

桩承式加筋路堤三维动力流固耦合分析

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:为了研究交通荷载作用下桩承式加筋路堤的动力特性,采用 FLAC 3D 软件建立了路堤的三维动力流固耦合分析模型,对无筋无桩、有筋无桩、无筋有桩、有筋有桩 4 种情况的路堤在动荷载作用下的竖向位移、水平位移、桩土应力比、超孔隙水压力、加速度等进行了计算分析,对比研究了 4 种情况下各自的特点,揭示了桩承式加筋路堤的作用机制。数值分析结果表明:交通荷载作用下,桩承式加筋路堤通过桩体土拱效应和格栅加筋效应的联合作用,其路面竖向位移、差异沉降及路堤堤趾的水平位移都比其它几种情况明显减小;桩土应力比在刚开始加载时最大,随后逐渐减小并趋于稳定;软土地基中的加速度幅值及加速度趋于稳定的时间都明显减小;软土地基中的超孔隙水压力值也远小于无筋无桩时的值。

关键词:交通荷载;桩承式加筋路堤;三维流固耦合;土拱效应

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)03-0045-07

3D Dynamic Coupled Mechanical and Hydraulic Analysis of Geogrid-reinforced Pile-supported Embankments

LIU Fei-yu, YU Wei, YANG Feng-yun, ZHANG Meng-xi

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

Abstract: In order to investigate the dynamic behaviors of geogrid-reinforced pile-supported embankments under traffic loading, three-dimensional coupled mechanical and hydraulic numerical simulations are conducted using FLAC 3D. Four cases are studied including unreinforced and no-pile embankments, reinforced embankments, pile-supported embankments, and geogrid-reinforced pile-supported embankments. The behaviors of vertical displacement, horizontal displacement, pile-soil stress ratio, excess pore water pressure and acceleration under four cases are analyzed. It is found that the vertical displacement, nonuniform settlement and horizontal displacement of geogrid-reinforced pile-supported embankments are smaller than those of other cases due to soil arching effect and reinforcement effect. Pile-soil stress ratio decreases with the increase of loading number. The crest value of acceleration and the time for acceleration to be steady are also smaller than those of other cases. The dissipation velocity of excess pore is quicker than that of unreinforced embankments.

Key words: traffic loading; geogrid-reinforced pile-supported embankments; three-dimensional coupled mechanical and hydraulic modeling; soil arching effect

桩承式加筋路堤具有施工方便、工期短、总沉降和不均匀沉降相对较小等优点,特别适用于需要快速施工或对沉降要求比较严格的工程^[1-2]。然而,桩

承式加筋路堤的理论研究还远落后于工程实践。

Low 等^[3]通过模型试验与理论分析比较了加筋和不加筋 2 种情况下,桩承式路堤中土工织物的传

收稿日期:2010-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808119);国家 863 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。

力机制与影响因素。Hewlett 等^[4]通过模型试验,分析了在正方形布桩的情况下,砂填料路堤中的空间土拱效应。曹卫平等^[5]通过模型试验,研究了桩土相对位移、路堤高度、桩梁宽度及水平加筋体强度等因素对桩土应力比及沉降的影响。费康等^[6]对静力条件下的桩承式加筋路堤进行了现场试验和数值分析的对比。Sa 等^[7]应用 FLAC 分析软件,对平面应变条件下的桩承式加筋路堤进行了分析,认为筋材的层数比其拉伸刚度对竖向位移的影响更大。Han 等^[8]采用 FLAC2D 软件,分析了平面应变条件下路堤高度和桩网模量对桩土应力比和格栅拉力的影响。Huang 等^[9]通过对桩承式加筋路堤的三维静力计算分析,认为由于桩网的共同作用,使得地基中的超孔隙水压力能更快的消散,加速了静力固结过程。芮瑞等^[10]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,同时对桩体的应力进行了对比研究。

然而,以上研究都没有考虑交通荷载作用下桩承式加筋路堤的动力特性,而大量的工程实践表明,交通荷载的作用对软土地区道路的变形特性往往有较大的影响^[11]。同时,目前的研究多采用二维计算模型,采用三维计算模型研究的还很少^[12]。基于此,本文采用 FLAC3D 软件,首次建立了路堤的三维动力流固耦合分析模型,通过对无筋无桩(未经处理的软土地基上的路堤)、有筋无桩(只采用土工格栅加筋的路堤)、无筋有桩(只采用刚性桩体加固的路堤)、有筋有桩(桩承式加筋路堤)4 种情况的路堤在动荷载作用下的特性的对比分析,揭示了桩承式加筋路堤的作用机制。

