

文章编号: 1000-7598-(2008)11-3095-04

# 大直径嵌岩桩残余应变状态分析

印长俊<sup>1</sup>, 王星华<sup>1</sup>, 夏力农<sup>2</sup>

(1 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 长沙学院, 长沙 410003)

**摘要:** 通过对2根大直径嵌岩灌注桩(人工挖孔)加载前应变状态连续监测, 初步分析了桩身残余产生的原因、分布规律和对桩受力性状的影响, 并得到如下结论: (1) 混凝土的干缩是产生残余应变的主要因素; (2) 桩身的残余应变随空间和时间变化是有规律的, 但诸多施工因素(如爆破, 地下水和浇注方式)会使其分布不均匀或弱化桩侧岩石的约束力; (3) 桩身局部的残余应变会超过混凝土的极限拉应变而产生裂缝, 失去对桩身钢筋的保护能力, 并且桩身整体收缩会减小桩端与地基的接触力。以上结论可为工程实践提供参考。

**关键词:** 大直径; 嵌岩桩; 干缩; 残余应变; 温度

**中图分类号:** TU 473.1

**文献标识码:** A

## Analysis of residual strain state of large-diameter rock-socketed piles

YIN Chang-jun<sup>1</sup>, WANG Xing-hua<sup>1</sup>, XIA Li-nong<sup>2</sup>

(1 School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Changsha University, Changsha 410003, China)

**Abstract:** According to longtime monitor on residual strain states of two large-diameter rock-socketed cast-in-place piles (dig by hand) before loading, inducing factors and distribution rules of residual strain, and its influence on bearing behaviours of pile are analyzed, some conclusions are obtained as follows: (1) the main factor of inducing residual strain is drying shrinkage of concrete; (2) the residual strain distribution of the two piles are regularly changing with space and curing time, but some construction factors, such as blowing up, groundwater and type of casting pile, will disturb residual strain distribution or soften restricting force which comes from rock beside pile side. (3) local strain of piles can exceed ultimate tensile strain of concrete, which can result in crazing of concrete and losing of capability of protection to reinforcement bar, and the shrinkage of the whole pile will decrease contact force between pile bottom and rock. The foregoing conclusions provide reference to engineering practice.

**Key words:** large-diameter; rock-socketed piles; drying shrinkage; residual strain; temperature

## 1 引言

一般认为直径大于80 cm的桩为大直径桩<sup>[1]</sup>, 在桥梁基础中常将大直径灌注桩穿过全部覆盖层嵌入基岩, 成为嵌岩灌注桩, 这种桩具有单桩的承载力大、沉降量小和群桩效应小的优点。以往的研究中侧重于加载情况下大直径桩的受力性状, 很少考虑桩基施工过程本身对桩的受力性状的影响。Fellenius<sup>[2]</sup>认为打入桩和钻孔桩在施工过程中都会产生残余应力, 只有考虑残余应力才能得到桩身实际的荷载传递规律。Zhu<sup>[3]</sup>对灌注桩施工过程引起的侧阻力-位移曲线、剪切模量的弱化进行过详细的试验研究。本文通过对大直径嵌岩桩在加载前受

力性状的监测结果进行分析, 拓展了对大直径嵌岩桩的认识范围, 据此对工程实践提出了一些建议。

## 2 工程和地质概况

本工程为钢筋混凝土连续刚构桥, 其中基础工程采用大直径全嵌岩群桩基础, 桩采用C25混凝土, 均为人工挖孔桩。地基岩石主要为黏土岩, 成倾斜层状, 节理裂隙发育, 单轴抗压强度为300~450 kPa(据勘测资料)。

