

DOI: 10.7672/sgjs2026030022

碎块石地层海塘防渗系统设计与施工关键技术*

金晓彬¹, 刘芬²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 舟山市水利局, 浙江 舟山 316021)

[摘要] 城防海塘更新改造过程中, 由于海水冲刷的影响, 防渗系统施工常遇到碎块石地层, 对碎块石地层进行准确注浆、整体防渗是目前海塘工程防渗施工的关键。为此, 基于碎块石间孔隙填充理论, 建立考虑孔径、布置形式的水泥砂浆填充灌浆与高压旋喷桩组合防渗系统, 并对防渗效果进行验证。基于应力扩散原理, 考虑了动水流及浆液扩散的影响, 优化防渗系统施工参数, 总结关键施工技术。研究表明, 采用组合防渗系统可使桩身 28d 抗压强度均 $>1.2\text{MPa}$, 渗透系数均 $\leq 10^{-5}\text{cm/s}$, 满足设计要求; 采用组合防渗系统前桩身较破碎, 采用组合防渗系统后桩身较完整, 该系统具有较好的可靠性, 可在一定程度上解决碎块石地层灌浆体早期强度低和浆液在动水条件下扩散范围大的问题。

[关键词] 堤防工程; 海塘; 碎石; 高压旋喷桩; 灌浆; 防渗

[中图分类号] TU74

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0022-05

Key Technology of Design and Construction of Seawall Anti-seepage System in Fragmented Rock Stratum

JIN Xiaobin¹, LIU Fen²

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. Zhoushan Water Resources Bureau, Zhoushan, Zhejiang 316021, China)

Abstract: During the renovation of urban flood control seawalls, the construction of the anti-seepage system often encounters fragmented rock stratum due to seawater scouring. Accurate grouting and achieving integrated anti-seepage prevention in such strata are currently critical challenges in seawall engineering. To address this, based on the pore-filling theory for fragmented rock, a combined anti-seepage system comprising cement-mortar filling grouting and high-pressure jet grouting piles was established, considering factors such as aperture and layout. Its effectiveness was subsequently verified. Furthermore, guided by the stress diffusion principle and taking into account the influences of flowing water and grout diffusion, the construction parameters for the anti-seepage system were optimized, and key construction techniques were summarized. The research results show that the combined system enables the pile body to achieve a 28d compressive strength greater than 1.2MPa and a permeability coefficient less than or equal to 10^{-5}cm/s , meeting the design requirements. The pile body was relatively fragmented before implementing the combined system but became more integrated afterward. The system has good reliability, which can solve the problems of low early strength of grouting body in fragmented rock stratum and large diffusion range of slurry under dynamic water conditions to a certain extent.

Keywords: embankment engineering; seawall; fragmented rock; high-pressure jet grouting pile; grouting; anti-seepage

0 引言

海塘防渗是沿海安全的“生命线工程”, 其不仅

是工程技术, 更是城市韧性、生态智慧与文明传承的集中体现。目前, 注浆、高压旋喷桩防渗技术已广泛应用于隧道、基坑等防渗工程中, 但针对城防海塘工程碎块石地层应用较少, 且缺乏有效的施工技术, 难以指导实际工程施工。本文基于岱山县海

* 国家自然科学基金(51608477)

[作者简介] 金晓彬, 高级工程师, E-mail: 493255281@qq.com

[收稿日期] 2025-07-28

塘安澜工程碎块石地层地质条件,设计水泥砂浆填充灌浆与高压旋喷桩防渗系统,提出城防海塘工程碎块石地层防渗施工技术,并对施工效果进行评价。

1 工程概况

1.1 项目概况

海塘安澜工程位于舟山市岱山县内,以挡潮排涝为主,兼顾改善沿塘生态环境。海塘沿线内侧密集分布城市房屋建筑、工业厂区等,且海塘沿线地下管线分布情况复杂,因此,海塘周边环境较复杂。海塘安澜工程施工内容为对现状总计约 10.17km 的老旧海塘进行综合整治。通过堤线优化与结构整合,建成后形成连续、坚固的标准化主海塘,全长约 8.5km,其防洪御潮能力得到全面提升,加固水闸 2 座,新建旱闸 20 座,新增水利管理用房 1 450m²。工程级别为 II 等,海塘主要建筑物级别为 1 级,海塘防潮标准为 100 年一遇。海塘结构形式为 A~I 型,堤身防渗主要采用高压旋喷桩和填充水泥砂浆的形式。

