

DOI: 10.7672/sjgs2025110063

富水砂层止水 MJS 成桩连续性研究*

危正平^{1,2}, 陈 律³, 危雅乐¹, 程 凯¹

(1. 正宇科创(武汉)岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉正洪岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430000;
3. 中机三勘岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430000)

[摘要] 以长江 I 级阶地武汉轨道交通多个换乘站超深基坑为研究背景, 通过对 MJS 采用 1 根桩 2~3 个钻芯孔检测及水泥有效利用率试验, 研究 MJS 在富水砂层中的成桩连续性 & 成桩特点。通过研究 MJS 在返浆液中的水泥量, 分析水泥有效利用率, 将其作为判断 MJS 成桩质量的依据之一。研究结果表明, MJS 在富水砂层中水泥有效利用率低, 难以形成连续且均匀的桩体。

[关键词] 基坑; 富水砂层; 止水帷幕; 施工技术

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0063-05

Pile-forming Continuity of MJS for Water-stop in Water-rich Sand Layers

WEI Zhengping^{1,2}, CHEN Lü³, WEI Yale¹, CHENG Kai¹

(1. Zhengyu Kechuang (Wuhan) Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;
2. Wuhan Zhenghong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;
3. China Machinery TIDI Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: Based on the ultra-deep foundation excavation of multiple transfer stations of an urban rail transit in the first-class terrace of the Yangtze River, a two-hole or three-hole full-pile core drilling test and cement effective utilization test are carried out on metro jet system (MJS) to study the continuity and characteristics of MJS in water-rich sand. The effective utilization rate test of cement is a new research method for cement-soil piles that aims to study the cement utilization of MJS. The research indicates that the effective utilization rate of MJS cement in a water-rich sand layer is low, and it is difficult to form a continuous and uniform pile.

Keywords: foundation excavation; watered sandy stratum; water-stop curtain; construction

0 引言

MJS(metro jet system)工法是为了解决旋喷施工中的排浆和环境问题研发的高压喷射工法^[1], 该工法为 20 世纪 70 年代初期最先由日本开发的地基处理技术^[2]。近年来, MJS 工法已在国内地下工程和地铁建设领域广泛应用, 充分展现了其在复杂地质条件下的优越性能^[3]。已有学者围绕 MJS 工法开展了一系列研究, 姚志雄等^[4]结合 MJS 工法在下穿高铁桥梁深厚软基工程的应用实例, 分析了成桩过程中桩侧土体变形规律, 揭示了桩土相互作用机理; 梁利等^[5]根据上海某轻轨车站换乘通道基坑工

程中 MJS 工法应用情况, 探讨了既有列车运行情况下 MJS 施工参数; 王志丰等^[6]通过现场试验, 研究了水平旋喷成桩引起超静孔隙水压力变化规律, 探讨了水平旋喷施工影响范围; 张品等^[7]以长沙地铁 4 号线下穿 2 号线运营隧道 MJS 工法加固工程为例, 研究了 MJS 工法桩施工对周围地层及运营隧道的影响规律; 刘澄赤等^[8]总结了地下连续墙接缝处采用 MJS 工法止水施工过程中的要求和实际工程应用效果; 梁宇等^[9]通过对哈尔滨多个地铁站地下连续墙接缝 MJS 施工的分析, 总结了 MJS 工法并分析了其优缺点; 褚硕^[10]依托无锡地铁某项目中 MJS 作为基坑支护桩间止水的的应用, 提出了 MJS 施工过程控制措施。

目前已有研究主要集中于对 MJS 工艺特点和环境影响的分析, 关于 MJS 工法成桩形态的研究较

* 湖北省建设科技计划(2023117); 武汉市 2023 年度市城建局科技项目(202361)

[作者简介] 危正平, 教授级高级工程师, E-mail: 7404024@qq.com

[收稿日期] 2025-01-05

少。目前,大部分工程以抽芯检测强度作为判断 MJS 工法施工质量优劣的标准。然而,在富水砂层超深基坑止水工程中,帷幕的连续性要求高于强度要求。为进一步研究 MJS 工法在长江 I 级阶地富水砂层中的成桩情况与特点,进行全桩长钻芯检测与水泥有效利用率试验。

