

钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究*

Study of mechanism and application on bored pile end grouting

张忠苗 吴世明 包 风
(浙江大学岩土工程研究所, 杭州, 310027)

文 摘 系统阐述了持力层为砾石层的钻孔灌注桩的桩底后注浆机理和工艺, 并结合工程实际分析研究了注浆压力、浆液浓度、注浆量、注浆半径和注浆效果。

关键词 砾石层, 钻孔灌注桩, 桩底注浆

中图法分类号 TU 413

作者简介 张忠苗, 男, 1961 年生, 现为浙江大学土木系岩土所副教授, 从事桩基工程和岩土工程教学、检测和研究工作。

Zhang Zhongmiao Wu Shiming Bao Feng

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract This paper explains the mechanism and technology of grouting under bored piles whose bearing stratum is grit. Based on four examples, grouting pressure, grout density, grouting capacity, grouting radius and grouting effect has been analyzed and studied.

Key words grit stratum, bored pile, pressure grouting at pile end

1 工程背景*

沿海杭州、宁波等地广泛分布着厚约 20~60 m 的软土地基。在软土地基上建造高层建筑及大跨度厂房等 80% 以上采用钻孔灌注桩基础, 桩持力层为砾石层、基岩或粘土层。钻孔灌注桩具有施工简单、对地层适应性强和造价经济等优点, 但钻孔灌注桩施工中也存在因孔底沉渣难处理干净而降低端阻及因泥浆护壁而降低侧阻的缺点, 从而使钻孔灌注桩的侧阻系数和端阻系数比打入式预制桩要低。因此, 如何提高钻孔桩的侧阻与端阻是工程中迫切需要解决的研究课题。桩端注浆和桩侧注浆就是提高桩承载力的有力措施之一。本文着重就砾石层地基钻孔桩桩底注浆机理、工艺及应用效果作一阐述。因为砾石层地基钻孔灌注桩施工中常出现清渣难干净和打桩扰动砾石层使桩端承载力降低的特点, 而桩底注浆有效地加固了砾石层, 从而提高了桩的承载力。同时由于桩端及其周围土层得到了加固, 使得桩注浆后大大减少单桩的变形量, 并可减少群桩的不均匀沉降^[1~6]。

2 桩底后注浆的作用机理

桩底后注浆是指钻孔灌注桩在成桩后, 通过预埋的注浆通道用一定的压力把水泥浆压入桩底, 并在桩底形成扩大头, 使浆液对桩底附近的桩周土层起到渗透、填充、压密和固结等作用, 从而来提高桩承载力的一项技术措施。其流程图见图 1。

众所周知, 单桩的极限承载力 Q_u 由极限侧摩阻力

O_{su} 和极限端阻力 O_{pu} 构成。因而提高单桩承载力有以下 3 个措施: ①增加桩的几何尺寸, 如桩长或桩径; ②提高持力层的强度, 即提高桩端阻力; ③改善桩-土相互作用, 即提高侧摩阻力。桩底注浆和桩侧注浆恰能在上述 3 个方面提高桩的承载力。

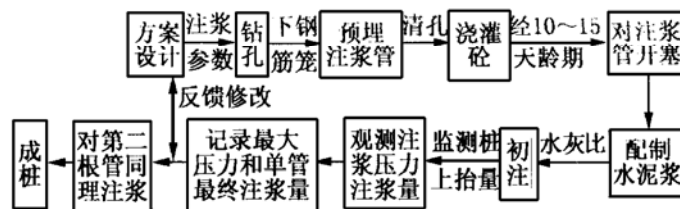


图 1 桩底注浆流程图

Fig. 1 Flow diagram of pile end grouting

桩底注浆机理可分为力学机理和化学机理。注浆一般可划分为渗透注浆、压密注浆和劈裂注浆。对于不同的注浆对象与工艺参数, 其力学机理往往不同。

桩底注浆的力学机理: 在钻孔灌注桩放置钢筋笼时预埋两根 $\phi 30 \sim 50$ mm 的注浆管(管底预留注浆孔并临时封闭以防混凝土堵塞), 然后在水下混凝土初凝后(约 10~15 d)用清水在预埋管底开塞, 接着把配制好的水泥浆用高压泵将浆液注入桩底砾石层处。刚开始时, 浆液对砾石层土体和沉渣起到渗透及压密作用, 随着注浆量和注浆压力的增加, 桩底扩大头逐渐形成, 压密区范围也逐渐扩大, 从而使桩底土的应力路径和固结状态改变。如果桩持力层砾石层较薄, 渗透性差, 则注浆压力进一步增大, 但注浆量增大不多, 从而在后期

