

新型钻孔微型桩单桩极限承载性能的探讨

Ultimate Bearing Performance of a Novel Single Bored Micro-pile

赵玉成¹, 刘栩阳¹, 马朝阳²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043, 2. 唐山市规划建筑设计研究院有限公司, 唐山 063000)

摘要: 提出并探讨了一种新型微型桩结构, 在传统微型桩基础上, 创新性地采用单根螺旋钢筋替代传统钢筋笼。基于 Abaqus 有限元分析软件, 构建了新型钻孔微型桩的三维数值模型, 系统研究了其承载性能、破坏模式、荷载传递机制及关键影响因素。结果表明: 桩长对抗拔承载力提升效应显著, 但当桩长超过临界值后, 承载力增长呈现递减特性; 桩身设置合理倾角可有效增强基础稳定性; 桩土材料参数中土体黏聚力对承载力影响相对较小, 桩土间摩擦系数对承载力影响较大。结果可为相关工程提供参考。

关键词: 新型钻孔微型桩; 数值模拟; 承载能力

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0062-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.012

ZHAO Yucheng¹, LIU Xuyang¹, MA Zhaoyang²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Tangshan Planning and Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: This study proposes and investigates a novel micropile structure, which innovatively utilizes a single helical reinforcement bar to replace the traditional reinforcement cage. Using the Abaqus finite element analysis platform, a three-dimensional numerical model of the novel bored micropile was established. The model was employed to systematically investigate its bearing performance, failure modes, load transfer mechanisms, and key influencing factors. The results indicate that the pile length significantly enhances the uplift bearing capacity; however, beyond a critical length, the capacity increase exhibits a diminishing growth pattern. Setting an appropriate inclination angle for the pile body can effectively enhance foundation stability. Among the pile-soil material parameters, soil cohesion has a relatively minor influence on the bearing capacity, while the friction coefficient at the pile-soil interface exerts a more substantial effect. The findings of this study can provide valuable references for related engineering practices.

Key words: novel single bored micro-pile; numerical simulations; ultimate bearing performance

0 引言

目前在架空输电线路中, 软弱地基或地下水位较高地段多采用灌注桩基础, 该基础施工方法传统, 施工过程不利于环保, 施工成本较高, 且对于一些

比较偏远的地方, 灌注桩成孔机械也不易进入施工场地, 会增加施工的难度。为解决此难题, 提出一种能够在软土地基输电线路工程中应用的新型钻孔微型桩杆塔基础。微型桩作为一种小桩基础, 具有布置灵活、高效、环保、可在狭小场地施工等特点常常被用于基础加固和边坡治理中^[1-2]。许多学者对微型桩进行深入研究。郑静等^[3]通过大型模型试验方法对垂直微型桩群的侧向承载特性进行了研究; 胡富贵等^[4]通过数值分析发现微型桩遭受弯曲损伤

作者简介: 赵玉成 (1969—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 城市地下工程理论与应用。

收稿日期: 2024-04-18

时,其抗弯性能并未消失而桩身的抗拔性能得到发挥,并研究了微型桩的破坏过程和机制;Doohyun等^[5]研究了微型桩的横向承载能力,结果显示侧向荷载作用下被动破坏区越大,微型桩表面的摩擦力越大,斜向微桩的侧向承载能力越高;Cheng等^[6]设计一种基于数值模拟软件的桩长优化模型;Farooqi等^[7]发现微型桩间距的减小和横向范围的增加会使承载能力显著改善;张秋晗等^[8]采用 Abaqus 软件模拟运算交叉倾斜群桩模型分析了微型桩基础中桩 - 土相互作用;胡明等^[9]应用有限元软件 Ansys 证明倾斜微型桩的设计对于工程应用具有积极的意义;欧煜^[10]通过 Abaqus 软件分析了微型桩的位移分布规律;夏峻等^[11]基于微型桩原位静载荷试验,分析了桩长、桩径及黄土湿陷性等不同参数对微型桩承载性能的影响,进一步分析了桩长、桩径及桩身弹性模量对其抗拔及抗压承载性能的影响;陈国军等^[12]利用数值分析的方法建立模型得出了随着微型桩倾斜角度的增加,稳定性系数先增大后减小,倾斜桩体能更好地增强边坡的整体稳定性;马鹏杰等^[13]进行了微型桩加固长大缓倾裂隙土边坡的参数影响模型试验,得出了微型桩提供的抗滑阻力随桩长增加而增加,但提升效率随桩长增加而减小的结论。

