

带帽 PTC 桩复合地基上路堤的稳定性数值分析

陈昆明¹, 陈宝林^{2,3}, 胡长江¹, 陈亚鹏¹, 戴自航⁴

(1. 福建第一公路工程集团有限公司, 福建 泉州 362000;

2. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350108;

3. 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350108;

4. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 以福建省某浅海填方路堤采用带帽 PTC 桩进行软基处理为背景, 采用有限元强度折减法, 分析路堤或桩的失稳破坏形式、常用等效平面模型存在的问题, 并探讨了桩长、单桩桩位及加筋垫层对路堤稳定性的影响。研究表明: 由于土拱效应, 临界稳定状态时路堤边坡的塑性区在桩帽顶以上分块贯通, 路堤边坡失稳破坏类似倾覆破坏; PTC 桩可能的破坏模式是倾覆破坏或弯曲破坏, 而不是传统认为的剪切破坏, 且根据受力特点不同, 路堤地基中的桩可分为承压桩、弯剪桩、压弯桩、拉弯桩四类; 等效的平面模型高估了桩的抗弯能力而低估其竖向承载力; 桩位、桩长、垫层对路堤稳定性及其失稳破坏形式均有不同程度的影响。

关键词: 带帽 PTC 桩; 路堤; 稳定性; 强度折减法; 土拱效应

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0045—08

Numerical Analysis of Embankment Stability on Composite Foundation with Capped PTC Piles

CHEN Kunming¹, CHEN Baolin^{2,3}, HU Changjiang¹, CHEN Yapeng¹, DAI Zihang⁴

(1. The First Fujian Highway Group Co., Ltd., Quanzhou, Fujian 362000, China;

2. Fujian Building Research Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou, Fujian 350108, China;

4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Based on a fill embankment in a shallow sea in Fujian Province in which its soft ground was improved by PTC piles with a cap, the instability failure modes of the embankment or piles and the problems that the commonly used equivalent plane model were analyzed by using the strength reduction method of finite element. And the effects of pile length, single pile position and reinforced cushion on the stability of embankment were discussed. The research outcomes show that because of the soil arching effect, the plastic zones of the embankment slope at the critical state run through in block partition above the top of the pile caps, and the instability failure of the embankment slope looks like overturning failure. The possible failure mode for PTC piles is toppling or bending flexure rather than shearing as traditionally thought, and according to their mechanical behavior, piles in embankment subgrade can be divided into four categories: the pressure bearing pile, the bending and shearing pile, the pressure and bending pile, and the tension and bending pile. The equivalent plane model overestimates the flexural capacity of a pile and underestimates its vertical bearing capacity. Pile location, pile length and cushion affect the embankment stability and its failure mode in various degree.

Keywords: capped PTC pile; embankment; stability; strength reduction method; soil arching effect

地基处理技术是工程中常采用的地基加固方法,其目的主要是减少地基沉降和增加承载力。主

要采取的方式为通过设置竖向加强体来加固软土地基,从而形成复合地基,比较常用的竖向增强体主要有:粉煤灰桩、砂桩、水泥土搅拌桩、预应力管桩、碎石桩等^[1-8]。地基的这类处理技术主要优点在于施工速度快,造价合理,被广泛应用于软弱路基的加固中。但是往往在这类地基的加固研究中只考虑到提高承载力、控制沉降,却忽视了路堤整体的稳定性的研究,尤其是当复合地基竖向增强体采用带帽的预应力薄壁管桩(PTC 桩)的新兴技术时。针对于路堤下刚性桩复合地基。目前稳定分析的方法往往忽略了桩体结构性及土体整体稳定之间的关系,单纯的把桩-土关联的结构破坏按单纯的剪切破坏来考虑,与实际的可能破坏模式相差甚大,所得结果难免与实际情况存在较大偏差。目前,人们在带帽 PTC 桩复合地基上路堤的失稳破坏模式、路堤稳定性影响因素及各因素的影响规律等方面的研究少有报道。

本文以实际项目福建省莆田至永定高速公路工程为背景(见图 1 和图 2),建立带帽 PTC 桩复合地基上路堤稳定分析的有限元模型。将强度折减法应用在 ABAQUS 分析软件中,系统的对带帽 PTC 桩复合地基上路堤桩-土体系的稳定性进行分析,并分析其影响因素,为合理评价带帽 PTC 桩复合地基上路堤的稳定性提供有益的参考。

