

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.052

# 南京仙新路过江通道南锚碇超深地连墙施工 质量控制及关键技术

余有光, 孙成

(南京市交通运输综合行政执法监督局, 江苏 南京 210000)

**摘要:**针对南京仙新路过江通道南锚碇深基坑开挖深度大(58 m)、地质条件差(淤泥质粉质黏土层)、水头差大(60 m)的特点,为了保证施工质量、安全,对锚碇深基坑的地连墙施工质量控制及关键技术进行了研究。通过对槽壁加固施工工艺进行比选,在锚碇工程槽壁加固施工的基础上使用了双轮铣深层搅拌技术,并结合现场试验和计算优化了泥浆配制和槽壁预留变形量值。在成槽施工时通过“抓凿铣”相结合的施工方式,保证了成槽质量,同时对墙底注浆的范围和参数进行了优化,采取的相关施工工艺和措施不但保证了地连墙施工的质量和安,而且提高了施工效率,并合理地控制了工程造价。

**关键词:**地连墙; 双轮铣深层搅拌技术; 墙底注浆; 质量控制

随着大跨度桥梁的不断发展,悬索桥的跨度也越来越大,因此对悬索桥锚碇结构的要求也越来越高。同时锚碇工程往往位于江边,其地质条件往往较差,为了保证桥梁结构的安全性,锚碇基坑的开挖深度也在不断加深,同时环保要求也越来越高,给基坑工程的设计和施工带来很大的难度。而地连墙作为锚碇基坑施工时的主要防护结构,其施工的质量和安全性都尤为重要,因此研究超深地连墙施工的质量控制及关键技术具有重要意义。

## 1 工程概况

南京仙新路过江通道工程是连系南京江南和江北地区的重要通道之一,该工程距上游南京长江二桥约5.9 km,距下游南京四桥约4.3 km。采用悬索桥的方式跨越长江,主桥跨径1 760 m是目前中国第一、世

界第二大跨度悬索桥。

南京仙新路过江通道的南锚碇工程位于长江南岸的小漓江生态湿地公园内,结构形式为重力式锚碇,采用圆形地下连续墙基础作为基坑开挖施工的支护形式,基坑深58.4 m。南锚碇基础顶面高程为+13.085 m,基础开挖底面高程为-45.915 m。地下连续墙外直径为65 m,墙厚为1.5 m,墙底嵌入微风化砾岩3 m。南锚碇覆盖层主要为填土及软土,厚度为53~59 m,下伏基岩为砾岩,其中强、中风化砾岩层厚2~5 m,微风化砾岩层物理性质良好,地基承载力容许值为3 000 kPa,是理想的锚碇地连墙基础持力层。地下水位埋深为1.10~3.60 m,标高为11.05~16.39 m,水位年变化幅度为1.0~3.0 m,最大水头差达60 m(图1)。

该工程锚碇地连墙基础深度为60 m(A区)和63 m(B区),其后续基坑开挖深度为58.4 m,基坑深度较

的地基处理方案研究[J].城市轨道交通研究,2013(2).

[9] 朱连臣,王渭明,王有旗,等.卵石流塑地层盾构下穿铁路框架桥加固技术与变形控制研究[J].铁道标准设计,2018(9).

[10] TB 10182—2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程[S].

[11] 王家祥.昆明地铁1号线盾构隧道穿越密集居民区施工控制技术研究[J].中外公路,2018(1).

[12] 陈发东.盾构隧道施工对临近桥梁桩基及周围土体影响的模拟研究[J].中外公路,2018(6).

[13] 彭智勇,杨秀仁.基坑分块开挖参数对邻近地铁盾构隧道的变形影响分析[J].中外公路,2019(2).

收稿日期:2021-05-17(修改稿)

