

【工程应用】

含砂地层大直径旋挖钻孔桩孔内泥浆性能研究

骆嘉成^{1,2}, 叶浩川³, 白银银⁴, 强小兵², 姚雪军², 邵吉成^{3*}

(1. 温州市地质资源与生态环境重点实验室, 浙江 温州 325006; 2. 浙江省第十一地质大队, 浙江 温州 325006;
3. 浙江华坤地质发展有限公司, 浙江 温州 325006; 4. 温州浙南地质工程有限公司, 浙江 温州 325006)

摘要: 为探究大直径钻孔桩在成孔过程中孔内泥浆性能的变化及对施工质量的影响, 以龙泉市大直径钻孔桩的施工为背景, 根据对现场泥浆性能的测量结果及时制定应对措施, 为大直径钻孔桩的施工提供参考。结果表明, 在成孔过程中泥浆中的砂子向孔底沉淀, 使孔内泥浆比重逐渐减小, 含砂率与比重的拟合指数 R^2 在 0.858~0.987 之间。泥浆含砂率的降低导致其黏度下降, 在循环使用期间, 泥浆中的胶体部分逐渐被消耗, 导致清孔时泥浆携砂性能下降。终孔后, 泥浆含砂率的变化直接影响孔底沉渣厚度, 孔底泥浆含渣率最高可达 86%。采用气举反循环方式协同除砂机进行清孔, 1.5~2 h 可完成清孔; 清孔完毕后应立即浇灌混凝土, 避免孔底再次淤积沉渣。

关键词: 大直径桩; 泥浆; 含砂率; 比重; 黏度; 沉渣

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0437-08

Study on the mud properties of large diameter rotary drilling bored pile in sand stratum

LUO Jia-cheng^{1,2}, YE Hao-chuan³, BAI Yin-yin⁴, QIANG Xiao-bing², YAO Xue-jun², SHAO Ji-cheng^{3*}

(1. Wenzhou Key Laboratory of Geological Resources and Ecological Environment, Wenzhou 325006, Zhejiang, China;
2. The 11th Geology Team of Zhejiang Province, Wenzhou 325006, Zhejiang, China;
3. Zhejiang Huakun Geological Development Co., Ltd., Wenzhou 325006, Zhejiang, China;
4. Wenzhou Zhe'nán Geological Engineering Co., Ltd., Wenzhou 325006, Zhejiang, China)

Abstract: In order to investigate the changes of mud properties and its impact on the quality of construction, the construction of large diameter rotary drilling bored pile in the process of hole forming in Longquan city is taken as the background. According to the changes of mud properties measured on site, the control measures are formulated in time, which provides reference for construction of large diameter bored pile. The results show that the sand in the mud of the hole precipitates towards the bottom of the hole during hole forming, so that the mud specific gravity in the hole gradually decreases, and the fitting indexes R^2 between the sand content and specific gravity are between 0.858 and 0.987. The decrease of sand content results in the decrease of mud viscosity, and the colloidal portion of the mud is gradually consumed during the cycle, which leads to the sand carrying capacity of mud decreasing during hole cleaning. After finishing drilling, the changes of sand content of the mud directly affects the thickness of the sediment at the bottom of the hole. The sand content of the mud is up to 86%. The gas lift reverse circulation together with the sand removal machine is used to clear the hole, and the clearing process can be completed in 1.5-2 hours. After clearing the hole, it is necessary to pour concrete immediately to avoid sediment deposition at the bottom of the hole again.

Key words: large diameter pile; mud; sand content; specific gravity; viscosity; sediment

0 引言

钻孔灌注桩具有无挤土、适用地层广、施工效

率高等优点^[1-3], 在建筑工程、桥梁工程、铁路工程等领域有较广的应用^[4-5]。大直径钻孔灌注桩的施工设备相对简单, 单桩承载能力大, 抗震性、抗风稳

收稿日期: 2022-02-27

作者简介: 骆嘉成(1968—), 男, 湖北蕲春人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事桩基工程、软基处理等方面的工作。E-mail: 252735683@qq.com。

*通信作者: 邵吉成(1992—), 男, 湖北襄阳人, 硕士, 工程师, 主要从事软基处理、环境岩土工程等领域的研究与应用。E-mail: shaojicheng2021@126.com。

