

# 降雨 - 开挖耦合下软土边坡响应分析及失稳机理研究

Response Analysis and Instability Mechanism Study of Soft Soil Slope under Rainfall Excavation Coupling

高明辉<sup>1,2</sup>, 邢晓琳<sup>1,2</sup>, 苏继波<sup>1,2</sup>, 张世豪<sup>1,2</sup>, 郭 悅<sup>1,2</sup>, 郑 军<sup>1,2</sup>

(1. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 石家庄 050021; 2. 河北省地质环境监测院, 石家庄 050021)

**摘要:** 针对软土边坡在降雨与开挖耦合作用下的失稳问题, 通过模型试验模拟降雨 - 开挖耦合条件, 并对边坡相应指标展开了监测, 揭示其失稳机理。结果表明: 坡顶水平变形呈三阶段增长, 坚向变形受土体固结与应力释放影响, 依次经历初始应力集中、固结效应减弱及开挖卸荷主导等过程; 而坡脚的变形规律反映出开挖卸荷与土体流变的耦合作用机制; 土体含水率随降雨历时增加由非饱和向饱和转变, 沿深度方向呈现“先降后升”特征; 而孔隙水压力场呈现坡顶最高, 坡中次之, 坡底因排水条件好而最低; 其失稳机理为开挖、降雨下渗冲刷等构成失稳物质基础, 多级开挖与降雨致应力集中使土体强度衰减, 呈现坡顶变形、坡脚隆起与孔隙水压梯度扩展的耦合破坏特征。研究成果为软土边坡稳定性评估优化及防控策略制定提供了关键理论支撑。

**关键词:** 软土边坡; 降雨 - 开挖耦合; 响应指标; 失稳机理

**中图分类号:** TU391.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0054-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.010

GAO Minghui<sup>1,2</sup>, XING Xiaolin<sup>1,2</sup>, SU Jibo<sup>1,2</sup>, ZHANG Shihao<sup>1,2</sup>, GUO Yue<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Geo-Environment Monitoring, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** In response to the instability problem of soft soil slopes under the coupling effect of rainfall and excavation, model experiments were conducted to simulate the rainfall excavation coupling conditions, and corresponding indicators of the slope were monitored to reveal its instability mechanism. The results show that the horizontal deformation at the top of the slope increases in three stages, while the vertical deformation is affected by soil consolidation and stress release, and undergoes processes such as initial stress concentration, weakening of consolidation effect, and dominant excavation unloading; The deformation law at the foot of the slope reflects the coupling mechanism between excavation unloading and soil rheology; The soil moisture content changes from unsaturated to saturated with the increase of rainfall duration, showing a characteristic of "first decreasing and then increasing" along the depth direction; The pore water pressure field shows the highest at the top of the slope, followed by the middle of the slope, and the lowest at the bottom of the slope due to good drainage conditions; The instability mechanism is based on excavation, rainfall infiltration and erosion, which form the unstable material foundation. Multi level excavation and rainfall induced stress concentration weaken the soil strength, presenting a coupled failure characteristic of slope top deformation, slope foot uplift and pore water pressure gradient expansion. The research results provide key theoretical support for

作者简介: 高明辉 (1981—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向: 地质灾害防控。

通信作者: 郑军 (1990—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地质灾害防控。

收稿日期: 2024-12-17

the optimization of soft soil slope stability assessment and the formulation of prevention and control strategies.

**Key words:** soft soil slope; rainfall–excavation coupling; response index; destabilization mechanism

## 0 引言

软土是一种土体含水率较高、颗粒较小且剪切强度较低的土层，广泛分布于我国沿海地区及内陆河流冲积平原<sup>[1-2]</sup>。然而在软土地基上进行工程作业，不可避免地会形成软土边坡，其稳定性直接关系到工程的安全与正常使用<sup>[3]</sup>。

