

暴雨极端工况下山区冲沟弃土场边坡失稳机制与稳定性分析

樊 桐

中国建筑第八工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘 要】山区高速公路建设产生大量弃土废渣，多就地堆载于沿线冲沟区域形成冲沟型弃土场。此类弃土场依托沟谷地形堆积，土体结构松散、压实度不均、排水条件复杂，相较于常规边坡，在暴雨极端工况下极易发生渗流破坏、滑移失稳、沟道溃塌等地质灾害，严重威胁山区道路运营安全与周边生态环境。为探明暴雨诱发冲沟弃土场失稳的核心机理，本文以山区高速典型冲沟弃土场为研究对象，系统分析冲沟弃土地形结构、堆积特性与工程缺陷，阐明暴雨入渗、孔隙水压力变化、抗剪强度衰减的失稳演化机制，结合极限平衡法完成不同降雨工况下边坡稳定性数值计算，量化分析降雨强度、降雨历时、堆积厚度对边坡安全系数的影响规律。结果表明：暴雨入渗导致边坡土体饱和度大幅提升、基质吸力消散、有效应力降低，是诱发边坡失稳的核心诱因；降雨历时越长、雨强越大，边坡安全系数衰减越显著，短时强暴雨对浅表层滑移破坏的诱发作用最为突出。本文结合分析结果提出针对性排水优化、坡体加固、动态防控措施，可为山区高速弃土场灾害防控、边坡稳定性管控、地质灾害治理提供技术参考。

【关键词】暴雨工况；山区高速公路；冲沟弃土场；边坡失稳；渗流特性；稳定性分析

1 引言

山区高速公路地形起伏大、沟壑纵横、土石方调配量大，施工过程中产生的弃土、弃渣多就近填埋于沿线天然冲沟内，形成大量冲沟型弃土场。不同于平地弃土场，冲沟弃土场依托天然沟谷成型，具有三面环山、汇水面积大、堆积厚度不均、基底起伏复杂、土体松散杂乱等特征，天然稳定性较差。常态工况下，多数冲沟弃土场可保持基本稳定，但在暴雨极端工况下，沟谷汇水效应显著，大量雨水快速入渗坡体内部，极易引发边坡冲刷、溜塌、滑移、整体滑坡等灾害，是山区公路地质灾害的高发区域。

近年来极端暴雨天气频发，山区高速冲沟弃土场失稳垮塌事件频发，不仅造成道路淤堵、设施损毁，还易引发次生山洪、泥石流灾害，造成严重的经济损失与安全隐患。现阶段针对边坡稳定性的研究多聚焦路基边坡、岩质边坡，针对冲沟特殊地形、暴雨极端工况耦合作用下弃土场失稳机制的精细化研究相对不足，失稳演化规律与防控体系不够完善。基于此，本文结合山区高速工程实际，探究暴雨工况下冲沟弃土场边坡失稳全过程机制，通过量化稳定性变化规律，明确关键影响因子，提出科学可行的防控对策，为山区公路弃土场安全运维与灾害治理提供理论与实践支撑。

2 冲沟弃土场工程特性及固有缺陷

2.1 冲沟弃土场基本工程特征

冲沟型弃土场是依托天然狭长沟谷堆积形成的人工松散堆积体，整体呈现“上窄下宽、三面汇水、纵深堆积”的空间形态。弃土堆积物料主要为路基开挖碎石土、粉质黏土、风化岩

屑，颗粒级配杂乱，大粒径块石与细粒土混杂堆积，无统一压实标准，土体孔隙率大、均匀性差。受沟谷地形限制，弃土场多顺沟道分层堆积，边坡坡度普遍介于 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，大于自然休止角，自身储备稳定安全余量较小。同时冲沟天然具备汇水功能，降雨后地表水快速汇集于沟谷内部，为边坡渗流破坏、水力冲刷提供了水文条件。

2.2 边坡固有稳定性缺陷

一是堆积体结构松散，弃土无序堆载、压实不均，土体内部存在大量孔隙与潜在滑动面，抗剪强度远低于原状土体；二是排水体系不完善，多数临时弃土场未设置完善的截排水设施，暴雨汇水无法快速排出，长期滞留坡体；三是基底条件复杂，天然冲沟基底凹凸不平、存在软弱夹层，堆积体与基底接触面粘结薄弱，易形成沿基底的整体滑移面；四是边坡形态不规则，局部坡率过陡、堆载过高，应力集中明显，极端工况下极易突破稳定极限。

3 暴雨极端工况下边坡失稳演化机制

暴雨诱发冲沟弃土场失稳是地表水入渗、土体力学性能衰减、应力重分布耦合作用的动态过程，整体可分为表层冲刷、浅层软化、深层渗损、整体失稳四个阶段，失稳机制区别于常规边坡，具有突发性、连锁性、破坏性强的特点。