定性良好, 造价相对低廉^[6-7]。随着超高层建筑、海上风力发电工程以及公铁两用桥等工程项目的建设发展, 对单桩承载力的要求逐渐提高, 大直径、高承载力桩的应用也越来越广泛^[8]。大直径桩在成孔时, 由于桩孔壁的拱环作用急剧减弱, 桩孔侧壁土体有偏向孔内位移的趋势, 孔壁的不稳定概率增加, 极易造成孔壁坍塌事故^[9-11], 尤其是在含砂、卵石地层中钻孔, 成孔时塌方概率明显增加。在大直径桩成孔过程中, 泥浆的性能关系到桩孔的安全, 桩孔内泥浆的有效液压力可以平衡孔壁土中水的渗透压力和桩周围土压力^[12]。研究表明, 泥浆本身的特性直接影响钻孔灌注桩的成桩质量, 进而影响桩在使用过程中的承载特性。此外, 泥浆还具有冷却机具和切土润滑等多项重要作用, 泥浆黏度影响其携渣性能, 对大直径桩的清孔效果具有较大的影响。当前对泥浆护壁效果方面的研究较多, 但关于成桩过程中桩孔内泥浆性能的变化鲜有公开报道。泥浆的比重、含砂率和黏度是泥浆最重要的特性, 因此研究成桩过程中孔内泥浆性质的变化对大直径钻孔灌注桩的质量控制意义较大。本文以龙泉市某大直径旋挖钻孔灌注桩施工项目为背景, 研究了大直径钻孔灌注桩在成孔过程中桩孔内泥浆含砂率、比重以及黏度的变化规律, 针对现场问题制定相应对策, 为大直径钻孔灌注桩施工的质量控制提供建议。

1 工程概况

1.1 工程简介

本项目位于丽水市龙泉市环城东路, 项目为两座主楼及周边裙带建筑, 两座主楼分别为酒店和公寓, 酒店主楼共 35 层, 高 156 m; 公寓大楼共 30

层, 高 159.8 m, 建筑落成后为龙泉市最高建筑物。本项目设计有 91 根工程桩, 桩径均为 1 200~2 400 mm, 桩长在 17~39 m, 采用 XR 550D 型旋挖钻机进行成孔。该工程共有 5 根桩的桩径为 2 400 mm, 其单桩极限承载力为 8 960 kN, 在房屋建筑领域较为罕见, 鲜有施工经验可参考。本工程桩基受力形式为端承桩, 以中风化花岗岩为持力层, 桩入花岗岩深度为 0.5 倍桩径。表 1 为该工程所有桩的桩型和数量。

表 1 桩型和数量

桩径/mm	数量/个	单桩极限承载力/kN
1 200	11	2 200
1 800	16	4 800
2 000	17	6 200
2 100	22	6 800
2 200	20	7 400
2 400	5	8 960
总计	91	—

1.2 工程地质情况

施工场地土层分布情况如表 2 所示。在距地表 0~13.1 m、0.8~12.8 m 范围内分别分布有粉砂层和卵石层, 厚度分别为 0.2~9.2 m 和 2.1~12.0 m。对于大直径旋挖钻孔桩而言, 在成孔过程中, 粉砂层和卵石层区域易出现塌孔情况。前期已有单位施工了 7 根试桩, 其中 2 根试桩在砂层处出现过塌方情况, 且因清孔不达标导致钻芯取样时发现桩断层、夹砂等现象。鉴于前期施工情况, 本单位采用人工造浆的方式对孔壁进行护壁, 在施工过程中需及时关注孔内泥浆性能的变化, 并严格监测孔底沉渣厚度的变化。

表 2 施工场地土层分布一览表

Table 2 Soil layer distribution at construction site

地层编号	地层名称	层顶埋深/m	层顶高程	层底埋深/m	层底高程	层厚/m
①-1	杂填土	0.00~0.00	196.40~191.40	16.70~0.20	194.90~178.70	16.70~0.20
①-2	素填土	11.10~2.60	192.10~182.40	14.50~5.80	190.30~180.10	6.00~0.50
①-3	耕土	2.20~0.00	192.70~191.40	2.70~0.30	192.40~190.90	0.50~0.30
②	粉质黏土	3.70~0.00	193.40~189.30	5.90~1.30	192.10~187.30	3.70~0.50
③	粉砂	5.80~0.00	194.90~187.60	13.10~0.80	194.20~181.10	9.20~0.20
④	卵石	6.40~0.80	194.20~185.90	12.80~6.50	188.70~179.30	12.00~2.10
⑩-1	全风化花岗岩	16.70~5.80	190.30~178.70	26.10~13.80	179.80~167.80	17.20~3.60
⑩-2	强风化花岗岩	26.10~13.80	179.80~167.80	43.30~21.90	171.20~149.80	23.40~2.30
⑩-3	中风化花岗岩	43.30~21.90	171.20~149.80	—	—	12.50~1.00

1.3 成孔速度统计

如图 1 所示, 桩径为 1 200 mm 的钻孔灌注桩, 成孔时间在 8.0~14.5 h 之间, 入岩时间在 1.5~3.7 h 之间。桩径为 2 400 mm 的大直径钻孔桩, 成孔时间较长, 通常在 16.3~25.0 h 之间, 入岩时间在 5.4~12.6 h 之间, 如图 2 所示。对于大直径桩, 桩孔自身的稳定性比小直径桩孔差, 其成孔时间、入岩时间均较长, 成孔时孔内泥浆性能有较大的变化, 对桩孔稳定性影响也较大。若桩孔暴露时间较长, 理论上更易出现塌孔事故, 因此成孔时需严格监测孔内泥浆各项指标的变化, 并需要及时测量孔内泥浆性能的变化。