综上所述,众多学者已经对微型桩进行了较为深入的研究和广泛的工程应用。为了便于施工,节省资源,设计一款新型微型桩,采用一根螺旋钢筋代替传统钻孔微型桩中的钢筋笼制作微型桩。用 Abaqus 有限元软件分析某一特定尺寸的新型钻孔微型桩承载性能,及微型桩的桩长、材料参数和倾斜角度对新型钻孔微型桩单桩承载性能的影响。

1 单桩极限抗拔承载力的分析

1.1 新型钻孔微型桩结构构造

新型微型桩结构是在传统微型桩的基础上进行改造,采用单根螺纹钢杆代替传统微型桩结构的钢筋笼,如图 1 所示。根据微型桩的实际施工条件,微型桩的直径(即 D)应小于 400 mm,长细比(L/D)应大于 30。

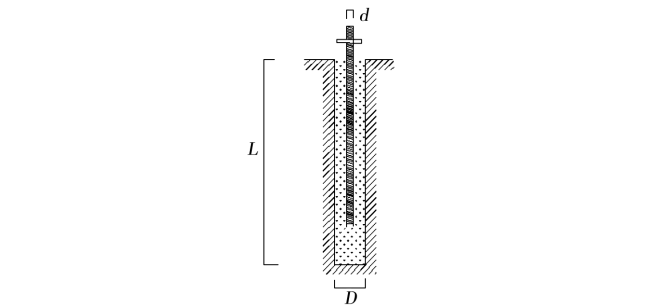


图 1 新型钻孔微型桩结构简图
Fig. 1 Structure diagram of the new drilled micro pile

1.2 建立模型

在进行有限元模拟时,将多层土等效为单层土进行建模分析;桩土接触面的摩擦系数 μ 跟 φ 相关,关系式为 $\mu = \tan (0.75\varphi)$;选取增量加载的方法对桩顶进行荷载施加,通过设置多个分析步,等量增加每个分析步中荷载数值,从而求得荷载 - 位移曲线关系。

选取某新型钻孔微型单桩,钢筋直径尺寸 d 为 38 mm,桩直径 D 为 152 mm,桩长 L 为 13 m。桩土参数见表 1。

表 1 单桩模型桩土参数					
Table 1 Pile and soil parameters of a single pile model					
名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/ (^{\circ})$
土	18	20	0.3	21	14
桩	24	300 00	0.2		
钢筋	24	200 000			

单桩与土体的接触类型采用面 - 面接触关系,通过在桩体与土体之间设置摩擦系数的方式进行数值模拟。为了能够使桩体接触尽快达到一种极限平衡状态,采用增量加载的方法对桩顶施加载荷^[14],设置 6 个分析步,初始分析步中施加载荷为 30 kN,以后每个分析步中等量增加荷载 30 kN。新型钻孔微型桩模型如图 2 所示。

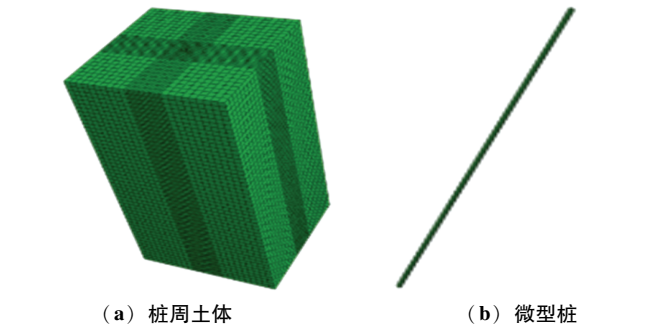


图 2 新型钻孔微型桩网格模型
Fig. 2 Innovation micro - network model for bored piles

1.3 结果数据分析

对模拟结果云图进行后处理时,使输出结果只显示桩基础竖向的位移云图,可得到在上拔荷载为180 kN时新型钻孔微型桩的变形情况,及沿着桩长建立有效路径数据,如图3所示。在上拔荷载作用下,桩体上部变形较大,下部变形较小,由上至下呈递减趋势,随着桩深的增加,位移近似成线性减小。

