

土工格栅对桩承式路堤土拱效应影响的数值模拟研究

夏璐, 艾英铎

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过 plaxis8.5 有限元软件, 研究大主应力偏转角度的变化, 模拟出有无土工格栅时土拱效应的形成及变化规律, 分析了填土高度、桩间距、填土的力学参数和本构模型对土拱效应的影响。研究表明: 格栅的作用是减弱土拱效应和其本身张拉膜效应以及与垫层之间的摩擦咬合三种作用的叠加; 路堤填土的塑性是产生土拱的又一条件; 主应力偏转发生在填土初期, 达到一定高度时拱达到稳定, 且拱轴线并不是由桩顶直接出发, 而是在桩顶形成抛物面形的应力核区, 拱上应力偏转大致垂直于此抛物面。

关键词: 桩承式路堤; 土拱效应; 数值模拟; 土工格栅

中图分类号: U416.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0162—06

Numerical Simulation for Influence of Geogrid on Soil Arching Effect of Elevated Pile-Supported Embankments

XIA Lu, AI Ying-bo

(Geotechnical Engineering Research Institute of Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Through the plaxis 8.5, the changes of principal stress angle are studied, the forming process and change rules of the soil arching effect whether there is geogrid loading or not are simulated, and the influencing factors to soil arch, such as the height of fill, the space between piles, the mechanical parameters and constitutive model of fill, are analyzed. The study results show that geogrid is the composition result of three effects, such as the geomembrane effect itself, decreased soil arching effect and the friction occlusion effect between cushion layer and geomembrane itself; The plasticity of embankment filling is another condition for generating soil arch; The principal stress deflection occurs in its early stage, when reaching to a certain height, the deflection angle is unchanged, and the arch becomes stable. In addition, the arch axis does not set out directly from the pile block, by contrast, the stress area of paraboloid is shaped on the pile block, and the stress deflection on the arch is approximately perpendicular to the paraboloid.

Keywords: pile-supported embankment; soil arching effect; numerical simulation; geogrid

0 引言

桩承式路堤包含竖向增强体和水平增强体, 其主要机理是通过竖向增强体的土拱效应将路堤荷载大量的转移到桩顶; 水平增强体一方面通过自身的张拉膜效应转移荷载到桩顶, 一方面通过影响土拱效应^[1]控制荷载的转移。在这两种因素的作用下, 若转移荷载过多, 没发挥桩间土承载力则不经济; 转移荷载过少则不安全。文献[2]对单桩进行数值模拟分析格栅上下的桩土应力比, 认为格栅大大降低

了土拱效应。文献[3]只考虑桩土模量的差异, 认为格栅对土拱影响甚微。文献[4]变换桩间距与桩径的比值对土拱效应的影响, 未考虑水平加筋体的作用。文献[5]不考虑格栅情况下模拟出土拱的临界高度。文献[6]改变格栅的参数得出格栅对桩土应力比的影响。连峰^[7]通过模型试验和数值模拟, 认为桩帽边缘处格栅应力最大, 桩间距过大过小对加筋体的发挥都是不利的。贾宁^[8]将单桩简化为圆柱体, 简化水平加筋体为抛物线, 得到格栅受力的解析式。陈毅^[9]综合分析了格栅对路堤工作性状的影响

和格栅对不均匀沉降的作用。俞缙^[10]分析了内摩擦角、桩土模量对格栅上下桩土应力比的影响。在此基础上,本文通过 plaxis8.5 有限元软件,研究桩承式路堤中大主应力偏转角度的变化,定性的得到土拱的形成过程和变化规律,以及格栅两种作用的发挥程度。

1 有限元模型与参数

1.1 模型的建立

模型路堤填土高 5 m,路面宽度 24 m,坡度为 1:1.5,碎石垫层 0.5 m,桩帽 1 m,桩直径 0.5 m,桩长 15 m,格栅铺设在垫层中间处,软土下为一层较好土体。地下水位在地基表面下 2 m 处,边界条件为左右两侧无水平位移的不透水边界,底部边界完全固定的透水边界,地基表面为固结排水边界。各接触面均采用 goodman 单元来表示接触作用,通过设置‘虚拟厚度’即界面强度折减因子来模拟不同材料界面间的弹性变形。有限元网格生成过程中,采用局部加密,各材料类组划分为三角形 15 个节点单元来模拟结构的反应以及相互作用。模型如图 1 所示。

