

文章编号: 1674—8247(2022)01—0001—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.01.001

## 支挡结构安全风险识别与防控研究

魏永幸 刘会娟 王占盛 褚宇光 周 成

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**支挡结构在山区铁路、公路工程中应用广泛,但受地质、水文、技术、材料等因素及勘察、设计、施工、维护等环节的影响,安全问题时有发生,如何精准识别、评估、防控支挡结构的安全风险是道路工程领域亟需解决的技术难题。为此,本文基于中铁二院工程集团有限责任公司支挡结构安全风险识别、支挡结构极限状态设计、支挡结构安全性能提升的科学研究成果,介绍支挡结构安全风险量化识别、极限状态设计参数匹配优化、复杂环境支挡结构安全性能提升等支挡结构安全风险识别与防控技术,以期为山区道路支挡结构的安全风险识别和防控设计提供指导借鉴。

**关键词:**支挡结构; 安全风险; 识别; 防控; 极限状态; 技术体系

中图分类号:U213.1<sup>+</sup>5 文献标志码:A

## Study on Identification and Prevention of Safety Risks of Retaining Structures

WEI Yongxing LIU Huijuan WANG Zhansheng CHU Yuguang ZHOU Cheng

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Retaining structures are widely used for railways and highways in mountainous areas. However, due to the influence of geological, hydrological, technical, material, and other factors and the activities of investigation, design, construction, and maintenance, safety problems often occur. How to accurately identify, evaluate, prevent and control the safety risks of retaining structures is a technical challenge that needs to be solved urgently in the field of road engineering. Therefore, based on research achievements on safety risk identification, limit state design and safety performance improvement of retaining structure of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., this paper introduces the identification and prevention and control of safety risks for retaining structure, such as quantitative identification of safety risk of retaining structure, matching and optimization of limit state design parameters, safety performance improvement of retaining structure in a complex environment, etc., in order to provide guidance and reference for the design of identification and prevention and control of safety risk for retaining structures of mountain roads.

**Key words:** retaining structure; safety risk; identification; prevention and control; limit state; technical system

支挡结构在山区铁路、公路工程中应用广泛,其安全关乎山区道路建设安全、运输安全和人民生命财产安全。山区道路支挡结构的建设环境极其复杂,受地质、水文、技术、材料等因素及勘察、设计、施工、维护等

收稿日期:2021-12-31

作者简介:魏永幸(1964-),男,教授级高级工程师,四川省工程勘察设计大师。

引文格式:魏永幸,刘会娟,王占盛,等.支挡结构安全风险识别与防控研究[J].高速铁路技术,2022,13(1):1-6.

WEI Yongxing, LIU Huijuan, WANG Zhansheng, et al. Study on Identification and Prevention of Safety Risks of Retaining Structures[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1):1-6.

环节的影响,支挡结构安全问题时有发生。如何量化识别山区道路支挡结构的安全风险,科学评估山区道路支挡结构的安全风险,并从工程建设源头—工程设计环节做好山区道路支挡结构的安全风险防控,是山区道路建设与运营维护亟需解决的关键技术难题之一。

1 研究思路与技术路线

中铁二院工程集团有限责任公司历时十余年,围绕支挡结构安全风险识别、支挡结构极限状态设计、支挡结构安全性能提升开展系统研究<sup>[1-8]</sup>,在支挡结构安全风险量化识别、极限状态设计参数匹配优化、安全保障与性能提升技术等方面取得突破,形成了支挡结构安全风险识别与防控成套技术。支挡结构安全风险识别与防控研究技术路线如图1所示。

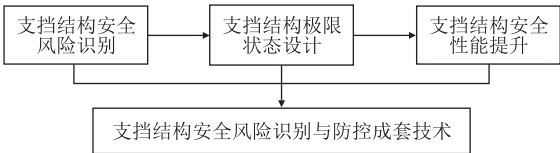


图1 支挡结构安全风险识别与防控研究技术路线图

2

2 支挡结构安全风险识别

系统开展支挡结构安全风险识别的研究,建立山区道路常用支挡结构安全风险库,提出支挡结构安全风险“量化识别+综合评估”方法和山区道路常用支挡结构风险防控对策。

2.1 支挡结构安全风险库

支挡结构安全风险可采取正向分析和反向分析两种途径。所谓正向分析就是从影响支挡结构安全的因素入手,分析安全风险因素可能导致的风险事件;所谓反向分析则是从已知支挡结构可能的风险事件入手,分析导致风险发生的风险因素。影响支挡结构安全的因素,可归纳为环境、技术、材料三大类,共14项,如表1所示。

