

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.01.002

工艺参数对灌注桩桩基后注浆浆液扩散的影响

仪晓立¹ 王振军² 侯向阳¹ 惠冰² 孙巍¹ 张旭² 苗鑫²

(1. 中铁一局集团建设安装工程有限公司, 西安 710000;

2. 山东省交通科学研究院, 济南 250014)

摘 要: 劈裂注浆作为最常用的注浆方式, 其工艺参数条件直接影响浆液扩散范围, 研究浆液扩散特性对确定现场施工参数条件具有指导意义。以某灌注桩现场为基础, 建立了平板裂缝浆液扩散模型, 研究了不同因素对桩基后注浆浆液最大扩散半径的影响。结果表明, 注浆压力增加导致浆液最大扩散半径先升高后趋于平缓, 注浆压力优选 4 MPa。随着注浆量的增加, 浆液最大扩散半径先升高后趋于平缓。水泥浆粘度增加导致浆液最大扩散半径降低, 技术人员在设计水泥浆时, 在考虑力学性能基础上应引入浆液粘度对最大扩散半径的影响。浆液最大扩散半径随着裂缝高度的增加先增大后降低, 裂缝高度为 25 cm 时有利于灌注桩承载能力的提升。裂缝宽度对最大扩散半径的影响较小。

关键词: 后注浆; 桩基; 浆液; 扩散范围; 裂缝

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2024)01-0009-06

Effect of process parameter on grouting slurry diffusion after grouting pile foundation

YI Xiaoli¹ WANG Zhenjun² HOU Xiangyang¹ HUI Bing² SUN Wei¹ ZHANG Xu² MIAO Xin²

(1. China Railway First Group Building & Installation Engineering Co. Ltd., Xi'an 710000, China;

2. Shandong Transportation Institute, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Split grouting is the most commonly used grouting method. The grouting process parameters directly affect the grout diffusion range. The study of the grout diffusion characteristics has guiding significance for determining on-site construction parameters. Based on a grouting pile site, a flat crack grout diffusion model was established to study the influence of different factors on the maximum diffusion radius of grouting behind the pile foundation. The results show that the increase in grouting pressure causes the maximum diffusion radius of the grout to increase first and then level off, and the optimal grouting pressure is 4 MPa. As the grouting volume increases, the maximum diffusion radius of the grout first increases and then levels off. The increase in cement slurry viscosity leads to a decrease in the maximum diffusion radius of the slurry. When designing the cement slurry, technicians should introduce the influence of the slurry viscosity on the maximum diffusion radius based on the mechanical properties. The maximum diffusion radius of slurry first increases and then decreases with the increase of crack height. When the crack height is 25 cm, it is beneficial to improve the bearing capacity of cast-in-place piles. The crack width has little impact on the maximum diffusion radius.

Key words: post grouting; pile foundation; grout; diffusion range; cracks

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 山东省交通运输科技计划项目(2023B46)

第一作者: 仪晓立, 学士, 高级工程师, 主要从事土木工程研究。E-mail: 18992378965@163.com

灌注桩后注浆是指在钻孔灌注桩内预埋钢筋笼和注浆管, 成桩后通过高压泵向桩侧面和端面土层加压注浆^[1-3]。后注水泥浆渗透至桩基泥皮、持力层和沉渣后进行填充压实, 进而延伸至深土层形成

