

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0013-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.003

深厚软土区过渡段软基处理方式现场试验研究

倪洁¹, 陈永辉^{1*}, 毛斌²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 以浙江省台州湾大桥及接线工程 TS13 标段为依托, 研究了水泥搅拌桩处理、管桩处理等软基处理方式下桥头过渡段到普通路段的过渡效果。现场试验研究管桩变桩长、管桩和水泥搅拌桩相结合的软基处理方案, 研究发现: 通过控制管桩的桩长变化, 可以实现桥头段到桥头过渡段的平滑过渡; 在管桩和水泥搅拌桩的软基处理方式处, 设置合理的管桩和水泥搅拌桩的桩长与间距, 或者增加过渡段的长度, 可使管桩处理段和水泥搅拌桩处理段平滑过渡。

关键词: 软土地基; 过渡段; 管桩; 水泥搅拌桩

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Field Test on Treatment of Soft Foundation in Transition Section of Deep Soft Soil Area

NI Jie¹, CHEN Yonghui^{1*}, MAO Bin²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning Design and Research, Hangzhou, Zhejiang 310006, China)

Abstract: Based on the TS13 section of the Taizhou Bay Bridge and its connection project in Zhejiang Province, the effect of the transition from the abutment to the common section was studied. Field tests were conducted to study the soft foundation treatment scheme with variable length of pipe pile and combination of pipe pile and cement mixing pile. It is found that the smooth transition from abutment to the common section can be realized by controlling the change of pile length. Setting reasonable length and space between pipe pile and cement mixing pile, or increasing the length of transition section, can offer a smooth transition between the treatment section of pipe piles and cement mixing piles in the soft foundation treatment of pipe pile and cement mixing pile.

Key words: soft soil foundation; transition section; pipe pile; cement mixing pile

我国东南沿海地区普遍存在深厚软土区, 特别是浙江沿海地区, 软土的厚度大、性质复杂、工后沉降大且沉降影响因素多。遇到深厚软基时, 设计人员通常采用管桩、水泥搅拌桩、轻质填料、塑料排水板以及多种软基相结合的地基加固方案。因此, 在一个路段内可能存在两种或多种不同的软基处理方式。由于软基处理方式不同, 荷载传递规律不同, 会在不同处理段交接处发生差异沉降, 严重时会出现跳车现象^[1-3]。因此, 在相邻的两种软基处理路段

交接处必须合理地设置软基处理深度、处理间距、桩径和路堤高度等参数, 以减小不同软基处理段的差异沉降和路面纵坡差, 使不同软基处理段之间可以协调变形并平滑过渡。近年来工程界重点研究了桥头处跳车现象, 在桥头路段加大处理后, 可以减少桥头的跳车现象。目前主要研究多集中在同一种软基处理方式下的地基沉降, 而对同一路段间不同软基处理方式的沉降研究还比较少, 尚未形成系统的理论。在实际工程中最常用的复合地基处理法是

收稿日期: 2019-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378008); 浙江省交通运输厅科研计划项目(2015J06)

作者简介: 倪洁(1994-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事地基处理、岩土工程方面的研究工作。* 通讯作者: 陈永辉(1972-), 男, 浙江东阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基处理与地基基础工程方面的研究。

管桩和水泥搅拌桩处理。为了研究同一路段采用这两种软基处理段平滑过渡的效果,本文以浙江省台州湾大桥及接线工程 TS13 标段为例,研究多种软基处理方式下桥头过渡段到普通路段的过渡效果,对管桩变桩长、管桩和水泥搅拌桩相结合的软基处理方案进行现场试验研究和长期的现场监测分析,为提高公路软基的设计水平,为促进差异沉降控制技术的发展提供借鉴。

1 工程实例

1.1 工程概况

浙江省台州湾大桥及接线工程起点接三门湾大桥及接线工程的终点,经三门、临海,跨越台州湾后,接乐清湾大桥及接线工程的起点,起点桩号 K99+000,终点为温岭南城,终点桩号 K201+239.037,全长约 102 km。