1.2 模型参数的选择

在 plaxis 软件中,材料模型包括线弹性模型、摩

尔库伦模型、土体硬化模型、软土蠕变模型、节理岩体模型^[11]。线弹性模型模拟刚度较大的材料包括 E 、 μ 两个参数;摩尔库伦模型为一阶模型用于问题的初步分析,包括模量 E 、泊松比 μ 、内摩擦角 ϕ 、粘聚力 c 、剪胀角 ψ 五个参数;软土蠕变模型用于正常固结的软粘土,模拟地基的沉降问题包括修正压缩系数 λ^* 、修正膨胀系数 K^* 、修正蠕变指数 μ^* 、内摩擦角 ϕ 、粘聚力 c 、剪胀角 ψ 六个参数。本文中各材料参数和模型选择如表 1。桩采用线弹性模型,模量为 3×10^7 kPa,格栅利用软件中 Geogrid 格栅单元来模拟,材料特性是只能承受轴向拉力,其轴向弹性刚度 $EA = 2\ 400$ kN/m,并考虑其与垫层之间的接触作用。

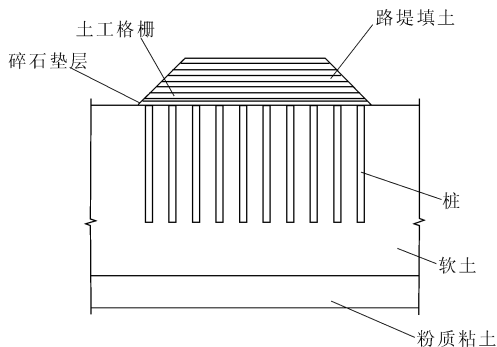


图 1 数值模拟模型图

表 1 土层参数及其参本构模型

| 土的类型 | 模型 | γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | γ_{sat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | E /kPa | μ | ϕ | c /kPa | 界面折减 强度 |
|------|--------|--|---|-------------|-------|--------|-------------|------------|
| 路堤填土 | 摩尔库伦模型 | 16.0 | 21 | 30000 | 0.30 | 28.0 | 7 | 0.90 |
| 碎石垫层 | 摩尔库伦模型 | 19.0 | 20 | 80000 | 0.15 | 41.0 | 1 | 0.85 |
| 粉质粘土 | 摩尔库伦模型 | 18.0 | 20 | 5200 | 0.30 | 9.5 | 30 | — |
| 淤泥质土 | 软土蠕变模型 | 16.8 | 20 | — | — | 31.0 | 8 | — |

注:考虑蠕变模型时淤泥质土 $K^* = 0.15, \mu^* = 0.03, \lambda^* = 0.28$

本文对以下几种情况进行了模拟:① 模拟填土高度为 5 m 桩间距 2 m 有无格栅时的土拱效应,主要分析分级加载土拱效应的形成过程及变化趋势。并改变格栅和垫层之间的摩擦系数比较格栅摩擦力对土拱效应的影响;② 填土高度为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 时的土拱效应;③ 桩间距为 2 m、3 m、4 m、5 m、6 m 时的土拱效应;④ 改变路堤填土的力学参数及本构模型对比其土拱效应;⑤ 改变桩帽尺寸研究其土拱效应。

2 计算结果分析

2.1 土工格栅对土拱形成过程的影响分析

将 5 m 填土高度 2 m 桩间距有无格栅的模型分

级加载,对其每施加一层填土时的大主应力偏转角度、桩和桩间土应力变化、桩土沉降差进行分析。

从已模拟出的拱轴线拱脚、拱腰、拱顶处选出三个点如图 2、图 3,分别归纳出这三个点在每一级加载后的大主应力偏转角度及其变化,定性的说明土拱的形成过程。以水平方向为大主应力角的基线则填筑过程开始时各点的角度均为 90° ,当达到第 30 步即垫层铺设完成时,大主应力开始发生偏转,且偏转过程中出现‘阶梯形’变化,说明拱在加载的瞬间发生突变。拱脚的角度变化明显大于拱腰两点角度的变化,且先于拱腰发生,也先达到稳定的偏转状态,稳定后拱腰的偏转大于拱脚的偏转。由此可知,某点的大主应力偏转是由这一点之上的相对填土高