会形成劈裂注浆;如果桩持力层砾石层厚且渗透性好,则注浆压力增大不多,而注浆量会持续增大,且注浆的扩散半径会持续增大,此时一般是压密注浆状态。

从初注到注浆后期,由于注浆压力和持力层土渗透性的变化,水泥浆与土层发生挤密、渗入、充填、劈裂等过程,从而会使注浆压力泵的压力表现为下降与回升的反复波动现象,这是水泥浆与土体共同作用的结果。但总的趋势是随着注浆量的增加注浆扩散半径增大,注浆压力升高。

最终注浆压力的确定要考虑下列 3 个方面:①最终注浆压力要小于桩上抬的摩阻力,即注浆时不能使桩向上严重位移;②最终注浆压力要尽可能使桩端、桩身混凝土少破坏;③最终注浆压力要使注浆量达到设计要求,形成扩大头,使桩端加固明显。

桩底注浆不但使桩端阻力因土层加固而提高,还使桩侧阻力提高,这是因为桩入持力层一般有一定深度,桩底注浆使“嵌岩段”侧阻明显提高,另外,浆液沿桩壁泥皮向上渗透也使部分桩侧土得到加固。

当浆液与砾石层充分接触时,化学机理将更加突出。其加固机理如下:

普通硅酸盐水泥主要是由 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及 SO_2 等组成,由这些不同的氧化物分别组成了不同的水泥矿物如硅酸三钙,硅酸二钙,铝酸三钙,铁铝酸四钙,硫酸钙等。这些矿物与水发生水解和水化反应,减少了被加固土中的含水量,增加了土颗粒间的粘结,同时,生成氧化钙,水化硅酸钙,水化铝酸钙,水化铁酸钙等。

水泥与砂砾石拌和后,水化产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CSH (水化硅酸钙)等水化物。溶液中的 Ca^{2+} 含量增加,与土颗粒发生阳离子交换作用,等当量置换出 K^+ 、 Na^+ ,形成水泥与砂砾石的团粒结构,并封闭了砾石层之间的空隙,形成坚固的联结,即我们通常所说的混凝土。另外水泥土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中或水中 CO_2 化合生成不溶于水的 CaCO_3 ,这种反应也能使砾石层增加强度。

总的来说,浆液加固土体的物理化学作用可概括为:化学胶凝作用、充填胶结作用、离子交换作用、加筋效应、固化效应。

3 桩底注浆的工艺技术

桩底注浆的目的是把有限的浆液材料输送到桩端及桩周一定的有效范围内,使之对该范围介质起加固作用。但是,桩端及桩周对浆体而言是开放空间,桩底注浆属隐蔽工程,目前的监测手段十分有限,要实现上述目标则主要依赖于好的注浆工艺。好的注浆工艺建立在对桩底注浆机制的正确认识上,它要求因地制宜,

严密设计,优质施工,适时调控。

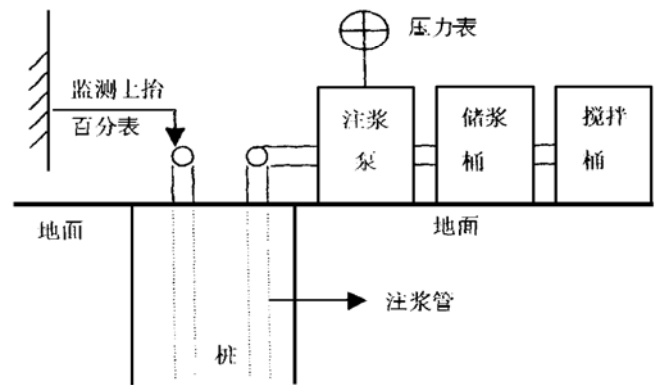


图2 桩底注浆装置示意图

Fig. 2 Device of pile end grouting

(1) 注浆管设置与制作

注浆管采用 $\phi 30 \sim 50$ mm 钢管,用榔头将钢管的底端砸成尖形开口。钢管底端 30 cm 左右钻若干个 $\phi 8$ mm 小孔,然后在每个小孔中放上图钉(单向阀作用),再用绝缘胶布加胶带包裹,以防小孔被浇筑的混凝土堵塞。钢管可作为钢筋笼的一根主筋,用丝扣连接或外加短套管电焊。

