

PHP 泥浆在桥梁超长超大直径钻孔灌注桩 施工中的应用

张雄文^{1,2}, 管义军², 周建华²

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 江苏 南通 226009)

摘要: PHP (partially hydrolyzed polyacrylamide) 泥浆是一个特别适合于超长超大直径钻孔灌注桩施工的泥浆系统。制作原料、制作过程、循环系统及施工控制等是决定其经济性、高效性的关键因素。苏通大桥工艺试桩工程根据工程场区独特的地质、水文条件确定了适合该工程的 PHP 泥浆循环系统, 以实践证明采用该系统可以实现桩侧泥皮厚度小于 1 mm、桩底沉渣厚度为 0 cm。

关键词: 桥梁工程; PHP 泥浆; 苏通大桥; 钻孔灌注桩; 泥皮; 桩底沉渣

中图分类号: TU 473.1⁺4; U 443.15⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6915(2005)14-2571-05

APPLICATION OF PHP SLURRY TO DRILLING OF OVERLENGTH AND EXTRA-LARGE-DIAMETER BORED PILES

ZHANG Xiong-wen^{1,2}, GUAN Yi-jun², ZHOU Jian-hua²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Su-Tong Bridge Construction Headquarters, Nantong 226009, China)

Abstract: PHP (partially hydrolyzed polyacrylamide) slurry is especially suitable for the drilling of overlength and extra-large-diameter bored piles. Its economical efficiency and construction efficiency are dependent on the following key factors: manufacturing of raw materials, manufacturing process, cycling system and construction control. According to geological and hydrologic conditions of the site of Su-Tong Bridge, the testing pile project has adopted PHP slurry cycling system, which has been proved in the practice to have achieved thickness of mud cake around piles less than 1 mm and thickness of sediments at pile tip of zero.

Key words: bridge engineering; PHP (partially hydrolyzed polyacrylamide) slurry; Su-Tong Bridge; bored pile; mud cake; sediment at pile tip

1 引言

很多地区,特别是长江中下游地区,由于特定的地质、水文及航运条件的限制,桥梁必须选择超长超大直径钻孔灌注桩基础将其巨大的上部荷载传递给地基岩土体。对这类基础而言,承载力是控制工程安全的决定性因素。由于施工条件的

限制,施工过程中的成孔工艺是决定桩基承载能力的最重要因素之一。影响超长超大直径钻孔灌注桩基础成孔工艺的因素很多,有些因素是无法改变的,如钻孔所处的环境、气候条件、地层分布等自然条件,有些因素不可能在短期内进行多次性改变,如人员条件、所使用的钻机类型及其他大型固定设备,但有一些因素可以根据需要不断改进,以便使钻孔效率更高、钻孔工艺更经济、更合理。泥

收稿日期: 2004-03-29; **修回日期:** 2004-05-18

作者简介: 张雄文(1976-),男,1999年毕业于河海大学地质工程系,现为桥梁工程师、博士研究生,主要从事岩土工程及钢筋混凝土结构方面的研究工作。E-mail: zhangxw@stbridge.com.cn.

浆是这类因素中最重要的一个,其他因素都依赖于泥浆体系^[1]。可以说,泥浆质量的好坏及其体系的效率直接决定了超长超大直径钻孔灌注桩基础的质量。

2 PHP 泥浆技术

自20世纪60年代钻孔灌注桩在我国出现以来,钻孔泥浆发展经历了自然造浆、细分散、粗分散、不分散等4个阶段。在不分散阶段,通过在泥浆中加入高效有机掺合剂使钻屑、粘土成为絮凝状态而最终清除。该阶段泥浆质量最优。PHP(partially hydrolyzed polyacrylamide)泥浆就是这阶段涌现出的优质泥浆,该泥浆于20世纪70年代首先在油田钻井中使用,80年代中后期被引入广东九江大桥钻孔桩施工中。此后虽在桥梁钻孔桩施工中开始推广使用,但到目前为止该泥浆的使用多限于端承桩,在超长超大直径摩擦桩施工中的使用尚不多见^[2]。

