

桩端后注浆上返高度及桩顶冒浆处理

张忠苗^{a,b}, 邹健^{a,b}

(浙江大学 a. 岩土工程研究所; b. 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘要:在幂律型浆液平板窄缝流动模型的基础上, 推导出了桩端后注浆浆液上返高度的计算公式。并对上返高度随注浆压力、桩埋深、桩径、泥皮厚度的变化情况进行计算分析, 结果表明: 桩底浆液压力越大、桩侧泥皮越厚、桩长越短, 浆液上返高度越大, 即越容易发生桩顶冒浆。工程实例研究表明, 桩顶冒浆的主要原因包括桩侧泥皮厚、试桩龄期短、持力层可注性差和桩底沉渣厚。通过降低注浆压力, 减小桩侧泥皮及桩底沉渣厚度, 提高泥皮强度可以防止桩顶冒浆的发生。对于发生桩顶冒浆的试桩, 可采用间歇注浆进行处理。与未发生桩顶冒浆的桩相比, 发生桩顶冒浆并通过复注达到设计注浆量的桩, 其极限承载力较高。这是由于沿桩侧泥皮上返的浆液, 通过劈裂、置换桩侧泥皮, 使桩侧摩阻力略微提高。

关键词:桩端后注浆; 上返高度; 桩顶冒浆; 桩侧摩阻力

中图分类号: TU753.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)05-0001-08

Climb Height and Overflow of Grout in Shaft Base Grouting

ZHANG Zhong-miao^{a,b}, ZOU Jian^{a,b}

(a. Institute of Geotechnical Engineering; b. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China)

Abstract: Based on the assumptions of exponential fluid and narrow plate model, formulas for calculating the climb height of grout in shaft base post grouting was deduced. It is shown that the climb height of grout is mainly related to the grouting pressure, the shaft length, the shaft diameter and the mudcake thickness. With the theoretic analysis and case study, it is indicated that thicker mudcake, higher grouting pressure and shorter shaft length would lead to larger climb height and larger risk of overflow. The overflow of grout would be prevented by reducing the grouting pressure, the mudcake thickness and debris thickness. The overflow of grout can also be prevented by increasing the strength of mudcake. For the overflow shafts, intermission grouting would be employed. Compared with the ordinary shafts, the former has higher bearing capacity than the latter, resulting from the grout upwards along the shaft-soil interface.

Key words: shaft base post grouting; climb height; overrun; skin friction

桩端后注浆用于钻孔灌注桩, 不仅能提高灌注桩的端承力, 还能减小发挥端承力所需的位移^[1-3], 故广泛地应用于高层建筑、桥梁工程、高速铁路、大型地下基础的抗拔桩、基础托换、既有桩基础的补强

及既有桩基础的纠偏等^[4]。在桩端后注浆过程中, 桩底高压浆液可能沿着桩土交界面向上爬升, 从而提高了爬升高度以内的桩侧阻力^[5]。若高压浆液爬升至桩顶, 则造成桩顶冒浆。桩顶冒浆表现为桩顶

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078330)

作者简介: 张忠苗(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程、地基处理及工程地质研究,
(E-mail) zjuzzm@163.com.

周围向上冒气泡、稀浆或浓浆,严重时呈沸腾状。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)^[6]规定桩端后注浆以注浆量作为主控因素,而桩顶冒浆将使设计注浆量无法达到。关于桩顶冒浆的成因及处理措施,目前国内外都未见报道,同时桩顶冒浆与桩承载力的关系也还有待研究。

该文在幂律型浆液平板窄缝流动模型的基础上,推导出了桩端后注浆时浆液上返高度的计算公式。在此基础上,对桩顶冒浆的成因及其影响因素进行分析,并以实际工程为依托,对桩顶冒浆的处理措施及其效果进行研究。

1 桩端后注浆浆液上返高度计算分析

钻孔灌注桩桩土间的泥皮层比桩周土更软弱^[7],浆液在压力作用下有沿桩侧软弱面向上运动的趋势,此处软弱面有 2 个,即桩—泥皮接触面和泥皮—桩周土接触面。浆液在压力作用下,首先克服任一软弱面的阻力,顺此软弱面向上爬升,并对泥皮层和桩侧土体进行挤密,甚至破坏泥皮结构,沿桩侧形成流动通道,如图 1 所示。