降雨和开挖是影响软土边坡稳定性的两个重要因素<sup>[4]</sup>。降雨会导致软土的含水量增加，使土体容重增大，同时降低了土体的抗剪强度以及使孔隙水压力升高，从而影响边坡的稳定性<sup>[5]</sup>；而土体开挖过程会改变边坡固有的应力状态，使边坡土体产生卸荷回弹，致使土体结构产生破坏，强度降低<sup>[6-7]</sup>，对此已有较多学者针对降雨或者开挖条件下边坡稳定性展开了较为深入的研究。马文成<sup>[8]</sup>利用有限元软件模拟不同降雨工况（降雨类型、降雨时长和降雨强度）对高填边坡稳定性展开了研究，发现短时强降雨与持续增强型降雨过程均对高填方边坡稳定性产生显著作用，其中渐进式降水模式更易引发失稳风险。回填土形成的人工边坡极易受到降雨的影响，为此，涂美义等<sup>[9]</sup>结合了数值模拟与现场监测两种手段开展了不同降雨工况对边坡稳定性的影响，结果发现渗水通道多发育于坡体前缘和坡面陡峭处，强降雨会加剧坡体中下部水平位移扩展，且数值模拟结果与实地监测数据高度吻合。吴能<sup>[10]</sup>基于土质边坡实例，通过数值模拟手段分析了降雨对其位移变化、土体饱和度等指标的影响，发现降雨历时延长会导致土质边坡安全系数持续下降，其衰减速率呈现先加速后趋缓的非线性特征，同时显著影响着土体饱和度、孔隙水压力及位移响应。为研究开挖对高边坡稳定性的影响，蔡汉杰<sup>[11]</sup>提出从边坡破坏模式、稳定性计算方法、防护措施、开挖工艺及监测技术等维度进行研究；张军文<sup>[12]</sup>基于 FLAC 3D 数值模拟方法，构建摩尔–库仑软化判据的三维模型，并结合现场监测位移，揭示了软土边坡开挖的变形特征；魏芸等<sup>[13]</sup>以某大面积开挖软土边坡工程为依托，针对不同的土体强度指标进行分析，以便于更

好地评估边坡稳定性；张雷<sup>[14]</sup>在软土边坡施工过程中，利用分层开发的方式处置边坡，并结合支护技术确保了边坡的稳定性；王梓轩<sup>[15]</sup>利用 FLAC 3D 研究了某取土场开挖后的边坡稳定性，发现开挖后，边坡坡脚应力场分布突变。然而，往往在实际工程中，降雨和开挖同时存在，两者的耦合作用对边坡特别是软土边坡稳定性的影响更为复杂，且关于此研究的文献相对较少。

基于以上研究，通过开展多工况软土边坡模型试验，模拟多级阶梯式开挖与不同强度–历时降雨的耦合作用过程，同步监测软土边坡的响应指标等关键参数，揭示软土边坡的失稳机理，为软土边坡稳定性评估及防控措施优化提供理论依据。

## 1 工程概况

某工程区域长期受河流沉积作用影响，软土广泛分布，场地软土以湖相沉积的淤泥质黏土和粉质黏土为主，具有高含水率、高压缩性和低强度特征。在交通枢纽建设中，需进行大规模土石方开挖与地下空间开发，形成多处软土边坡。

以其中一个软土边坡为例，该边坡整体呈不对称结构，左侧最大高度 74 m，右侧高度 16 m，总宽度 138 m，采用六级阶梯式开挖方案。其中第一级边坡坡比为 1:0.5，第二、三阶坡比均为 1:0.75，后三阶均采用 1:1 的垂直坡比。土层分布自上而下为淤泥质黏土、粉质黏土、砂质黏土。

场区属亚热带湿润气候，年均降雨量 1 400 mm，集中在 5~9 月（占全年 70%）。施工期恰逢梅雨季节，持续强降雨显著增加边坡水压力。因此，软土边坡在降雨–开挖耦合作用条件下易导致失稳。

