

钻孔灌注桩护壁泥浆对桩基承载性能的影响

吴 鹏¹, 龚维明², 任伟新¹, 游庆仲³

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096; 3. 苏通大桥建设指挥部, 江苏 南通 226010)

摘 要: 为了解钻孔灌注桩护壁泥浆对桩基承载性能的影响, 分析了钻孔灌注桩护壁泥浆的功能以及对桩基承载性能影响的机理。通过对国内某大型公路桥梁大量的桩基静载试验结果分析, 可以得出结论: 护壁泥浆质量的好坏将直接影响到桩端沉渣厚度和桩侧泥皮厚度, 进而影响桩基承载性能, 因此在计算分析时需要通过合适的方式考虑。最后, 总结了优质泥浆的配置原则、配置方法、泥浆施工管理和安排等经验。

关键词: 钻孔灌注桩; 护壁泥浆; 桩端沉渣; 桩侧泥皮

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1327-06

作者简介: 吴 鹏(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士后, 主要从事基础工程方面的研究。E-mail: wupeng008@eyou.com。

Effect of slurry on bearing performance of bored piles

WU Peng¹, GONG Wei-ming², REN Wei-xing¹, YOU Qing-zhong³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Construction Headquarters of Sutong Bridge, Nantong 226010, China)

Abstract: In order to study the effect of slurry on the bearing performance of bored piles, the function and the effect mechanism of slurry were analyzed. Through the analysis on the static load test results of piles of a bridge, some conclusions could be drawn: the quality of slurry would have direct effect on the thickness of settled materials of pile tip and the thickness of slurry skin on piles, and further would have great effect on the bearing performance of bored piles. So the quality of slurry should be included into the bearing performance analysis model of bored piles. Finally, the experiences in principles and methods of preparation, management and arrangement of construction of fine quality slurry were summarized.

Key words: bored pile; slurry; bottom sediment; slurry skin on piles

0 前 言

钻孔灌注桩是目前广泛应用的一大类桩型, 尤其是在公路交通的建设过程中应用甚广, 其能适用于各种土层条件, 能制成较大直径和各种长度, 能满足不同承载力的要求。通常情况下, 对影响钻孔灌注桩的承载性能的因素, 人们更多地关注地质情况, 而施工因素则常常被忽略。

钻孔灌注桩在钻孔过程中需要用泥浆护壁。理论研究以及工程实践^[1-3]均表明护壁泥浆质量的好坏将在很大程度上直接影响到桩基承载性能。因此, 展开对钻孔灌注桩护壁泥浆影响桩基承载性能的研究非常重要。但是, 虽然泥浆质量对钻孔灌注桩承载性能有着重要的影响已经得到学术界和工程界的普遍认同, 但是, 由于其较为复杂, 研究难度大, 缺乏针对性试验, 目前为止, 有关泥浆质量对桩基承载性能方面的研究较为少见, 研究水平也较低, 泥浆质量的好坏也还完全处于经验阶段。各工程采用的泥浆也不一样, 有普通泥浆、特种泥浆^[4]和咸水(海水)制备泥

浆^[5]等。

1 护壁泥浆影响灌注桩承载性能机理

钻孔泥浆是由水、膨润土(或黏土)和添加剂等所组成的混和浆体。在钻孔桩施工过程中, 泥浆循环时, 利用泥浆与地下水之间的压力差来控制水压力, 使泥浆能在孔壁上形成泥皮而加固孔壁和防止坍塌, 同时稳定孔内水位。同时, 泥浆还具有能带出岩土碎屑、冷却和润滑钻头的作用。因此, 无论在成孔阶段还是灌注阶段, 都对成桩质量有着重要的影响, 从而较大程度上影响桩基承载性能。