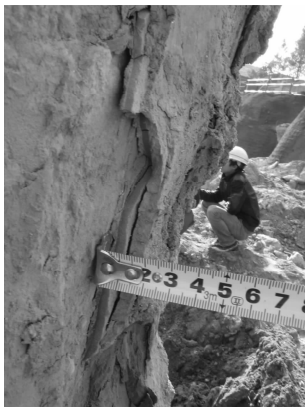


图 1 浆液沿桩侧泥皮向上爬升

1.1 基本假定

目前对桩端后注浆浆液爬升高度的理论研究还很少,中国仅有张晓炜等^[8]对其进行过研究,但他们为了分析方便,将其简化为 2 个阶段,即假定浆液在软弱层中的运动是先流动上升,再产生挤压作用。这与实际情况有所出入,因为浆液流动孔隙的宽度直接影响到浆液流动的阻力,即影响到浆液的上返高度。该文从实际情况出发,对浆液沿桩侧薄弱层的流动做出以下假定:

1) 浆液为幂律流体,其流动形式为层流,根据文献^[9],工程上较常用的水灰比为 0.5~0.7 的水泥浆为幂律流体,即 $f(\tau) = (\frac{\tau}{k})^{\frac{1}{n}}$;

2) 浆液的运动粘度为常量,且在扩散过程中流型不变^[9];

3) 假设桩侧泥皮厚度均匀不变(对于干作业螺旋钻孔灌注桩,其泥皮厚度为零,故极少发生冒浆),且桩身为光滑圆柱面。此时桩侧裂隙宽度为 $\delta + u$,其中 δ 为泥皮厚度, u 为桩侧土体及泥皮的压缩量,如图 2 所示。

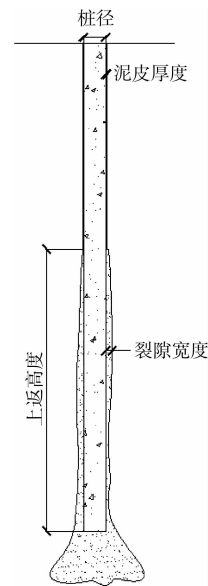


图 2 浆液扩散模型

4) 桩端后注浆过程中,浆液沿桩侧的流动实际上是浆液劈裂破坏桩侧土,浆液沿桩侧软弱层向上流动,浆液挤压桩侧土体 3 个状态的耦合。若考虑时间因素的影响,将使得求解变得极为复杂。因此文中不考虑时间因素的影响,仅对最终的平衡状态进行分析。

1.2 理论分析

1.2.1 桩侧土体的位移 对于线弹性土层,浆液对桩侧土的压缩可由柱扩张理论计算得到^[10-11]。

平衡方程:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} = 0 \quad (1)$$

几何方程:

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (2)$$

弹性本构方程:

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{M} \left\{ \sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_\theta \right\} \\ \epsilon_\theta = \frac{1}{M} \left\{ -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r + \sigma_\theta \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ν 为泊松比; M 为 $\frac{E}{1-\nu^2}$ 。

边界条件如下:

$$\begin{cases} \sigma_r(a) = p \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r = p_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: p 为浆液的压力; p_0 为土体的初始应力, $p_0 = K_0 \sum \gamma_i z_i$

联立(1)–(4)式,可以求得弹性状态土体的位移场:

$$u = \frac{p - p_0}{2G} \frac{a^2}{r} \quad (5)$$

式中: u 为桩侧土体的侧向位移; a 为内孔半径; r 为计算点半径; G 为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 。

在式(5)中,令 $r = a = \frac{D}{2} + \delta$,即可求得桩侧土体的压缩量,由于 $\delta \ll D$,可近似的令 $r = \frac{D}{2}$,此时:

$$u = \frac{(p - p_0)D}{4G} \quad (6)$$

式中: D 为桩径。

1.2.2 浆液流动基本方程 非时变性粘性流体的本构方程为^[12]:

$$\gamma = f(\tau) \text{ 或者 } -\frac{dv}{dy} = f(\tau) \quad (7)$$

式中: γ 为剪切速率; τ 为剪切应力; v 为浆液流速; y 为裂隙边与裂隙中心距离,为 $1/2$ 裂隙宽度。

由于裂隙宽度的变化不大,可以将每一小高差段看成平板窄缝,则均匀流动方程:

$$\tau = \frac{\Delta p y}{\Delta h} \quad (8)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta p(\delta + u)}{2\Delta h} \quad (9)$$

式中: Δp 为压力差; Δh 为高差; δ 为泥皮厚度, $(\delta + u)$ 为裂隙宽度; τ_w 为窄缝边缘处剪切应力。

由式(7)和边界条件($y = \frac{\delta + u}{2}$, $v = 0$)得:

$$v = \int_y^{\frac{\delta + u}{2}} f(\tau) dy \quad (10)$$

联立式(8)和式(9)得

$$\tau = \tau_w \frac{2y}{\delta + u} \text{ 或 } y = \frac{\delta + u}{2\tau_w} \tau$$

