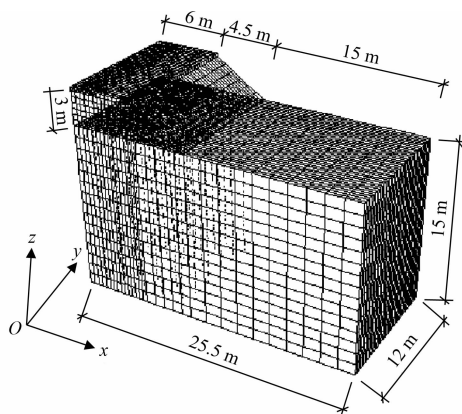


图1 三维计算模型示意图

另外,通过软件 Config fluid 命令,将模型设置为在渗流模式下进行完全流固耦合计算。在计算过程中,流体计算引起的孔隙水压力变化被传递给力学计算过程,引起相应的土体有效应力的变化;而在更新后的有效应力场中完成的力学计算所产生的土体体积应变,又被传递回流体计算模式,导致新的孔隙水压力的改变。

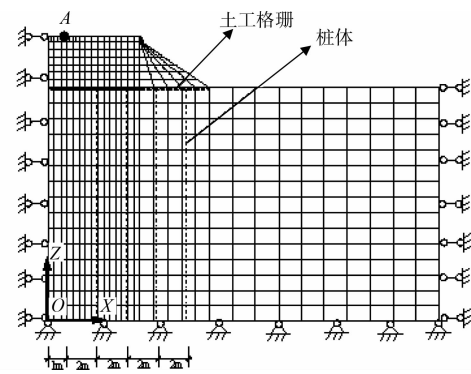


图2  $y=6\text{ m}$  剖面边界条件示意图

### 1.2 模型参数选取

采用线弹性模型来模拟面层,采用莫尔-库伦模型模拟路堤和软土地基,分别采用 geogrid 和 pile 结构单元来模拟土工格栅和桩体的特性。其中,pile 结构单元通过分别设置切向与法向耦合弹簧来模拟桩与土体间的粘结与摩擦特性;geogrid 结构单元通过在法线方向上与土体单元表面设置刚性连接,在切线方向设置切向弹簧,来模拟土工格栅与土体在法向上其节点随土体网格的运动而运动,在切向上与土体相互摩擦的界面特性。模型中桩长、桩径、桩间距分别为15、1、2 m,其中第一根桩从距离纵向对称面1 m的地方开始布置,土工格栅则被铺设在软土层顶面与路堤交界的位置。计算参数主要引自文献<sup>[13-15]</sup>,路堤层黏聚力为10 kPa,内摩擦角为 $40^\circ$ ;软土地基层的黏聚力为8 kPa,内摩擦角为 $15^\circ$ ,渗透系数为 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,其它参数如表1所示。

表1 模型计算参数

名称	厚(长)度/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
面层	0.3	4 134	0.30	249 0
路堤	3.0	50	0.33	200 0
地基	15.0	2	0.40	175 0
桩体	15.0	30 000	0.20	240 0
格栅	0.006	2 000	0.33	250 0

### 1.3 荷载形式

轮胎与路面的接触面简化为 $0.30 \text{ m} \times 0.22 \text{ m}$ 的矩形,轮胎压力取0.7 MPa,设计车速为 $V=60 \text{ km/h}$ 。移动荷载作用中心为距路堤对称中心1 m处,取距路堤中心1 m处所在网格为行车线路。设移动荷载起始点在 $y=0$ 处,随后沿 $y$ 正方向运动。为了模拟车辆移动荷载,采用阶跃式载荷进行加载。首先将荷载施加在行车线路起始端的第1个网格单元上,轮载持续时间为0.018 s,求解结束后将第1个单元上的荷载删除,向前移动一个单元再持续

0.018 s, 重复执行上述步骤直到最后一个单元为止。采用不同车速时, 只要改变载荷的持续时间即可。由于三维动力流固耦合计算量很大, 限于计算机硬件条件, 本文只模拟了移动荷载初次单程加载过程。选取路面中点 A 为监测点, 其坐标为 (1, 6, 18.3), 见图 2。为了确保计算结果的正确性, 采用本文所用建模方法, 对室内试验进行了对比验证<sup>[16]</sup>, 在此基础上再进行计算分析。

