

秦岭南麓山区高铁桥梁“墩-坡”稳定性协同机理研究

卢高峰¹,袁光英²,李海国¹,武思奇¹,陈长宇¹

(1. 中铁北京工程局集团第六工程有限公司,北京市,110136;

2. 陕西铁路工程职业技术学院,陕西省渭南市,714000)

摘要 新建西安至十堰高速铁路XSZQ-7标段地处秦岭南麓复杂山地,线路桥隧比高达87.38%,桥梁工程多建于高陡边坡之上,形成典型的“墩-坡”协同作用体系。本文以漫川关福银高速立交特大桥及沿线边坡为工程背景,深入剖析边坡滑坡、变形的主控因素与机理,构建“墩-坡”协同稳定性分析力学方程,揭示桥墩荷载与边坡岩体的相互作用规律,结合工程实践提出针对性防控措施,为同类山区高铁桥梁边坡工程提供理论参考与技术借鉴。

关键词 高陡边坡;墩-坡协同;稳定性分析;滑坡防控

中图分类号:U443.2 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)10-0060-03

秦岭南麓山区高铁网络受复杂地形制约,线桥隧占比极高,大量高墩桥梁修建于顺层高陡边坡,形成“墩-坡”耦合受力体系。秦岭南麓山区内炭质板岩、泥质夹层广泛发育,岩体遇水软化、泥化,顺层结构稳定性不足;叠加汛期暴雨、桥墩竖向荷载等多重扰动,易产生顺层滑移、墩身偏移等病害,威胁高铁建设与运营安全。现有边坡分析理论难以量化墩体与边坡双向协同力学效应,针对该区域墩坡耦合体系的定量研究较为匮乏。本文以西十高铁漫川关立交特大桥为工程载体,梳理场区地质水文条件,从岩性、降雨、施工扰动三方面阐明边坡失稳机理,基于摩尔-库伦准则构建墩坡协同稳定力学方程,量化各影响因子权重与参数敏感性,结合全施工周期稳定系数变化揭示边坡演化规律,提出桩锚、排水一体化综合治理措施,研究成果可为同类山区高墩边坡稳定评价与风险管控提供理论依据及工程参考。

1 工程概况

1.1 工程建设规模

新建西安至十堰高速铁路是国家“八纵八横”高铁网重要组成部分,XSZQ-7标段位于陕西省商

洛市山阳县漫川关镇,线路里程DK156+752~DK175+650,全长18.873km。标段以桥隧工程为主,含桥梁2.304km、隧道16.492km,桥隧比高达87.38%;核心控制性工程为漫川关福银高速立交特大桥(全长1423m,最大墩高69m)、天竺山三号隧道(7808m)及云岭一号隧道(7057m),线路穿越秦岭南麓低山区,地形地质条件极为复杂。

1.2 工程地质条件

沿线地层岩性复杂,主要出露古近系古新统砾岩、砂岩、泥岩,志留系梅子垭组板岩,局部夹杂炭质板岩;第四系残坡积层广泛分布于边坡表层,厚度2~8m,以粉质黏土、碎石土为主,结构松散、透水性;下伏基岩为强~中风化板岩、砾岩,岩体节理裂隙发育,完整性差,局部存在破碎带与软弱夹层。

2 边坡滑坡、变形成因分析

2.1 内在地质缺陷:边坡失稳的根本内因

2.1.1 岩体结构面主控作用

沿线边坡岩体节理、裂隙、层理发育,形成大量软弱结构面,包括顺层界面、节理密集带、破碎带及岩性接触面。这些结构面抗剪强度低、黏聚力弱,是边坡潜在滑移面;顺层边坡岩层倾向与坡向一致,倾角 25° ~ 40° ,与天然休止角接近,天然状态下处于临界平衡,一旦受外力扰动,易沿结构面发生顺层滑动。

