DOI:10.14048/j.issn.1671－2579. 2020.04.004

软土桩承加筋路堤优化设计研究

陈维家[1],张惠明[2]

(1.珠海交通集团有限公司,广东 珠海 519060;2.深圳建设综合勘察设计院有限公司)

摘要:为了得到经济安全的软土桩承加筋路堤设计方案,该文依据现场试验结果,结合理论推导,对软土桩承加筋路堤的设计进行了系统的研究。结果表明:现行加筋体理论张拉力计算值严重偏大,反映的加筋体应力应变关系与材料性质相悖;采用复合加筋体模型计算得到的加筋体张拉力和下垂量与实际状态吻合;单桩承载力综合安全系数建议取1.3,桩间软黏土承载力基本可以忽略,上部荷载由桩体承担;建立的桩承加筋路堤优化设计理论能得到既满足相关技术要求、工程造价又比较经济的桩承加筋路堤设计方案。

关键词:软基;桩承加筋;复合加筋体;优化设计

桩承加筋路堤有几大优点:可有效控制软基的沉降、可承载高路堤荷载、可处理深厚软基、地质条件适应强、施工工期较短、施工质量容易控制等,因此在软土地区道路建设中得到了越来越广泛的应用。

在桩承加筋路堤中,路堤荷载向下传递的过程遵循土拱效应。Terzaghi于1936年根据模型试验结果提出了土拱效应和等沉面概念,并建立了平面土拱效应计算理论。基于Terzaghi的土拱理论,几十年来,很多学者通过模型试验和理论分析对土拱效应进行了研究,建立了桩承荷载的计算理论,比较典型的研究成果见文献[2－5],相关的研究成果已应用到新近颁布的技术规程中。

桩承加筋路堤在设计理论和设计方法上存在两个重要问题:① 加筋体张拉力方面,基本上是按悬索理论或薄膜理论考虑的,如蔡德钩等采用悬索理论,考虑加筋体的初始挠度,提出了改进的加筋体张拉力计算公式。但无论是悬索理论还是薄膜理论,得到的加筋体张拉力计算结果与实际情况严重不符;② 在桩承加筋路堤设计方面,基本上是根据经验选取桩间距和桩帽尺寸等设计参数,再依据填土高度和设计荷载、单桩承载力等对设计参数进行验算,验算结果满足相关要求即可。因桩承加筋路堤中,满足相关技术要求的设计参数有无数种组合,上述经验检验法不易得到既能满足技术要求、工程造价又比较经济的理想方案。

该文依据桩承加筋路堤现场试验结果,结合笔者多年的工程设计经验,对桩承加筋路堤的设计进行系统的研究,提出一些新的设计计算理论和设计方法,以便为类似工程提供借鉴。

1 加筋体张拉力研究

1.1 现行加筋体张拉力计算理论的问题

为研究加筋体张拉计算理论,在珠海高栏港高速公路的一段桥头软基路段进行了桩承加筋路堤的现场试验。试验中,桩帽和桩间土的沉降量采用高精度电子沉降杯观测,可以得到较准确的桩土差异沉降或加筋垫层下垂量;桩承荷载采用测力桩帽观测,避免了测量土压力推算桩承荷载的种种弊端,得到了较高精度的单桩承受荷载及其变化规律。

试验段淤泥层厚平均为16 m,采用ϕ300 mm预应力管桩,桩间距为3.2 m;方形桩帽,边长为1.0～1.6 m;加筋采用土工格栅和土工格室。填土高度为3.0～3.9 m。满载后,桩帽与桩间土的实测沉降见表1。表1表明:桩与桩间土的沉降量均不大,桩的沉降约为43 mm,桩间土的沉降为54～80 mm,桩与桩间土差异沉降为11～35 mm。差异沉降受桩间净间距的影响较大,随净间距的增加而增大;加筋类型对差异沉降也有一定影响,土工格室垫层的差异沉降小于土工格栅垫层的差异沉降。

GB/T 50738－2012《复合地基技术规范》给出的

收稿日期:2020－05－20(修改稿)

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:2011－02－006)