1.1 对桩端承载力的影响机理

泥浆的一个重要的作用就是桩底清孔, 其目的就是为了防止砂粒在孔中沉淀超过设计规定的厚度。如

基金项目: 国家自然科学基金项目(50708115); 中国博士后科学基金项目(20070410308); 中南大学博士后科学基金项目

收稿日期: 2007-10-15

表 1 试桩基本情况表
Table 1 Basic data of test piles

项目 序号	原编号	钻孔号	桩端土层 /m	桩底标高 /m	桩顶标高 /m	桩长 L/m	桩径 d/m	长细比 (L/d)	ξ	泥浆类型	泥浆密 度 ($g \cdot cm^{-3}$)	沉渣 厚度 /cm	清孔 次数
#1	I -N1	NSZ1	粉砂	-73.8	+2.2	76	1.0	76.0	0.75	(差) 膨润土+碱	1.38	17	二次
#2	I -N2	NSZ1	粉砂	-73.8	+2.2	76	1.0	76.0	0.81		1.32	19	二次
#3	I -N3	NSZ2	粉砂	-73.8	+2.2	76	1.8	42.2	0.90		1.32	18	二次
#4	I -S1	SSZ1	粉砂	-80.1	+3.9	84	1.5	56.0	0.98	(中) 膨润土+ C.M.C	1.25	16	二次
#5	I -S3	SSZ2	粉砂	-65.8	+3.2	69	1.5	46.0	1.06		1.30	18	二次
#6	II-S4	ZK2	粉砂	-121.0	+4.0	125	2.5	50.0	1.11		1.15	10	二次
#7	III-CS5	STSZ1	粉砂	-121.0	+5.0 (-9.7)	126	2.5	50.4	1.45	(优) 膨润土+ P.H.P	1.08	0	一次
#8	IV-N1	XK205	粉砂	-56.5	+2.4	58.9	1.2	49.1	1.46		1.06	0	一次
#9	IV-N4	XK210	粉砂	-63.5	+0.1	63.6	1.5	42.4	1.27		1.10	0	一次

注：表中 ξ 为承载力提高系数，即试验极限承载力与计算极限承载力之比值。

果泥浆不能将孔中的钻渣清理干净，孔底就会有过多的沉淀，形成软垫层，这样必然降低桩端承载力，增加沉降，尤其是降低加载初期桩的刚度。

1.2 对桩侧承载力的影响机理

泥浆在循环的过程中，泥浆中的自由水不断向孔壁渗透，同时泥浆中的土颗粒不断黏附在孔壁表面上，形成一层比较柔韧的黏土膜，抵抗冲刷介质对孔壁的冲刷，起到稳定孔壁、防止坍塌的作用，随着钻孔的加深和循环时间的延长，泥皮也在不断地加厚。泥皮具有渗透能力差、止水性好、抗剪强度低的特点。其影响了混凝土与桩侧土的直接结合，从而降低了混凝土灌注桩的桩侧摩阻力，泥皮愈厚，降低程度越大^[6]。

1.3 对桩身自身强度的影响机理

在混凝土灌注阶段，性能不好的泥浆的液柱静切力对混凝土面上升起阻碍作用，容易造成混浆，即桩身混凝土中夹杂泥浆，从而影响桩身混凝土强度。

2 护壁泥浆对灌注桩承载性能影响试验

国内某大型公路桥梁为了验证桩基设计参数和施工工艺，共进行了四期单桩静载试验，试桩基本情况如表 1 所示。这四期试验桩施工时采用了不同的泥浆。

I 期试桩 采用普通膨润土加碱泥浆。由于循环系统中缺乏高效除砂器和泥浆池容积过小造成清孔时泥浆密度 ρ 居高不下（大于 $1.3 g/cm^3$ ），检测中发现桩底沉渣 17~19 cm 厚。在吊装钢筋笼灌注水下混凝土前，还必须进行第二次清孔。实测承载力提高系数 ξ 小于 1，实测钻孔桩承载力低于设计值 10%~25%。

II 期试桩 在膨润土和碱中加入 CMC 控制黏度并安置除砂机，由于泥浆池总体积远小于 $500 m^3$ ，清

孔时间不长，所以清孔后的泥浆密度 ρ 仍在 $1.2 g/cm^3$ 左右。如图 1 所示，清孔后桩底沉渣厚度随时间的增长而不断增厚。因此在水下混凝土浇筑前还必须用空气吸泥机进行第二次清孔。II 期试桩实际测承载力提高系数 ξ 在 1 左右，说明成桩工艺水平基本达到设计要求。

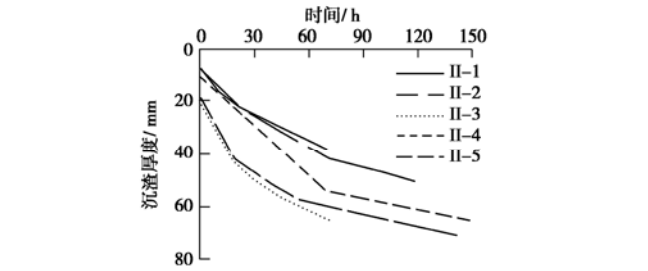


图 1 清孔后桩底沉渣厚度与时间曲线
Fig. 1 Relationship between thickness of bottom sediment and time after hole scouring