## 2 软土边坡模型试验

### 2.1 试验方案

采用模型箱开展边坡模型试验，其中模型箱尺寸为 380 mm（长）× 500 mm（宽）× 400 mm（高）。经参数比对分析，最终确定模型相似比为 1:140。

试验采用石膏材料浇筑成型地基基础，待石膏

## 岩土力学

地基完全硬化后，采用分层压实填筑工艺进行边坡土体施工。填筑用土均取自工程现场的原状土，经室内土工试验验证其物理力学性质与原型边坡土体一致。

### 2.2 工况设计

每组工况在开挖过程中采用降雨装置模拟降雨，同时离心机保持运转，通过数据采集系统持续监测边坡的变形发展规律及稳定状态。当一个工况结束后，对边坡进行支护，继续维持离心机运行，待土体变形稳定后提升离心加速度使边坡破坏，试验结束。具体工况方案见表 1。

表 1 工况方案  
Table 1 Operating condition scheme

工况	开挖方案	降雨条件
1	1~2 级开挖	3 mm/h 强度持续 4 h
2	3~4 级开挖	3 mm/h 强度持续 5 h
3	5~6 级开挖	3 mm/h 强度持续 6 h

### 2.3 监测方案

采用激光位移传感器对边坡的沉降情况开展监测，监测点布置如图 1 所示。H 点用于监测坡顶变形、J 点用于监测第 3 级边坡变形、I 点用于监测第 5 级变形、K 点用于监测坡脚变形。

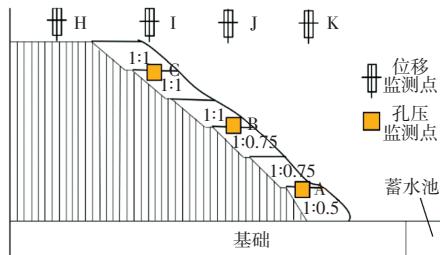


图 1 监测布置图  
Fig. 1 Monitoring layout diagram

## 3 试验结果与分析

### 3.1 坡顶变形

降雨 - 开挖耦合作用，软土边坡坡顶变形如图 2 所示。由图 2 (a) 可知，在降雨 - 开挖耦合作用下，软土边坡坡顶的水平变形演化呈现出显著的阶段性特征，该变形量与开挖级数、降雨历时存在非线性响应关系。

随着边坡开挖级数的不断增加，软土边坡坡顶的水平变形在降雨 - 开挖的耦合作用下呈增大的趋势。具体来说，在开挖 1~2 级过程中，伴随着 3 mm/h 强度持续 4 h 的降雨条件下，边坡响应较为

敏感，坡顶水平变形出现了较为剧烈的增幅，约 30.1%。这一现象源于土体在初次开挖扰动后，降雨入渗导致浅层土体饱和度迅速提升，有效应力骤降，引发滑裂面的局部发育。在开挖 3~4 级边坡时，降雨持续时间延长，此时水平变形增长速率明显趋缓，约 8.9%，这表明土体在经历初期变形后，其内部应力场逐渐调整并趋于新的平衡状态，但此时深层土体的蠕变效应开始显现，形成“开挖扰动 - 雨水软化 - 蠕变变形”的复合作用机制。当开挖 5~6 级，且降雨持续时间进一步增加，水平变形再一次出现了显著增加的趋势，增长了 31.2%，揭示了土体强度随开挖卸荷和长期雨水浸泡的双重衰减效应，当应力水平突破土体残余强度后，变形进入加速发展阶段。