深厚软基过渡段复合地基现场试验位于 TS13 标段,该标段的填方路堤位于海积平原深厚软土上。为了实现桥头段到一般路段的平稳过渡,设置桥头过渡段,且桥头过渡段采用变桩长和变刚度的复合地基处理方式。

1.2 地质条件

图 1 为 TS13 标段的地质剖面图。TS13 标段以海积平原为主,地势平坦开阔河网纵横交错。上部多为软土层,中部分布厚层海积软土、可塑状黏土等,场地工程地质条件复杂,浅部无良好的基础持力层。

表 1 为 TS13 试验标段地基土的物理力学参数。填方段表层为灰黄色粉质黏土,厚度一般为 0.9 ~

3.3 m。上部分布两层软土,整体厚度约 22.4 ~ 30.1 m。其中 ②₂ 层淤泥质黏土,以灰黄色为主,流塑,平均含水量 48.9%; ②₃ 层淤泥质黏土,灰色,流塑,平均含水量 49.1%。该软土具有高压缩性,易扰动、易变形等特性,工程地质条件差,必须进行地基处理。在软土层下多分布 ②₃² 和 ③₁ 层海积软塑土、③₂ 和 ④₁ 层粉质黏土,厚度较大,性质较差。场地下部多分布冲湖积黏性土、海积黏性土、冲海积粉细砂,其中冲湖积主要以可塑状为主,力学性质较好。海积以软塑、可塑状为主,力学性质一般,深部相对较好;粉砂多呈密实状,力学性质较好。

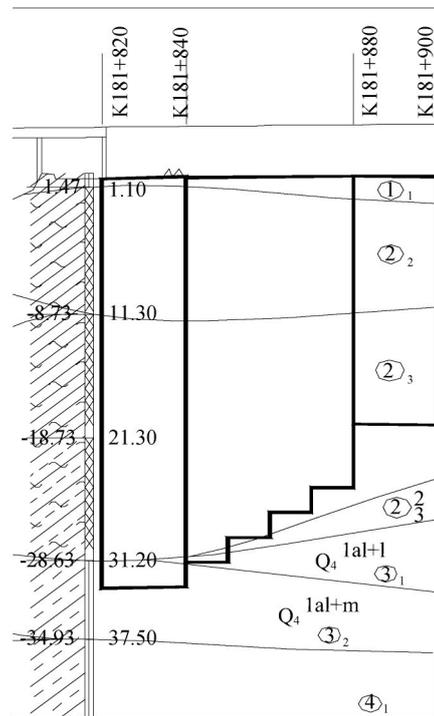


图 1 TS13 标段地质剖面图 (单位: m)

Fig.1 Section of TS13 geology

表 1 TS13 试验标段地基土的物理力学参数

Tab.1 TS13 physical and mechanical parameters of subsoil in test section

土层代号	岩土名称	天然含水率 w/%	天然孔隙比 e ₀	塑性指数 I _p	压缩模量 E _s /MPa	泊松比 ν	直剪快剪		固结快剪		渗透系数 k/(m·s ⁻¹)
							粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/°	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/°	
① ₁	黏土	34.3	0.971	17.4	4.18	0.3	29.3	8.8	34.9	13.2	1.3 × 10 ⁻⁸
② ₂	淤泥质黏土	49.4	1.377	19.8	2.24	0.35	6.8	2.1	11.1	8.2	1.95 × 10 ⁻⁹
② ₃	淤泥质黏土	49.5	1.396	24.4	2.23	0.35	7.9	2.6	12.0	9.3	1.93 × 10 ⁻⁹
② ₃ ²	黏土	41.1	1.150	17.2	3.32	0.35	13.9	5.6	-	-	1.3 × 10 ⁻⁹
③ ₁	黏土	30.8	0.883	17.1	5.53	0.3	41.6	11.9	-	-	1.1 × 10 ⁻⁹
③ ₂	粉质黏土	35.2	1.002	15.1	4.01	0.3	20.4	8.0	-	-	1.2 × 10 ⁻⁹
④ ₁	粉质黏土	29.1	1.127	15.3	5.74	0.3	37.0	13.0	-	-	1.1 × 10 ⁻⁹