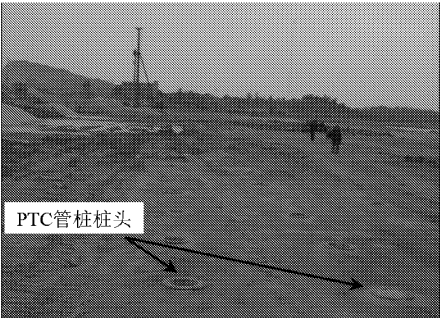


图 1 现场已施工的 PTC 管桩

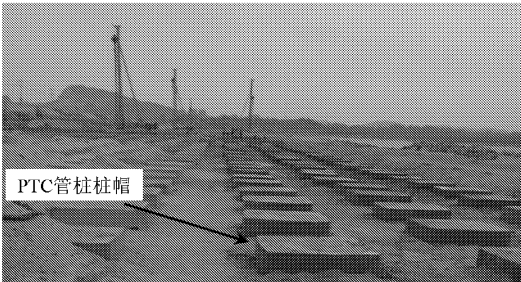


图 2 现场已施工的 PTC 管桩桩帽

1 带帽 PTC 桩上路堤算例描述

1.1 算例模型

基于上述工程,建立一个体现图 2 工程特点的

带帽 PTC 桩上的路堤模型,路堤及其地基横剖面、带帽 PTC 桩的平面布置分别如图 3 和图 4 所示。

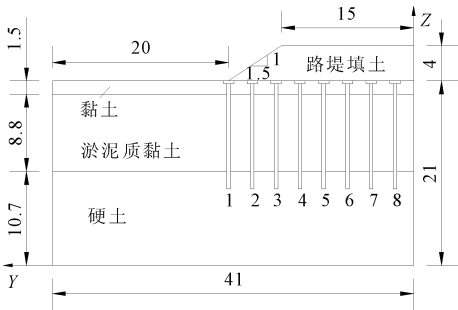


图 3 带帽 PTC 桩上路堤剖面图(单位:m)

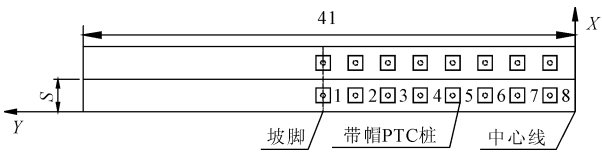


图 4 带帽 PTC 桩平面图(单位:m)

模型中土层由下到上依次为硬土、淤泥质黏土、黏土、路堤填土。预应力管桩采用 PTC - A400 - 60 桩,桩长为 12 m(桩端嵌入硬土层 2 m),桩相距都为 2.7 m,为方形布置,并在每根桩的桩顶设置 1.2 m×1.2 m×0.3 m(长×宽×高)的桩帽。根据设计说明,路面宽度设为 30 m,路堤填筑高度为 4 m,并在其上布置竖直向下的 20 kPa 的超载,路堤边坡斜率为 1: 1.5。

在工程分析中,应用对称性,只取半幅路堤断面进行分析,并应用单桩取半的方法(沿路堤走向的方向上)。建立如图 5 所示的分析模型,并对其进行单元划分。在模型四个竖直侧面(垂直于 X 轴、Y 轴)边界的法向的位移进行约束,在模型的底面(垂直于 Z 方向的法平面)施加 X、Y、Z 轴三个方向的位移约束,其他面均为自由边界面。模型单元划分主要采用六面体一次单元(C3D8),对于极少几何形状奇异的部位采用楔形体单元(C3D6)。

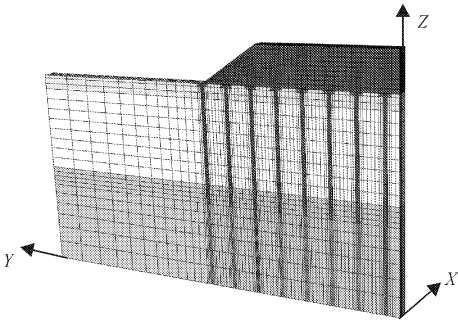


图 5 有限元模型及其网格划分

1.2 模型本构及其材料参数

本文目的主要在于分析 PTC 桩复合地基上路堤边坡的稳定性,故对路堤填土、黏土、淤泥质黏土、残积土的本构模型均采用适合于稳定性分析的摩尔-库仑理想弹塑性模型。为避免按钢筋混凝土本构模型参数获取的困难,本文中带帽 PTC 桩采用线弹性本构模型,但为了判断管桩是否发生破坏,将模型计算得到的剪力和弯矩与其桩额定的抗剪、抗弯承载力进行对比,从而判断桩是否破坏。

在饱和的软土中,快速填筑路堤会使土体中产生的超孔隙水压力来不及消散或缓慢消散,特别是对于未作排水(如砂井、塑性排水板等)加固处理的软土地基,路堤填筑结束后的段时间内稳定性最低,因此路堤短时间的稳定分析可不考虑地基土的排水效应,采用不固结不排水抗剪强度指标。即直接应用总抗剪强度 S 进行计算,其中强度不再考虑摩擦角部分,这个方法也叫 $\varphi = 0$ 法。本文即采用此方法,其饱和土体取不固结不排水指标 c_u ,材料参数详见表 1。PTC 桩材料参数如下:重度 24 kN/m^3 ,泊松比 0.168 ,弹性模量 $1.53 \times 10^7\text{ kPa}$,抗弯承载力 $189\text{ kN} \cdot \text{m}$,抗剪承载力 469 kN 。由于本工程路堤为浅海填方路堤,填土采用的是具有一定含泥量的砂土,其总抗剪强度指标(压实后)如表 1 所示。

1.3 桩-土接触问题

桩-土的相互作用一直是模型分析中的典型接触问题,分析成败的关键也在于接触的模拟。接触面是连续介质体的几何间断面,有两种力学模型存在于这个断面,分别为法向、切向模型。在 ABAQUS 中,这两种模型是分开定义的。在本文算例中,切向模型为罚函数的黏滑接触摩擦模型,法向模型是采用硬接触模拟。

表 1 材料参数					
材料名称	重度 γ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c 或 c_u/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
路堤填土	20.0	20	0.30	5	31
黏土	18.3	20	0.35	21	—
淤泥质黏土	15.6	1	0.40	16	—
残积土	22.0	48	0.25	100	—

