

基体流变特性对工程水泥基复合材料性能的影响

Effect of Matrix Rheological Properties on the Properties of Engineering Cement-based Composites

褚少辉¹, 谷 峪², 于海洋^{2,3}, 曹 明⁴

(1. 河北省建筑工程质量检测中心有限公司, 雄安 071800; 2. 河北省建筑科学研究院有限公司, 石家庄 050227; 3. 河北省固废建材化利用科学与技术重点实验室, 石家庄 050227; 4. 沧州黄骅港航务工程有限公司, 沧州 061113)

摘 要: 工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composites, ECC) 的拉伸应变硬化性能高度依赖于纤维的均匀分散, 而基体流变特性是调控纤维分布的关键因素。通过调控水胶比、减水剂与增稠剂掺量, 结合流变测试、流动度试验及单轴拉伸试验, 系统探究了 ECC 基体流变特性与宏观力学性能的关联机制。结果表明: 基体流变行为符合 Modified Bingham (M-B) 模型, 其剪切变稀特性可抑制纤维团聚; 流动指标与塑性黏度呈显著线性负相关, 验证了流动度试验评价流变参数的可行性。当塑性黏度为 $2.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, ECC 拉伸应变硬化性能最优, 极限应变达 3.08%, 初裂强度与极限强度分别为 3.50 MPa 和 4.76 MPa。通过调控基体流变参数可实现纤维均匀分散与界面应力有效传递, 为 ECC 材料性能优化提供了量化设计依据。

关键词: 工程水泥基复合材料; 塑性黏度; 流动指标; 拉伸应变硬化

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0019-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.004

CHU Shaohui¹, GU Yu², YU Haiyang^{2,3}, CAO Ming⁴

(1. Hebei Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd., Xiong'an 071800, China; 2. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050227, China; 3. Hebei Province Science and Technology Key Laboratory of Solid Waste for Building Materials, Shijiazhuang 050227, China; 4. Cangzhou Huanghua Port Shipping Engineering Co., Ltd., Cangzhou 061113, China)

Abstract: The tensile strain-hardening behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) is highly dependent on the uniform dispersion of fibers, with the rheological properties of the matrix serving as a key factor governing fiber distribution. By adjusting the water-to-binder ratio, superplasticizer dosage, and thickener content, and combining rheological testing, flowability measurements, and uniaxial tensile tests, this study systematically investigates the correlation mechanism between the rheological properties of the ECC matrix and its macroscopic mechanical performance. The results indicate that the matrix

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (246Z3806G); 石家庄市后补助奖励专项资金项目 (246790147H); 石家庄市科技创新团队项目 (248790156A)。

作者简介: 褚少辉 (1985—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 土木工程。

通信作者: 曹 明 (1988—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑施工。

收稿日期: 2023-06-30

材料科学

rheological behavior conforms to the Modified Bingham (M-B) model, and its shear-thinning characteristics effectively inhibit fiber agglomeration. A significant linear negative correlation exists between flowability indicators and plastic viscosity, validating the feasibility of using flowability tests to evaluate rheological parameters. Optimal tensile strain-hardening performance was achieved at a plastic viscosity of 2.5 Pa s, yielding an ultimate strain of 3.08%, with first-crack strength and ultimate strength reaching 3.50 MPa and 4.76 MPa, respectively. Regulating matrix rheological parameters enables uniform fiber dispersion and effective interfacial stress transfer, providing a quantitative design basis for optimizing ECC material performance.

Key words: engineered cementitious composites; plastic viscosity; flow indicators; tensile strain hardening

0 引言

工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composites, ECC) 因其独特的拉伸应变硬化特性与多缝开裂行为, 在土木工程抗震加固与耐久性修复领域具有重要应用价值^[1-3]。这一性能源于 Yang 等^[4]、Kanda 等^[5]提出的微观力学设计理论: 通过精确调控纤维、基体与界面三者的力学参数, 使材料同时满足裂纹稳态扩展的强度准则与能量准则。然而, 实现上述理论性能的关键在于纤维的均匀分散, 当 PVA 纤维体积掺量达到 2% 时, 其亲水性羟基基团易引发范德华力吸附, 导致纤维束形成, 显著降低桥接应力传递效率^[6-8]。此外, 纤维间距大于 1.2 mm 时, 基体裂缝将优先扩展而非诱发多缝开裂, 导致材料呈现脆性断裂特征^[9]。因此, 基体流变特性作为控制纤维运动学的核心参数, 是优化 ECC 性能的关键^[10-11]。