1 数值建模

1.1 几何模型及荷载条件

假设有一列汽车沿路面中轴线行驶,汽车的中轴线与路面的中轴线重合,两轮间距 2 m,车轮与地面的接触面为直径 0.3 m 的圆面,轮胎压力为 0.7 MPa。利用对称性,路堤在横向取一半进行计算,土工格栅则被铺设在软土层顶面与路堤交界的位置。综合考虑桩间距、车轴间距以及计算量等因素,路堤纵向长度取 2 m。通过对模型尺寸和不同网格划分情况的试算,在试算结果精度相差在 2% 以内的情况下,确定了如图 1 所示的计算模型。交通荷载的作用采用半波正弦荷载来模拟,荷载频率 2 Hz。由于三维动力流固耦合计算量很大,限于计算机硬件条件,只计算了 80 个循环的荷载作用,即荷载作用时间为 40 s(一次计算过程平均约花 5 d 时间)。

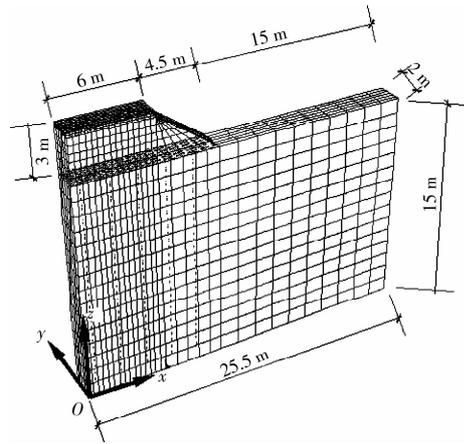


图 1 三维计算模型示意图

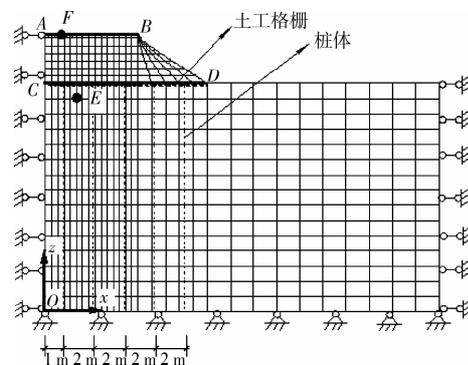


图 2 $Y=1\text{ m}$ 剖面上各点示意图

在静力计算时,将模型底部 3 个方向的变形完全约束住,而模型四周则仅约束相应的水平变形,在动力计算时则通过分别在模型底部设置静态边界和模型四周设置自由场边界来减少模型边界上波的反射。另外,在进行流固耦合计算时,假设地下水位线位于软土地基表面。考虑到路堤的对称性,将模型左侧边界及纵向前后两边界设置为不透水边界;由于右侧边界距离路基足够远,对计算结果影响不大,因此右侧边界也设为不透水边界;而对于模型底面,由于持力层的透水性一般较弱,因而也设定为不透水边界。所以,整个模型只将软土层顶面设置为透水边界。

1.2 模型参数选取

采用 geogrid 和 pile 结构单元来分别模拟土工格栅和桩体的特性,模型中桩长、桩径、桩间距分别为 15 m、1 m、2 m,其中第 1 根桩从距离纵向对称面 1 m 的地方开始布置。面层采用线弹性模型来模拟,路堤和软土地基则采用莫尔-库伦模型来模拟土体的弹塑性性质。计算参数主要引自文献^[13-15],路堤层的粘聚力为 10 kPa,内摩擦角为 40° ;软土地基层的粘聚力为 8 kPa,内摩擦角为 15° ,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	4134	0.33	1 750
路堤	3.0	50	0.33	2 000
地基	15.0	2	0.40	2 490
桩体	15	30 000	0.30	2 500
格栅	0.006	20 000	0.33	1 800

1.3 计算模型验证

桩承式加筋路堤的数值模拟过程主要分为3个步骤:首先是对天然软土地基进行初始应力平衡计算;其次,在建立桩和格栅结构单元后进行路基及面层的自重平衡计算,这两个步骤都是静力条件下的计算;最后在路基顶面施加相应的循环荷载,进行动力作用下的流固耦合计算。