## 2 初次加载结果分析

### 2.1 竖向变形

图 3 给出了桩承式加筋路堤与天然路堤监测点 A 的竖向变形时程曲线。不论加筋与否, 在移动荷载作用初期, A 点均出现短暂的路面隆起现象, 但隆起变形非常小; 随着移动荷载不断靠近 A 点, 其竖向变形迅速增加; 当移动荷载正好作用在 A 点上时, 其竖向变形达到最大, 加筋与不加筋时分别为 1.39、1.71 mm; 此后随着移动荷载远离 A 点, A 点竖向变形不断减小并逐渐趋于稳定。至初次加载结束时, 桩承式加筋路堤与天然路堤路面 A 点的竖向变形分别为 1.05、1.57 mm。因此, 在初次加载结束时, 两者的弹性变形分别为 0.34、0.14 mm, 各自占最大竖向变形的 24.5%、8.2%。表明与天然路堤相比, 由于路堤土拱效应和土工格栅张拉膜效应的共同作用<sup>[16]</sup>, 桩承式加筋路堤不仅可以减小移动荷载作用过程中路面的最大竖向变形, 还增大了弹性变形在总变形中的比例, 使路面竖向变形在荷载作用结束后有较大程度的恢复, 这对于减小路面的工后沉降十分有利。

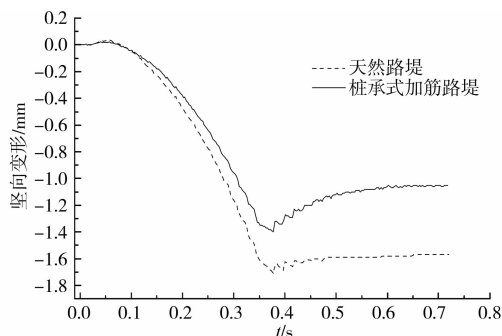


图 3 路面监测点 A 竖向变形时程曲线

### 2.2 桩土应力

图 4 给出了移动荷载作用下, 桩承式加筋路堤桩土应力比的时程曲线图, 其中桩顶应力取  $y=5$  剖面上离道路中心线 1 m 处的桩顶单元应力; 土的应力取  $y=6$  剖面上离道路中心线 1 m 处的桩间土体

单元应力。随着移动荷载逐渐靠近所监测的点, 桩土应力比及其波动幅值逐渐增大; 而后, 随着移动荷载逐渐远离所监测的点, 桩土应力比大小开始趋于稳定, 其波动幅值也不断减小。表明在移动荷载逐渐靠近监测点的过程中, 原本应由桩间土体承受的部分荷载, 通过土拱效应和张拉膜效应逐步转移到了桩顶, 桩体承载能力较大的特点得到了充分发挥, 体现了桩承式加筋路堤相对于天然路堤在承载力方面的优势。

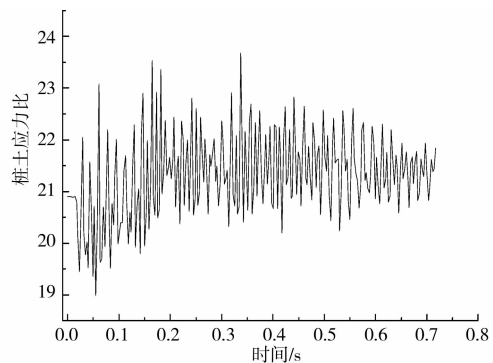


图 4 桩土应力比时程曲线

### 2.3 软土地基中的超孔隙水压力

图 5 给出了桩承式加筋路堤与天然路堤软土地基中, 超孔隙水压力沿深度方向的变化规律。所取各点为  $y=6$  剖面上, 距路堤中心 2 m 处软土地基中, 每隔 1 m 深度所在点的超孔隙水压力值。由于本文假设软土地基表面透水, 故路基表面处超孔压为 0。不论哪种路堤, 软土地基中超孔隙水压力沿地基深度方向都呈现先增大后减小的规律, 超孔压最大值都出现在距软土地基表面 1 m 左右深度处, 桩承式加筋路堤与天然路堤软土地基中超孔压最大值分别达到 347、530 Pa; 在各相同深度处, 桩承式加筋路堤软土地基中的超孔压值都小于天然路堤软土地基中的超孔压值, 表明桩承式加筋路堤桩间土体所受移动荷载的影响要小于天然路堤。