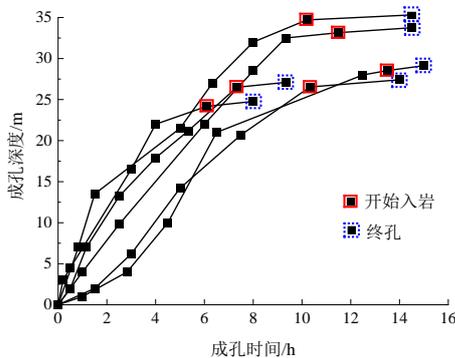


图 1 1 200 mm 桩的成孔时间

Fig. 1 Hole-forming time of 1 200 mm pile

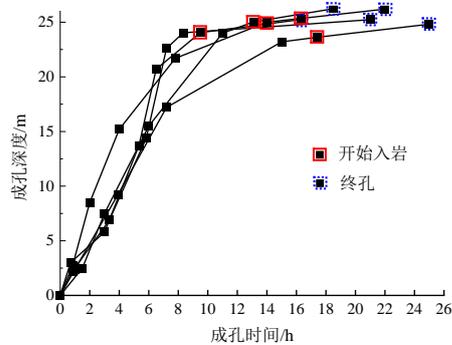


图 2 2 400 mm 的桩成孔时间

Fig. 2 Hole-forming time of 2 400 mm pile

2 泥浆中含砂率、比重分析

2.1 造浆配比

在施工过程中, 采用膨润土造浆对桩孔进行护壁, 膨润土造浆过程中, 添加 CMC、PCI、PHP 以及 Na₂CO₃ 等多种材料。具体配比如表 3 所示。

表 3 造浆配比

Table 3 Properties of slurry

材料	淡水	膨润土	CMC	纯碱	PHP	重晶石
配比	100	8~12	0.007	0.2~0.5	0.003	试验确定

刚造好的护壁泥浆性质较稳定, 本工程护壁泥浆的初始密度在 1.08~1.15 g/cm³ 之间, 护壁泥浆的初始含砂率为 0%。成孔时, 土屑会分散到护壁泥浆中, 同时地下水也会向桩孔内渗透, 导致桩孔内泥浆性质发生改变。成孔时泥浆含砂率 (粒径 ≥75 μm) 会在较大程度上影响泥浆的比重。此外, 泥浆在桩孔内沿桩身不同深度分布并不均匀, 呈现一定的规律性, 对桩孔的护壁效果也有所差异。

2.2 现场泥浆含砂率与比重统计

以现场 Z18 号桩和 Z40 号桩为例, 成孔时对孔内泥浆含砂率和比重进行测量, 其结果如图 3 (a) 所示。随着成桩深度的增加 (即成桩时间增加), 在自重作用下, 孔口泥浆中的砂子向桩底下沉, 导致泥浆的含砂率呈现一定的下降趋势; 同时, 孔内泥浆的比重也呈现相应的降低趋势。终孔后, 钢筋笼的运输、下放和焊接以及导管的下放过程通常超过 2 h, 对孔口泥浆扰动影响不大, 此时可将孔口泥浆视为静止状态, 孔口泥浆的含砂率和比重趋向稳定状态, 孔口泥浆的含砂率为 0.2%~0.8%, 泥浆的比重为 1.08~1.10 g/cm³。在清孔时, 由于孔底泥浆携带沉渣返回孔口, 孔口的含砂率呈现略微增加的趋势, 约为 0.4%~0.8%, 因此孔口泥浆比重也略微增大, 约为 1.09~1.10 g/cm³。

在 Z18 号桩和 Z40 号桩成孔过程中, 对孔深一半位置 (半孔深) 泥浆进行检测, 桩半孔深处泥浆比重和含砂率之间变化规律如图 3 (b) 所示。随着成孔深度的增加, 两根桩半孔深处泥浆含砂率也呈现下降趋势, 泥浆的比重也随之降低, 泥浆比重的降低会导致泥浆对孔壁的有效静液压力降低, 对于大直径钻孔桩而言, 粉砂层和卵石层等相应部位塌孔概率会增加。

孔底泥浆的含砂率一直较高, 尤其是在桩孔入岩过程中, 中风化花岗岩被钻机钻头磨碎, 孔底沉渣激增, 从而导致泥浆的含砂率增加, 可达 64%~86%, 泥浆的比重可达 1.81~1.82 g/cm³, 如图 3 (c) 所示。过多的沉渣会增加桩孔的清孔难度, 同时影响桩的灌浆质量。

2.3 含砂率与比重关系拟合分析

对 Z18 号桩和 Z40 号桩的孔口和半孔深泥浆中的含砂率和比重进行线性拟合分析, 由于桩底泥浆砂子较多, 成孔过程中泥浆的含砂率变化幅度较大, 且与桩孔其它部位泥浆的差异性较大, 因此孔底泥浆不具有代表性, 仅对孔口和半孔深处泥浆进行拟合分析, 结果如图 4 和表 4 所示。

