

# 粉喷桩单桩承载力的时效分析

杜海金 张建新 吴东云 杨树标  
(河北建筑科技学院建筑工程系 邯郸 056038)

**摘要** 采用土的弹塑性模型和弹性力学理论, 分别对桩周土和桩身应力的传递及变形进行了分析, 建立了单桩的受力模型, 并得到了其理论解, 证明单桩承载力随成桩时间的增长而有明显的提高; 通过某工程的粉喷桩单桩载荷试验资料, 分析了在饱和土层中, 粉喷桩复合地基单桩承载力的时间效应问题, 且地下水对也具有较大的影响。掌握单桩承载力的时间效应规律, 对粉喷桩复合地基的优化设计及确定载荷试验的时间具有重要的意义。

**关键词** 粉喷桩, 承载力, 时间效应, 龄期

**分类号** TU 451

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)04-0586-04

## 1 前言

粉喷桩复合地基是采用专门的施工机械, 将水泥粉与原状软弱土充分地混合, 吸收土中的水, 并经一系列的物理化学反应, 形成一种半刚性的桩体, 桩体与桩间土通过一褥垫层共同承受上部荷载, 组成复合地基。粉喷桩的单桩承载力与桩身水泥土的强度、桩间土及桩端土的性质等因素有关<sup>[1]</sup>。在同一场区, 若其他条件相同时, 存在着单桩承载力随时间增长而逐渐增大的现象, 这一现象称为时间效应。

单桩承载力的时间效应, 已有多年的研究<sup>[2~5]</sup>, 但对粉喷桩承载力的研究相对较少。时间效应产生的原因, 一是在成桩过程中, 水泥与土中粘粒和水的物理化学反应及水化作用, 桩身强度不断增长; 二是搅拌时对周围桩周土的扰动, 土体的再固结及强度恢复。此项研究意义在于, 认清单桩承载力的时间效应, 将对粉喷桩的优化设计及确定载荷试验的时间提供必要的依据。

本文结合邯郸市某工程的载荷试验资料, 对粉喷桩单桩承载力的时间效应进行了分析讨论。

## 2 单桩承载力随时间增长的理论分析

在饱和和软土中, 一般认为粉喷桩是作为摩擦桩<sup>[6]</sup>。河北建筑科技学院在2000年的科研报告“粉喷桩复合地基单桩承载力的测试研究”中, 认为在单桩承载力标准值应力水平时, 桩端阻力为零, 并且桩周土体处于弹性状态; 桩周土摩阻力模型如图1, 并有

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } r \leq r_{su} \text{ 时, } \tau &= \frac{\tau_u}{r_{su}} r_s = k r_s \\ \text{当 } r > r_{su} \text{ 时, } \tau &= \tau_u \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为桩侧摩阻力(kPa),  $\tau_u$  为桩侧摩阻力极限值(kPa),  $r_s$  为桩、土相对位移(m),  $r_{su}$  为对应于  $\tau_u$  的  $r_s$  值(m),  $k$  为桩与桩周土的弹性摩擦系数。

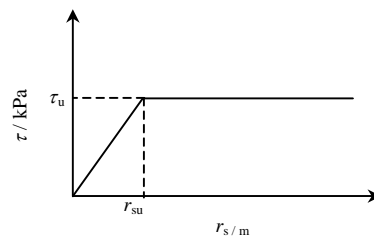


图1 桩周土摩阻力计算模型

Fig.1 Calculation model of the skin friction along the pile

在桩顶荷载  $P$  的作用下, 桩顶下  $x$  处桩身截面的内力为  $N$ , 并设桩端土受力为  $N_d=0$ , 桩截面面

2001年2月23日收到初稿, 2001年4月12日收到修改稿

作者 杜海金 简介: 男, 1962年生, 1984年毕业于同济大学工程地质专业, 现任土工实验室主任、副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。

积为  $A_p$ , 桩周长为  $U$ , 桩身弹性模量为  $E$ 。在  $x$  处取一微单元体  $dx$ , 其内力变化为  $dN$ , 根据力的平衡关系, 有

$$N = N + \frac{dN}{dx} dx + kU r_s dx \quad (2)$$

根据变形协调关系, 桩身的微应变为  $\varepsilon = dx/x$  时, 有

$$\varepsilon = [(r_s + dU/dx \cdot dx - r_s)]/dx \quad (3)$$

桩身变形服从虎克定律, 则有

$$\varepsilon = -N/(A_p E) \quad (4)$$

整理式(2)~(4)得

$$\frac{d^2 r_s}{dx^2} - \frac{kU}{A_p E} r_s = 0 \quad (5)$$

代入边界条件及初始条件, 并经转换得到  $P-r_s$  关系式

$$P = \alpha A_p E \frac{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} r_s \quad (6)$$