树枝状劈裂，泥浆固结后有效加强灌注桩桩基的强度，降低了灌注桩的沉降量，提高了桩基的承载能力^[4-6]。后注浆浆液向桩基四周的劈裂扩散程度直接影响了灌注桩的稳定性，而劈裂扩散过程受到水灰比、注浆压力等多种因素的影响，研究后注浆浆液扩散机理对增强灌注桩强度具有重要意义^[7-9]。国内外学者对后注浆进行了大量的研究，但对后注浆扩散规律认识并不全面^[10-14]。周亚龙等^[15]研究了后注浆过程中注浆量、注浆压力、灌注桩位移及承载变形的变化，建立了灌注桩载荷和沉降位移的逻辑关系，发现“开式—闭式—开式”复合式后注浆式浆液重复交替进行渗透、劈裂、压实过程，注浆量和注浆压力可满足设计要求，灌注桩沉降位移较小。李文广等^[16]采用 COMOSOL 软件建立了盾尾壁后注浆有限元分析模型，研究了注浆压力、注浆位置和浆液黏度时变变化对浆液扩散规律的影响，发现注浆位置对浆液形态的影响较大，浆液填充速度越大，注浆压力随之增大，而浆液黏度降低，在后期填充时速度明显变慢。林志豪等^[17]研究了桩端注浆和桩基桩端复合注浆对灌注桩承载能力的影响，发现桩基桩端复合注浆使灌注桩桩基承载能力升高了 1.35~1.5 倍，桩周侧向土层摩阻提高了 3~6 倍。目前人们对后注浆的研究多集中在注浆过程参数变化及灌注桩承载力方面，对浆液扩散研究较少，而浆液扩散是灌注桩强度的直接影响因素，研究其扩散区域及扩散变化规律有利于提高注浆均匀度，增强桩基的稳定性^[18-20]。本文以山东济南某灌注桩现场为基础，截取注浆扩展裂缝某一平面作为研究对象，采用 CFD 软件建立灌注桩后注浆平板裂缝浆液扩散有限元模型，分析不同因素变化对浆液扩散规律的影响，结果可为工程技术人员设计注浆参数提供理论依据。

1 灌注桩后注浆浆液扩散模型建立

截取济南某灌注桩现场注浆扩展裂缝某一平面，采用 CFD 软件建立灌注桩后注浆平板裂缝浆液扩散模型，如图 1 所示。扩展裂缝平面尺寸为 400 cm×200 cm，桩基直径为 100 cm，注浆孔设置在平面中心位置，网格划分数量为 49 823 个，形状为六面体，注浆孔设置为流量入口边界，注浆量通过注浆时间控制，平面四周设置为压力出口边界。

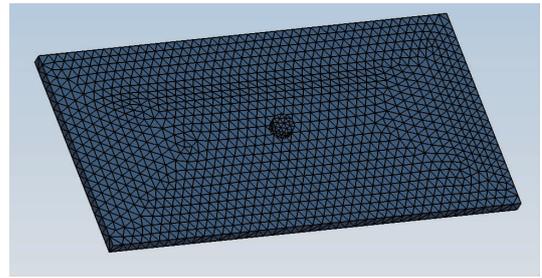


图 1 灌注桩后注浆平板裂缝浆液扩散模型

Fig. 1 Grout diffusion model for grouting plate cracks after grouting of cast-in-place piles

根据现场数据：注浆压力为 3 MPa、注浆量为 0.2 m³、浆液黏度为 40 cPa·s、裂缝高度为 10 cm、裂缝宽度为 200 cm，控制注浆压力变化范围在 2~5 MPa，变化梯度为 0.5 MPa；注浆量变化范围在 0.05~0.4 m³，变化梯度为 0.05 m³；浆液黏度变化范围在 10~80 cPa·s，变化梯度为 10 cPa；裂缝高度变化范围在 5~50 cm，变化梯度为 5 cm；裂缝宽度变化范围在 50~400 cm，变化梯度为 50 cm，研究不同因素变化对注浆浆液最大扩散半径的影响。

2 灌注桩后注浆浆液扩散规律

2.1 注浆压力对浆液最大扩散半径的影响

控制注浆量 0.2 m³、浆液黏度 40 cPa·s、裂缝高度 10 cm、裂缝宽度 200 cm，改变注浆压力，得到后注浆浆液最大扩散半径变化趋势如图 2 所示。