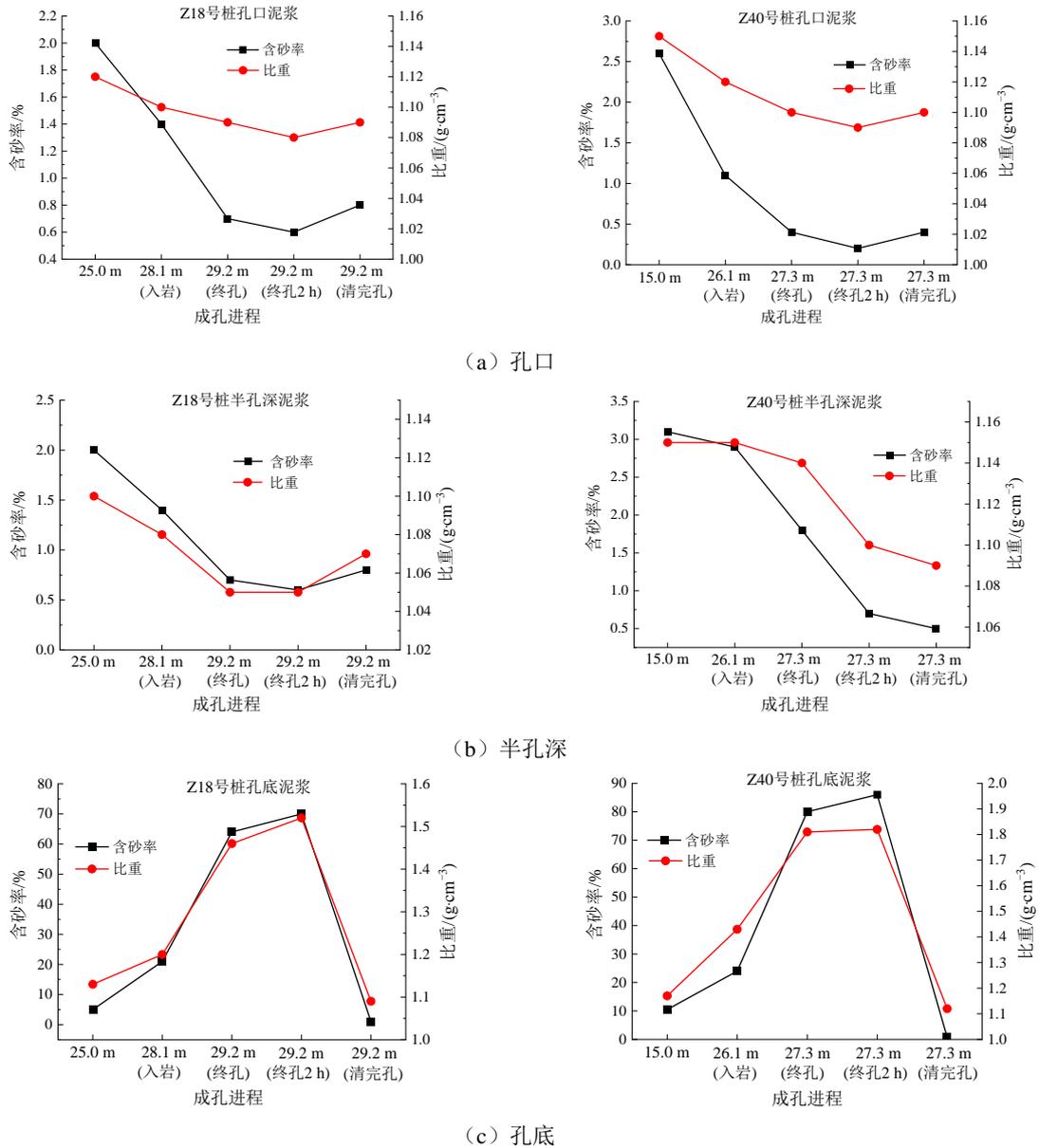


图3 泥浆含砂率与比重的关系

Fig. 3 Relation between the sand content and specific gravity

表4 拟合数据
Table 4 Fitting data

桩口	斜率	截距	斜率 标准差	截距标准 差	拟合 指数 R^2
Z18 孔口	0.025 0	1.068 5	0.003 27	0.004 00	0.935
Z18 半孔深	0.011 6	1.078 8	0.002 31	0.006 94	0.858
Z40 孔口	0.023 5	1.088 5	0.001 34	0.001 80	0.987
Z40 半孔深	0.022 9	1.085 0	0.003 94	0.008 27	0.892

通过拟合结果可知, Z18号桩和Z40号桩的孔口和半孔深泥浆的比重与含砂率呈正相关, 拟合指数 R^2 在 0.858~0.987 之间, 拟合度较高, 表明桩孔内泥浆的含砂率是影响其比重的重要因素。