度决定的,所以拱脚处先稳定;完整拱轴线并不是由曲率相同的圆弧形拱组成,而是由不同曲率的曲线组成且越靠近桩顶平面曲率越小。

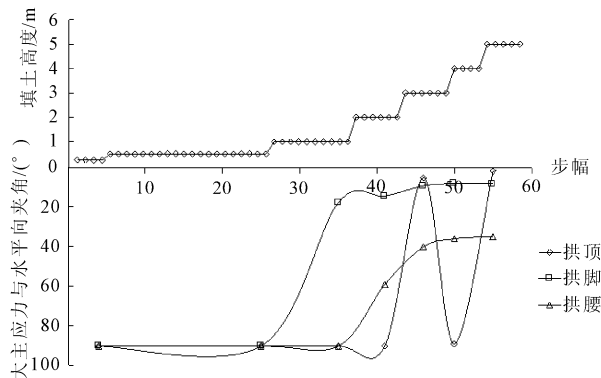


图 2 有格栅时大主应力角度变化曲线

对比有无格栅两个模型,观察路堤内部的应力偏转情况,稳定后无格栅时偏转迹象明显,有无格栅时拱腰处大主应力偏转角度分别为 53°、68°,说明有格栅时产生的拱高较低,经观察有无格栅时产生拱高分别约为 1.5 m、1.8 m。由此可知,从拱形上观察,相同填土高度时,有格栅的沉降差先达到稳定,无格栅的更容易产生土拱效应,拱效应更强。

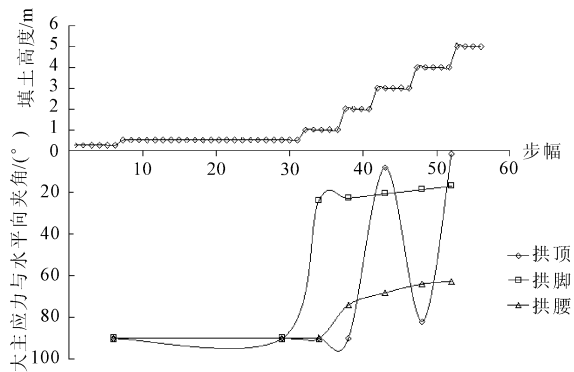


图 3 无格栅时大主应力角度变化曲线

进一步比较有无格栅时的桩和桩间土的应力(图 4),铺设格栅之后,桩顶应力增大桩间土应力减小,若格栅的存在减弱了土拱效应,则桩顶应力应减小,那么有格栅时较少的荷载转移到桩上,但事实相反。这是由于格栅有两个作用,一是降低不均匀沉降,减小土拱效应;另一方面是格栅平铺在桩和桩间土之上,路堤荷载一部分通过张拉膜效应转移到桩顶,使桩顶应力大量增加,且这种作用较大。其次,桩顶增大的应力大于桩间土减小的应力,是因为格栅和垫层之间的摩擦作用和桩之间的侧向挤压也承

担了一部分竖向荷载。

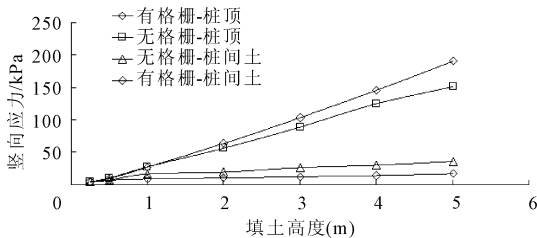


图 4 有无格栅时桩顶、桩间土应力变化曲线

将格栅和垫层之间的界面折减强度设置为 1,即不考虑格栅和垫层之间的摩擦作用。模拟后发现桩土应力比增大。这是由于格栅和垫层之间摩擦力的存在,其竖直向上的分力减小了桩间土的受力,且这种情况下张拉膜效应发挥主要作用,桩顶应力增大,桩土应力比增大。

2.2 不同填土高度下有无格栅桩土应力变化分析

采用以上模型,分别模拟出了在填土高度为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 桩间距 2 m 有无格栅时的土拱效应。观察分级加载应力偏转结果可知:随着填土高度的增加,拱高随之增高,拱效应随着高度增加增强。当填土高度继续增加,产生稳定的拱且在大于 1.5 倍桩间距的填土内部大主应力偏转角度较小。加载结束时,在 1 m 高度内产生抛物线形的拱,大于此高度产生圆弧形拱,拱两侧的大主应力方向向两侧偏转大致指向拱脚位置,拱顶处大主应力发展成与桩顶平行,与上文结果一致。且发现拱并不是直接作用在桩顶上,而是在桩顶由于应力集中,形成一个形如抛物面的集中区,形成拱的应力由此抛物面上发出,大致呈垂直状态。