2 监测方案

2.1 软基处理方案

表2为TS13标段试验段类型。K181+820-K181+840为桥头段，长20m；K181+840-K181+880为桥头过渡段，长40m。K181+880-K181+900为一般路段，长20m。表3为各类型试验段软基处理方案。桥头段和桥头过渡段地基采用管桩处理。采用钉型水泥搅拌桩处理地基。依据地质勘察资料，现场监测段软土层厚30m，路堤1:1.5放坡。管桩处理段采用正方形布置，桥头段管桩处理深度为33m，管桩穿透软土层，处理间距为2.3m，桩径为0.4m，桩帽尺寸为1.0m×1.0m×0.3m。在桥头过渡段，处理深度依次递减2m，部分路段管桩未穿透软土层，管处理间距为2.4m。水泥搅拌桩采用梅花形布置，处理间距1.8m，处理深度20m，扩大头直径1m，下部桩体直径0.5m，水泥搅拌桩未穿透软土层。

2.2 监测仪器

图2为TS13标段仪器布置平面图。在K181+83-K181+892监测断面均埋设了沉降板和测斜管。路基填筑期，每填筑一层，观测一次沉降；预压期内，第一个月内每三天观测一次，从第二个月起，每7天观测一次。

在K181+882监测断面埋设了孔隙水压力计，共计7个断面沉降板和1个孔隙水压力计。振弦式孔隙水压力计量程为1MPa，精度为1kPa。图3为管桩处理段路基横断面，管桩处理段桩长33m，桩间距2.3m。图4为水泥搅拌桩处理段路基横断面，水泥搅拌桩处理段桩长20m，桩间距1.8m。图5为土压力盒的布置，土压力盒量程为1MPa，精度

为1kPa。在桩间土压力盒埋设深度大约400mm，与桩帽中心土压力盒间距为1.2m。孔隙水压力计和土压力盒监测频率与沉降观测一致。

3 监测结果分析

3.1 管桩和水泥搅拌桩过渡段沉降规律

TS13标段现场试验段地基处理工作于2016年

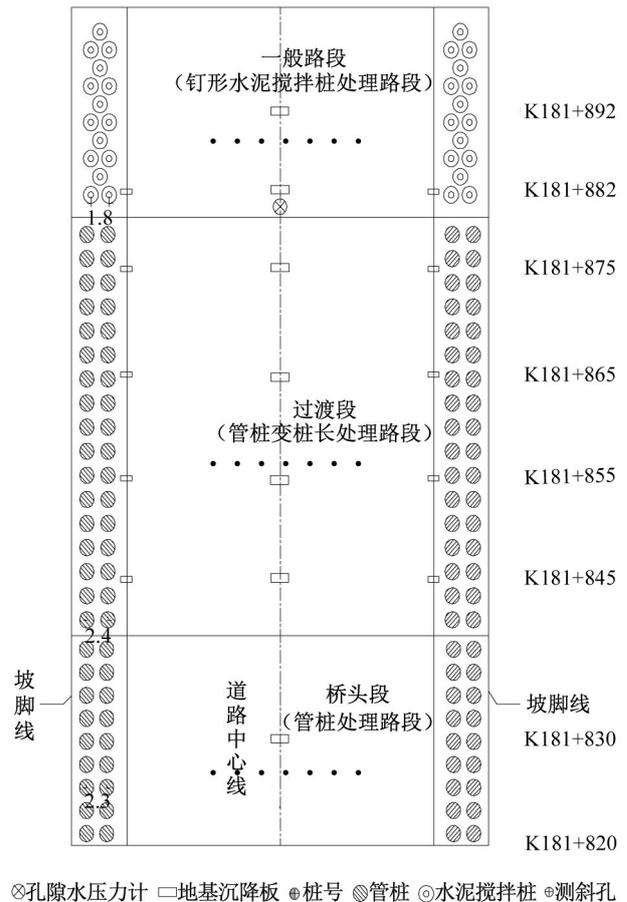


图2 TS13标段仪器布设平面图

Fig.2 Instruments layout of TS13

表2 TS13标段试验路段类型

Tab.2 Section type of TS13

路段类型	路段桩号	处理长度 /m	路段填高 /m
桥头段	K181+820-K181+840	20	4.2
桥头过渡段	K181+840-K181+880	40	4.2
一般路段	K181+880-K181+900	20	4.2