作者简介:陈维家,男,硕士,高级工程师.E－mail:13823099649@126.com

表 1　实测沉降、应变和计算张拉力

试验段	路基高/m	桩间净间距/m	垫层	沉降/mm 桩	沉降/mm 桩间土	差异沉降/mm	差异沉降*/mm	格栅应变/%	张拉力/(kN·mm^{-1}) ①	张拉力/(kN·mm^{-1}) ②	张拉力/(kN·mm^{-1}) ③
2	3.9	2.0	2 层格栅	45	80	35	29	0.88	35.1	801	37.5
3	3.9	1.8	2 层格栅	43	74	31	26	0.40	16.1	591	34.5
4	3.0	1.6	1 层格栅	42	59	17	24	0.49	19.6	690	31.3
5	3.0	1.6	1 层格室	43	54	11					

注：张拉力①为按实测格栅应变计算值；张拉力②为根据实测下垂量按公式(1)计算值；张拉力③为根据公式(2)计算值；差异沉降* 为根据公式(3)计算值。

加筋张拉力公式为：

$$T=\frac{1.35\gamma h_c(S^2-a^2)\sqrt{(S-a)^2+4\Delta^2}}{32\Delta a} \tag{1}$$

式中：T 为加筋体张拉力；S 为桩间距；a 为桩帽尺寸；γ 为桩帽之上填土重度；h_c 为完全土拱高度；Δ 为加筋体的下垂量，可取桩间距的 1/10，最大不宜超过 0.2 m。

式(1)中，加筋张拉力与加筋、垫层和填土的性质没有直接关系，主要受桩间距、桩帽尺寸和加筋体下垂量影响，而下垂量的取值是假定的，不是根据具体工况条件计算得到的。按规范要求计算，试验段 2 的加筋体张拉力达 143 kN/m，按实测的加筋体下垂量 0.035 m 计算更是高达 801 kN/m。显然，若有这样高的张拉力作用在土工格栅上，土工格栅早就断裂了；但实际情况并非如此，按实测格栅应变计算的张拉力只有 35.1 kN/m。可见式(1)大大地高估了加筋体张拉力。

图 1 为按式(1)计算的加筋张拉力与加筋体下垂量关系曲线。

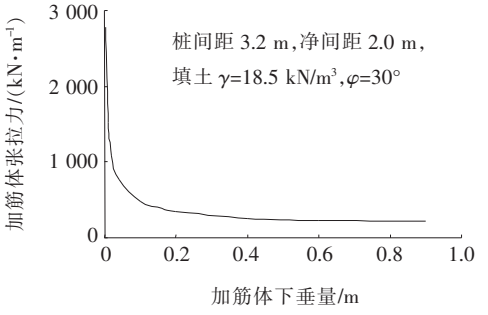


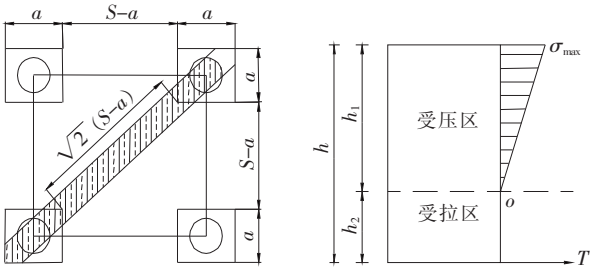
图 1　加筋体张拉力与加筋体下垂量[式(1)]的关系

从图 1 可以看出：据公式(1)计算的加筋体张拉力与加筋体下垂量成反比，在下垂量水平较低时，加筋体张拉力随下垂量的增加而急剧下降。这种变化规律是与加筋体的实际受力状态相悖的：加筋体铺设后，还没有填土时，其下垂量为零，加筋体张拉力也为零；随填土荷载增加，加筋体下垂量(加筋体应变)随之发展，加筋体张拉力伴随其应变的发展而增加；填土荷载越大，加筋体下垂量(应变)越大，其张拉力也越大。由此可见，式(1)计算得到的加筋体张拉力变化规律是不合理的。

式(1)的上述问题应该与其基本假设有关：将加筋假定为悬索，土拱荷载直接作用在悬索上，完全不考虑垫层和填土层在抵抗下垂变形中所起的作用。事实上，加筋体下垂变形时，加筋体上的垫层和填土层(起码在土拱范围内的填土层)是一起变形的，共同承担因荷载作用而产生的弯矩、轴力和剪力。因此，在桩承加筋路堤的分析计算中，应综合考虑加筋体、垫层及填土层的共同作用，才能建立较合理的加筋体张拉力和下垂量的分析方法。