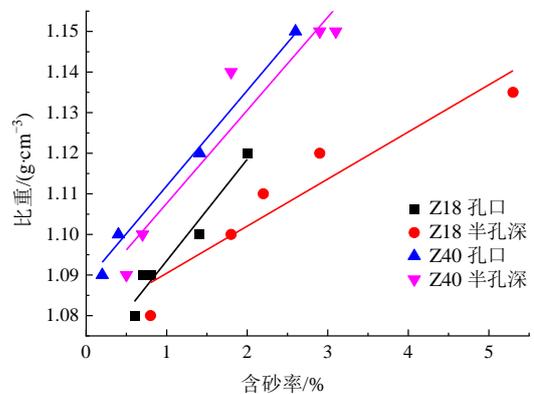


图4 含砂率与比重拟合结果

Fig. 4 Fitting results between the sand content and specific gravity

泥浆比重的下降会导致对孔壁的环向应力出现减小的趋势,当孔壁某部位存在容易坍塌的区域时,由于钢护筒埋深有限,达不到保护效果,泥浆对桩孔护壁效果的重要性凸显,泥浆比重不仅要达到规范规定(1.10~1.25 g/cm³)的要求^[13],而且泥浆比重需满足平衡孔壁侧压力和地下水压力的作用。在人工造浆这一环节,仅增加膨润土投加量在一定程度上可提高护壁泥浆的比重,但也会使泥浆的黏度增加,不利于泥浆中的砂子析出。根据现场实际情况,本工程在泥浆中加一定量的加重剂(重晶石),使孔口部位泥浆在钻孔时比重达标。

3 泥浆中含砂率-黏度分析

泥浆黏度是泥浆流动难易程度的重要指标^[14],泥浆的黏度指标及流变性对孔壁稳定、排渣和清渣的效果都有直接影响^[15-17]。有研究表明,随着泥浆密度的增加,泥浆的黏度也呈增大趋势^[18]。对于本桩基工程,泥浆的比重与黏度之间的相关性并不明显,造浆完毕后,泥浆的黏度与含砂率之间有一定

联系。

Z18号桩和Z40号桩孔内泥浆黏度和含砂率之间的关系如图5所示。泥浆黏度与含砂率变化呈现较好的相关性。在入岩过程-终孔这一阶段,由于孔底花岗岩被钻机钻牙磨碎,以及桩孔泥浆中的砂子向孔底沉降、聚集,孔底一定范围内的固相物含量增多,孔底泥浆含砂率增大^[19],在测量黏度时漏斗黏度计的管口易堵,孔底泥浆的黏度很难准确的测出,因此仅有孔口和半孔深泥浆的黏度数据。在清孔后,绝大部分粒径大于75 μm的固相物都被清理干净,桩孔内各部位泥浆的含砂率都在0.4%~1%之间,泥浆的黏度维持在18.32~22.12 s之间,与刚配好的护壁泥浆(18.12~24.63 s)有一定变化,且多次循环使用后的泥浆性能很不稳定,不满足规范要求^[20]。护壁泥浆在循环使用期间,其内部胶体会逐渐被消耗,且泥浆中携带桩孔中的砂子返回储浆池,并在储浆池内聚集,使储浆池内的护壁泥浆的性能变差,需及时清理储浆池中淤积的砂子,并根据储浆池内泥浆性质、状态重新造浆对储浆池进行补浆,可适当增加新浆中膨润土的添加量。