表3 TS13标段各路段软基处理方案

Tab.3 Soft foundation treatment of TS13

桩体类型	处理路段	间距 /m	深度 /m	预压方式
管桩	桥头段、过渡段、一般路段	2.3 ~ 2.4	25 ~ 33	等载
水泥搅拌桩	一般路段	1.8	20	等载

8月15日全部完成,并埋设好沉降板。施工填筑路堤高度3.5m,填筑期共108天。管桩处理路段和水泥搅拌桩处理路段预压期为8个月。

图6为现场试验段各个监测断面路中的沉降曲线。发现:至2018年2月7日,即路堤填筑完成后14个月,K181+830、K181+845、K181+865、K181+875、K181+882和K181+892监测断面的沉降分别为91、99.4、115.5、125、154、187mm。我国《公路路基设计规范》规定,高等级公路及一级公路在桥头与路堤相邻处工后沉降要不大于10cm,在一般路段工后沉降要不大于30cm,现场各监测断面的工后沉降都满足规范要求。K181+830-K181+875监测断面均处于管桩处理段,K181+882和K181+892监测断面处于水泥搅拌桩处理段。距离桥头段距离

越远,沉降越大。在桥头段,管桩长33m,管桩穿透软土层,所以沉降比较小。管桩处理段的沉降明显小于水泥搅拌桩处理段的沉降。这是因为水泥搅拌桩处理的软土地基属于柔性地基,而管桩处理的属于刚性地基,所以从桥头段到桥头过渡段,再到一般路段沉降逐渐增大。

图7为道路中心纵向地基沉降。随着管桩长度的递减,地基的沉降逐渐增大,距桥台10~50m范围内,地基沉降逐渐增加,桥头段到桥头过渡段达到了平滑过渡的处理效果。然而,桥头过渡段到普通路段出现了较大的差异沉降,在管桩变桩长处理段与水泥搅拌桩处理段出现斜坡,严重时会发生二次跳车现象。管桩变桩长与水泥搅拌桩处理段交界处的纵坡率为0.094%,预压8个月后此处的纵坡坡度增加到0.106%,道路纵坡坡度仅增加了0.01%。研究表明^[7],公路不均匀沉降引起的纵向纵坡差要小于0.5%,横向不均匀沉降差不得大于1%。桥头处纵坡率大于0.4%时会影响行车舒适度并影响行驶速度,车辆行驶速度在110km/h时,公