## 3 监测方案

监测项目全部采用长沙金码公司生产的钢弦式应变传感器, 其中有部分传感器可同时监测应变和

收稿日期: 2007-02-06

基金项目: 湖南省科技厅重点项目(No.04SK2008)。

作者简介: 印长俊, 男, 1977年生, 博士, 主要从事桩基和工程力学的研究。E-mail: yinchangjun@yahoo.com.cn

温度,其主要技术参数:量程为 $\pm 1\,500\,\mu\epsilon$ ;灵敏度为 $1\,\mu\epsilon$  ( $0.1\,\text{Hz}$ );测量标距为 $157\,\text{mm}$ ;使用温度范围在 $-10\sim+70\,^{\circ}\text{C}$ 之间;温度测量范围在 $-20\sim+110\,^{\circ}\text{C}$ 之间,温度测量的灵敏度为 $0.5\,^{\circ}\text{C}$ ,精度为 $\pm 1\,^{\circ}\text{C}$ 。

埋设传感器前先将传感器和测线在地面上按不同深度排列绑扎成线束,然后将线束下到钢筋笼中的指定位置并沿钢筋绑扎牢固,再将线束与传感器分别绑扎到钢筋上。

本文选取 2 根桩作为监测研究对象,桩径为 $2.5\,\text{m}$ ,其中 1<sup>#</sup>桩长 $34.5\,\text{m}$ ,2<sup>#</sup>桩长为 $32\,\text{m}$ 。沿 1<sup>#</sup>桩选取 15 个监测截面,截面间距从上往下取 $2.5\,\text{m}$ 直至桩底,每个截面在桩圆周的 4 等分点上布置测点;2<sup>#</sup>桩选取 14 个监测截面,其他布置方案与 1<sup>#</sup>桩相同,2 根桩测点布置如图 1 所示。

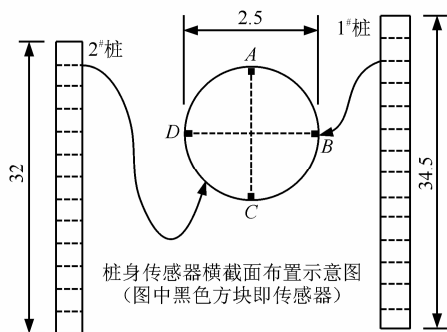


图 1 应变计埋设方案 (单位: m)

Fig.1 Project of installation of strain gauge (unit: m)

## 4 监测结果与分析

### 4.1 某一时刻桩身应变分布的测试结果与分析

这里取拉应变为正,压应变为负。由于施工过程中难以准确控制以及对传感器造成的损伤,使某些数据异常,主要有两种情况:(1)图 2(a)中 C 轴在 10, 12.5 m 和 20 m 处的数据与其他同截面的测点相反,其原因复杂,可能是由于桩孔直径不均匀或者地下水的渗入引起同截面的混凝土不均匀。(2)图 2(b)中 D 轴 25, 27.5 m 和 32.5 m 数据异常,后来证明是由于该处的传感器失效,在后面求平均值的计算中把这几个数据去掉。

如果不考虑上述两种情况,不同时间的 2 根桩桩身应变分布特征大致相同,现以浇筑混凝土完成 24 h 和 43 d 后 1<sup>#</sup>桩桩身应变状态为例(图 2)分析某一时刻桩身应变分布有如下特征:

(1) 桩身同一横截面上不同测点之间应变大小存在不同程度的差异;(2) 某些测点的拉应变已接近或超过混凝土的极限拉应变。

形成以上结果的原因有:

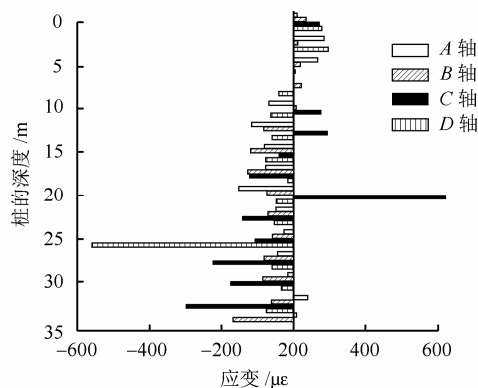
(1) 桩身混凝土的浇注持续约 13 h,而且对水封技术的掌握不成熟,浇注过程不连续,造成沿桩身混凝土并非同时凝固,由于不同时刻、不同位置、不同相态的混凝土在凝固过程中相互制约,形成天然的应变差异<sup>[4]</sup>。