新型微型桩桩顶荷载-位移曲线关系如图4所示。当桩顶上拔位移从0逐渐增大到12 mm时,荷载也呈现出线性递增趋势;而当桩顶位移达到12 mm时,曲线走势开始发生突变;当桩顶位移大于12 mm

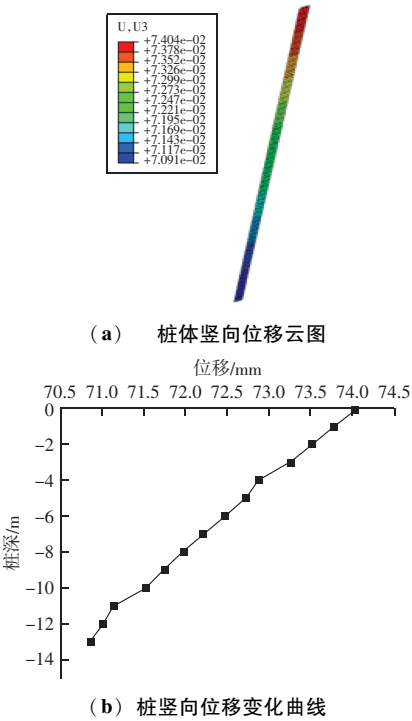


图3 桩竖向位移图
Fig. 3 Pile vertical displacement

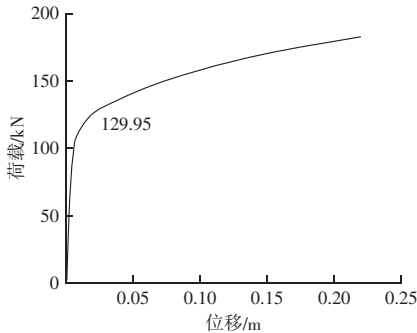


图4 上拔荷载下新型钻孔微型桩荷载-位移曲线图
Fig. 4 Load-Displacement curve for innovative bored micro-plies subject to uplift load

后,随着位移的不断增加,荷载增加越来越缓慢。荷载-位移曲线类型为陡变型,抗拔极限承载力值为129.95 kN。

由图5可知,当桩体承受不同的上拔荷载时,均是桩体上部轴力值较大,桩体下部轴力较小。而到桩端处轴力数值均趋近于0,几乎无轴力存在。

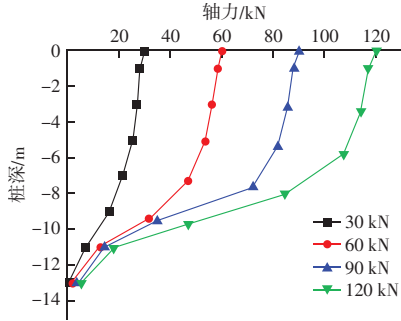


图5 轴力沿桩深变化曲线图
Fig. 5 Axial force variation curve along pile depth

当桩深在0~4 m时,轴力变化较小,表明在荷载很小且保持恒定值时,桩顶的侧向阻力已充分发挥。继续增加荷载,桩中部和底部的轴力发生显著变化,因为当桩顶侧向阻力充分展开时,荷载完全由桩下部侧向阻力承受,桩底侧向阻力随着荷载的增大而增大。按照等截面抗拔桩经验公式计算抗拔极限承载力值为138.28 kN。有限元分析结果与用工程经验公式所算出的单桩抗拔承载力比较吻合,说明该模型能较好地模拟新型微型桩的承载性状。

