

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.04.001

路堤荷载下挤密螺纹桩复合地基沉降现场试验

郑军锋

(中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司,福建 福州 350000)

摘要: 对新建兴泉铁路黄塘车站挤密螺纹桩复合地基的桩、土沉降及应力进行监测,分析了路堤荷载下桩、土沉降及差异沉降变化规律,桩土应力比与差异沉降关系。结果表明:桩、土沉降及差异沉降均随路堤填土高度的增加而呈线性增大;桩顶和桩间土应力随路堤填土高度的增加均不断增大,且桩顶应力大于桩间土应力;桩土应力比随着桩土差异沉降的增加先增加后减小,最终趋于稳定。结合修正的 Terzaghi 土拱理论提出了简化桩土应力比随桩土差异沉降变化曲线。现场试验分析结果有助于完善挤密螺纹桩复合地基设计理论,为工程实践提供一定的参考。

关键词: 挤密螺纹桩;复合地基;沉降;差异沉降;桩土应力比

中图分类号: TU472.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)04-0307-07

Field experiment on settlement of compacted threaded pile composite foundation under embankment load

ZHENG Junfeng

(Fujian Railway Construction Co., Ltd., China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: The pile and soil settlement and stress of the compacted threaded pile composite foundation of Huangtang Station of Xingquan Railway were monitored. The variation rules of pile and soil settlement and differential settlement under embankment load, and the relationship between pile-soil stress ratio and differential settlement were analyzed. Results show that pile settlement, soil settlement and differential settlement increase with the increase of embankment height and show a linear relationship. The soil stress at the top of pile and that between piles increases with the increase of embankment height, and the stress at the top of pile is larger than that between piles. With the increase of differential settlement, the pile-soil stress ratio increases at first, then decreases, and finally tends to be stable. Combined with the modified Terzaghi soil-arch theory, the simplified pile-soil stress ratio curve with pile-soil different settlement was proposed. The results of field test and analysis are helpful to improve the design theory of compacted threaded pile composite foundation and provide some references for engineering practice.

Keywords: compacted threaded pile; composite foundation; settlement; differential settlement; pile-soil stress ratio

引言

在软土地基处理工程中,桩+土工格栅或土工格室的桩-网复合地基得到广泛应用^[1],常见桩网复合地基桩体有水泥土搅拌桩^[2]、碎石

桩^[3-4]、CFG 桩^[5]等。近年来,螺纹桩得到快速发展,挤密螺纹桩^[6]桩-网复合地基成为一种新型的软土地基处理方式,在铁路工程中已得到实际应用。早期的复合地基一般属于单一型的复合地基,即水平向增强体型或竖直向增强体型^[7]。新

收稿日期: 2019-07-06

作者简介: 郑军锋(1975-),男,福建仙游人,高级工程师,学士,研究方向:地基加固处理。

建兴泉铁路黄塘车站采用的挤密螺纹桩+土工格室+碎石垫层的桩网复合地基属于联合形式的复合地基。其中土工格室+碎石垫层组成了上部水平方向增强体;挤密螺纹桩组成了下部竖直方向增强体。复合地基使桩-网-土协调作用,共同承担上部荷载,能够有效地提高地基承载力,减小地基沉降^[8]。许多学者从加固机理、沉降计算^[9-10]等方面对桩网复合地基的承载特性及工后沉降进行了大量研究。闫林栋^[11]等通过现场监测得出 CFG 桩复合地基桩、土之间存在差异沉降,其差异沉降随着施工进度及桩土应力的不断调整逐渐趋于稳定。通过室内模型试验,李善珍^[12]等认为桩(帽)网复合地基和桩筏复合地基在路堤荷载作用下的沉降及荷载传递表现出相似的规律,其中桩筏复合地基中桩分担的荷载最大,桩帽网复合地基次之。袁江雅^[13]、章定文^[14]等对桩网(筏)复合地基的承载机理及变形特性做了研究,为工程应用提供了参考。针对桩网复合地的探讨大多针对传统直桩桩网复合地基。由于挤密螺纹桩在桩身构造及成桩工艺上与传统直桩有明显差别,其桩网复合地基在承载特性和沉降规律也会有一定的差别。本研究主要通过现场测试,探讨挤密螺纹桩桩网复合地基桩土沉降变形规律,研究桩土应力比与桩土差异沉降的关系,为完善软土地区挤密螺纹桩复合地基设计理论提供科学依据。