III 期试桩 在总结 II 期试桩泥浆工艺基础上，减少膨润土用量，以高效增黏剂“PHP”来提高黏度。另外增加清孔时间，将清孔泥浆密度 ρ 降至 $1.10 g/cm^3$ 左右，由此百米深桩的桩底沉渣极少，实测承载力提高系数 $\xi=1.20\sim1.40$ ，即成孔和成桩工艺水平超过设计要求。

IV 期试桩 为了全面完整系统地掌握钻孔泥浆技术，在北岸 B1 标增补第 IV 期试桩。力争消除百米深桩清孔后桩底沉渣。结果在 2 桩工艺孔实验中取得了连续六天桩底沉渣无变化，实现“零沉渣”的优异成绩。如表 1 所示。第 IV 期试桩采用“专用 PHP 泥浆”标准后，实测承载力提高系数 $\xi=1.27\sim1.46$ 。

从表 1 可以看出，采用膨润土+碱泥浆，质量不良，泥皮厚，清孔后密度大于 $1.3 g/cm^3$ ，桩端沉渣 17~19 cm，成孔工艺质量差，使试压荷载比规范值低

10%~25%左右。膨润土+CMC 钻孔泥浆一般清孔后密度大于 1.2 g/cm^3 , 桩端沉渣 10~16 cm, 成孔工艺质量一般, 试压荷载达到设计值。采用膨润土+PHP 专用泥浆和完善循环系统, 清孔后泥浆密度小于 1.10 g/cm^3 , 桩端无沉渣, 试压荷载超过规范值。

3 护壁泥浆对灌注桩承载性能影响的试验结果

虽然本次试验四期试桩的目的是为了揭示场地的土质性能, 并验证灌注桩施工工艺的可靠性而进行的综合性试验, 没有具体针对泥浆的具体性试验。但是, #6 和 #7 试桩、#5 和 #9 试桩的地质情况和施工工艺类似, 只是使用的泥浆不同, 有一定的参考意义, 分别讨论如下。

3.1 对桩端承载力的影响

从表 1 可以看出, #5 试桩与 #9 试桩、#6 试桩与 #7 两组试桩的地质情况分别类似, 几何特征也分别接近, 其不同点在于使用的泥浆不一样。

而从表 1、图 2 和图 3 均可以看出, 使用优质“专用 PHP 泥浆”后, 桩端沉渣减小, 桩端阻力明显提高, 沉降减小, 尤其是在加载初期的刚度就较大。

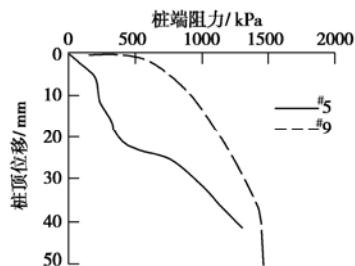


图 2 #5 试桩与 #9 试桩桩端应力 - 位移曲线

Fig. 2 Relationship between stress and displacement of pile tip for test piles #5 and #9

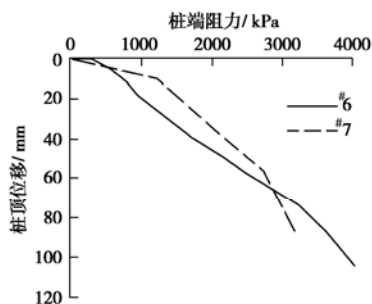


图 3 #6 试桩与 #7 试桩桩端应力 - 位移曲线

Fig. 3 Relationship between stress and displacement of pile tip for test piles #6 and #7