由于目前尚缺少动力计算对比实例,因此只能退化到静力状态与现有资料进行对比验证,以确保静力计算结果的正确性。为此,首先采用本文的建模方法对文献[9]中的实例进行了计算。与文献[9]不同的是,本文中的桩体采用 pile 结构单元来模拟。模型中的计算参数都选用文献[9]的相关参数。通过计算得到了静力情况下桩顶竖向位移和软土地基底部超孔隙水压力随时间变化的关系曲线,并与文献[9]中给出的现场实测值及计算结果进行了对比,如图3、图4所示。

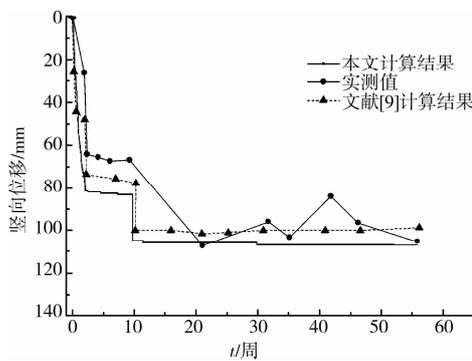


图3 桩顶竖向位移与时间关系曲线

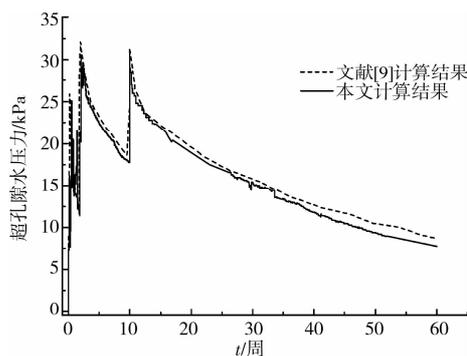


图4 超孔隙水压力与时间关系曲线

从图3中可以看到,本文所得到的桩顶竖向位移变化趋势与文献[9]的计算结果及其所给出的实测数据基本吻合;从图4中可以看出,软土地基底部的超孔隙水压力变化趋势与文献[9]的计算结果也基本一致。经过以上计算,验证了本文静力计算模型的正确性,也为后续的动力计算提供了可靠的基础。

2 计算结果分析

采用第1节所述的计算模型,对动荷载作用下流固耦合的桩承式加筋路堤进行了计算分析,部分研究结果如下。

2.1 竖向位移

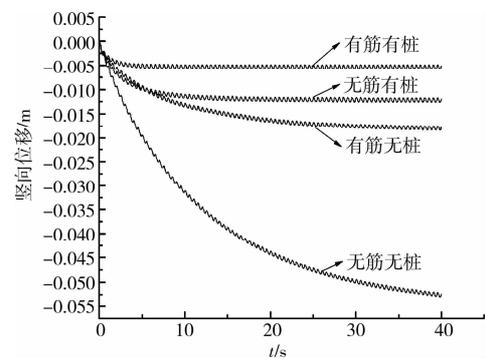


图5 F点的竖向位移时程曲线

图5给出了4种不同情况下,路面上循环荷载作用中心点F(见图2)的竖向位移时程曲线, t 表示荷载作用时间。由图可见,40s末无筋无桩路堤F点的沉降值为5.4cm。有筋无桩路堤,由于格栅与土体之间的相互作用,增强了路堤的整体强度,提高了路堤层扩散荷载的能力,使得40s末有筋无桩路堤F点的沉降值为1.8cm,比无筋无桩路堤减小了约66.7%。无筋有桩路堤,由于土拱效应的作用,能将部分路堤的自重和动荷载作用通过桩体传到持力层,40s末无筋有桩路堤F点的沉降值为1.3cm,比无筋无桩路堤减小了约75.9%。桩承式加筋路堤(有筋有桩),结合了前面2种地基处理方式的优点,在土拱效应和格栅加筋效应的共同作用下,40s末F点的沉降值仅为0.5cm,比无筋无桩路堤减小了约90.7%。

此外,从图中还可看出,桩承式加筋路堤在5s左右的时间里动力沉降基本趋于稳定,而无筋无桩的路堤在40s后,其竖向位移仍有增加的趋势。这表明桩承式加筋路堤对控制工后沉降具有非常显著的效果。

2.2 差异沉降

图6给出了 $Y=1$ 剖面上路面AB线(见图2)上各点在荷载作用40s后的沉降曲线。无筋无桩时,路面的差异沉降为3.5cm;有筋无桩时,差异沉降仅为0.5cm,比无筋无桩减小了85.7%;无筋有桩

