

含部分黏性土的卵石层桩底注浆现场试验与分析

张忠苗, 王华强, 邹健

(浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 通过对温州某工地 361 根灌注桩现场桩底注浆试验观测, 得出注浆压力 P 与注浆过程持续时间 t 的 5 类曲线形态。注浆试验表明: 随着成桩龄期的增加, 开塞压力也相应增大, 但成桩龄期对终注压力影响不大。含黏性土的卵石层越厚, 注浆压力越低; 桩位平面上越靠近中心的桩注浆压力越大, 边桩的注浆压力较小; 注浆顺序在后的桩终注压力往往较大。通过 6 根不同注浆量试打桩的静载试验还表明, 单桩注浆量有一个合理的限值, 当注浆量低于合理值下限时, 桩的极限承载力或沉降量无法满足设计要求。此研究结果对类似工程具有指导意义。

关键词: 含黏性土的卵石层; 桩底注浆; 现场试验; 注浆量; 注浆压力; 注浆时间; 沉降控制

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)02-0308-07

作者简介: 张忠苗(1961-), 男, 浙江宁海人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程与桩基础的研究、教学、检测工作。E-mail: zjuzzm@163.com。

In-situ test and analysis of pile end post grouting in gravel strata with cohesive soils

ZHANG Zhong-miao, WANG Hua-qiang, ZOU Jian

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Through tests and observations of 361 place-in-situ piles in a construction site in Wenzhou, five kinds of curves of grouting pressure (P) and grouting time (t) are drawn. The tests show that the longer the age of bored piles, the higher the opening pressure of pile end post grouting. However, the age of bored piles has little influence on the final grouting pressure. And there is positive correlation between the thickness of gravel layer with cohesive soils and grouting pressure. In the planar graph of pile arrangement, the grouting pressure of the piles in the center is larger than that of border piles. And the final grouting pressure of the piles in the late grouting order is larger. Static load tests on six piles with different grouting volumes show that there is a reasonable limit grouting volume for a single pile. When the grouting pressure is lower than the lower limit, the ultimate bearing capacity and settlement cannot meet the design requirements.

Key words: gravel stratum with cohesive soils; pile end post-grouting; in-situ test; grouting volume; grouting pressure; grouting time; settlement control

0 前言

钻孔灌注桩由于泥浆护壁使得侧阻降低、桩端沉渣难清理干净且持力层扰动使得端阻降低, 所以桩端后注浆技术近年来发展迅速。

与普通钻孔灌注桩相比, 后注浆桩具有下列显著优点^[1-4]: ①能够提高单桩极限承载力 20%~30%, 尤其对砂卵石层, 注浆加固效果更为明显; ②能够显著减少单桩桩端沉降和群桩差异沉降, 使上部结构沉降均匀; ③能够有效处理钻孔底部的沉渣和虚土问题, 加固桩端土层; ④注浆压力使桩身上抬, 相当于对桩身施加预应力, 有利于侧阻发挥; ⑤桩底浆液会沿着桩身向上爬升, 有利于加固桩侧土体, 增大侧阻。

虽然钻孔灌注桩后注浆技术得到了广泛应用, 但

是系统的现场试验文献很少^[5-7], 几乎没有对同一场地内大量注浆桩的综合研究。本文通过对温州车站大道某工程所有注浆桩的现场试验观测, 研究了注浆开塞压力、终注压力、注浆过程压力与注浆时间及与成桩龄期、持力层厚度、桩位分布及注浆顺序的关系。同时通过六根不同注浆量的试打桩的静载试验, 得到了注浆量与桩顶沉降的相关关系, 研究结果对类似工程具有指导意义。

1 工程概况

温州某写字楼由一幢 19 层的高层建筑和 4 层的裙

表 1 地基土物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of foundation soils

层号	岩土名称	层底埋深 /m	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率/%	孔隙比	I_p	I_L	E_s	f_{ak} /kPa	q_{sia} /kPa	q_{pk} /kPa
①	人工填土	0.2~1.9									
②	黏土	1.7~2.2	18.38	36.4	1.043	21.4	0.621	3.69	85	8	
③-1	淤泥	15.0~16.0	15.49	73.7	2.089	24.0	1.928	1.08	42	5	
③-2	淤泥	25.0~27.4	16.02	66.5	1.867	24.4	1.644	1.95	55	8	
③-3	淤泥质黏土	27.5~33.1	17.54	45.5	1.285	21.4	1.058	3.62	70	11	
④-1	黏土	28.8~32.2	19.05	31.9	0.902	18.7	0.599	5.45	120	16	150
④-2	粉质黏土	33.7~36.4	18.83	31.5	0.906	13.3	0.773	6.32	150	23	250
⑤-1	圆砾	34.8~34.9							250	35	500
⑤-2	粉质黏土	36.4~38.2	18.37	33.9	0.984	12.9	0.828	6.91	130	20	200
⑤-3	卵石	42.2~46.2							300	40	1000
⑤-4	粉质黏土	43.2~45.8	17.90	38.1	1.099	12.4	0.831	7.84	130	20	200