1 试验概况

1.1 工程概况

兴泉铁路黄塘车站属丘陵地貌,地形起伏较大,场内上覆地层为第四系全新统人工填土、坡洪积层松软土、粉质黏土、冲洪积层软土、粉质粘土、中砂,下伏基岩为志留纪西溪超单元花岗岩。

试验场地位于挤密螺纹桩复合地基加固 A 区和加固 D 区。挤密螺纹桩桩径为 0.5 m(其中螺牙外径为 0.5 m,螺杆直径为 0.4 m),采用正三角形布置。A 区桩长 4.0~8.5 m,D 区桩长 4.2~7.0 m。复合地基采用挤密螺纹桩桩+土工格室+碎石垫层的结构形式,具体铺设方案:(1)桩顶首先铺设 0.25 m 厚碎石垫层;(2)在第一层碎石垫层上铺设土工格室(0.05 m)并填充碎石于土工格室内;(3)最后铺设 0.3 m 厚的碎石。现场实际施工时发现,挤密螺纹桩成桩完成后,桩头附近一定

范围内有浮浆涌出。

根据设计要求,A 区和 D 区挤密螺纹桩成桩完成并达到强度后进行了砍桩处理,除去了桩头的浮浆,然后铺设碎石垫层。为了对比研究砍除桩头和不对桩头进行处理的复合地基沉降特性,特意在 D 区选择局部区域不做砍桩处理,直接铺设碎石垫层。图 1(a)和(b)分别为 A 区和 D 区局部区域复合地基加固示意图。

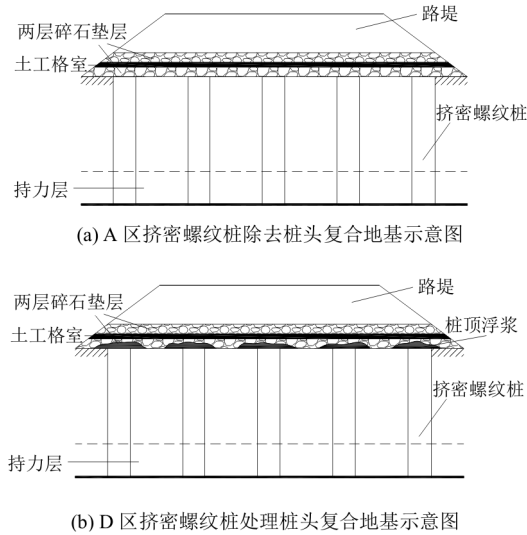


图 1 挤密螺纹桩复合地基示意图
Fig.1 Schematic diagram of compacted threaded pile composite foundation

1.2 试验方案

现场试验内容主要包括路堤填土过程中桩顶及桩间土沉降监测和应力监测。监测仪器包括沉降板和土压力盒,分别用于监测桩土沉降变化和应力变化。现场沉降板和土压力盒布置示意图如图 2 所示。A 区具体布置方式为:57-16 号桩桩顶布置桩顶沉降板,57-17 和 57-18 号桩之间布置桩间沉降板,59-17、60-17 和 60-18 号桩桩顶布置 3 个土压力盒,编号 P1、P2、P3,桩间土布置 3 个土压力盒,编号 S1、S2、S3;D 区具体布置方式为:87-14 号桩桩顶布置桩顶沉降板,86-12 和 86-13 号桩之间布置桩间沉降板。

沉降板布置时,桩顶测点使用水泥浇筑找平,桩间土测点开挖深 50 cm × 50 cm × 20 cm 左右的土坑,坑内用厚 3~5 cm 厚的黄砂垫平压实,沉降板放置于测点后,用水准尺校正水平,再填土压实,并用 PVC 塑料套管保护测杆。土压力盒布置时,先将测点整平,再铺设一层经过筛选的细砂,

