

深厚软土桩-网复合地基沉降控制现场试验研究

李 瑛¹, 郑健明², 陈 东¹, 刘兴旺¹

(1. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006; 2. 湖州市城市投资发展集团有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘 要: 桩-网复合地基多用于路堤, 有时沉降难以控制。本文以处于深厚软土上的某大型体育场为例, 通过3次现场试验, 利用桩帽形式、加筋垫层厚度、桩端持力层、桩间填充材料等设计参数的调整, 达到沉降控制要求。现场试验和施工监测的数据分析, 揭示了桩帽形式对加筋垫层刚度的影响规律, 以及加筋垫层刚度和复合地基工作机理的关系。研究表明, 在管桩间距相同时, 倒T形桩帽比矩形桩帽和T形桩帽在增强加固垫层的刚度上有很好的效果。

关键词: 桩-网复合地基; 现场试验; 深厚软土; 桩帽; 沉降控制

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)02-0111-05

Field test study on settlement control of pile-net composite foundation in deep soft soil

LI Ying¹, ZHENG Jian-ming², CHEN Dong¹, LIU Xing-wang¹

(1. Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, Hangzhou 310006, China;

2. Huzhou City Investment&Development Group, Huzhou 313000, China)

Abstract: Pile-net composite foundation is usually applied in embankments, but sometimes the settlement is difficult to control. Based on a large stadium case in deep soft soil, three field tests were implemented to meet the requirements of settlement by optimizing design parameters, including pile cap form, reinforced cushion thickness, pile tip bearing stratum, and filling material between piles. The field test and construction monitoring data analysis revealed the influence of pile cap form on the stiffness of reinforced cushion and the relationship between the stiffness of reinforced cushion and the working mechanism of composite foundation. The results showed that with the same pipe pile spacing, the invertible T-shaped cap had a better effect in increasing the stiffness of reinforced cushion than rectangular cap and T-shaped cap.

Key words: pile-net composite foundation; field test; deep soft soil; pile cap; settlement control

0 引 言

桩-网复合地基是“桩-网-土”协同工作、桩土共同承担荷载的地基体系, 它能充分调动桩、网、土三者的潜力, 适合于在天然软土地基上快速修筑路堤或堤坝类构筑物, 与其他地基处理方法相比技术优势明显^[1-3]。

国内外桩-网复合地基相关研究成果较多^[4-9], 且有如下特点: (1) 研究手段多样, 现场试验虽然成本较高, 但是因接近真实受力状态, 是主要研究手段之一; (2) 研究对象多为高铁或高速公路路堤, 在民用建筑尤其是体育场中应用相对较少; (3) 用在软土路堤时, 路堤沉降较大, 一般都大于 10 cm,

而且不做专门处理时路堤中心和边缘的沉降差较大; (4) 预应力管桩使用较多, 且桩帽多为矩形。

桩-网复合地基如要应用于深厚软土地基上的大型体育场, 需要解决沉降和不均匀沉降的问题。路堤变形近似二维问题, 复合地基在路堤边缘和路堤中心的要求差别较大, 桩基布置较为重要。大面积回填近似为一维问题, 除处理场地周围, 复合地基要求基本相同, 桩顶和桩间土体之间的差异沉降控制是关键。

本文主要介绍某深厚软土大型体育场地基处理工程的现场试验和施工监测, 通过对试验和监测数据的分析, 揭示桩-网复合地基的受力性状。本文研究成果可作为大面积深厚软土桩-网复合地基处

理的进一步研究和类似应用的基础。

1 现场试验

1.1 工程概况

试验工程为位于浙江省湖州市的南太湖湿地奥体公园体育场。体育场主要由内场、跑道和看台组成,看台范围采用管桩基础,其余范围采用桩-网复合地基。内场平面为椭圆,长轴约 160 m,短轴约 73 m,平面面积约 10 345 m²,设计要求施工期累计沉降不超过 30 mm,工后沉降不超过 20 mm。

复合地基采用直径 400 mm 预应力混凝土管桩,型号 PTC 400×60,桩长 27.0~30.0 m。管桩平面梅花形布置,内场相邻桩中心距为 4.0 m,且以每根管桩为正六边形中心布置 6 根塑料排水板,六边形边长为 1.5 m。