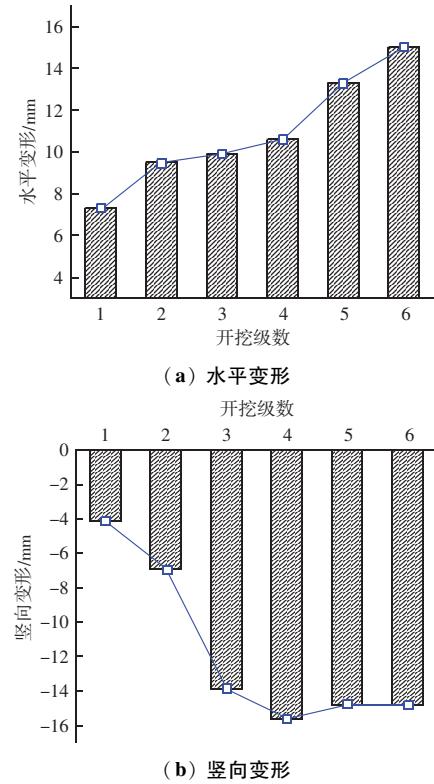


图 2 边坡坡顶变形  
Fig. 2 Deformation at the top of the slope

由图 2 (b) 可知，对软土边坡进行开挖后，坡顶立即出现了显著的竖向变形，这一现象主要归因于初次开挖引起的应力释放与雨水入渗的叠加效应。由于前面 3 级开挖的坡度较陡，导致边坡临空面应力集中，而短期强降雨加速了浅层土体的饱和进程，有效应力骤降引发剪切破坏，形成以浅层滑移为主

的变形模式，因而坡顶的竖向变形沉降发展较快。而在开挖最后2级过程中，变形速率放缓，进入了一个稳定期。开挖到第4级后，坡率减小至1:0.75，且降雨时间延长至5 h，此时沉降速率减缓。坡比放缓虽在一定程度上缓解了应力集中，但持续降雨的软化效应仍占主导地位，使得变形呈现“开挖卸荷-雨水软化-塑性流动”的复合作用特征。当开挖级数突破4级后，坡率为1:1，降雨延长至6 h，此时沉降变形曲线出现了明显转折，这与土体的应力-应变-时间本构关系相关，且长时间的降雨致使土体渗透性下降，抑制了变形的发展。

### 3.2 坡脚变形

降雨-开挖耦合作用下软土边坡坡脚的变形如图3所示。由图3(a)可知，对边坡前4级进行开挖，在降雨作用下，坡脚的水平变形剧烈。具体来说，1~2级过程中，变形增长了23.4%，原因在于陡坡设计导致的临空面应力集中，叠加短期强降雨引发的浅层土体饱和，雨水入渗使基质吸力丧失，土体抗剪强度骤降，形成以剪切破坏为主的变形机制；开挖2级到3级过程中，坡率和降雨时长均发生了变化，变形增长的速率达到最大，约37.7%，反映出土体在多级开挖扰动下的累积损伤效应。随着开挖深度增加，坡脚区域形成应力集中带，而持续降雨促进了裂隙网络的发育，导致雨水入渗深度扩展至中深层土体，引发“开挖卸荷-雨水软化-塑性流动”的复合变形过程。当开挖级数超过了4级之后，坡脚的水平变形出现了异常下降趋势。这是因为经过前期多级开挖与长期雨水浸泡，土体已趋近于残余强度状态，变形以黏滞蠕变为主。

由图3(b)可知，当开挖级数从1级增加到3级，坡脚的竖直向下变形迅速增加至峰值，增幅近乎100%。这一现象主要归因于陡坡设计导致的临空面应力集中，叠加短期强降雨引发的浅层土体饱和。从第3级开挖到第4级时，坡比保持1:0.75，降雨历时延长至5 h，变形值开始出现减小的趋势。这是因为随着开挖深度增加，坡脚区域应力场逐渐调整，前期累积的超孔隙水压力开始消散，土体发生固结沉降。当开挖第5级时，竖向变形发生显著反转，这是由于开挖卸荷导致土体应力路径从压缩转向膨胀，而长期雨水浸泡使黏土矿物发生水化膨胀，两者共