作者简介:余有光,女,硕士,教授级高工。E-mail:zjzsyg@163.com

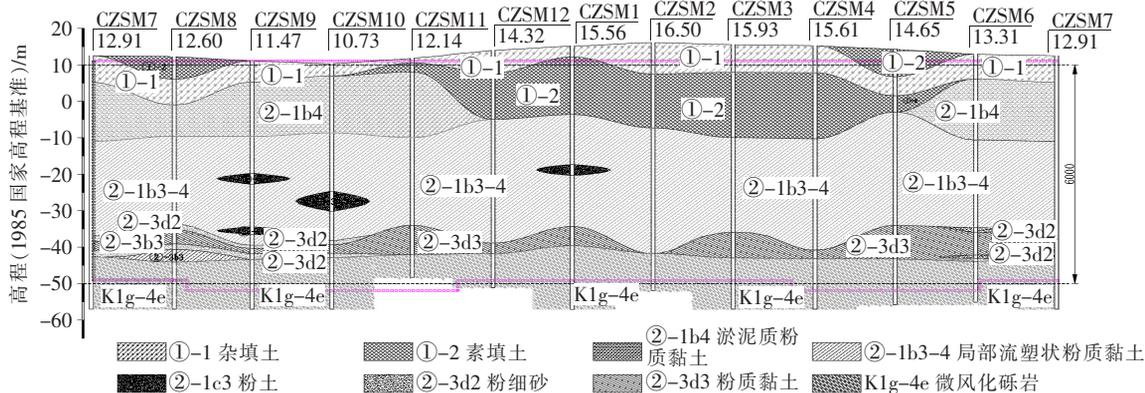


图1 南锚碇地质剖面图

大,因此施工时必须对地连墙垂直度进行精准控制以保证圆形地连墙幅间止水效果,同时地质资料也表明了锚碇地连墙下方软土层较厚(超过50m),槽壁稳定性差,成槽施工难度极大。因此基于该项目复杂的地质情况以及地连墙垂直度控制要求高的特点,需要对槽壁加固施工工艺进行研究比选,从而严格控制槽壁施工质量和稳定性;同时为了实现成槽时对槽壁稳定性的过程控制,还必须对泥浆指标进行研究;地连墙除了幅间止水外,其底部的沉渣层亦是其防水的薄弱点,还需对其进行墙底注浆。

## 2 槽壁加固

地连墙施工前,为防止地连墙成槽期间塌孔,保证地连墙成槽过程中槽壁的稳定性以及减少槽壁的变形,需要对槽壁进行预加固处理。目前悬索桥锚碇地连墙基础槽壁加固应用较多的工艺为高压旋喷桩和水泥搅拌桩。经过相关调研可知:高压旋喷桩最大施工深度较浅,在施工深度较深(超过30m)时无法保证成桩质量,同时施工效率也较低;虎门二桥、南京四桥、深中通道等锚碇深基坑槽壁加固采用的是水泥搅拌桩的施工工艺,水泥搅拌桩成桩的均匀性和加固效果要比高压旋喷桩好,其理论最大施工深度可达50m,但以上工程的水泥搅拌桩实际施工深度为15~20m,锚碇基础工程尚无施工超过30m的工程实例,同时高压旋喷桩和水泥搅拌桩二者都是通过水平旋转喷浆的方式切割搅拌周围土体进行地层加固,当加固深度较深、地层种类较多时,随着地层的变化,其加固范围的平面尺寸精度难以控制,成桩粗细不一,质量控制效果差。该工程最大水头差达60m,槽壁加固深度达48m,加固范围包括4种地层,加固层需穿过软塑状的粉质黏

土地层,因此采用水泥搅拌桩或高压旋喷桩施工无法保证施工深度较大时的成桩质量和防渗要求。而通过相关调研,在水工领域应用较多的双轮铣深层搅拌技术,是将双轮铣削成槽工艺和传统的深层水泥土搅拌工艺相结合的一种新型地下深层搅拌工法,由铣、削、搅、气、浆共同作用,通过垂直向下铣削搅技术来生成墙体,形成的墙体均匀密实,幅间连接为完全铣削结合,接合面无冷缝且接头少、整体性强,防渗性能好,自动化程度高,施工产生的污染小、扰动低,墙体垂直度也可控制在3‰以内,在中国有最大施工深度达到55m的工程实例,但其成本比水泥搅拌桩略高。为了保证工程质量、施工安全以及满足环保要求,该项目决定应用双轮铣深层搅拌技术进行地连墙的槽壁加固,在锚碇工程中使用该工法进行槽壁加固在中国尚属首次。

该工程应用双轮铣深层搅拌技术施工的内侧槽壁共计75幅,幅间搭接长度为23.74cm;外侧槽壁共计80幅,幅间搭接长度为21.69cm。采用的两喷两搅施工工艺如图2所示。

在施工过程中,为了防止槽壁变形造成地连墙厚度不够影响成墙质量,以及地连墙成槽施工时因槽壁变形过大造成施工设备卡机的情况,需要在内外侧槽壁与地连墙之间预留合理的变形量值。若预留变形量过大则会导致成槽施工中成槽设备的施工厚度不够而在槽壁和地连墙之间留有泥皮以及混凝土超耗过多导致造价变高,因此通过工程类比及计算分析,确定内外侧槽壁与地连墙间各预留5cm的预留变形量。其中计算分析选取了最不利工况进行有限元计算,即成槽施工时,施工设备履带吊及铣槽机最大施工荷载作用于最不利地层时槽壁的变形情况。有限元模型计算时,考虑槽段宽6.3m,厚1.5m,深60m,周围土体尺