3.1 表层水力冲刷阶段

暴雨初期，高强度雨水直接冲击弃土边坡表层，松散细粒土被雨水冲刷剥离，坡表形成细小冲槽。随着降雨持续，汇水流量增大，表层冲槽逐步贯通、加深拓宽，破坏边坡表层完整性。冲沟地形的汇水效应使坡面水流流速加快，动水压力持续冲刷坡体，形成溯源冲刷与侧向侵蚀，大幅削弱边坡表层抗冲

刷能力，为雨水深层入渗创造通道。

3.2 浅层土体软化阶段

雨水通过坡表孔隙、冲刷沟槽快速入渗浅层土体，土体含水率急剧上升，非饱和土基质吸力快速消散，土体黏聚力、内摩擦角等抗剪强度参数大幅衰减。同时土体吸水饱和后自重荷载显著增大，边坡下滑力持续提升，抗滑力持续降低，坡体逐步进入临界稳定状态。此阶段边坡无明显滑移变形，仅出现局部沉降、表层溜塌，是失稳破坏的前兆阶段。

3.3 深层渗流损伤阶段

暴雨持续作用下，雨水持续向坡体深层渗透，堆积体内部孔隙水压力快速升高，有效应力显著降低。冲沟基底透水性弱，雨水在基底接触面富集，形成软弱渗流夹层，大幅降低堆积体与基底的摩擦阻力。同时坡体内部形成稳定渗流场，产生向下的渗透力，持续推动土体位移，边坡局部出现裂缝、沉降变形，潜在滑动面逐步贯通。

3.4 整体滑移失稳阶段

当降雨时长、雨强达到临界值，边坡抗滑力不足以抵抗下滑力，贯通滑动面完全形成，松散堆积体沿基底软弱面或内部圆弧滑动面发生整体滑移、垮塌。冲沟汇水形成的积水压力进一步加剧滑移速度，最终引发大规模滑坡、泥石流灾害，造成弃土场整体损毁。

4 暴雨工况下边坡稳定性数值计算与结果分析

依托山区高速典型冲沟弃土场工程案例，采用极限平衡法开展边坡稳定性计算，选取天然无雨、中雨、暴雨、特大暴雨四种典型工况，对比分析不同降雨条件下边坡安全系数变化规律，明确暴雨对边坡稳定性的影响机制。本次计算土体物理力学参数依托现场土工试验确定，具体参数及稳定性计算结果如下表所示。

计算工况	降雨强度 (mm/h)	降雨历时 (h)	土体黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	边坡安全系数	稳定状态判定
天然无雨工况	0	0	18.6	22.4	1.38	稳定
中雨工况	8	6	15.2	20.1	1.15	基本稳定
暴雨工况	25	6	11.3	17.5	0.98	临界失稳
特大暴雨工况	40	6	8.5	15.2	0.82	失稳破坏

由计算结果可知，降雨对弃土场边坡稳定性存在显著弱化作用。天然工况下边坡安全系数为 1.38，边坡整体稳定、无变形风险；中雨工况下土体抗剪强度小幅衰减，安全系数降至 1.15，

边坡处于基本稳定状态，但局部易出现表层冲刷病害；暴雨工况下土体强度大幅衰减，安全系数降至 0.98，低于规范稳定临界值 1.0，边坡进入临界失稳状态，极易出现局部滑移；特大暴雨工况下边坡安全系数仅为 0.82，边坡整体失稳破坏风险极高。

为进一步分析降雨历时的影响规律，固定暴雨强度 25mm/h，开展不同降雨历时稳定性对比计算，结果如下表所示。

降雨历时 (h)	2	4	6	8	10
边坡安全系数	1.12	1.05	0.98	0.93	0.89
稳定状态	基本稳定	临界稳定	临界失稳	失稳	完全失稳

数据表明，相同雨强条件下，边坡安全系数随降雨历时延长持续衰减，降雨前期稳定性衰减速率最快，短时间强降雨是诱发边坡突发失稳的核心因素。降雨 6h 后边坡突破稳定临界值，随着雨水持续入渗，坡体饱和区域持续扩大，孔隙水压力不断累积，边坡失稳风险呈指数级上升。

5 边坡失稳核心影响因素分析

5.1 降雨条件影响

降雨是诱发冲沟弃土场失稳的外部主导因素，雨强决定雨水入渗速率与表层冲刷强度，降雨历时决定坡体饱和范围与孔隙水压力累积程度。暴雨工况下，雨水入渗速率远大于土体排水速率，坡体内部快速饱和，基质吸力完全消散，土体抗剪强度大幅降低，最终引发滑移破坏。相较于缓雨，短时高强度暴雨对边坡稳定性的破坏作用更直接、更剧烈，是山区弃土场灾害高发的主要诱因。

5.2 堆积体特性影响

冲沟弃土堆积体土质杂乱、孔隙率大、压实度不足，整体结构性极差，为雨水入渗提供了便捷通道。细粒土含量过高时，土体吸水软化明显，抗剪强度衰减幅度大；块石含量过高时，土体整体性差，内部易形成渗水通道，加剧渗流破坏。同时弃土堆积厚度越大，坡体自重荷载越大，基底应力越集中，暴雨工况下失稳概率显著提升。