房组成, 工程占地面积 5690 m², 总建筑面积 25912.4 m²。高层为框剪结构, 多层为框架结构, 地下室 1 层, 深 5 m。基础采用钻孔灌注桩, 桩径 700 mm, 桩长 41 m, 间距 2.35 m, 桩身采用 C20 混凝土, 持力层为含砂和黏土的卵石层, 设计要求预估单桩竖向承载力极限值为 6500 kN, 满堂式正方形布桩, 共 361 根, 桩位如图 1 所示。成桩 60 d 以后进行桩底注浆, 设计注浆量 1000 kg, 边开塞边注浆。

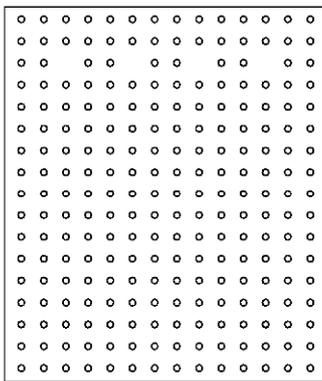


图 1 桩位布置图 (主楼)

Fig. 1 Arrangement of piles (main building)

2 工程地质条件

场地内地基土的物理力学性质见表 1, 地层剖面及各层厚度如图 2 所示。

持力层⑤-3 卵石层颗粒级配较好, 骨架颗粒含量在 17.6%~64.3%, 波动范围较大, 且排列混乱, 粒径一般在 2~6 cm, 少量大于 10 cm, 不均匀。充填物为砂混黏性土, 其中砂粒含量为 16.6%, 细粒含量 12.2%, 分选性差。

层号	岩土名称	地层桩状	层厚
1	杂填土		1.10 m
2	黏土		1.50 m
③-1	淤泥		12.40 m
③-2	淤泥		11.90 m
③-3	淤泥质黏土		4.60 m
④-1	黏土		1.10 m
④-2	粉质黏土		3.40 m
⑤-1	圆砾		1.60 m
⑤-2	粉质黏土		1.30 m
⑤-3	卵石		5.20 m
⑤-4	粉质黏土		0.30 m