复合地基的褥垫层构造如图 1 所示,由有纺土工布、土工格栅和碎石等组成。桩帽底部设素混凝土垫层和碎石垫层。上部填土厚度为 2.4 m。

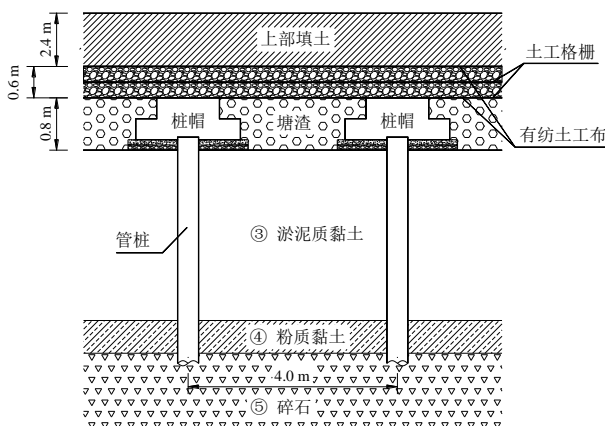


图 1 桩-网复合地基断面示意

Fig. 1 Cross section of pile-net composite foundation

1.2 地质情况

地基土层自上而下依次为①层杂填土、②层软塑~可塑状的粉质黏土、③层深厚流塑状饱和淤泥质黏土、④层软塑~硬可塑状粉质黏土、⑤层中密碎石。碎石层的碎石含量为 55%~80%左右,粒径多在 2.0~7.0 cm 之间,级配较差,磨圆度较差,呈棱角状,母岩成份主要为凝灰岩、硅质岩,充填物以黏性土为主,低压缩性。各土层的主要力学性能指标列于表 1。

因②层粉质黏土在场地大部分地段缺失,桩帽和褥垫层处于③层淤泥质黏土。③层淤泥质黏土的层厚变化较大,对复合地基控制不均匀变形的能力要求较高。④层粉质黏土在场地局部缺失。

1.3 试验方案

现场试验平面布置如图 2 所示,呈正六边形,边长为 15.0 m,设有 19 根管桩,处理面积约 166 m²,边界处设置砖砌挡土墙。监测内容主要有桩顶地表沉降(P1~P4)、桩间地表沉降(S1~S4)、桩间土体分层沉降(F1~F3)、地下水位(L1~L3)等。试验要求填土在 12 h 内完成,且分层均匀堆填。桩顶地表沉降和桩间地表沉降都通过沉降板测量;分层沉降采用磁环法测量,孔深 20 m,竖向间隔为 2.0 m。

现场试验共进行了 3 次,逐次进行,因前 1 次沉降达不到沉降控制要求才进行后 1 次试验,各次试验主要条件列于表 2,T1 的褥垫层厚度为 0.3 m,其余 2 次试验的为 0.6 m,桩帽形状如图 3 所示。第 3 次试验的累计沉降量和变形速率满足要求,地基处理按 T3 做法施工,施工监测内容与试验监测内容基本相同。图 4 为第 3 次现场试验的照片。

表 1 各土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层编号	土层名称	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	$w/\%$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	E_{s1-2}/MPa	f_{ak}/kPa
②	粉质黏土	0~2 (1.5)	18.2	1.018	33.4	27.0	11.0	5.5	160
③	淤泥质黏土	14~28 (26.0)	17.0	1.419	50.3	6.0	5.0	2.1	60
④	粉质黏土	0~4 (3.0)	19.1	0.834	27.9	19.8	10.4	4.5	100
⑤	碎石	7~15 (8.0)	20.1	—	—	0	32.0	18.0	400

注:表中所示指标均由天然状态土体测试所得;厚度栏中括号内数字为现场试验处土层厚度; γ 、 e 和 w 分别为土体重度、孔隙比和含水量;抗剪强度指标 c 和 φ 由固结快剪试验获得; E_{s1-2} 为土体的压缩模量, f_{ak} 为地基承载力特征值。

表 2 现场试验条件

Tab. 2 Field test conditions

试验编号	监测时间/d	桩帽形式	管桩桩端持力层	褥垫层厚度/m	其他
T1	180	矩形	⑤层顶面	0.3	桩帽之间素土回填
T2	180	T形	⑤层顶面	0.6	桩帽之间填筑塘渣
T3	275	倒T形	进入⑤层 0.5 m	0.6	桩帽之间填筑塘渣