传统的钻芯检测通常采用 1 根桩 1 个钻芯孔。考虑到 MJS 工法属于旋喷桩工艺,成桩质量存在各向不均匀性,本文采用 1 根桩 2~3 个钻芯孔,并将其布置在距桩中心不同的方向和距离,可更全面地研究 MJS 工法成桩形态。

本文通过研究 MJS 工法在返浆液中的水泥量,分析水泥有效利用率,将其作为判断 MJS 工法成桩质量的重要依据之一。

1 MJS 工法特点

MJS 工法的核心在于地内压力监测和主动强制排浆,在传统高压喷射注浆工艺的基础上,通过采用独特的多孔管实现。MJS 工法理论上具有桩身直径大、质量好、成桩深度大、对周边环境影响小及定点返浆污染少等特点。

DB42/T2090—2023《全方位高压喷射注浆技术规程》建议,MJS 在标贯击数 $N<70$ 的砂土和黏聚力 $c<50\text{kPa}$ 的黏性土中成桩直径可达 $2.0\sim2.6\text{m}$,深度可达 60m 。但实际有效成桩直径和有效成桩深度仍需进一步研究确定。

2 工程概况

2.1 项目概况

本文以长江 I 级阶地武汉多个地铁超深换乘站基坑为研究背景,分析 MJS 工法成桩特性。项目均采用直径 $2\,000\text{mm}$ 的半圆形 MJS 工法桩作为地下连续墙接缝加强止水措施,MJS 工法桩平面布置如图 1 所示。

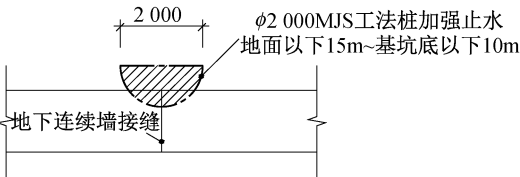


图 1 MJS 工法桩平面布置
Fig.1 Plan layout of MJS piles

2.2 水文地质条件

长江 I 级阶地上部分布有人工填土、近代沉积的河湖相黏性土、淤泥和淤泥质土,下部长江冲洪积地层呈现典型的二元结构,颗粒粒径自上而下逐渐变大,砂层厚度约 35m ,砂层中的承压水与长江具有良好的水力联系,具有深厚含水层、高承压性、高

渗透性和强破坏性等特点。武汉长江 I 级阶地典型地层剖面如图 2 所示。

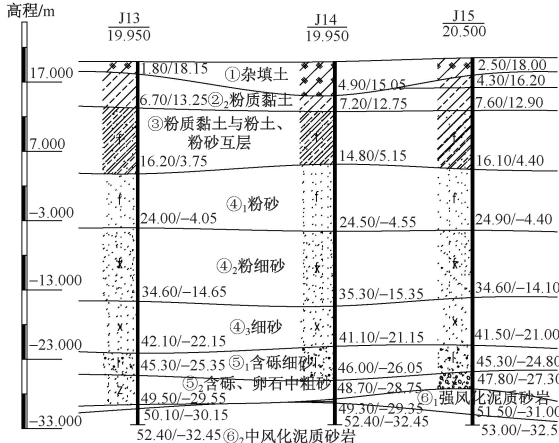


图 2 长江 I 级阶地典型地层剖面

Fig.2 Typical stratigraphic profile of the first terrace of the Changjiang River

2.3 MJS 工法桩设计参数

桩长范围一般为地面下 $15\sim43\text{m}$;采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,水灰比约 $1:1$;泥浆压力 $\geq 40\text{MPa}$;空气压力 $0.5\sim0.8\text{MPa}$;地内压力控制系数 $1.1\sim1.6$ (视监测情况进行调节和控制);水泥掺量 $40\%\sim50\%$;提升速度 $25\sim33\text{mm/min}$;浆液流量 $80\sim160\text{L/min}$ 。

3 MJS 成桩情况及特点

为全面了解 MJS 成桩情况,在多个车站基坑随机选取 10 根 MJS 工法桩,并布置 20 余个钻芯孔进行取样。钻芯均采用双管单动半合管,岩芯管直径 89mm ,每回次严格按照 1m 或 1.5m 控制。