新拌水泥基材料的流变行为通常采用 Bingham 模型描述, 但其对含增稠剂与超塑化剂体系的非线性响应预测存在局限^[12]。为此, Modified Bingham (M-B) 模型通过引入二次项系数, 可更准确表征剪切变稀或剪切变稠行为^[13-14]。塑性黏度与屈服应力的协同作用直接影响纤维分散效果: 塑性黏度过低时纤维因重力沉降导致竖向分布不均; 塑性黏度过高则增大纤维旋转阻力, 限制其空间取向随机性^[15-16]。这一发现揭示了通过调控流变特性改善纤维分散性的微观机制。

在不影响 ECC 的组成成分前提下, 使用外加剂控制基体材料的流变性能是保证硬化状态下复合材料拉伸延展性的主要途径, 常用的外加剂组合为高性能减水剂和增稠剂^[17]。减水剂通过静电排斥作用提高了水泥颗粒的分散性, 但随着时间推移, 排斥

层的减少会导致水泥颗粒重新黏聚, 致使黏度快速上升而影响工作性^[18]。增稠剂的聚合物长链通过稳定颗粒之间的空间, 可以延缓静电排斥力随时间的减小^[19-20]。此外, 聚羧酸减水剂的亲水性侧链通过空间位阻作用也能增加水泥颗粒分散稳定性^[21]。两者协同可形成“低塑性黏度高屈服应力”的流变特征, 兼顾工作性与纤维悬浮稳定性^[22]。值得注意的是, 增稠剂分子量对屈服应力的影响呈指数关系, 而减水剂侧链长度决定吸附形态, 从而影响塑性黏度。然而, 现有研究多聚焦于单一外加剂的作用机制, 对复配体系的流变动力学及其与纤维分散的定量关系尚未明晰, 这导致工程实践中仍依赖经验确定外加剂掺量, 显著制约了其工程应用。

针对上述问题, 以水胶比、减水剂掺量与增稠剂掺量为变量。基于颗粒堆积理论与 Alfred 理想级配模型^[23], 设计可实现剪切液化的基体配比, 通过流动度试验建立塑性黏度与流动指标的经验模型, 结合单轴拉伸试验, 定量表征流变参数对 ECC 拉伸应变硬化行为的影响规律, 探究 ECC 基体流变特性与宏观力学性能的关联机制。研究成果可为 ECC 的流变学设计与性能优化提供理论依据与实用化指导。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 水泥, 粉煤灰为 I 级低钙粉煤灰, 骨料为石英砂, 水泥、粉煤灰、石英砂的粒度分布如图 1 所示; 纤维为 Kuraray CES 15 型 PVA 纤维, 性能指标见表 1; 减水剂为西卡 325C 型粉状高效聚羧酸减水剂; 增稠剂为 20 万黏度的羟丙基甲基纤维素。设计 ECC 基体材料的水胶比分别为 0.25、0.30, 增稠剂掺量为各水胶比下设计胶凝材料质量的 0.02%、0.04%、0.06%, ECC 中纤维的掺量为 2%

的体积掺量，不同水胶比的减水剂掺量以不使用增稠剂时能保证新拌 ECC 具有良好工作状态且不泌水的减水剂用量确定，试验配合比见表 2。

表 1 聚乙烯醇纤维的相关性能参数
Table 1 Performance parameters of PVA fiber

密度 /(g/cm ³)	直径 /mm	长度 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	断裂延伸率 /%
1.3	0.039	12	1 620	42.8	7

表 2 ECC 基体材料的配合比
Table 2 Mixture ratio of ECC

编号	水胶比	水泥	粉煤灰	石英砂	水	减水剂 /%	增稠剂 /%
M0	0.25	1.0	1.2	0.8	0.55	0.7	
M2	0.25	1.0	1.2	0.8	0.55	0.7	0.02
M4	0.25	1.0	1.2	0.8	0.55	0.7	0.04
M6	0.25	1.0	1.2	0.8	0.55	0.7	0.06
N0	0.30	1.0	1.2	0.8	0.66	0.25	
N2	0.30	1.0	1.2	0.8	0.66	0.25	0.02
N4	0.30	1.0	1.2	0.8	0.66	0.25	0.04
N6	0.30	1.0	1.2	0.8	0.66	0.25	0.06