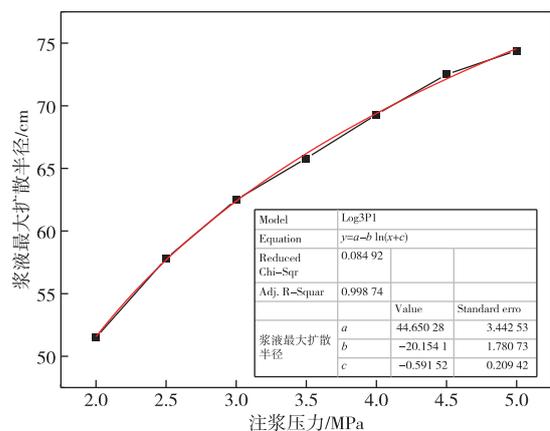


图 2 注浆压力对浆液最大扩散半径的影响

Fig. 2 Effect of grouting pressure on the maximum diffusion radius of grout

从图 2 可以看出，随着注浆压力的增加，浆液最大扩散半径先增大，后增大幅度趋于平缓。这是

因为，在注浆压力较低时，压力的增加为浆液流动提供了更多动力，增强了浆液对周围土层的渗透和劈裂能力，导致最大扩散半径显著增大。当注浆压力较高时，浆液向土层深处延伸，劈裂扩展需要克服的反作用力增强，虽然仍可进一步劈裂扩展，但其扩展能力降低，最大扩散半径增大幅度趋于平缓。由图 2 可知，当注浆压力为 2 MPa 时，浆液最大扩散半径为 51.5 cm，当注浆压力达到 4 MPa 后，浆液最大扩散半径达到 69.3 cm 且变化速度变缓，当注浆压力达到 5 MPa 时，浆液最大扩散半径达到 74.4 cm。采用对数形式拟合注浆压力与浆液最大扩散半径的关系（图 2），曲线拟合优度为 0.998 74，拟合误差较小，可为设计人员提供计算依据。考虑建造成本和桩基稳定性，注浆压力优选 4 MPa。

2.2 注浆量对浆液最大扩散半径的影响

控制注浆压力 3 MPa、浆液黏度 40 cPa·s、裂缝高度 10 cm、裂缝宽度 200 cm，改变注浆量，得到后注浆浆液最大扩散半径变化趋势如图 3 所示。

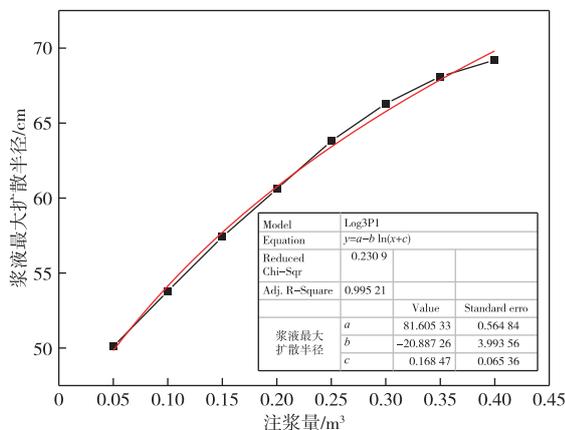


图 3 注浆量对浆液最大扩散半径的影响

Fig. 3 Effect of grouting amount on the maximum diffusion radius of slurry

从图 3 可以看出，随着注浆量的增加，浆液最大扩散半径先增大，后增大幅度趋于平缓。分析其原因认为，在低注浆量下，浆液虽然有足够的能量向外部拓展，但受到浆液量的限制，难以达到土壤深层，当注浆量升高时，在足够的动力驱动下更多浆液向外部渗透劈裂，最大扩散半径快速增大；在高注浆量下，虽然浆液量足够，但动力不足导致最大扩散半径变化趋于平缓。由图 3 可知，当注浆量为 0.05 m³ 时，浆液最大扩散半径为 50.1 cm，当注浆量达到 0.3 m³ 后，浆液最大扩散半径达到 66.3 cm 且变化开始趋于平缓，当注浆量为 0.4 m³

时，浆液最大扩散半径为 69.2 cm，注浆量对最大扩散半径的影响相对较大。采用对数形式拟合注浆量与浆液最大扩散半径的关系（图 3），曲线拟合优度为 0.995 21。