2 上拔承载性能影响因素分析

2.1 桩体参数改变对承载性能影响

2.1.1 桩长

分别选取桩长为8、10、13、17 m的单桩进行模拟分析,不同桩长的荷载-位移曲线如图6所示。当桩长为8 m时,极限承载力仅为82.27 kN,而当桩长逐渐增大到17 m时,极限承载力也增大到153.42 kN;增大了1.86倍。随着桩长的增加,桩的自重也逐渐增大,可以抵消一部分上拔力。由图7可知,随着桩长 L 的增加,新型钻孔微型桩的抗拔极限承载力增大趋势越来越缓慢,说明在受上拔荷载时,并不是桩长越长桩体抗拔承载性能越好。充分说明新型钻孔微型桩存在一个发挥其最优抗拔性能的有效桩长。取桩长 $L=40D$ 的单桩抗拔极限承载力数值作为基准,得到如图8所示曲线关系。

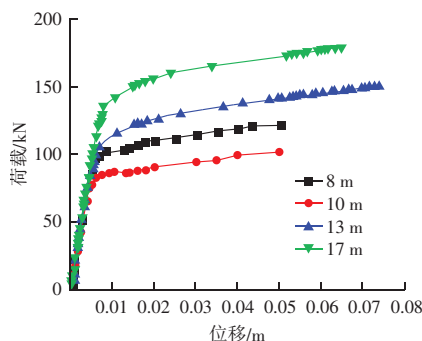


图6 桩长改变下的荷载-位移曲线图

Fig. 6 Load-Displacement curve of pile length changed

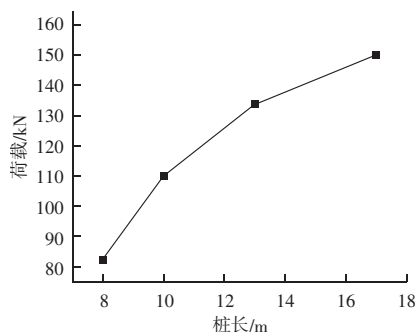


图7 承载力随桩长变化的曲线图

Fig. 7 Curve of bearing capacity with pile length

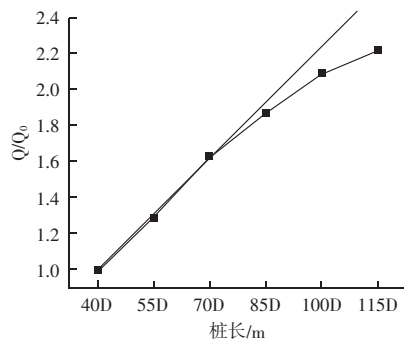


图8 单桩抗拔承载力随桩长变化曲线图

Fig. 8 Curve of uplift capacity of single pile with pile length

当桩长达到 $40D \sim 85D$ 时, 单桩抗拔承载力随桩长的增长呈现出比较明显的线性特征; 当桩长超过 $85D$ 时, 曲线呈现初步非线性特征; 当桩长达到 $100D$ 时, 其最大承载力增长到 $40D$ 桩长的 2.49 倍; 当桩长达到 $115D$ 时, 其最大承载力只增长到 $40D$ 桩长的 2.58 倍。当桩长达到 $115D$ 时, 与桩长为 $100D$ 时极限承载力相比, 相差较小, 结合施工场地和器材的情况, 合理桩长不宜超过 $100D$ 。

2.1.2 倾角

带有倾角的微型桩可以大大增加地基承载力的稳定性, 但如果桩体倾角过大, 桩基的承载力就会

下降。因此, 分别选取倾角 φ 为 0° 、 6° 、 12° 、 18° 的微型桩单桩进行有限元模拟分析 (φ 为桩体与竖直面夹角)。

由图9及图10可知, 当桩身倾角从 0° 逐渐增大到 12° 时, 极限承载力值从 131.3 kN 逐渐增大到 147.6 kN ; 而当桩身倾角增长到 18° 时极限承载力值仅为 135.4 kN , 相较于 12° 时承载力显著减小。这是因为微型桩在抵抗上拔荷载时, 当桩体倾斜程度变化较大时, 会产生较大的弯矩。但微型桩体截面较小, 桩体刚度有限, 承受弯矩的能力较弱, 因而抗拔承载能力降低。另外, 如果桩身倾斜过大, 桩身外上覆土的重量会减小, 桩的埋深会变浅, 也会导致抗拔承载力逐渐降低。结合施工现场的工具特点与施工过程的可行性, 建议新型微型桩单桩的倾角可取为 12° 。