支挡结构可能的风险事件通常包括:结构失稳出现垮塌、倾覆,结构出现超出预期的变形,结构出现开裂等损伤,不满足使用功能要求等。

结合具体支挡结构,可利用分解分析法、图解法等风险识别方法,分析可能导致支挡结构发生潜在风险事件的风险因素,也可从支挡结构可能发生的潜在风险事件入手,分析影响支挡结构安全的风险因素。以常用的桩板式挡土墙为例,从影响桩板式挡土墙安全的风险因素入手,分析潜在风险事件,其树状层次分析图如图2所示;或从桩板式挡土墙倾覆破坏风险事件

入手,分析可能风险因素,树状层次结构如图3所示。

表1 支挡结构安全影响因素表

因素分类	影响因素
环境	支挡结构的地质环境及其特性
	地基稳定性
	气象与水文条件
	作用于支挡结构的荷载
	支挡结构周边环境
技术	支挡工程施工顺序
	支挡结构施工工艺
	支挡结构防排水施工工艺
	支挡结构的作用与抗力计算
	支挡结构稳定分析
	支挡结构变形分析
材料	支挡结构材料性能及参数
	支挡结构形状及尺寸
	支挡结构耐久性

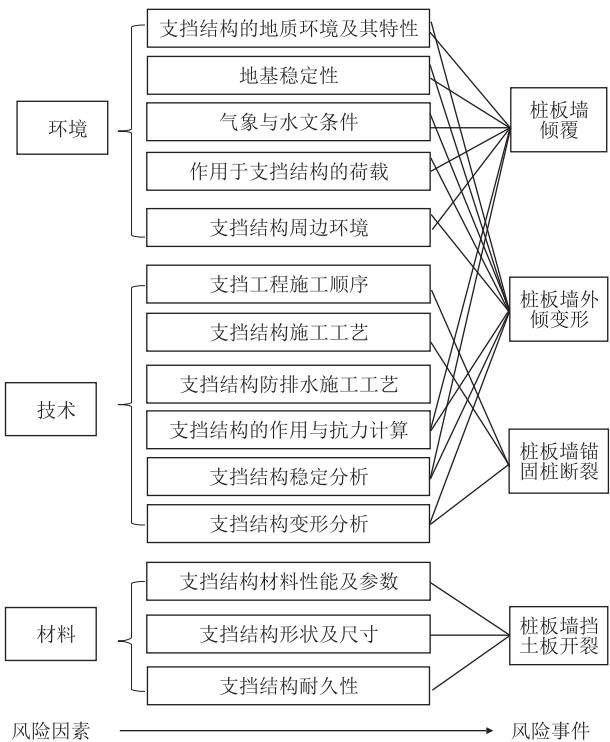


图2 桩板式挡土墙安全影响因素分析树状层次分析图

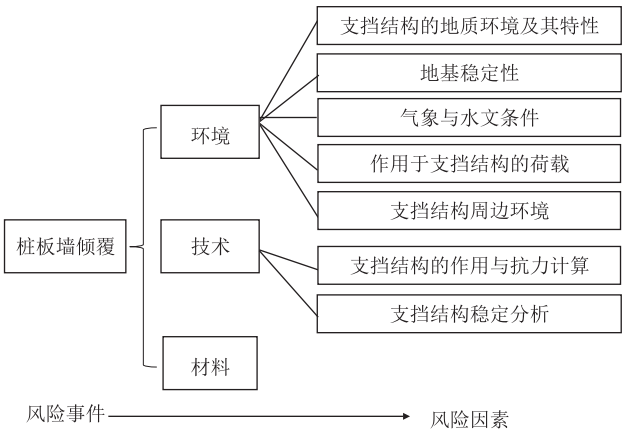


图3 桩板式挡土墙倾覆安全风险因素树状层次分析图

2.2 支挡结构安全风险识别与评估

应用层次分析法、敏感性分析法、专家打分法等可对影响支挡结构安全的风险因素进行分析,识别风险的大小,并对风险因素进行排序,也可对支挡结构某一风险事件的风险因素进行排序。桩板式挡土墙发生倾覆的风险因素排序如表 2 所示。

