

软基上桩承加筋路基与桩基桥台的承载机理

余志通¹, 余智敏²

(1. 莆田学院 土木工程学院, 福建 莆田 351100; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 采用 ABAQUS 有限元软件建立桩承加筋路基和桩基桥台模型, 系统研究桩基桥台-路基-地基的相互作用性状, 包括桥台桩基水平位移、桥头路面沉降、桥台桩弯矩等的变化规律, 分析深厚软土地基的超孔压固结, 并提出若干施工建议。

关键词: ABAQUS; 软土地基; 桩基桥台; 超孔压

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)06-0532-05

Load bearing mechanism between geosynthetic reinforced pile-supported embankment and piled abutment constructed on soft soils

She Zhitong¹, She Zhimin²

(1. School of Civil Engineering, Putian University, Putian 351100, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: A pile-supported geosynthetic reinforced embankment and bridge abutment model was constructed using the ABAQUS finite element program. The characters of interaction among the bridge abutment, embankment and foundation were systematically studied, including the change laws of the lateral displacement of the bridge abutment, the settlement of the embankment and the bending moment of abutment pile. The super-pore pressed consolidation of the deep soft foundation was analysed. Suggestions on the construction of the eosynthetic reinforced embankment and the piled abutmens were proposed.

Keywords: ABAQUS; soft soil foundation; piled abutment; super pore pressure

我国东南沿海地区的大部分海岸属于淤泥质,土体主要是淤泥、淤泥质黏土、粉质粘土等。该类土具有孔隙比大、天然含水量高、渗透性差、承载力低、抗剪强度低、中高灵敏度等特点,造成在沿海软土地基上修筑高速公路、铁路路堤等工程地基承载力不足、路堤稳定性差、路堤顶面沉降差异大等工程问题。因此,对软基上桩基桥台、路基与地基的相互作用机理研究,可以加深对桥台的工作性状以及路基的变形性状的认识,对改善桩基桥台的设计水平,防治桥台区域病害具有重要指导意义。

1 计算模型的建立

有限元模型采用 $Z-X$ 面对称建立,地基长度 X 方向取 65 m,宽度 Y 方向 30 m,地表向下深度 Z 方向 40 m。台身高 4.5 m,路基填土高度 4.0 m,碎石垫层 0.5 m,路面宽度 11 m。路基两侧进行放坡,坡度为 1:1.5。桥台后路堤下的软土地基采用水泥搅拌桩加固,桩直径 0.6 m,桩长 22 m。4 根灌注桩直径 1.2 m,桩长为 34 m。桥台长 5 m,宽 11 m。

模型的边界条件:底部采用完全约束边界条

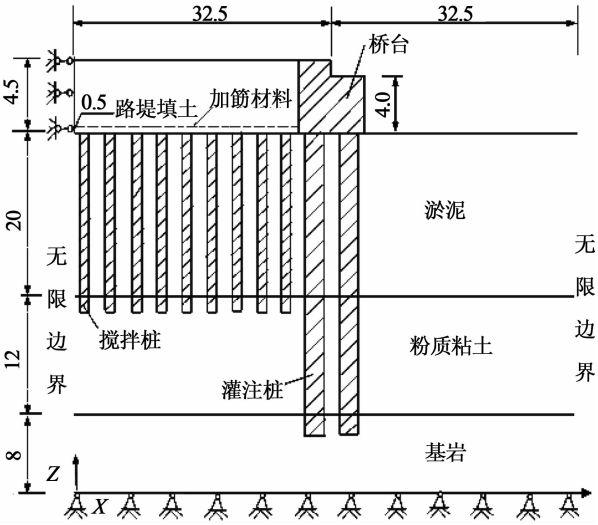


图 1 桥头剖面尺寸示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic of bridge head section (end) size/di-mension