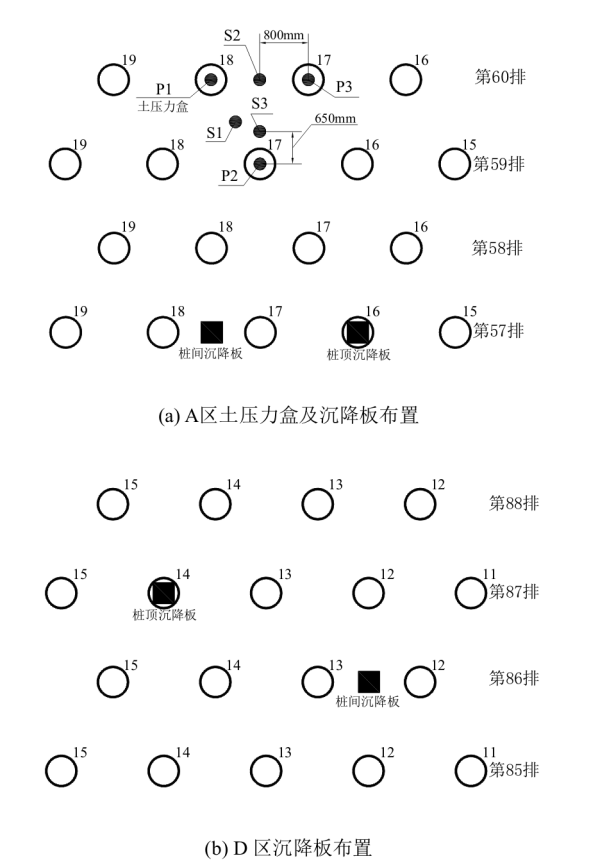


图 2 沉降板及土压力盒布置示意图

Fig.2 Layout of settlement board and soil pressure cell

厚度为 10~15 cm, 夯实找平, 再安装土压力盒就位。

现场桩土沉降监测、应力监测及路堤填土高度监测频率均为 1 次/d。

2 结果分析

2.1 路堤荷载下桩、土沉降规律

图 3 为实测桩、土沉降及填土高度随填土时长变化曲线, 可以看出, 路堤填筑过程中, 桩顶和桩间土沉降随时填土时长及填土高度的增加而增大, 桩间土沉降大于桩顶沉降。监测期末, A 区桩、土沉降稳定在 46 mm 和 101 mm, D 区桩、土沉降稳定在 63 mm 和 78 mm。路堤填筑过程中, 由于施工工期及天气影响, 部分填土层之间较长时间未施工, 静载恒定期较长。从静载恒定段(填土高度保持不变)沉降曲线可以看出, 静载恒定期间桩顶及桩间土沉降曲线较为平缓, 表现为沉降先缓慢增加, 后趋于稳定的变化趋势, 说明路堤荷载作用下, 桩网复合地基最终会达到变形协调