3.1 实际成桩情况

钻芯检测虽是以点带面,但基本能反映 MJS 成桩情况。选取 4 个代表性钻芯检测芯样,如图 3 所示。结果表明,MJS 成桩连续性和均匀性存在明显缺陷,有效成桩直径和有效成桩深度有限。

3.2 实际成桩特点

1) 桩身强度离散性大

2 个不同项目的钻芯孔芯样如图 4 所示,呈现 2 种形态:①纯水泥浆或含少量砂粒的砂浆,强度较高;②基本未发现水泥,呈现砂层特征。由此可见,MJS 工法桩在深度范围内成桩随机性大,桩身强度离散性大。

2) 深度方向桩身连续性差

由图 3、4 可知,MJS 工法桩在深度方向成桩断断续续,难以形成连续桩体,即使距离桩中心仅 $300\sim500\text{mm}$,也无法取得连续芯样。达到一定深度后,下

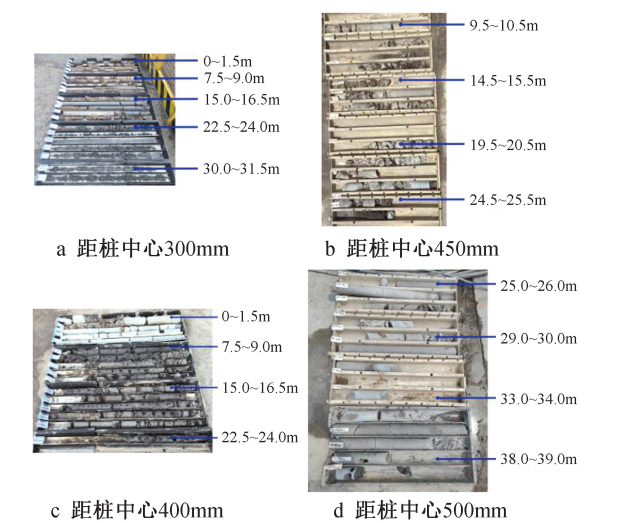


图 3 钻芯孔芯样

Fig. 3 Core sample obtained by drilling

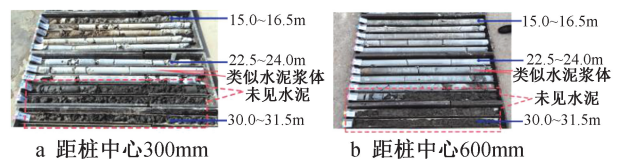


图 4 不同项目钻芯孔芯样

Fig. 4 Core drilling samples in different projects

部为完全不含水泥的砂土层。

3) 芯样可见明显的不同喷射半径,斜断面为纯砂,未见水泥

某钻芯孔(距桩中心 400~500mm 处)芯样取出后的楔形断面如图 5 所示,可明显看出喷射半径发生了变化,最小喷射半径小于钻芯孔与桩中心的距离($R_1 < R_2$),且远小于设计半径。

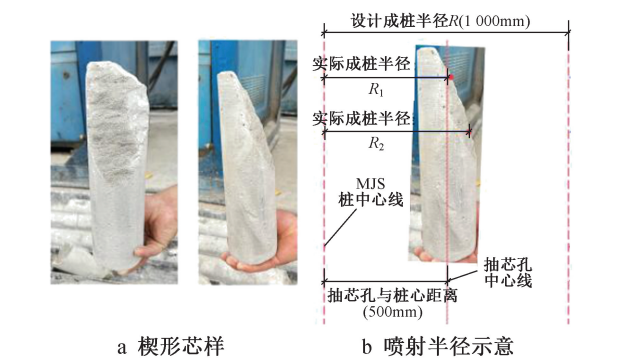


图 5 楔形芯样

Fig. 5 Wedge-shaped core samples

4) 同一深度水平方向连续性差

同根桩在相同深度不同方向和距离成桩连续性差,质量差异大。1 根桩 3 个钻芯孔平面位置如图 6 所示,芯样如图 7 所示。MJS 工法桩设计深度为地面下 15~43m,1 号孔芯样在 31.5m 以下不含

水泥,不成桩;2 号孔芯样在 36.5m 以下含很少水泥,不成桩;3 号孔芯样除 16.5~18m 见少量短柱状水泥土,其余均不含水泥且不成桩。3 个钻芯孔成桩情况如图 8 所示。