3.2 对桩侧极限摩阻力的影响

桩侧土极限摩阻力 $\tau_{\max}$ 值的大小, 泥浆因素的影响主要决定于孔壁泥皮厚度。在孔内钻进时回孔泥浆

质量好坏是影响泥皮厚度 K 的关键。公路桥涵施工技术规范 (JTJ041—2000) 中所表明的泥浆性能: 黏度 18~20 s, 相应胶体率 $\geq 95\%$, 失水量 $\leq (\text{ml}/30 \text{ min})$ 和泥皮厚度 $t \leq 3 \text{ mm}$ 等指标, 对于大直径桩均偏低, 不能满足高质量钻孔桩的要求。国外某规范对钻孔灌注桩泥浆性能指标如下: 黏度 (T) 高 (黏土页岩 $\leq 21 \text{ s}$; 粉细砂 $\leq 27 \text{ s}$; 粗砂砂砾 $\leq 35 \text{ s}$), 失水量 (B) 小 ($\leq 10 \text{ ml}/30 \text{ min}$), 泥皮 (K) 薄 ($\leq 1 \text{ mm}/30 \text{ min}$), 从护筒下开始钻进至桩水下混凝土浇筑结束, 在三天 (72 h) 以内为宜, 否则孔壁泥皮会随时间而变厚, 降低桩侧极限摩阻力 $\tau_{\max}$ 值。

从图 4 和图 5 可以看出, 采用优质泥浆后, 桩侧平均阻力明显提高。

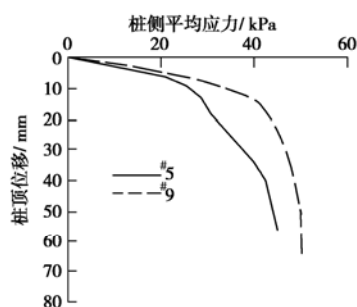


图 4 #5 试桩与 #9 试桩桩侧平均应力 - 桩顶位移曲线

Fig. 4 Relationship between average stress of pile side and displacement of pile head for test piles #5 and #9

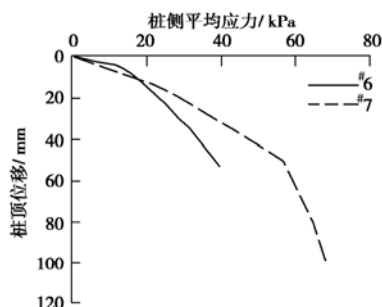


图 5 #6 试桩与 #7 试桩桩侧平均应力 - 桩顶位移曲线

Fig. 5 Relationship between average lateral stress of pile and displacement of pile head for test pile #6 and #7

3.3 对整桩承载力的影响

从表 1 可以看出, 最差泥浆的桩极限承载力比计算值低 25%, 最好泥浆的桩极限承载力比计算值高 30%~40%, 两者绝对为计算值的 60%, 这充分说明对于超长桩而言, 钻孔泥浆质量是影响单桩承载力的一个重要因素。

4 护壁泥浆的配置经验总结

4.1 目标和原则

(1) 既要保护孔壁, 防止坍塌, 又要使泥浆密

度过大，易沉淀并增加泥皮厚度。

(2) 既能悬浮钻渣，又要使钻渣在泥浆池中循环时迅速下沉。

(3) 既能有利施工，又能尽可能减少对承载性能的不利影响。

因此，需要根据具体的工程实际情况、地质情况以及施工要求，合理控制不同土层中泥浆的性能指标。

4.2 泥浆的配置方法

钻孔泥浆的主要性能有泥浆密度、黏度、静切力、含砂率、胶体率、失水率、酸碱度和塑性指数等。泥浆的性能指标是钻孔灌注桩施工的重要工艺指标，每一个性能指标的变化都直接影响到机械钻速、孔壁稳定、孔内净化、钻头寿命和预防孔内事故等一系列的成孔工艺问题，直接影响孔深、孔径、垂直度、泥皮厚度和孔底沉渣厚度等，特别对超长大直径钻影响更显著。要充分发挥泥浆的作用，其性能指标的选取非常重要。

在泥浆性能指标中最主要的是密度指标。泥浆密度的大小决定于泥浆中固相物质的含量和固相的密度。而要保证灌注桩成孔过程中不塌孔，应要求泥浆具有适宜的密度。如果泥浆密度过大，虽能维持钻孔和地层间压力的平衡，维护孔壁的稳定，加大悬浮钻渣的能力，但同时也会造成泥浆中无用固相含量较多，

附着在孔壁的泥皮过厚，而且泥皮疏松，韧性较低，不但会使钻孔缩径，而且会引起孔壁水化崩塌，导致泥皮脱落，致使孔内不能净化，造成清孔困难。有时还会使泥浆泵产生堵塞，使砼的置换产生困难。况且，泥浆中无用固相含量过高时，也会拖曳钻头的钻进，使得岩屑颗粒重复破碎，导致机械钻速下降，同时对管材、钻头、水泵、叶轮等会产生较大的磨损，降低其使用寿命。如果泥浆密度过小，泥浆护壁就容易失去阻挡孔壁土体坍塌的作用，造成坍孔，也会使清孔困难。