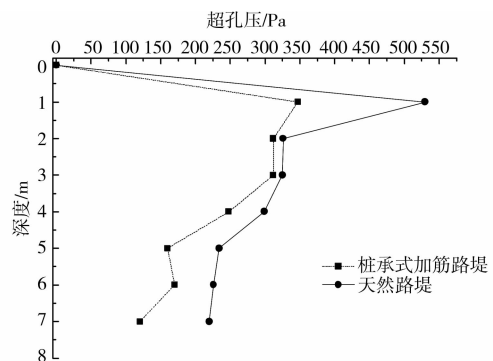


图 5 软土地基中超孔压随深度的变化曲线

## 2.4 加速度

图6(a)、(b)分别为天然路堤与桩承式加筋路堤中,路面A点正下方4m处B点的竖向加速度时程曲线。随着移动荷载逐渐靠近B点,其竖向加速度值逐渐增大,且当加载点作用至B点正上方时,向下竖向加速度达到最大值,天然路堤与桩承式加筋路堤分别达到 $0.22$ 、 $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。可见,移动荷载作用下,桩承式加筋路堤通过桩体和筋才的共同作用,有效减小了传递到软土地基中的竖向加速度。

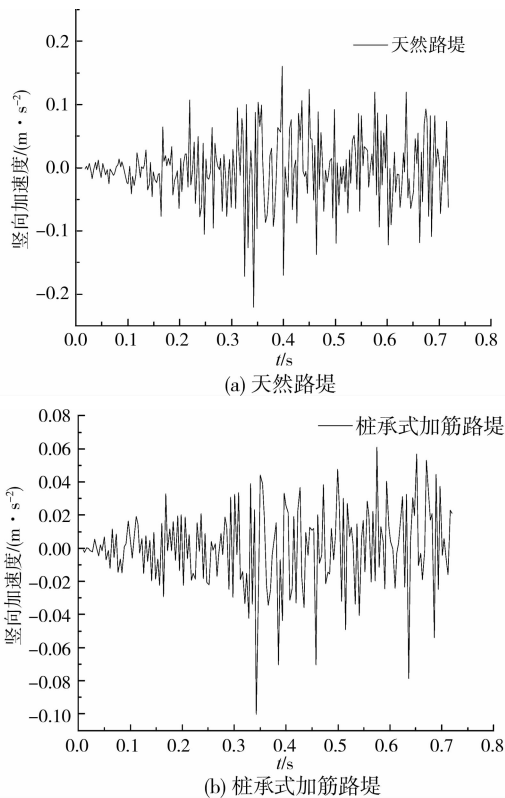


图6 软土层B点竖向加速度时程曲线

## 2.5 轴载对竖向变形的影响

图7给出了轴载分别为 $0.7$ 、 $1.4$ 、 $2.1$ 、 $3.5 \text{ MPa}$ 时,路面A点竖向变形随轴载变化的规律。除轴载变化外,其余各项参数均如前所述,取移动荷载作用过程中A点竖向变形的最大值进行比较。不论加筋与否,随着轴载值的不断增大,A点的竖向变形不断增加。而且轴载越大,相同轴载增幅所引起的竖向变形差越大,表明超载会使路面变形显著增大,体现了超载对路面破坏产生的严重影响。另外,同一轴载作用下,桩承式加筋路堤路面竖向变形都比天然路堤的小;且随轴载的增加,两者的变形差距越来越大。当轴载值为 $3.5 \text{ MPa}$ 时,桩承式加筋路堤与天然路堤的A点竖向变形分别为 $3.74$ 、 $5.34 \text{ mm}$ ,前者比后者减小了 $30.96\%$ 。表明桩承式加筋路堤对于减少超重引起的路面变形具有十分明显的效果。