式中:  $\alpha = \sqrt{\frac{kU}{A_p E}}$ , 其他符号同前。

式(6)建立了桩顶荷载与位移、桩周土的性状及桩身参数之间的关系。在同一场区, 通过载荷试验确定单桩承载力时, 若认为桩周土性状、桩的直径、长度及施工质量是相同的, 所得荷载-位移( $P-S$ )曲线显然将随桩身弹性模量的不同而存在差异, 桩身模量越大,  $P-S$  曲线上显示的单桩承载力越高; 而桩身弹性模量是随粉喷桩龄期的增长逐渐增大的, 它直接影响了桩与土的相对位移的大小和桩侧摩阻力的发挥, 所以, 从理论上讲, 单桩承载力是随着成桩时间的增长而逐渐提高的, 并且桩身强度起着

重要的作用。

### 3 试验基本情况

#### 3.1 场区工程地质条件简述

该工程位于邯郸市区内, 该区作为建筑物地基的土层均为第四纪新近沉降的冲洪积土层, 土层均具有含水量高、孔隙比大、承载力低等特点, 特别适合于用粉喷桩进行加固处理, 形成复合地基。该工程土层性质如表 1。

粉喷桩加固处理的主要是第②~④层土, 设计要求单桩承载力标准值  $R_k^d = 130 \text{ kN}$ 。场区东北角由于下水管道的渗漏, 使地下水局部富集, 含水量偏高, 土质相对较软, 地下水埋深为 1.70 m, 其他部位未见地下水。

#### 3.2 现场单桩载荷试验

现场载荷试验共 9 组, 其中东部 3 组, 中部 3 组及西部 3 组, 分别做 14, 28 d 龄期试验, 由于场区东北部受地下水的影响,  $R_k^d$  不满足设计要求, 故进行补强处理。补强处理后, 为本课题的研究创造了条件, 又对桩进行了 60 d 载荷试验。单桩承载力基本值按相对沉降法( $s/d = 0.01$ )取值<sup>[7]</sup>。试验成果见表 2。

#### 3.3 水泥土室内强度试验

在成桩后 7, 14, 28, 60, 90 d, 分别做粉喷桩桩身试块(70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)无侧限抗压强度试验, 其平均值见图 2。

## 4 结果分析

表 1 场地土层物理力学性质指标

Table 1 Physic-mechanical indexes of soils in site

层号	土名	厚度 /m	颜色	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	含水量 $W/\%$	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	承载力标准值 $f_k/\text{kPa}$
②	粉质粘土	0.5~3.8	褐黄	28.8	17.4	12.4	1.15	30.1	19.2	97.2	0.937	5.3	95
③	粉土	0.7~1.8	褐黄	28.3	20.5	7.8	0.58	25.0	19.7	88.0	0.767	5.6	100
④	粉质粘土	1.3~4.4	黄褐	30.7	19.7	12.1	1.03	31.3	19.5	98.1	0.860	6.4	115
⑤	粉土	3.9~4.5	黑灰	31.5	20.6	8.4	0.88	29.9	19.6	95.9	0.847	7.5	115
⑥	粉质粘土	未打穿	灰黑	28.6	17.2	11.4	0.54	23.2	19.7	86.7	0.723	4.7	140

注: 第①层为杂填土, 厚度为 0.5~1.7 m。

表 2 单桩承载力基本值

Table 2 Basic values of bearing capacity for single pile

桩号	龄期 / d	$R_0$ / kN	桩号	龄期 / d	$R_0$ / kN	桩号	龄期 / d	$R_0$ / kN
	13	*		14	82		15	105
东部 1#	28	105	东部 3#	28	110	西部 5#	30	140
	/	/		61	122		62	146
	15	85		13	98		13	96
东部 2#	29	98	中部 4#	27	135	西部 8#	27	135
	/	/		60	145		63	142

注：\* 桩身强度低，沉降过大。中、西部各桩承载力变化情况较为一致，此表仅列出东部 3 根桩的结果。

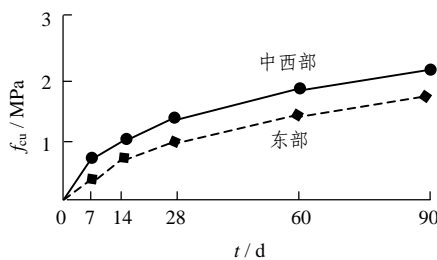


图 2 桩身无侧限抗压强度( $f_{cu}$ )与时间( $t$ )的关系

Fig.2 Relationship between compressive strength of pile and time without lateral confining

4.1 桩身无侧限抗压强度时间效应分析

由试验结果图 2 可知，28 d 以前桩身强度随着时间的增长而显著提高，28 d 后的提高缓慢；而 60 d 后强度基本上没有增长。

4.2 单桩承载力时间效应分析

由表 2，各单桩承载力随着龄期的增长而有明显变化。表 3 中，承载力的平均增幅：14~28 d 为 23.8%；28~60 d 为 6.5%。

表 3 单桩承载力随时间的变化情况

Table 3 The bearing capacity of single pile varied with time

桩号	14~28 d		28~60 d	
	递值 / kN	增幅 / %	递值 / kN	增幅 / %
1#	13	13	/	/
2#	/	/	/	/
3#	28	25	12	10
4#	37	27	10	7
5#	35	25	6	4
8#	39	29	7	5