PHP 泥浆又称聚丙烯酰胺不分散低固相泥浆,是通过在采用膨润土作为原料的基浆中加入PHP胶体制成的。该泥浆具有如下特点^[3]:(1)触变性好。配制成功的PHP泥浆粘度大,在静止状态时呈凝胶状。其流动到静止的过程是一个粘度恢复的过程。粘度恢复后悬浮作用大,能阻止钻屑下沉,而当钻头旋转泥浆流动时,泥浆结构被改变,粘度减小,流动性增加,减少了钻头阻力。PHP泥浆的这种触变性能使它能同时满足钻进时阻力小,静止时稳定性好两项要求。(2)比重轻,低固相。该泥浆以膨润土作为原料,含砂率较低(0%~0.3%),造浆率高。原浆(未经钻进的PHP泥浆)比重小(约为1.02~1.04),能携带较多钻屑,固相泥浆含砂率可达4%。此外,由于比重较轻,其对钻头旋转的阻力较小,因此能提高钻进速度,减小钻机磨损。(3)粘度高。该泥浆制作过程中使用PHP特效增粘剂,泥浆粘度很高,因此相应的胶体率大。这样,泥浆胶体在粉细砂、粗砂砾石土体中形成一层化学膜,封闭孔壁,保持孔壁稳定。(4)成孔后泥皮薄。这是PHP泥浆的一个重要特点。采用这种泥浆后,孔壁泥皮厚度小于1mm,这也是普通泥浆难以办到的。(5)失水量小。一般而言,泥皮厚度与泥浆过滤失水率成正比,该泥浆的低失水率使其具有泥皮薄的特点。(6)不分散。该性能使钻孔后泥浆发生絮凝作用,从而使泥浆中的淤泥类细颗粒钻屑进一步变成较大颗粒沉渣,进而易被机械除砂装置清除。PHP泥浆的这

种保留优质的造浆粘土、絮凝去除劣质钻屑的特殊功能十分有利于泥浆循环、净化。(7)经济。PHP泥浆以造浆率高的膨润土作为原料,其造浆率比普通粘土高出4~5倍,采用高效泥浆循环系统后,其使用回收率可达60%,从而可做到循环使用。因此,在大型工程中采用该泥浆系统是比较经济的。(8)利于环保。PHP泥浆废料pH=8,无毒、无害,可将对环境的污染降低到最低程度。

3 PHP 泥浆的制作

3.1 制作材料

PHP 泥浆的制作材料主要为膨润土、聚丙烯酰胺(PAM)、纯碱(NaCO_3)和 NaOH ^[4]。膨润土是泥浆胶体质的主要来源,分为钠质和钙质两类。钠质膨润土泥皮薄、稳定性好、造浆率高(1t膨润土可造12~16m³泥浆)。钙质膨润土较钠质膨润土性能稍差,但其价格相对低廉,选择适当的配比也能较好的满足工程需要。市场上膨润土有铸造用和造浆用两类,其区别主要在于胶体率上。为了增大泥浆的胶体率,在膨润土选择时应选用钻孔用膨润土,切不可选用铸造用膨润土。其胶体率应大于96%,含砂率要小(0%~0.3%)。

NaCO_3 的主要作用是增大泥浆 pH 值,通常纯碱的添加可将泥浆 pH 值提高到10以上,有利于添加PHP时泥浆粘度的提高。此外,添加纯碱可以将粘土颗粒进行分散,并增加泥浆表面负电荷,以吸附带正电荷的钻屑,使泥浆悬浮钻屑效能更好。在泥浆制作过程中纯碱参量为体积的0.3%~0.5%。

PAM 的突出功能是使泥浆具有触变性,保持不分散、低固相、高粘度的性能。其掺用量为泥浆体积的0.003%。

3.2 泥浆制作

PHP 泥浆循环系统中需制备两种泥浆。一种为不含PHP的基浆,另一种为含有PHP的新浆。基浆是由膨润土、纯碱和水拌制而成,其配置比例应根据水质、膨润土性质试验确定。制备过程中先将水与膨润土混合,膨润土和水在自然状态下不能混成泥浆,必须通过高速率搅拌才能形成泥浆胶体。实际配置中是在制浆池中装置高压水泵,经过自吸、反喷多次循环而形成均质泥浆。制备泥浆的水应不含有有害物质,事先应进行水质检查,水量不能保持时应有储水装置。膨润土颗粒在水中充分

分散后即往溶液中加入纯碱，以调整泥浆比重、粘度及 pH 值，泥浆性能超标时严禁直接兑入清水。当基浆性能无法满足要求时可加入 PHP 而使其性能得以改善。配置好的基浆性能指标如表 1。

表 1 基浆性能指标一览表
Table 1 Performance of base slurry

粘度	比重	含砂率 /%	pH 值	胶体率 /%	失水率 / (mL · (30 min) ⁻¹)	剪切力 /Pa
20 ~ 22	< 1.03	< 0.3	9 ~ 10	> 98	< 20	2 ~ 4