2.1.2 岩土体物理力学性质劣变

边坡表层为松散碎石土、粉质黏土,孔隙率大、

作者简介:卢高峰(1980~),男,陕西商州人、本科,高级工程师,研究方向:桥隧施工。

渗透性强、抗剪强度低,遇水易软化、崩解;下伏板岩、泥岩遇水易膨胀、软化,形成软弱夹层,降低岩体整体强度;炭质板岩遇水易泥化,进一步劣化结构面力学性能。

2.2 外部环境扰动:边坡失稳的关键诱因

2.2.1 降雨渗入与地下水作用

降雨是山区边坡失稳的主导外部诱因。汛期强降雨快速渗入边坡岩体,一方面增加坡体自重,增大下滑力;另一方面软化岩土体,降低结构面黏聚力与内摩擦角,同时地下水产生静水压力与渗透压力,抵消部分有效应力,进一步降低抗滑力。

表1 降雨强度与稳定系数关系

降雨等级	稳定系数降幅	变形特征
小雨	0.05 ~ 0.10	无明显变形
中雨	0.10 ~ 0.15	微小裂缝
暴雨	0.15 ~ 0.25	局部滑移

2.2.2 风化与侵蚀作用

长期物理风化、化学风化导致表层岩体破碎、剥落,岩体强度持续衰减;坡面流水冲刷、侵蚀切割坡体,破坏边坡完整性,形成冲沟、凹槽,进一步劣化边坡稳定性。

2.3 工程荷载与施工扰动:边坡失稳的直接触发因素

工程机械自重、废弃物堆载等附加荷载打破边坡原有应力平衡,在坡体内部产生附加应力场,导致坡体应力重分布,诱发裂缝产生、扩展,最终形成贯通滑移面,引发滑坡。尤其是荷载大、作用深度深,对边坡稳定性影响更为显著。桥梁基础、隧道洞口开挖直接破坏边坡原有稳定结构,形成新的临空面,改变坡体应力状态;爆破振动产生的地震波传递至边坡岩体,加剧节理裂隙扩展,降低岩体完整性,诱发边坡变形。

3 “墩-坡”协同的边坡稳定性分析

3.1 “墩-坡”协同体系受力特征及原理

“墩-坡”协同体系是指桥梁或高架的桥墩、桩基与边坡岩体形成的耦合受力系统,桥墩荷载、桩土相互作用、边坡岩体应力传递相互影响、相互制约,边坡稳定性不仅取决于岩体自身力学性质,更受桥墩附加荷载与应力分布的显著影响。该体系核心受力原理是应力传递-变形协调-稳定性联动,

桥墩荷载改变边坡应力场,边坡变形反过来影响桥墩受力与变形,二者相互影响、相互作用,形成力学整体;边坡为墩体提供承载基础,桥墩对边坡产生约束与加载双重效应,二者形成协同演化关系。

3.2 “墩-坡”稳定性力学方程构建

基于摩尔-库伦强度准则与极限平衡理论,建立“墩-坡”协同体系受力平衡方程:

总下滑力(驱动边坡失稳的合力):

$$F_t = (G + P) \sin \theta + F_w \quad (1)$$

总抗滑力(抵抗边坡失稳的合力):

$$F_r = cL + (G + P) \cos \theta + \tan \varphi \quad (2)$$

边坡稳定性系数(核心评价指标):

$$F_s = \frac{F_r}{F_t} = \frac{cL + (G + P) \cos \theta + \tan \varphi}{(G + P) \sin \theta + F_w} \quad (3)$$

其中:P:桥墩总附加荷载(包含墩身自重、梁体自重、列车活载);G:滑移面以上边坡岩体总自重(kN); θ :顺层滑移面倾角($^{\circ}$);c:滑移面岩土体黏聚力(kPa); φ :滑移面岩土体内摩擦角($^{\circ}$);L:滑移面有效长度(m); F_w :地下水渗透压力(kN); F_s :边坡稳定性系数。

3.3 基于力学方程的桥墩荷载对稳定性的影响

选取漫川关福银高速立交特大桥32#~35#墩边坡为分析对象,该段边坡为顺层边坡,坡度 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$,坡高60~80m,表层残坡积层厚5~8m,下伏强风化板岩,岩层倾角 32° ,与坡向一致,为典型顺层滑移型边坡。桥梁32#~35#墩为矩形高墩,最大墩高69m,桥墩位于秦岭南麓鹞岭山前顺层岩质边坡中,桥墩下部的桩基嵌入中风化板岩,单墩设计总荷载 $P=6\,500\text{kN}$ 。桩基采用大孔径钻孔灌注桩,嵌入中风化梅子垭组板岩地层,桩基深度32~38m。