1.2 工程地质条件

根据勘察报告显示,工程所在地土层主要为素填土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、块石、含粉质黏土角砾、凝灰岩等,土层物理力学性能参数如表 1 所示。

填充灌浆、高压旋喷桩防渗处理部位为①₁素填土层,根据钻孔灌浆先导孔芯样可知,该层主要由碎石、砾石及块石混合料组成,孔隙为黏土填充。部分区段由于长期受台风季潮水冲刷影响,孔隙内的黏土已基本流失,导致海塘内侧地下水位随外侧潮水涨落而涨落。

1.3 水文地质条件

场地内地下水分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水,其中松散岩类孔隙水可分为孔隙性潜水和孔隙性承压水。孔隙性潜水主要分布在浅部填土中,分布广泛,水量较小。孔隙性承压水主要分布于⑤₃含粉质黏土角砾层中,其储水性及导水性相对较

好,但其厚度不大,且局部缺失,水量一般,对工程影响小。

2 城防海塘防渗系统设计

海塘闭气防渗是保障沿海安全的核心工程,可防止海水渗透导致土体饱和、管涌坍塌,提升结构稳定性,阻断海水入侵,保护农田、湿地生态等,此外,海塘闭气防渗可保障城市基础设施安全,延长其使用寿命,降低维护成本。本工程城防海塘下卧层存在碎块石地层,属于强透水性土层,为满足海塘整体闭气防渗要求,采用水泥砂浆填充灌浆与高压旋喷桩组合防渗系统。

2.1 水泥砂浆填充灌浆防渗系统

水泥砂浆填充灌浆防渗系统具有施工工艺简单、效率高、经济性好、防渗效果好的特点,且对复杂环境适应性好,该系统设计基于碎块石间孔隙填充理论,通过优化砂浆流动性、凝结时间与早期强度,旨在实现对碎块石地层中大孔隙的有效填充与快速封闭,城防海塘横断面如图 1 所示。为满足海塘整体防渗要求,在临海侧混凝土挡墙基础下设 3 排水泥砂浆填充灌浆孔,灌浆孔孔径为 108mm,纵向孔距为 800mm,排间距为 800mm,采用梅花形布置(见图 2),灌浆孔长度 ≥ 6m,且桩底深入不透水层 ≥ 1.5m。

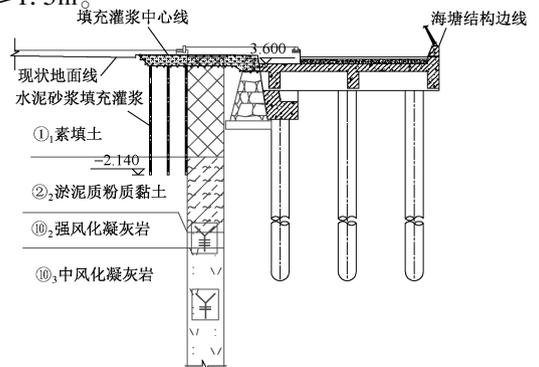


图 1 水泥砂浆填充灌浆防渗系统下城防海塘横断面
Fig. 1 Cross-section of the urban flood control seawall with cement-mortar filling grouting anti-seepage system

表 1 土层物理力学性能参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	天然密度/ (g · cm ⁻³)	固结快剪		承载力特征值/kPa
			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	
② ₂	淤泥质粉质黏土	1.80	11.9	9.7	50
④ ₁	粉质黏土	1.99	27.4	17.7	140
⑤ ₁	含砾砂粉质黏土	2.01	26.8	19.4	150
⑤ ₂	块石	—	—	—	220
⑥ ₁	粉质黏土	2.01	27.1	20.8	160
⑩ ₁	全风化凝灰岩	—	—	—	220