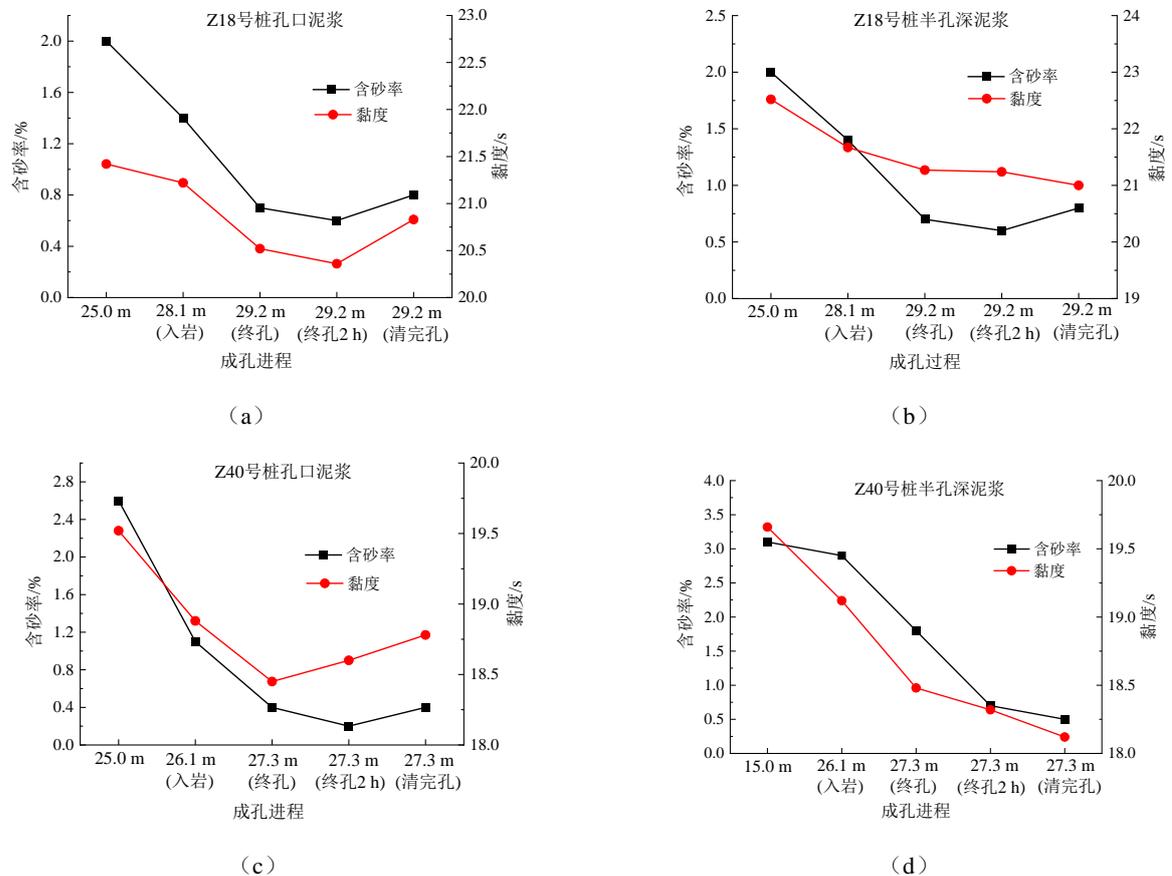


图5 泥浆含砂率与黏度的关系

Fig. 5 Relation between the mud sand content and viscosity

4 沉渣及泥浆含砂率对灌浆影响

桩成孔过程中，泥浆含砂率沿桩孔内竖向分布呈现逐渐增大的趋势，如图6所示。孔口至半孔深范围，孔内泥浆的含砂率变化不大，通常在0.1%~3.1%之间。孔底1~4 m范围，泥浆含砂率在0.3%~5%之间。在桩终孔前，孔底0.5 m位置的泥浆含砂率较大，其值在4.0%~7.2%之间。由于桩孔内泥浆中的砂子向孔底沉降，孔底泥浆含砂率一直较高，尤其是在入岩过程中，钻机提钻次数较少，除孔底外其它部位泥浆的扰动都较小，孔底泥浆含砂率激增。此外，入岩时中风化花岗岩被钻牙磨碎也会增加孔底泥浆的含砂率。终孔2 h后，孔底泥浆含砂率最大测量值为86%。实际上，终孔后孔底会形成一定厚度且相对密实的沉渣，取浆器无法到达真实的孔底，取浆器到达的“孔底”实际上是孔底沉渣表面处，孔底含渣率可能大于86%。

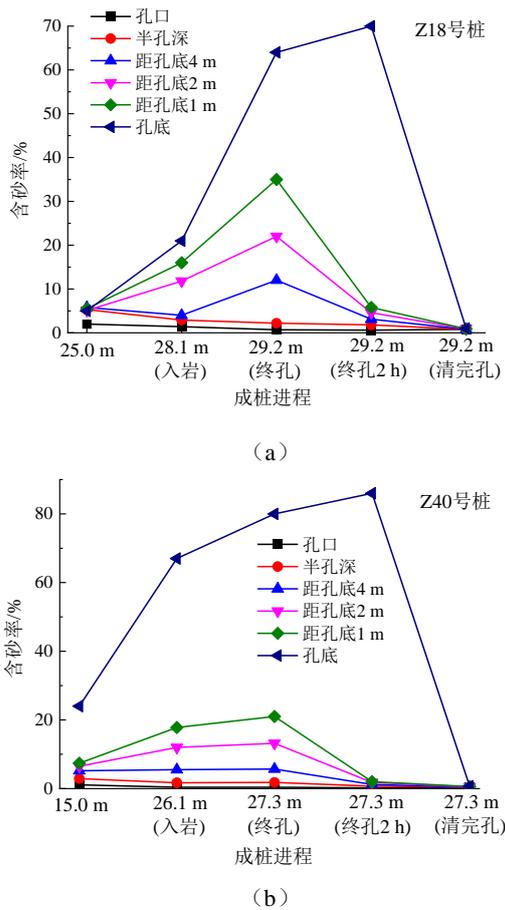


图6 成孔时泥浆含砂率的变化

Fig. 6 Variation of sand content of mud in drilling

桩孔内泥浆中的砂子向孔底沉淀是孔底沉渣厚度增加的主要原因，桩在终孔后，桩孔内泥浆中

的砂子在重力作用下向孔底沉降、聚集，使孔底沉渣逐渐加厚，并趋向稳定，泥浆含砂率的变化直接影响孔底沉渣厚度^[19]。如图7所示，两根桩在终孔1 h内，完成大部分沉渣淤积，在终孔2 h后两根桩孔底沉渣厚度均超过100 cm，分别为121 cm和106 cm。

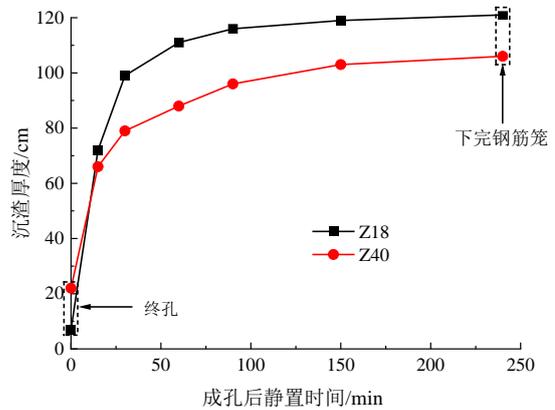


图7 桩孔底沉渣厚度与时间关系

Fig. 7 Relation between the sediment deposition thickness and time at hole bottom