同作用形成“卸荷回弹-膨胀隆起”的复合变形机制，并且随着继续开挖，竖直向上的变形值开始增大，表明土体已进入弹塑性变形阶段。

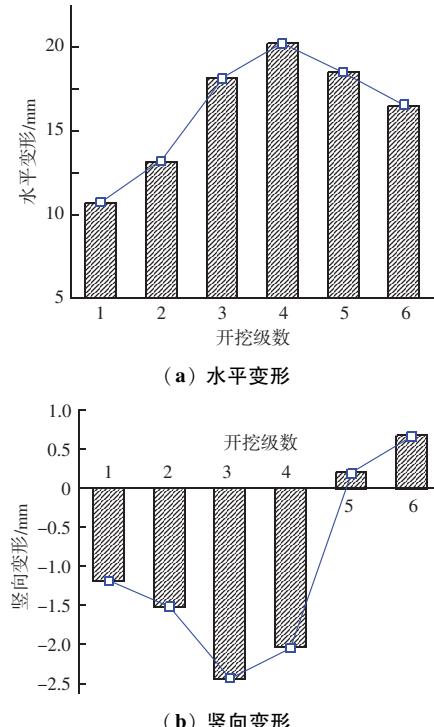


图3 边坡坡脚变形

Fig. 3 Deformation at the foot of the slope

### 3.3 含水率变化

从图4中可以看出，边坡表层土体的含水率分布呈现显著的时空变异特征，该特征与降水入渗过程存在高度相关性。在开挖-降雨耦合作用下，不同开挖梯级的边坡土体均表现出相似的含水率分布规律：随着降雨历时的增加，土体经历由非饱和向饱和状态的转变过程，其含水率沿深度方向呈先降低后增大的变化趋势。这主要归因于地下水位抬升引发的孔隙水压力场变化，在地下水位以上区域形成暂态饱和带。该暂态饱和区的出现不仅造成暂态孔隙水压力的抬升，同时导致非饱和区域基质吸力的衰减，进而引发边坡抗滑性能弱化。随着开挖梯级增大，软土边坡的含水率增大。此外，一般来说，土体含水率与力学参数间存在显著负相关关系，含水率增加将直接导致土质边坡安全系数的下降。基于非饱和土力学理论，土体含水率的变化会通过两条路径影响边坡稳定性：含水率增加导致土颗粒间的基质吸力降低，这将直接削弱土体的抗剪

## 岩土力学

强度；暂态饱和区的形成使孔隙水压力系数增大，降低潜在滑面上的正应力分量。

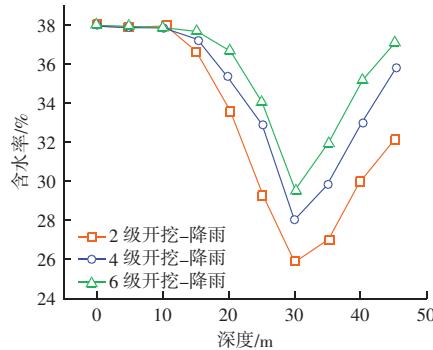


图4 含水率变化  
Fig. 4 Moisture content variation

### 3.4 孔隙水压力变化

从图5可以发现，在降雨-开挖耦合条件下，坡顶的孔隙水压力最大，其次为坡中，而坡底的孔隙水压力最小。其中，坡顶的孔隙水压力随时间变化的曲线出现了明显的阶段性演变规律。从空间分布来看，坡顶区域孔隙水压力值最高，这与坡顶直接暴露于降雨环境、入渗路径相关，降雨初期雨水通过坡顶裂隙快速入渗，导致浅层土体饱和度迅速提升，形成超静孔隙水压力区。坡中区域孔隙水压力次之，该区域处于坡顶入渗水流的过渡带，同时受开挖卸荷引起的应力重分布影响，孔隙水压力呈现梯度衰减特征。坡底区域孔隙水压力最低，这是由于坡底处于排水边界条件较好的位置，且土体在开挖过程中经历了一定程度的固结排水。