2.3 黏度对浆液最大扩散半径的影响

控制注浆压力 3 MPa、注浆量 0.2 m³、裂缝高度 10 cm、裂缝宽度 200 cm，改变浆液黏度，得到后注浆浆液最大扩散半径变化趋势如图 4 所示。

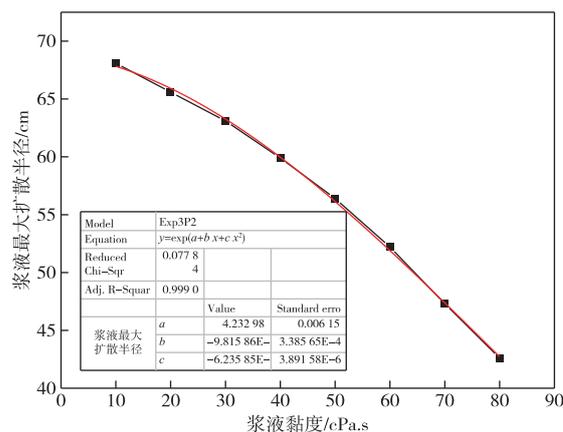


图 4 黏度对浆液最大扩散半径的影响

Fig. 4 Effect of viscosity on the maximum diffusion radius of slurry

由图 4 可知，随着浆液黏度的升高，最大扩散半径减小。这是因为，当浆液黏度升高时，其流动性下降，浆液内部摩擦力和黏结力造成流体部分能量损失，促使其扩展能力下降，而浆液黏度升高后，浆液与土层黏结力加强，浆液向土层深处的渗透能力降低，导致最大扩散半径减小。当浆液黏度为 10 cPa·s 时，最大扩散半径为 68.1 cm，当浆液黏度升高至 80 cPa·s 时，最大扩散半径减小至 42.6 cm。采用对数形式拟合浆液黏度与最大扩散半径关系（图 4），曲线拟合优度为 0.999 0。工程技术人员在设计水泥浆配合比时，在考虑力学性能基础上应引入浆液黏度对最大扩散半径的影响。

2.4 裂缝高度对浆液最大扩散半径的影响

控制注浆压力 3 MPa、注浆量 0.2 m³、浆液黏度 40 cPa·s、裂缝宽度 200 cm，改变裂缝高度，得到后注浆浆液最大扩散半径变化趋势如图 5 所示。

由图 5 可知，随着裂缝高度的增加，浆液最大扩散半径先增大后降低。这是因为，当裂缝高度较小时，浆液受到裂缝高度的限制流动阻力变大，当

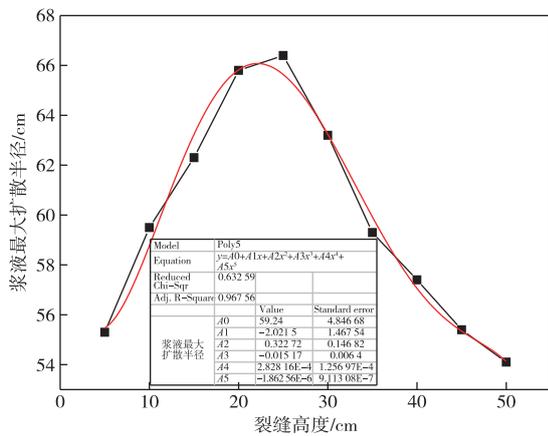


图5 裂缝高度对浆液最大扩散半径的影响
Fig. 5 Effect of crack height on the maximum diffusion radius of slurry

裂缝高度升高时，浆液流动阻力降低，最大扩散半径显著升高。当裂缝高度较大时，流动阻力不再是影响流动的主要因素，在注浆量和注浆压力一定时，浆液不仅需要向横向渗透劈裂，还需要向纵向流动填充，导致其最大扩散半径降低。当裂缝高度为 5 cm 时，浆液最大扩散半径为 55.3 cm，当裂缝高度达到 25 cm 时，浆液最大扩散半径增大至最大值 66.4 cm，当裂缝高度继续增加至 50 cm，浆液最大扩散半径反而降低至 54.1 cm。采用多项式形式拟合裂缝高度和最大扩散半径的关系（图 5），对应曲线拟合优度为 0.967 56。因此，裂缝高度为 25 cm 有利于灌注桩承载能力的提升。

2.5 裂缝宽度对浆液最大扩散半径的影响

控制注浆压力 3 MPa、注浆量 0.2 m³、浆液黏度 40 cPa·s、裂缝高度 10 cm，改变裂缝宽度，得到后注浆浆液最大扩散半径变化趋势如图 6 所示。

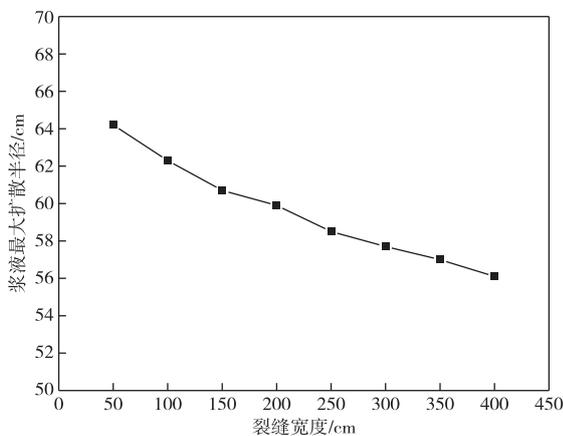


图6 裂缝宽度对浆液最大扩散半径的影响
Fig. 6 Effect of crack width on the maximum diffusion radius of slurry