寸为 32 m×32 m×65 m,侧面仅约束法向位移,底面( $z = -65$  m)三向位移全约束,地表面( $z = 0$  m)为自由面。

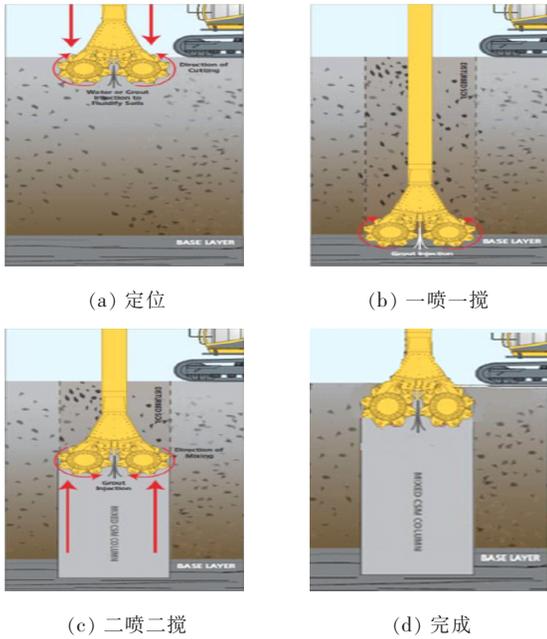


图 2 两喷两搅示意图

### 3 成槽施工

南锚碇地下连续墙主要采用液压铣槽机进行成槽施工,地连墙结构长度分为两种:A 区段地连墙(总长度为 60 m)和 B 区段地连墙(总长为 63 m),厚度为 1.5 m;地连墙施工共划分为 48 个槽段,其中 I 期槽段采用三铣成槽,共 24 个;II 期槽段采用一铣成槽,共 24 个,地连墙槽段之间采用铣接法进行搭接,搭接长度 0.25 m,如图 3 所示。

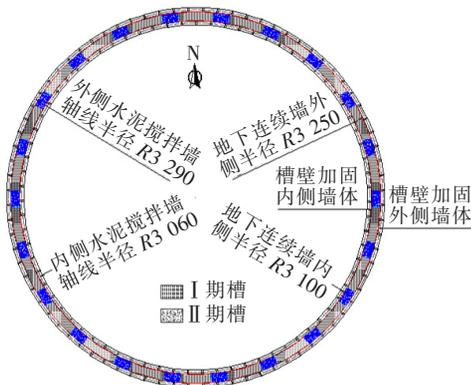


图 3 南锚碇地连墙分区及槽段划分图(单位:cm)

同时为应对不同地质情况以提高施工效率及减小设备损耗,南锚碇地下连续墙又配备了 1 台 GB80S 型液压抓斗和 4 台 CZ-6 型冲击钻、2 台 BC-40 型液压铣槽机进行搭配施工。

I 期槽段开挖表层 10 m 左右的淤泥质粉质黏土层时利用液压抓斗开挖成槽以提高施工效率以及节约成本。液压抓斗机定位后,平行于导墙内侧面进行抓斗下放,使抓斗自行进入导墙内,避免强力推入,以保证成槽精度,同时在每幅连续墙施工时,先抓取两侧土体,后抓取中心土体,防止抓斗两侧受力不均而影响槽壁垂直度。I 期槽段开挖地面 10 m 以下的软土层时采用铣槽机进行施工。铣槽机成槽时,利用铣槽机自带的纠偏装置,做到随挖随纠以确保成槽垂直度要求,同时在铣槽时要注意钢丝绳的受力状态,以便于控制精度。进入基岩成槽施工时,当液压铣槽机施工工效低于 0.5 m/h 或铣齿磨损严重时,则不采用纯铣法,改用凿铣法。凿铣法即采用 CZ-6 型冲击钻机配合液压铣槽机成槽。先用冲击钻冲击破碎基岩,然后下放液压铣槽机进行成槽施工。

在进行槽段施工过程中采用 UDM100 超声波成槽检测仪对应用双轮铣深层搅拌技术施工的槽壁成槽质量进行检测,试验段超声波成槽检测和试验段垂直度偏差情况如图 4、5 所示。