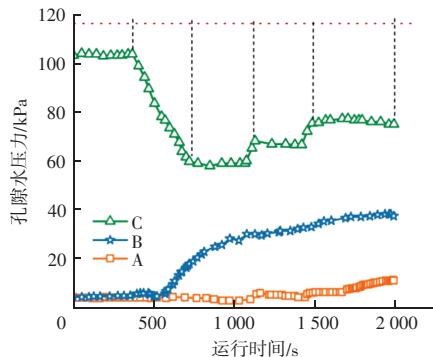


图5 孔隙水压力变化  
Fig. 5 Pore water pressure variation

### 3.5 失稳机理

开挖会对边坡原土体造成破坏，打破坡体原有的应力平衡状态；开挖后裸露的临空面在降雨条件下会导致地表水下渗，这不仅增大了土容重，且长

时间的降雨增强了地表径流，水流冲刷作用在坡面上形成侵蚀沟槽并切割坡体。此软土边坡主要由淤泥质黏土、粉质黏土和砂质黏土等组成，土体结构松散，渗透性能较强，力学性能较差，抗剪强度较低，易导致边坡失稳。

多级阶梯式开挖导致临空面应力集中，叠加分阶段延长的持续降雨引发土体强度衰减，使淤泥质黏土首先发生浅层滑移，随后粉质黏土因长期软化形成复合滑裂面，最终在垂直坡比引发的卸荷回弹与砂质黏土封闭水压共同作用下，当应力比超过临界值时触发深层圆弧滑动，呈现“坡顶水平变形激增-坡脚隆起反转-孔隙水压力梯度扩展”的耦合破坏特征。

## 4 结论

通过边坡模型试验模拟降雨-开挖耦合作用对软土边坡稳定性的影响，探究其失稳机理，得到如下主要结论：

(1) 坡顶水平变形呈现三阶段增长模式：1~2级开挖时增幅30.1%，4级增速降至8.9%，开挖5级后再增31.2%；竖向变形则经历快速沉降、速率放缓和曲线转折的过程，揭示了“应力释放-雨水软化-蠕变-塑性流动”的复合变形机制。

(2) 坡脚水平变形呈现显著阶段性特征：水平变形1~2级增长23.4%，2~3级达最大增速37.7%，4级后异常下降；竖直变形则在1~3级快速增至峰值，增幅近100%，5级开挖后发生显著隆起反转。

(3) 含水率随降雨历时增加由非饱和向饱和转变，沿深度方向先降后升。开挖等级的增大导致含水率显著增加，且含水率与土体力学参数呈负相关，降低软土边坡的稳定性。

(4) 坡顶孔隙水压力在耦合作用下最高且呈阶段性演变；坡中孔隙水压力次之；坡底由于排水边界条件良好，孔隙水压力最低。

## 参 考 文 献

- [1] 汪仕旭. 基于归一化的公路软土路基不均匀沉降预测 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 51-55.
- [2] 曾晖, 通飞, 嘉艺, 等. 复合固化剂固化软土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 125-130.

- [3] 周冲, 黄玮, 王兆军, 等. 黄河冲积平原区软土地基快速液压夯加固参数试验研究 [J]. 铁道建筑, 2025, 65 (1): 142–146.
- [4] 崔宇寒, 顾东明, 余海兵, 等. 降雨开挖诱发顺层岩质滑坡稳定性与堆积特征 [J]. 人民长江, 2024, 55 (9): 156–164.
- [5] 刘畅, 季凡凡, 郑刚, 等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (3): 447–456.
- [6] 姚亚辉, 薛晓辉, 张玉洁, 等. 开挖条件下土质边坡稳定性影响试验研究 [J]. 科技通报, 2015, 31 (9): 103–106.
- [7] 安海堂, 余会明, 张卫强. 土质边坡开挖试验及其数值模拟研究 [J]. 人民长江, 2016, 47 (19): 48–52, 82.
- [8] 马文成. 不同降雨条件下高填方边坡稳定性的数值模拟分析 [J]. 价值工程, 2025, 44 (5): 19–21.
- [9] 涂美义, 袁世宇, 陈江军, 等. 不同降雨工况下的矿山修复工程

- [10] 吴能. 不同降雨持续时间条件下土质边坡的稳定性分析 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30 (12): 30–33.
- [11] 蔡汉杰. 公路工程高边坡开挖稳定性研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (21): 126–128.
- [12] 张军文. 软土边坡开挖变形特征与临界破坏范围数值模拟 [J]. 能源与节能, 2023 (7): 156–160.
- [13] 魏芸, 赵娟. 软土边坡稳定分析时土体强度参数的取法分析 [J]. 港工技术, 2017, 54 (5): 33–34.
- [14] 张雷. 软土边坡支护技术及其应用分析 [J]. 四川水泥, 2024 (9): 109–111.
- [15] 王梓轩. 强风化砾岩区取土场开挖前后边坡稳定性研究 [J]. 交通节能与环保, 2025, 21 (1): 160–163.

