

软土地区桥台桩基负摩阻力试验研究

In-situ tests on negative friction resistance of abutment piles in soft soil

律文田, 冷伍明, 王永和

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 软弱土地基上的桩基, 由于桩周土的向下运动, 土与桩的摩擦增加了桩的下拉荷载, 这就是所谓的桩侧负摩阻力, 负摩阻力的存在增大了桩基的变形甚至导致破坏。通过软土地区桥台桩基的现场试验研究, 获得了软土地区台背路基填土过程之中和之后的第一手资料, 揭示了软土地区桥台路基填土时, 桥台桩基内力和负摩阻力的变化规律。试验结果表明: 台后填土对桥台桩基轴力的影响不仅发生在填筑施工期间, 而且在施工完毕后相当长一段时间内仍有一定的影响; 由于负摩阻力的作用, 桩身轴力随着深度的增加先增大后减小, 桩侧摩阻力沿深度呈非线性变化。

关键词: 软土; 桥台桩基; 负摩阻力; 现场试验

中图分类号: TU 470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)06-0642-04

作者简介: 律文田(1976-), 男, 中南大学博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。

Lü Wen-tian, LENG Wu-ming, WANG Yong-he

(Civil Engineering and Architecture Institute, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: With regard to the pile foundation in soft soil, because of the downward movement of the soil around the piles, the friction between the soil and the piles increased the downdrag of the piles, and it was called the negative skin friction. The result is that it increases the deformation of piles and even leads to the destruction of pile foundation. The first-hand materials about the change of the axial force of pile is obtained during and after embankment fill behind abutment in soft ground by the field test of the piles, and it reveals the variation of the internal force of pile and the negative skin friction. Test results show that the influence of embankment fill on the axial force of piles exist not only during the construction, but also a long time after the construction. The axial force of piles first increases with the depth and then decreases. The variation of negative skin friction with the depth of piles is nonlinear.

Key words: soft soil; abutment pile; negative skin friction; field test

变化规律。

0 前言

在正常情况下, 桩受竖向压力后, 相对于桩侧土向下运动, 土对桩就产生向上作用的摩阻力, 称为正摩阻力。但是当桩周地基土由于某种原因^[1], 产生的沉降变形大于桩身的沉降变形时, 在桩侧表面的全部或一部分面积上将出现向下作用的摩阻力, 称之为负摩阻力。自1948年Terzaghi和Peck提出桩基负摩阻力这一概念以来, 负摩阻力问题已受到国内外工程界的普遍关注, 国内外很多学者开展了桩基负摩阻力的理论研究和试验研究^[2-7]。在软土地区修建桥梁时, 桥头路基填土引起地基土固结沉降, 使桩基产生负摩阻力, 并引起不均匀沉降。这对桥台和上部结构非常不利^[8], 特别是高速铁路对线路的平顺性提出了严格要求, 桥头路基填土会引发桥台桩基内力发生新的变化和不均匀沉降, 其分布规律和大小是设计人员十分关心的问题, 由于很多因素的制约, 软土地区桥头路基填土引起的桩基负摩阻力的现场测试研究并不多见。基于此, 本文对软土地区桥台桩基进行了负摩阻力测试研究, 分析了台后路基填土作用下, 桩基轴力和侧摩阻力的

1 现场试验概况

1.1 工程地质概况

根据该工程的地质勘察报告, 场地地层属第四系全新统冲湖积层, 主要由粘土、淤泥质粘土、粉质粘土、粉砂组成。桩长范围内各主要土层地质资料如下: ①粘土, 灰黄色, 软—硬塑, 夹有少量铁锰结核, 表层0.2~0.5 m为种植土, 含有植物根系, 厚1.2 m, 属中等压缩性土; ②淤泥质粘土, 深灰色, 流塑, 含少量腐植物, 局部夹有薄层粉砂, 具高压缩性、低强度的特点, 且大多数灵敏度超过16, 为流动粘土, 高触变性, 厚2.54 m; ③粘土, 灰绿色, 黑灰色, 软塑—硬塑, 厚4.86 m, 属中等偏低压缩性土; ④粉土局部夹薄层粉砂或粘土, 灰黄色, 软塑, 厚5.7 m, 属中等偏低压缩性土; ⑤粉质粘土, 浅灰色, 灰黄色, 软塑, 厚8.7 m; 属中等偏低压缩性土; ⑥粉砂, 褐黄色, 深灰色, 中密—密实, 饱和。各土层的物理力学性质指标见表1。

