

DOI: 10.7672/sgjs2025120118

# 巨厚砂层超深双轮铣(CSM)防渗墙设计与施工\*

胡志红<sup>1</sup>, 汪泉庆<sup>2</sup>, 罗 鹏<sup>3</sup>

(1. 武汉交通工程建设投资集团有限公司, 湖北 武汉 430048; 2. 中交路桥建设有限公司, 北京 101107; 3. 中交路桥华东工程有限公司, 上海 201203)

[摘要] 以汉南长江大桥南锚碇沉井基础液压双轮铣削搅拌(CSM)工法墙为研究对象, 该工程毗邻长江大堤, 施工区环境复杂, 地下水位高, 砂基地层与江水连通, 场地水位随季节变化明显, 存在水力通道, 易造成管涌等风险。锚碇沉井基础施工周期覆盖长江汛期, 为避免汛期对沉井施工造成影响, 沉井四周设置内径为132m的圆形落底式液压双轮铣搅拌(CSM)工法墙。采用数值计算, 结果表明, 在沉井下沉不同工况下均满足要求。通过工艺试验, 优化设备性能需求, 创新提出“钻+铣”施工技术, 提高施工工效、保证墙体垂直度与入岩深度, 优化分段“四铣四喷”成墙技术与水泥掺入比, 取芯验证了成墙完整性、墙体强度与渗透性, 确保长江大堤及周边环境安全, 保障锚碇沉井顺利下沉。

[关键词] 沉井基础; CSM工法; 防渗墙; 复杂地层; 数值模拟; 施工技术

[中图分类号] U445.55

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)12-0118-06

## Design and Construction of Ultra-deep and Double-wheel Milling (CSM) Anti-seepage Wall in Extremely Thick Sandy Stratum

HU Zhihong<sup>1</sup>, WANG Quanqing<sup>2</sup>, LUO Peng<sup>3</sup>

(1. Wuhan Communications Investment Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430048, China;

2. Road &amp; Bridge International Co., Ltd., Beijing 101107, China;

3. Road &amp; Bridge East China Engineering Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract:** In this paper, the hydraulic double-wheel milling and mixing (cutter soil mixing, CSM) method wall of the south anchorage caisson foundation of Hannan Yangtze River Bridge is taken as the research object. The project is adjacent to Yangtze River levee. The environment of the construction area is complex, the groundwater level is high, the sand base stratum is connected with the river water, the site water level changes significantly with the seasons, and there is a hydraulic channel, which is easy to cause piping and other risks. The construction period of the foundation of the anchor caisson covers the flood season of Yangtze River. In order to avoid the impact of the flood season on the construction of the caisson, a circular bottom dropping hydraulic double-wheel milling mixing construction wall with an inner diameter of 132m is set around the caisson. The numerical calculation results show that the requirements are met under different conditions of caisson sinking. Through the process test, the equipment performance requirements were optimized, and the drilling-milling construction technology was innovated to improve the construction efficiency, ensure the wall perpendicularity and rock penetration depth, optimize the sectional “four milling and four spraying” wall forming technology and cement mixing ratio, and core sampling verified the integrity, strength and permeability of the wall, ensure the safety of Yangtze River embankment and surrounding environment, and ensure the smooth sinking of the anchor caisson.

**Keywords:** open caisson foundation; CSM method; anti-seepage wall; complex stratum; simulation; construction

\* 中交路桥建设有限公司科技研发项目: 临近长江大堤巨厚砂层双轮铣 CSM 超深沉井防渗墙施工技术研究 (RP2024044126)

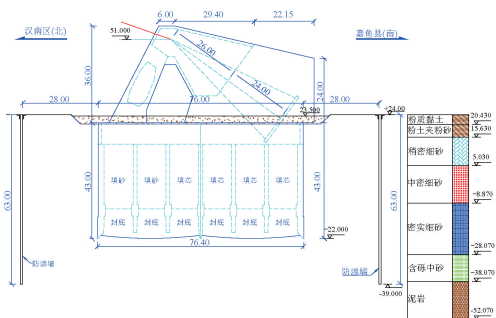
[作者简介] 胡志红, 高级工程师, E-mail: 710231262@qq.com