代入式(10)并变换积分变量可得:

$$v = \frac{\delta + u}{2\tau_w} \int_{\tau}^{\tau_w} f(\tau) d\tau \quad (11)$$

幂律流体的流变方程:

$$f(\tau) = \left(\frac{\tau}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

式中: k 为稠度系数。

流速 v :

将式(12)代入式(11)求得:

$$v = \frac{\delta + u}{2\tau_w} \left(\frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (\tau_w^{\frac{n+1}{n}} - \tau^{\frac{n+1}{n}})$$

将 τ 和 τ_w 分别以式(8)和式(9)代入,求得

$$v = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta p}{k\Delta h}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{\delta + u}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}}\right] \quad (13)$$

流量 q :

$$\begin{aligned} q &= \int_{-\frac{\delta + u}{2}}^{\frac{\delta + u}{2}} b v dy \\ &= 2b \int_0^{\frac{\delta + u}{2}} v dy = 2\pi D \int_0^{\frac{\delta + u}{2}} v dy \end{aligned} \quad (14)$$

式中: b 为裂隙的长度, $b = \pi D$

将式(13)代入式(14)求得:

$$q = \frac{2\pi D n}{2n+1} \left(\frac{\Delta p}{k\Delta h}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\delta + u}{2}\right)^{\frac{2n+1}{n}} \quad (15)$$

压力差 Δp :

根据式(15)变形可得:

$$\Delta p = \left(\frac{q}{\pi D}\right)^n \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \frac{2^{n+1} k \Delta h}{(\delta + u)^{2n+1}} \quad (16)$$

若考虑重力的影响,则

$$\Delta p = \left(\frac{q}{\pi D}\right)^n \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \frac{2^{n+1} k \Delta h}{(\delta + u)^{2n+1}} + \gamma \Delta h \quad (17)$$

式中: γ 为水泥浆的重度。

将式(6)代入上式得到:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left(\frac{q}{\pi D}\right)^n \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \cdot \\ &\frac{2^{n+1} k \Delta h}{\left\{\delta + \frac{[p(h) - p_0(h)]D}{4G}\right\}^{2n+1}} + \gamma \Delta h \end{aligned} \quad (18)$$

边界条件:

$$h = 0, p = p_c \quad (19)$$

1.2.3 浆液上返高度及桩顶冒浆条件 根据工程断裂力学,仅当压力大于起裂压力时,裂缝才会扩张,而由于桩侧泥皮土(桩土交界面)的粘聚力极小(仅为几千帕到十几千帕^[7]),所以只要高度 h 处的浆液压力大于土体的水平向静止土压力 $p_0(h)$,裂隙就能继续扩张,且当浆液压力等于土体的水平向静止土压力时,即当 $p(h) = p_0(h)$ 时,裂隙扩展到最高处,此时的高度 h 即为浆液的上返高度 h_{\max} 。

$$\begin{cases} \Delta p = \left(\frac{q}{\pi D}\right)^n \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \cdot \\ \frac{2^{n+1} k \Delta h}{\left\{\delta + \frac{[p(h) - p_0(h)]D}{4G}\right\}^{2n+1}} + \gamma \Delta h \\ p(0) = p_c \\ p(h_{\max}) = p_0(h_{\max}) \end{cases} \quad (20)$$

对式(20)进行叠代求解可得浆液上返高度,若浆液上返高度大于桩长,则发生桩顶冒浆。

2 浆液上返高度的计算分析

2.1 计算参数的选取

为了分析各因素对桩顶冒浆的影响,利用 Matlab 对式(20)进行计算分析,并讨论各因素对浆液上返高度的影响。假设土体为单层均质土,泊松比 $\nu = 0.35$,土体重度 $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$,水泥浆重度 $\gamma' = 17 \text{ kN/m}^3$,静止土压力系数 K_0 及土体变形模量 E ^[13] 的取值如表 1 所示。

表 1 静止土压力系数 K_0 及土体变形模量 E

土名	砾石、卵石	粉土	砂土	粘土
K_0	0.20	0.40	0.25	0.55
E/MPa	360	85	130	60

注:这里考虑的是注浆过程中的桩侧土体的变形,由于变形时间较短,变形模量取值较大,且通过此变形模量计算的桩侧浆脉厚度与现场观测厚度相符。

2.2 桩底浆液压力对上返高度的影响

当桩长 $H = 40 \text{ m}$,桩径 $D = 1 \text{ m}$,注浆速率 $q = 0.1 \text{ L/s}$ (这里的注浆速度并非实际注浆速率,而是仅仅考虑沿桩侧泥皮上返的那部分浆液),泥皮厚度 $\delta = 1 \text{ cm}$,稠度系数 $k = 1 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,流变参数 $n = 0.1$ 时,不同桩底浆液压力 p_c 下浆液上返高度 h_{\max} 的值如图 3。