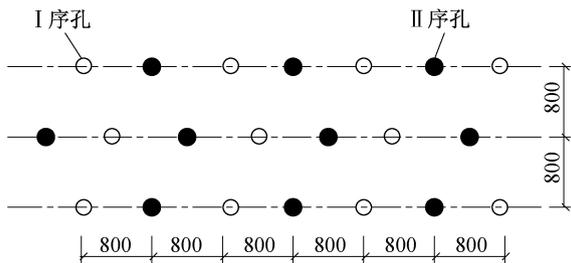


图 2 水泥砂浆填充灌浆孔平面布置

Fig. 2 Layout of cement-mortar filling grouting holes

2.2 高压旋喷桩防渗系统

高压旋喷桩适用地层范围较广,在碎块石地层中可发挥防渗作用,且桩径范围可调整幅度较大,施工方式较可靠、方便,对周边环境影响较小,采用该系统时城防海塘横断面如图 3 所示。为满足海塘整体闭气防渗要求,在挡墙底板 2 排灌注桩间施工高压旋喷桩进行防渗,高压旋喷桩直径为 800mm,桩长为 8m,桩间距为 600mm,且桩底深入不透水层 $\geq 1.5\text{m}$,并在挡墙和透空式平台衔接处增设止水装置(见图 4)。因此,高压旋喷桩防渗系统采用设置高压旋喷桩与灌注桩、黏土回填、设置防洪墙等闭气止水结构相结合的方式实现防渗。

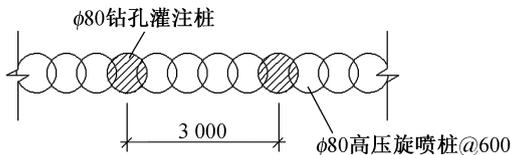


图 4 高压旋喷桩平面布置

Fig. 4 Layout of high-pressure jet grouting piles

3 城防海塘防渗施工关键技术

3.1 水泥砂浆填充灌浆

3.1.1 施工工序

进行水泥砂浆填充灌浆防渗系统钻孔、灌浆时,首先钻灌下游排(内海侧)孔,然后钻灌上游排(外海侧)孔,最后钻灌中游排孔。上中下游排孔均按两序施工,首先施工 I 序孔,然后施工 II 序孔(见

图 2)。

3.1.2 施工参数

施工参数设计基于应力扩散原理,旨在控制浆液在碎块石孔隙网络中的有效填充半径与加固形态。同时,充分考虑了动水流对浆液的稀释、冲刷作用及浆液自身的扩散规律,以此优化浆液配合比、灌浆压力与施工工序,确保在复杂水文地质条件下形成连续、密实的防渗体。填充材料包括水泥、细砂、水玻璃,其中 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥细度满足通过 $80\mu\text{m}$ 方孔筛的筛余量 $\leq 5\%$ (按质量计);细砂采用河砂或机制砂,粒径 $\leq 1.5\text{mm}$;水玻璃模数为 2.4~3.0,浓度为 30~45°Bé。下游排 I 序孔填充材料采用水泥砂浆,考虑到动水条件、碎块石地层孔隙大的影响,水泥砂浆中添加 6%(水泥质量)水玻璃,以达到速凝、堵漏效果。下游排 II 序孔、上游排孔与中游排孔填充材料采用水泥浆,因水泥浆和水泥砂浆速凝性不同,区段间待凝时间为 12h 以内。灌浆体效果检验以强度与渗透性为核心,灌浆施工完成 28d 后,通过注水试验检测灌浆体抗渗性能,同步采用钻芯取样法开展抗压强度试验,精准测定灌浆体强度,全面验证灌浆加固效果。填充材料参数如表 2 所示。

3.1.3 施工技术

1) “少灌多复”与动态渗漏封堵技术

针对素填土层中碎石、块石含量高,原有填充黏土流失严重,存在大型渗流通道的问题,为防止浆液经通道直接流入外海造成污染并确保填充效果,采用“少灌多复”与动态渗漏封堵相结合施工技术。“少灌多复”指控制单次灌浆量,采用较低压力(0.05~0.10MPa)进行间歇性、重复性灌注,使浆液能够逐次、缓慢地填充大孔隙和通道,避免浆液瞬时长距离流失。动态渗漏封堵指在灌浆过程中全程监测,一旦发现浆液沿结构缝或明显石缝渗漏至外海,立即暂停灌浆,采用防渗土工布进行快速嵌缝封堵;对于滩涂表面的冒浆点,迅速铺设防渗布