件,Y正向侧面采用轴对称边界,其余3个侧面采用无限元单元。地下水位处于地表面。模型的尺寸和边界条件如图1所示。

2 参数选取

填土和砂垫层的本构关系采用 Mohr-Coulomb(即 MC)模型;粉质黏土、淤泥的本构关系采用修正剑桥 modified cam clay(MCC)模型。在模型计算中将水泥搅拌桩、桥台、桥台桩视为线弹性材料。材料参数如表 1、2、3 所示。

表 1 土的 Mohr-Coulomb 本构关系参数

Tab.1 The MC constitutive relationship parameters of soil

材料	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	ν	c/kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)	$\psi/$ ($^{\circ}$)	E/kPa
路堤填土	18	0.30	30	22	0	8
碎石垫层	20	0.25	10	40	0	20

表 2 土的 MCC 本构关系参数

Tab.2 The MCC constitutive relationship parameters of soil

材料	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	ν	λ	κ	M	e_1	$k_w/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
淤泥	17	0.35	0.15	0.03	0.95	1.79	1.46
粉质粘土	19	0.35	0.05	0.01	1.10	0.88	8.64

表 3 桩、土、土工合成材料计算参数

Tab.3 Calculation parameters of pile, soil and geo-syn-thetic material

材料	$l(h)/\text{m}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	ν
搅拌桩	19	2.35	0.1	0.30
灌注桩	40	2.55	25.0	0.15
桥台	-	2.55	25.0	0.15
土工格栅	0.002	2.00	2.00	0.15
基岩	—	2.04	0.50	0.20

桥台-填土和桥台-地基之间的接触采用面接触,桥台桩和搅拌桩的模拟采用梁单元,薄膜单元 M3D4 可以用来模拟土工格栅^[1],桩与土体的接触通过嵌入技术来实现。

基本模型计算分析按以下步骤进行:建立模型尺寸→设置土层参数进行地基地应力平衡→设置搅拌桩参数模拟搅拌桩→加入灌注桩和承台→施加第一层碎石填土(0.5 m)→加土工合成材料并设置其参数同时施加第二层填土(1 m)→施加第三层填土(1 m)→施加第四层填土(1 m)→施加第五层填土(1 m)→在填土和桥台表面施加交通荷载(11.5 kPa)→后续固结。

在 ABAQUS 中每级荷载的施加与时间分析步是相对应的:①有荷载施加情况下,对应时间分析步模拟的是土体的加载;②无荷载施加时,对应时间分析步模拟的是施工间歇期或填筑后的预压期。路堤的填筑速率为 0.1 m/d,每层填筑后的施工间歇期为 5 d。从路堤填筑开始到固结完成结束整个过程持续 1 000 d。淤泥土由于天然含水量高、孔隙比大、渗透性弱、压缩性高、流变性显著、侧向变形较大,分析中的软土均指淤泥土。

3 模型计算结果

3.1 桥台沉降与水平前移

桥台区域施加交通荷载固结 1 000 d 后的桥台 4 个角点 ABCD 的沉降数据分别为 -24.80 mm, -25.27 mm, -2.80 mm, -2.38 mm,平均沉降 -13.81 mm(按顺时针读取,AB 靠近路基,CD 远离路基)。靠近路基一侧桥台角点沉降比远离路基一侧桥台沉降略大,主要原因:(1)台身重心往路基方向偏移;(2)桩基在台后路堤荷载作用下产生了负摩擦力,靠近路基一侧的负摩擦力远大于远离路基一侧的负摩擦力;(3)搅拌桩和土

体之间存在相对滑移的现象,使得土体下沉时对桥台桩产生向后拉的力,进一步导致靠近路基一侧的桥台沉降较大。这与文献[2]的研究结果一致,在实际工程中,桥台前缘在桥梁自重作用下会产生沉降,可抵消先前产生的倾斜变形,即桥梁的修建可保证桥台恢复到直立状态。

数值分析得到的桥台 A 点 B 点基本可代表桥台的前移量,其数值分别为 7.63、7.64 mm。桥台平均前移了 7.63 mm,没有超过 Moulton^[3]、Barkar^[4]等建议的桥台前移控制标准 25 mm 和 38 mm,桥台前移控制满足设计要求。