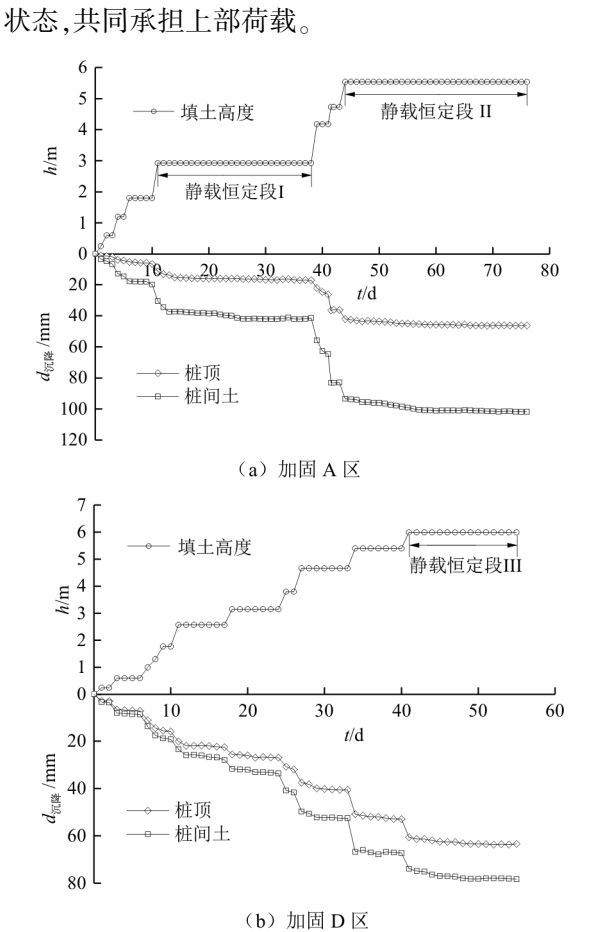


图 3 桩、土沉降及填土高度随填土时长变化曲线

Fig.3 Variation curves of pile and soil settlement and height of embankment with the time of embankment

由图 3(a)、3(b)可见, A 区第 5 层(静载恒定段 I)和最后一层填土(静载恒定段 II)及 D 区最后一层填土(静载恒定段 III)静载恒定时间持续较长, 静载恒定期间桩、土沉降量如表 1 所示, 由表可见, 静载恒定期间内桩顶及桩间土都会发生少量沉降, 桩、土沉降量都随当层填土厚度的增大而增大, 且桩间土沉降大于桩顶沉降, 说明静载作用对桩间土沉降的影响更大。

表 1 静载恒定期间桩、土沉降				
Tab.1 Pile and soil settlement during constant static load				
加固区域	静载恒定段	当层填土厚度/m	桩顶沉降/mm	桩间土沉降/mm
A	I	1.13	5.64	10.39
A	II	0.81	4.22	8.34
D	III	0.59	2.75	4.45

图 4 所示为桩、土沉降随填土高度变化曲线,由图 4 可见,在观测期间内,随着填土高度的增加,桩顶及桩间土沉降基本呈线性增加,且实测桩间土沉降大于桩顶沉降。由于路堤填筑采用同种填料,因此,填土高度即反映了路堤荷载的大小,可得:在路堤荷载不大时(填土高度 < 6 m),挤密螺旋桩复合地基桩、土沉降随路堤荷载的增大基本呈线性增加,且桩间土沉降大于桩顶沉降。

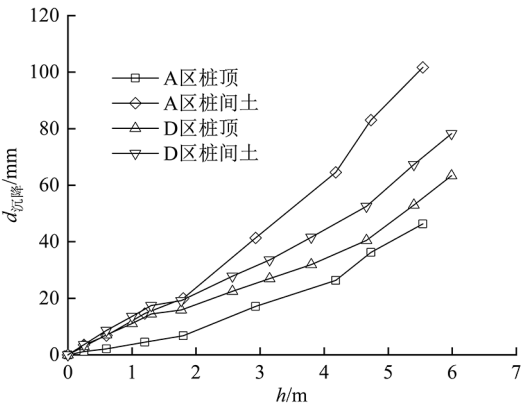


图 4 桩、土沉降随填土高度变化曲线
Fig.4 Variation curves of pile and soil settlement with the height of embankment

2.2 桩土差异沉降分析

图 5 给出了两个监测区域实测桩、土差异沉降随填土高度变化曲线,由图 5 可知:桩、土差异沉降随填土高度的增加基本呈线性增加。同时可以看出加固 D 区的桩土差异沉降远小于加固 A 区,分析发现:两个加固区域地理位置很近,工况几乎相同,不同之处在于加固 A 区进行了砍桩处理,切除了桩顶以下 0.5 m 的桩头,桩顶附近较为平整且无浮浆(如图 1(a)所示),D 区试验区域特意进行不砍桩处理,桩顶附近有大量浮浆(如图 1(b)所示)。因此推测桩顶表面浮浆是造成 D 区差异沉降小于 A 区的主要原因。分析表明:加固 D 区桩顶表面浮浆承担了部分路堤荷载,并将其传递到桩体中,重新调节了桩土荷载分担比重,使桩顶荷载增加,桩间土荷载减小,造成桩顶沉降增大,桩间土沉降减小,从而使桩、土差异沉降减小。由图 4 也可以看出:A 区桩顶沉降小于 D 区,而桩间土沉降则大于 D 区,这也验证了上述结论。桩顶附近表面浮浆硬化后具有一定的强度,在一定程度上相当于形成了一个不规则的桩帽,因此可以提高桩体分担荷载,降低差异沉降,这与郭帅杰^[15]采用楔形土拱模型和荷载传递理论分析得