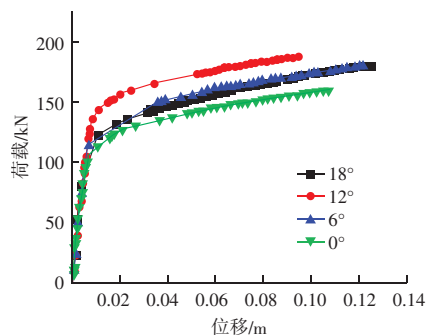


图9 倾角改变的荷载-位移曲线图

Fig. 9 Load-Displacement curve with changing inclination angle

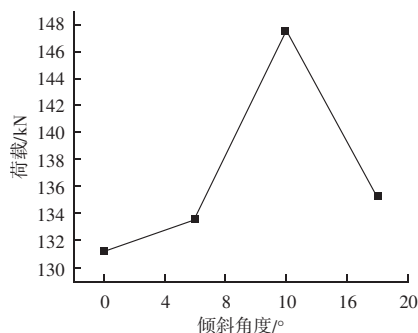


图10 倾角改变极限荷载值曲线图

Fig. 10 Curve of ultimate load value under change of inclination angle

2.2 材料参数改变对承载力的影响

2.2.1 土体的黏聚力

选取桩长 L 为 13 m , 桩直径 D 为 152 mm 的新型钻孔微型桩单桩, 仅改变土体黏聚力 c , 取 c 值为 5 、 15 、 25 、 35 kPa 进行单桩有限元模拟分析。桩顶荷载-位移曲线如图11所示。荷载随着黏聚力 c 的增

岩土力学

大而增加,但增长幅度很小。说明黏聚力 c 对桩长 L 为 13 m、桩径 D 为 152 mm 的新型微型桩单桩承载性能影响比较小。

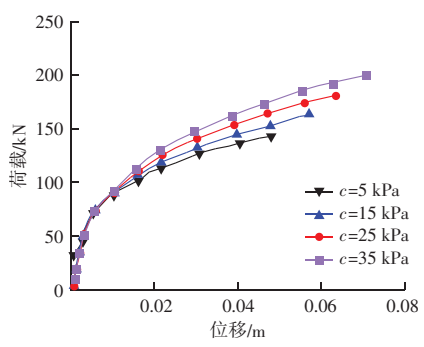


图 11 土体黏聚力改变下的荷载 - 位移曲线

Fig. 11 Load - Displacement curve under soil cohesion change

2.2.2 桩土间摩擦系数

分别取摩擦系数 μ 为 0.2、0.3、0.4 的新型钻孔微型桩单桩进行有限元模拟分析,其他参数不变,桩顶的荷载 - 位移曲线如图 12 所示。当摩擦系数 μ 为 0.2 时,单桩极限抗拔承载力仅为 103.28 kN;而当摩擦系数 μ 逐渐增大到 0.4 时,单桩极限抗拔承载力增大,为 162.63 kN。可见,随着摩擦系数 μ 的增加,单桩抗拔承载性能也随之提升。这主要是因为随着桩土界面摩擦系数增大,接触面变得粗糙,从而导致单桩抗拔承载力增大。

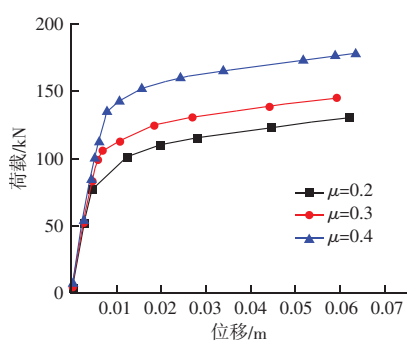


图 12 不同摩擦系数 μ 的荷载 - 位移曲线图

Fig. 12 Load - Displacement curves of different friction coefficients μ

3 破坏模式

在 Abaqus 有限元软件里一般用输出变量 pemag 来表示土体的破坏情况,提取有效桩长为 6 m 的新型微型桩单桩土体破坏云图 (如图 13 所示)。当上拔荷载为 300 kN 时,土体还未发生破坏,只在桩体上部沿着桩土交界面出现少许塑性区;随着上拔荷