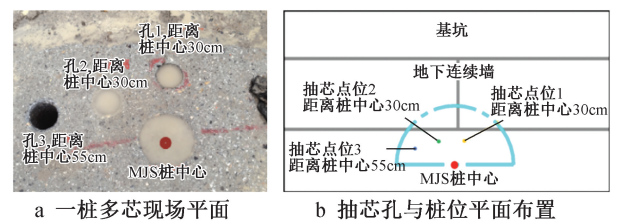


图 6 同根 MJS 工法桩多钻芯孔平面布置

Fig. 6 Layout of multiple core holes in the same MJS pile

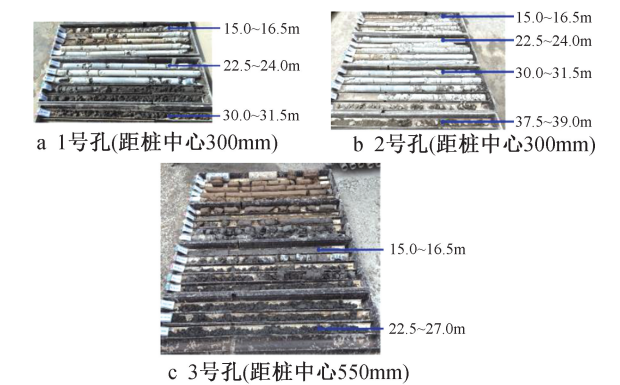


图 7 同根 MJS 工法桩多钻芯孔芯样

Fig. 7 Core sample from the same MJS pile multi-core drilling

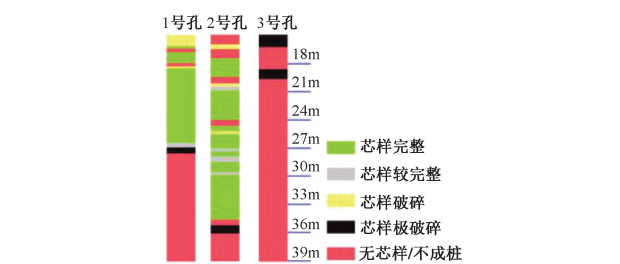


图 8 多钻芯孔成桩情况

Fig. 8 Pile formation with multi-core drilling

由图 6~8 可知,MJS 工法桩深度方向成桩连续性差;在相同深度、不同方向成桩连续性差,质量差异大;随着与桩中心距离的增大,成桩质量变差。

5) 有效成桩直径和深度受限

MJS 工法桩设计直径 2 000mm,钻芯孔距离桩中心 300~600mm,均无法取得从上到下连续完整的芯样,表明 MJS 有效成桩直径有限。

在距离桩中心仅 300~500mm 处,可取得芯样深度为 15~35m,难以超过 40m,表明 MJS 工法桩有效成桩深度有限,难以满足设计和工程使用要求。

4 水泥有效利用率试验

水泥能否被有效利用是影响水泥土桩成桩质

量的重要因素之一。为探究 MJS 工法桩水泥利用情况,开展水泥有效利用率试验。

4.1 试验依据

1) 根据勘察报告,砂层中粒径<0.05mm 的颗粒总量为 0,因此返浆浆液中固体物质粒径<0.05mm 的均为水泥颗粒,粒径>0.05mm 的水泥颗粒忽略不计。

2) 100g 水泥与 100g 水配制成 1:1 水灰比的水泥浆,体积为 132mL,烘干后水泥质量为 100g。

3) 试样筛析根据 GB/T 1345—2005《水泥细度检验方法筛析法》进行。

4.2 设计及施工参数

1) 设计参数 深度 50m,直径 2 000mm,水泥掺入比 50%。

2) 施工参数 按照水:水泥=710kg:800kg 配置水泥浆,水灰比约为 1:1.13,体积 1 000L,提升速度 33mm/min。

4.3 试验过程

1) 返浆量测定 随机测定每分钟返浆量 $Q_{返}$ (L/min),通过测定返浆箱(尺寸 1 700mm×1 700mm)浆液液面上升 200mm 所需时间 t (s),计算得出 $Q_{返}=1\ 700\times1\ 700\times20\times0.001/(t/60)$ 。