1.2　加筋体张拉力的新理论

基本假定：加筋体、砂石垫层和部分填土作为一个“复合加筋体”承担自重及上部荷载；路堤填土高度大于完全土拱对应的等沉面高度；复合加筋体的填料和加筋体均假定为弹性体；在桩间土范围复合加筋体竖向土压力均匀分布；复合加筋体桩间范围下部悬空，即不考虑地基土的反力；以平面问题、按对角线条带分析加筋复合体受力状态，两端简支；加筋复合体的正截面在受力并发生弯曲变形以后，仍保持为平面。复合加筋体模型示意图见图 2。



(a) 平面示意图　　(b) 受力示意图

图 2　加筋复合体模型

根据上述基本假设，可以推导出加筋体的张拉力 T 和下垂量 δ 的计算式为：

$$T=\frac{3qA_s}{4(3h-h_1)} \tag{2}$$

$$\delta=\frac{5qA_s^2}{8E_mh^3} \tag{3}$$

式中：$A_s=(S-a)^2$，S 为桩间距；a 为桩帽尺寸；h 为复合加筋体高度；受压区高度为 $h_1=\sqrt{\lambda^2+2\lambda}h-\lambda$，$\lambda=\frac{E_g}{E_m}$，$E_m$ 为复合体变形模量，E_g 为加筋体抗拉模量；q 为作用在复合加筋体上的荷载。其计算式如下：

$$q=\frac{A_s\gamma-cL_p}{k_0L_p\tan\varphi^2}(1-\mathrm{e}^{\frac{hk_0L_p\tan\varphi^2}{A_s}})+\gamma h \tag{4}$$

式中：γ、c、φ 分别为填土的重度、黏聚力和内摩擦角；$L_p=4(S-a)$。

桩间净间距范围产生下垂变形时，主要影响范围为完全土拱以内，复合加筋体的高度应不大于完全土拱高度，由此复合加筋体高度可表达为：

$$h=\alpha h_c \tag{5}$$

式中：α 为复合加筋体系数，小于 1.0，可按 0.7 取值；h_c 为对应于桩间净间距($S-a$)的完全土拱高度。

复合加筋体的变形模量：

$$E_m=\frac{\alpha h_cE_tE_d}{h_tE_d+h_dE_t} \tag{6}$$

式中：$h_t=\alpha h_c-h_d$ 和 E_t 为填土部分的厚度和变形模量；h_d 和 E_d 为垫层的厚度和变形模量。

按复合加筋体理论[公式(2)、(3)]计算的试验段 2～4 的土工格栅张拉力和差异沉降(下垂量)结果见表 1。表 1 表明：按复合加筋体理论计算的格栅张拉力分别为 37.5、34.5 和 31.3 kN/m，与实测计算的张拉力 35.1、16.1 和 19.6 kN/m 是比较接近的；理论计算的差异沉降分别为 29、26 和 24 mm，与实测的 35、31 和 17 mm 也很接近。由此可得到初步结论：复合加筋体理论比较符合桩承加筋路堤的实际状态。

2 单桩承载力与桩承荷载

2.1 单桩承载力

单桩承载力特征值 R_a 按下式确定：

$$R_a=\frac{Q_{uk}}{K} \tag{7}$$

式中：Q_{uk} 为单桩极限承载力；K 为综合安全系数。

综合安全系数 K 的取值，应根据不同工程类型特点，区别处理。建筑桩基规范取 $K=2.0$，实际上是按沉降控制来确定单桩承载力，让桩在承受荷载的过程中，桩沉降控制在很低的水平。对于房建结构，这种控制是必要的：建筑物的框架在荷载增加的初期就已施工，大部分荷载是后增加的；若在荷载增加过程中桩还发生较大沉降，将会对框架结构造成损坏。

