

超深地下连续墙泥浆材料特性及配比试验研究

龚振宇¹, 徐前卫², 孙梓栗², 贺翔²

(1. 中铁五局电务城通公司, 湖南长沙 410205;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 地下连续墙在施工过程中常发生槽壁坍塌现象, 泥浆护壁是保证槽壁稳定的常用手段, 而泥浆配比直接影响到护壁效果。以滇中引水龙泉倒虹吸盾构接收井超深基坑地下连续墙施工为例, 结合护壁泥浆的配制材料和主要参数, 通过泥浆配比试验, 分别研究钠基膨润土、CMC(羧甲基纤维素)、 Na_2CO_3 (纯碱)等制浆材料对泥浆性质的影响。研究表明: 泥浆配比试验的搅拌时间与静置时间对泥浆性质的影响不容忽视; 平均1%膨润土含量可使泥浆比重约增加0.008; 平均0.1‰ CMC即可使1:20基浆黏度增加5.5 s; 纯碱含量对泥浆的黏度有明显的降低效果, 基浆膨水比越大黏度降低越明显; 平均每1%的黏土可使泥浆比重增加0.006 7, 但同时影响泥浆含砂率。工程实测变形发现槽壁稳定性得到保证, 说明泥浆护壁效果良好。

关键词: 超深基坑; 地下连续墙; 泥浆护壁; 配比试验; 添加剂

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0101—08

Mud Material Characteristic Test and Proportioning Research of Ultra-deep Underground Continuous Wall

GONG Zhenyu¹, XU Qianwei², SUN Zili², HE Xiang²

(1. The Electricity Engineering Co., Ltd. of CREC No. 5 Group, Changsha, Hunan 410205, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: During the construction of diaphragm wall, the collapse of trench wall often occurs. The slurry ratio directly affects the effects of slurry wall protection. Based on the construction of ultra-deep diaphragm wall of Longquan Inverted Siphon Shield Receiving Well in central Yunnan, the preparation materials and main parameters of the slurry were introduced firstly, and then the influence of sodium bentonite, CMC, Na_2CO_3 and other slurry materials on the properties of slurry through slurry ratio was analyzed. The results show that the influence of mixing time and static time on the properties of slurry are as follows. The average 1% bentonite content can increase the density of slurry by about 0.008; the average 0.1‰ CMC can increase the density of 1:20 proportioning slurry by 5.5 s; the sodium carbonate content has a significant effect on the viscosity of slurry, the larger the ratio of base slurry to bentonite, the more obvious the viscosity reduction; the average 1% clay can make the slurry density increased by 0.006 7, but at the same time affect the sand content. By applying the test results to engineering practice, it is found that the stability of the tank wall is guaranteed according to the measured deformation data, which indicates that the mud wall protection is effective.

Keywords: ultra-deep foundation pit; diaphragm wall; mud protection; proportioning test; construction additive

地下连续墙作为基坑围护的一种重要形式, 具有刚度大、整体性强以及可进行逆作法施工等优点。

但是在实际施工过程中常常发生槽壁坍塌现象。因此, 地下连续墙成槽过程中常采用泥浆护壁, 通过泥

浆对槽壁产生的静压力,并在槽壁上形成泥皮,从而有效地防止基槽、孔壁坍塌^[1]。曹豪荣等^[2]研究发现槽壁失稳表现为表层土体的整体失稳以及软弱夹层的局部失稳 2 类破坏模式。地下连续墙成槽施工全过程中泥浆始终充满槽段,作为保证槽壁稳定的常用手段,对泥浆材料及配比的研究有着重要意义。

针对护壁泥浆的材料及性能,目前已有一些学者进行了相关的研究。其中,在泥浆配比方面,董宏波等^[3]、张山等^[4]分别分析了膨润土以及各种添加剂对泥浆性能的影响,根据正交试验测定泥浆性能优化配比。在槽壁稳定性力学分析方面,欧明喜等^[5]提出槽壁开挖将导致地下连续墙黏性土夹砂层土体单元产生负孔隙水压力,局部稳定性系数将会随负孔隙水压力的消散逐渐降低。王世君等^[6]研究发现,增大泥浆重度、泥浆面超高以及土体的抗剪强度指标,可有效的提高槽壁稳定性;而地面超载的增大,会降低槽壁稳定性。在泥浆重度理论计算方面,崔根友等^[7]和易岸峰^[8]通过建立了地下连续墙成槽施工槽壁土体整体稳定性和局部稳定性力学模型,推导得到保证地下连续墙槽壁稳定的成槽施工泥浆临界值公式,并在相应工程应用中加以论证。

由于泥浆材料种类繁多、性质各异,目前对泥浆配制及各组分性能的研究一般缺少系统的试验分析,而现场施工更多的则是依据施工人员的经验对泥浆配比进行调整。另外,虽然部分学者针对圆形基坑或超深基坑地下连续墙施工进行了相关研究^[9-12],但本文研究的工程背景为超深圆形基坑,其槽壁稳定性研究建立在试验分析及实际施工效果两方面,其结果更为典型。