(2) 桩开始注浆时间

泥浆护壁灌注桩水下混凝土初凝期需 10 d 左右,故注浆时间宜在混凝土初凝(即 10 d 左右)后进行。注浆过早,会导致因桩身混凝土强度过低而破坏桩本身;注浆过晚,可能难以使桩底已硬化的混凝土形成注浆通道,从而使桩中心形成低强度区,使浆液流向远处砾石层处。

(3) 注浆泵选择

要选择注浆压力高(至少达 10 MPa),排浆量大($5 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上),性能稳定、操作方便的注浆泵,如 BW-2 注浆泵和 SGB6-10 灌浆泵。

(4) 压水试验(开塞)

压水试验是注浆施工前必不可少的重要工序。成桩后至实施桩底注浆前,通过压水试验来认识桩底的可灌性。压水试验的情况是选择注浆工艺参数的重要依据之一。此外,压水试验还担负探明并疏通注浆通道,提高桩底可灌性的特殊作用。

压水试验不会影响注浆固结体的质量。这是因为,受注体是开放空间。无论是压水试验注入的水,还是注浆浆液所含的水,都将在注浆压力或地层应力下逐渐从受注区向外渗透消散其多余的部分。

一般情况下,压水宜按 2~3 级压力顺次逐级进行,并要求有一定的压水时间与压水量。压水量一般控制在 0.6 m^3 左右,开塞压力一般小于 6 MPa。如一管压水,另一管冒水,则连通了。

(5) 初注

在压水试验之后,就要将配制好的水泥浆通过高压泵和预埋管注入到桩底砾石层中去。初注时一般压力较小,浆液亦由稀到稠。初注要密切注意注浆压力、注浆量和注浆皮管的变化,并注意注浆节奏。同时,用百分表监测桩的上抬量。

(6) 注浆量

合理的注浆量应由桩端、桩侧土层类别、渗透性能、桩径、桩长、承载力增幅要求、沉渣量等诸因素确定。也可根据表1进行估算。

表1 一般砾石层注浆量的经验数据表

Table 1 Empirical Data of grouting capacity in gravel layer

桩径 ϕ /mm	注浆量/kg			
	渗透性好		渗透性差	
	持力层厚	持力层薄	持力层厚	持力层薄
800	2000~ 3000	1000~ 1500	1000~ 1500	800~ 1000
1000	3000~ 4000	1500~ 2500	1500~ 2500	1000~ 2000
1200	4000~ 5000	2500~ 3500	2500~ 3500	2000~ 3000
1500	≥ 5000	≥ 3500	≥ 3500	≥ 3000

在实施注浆中,还需根据压水试验情况及注浆过程中的反应适当调整注入量,并通过对注浆压力、浆液浓度、注浆方法诸因素的调控,将所需注浆量灌注到设计要求范围内。一般浆液浓度和灌浆量大,灌浆压力高,加固效果更好。

(7) 注浆压力

在注浆过程中,桩底的可灌性的变化直接表现为注浆压力的变化。可灌性好,注浆压力则较低,一般在4 MPa以下;反之,若可灌性较差,注浆压力势必较高,可达4~ 8 MPa,有的用8 MPa仍不可注。一般第1, 2根桩注浆压力低,以后随注浆桩数增加注浆压力增大。

浆液的扩散半径与灌浆压力的大小密切相关,因此,人们往往倾向于采用较高的注浆压力。较高的注浆压力能使一些微细孔隙张开,有助于提高可灌性。当孔隙被某些软弱材料充填时,较高的注浆压力能在充填物中造成劈裂灌浆,使软弱材料的密度、强度以及不透水性得到改善。此外,较高的注浆压力还有助于挤出浆液中的多余水分,使浆液结合体的强度得到提高。但是,一旦灌浆压力超过灌注桩的自重和摩阻力时,就有可能使桩上抬导致桩悬空(灌浆压力过高也会使注浆管爆破)。因此,这里有一个容许灌浆压力的问题。

容许灌浆压力与地层的密度、渗透性、初始应力、钻孔深度和位置以及灌浆次序等都有密切的关系。但这些因素是难以准确预知的,故通常只能根据现场试验确定。如桩顶侧面冒浆,则暂停。