该工程通过Ⅳ期试桩，提出在 8 个不同施工过程中所采用的不同性能指标，成为该工程的“专用 PHP 泥浆”标准，如表 2 所示。其中最为重要的是：

- (1) 控制基浆的密度 $\gamma < 1.03 \text{ g/cm}^3$ 的关键是膨润土要充分膨化。1 吨要造 $8 \sim 12 \text{ m}^3$ 泥浆（黏度不高才能实现）。必须特别强调的是膨润土泥浆要静止 24 h 以后才能使用，这样黏度又会提高。
- (2) 钻孔泥浆黏度不足主要依靠回流泥浆中加入浓 PHP 鲜浆来实现。
- (3) 在循环净化装置中补足新钻进所需泥浆，一定要用淡基浆注入钻机出口管来淡化泥浆使 PHP 含量降低，泥浆黏度也下降，发生絮凝现象的加速沉

表 2 专用“PHP 泥浆”不同阶段指标
Table 2 Indices of “PHP slurry” during different processes

性能指标	①淡基浆 (膨润土+碱)	②浓鲜浆 (①+PHP)	③钻进 (⑤+钻屑)	④循环净化 (③+①)	⑤回流 (④+②)	⑥清孔 (⑤+①)	⑦返浆 (⑥+水下混 凝土)	⑧弃用 (⑦)
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	<1.03	<1.04	<1.30		<1.10	<1.08		>1.3
黏度 $T/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	19~20	26~35	25~28		24~26	22~24		>42
含砂率 $\pi/\%$	<0.30	<0.30	<4	在钻机水笼 头出口处，注 入①淡基浆 降低黏度，发 生絮凝。	<1.0	<0.3	在水下混凝 土灌注中将 清孔后的泥 浆顶升，泵吸 返回循环池 回收，孔内与 水泥浆混合 部分弃用。	>10
胶体率 $G/\%$	>98	100	96		>98	100		<90
失水率 $B/(\text{ml} \cdot 30 \text{ min}^{-1})$	15	<10	<18		<15	<10		>25
泥皮厚度 $K/(\text{ml} \cdot 30 \text{ min}^{-1})$	1.5	≤1	2		1.5	≤1		>5
酸碱度(PH)	9~10	10~12	9~10		9~10	8~10		<7 >14
静切力 Q/P_a	2~4	4~6	3~5		3~5	3~5		<1
⑨说明	①润土基浆可 少量掺用 CMC 改善性能。②须 静置 24 h，使膨 润土颗粒充分 膨化才能使用。	①PHP 专用于 提高黏度。 ②用专门的制 浆及储存设备 存放	钻进中水笼 头出口泥浆 含沙量过高 可以降低钻 进速度。泥浆 黏度不够在 回流泥浆中 加②浓鲜浆	—	循环池出口 处再加鲜浆 来调整回流 泥浆黏度。	清孔后用正 循环法在桩 底注入 5 m 高②新浆作 隔离层。	—	在循环 池中清 除固相 沉渣。