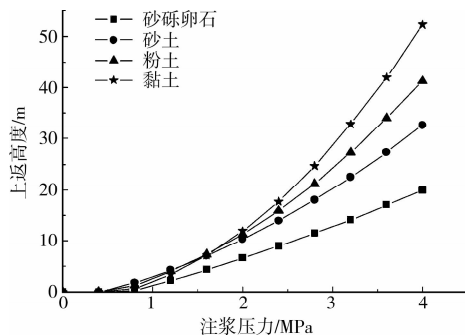


图 3 注浆压力对上返高度的影响

从图 3 中可以看出,随着桩底浆液压力的增大,浆液上返高度迅速增大,即越容易发生桩顶冒浆。

2.3 桩长(埋深)对上返高度的影响

在桩径 $D = 1 \text{ m}$,桩底浆液压力 $p_c = 2 \text{ MPa}$,注浆速率 $q = 0.1 \text{ L/s}$,泥皮厚度 $\delta = 1 \text{ cm}$,稠度系数 $k = 1 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,流变参数 $n = 0.1$ 的情况下,不同桩长 H 下浆液上返高度 h_{\max} 的值如图 4。

从图 4 中可以看出,桩埋深(桩长)的越深,桩底注浆的上返高度越小,即越不容易发生冒浆。

2.4 桩径对上返高度的影响

当桩底浆液压力 $p_c = 2 \text{ MPa}$,桩长 $H = 40 \text{ m}$,

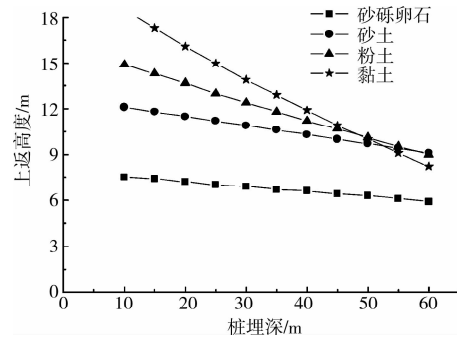


图 4 桩埋深对上返高度的影响

注浆速率 $q = 0.1 \text{ L/s}$,泥皮厚度 $\delta = 1 \text{ cm}$,稠度系数 $k = 1 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,流变参数 $n = 0.1$ 时,桩径 D 对上返高度 h_{\max} 的影响如图 5。

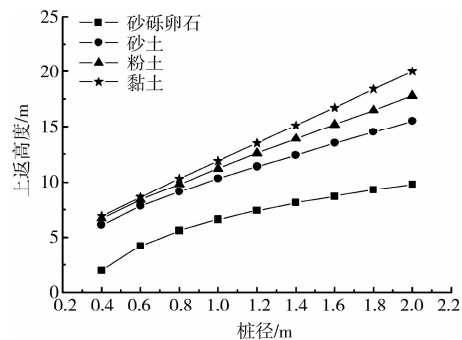


图 5 桩径对上返高度的影响

从图 5 中可以看出,随着桩径的增大,桩端后注浆上返高度也相应增大,但增大幅度很小,这说明桩径变化对上返高度的也略有影响。

2.5 泥皮厚度对上返高度的影响

当桩底浆液压力 $p_c = 2 \text{ MPa}$,桩长 $H = 40 \text{ m}$,桩径 $D = 1 \text{ m}$,注浆速率 $q = 0.1 \text{ L/s}$,稠度系数 $k = 1 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,流变参数 $n = 0.1$ 时,桩侧泥皮厚度对上返高度的影响见图 6。