(8) 浆液浓度

不同浓度的浆体其行为特性有所不同:稀浆(水灰

比约为0.8:1)便于输送,渗透能力强,用于加固预定范围的周边地带;中等浓度浆体(水灰比约为0.6:1)主要加固预定范围的核心部分,在这里中等浓度浆体起充填、压实、挤密作用;而浓浆(水灰比约为0.4:1)的灌注则对已注入的浆体起脱水作用。

在桩底可灌性的不同阶段,调配不同浓度的注浆浆液,并采用相应的注浆压力,才能做到将有限浆量送达并驻留在桩底有效空间范围内。浆液浓度的控制原则一般为:依据压水试验情况选择初注浓度,通常先用稀浆,随后渐浓,最后注浓浆。在可灌的条件下,尽量多用中等浓度以上浆液,以防浆液作无效扩散。在实际工程应用中,施工单位往往多只使用水灰比为(0.4~ 0.6):1的浓浆。通常在浆液中可加入水泥重量2.5%的木钙作减水剂,并加入1%~ 2%水泥重量的UEA微膨胀剂。

(9) 注浆节奏

为了使有限浆液尽可能充填并滞留在桩底有效空间范围内,在注浆过程中还需掌握注浆节奏,实行间歇注浆。间歇时间的长短需依据压水试验结果定,并在施注过程中依据注浆压力变化,判断桩底可灌性现状加以调节。间歇注浆的节奏需掌握得恰到好处,既要使注浆效果明显,又要防止因间歇停注时间过长堵塞通道而使注浆半途而废。对于短桩,桩底注浆时往往会出现浆液沿桩周上冒现象,此时应在注入一定冒浆后暂时停止1~ 2 d,待桩周浆液凝固后,再施行注浆,这样可以达到设计要求的注浆量。

(10) 注浆后的保养龄期

所谓注浆后的保养龄期即桩底注浆后多少时间后可以静载试验或作为工程桩使用的龄期,通常要求注浆后保养15 d左右。

(11) 桩底注浆的经济效益

一根桩如果设置两根注浆管(长约40 m),且桩底注浆量为2~ 5 t,那么将增加投资约2000~ 2600元,但能提高单桩的承载力20%~ 40%左右,且减少了变形量,同时能降低群桩不均匀沉降,经济效益明显。

4 桩底注浆效果分析

4.1 相邻两根试桩桩底注浆与不注浆效果分析

正在建设中的长途电信楼位于杭州市钱塘江边,总高度209 m,地上40层,地下2层,建筑面积近6万 m^2 。设计采用 $\phi 1500$ mm钻孔桩群桩基础,桩长为40~ 42 m,其桩身长度范围内土层分布及土工参数见表2。桩端持力层为砂砾石层,且桩入砾石层深度为8 m(本处砾石层较松散),桩身采用C30混凝土。设计单桩竖向极限承载力为16 MN。

表 2 长途电信大楼土层分布与土工参数简表

Table 2 Soil layers distribution of long- distance telecommunication building and Geotechnical parameters

层序	土层名称	层顶埋深 /m	土工参数					
			含水量 /%	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	f_k /kPa	E_s /MPa	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kPa
1-1	杂填土	0.0		17.0	90	4.5		
1-2	素填土	0.2		17.5	100	5.5		
2-1	砂质粉土	1.2	33.6	18.8	130	9.8	35	
2-2	粉砂	7.8	30.1	18.7	120	8.0	36	
3-1	砂质粉土	10.2	33.3	18.9	160	14.0	45	
3-1a	粉砂	14.1	27.7	19.3	180	16.0	50	
3-2	砂质粉土	17.1	33.5	18.8	100	7.5	30	
4	淤泥质粉质粘土	18.5	38.4	18.0	90	3.5	16	
5-2	粉质粘土	24.1	24.8	20.1	260	13.0	65	
6-1	含砂粉质粘土	27.2	25.0	19.7	200	13.0	55	
6-2	含圆砾粉细砂	28.5			260	16.0	60	
7-1	卵砾石	35.8			450		115	
7-2	圆砾	37.2			400		90	
7-3	卵砾石	41.2			600		120	5500
7-4	圆砾	44.5			450		95	
7-5	卵砾石	50.2			600		125	
	基岩	58.5						