(2) 钢筋笼在吊装和分段焊接过程中已有不同程度变形,造成应变计的受力方向并非绝对竖直,并且混凝土流动也对其产生影响。

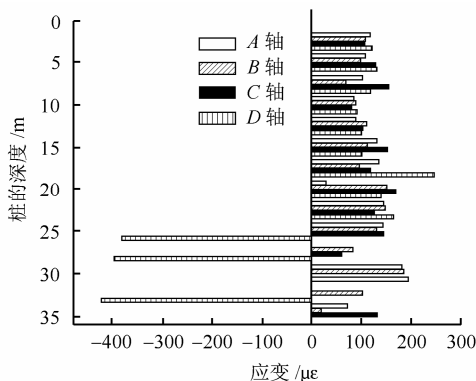
(3) 在收缩过程中由于靠近桩侧的混凝土收缩比桩芯快,使桩侧表面受拉应变,且某些超过混凝土极限拉应变的地方已出现裂缝,如果裂缝位置在应变计的中间,则使应变显著增大;如果裂缝位置在应变计的两端,则使应变显著减小。

(4) 成孔施工方法采用爆破加人工清渣,造成孔壁形状的不均匀性,使同一截面圆周的不同部分的侧阻力显著差异。

(5) 桩周软岩的风化程度随深度增加而降低,以及侧压力系数的变化都会对侧阻力产生不同程度的影响。



(a) 浇筑混凝土 24 h 后



(b) 浇筑混凝土 43 d 后

图 2 1<sup>#</sup>桩桩身应变分布图

Fig.2 Drawing of strain distributing of pile #1

## 4.2 桩身应变状态随时间变化的测试结果和分析

1<sup>#</sup>桩和 2<sup>#</sup>桩的浇注方式不同, 1<sup>#</sup>桩采用的是串筒干封, 浇注前其孔底只有 2 m 深积水, 且在浇注前抽干, 其他地方孔壁没有经水浸泡。2<sup>#</sup>桩采用导管水下浇注, 且在成孔后 12 d 才浇注, 期间由于涨水孔壁在水中浸泡了约 7 d。1<sup>#</sup>桩和 2<sup>#</sup>桩桩身各个截面的平均应变随时间的变化情况如图 3 所示, 监测时间都是从成桩后 24 h 开始, 其应变性状的共同变化特征如下:

(1) 成桩后 24 h, 1<sup>#</sup>桩和 2<sup>#</sup>桩身上部 0 m 至 7.5 m 范围内受拉应变, 其值随深度增加大致呈减小趋势; 桩身下部 7.5 m 至桩底长度范围内受压应变作用。由于凝固时间不一, 只有桩身中部 (7.5 m 至 25 m) 的应变分布形状大致与静水压力的分布相似。2<sup>#</sup>桩的桩底 1/5 桩长范围内的压应变逐渐减小直至变成拉应力, 1<sup>#</sup>桩相应段应变分布规律不明显, 2 根桩的最大压应变都出现在距桩顶 25 m 处。

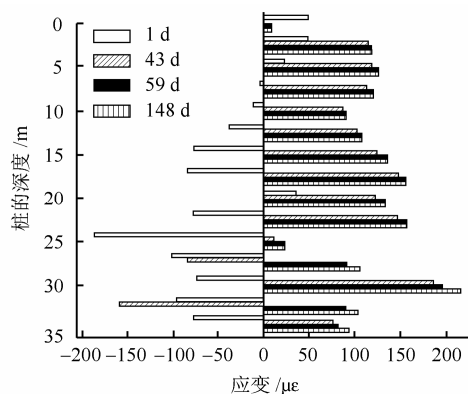
(2) 混凝土强度达到预期强度后 (28 d), 桩身的压应变几乎全部变成拉应变。除个别截面数据异常外 (如图 3 (a) 的 27.5 m 和 32.5 m 处), 沿桩身各个截面之间的拉应变差异不大。