2) 返浆浆液筛分 进行返浆量测定时,现场取 200mL 返浆浆液。

3) 浆液测重 对 200mL 返浆浆液进行称重。

4) 筛分 依次采用 0.25,0.10,0.075,0.05mm 的土工筛进行筛分。

5) 烘干 将筛分后的浆液沉淀至水清,排出多余的明水,烘干沉淀物。

6) 称重 采用电子天平称取烘干物质量 m_1 (粒径>0.05mm,主要为砂)、 m_2 (粒径<0.05mm,主要为水泥)。

7) 统计计算 每分钟返浆浆液中的水泥含量 $m_{2返}=1\ 000m_2\times Q_{返}/200$,砂含量 $m_{1返}=1\ 000m_1\times Q_{返}/200$ 。

8) 喷浆浆液水泥含量计算 设备自动记录的每分钟喷浆量为 $Q_{喷}$ (L/min),则每分钟喷浆浆液中水泥质量 $m_{喷}=Q_{喷}\times(800\text{g/L})$ 。

9) 计算水泥有效利用率 水泥有效利用率 $n=(1-m_{2返}/m_{喷})\times100\%$ 。

4.4 试验结果与分析

对某车站施工过程中的 3 根 MJS 工法桩进行了 55 组试验(施工深度 32~45m),结果如表 1 所示,水泥有效利用率区间分布如表 2 所示。

表 1 试验结果

Table 1 Experimental results

项目	试验结果	平均值
地内压力/MPa	0.26~0.42	0.37
喷水量/(L·min ⁻¹)	24.00~45.00	33.50
喷浆量/(L·min ⁻¹)	129.00~142.00	133.50
返浆量/(L·min ⁻¹)	108.00~333.50	218.70
返浆量-(喷浆量+喷水量)/(L·min ⁻¹)	-61.90~153.50	51.30
喷入水泥/(kg·min ⁻¹)	103.20~110.60	106.80
返出水泥/(kg·min ⁻¹)	26.40~125.30	88.70
水泥利用率/%	-20.27~74.63	16.70

表 2 水泥有效利用率区间分布

Table 2 Statistics of effective utilization rate of cement between zones

水泥利用率 n /%	样本数量/个	样本占比/%
$n<0$	13	23.64
$0\leq n<10$	7	12.73
$10\leq n<20$	9	16.36
$20\leq n<30$	12	21.81
$30\leq n<40$	7	12.73
$40\leq n<50$	5	9.09
$n>50$	2	3.64
平均值	55	16.69

由试验结果可知,水泥有效利用率低,平均水泥有效利用率仅 16.69%,表明大部分水泥被强制排出,实际用于成桩的水泥少,成桩质量难以保证;水泥有效利用率离散性大,表明不同深度成桩质量离散性大,成桩连续性差;部分试验返浆量大于喷浆量和喷水量之和,表明孔内排浆时地下水会向引孔内补给;水泥有效利用率部分出现负值,表现为该组试验对应排浆量偏大,分析为强制排浆时,之前喷出已与土体混合的水泥浆随之排出;水泥有效利用率试验结果与钻芯检测反映的成桩情况吻合。

5 成桩缺陷原因分析

1) 孔内强制排浆影响

孔内强制排浆在保证孔壁稳定、长时间喷浆和泥浆集中管理等方面是有利因素,但严重影响 MJS 成桩质量,引孔中的浆液压力为 0.26~0.42MPa,会成为 40MPa 高压喷射水泥浆液的减压通道;返浆量约为喷浆量与喷水量之和的 120%,表明强制排浆过程中,排浆口附近一定范围内会形成负压,导致地下水向引孔内补给;喷浆口与孔内强制排浆口距离仅约 500mm,浆液在两者之间会形成回流。高压水泥浆液喷射进入土体,前面是富水砂层的阻力,后面是强制排浆形成带负压的返浆浆液,水往低(压)处流,浆液会直接回流到强制排浆口,大部分水泥浆直接被排出浪费,影响成桩质量;浆液喷射压力会迅速降低,从而影响成桩直径。