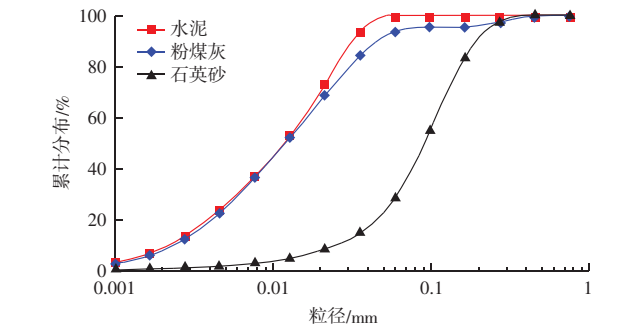


图 1 原材料粒度分布曲线
Fig. 1 Particle size distribution curve of raw materials

1.2 试验方法

使用 JJ-5 水泥胶砂搅拌机制备 ECC 材料。基体材料的制备工艺如图 2 所示，基体材料制备完毕后，

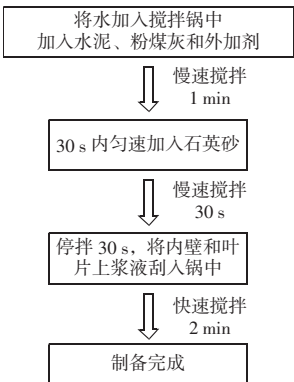


图 2 基材制备工艺流程
Fig. 2 Matrix preparation process

分两次加入 PVA 纤维，慢速搅拌 1 min 后再快速搅拌 2 min 即可得到新拌 ECC 材料。

使用博勒飞流变仪直接测定新拌基体砂浆在不同剪切速率下的剪切应力。由于掺加外加剂和矿物掺合料会使新拌水泥浆体出现剪切变稠或剪切变稀的情况^[24]，线性模型 Bingham 模型在描述浆体流变特性时会存在较大误差，因此使用非线性模型 M-B 模型^[13]，对浆体流变性进行拟合，得到 ECC 砂浆的塑性黏度。M-B 模型如下：

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma + c \cdot \gamma^2$$

(1)

式中： τ_0 为屈服应力，Pa； η 为塑性黏度，Pa·s； γ 为剪切速率，s⁻¹； τ 为剪切应力，Pa； c 为常数，表征流体的流变特性偏离线性的程度， $c > 0$ 表示剪切变稠， $c < 0$ 表示剪切变稀， $c = 0$ 即为 Bingham 模型。

使用水泥净浆流动度试模，参照 GB/T 8077—2023《混凝土外加剂匀质性试验方法》对浆体流动度进行测试，新拌基体流动性以流动指标 Γ 表征，流动指标的计算公式^[25]如下：

$$\Gamma = \frac{d_f^2 - d_0^2}{d_0^2}$$

(2)

式中： d_f 为新拌基体的流动度； d_0 为水泥净浆流动度试模底部直径，为 60 mm。

单轴拉伸试验采用狗骨形试件，每组配合比制备 3 个试件，试件成型后置于标准条件（温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $> 95\%$ ）下养护 28 d 后取出进行试验。单轴拉伸试验采用万能试验机进行，通过位移加载控制模拟准静态加载条件，加载速率为 0.15 mm/min，使用夹式引伸计测量试验过程中的应变信息，引伸计标距为 80 mm。

2 结果与讨论

2.1 基于液化机理的配合比分析

工程水泥基复合材料的工作性能主要受小尺寸颗粒的影响。由水泥、粉煤灰和石英砂组成的分散体系，加水搅拌后能够发生液化，液化行为有利于降低新拌浆体的抗剪强度，使基体材料具有更好的流动性，且在静置过程中产生自密实行为。

由基体材料混合物的粒度分布曲线，及基于液化机理确定 Alfred 粒度分布曲线，即理想粒度分布^[23]，如图 3 所示。

材料科学

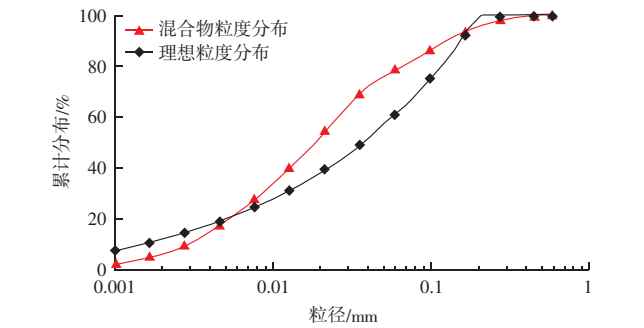


图3 混合物的粒径分布和理想粒径分布

Fig. 3 Article size distribution and ideal particle size distribution of mixtures

基体材料混合物的粒度分布与理想粒度分布较为接近，且 10~40 mm 尺寸的细小颗粒含量，混合物较理想分布曲线略高，说明该配比在理论上可以实现强制搅拌过程中混合物的液化。