综上所述,本文采用取自施工现场的泥浆材料进行室内配比实验,分别研究钠基膨润土、CMC、 Na_2CO_3 等制浆材料对泥浆性质的影响,为成槽施工过程中的槽壁稳定性控制服务,并为今后类似工程提供一定的借鉴和参考。

1 工程概况

滇中引水工程龙泉倒虹吸接收井位于昆曲高速与沔源路交叉口西侧绿化带内,基坑属于超深基坑类型,周边环境平面图如图 1 所示。

接收井基坑为 $R = 10.0 \text{ m}$ 圆形围护结构,采用 1.5 m 厚地下连续墙,成槽深度 96.6 m ,共计 14 幅,分两期施工。地墙接头型式为铰接头,墙顶设锁口圈梁,连续墙嵌入基岩。基坑开挖深度 77.3 m ,内

衬墙厚度 1.0 m 。如图 2 所示。



图 1 接收井基坑平面示意图

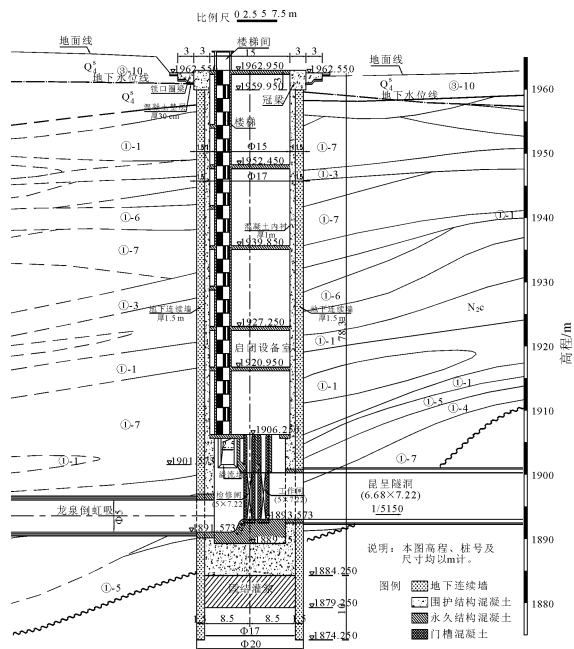


图 2 接收井立面图(显示内外墙)

2 泥浆配比试验材料

2.1 膨润土

膨润土性能评价指标包括可交换阳离子容量和膨胀性。其主要化学组分为蒙脱石,少量成分由伊利石、高岭石等黏土矿物组成。其中蒙脱石含量约占整个膨润土矿物的 80%,决定了膨润土主要的物理化学性质。

2.2 CMC(羧甲基纤维素)

CMC(羧甲基纤维素)属于纤维素醚类,广泛应用于石油、食品、医药、纺织和造纸等行业。CMC 最大的特点是溶于水之后会迅速水解为透明的胶体溶液,具有增稠、成膜、黏接、水分保持、胶体保护、乳化及悬浮等作用,酸碱程度显中性。其性状为白色固体颗粒状,在干燥环境中性质稳定,可以长时间保

存。在本次泥浆配制试验中采用 CMC 来快速提高泥浆的黏度,如图 3 所示。

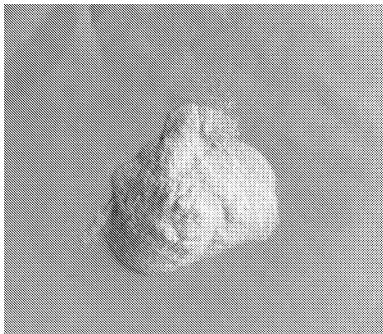


图 3 试验用 CMC 颗粒

考虑到 CMC 具有高度亲水性及高度增黏性,搅拌不充分会导致外部成胶体阻碍内部溶解,不利于其性能发挥,同时也会导致试验结果失准。因此将 CMC 配制成 0.2% 的溶液后再添加,可以有效避免该问题。

2.3 Na_2CO_3 (纯碱)

在地下连续墙施工时,护壁泥浆的 pH 值要求处于 7~10 之间,总体偏碱性。因此,配制浆液过程中加入 Na_2CO_3 (纯碱)可以满足护壁泥浆的碱性要求,另外, Na_2CO_3 (纯碱)还可以提高浆液的稳定性,使得泥浆内部各组分布均匀。

2.4 现场 <2-2> 粉质黏土及试验用砂

地下连续墙成槽过程中,周围土体会一定程度溶解并悬浮于泥浆中,黏土层可能导致泥浆重度升高,砂土层可能导致泥浆含砂率增加。因此,试验时配置一些碾碎的黏土粉末及砂砾,以研究其对泥浆性质的影响,现场主要分布的 <2-2> 粉质黏土如图 4 所示,试验用细砂如图 5 所示。



