

加筋褥垫层在PCC桩复合地基中的影响研究

刘汉龙, 谭慧明

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过现场试验, 测得了路堤下PCC桩复合地基桩土差异沉降及应力比随路堤填筑的变化过程线。试验表明, 加筋褥垫层性质对桩土差异沉降以及应力比会产生影响; 加筋材料不同的预张拉程度会产生前期增长型和后期增长型两种桩土应力比增长模式, 提高预张拉程度对减小地基水平位移是有利的。此外, 采用数值模拟方法对褥垫层中加筋材料抗拉强度及铺设层数和位置的影响研究表明, 提高加筋材料的抗拉强度, 对减小桩土差异沉降、提高桩土应力比是有利的; 改变加筋材料铺设层数和位置也会产生一定的影响, 但影响程度较小。

关键词: 加筋褥垫层; PCC桩; 差异沉降; 应力比; 复合地基

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1270-06

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基基础与土动力学方面的教学与科研工作。

E-mail: hliu@hhu.edu.cn.

Influence of reinforced cushion in PCC pile composite foundation

LIU Han-long, TAN Hui-ming

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the in-situ tests, the development of differential settlement and stress ratio between PCC piles and soil was obtained. The material and thickness of reinforced cushion had an effect on the differential settlement and stress ratio. Therefore, the deformability of cushion and the reinforcing effect of geogrid in cushion should be taken into account. Different laying technology of cushion, such as pre-tension of geogrid, would result in different growing modes of pile-soil stress ratio. The larger the tensile force of geogrid was in laying, the faster the pile-soil stress ratio would develop. Furthermore, the numerical analyses by use of the finite element method were also made to study the influence of the tensile strength and arrangement of geogrid on the pile-soil differential settlement and stress ratio. It was indicated that with the increase of tensile strength of geogrid, the more loads would be supported by piles, which led to increase the bearing capacity of the composite foundation, and the pile-soil differential settlement would be reduced. However, the influence of number of layers and laying place of geogrid, especially the laying place, is almost negligible.

Key words: cushion; PCC pile; differential settlement; stress ratio; composite foundation

0 前言

在近年的高速公路建设中, 刚性桩复合地基得到了越来越广泛的应用。在路堤等柔性荷载作用下, 复合地基加筋褥垫层除了能保证桩土共同承担荷载之外, 还能通过刚性承台效应^[1], 起到减小沉降和差异沉降、限制水平位移增加路堤稳定性的作用。

在复合地基中通过改变褥垫层, 可以达到影响到复合地基加固效果的目的。李进军等^[2]水泥土单桩复合地基载荷试验, 探讨了褥垫层作用下桩土应力比的分布情况。朱世哲等^[3]认为褥垫层模量和厚度的变化会引起复合地基破坏模式的变化。褥垫层通过自身的流动调节作用, 实现了对桩土荷载分担的调节, 桩土

的差异沉降从根本上反映了褥垫层的调节情况, 但这方面的研究, 特别是现场试验研究还较少, 而且路堤荷载下加筋褥垫层加筋材料影响的研究也很少。鉴于上述提到的问题, 本文结合现浇混凝土薄壁管桩(PCC桩)^[4-5]复合地基的实际工程应用, 进行了加筋褥垫层的现场试验, 分析了加筋褥垫层对桩土差异沉降、应力比以及地基水平位移的影响。最后通过数值模拟的方法, 分析了褥垫层中的加筋材料抗拉强度以及铺设

基金项目: 国家自然科学基金项目(50679017); 江苏省“六大人才高峰”基金项目(50528512)

收稿日期: 2007-07-27

层数和位置对桩土差异沉降、应力比等的影响, 得到了一些结论, 给相关设计和施工提供了参考依据。

1 现场试验研究

1.1 试验场地概况

本次现场试验是以盐通高速公路为依托。盐通高速公路位于江苏境内, 该地区软土层为淤泥及淤泥质土, 部分地段存在超软、深厚的软土, 有的深达 30 m 以上, 工程技术指标差。场地典型的地层分布见表 1^[6]。在综合考虑的前提下, PCC 桩复合地基在盐通公路的建设中得到了应用, 并进行了专门的现场试验研究。