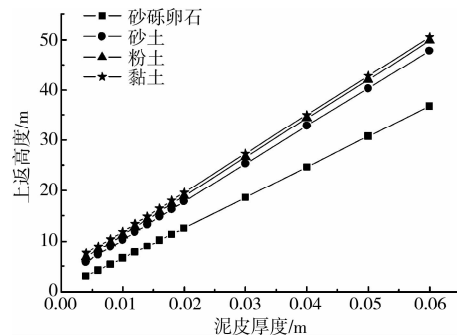


图 6 泥皮厚度对上返高度的影响

从图 6 中可以看出,随着泥皮土厚度的增加,桩底注浆的上返高度迅速增加,即桩侧泥皮越厚,越容易发生桩顶冒浆。

总的来说,桩底浆液压力越大、桩侧泥皮越厚、

桩长越短,越容易发生桩顶冒浆。在实际施工中,桩侧泥皮的强度也对桩顶冒浆有一定影响,桩侧泥皮强度越低,则浆液越容易沿桩侧泥皮向上爬升。

3 桩顶冒浆工程实例

3.1 工程概况及试桩概况

杭州市奥体博览中心项目一标段——主体育场位于钱塘江南岸庆春路过江隧道南侧,西北方紧邻钱塘江,东南方为七甲河。场地土性质较差,其场地土层情况如表2所示。

表2 地基土物理力学性质指标

层号	岩土名称	层底埋深/m	重度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	孔隙比	I_p	I_L	E_s / MPa	f_{ak} / kPa	q_{sia} / kPa	q_{pk} / kPa
0-2	素填土	0.7	18.8	26.9	0.789	8.6	0.94		50		
1-1	粘质粉土	2.0	18.5	28.3	0.834	8.9	1.05	10	120	14	
1-2	砂质粉土	5.8	18.63	27.99	0.820	9.17	1.09	1.5	140	22	
2-1	砂质粉土	10.4	18.8	26.8	0.784	10.1	1.11	11	150	23	
3-1	粉砂夹粉土	17.2	19.1	24.8	0.728	10	1.01	12	160	25	
3-3	淤泥质粘土	23.4	17.33	41.38	1.185	17.51	1.09	3	85	10	
4-1	粉质粘土	25.0	18.8	27.3	0.809	14.8	0.45	6	180	27	
4-2	粉质粘土	30.2	19.29	23.65	0.705	11.98	0.41	7	210	31	
5-1	含砂粉质粘土	31.6	19.5	22.5	0.666	10.3	0.51	7	240	34	
5-2	粉细砂	36.1	19.71	20.58	0.616			12	220	35	2 000
6-2	卵石	47.5						35	550	55	2 500
6-3	卵石	53.5						40	580	60	2 700

试桩采用泥浆护壁钻孔灌注桩,其中桩径700 mm的18根,桩端进入持力层6-2卵石层,施工桩长约40 m;桩径800 mm的40根,桩端进入持力层6-2卵石层,施工桩长约40 m;桩径1 000 mm的8根,桩端进入持力层6-3卵石层,施工桩长约48 m。采用GP-25型钻机成孔和大泵量4PN泵正循环清孔施工工艺成孔。

3.2 注浆设计参数及注浆过程中冒浆情况

由于主体育场荷载大,对差异沉降敏感,考虑到桩底沉渣的影响,必须对桩底进行后注浆,以确保成

桩质量。桩底后注浆于成桩7 d后进行,桩径700 mm的桩,设计注浆量为2.5 t,桩径800 mm的桩为3.0 t,桩径1 000 mm的桩为4.0 t,采用水灰比为0.5的纯水泥浆。

在原定的注浆设计中,成桩7 d后采用清水开塞,开塞清水量为100 kg,紧接着进行桩端后注浆。前13根桩仅有7根桩达到设计注浆量,其余6根桩均因桩顶冒浆而无法达到设计注浆量,详见表3。其中部分桩注浆压力及注浆量随时间变化曲线如图7—10所示。

表3 试桩注浆记录

桩号	桩径/ mm	一次注浆				备注	二次注浆			
		注浆时 龄期/d	开塞压力/ MPa	注浆压力/ MPa	水泥量/ kg		注浆时 龄期/d	开塞压力/ MPa	注浆压力/ MPa	水泥量/ kg
A16	800	8	0.8	1.2	1 400	冒浆	8	0.8	1.1	1 100
A17	700	6	0.9	1.2	2 500					
S8	800	12	0.8	1.4	4 200					
S12	800	8	0.8	1.4	4 200					
S4	800	6	1.0	1.2	4 200					
A33	700	6	0.9	1.5	2 600					
A32	800	6	0.8	1.3	3 100					
A37	800	10	0.9	1.5	3 200					

续表 3

桩号	桩径/ mm	一次注浆				备注	二次注浆			
		注浆时 龄期/d	开塞压力/ MPa	注浆压力/ MPa	水泥量/ kg		注浆时 龄期/d	开塞压力/ MPa	注浆压力/ MPa	水泥量/ kg
S5	700	12	0.8	0.8	500	冒浆	18	1.2	0.9	2 000
S7	1 000	7	0.8	0.9	800	冒浆	13	1.2	1.1	800
A8	1 000	8	0.8	0.8	600	冒浆	14	0.8	1.2	2 500
A6	800	4	0.8	0.8	600	冒浆				
S9	700	10	1.0	1.1	1 000	冒浆	15	1.0	1.2	1 500