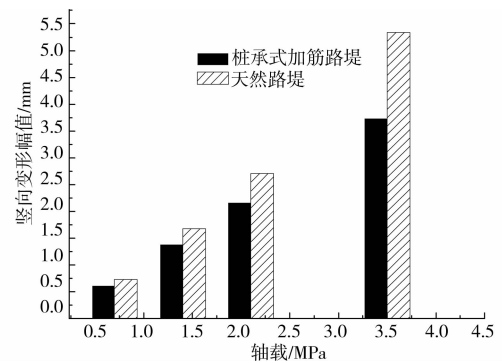


图7 轴载对路面A点竖向变形的影响

## 4 结语

采用FLAC3D软件首次建立了移动荷载作用下桩承式加筋路堤的三维流固耦合分析模型,并对桩承式加筋路堤的动力特性和影响因素进行了分析,得到了以下结论:

- 1) 移动荷载作用下,桩承式加筋路堤能有效减小路面竖向变形,增大弹性变形占路面总竖向变形的比例。
- 2) 随着移动荷载逐渐靠近监测点,桩土应力比及其波动幅值逐渐增大;随着移动荷载逐渐远离监测点,桩土应力比大小开始趋于稳定,其波动幅值也不断减小。
- 3) 桩承式加筋路堤中移动荷载引起的软土地基超孔隙水压力要小于天然路堤的情况。
- 4) 移动荷载作用下,桩承式加筋路堤可以有效减小软土地基中的竖向加速度。
- 5) 移动荷载作用下,随着轴载的增加,桩承式加筋路堤路面竖向变形不断增大。

## 参考文献:

- [1] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 44-53.
- [2] Hello B L, Villard P. Embankments reinforced by piles and geosynthetics—numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment [J]. Engineering Geology, 2009, 106(1): 78-91.
- [3] Deb K, Chandra S, Basudhar P K. Response of multilayer geosynthetic-reinforced bed resting on soft soil with stone columns [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(3): 323-330.
- [4] 陈仁朋, 徐正中, 陈云敏. 桩承式加筋路堤关键问题研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 7-12.

- CHEN Renpeng, XU Zhengzhong, CHEN Yunmin. Research on key problems of pile supported reinforced embankment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(2): 7-12.
- [5] Quang T S, Ghazi H, Patrick D B. A three-phase model for evaluating the seismic resistance of soils reinforced by a network of symmetrically inclined piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(4): 545-554.
- [6] Huang J, Han J. 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed column-supported embankment [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(4): 272-280.
- [7] Jenck O, Dias D, Kastner R. Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(3): 295-305.
- [8] 芮瑞, 夏元友. 桩-网复合地基与桩承式路堤的对比数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(5): 769-772.  
RUI Rui, XIA Yuanyou. Numerical simulation and comparison of pile-net composite foundation with pile-supported embankment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(5): 769-772.
- [9] Wang J C, Zeng X, Mullen R L. Three-dimensional finite element simulations of ground vibration generated by high-speed trains and engineering countermeasures [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2008, 11(12): 1885-1902.
- [10] Galv N P, Dom N J. Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the Córdoba-Málaga line [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(4): 641-657.
- [11] 肖宏, 罗强, 邓江东, 等. 混凝土夯扩桩和土工格室加固铁路基床试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2157-2162.
- XIAO Hong, LUO Qiang, DENG Jiangdong, et al. Test study of reinforcing railway subgrades by using concrete compacted base-enlarged piles and geogrids [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2157-2162.
- [12] Chebli H, Clouteau D, Schmitt L. Dynamic response of high-speed ballasted railway tracks: 3D periodic model and in situ measurements [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(2): 118-131.
- [13] Huang J, Han J, Oztoprak S. Coupled mechanical and hydraulic modeling of geosynthetic-reinforced column-supported embankments [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(8): 1011-1021.
- [14] Saad B, Mitri H, Poorooshasb H. 3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(5): 402-415.
- [15] Bergadoa D T, Teerawattanasuk C. 2D and 3D numerical simulations of reinforced embankments on soft ground [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(1): 39-55.
- [16] 刘飞禹, 余炜, 杨风云, 等. 桩承式加筋路堤三维动力流固耦合分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(3): 45-51.  
LIU Feiyu, YU Wei, YANG Fengyun, et al. 3D dynamic coupled mechanical and hydraulic analysis of geogrid-reinforced pile-supported embankments [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(3): 45-51.

(编辑 王秀玲)