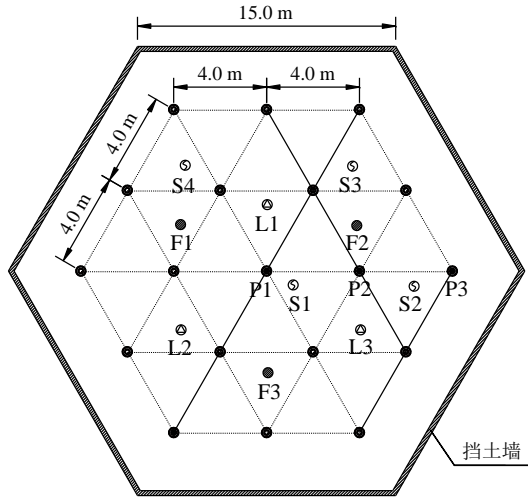


图 2 现场试验监测点平面布置

Fig. 2 Layout plan of monitoring points for field test

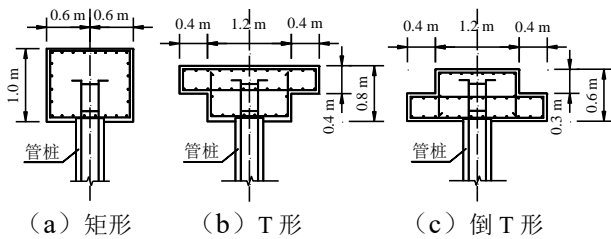


图 3 不同形式桩帽对比

Fig. 3 Different shapes of pile cap



图 4 第 3 次 (T3) 现场试验照片

Fig. 4 Photograph of the third field test (T3)

2 监测数据分析

2.1 桩帽对复合地基沉降的影响

图 5 和图 6 分别显示了不同形式桩帽对桩顶地表沉降(以 P1 为例)和桩间地表沉降(以 S1 为例)的影响。由于预应力管桩桩身强度高, 桩顶地表沉降主要包括填土在自重作用下的压缩变形和桩底刺入变形。T3 管桩端部进入低压缩性中密碎石的长度较大, 桩顶地表沉降相对较小, 总体而言 3 次试验相差不大。

而 3 次现场试验测得的桩间地表沉降相差较大。

试验结束时, T1 的桩间地表沉降达到 14.5 cm 且仍在发展; T2 的桩间地表沉降达到 8.0 cm, 而沉降速率趋于稳定; T3 的桩间地表沉降约 1.8 cm 且基本稳定。这说明桩帽形式对桩间地表沉降影响较大, 但是 T1 的结果还与褥垫层厚度只有其余的一半有关。

表 3 进一步研究了桩帽形式对复合地基沉降的影响, 并列出了桩顶地表沉降和桩间地表沉降之间的沉降差、相邻桩帽之间的水平净距。

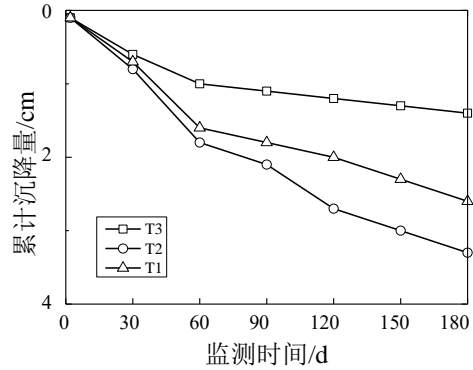


图 5 现场试验桩顶地表沉降

Fig. 5 Ground settlement of pile top in field tests

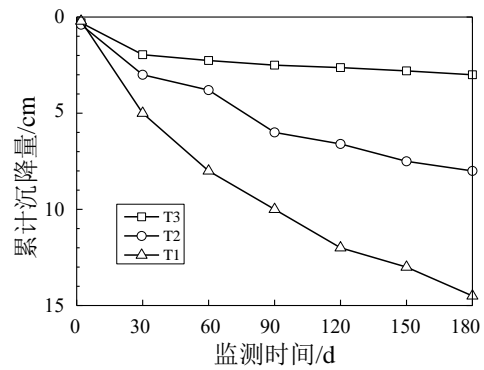


图 6 现场试验桩间地表沉降

Fig. 6 Ground settlement between piles in field tests

表 3 现场试验沉降结果对比

Tab. 3 Comparison of settlement in field tests

试验编号	桩顶沉降/ cm	桩间沉降/ cm	沉降差/ cm	净距/ m
T1	2.6	14.5	11.9	2.8
T2	3.3	8.0	4.7	2.0
T3	1.8	3.2	1.4	2.8