3.2 桥台桩水平位移

桥台桩水平位移数值曲线如图 2 所示:①前后排桩的侧移量走势基本一致;②后排桩的水平位移小于前排桩水平位移;③桥台桩最大水平侧移皆发生在淤泥层;④沿着桩长方向二者水平位移差逐渐减小;⑤当路堤上部荷载达到 28 kPa 时,桩顶最大水平位移随填土高度变化近似采用双折线来描述。这与 Stewart 等^[5]的研究基本一致:桥台桩顶水平位移与路堤荷载之间近似呈双折线的关系。

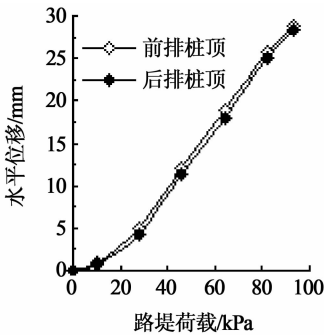


图 2 桩顶水平位移随路堤荷载变化图
Fig. 2 The horizontal displacement of pile top vs embankment loading

图 3 反映的是桥台桩顶水平位移随固结期时间的变化曲线图。在固结期,随着土体间孔隙水的排出,有效应力逐渐增大,土体被逐渐压缩密实,软土层的侧移量有所回弹,前后排桩顶最大水平位移各回弹至 10.69、9.17 mm。

3.3 桥台桩弯矩分析

桥台桩沿桩长的弯矩变化曲线如图 4 所示。前排桩与后排桩的弯矩沿着桩长深度方向的变化趋势基本相同,桩顶和桩底弯矩皆近似为零。在

淤泥层中,采用搅拌桩对软土地基进行加固,使得该层桥台桩的最大弯矩值小于粉质粘土层和基岩层桥台桩最大弯矩值。粉质粘土层和基岩中的桥台桩最大弯矩皆出现在各土层交界处。

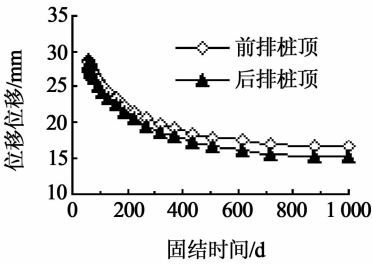


图 3 固结期桥台桩顶水平位移图
Fig. 3 The horizontal displacement of abutment pile top during consolidation period

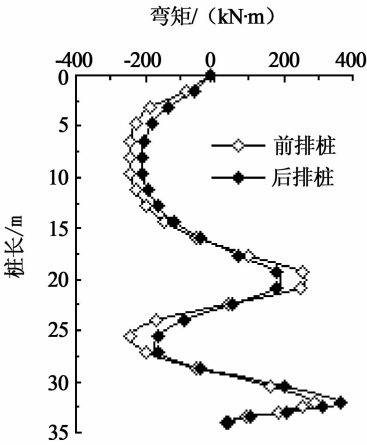


图 4 桥台桩桩身弯矩图
Fig. 4 The bending moment of bridge abutment piles

路堤填土堆载高度对桥台桩弯矩的影响敏感度如图 5 所示:随着填土高度的增大,桥台桩弯矩逐步增大;填土在堆载初期对桥台桩弯矩的影响较敏感,弯矩值增幅较大;在固结期,桥台桩弯矩值有回弹趋势。固结期间,土体颗粒被压缩密实,软土对桥台桩的侧向挤压力有所缓解,使得桥台桩水平位移和弯矩都相应变小。

3.4 超孔压分析

图 6 是关于淤泥层中部和搅拌桩桩底土层的孔压变化图:(1)超孔压的变化和路堤加载过程有较好的相关性,在路堤加载分析步中孔压上升,施工间歇期中孔压消散,这与文献[6]的结论较一致;(2)在淤泥层中部的超孔压约为 42 kPa,与