大直径旋挖钻孔灌注桩的钻渣易沉淀，且清渣困难^[6]，前一家施工单位因清孔不达标而导致桩出现断层、夹砂等事故。通常来讲，气举反循环清孔方式在建筑领域应用较为广泛，一般能达到清孔要求。本工程桩径大多在1 800~2 400 mm之间，在房屋建筑领域非常罕见，无经验可参考，可借鉴桥梁桩基施工经验。

在采用气举反循环清孔的同时，采用除砂机对孔内泥浆砂子进行清除。图8为两根桩在清孔时孔底沉渣淤积量的变化。该桩在清孔15 min后，孔底沉渣大部分被清除，分别由原始的121 cm和106 cm变为44 cm和36 cm。在清孔过程中，导管搅动影响使部分孔底沉渣再次分散到孔中，因此在刚清孔时孔底沉渣厚度下降非常明显，不完全是砂子清除导致的结果，因此需确保充足且合适的清孔时间，本工程桩清孔时间为1.5~2 h，清孔后孔底沉渣均未超过5 cm左右。

通过试验，Z18号桩停止清孔后，孔底在20 min左右再次淤积12 cm的沉渣，此时孔底淤积的不一定是较大颗粒的固相物，但为了安全起见，应该继续清孔，直到沉渣小于5 cm为止^[13,20]，并立即浇筑混凝土。相比较小直径桩，大直径钻孔灌注桩孔底更容易淤积沉渣，且沉渣更难清理干净，采用的清孔方式更为复杂，清孔时间更久。

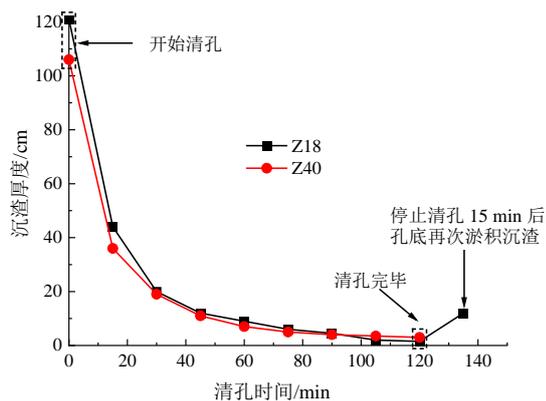


图8 桩清孔时孔底沉渣淤积量变化规律

Fig. 8 Variation of sediment deposition at hole bottom during hole clearing

5 结论

(1) 大直径钻孔灌注桩成桩时间更久, 孔内泥浆的含砂率、比重都有较大的变化, 对桩孔稳定性影响也大, 更易出现塌孔事故。

(2) 泥浆的含砂率在较大程度上会影响泥浆的比重, 泥浆中的砂子向孔底沉降、淤积, 使孔内泥浆比重逐渐减小, 泥浆含砂率与比重的拟合指数 R^2 在 0.858~0.987 之间。在人工造浆过程中, 可适当加入加重剂使泥浆比重能满足护壁要求。

(3) 成孔过程中泥浆含砂率的降低导致泥浆的黏度下降, 泥浆在循环使用期间, 其内部胶体会逐渐被消耗, 导致清孔时泥浆携砂性能下降。需及时清理储浆池中淤积的砂子, 并重新造浆对储浆池进行补浆, 可适当增加新浆中膨润土的添加量。

(4) 桩在入岩时, 孔底泥浆含砂率激增, 终孔后孔底泥浆含砂率最高可达 86%。孔底在终孔 1 h 内, 完成大部分沉渣淤积, 在终孔 2 h 后两桩孔底沉渣厚度均超过 100 cm。

(5) 大直径钻孔灌注桩孔底更容易淤积沉渣, 且难以清理干净; 采用气举反循环方式协同除砂机进行清孔, 1.5~2 h 可完成清孔, 清孔完毕后立即浇灌混凝土, 避免桩孔内再次淤积沉渣。

参考文献

[1] 王川婴, 韩增强, 王玉山. 钻孔灌注桩沉渣厚度检测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 1212-1215.
WANG Chuan-ying, HAN Zeng-qiang, WANG Yu-shan. Detection method for bottom sediment thickness of bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

2013, 35(S2): 1212-1215.

[2] 左明福. 深水大直径钻孔灌注桩若干问题刍议[J]. 中国港湾建设, 2006(5): 33-35.

ZUO Ming-fu. Discussion on large diameter bored piles in deep waters[J]. China Harbour Engineering, 2006(5): 33-35.

[3] 王贵森, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 桩径和扩径比对大直径扩底灌注桩工程特性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 308-314.

WANG Gui-sen, HONG Bao-ning, LIU Xin, et al. Impact of pile diameter and expanding diameter ratio on engineering characteristics of belled pile[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(34): 308-314.