图 2 地层综合柱状图

Fig. 2 Columnar section of the site

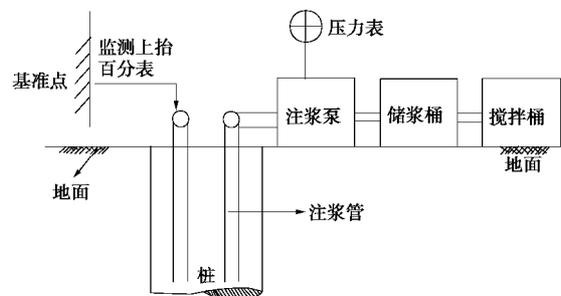


图 3 桩端后注浆装置示意图

Fig. 3 Devices for pile end post grouting

3 注浆参数及流程

本工程注浆泵采用杭州探矿机械厂生产的 SGB6

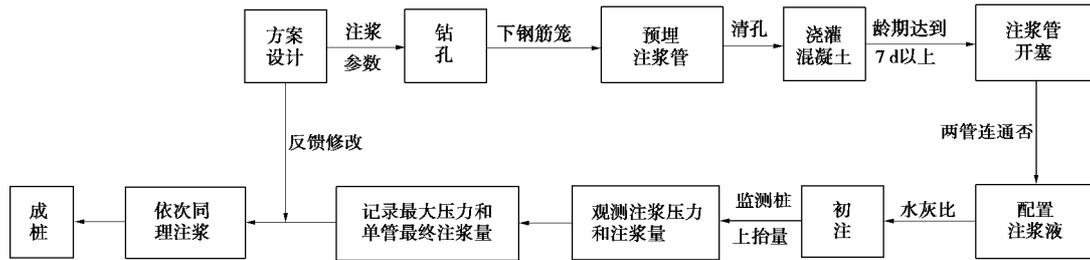


图4 桩端后注浆流程示意图

Fig. 4 Flow chart of pile end post grouting

-10型灌浆泵,排量为100 L/min,最大注浆压力可达10 MPa以上,注浆装置与监测仪器布置见图3^[8]。注浆水灰比0.5左右,并随注浆进行逐渐降低,以注浆量为主控因素(设计注浆量为1 t水泥),注浆压力为副控因素。对本工地注浆压力、注浆量和注浆时间进行了详细记录,并通过百分表监测了部分桩的上抬量,范围在0.8~1.5 mm。

桩底后注浆的工艺流程如图4所示。

4 注浆开塞压力与成桩龄期的关系

本工程全场布桩数量较多,打桩历时4个多月,注浆采用大部分桩打好以后边开塞边注浆的方法,清水开塞。由于桩身混凝土的龄期不同,开塞压力也有所变化。本文统计了开塞压力与成桩龄期的关系,如图5所示,经回归分析可得,开塞最大压力 P_{\max} 、最小压力 P_{\min} 与桩身混凝土龄期 T (d)的关系分别为 $P_{\max} = -28.11e^{-T/21.11} + 8.94$ $P_{\min} = 0.02e^{-T/25} + 2.82$ 。图中点表示每根桩的开塞压力,实线为开塞压力随成桩龄期的变化拟合曲线。可以看到,在含黏性土的卵石层中,随着灌注桩成桩龄期的增加,开塞压力有增大的趋势。灌注桩龄期达到60~70 d后,开塞压力最大为6.7 MPa,最小为3.4 MPa,平均压力5.3 MPa;养护130~140 d后,最大开塞压力为8.8 MPa,最小为平均开塞压力为6.9 MPa,平均8.1 MPa。

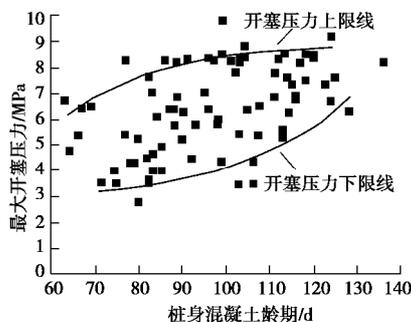


图5 开塞压力与混凝土龄期的关系

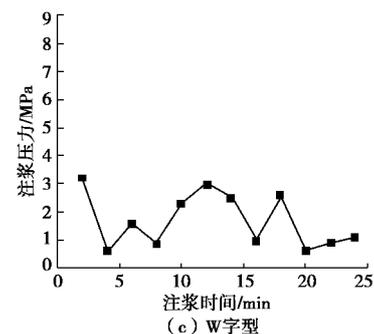
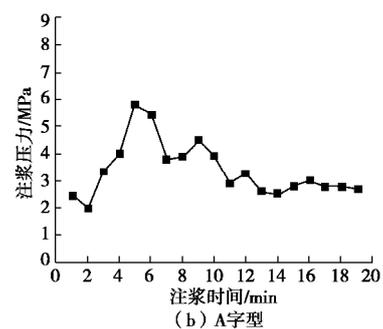
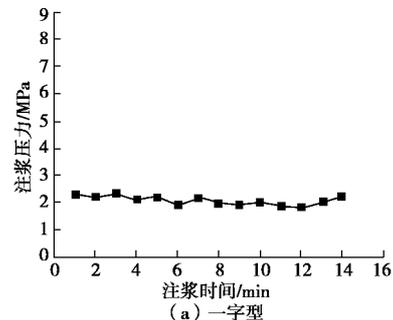
Fig. 5 Relationship between plug opening pressure and curing time of concrete

综观两条曲线,开塞压力的上下限包络在混凝土龄期较小时开口较大,距离较远,超过100 d后,两条曲线越来越接近,可以预见在龄期超过一定范围后开塞压力将稳定在9 MPa上下。

5 注浆压力与注浆过程持续时间关系

对本工程所有注浆桩注浆压力与时间的关系进行汇总,得到了含黏性土卵石层注浆压力 P 随时间 t 的变化规律。将这些曲线归纳分析,根据注浆曲线形状的不同,可以大致分成5类:一字型、A或V字型、W或M字型、上升型、下降型,见图6。