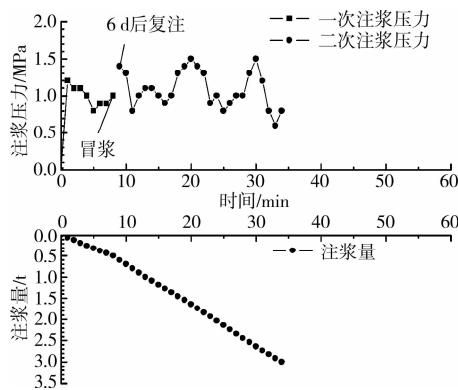


图 7 试桩 S5 注浆压力和注浆量随时间变化曲线

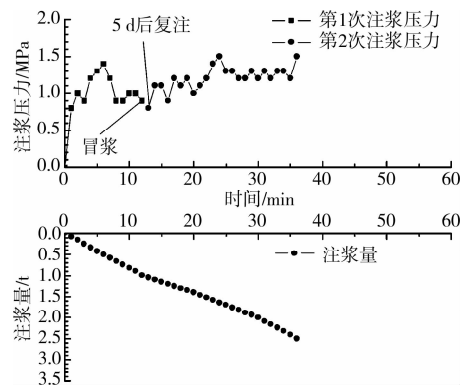


图 9 试桩 S9 注浆压力和注浆量随时间变化曲线

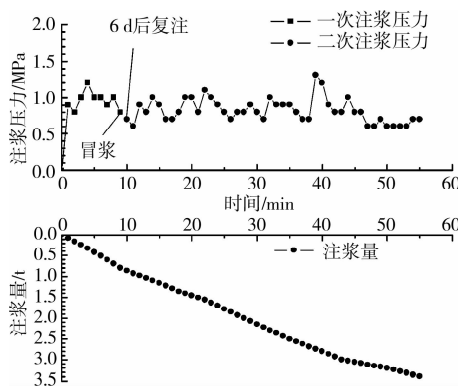


图 8 试桩 S7 注浆压力和注浆量随时间变化曲线

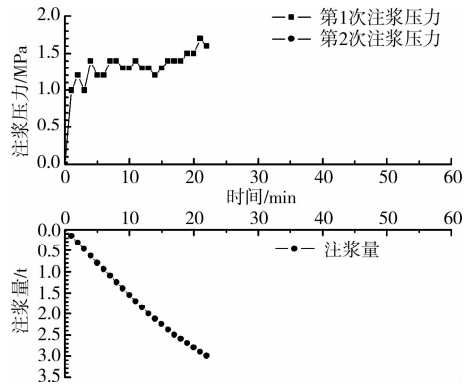


图 10 试桩 S12 注浆压力和注浆量随时间变化曲线

比较非冒浆桩(图 10)和冒浆桩(图 7—9)的注浆压力随时间变化曲线,可以发现桩顶冒浆发生时,注浆压力显著下降并维持在较低值(1 MPa 以下)。这是由于高压浆液在打开桩侧通道后,沿着桩土交界面向上爬升,在桩侧通道较薄弱的情况下,浆液沿桩土交界面流动所需压力小于浆液在桩底流动所需压力。正常的桩端后注浆,其压力将波动上涨(图 10)。

3.3 桩顶冒浆原因分析

根据对现场施工情况、工程地质条件进行考察研究,现将桩顶冒浆原因分析总结如下:

1) 桩侧泥皮厚。试桩采用泥浆护壁成孔,而 7~15 m 深度处为砂质粉土层,该层土在施工中容易

塌孔,如图 11 所示,为了防止塌孔,将泥浆比重提高至 1.35。塌孔和较浓的泥浆造成了较厚的桩侧泥皮及桩底沉渣。现场部分桩的开挖发现,冒浆桩桩侧泥皮厚度高达 5~10 cm。桩侧泥皮越厚,浆液上返高度约高,越容易发生桩顶冒浆。

2) 试桩龄期短。大部分试桩于成桩 7 d 后就进行桩端后注浆,此时桩侧泥皮强度还比较低,高压浆液容易打开桩侧流动通道。

3) 持力层可注性差。持力层中细颗粒含量较高,如表 4 所示。若开塞水量不足,细颗粒将堵塞浆液在桩底的流动通道,并导致较高的注浆压力。而浆液压力越大,浆液上返高度越高,越容易发生桩顶冒浆。