表 1 场地地层分布

Table 1 Soil properties of the test site			
地层序号	地层名称	一般厚度 /m	状态或密度
1	亚黏土	1.2~2.8	可塑
1-2	淤泥质亚黏土	6.3~10.5	流塑
1-2a	亚黏土夹粉砂, 亚砂土	2.0~4.4	软塑—流塑
3	(亚)黏土	1.3~4.8	硬塑—可塑
3a	亚黏土	1.2~2.6	可塑—软塑
3b	亚黏土	2.5	软塑
3-1	粉砂、亚砂土	7.4~14.2	中密—密实
3-2	亚黏土	1.1~6.8	流塑
3-3	粉砂	4.0~7.4	密实—中密
4	(亚)黏土	5.4~10.5	硬塑为主, 部分可塑
4c	亚砂土	1.5~4.0	密实

1.2 试验方案

考虑到褥垫层在复合地基中的重要作用, 在现场进行了试验研究。本次现场试验主要是通过对桩土应力、桩土差异沉降以及地基表面水平位移等的测量来反映褥垫层性质改变所带来的影响。具体实施方法是: 在不同的标段设置不同厚度不同材料的加筋褥垫层(设计方案如表 2 所示), 并在铺设土工格栅时改变其预张拉程度(试验中的土工格栅是同一规格的; 土工格栅铺设位置也相同: 一层位于褥垫层顶面, 一层位于距褥垫层顶面 25 cm 处), 然后分别通过埋设的土压力盒、沉降板以及测斜管对桩土荷载分担、桩土差异沉降以及地基水平位移进行测量。

表 2 PCC 桩加固方案

Table 2 Layout of reinforcement with PCC piles			
试验断面号	桩间距/m	垫层种类及厚度/cm	土工格栅预张拉程度
K30+756.5	3.3	灰土/两层土工格栅,60	松
K30+822	2.8	碎石/两层土工格栅,50	松
K30+853	3.0	碎石/两层土工格栅,50	松
K30+884.5	3.3	碎石/两层土工格栅,50	紧
K31+535.4	3.3	碎石/两层土工格栅,50	紧
K31+578.8	3.3	灰土/两层土工格栅,60	松

在 PCC 桩体浇筑完成后, 桩顶以下 0.5 m 范围内

的桩芯土会被挖出, 并埋设土压力盒以测量桩芯土的土压力, 然后回灌混凝土形成桩头, 在桩头上放置两个土压力盒, 取其平均值作为作用于桩顶的荷载。在试验桩四周、桩间距中心处的地基土表面都埋设土压力盒, 并以其平均值作为桩间土承担荷载的大小。试验结果分析中提到的桩土应力比即为桩顶平均土压力与桩间土平均土压力之比。在埋设土压力盒的同时, 在桩顶和桩间土中间埋设了沉降板, 通过其差值来反映桩土的差异沉降(如图 1 所示)。由于现场测试手段有限, 并没有量测土工格栅的拉力, 在实际操作中通过严格控制褥垫层材料的铺设顺序、压实程度等手段来实现土工格栅处于相对拉紧的状态。

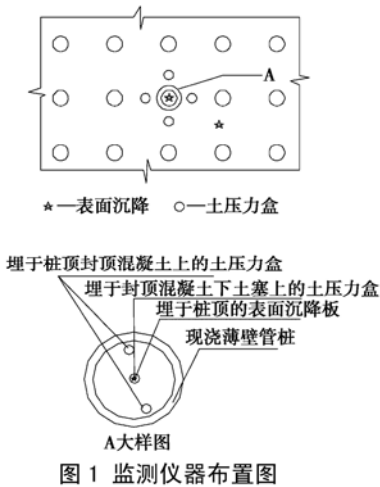


图 1 监测仪器布置图

1.3 试验结果与分析

通过 9 个月的监测, 得到了路堤荷载下 PCC 桩复合地基加固区的桩土差异沉降过程线以及桩土应力过程线等结论。图 2 和图 3 分别为典型断面的桩土差异沉降过程线以及桩土应力过程线。图 4 则反映了不同断面桩土应力比的变化过程。