桩底注浆桩 S1 与另一根桩底未注浆桩 S2 的静载试验数据结果见图 3。

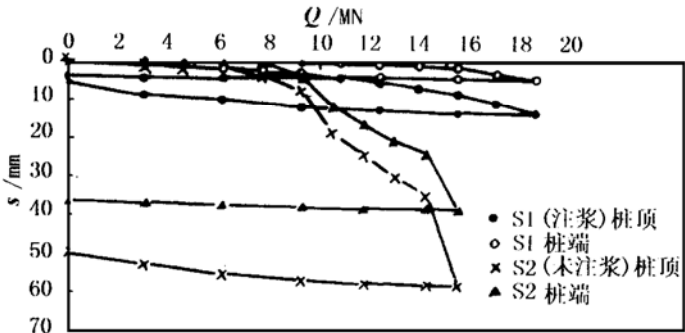


图 3 某电信大楼相邻两根试桩静载 $Q-s$ 曲线

Fig. 3 $Q-s$ curves of two adjacent test piles of a telecommunication building

从试验的数据可看出下列结果:

(1) 桩底未注浆的 S2 试桩(龄期 34 d)在按规定荷载级别加载到第 9 级荷载 14.283 MN 时,桩顶本次沉降为 4.60 mm,累计沉降为 34.87 mm;但在第 10 级荷载 15.525 MN 时,桩顶与桩端沉降又开始增大,桩顶本次沉降量从第 9 级的 4.60 mm 发展至第 10 级的 23.06 mm,达

到了 5 倍。这表明桩端砾石层本身被逐渐挤开并产生滑移,最后在该级荷载下桩顶累计沉降 57.93 mm,桩端累计沉降达到 38.54 mm。该桩的单桩竖向极限承载力可取 14.000 MN,尚达不到设计要求的 16.000 MN。

(2) 相邻相同尺寸的 S1 试桩在经过注浆(注浆参数见表 3)25 d 后(总龄期 43 d)作静载试验的结果为:在按规定荷载级别加载到第 11 级荷载 18.630 MN 时,桩顶累计沉降量才 13.57 mm,桩端累计沉降量才 4.36 mm。该桩的竖向极限承载力至少可取 18.630 MN,比 S2 桩提高了 30%。该 S1 桩的极限侧阻力可取 10.867 MN 比 S2 试桩侧阻 7.762 MN 提高了 40%,而桩端阻力也至少比 S2 试桩提高了 19%。这里值得说明,该场地桩侧阻力有较大提高的原因有二:一是由于该桩入持力层深度为 8 m,而桩端注浆由于砾石层渗透系数大,注入的浆液会沿砾石层向上、下、左、右压密渗透和劈裂渗透,从而使桩底周围土体和桩“嵌岩段”性能改变;二是注入浆液亦向桩周泥壁渗透,使泥壁性能改变,在后来基坑开挖到地下 15 m 时发现,桩周包裹有厚达 5~30 mm 的水泥硬壳层。

表 3 长途电信大楼 S1 试桩桩底注浆记录表

Table 3 The record of pile end grouting of long- distance telecommunication building

注浆管号	注浆开始时间	注浆终止时间	开塞压力 /MPa	初注压力 /MPa	终了压力 /MPa	单管注入水泥量 /kg	总灌入水泥量 /kg
1	9:50	11:20	1.0	0.8	1.5	3000	6000
2	15:40	18:20	4.0	0.6	6.0	3000	

4.2 同一根桩注浆前后的承载性状比较

本试桩系某铁路客运站地下车库一工程桩。设计试桩 S02 桩长为 48 m, 桩径为 $\phi 800$ mm。桩端持力层为砂砾石层, 入持力层深度为 3.5 m, 设计单桩竖向极限承载力为 7.200 MN。