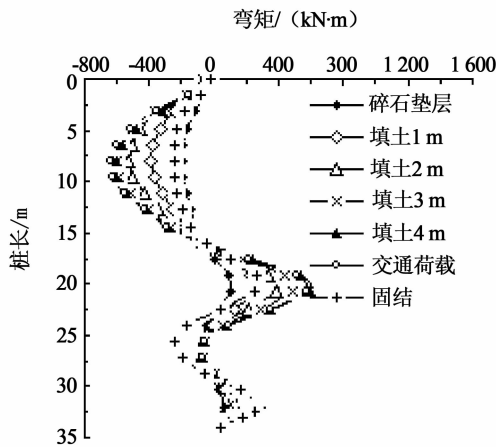


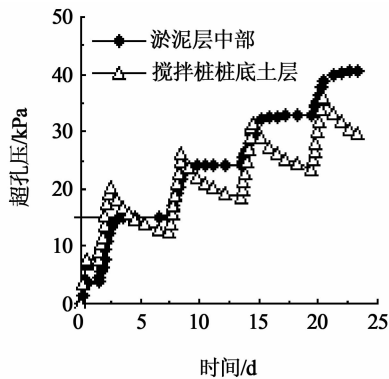
图5 前排桩弯矩随填土高度的变化
Fig. 5 The bending moment of first row piles vs the height of filled earth

大部分类似工程^[7]用砂井处理后的孔压对比,其值大大减小。桥台后桩承加筋路堤中,路堤的荷载大部分由桩体承担,存在土拱效应。Borges J L^[8]、费康^[9]等的研究表明,土拱效应的存在使得路堤荷载向桩体转移,可有效减少地基中超孔压的产生。

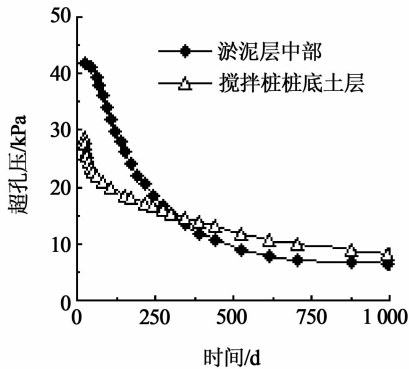
图6(a)反应的是路堤在加载和间歇期中,地基土层不同位置所产生的孔压。这里所指的不同位置特指路堤中轴线下地基土的不同位置。在加载初期,由于上部荷载较小基本由桩体承担,荷载进一步传递给下部持力层,导致桩底土层的孔压上升较快;桩端持力层为粉质粘土,与上部淤泥层相比,土体颗粒抗变形能力较强,相对孔隙体积变化较小,提供了更通畅的排水通道,且其渗透系数较大,故在施工间歇期间,粉质粘土层的孔压消散相对会快点。桩底持力层粉质粘土的工程性质较好,属于中等压缩性土层,土中孔隙水多为结合水较难排出孔隙,且排水路径较长,因此图6(b)中计算固结期结束后超孔压8 kPa 反而比淤泥层中部的超孔压6 kPa 大,这与 Tanchaisawat^[10]、邢皓枫^[11]等的研究结果基本一致。

4 结论

1)在实际工程中,软土地基可先采取超载预压排水固结法处理,待软土地基沉降趋于稳定后,再修建桥台桩基础;



(a) 加载期



(b) 固结期

图6 淤泥层中部和搅拌桩桩底土层的孔压对比分析

Fig. 6 The comparison of pore pressure between the middle of sludge and mixed pile bottom soil layer

2) 选择合理的路堤填料,减小路堤填土的重度;

3) 必须控制路堤堆载速率,防止出现过大的超孔压,对路堤稳定不利;

4) 地基中最大超孔压出现在淤泥软土层,可通过改善地基中软土层的排水条件,加快地基超孔压的消散。超孔压的消散基本规律是地基层孔压较大,地表孔压为零,形成孔隙水往上渗流的趋势。地基在固结1 000 d后,越往地基深处的孔压消散越难,搅拌桩桩底土层消散后的超孔压为6 kPa。究其原因大致有两点:(1) 固结后期土体中孔隙水多为结合水,较难排出孔隙;(2) 地基深处的排水路径相对较长;结合超孔压的分析,计算土体的沉降应变固结度。计算出的固结曲线走势大致情况是:路堤堆载期间固结速率明显较快,后期固结较缓慢,在1 000 d后固结速率趋于零。