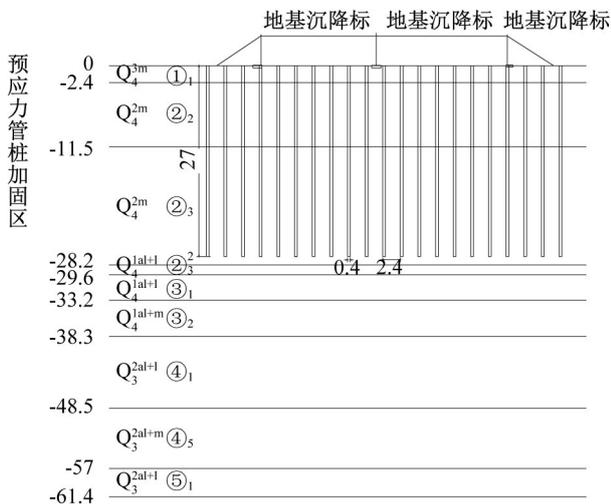


图3 管桩处理段路基横断面图(单位:m)
Fig.3 Map of pipe pile treatment section

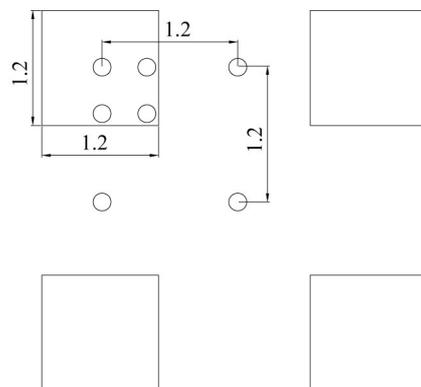


图5 土压力盒布置(单位:m)
Fig.5 Arrangement of soil pressure boxes

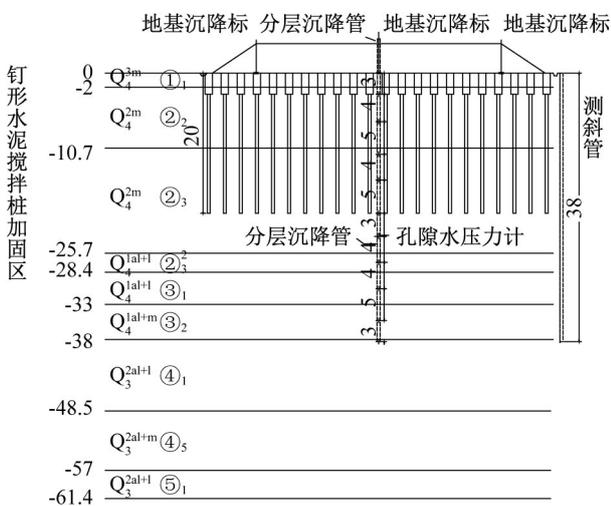


图4 水泥搅拌桩处理段路基横断面图(单位:m)
Fig.4 Map of cement mixing pile

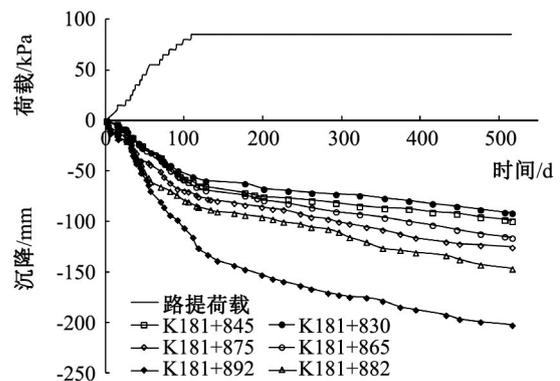


图6 各监测断面荷载-时间-沉降曲线
Fig.6 Load time settlement curve of monitoring sections

路的容许纵坡差要小于0.5%^[8]。《浙江软基处理规范》规定公路软土地基除需满足各段工后沉降外，同时对差异沉降的过渡应该满足其渐变率 $\leq 0.5\%$ 。路堤填筑阶段和预压期末的道路渐变率都小于0.5%，现场数据满足规范要求。在管桩与水泥搅拌桩处理段交界处出现斜坡，由此说明在管桩和水泥搅拌桩处理段交接处，要合理设置管桩和水泥搅拌桩的桩长与间距，使管桩处理段和水泥搅拌桩处理段平滑过渡。

3.2 超静孔隙水压力分布规律

孔隙水压力计的读数为总孔压，扣除静孔隙水压力后，获得超静孔隙水压力。图8为K181+882断面中心位置处不同深度超静孔隙水压力随时间的变化曲线。K181+882断面管桩处理深度为25 m。在路堤加载期间，超静孔隙水压力随着路堤荷载的增加而不断增大。加载完成后，超静孔隙水压力开始逐渐消散，但是消散的速率越来越慢。这是因为

随着软土的固结，孔隙水排出，软土渗透系数逐渐减小。26 m和30 m处的超静孔隙水压力比较小，且消散比较快，是因为管桩加固区的下卧层存在粉砂，透水性比较好。越接近地表，超静孔隙水压力也大。土体深度为6 m时，超静孔隙水压力最大这是因为此处的附加应力增量比大。