1.4 分析过程

利用有限元强度折减法来研究带帽 PTC 桩上路堤边坡的稳定,本文判断边坡失稳的判据采用路堤特征部位的位移是否突变并结合塑性区是否贯通综合来考虑。判断桩是否破坏采用将桩的剪力、弯矩与其抗剪、抗弯承载力进行对比,从而来评价路堤

的稳定性。

本文主要分析步如下:

(1) 基于 ABAQUS 软件建立带帽 PTC 桩路堤模型,对模型材料属性进行赋值,并设置土体的抗剪强度随模型场变量的变化而变化,变化范围取为 $0.5 \sim 2.0$ 。

(2) 分析步(1)中还应进行初始地应力平衡,从而算出初始应力场。初始的折减系数一般定位小于 1 的值,本文设置为 0.5,其实质是将抗剪强度指标增大了。其目的是防止塑性变形破坏在边坡的地应力平衡阶段就产生,而对边坡稳定安全系数的确定产生影响。

(3) 设置加载分析步,模拟工程实际在路基顶面均匀布置 20 kPa 的超载。

(4) 设置强度折减分析步,使土体强度随着场变量的变化而折减,从而得到边坡的稳定安全系数。

2 算例分析结果

2.1 变形破坏特性

按上述判据,得到路堤边坡的稳定性系数为 1.444,与假设不设桩时稳定系数 0.920 比,得到了大幅的增加。

相比假设不设桩时稳定性系数 0.920(不稳定)有大幅提高。暂不考虑桩的破坏可能性,研究路堤边坡破坏的特性。图 6 给出了极限状态下路堤的塑性区分布。从程序动态显示结果来看,路堤填土在桩帽顶的上部位置首先出现,且有趋势发生桩刺入路堤填土的破坏,而桩顶存在桩帽,使桩帽顶的应力和变形减少,因此此类破坏模式没发生,这时桩变形几乎于没有。继续增大折减系数,塑性区继续从桩帽顶向上发展,此时塑性区形状为拱型,发生“土拱效应”,考察桩的变形特性,在路肩以外的桩都全部向路堤坡脚的方向倾斜,其余桩则主要是向下沉降,说明路肩以内的桩承受的主要为竖向荷载,而路肩以外桩承受的主要为路堤边坡的推力。当继续增加折减系数,路肩以外的桩向外倾斜的程度更加严重,路堤边坡的变形已无法较有效的阻止,导致路堤边坡上塑性区分块贯通,路堤破坏的类型类似于整体的倾覆破坏。

图 7 显示的是未设桩时塑性区在路堤边坡上的发展形成过程,和图 6 进行对比,可知由于桩的存在阻止了路堤以下地基土的塑性区的进一步发展,当有设置桩时的路堤在失稳时并不会形成传统意义上的深层滑动面。

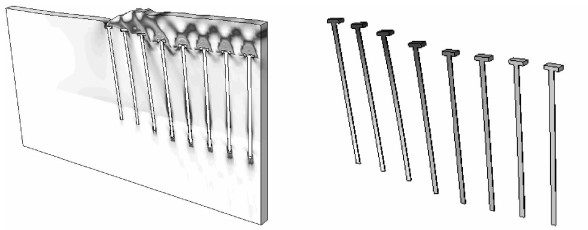
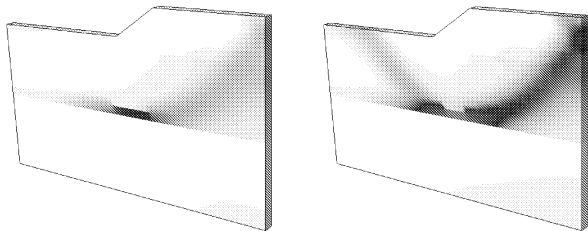


图 6 路堤临界稳定状态下的塑性区



(a) $F_s=0.894$ (b) $F_s=0.920$

图 7 无桩路堤剪切破坏带形成过程

提取得到没根桩在路堤临界失稳破坏时,即 $F_s=1.444$ 时的弯矩、剪力、轴力,并以此得到各桩的弯矩、剪力、轴力随桩身长度变化的曲线,如图 8—图 10 所示。

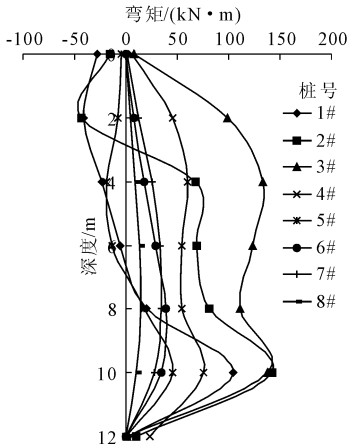


图 8 路堤临界稳定状态时各桩弯矩

由图 8 可见,各桩所受弯矩均未达到桩的抗弯承载力,1#—4#桩承受弯矩较大,特别是 3 号桩 $137.3\text{ kN}\cdot\text{m}$,约为抗弯承载力的 80%,而由图 9 可见,各桩所受剪力远小于桩的抗剪承载力,因此,说明路堤下带帽 PTC 桩假如发生破坏,最有可能发生的为弯曲破坏,而不是传统认为的基于极限平衡法假设的剪切破坏(剪断)。由图 10 可见,路堤边坡以下的 1#—3#桩承受的轴力小于路堤中部各桩的,值得特别在意的是,1#桩上承受的轴向力是为拉力,即 1#桩是抗拔桩,其主要原因在于在路堤边坡失稳变形时,该桩的桩帽下的土体受到了向上推挤的作用力,原因是在路堤边坡失稳变形时,1#桩桩帽下临