参考文献:

- [1] 钱劲松,凌建明. 路基拓宽工程中桩承式加筋路堤处理的数值分析[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):67-71.
- [2] 岳健,冷伍明. 深厚淤泥地基中高路堤桥台桩基工作性状的现场实测与分析[J]. 岩土力学,2011,32(11):3333-3340.
- [3] Moulton L K, Ganga Rao H V S, Halvorsen G T. Tolerable movement criteria for highway bridges[S]. Washington:Federal Highway Administration, 1982.
- [4] Barker R M, Duncan J M, Rojiani Et. Manuals for the Design of Bridge Foundations[R]. Washington:National Cooperative Highway Research Society, 1991.
- [5] Stewart D P, Jewell R J, Randolph M F. Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements[J]. Geotechnique,1994,44(2):277-296.
- [6] Jose L B. Three-dimensional analysis of embankments on soft soils incorporating vertical drains by finite element method[J]. Computers and Geotechnics,2004,31(8):665-676.
- [7] Kelesoglu M K, Springman S M. Analytical and 3D numerical modelling of full-height bridge abutments constructed on pile foundations through soft soils[J]. Computers and Geotechnics,2011,38(8):934-948.
- [8] Borges L J, Marques D O. Geosynthetic-reinforced and jet grout column-supported embankments on soft soils: Numerical analysis and parametric study[J]. Computers and Geotechnics,2011,38(7):883-896.
- [9] 费康,刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. 岩土力学,2009,30(4):1004-1014.
- [10] Tanchaisawat T, Bergado D T. Numerical simulation and sensitivity analyses of full-scale test embankment with reinforced lightweight geomaterials on soft Bangkok clay[J]. Geotextiles and Geomembranes,2008,26(6):498-511.
- [11] 邢皓枫. 复合地基固结形状研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 531 页)

参考文献:

- [1] Matlock H. Correlation for design of laterally loaded pile in soft clay[J]. Proc 2nd Offshore Tech Conf,1970,108(4):577-594.
- [2] 顾明. 水平循环及偏心荷载作用下群桩性状模型试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [3] 张春辉. 考虑桩土相互作用的曲线梁桥地震效应分析[D]. 济南:山东建筑大学,2012.
- [4] 杜鹏. 交通荷载作用下碎石桩复合地基的动力特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [5] 张陈蓉,俞剑,黄茂松. 软黏土中水平循环荷载作用下刚性短桩 $p-y$ 曲线分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(2):78-82.
- [6] 章敏. 非饱和土中桩的动力响应与循环荷载试验研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [7] 黄占芳. 可液化砂土中复合桩基体系的动力响应研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
- [8] Achmus M, Thieken K. On the behavior of piles in non-cohesive soil under combined horizontal and vertical loading[J]. Acta Geotechnica,2010,5(3):199-210.
- [9] 朱勇. 多向水平荷载作用下的群桩效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [10] 徐令宇. 桩基础水平响应计算方法及其抗液化性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [11] 郑中. 多向荷载下高承台群桩基础分析方法及应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [12] 章敏,王星华,冯国瑞. 非饱和土中端承桩水平振动特性研究[J]. 岩土力学,2015,36(2):409-422.
- [13] 高笑娟,吕冰. 水平振动荷载作用下支盘桩承载性状研究[J]. 中外公路,2015,35(3):35-40.
- [14] 陈国成. 瞬态荷载下墩基-群桩动力非线性特性分析[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [15] 郑明燕. 考虑 SSI 的减隔震简支桥梁(渡槽)建模及地震动力响应研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.
- [16] 刘林超,杨骁. 地震作用下饱和土-桩-上部结构动力相互作用研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):120-128.

(责任编辑:陈雯)