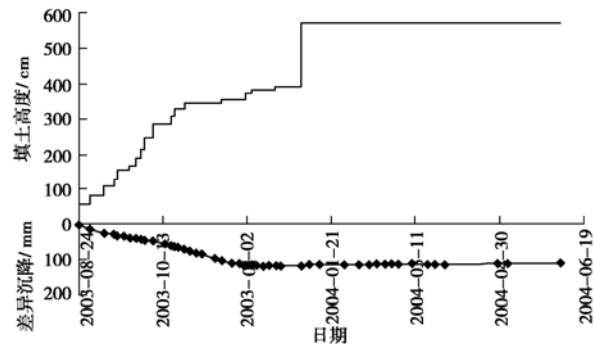


图 2 典型断面桩土差异沉降过程线

Fig. 2 Typical curves of differential settlement

从图 2 和图 3 可以看出, 在路堤填筑初期, 由于荷载比较小, 所以在桩体上并没有出现明显的应力集中, 基本与桩间土的土压力相等。当上部荷载不断增加, 填

土高度超过 1 m 后, 桩间土的承载力得到较大发挥, 产生了较大的沉降, 但桩体的沉降比较小, 桩土之间的差异沉降开始出现, 并逐渐加大。此时加筋褥垫层就开始发挥作用, 一方面褥垫层发挥自身的调节作用, 不断补偿到桩间土顶部, 以保证桩间土能继续承担一部分荷载; 另一方面, 随着桩顶刺入褥垫层, 加筋垫层通过加筋材料的张拉作用形成刚性承台效应, 将更多的上部荷载传递到桩顶, 以便充分发挥桩体的承载力。随着路堤填筑到 4 m 左右时, 在加筋褥垫层可调节范围内的桩间土承载力已经得到充分发挥, 桩间土压力基本不再增加, 桩土差异沉降也趋于稳定, 但桩顶土压力还是不断增加。当填土达到预定高度 5.7 m 后不再增加时, 桩顶上的土压力也逐渐趋于稳定。各断面的最终差异沉降以及桩土应力比见表 3。在复合地基中桩与土荷载分担就是在这样一个动态的变化中寻求平衡。桩土差异沉降以及桩土应力比都能反映这个过程, 前者是从位移的角度, 后者是从应力的角度。