表 2 桩板式挡土墙倾覆风险因素排序表

风险排序	风险因素
1	支挡结构的地质环境及其特性
2	地基稳定性
3	支挡结构周边环境
4	作用于支挡结构的荷载
5	支挡结构稳定分析
6	支挡结构的作用与抗力计算
7	气象与水文条件

必要时,也可采用仿真分析法、模型试验法,对影响支挡结构安全的风险因素做进一步的研究分析。如针对高速铁路线下基础工后毫米级沉降标准的限制要求,中铁二院工程集团有限责任公司开展了“高速铁路桩板式挡土墙基于路基面沉降控制的设计研究”,采用数值模拟和室内模型试验对高速铁路桩板式挡土墙风险进行识别,找出风险的主控因素为锚固桩侧向变形,进而提出限制锚固桩侧向变形的工程措施。

2.3 山区道路常用支挡结构风险防控对策

基于山区道路支挡结构风险识别与评估,研究规避或降低支挡结构安全风险的对策和工程措施。针对具体的支挡结构或具体的某一风险事件,研究制定相应的风险防控对策。山区道路常用支挡结构的风险防控对策如表 3 所示。

表 3 山区道路常用支挡结构风险防控对策表

风险因素分类	风险影响因素	风险防控对策
环境	支挡结构的地质环境及其特性	查明地质,合理选用参数
	地基稳定性	查明地质,科学判断
	作用于支挡结构的荷载	明确使用条件
	支挡结构周边环境	查明周边环境情况
	气象与水文条件	查明气象与水文条件
技术	支挡工程施工顺序	明确技术要求
	支挡结构施工工艺	明确技术要求
	支挡结构防排水施工工艺	明确技术要求
	支挡结构的作用与抗力计算	合理选用参数
	支挡结构稳定分析	合理选用模型及参数
	支挡结构变形分析	合理选用模型及参数
材料	支挡结构材料性能及参数	合理选用参数,必要时试验确定
	支挡结构形状及尺寸	合理选型,科学设计
	支挡结构耐久性	明确技术标准

3 支挡结构极限状态设计

系统开展支挡结构极限状态设计研究<sup>[9-11]</sup>,提出山区道路常用支挡结构基于安全风险识别的设计分项系数及基于参数“自治”匹配的结构设计参数,提出基于风险识别、参数“自治”的支挡结构极限状态设计方法。

3.1 支挡结构极限状态设计内容

根据 GB 50153 - 2008《工程结构可靠性设计统一标准》,支挡结构极限状态设计需考虑承载能力极限状态和正常使用极限状态。山区道路常用支挡结构按结构形式、受力特点等可分为明挖基础、锚固桩、锚杆(索)三类支挡结构。其极限状态设计内容如表 4 所示。

表 4 支挡结构极限状态设计内容表

检算项目	明挖基础挡土墙				锚固桩支挡结构	锚杆(索)支挡结构
	重力式和衡重式	悬臂式和扶壁式	槽型挡土墙	加筋土挡土墙		
外部稳定	抗倾覆	●	●	●	-	-
	抗滑动	●	●	●	-	-
	抗浮	-	-	●	-	-
	基底承载力	○	○	○	-	-
锚固段抗拔或抗压		-	-	●	○	●
结构构件	抗弯	●	●	●	●	●
	抗剪	●	●	●	●	●
	抗拉	●	●	-	-	●
	抗压	●	-	-	-	●
	裂缝宽度	-	○	○	○	○
	位移或变形	-	○	○	○	○

注:●承载能力极限状态;○正常使用极限状态;○介于两者之间

3.2 基于安全风险识别的设计分项系数

合理设置各类作用、效应的设计分项系数对支挡结构极限状态设计十分重要,可使支挡结构在各类作用、效应的共同作用下处于同一可靠程度,避免出现系统短板。

依据支挡结构安全风险因素的识别结果,支挡结构极限状态设计可从提高、增加主控风险因素的可靠性出发,调整相应的设计分项系数。如倾覆风险是桩板式挡土墙的主要风险之一,其排序位列前两位的风险因素是地质环境及其特性和地基稳定性,因此,桩板式挡土墙极限状态设计时,应适当调低地基横向抗力的设计分项系数,以增加锚固桩的锚固深度,提高桩板式挡土墙抗倾覆的可靠性。