(1)一字型表示注浆压力随注浆时间基本不发生



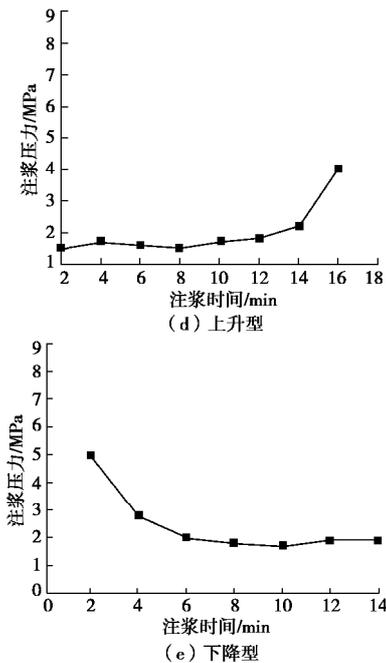


图 6 现场注浆压力与时间曲线形式

Fig. 6 Relationship between in-situ grouting pressure and time 变化, 说明注浆区周围卵石骨架含量较高, 空隙较大, 浆液可灌性好, 注浆泵施加的压力与浆液行进过程受到的阻力基本一致 (图 6 (a))。注浆过程呈一字型变化时, 渗透注浆占主要形式, 不会出现大面积的劈裂或压密现象^[9], 往往采用注浆量作为控制因素结束注浆过程。

(2) A 字型表示注浆压力先上升后下降, 说明浆液从开始注入起遇到的阻力逐渐上升, 原因可能是注浆孔周围卵石间细粒填充物较多, 阻塞了浆液行进通道。在浆液行进过程中, 密实度高、稠度较大的填充物由于强度较大, 对水泥浆液的渗透起阻碍作用, 待到浆液压力逐渐增大使得这些细粒填充物发生劈裂或者压密, 重新打开注浆通道后, 吃浆量就会激增, 注浆压力迅速下降, 表现为注浆压力达到峰值后迅速下降, 在注浆形式上表现为渗透、压密、劈裂相互交替。

V 字型与 A 型压力分布形式恰恰相反, 其注浆压力先降后升, 说明浆液起始阻力较大, 前期吃浆量很少, 在注浆压力图中表现为注浆开始后压力急剧上升至某较大值。当填充物被劈裂或压密, 注浆通道打开之后, 浆液流量增大, 注浆压力迅速降低。之后浆液行进又遇到密实度较大的卵石间填充物, 浆液渗透阻力随之增大, 这时如果注入浆液总量达到要求, 可以停注。如果总量未达到要求而压力一直上升达到某一限值超过规定时间, 也应停机, 视情况可以打开另一根注浆管或者过一段时间再注。

(3) W 字型注浆压力分布图则是 A 型和 V 型相结合的结果, 说明浆液起始的受到的阻力过大, 需要将注浆管周围卵石之间的填充物压密或劈裂才能够继

续前进, 通道打开之后, 浆液流量突然增大, 注浆泵无法满足流量供应, 压力降低, 注浆一段时间后, 再次遇到填充物, 压力再次增加, 如此反复。在这种情况下, 应控制好最高注浆压力, 如果压力持续一段时间仍居高不下, 可以采取间歇式注浆的方法。M 型与 W 型恰恰相反, 注浆控制可参照 W 型。

(4) 上升型表示注浆过程中压力一直上升, 表明注浆管周围卵石层填充物分布较多, 密实度较高且渗透系数较低, 不利于注浆通道的形成。由于浆液流量受到限制, 注浆泵内部压力逐渐升高 (图 6 (d))。在这种条件下, 浆液往往边劈裂 (或压密) 填充物边流动, 流量不发生大的变化, 反映在 $p-t$ 图中就是压力稳步上升。产生这种情形时, 要注意控制最高注浆压力, 防止注浆管爆裂。

(5) 下降型表示注浆过程压力随时间逐渐下降, 说明在注浆开始时注浆管周围土层对浆液的行进阻力非常大, 这可能是注浆管出口被卵石或致密的填充物包围, 导致注浆起始时浆液流量很小, 瞬时压力甚至可能接近灌浆泵的压力上限。待到注浆口打开后, 注浆压力随行进阻力的减小而缓步降低。这往往出现在卵石层孔隙比较大, 填充物局部密实但含量较少, 或小粒径的填充物所占的比例不大的地层中。在注浆后期, 浆液行进中所受的阻力要远小于注浆泵提供的压力, 因此注浆过程中浆液的流量越来越大, 有可能发生浆液逸走的情况, 这时要采用间歇性注浆或增大水泥浆稠度的方式保证单桩水泥浆灌入量满足设计要求。