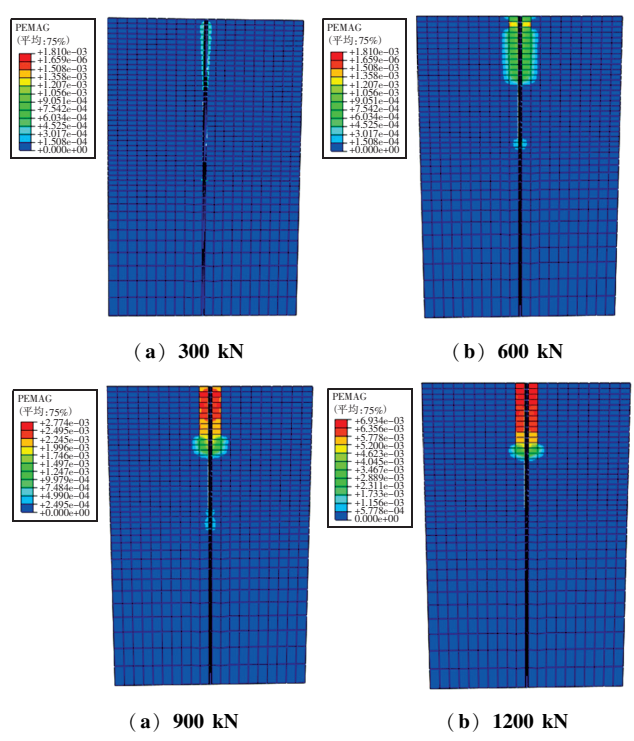


图 13 不同荷载下 6 m 桩的破坏形态

Fig. 13 Failure modes of 6 m piles under different loads

载增加到 600 kN 时,土体破坏,由桩顶沿着桩土接触面向下传递,形成一个沿着桩 - 土交界面的圆柱形剪切面;当荷载增加到 900、1 200 kN 时,可以发现桩土接触部分的土体破坏逐渐加大,传递方向仍然是从桩顶沿着桩土接触面向下传递,且形成的破坏面仍是沿着桩 - 土交界面的圆柱形剪切面,因此可以判断出新型微型桩的破坏模式属于沿接触面的剪切破坏,破坏面的竖向深度大约为 2.9 m,约为桩长的 1/2。

有效桩长为 8、10 m 时,与有效桩长 6 m 的新型微型桩单桩破坏模式规律相同,均为沿接触面的剪切破坏,形成的破坏面竖向长度约为桩长的 1/2。

4 结论

采用 Abaqus 有限元分析法建立模型,分析新型钻孔微型桩单桩的承载性能和破坏情况,不同荷载作用下、不同桩长和倾角及土体黏聚力和桩土间摩擦系数对微型桩承载性能的影响,得出以下主要结论:

- (1) 桩长的增加对于提高单桩抗拔承载性能效果明显,但当桩长过长时,增长趋势越来越缓慢,说明存在着发挥其最优性能的临界桩长,合理桩长不宜大于 100D。

(2) 新型微型桩存在倾角时, 承载稳定性会有较大的提升; 但桩身倾角过大时就会破坏桩基础承载稳定性, 最佳倾角取为 12° 为宜。

(3) 桩土材料参数中土体黏聚力对承载力影响相对较小, 桩土间摩擦系数对承载力影响较大。通过增大摩擦系数, 可使单桩抗拔承载性能得到很大提升, 在施工时可采用二次注浆的方式来提升新型钻孔微型桩单桩的承载性能。