图 4 现场 <2-2> 粉质黏土

3 泥浆试验流程及测定参数指标

3.1 试验流程

泥浆配比试验是按照一定的材料配合比,将膨润土、CMC、 Na_2CO_3 等制浆添加剂混合,然后利用

JJ-1 型电动搅拌器,以 750 r/min 的转速将泥浆原料搅拌混合,如图 6 所示。接下来,在室温条件下水化膨胀一定的时间,而后参考相关规范给出的测量指标及测量方法,主要测量的泥浆指标有比重、黏度和 pH 值等,对比定量分析各种添加剂对泥浆自身主要特性的影响程度,最终使得各项指标都满足施工规范后,记录试验泥浆的具体配比。

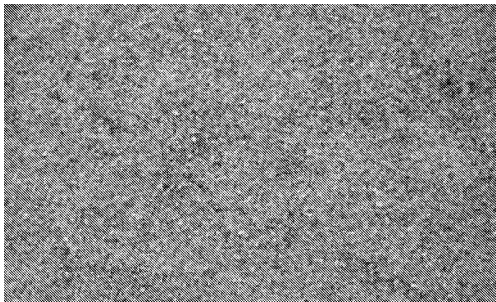


图 5 试验用细砂



图 6 泥浆搅拌过程

3.2 泥浆比重

泥浆比重代表浆液中固体颗粒含量的多少,是衡量泥浆与地层之间适应性的一个主要指标,也是泥浆最重要性能指标之一。当泥浆比重偏小,固体颗粒含量不足,不利于建立泥膜。当泥浆比重偏大,会造成泥浆泵超负荷运转,泥浆的携渣能力减弱,固体颗粒会发生沉积。因此,在地下连续墙施工时,不仅要考虑槽壁的稳定性的,还要考虑相关输送设备的承受能力。试验采用 NB-1002 型泥浆比重计,所测泥浆的比重为泥浆的重量与 4℃ 时同体积的纯水重量之比。

3.3 泥浆黏度

泥浆黏度,一般指塑性黏度,用来反应流动的液体抵抗剪切变形能力的大小。过大或过小的泥浆黏度都不利于实际施工。黏度越大,则悬浮携带土颗

粒的能力越大,泥沙不容易沉淀,沉渣厚度越小且泥皮越厚,可能会出现缩径或者泥皮脱落的情况;反之,黏度过小会导致泥浆发生离析分离,成膜失效,泥浆携渣能力大大降低。所以,浆液黏度是槽壁成膜与否的关键指标,同时在施工过程中,黏度合理的浆液可以及时带走泥沙,避免悬浮颗粒沉积,不会影响到后期混凝土浇筑和墙底质量。本试验采用漏斗黏度计测定。

3.4 pH 值

泥浆的酸碱性对泥浆特性、水敏地层的稳定、泥浆处理剂的应用都有很大影响。本试验采用 pH 计测定。

3.5 含砂率

泥浆含砂率是指泥浆中大于 74 μm 的非黏性土占泥浆总体积的百分含量。在地下连续墙成槽过程中,若泥浆中含砂率高,会对钻杆和钻头的磨损严重,且会影响泥浆泵的工作。因此泥浆制备时需要控制含砂率指标。试验采用 ANY-1 型泥浆 3 件套测试仪中的含砂率测试仪进行测定。

3.6 泥浆参数控制指标

结合地下连续墙施工经验,拟定的泥浆参数控制指标如表 1 所示。比较可知,循环泥浆的比重和含砂率高于新制泥浆,但两者的黏度相差不大。

表 1 泥浆参数控制指标表

泥浆类型	新制泥浆	循环再生泥浆	混凝土浇筑前槽内泥浆
比重	≥1.05	≤1.15	≤1.15
黏度/s	18~22	20~25	≤35
pH 值	7~9	7~9	7~9
含砂量/%	≤2	≤4	≤7

4 单因素泥浆配比试验结果

4.1 搅拌时间对泥浆性质的影响

泥浆的搅拌时间对泥浆性质有影响,搅拌时间过短会导致泥浆分散性较差,性质不稳定。因此,配置“膨润土:水=1:20(即膨润土 50 g、水 1 000 g)”的纯膨润土泥浆为基浆。搅拌速度为 750 r/min,以搅拌时间 0~90 min 为变量进行试验。泥浆性能结果变化如图 7 所示。其中,考虑到实际施工中新浆配置时间不能与成槽施工脱节,即新浆静置时间不应过长。故试验设定静置时间为 1 h。