由图 6 可知，随着裂缝宽度的增加，浆液最大扩散半径降低。注浆宽度主要影响注浆向两侧的发展，对纵向最大扩散半径影响较小。当裂缝宽度为 50 cm 时，浆液最大扩散半径为 64.2 cm，当裂缝宽度达到 400 cm 后，浆液最大扩散半径减小至 56.1 cm。

对比各因素对浆液最大扩散半径的影响，注浆压力、注浆量、黏度的影响较大，裂缝高度的影响相对较小，裂缝宽度的影响最小。

3 结论

工艺参数注浆压力、注浆量、浆液黏度以及注浆扩展裂缝高度和宽度对灌注桩桩基后注浆浆液扩散均具有一定影响，随着注浆压力的增加，浆液最大扩散半径先增大后增大幅度趋于平缓，考虑建造成本和桩基稳定性，注浆压力优选 4 MPa。随着注浆量的增加，浆液最大扩散半径先增大后增大幅度趋于平缓。随着浆液黏度的升高，最大扩散半径减小，工程技术人员在设计水泥浆配合比时，在考虑力学性能基础上应引入浆液黏度对最大扩散半径的影响。随着裂缝高度的增加，浆液最大扩散半径先增大后减小，裂缝高度为 25 cm 时，有利于灌注桩承载能力的提升，裂缝宽度对最大扩散半径的影响较小。

参考文献

[1] 周佳媚, 覃青松, 张雨帆. 考虑稠度空间分布的盾构壁后注浆扩散模型[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 61-68.
ZHOU J M, QIN Q S, ZHANG Y F. Diffusion model of grouting behind shield wall considering the spatial distribution of consistency [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(1): 61-68.

[2] 徐加兴, 沈贤德, 邱县金, 等. 矿山酸性废水处理高密度泥浆法及辅助沉降协同试验研究[J]. 矿冶, 2019, 28(6): 88-91.
XU J X, SHEN X D, QIU X J, et al. Synergistic study on high density sludge process and auxiliary settlement method in treatment of acid mine drainage[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(6): 88-91.

[3] 金智荣, 孙悦铭, 包敏新, 等. 基于真三轴压裂物理模拟系统的暂堵压裂裂缝扩展规律试验研究[J]. 非常规油气, 2021, 8(6): 98-105.
JIN Z R, SUN Y M, BAO M X, et al.