[收稿日期] 2025-03-20

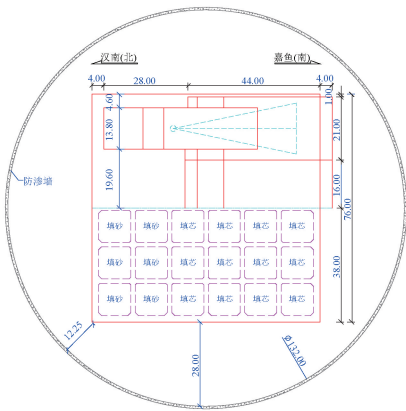
本文依托新建汉南长江大桥南锚碇沉井基础,采用落底式液压双轮铣搅拌(CSM)工法墙作为沉井下沉时的隔水屏障,减小长江汛期高水位对沉井基础安全的影响,确保沉井下沉及周边环境安全,使其达到安全、适用、经济、绿色环保的目的。

### 1 工程概况

汉南长江大桥主跨设计为1 600m双主缆单跨双铰钢箱梁悬索桥,跨径布置为(565+1 600+565)m,南锚碇沉井基础钢壳节段长、宽均为76.4m,混凝土段长、宽均为76.0m且高为43.0m,沉井下沉深度达46.0m,顶标高21.000m,底标高-22.000m,施工场地标高24.000m,距长江大堤坡脚最近120m,距长江水线边约650m。为保障沉井下沉安全、提供隔水屏障、减小下沉时对周围环境的影响、进一步保护长江大堤,沿沉井基础四周呈圆形布置落底式CSM工法防渗墙,墙厚0.85m、深63.0m、内径132m,墙底嵌入泥岩层 $\geq 1.0\text{m}$ ,墙体28d无侧限抗压强度 $\geq 2.0\text{MPa}$ ,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ ,允许渗透比降 $>40$ ,墙体内插入41.5m深HM588型钢,型钢标准间距为1.5m,墙顶设置0.9m $\times$ 1.0m混凝土帽梁。结构如图1所示。



a 立面



b 平面

图1 南锚碇结构(单位:m)

Fig. 1 Structure of southern anchor caisson (unit: m)

### 2 水文地质条件

#### 2.1 地质与水文地质条件

南锚碇处覆盖顶层为厚5.8~12.5m粉质黏土、粉土夹粉砂,为相对隔水层;底部以厚47.4~57.8m细砂、含砾中砂为主,为强透水性地层,下伏泥岩厚15.4~20.0m,为相对隔水层。场地地质剖面如图2所示。

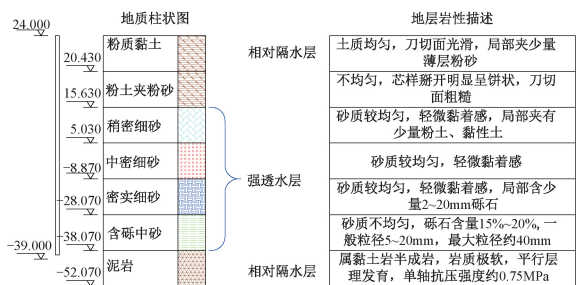


图2 场地典型地质剖面(单位:m)

Fig. 2 Typical geological section of the site (unit: m)

锚碇区地下水包括上层滞水、松散岩类孔隙水、基岩裂隙水,其中上层滞水赋存于粉质黏土中,松散岩类孔隙水主要赋存细砂层和江水存在直接水利联系,水位动态随季节性变化,水量丰富,基岩裂隙水的水量受节理、裂隙发育程度控制。