注: 表中所列沉降均为现场试验监测结束时数值, 桩顶沉降以 P1 为例, 桩间沉降以 S1 为例; 净距指相邻桩帽之间的水平净距。

2.2 复合地基沉降变化

图 7 所示为 T3 试验时桩间地表沉降随监测时间的变化曲线, 不同监测点的沉降曲线相差不大, 最大沉降量约为 3.25 cm。沉降曲线大致可根据沉降速率不同分为 2 个阶段, 第 1 阶段为试验前

30 d, 平均沉降速率为 0.58 mm/d; 第 2 阶段平均沉降速率为 0.061 mm/d, 第 1 阶段的沉降速率约为第 2 阶段的 10 倍。

桩顶地表沉降规律与此类似, 如图 8 所示, 不同位置管桩顶部地表沉降基本相同, 最大沉降约 1.50 cm。沉降曲线也可根据沉降速率分为 2 个阶段, 第 1 阶段为试验前 30 d, 平均沉降速率约 0.25 mm/d; 而第 2 阶段平均沉降速率为 0.031 mm/d, 第 1 阶段的沉降速率约为第 2 阶段的 8 倍。

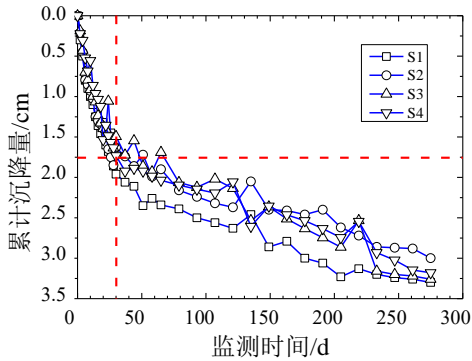


图 7 桩间地表沉降变化曲线

Fig. 7 Curves of ground settlement between piles

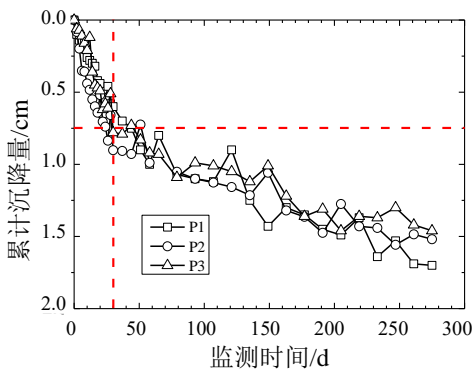


图 8 桩顶地表沉降变化曲线

Fig. 8 Curves of ground settlement of pile top

图 9 和图 10 分别为桩间土体分层沉降随监测时间和深度的变化曲线。3 个监测点的数据基本相同, 此处所示均为监测点 F2。根据图 9, 不同深度土体沉降规律相同, 前 30 d 沉降速率较大, 后期沉降速率较小且相对平稳, 不同土层的沉降速率差主要发生在前 30 d。

图 10 反应了不同时间桩间土体沉降随深度变化的规律。沉降主要发生在地表以下 10 m 范围。以观测的第 205 天为例, 10 m 以上的沉降曲线斜率为 -0.12% , 而其下斜率为 -0.01% 。此时地表 10 m 以下土体累计沉降量约 1.0 cm。沉降主要发生在堆土后的前 37 d, 观测范围土体整体下沉约 0.75 cm。第 2 天的沉降量与第 37 天的沉降量相差较大, 其后沉

