

夯实水泥土桩桩身压缩量对承载特性的影响

杨志红¹, 郭忠贤²

(1. 河北省建筑科学研究院, 石家庄 050021; 2. 石家庄铁道大学 土木分院, 石家庄 050043)

摘 要: 针对夯实水泥土桩的施工方法, 在桩身埋设特制的应变传感器, 测定桩身应变。基于试验测试数据, 探讨桩身压缩量的计算方法, 分析桩身压缩变形的分布规律及其对桩侧摩阻力的影响, 并探讨不同桩长、不同水泥掺入比情况下, 夯实水泥土桩桩身压缩量及其对承载特性的影响。研究表明, (1) 对夯实水泥土桩, 桩身压缩主要集中在桩身上部 $8d$ (d 为桩径) 范围内, 且变形速率变化较大, 桩身压缩在桩顶位移中占比达 80% 以上; (2) 桩身轴向荷载传递、桩侧摩阻力分布主要发生在此范围内; (3) 桩身侧摩阻力分布非常不均匀, 上部发挥较为充分, 而下部发挥较少; (4) 在工程常用水泥掺入比下, 桩长大于 $12d$ 后, 桩长径比和水泥掺入比的变化对桩承载特性影响不显著。

关 键 词: 夯实水泥土桩; 桩身压缩量; 长径比; 掺入比; 承载特性

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Influence of pile shaft compression on bearing properties of rammed soil-cement pile

YANG Zhi-hong¹, GUO Zhong-xian²

(1. Hebei Provincial Architectural Science Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at special method of installation of rammed soil-cement piles, laying special strain sensor and then the pile shaft can be measured. Based on test data of pile shaft compressions, the computation method of shaft compression is studied; and the distribution of pile shaft compression, and its influence on shaft resistance are analyzed. The shaft compression and its influence on bearing properties in different lengths and different cement contents of rammed soil-cement pile are discussed. Research results show that (1) the pile shaft compression is mainly distributed in upper range of pile length about 8 pile diameters; and the varying gradient is larger; and pile shaft compression the displacement of pile tip; (2) the axial load transfer, distribution of shaft resistance occurred mainly within this range; (3) the shaft friction distribution is uneven; and it plays more fully in upper part of pile and less in lower part of pile; (4) under cement mixing ratio within the common project and the length-diameter ratio >12 , the change of length-diameter ratio and cement mixing ratio is not significant effect on load-bearing characteristics of pile.

Key words: rammed soil-cement piles; shaft compression; length-diameter ratio; cement mixing ratio; bearing properties

1 引 言

夯实水泥土桩利用排土法或挤土法在地基中成孔, 然后分层夯填水泥土(水泥与土的拌合料), 经充分夯实而形成夯实水泥土桩。对夯实水泥土桩, 施工方法的特殊性, 郭忠贤等^[1]介绍了一种测定桩身轴力的方法。对夯实水泥土而言, 其材料强度及压缩模量相对钢筋混凝土要小许多, 夯实水泥土桩荷载传递特性与钢筋混凝土桩存在明显的差异,

受桩身材料强度的限制及桩身压缩量的影响较大。桩向土中传递应力的前提是桩土间有相对位移或位移趋势, 而桩身的压缩是使桩、土间产生相对位移的方式之一。桩身压缩量是一个很重要的参数, 它直接关系到桩身荷载传递规律和桩的破坏方式, 所以有必要对它进行专门研究, 文献[2-5]研究了钢筋混凝土桩的压缩变形问题, 但对夯实水泥土桩方面的研究鲜见报道。本文在试验基础上, 探讨夯实水泥土桩桩身压缩量及其对承载特性的影响。

2 夯实水泥土桩桩身压缩量的计算与分析

2.1 桩身压缩量的计算

桩顶受到荷载作用时, 桩身各部位在轴向压力作用下产生压缩, 只要知道桩身轴力的分布, 就能准确计算出桩身的压缩变形。桩身轴力沿深度的变化又与桩侧摩阻力分布和桩端阻力的大小有关, 由于桩侧摩阻力分布和桩端阻力大小受到土性、桩体材料模量及荷载水平等的影响, 要想准确计算仍存在较大困难。因此, 目前确定桩身轴力的方法多是通过载荷试验, 并在桩身截面中埋设测试元件, 实际测得桩身各截面的轴力 (应变)。