可以看出,搅拌时间对泥浆比重影响很小,基本处于 1.028~1.030 范围内,而对泥浆黏度影响较

大,在搅拌时间由 15 min 增至 45 min 过程中,泥浆黏度由 17.5 s 快速增至 19.8 s,而后保持稳定。在搅拌时间为 15 min、30 min、45 min 时,泥浆黏度测试时滤网滤得泥浆颗粒如图 8 所示,当搅拌时间为 15 min 时,泥浆分散效果差,残余颗粒多;搅拌时间为 30 min 时,仅剩余少量残余颗粒;当搅拌时间为 45 min 时,可认为已完全溶解。因此,综合考虑泥浆黏度与分散性,后续实验中搅拌时间为 45 min。

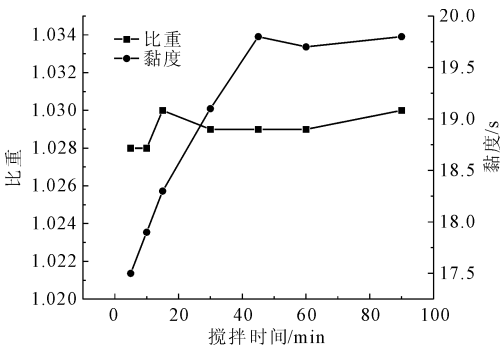


图 7 搅拌时间对泥浆参数影响

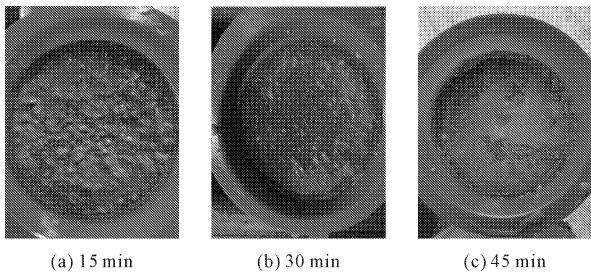


图 8 不同搅拌时间下泥浆搅拌效果

4.2 静置时间对泥浆性质的影响

膨润土作为泥浆最主要的组分之一,其膨胀水化的时间对泥浆性能存在影响。因此,设计试验研究不同静置时间下的泥浆性能。配置“膨润土:水=1:20(即膨润土 50 g、水 1 000 g)”的纯膨润土泥浆为基浆,以静置时间 0~24 h 为变量进行试验,泥浆性能结果变化如图 9 所示。其中,根据前文试验结果可知,搅拌时间为 45 min 时,膨润土颗粒完全溶解。故试验设定搅拌时间为 45 min。

可以看出,静置时间对泥浆比重影响很小,比重基本处于 1.030 附近波动,但静置时间对泥浆黏度影响较大,静置时间由 0 h 增至 1 h 时,泥浆黏度由 17.5 s 增至 18.5 s,增长速度较快,而后缓慢增加,直至静置 12 h 时,泥浆黏度增至 19.5 s,静置 24 h 时,泥浆黏度为 19.9 s。综合考虑试验便捷性以及泥浆膨化特性,说明前节搅拌时间对泥浆性质的影响试验中,泥浆静置时间定为 1 h 是可行的。

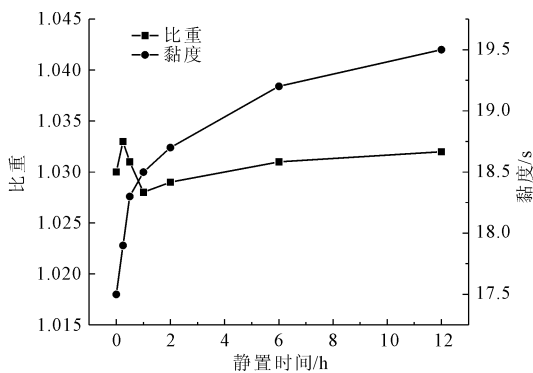


图 9 静置时间对泥浆参数影响

4.3 膨润土含量对泥浆性质的影响

膨润土造浆率高且易调节泥浆性能,因此膨润土含量对泥浆性质也有着重要影响。配置 1 000 ml 泥浆,设定搅拌速度为 750 r/min、搅拌时间为 45 min、静置时间为 1 h,以膨润土含量为变量进行试验,泥浆性能结果变化如图 10 所示。