在桩承加筋路堤结构中，要求路面不要产生过大的工后差异沉降。桩承荷载主要是路堤填土和路面结构层，而桩的沉降在这些荷载作用下，在较短的时间内即可完成。也就是说，桩的沉降在桩承加筋路堤施工过程中已基本完成，桩的工后沉降很小，不会对道路的正常使用产生不良影响。因此，在桩承加筋路堤中，可以适当调低桩基承载力的综合安全系数。在个别地方性规范中，该综合安全系数已调整至 1.1。不同安全系数对应的桩基承载力见图 3。

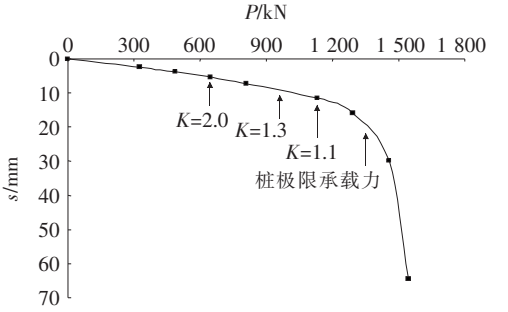


图 3 不同安全系数对应桩基承载力特征值

综上所述，为较好地发挥桩的承载力、又能有足够的安全储备，建议对于桩承加筋路堤采用 1.3 的桩基综合安全系数。

2.2 桩承荷载

现行技术标准对桩承荷载的要求不一致。GB/T 50738－2012《复合地基技术规范》不考虑桩间土的承载作用，上部荷载均由桩承担。G/T D31/02－2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》要求考虑桩间土的承载作用。

桩间软土层的变形固结状态应为是否考虑桩间土承载作用的重要因素。若在桩帽以下填土荷载的作用下，桩间软土处于欠固结状态或正常固结状态，因工后将发生固结沉降和次固结沉降，桩间土所提供的承载力是不可靠的，这种情况不应考虑其承载作用。只有桩间软土处于较明显的超固结状态时，才可考虑其承载作用。

实际工程中，需要采用桩承加筋路堤处理的软基土的工程性质通常较差，能提供的承载力并不大；而桩基可以提供较高的承载力，稍微加大桩长所增加的承载力即比桩间土所能提供的承载力还大。

综上所述，对于软土桩承加筋路堤，桩间土的承载力基本可以忽略，上部荷载由桩体承担。

3　桩承加筋路堤优化设计理论

3.1　优化设计思路

优化设计的基本思路如下：明确桩承加筋路堤的基本技术要求；建立主要设计参数之间的关系和造价优化方程，找到造价较低的设计参数区域；根据基本技术要求和造价优化区间，确定主要设计参数；根据基本技术要求，检算和确定其他设计参数。

在桩承加筋路堤设计中，对于工程造价影响很大、且可有很多组合的设计参数是桩间距和桩帽尺寸，优化设计的方向就是找到满足技术要求且造价较低的桩间距与桩帽尺寸组合。

3.2　桩承加筋路堤的技术要求

桩承加筋路堤应按下面要求进行设计：路面不出现明显的差异沉降；加筋体不能断裂，其抗拉强度须大于加筋体张拉力；桩基承载力须不小于桩承荷载；桩帽结构满足抗剪、抗弯和抗冲切的相关技术要求；路堤边坡不出现滑移或溜塌破坏；桩间软土发生较大工后沉降、可能脱离加筋体时，加筋体上填料不会流失。

3.3　桩间距与桩帽优化设计

3.3.1　桩间净间距的基本要求

为保证路面不因桩土工后差异沉降而导致路面出现明显波浪变形，土拱高度需满足如下要求：

$$1.2h_c \leqslant H = (h_d + h_t) \tag{8}$$

式中：h_c 为完全土拱高度；H 为桩顶覆土厚度；h_d 为垫层厚度；h_t 为加筋垫层顶面至路基面的填土厚度。

采用正方形布桩和正方形桩帽时，桩间净间距 b 与土拱高度有如下关系：

$$h_c = 0.707b/\tan\varphi \tag{9}$$

式中：φ 为填土的内摩擦角，黏性土取综合摩擦角。

由式(8)、(9)可得到桩间净间距须满足：

$$b = 1.179H\tan\varphi \tag{10}$$

3.3.2　造价最优的桩间距推导

对于桩承加筋路堤，单位面积所需桩和桩帽的综合单价 $F(s)$ 为：

$$F(s) = nLC_p + na^2h_mC_c + na^2h_m\gamma_s\rho C_s \tag{11}$$

式中，$n = 1/S^2$ 为单位面积桩根数和桩帽个数；h_m 为桩帽厚度；L 为桩长；C_p 为桩的综合单价；C_c 为混凝土的综合单价；C_s 为钢筋的综合单价；γ_s 为钢筋的重度；ρ 为桩帽配筋率（一般情况下，桩帽配筋率均小于构造最小配筋率，故 ρ 按最小配筋率选取，为常量）。