3.3 土压力分布规律

图9-图11分别为K181+830、K181+855和K181+875处桩帽和桩间土上的土压力随着时间变化的实测结果， P_p 表示桩帽上的土压力， P_s 表示桩间土的土压力。发现：桩帽上的土压力随时间变化的规律与路堤填筑时间曲线相一致，而桩间土上的土压力随时间增加的较为缓慢。

截至2017年3月4日，即路堤填筑工后120天，K181+830处桩帽上的土压力为177.3 kPa，桩间土上的土压力为44.4 kPa，桩土应力比为4。此时，为

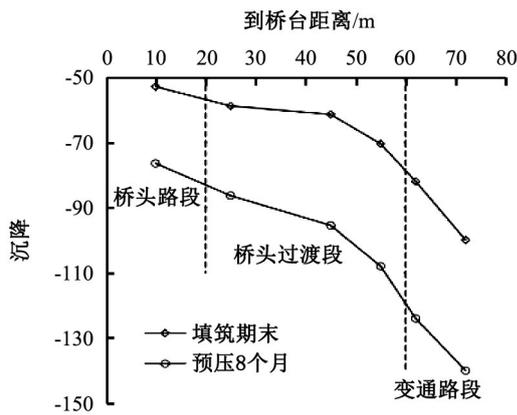


图7 道路中心纵向地基沉降
Fig.7 Longitudinal settlement of road center

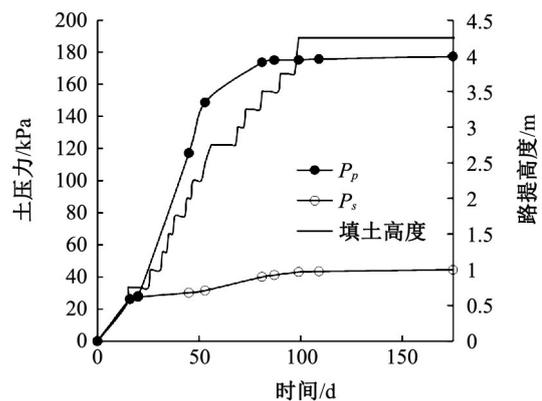


图9 K181+830路中桩帽及桩间土土压力实测值
Fig.9 Measured values of soil pressure on pile cap and pile in K181+830

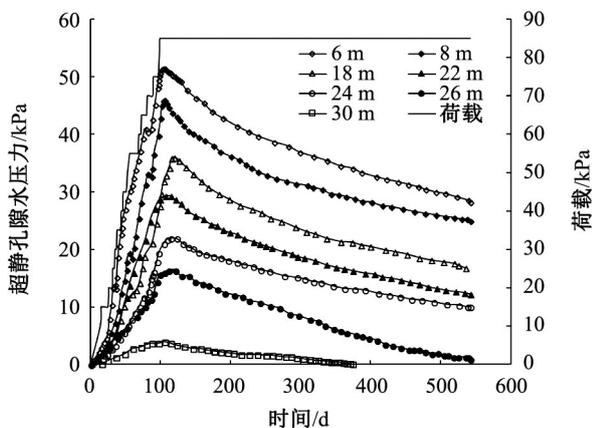


图8 K181+882断面超静孔隙水压力随时间变化规律
Fig.8 Change of pore water pressure with time in K181+882

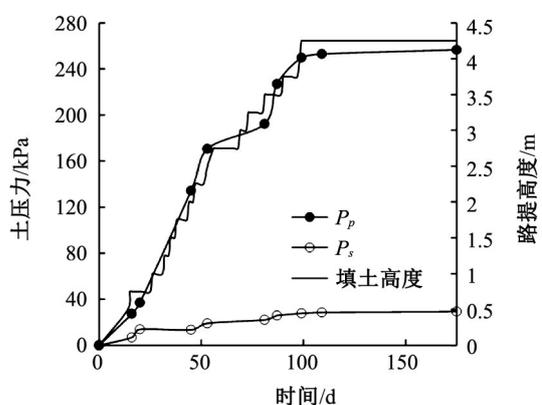


图10 K181+855路中桩帽及桩间土土压力实测值
Fig.10 Measured values of soil pressure on pile cap and pile in K181+855