对 5 种典型的注浆压力曲线进行统计分类, 各种类型所占的比例如表 2 所示。

可以看出注浆过程中压力平稳变化 (一字型) 的比例超过了总数的一半以上, 说明在含黏土填充物的卵石层中注浆, 注浆形式以渗透为主, 压力平稳变化, 在填充物含量较多的区域, 伴随着浆液对填充物的劈裂或挤密, 注浆压力会有较大的波动, 主要表现为注浆压力在一段时间内急剧上升或下降。因此, 卵石层内填充物的含量、密实度、渗透性对注浆压力曲线的变化形式具有决定性作用。

表 2 5 种曲线形式比例表

曲线类型	一字型	下降型	A 或 V 字型	W 或 M 字型	上升型
数量	183	62	53	37	25
比例/%	50.8	17.2	14.8	10.2	7.0

6 影响终止注浆压力的因素

注浆压力是判断注浆施工效果好坏的关键因素之一, 工程中常常将注浆压力尤其是后期的注浆压力作为重要参数来控制终止注浆, 因此研究影响终止压力的因素具有重要意义。

6.1 终注压力与桩身成桩龄期的关系

图 7 给出了终注压力与桩身成桩龄期之间的关系，点代表实测数据，实线代表变化趋势，其曲线方程为 $P_e = 2.456 + 0.002T$ 。在不同的养护时间，终注压力最大为 5 MPa，最小为 1.1 MPa，平均为 2.69 MPa，终注压力之所以很小，是因为桩端卵石层渗透性较好。可以看出，在成桩时间 60~140 d 的时间里，趋势曲线基本与横轴平行，说明终注压力与桩身龄期没有直接联系，亦即成桩时间只对开塞压力有影响，对后期注浆压力影响不大。

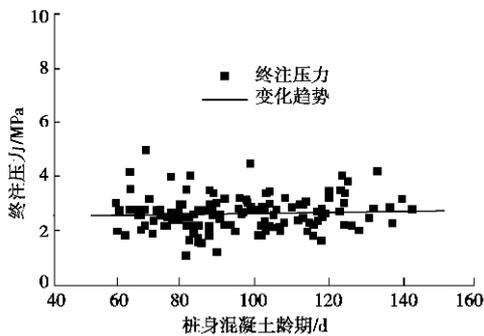


图 7 终注压力与桩身成桩龄期的关系

Fig. 7 Relationship between final pressure and curing time of concrete

6.2 终注压力与持力层层厚的关系

桩端注浆是在桩底设置注浆管，待到桩身混凝土达到一定强度之后进行注浆的工艺，因此桩端土质性质、桩入持力层厚度、持力层的厚度以及桩位分布等都会对桩端注浆的终止压力造成影响。

在本工程中，桩端土层均为含砂与黏土的卵石层，设计桩端入持力层深度为 2.5 m，因此卵石层厚度（厚度等值线如图 8 所示）可能对注浆压力有一定影响。卵石层厚度为 5.0~7.6 m，东北方向卵石层较薄，向西南方向厚度逐渐增大。

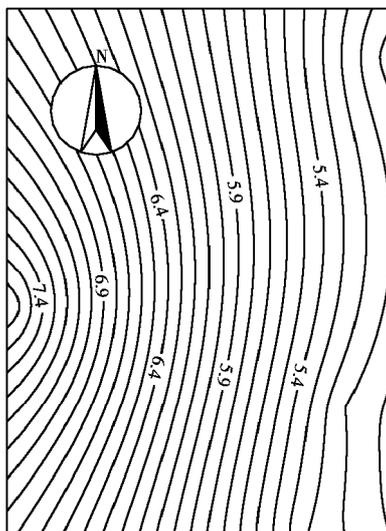


图 8 卵石层厚度等值线图

Fig. 8 Thickness contours of the gravel strata

含黏性土卵石层桩底终止注浆压力等值线如图 9 所示。从图中可见，注浆压力与层厚之间有一定联系。卵石层厚度越大，注浆压力越低。在等值线图中，随着层厚自西向东逐渐变小，桩端注浆压力除在布桩的中心区域有异变外，基本上随着层厚逐渐增大。原因可能是在层厚较大处，浆液的扩散时行进的通道相对较长，遇到与卵石层相邻的上下两层粉质黏土几率较小，而层厚较大处，浆液较容易扩散至土层交界面，行进阻力大，则注浆压力也高。