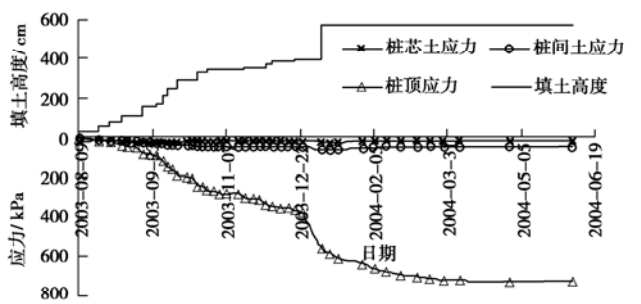


图 3 典型断面桩土应力变化过程线
Fig. 3 Typical curves of pile-soil stress ratio

桩土差异沉降以及应力比受到诸多因素的影响, 如上部荷载、桩间土的性质等, 加筋褥垫层性质也是一个很重要的因素。如表 2 所示, 在本试验中设置了两种垫层: 60 cm 厚灰土垫层、50 cm 厚碎石垫层; 同时分别在垫层的中部和表面各设置一层土工格栅。K30+756.5 断面与 K31+535.4 断面、K30+884.5 断面 K30+822 断面以及 K30+853 断面相比, 填土高度以及桩间距基本相同, 由于采用了不同的褥垫层, 最后导致的桩土差异沉降以及桩土应力比都有所不同。虽然 K30+756.5 断面的土压力盒由于损坏未能测得其最终的土压力值, 但已测得的桩土应力比值已经大于了其他类似断面的最终值, 差异沉降也小于其他断面相应的差异沉降量, 所以在本次试验中与 50 cm 厚碎石垫层相比, 不论土工格栅预张拉程度如何, 采用 60 cm 厚灰土垫层的差异沉降较小、桩土应力比较大。这也说明褥垫层材料改变所带来的影响要大于土工格栅预张拉程度改变的影响。

结合表 1 和表 3 可以看出, 断面 K30+822、

K30+853 以及 K30+884.5 的褥垫层均为 50 cm 厚的碎石加筋褥垫层, 填土高度也都相同, 但最终的桩土差异沉降和应力比却有明显的差别。断面 K30+884.5 的褥垫层中的土工格栅预张拉得比较紧, 最终桩土差异沉降和应力比都较小。这可能是由于桩间距、桩间土性质等因素造成的。因此, 从本次试验结果来看加筋材料预张拉程度对最终桩土应力比以及差异沉降的影响规律是不明显的。这在图 4 中也有反映。

表 3 各断面最终的桩土差异沉降及桩土应力比

Table 3 Ultimate differential settlement and pile-soil stress ratio in different sections

断面	填土高度 /m	差异沉降 /cm	桩土应力比
K30+756.5	5.4	10.0	20.1*
K30+822	5.4	11.4	16.5
K30+853	5.4	12.5	16.0
K30+884.5	5.4	10.8	13.8
K31+535.4	5.7	11.3	17.0
K31+578.8	6.2	12.7	27.7

注: *由于土压力盒遭到损坏, 该数据未达到最后稳定状态。

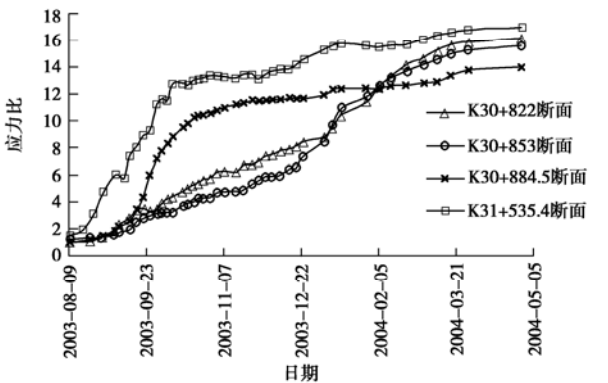


图 4 各断面桩土应力比变化过程

Fig. 4 Development of pile-soil stress ratio in different sections

从图 4 可以看出, 不同断面的桩土应力比曲线还表现出了一些区别, 大体上表现为两种增长规律: ① K30+884.5 和 K31+535.4 断面的桩土应力比早期增长较快; ② K30+822、K30+853 断面的桩土应力比后期增长较快。桩土应力比增长规律差异的原因主要来源于加筋褥垫层, 褥垫层密实、土工格栅预张拉得紧则桩土应力比前期增长较快, 否则桩土应力比曲线将表现为后期增长型。所以在上部荷载较小的情况下, 通过提高褥垫层加筋材料的预张拉程度, 使荷载较早的向桩体转移是很有必要的, 否则可能出现桩体承载力得不到充分发挥的情况。图 4 试验结果还表明, 当上部荷载较大时, 土工格栅预张拉程度的大小与最终的桩土应力比大小并没有必然的联系。虽然 K30+884.5 断面的土工格栅预张拉程度较紧, 但其最终的桩土应力比还是小于预张拉程度较松的 K30+822 和 K30+853 断面。