现场静载测试分桩底注浆前(第一次试验桩龄 38 d)和桩底注浆后(第二次试验桩龄 51 d, 即注浆后休止 13 d)两次。两次测试的结果见图 4。

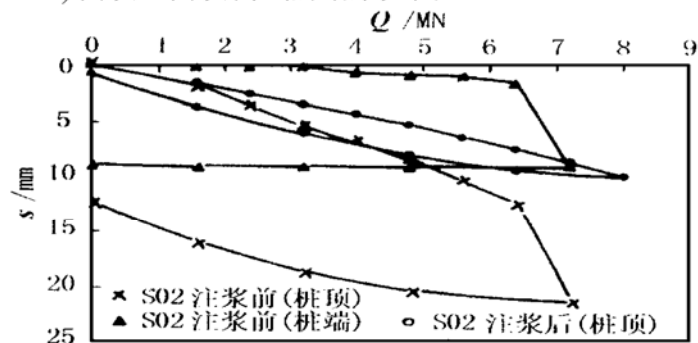


图 4 同一根 S02 注浆前后静载 $Q-s$ 曲线

Fig. 4 $Q-s$ curves of the same pile S02 before and after grouting

第一次试验加载到第 7 级荷载 6.400 MN 时, 桩顶本次沉降量为 2.20 mm, 累计沉降量为 12.57 mm, 桩端本次沉降量为 0.56 mm, 累计沉降量为 1.59 mm, 加载到第 8 级荷载 7.200 MN 时, 桩顶沉降急剧加大, 仅 30 min, 桩顶本次沉降量就达 9.93 mm, 累计沉降量为 21.50 mm, 桩端本次沉降量为 7.53 mm, 累计沉降量为 9.12 mm。可见注浆前该桩 7.200 MN 时沉降受力偏大, 该桩极限承载力可取 6.400 MN。

第二次在注浆 13 d 后再做试验(注浆量为 1.5 t 水泥)。加载到第 8 级荷载 7.200 MN, 桩顶累计沉降量才 8.77 mm, 且很快稳定; 加载到第 9 级荷载 8.000 MN 时, 桩顶累计沉降量才 10.08 mm。可见同一根桩注浆后比注浆前承载力至少提高了 25%。

4.3 不同桩长的桩底注浆效果分析

(1) 短桩 富阳某综合楼地质情况 0~20 m 为粉质粘土和淤泥质粘土, 20~29 m 为松散的砾砂层, q_p 值为 2000 kPa, 为了提高承载力和减少变形选择相邻一根 $\phi 800$ mm 试桩(桩底不注浆)S1 与另一根 $\phi 800$ mm (桩底注浆)的试桩 S2 作静载试验对比, 同时还有一根 $\phi 650$ mm (桩底注浆)试桩。S2 注浆量为 1.6 t 水泥。因 S2 桩短, 注浆时曾发生浆液沿泥浆壁上冒现象, 后采用间歇注浆办法, 即第一次先对单管多次注浆, 然后休止 1~2 d, 使上冒的水泥浆在桩周泥皮上凝固后, 再对另一管注浆的办法, 使上冒现象大大减少。同时监测桩上抬量和注浆最大压力, 直到达到设计注浆量为止。在注浆 20 d 后对两根试桩做静载试验, 结果见图 5。

对比发现承载力提高 40% 以上。

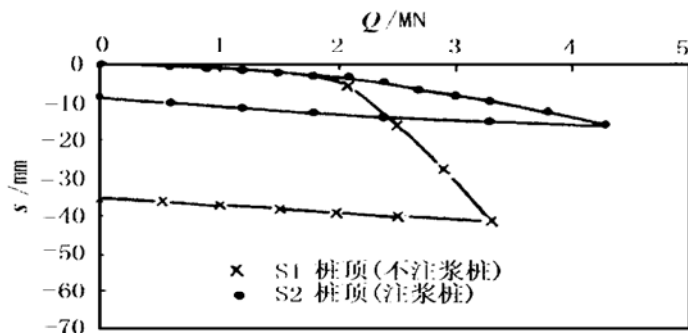


图 5 某综合楼相邻两根试桩静载 $Q-s$ 曲线

Fig. 5 $Q-s$ curves of the two adjacent piles of a building

(2) 中长桩(40~50 m) 见本文中其他例子。

(3) 长桩 温州某大厦两组 $\phi 1000$ mm 试桩桩底注浆 S1 桩与桩底未注浆 S2 桩对比, 桩长均为 68 m, 桩侧土为淤泥质土、粉质粘土、粘土和粉质土, 持力层为砂卵石, q_p 值为 2800 kPa, 两组试桩在达龄期后的静载试验结果见图 6。对比发现承载力提高 35% 左右。