2)砂土对射流的影响

高速水泥浆射流进入水中,并不是理想的直线切割,而会形成湍流或涡流。高压水泥浆遇到土体或混合浆液阻力时,水泥浆的动能转变为压力能,压力能又转变为动能,进而改变了流向,形成涡流,并非直线劈裂,劈裂能量减小。水泥浆喷射形成的涡流,由于能量有限,只能形成局部涡流,不能形成360°的完整切割,故无法形成连续的水泥土柱体。

6 结语

- 1)MJS 工法桩在富水砂层中水泥有效利用率低,水泥易浪费,成桩连续性、均匀性较差,质量离散性大,有效成桩直径和深度难以满足设计和实际工程止水要求。
- 2)作为止水帷幕,MJS 工法桩在保证基本强度的前提下,其连续性是保证止水帷幕质量的重要评价指标。全桩长钻芯检测是 MJS 工法桩质量检测最简单、有效的方式之一,建议每根桩进行 3 个孔的钻芯检测,判断其桩体连续性。
- 3)MJS 工法桩在富水砂层中作为超深基坑止水帷幕和地下连续墙接头加强止水措施,尚需进行工艺改进和提升。

参考文献:

[1] 弓毅伟,陈杰华,唐欣薇. 砂土地层暗挖施工结合 MJS 工法应用研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(23):36-41,46.

GONG Y W, CHEN J H, TANG X W. Application research on underground excavation construction combined with MJS method in sand stratum[J]. Construction technology, 2024, 53(23): 36-41, 46.

[2] 黄毅,何健,唐俊韬,等. 深层高承压水粉砂地层 MJS 邻近施工对盾构始发风险控制技术研究[J]. 中国水运,2024(18):128-130.

HUANG Y, HE J, TANG J T, et al. Study on risk control technology of shield initiation caused by adjacent construction of MJS in deep high confined water silt stratum[J]. China water transport, 2024(18): 128-130.

[3] 张帆. 二种先进的高压喷射注浆工艺[J]. 岩土工程学报, 2010,32(S2):406-409.

ZHANG F. Two advanced jet grout methods[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(S2): 406-409.

[4] 姚志雄,夏华灿,黄敏,等. 福州滨海软土 MJS 工法桩加固施工及环境效应[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(3):1019-1026,1037.

YAO Z X, XIA H C, HUANG M, et al. Construction and environmental effect of MJS pile strengthening soft soil in Fuzhou coastal area [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(3): 1019-1026, 1037.

[5] 梁利,李恩璞,王庆国,等. MJS 工法在轻轨车站换乘通道中的工程实践[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(1):135-139.

LIANG L, LI E P, WANG Q G, et al. Practice of MJS method in light railway inter change passage construction in Shanghai [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2012, 8(1): 135-139.

[6] 王志丰,王亚琼,谢永利. 水平旋喷成桩引起超静孔隙水压力研究[J]. 西安科技大学学报,2016,36(2):207-212.

WANG Z F, WANG Y Q, XIE Y L. Investigation of excess pore water pressure caused by installation of horizontal jet grout columns [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(2): 207-212.

[7] 张品,钟志全,陈仁朋,等. MJS 桩加固对上覆地铁运营隧道影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (4): 1164-1171.

ZHANG P, ZHONG Z Q, CHEN R P, et al. Study on influence of MJS columns reinforcement on overpass subway operation tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15(4): 1164-1171.

[8] 刘澄赤,卞睿凡,睢博栋. MJS 工法超长高压旋喷桩在深基坑止水工程中的应用[J]. 施工技术,2021,50(3):85-87.

LIU C C, BIAN R F, SUI B D. Application of the MJS method ultra-long high-pressure jet grouting pile in deep foundation excavation waterproof engineering [J]. Construction technology, 2021, 50(3): 85-87.

[9] 梁宇,吕计瑞. 浅谈地铁深基坑工程地连墙接缝止水 MJS 工艺[J]. 中国新技术新产品,2019(8):105-106.

LIANG Y, LÜ J R. Discussion on MJS technology for joint sealing of diaphragm wall in subway deep foundation pit engineering [J]. New technology & new products of China, 2019(8): 105-106.

[10] 褚硕. MJS 工法在地铁工程围护结构止水帷幕中的应用[J]. 江西建材,2022(5):145-146,151.

CHU S. Application of MJS construction method in water stop curtain of subway engineering envelope [J]. Jiangxi building materials, 2022(5): 145-146, 151.