#### 2.2 水文条件

长江汛期多在5—10月,7—8月水位最高,武汉地区长江最高洪水水位为27.13m,最低枯水位为8.87m,水位升降幅度18.26m。水位变化如图3所示。

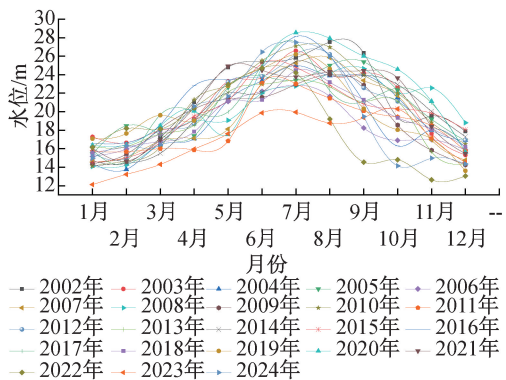


图3 近20年水位变化曲线

Fig. 3 Water level change curves over the past 20 years

桥位处最高通航水位29.27m,最低通航水位11.010m。近20年5月最高水位24.920m,近20年10月最高水位24.580m,近20年最高水位28.540m。

### 3 防渗墙设计

#### 3.1 工况分析

防渗墙的主要作用是在沉井下沉阶段阻断场

地内地下水与长江水力联系,保证场地内降水深度,同时对土体起到一定的支护与加强作用,减小对长江大堤的影响。故在防渗墙内外形成水头差的情况下,其既受墙内外的土压力,也受墙内外的水压力,受力计算简图如图4所示。

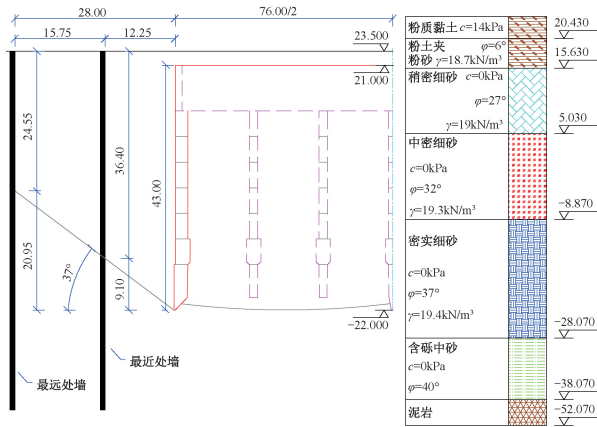


图4 受力计算简图(单位:m)

Fig. 4 Force calculation diagram (unit: m)

1) 防渗墙内外土体压力差。在沉井下沉过程中会扰动周边土体,使防渗墙有向沉井方向变形的趋势,考虑防渗墙内侧受扰动土体按主动土压力计算,防渗墙外侧土体按静止土压力计算。因此,取最不利工况,即沉井下沉至持力层,此时沉井外侧受扰动土体范围最大,扰动土体范围按砂土自然休止角。根据计算可知,距离沉井最近处防渗墙内侧土体受扰动深度为36.4m;距离沉井最远处防渗墙内侧土体受扰动深度为24.55m。

2) 防渗墙内外水头差。防渗墙外侧水位达到警戒水位24.500m,防渗墙内侧进行降排水施工,沉井首次采取排水下沉,水位降深17.2m;第2次沉井下陷仍采用排水下沉,水位降深26.2m;第3次下沉采用不排水下沉,保证防渗墙内外水头差相同。故取最不利工况,防渗墙外侧水位达到原地面高度,内侧降水深度达26.2m,防渗墙内外水头差达26.2m。

### 3.2 数值模拟与验算

#### 3.2.1 建立模型

采用有限元软件根据工况计算防渗墙变形及内力。计算模型尺寸为100m×200m×100m(长×宽×高),土体本构模型采用硬化土模型,如图5所示。

防渗墙为塑性混凝土材料,模量一般为500~800MPa,本计算取650MPa,型钢模量取206GPa,防渗墙用板单元模拟,根据刚度等效原理,可计算出防渗墙等效弹性模量,如表1所示。

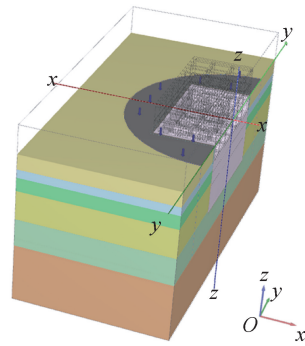


图5 有限元计算模型

Fig. 5 Finite element calculation model

表1 结构构件线弹性模型参数取值

Table 1 Parameters of linear elastic models of structural members

单元	本构模型	重度 $G/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
防渗墙(内插型钢)	弹性	3	3.80	0.2
防渗墙(未插型钢)	弹性	3	0.65	0.2
C35混凝土	弹性	25	31.50	0.2