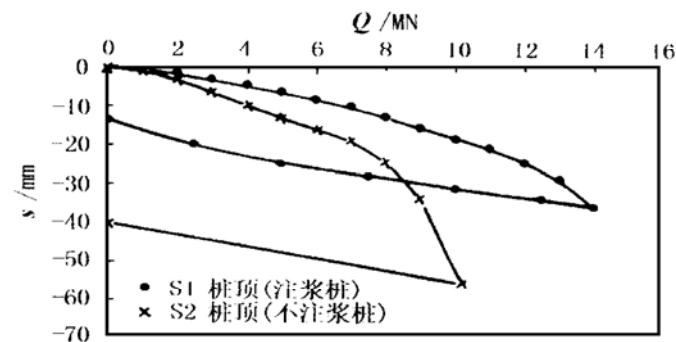


图 6 某大厦两根试桩静载 $Q-s$ 曲线

Fig. 6 $Q-s$ curves of the test piles of a mansion

4.4 关于注浆扩散半径的分析

正在建设中的某商城总高度 35 m, 地上 8~10 层, 地下 3 层, 建筑面积 6 万 m^2 。设计试桩桩长为 38.8 m, 桩径为 $\phi 1100$ mm, 桩端持力层为砂砾石层, 入砾石层深度为 0.5 m, 设计单桩竖向极限承载力为 12.0 MN。

测试结果见图 7。其中, S2 为桩底注浆桩, 注浆最大压力为 2.3 MPa, 注浆量为 1650 kg; S3 未注浆。S2 与 S3 桩相邻, 其周围的锚桩均为工程桩且均已桩底注浆。

由图 7 可知, S2 试桩的单桩竖向极限承载力至少可取 13.040 MN。其桩侧极限阻力可取 7.452 MN; 而 S3 试桩的单桩竖向极限承载力至少可取为 12.420 MN, 其桩侧极限阻力可取 6.210 MN。注浆桩比不注浆桩侧阻力有所提高。

从表面看, 该例中不管桩底是否注浆都能满足承载力要求, 事实上, 并非如此。该工程的持力层(砂砾石层)只有 1~2 m 厚, 其下部即强风化基岩。桩底注浆的浆液因不可能向下扩散而向径向扩散, 使得桩底注浆扩散半径增大, 同时由于未注浆的 S3 桩周围的锚

桩均注了浆,加上试桩与锚桩的中心间距仅为 3.425 m,故锚桩桩底注的浆液有可能扩散至试桩桩底,加固了桩底土层,通过注浆前、后的超声波透视检测表明声速从注浆前 2800 m/s,提高到注浆后 3300 m/s,最终使未注浆的 S3 试桩沉降减少。这一例子说明对薄的砾石层注浆后的扩散半径可达到 3.5 倍桩径以上。

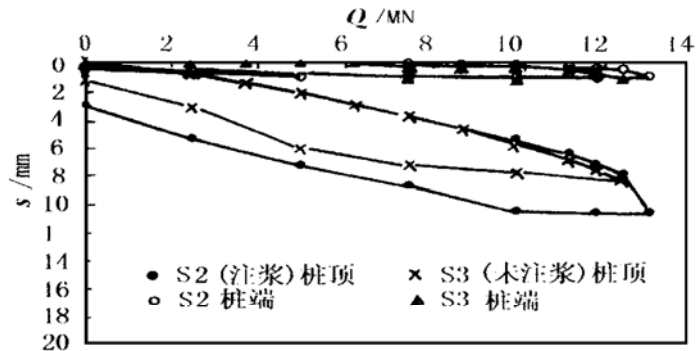


图7 某商城相邻两根试桩静载 $Q-s$ 曲线

Fig. 7 $Q-s$ curves of the two adjacent piles of a building

4.5 关于注浆量与注浆后保养龄期的分析

杭州某厂 B[#] 消化池试桩桩长为 52.5 m, 桩径为 $\phi 1000$ mm, 桩端持力层为砂砾石层, 入砾石层深度为 15 m。设计未注浆单桩竖向极限承载力为 9.0 MN。注浆单桩竖向极限承载力为 11.0 MN。

试桩 S2 未注浆(龄期 19 d); S3 为桩底压力注浆桩(龄期 21 d, 注浆后龄期 8 d, 注浆最大压力为 3.1 MPa, 注浆量仅为 800 kg)。两根试桩的测试结果见图 8。