[4] 朱栋文, 赵春风, 赵程, 等. 泥浆比重对钻孔灌注桩孔径变化规律的影响[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊 1): 349-353.

ZHU Dong-wen, ZHAO Chun-feng, ZHAO Cheng, et al. The influence of slurry gravity on the variation of the pore diameter in cast-in-situ bored pile[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 349-353.

[5] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 大直径扩底嵌岩桩竖向承载性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(2): 541-547.

LIU Nian-wu, GONG Xiao-nan, YU Feng, et al. Vertical bearing capacity of rock-socketed pile with large diameter enlarged bottom[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2016, 47(2): 541-547.

[6] 胡东范. 铁路桥梁大直径桩施工难点及对策[J]. 工程建设与设计, 2009(2): 103-105.

HU Dong-fan. Construction difficulties and countermeasures of large diameter piles for railway bridges[J]. Construction & Design for Project, 2009(2): 103-105.

[7] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1817-1826.

WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. Field loading tests on large-diameter and super-long bored piles of Shanghai Center Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1817-1826.

[8] 付连红, 徐斌, 王恩. 大直径钻孔灌注桩施工常见事故处理与预防研究[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2018(23): 122, 91.

FU Lian-hong, XU Bin, WANG En. Construction

- accidents and prevention research of large diameter bored pile[J]. *Urban Construction Theory Research: Electronic Edition*, 2018(23): 122, 91.
- [9] 姜鹏, 章剑青, 朱征平. 钻孔灌注桩施工中泥浆比重控制研究[J]. *公路*, 2019, 64(7): 145-148.
JIANG Peng, ZHANG Jian-qing, ZHU Zheng-ping. Research on mud proportion control in bored pile construction[J]. *Highway*, 2019, 64(7): 145-148.
- [10] 李满程, 杨斌, 莫建军, 等. 桥梁大直径桩施工难点及其对策[J]. *长沙交通学院学报*, 1999(1): 81-84.
LI Man-cheng, YANG Bin, MO Jian-jun, et al. Construction difficulties and its counter-measures of big diameter piles in bridges[J]. *Journal of Changsha Communications University*, 1999(1): 81-84.
- [11] 张功英. 超厚砂层地质条件下的旋挖冲孔灌注桩施工技术应用[J]. *河南建材*, 2020(1): 14-16.
ZHANG Gong-ying. Application of construction technology of rotary drilling bored pouring pile under geological condition of ultra-thick sand layer[J]. *Henan Building Materials*, 2020(1): 14-16.
- [12] 郑万栋, 申翊, 靳利安, 等. 泥浆的有效静液压力及在泥浆护壁中的作用[J]. *土工基础*, 2019, 33(6): 704-708.
ZHENG Wan-dong, SHEN Hong, JIN Li-an, et al. Effective hydrostatic pressure of slurry and its role in stabilizing the slurry wall excavation[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2019, 33(6): 704-708.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础工程施工质量验收规范: GB 50202—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Acceptance of Construction Quality of Building Foundation: GB 50202—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [14] 周中, 张磊, 缪林武, 等. 断层破碎地层泥水盾构泥浆渗透试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(3): 682-689.
ZHOU Zhong, ZHANG Lei, MIAO Lin-wu, et al. Mud permeation tests of slurry shield in fault fractured stratum[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(3): 682-689.
- [15] 杨光, 樊至, 吴智, 等. 不同性质黏性土对泥浆渣土输送能力影响研究[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(3): 58-64.
YANG Guang, FAN Zhi, WU Zhi, et al. Impact of clay properties on transport ability of mud residue[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(3): 58-64.
- [16] ABBAS A K, ALSABA M T, AL DUSHAISHI M F. Improving hole cleaning in horizontal wells by using nanocomposite water-based mud[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203(4): 108619.
- [17] 叶伟涛, 王靖禹, 付龙龙, 等. 福州中粗砂地层泥水盾构泥浆成膜特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1260-1269.
YE Wei-tao, WANG Jing-yu, FU long-long, et al. Laboratory test and characteristic of filter cake formation of slurry shield in medium-coarse sand stratum in Fuzhou[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1260-1269.
- [18] 范英宏, 洪蔚, 侯世全, 等. 铁路桥梁钻孔桩泥浆黏度及流变特性研究[J]. *铁道建筑*, 2011(6): 55-57.
FAN Ying-hong, HONG Wei, HOU Shi-quan, et al. Study on mud viscosity and rheological properties of bored pile of railway bridge[J]. *Railway Engineering*, 2011(6): 55-57.
- [19] 邵吉成, 占运, 骆嘉成, 等. 含砂地层大直径旋挖钻孔灌注桩孔底沉渣分析[J]. *路基工程*, 2021(2): 82-86.
SHAO Ji-cheng, ZHAN Yun, LUO Jia-cheng, et al. Analysis of sediment at the hole bottom of large diameter rotary drilling cast-in-place bored pile in sand stratum[J]. *Subgrade Engineering*, 2021(2): 82-86.
- [20] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—94[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical Code for Building Pile Foundation: JGJ 94—94[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.