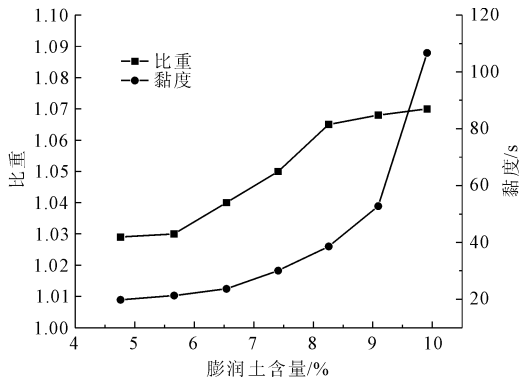


图 10 膨润土含量对泥浆参数影响

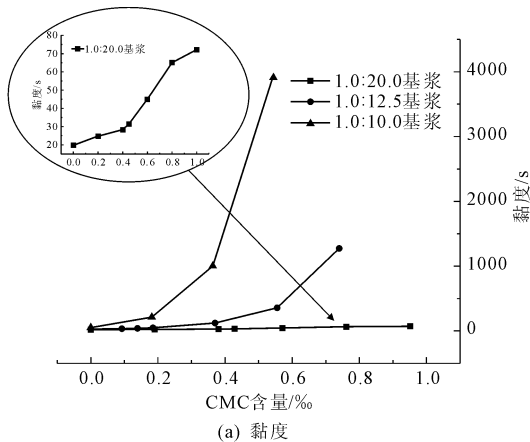
可以看出,膨润土量对泥浆的比重、黏度均有一定程度的影响。随着膨润土质量分数由 4.7% 增至 9.9%,泥浆比重由 1.03 均匀增至 1.07,膨润土含量每增加 1%,泥浆比重约增加 0.008。随着膨润土含量增加,泥浆黏度呈现指数型增加,当膨润土含量超过 9% 时,泥浆黏度增至 100 s 以上。

4.4 CMC 含量对泥浆性质的影响

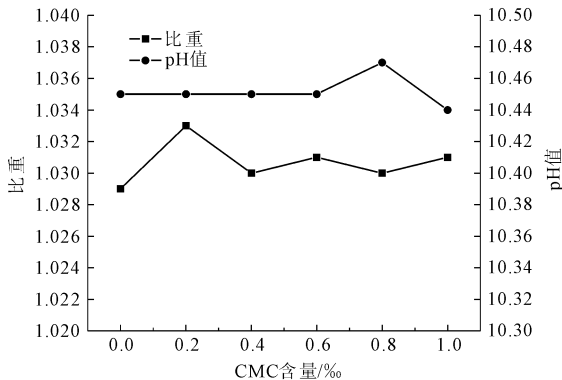
分别配置“膨润土: 水 = 1.0: 20.0、1.0: 12.5 和 1.0: 10.0(即膨润土 50/80/100 g、水 1 000 g)”三种“膨水比”的纯膨润土泥浆为基浆,设定搅拌速度为 750 r/min、搅拌时间为 45 min、静置时间为 1 h,以 CMC 含量为变量进行试验,泥浆性能结果变化如图 11 所示。

可以看出,CMC 含量对泥浆比重、pH 值影响不大,比重基本处于 1.028 ~ 1.033 范围内,pH 值基本处于 10.45 左右。而 CMC 含量对泥浆黏度有明显

的提升效果,随着 CMC 质量分数由 0‰ 增至 0.95‰,1.0: 20.0 基浆黏度由 19.8 s 增至 72.2 s,亦即平均 0.1‰ 的 CMC 即可使 1.0: 20.0 基浆黏度增加 5.5 s。



(a) 黏度



(b) 比重、pH 值(1.0:20.0 基浆)

图 11 CMC 含量对泥浆参数影响

CMC 对不同基浆的泥浆的增黏效果有所不同,当基浆中膨润土含量为 1.0: 20.0 时,加入 0.2‰ 的 CMC 可使基浆黏度由 19.8 s 提升至 24.8 s,当基浆中膨润土含量为 1.0: 12.5 时,加入 0.2‰ 的 CMC 可使基浆黏度由 30.1 s 提升至 48.9 s,基浆中膨润土含量为 1.0: 10.0 时,加入 0.2‰ CMC 可使基浆黏度由 52.8 s 提升至 213.4 s。CMC 对不同基浆的黏度影响差异与泥浆中的固体颗粒含量有关,因为泥浆中的黏土颗粒一般呈不规则状,泥浆颗粒的表面性质也非常不均匀,泥浆颗粒之间通过分子间作用力互相结合,构成网状絮凝结构。当泥浆中的黏土颗粒浓度增大,形成连续空间网状结构的效果也越明显,会导致泥浆黏度变得更大。所以,在添加 CMC 添加量应有效控制,当需要泥浆黏度快速提高到一个较高的施工水平时,可以考虑添加 CMC。

4.5 Na₂CO₃ 含量对泥浆性质的影响

分别配置“膨润土: 水 = 1.00: 6.25、1.00: 7.70、

1.00: 9.10、1.00: 10.00、1.00: 12.50 (即膨润土 160/130/110/100/80 g、水 1 000 g)”的纯膨润土泥浆,设定搅拌速度为 750 r/min、搅拌时间为 45 min、静置时间为 1 h,以 Na_2CO_3 含量为变量进行试验,泥浆性能结果变化如图 12 所示。