#### 3.2.2 计算结果

根据数值计算结果,距离沉井最远处防渗墙水平位移最大81.3mm,发生在地面以下约20m处;弯矩最大204.4kN·m/m,发生在地面以下约22m处;剪力最大值164.5kN/m,发生在地面以下24.5m处。防渗墙抗弯承载力 $99.0\text{MPa} < f = 215\text{MPa}$ ,防渗墙抗剪承载力 $75.0\text{MPa} < f_v = 125\text{MPa}$ ,型钢与水泥土间错动受剪承载力 $117\text{kPa} < \tau = 222\text{kPa}$ ,均满足规范要求。相关验算结果如表2所示。

### 4 防渗墙工艺试验

目前鲜有CSM工法机施工深度达63m,结合地质环境、空间环境及设备性能,采用凯氏方形导杆结构的SC65型工法机进行施工。为确保SC65型工法机在该环境下施工的可行性、稳定性和效率,并探究其在实际应用中的最佳操作参数和施工技术,在现场选取一处具有代表性的区域进行工艺试验,水泥参量分别为25%,30%,通过取芯验证墙体强度、渗透系数、完整性及设备选择的合理性。

#### 4.1 防渗墙强度检测结果

在成墙28d及60d后选择墙幅具有代表性部位采用双套管取芯,芯样选取位置沿墙体深度方向,每10m取样1组,每组3件试块。

根据芯样检验结果,采用25%水泥掺入比,28d龄期单块芯样试件无侧限抗压强度均 $< 2.0\text{MPa}$ ,试块平均强度1.2MPa,数据离散性较大;采用30%水泥掺入比,28d龄期单件芯样试件无侧限抗压强度均 $> 2.0\text{MPa}$ ,测得试块平均强度为3.02MPa,60d龄期平

表 2 防渗墙变形及内力验算结果

Table 2 Checking results of deformation and internal force of anti-seepage wall

计算工况	最大水平位移/mm	弯矩 $M_{11}$ / [(kN · m) · m <sup>-1</sup> ]	剪力 / (kN · m <sup>-1</sup> )
沉井首次下沉 (降水 17.2m)	<p>总位移 <math>w_x</math> (最大 100 倍) 最大值 = 0.02034 m (单元 380 在节点 5789) 最小值 = 0.0000 m (单元 1 在节点 349)</p> <p>Max:70.3</p>	<p>弯矩 <math>M_{11}</math> (最大 0.05000 倍) 最大值 = 142.140 kN/m (单元 1917 在节点 52948) 最小值 = -204.488 kN/m (单元 409 在节点 57730)</p> <p>Max:204.4</p>	<p>剪力 <math>Q_{13}</math> (最大 0.05000 倍) 最大值 = 164.546 kN/m (单元 142 在节点 6055) 最小值 = -96.318 kN/m (单元 378 在节点 57872)</p> <p>Max:164.5</p>
沉井二次下沉 (降水 26.2m)	<p>总位移 <math>w_x</math> (最大 50.0 倍) 最大值 = 0.08125 m (单元 380 在节点 57767) 最小值 = 0.0000 m (单元 1 在节点 349)</p> <p>Max:81.3</p>	<p>弯矩 <math>M_{11}</math> (最大 0.05000 倍) 最大值 = 102.741 kN/m (单元 1806 在节点 53013) 最小值 = -122.241 kN/m (单元 409 在节点 57730)</p> <p>Max:122.2</p>	<p>剪力 <math>Q_{13}</math> (最大 0.05000 倍) 最大值 = 138.244 kN/m (单元 149 在节点 7657) 最小值 = -73.95 kN/m (单元 1639 在节点 6855)</p> <p>Max:138.2</p>
沉井三次下沉 (不降水)	<p>总位移 <math>w_x</math> (最大 200 倍) 最大值 = 0.03321 m (单元 380 在节点 57882) 最小值 = -0.01735 m (单元 54 在节点 9775)</p> <p>Max:33.2</p>	<p>弯矩 <math>M_{11}</math> (最大 0.05000 倍) 最大值 = 63.604 kN/m (单元 993 在节点 51359) 最小值 = -87.194 kN/m (单元 115 在节点 7915)</p> <p>Max:87.2</p>	<p>剪力 <math>Q_{13}</math> (最大 0.05000 倍) 最大值 = 57.59 kN/m (单元 194 在节点 6285) 最小值 = -40.08 kN/m (单元 1013 在节点 51647)</p> <p>Max:57.6</p>