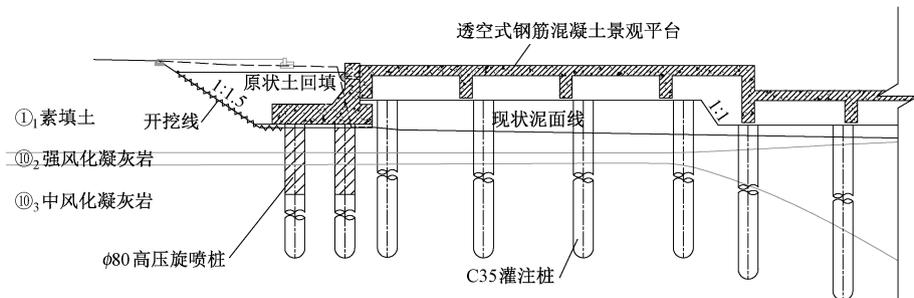


图 3 高压旋喷桩防渗系统下城防海塘横断面

Fig. 3 Cross-section of the urban flood control seawall with high-pressure jet grouting pile anti-seepage system

表 2 填充材料参数

Table 2 Parameters of filling materials

注浆部位	注浆材料	体积配合比	灌浆压力/MPa	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	28d 灌浆体抗压强度/MPa
下游排 I 序孔	水泥砂浆	水:水泥:砂=1:1:1	0.05~0.10	$\leq 10^{-5}$	≥ 1.2
其他孔	水泥浆	水:水泥=1:1	0.05~0.10	$\leq 10^{-5}$	≥ 1.2

并压盖沙袋堆载,封闭渗漏路径后再恢复灌浆,形成灌浆、监测、封堵、再灌浆的闭环作业流程。

2) 基于压力-扩散耦合控制的灌浆参数调控技术

为确保灌浆有效性与安全性,采用以压力控制为核心的浆液扩散范围调控技术。通过将灌浆孔口压力严格控制在 0.05~0.10MPa,并匹配适宜的浆液初凝时间与黏度,使浆液在碎块石地层中的扩散半径得到有效约束,以避免压力过高对已有海塘结构或地层产生劈裂破坏作用,并防止浆液因压力过大而无效扩散至设计范围之外,进而避免造成材料浪费及削弱整体防渗体连续性。

3) 防串浆技术

针对地层中碎石多、孔隙连通性好的特点,为有效防止灌浆过程中相邻孔串浆,首先施工孔距较大的 I 序孔,形成初步的防渗骨架。延长 I 序孔与 II 序孔之间的施工间隔时间,确保先序灌入的浆液达到足够强度,阻断潜在的连通通道。在单个孔内采用自下而上的分段灌浆法,每段灌浆结束后待凝,进一步降低同一孔内不同段之间及邻孔之间因压力传递导致的串浆风险,从而保证各灌浆孔独立性与完整性。

3.2 高压旋喷桩施工

3.2.1 施工材料与参数优化

高压旋喷桩材料选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐散装或袋装水泥,水泥掺量为 35%,浆液水灰比为 1,水泥浆密度为 $1.52\text{g}/\text{cm}^3$ 。浆液配制后存放时间宜 $\leq 4\text{h}$,考虑到动水条件、碎块石地层孔隙大的影响,浆液中掺入 0.1% 早强剂,以达到速凝、堵漏效果。对高压旋喷桩最优施工参数进行现场试验,提升速度分别设为 20, 22, 24cm/min,水泥含量分别设为 25%, 28%, 30%,其他参数中注浆压力为 26MPa,喷浆流量为 72L/min,气压力为 0.7MPa,浆液水灰比为 1。结合 28d 取芯样及注水试验结果,防渗指标满足设计要求,取芯完整性不满足要求,上部 3m 左右回填层可成型,下部碎块石地层强度较小,成型率较小,这是因为水泥浆液在碎块石地层孔隙中形成的固化体早期强度较低,且受水流冲刷影响。通过多次现场试验,对高压旋喷桩施工参数进行优化,最终确定注浆压力为 25MPa,喷浆流量为