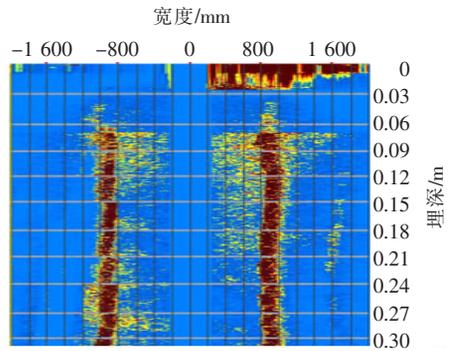


图 4 试验段超声波成槽检测

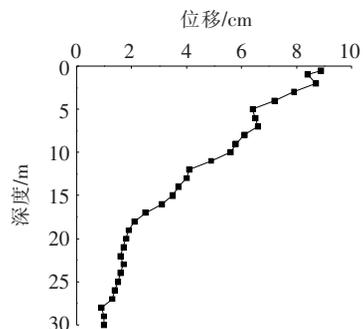


图 5 试验段垂直度偏差情况

由图4、5可知:在地表深度15 m的范围内槽壁的位移量值略大,槽壁的下部垂直度控制较好,上部位移较大的原因主要是受槽壁施工时施工设备荷载的作用,实测最终垂直度偏差最大值为9 cm,该段槽壁深度约为51 m,垂直度最大偏差为1/574,设计要求成墙垂直度偏差为1/400,表明双轮铣深层搅拌技术施工精度控制高,完全符合设计对垂直度偏差要求。

## 4 泥浆配制

泥浆是保障地连墙成槽稳定性的关键,成槽泥浆是由膨润土、聚合物(CMC等)、纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )和水按一定比例配制而成。泥浆贯穿地连墙施工的整个过程,具有护壁、携渣、清孔、冷却设备及减小钻进阻力的作用。其中泥浆液面与地层间水位存在压力差,泥浆水分向槽壁内渗入,使黏土颗粒黏附在槽壁上,形成泥膜,若形成的泥膜质量不佳,则容易在泥膜和土层之间

形成渗透带从而导致槽壁出现坍塌,因此泥浆质量是保障地层成槽稳定的关键。

该工程地质覆盖层主要为冲洪积层,上部软弱层为淤泥质粉质黏土地层,地层层理结构明显,水平渗透系数大,在局部又存在粉细砂地层,泥浆和地层之间极易出现渗透带,影响泥膜护壁效果。为保证成槽质量,通过采用优质钠基膨润土进行泥浆配制,结合现场试验对泥浆参数进行全过程动态管理,通过调整新配制泥浆、循环泥浆的膨润土、聚合物(CMC等)、纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )的添加比例等措施保证了成槽质量,同时成槽过程中安排专人巡查,以防止泥浆漏失造成槽壁坍塌,该工程的泥浆性能指标如表1所示。

## 5 墙底注浆

在注重地连墙本身质量控制和防水性能的同时,地连墙墙底的沉渣层也是需要防水的重点,沉渣层主

表1 泥浆性能指标

检查项目		单位	性能指标	检查方法	
新配制泥浆	比重		1.03~1.10	比重计	
	黏度	黏性土	s	20~25	黏度计
		砂土	s	25~35	
	胶体率	%	$\geq 95$	带刻度量杯	
	失水率	mL/min	$\leq 1/3$	尺量	
	泥皮厚度	mm	$\leq 3$ mm		
	稳定性		同胶体率		
pH值		7~9	pH试纸		
循环泥浆	比重		1.05~1.25	比重计	
	黏度	黏性土	s	20~30	黏度计
		砂土	s	30~40	
	失水率	mL/min	$\leq 0.5$	尺量	
	pH值		7~9	pH试纸	
清基(槽)地下连 的泥浆续墙	比重	黏性土	1.10~1.15	比重计	
		砂土	1.10~1.20		
	黏度	s	17~20	黏度计	
	含砂率	%	$\leq 2$	含砂率计	
	pH值		7~9	pH试纸	
	废弃泥浆	比重		$> 1.25$	比重计
黏度		黏性土	s	$> 25$	黏度计
		砂土	s	$> 35$	
pH值			$> 9$	pH试纸	