表 1 各土层物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	含水率/%	压缩模量 /MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)	标准贯入击数 $N_{63.5}$
粘土	18.4	0.95	37.0	4.61	24.5	8.7	4~6
淤泥质粘土	18.3	1.23	40.5	7.55	8.4	6.3	1~2
粘土	20.0	0.78	26.1	9.39	37.3	16.7	8~14
粉土局部夹薄 层粉砂或粘土	19.0	0.98	35.2	10.01	15.6	21.0	8~11
粉质粘土	18.2	1.03	43.2	6.08	14.7	15.3	5~24
粉砂	19.5	0.60	25.0	28.25	4.0	20.0	18~58

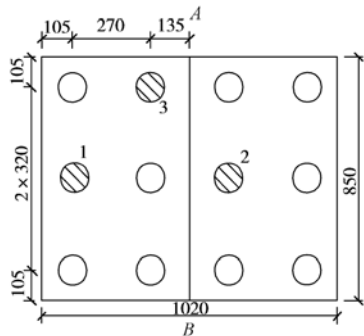


图 1 桥台基桩布置图

Fig. 1 Layout of abutment piles

1.2 试桩概况

桥台桩基采用钻孔灌注桩, 共 12 根, 平面布置如图 1 所示, 图中 1、2、3 号桩为试验桩, 桥台 A 方是台后路基填筑段, 其软基采用袋装砂井和堆载联合方式进行了处理。钻孔灌注桩的设计桩径 1.0 m, 桩长 43 m, 桩端持力层为褐黄色的粉砂层, 钻孔桩的主筋为 $\phi 25$ 钢筋。为了方便设置传感器, 试验桩采用通长配筋, 桩身上部 16.4 m 范围内采用 40 根 $\phi 25$ 钢筋, 16.4 m 下采用 20 根 $\phi 25$ 钢筋。钢筋计主要布置在各土层分界面, 各试桩自下而上设置 14 个测试截面, 测试截面编号依次为 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N。每一测试截面上设有两个钢弦式钢筋计和两个电阻应变式钢筋计, 通过专用测试仪器, 可以直接读出钢筋应力, 再根据截面配筋率, 换算出测试截面处桩的轴力。测点布置如图 2 所示。

2 试验数据分析

2.1 基桩轴力计算

$$N = \sigma_g A_g n + \frac{\sigma_g}{E_g} A_h E_h \quad (1)$$

式中 σ_g 为钢筋应力设计值 (MPa); A_g 为单根钢筋的面积 (mm^2); E_g 为钢筋弹性模量 (N/mm^2); E_h 为混凝土弹性模量 (N/mm^2); A_h 为单桩截面积 (mm^2); N 为单桩轴力 (N); n 为测试截面处所配置钢筋的根数。

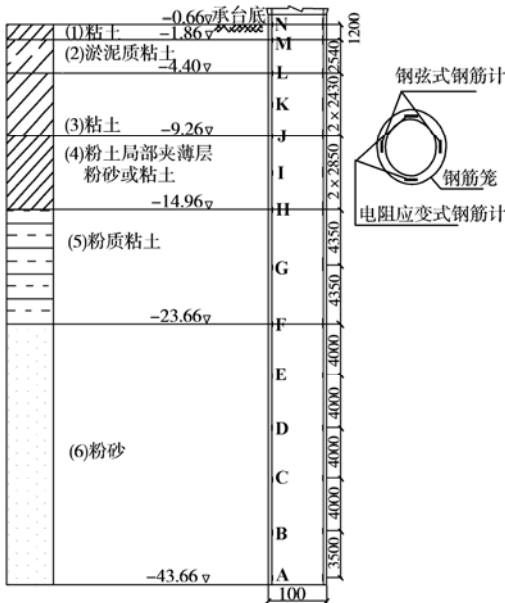


图 2 钻孔灌注桩钢筋计布置图

Fig. 2 Layout of strain gauges in a bored pile

2.2 桩侧平均侧摩阻力

$$f_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{Uh_i} \quad (2)$$

式中 f_i 为第 i 层土的桩侧摩阻力 (kPa); N_i 、 N_{i+1} 为第 i 土层中所对应的基桩上下截面的轴力 (kN); U 为基桩截面周长 (m); h_i 为第 i 层土厚度 (m)。