郭忠贤等^[1]、刘焕存等^[6]通过现场试验和室内三轴试验, 证明夯实水泥土的应力-应变关系多表现为非线性特征, 因此, 要准确计算桩身压缩变形量, 就必须考虑其非线性的影响。沿桩身长度方向取轴向长度为 l_i 小段 (实际可取两测试元件之间的距离), 在桩身轴向压力增量 ΔN 作用下产生应力增量 $\Delta \sigma$, 相应的桩身截面产生应变增量 $\Delta \varepsilon$ 。实际计算中, 可以假设相邻两截面之间的轴力 (应变) 沿桩长成线性变化, 按下述方法计算桩身压缩量。

设第 i 和第 $i+1$ 截面测得的轴力 (应变) 增量分别为 ΔN_i ($\Delta \varepsilon_i$) 和 ΔN_{i+1} ($\Delta \varepsilon_{i+1}$), 该两截面的距离为 l_i , 则距离第 i 截面以下为 z 的截面轴力 (应变) 增量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{iz} &= \Delta N_i + \frac{\Delta N_{i+1} - \Delta N_i}{l_i} z, \quad (z \in [0, l_i]) \\ \text{或 } \Delta \varepsilon_{iz} &= \Delta \varepsilon_i + \frac{\Delta \varepsilon_{i+1} - \Delta \varepsilon_i}{l_i} z, \quad (z \in [0, l_i]) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

相应的第 i 和第 $i+1$ 截面之间的桩身压缩增量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta s_{si} &= \int_0^{l_i} \frac{\Delta N_{iz}}{E_p A} dz = \frac{\Delta N_i l_i + (\Delta N_{i+1} - \Delta N_i) l_i / 2}{E_p A} \\ \text{或 } \Delta s_{si} &= \int_0^{l_i} \Delta \varepsilon_{iz} dz = \Delta \varepsilon_i l_i + \frac{1}{2} (\Delta \varepsilon_{i+1} - \Delta \varepsilon_i) l_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E_p 为根据应力水平由应力-应变关系曲线确定的桩身变形模量; A 为桩身截面积。

假设在施加轴力 (应变) 增量前, l_i 桩段已产生 s_{si-1} 的压缩量, 则在轴力作用下 l_i 桩段产生的累计变形为

$$s_{si} = s_{si-1} + \Delta s_{si} \quad (3)$$

全桩身由于桩身压缩产生的累计沉降变形 s_s 为

$$s_s = \sum_{i=1}^n s_{si} \quad (4)$$

相应的桩端处沉降为桩顶沉降减桩身压缩量:

$$s_b = s - s_s \quad (5)$$

2.2 夯实水泥土桩桩身压缩量的计算及测试方法

考虑夯实水泥土桩的施工特点, 以塑料管为载体在桩身中埋设电阻片式应变传感器, 测定夯实水泥土桩单桩的桩身轴力, 方法见文献[1]。单桩试验采用慢速维持荷载法。试桩共 5 根, 分为 2 组: 一组水泥掺入比一定 ($a_w = 17\%$), 桩长 $l = 1.2$ 、 2.1 、 3 m (编号 P1~P3); 另一组桩长一定 ($l = 3$ m), 水泥掺入比 $a_w = 12\%$ 、 17% 、 25% (编号 P3、P4、P5), 5 根桩桩径 $d = 150$ mm, 分别在桩身不同位置埋设传感器, 实测的各级荷载下沿桩身各截面的轴向应变值。图 1 为 5 根桩实测各级荷载下桩顶截面 (距桩顶-0.03 m, 标定面) 的应力-应变关系曲线, 为非线性, 即在整个加载过程中桩身变形模量是变量。为准确反映其变化关系, 对该关系曲线进行拟合, 拟合曲线作为桩身各截面应力-应变关系的计算函数, 以确定不同应力水平下桩身变形模量。