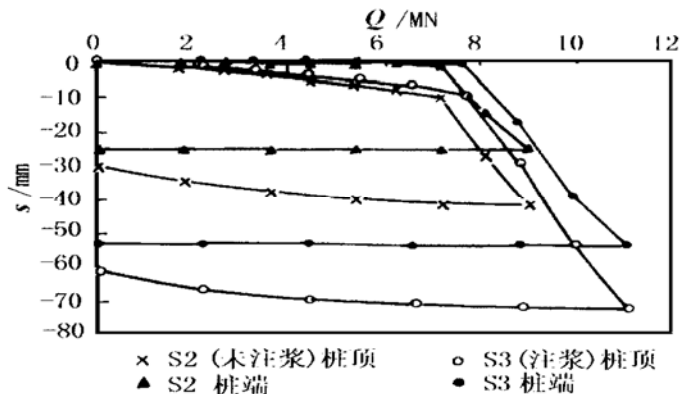


图8 不相邻两根试桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 8 $Q-s$ curves of the non-adjacent piles

由图 8 可知, S2 试桩的单桩竖向极限承载力可取 9.000 MN, 相应的桩顶、桩端沉降量分别为 42.03 mm, 25.55 mm; 而 S3 试桩在加载至 8.800 MN 时, 桩顶累计沉降量为 29.73 mm, 桩端沉降为 17.88 mm, 比 S2 试桩在 9.000 MN 这一级的沉降量要少, 但继续加载到 11.000 MN 时, 桩顶累计沉降量达到 53.95 mm, 桩端累计沉降量达到 39.49 mm。比较 S2 与 S3 试桩, 虽然注浆后桩端沉降开始时间推迟(即侧阻增大), 但总体效

果不理想, 究其原因有三: 一是注浆后水泥浆固结龄期 8 d, 偏短, 桩底水泥浆还没有完全硬化; 二是注浆量 800 kg 对 $\phi 1000$ mm 桩径的桩来说偏少; 三是该工程桩注浆方案设计中在桩底钢筋笼处设置铁板, 原来的目的是为了防止注浆压力过大破坏铁板以上桩身混凝土的性能, 但同时带来的问题是孔底沉渣不易清除干净, 因而引起了过大的沉降。

5 结 语

通过对砾石层桩底注浆机理与应用研究得出下列有用的结论:

(1) 由于钻孔灌注桩存在砾石层清渣困难和对持力层扰动破坏使端阻降低及因泥浆护壁使侧阻降低的缺点很难避免, 所以对砾石层作为持力层的钻孔桩实行桩底注浆工艺是很有必要的。

(2) 对砾石层作为持力层的钻孔桩实施合理的桩底注浆工艺来提高桩承载力, 效果很明显。对不同桩长的桩可提高单桩竖向极限承载力 20%~40%, 甚至更高, 且可减少桩的变形量, 保证群桩沉降均匀性。

(3) 对桩底注浆工艺和参数的确定, 要针对不同的地质条件有针对性地进行, 在保证桩底混凝土不破坏和桩不上抬前提下, 实行桩底注浆量和注浆压力双控, 并首先保证桩底合理的注浆量。

(4) 桩底注浆预埋管要埋两根且应在水下混凝土达初凝强度(通常 10 d 左右)后进行开塞、注浆, 浆液水灰比常为 (0.4~0.7): 1, 先稀后浓, 掺入少量减水剂和膨胀剂。注浆后保养龄期通常应在 15 d 以上。

(5) 桩底浆液的扩散半径与桩底土的渗透性、厚度、注浆压力、注浆量及桩距等诸因素有关。桩底注浆不但可以提高桩的承载力, 还可以提高桩侧阻力。

参 考 文 献

- 1 Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting. *Ground Engineering*, 1986, 19(4): 9~15
- 2 Fleming W G K. The improvement of pile performance by base grouting. *Civil Engineering*, 1993, 97: 88~93
- 3 张忠苗等. 钻孔灌注桩受力机理分析. 见: 第二届国际结构与地基讨论会论文集. 香港, 1997
- 4 张忠苗等. 基于桩顶与桩端沉降的钻孔桩受力分析研究. *岩土工程学报*, 1997, 19(4): 88~93
- 5 张忠苗等. 软土地基钻孔桩性状有关参数的分析. *浙江大学学报*, 1997(3): 140~146
- 6 张忠苗等. 利用实测的桩端沉降划分桩侧阻力与桩端阻力. 见: 土力学与基础工程的理论与实践. 上海: 上海交大出版社, 1998. 223~231