褥垫层中土工格栅预张拉程度除了图 4 所反映的

会对桩土应力发展过程产生影响之外,对路基的水平位移也会产生影响。如图 5 所示,K30+884.5 断面与 K30+822 断面相比,虽然路堤填土高度、桩间距以及褥垫层性质都基本相同,但 K30+884.5 断面的路基表面水平位移要明显小于 K30+822 断面,这主要是因为 K30+884.5 断面的加筋褥垫层土工格栅预张拉程度较高,可以很好地约束土体的侧向变形,增加路堤的稳定性。从图中还可以看出,加筋材料预张拉程度对减小土体侧向变形的影响并非在路堤填筑初期就表现出来,而是当路堤达到一定高度后,其影响才表现出来,这与预张拉力的大小、路堤填筑速度以及路堤填土性质等因素有关。在本次试验中,当路堤填筑至 4 m 左右时,土工格栅预张拉程度的影响才比较明显的表现出来。

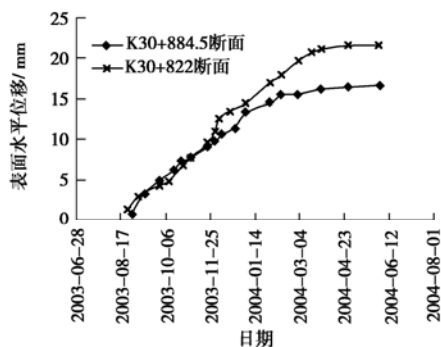


图 5 各断面表面水平位移变化过程

Fig. 5 Development of lateral displacements in different sections

2 数值模拟

对于加筋褥垫层而言,除了现场试验中考虑的褥垫层厚度、材料以及加筋材料预张拉程度等因素外,所使用的加筋材料(常采用土工格栅)的抗拉强度、铺设层数以及位置也都是必需考虑的影响因素。与分析褥垫层厚度以及材料等相比,由于加筋材料种类繁多以及铺设质量易受影响等原因,采用现场试验的方法来研究是比较困难的,而数值模拟的方法恰好能弥补这些不足。所以本文在现场试验的基础上,采用有限元数值模拟的方法来分析加筋材料抗拉强度以及铺设层数和位置对桩土应力比以及差异沉降的影响。

2.1 模型建立

模拟采用通用有限元软件 PLAXIS 进行,考虑平面轴对称问题,对 PCC 单桩及其加固范围内的圆柱形土体进行了数值模拟。由于现场试验中各个断面的参数略有不同,本次数值模拟以断面 K30+822 参数为依据,具体几何参数如下:桩长 18 m,桩外径 1 m,内径 0.76 m;桩间距 2.8 m,模拟时认为单桩的有效加固范围是直径为 3.16 m 圆柱体;下卧层厚度为 20 m;桩顶设置 50 cm 厚的褥垫层,在垫层顶面和中间各铺

设了一层土工格栅;路堤填土高度为 5.4 m。由于桩体变形很小,基本处于弹性阶段,故采用弹性模型来模拟桩体;桩周土体、下卧层土体以及上部路堤填土采用常用的 Mohr-Coulomb 模型;加筋垫层中的土工格栅采用 PLAXIS 提供的格栅单元,只能承受拉力,不能承受压力,其抗拉强度为 10 kN/m;褥垫层材料为碎石,文献[7]指出,素碎石土和土工格栅加筋碎石土都符合 Mohr-Coulomb 强度破坏准则,加筋可以提高碎石土的黏聚力和摩擦角,故本次也采用 Mohr-Coulomb 模型来模拟褥垫层材料。地基土是分层的(见表 1),为了方便起见,将地基土简化为两层,即加固区和下卧层,两层土体采用不同的计算参数,各层的计算参数是根据 K30+822 断面的地质资料按厚度进行加权后的平均值,其中弹性模量为根据压缩模量按弹性理论近似换算所得的变形模量。各材料参数汇总于表 4。