采用控制变量法,通过固定其他参数,并控制单一变量分析对边坡稳定性系数的影响规律,量化各因素的控制作用。以桥墩荷载占比为例,通过分析施工时不同桥墩荷载占比对边坡稳定性的影响,阐述边坡在不同桥墩荷载占比时的变化特征,并与现场实际变形进行比对,优化力学方程的参数选取,具体稳定系数如表2所示。

3.4 整体变化趋势总结

第一阶段:天然状态阶段,无人工附加荷载、无开挖卸荷,无地下水影响,渗透压力小。边坡依靠岩体自身抗剪强度维持平衡, F_s 处于稳定区间;第

表2 荷载与“墩-坡”协同稳定系数表

施工阶段	墩荷载占比P	稳定性安全系数	稳定等级	变化特征
天然状态	0	1.15	稳定	山体长期自然平衡,顺层边坡安全
基坑+桩基施工	50%(仅桩基自重)	1.15→1.11	稳定系数小幅下滑,稳定	施工开挖卸荷减轻自重、劣化岩体,Fs小幅减少
空心墩分次浇筑	70%(墩身完工无梁)	1.11→1.09	基本稳定	桥墩附加荷载持续增大,Fs略微减少
挂篮悬臂浇筑连续梁施工(最危险工况)	100%满载	1.09→1.05	基本稳定(谷值)	全周期Fs最低点,坡面出现微小张拉裂缝
边坡加固+成桥竣工	100%满载	1.05→1.36	稳定	边坡加固,桥墩竣工,Fs增加,超过天然状态Fs

二阶段:基坑+桩基施工阶段,因基坑开挖施工及爆破施工,扰动原状土体,Fs由1.15降低至1.11,降幅仅为3.48%,下降幅度平缓,无变形病害;第三阶段:墩身浇筑加载期,随着69m的超高空心墩分段翻模浇筑,墩自重逐级累积,桩基将竖向应力由深部基岩传至滑移面,增大下滑力,同期进入汛期,雨水渗入坡体内部,岩土体遇水软化,抗剪强度指标下降,导致Fs由1.11降至1.09,坡面出现细微的裂缝,依然处于稳定状态;第四阶段:悬臂梁施工阶段,该阶段为墩-坡协同体系稳定性最不利阶段,桥墩设计恒载+临时挂篮活载全部施加,达到100%设计值,下滑力达到峰值;Fs跌至1.05,为稳定性系数极小值,坡面出现微小张拉裂缝,如不采取措施,有滑坡风险;第五阶段:加固治理+成桥竣工阶段,依托“固-排-减-监”治理方案的落实,Fs由1.05提升至1.36,显著优于天然状态阶段的稳定性安全系数1.15,后续24个月多轮汛期监测无新生变形。

4 结语

本文依托西十高铁XSZQ-7标漫川关立交特大桥工程实体,立足秦岭南麓顺层变质岩地质环境,基于极限平衡理论构建“墩-坡”协同稳定性力学方

程,梳理了从天然边坡至施工全周期、加固全过程的稳定性系数变化规律。研究表明,顺层节理构造、软弱夹层是边坡失稳的内在核心,桥墩逐级附加荷载、雨水渗入、施工扰动形成多场耦合劣化效应,稳定性系数整体呈现天然稳定-开挖微降-加载持续降低-满载+降雨触底-综合治理抬升超原值的非线性演化特征,其中降雨与桥墩满载耦合是导致边坡稳定性系数达到谷底的主要原因,但依托锚索加固+抗滑桩+排水的综合治理,可显著提升边坡稳定性系数。

参考文献

[1] 卓卫东,蔡哲罕,王志坚.山区高铁高墩-顺层边坡耦合体系全周期稳定性演化规律[J].工程力学,2025,42(02): 217-228.

[2] 杜兆萌,程强.秦岭南麓板岩顺层边坡墩-坡协同失稳渗流-应力耦合机理[J].中国地质灾害与防治学报,2024,36(02):109-117.

[3] 杨文勋,石春华.基于midas GTS NX的顺层岩质边坡桩锚复合支护数值仿真研究[J].岩土工程技术,2023,37(04):225-231.

[4] 国家铁路局.TB10433-2023铁路工程地质勘察规范[S].北京:中国铁道出版社,2023.