5.3 地形与排水条件影响

冲沟特殊的汇水地形是弃土场失稳的先天诱因，沟谷三面环山的形态使降雨汇水集中，坡面水流速度快，冲刷与入渗双重作用加剧坡体损伤。无完善截排水系统的弃土场，雨水无法快速外排，长期滞留坡体内部，持续软化土体、累积孔隙水压力，大幅降低边坡长效稳定性。此外，沟底基底起伏、存在软弱夹层，会形成应力集中与滑移薄弱面，进一步降低边坡抗失稳能力。

6 暴雨工况下边坡稳定性防控技术措施

6.1 完善截排水系统，阻断雨水入渗通道

针对冲沟汇水特性，构建“外围截水、坡面排水、沟底疏水”的全方位排水体系。在弃土场顶部外围设置截水沟，拦截坡面汇水，避免雨水汇入弃土区域；边坡坡面设置横向、纵向排水槽，快速排出坡面雨水，减少表层冲刷与深层入渗；沟底设置盲沟、渗管，疏导坡体内部渗水，降低孔隙水压力，从源头弱化暴雨对边坡稳定性的不利影响。同时定期清理排水设施淤积杂物，保障排水体系通畅。

6.2 优化坡体填筑与压实工艺

整改无序堆载施工模式，采用分层填筑、分层碾压工艺，严控每层填筑厚度与压实度，减小土体孔隙率，提升堆积体整体性与抗渗性能。优化填料级配，合理搭配土石比例，剔除纯细粒土、淤泥质软弱填料，提升土体抗剪强度与水稳性。对陡坡、高堆载区域进行削坡减载，放缓边坡坡率，降低边坡下滑力，提升天然稳定储备系数。

6.3 增设边坡加固防护措施

针对暴雨易失稳的薄弱边坡，采用生态防护与工程防护相结合的方式。坡面采用植草、喷播绿化防护，抵抗雨水表层冲刷；高陡边坡、临界失稳边坡增设锚杆框架、土工格栅加固，约束土体变形，提升边坡整体抗滑性能。对弃土场基底软弱区域进行换填夯实，消除基底滑移隐患，增强堆积体与基底的粘结强度，杜绝沿基底发生整体滑移破坏。

6.4 建立暴雨动态监测预警体系

在冲沟弃土场布设位移监测、孔隙水压力监测、雨量监测

设备，实时采集边坡变形、渗流、降雨数据，实现暴雨工况下边坡稳定性动态监测。设定预警阈值，暴雨天气实时跟踪数据变化，发现位移突变、孔压骤升等异常情况及时发布预警，提前采取交通管制、人员撤离、应急加固等措施，防范地质灾害发生。同时建立雨后排查机制，暴雨结束后全面排查边坡冲刷、裂缝、渗水隐患，及时整改修复。

7 结论

山区高速冲沟弃土场因特殊的沟谷汇水地形、松散的堆积结构、不完善的排水体系，对暴雨极端工况极为敏感，稳定性风险突出。暴雨诱发边坡失稳是雨水入渗、土体软化、孔压升高、应力失衡的耦合结果，雨强越大、降雨历时越长，边坡抗剪强度衰减越显著，安全系数越低，失稳风险越高。天然工况下冲沟弃土场基本保持稳定，暴雨工况下易进入临界失稳状态，特大暴雨将直接引发边坡整体滑移垮塌，是山区公路主要地质灾害隐患点。

本文通过工况模拟计算，量化了不同降雨条件下边坡稳定性变化规律，明确了降雨、堆积体结构、地形排水三大核心影响因素。针对性提出截排水优化、坡体压实加固、边坡防护、动态监测预警的综合防控体系，可有效提升暴雨工况下冲沟弃土场边坡稳定性，降低地质灾害发生概率。研究成果可为山区高速公路弃土场设计、运维、灾害防控提供理论支撑与工程参考，对保障山区道路安全运营、防范降雨型地质灾害具有重要实践意义。

参考文献:

- [1] 陈登峰, 白恒承, 汪磊. 降雨条件下差异性弃土边坡渗流及稳定性分析[J]. 中国地质调查, 2025, 12(05): 45-51.
- [2] 李阳. 山区高速公路沟谷型弃渣场暴雨稳定性数值模拟研究[J]. 中外公路, 2024, 44(08): 67-72.
- [3] 王浩, 张磊. 强降雨诱发山区弃土场边坡失稳机制与防控对策[J]. 公路交通科技, 2025, 42(03): 34-39.
- [4] 刘军. 冲沟地形弃渣场边坡渗流特性及稳定性评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 32(02): 98-103.
- [5] 赵文博. 极端暴雨工况下松散堆积边坡失稳演化规律研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(01): 112-118.
- [6] 周凯. 山区公路弃土场排水优化与边坡稳定性防控技术[J]. 交通世界, 2024(28): 89-91.