表 4 材料基本计算参数

Table 4 Parameters of materials for computation

材料	模量 /MPa	泊松比	重度 /(kN·m ⁻³)	抗剪强度	
				c/kPa	φ/(°)
路堤填土	15.0	0.30	20	15.0	20.0
褥垫层	30.0	0.28	20	1.0	30.0
PCC 桩	10000.0	0.18	25	—	—
加固区土	4.3	0.30	18	10.7	12.1
下卧层土	10.4	0.30	18	20.5	20.8

考虑到问题的对称性,只取一半建立平面轴对称模型。在模型底部设置竖向约束,在模型两侧边界考虑到对称性设置水平约束。外荷载即为上部填土的自重,不考虑路堤上的路面及车辆荷载。同时计算时考虑路堤的分层填筑过程。为了考虑初始地应力的影响,在施加填土荷载之前,先对地基土在其自重作用下进行了计算,得到了初始地应力。模拟时认为地下水位与地基表面齐平。由于桩土模量的差异,在桩土之间设置了界面单元,对界面处的土体强度进行了折减,折减系数为 0.7。

2.2 与现场实测结果对比

图 6 和图 7 分别为采用上述有限元模型计算所得的 K30+822 断面的桩土差异沉降过程线以及桩土应力变化过程线。从图中可以看出,计算结果与实测结果的一致性是比较好的,两者的变化趋势基本相同,这也就说明采用本数值模拟方法是可以反映受荷后桩土沉降以及应力的变化情况的。现场观测数据表明实际的路堤填筑过程是分为许多层完成的,观测结果只有在某一级填土较多的情况下才会出现台阶状,但在进行数值模拟时,将路堤填筑过程简化为六级加载,所以得到的曲线台阶状比较明显。另外,桩顶应力计算值与实测值在开始阶段偏差较大,这反映了加筋材

料预张拉程度的影响。数值模拟中,加筋材料由于边界的约束在加载后立刻发挥作用,但在试验中加筋材料要等绷紧后才能显著发挥作用。

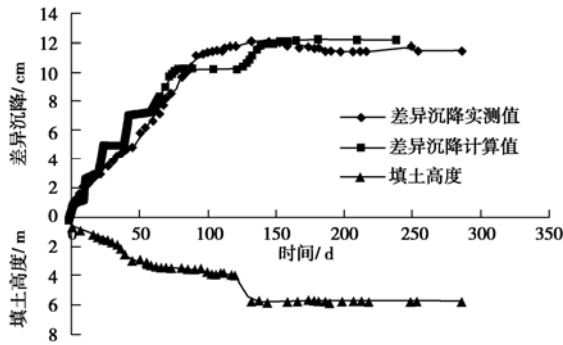


图6 K30+822断面桩土差异沉降实测和计算过程线

Fig. 6 Measured and calculated pile-soil differential settlements in section K30+822

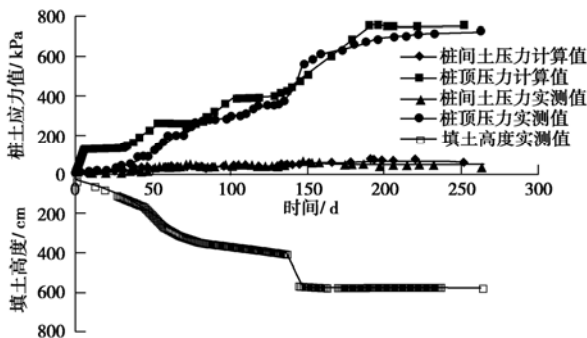


图7 K30+822断面桩土应力变化实测和计算过程线

Fig. 7 Measured and calculated pile-soil stress ratio curves in section K30+822

2.3 加筋材料抗拉强度的影响

以上述数值模型为基础,对褥垫层加筋材料的抗拉强度影响进行分析。在其他参数不变的情况下,改变加筋材料的抗拉强度进行计算分析。加筋材料的抗拉强度分别为5, 10, 20, 40, 80, 120, 250 kN/m。