出的结论相一致。监测期末,A 区桩、土沉降稳定在 46 mm 和 101 mm,D 区桩、土沉降稳定在 63 mm 和 78 mm,说明 D 区整体沉降比 A 区小。因此,在桩网复合地基的设计中,合理设置桩帽可以减小桩、土差异沉降及复合地基整体沉降。

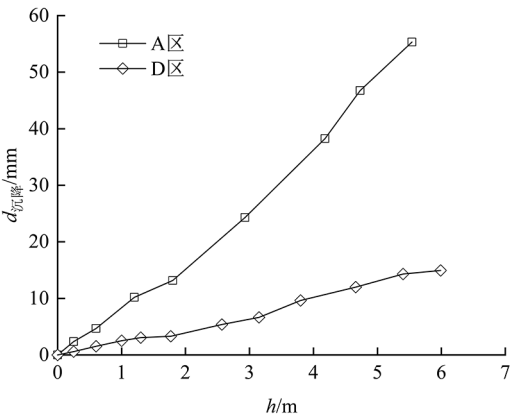


图 5 桩、土差异沉降随填土高度变化曲线
Fig.5 Variation curves of pile-soil differential settlement with the height of embankment

2.3 桩土差异沉降与桩土应力比关系

图 6 给出了加固 A 区土压力盒实测数据,由图 6 可以看出,路堤填土过程中,桩顶和桩间土应力均不断增大,且桩顶应力大于桩间土应力。路堤荷载下桩网复合地基各点的沉降量并不相同,桩间土的沉降要大于桩顶沉降,原因在于路堤填土基础是区别于刚性基础的柔性基础。由于桩土差异沉降的存在,使得路堤填土在竖直方向产生的应力发生了应力重分布现象,最终导致桩顶竖向应力增加而桩间土竖向应力减小的现象,即发生了“土拱效应”。

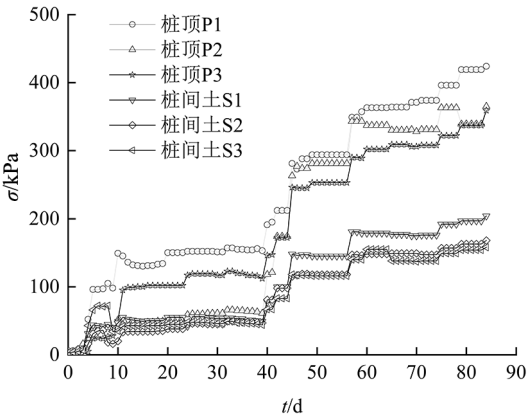


图 6 实测土压力随填土时长变化曲线
Fig.6 Variation curves of measured earth pressure with the time of embankment

Terzaghi 在 1943 年通过“活动门试验”对土工效应进行了验证^[16],土拱存在两个特点:(1)土体中存在差异沉降;(2)出现了明显的拱脚。为了验证施工现场柔性基础下复合地基是否存在“土拱效应”,结合桩土应力比^[17]与桩土差异沉降进行分析。