近地基土受到的是向上的推挤力,并作用在桩上和桩帽底面,使其处于“托举”的受力状态。由以上分析和图 11 路堤临界稳定状态下土体的位移矢量图可将路堤下的桩按其受荷状态划分为以下几种类型:

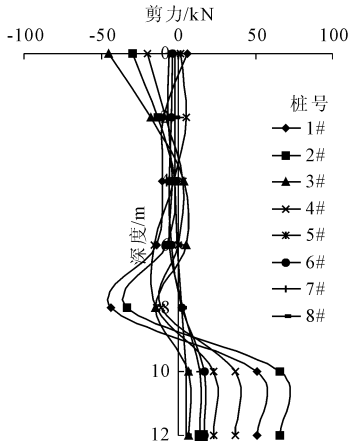


图 9 路堤临界稳定状态时各桩剪力

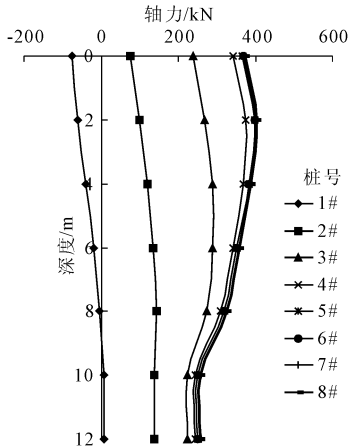


图 10 路堤临界稳定状态时各桩轴力

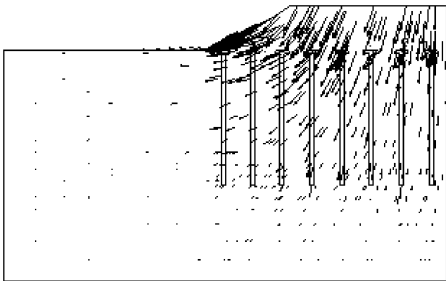


图 11 路堤临界稳定状态时土体位移矢量

(1) 承压桩:如 6#—8#号桩,这类桩位于路堤中部,该区域的桩周土体产生的位移相对于桩身向下,其整体的变形比较小。再分析桩的内力,可知即使在路堤趋于破坏时,它们的弯矩也很小,主要承担来自路堤自重及路面荷载产生的竖向压力,此类桩不会发生弯曲破坏,可能的破坏模式为受压破坏。

但设计时一般能满足竖向承载力的要求,所以因承压桩破坏而发生路堤失稳的可能性极小。

(2) 弯剪桩:如 2#、3#桩,即位于路堤边坡地基中的桩,其桩周土体位移主要以水平向为主。在路堤接近破坏时,桩身上的弯矩及剪力,尤其是弯矩相对的较大,其轴力却相对比较小,此时桩主要承担的是水平向的荷载,因此该类桩发生弯曲破坏的可能性最大。其也是路堤失稳时最先发生破坏的桩。该类桩阻止周围土体滑动的作用主要是通过发挥较大的弯矩来实现的。

(3) 压弯桩:如 4#、5#桩,即位于路肩内侧但临近路堤边坡的桩,该类桩的受力特性介于承压桩和弯剪桩之间,桩周土体的竖向和水平位移几乎差不多。当路堤接近于破坏时,其弯矩比 6#—8#桩要大,而又比 2#、3#桩要小,其轴向力又跟 6#—8#桩相差不大,此类桩称为压弯组合桩。相比于弯剪桩该类桩的弯矩要小很多,故该类桩一般都晚于弯剪桩发生弯曲破坏。但是只要弯剪桩发生了弯曲破坏,其就会紧随着也发生弯曲破坏。该类桩对土体起到的抗滑作用主要是通过发挥了一定的弯矩和轴力来实现的。

(4) 拉弯桩:如 1#桩,即位于路堤坡脚的桩。

(5) 其桩周土体位移相对于桩身主要是竖直向上和水平向的。当路堤接近于破坏时,其桩身承受的弯矩、剪力都达到了较大值,因为桩帽底面向上应力和负摩阻力的作用,导致了其承受的为拉力,该类桩称为拉弯组合桩。该类桩最可能发生的破坏模式为弯曲或受拉。该类桩对土体起到的抗滑作用主要是通过发挥了其抗弯和抗拉能力来实现。

2.2 等效平面模型

现阶段,由于节约计算成本,在边坡和路堤的稳定分析中,常将三维的模型转化为二维平面模型,而后再采用强度折减法计算得到安全系数来判断复合地基路堤的稳定性。但此类简化计算方法存在不可靠性,因此本节为了探讨带帽 PTC 桩上路堤等效平面模型是否可靠,将上文的算例简化为等效的平面模型并分析其结果,进一步将其结果与三维的算例进行对比。

如图 12 所示,在沿路堤纵向上的同一直线上的各离散布置的桩的受力性状是一致的,采用强度等效的方法将本来离散的桩体转换成墙体,然后在任一位置处截取一截面就可作为等效的平面计算模型。等效墙体的重度和刚度取值可按墙体包含的桩和土体根据面积加权平均得到,即有如下的计算公

式:

$$\gamma_{eq} = (1 - m)\gamma_s + m\gamma_p \tag{1}$$

$$E_{eq} = (1 - m)E_s + mE_p \tag{2}$$

式中: γ_{eq} 、 E_{eq} 分别为复合区域等效实体的等效重度、等效弹性模量; γ_p 、 E_p 分别为桩体的重度、弹性模量; γ_s 、 E_s 分别为土层的重度、弹性模量; m 为等效墙体内桩体的面积置换率。