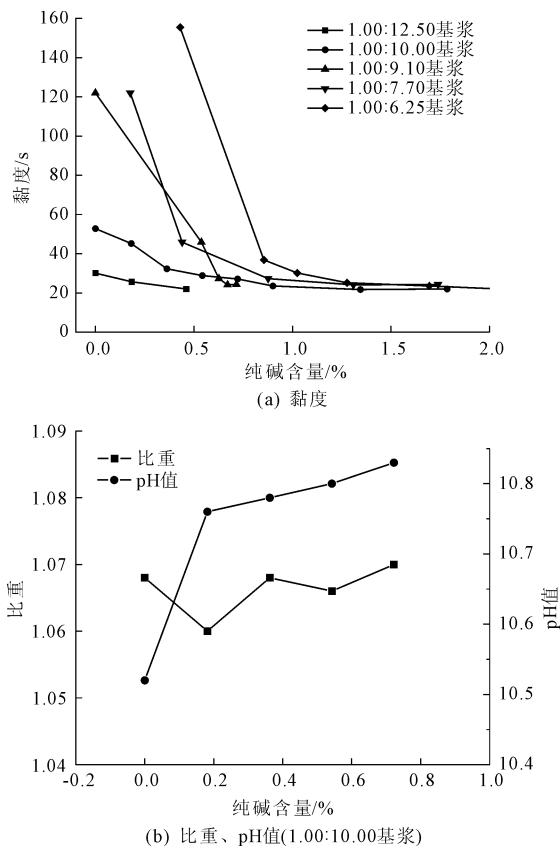


图 12 纯碱含量对泥浆参数影响

可以看出,纯碱含量对泥浆比重影响不大,其中 1.00: 10.00 的基浆比重基本处于 1.06 ~ 1.07 范围内,但是纯碱含量对泥浆的黏度有明显的降低效果,对泥浆 pH 值有一定的提升效果。随着纯碱质量百分比由 0 增至 1%,各组泥浆黏度均大幅度下降,基浆“膨水比”越大,黏度降低越明显。例如,1.00: 10.00 的基浆黏度由 52.8 s 降至 23.57 s,降低达 29.2 s;1.0: 7.7 的基浆黏度由 122.02 s 降至 27.33 s,降低达 94.7 s;当纯碱含量达到 1% 后,泥浆黏度均处于 30 s 左右的较低水平。因此,在施工应加入适量的纯碱,从而避免泥浆黏度过高影响流动性,同时提高泥浆的稳定性。

此外,pH 值随着纯碱含量增加亦有所提高,如对于 1.00: 10.00 的基浆,加入 0.7% 的纯碱可使得其 pH 值从 10.5 升至 10.8。需要注意的是,在水中加入膨润土之前就应加入纯碱,使之形成 Na_2CO_3 溶液,这对膨润土的分散效果影响更为明显。

4.6 细砂含量对泥浆性质的影响

由于施工中地下连续墙成槽不可避免地会穿越砂层或夹砂层,因此泥浆中可能会夹杂细砂,为研究这些细砂对泥浆性能影响,配置“膨润土: 水 = 1.0: 20.0、1.0: 12.5 和 1.0: 10.0 (即膨润土 50/80/100 g、水 1 000 g)”的三种纯膨润土泥浆为基浆,设定搅拌速度为 750 r/min、搅拌时间为 45 min、静置时间为 1 h,以细砂含量为变量进行试验,泥浆性能结果变化如图 13 所示。

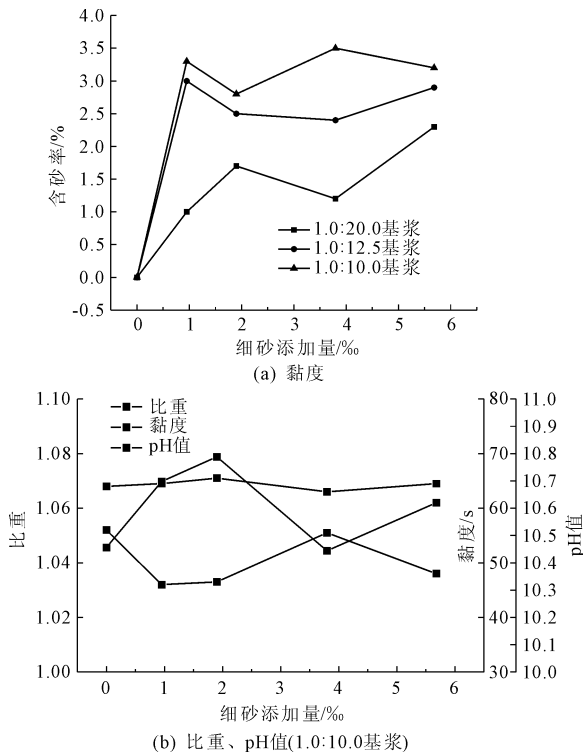


图 13 细砂含量对泥浆参数影响

可以看出,砂含量主要对泥浆的含砂率影响较大,但对其比重、黏度、pH 值影响很小。随着细砂添加量由 0 增至 2‰,各组泥浆含砂率均明显增加,但细砂添加量由 2‰增至 6‰时,各组泥浆含砂率并未有明显提高,而是处于波动状态,即存在上限值。根据上文分析可知,不同配比的泥浆,其黏度与重度差距较大,其中黏度越大,泥浆悬浮颗粒能力越强,因此含砂率上限也越高。因此,在施工中可通过控制黏度来一定程度上控制含砂率。