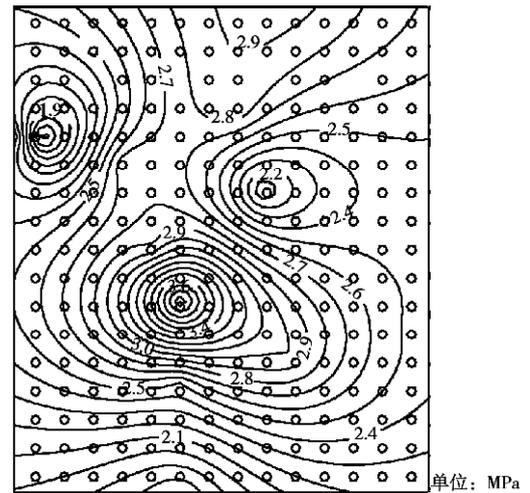


图 9 桩位与注浆压力等值线图

Fig. 9 Pile arrangement and contours of grouting pressure

6.3 终注压力与桩位分布的关系

将注浆压力等值线和桩位分布图绘制在一起（图 9），可以直观地看出桩位对与注浆压力的影响。在桩位图的周边，注浆压力往往较低，随着桩位逐渐向中心靠近，注浆压力也慢慢增大。在桩位图的中心处，注浆压力是最高的，达到 3.7~3.8 MPa。因为对于一根桩来说，桩底浆液扩散范围是球状或椭球状，其尺寸往往要比桩径大得多，那么前一根桩桩底的浆液扩散就必然会对邻桩产生影响，从这个角度说来，角桩受到的影响是最小的，边桩其次，中心桩受到的影响最大。即越靠近中心的桩，桩端孔隙就越少，浆液注入越困难，因而注浆压力也就越大。因此，在桩位分布上，中心桩终注压力最大，边桩次之，角桩最小。

6.4 终注压力与注浆顺序的关系

注浆顺序是影响场地内注浆压力分布的又一个重要因素。由于先注浆桩桩底浆液扩散范围的影响，会使得相邻的后注浆桩浆液扩散受到限制，本文着重对较厚卵石层注浆顺序对场地内注浆压力分布的影响作了分析，如图 9，10 所示，图 10 中数字代表泵机集中注浆的区域，区域内部泵机呈 Z 形移动，箭头代表泵机移动和出入场地的顺序。

对比图 9，10 易见，注浆顺序对终注压力有较大

影响, 主要表现在以下两方面: ①场地四角处终止注浆压力相对较低, 尤其是西北角部分区域, 终注压力尚不足 2 MPa; ②各注浆区域交接部分终止注浆压力相对较高, 如 1, 2 区域交界处, 3, 5 区域交界处等, 其中最为明显的是 5, 6 区域交界处, 终止注浆压力最高近 4 MPa, 导致部分桩注浆量略有不足, 此时尚应采取有力措施保障注浆量。

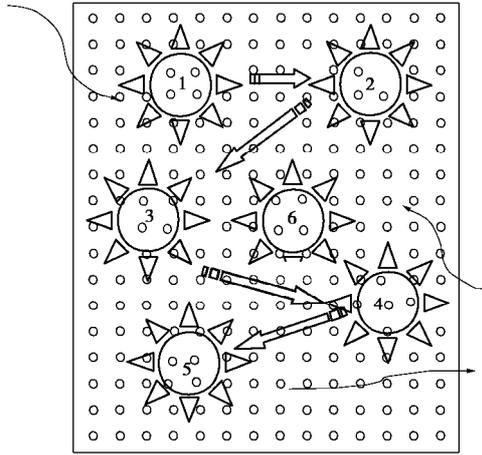
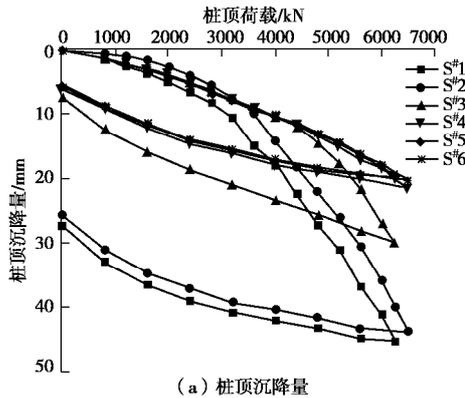