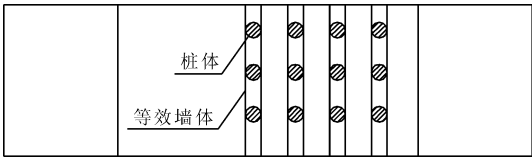


图 12 等效桩墙平面图

按前文假定的算例,分别建立三维和等效的二维分析算例;为了研究桩在不同位置时,三维模型和等效平面模型的差异,将单桩分别布置在 1#—7#不同位置处,并分别建立三维的和等效的平面模型,如图 13 所示为其桩位布置示意图。计算结果如图 14 所示,从中可知,当为群桩模型时,三维安全系数为 1.444,这与平面等效模型的 1.400 是极为接近的,而二维稳定系数低一点的原因是在三维模型下其存在沿路堤纵向的约束,路堤边界的摩阻力阻碍了路堤的变形。当为单桩模型时,分析其安全系数结果可以发现,当桩布置在 1#—3#位置时,等效的平面模型的安全系数比三维的大;当桩布置在 4#—7#号位置时,等效的平面模型的安全系数比三维来的小。其原因在于 1#—3#位置处桩主要承受的是水平向的推力,4#—7#号位置处桩主要承受的是竖向的荷载,说明在将带帽 PTC 桩路堤按上述方法等效简化后,高估了桩的抗弯承载力,低估了桩的竖向承载力。显而易见,在简化为二维的模型中,其忽略了土体在路堤纵向方向的变形,故难以反映绕流的作用,这也是桩位在 1#—3#号位置处时安全系数较高的原因之一。

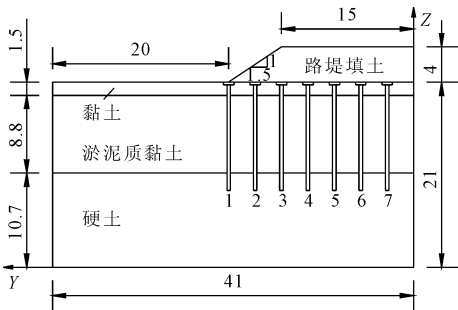


图 13 单桩桩位布置示意图(单位:m)

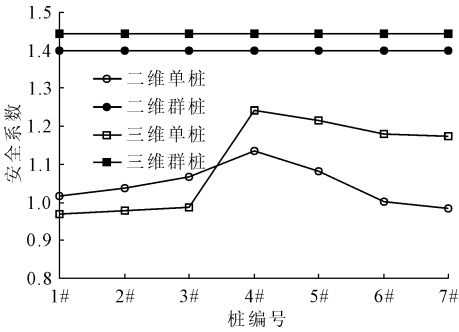


图 14 不同桩位二、三维模型的安全系数

3 PTC 桩路堤稳定性影响因素分析

3.1 桩位对路堤稳定性的影响

为了突出分析桩位对路堤稳定性的影响,假设仅设置单根桩并通过改变桩在路堤中的不同位置。如将单桩分别独立设置于图 13 所示 1#—7#桩的位置。以桩号来表示不同桩位,由于仅设置单桩,桩在某些位置将承受较大的弯矩和剪力,暂不考虑桩的可能破坏,假设桩位弹性材料,桩可能发生的破坏模式另作研究。

同时改变路堤纵向上的桩距 S , 计算得到不同桩距条件下的安全系数,如图 15 所示为安全系数随桩位置变化的曲线图。可见,桩设在图中各位置对提高路堤的稳定性均有影响,在 1#—3#桩位处提高得较少,提高最显著的桩号为 4 号位置。除此之外,随着路堤纵向桩距增大,其稳定系数减少,无桩路堤可以看作是 S 无穷大的情况,此情况下安全系数为 0.920,该值也是路堤稳定系数的下限值。

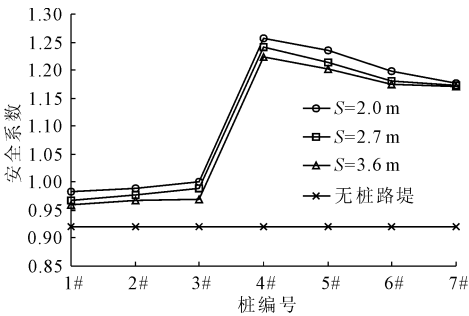


图 15 安全系数随桩位变化曲线

图 16 为临界失稳状态时不同桩位等效塑性应变云图(为节省篇幅,5#和 6#桩的未列出),可以看到 1#—3#桩位处在滑动面的下游处,因为有桩的存在,阻挡了滑动面的延伸,此时桩身受到的力主要为水平向的,以此来提高了路堤的稳定性。4#、5#桩位处于滑动面的中游,即为路堤滑动面最深处,此时桩

的存在改变了原先土体塑性区的走向,且在桩帽顶部土体存在交叉的塑性发展区,设置在该处的桩对路堤稳定性的提高最大。6#、7#桩位处于滑动面的上游,此时桩的存在改变了滑动面的相对位置(整体向上移动),此时桩提高路堤的稳定性主要是通过承受竖向荷载来实现,其并不会阻止滑动的贯通。