2.3 中性点相对深度系数

$$\beta = \frac{h_m}{H} \quad (3)$$

式中 β 为中性点的相对深度系数; h_m 为中性点深度 (m); H 为压缩土层深度 (m)。

3 试验数据分析

3.1 基桩轴力分析

测试桩的桩顶上没有荷载作用时, 也基本不发生沉降。当在台后填土时, 桩周土产生沉降, 通过桩周土和桩侧面之间的摩阻力 (主要是负摩阻力), 将填土荷重传递到桩身, 因此可以说, 实测到的桩身轴力完全是由桩周负摩阻力引起的^[3]。

通过埋设在桩身钢筋上的钢筋计,在填土期间量测钢筋计读数,通过式(1)换算得到桩身轴力。在桩周存在负摩阻力时,桩身轴力逐渐增大,然后减小,衰减速度很快,桩端处的轴力很小,在填土高度不大的时候桩端轴力接近于0,桩身轴力最大值的位置就是中性点的位置。图3和图4分别是试桩1和试桩2的桩身轴力随深度和填土高度的变化,在图中还给出了填土完毕后桩身轴力随深度的变化曲线。图中填土高度505 cm+1.7 m和填土高度505 cm+2.7 m分别表示在填土达到路基设计标高后再在路基上面堆载1.7 m和2.7 m浮土对路基进行超载预压。图中数据已经扣除了桥台重和桥台上预压荷载重。

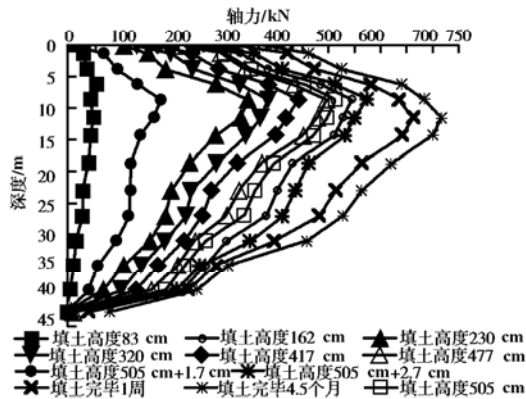


图3 试桩1 桩身轴力随深度和填土高度的变化曲线

Fig. 3 The variation of the axial force of the test pile 1 with the depth and fill height

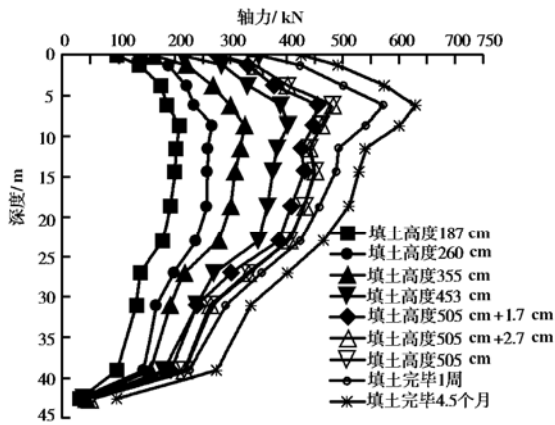


图4 试桩2 桩身轴力随深度和填土高度的变化曲线

Fig. 4 The variation of the axial force of the test pile 2 with the depth and fill height

从图3、4看出,桩身轴力沿深度先增大,然后减小,说明台后路基填土在填土期间就使桥台桩基产生了负摩阻力;邱青云、张小敏^[9]也认为当桩穿过软弱高压缩性土层而支承在坚硬的持力层上时最易发生桩的负摩阻力的问题,并且桩基负摩阻力可能发生在施工过程、使用前或使用过程。测试表明桩身轴力随着填土高度的增加而逐渐增加,填土高度的变化直接影响了基桩轴力的变化;桩身轴力在超载预压完毕一周

和四个半月后仍有明显增大,这说明路基填土对桥台基桩轴力的影响不仅发生在填筑施工期间,而且发生在施工完毕后相当长一段时间内。这是路基软弱下卧层固结和蠕变特性使得桩基负摩阻力充分发挥所致。