桩土应力比表达式:

$$n = \frac{\sigma_{col}}{\sigma_{soil}} \quad (1)$$

式中: σ_{col} 表示作用在桩顶的路堤荷载; σ_{soil} 表示作用在桩间土的路堤荷载。

为了更直观地探究桩土应力比随桩土差异沉降变化规律,绘制出加固 A 区桩土差异沉降与桩土应力比关系曲线如图 7 所示,可以看出,随着桩土差异沉降的增加,桩土应力比先增加,达到峰值后有所减小,并最终趋于稳定。这与曹卫平^[18]等通过设计室内试验对土拱效应进行研究得到的规律相一致。在路堤荷载作用下,桩土差异沉降小于 25 mm 时,4 组桩土应力比均随桩土差异沉降增加而增大,且在桩土差异沉降为 25 mm 附近达到峰值 2.29~3.35,随着差异沉降继续增加,桩土应力比有所减小并最终趋于稳定,实测 A 区桩土沉降比稳定在 1.80~2.65 之间,对比刚性基础,比值较小,说明桩间土在荷载承担上发挥了较大的作用。

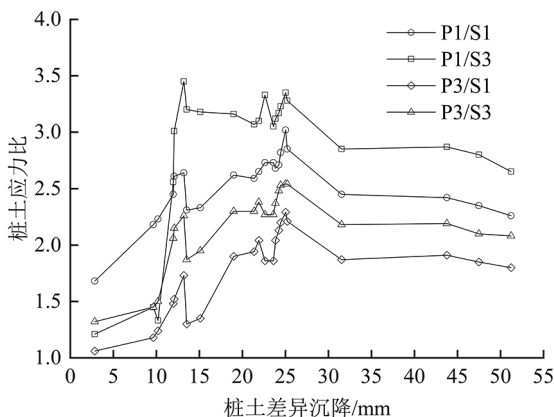


图 7 桩、土应力比随填土高度变化曲线

Fig.7 Variation curves of pile-soil stress ratio with the height of embankment

由于现场试验受到诸多环境的干扰,试验数据存在一定的偏差。

目前关于桩土应力比的相关研究较多,国内

外学者在不同的工况条件下,通过提出不同的假设条件,对桩土应力比的解析解进行建立,并与实际工况进行对比验证解析解的准确性。饶为国^[19]在复合地基桩土应力比进行研究时,考虑到网与垫层具有的“拉膜效应”,对垫层与网组成的“复合网垫”单元进行受力分析,如图 8 所示。

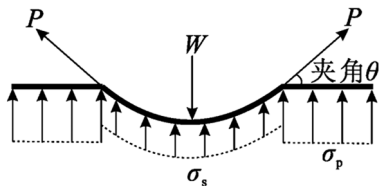


图 8 网单元受力平衡状态

Fig.8 Net unit stress balance state

复合网垫单元的受力分析如式(2):

$$W = 2P \sin \theta + P_p + P_s \quad (2)$$

为了对夹角 θ 进行计算,将网与垫层组合“复合网垫”的变形近似假设为抛物线,其中将抛物线的最低点假设为最大差异沉降 S_{∞} 。通过分析正三角形布桩形式下简化桩周土所承担的上部土柱面积,求出在正三角形布桩形式下的桩土应力比解析式^[19]。

$$n = 2 \times \frac{\sqrt{3}l^2(H_y - \lambda f) - \frac{256\varepsilon E_g l S_{\infty}}{32S_{\infty}^2 + l^2}}{\pi d^2 \lambda f} \quad (3)$$

式中: l 为上覆土的容重,通过环刀法测得数据为 23.5 kN/m³; H 为路堤填土高度, m; f 为桩土承载力标准值,其值为 100 kPa; λ 为桩间土体承载力发挥系数,当 $H_y \leq f$ 时,系数取值范围在 0.3 ~ 0.8 之间,当 $H_y > f$ 时,系数取值为 1.0; ε 为土工格栅工作下应变,其值为 9.5%; E_g 为土工格栅抗拉模量,其值为 102 kN/m。

在进行计算时,桩径 d 取值 0.5 m。将参数数值与桩土差异沉降代入等式(3),绘制桩土应力比随桩土差异沉降变化曲线如图 9 所示。

结合图 7 与图 9 可以看出,理论分析与现场实测数据反映的规律相近,因此在现场实测数据与求解得到的解析解基础上,结合修正的 Terzaghi 土拱理论提出简化桩土应力比随桩土差异沉降变化曲线如图 10 所示。