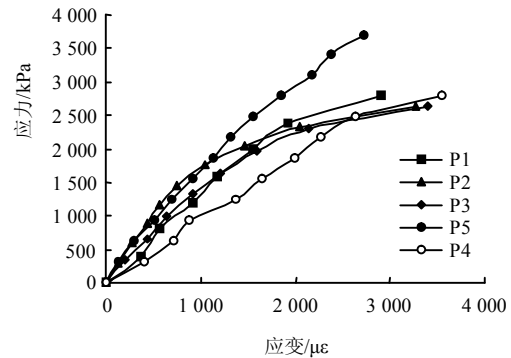


图 1 桩身截面应力-应变关系

Fig.1 Curves of stress-strain of rammed soil-cement piles

按上述方法计算所得桩 P3 ($l = 3$ m, $a_w = 17\%$) 在各级荷载下因桩身压缩变形产生的沉降沿深度的变化如图 2 所示。当竖向荷载施加于桩顶时, 一方面桩身材料由于受力而压缩, 另一方面桩端土受到桩传来的压力也会有一个压缩量, 所以桩顶位移应包括桩身压缩量和桩端位移两部分。图 3 为桩顶、桩端位移和桩身压缩随荷载变化曲线。

由图 2 可以看出, 桩身压缩量主要集中在桩身上部 1/3 范围内, 从曲线变化趋势看, 随荷载增大, 桩身上部压缩变形的变化率明显增大, 而下部变化率比较缓慢, 变化位置约 1.2 m ($8d$) 附近。由图 3

可见, 桩身压缩变形在桩顶位移中占较大比例。荷载前期, 桩身压缩与桩顶位移曲线非常近, 说明桩端受力较小, 以桩侧摩阻力为主; 荷载后期, 桩身压缩与桩顶位移曲线开始分离, 说明桩端承载力开始发挥, 但由于桩身上部压缩变形的快速增加, 使桩身材料产生破坏(压缩变形快速增大), 限制桩端承载力的发挥。因此, 对夯实水泥土桩在设计中应考虑这一因素, 不能过高估计桩的承载力。

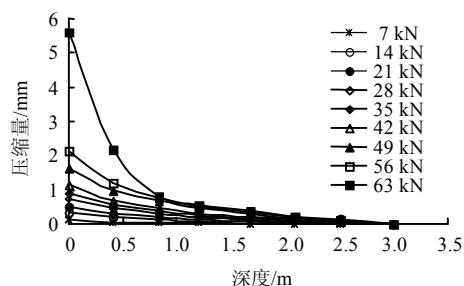


图2 各级荷载下桩身不同深度压缩变形

Fig.2 Pile compression with depths under varied loads

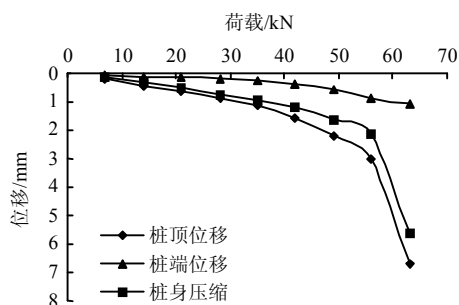


图3 桩顶、桩端位移和桩身压缩随荷载变化

Fig.3 Displacements of pile top, pile end and pile compression under loads

3 桩身压缩变形对承载特性的影响

3.1 长径比的影响

图4、5分别为桩P1~P3在相同水泥掺入比($a_w=17\%$)不同桩长(长径比 $L/d=8、14、20$)使用荷载(承载力特征值)时, 桩身压缩和桩端压缩在桩顶位移中所占比例 $\alpha_s、\beta_s$ 与桩侧摩阻力和桩端荷载在桩顶轴向压力中所占比例 $\alpha_p、\beta_p$ 的变化曲线。由图4可知, 当长径比由8、14增大到20时, α_s 逐渐增大, 由32%增加到82%, 随长径比近似为线性关系, 而 β_s 相反。相应的 α_p (β_p)随长径比的增加略有增大(减小)(见图5), 其桩侧摩阻力占桩顶轴向压力的比例 α_p 都大于80%。表面上看, 桩身压缩量大小对荷载传递特性影响不大, 实际上主要是因桩身压缩沿桩身分布极其不均匀造成的。所以, 对夯实水泥土桩多表现为纯摩擦桩的特性。