时,差异沉降为 1.0 cm,比无筋无桩减少了 71.4%;有筋有桩时,路面的差异沉降为 0.5 cm,比无筋无桩减少了约 85.7%。比较有筋无桩和无筋有桩的结果还可以发现,在控制差异沉降方面,前者优于后者;在控制整体沉降方面,后者优于前者。

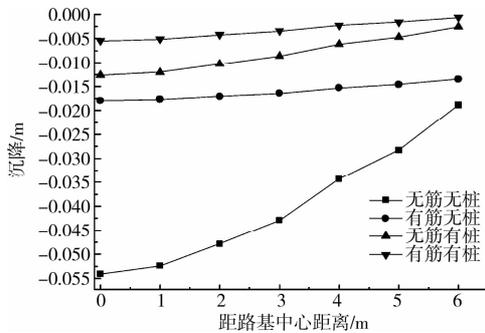


图 6 Y=1 剖面路面沉降示意图

图 7 给出了 Y=1 剖面上软土层顶面 CD 线(见图 2)上各点在荷载作用 40 s 后的沉降曲线。无筋无桩时荷载作用区下方软土的沉降最大,为 4.1 cm,路堤堤址附近软土的隆起量也是最大的,达到了 2.4 cm,差异沉降为 6.5 cm;有筋无桩时,由于格栅张拉膜效应的约束作用,荷载作用区下方软土的沉降减少到了 1.7 cm,堤址附近的隆起量为 1.0 cm,比无筋无桩时分别减少了约 58.5%和 58.3%,差异沉降减少了约 58.4%;无筋有桩和有筋有桩时,由于桩体对地基的加固作用,使得路堤堤址附近几乎没有发生软土的隆起现象。无筋有桩和有筋有桩时,软土层的最大沉降分别为 1.0 cm 和 0.4 cm,比无筋无桩分别减少了约 75.6%和 90.2%,差异沉降比无筋无桩分别减少了约 84.6%和 93.8%。可见,桩承式加筋路堤在减小沉降和差异沉降方面具有非常明显的效果。

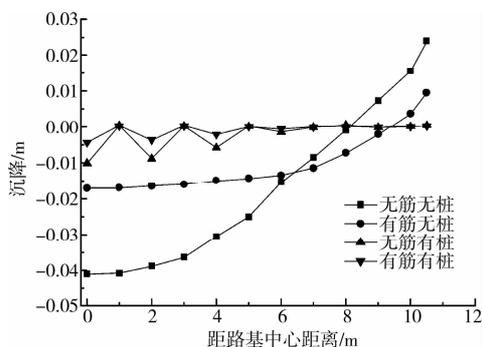


图 7 软土地基顶面沉降示意图

2.3 水平位移

图 8 为路堤堤址 D 点(见图 2)在动荷载作用过程中的水平位移时程曲线。无筋无桩时,D 点水平位移随荷载作用次数增大而增大,在荷载作用 40 s 后达到 28.2 mm,且仍有继续发展的趋势;无筋有桩情况下,由于桩体加固了软土地基,减小了土体沿水

平方向的位移,因此在 40 s 末 D 点的水平位移比无筋无桩时减少了约 80%;有筋无桩情况下,由于格栅和土体之间的摩擦作用约束了土体水平位移的发展,因此 40 s 末其水平位移只有 1.3 mm,比无筋无桩减少了约 93%;有筋有桩情况下,在土工格栅和桩体的共同影响下,D 点的水平位移仅为无筋无桩条件下的 5%,表明桩承式加筋技术对减小路堤的水平位移也有明显的效果。