新浆制作前需将 PAM 在 NaOH 溶液中水解成 PHP。水解 PAM 时其重量及 NaOH 浓度与重量应根据 PAM 分子量及类型经过试验确定。水解时将 PAM 及 NaOH 溶液混合搅拌，直至 PAM 全部分散于水中，静置 2 ~ 3 d 后即成为可使用 PHP 胶体。在基浆中加入一定重量的 PHP 胶体即为新浆。加入 PHP 的量应根据粘度及失水率的需要调配^[5]。一般情况下，每立方米基浆中加入 PHP 胶体 0.4 ~ 0.6 kg。配置好的新浆性能指标如表 2。

表 2 新浆性能指标一览表
Table 2 Performance of fresh slurry

粘度	比重	含砂率 /%	pH 值	胶体率 /%	剪切力 /Pa
26 ~ 35	< 1.04	< 0.3	10 ~ 12	100	4 ~ 6

4 PHP 泥浆循环系统

泥浆循环系统是控制成孔工艺成败的关键因素之一。PHP 泥浆循环系统由新泥浆池、基浆池、循环沉淀池、絮凝沉淀池、维浆池、造浆池、砂浆池、泥浆净化器等几部分组成^[6]。它具有泥浆浓度、粘度、酸碱度(pH)值、含砂率可调节，泥浆可重复利用等优越性能。泥浆流程如图 1。

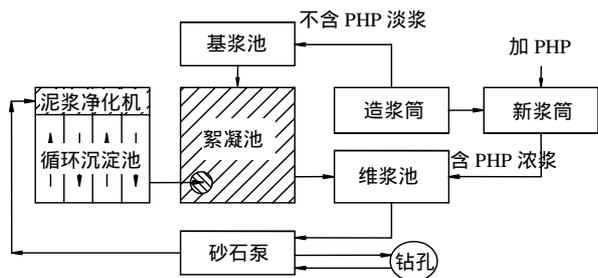


图 1 泥浆流程示意图

Fig.1 Sketch flow chart of slurry

PHP 泥浆循环系统中砂石泵的作用在于将钻进过程中形成的带钻屑泥浆泵入泥浆净化机，并使维浆池中 PHP 含量高的新浆流入钻孔内供钻进使用。泵入泥浆净化机的泥浆钻屑含量较高，一般为 3% ~ 4%。泥浆净化机将粒径在 0.075 mm 以上的颗粒清除(其中包括絮凝的小粒径颗粒。一般而言，粒径为 0.04 ~ 0.075 mm 的颗粒因絮凝作用而被泥浆净化机清除)，粒径小于 0.075 mm 的颗粒随泥浆流入泥浆循环沉淀池中沉淀。为了增强沉淀效果，循环沉淀池做成几个隔仓以增大泥浆流动路径。经过循环沉淀池后泥浆流入絮凝池，在絮凝池中浆液可以通过控制基浆池中流入的基浆指标来调节其浓度和酸碱度。基浆池中的基浆是通过造浆筒制备和补充的，其主要性能指标包括浓度和酸碱度，对它们的控制主要是通过加入膨润土和纯碱来实现的。在絮凝池中通过调节泥浆浓度而使其中小粒径颗粒进一步絮凝沉淀。经过絮凝池而流入维浆池的泥浆，其粘度、失水率等性能指标是不能满足钻进需要的，为了使之成为 PHP 含量高的优质泥浆，需要在其中加入 PHP 含量高的新浆以增加其粘度。新浆是通过新浆筒添加的，造浆筒中制备的基浆流入新浆筒，在其中添加 PHP，调节其浓度而制成新浆。经过维浆池后，泥浆性能指标又能满足钻进需要^[7]。

该过程的总体思路是：使用过的粗颗粒含量高的泥浆通过净化、循环、絮凝及稀释等过程后，其中大颗粒沉淀，然后往泥浆里加入 PHP 含量高的新浆，增加其粘度，减小其失水率，调整其性能指标，从而使之重新成为满足钻进需要的泥浆。必须注意的是泥浆的粘度与其 pH 值息息相关。实践表明，pH 值为 10 的泥浆的粘度小于 22，而 pH 值为 12 的泥浆的粘度可大于 30。因此 pH 值的调节是整个过程的关键步骤之一。泥浆 pH 值的调节是通过基浆池中 NaCO₃ 的添加，及 PHP 胶体制备过程中 NaOH 的浓度的控制来实现的。一般而言，NaCO₃ 的添加能使泥浆 pH 值达到 10，而 NaOH 浓度控制可使泥浆 pH 值达到 12。