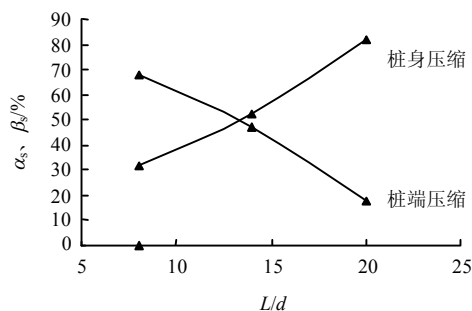


图4 $\alpha_s、\beta_s$ 随长径比变化

Fig.4 Changes of $\alpha_s、\beta_s$ in varied L/d

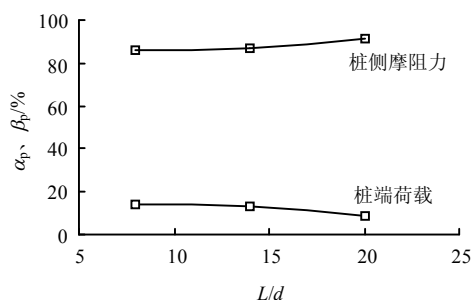


图5 $\alpha_p、\beta_p$ 随长径比变化

Fig.5 Changes of $\alpha_p、\beta_p$ in varied L/d

3.2 桩身水泥土掺入比的影响

图6、7为桩P3~P5在相同桩长($L/d=20$)不同水泥掺入比($a_w=12\%、17\%、25\%$)使用荷载时, 桩身压缩和桩端压缩在桩顶位移中所占比例 $\alpha_s、\beta_s$ 与桩侧摩阻力和桩端荷载在桩顶轴向压力中所占比例 $\alpha_p、\beta_p$ 变化曲线。

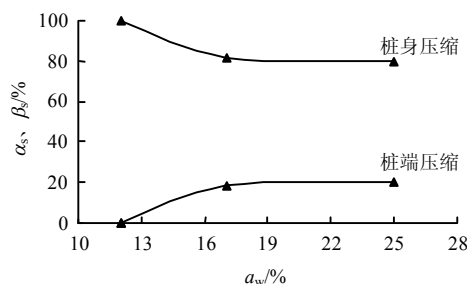


图6 $\alpha_s、\beta_s$ 随水泥土掺入比变化

Fig.6 Changes of $\alpha_s、\beta_s$ in varied a_w

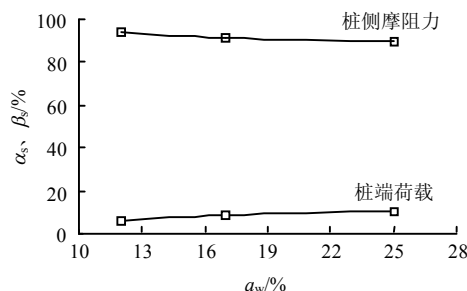


图7 $\alpha_p、\beta_p$ 随水泥土掺入比变化

Fig.7 Changes of $\alpha_p、\beta_p$ in varied a_w

由图 6、7 可以看出,工程常用掺入量下桩身压缩在桩顶位移中所占比例 α_s 都达到 80% 以上,桩侧摩阻力占桩顶轴向压力的比例 α_p 超过 90%。说明水泥掺入比的变化,对荷载传递特性无显著影响。

4 桩身压缩变形对桩侧摩阻力的影响

施加于桩顶的荷载,使桩身材料从上而下产生桩身压缩,从而产生相对于土的向下位移,而桩周土体为了阻止桩的向下位移,在桩侧表面会产生向上的侧摩阻力。由于桩侧阻力从上层到下层逐渐传递,使桩身轴力随深度递减,相应的桩身压缩量也会随深度递减。桩侧摩阻力的发挥取决于桩土的相对位移大小,或者说在某种程度上取决于桩身压缩

量的大小。图 8 为桩 P1~P3 实测所得各桩段桩侧摩阻力与桩土相对位移的变化,可见 3 根桩在桩身上部 0~0.83 m (约 5.5d) 范围内桩侧摩阻力平均值要远大于其它桩段(由地质资料各桩段处于同一土层,认为桩周土性质相近),表现非常不均匀。主要原因为随荷载增大桩身上部压缩变形快速增大(见图 1),使桩侧摩阻力充分快速发挥。且由于夯实水泥土桩的特殊施工方法,一方面使桩身水泥土与桩周土紧密接触,另一方面在夯实过程中对桩周土有一定的挤密效应,造成夯实水泥土桩桩侧摩阻力大幅度提高,与相同条件下干钻孔混凝土桩相比可提高 1.18~1.92 倍^[1]。所以造成桩身上部侧摩阻力可达到较高的值,限制了桩身下部摩阻力的发挥。