(3) 在一定时间范围内, 随着时间的增长, 各截面的拉应变几乎都略有增长。形成以上结果的原因: (1) 混凝土浇注过程中桩身不同深度处的凝固情况不一, 距桩底越近, 强度越高, 所以压应变逐渐减小, 有时因为混凝土已经开始收缩会产生拉应变 (见图 3 (b), 32.5 m 处)。而桩身大约 25 m (这个距离由混凝土自身性质决定, 如初凝时间等) 以上部分的混凝土还处于流塑状态, 距桩顶越近, 强度越低, 所以桩身中部的压力分布形状类似于静水压力的分布特征; 由于混凝土的粗细骨料均采用机制砂、石, 离析的趋势比较明显, 骨料向下缓慢的蠕动使得桩顶以下 7.5 m 范围内的应变计受向下的摩擦力而表现为拉应变。

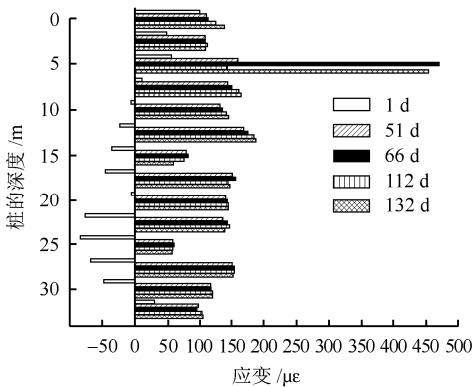
(2) 混凝土强度增强过程中, 由于它自身的收缩 (干缩和冷缩), 使桩身表面产生拉应变。文献[5]认为, 混凝土的干缩能持续一年多, C25 混凝土的极限值约 150  $\mu\epsilon$ , 这与本文的监测结果相符。

2 根桩应变性状的不同点为: (1) 随着时间的增长, 与 1<sup>#</sup>桩不同的是 2<sup>#</sup>桩距桩底约 5~17.5 m 范围内的拉应变略有下降。(2) 如果除去 1<sup>#</sup>的桩顶截面数据 (凿桩头时被应变计挖出) 和 2<sup>#</sup>桩 5 m 处截面 (与其他截面相差太大), 依据剩下的数据计算出的 1<sup>#</sup>桩和 2<sup>#</sup>桩拉应变的平均值分别是 116.1  $\mu\epsilon$  和 125.6  $\mu\epsilon$ , 标准方差值分别为 41.9 和 32.9。

造成以上结果的原因是由孔壁浸水情况决定的: (1) 关于 2<sup>#</sup>桩某段拉应变减小 (图 3 (b)) 的原因不甚明确, 但使桩身产生压缩的力只有桩自身的重力。由于桩底也是拉应变, 所以桩身的自重是由侧阻力承担的。可能是由于侧阻力的弱化使得桩的自重向下传递, 导致桩身局部压缩。(2) 2<sup>#</sup>桩由于水的长期浸泡使得岩石软化, 孔壁的切向强度降低且容易松弛, 进而导致对混凝土收缩应变的约束弱化, 所以 1<sup>#</sup>桩的拉应变平均值小于 2<sup>#</sup>桩。而且, 由于软岩对桩约束减小, 2<sup>#</sup>桩的应变沿桩身分布相对均匀。



(a) 1<sup>#</sup>桩



(b) 2<sup>#</sup>桩

图 3 桩身各个截面的平均应变随时间的变化  
Fig.3 Change of mean strain of every section of piles

## 4.3 混凝土收缩原因的确定

桩身混凝土收缩的原因分别为干缩和冷缩<sup>[6]</sup>。混凝土的水灰比  $w/c = 0.6$ , 塌落度约 17 cm, 混凝土标号是 C25。由于水灰比高, 所以收缩潜力很大, 而且持续时间长。如图 4 所示, 桩身浇注完成 1 d 后桩身温度达到最高值, 一周之后趋于稳定, 以后与地温一样保持几乎是恒定的状态。但当温度恒定后桩身混凝土的拉应变仍在增长 (图 3), 因此可以推断桩身的早期收缩是由干缩和冷缩共同作用的, 而以后以干缩为主。