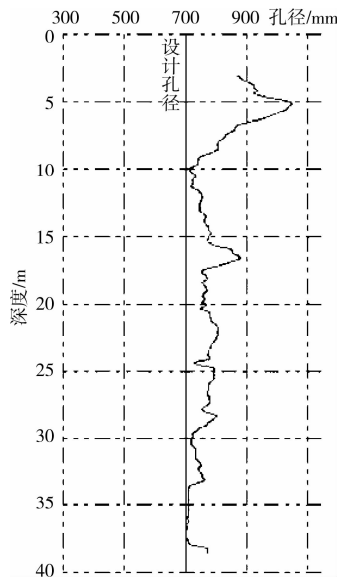


图 11 试桩 S9(桩径 700 mm)孔径检测曲线

4) 桩底沉渣厚。7~15 m 深度处的砂质粉土层

表 4 持力层颗粒级配

层号	岩土名称	土粒组成 /mm					
		>20.00	20.0~2.00	2.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005
6-2	卵石	64.6	14.1	5.4	5.1	5.0	6.7
6-3	卵石	66.7	13.3	5.4	4.9	4.7	6.1

2) 减小桩侧泥皮及桩底沉渣厚度。选用优质粘土造浆,保证孔壁的质量。并采用换浆清孔法,进行 2 次清孔:第 1 次清孔以孔口返浆相对密度在 1.2 以内及孔底沉渣厚度小于 100 mm 为控制标准;第 2 次清孔在吊放钢筋笼及安装灌注混凝土导管之后,以复测沉渣厚度小于 100 mm 为控制标准。清孔完毕,立即灌注混凝土。

3) 提高泥皮强度。除了选用优质粘土造浆护壁以外,还可在第 2 次清孔的换浆阶段,加入 5% 的水泥进行循环,以提高泥皮强度。同时,待试桩浇筑后 15 d 再进行注浆,使桩侧泥皮达到一定强度。

对于发生桩顶冒浆的试桩,参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008),停止注浆 4 h 后,打开另一根注浆管,并采用间歇注浆,间歇时间为 20 min,使其达到设计注浆量。

采用了以上措施对已发生冒浆的 6 根试桩进行复注,其中 4 根达到设计注浆量,详见表 3。对已打好但未注浆的 53 根试桩,于成桩 15 d 后进行注浆,采用间歇注浆及提高开塞清水量的措施,大大降低了桩顶冒浆的概率,53 根试桩仅有 14 根发生冒浆,且复注后,仅有一根未能达到设计注浆量。可见,以上措施切实可行。

的塌孔,造成桩底沉渣较厚。无法清理掉的桩底沉渣在注浆时被水泥浆冲开并带入孔隙中,可能堵塞桩底浆液的流动通道,并导致较高的注浆压力。

3.4 桩顶冒浆处理措施

根据上述分析可知,注浆压力越大、桩侧泥皮及桩底沉渣越厚、桩侧泥皮强度越低,越容易发生桩顶冒浆。故针对该工程实际情况,采取 3 个方面的措施来防止冒浆的发生:

1) 降低注浆压力。注浆压力与注浆节奏、持力层的含泥量及持力层可注性等因素相关。为此可以通过放慢注浆节奏、提高持力层的可注性 2 方面降低注浆压力。采用间歇注浆放慢注浆节奏,每注 500 kg 水泥,间歇 20 min,使桩底注浆引起的应力消散。同时将开塞时注入清水量提高至 600 kg,利用清水打通桩底通道,并防止桩底沉渣堵塞桩底通道,从而提高桩底持力层的可注性。

3.5 桩顶冒浆对桩承载性状的影响

3.5.1 桩顶冒浆对桩极限承载力的影响 通过在桩身埋设钢筋应力计,并对注浆桩进行静载试验,对桩顶冒浆对桩承载性状的影响进行研究。3 根 700 桩径的后注浆桩的荷载沉降曲线如图 12-13 所示。

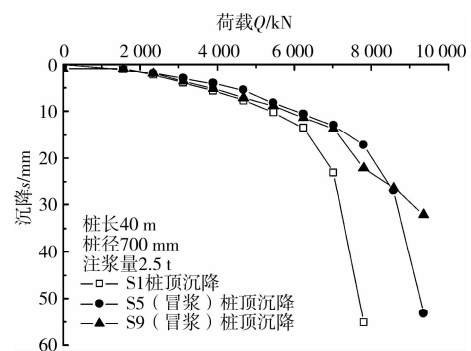


图 12 试桩静载试验 $Q-s_1$ 曲线

从图 13 中可以看出,发生桩顶冒浆并通过复注达到设计注浆量的桩,其承载力略高于不发生桩顶冒浆的桩。

3.5.2 桩顶冒浆对桩侧摩阻力的影响 桩侧平均摩阻力沿桩身分布曲线如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,发生桩顶冒浆的桩,其桩侧摩阻力略高于不发生桩顶冒浆的桩。这是由于沿