4.7 黏土含量对泥浆性质的影响

由于施工中地连墙成槽不可避免经过黏土层,因此泥浆中不可避免会夹杂些许黏土,为研究这些黏土颗粒对泥浆性能影响,配置膨润土: 水为 1: 20 (即膨润土 50 g、水 1 000 g) 的纯膨润土泥浆为基浆,设定搅拌速度为 750 r/min、搅拌时间为 45 min、

静置时间为 1 h,以黏土含量为变量进行试验,其中黏土取施工现场 <2-2> 粉质黏土,碾至成粉方可为实验所用,实验所得泥浆性能结果变化如图 14 所示。

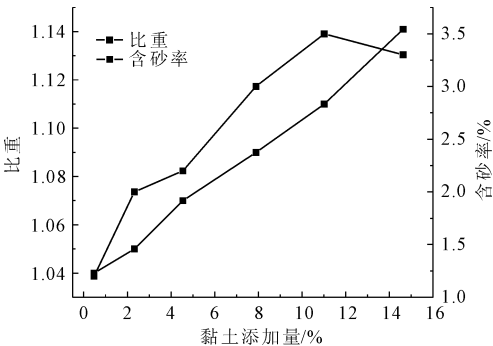


图 14 黏土含量对泥浆参数影响

可以看出,黏土含量对泥浆比重、含砂率影响较大,对其黏度、pH 值影响较小。随着黏土含量增多,比重得到明显上升,当黏土含量由 0% 增至 15% 时,泥浆比重由 1.04 增至 1.14,平均每 1% 的黏土,可使泥浆比重增加 0.006 7。同时,由于现场所取黏土中含有少量细砂,因此随着黏土添加量增加,含砂率亦有所上升,但当黏土含量达到 11% 之后,含砂率稳定在 3.2% ~ 3.5%,并未继续上升,与前文研究规律相符。同时由于黏土中存在黏性颗粒,因此泥浆黏度有少量上升,pH 有少量下降,但幅度均很小,可忽略不计。

5 施工泥浆优选配比与实测变形情况

根据单因素泥浆配比试验研究结果,施工新制泥浆按表 2 进行配置。经计算,满足拟定的泥浆参数控制指标,研究泥浆配比是否满足施工变形控制要求。

表 2 施工新制泥浆配比表

膨润土 品名	不同材料用量/kg				
	水	膨润土	CMC	Na ₂ CO ₃	其它外加剂
钠土(Ⅱ级)	1000	67	0.1	2.5~4.0	暂无

接收井地下连续墙施工前,在其周边布设相应监测点,如图 15 所示。

以第一幅槽壁施工为起点,直至全部槽壁施工完成,共 81 d。根据实测变形数据绘制地表沉降曲线,分析槽壁施工质量,如图 16 所示。可以发现,槽壁外部(JC3、JC6—JC10)地表沉降一直很小,槽壁内部(JC11、JC12)地表沉降在前期(0~56 d)也得

到了良好的控制。但在后期(56 d~81 d),由于使用旋挖机对复铣混凝土进行引孔时偏孔情况严重,修孔花费较长时间且效果不明显,旋挖机偏孔后铣槽机因纠偏板受限等原因,导致槽壁内部(JC11、JC12)地表沉降产生了比较明显的变形,最大累计沉降达到 -13.81 mm。考虑到本身施工机械受限的缘故,在该不利因素下槽壁稳定性虽然受到一定影响,但其施工质量总体可控,说明根据试验结果调整各组分量配置的泥浆满足工程需要,其配比选用较为合理。