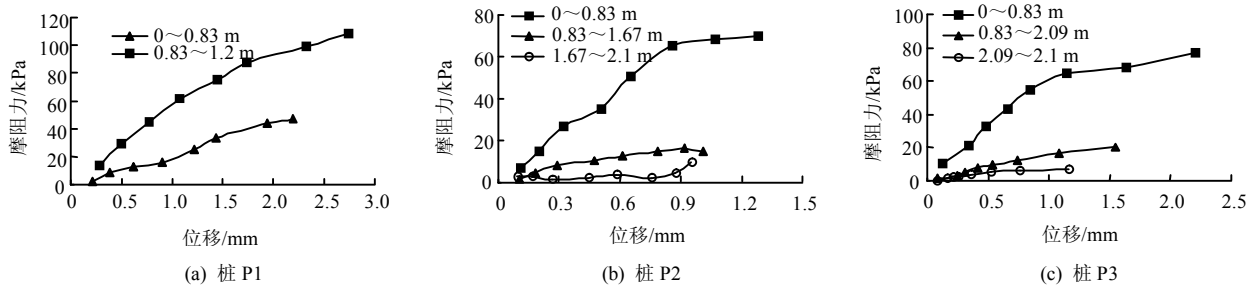


图 8 各桩段桩侧摩阻力与桩土相对位移关系

Fig.8 Relations between shaft resistance and pile-soil relative displacements in different sections

5 结 论

(1) 桩身压缩主要集中在桩身上部约 8d 范围内,且其变形速率增加很快,而桩身下部压缩变形变化缓慢。造成沿桩身桩侧摩阻力分布极不均匀,上部发挥较为充分,而桩身下部发挥较少。

(2) 桩身压缩变形占桩顶位移的比例随长径比增加近似为线性增大,在工程常用水泥掺入量下,桩身压缩在桩顶位移中所占比例都达到 80% 以上。

(3) 桩长径比和水泥掺入比的变化对桩承载特性影响不显著,桩侧摩阻力占桩顶轴向压力的比例达 80% 以上,夯实水泥土桩表现为纯摩擦桩特征。

参 考 文 献

- [1] 郭忠贤, 杨志红, 王占雷. 夯实水泥土桩的荷载传递规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2020—2024. GUO Zhong-xian, YANG Zhi-hong, WANG Zhan-lei. Experimental study of load transfer behavior of rammed soil-cement piles[J]. *Rock and soil Mechanics*, 2006, 27(3): 284—288.
- [2] 陈竹昌, 宋荣. 单桩桩身压缩量的分析计算[J]. 中国公路学报, 1992, 5(1): 69—75. CHEN Zhu-chang, SONG Rong. Shaft compression

- analysis for individual piles[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1992, 5(1): 69—75.
- [3] 任光勇, 张忠苗, 宋仁乾. 桩身混凝土在竖向荷载作用下的压缩量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 348—354. REN Guang-yong, ZHANG ZHONG-miao, SONG Ren-qian. Testing study on compression of pile under vertical load[J]. *China Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2): 39—43.
- [4] 蒋建平. 超长桩桩身压缩的试验与数值模拟研究[J]. 工程勘察, 2006, (12): 19—23. JIANG Jian-ping. Tests and numerical simulation on shaft compression of super-long piles[J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006, (12): 19—23.
- [5] 杨龙才, 周顺华, 高强. 基于单桩轴力的桩身压缩变形计算与分析[J]. 工程勘察, 2004, 31(4): 42—46. YANG Long-cai, ZHOU Shun-hua, GAO Qiang. Calculation and analysis on pile shaft compression of single bored pile[J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2004, 31(4): 42—46.
- [6] 刘焕存. 夯实水泥土变形特性试验研究[J]. 岩土工程技术, 1997, (1): 19—24. LIU Huan-cun. Studies on the tests of the deformation properties of compacted soil-cement[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 1997, (1): 19—24.