5 钻孔施工

PHP 泥浆循环系统特别适合于反循环钻进。开孔钻进时要采用轻压慢转参数。正常钻进施工时，在粘土层中钻进时要控制进尺，每钻进一个回次时要及时扫孔，保证钻孔直径要求，正常钻进施工中

要控制泥浆性能满足要求。钻进及钻杆提升拆除的整个过程中要及时补充浆液量,以维持护筒内外头水头差不小于 2.0 m,从而保持孔壁稳定。加接钻杆时,先停止钻进,将钻具提离孔底 20 cm,维持泥浆循环 5 min 以上,以消除孔底沉渣并将管道内的钻渣携出排净。钻孔过程中采用反循环方式排渣,钻进过程中应每个班次测量泥浆性能指标 2 次,及时调整泥浆循环系统的泥浆指标。当钻进至设计标高时,应将钻具提离孔底 5 cm,继续转动钻具,维持泥浆循环。终孔后,进行最后一次清孔。清孔和检孔完成后,在孔底注入 5 cm 高度的新浆,插入两根注浆管,一根为进浆管,另一根为出浆管,通过泥浆循环系统不断循环流动孔内泥浆,以保证孔底沉渣和孔壁泥皮厚度满足要求^[8-10]。

6 工程实例

苏通大桥是一座连接苏州和南通两市的斜拉桥,其主跨跨径为 1 088 m,建成后它将成为当今世界上最大跨径的斜拉桥。苏通大桥主塔高约 300 m,采用长约 100 m,直径 2.5 m 的钻孔灌注桩群桩基础。最大承台桩数约 130 根。为了验证桩基承载力及钻孔桩施工工艺,该工程开展了试桩工程。试桩工程场地岩土性质为:第 1 层为砂性土层,分 3 个亚层,第 1 亚层为粉砂层,呈松散~稍密状,以砂土为主;第 2 亚层为亚砂土,粉砂夹亚粘土,呈稍密或软塑状;第 3 亚层为粉砂,呈稍密~中密状,中压缩性,土性较均匀。第 2 层为亚粘土,呈流塑~软塑状,高压缩性。第 3 层以细粉砂为主,上部为亚砂土,呈稍密~中密状;下部为粉细砂,呈密实状。第 1 期试桩施工时采用普通泥浆,施工时发现

成孔效率低下,塌孔现象严重。检测发现桩侧泥皮及桩底沉渣过厚,桩基承载力难以满足设计要求。第 2 期试桩工程中对直径分别为 1.2, 1.5 m,桩长分别为 58.9, 65.9 m 的钻孔桩进行了工艺试验。试验中采用了 PHP 泥浆系统。

工艺试验时采用以蒙脱石为主要矿物质的膨润土作为泥浆制作原料,水取自长江河道,水质属 $\text{HCO}_3^- \sim \text{Ca}^{2+}$ 型, pH 值为 8.1~8.5。按照水膨润土 $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 303 \quad 18.2 \quad 1$ (质量比)制成基浆。新浆选用分子量为 1 200 万的非速溶水解型 PAM 为原料制作,按 PAM NaOH $\text{H}_2\text{O} = 10 \quad 1.0 \quad 600$ (质量比)水解成 PHP 溶液。在每立方米基浆中加入 0.6 kg PHP 溶液制成新浆。钻孔过程中各阶段泥浆性能指标按基浆、新浆、钻进浆、回流浆、清孔浆、弃用浆进行控制,控制标准如表 3。

采用 PHP 泥浆系统进行钻孔施工,每根桩成孔时间均控制在 20 h 左右。超声波检测表明两试桩孔深分别为 58.9, 65.9 m,最大孔径分别为 1 210, 1 505 mm,最小孔径分别为 1 199, 1 497 mm,平均孔径分别为 1 202, 1501 mm,孔壁泥皮厚度小于 1 mm,孔底沉渣为 0 cm。桩基承载力测试结果也表明采用新施工工艺后,桩基承载力可以大大得以提高。

7 结 语

对于超长超大直径钻孔灌注桩而言,成孔工艺对其承载力是至关重要的。苏通大桥工艺试桩工程中对泥浆进行了试验,试验表明:(1) PHP 泥浆性能优越,采用该泥浆系统可以提高钻孔效率,保证成孔质量;(2) PHP 泥浆是一个循环系统,使用过