利用简化的关系曲线对柔性基础下挤密螺纹桩复合地基工作机理进行分析,在填土初期,当桩与桩间土之间的差异沉降 ΔS 满足 $\Delta S \leq \Delta S_1$ 时,

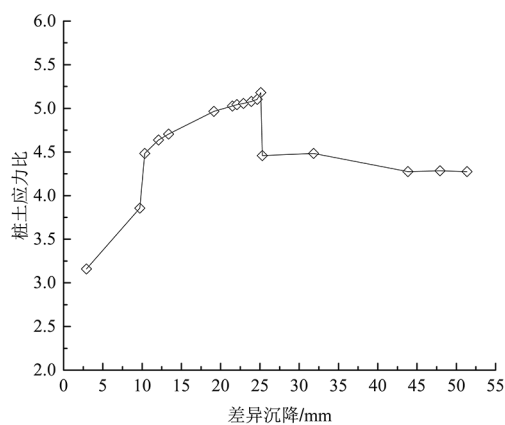


图 9 应力比与差异沉降的关系曲线
Fig.9 Relationship curve between stress ratio and differential settlement

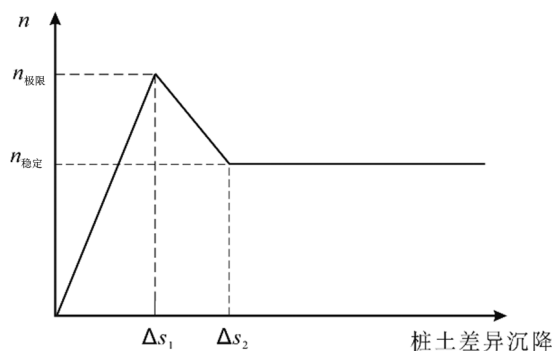


图 10 简化差异沉降与桩土应力比关系曲线
Fig.10 Relationship curve between the simplified differential settlement and pile-soil stress ratio

随着 ΔS 的增加,桩土应力比逐渐增大,在 ΔS_1 时达到最大值,此时对应的桩土应力比为 $n_{\text{极限}}$,土拱效应发挥到最大程度。当 ΔS 继续增加时,桩土应力比开始减小,意味着桩间土荷载分担比重开始增加。 ΔS 增加到 ΔS_2 时,曲线进入平稳状态,此时对应的桩土应力比为 $n_{\text{稳定}}$,之后随着 ΔS 的增加, n 在 $n_{\text{稳定}}$ 附近上下波动。

3 受力、变形分析

桩网结构复合包括桩、桩帽、网、土等四大组成部分,在荷载作用下,各部分将通过相互作用共同承载,保证整个复合地基有效运行。

桩体刚度较大,上部路基荷载大部分由桩体承担,并通过桩体将荷载传递给深层土体,桩间土所分担的荷载相对于无桩的情形下将减小,这样可使复合地基承载力提高,同时减小沉降量。

随着路堤荷载的增加,垫层材料不断调整并补充到桩间土上,保证在任意荷载下桩和桩间土始终参与工作。此外,还起到应力扩散作用,有利于减小土体沉降量,提高地基承载力。

在填土荷载作用下,路基土体会产生竖向位移及侧向位移,桩体除了提高地基承载力外,还可以提高土体抗剪强度,增大路基的抗滑能力;同时在土体中加入人工合成材料,在外力作用下,由于筋土变形不一致导致两者间产生相对位移趋势,进而调动两者间摩阻力,使得筋材受到拉力,限制了土体的侧向挤出,有效地减小土体横向变形,提高其稳定性。

加入土工格栅等加筋材料的复合垫层受力时表现为盘形或膜形变形。由于桩间土的弯沉使土工格栅随之被拉紧,从而调动它的抗拉能力,起到张力膜效应,同时将荷载均匀地传递、分布到地基土中。随着土工格栅抗拉强度的增加,将部分作用在桩间土上的荷载传递给桩体,起到调节桩土应力比的作用,并能提高复合地基承载力,降低桩、土沉降差。