(4) 新型钻孔微型桩基础在承受上拔荷载时单桩破坏模式为沿接触面的剪切破坏。

参 考 文 献

- [1] 邱昊茨, 武奋前, 张文翔, 等. 特高压输电线路机械化施工山地微型桩基础设计技术研究 [J]. 能源与环境, 2023 (4): 29–33.
- [2] 张乾坤. 万里水库库岸荷载边坡塌方与微型桩支护措施研究 [J]. 陕西水利, 2022 (10): 145–147.
- [3] 郑静, 安孟康. 微型桩侧向承载特性现场大型模型试验研究 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (6): 122–126.
- [4] 胡富贵, 巢万里, 冯龙健. 基于极限抗力的微型单桩加固边坡承载失效模式研究 [J]. 公路, 2020, 65 (4): 12–18.
- [5] DOOHYUN KYUNG, JUNHWAN LEE. Interpretative analysis of lateral load-carrying behavior and design model for inclined single and group micropiles [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2018, 144 (1).
- [6] CHENG H, SUI G, WANG G, et al. Study on the optimization of pile length of micropiles in soil landslides [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (17): 9980.
- [7] FAROOQI M A, ALI K, SHAH I A, et al. Effect on bearing capacity and settlement behaviour of fly-ash reinforced with fine micropiles [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2023, 18 (6): 539–547.
- [8] 张秋晗, 甘凤林. 输电铁塔微型桩基础中桩-土共同作用研究 [J]. 吉林电力, 2013, 41 (1): 34–36.
- [9] 胡明, 雷用, 赵晓柯. 倾斜微型桩桩身参数敏感性有限元分析 [J]. 后勤工程学院报, 2014, 30 (1): 12–16.
- [10] 欧煜. 微型桩轻型挡墙在边坡滑塌治理中的应用 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (2): 84–91.
- [11] 夏峻, 白汗章, 王佳佳, 等. 黄土地基微型桩基础上拔及下压承载性能研究 [J]. 应用力学学报, 2023, 40 (2): 340–349.
- [12] 陈国军, 毛少霞, 张雪云, 等. 基于 Abaqus 的倾斜微型桩护坡承载特性研究 [J]. 科技和产业, 2023, 23 (19): 145–150.
- [13] 马鹏杰, 芮瑞, 曹先振, 等. 微型桩加固长大缓倾裂隙土边坡模型试验 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (6): 1695–1707.
- [14] 邓楚键, 孔位学, 郑颖人. 极限分析有限元法讲座Ⅲ——增量加载有限元法求解地基极限承载力 [J]. 岩土力学, 2005 (3): 500–504.
- [15] 硅酸盐学报, 1–12 [2025–06–18]. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20240826>.
- [12] 韩建国, 毕耀, 黎梦圆, 等. 矿物掺合料和化学外加剂对胶凝材料浆体的流变参数的影响 [J]. 土木工程学报, 2021 (10): 55–63.
- [13] 刘豫. 新拌混凝土流变的测量、模型及其应用 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2020.
- [14] 胡阳, 刘亚炜, 吴颖辉, 等. 两种改性剂对注浆材料流变性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (9): 3135–3142.
- [15] 刘一帆, 吴泽媚, 张轩翰, 等. 超高性能混凝土流变特性及调控研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51 (11): 3025–3038.
- [16] KUDER G K, OZYURT N, MU B E, et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 37 (2): 191–199.
- [17] 于海洋. 聚乙烯醇-玄武岩纤维混杂增强水泥基复合材料力学性能研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [18] PLANK J, SAKAI E, MIAO C, et al. Chemical admixtures – chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability [J]. Cement and Concrete Research, 2015 (78): 81–99.
- [19] LILI K, NING K, FEI W. Effects of thickener on macro- and meso-mechanical properties of ECC [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023 (19): e02292.
- [20] 张艺劼. 高分子增稠剂对新拌水泥浆体性能的影响及机理研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- [21] 水亮亮, 杨海静, 孙振平, 等. 聚羧酸系减水剂作用机理的研究进展 [J]. 建筑材料学报, 2020 (1): 64–69.
- [22] 彭毅. 增稠剂与聚羧酸减水剂的协同作用对水泥浆体流变性的影响 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [23] FUNK J E, DINGER D R, et al. Particle packing, part VI – applications of particle size distribution concepts [J]. Interceram, 1994 (43): 350–353.
- [24] ROUSSEL N. 聚合物和新拌混凝土性能研究进展 (英文) [J]. 硅酸盐学报, 2015, 43 (10): 1401–1407.
- [25] KONG H, BIKE G S, LI C V. Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25 (3): 301–309.

(上接第 23 页)