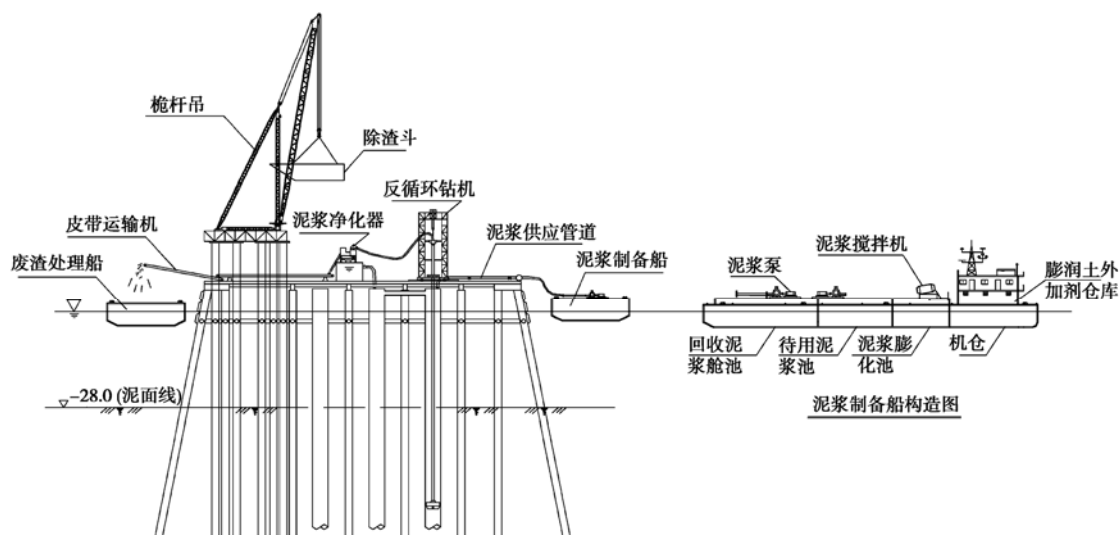


图6 泥浆循环系统示意图

Fig. 6 Circling system of slurry

凝,以利于降低泥浆中含砂率。其控制标准如表2所示。

4.3 优质泥浆的特点

(1) 触变性好

配制成功合格的 PHP 泥浆呈嫩白色。由于黏度较大在静止状态时呈冻胶状。当钻头旋转泥浆流动时,又改变了泥浆结构,触变成黏度小的泥浆增加流动性,从而减少了钻头阻力。泥浆从流动到静止时,其黏度又能恢复增大产生悬浮作用,阻止钻屑下沉。PHP 泥浆这种触变性能是其他泥浆所没有的,它同时满足了钻进时阻力少和静止时稳定性好的两项要求。

(2) 密度轻,低固相

由于使用造浆能力最强的土-膨润土做原料,故制造的泥浆含砂率极低(0~0.3%),即几乎全部土颗粒陡变成胶体,没有废余料(1 t 膨润土可造 10~15 m³ 泥浆)。这是普通黏土所做不到的。膨润土的原浆密度小(1.02~1.04 g/cm³),故能携带的钻屑就多,固相(低密度黏土和钻屑)的含砂率可由 2%提升到 4%。另外由于泥浆密度轻,对钻头阻力就小,故能提高钻进速度,减少钻机内部各种零件的磨损。

(3) 黏度高

原因是使用特效增黏剂——聚丙烯酰胺(PHP),而不是通常所用膨润土,它的掺用量是泥浆十万分之三,而羟基纤维素(CMC)掺量是泥浆的千万分之一,两者相差 30 倍,由此减少了掺料的总重量和工作量。PHP 泥浆单价虽高,但总价却低。PHP 泥浆黏度高,相应要求胶体率大(100%),这样 PHP 泥浆胶体在粉细砂粗砂砾石的孔隙土中形成一层化学膜,封闭孔壁保持稳定,不易塌孔。这和冲击钻用黏土形成的厚泥皮(物理膜)有本质上不同。

(4) 泥皮薄

PHP 泥浆的重要指标是泥皮厚度 $K \leq 1$ mm,这是

其他泥浆所做不到的。愈薄则桩水下砣与桩侧土壤接触面的夹层愈小,使桩侧土壤极限摩阻力 $\tau_{\max}$ 愈大。应当注意在钻进时由于需要携带了很多钻屑,提高了黏度的同时也使孔壁泥皮加厚,所以在清孔时应将孔内泥浆的黏度调低,即注入表 2 中①淡基浆,有条件时应将全孔泥浆置换。特别应当提出清孔后吊装钢筋笼之前,在孔内还要用 $\Phi 4$ cm 水管伸入孔内,压注稀泥浆进行低流量的小循环防止孔内泥皮厚度的增长而影响承载力。

(5) 失水量小

泥浆在钻井中有水渗入孔壁的现象叫失水。失水是指一个大气压差 30 min 从泥浆里渗出的体积(mL)。泥皮厚度与泥浆过滤失水率成正比。为了不增大泥皮厚度就必须尽量减少失水量,所以在清孔过程中调整失水量小于 10 是确保成孔质量的关键。

(6) 不分散

系指泥浆中黏土颗粒不向 1 μ m 方向发展被控制在 1~30 μ m 范围内的特性。钻进中钻屑混在泥浆中,通过钻杆的水龙头进入到沉淀池前,在泥浆管扩大处要加入淡膨润土基浆,使 PHP 在泥浆中的浓度降至 20%~40%发生絮凝作用。这样淤泥类细颗粒钻屑就能进一步变成较大的颗粒沉淀,容易被机械除砂装置清除。PHP 泥浆这种保留优质的造浆黏土,絮凝除去劣质钻屑的特殊功能十分有利于泥浆循环、净化。