4 结论

基于挤密螺纹桩复合地基在填土荷载作用下沉降及应力现场实测数据,对挤密螺纹桩桩-网(土工格室+碎石垫层)复合地基的沉降规律及承载特性进行了分析,结果表明,当路堤填筑高度小于 6 m 时:

- 1) 桩、土沉降随填土时长及填土高度的增加而增大,随路堤荷载的增加而线性增大,桩间土沉降大于桩顶沉降。随着时间的延续,桩网复合地基之间的沉降最终会达到变形协调状态,共同承担上部荷载。
- 2) 桩、土差异沉降随填土高度的增加基本呈线性增加。在桩网复合地基的设计中,合理设置桩帽可以减小桩、土差异沉降及复合地基整体沉降。
- 3) 桩土应力比随着桩土差异沉降的增加,先增加,后减小,并最终趋于稳定。桩土应力比存在一个极限值,此时桩体荷载分担比重最大,土拱效应发挥到最大程度。实测 A 区桩土应力比峰值在 2.29~3.35 之间,稳定值在 1.80~2.65 之间。

参考文献:

- [1] 左坤,王敏,徐林荣,等.高速铁路中低压缩性土桩-筏(网)地基加固效果研究[J].中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1590-1597.
- [2] 郝玉龙,王立忠,陈云敏,等.深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制[J].岩土工程学报, 2001, 23(3): 345-349.
- [3] ZHANG L, ZHAO M H, SHI C J, et al. Settlement calculation of composite foundation reinforced with stone columns[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(3): 248-256.
- [4] 赵明华,牛浩懿,刘猛,等.柔性基础下碎石桩复合地基桩土应力比及沉降计算[J].岩土工程学报, 2017, 39(9): 1549-1556.
- [5] ZHENG J J, ABUSHARAR S W, WANG X Z. Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG-lime piles[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(4): 637-643.
- [6] 周杨,肖世国,徐骏,等.变截面螺纹桩竖向承载特性试验研究[J].岩土力学, 2017, 38(3): 747-754, 783.
- [7] 晏莉,阳军生,韩杰.桩承土工合成材料加筋垫层复合地基作用原理及应用[J].岩土力学, 2005, 26(5): 821-826.
- [8] 付强,刘汉龙,庄妍,等.高速铁路CFG桩筏复合地基沉降变形特性研究[J].铁道科学与工程学报, 2014, 11(6): 45-51.
- [9] 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.
- [10] YUAN M, DING J H, ZHANG P X, et al. The settlement computation of composite foundation of different typed-pile based on the load test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 490-491: 1706-1711.
- [11] 闫林栋,魏丽敏,何群.铁路客运专线CFG桩复合地基沉降监测与分析[J].铁道科学与工程学报, 2010, 7(1): 42-46.
- [12] 李善珍,马学宁,时瑞国.高速铁路桩(帽)网和桩筏复合地基模型试验研究[J].铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 600-605.
- [13] 袁江雅.土工格室+碎石桩复合地基承载机理研究[J].铁道科学与工程学报, 2009, 6(3): 17-21.
- [14] 章定文,谢伟,郑晓国.考虑桩土非等应变的路堤荷载下搅拌桩复合地基沉降计算方法[J].岩土力学, 2014, 35(S2): 68-74.
- [15] 郭帅杰.基于桩帽尺寸调整的桩网复合地基沉降控制方法研究[J].铁道标准设计, 2016(11): 5-9.
- [16] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1943. DOI: 10.1002/9780470172766.
- [17] LYU W, MIAO L. Calculation method of pile-soil stress ratio of rigid pile composite foundation[J]. Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 624-628.
- [18] 曹卫平,胡伟伟.桩承式加筋路堤三维土拱效应试验研究[J].岩土力学, 2014, 35(2): 351-358.
- [19] 饶为国,赵成刚.桩-网复合地基应力比分析与计算[J].土木工程学报, 2002, 35(2): 74-80.

(责任编辑:方素华)