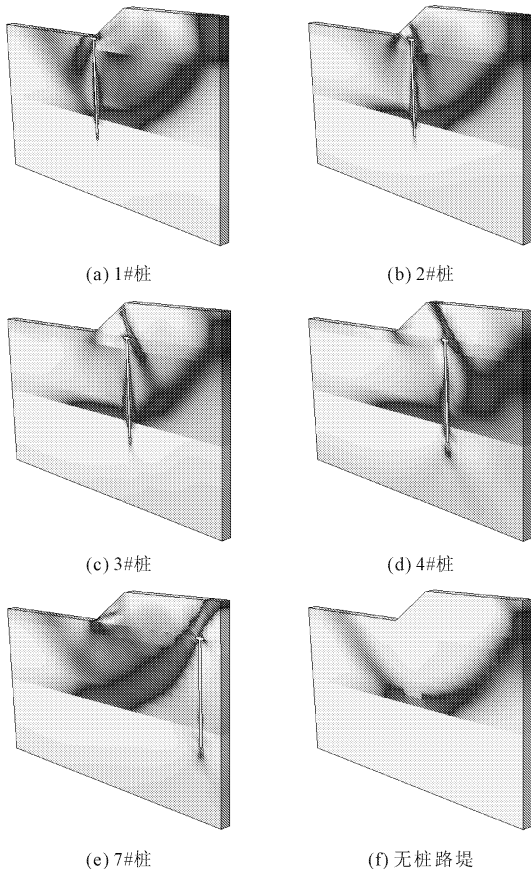


图 16 桩位不同时路堤临界稳定状态等效塑性应变云图

接下来分析桩可能的破坏形式,图 17#—19#分别为在路堤临界稳定状态时桩设在不同位置时的弯矩、剪力和轴力沿桩身的分布曲线。可见,1#—5#桩位处桩身弯矩都已达到了桩的抗弯承载力 ($189 \text{ kN} \cdot \text{m}$),而此时其承受的剪力还远未达到桩的抗剪承载力 (469 kN)。说明带帽 PTC 桩上路堤失稳时,桩的破坏模式是为弯曲破坏,而不是传统认为的柔性桩的剪切破坏,这一结论与前文对群桩下桩破坏模式的推断是一致的。分析各桩位处的受力性状,与群桩类似仍可按桩的受力特点分为四类:承压桩(6#、7#桩位)、弯剪桩(2#、3#桩位)、压弯桩(4#、5#桩位)、拉弯桩(1#桩位)。各类桩的可能的破坏形式、抗滑机理与群桩下分析的相似,在此不再赘述。

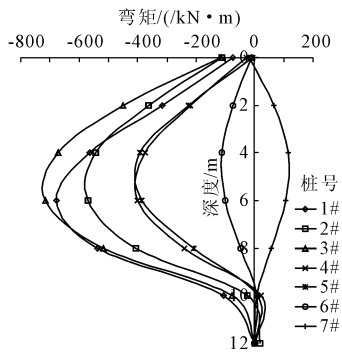


图 17 桩位不同路堤临界稳定状态时桩身弯矩

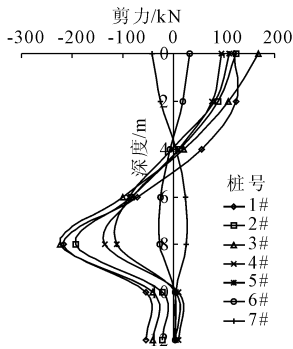


图 18 路堤临界失稳状态时各桩位处桩剪力

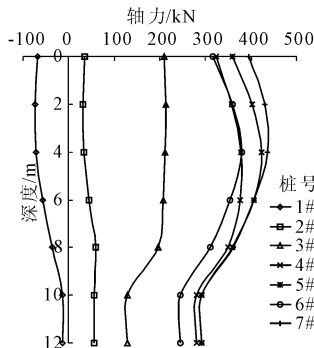


图 19 路堤临界失稳状态时各桩位处桩轴力

3.2 桩长对路堤稳定性的影响

桩长的设计在复合地基路堤设计中至关重要的一环,经济合理的桩长对路堤的稳定、承载力、施工、成本控制都会产生重要影响。故本节根据图 3 和图 4 的参数建立起不同桩长下的带帽 PTC 桩路堤模型。为了能客观的得到当桩悬于软弱土层及桩端嵌入坚硬土层的不同受力性状,分别取桩长为 8 m、10 m、12 m、14 m 和 16 m。各不同桩长分别对应桩端位于硬土层以上 2 m、桩端正好支承于硬土层顶面和桩端嵌入硬土层 2 m、4 m 和 6 m。计算所得路堤稳定性系数随桩长的变化曲线如图 20 所示。可见,路堤的稳定性系数随桩长的增加而增大,但在桩长超过 12 m,即嵌入硬土层 2 m 以后,几乎不再增大。说明桩嵌入硬土层对路堤稳定性有大幅的提