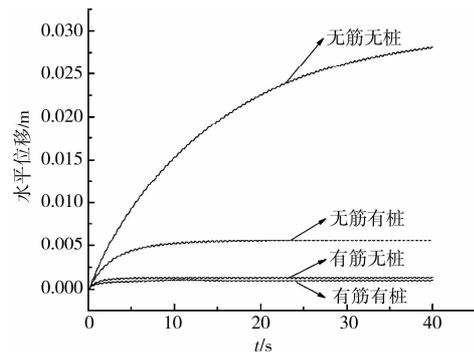


图 8 坡脚 D 点水平位移时程曲线

2.4 桩土应力

图 9 给出了无筋有桩和有筋有桩情况下桩土应力比的时程曲线,其中桩顶应力和土体应力分别取 y=1 剖面上距道路中心线 1 m 处的桩顶单元应力和距中心线 2 m 处的桩间土体单元应力。2 种情况下桩土应力比都是刚开始加载时最大,随后逐渐减小并趋于稳定。无筋有桩时,桩土应力的初值为 8.9,趋于稳定状态后桩土应力比的上限值为 8.4,下限值为 7.9;有筋有桩情况下,桩土应力的初值为 11.4,比无筋有桩时的值大 28.1%,趋于稳定状态后桩土应力比的上限值为 10.6,比无筋有桩时的值大 35.7%,下限值为 10.1,比无筋有桩时的值大 27.8%。桩承式加筋路堤中桩土应力比较无筋有桩时大,意味着桩承式加筋路堤通过桩体和格栅的相互作用,刚性桩体分担了更多的原本应由桩间土体承受的荷载,这有利于减小路堤的沉降和不均匀沉降。

图 10 给出了桩承式加筋路堤在动力荷载作用 40 s 后,Y=1 剖面上路堤的竖向应力等值线图。从图中可以看出,两桩之间的路堤土竖向应力等值线呈现出连续的拱形,而在各桩桩顶则出现了不同程度的应力集中现象。表明在动荷载作用下,桩承式加筋路堤中的土拱效应依然存在,并将原本由桩间土体承受的部分荷载转移至各桩桩顶,从而减小了路堤的整体沉降。土拱效应越明显,桩体分担的荷载越大,桩土应力比也越大。由于交通荷载只在局部区域发生作用,导致路堤出现不均匀沉降,因此在研究静力情况下的土拱效应时具有重要意义的“等沉面”在动荷载作用下没有出现。

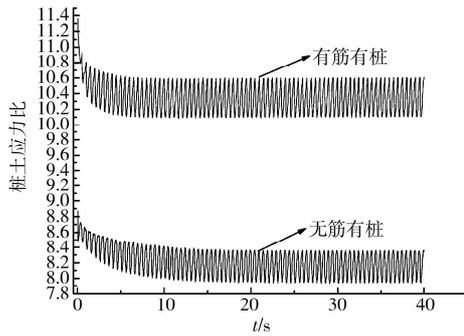


图 9 桩土应力比时程曲线

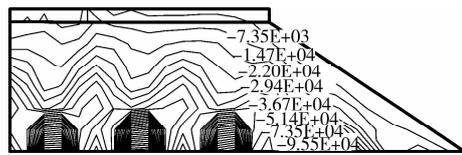


图 10 桩承式加筋路堤的竖向应力等值线图

2.5 软土地基中的超孔隙水压力

图 11 给出了 E 点(见图 2)的超孔隙水压力随循环荷载作用次数变化的曲线图。随着循环荷载作用次数的增加,4 种情况下的超孔隙水压力值不断增长并逐渐趋于稳定,40 s 后其值分别达到了 6.2 kPa、4.1 kPa、3.2 kPa、2.9 kPa。对于有筋无桩的情况,由于土工格栅的加筋作用,减小了传递到软土层的应力,因此 E 点的超孔隙水压力比无筋无桩情况下减小了约 33.9%。对于无筋有桩的情况,由于土拱效应的作用,使得桩间土承受的动应力大幅减小, E 点的超孔隙水压力比无筋无桩情况下减小了约 48.4%。而对于有筋有桩情况,由于土工格栅的张拉膜效应和桩体土拱效应的联合作用,使得 E 点的超孔隙水压力比无筋无桩情况下减小了约 53.2%,可见,在循环荷载作用下,桩承式加筋路堤可以减小软土地基中超孔隙水压力的积聚。

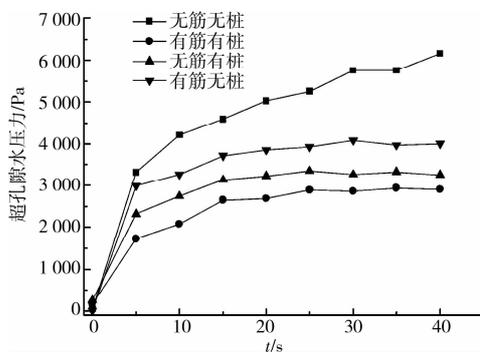


图 11 超孔隙水压力的时程曲线

2.6 地基中的加速度

图 12—15 给出了地基中 E 点(图 2)的加速度时程曲线。从图中可以看出,4 种情况的加速度幅值都有一个先增大后减小的过程。这是因为在荷载作用初期,传递到 E 点的荷载有个增大的过程,因