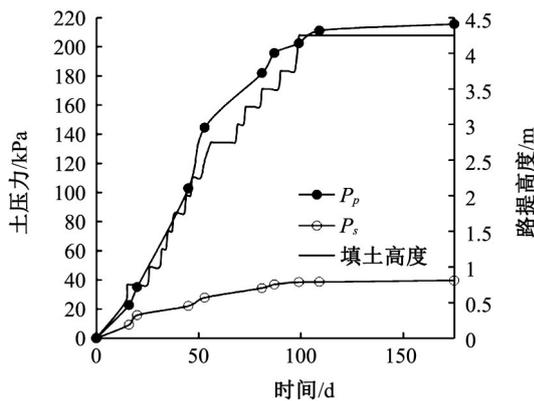


图 11 K181+875 路中桩帽及桩间土土压力实测值

Fig.11 Measured values of soil pressure on pile cap and pile in K181+875

为了方便桥头桩基施工, 该区域进行了桥头放坡, 尚未进行桥头台背路堤回填, 导致该处的桩土应力比较小。

截止监测结束, K181+855 和 K181+875 桩帽上的土压力分别为 256.6 kPa 和 195.6 kPa, 桩间土的土压力为 29.3 kPa 和 39.6 kPa, 桩土应力比分别为 8.7 和 5.0。K181+855 处的桩土应力比明显大于 K181+875 处的桩土应力比。K181+855 和 K181+875 处的桩长分别为 29 m 和 25 m。表明桩长越长, 桩土应力比越大。

4 结论

1) 从桥头段到桥头过渡段, 随着管桩长度的逐级减小, 地基的沉降逐渐增大, 可以实现桥头段到桥头过渡段的平滑过渡。

2) 管桩处理段与水泥搅拌桩处理段出现斜坡, 严重时会发生跳车现象。在不同软基处理方式处, 管桩采用短桩大间距排布、水泥搅拌桩采用长桩小间距排布可减小过渡差异沉降。同时, 增加过渡段

的长度, 也可使管桩处理段和水泥搅拌桩处理段平滑过渡。

3) 在路堤加载期间, 超静孔隙水压力随着路堤荷载的增加而不断增大。路堤荷载填筑完成后, 超静孔隙水压力开始消散, 消散的速率随着时间的增长减慢。附加应力增量比大的土层超静孔隙水压力大。

4) 桩帽上的土压力随时间变化的规律与路堤填筑时间曲线相一致, 桩间土上的土压力随时间增加的较为缓慢, 且桩长越长, 桩土应力比越大。

参考文献:

- [1] 李翔军. 水泥搅拌桩复合地基技术与工程实践 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [2] 李然, 刘润, 徐余, 等. 水泥搅拌桩法处理软土地基中桥头跳车现象的影响因素分析 [J]. 岩土工程学报, 2013(35): 725-729.
- [3] 潘晓东, 杜志刚, 杨晓光. 桥头跳车对行车安全影响评价指标的研究 [J]. 同济大学学报, 2006 (34): 634-637.
- [4] 蒋应军, 武建民, 陈忠达, 等. 桥头跳车成因分析及防治技术研究 [J]. 公路, 2004(7): 124-131.
- [5] 徐宏. 公路路堤荷载下变刚度复合地基设计方法优化及其试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [6] 茅进宇, 吴跃东. 高速公路桥头过渡段差异沉降控制研究 [J]. 公路与汽运, 2013(1): 176-181.
- [7] 叶见曙, 赖国麟, 蒋爱祥, 等. 宁通一级公路扬江段桥头搭板的调查与分析 [J]. 华东公路, 1995(6): 27-30.
- [8] 刘吉福, 魏金霞, 徐小庆. 桥头跳车机理研究与容许工后沉降研究 [C]// 高速公路地基处理理论与实践 -- 全国高速公路地基处理学术研讨会论文集. 广州: 中国土木工程学会, 2005: 82-89.

(责任编辑 李新)