图8和图9分别反映了加筋材料抗拉强度对桩土差异沉降以及应力比的影响。随着加筋材料抗拉强度的增加,桩土差异沉降呈不断减小的趋势;同时加筋材料抗拉强度的增加,导致桩土应力比不断增加,但增加幅度也是不断变小的,最后趋于一个常量。增大加筋材料的拉伸强度,从本质上是提高了加筋褥垫层对桩顶刺入的约束作用,这就导致了桩土差异沉降的减小。桩土差异沉降的减小,使得褥垫层的调节作用变弱,桩间土的承载力发挥不充分,更多的荷载转移至桩顶,桩土应力比也就增加了。但加筋材料抗拉强度增加对桩顶刺入褥垫层的约束作用毕竟是有限的,不可能达到混凝土承台那样的效果,桩间土总是要承担一部份荷载的,所以桩土差异沉降和应力比最后都是趋于一个常量。

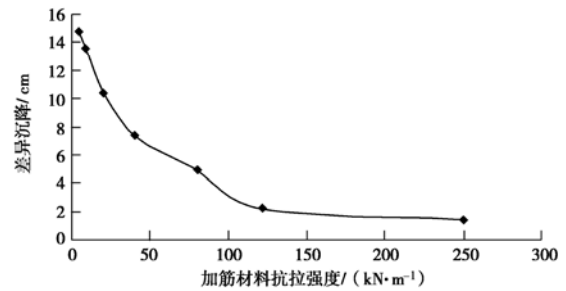


图8 加筋材料抗拉强度对桩土差异沉降的影响

Fig. 8 Influence of tensile strength on pile-soil differential

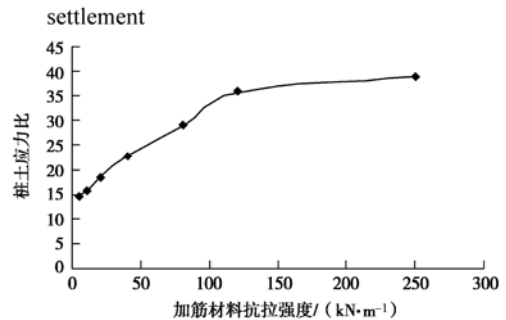


图9 加筋材料抗拉强度对桩土应力比的影响

Fig. 9 Influence of tensile strength on pile-soil stress ratio

2.4 加筋材料铺设层数和位置的影响

在其他参数不变的情况下,改变加筋材料铺设位置以及铺设层数进行计算。本次模拟了4种加筋材料铺设方式:①设置一层加筋材料,位于褥垫层的中部;②设置两层加筋材料,两层分别位于褥垫层的上部和中部;③设置两层加筋材料,两层分别位于褥垫层的下部和中部;④设置三层加筋材料,三层分别位于褥垫层的上部、中部和下部。

图10和图11分别为加筋褥垫层铺设层数和位置对桩土差异沉降和应力比的影响。随着褥垫层中加筋材料层数的增加,桩土差异沉降呈减小的趋势,而桩土应力比则是增大的。

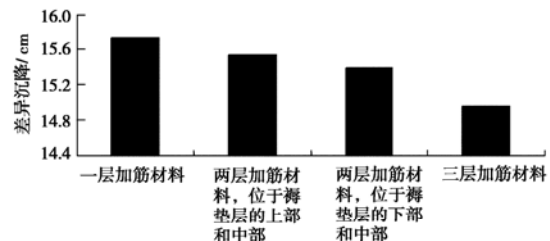


图10 加筋材料铺设对填土差异沉降的影响

Fig. 10 Influence of geogrid arrangement on pile-soil differential settlement

在加筋材料层数相等的情况下,加筋材料的铺设位置对桩土差异沉降和应力比也有一定的影响,与铺设在中上部相比,将加筋材料铺设在褥垫层的中下部可以略减小桩土差异沉降并提高桩土应力比。无论是增加加筋材料的层数,还是降低加筋材料的铺设位置,其根本目的是限制桩体的刺入以及荷载向桩间土的转