要由悬浮泥浆中的大颗粒组成,其渗透性很大,在基坑内外巨大的水头差作用下,基坑极易出现涌水涌砂的风险,因此必须对地下连续墙墙底的沉渣层进行防水处理。桥梁锚碇地连墙基础往往采用帷幕注浆的方式来防水控制,持力层基岩的透水性是帷幕灌浆设计的关键,如广东省虎门二桥东锚碇以及深中通道东锚碇,均采用灌浆帷幕的方式对地连墙底部强、中风化基岩裂隙进行封水,这两项工程的地连墙持力层均为中风化花岗岩层,其渗透系数为  $0.257 \sim 0.386 \text{ m/d}$ ,属于弱透水层,因此其墙底灌浆帷幕深度均较深达到了  $10 \text{ m}$ 。该工程地连墙墙底持力层为微风化砾岩,渗透系数为  $0.009 \text{ m/d}$ ,属于微透水层,透水性差,同时槽壁加固采用了双轮铣深层搅拌技术,使得施工形成的墙体沉渣少、抗渗性能好,故该工程地连墙防水只需将地连墙墙底与基岩接触段的岩层进行帷幕注浆即可,即钻孔深度为超出地连墙墙底  $0.5 \text{ m}$ (入岩  $0.5 \text{ m}$ )即可,地连墙施工时在钢筋笼上焊接预埋钢管作为注浆管,注浆管共分为内外两排,沿地连墙呈双圆筒状布置,为了防止注浆压力过大导致地连墙底部混凝土开裂,经过注浆测试,现场注浆压力保持为  $1.2 \sim 1.3 \text{ MPa}$ 。

在灌浆结束  $14 \text{ d}$  后分别进行了孔压水试验检测;采用单点法进行压水试验。压水试验以透水率  $q$  表示,检查合格标准为  $q \leq 3L_u$ 。注浆结束后,按照检查孔的数量为灌浆孔总数  $4\%$  的原则设立  $7$  个检查孔,对  $7$  个检查孔进行压水试验,采集数据经过计算得到渗透率如图 6 所示。

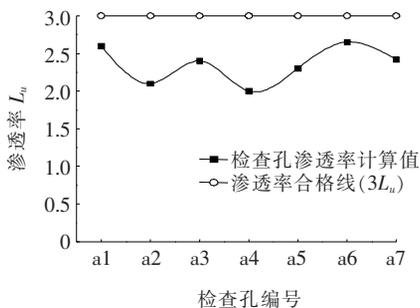


图 6 检查孔渗透率计算结果

从图 6 可以看出:  $7$  个检查孔的渗透率均小于  $3L_u$ ,表明灌浆质量合格,合格率为  $100\%$ 。

## 6 结论

南京仙新路过江通道南锚碇是开挖深度较深的基坑工程,其地质条件差,水头差大,地连墙的质量、防渗控制以及施工的工期、环保等要求均较高。该文通过对施工工艺进行研究,不但保证了地连墙施工的质量和安,而且提高了施工效率并合理地控制了工程造价,其主要施工经验总结如下:

(1) 使用双轮铣深层搅拌技术进行地连墙的槽壁加固施工,其成墙质量好,施工效率高,污染小,垂直度和防渗性能均能满足质量要求。

(2) 成槽施工时通过合理组织搭配施工设备以及优化泥浆配比,有效地保障了成槽质量,墙底注浆可以通过持力层基岩的透水性来进行设计,在基岩透水性较差时,仅对地连墙墙底与基岩接触段的岩层进行帷幕注浆即可。

### 参考文献:

- [1] 刘杨,刘维,史培新,等.超深地连墙成槽富水软弱层局部失稳理论研究[J].岩土力学,2020(S1).
- [2] 邱明明,杨果林,申权,等.深厚砂层地下连续墙槽壁稳定性特征及影响因素研究[J].铁道科学与工程学报,2020(5).
- [3] 刘钢立,曹东娇,李新龙,等.淤泥覆盖下高强度硬岩地下连续墙成槽技术研究[J].现代隧道技术,2020(S1).
- [4] 卢伟.“上软下硬”复合地层地连墙快速成槽施工关键技术研究[J].铁道科学与工程学报,2020(1).
- [5] 张少文,程康,郝郁清.苏州软土地区地铁基坑墙顶竖向位移变形特性分析[J].中外公路,2018(6).
- [6] 朱治宝.虎门二桥坭洲水道桥西锚碇基坑施工监测技术[J].桥梁建设,2016(5).
- [7] 胡风明,宋健,闫磊,等.危岩带下深基坑开挖关键技术与仿真分析[J].中外公路,2020(4).
- [8] 姚志安,陈炳耀.深中通道伶仃洋大桥东锚碇基坑支护施工关键技术[J].桥梁建设,2020(3).
- [9] 金亚兵.地连墙槽壁加固深度和宽度计算方法研究[J].岩土力学,2017(S2).
- [10] 王海林.跨海隧道填海围堰内深大基坑支护选型与设计技术[J].中外公路,2018(6).