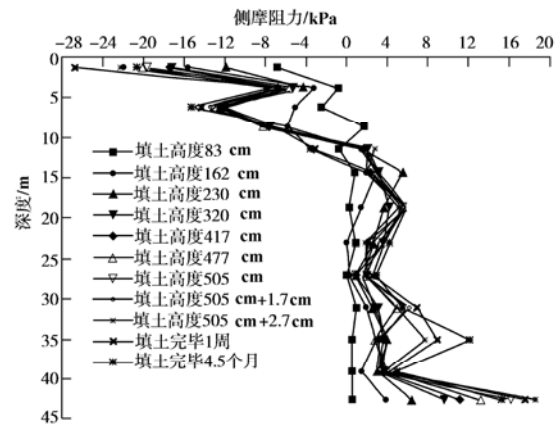


图5 试桩1 桩侧摩阻力随深度和填土高度的变化曲线

Fig. 5 The variation of side resistance of the test pile 1 with the depth and fill height

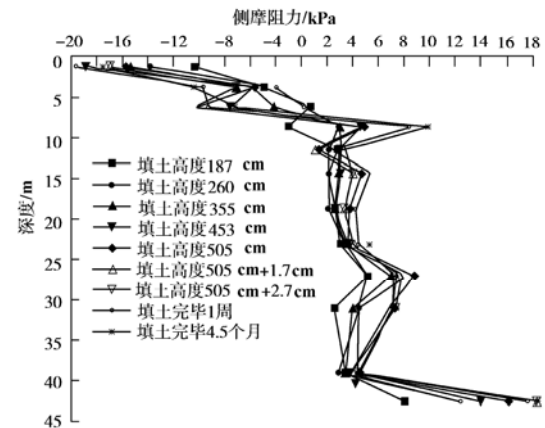


图6 试桩2 桩侧摩阻力随深度和填土高度的变化曲线

Fig. 6 The variation of side resistance of the test pile 2 with the depth and fill height

3.2 桩侧摩阻力分析

根据计算出的桩身各截面处的轴力,利用式(2)可计算出桩侧平均摩阻力。从图5和图6可以看出,两根试桩的桩侧摩阻力分布规律相类似,沿桩身呈非线性分布。随着深度的增加,在中性点以上桩侧负摩阻力的变化较大,在中性点以下桩侧摩阻力随深度呈非线性变化,在桩底附近侧摩阻力变化较大。当增加填土高度时,桩侧摩阻力数值逐渐增大,但变化幅度很小。在路基填土完毕后,由于路基软弱下卧层固结和蠕变特性使得桩基负摩阻力的产生和发展要经历一时间过程。这一过程的长短取决于桩侧土固结完成的时间和桩身沉降所完成的时间^[9],一般在初期增长快,随后逐渐趋向稳定,当桩的沉降迟于桩侧土的沉降时,则负摩阻力达峰值后会有所降低。固结土层越厚,渗透性越低,负摩阻力达峰值所需时间越长。图5和图

6 也说明了软土层桩侧负摩阻力的发展存在时间效应,当填土预压完毕后,桩侧负摩阻力随着时间的推移,而进一步增长。

在桩端附近表现出桩侧摩阻力的增强效应,桩侧摩阻力大大提高。表 2 中给出了第(6)层粉砂土层中,试桩 1 和试桩 2 桩侧摩阻力的平均值和桩端处侧摩阻力的比较。从表中可以看出,2 根试桩桩端处的侧摩阻力最大值是桩侧摩阻力平均值最大值的 2.41 倍和 2.56 倍。虽然两根桩处在同一个场地,但桩端处侧摩阻力最小值差别很大,这也从侧面说明了影响桩端处侧摩阻力增强效应的因素很多;文献[10]对钻孔灌注桩进行了一系列的试验研究工作,试验结果说明,即使每组试桩的桩长、持力层、桩壁土层、施工机械和施工工艺均相同的条件下,仅孔底处理不同,那么测出的桩端处的侧摩阻力也不相同。文献[11]也认为桩端附近桩侧摩阻力增强效应普遍存在,但对于桩侧摩阻力在桩端附近的增强效应的机理还不是很明确,应当加强模型试验和现场试验的研究。