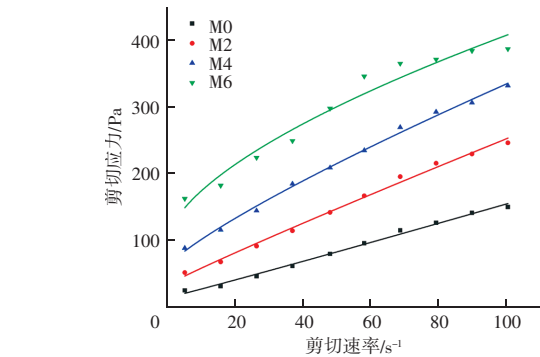
2.2 新拌基体材料的流变性

新拌基体材料的剪切速率-剪切应力 M-B 拟合曲线如图 4 所示。基体材料的剪切应力和剪切速率呈现正相关，且增稠剂掺量越大，同一剪切速率下的浆体剪切应力越大，表明增稠剂对提高基体材料的黏度有利。M-B 拟合曲线的参数值见表 3，M-B 模型中的常数 c 值均小于 0，说明各配比下新拌基体材料的流变特性均表现为剪切变稀，这对于 PVA 纤维在基材中的均匀分散是有利的。

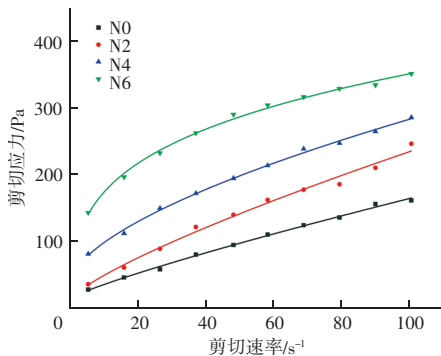
表3 M-B 拟合曲线的参数值

Table 3 Parameter values of M-B fitting curve

编号	τ_0/Pa	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	c	R^2
M0	11.91	1.45	-0.000 3	0.993 72
M2	32.75	2.48	-0.002 9	0.995 13
M4	67.58	3.34	-0.006 9	0.997 43
M6	122.98	4.69	-0.002 0	0.979 60
N0	18.03	1.75	-0.002 9	0.997 23
N2	24.73	2.58	-0.004 8	0.988 59
N4	67.56	3.16	-0.010 3	0.996 56
N6	129.96	4.32	-0.021 9	0.992 02



(a) 水胶比 0.25



(b) 水胶比 0.30

图4 新拌基体材料的 M-B 拟合曲线

Fig. 4 M-B fitting curve of fresh matrix material

2.3 新拌基体材料的流动性

表 4 为各配比基体材料的塑性黏度 η 和流动指标 Γ ，对塑性黏度和流动指标进行拟合，如图 5 所示。可知流动指标 Γ 随着塑性黏度 η 的增加而减小，二者具有很强的线性相关性 ($R^2=0.95$)，说明以流动度试验测定的流动指标可间接用于试验室中对浆体塑性黏度的测定。

表4 基体材料的流变学性能参数

Table 4 Rheological properties of matrix materials

编号	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	d_f/mm	Γ
M0	1.45	21.75	12.14
M2	2.48	20.50	10.67
M4	3.34	18.75	8.77
M6	4.69	17.50	7.51
N0	1.75	22.05	12.51
N2	2.58	20.75	10.96
N4	3.16	19.15	9.19
N6	4.32	17.95	7.95