降量相差较小。以深度 10 m 处的分层沉降为例, 37 d 以前的平均沉降速率为 0.18 mm/d, 而之后的平均沉降速率为 0.021 mm/d。

试验期间, 地下水位变化幅度较小, 基本稳定在原地表下 1.5 m 左右。施工监测结果与现场试验基本相同。

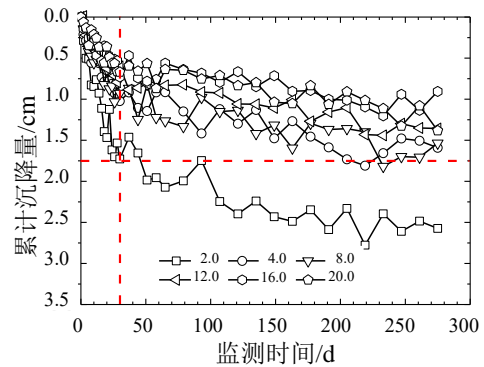


图 9 桩间土体分层沉降随时间变化曲线

Fig. 9 Layered settlement of soil between piles varies with time

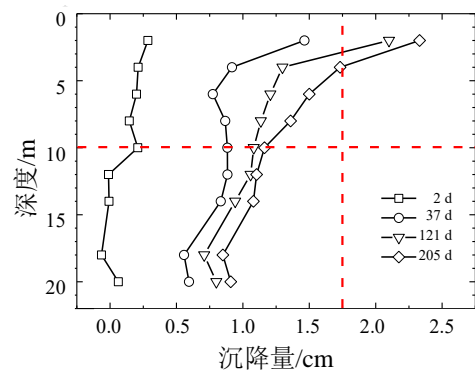


图 10 桩间土体分层沉降随深度曲线

Fig. 10 Layered settlement of soil between piles varies with depth

2.3 桩-网复合地基工作机理分析

在桩-网复合地基中, 土与土工合成材料(如土工布、土工织物或土工格栅等)的相互作用改变了土体应力分布。既有研究表明^[10], 只有一层土工合成材料的加筋垫层工作时类似张力膜, 而含有多层土工合成材料的加筋层工作时接近梁或者板。一般认为桩-网复合地基的荷载传递机理是土拱效应、薄膜拉张效应(或刚性平台效应)和桩-土相对刚度效应的组合, 并依赖于以下因素: (1) 土工合成材料加筋的层数和拉张强度; (2) 路基填料和地基土的性质; (3) 成桩材料和土的模量。

根据本文 2.1 节, 桩帽形式、褥垫层厚度、桩帽间充填材料等影响褥垫层的刚度, 褥垫层刚度由小到大依次为矩形、T 形和倒 T 形。虽然 T 形桩帽

和倒 T 形桩帽的体积相等,但是后者可充分发挥塘渣的应力扩散性质,减小褥垫层在受力时相邻支点的距离。从桩顶地表沉降和桩间地表沉降的监测结果分析,采用倒 T 形桩帽的复合地基加筋层在工作时接近板,而采用矩形桩帽的复合地基加筋层在工作时类似张力膜。

根据本文 2.2 节,采用倒 T 形桩帽后,桩-网复合地基在加载后前 30 d 发生整体沉降,与桩筏基础的受力性状相似,其后桩间土沉降速率较大,土工格栅逐渐拉伸,而且此阶段的土体沉降主要发生在地基浅层(原地表以下 10 m 内),可能与桩间土拱有关。

3 结 论

根据湖州市南太湖湿地奥体公园体育场复合地基的现场试验和施工监测结果,结合本文的分析,得出以下结论:

(1) 经合理设计,桩-网复合地基可用于控制大面积荷载作用下深厚软土的累积沉降和不均匀沉降。

(2) 桩帽形式影响褥垫层刚度,进而影响桩-网复合地基的工作机理;相比矩形桩帽,倒 T 形桩帽可缩短褥垫层受力支点距离,并使其工作状态接近结构板。

(3) 对倒 T 形桩帽的桩-网复合地基加载后,沉降在前期呈现整体性,其后土工格栅逐渐受拉,

并且土体沉降主要发生在浅部。

(4) 沉降与褥垫层刚度的关系值得进一步研究,可为按沉降控制设计提供依据。

参考文献

- [1] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
- [2] Han J, Huang J, Porbaha A. 2D numerical modeling of a constructed geosynthetic-reinforced embankment over deep mixed columns[C]//Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress. US: ASCE, 2005.
- [3] 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.
- [4] 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(9): 1057-1062.
- [5] 吕伟华,缪林昌,刘成,等. 基于系统分析的桩网复合地基荷载效应定量评价模型研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2291-2298.
- [6] 于进江,程谦恭,李成辉,等. 超大面积深厚软土桩-网复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2881-2889.
- [7] 于进江,程谦恭,贺宏武,等. 超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3323-3330.
- [8] 徐林荣,牛建东,吕大伟,等. 软基路堤桩-网复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 1057-1062.