图 10 注浆泵移动方向

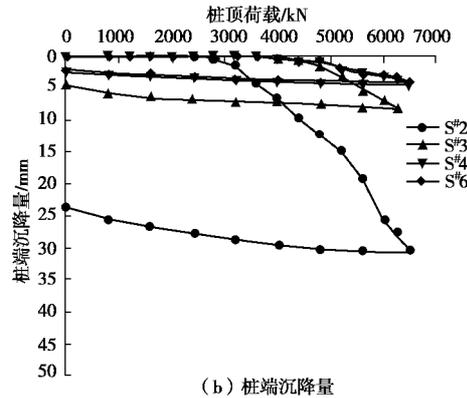
Fig. 10 Moving directions of grouting pump

7 注浆量与试打桩静载试验结果关系

为验证桩底注浆对提高承载力的效果, 分别对场地周边六根试验桩 (非工程桩) 进行不同注浆量的注浆试验, 待桩身混凝土达到预定值之后进行慢速加载静载试验, 结果见表 3。



(a) 桩顶沉降量



(b) 桩端沉降量

图 11 不同注浆量下各试打桩的沉降量

Fig. 11 Settlement curves of test piles with different grouting volumes

表 3 试桩静载试验结果

Table 3 Results of static load tests on piles

桩号	注浆量/kg	桩长/m	桩径/mm	单桩竖向承载力/kN	桩顶沉降/mm	桩端沉降/mm
S1	100	40.0	700	5600	45.26	30.43
S2	400	41.0	700	6000	43.83	—
S3	700	39.6	700	6250	29.88	6.03
S4	1000	40.5	700	6500	21.44	4.38
S5	1000	39.6	700	6250	19.57	—
S6	1200	39.6	700	6500	20.12	4.13

选取 4 根注浆量分别为 400, 700, 1000, 1200 kg 的试打桩极限承载力和桩顶桩底沉降量进行分析, 桩顶和桩端沉降曲线如图 11 所示。

可以看到在合理注浆量 (本工程为 1 t 水泥浆) 范围内, 即注浆量在 1000~1200 kg 时, 桩 S4~S6 桩顶与桩端沉降曲线十分相近, 可以划为同一曲线族。而注浆量明显小于合理值 (如 400 kg) 时, 沉降曲线与合理曲线族偏差较大, 表现为沉降量尤其是桩端沉降量明显大于合理曲线值 2~3 倍。可以预见, 当注浆量小于 400 kg 时, 桩顶和桩端沉降量会更大, 甚至有可能因桩土位移过大而发生侧阻软化^[10]或桩端刺入。

根据试打桩静载试验结果, 选取其中 5 根, 假定沉降监测数据满足高斯分布, 对注浆量与桩顶沉降的关系进行高斯拟合, 拟合模板取 $g(x) = ae^{-(x-b)/c^2} + g_0$, 结果见图 12。

在图中的拟合曲线里, 注浆量和桩顶沉降量呈倒 S 形关系, 经反弯点判别本工程的有效注浆量为 700 kg 左右, 合理注浆量在 1000 kg 左右。表现为注浆量在 700 kg 上下沉降随注浆量减小最为明显, 在 1000 kg 左右沉降曲线趋于平缓, 说明注浆量超过合理值对沉降量的影响逐渐变小。

因此对于含充填物的卵石层, 单桩注浆量应控制在合理范围之内, 当注浆量低于这一范围的下限——有效注浆量时, 桩的承载力或沉降量可能无法满足设计要求; 而当注浆量超过合理范围上限, 则对减小桩顶沉降量意义不大。

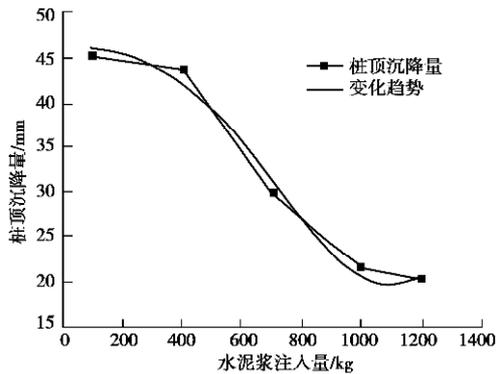


图 12 注浆量与桩顶沉降量关系

Fig. 12 Relationship between grouting volume and pile top settlement

8 结 论

(1)含黏性土卵石层注浆压力与时间曲线可以分为五种类型,其中占主要部分的是“一”字型,说明当砂卵石层中骨料含量较大时,注浆形式以渗透为主。出现其他类型的曲线主要影响因素包括卵石层中填充物的密实度和渗透性及桩位分布的注浆顺序等。若某一注浆区域的卵石层级配好且细粒填充物多,孔隙率小,注浆阻力大,注浆压力就上升,注浆形式就由渗透、压密、劈裂相互交替。