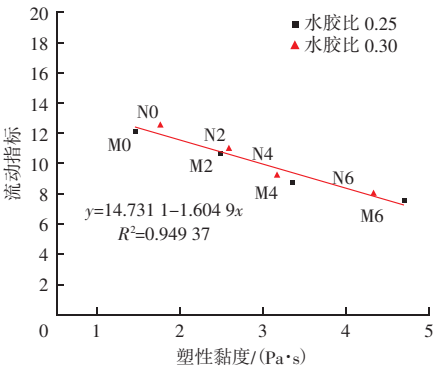


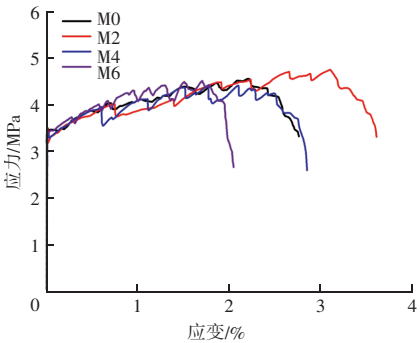
图5 塑性黏度-流动指标关系曲线

Fig. 5 Plastic viscosity-flow relation index curve

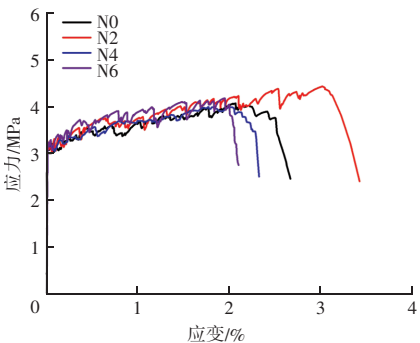
2.4 ECC 材料的单轴拉伸性能

图 6 为各配比 ECC 的单轴拉伸应力-应变曲线，不同配比的 ECC 均表现出明显的拉伸应变硬化特征。表 5 为对应的单轴抗拉性能力学参数值，水

胶比影响 ECC 的基体材料强度，水胶比越低基材强度越高。同一水胶比下，M2、N2 组具有相对更高的极限延伸率，分别为 3.08%、2.99%，对应初裂强度分别为 3.50、3.25 MPa，对应极限强度分别为 4.76、4.43 MPa。与所对应基体材料的塑性黏度值比较，可知塑性黏度在 2.5 Pa·s 左右时，ECC 材料的拉伸性能较佳。



(a) 水胶比 0.25



(b) 水胶比 0.30

图 6 ECC 单轴拉伸应力 - 应变曲线

Fig. 6 Uniaxial tensile stress - strain curve of ECC

表 5 ECC 的单轴拉伸力学性能参数

Table 5 Uniaxial tensile mechanical properties parameters of ECC					
编号	$\sigma_{fc,i}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{fc}/\%$	σ_t/MPa	$\varepsilon_t/\%$	E/GPa
M0	3.38	0.013 0	4.57	2.21	25.95
M2	3.50	0.013 2	4.76	3.08	26.48
M4	3.41	0.012 8	4.42	2.47	26.67
M6	3.38	0.013 3	4.52	1.72	25.44
N0	3.17	0.012 7	4.07	2.23	25.01
N2	3.25	0.012 9	4.43	2.99	25.13
N4	3.17	0.012 7	3.99	2.02	24.91
N6	3.24	0.013 3	4.17	1.95	24.37

3 结论

通过调控基体流变特性，揭示了其对 ECC 拉伸应变硬化性能的关键作用机制，并确立了实现最优性能的流变参数阈值，得到主要结论如下：

(1) 使用外加剂和增稠剂可实现对 ECC 基体材料的流变学性能调控，不同水胶比下基体材料的流变特性符合 M - B 模型，且呈现剪切变稀，这对于 PVA 纤维在基材中的均匀分散是有利的。

(2) 新拌基体材料的流动指标随着塑性黏度这一流变特性的增大而减小，且具有线性相关性，表明通过流动度试验可间接评价基体材料的流变性能。

(3) 新拌基体材料的塑性黏度对 ECC 的单轴拉伸性能有显著影响，塑性黏度在 2.5 Pa·s 左右时 ECC 材料的拉伸性能较佳，此时流动指标 Γ 值在 10.8 左右。

参 考 文 献

[1] LI V C. Sustainability of Engineered Cementitious Composites (ECC) [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2019.

[2] 李艳, 谢佳宁, 刘泽军, 等. U 型 ECC 修复既有混凝土梁受剪性能研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (11): 47 - 54.

[3] 袁朝庆, 代晓辉, 章桀, 等. 水泥基复合材料双钢板组合剪力墙最佳 ECC 高度研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2021 (3): 37 - 45.

[4] YANG E, WANG S X, YANG Y Z, et al. Fiber - bridging constitutive law of engineered cementitious composites [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6 (1): 181 - 193.

[5] KANDA T, LI V. C. Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4 (1): 59 - 72.

[6] GAO Q F, JIANG H N, YANG Q L, et al. Investigation of the multiparameter mix proportion design and mechanical properties of polyvinyl alcohol - Engineered Cementitious Composites [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36 (9): 18195.

[7] YAO S, HU C L, WANG F Z, et al. Improving the interfacial properties of PVA fiber and cementitious composite; Design and characterization [J]. Construction and Building Materials, 2023 (409): 134 - 163.

[8] ZHANG D, JAWORSKA B, ZHU H, et al. Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3) [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103766.

[9] 雷东移, 武志盈, 贾昊琨, 等. 高延性水泥基复合材料拉伸开裂行为多尺度模拟研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2025, 53 (1): 173 - 189.

[10] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2014 (5): 1037 - 1040.

[11] 赵宇, 沈光海, 朱伶俐, 等. 聚乙烯纤维对 3D 打印高强度高延性水泥基复合材料性能的影响 [J/OL]. (下转第 67 页)

(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)