均强度为 3.71MPa。综合芯样的连续性、完整性及成墙质量和试验报告,推荐后续施工采用 30% 水泥掺入比满足设计要求。芯样强度曲线如图 6 所示。

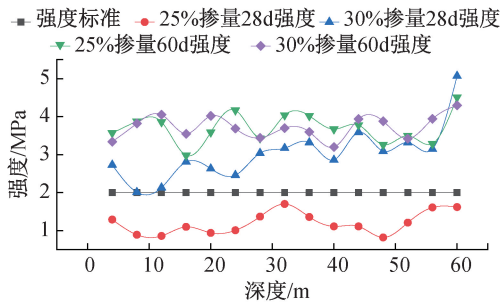


图 6 芯样强度曲线

Fig. 6 Strength curves of core samples

4.2 防渗墙渗透系数试验结果

对套管取芯孔进行注水试验,检验防渗墙的防渗效果。通过注水试验验证防渗墙最大防渗系数

为  $9.69 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 小于设计值, 满足防渗要求。

4.3 芯样完整性评价

取出的芯样实物除顶部较为松散外,芯样自上而下较为完整,连续性好,破碎较小,芯样呈水泥土颜色,且自上而下颜色较为均匀,手掰易碎,底部靠近泥岩层芯样强度明显高于细砂层,细砂层芯样整体较均匀,综合评价防渗墙完整性较好,如图 7 所示。



图 7 防渗墙取芯完整性实物

Fig. 7 Physical integrity of core sampling for anti-seepage wall



打前涂刷减摩剂,辅助型钢依靠自重插入水泥石。涂刷前,应清除 H 型钢表面污垢及铁锈,待第 1 遍涂刷的减摩剂风干后,需进行第 2 次补充涂刷,保证 H 型钢每个接触面都进行过 2 次涂刷。减摩剂必须用电热棒加热至完全熔化,用搅棒搅拌时感觉厚薄均匀,才能涂敷于 H 型钢上,否则涂层不均匀,易剥落。H 型钢起吊由 1 台 XGC100-II 型和 1 台 SCC500A-6 型履带式起重机完成,墙顶设置型钢定位框,确保 H 型钢插入搅拌墙内垂直且居中。搅拌成墙 20min 后开始进行插入 H 型钢施工,间隔时间最迟 2h,否则 H 型钢插入困难,影响成墙质量。

#### 5.4 施工控制要点

1) 注浆量控制:注浆量大小由装在操作台的无级电动机调速器和自动瞬时流速计及累计流量计监控,在 CSM 工法机操作室大屏显示提升高度、注浆总量。

2) 特殊地层搅喷:SC65 铣削机铣进至含砾中砂与泥岩层时严格控制铣进、搅喷速度,确保搅喷均匀。

3) 垂直度控制:SC65 铣削机集成倾角传感器,实时监测并纠偏,配合全站仪复核。

4) 入岩判定:通过主机的深度传感器数据和计算钻杆长度与旋挖钻机引孔揭示地质层进行深度控制,通过钻杆跳动频率与压力突变作为辅助判定依据,确保墙端嵌入泥岩 $\geq 1\text{m}$ 。