(2)灌注桩桩身成桩龄期对开塞压力影响较大,回归分析得到的开塞压力上下限曲线分别为 $P_{\max} = -28.11e^{-T/21.11} + 8.94$ $P_{\min} = 0.02e^{-T/25} + 2.82$ 。可见成桩龄期越长,开塞压力越大,但龄期超过一定期限后开塞压力逐渐趋于 9 MPa 左右。

(3)含黏性土卵石层的终注压力与灌注桩成桩龄期线性拟合关系为 $P_c = 2.456 + 0.002T$,几乎是与 T 轴平行的一条直线,桩身龄期对含部分黏性土卵石层注浆的终止注浆压力影响不大,在成桩后 60~140 d,终止注浆压力均在 3 MPa 上下浮动。

(4)卵石层层厚、桩位分布及注浆顺序都对桩端终止注浆压力有较大影响。卵石层层厚较大处与层厚较小处相比,浆液的扩散范围要大一些,注入也较容易,注浆压力相对较小;桩位分布上,边桩由于浆液扩散时可流动范围要比中心桩大得多,因此注浆压力要小于中心桩;注浆顺序为四周向中心,因而后注浆的桩、注浆区域交界处的桩及中央的桩注浆压力要大。

(5)含黏性土卵石层中注浆时,注浆量要控制在合理值上下。若低于有效值,可能无法控制沉降量或提供足够的承载力,高于合理值过多对控制沉降作用不大且降低了经济性。

参考文献:

[1] 张忠苗. 软土地基大直径桩受力性状与桩端注浆新技术

[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001. (ZHANG Zhong-miao. Bearing character of large diameter piles and bottom grouting new technique in soft soil foundation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001. (in Chinese))

[2] 薛 韬. 灌浆法: 一种提高桩基承载力的有效方法[J]. 地基处理, 1992, 3(4): 43 - 48. (XUE Tao. Grouting: an effective method to raise pile bearing capacity[J]. Ground Improvement, 1992, 3(4): 43 - 48. (in Chinese))

[3] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (ZHANG Zhong-miao. Pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))

[4] FLEMING W G K. The improvement of pile performance by base grouting[J]. Proceedings of the ICE-Civil Engineering, 1993, 97(2): 88 - 93.

[5] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代, 等. 软土地基灌注桩、挤扩支盘桩和注浆桩应用效果分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 709 - 711. (ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, XIA Tang-dai, et al. Analysis on effect of grouting pile squeezed branch pile and bottom grouting pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 709 - 711. (in Chinese))

[6] 布克明, 殷坤龙, 龚维明, 等. 钻孔后压浆技术在苏通大桥基础工程中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1697 - 1700. (BU Ke-ming, YIN Kun-long, GONG Wei-ming, et al. Post grouting technique for piled foundation: case history of Su-Tong Bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1697 - 1700. (in Chinese))

[7] 傅旭东, 于志强, 赵善锐, 等. 钻孔桩桩底、桩侧后压力灌浆试验[J]. 工业建筑, 2000, 30(4): 45 - 49. (FU Xu-dong, YU Zhi-qiang, ZHAO Shan-rui, et al. Experimental study of post-pressure grouting to the toe and the side of bored-pile[J]. Industrial Construction, 2000, 30(4): 45 - 49. (in Chinese))

[8] 张忠苗, 包 风, 吴世明. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 681 - 686. (ZHANG Zhong-miao, BAO Feng, Wu Shi-ming. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 681 - 686. (in Chinese))

[9] 李冠奇, 魏 鸿, 胡小文, 等. 致密土体注浆劈裂压力的计算[J]. 路基工程, 2007, 4: 48 - 49. (LI Guan-qi, WEI Hong, HU Xiao-wen, et al. Calculation of fracturing grouting pressure in low-permeability soils[J]. Subgrade Engineering, 2007, 4: 48 - 49. (in Chinese))

[10] 辛公锋. 大直径超长桩侧阻软化试验与理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. (XIN Gong-feng. Test and theory study on shaft resistance softening of large diameter and super-long piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))