(上接第 6 页)

- [6] 熊辉霞, 张谦, 李岩, 等. 粉煤灰和硅灰掺料对高性能混凝土氯离子扩散影响 [J]. 混凝土, 2021 (7): 95–97.
- [7] 用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [8] LUAN C Q, WU Z M, HAN F N, et al. The effects of calcium content of fly ash on hydration and microstructure of ultra - high performance concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137735.
- [9] WANG Z W, GUO M L, LIU C L, et al. Chloride binding behavior and pore structure characteristics of low - calcium high - strength cement pastes [J]. Materials, 2024, 17 (13): 3129.
- [10] 胡勤, 李猛, 刘京, 等. 粉煤灰钙含量对 MPC-UHPC 水化及力学性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2025 (7): 95–102.

- [11] 李建华, 邓强, 赵中军, 等. 低钙粉煤灰玻璃体含量对强度发展的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (6): 2201–2209.
- [12] 黄煌煌, 陈铁锋, 高小建. CO<sub>2</sub>矿化改性高钙粉煤灰对水泥砂浆力学性能和微结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (5): 1889–1896.
- [13] 董红娟, 熊青青, 王晨阳, 等. 高低钙粉煤灰协同钙基固废制备复合胶凝材料性能研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2024, 43 (4): 326–330, 352.
- [14] 周建伟, 余保英, 程宝军. 不同细度粉煤灰复掺对高强混凝土力学性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (3): 75–78.
- [15] 成高立, 李晓光, 王攀奇, 等. 石灰石粉-粉煤灰细度变化对水泥基胶凝材料体系水化动力学的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (7): 2337–2343.

(上接第 22 页)

- [4] 王蓓, 王彦. 矿物掺合料在活性粉末混凝土 (RPC) 中应用研究 [J]. 混凝土, 2024 (10): 167–170, 177.
- [5] 何翔, 乔险涛, 喻鹏, 等. 工业固废粉末对自密实高性能混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4017–4026.
- [6] 汤建华, 贾飞, 潘慧敏, 等. 矿物掺合料粒度分布对喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响 [J]. 混凝土, 2022 (6): 61–66.
- [7] 张平, 陈旭, 李绍纯, 等. 绿色低碳型高性能混凝土的制备及其性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (9): 155–158.
- [8] 马召林, 明阳, 李文俊, 等. 多元固废协同制备超细高活性矿物掺合料及性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1824–1833.
- [9] 张雪丽, 侯付闯. 多元复合超细掺合料制备混凝土内部结构研究 [J]. 混凝土, 2023 (10): 116–119.

- [10] 宋佳佳, 杜红秀. CMK 复合微粉对混凝土耐蚀性及阻抗谱特性的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2023, 54 (6): 1127–1133.
- [11] 蒋勇, 廖斌, 王小均, 等. 钢渣复合矿粉对不同养护条件下混凝土性能的影响 [J]. 金属矿山, 2024 (5): 311–317.
- [12] 陈平, 夏海洋, 胡成, 等. 多元固废基复合胶凝材料的硬化特征与抗蚀性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (3): 24–28.
- [13] 卫煜, 陈平, 明阳, 等. 复合超细高活性矿物掺合料对 UHPC 水化和收缩性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (2): 461–468.
- [14] 秦哲焕, 周志刚, 朱国军, 等. 粉煤灰-矿粉超细复合型矿物掺合料对混凝土耐久性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 66–69, 79.
- [15] 刘琴梅. 矿物掺合料对 C55 高性能混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (3): 97–100.