(7) 环保好

PHP 泥浆废料 pH=8,无毒、无害,对农作物生长不影响,对环境污染减少到最低程度,被誉为“工农泥浆”。

4.4 泥浆的施工管理

除了泥浆配合质量的控制以外,泥浆的循环控制系统的合理安排也是十分重要的^[7-8]。

要实现上述 PHP 优质泥浆的施工,须采用“工厂化生产模式”,即集中制浆,拥有大体积泥浆池,设备完善的除砂循环和回收系统。泥浆循环系统由基浆池、除砂器、除泥器、沉淀池、运渣设备、维浆池及回收池等几大部分组成,如图 6 所示。具体工序包括泥浆循环系统的布置、泥浆配制、泥浆循环、泥浆净化、泥浆的回收等。这些前期投入较大,但其回报也是巨大的,可提高钻孔速度约 20%左右,泥浆回收率可达 30%~40%,桩承载力增大 20%左右,并且在施工中不塌孔,泥皮薄,质量上乘,桩底无沉渣,不需二次清孔。

4 结 论

(1) 钻孔灌注桩施工过程中泥浆质量对单桩承载性能有较大的影响。其表现形式主要是桩端沉渣厚度影响桩端承载力,桩侧泥皮厚度影响桩侧摩阻力。因此,提高泥浆质量,改善其性能指标,合理安排泥浆循环系统,减少桩端沉渣和桩侧泥皮厚度对钻孔灌注桩的承载性能非常重要。

(2) 对于钻孔灌注桩,其极限承载力的计算应分别考虑桩侧、桩端的泥浆影响系数。

致 谢: 本文的完成得到了苏通大桥建设指挥部的支持,在此,对他们表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 邓奕泉, 罗锦鸿. 钻孔灌注桩泥浆及其对桩基承受力的影响[J]. 山西建筑, 2007, 33(2): 132 - 133. (DENG Yi-quan, LUO Jin-hong. Mud and its influences on bearing capacity of foundation of cast-in-place bored pile[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(2): 132 - 133. (in Chinese))
- [2] 祝和芬. 影响钻孔灌注桩成桩质量的几个问题分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(5): 106 - 108. (ZHU He-fen. Some factors affecting pile quality of bored pile[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(5): 106 - 108. (in Chinese))
- [3] 李 峰. 泥浆与桩侧摩阻力关系的工程实例浅析[J]. 岩土工程技术, 1996(4): 9 - 11. (LI Feng. Interpreting relation of slurry and side resistance of drilled pile according to actual project[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1996(4): 9 - 11. (in Chinese))
- [4] 李建斌. 特种护壁泥浆在大孔径桩基施工中的应用[J]. 铁道建筑, 2002(4): 2 - 4. (LI Jian-bin. Special slurry applying in large diameter bored pile[J]. Railway Engineering, 2002(4): 2 - 4. (in Chinese))
- [5] 吴泽生, 姚红梅. 舟山连岛工程金塘大桥主通航孔桥海上桩基施工[J]. 铁道建筑, 2007(1): 29 - 32. (WU Ze-sheng, YAO Hong-mei. Pile construction of the main bridge of Jintang Bridge[J]. Railway Engineering, 2007(1): 29 - 32. (in Chinese))
- [6] 马茂军, 曲学进. 护壁泥浆对抗浮桩承载力的影响分析[J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28(1): 114 - 116. (MA Mao-jun, QU Xue-jin. Influence analysis of mud on anti-buoyant pile sustain stress[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2007, 28(1): 114 - 116. (in Chinese))
- [7] 彭林旭. PHP 泥浆在深水大直径桩基施工中的应用[J]. 世界桥梁, 2007(1): 23 - 25. (PENG Lin-xu. Application of PHP slurry to construction of large diameter foundation piles in deep water[J]. World Bridges, 2007(1): 23 - 25. (in Chinese))
- [8] 张 彦, 文洁平, 谢伟英. 东沙大桥主桥桩基泥浆维护使用及泥浆循环系统[J]. 公路, 2007(6): 198 - 200. (ZHANG Yan, WEN Jie-ping, XIE Wei-ying. Slurry applying and circling system in pile struction of Dongsha Bridge[J]. Highway, 2007(6): 198 - 200. (in Chinese))