70L/min,气压力为 0.7MPa,气流量为 $1\text{L}/\text{m}^3$,提升速度为 16cm/min,水灰比为 1,水泥掺量为 35%,桩底深入不透水层 1.5m,浆液中掺入 2.53kg 的 0.1% 早强剂。

3.2.2 施工工艺与质量控制

高压旋喷桩施工检查内容主要为强度和渗透性,成桩 28d 后在浅部开挖桩头,取芯检测 28d 抗压强度 $\geq 1.2\text{MPa}$,渗透系数 $\leq 10^{-5}\text{cm}/\text{s}$ 。高压喷灌结束后,因孔内水泥浆液固结过程中体积收缩,且仍向孔壁四周范围有一定渗漏,会出现一段时间的沉降,应不间断地将浆液回灌到已喷孔内,并保持压浆作用,直至孔内浆液面不再下沉。

针对碎块石地层渗透性强、存在动水影响的工程特点,高压旋喷桩施工采用了系统性适配工艺。通过精准引孔确保桩体深入不透水层,采用掺加早强剂的水泥浆液以提升动水条件下的抗冲散与早期凝结能力,施工中严格采用优化参数(注浆压力 25MPa,提升速度 16cm/min),并在碎块石集中段辅以“提+停+复喷”的间歇工艺,实现对大孔隙的反复填充与挤密。同时,实施全过程渗漏监控与动态调控,一旦发现浆液流失立即采取降速或增黏等措施。终喷后执行稳压回填,以补偿浆体收缩与渗漏,确保桩体连续性。该工艺实质上是将“少灌多复”与分序间隔的防渗理念,转化为高压旋喷的“慢提升、多回转、间歇补喷”技术,从而在复杂地层中形成满足强度与防渗要求的可靠桩体。

4 城防海塘防渗系统效果评价

为判断城防海塘防渗系统效果,施工完成 28d 后在桩身钻芯取样,将试样送到实验室开展无侧限抗压强度试验和渗透试验。经检测,芯样 28d 抗压强度均 $> 1.2\text{MPa}$,渗透系数均 $\leq 10^{-5}\text{cm}/\text{s}$,满足设计要求。

防渗加固前后桩身对比如图 5 所示。由图 5a 可知,防渗加固前由于①₁ 素填土层中主要由碎石、砾石及块石混合料组成,且长期受台风季潮水冲刷影响,孔隙内的黏土已流失,所以取样桩身主要为不同粒径的试块,桩身较破碎。由图 5b 可知,防渗加固后桩身较完整,满足强度和渗透性要求,这表明水泥砂浆填充灌浆与高压旋喷桩组合防渗系统效果较好,使海塘工程整体闭气防渗性能满足要求。

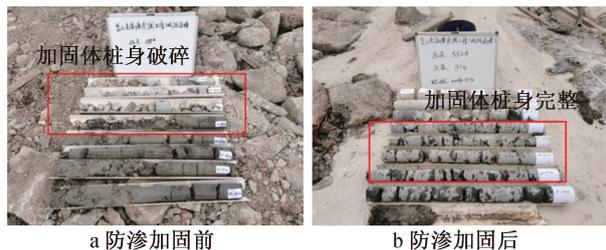


图5 防渗加固前后桩身对比

Fig. 5 Comparison of pile body before and after anti-seepage reinforcement

5 结语

1) 针对碎块石地层不同区段的工程特性与结构要求,采用了差异化的防渗技术:在临海侧挡墙基础下部的大孔隙、强透水区段,采用水泥砂浆填充灌浆技术,着重实现对松散碎块石和宽大渗流通道的填充与密实;在挡墙底板下需形成连续竖向屏障的关键部位,采用高压旋喷桩技术,构建深度与完整性可控的防渗墙体。2种技术依据地层条件与防护目标进行应用,形成了定位清晰、功能互补的综合防渗方案。

2) 基于碎块石地层的特殊工程性状,对关键技术参数与施工方法进行了针对性优化。提出的“少灌多复”与动态渗漏封堵填充灌浆工艺及“提+停+复喷”与过程调控的高压旋喷桩施工方法,有效应对了动水冲刷、浆液扩散失控及成型困难等现场挑战,将理论设计转化为可靠实施的工程实践。