此初期加速度幅值逐渐增大;在动荷载作用一段时间后,路堤土体被压密,强度逐渐增大,能将路面荷载扩散传递到更大的范围,从而减小了传递到 E 点的动应力,其加速度也随之减小。

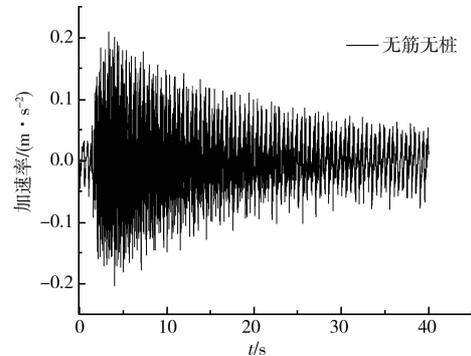


图 12 无筋无桩时 E 点加速度时程曲线

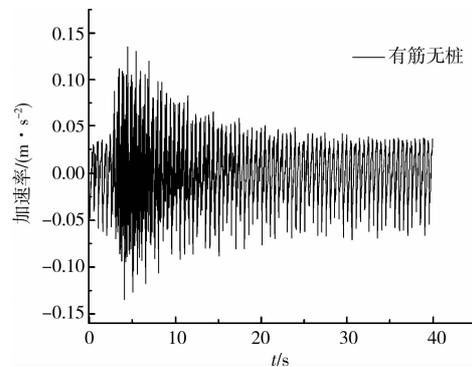


图 13 有筋无桩时 E 点加速度时程曲线

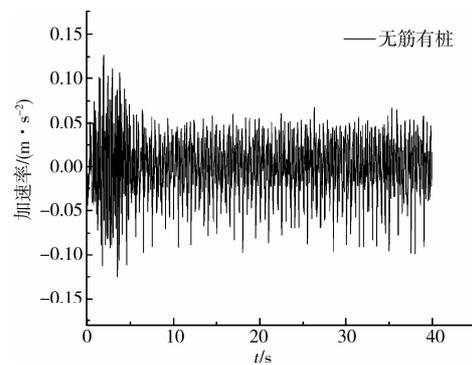


图 14 无筋有桩时 E 点加速度时程曲线

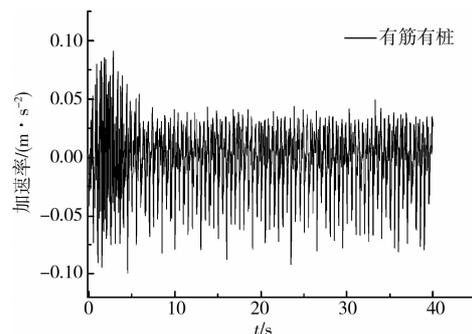


图 15 有筋有桩时 E 点加速度时程曲线

比较图 12—15 还可以看出,无筋无桩时,加速度的最大值为 $0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,在 35 s 左右达到稳定;有筋无桩时,由于土工格栅与土体的相互作用,限制了加速度沿接触面向软土地基内传递,其加速度的最大值为 $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,比无筋无桩时减小了约 33.3%,并在 28 s 左右趋于稳定。对于无筋有桩的情况,由于桩对土体的增强效应和土拱效应的共同作用,加速度的最大值为 $0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,比无筋无桩时减小了 38.1%,在 18 s 左右趋于稳定。而对于桩承式加筋路堤,在格栅和桩体的共同作用下,加速度的最大值仅为 $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,比无筋无桩时减小了 57.1%,在 8 s 左右已趋于稳定,是 4 种情况中最快达到稳定状态的。

3 动力计算与静力计算的对比

图 16 给出了分别采用三维动力流固耦合方法与静力法计算时,桩承式加筋路堤路面上荷载作用中心点 F (见图 2)的竖向位移时程曲线,其中轮胎压力分别取 0.2 MPa 、 0.7 MPa 、 1.2 MPa 。静力法采用的荷载作用面积与动力法相同,荷载的大小采用动荷载的幅值,计算中只进行力学计算,不进行流固耦合计算。从图中可以看到,当轮胎压力较小时,如为 0.2 MPa 和 0.7 MPa 时,三维动力流固耦合计算得到的竖向位移值(40 s 末)小于采用静力法得到的结果;而当轮胎压力较大时,如为 1.2 MPa 时,三维动力流固耦合计算得到的竖向位移值(40 s 末)要大于采用静力法得到的结果。表明当路面动力荷载较小时,采用静力方法进行设计计算是安全的;但如果路面荷载较大,如出现超载时,静力的计算结果小于动力的计算结果,此时宜采用动力分析的方法来评估超载对路面变形的影响。