根据 $n = \sigma_p / \sigma_s$ (σ_p 为桩顶应力, σ_s 为桩间土应力)计算每种填土高度下有无格栅时的桩土应力比如图 5,也证明了上文结论,格栅的存在降低了不均匀沉降但并没有影响桩土应力比的变化。且在 3 m 填土范围内随着高度增加土拱效应增强,大于此范围之后土拱逐渐稳定。

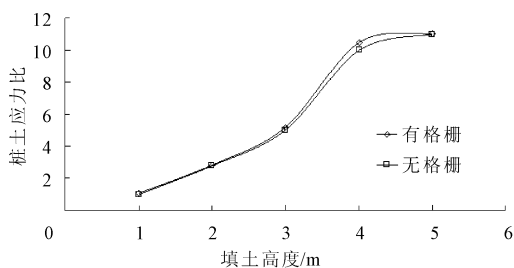


图 5 不同填土高度下有无格栅桩土应力比变化曲线

计算每层填土高度下桩和桩间土沉降差分别为:21 mm、32 mm、49 mm、52 mm、54 mm,分析发现填土高度在 3 m 内增加时,桩土沉降差增大,在 4 m 之后沉降差变化较缓,因此土拱效应与填土高度并不是正比关系,填土高度过高会使桩和桩间土都承担过多的荷载而不利于稳定。

2.3 桩间距对土拱效应的影响

取桩间距为 2 m、3 m、4 m、5 m、6 m 填土高度为 3 m 的模型进行数值模拟。观察路堤填土大主应力偏转情况,随着桩间距的增大,主应力偏转变强即拱轴线更明显,拱高也逐渐变高,在桩间距为 5 m 时填土内有不完整土拱产生,当桩间距增大到 6 m 时,只有垫层内的主应力发生了偏转,填土中几乎没有主应力偏转拱效应迅速减弱。对比各桩间距下的沉降差,当桩间距为 2 m、3 m、4 m、5 m、6 m 时稳定后桩土沉降差分别为:4.352 mm、14.553 mm、22.032 mm、30.440 mm、44.240 mm,沉降差增大,而桩土沉降差是土拱效应产生的直接因素,若从沉降的角度出发则土拱效应跟桩间距成正比关系,因此进一步分析地基表面处桩顶(图 6)和桩间土(图 7)上的应力变化曲线:

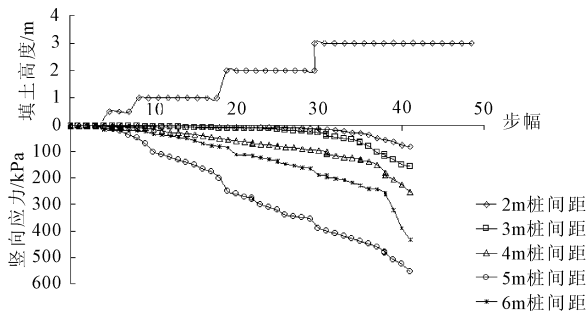


图 6 地基表面处桩顶应力变化曲线

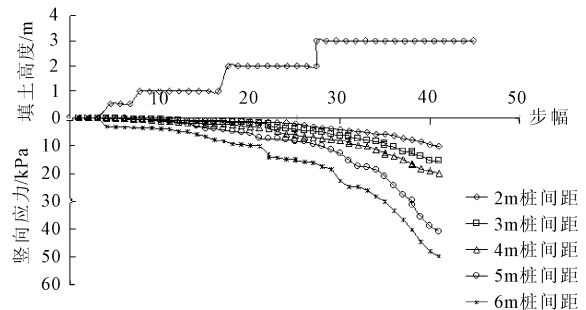


图 7 地基表面处桩间土应力变化曲线

从图 6、图 7 曲线中可以看出:随着桩间距的增大,桩顶和桩间土应力随之增大且桩顶应力增加的速度大于桩间土的应力增加速度,在施加填土的瞬

间应力均发生突变,其后随之稳定。这是因为当桩间距较小时,布桩的数量比较多,分配到单桩上的应力较小。在 6 m 桩间距时,桩顶应力反而减小,这是由于桩间距的增大,一方面因为桩的数量减小;另一方面由于土拱效应的增强,所以桩上的应力大幅度增加。而当桩间距过大,土拱效应降低,桩间距 6 m 时的桩顶应力小于 5 m 时的桩顶应力,此时,会有一部分未转移的荷载直接作用在桩间土上,因此桩间土受力后发生更多的沉降,导致桩土沉降差增大。