- Experimental study on crack propagation law of temporary plugging fracturing based on true triaxial fracturing physical simulation system[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2021, 8(6): 98-105.
- [4] 薛颖, 石立华, 曹跃, 等. 一种新的非线性渗流数值模拟模型[J]. *非常规油气*, 2022, 9(5): 103-116.
XUE Y, SHI L H, CAO Y, et al. A new nonlinear seepage numerical simulation model[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2022, 9(5): 103-116.
- [5] 叶飞, 夏天哈, 应凯臣, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液与地层适配性优选方法[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(12): 2225-2233.
YE F, XIA T H, YING K C, et al. Optimization method for backfill grouting of shield tunnel based on stratum suitability characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(12): 2225-2233.
- [6] 宋帮红, 闵凡路, 张建峰, 等. 三乙醇胺和快硬硫酸铝酸盐水泥对盾构壁后注浆浆体性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 2886-2896.
SONG B H, MIN F L, ZHANG J F, et al. Enrichment and recovery of scandium in hydrometallurgical process of Ramu laterite nickel ore[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(11): 2886-2896.
- [7] 王辉林, 杨鹏. 某铅锌矿全尾砂充填胶结材料优化研究与应用[J]. *矿冶*, 2021, 30(6): 11-15.
WANG H L, YANG P. Optimization and application of cementation material for full tailings filling in a lead-zinc mine[J]. *Mining and Metallurgy*, 2021, 30(6): 11-15.
- [8] 王贵森, 洪宝宁, 孙东宁, 等. 联合后注浆对群桩基础工程特性的影响[J]. *公路*, 2022, 67(9): 203-211.
WANG G S, HONG B N, SUN D N, et al. Research on influence of combined post-grouting on the engineering characteristics of group pile foundation[J]. *Highway*, 2022, 67(9): 203-211.
- [9] 孙长坤, 于永纯, 魏晓明, 等. 充填料浆沉缩性能试验研究[J]. *矿冶*, 2021, 30(6): 16-19.
SUN C K, YU Y C, WEI X M, et al. Experimental study on the shrinkage performance of backfill slurry[J]. *Mining and Metallurgy*, 2021, 30(6): 16-19.
- [10] 金浩增, 赵志红, 唐鹏程, 等. 页岩储层黏土矿物水化膨胀致裂数值模拟研究[J]. *非常规油气*, 2022, 9(2): 125-131.
JIN H Z, ZHAO Z H, TANG P C, et al. Research on numerical simulation of hydration swelling and cracking of clay minerals in shale reservoir [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2022, 9(2): 125-131.
- [11] 龚浩, 张华礼, 唐庚, 等. 金华一中台山区块致密砂岩储层井壁稳定判断及出砂预测[J]. *非常规油气*, 2021, 8(3): 124-130.
GONG H, ZHANG H L, TANG G, et al. Judgment of wellbore stability and sand production prediction of tight sandstone reservoir in Jinhua-Zhongtaishan block[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2021, 8(3): 124-130.
- [12] 闵凡路, 马佳伟, 俞超杰, 等. 盾构隧道壁后注浆固结装置研发及试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(4): 1241-1249.
MIN F L, MA J W, YU C J, et al. Development and experimental study of consolidation device of shield tunnel backfill grouting[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(4): 1241-1249.
- [13] 丁扬, 熊晔, 陈孜孜, 等. 灌注桩动力特性试验与数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊 2): 640-646.
DING Y, XIONG Y, CHEN Z Z, et al. Field test and numerical simulation for dynamic characteristics of cast-in-place pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup. 2): 640-646.
- [14] 张万春, 郭布民, 孔鹏, 等. 柿庄南煤层气重复压裂裂缝形态反演及效果分析评价[J]. *非常规油气*, 2022, 9(1): 119-128.
ZHANG W C, GUO B M, KONG P, et al. Fracture morphology inversion and effect evaluation of CBM refracturing in southern Shizhuang Block[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2022, 9(1): 119-128.
- [15] 周亚龙, 王旭, 张延杰, 等. 灌注桩基础桩底复合式后注浆及承载特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(10): 1864-1872.
ZHOU Y L, WANG X, ZHANG Y J, et al. Composite post grouting at pile tip and bearing characteristics of cast-in-place pile foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 1864-1872.
- [16] 李文广, 王东武, 张晨光, 等. 黏度时变双液浆盾构壁后注浆过程数值模拟研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2022, 50(4): 420-427.
LI W G, WANG D W, ZHANG C G, et al. Research on numerical simulation of shield tunnel backfill grouting by cement and sodium silicate mixed grout considering time-dependency of viscosity[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2022, 50(4): 420-427.

- [17] 林志豪, 陈宏湛, 陈仁伟, 等. 滨海软基后注浆灌注桩承载性状现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊 2): 578-586.
LIN Z H, CHEN H Z, CHEN R W, et al. Field test on bearing behavior of cast-in-situ pile with post grouting in coastal soft foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Sup. 2): 578-586.
- [18] 卢萍珍, 孙宏伟, 方云飞. 深厚砂层灌注桩后注浆提高系数试验分析[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(2): 116-121.
LU P Z, SUN H W, FANG Y F. Test analysis of post-grouting improvement coefficient for cast-in-situ pile in thick sand layers [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2022, 36(2): 116-121.
- [19] 袁征, 黄杰, 袁文奎, 等. 压裂裂缝长期导流能力衰退规律实验研究[J]. 非常规油气, 2022, 9(3): 78-82, 102.
YUAN Z, HUANG J, YUAN W K, et al. Experimental study on long term conductivity decline of hydraulic fracturing fracture[J]. Unconventional Oil and Gas, 2022, 9(3): 78-82, 102.
- [20] 张晓华, 王旭, 周亚龙, 等. 桩底复合式后注浆灌注桩的竖向承载特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 206-215.
ZHANG X H, WANG X, ZHOU Y L, et al. Study on vertical bearing characteristics of composite post grouting cast-in-place pile at pile bottom [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 206-215.