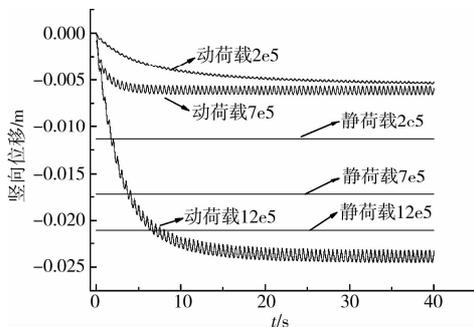


图 16 三维动力流固耦合与静力法对比结果

4 结 语

1) 桩承式加筋路堤通过土拱效应和加筋效应的共同作用,明显减小了路面沉降、差异沉降以及路堤

的水平位移。

2) 循环荷载作用下,桩承式加筋路堤中的土拱效应依然存在;桩土应力比在刚开始加载时最大,随后逐渐减小并趋于稳定。

3) 桩承式加筋路堤可以显著减小软土地基中超孔隙水压力的积聚。

4) 桩承式加筋路堤在格栅和桩体的共同作用下,减小了软土地基中的加速度幅值,同时加速度趋于稳定所需时间也大大减少。

5) 当路面荷载较小时,采用静力的方法计算交通荷载作用下的路面变形是安全的;但是当荷载较大时,静力的计算结果偏小,宜采用动力的方法进行分析。

参考文献:

- [1] 陈仁朋, 贾宁, 陈云敏. 桩承式加筋路堤受力机理及沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4358-4367.
CHEN-REN-PENG, JIA NING, CHEN YUN-MIN. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4358-4367.
- [2] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(5): 611-623.
- [3] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11): 1917-1938.
- [4] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [5] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 436-441.
CAO WEI-PING, CHEN REN-PENG, CHEN YUN-MIN. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 436-441.
- [6] 费康, 刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1004-1012.
FEI KANG, LIU HAN-LONG. Field test study and numerical analysis of a geogrid-reinforced and pile-supported embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1004-1012.
- [7] SA C, PALMEIRA E, DELLABIANEA L, et al. Numerical analysis of reinforced embankments on soft soils [C]//Proceedings of the Landmarks in Earth

- Reinforcement, swets and Zeitlinger, F, 2001.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 YUAN-YOU. Numerical simulation and comparison of pile-net composite foundation with pile-supported embankment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(5):769-772.
- [11] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2002, 128(11): 907-916.
- [12] 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.
- [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] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节, 等. 交通荷载作用下软基加筋道路加筋效果分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(11): 1659-1664.
LIU FEI-YU, CAI YUAN-QIANG, XU CHANG-JIE, et al. Parametric study of reinforced pavements on soft clay under traffic loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(11): 1659-1664.

(编辑 王秀玲)

(上接第44页)

- [6] YILMAZ I. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat—Turkey) [J]. *Computer & Geosciences*, 2009, 35:1125-1138.
- [7] BAEZA C, COROMINAS J. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2001, 26:1251-1263.
- [8] OH H J, LEE S. Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, DOI: 10.1007/s12665-010-0579-2
- [9] KANUNGO D P, ARORA M K, SARKAR S, et al. A fuzzy set based approach for integration of thematic maps for landslide susceptibility zonation [J]. *Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2009, 3(1):30-43.
- [10] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [11] LIN Y H. Application of neural networks to landslide susceptibility analysis [D]. Taiwan: National Central University, 2003.
- [12] DAI F C, LEE C F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong [J]. *Geomorphology*, 2002, 42:213-228.
- [13] OHLMACHER G C. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides [J]. *Engineering Geology*, 2007, 91:117-134.
- [14] 李媛. 区域降雨型滑坡预报预警方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- [15] 朱建平. 应用多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] 赵衡, 宋二祥. 滑坡灾害空间预测结果的评价方法[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(5):36-41.
ZHAO HENG, SONG ER-XIANG. Assessment method for results of the spatial prediction of regional landslides [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(5):36-41.

(编辑 王秀玲)