表 2 粉砂层中桩侧摩阻力

钻孔灌注桩	桩侧摩阻力/kPa	
	平均值	桩端处
试桩 1	0.5~7.7	0.5~18.6
试桩 2	2.5~6.4	6.0~16.4

3.3 中性点相对深度系数

桩侧负摩阻力并不一定出现在整个软弱压缩土层中,其深度是桩侧土层对桩产生相对下沉的范围,它与桩侧土的压缩、固结,桩身弹性压缩及桩底下沉等有直接关系。桩侧土的压缩与地表作用荷载及土的压缩性质有关,并随深度逐渐减小,而桩在外荷载作用下,桩底的下沉量为一定值,桩身压缩变形随深度相应减小。在特定的基桩断面上,该深度以上土的位移大于桩的位移,则该断面以上的桩受负摩阻力,轴向力随深度增加;该深度以下桩的下沉量大于土的下沉量,则该断面以下的桩受正摩阻力,轴向力随深度减小;那么桩上的正摩阻力和负摩阻力的分界点,称之为中性点,该点处桩土无相对位移、侧摩阻力为零,并且该断面处轴向力最大。中性点的深度与桩周土的压缩性和变形条件、桩和持力层土的刚度等因素有关。同时在桩、土沉降稳定前,它是变动的。因此,可以根据土的内摩擦角、孔隙比、稠度等指标具体计算桩、土的位移以合理确定其中性点位置,其确定方法可参考文献[12]。

通过埋设在桩身内的钢筋计,量测桩身不同深度处各截面的应变和应力,计算并绘出桩的轴向力随其深度的变化曲线(如图3、图4所示),则桩身最大轴力处即为中性点深度。这种方法应该是确定中性点比较可靠的方法。比较图3和图4,可以看出试桩1和试桩2

在填土开始到超载预压完毕期间中性点位置大致相同,都在桩身8.6 m处左右;试桩2中性点位置在超载预压完毕4.5个月没有发生变化,而试桩1中性点位置在超载预压完毕4.5个月下移至桩身11.45 m处。中性点的相对深度系数 β 可以根据式(3)计算。试桩1的 β 值等于0.266,试桩2的 β 值为0.200,也就是说台后填土对桥台桩基的影响深度不大。

4 结 语

软土地区桥台桩基的负摩阻力测试研究表明:①台后路基填土对桥台基桩轴力的影响不仅发生在填筑施工期间,而且在施工完毕后相当长一段时间内仍有一定的影响,由于负摩阻力的作用,桩身轴力随深度先增大后减小;②随着深度的增加,中性点以上桩侧负摩阻力变化较大,中性点以下桩侧摩阻力随深度的变化不大,且在桩端附近表现出桩侧摩阻力的增强效应;③试桩1和2的中性点相对深度系数 β 分别为0.226和0.200,且随着填土高度的增加,基本没有变化。

参考文献:

[1] 陈希哲. 土力学地基基础(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2001. 356 - 358.

[2] Wong K S. The C I negative skin friction on piles in layered soil deposits[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 1995, 121(6):457 - 465.

[3] 马时冬. 桩身负摩阻力的现场测试与研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(1):8 - 24.

[4] 陈福全, 龚晓南, 马时冬. 桩的负摩阻力现场试验及三维有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3):77 - 80.

[5] 张海民. 桥梁桩基负摩阻力的计算[J]. 中南汽车运输, 2000, 1: 34 - 36.

[6] Poorooshasb H B, Alamgir M, Miura N. Skin friction on rigid and deformable Piles [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(2):109 - 126.

[7] Chow Y K, Lim C H, Karunaratne, G P. Numerical modelling of negative skin friction on pile groups[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(3): 201 - 224.

[8] 蔡国军, 刘松玉. 软基上桥头路基填筑对桥台桩的影响研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12):2072 - 2077.

[9] 邱青云, 张小敏. 对桩的负摩阻力的研究[J]. 石家庄铁路工程职业技术学院学报, 2003, 2(4):18 - 20.

[10] 席宁中. 试论桩端土强度对桩侧阻力的影响[J]. 建筑科学, 2000, 16(6):51 - 60.

[11] 刘利民, 陈竹昌. 桩侧阻力增强效应及其工程意义[J]. 铁道建筑技术, 2001, 1:7 - 9.

[12] 李 伟. 软土地基负摩阻力对桩基计算的影响[J]. 东北公路, 1994, 3:55 - 58.