桩侧泥皮上返的浆液,通过劈裂、置换桩侧泥皮,使桩侧摩阻力略为提高。

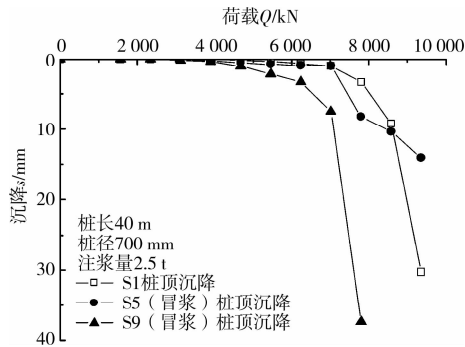


图 13 试桩静载试验 $Q-s_b$ 曲线

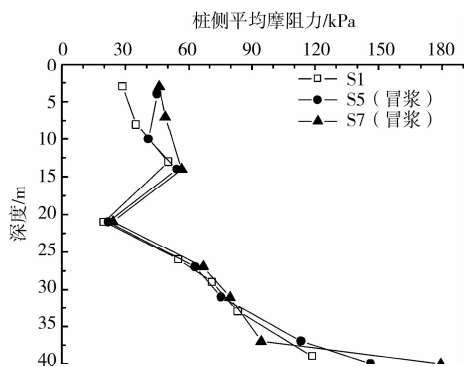


图 14 极限荷载下注浆桩桩侧平均摩阻力沿桩身分布曲线

4 结论

- 1) 在幂律型浆液平板窄缝流动模型的基础上,推导出了桩端后注浆时浆液上返高度的计算公式。
- 2) 理论分析表明,桩底浆液压力越大、桩侧泥皮越厚、桩长越短,则浆液上返高度越大,也越容易发生桩顶冒浆。
- 3) 工程实例研究表明,桩侧泥皮厚、试桩龄期短、持力层可注性差、桩底沉渣厚为桩顶冒浆的主要原因。
- 4) 桩顶冒浆可以通过降低注浆压力、减小桩侧泥皮及桩底沉渣厚度、提高泥皮强度 3 方面加以预防。对于发生桩顶冒浆的试桩,可采用间歇注浆,使其达到设计注浆量。
- 5) 发生桩顶冒浆并通过复注达到设计注浆量的桩,其极限承载力略高于不发生桩顶冒浆的桩。这是由于沿桩侧泥皮上返的浆液,通过劈裂、置换桩侧泥皮,使桩侧摩阻力略为提高。

参考文献:

[1] STOCKER M F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles[C]//Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Helsinki, 1983:167-170.

[2] SILWINSKI Z J, FLEMING W G K. The integrity and performance of bored piles [C]//International Conference on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, London, UK, Institution of Civil Engineers,1984.

[3] MULLINS G, WITERS D. Post grouting drilled shaft tips - Phase II [R]. Final Report to the Florida Department of Transportation,2004.

[4] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[5] CHU EU HO. Base grouted bored pile on weak granite [C]// Proceeding of 3rd International Specialty Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Louisiana, USA,2003:716-727.

[6] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.

[7] 张忠苗,张广兴,吴庆勇,等. 钻孔桩泥皮土与桩间土性状试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(6):695-699. ZHANG ZHONG-MIAO, ZHANG GUANG-XING, WU QING-YONG, et al. Studies on characteristics of mudcake and soil between bored piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(6):695-699.

[8] 张晓炜,黄根生. 钻孔灌注桩后压浆技术理论与应用 [M]. 武汉:地质大学出版社,2007.

[9] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(1):69-73. RUAN WEN-JUN. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1):69-73.

[10] 龚晓南. 土塑性力学 [M]. 杭州:浙江大学出版社,1997.

[11] 张忠苗,包风,陈云敏. 考虑材料应变软化的球(柱)扩张理论在桩底注浆中的研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):243-247. ZHANG ZHONG-MIAO, BAO FENG, CHENG YUN-MING. Research on grouted in pile bottom with spherical(columnar) hole expansion theory considering material strain-softening [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5):243-247.

[12] 沈崇棠,刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用 [M]. 北京:高等教育出版社,1989.

[13] 曾国熙,叶政青,冯国栋. 桩基工程手册 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:139-222.

[14] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例 [M]. 北京:科学出版社,2001.

[15] MULLINS G, WINTERS D, STEVEN D. Predicting End Bearing Capacity of Post-Grouted Drilled Shaft in Cohesionless Soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132 (4): 478-487.

(编辑 胡英奎)