表 3 苏通大桥试桩工程成孔工艺试验过程中泥浆性能指标一览表
Table 3 Parameters of slurry in testing pile project of Su-Tong Bridge

泥浆类型	比重	粘度	含砂率/%	胶体率/%	失水率	泥皮厚	pH 值
					$/(\text{mL} \cdot (30 \text{ min})^{-1})$	/mm	
基浆	< 1.03	20~22	< 0.3	98	< 20	1.5	9~10
新浆	< 1.04	> 30	< 0.3	100	< 12	1.0	10~12
钻进浆	< 1.2	25~28	< 4.0	96	< 36	2.0	8~9
回流浆	< 1.08	24~26	< 1.0	98	< 30	1.5	9~10
清孔浆	< 1.06	22~24	0.5	100	< 24	1.0	8~9
弃用浆	< 1.2	> 42	> 5	< 90	> 50	> 5	< 7, > 12

的泥浆具有 60% 的回收率, 因此具有很高的经济性; (3) 弃用浆一般为中性, 对环境污染较小, 有利于排放。可以说 PHP 泥浆具有质优、价廉、环保等优点, 可以在大型工程超长摩擦桩基础施工中推广采用。

参考文献(References):

- [1] 楼晓明, 陈强华, 洪毓康. 施工因素对钻孔灌注桩荷载传递特性的影响[J]. 工程勘察, 1996, (3): 32-36.(Lou Xiaoming, Chen Qianghua, Hong Yukang. The impact of construction factors on load transfer characters of bored piles[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1996, (3): 32-36.(in Chinese))
- [2] 王伯惠, 上官兴. 中国钻孔灌注桩新发展[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.(Wang Bohui, Shanguan Xing. The New Development of Bored Piles in China[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.(in Chinese))
- [3] 王卫红. 大直径桩成孔泥浆分析[J]. 山西建筑, 2003, 29(3): 64-65.(Wang Weihong. On mud used in large diameter pile drilling[J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(3): 64-65.(in Chinese))
- [4] 梁国军. “双聚泥浆”在钻探中的配制和应用[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(7): 123-124.(Liang Guojun. The confection and application of HPAM-HPAN slurry in drilling[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(7): 123-124.(in Chinese))
- [5] 孙良辰, 牟建立, 杨淑艳. 成井工艺中泥浆的配制和指标的测定[J]. 东北水利水电, 2003, 21(3): 10-12.(Sun Liangchen, Mu Jianli, Yang Shuyan. Slurry confection and index measurement in well drilling technology[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2003, 21(3): 10-12.(in Chinese))
- [6] 朱定法, 吴汉斌. 大直径钻孔桩基础施工中泥浆处理系统的应用[J]. 世界桥梁, 2002, (2): 22-24.(Zhu Dingfa, Wu Hanbin. The application of slurry system in large diameter bored piles construction[J]. World Bridge, 2002, (2): 22-24.(in Chinese))
- [7] 王寿光, 武晓峰, 肖合, 等. 油田钻井废泥浆工业化再利用技术研究[J]. 油气田地面工程, 2002, 21(4): 69-70.(Wang Shouguang, Wu Xiaofeng, Xiao He, et al. The study of reuse techniques in oil field drilling slurry[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2002, 21(4): 69-70.(in Chinese))
- [8] 张胜, 王彦, 刘万昌. 浅谈气举反循环钻孔施工中泥浆的使用和管理[J]. 黑龙江交通科技, 2003, (9): 27-28.(Zhang Sheng, Wang Yan, Liu Wanchang. The use and management of slurry in reverse circulation drills construction[J]. Heilongjiang Communication Science and Technology, 2003, (9): 27-28.(in Chinese))
- [9] 孙翔, 康杰. 泥浆护壁成孔灌注桩质量控制[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(11): 43-44.(Sun Xiang, Kang Jie. The quality control of slurry protected bored pile[J]. Building Technique Development, 2002, 29(11): 43-44.(in Chinese))
- [10] 史朝辉, 张国华. 钻孔灌注桩泥浆护壁性状研究[J]. 太原科技, 2003, (2): 58-60.(Shi Zhaohui, Zhang Guohua. The study on the protective mud of the cast-in-place pile[J]. Taiyuan Science and Technology, 2003, (2): 58-60.(in Chinese))