对比有无格栅时不同桩间距下的桩土应力比如图 8 所示:在桩间距较小时,格栅并不能发挥其转移荷载的作用,所以有无格栅时应力比均较小,随着桩间距的增大,桩顶荷载大量增加,桩间土荷载微量增加,桩土应力比增大且有格栅的增大幅度大于无格栅的,当桩间距过大,格栅的作用反而降低,桩间土承担了更多的荷载。因此桩间距过大会降低复合地基的承载能力。

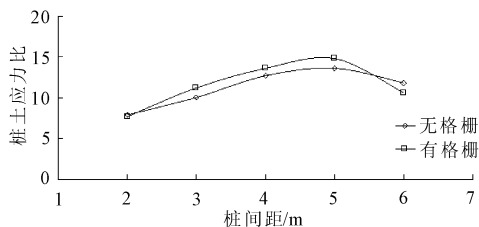


图 8 桩土应力比变化曲线

取沿路堤中心线对称的部分桩和桩间土沉降值并做出其格栅变形曲线(图 9),发现桩间距的变化时影响格栅变形的主要因素。由图可知,随着桩间距的增大,格栅由‘抛物线’形转化为‘悬链线’形,最后达到‘平底锅’形并保持稳定。

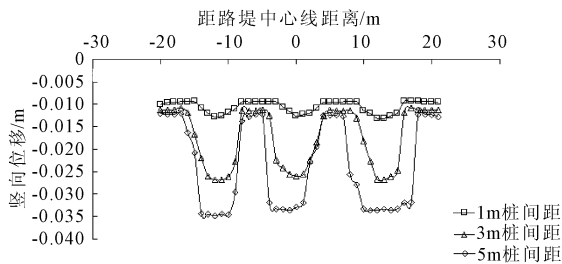


图 9 格栅变形曲线

2.4 路堤填土的性质对土拱效应的影响

其他条件不变,采用 5 m 填筑高度 3 m 桩间距,将路堤填土和碎石垫层均设置为线弹性、弹塑性模型和剑桥模型并作对比。模拟路堤填土内的主应力偏转状况发现:三种情况下主应力偏转程度大小依

次为线弹性 < 弹塑性 < 剑桥模型; 分别计算其桩土应力比分别为: 4.3、11.12、23.6。由此可知, 随着路堤填土和碎石垫层塑性程度的增强, 土拱效应逐渐增强, 当土体为近似弹性材料时, 土拱效应并没有发挥作用。因此可得出产生土拱的第三个条件路堤填土为塑性材料, 不是理想的弹性体。

其次将路堤填土选为摩尔库伦模型, 设置其内摩擦角分别为 28° 、 35° 、 40° 、 45° 并观察几种情况下的土拱效应。计算出四种情况下的桩土应力比 11.1、12.7、13.9、13.1, 由上可知随着内摩擦角的增大, 桩土应力比变化较小, 这是因为土的抗剪强度增大, 土体中向桩上转移的荷载增多, 但随着抗剪强度的增大路堤填土的相对沉降降低, 因此土体向桩顶所转移的荷载并不是由于土拱效应产生, 而是自身的抗剪强度所起的作用。由桩帽和桩中心点应力差可知, 抗剪强度越大其应力集中越显著, 不利于复合地基的稳定性。

2.5 桩帽尺寸对土拱效应的影响

分别对无桩帽、桩帽边长为 1 m、2 m 时, 填土高度为 5 m 的模型进行模拟。因为桩土应力比 $n = \sigma_p / \sigma_s$ 是消除了桩顶面积的影响来表示土拱效应的发挥程度, 所以在考虑桩帽尺寸对土拱效应的影响时, 需要用桩体荷载分担比即桩体承担的路堤荷载与其影响范围内的路堤荷载的比值: $E = \sigma_p a^2 / \gamma H s^2$, a 为桩帽边长, s 为桩间距。

首先观察以上四种情况下路堤填土的大主应力偏转状况, 首先可以得出在没有桩帽的情况下, 路堤填土内的大主应力方向依然会偏转, 拱轴线不清晰, 随着桩帽尺度的增大, 主应力偏转加强, 拱效应更加明显。且发现随着桩帽尺寸的变化, 桩顶的应力集中加强, 桩中心点和桩帽边缘点应力差值增大较快, 在桩顶所形成的抛物面形应力集中区更加明显。对地基表面桩和桩间土的应力进行分析结果如图 10 所示。