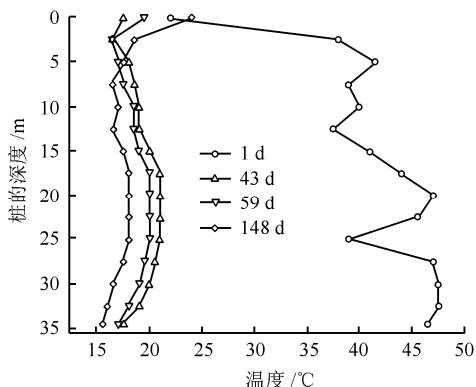


图4 1#桩身温度随时间的变化

Fig.4 Change of temperature with time of pile #1

#### 4.4 桩的残余应变状态对桩的影响

##### (1) 对桩身质量的影响

2#桩身的平均拉应变  $\varepsilon = 125.6 \mu\varepsilon$ , 某些测点的拉应变已超过了混凝土拉应变的极限值 ( $150 \mu\varepsilon$ ), 因此可以判定桩身混凝土会产生局部开裂, 将导致钢筋的腐蚀。

##### (2) 对桩受力变形的影响

桩身竖向不均匀收缩引起桩端与地基接触力减小, 导致桩身的初始沉降相对较大, 桩身的横向收缩使桩-岩间的法向应力减小, 因此导致桩侧阻力减小, 桩身的轴力增大。

以上2个因素都会使桩身的初始压缩量的增长速度比以后快。

## 5 结 论

(1) 由于桩身混凝土凝固的时间不一, 造成桩身混凝土在龄期较早时上部受拉应变和下部受压应变。随着混凝土龄期增长, 干缩作用使得桩身混凝土全部受拉应变, 期间温度降低对收缩的影响很小。

(2) 施工因素对桩的受力有显著影响, 如挖孔过程中的爆破使得桩孔直径不均匀会引起桩侧岩石约束情况的不均匀性; 地下水的浸泡会弱化桩侧岩石; 不同深度处混凝土凝固时间的不一致, 造成桩身不同深度以及同一横截面残余应变的不均匀性。

(3) 桩身某些地方的干缩引起的拉应变会超过混凝土的极限抗拉应变, 从而使得混凝土开裂和钢筋锈蚀; 桩身的整体收缩还会使桩长缩短, 并引起桩端与地基接触力减小, Tang<sup>[7]</sup>也得到类似监测结果。

## 参 考 文 献

- [1] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] FELLENIUS B H. Determining the true distribution of load in piles[C]//Edited by M. W. O'Neill, F. C.: Townsend, International Deep Foundation Congress, An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance, Geotechnical Special Publication No.116. Orlando, Florida: [s. n.], 2002: 1 455—1 470.
- [3] ZHU Hong, CHANG Ming-fang. Load transfer curve along bored piles considering modulus degradation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, (9): 764—774.
- [4] 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [5] 天津大学、同济大学、东南大学、清华大学. 混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [6] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [7] TANG Q. Load transfer mechanisms of drilled shaft foundations in karstic limestone — Behavior under working load[D]. Knoxville: The University of Tennessee, 1995.

## 《建筑科学与工程学报》2009 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学主办的学术性期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括建筑结构、地下建筑与基础工程、防灾减灾、桥梁工程、建筑材料、建筑学、市政工程、力学等相关专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结, 每期均发表院士专稿。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为: 建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大16开本, 128页。每期定价10.00元(含邮寄费), 全年共40.00元; 国内外公开发行人, 邮发代号: 52-140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地 址: 西安市南二环路中段长安大学内  
电 话: 82334397

邮 编: 710064  
E-mail: jzxb@chd.edu.cn