按 $F(s)' = 0$ 可得到造价最优的桩间距：

$$S = \frac{1.1L}{h_m b}\frac{C_p}{C_c + \gamma_s\rho C_s} - b \tag{12}$$

3.3.3　桩间距的确定

优化的桩间距应同时满足式(12)和承载力要求。按承载力要求，桩间距应满足：

$$S \leqslant \sqrt{\frac{R_a}{h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2 + h_3\gamma_3 + q}} \tag{13}$$

式中：h_1、h_2、h_3 分别为加筋垫层、填土层和路面结构层的厚度；γ_1、γ_2、γ_3 分别为加筋垫层、填土层和路面结构层的重度；q 为路面荷载；R_a 为单桩承载力特征值。

若按式(12)、(13)计算得到的桩间距分别记为 S_2 和 S_1，则当单桩承载力计算的 S_1 大于按优化综合单价计算的 S_2 时，按 $S \approx S_2$ 选择桩间距；当单桩承载力计算的 S_1 小于按优化综合单价计算的 S_2 时，按 $S \leqslant S_1$ 选择桩间距。

3.3.4　桩帽尺寸的确定

在桩间距确定后，按下式选择桩帽边长：

$$a \geqslant S - b \tag{14}$$

由式(12)可知存在最优桩间距使得单位面积造价最低。随着桩间距增大，桩帽边长相应增大，且桩帽边长增量大于桩间距增量。当桩间距大于一定值时，因桩帽尺寸增大使得单位面积造价增大。图 4 为根据上述优化理论进行设计的桩承加筋路堤算例。由图 4 可见：单位面积造价并不是随桩间距的增加而单边下降，而是有一个最低值，当桩间距为 2.6～2.8 m 时造价最优，为 500～504 元/m²。

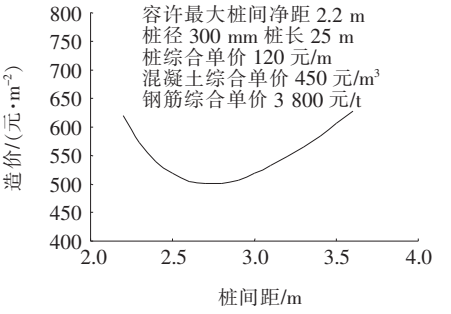


图 4　单位面积工程造价与桩间距关系曲线

4　桩承加筋路堤优化设计案例

4.1　桩承加筋路堤优化设计步骤

对于软土地区的道路软基处理设计，可遵循如下步骤进行：

(1) 收集道路规划基本资料和沿线的地形地貌及地质资料。

(2) 根据具体的工况条件进行地基处理方案比选。对于采用桩承加筋路堤方案的,按以下步骤设计:① 分析计算工作垫层荷载下,软基的固结状态和沉降情况。若软土层不是处于明显的超固结状态,不考虑其承载作用;若工后沉降较大,则需在加筋体上设置过滤土工布,以防止上部水土流失,掏空路基土;② 选择基桩参数和持力层,计算单桩承载力;③ 根据式(12)、(13)的计算结果,确定桩间距;④ 根据式(14)选择桩帽尺寸;⑤ 根据式(2)计算的加筋体张拉力,选择加筋设计参数;⑥ 验算桩帽结构和边坡稳定性;⑦ 根据上述确定的设计参数完成桩承加筋路堤设计。

4.2 桩承加筋路堤设计案例

根据桩承加筋路堤优化设计步骤,选取某高速公路路堤为设计案例,设计过程如下:

(1) 基本参数:高速公路,双向四车道,路基高度 3.2 m。

(2) 土层情况:由上至下为耕植土 0.4 m、淤泥层 14 m、粉质黏土 6.2 m、砾砂层 7.7 m、全风化层 12 m。

(3) 工作垫层填土厚度为 1.0 m,软基 20 年的固结沉降为 0.332 m。

(4) 设计采用 ϕ300 mm 预制管桩,以砾砂层为持力层,有效桩长为 25 m,单桩承载力特征值为 873 kN。

(5) 计算容许桩间净间距:加筋垫层厚 0.2 m、填土层厚 3.0 m,填土综合内摩擦角为 30°,由式(10)计算得到最大的容许桩间净间距 $b=2.2$ m。

(6) 单桩综合单价取 120 元/m,混凝土综合单价取 450 元/m^3,钢筋综合单价取 3 800 元/t,桩帽厚度取 0.5 m。按造价最优由式(12)计算得桩间距 $S_1=2.9$ m,按承载力由式(13)计算得桩间距 $S_2=3.2$ m,最后选用桩间距 $S=2.9$ m。

(7) 根据式(14)确定桩帽尺寸:$a \geqslant S-b=0.72$ m,选 $a=1.0$ m。

(8) 由式(2)计算得到加筋体张拉力 $T=34.5$ kN/m。根据相关规范,考虑加筋体综合安全系数为 2.5,选用双向土工格栅,其极限抗拉强度不小于 100 kN/m,断裂伸长率不大于 4%。

(9) 因下卧软土工后沉降较大,土工格栅上需铺设一层无纺土工布,以防止上部填土流失。

5 结论

(1) 现行桩承加筋路堤设计理论中,加筋体张拉力计算理论与实际情况有很大的差异,加筋体张拉力计算值严重偏大。

(2) 该文提出的复合加筋体理论,将加筋体、垫层和部分填土层作为一个整体,抵抗桩间的下垂变形,并推导出加筋体张拉力和下垂量计算公式。实测结果表明,该理论与桩承加筋路堤的实际状态是吻合的。

(3) 建立了一套桩承加筋路堤优化设计理论。该理论能得到满足相关技术要求、工程造价又比较经济的桩承加筋路堤设计方案。

(4) 根据路面结构的使用要求、桩承加筋路堤的技术特点和荷载特点,其单桩承载力的综合安全系数可取 1.3。

(5) 基于软黏土的固结和次固结性质,若桩间软土不是处于明显的超固结状态,可不考虑桩间土的承载作用,上部荷载由桩体承担。

参考文献:

[1] 章苏亚,赵腾飞,周洁.长短桩加筋路基在处治桥头差异沉降中的研究[J].中外公路,2020(1).

[2] Hewlett W. J.,Randolph M. F.. Analysis of Piled Embankments[J]. Ground Engineering, 1988,21(3):12-18.

[3] Jones, C. J. F. P., Lawson, C. R.,Ayres,D. J. Geotextile Reinforced Piled Embankments[C]. Proc. 4th Int. Conf. on Geotextiles: Geomembranes and Related Products, Den Hoedt(ed),Rotterdam: Balkema,1990:155-160.

[4] Low,B. K.,Tang,S. K.,Choa,V. Arching in Piled Embankments[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering,1993,120(11):1 917-1 938.

[5] Chen, R. P., Chen, Y. M., Han, J.,et al. A Theoretical Solution for Pile-Supported Embankments on Soft under One-Dimensional Compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008,45(3):611-623.

[6] British Standard Institute. British Standard 8006: Strengthened/Reinforced Soils and other Fills[S]. London: British Standard Institute, 2010.

[7] GB/T 50738-2012 复合地基技术规范[S].

[8] 连峰.桩网复合地基承载机理及设计方法[D].浙江大学博士学位论文,2009.

[9] 徐立新.桩承式加筋路堤的设计计算方法研究[D].浙江大学博士学位论文,2009.

[10] 曹卫平.桩承式路堤土拱效应及基于性能的设计方法研究[D].浙江大学博士学位论文,2007.

[11] 张惠明,等.软土桩承加筋路堤结构优化和设计优化研究报告[R],2016.

[12] DB 33/1051-2008 复合地基技术规程[S].

[13] G/T D31-02-2013 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S].