随着桩帽尺寸的增大, 桩和桩间土上的应力均在减小, 且桩顶减小的速率较大, 这是因为桩帽面积增大之后, 首先减小的是桩间土的应力, 其次是桩上的单位面积上承担的土压力也减小。根据公式计算桩的荷载分担比, 三种情况下荷载分担比分别为 3.01、7.26、8.97, 由此可知, 土拱效应随着桩帽尺寸的增大而更强, 但桩体并没有承担更多的荷载。因此设置较大尺寸的桩帽会不经济也不能充分发挥桩的承载力, 桩帽尺寸太小, 会由于受力面积小, 单位面积应力过大导致桩体破坏。

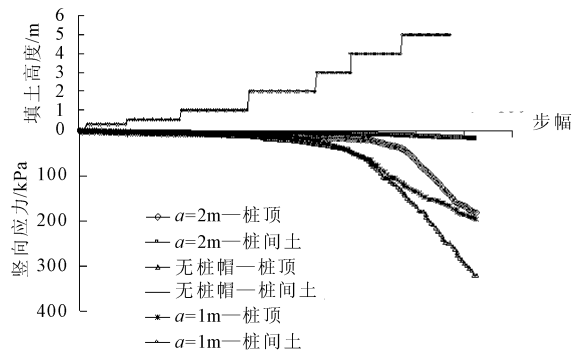


图 10 不同桩帽尺寸地基表面桩、桩间土应力曲线

3 结 论

(1) 当填土高度达到两倍的桩间距离时, 完整的土拱形成, 填到此高度之后, 继续增加填土高度, 拱轴线不发生较大的变化, 增加的荷载通过拱效应大量的转移到桩上, 桩的模量远远大于桩间土的模量, 产生沉降较小, 直到二者沉降差达到稳定状态。

(2) 格栅可以降低不均匀沉降, 但对桩土应力比影响不大。一方面它通过降低不均匀沉降来减弱土拱效应, 桩顶应力减小; 另一方面格栅的张拉膜效应使桩顶应力增大, 格栅和垫层之间的摩擦咬合作用, 降低桩间土的受力, 这两种作用相互折减。

(3) 桩间距是决定格栅变形的主要因素, 随着各种条件发生变化格栅总发生对称的变形, 且桩间距过小不利于格栅发挥作用。

(4) 拱的发生并不是直接从桩帽出发, 而是在桩帽顶面会产生一个抛物线形的应力集中区, 拱脚的大主应力偏转并不是直接从桩顶出发, 而大致垂直于此抛物面。

(5) 路堤填土的抗剪强度过大反而会影响土拱效应的发挥, 减弱地基的承载力, 但填土的塑性是土拱存在充分条件。

(6) 桩帽的存在影响了土拱效应, 但是对桩体承载力并没有太大的影响, 因此在桩帽的设置应综合考虑其面积置换率, 过大或过小都不宜。

参考文献:

- [1] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics [M]. New York: Wiley, 1943: 66-75.
- [2] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platform soft soil [J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 2002, 128(1): 44-53.

- [3] Pham H T V, Suleiman M T, White D J. Numerical Analysis of Geosynthetic: Rammed aggregate pier supported embankment [C]//Proceeding of Geo-Trans 2004 Conference: Geotechnical Special Publication No. 126. Los Angeles: ASCE, 2004, 126:657-664.
- [4] 曹卫平,陈仁朋,陈云敏.桩承式加筋路堤荷载分担比计算[J].中国公路学报,2006,19(6):1-6.
- [5] 余闯.路堤荷载下刚性桩复合地基理论与应用研究[D].南京:东南大学,2006.
- [6] 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.
- [7] 连峰,龚晓南,崔诗才,等.桩-网复合地基承载性状现场试验研究[J].岩土力学,2009,30(4):1057-1062.
- [8] 贾宁,高文龙.桩承式加筋路堤格栅分析[J].岩土工程技术,2006,20(2):103-106.
- [9] 陈毅,郑乾,王军军,等.土工合成材料在桩承式加筋路堤中的应用现状[J].水利与建筑工程学报,2011,9(6):29-32.
- [10] 俞缙,周亦涛,鲍胜,等.柔性桩承式加筋路堤桩土应力比分析[J].岩土工程学报,2011,33(5):705-713.
- [11] 北京金木软件技术有限公司. PLAXIS 岩土工程软件使用指南[M].北京:人民交通出版社,2010:37-68.