3) 现场检测结果表明,采用优化后的组合防渗系统形成的防渗体在强度(28d抗压强度 >1.2 MPa)与抗渗性(渗透系数 $\leq 10^{-5}$ cm/s)等关键指标上均满足高标准海塘设计要求。芯样对比直观揭示了该系统对破碎地层的加固与整合效果,证明了其在提升海塘结构整体性与服役性方面的有效性。

参考文献:

[1] LIU J, ZHANG L, YOU T, et al. Technique of grouting in silty-fine sand with abundant water: practice in Beijing [J]. Geomechanics and engineering, 2022, 29(4): 463-470.

[2] GUO Y X, ZHANG Q S, XIAO F, et al. Grouting rock fractures under condition of flowing water [J]. Carbonates and evaporites, 2020, 35(3): 96.

[3] YU B M, LI J H. A geometry model for tortuosity of flow path in porous media [J]. Chinese physics letters, 2004, 21(8): 1569.

[4] WANG C J, DIAO Y L, GUO C C, et al. Two-stage column-hemispherical penetration diffusion model considering porosity tortuosity and time-dependent viscosity behavior [J]. Acta

geotechnica, 2023, 18(5): 2661-2680.

- [5] GUO T T, ZHANG Z W, YANG Z Q, et al. Penetration grouting mechanism of time-dependent power-law fluid for reinforcing loose gravel soil [J]. Minerals, 2021, 11(12): 1391.
- [6] 刘博, 王宁, 汪伟华, 等. 长大隧道富水围岩防渗施工关键技术研究 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10): 71-76.
- LIU B, WANG N, WANG W H, et al. Research on key technology of seepage prevention construction of rich-water surrounding rock of long tunnel [J]. Construction technology, 2025, 54(10): 71-76.
- [7] 徐大松, 郝跃武, 蒋长伟. 富水软岩隧道渗流-应力场耦合影响因素分析 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10): 50-55, 63.
- XU D S, HAO Y W, JIANG C W. Analysis of influencing factors of seepage-stress field coupling in water-rich soft rock tunnel [J]. Construction technology, 2025, 54(10): 50-55, 63.
- [8] 刘军, 申精, 张宇, 等. 动水条件下卵石地层帷幕注浆浆液扩散机理 [J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(2): 403-411.
- LIU J, SHEN J, ZHANG Y, et al. Grouting diffusion mechanism of curtain grouting in pebble strata under flowing water conditions [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2025, 21(2): 403-411.
- [9] 朱明诚, 韩强, 赵贵斌, 等. 卵砾石含水层高压旋喷注浆止水帷幕技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 74-79.
- ZHU M C, HAN Q, ZHAO G B, et al. Technology of high pressure jet grouting water cutoff curtain in gravel aquifer [J]. Coal geology & exploration, 2020, 48(4): 74-79.
- [10] 张龙保, 古汉卿, 贾红学, 等. 滨海富水软土地质悬挂式止水帷幕深基坑管涌防治技术 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 55-60.
- ZHANG L B, GU H Q, JIA H X, et al. Construction technology of piping prevention and control of deep foundation excavation with suspended waterproof curtain in coastal water-rich soft soil geology [J]. Construction technology, 2024, 53(1): 55-60.
- [11] 陶云, 黄兴. 一种新的旋喷桩止水效果检测方法 [J]. 水运工程, 2022(9): 215-220.
- TAO Y, HUANG X. A new detection method for water cutoff effect of jet grouting piles [J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 215-220.
- [12] 陈浩. 土石围堰高压旋喷桩防渗施工技术应用 [J]. 水运工程, 2021(12): 112-114, 149.
- CHEN H. Application of anti-seepage construction technology of high-pressure rotary jet grouting pile in earth-rock cofferdam [J]. Port & waterway engineering, 2021(12): 112-114, 149.
- [13] 伦冠栋. 浅埋地铁车站基坑防渗墙支护体系稳定性分析 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(7): 38-44.
- LUN G D. Stability analysis of anti-seepage wall support system for foundation excavation of shallow subway station [J]. Construction technology, 2025, 54(7): 38-44.