升,但不应一味地通过增加桩在硬土层中的嵌固深度来提高路堤的稳定性,否则,不仅增加工程造价而且收效不明显。

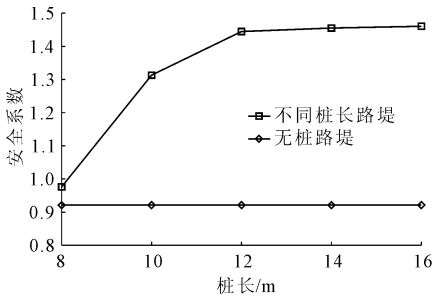


图 20 安全系数随桩长变化曲线

图 21 为在不同桩长条件下,带帽 PTC 桩路堤在临界稳定状态时的等效塑性应变云图,综合图 4 来分析不同桩长条件下,路堤失稳破坏特性的差异。当桩长设计为 8 m 时,此时桩并未进入硬土层,剪切滑动带仍可通过桩端以下贯通,对于路堤土体的滑移问题桩的存在起不到相应的作用,故此时的路堤边坡的稳定安全系数是偏低的,趋近于无桩加固路堤的状态。当桩长设计为 10 m 时,即桩端正好支承于硬土层顶面时,桩的存在对剪切滑动带的贯通有阻挡作用,故安全系数有显著提高,但由于桩没有嵌入硬土层,桩底产生了较大的刚性平移。当桩长继续增大,如设计为 12 m、14 m、和 16 m 时,此时桩的桩底已进入到坚硬的土层中,形成的结构受力模型类似于一端固定的边界条件。故此类桩有效的阻止了如无桩情况下的深层圆弧形滑动区的形成,桩主要靠发挥抗弯、抗压来提高路堤稳定性,且路堤失稳表现为因桩帽以上土拱效应交织而成的塑性区发展,为路堤边坡的倾倒破坏。当桩端嵌入硬土层一定深度后继续增加大桩长,边坡的塑性区发展或失稳破坏形式相似,这就是其稳定性系数不再有明显增大的原因。

3.3 有无垫层对路堤稳定性的影响

为能研究在带帽 PTC 桩上路堤上是否加设垫层对稳定性的可能影响,将上文 2.1 节中的算例进行修改,即将一个 0.5 m 厚的加筋垫层设置在路堤填土下。考虑加筋的作用,当筋材具有足够的抗拉强度时,垫层可按线弹性材料来模拟,假设垫层重度为 22 kN/m³,弹性模量取 30 MPa,泊松比 0.3。有无加设垫层下带帽 PTC 桩上路堤计算得到的稳定安全系数分别为 1.523 和 1.444,增设垫层后安全系数得到了一定的提高。图 22 为加设垫层的路堤在临界稳定状态下时的等效塑性应变云图,将其和

图 6 相比较可以发现,在加设了垫层的路堤中并未出现像未加设垫层时那样在桩顶土体上产生塑性变形,说明加设了垫层后可有效阻止桩体刺入路堤填土。而加设了垫层的路堤失稳破坏的主要起因是由于路堤填土在自重和路面荷载作用下而导致的失稳破坏,加筋垫层的存在能有效防止土体塑性区继续向地基土中延伸,故此类路堤边坡的稳定性主要由路堤填土本身抗剪强度决定。综上分析,路堤稳定性的提高一定程度上可以通过加设加筋垫层来实现,但其效果是有限的,考虑到增设垫层所带来的成本增加,是否增设加筋垫层,应从工程实际需要进行综合分析。

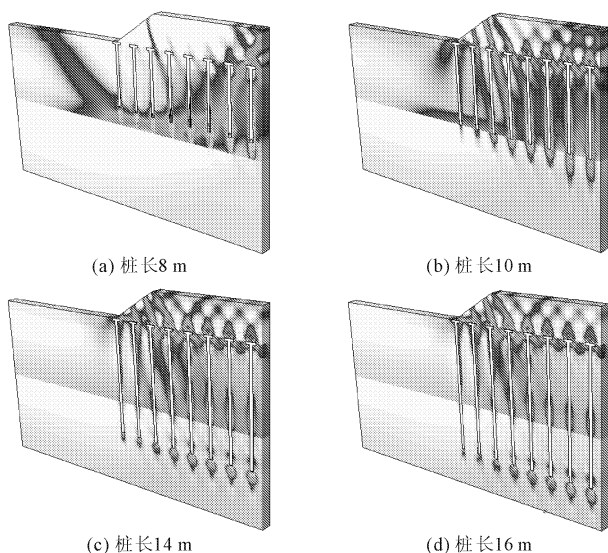


图 21 桩长不同时路堤临界稳定状态等效塑性应变云图

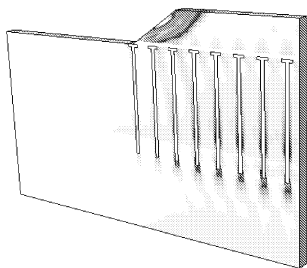


图 22 设有加筋垫层时路堤临界稳定状态等效塑性应变云图

4 结论与建议

(1) 采用带帽 PTC 桩复合地基可显著提高软土地基上路堤的稳定性。由于土拱效应,临界稳定状态时路堤的塑性区在桩帽顶以上分块贯通,路堤边坡失稳破坏类似倾覆破坏,且当桩具有足够的锚固深度时,因桩的阻隔作用不会形成类似无桩情况下的深层滑动。刚性带帽 PTC 桩的破坏形式主要为弯曲型或整体倾覆,而不是传统认为的剪切破坏,

而根据桩的受力特点,路堤下复合地基中的桩可分为承压桩、弯剪桩、压弯桩、拉弯桩四类。

(2) 当沿路堤纵向桩间距较大,不能在水平方向形成有效的土拱时,可能发生软土沿桩的绕流破坏。将带帽 PTC 桩复合地基等效为平面模型可以使计算简化,稳定性分析结果具有一定的可靠度。但简化后,高估了桩的抗弯承载力,低估了桩的竖向承载力,且其忽略了土体在路堤纵向方向的变形,因而无法反映土体的三维变形情况。