表 3 说明，粉喷桩单桩承载力具有明显的时间效应。分析认为，一方面，在成桩过程中及其以后一段时间内，由于水泥与周围土体逐渐发生水解、水化及碳酸化作用，使水泥石结构离散性越来越小，总体强度越来越高；另一方面，由于成桩时的搅拌，对桩周土体产生了扰动，随着时间的增长，桩周土将经历一个再固结、强度恢复的过程，使桩周土强度逐渐增加，在这一过程中，水泥石还在不断地吸收桩周土内的水分，使桩与土之间的摩擦力增大，进而单桩承载力也将逐渐提高。

4.3 地下水的影响

场区东部由于地下水较富集，从 3 组试桩结果显示，总体上单桩承载力增长缓慢，大小较中西部平均偏低 10 kN，而桩身室内无侧限抗压强度试验也表现出类似的规律。这说明由于地下水的影响，增加了水泥石的硬凝时间，并减小了桩侧摩阻力，从而使东部与中西部单桩承载力时间效应有较大的差异。

4.4 载荷试验龄期的选择

文[8, 9]规定 28 d 龄期的粉喷桩可进行载荷试验。在不考虑 1#桩情况下，从本工程看，14~28 d 龄期的单桩承载力相差 25%~29%，平均相差 26.5%，所以认为当桩身具有一定强度时，在有经验地区可用 14 d 的载荷试验确定承载力。

5 结 论

通过邯郸市粉喷桩单桩承载力载荷试验成果分析，可得到以下结论：

- (1) 粉喷桩单桩承载力随成桩时间的增加而逐渐提高，表现出明显的时间效应。
  - (2) 一般认为粉喷桩为纯摩擦型桩。在饱和土层中，水泥与土的水化及物化反应(硬凝过程)及桩间土的强度恢复需要一定时间，这是造成其承载力时间效应的主要因素。
  - (3) 由于地下水的影响，含水量过高，可减小单桩承载力，并使其时间效应相对不明显。
  - (4) 由单桩承载力时间效应分析认为，粉喷桩单桩载荷试验宜在成桩 28 d 后进行。当桩身具有一定强度时，在有经验地区也可采用 14 d 龄期的桩进行载荷试验。
- 掌握单桩承载力的时间效应规律，为粉喷桩的优化设计及进行载荷试验时间的确定提供了重要的依据。

## 参 考 文 献

- 1 技术规范编写组. 建筑地基处理技术规范 JGJ 79-91(1998 年版)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2000
- 2 叶为民, 黄雨, 唐益群等. 饱和软土中打入式预制桩单桩承载力的时效性[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 367~369
- 3 黄宏伟. 微型预制桩单桩承载力时效现场试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 666~669
- 4 陈晓平, 茜平一. 复合桩基竖向承载力分项系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 655~658
- 5 陈善雄, 谭新. 石灰桩-粉喷桩联合加固深厚软土地基设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1274~1275
- 6 梁志安, 陈静曦. 试论水泥喷射搅拌桩的单桩承载力测试[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 71~75
- 7 杜海金, 史三元. 载荷试验确定粉喷桩承载力的标准探讨[J]. 工程勘察, 2001, (1): 17~19
- 8 基础规定编写组. 火力发电厂地基处理基础规定(DL5024-93)[S]. 北京: 水利电力出版社, 1994
- 9 上海市工程建设标准化办公室. 上海地基处理技术规范(DBJ08-40-9)[S]. 上海: [s. n.], 1995

## TIME EFFECT ON BEARING CAPACITY OF SINGLE CEMENT SOIL PILE

Du Haijin, Zhang Jianxin, Wu Dongyun, Yang Shubiao

(Department of Civil Engineering, Hebei Institute of Architectural Science and Technology, Handan 056038 China)

**Abstract** Using elasto-plastic model and elastic mechanics theory, the stress transfer and deformation of pile along the pile are analysed respectively. The calculation model of single pile is built and the theoretic solutions are gained. The increase of bearing capacity of single pile is obvious with time. According to the data of static loading test for single cement soil pile, the time effect on bearing capacity of single cement soil pile is analysed in the saturated soil. The influences of groundwater on the bearing capacity are considered too. The presented results are of important significance to optimizing design of the cement soil pile composite foundation and deciding the time of the loading test.

**Key words** cement soil pile, bearing capacity, time effect, age

### 下期内容预告

2002 年第 5 期《岩石力学与工程学报》为重庆市作者论文专辑, 将发表下列内容的文章:

- (1) 岩石本构关系与煤层瓦斯突出问题的研究;
- (2) 节理内压致裂与微裂纹演化的分岔混沌特性;
- (3) 采动引起的岩层应力、变形与加固措施;
- (4) 滑坡失稳机制与综合治理措施;
- (5) 岩土动力学问题;
- (6) 研究进展与工程实录。