移,从而达到提高桩土应力比、充分利用桩体承载力的目的。与提高加筋材料的抗拉强度相比,改变加筋材料层数和位置,特别是改变铺设位置,对桩土差异沉降以及应力比的影响是较小的。

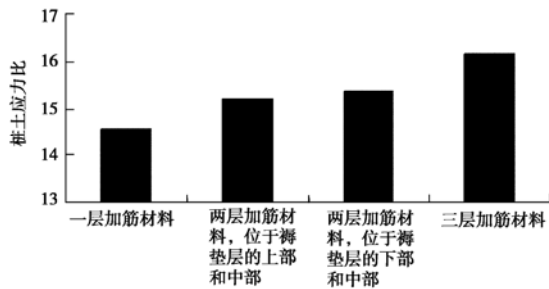


图 11 加筋材料铺设对桩土应力比的影响

Fig. 11 Influence of geogrid arrangement on pile-soil stress ratio

3 结 论

为了研究 PCC 桩复合地基中加筋褥垫层的工作特性,结合盐通高速公路,进行了现场试验,得出了路堤下 PCC 桩复合地基桩土差异沉降以及应力比随路堤填筑的变化过程线,并分析了加筋褥垫层对桩土差异沉降及应力比等的影响。采用有限元数值模拟的方法,分析了褥垫层中加筋材料抗拉强度以及铺设层数和位置对桩土差异沉降以及桩土应力比的影响。通过现场试验和数值模拟,得到如下一些结论。

(1) 现场试验表明,加筋褥垫层对桩土差异沉降以及应力比产生的影响值得重视。在本次试验中,采用 60 cm 厚的灰土垫层比 50 cm 厚的碎石垫层更有利于减小桩土差异沉降、提高桩土应力比。

(2) 现场试验表明,加筋材料不同的预张拉程度导致桩土应力比出现了前期增长和后期增长两种模式。增大加筋材料的预张拉程度对减小地基土的水平位移是有利的,可以增加路堤的稳定性。

(3) 数值模拟结果表明:随着加筋材料抗拉强度的增加,桩土差异沉降不断减小,而桩土应力比则不断增加,但其变化幅度都是减小的,趋于某一定值。

(4) 通过数值模拟认为,随着褥垫层中加筋材料铺设层数的增加以及铺设位置的降低,桩土差异沉降略有减小,桩土应力比略有增加。但与改变加筋材料抗拉强度相比,其影响较小。

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] 李进军,黄茂松,史三元,等. 复合桩基桩土应力比与褥垫层厚度关系的试验研究[J]. 工程勘察, 2003(3): 11 - 14. (LI Jin-jun, HUANG Mao-song, SHI San-yuan, et al. Experimental study on relationship between pile-soil stress ratio and thickness of cushions in composite foundation[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2003(3): 11 - 14. (in Chinese))
- [3] 朱世哲,徐日庆,杨晓军,等. 带垫层刚性桩复合地基桩土应力比的计算与分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 814 - 817. (ZHU Shi-zhe, XU Ri-qing, YANG Xiao-jun, et al. Computation and analysis of ratio of pile stress to soil stress of rigid pile composite foundation with cushion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 814 - 817. (in Chinese))
- [4] 刘汉龙,费康,马晓辉,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计理论[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164 - 168. (LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application (I): development and design[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 164 - 168. (in Chinese))
- [5] 刘汉龙,郝小员,费康,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与现场试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372 - 375. (LIU Han-long, HAO Xiao-yuan, FEI Kang, et al. Field pour concrete thin wall cased pile technology and its application (II): application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 372 - 375. (in Chinese))
- [6] 杨寿松,刘汉龙,周云东,等. 薄壁管桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 750 - 754. (YANG Shou-song, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, et al. Application of cast-in-situ concrete thin-wall pipe piles in soft soil improvement of expressways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 750 - 754. (in Chinese))
- [7] 赵川,周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 419 - 422. (ZHAO Chuan, ZHOU Yi-tang. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 419 - 422. (in Chinese))