5) 监测体系:布设墙顶位移、地表沉降及水位监测点,预警值分别为 30,33.3mm 及 1.5m。

#### 6 结语

汉南长江大桥锚碇区 CSM 工法防渗墙深 63m,是目前国内桥梁工程中应用深度最大的 CSM 工法防渗墙。CSM 工法防渗墙施工需依次穿越巨厚砂层和形似“磨刀石”的卵石层,最后深入岩层,目前国内相应施工深度的 CSM 工法机稀缺,整机桩架达 70m 高,成墙垂直度、强度、防渗系数、入岩深度等质量控制难度大。首次采用“钻+铣”成墙工艺,首先利用旋挖钻机引孔作为 CSM 工法机导向孔,然后利用 CSM 工法机沿导向孔向下铣削,充分发挥旋挖钻机垂直度高与 CSM 工法机铣削速度快的优势,施工工效提高 40%,同时提高成墙质量。

#### 参考文献:

[1] 唐昊陵,刘松玉,章定文,等.基于强度和渗透试验的 SMC 等厚度水泥土搅拌墙成墙效果研究[J].施工技术,2017,46(S2):6-11.  
TANG H L,LIU S Y,ZHANG D W, et al. Experimental research on strength permeability and penetration test of SMC deep mixing wall[J]. Construction technology,2017,46(S2):6-11.

[2] 魏豪,赵俊臣.双轮铣深搅(CSM)工法在深厚软土覆盖层锚碇基础中的应用[J].城市道桥与防洪,2024(2):173-175,196,19-20.  
WEI H,ZHAO J C. Application of CSM construction method in anchorage foundation of deep soft soil covering layer[J]. Urban roads bridges & flood control,2024(2):173-175,196,19-20.

[3] 张后利,李琼波,陈浩.沿海城区双轮铣等厚度水泥土搅拌墙全封闭止水施工技术[J].建筑技术开发,2022,49(24):110-112.  
ZHANG H L,LI Q B,CHEN H. Construction technology of fully enclosed water stop of cement soil mixing wall with equal thickness by double wheel milling in coastal urban areas[J]. Building technology development,2022,49(24):110-112.

[4] 霍镜,朱进,胡正亮,等.双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙(CSM工法)应用探讨[J].岩土工程学报,2012,34(S1):666-670.  
HUO J,ZHU J,HU Z L, et al. Application of deep mixing cement soil mixing wall (CSM) [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2012,34(S1):666-670.

[5] 马乐,李云,陈晨文.上软下硬地层 CSM 整体式止水帷幕施工关键技术[J].施工技术(中英文),2024,53(11):97-102.  
MA L,LI Y,CHEN C W. Key construction techniques of CSM overall water-resisting curtain in upper-soft and lower-hard stratum[J]. Construction technology,2024,53(11):97-102.

[6] 任路,秦超,向虎,等.武汉某高层建筑深基坑设计与施工[J].施工技术(中英文),2023,52(1):119-124.  
REN L,QIN C,XIANG H, et al. Design and construction of deep foundation excavation of a high-rise building in Wuhan [J]. Construction technology,2023,52(1):119-124.

[7] 邵勇,李光诚,帅红岩,等.超深水帷幕在武汉长江 I 级阶地冲积相基坑支护工程中的选取和应用[J].资源环境与工程,2021,35(6):882-886.  
SHAO Y,LI G C,SHUAI H Y, et al. Selection and application of extra-deep anti-seepage curtain in foundation pit supporting engineering on first terrace alluvial facies of Yangtze River in Wuhan [J]. Resources environment & engineering,2021,35(6):882-886.

[8] 李成巍,梁志荣,魏祥,等.CSM 工法在软土地区深基坑承压水控制中的应用[J].岩土工程学报,2019,41(S2):125-128.  
LI C W,LIANG Z R,WEI X, et al. Application of CSM method in control of confined groundwater of deep excavations in soft soils [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2019,41(S2):125-128.

[9] 倪才胜.基坑开挖渗流研究及其工程应用[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.  
NI C S. Study on seepage of foundation pit and engineering application [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,2008.

[10] 魏湛力.大型陆地锚碇沉井下沉结构受力分析及关键技术[J].中国港湾建设,2019,39(2):16-21.  
WEI Z L. Stress analysis and key technologies for submerged structure of ultra-large land anchorage caisson [J]. China harbour engineering,2019,39(2):16-21.