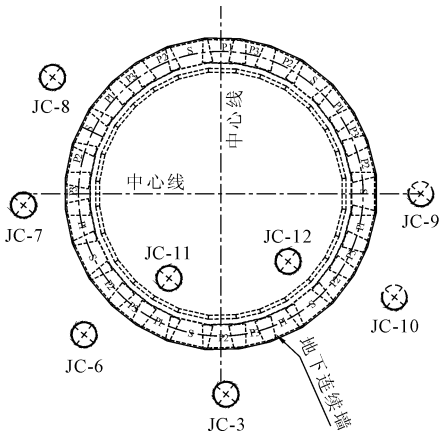


图 15 地下连续墙周边地表沉降监测点布置图

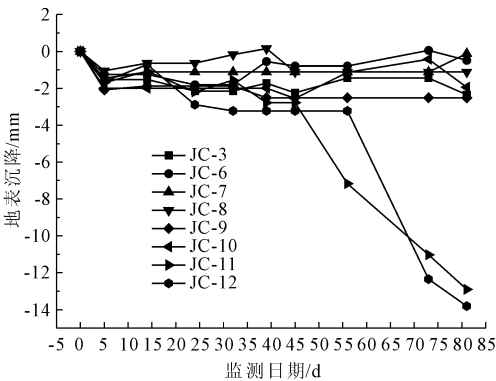


图 16 地下连续墙施工全过程周边地表沉降变化曲线

6 结 论

本文以滇中引水龙泉倒虹吸盾构接收井超深地下连续墙施工为工程背景,首先介绍了泥浆的配制材料和主要参数,而后通过泥浆配比试验,分别研究了钠基膨润土、CMC、Na₂CO₃ 等制浆材料对泥浆性质的影响,并得到以下结论:

(1) 泥浆配比试验的搅拌时间与静置时间对泥浆性质的影响不容忽视。随着静置时间增加,泥浆黏度先增加后稳定,随着搅拌时间的增加,泥浆比重先增大后稳定,因此在施工中应重视制浆过程,保证

泥浆参数处于合理范围。

(2) 增加膨润土含量可以一定程度上提高泥浆的比重、黏度。膨润土含量每增加 1%, 泥浆比重约增加 0.008。随着膨润土含量增加, 泥浆黏度呈现指数型增加, 当膨润土含量超过 9% 时, 泥浆黏度增至 100 s 以上。

(3) CMC 含量对泥浆黏度有明显的提升效果, 平均 0.1‰ CMC 即可使 1.0:20.0 基浆黏度增加 5.5 s。且随着泥浆膨水比的增大, CMC 对泥浆的增黏效果逐渐增强。

(4) 纯碱含量对泥浆的黏度有明显的降低效果, 对泥浆 pH 值有一定的提升效果, 基浆膨水比越大黏度降低越明显。

(5) 随着细砂含量的增加, 泥浆含砂率先增加后稳定, 存在上限值, 其上限值取决于泥浆悬浮颗粒能力越强, 根据试验结果泥浆悬浮能力可能与黏度有关。

(6) 黏土含量对泥浆比重、含砂率影响较大, 对其黏度、pH 值影响较小。平均每 1% 的黏土可使泥浆比重增加 0.006 7。且由于现场所取黏土难免夹杂细砂, 因此随着黏土添加量增加, 含砂率亦会有所上升。

参考文献:

[1] 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.

[2] 曹豪荣, 彭立敏, 雷明锋, 等. 地下连续墙槽壁失稳模式及其稳定性计算方法研究现状[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1743-1750.

[3] 董宏波, 王子阳, 钱宏春. 软土地层地下连续墙成槽护壁泥浆研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(2): 70-72.

[4] 张 山, 闫 飞, 于 涛. 咸水环境下防渗墙成槽泥浆配合比研究[J]. 山东水利, 2016(6): 31-32.

[5] 欧明喜, 戴志峰, 陈颖辉, 等. 地下连续墙黏性土夹砂层槽壁稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(4): 537-542.

[6] 王世君, 杨 才. 软土地区超载作用下地下连续墙的槽壁稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 99-104.

[7] 崔根群, 刘 瑶. 基于槽壁稳定性的地下连续墙成槽施工泥浆重度计算方法[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 178-183.

[8] 易岸峰. 地下连续墙成槽施工泥浆重度计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 1019-1023.

[9] 余海洋. 圆形深基坑围护结构优化设计研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(7): 665-673.

[10] 沈 浩, 邹丽敏, 王碧波. 超深圆形基坑地下连续墙成槽垂直度控制施工措施[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 83-87.

[11] 赵 民, 乌效鸣, 吴 迪, 等. 超深地下连续墙护壁泥浆优化[J]. 施工技术, 2016, 45(19): 20-22, 26.

[12] 杨武厂. 天津地区超深地下连续墙成槽关键技术[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 291-295, 301.

(上接第 51 页)

[27] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[28] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[29] 王 磊. 再生混凝土梁受剪承载力及可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[30] 李国强, 等. 工程结构荷载与可靠度设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[31] 张 明. 结构可靠度分析——方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[32] 肖建庄, 兰 阳. 再生混凝土单轴受拉性能试验研究

[J]. 建筑材料学报, 2006(2): 154-158.

[33] 彭 成, 肖茁良, 叶恒达, 等. 再生混凝土耐久性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 126-130.

[34] 刘华新, 柳根金, 王学志, 等. BFRP 筋再生混凝土无腹筋深梁抗剪承载力[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 17-22.

[35] Pradhan S, Kumar S, Barai S V. Shear performance of recycled aggregate concrete beams: an insight for design aspects[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 593-611.