(3) 若在软土地基中设置单桩来提高路堤的稳定性,则临界稳定状态下,当桩位于未设桩时的滑动面下游时,桩主要靠抵抗滑动土体的推力来提高路堤的稳定性。当桩位处于滑动面的中游,即为路堤滑动面最深处,此时桩的存在改变了原先土体塑性区的走向,且在桩帽顶部土体存在交叉的塑性发展区,稳定性系数提高最大。当桩位于滑动面的上游,桩的存在将使滑动面上移,桩仅通过竖向承压对路堤稳定性略有影响,不能阻止滑动面的贯通。

(4) 路堤的稳定性系数随桩长的增加而增大,但增幅随桩嵌入硬土层深度的增加而急剧衰减,故不能一味地通过增加桩长来提高路堤的稳定性。设置加筋垫层将在一定程度上增加了路堤的稳定性,但是否有必要应从安全性和经济性两方面权衡。

参考文献:

- [1] 蒋建清,曹国辉,刘热强. 排水板和砂井联合堆载预压加固海相软土地基的工作性状的现场试验[J]. 岩土力学,2015,36(S2):551-558.
- [2] 叶观宝,金培阳,张 振. 真空预压联合堆载预压加固软土地基现场试验研究[J]. 工程地质学报,2015,23(S1):721-727.
- [3] 周 峰,屈 伟,郭天祥,等. 基于沉降控制的端承型复合桩基工程实践[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(5):1071-1079.
- [4] 傅海龙. 软黏土路基现场强夯置换试验分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):56-60.
- [5] 杨 涛,李 超. 刚性基础下组合渗流碎石桩-不排水桩复合地基固结分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(11):212-221.
- [6] 聂文峰,邱邵富,张 蕊,等. 路堤荷载下水泥土搅拌桩复合地基失稳机理及其稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):51-55.
- [7] 黄 鹏,简文彬,洪儒宝,等. 覆盖型岩溶土洞泡沫混凝土复合地基模型试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):48-52.

(下转第 75 页)

国地质灾害与防治学报,2004(2):32-37.

[5] 胡 冉,陈益峰,周创兵.降雨入渗过程中土质边坡的固-液-气三相耦合分析[J].中国科学(技术科学),2011,41(11):1469-1482.

[6] 荆周宝,刘保健,解新妍,等.考虑流固耦合的降雨入渗过程对非饱和土边坡的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):165-171.

[7] 朱 伟,程南军,陈学东,等.浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J].岩土工程学报,2006(2):235-240.

[8] 朱 伟,陈学东,钟小春.降雨入渗规律的实测与分析[J].岩土力学,2006(11):1873-1879.

[9] 丰光亮,胡新丽,吴 刚,等.鄂西恩施地区非饱和土降雨入渗规律[J].地质科技情报,2010,29(5):112-116.

[10] Shlomo P. Neuman. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973,99(12):2233-2250.

[11] 陈善雄,陈守义.考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2001(4):447-450.

[12] 陈守义.考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J].岩土力学,1997(2):8-12,22.

[13] 薛 松,童富果,郝 霜,等.土体初始饱和度对降雨入渗的影响[J].水利水电科技进展,2016,36(4):31-35,41.

[14] Lam L, Fredlund D G, Barbour S L. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987,24(4):565-580.

[15] 孙冬梅,朱岳明,张明进.降雨入渗过程的水-气二相流模型研究[J].水利学报,2007(2):150-156.

[16] Fuguo Tong, Niem A, Yang Z, et al. A numerical model of tracer transport in a non-isothermal two-phase flow system for CO₂ geological storage characterization [J]. Transport in Porous Media, 2013,98(1):173-192.

[17] Van Genuchten. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.

[18] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976,12(3):513-522.

[19] Corey A T. The interrelation between gas and oil relative permeability [J]. Producers Monthly, 1954,19:38-41.

[20] 王 俊,黄岁樾.土壤水分特征曲线模型对数值模拟非饱和渗流的影响 [J].水动力学研究与进展(A 辑),2010,25(1):16-22.

~~~~~

(上接第 52 页)

[8] 王凤池,兰海洋,董 明,等.轮胎桩单桩复合地基承载力的试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):148-154.

[9] Tingting N, Hanlong L, Xuanming D, et al. Model tests on XCC-piled embankment under dynamic train load of high-speed railways [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018,17(3):581-594.

[10] Suzanne J M. van Eekelen, Arjan A M Venmans. Piled embankment or a traditional sand construction: how to decide? a case study [J]. Procedia Engineering, 2016, 143(3):590-597.

[11] 梁玉华,梁忠久.基于 ABAQUS 的抗滑桩与滑坡相互作用三维有限元数值分析 [J].华东公路,2018(5):118-123.

[12] 陈子玉,宋彦辉,严 豪.有限元强度折减法应用的几个问题及拓展 [J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):196-200.

[13] Zhang Z, Han J, Ye G. Numerical analysis of failure modes of deep mixed column-supported embankments on soft soils [J]. Geotechnical Special Publication, 2014, 238:78-87.

[14] Liu J, Yang C, Gan J, et al. Stability analysis of road embankment slope subjected to rainfall considering runoff-unsaturated seepage and unsaturated fluid-solid coupling [J]. International Journal of Civil Engineering, 2017,15(6):865-876.

[15] Chakraborty A, Goswami D. State of the art: three dimensional (3D) slope-stability analysis [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 10(5):1-6.