3.3 基于参数“自治”的支挡结构极限状态设计方法

工程结构极限状态设计涉及材料、作用、抗力等设计参数。对于铁路支挡结构而言,这些设计参数之间

普遍存在着一定的相关性,其一方面可表现为物理层面的相关,另一方面也可表现为数理层面的相关。物理层面的相关如重力式挡土墙的滑动力和抗滑力,其来源分别与土压力的水平分力和垂直分力,即作用和抗力本质同源,相关性不言而喻;数理层面的相关主要是指物理层面上相关并不明确,但在统计意义上有数值关系的情况(在铁路支挡结构中较常见)。参数相关性从性质上可分为正相关、不相关和负相关,从程度上可分为强相关、弱相关和不相关。

相关性的存在使得某一参数调整时,其他参数存在协调性和匹配性的问题;参数相关性性质与程度的不同,又使得支挡结构可靠度与各设计参数之间的敏感性存在差异。因此,在进行极限状态设计时,必须保证这些参数间的“自洽”,这也是确保设计结果可靠的重要前提。研究表明,采用相关性参数的支挡结构极限状态设计结果误差较小,校验结果符合性较好。基于参数“自洽”的支挡结构极限状态设计方法的核心要义是:首先进行设计参数的相关性分析,并由此确定“自洽”匹配的设计参数,试设计结果校验良好的设计参数才可用于后续设计。基于参数“自洽”的支挡结构极限状态设计流程如图4所示。

4

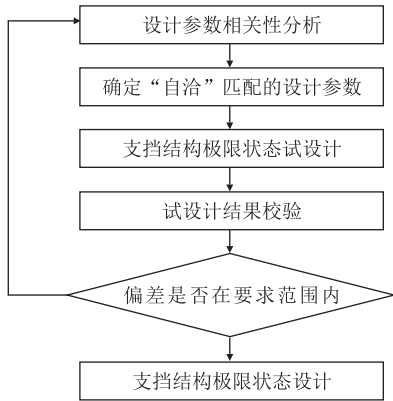


图4 基于参数“自洽”的支挡结构极限状态设计流程图

4 复杂环境路基支挡安全性能提升

基于安全风险识别及结构极限状态设计研究,提出了消除风险隐患、强化薄弱环节、提升系统可靠性的山区道路支挡结构安全风险防控技术对策,创新了支挡结构列车动力效应控制、支挡结构变形控制、超常荷载特殊支挡结构、既有支挡补强加固等安全保障和性能提升技术。

4.1 支挡结构安全风险防控技术对策

支挡结构安全风险防控的关键在于设计。由前述支挡结构安全风险的分析可知,防控风险需从风险的

三大来源,即环境、技术、材料入手,从消除风险、减低风险、控制风险三个维度防控风险。结合具体的支挡结构,采取对应的防控对策,以系统提升支挡结构的安全性和可靠性。支挡结构安全风险防控思路如图5所示,安全风险防控对策如表5所示。

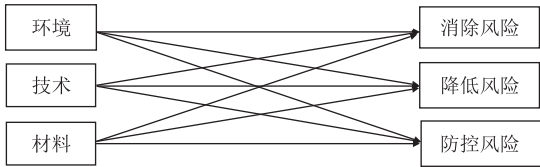


图5 支挡结构安全风险防控思路图

4.2 支挡结构列车动力效应控制

高速铁路列车高速度运行对线下基础提出了高平

表5 支挡结构安全风险防控对策表

风险来源	风险防控对策		
	消除风险	降低风险	控制风险
环境	消除环境因素的风险	降低环境因素的风险	采取措施确保风险不发生或发生后不造成不可接受的损失
技术	消除各个环节的风险	降低各个环节的风险	采取措施确保各个环节的风险不发生或发生后不造成不可接受的损失、不引起系统的其他风险
材料	消除材料的风险	降低材料引起的风险	采取措施确保风险不发生或发生后不造成不可接受的损失

顺性、高可靠性、高稳定性的要求。列车动荷载对路基支挡结构的影响受到工程界的广泛关注。中铁二院工程集团有限责任公司开展了列车动荷载对支挡结构影响的研究,通过理论计算与分析、实尺动态大模型试验等手段,对列车动荷载作用及其对重力式挡土墙和衡重式挡土墙结构的影响进行了系统研究,并取得了以下认识:

(1)数值分析、弹性理论和模型试验的墙背荷载土压力分布图形较为接近,均呈中上部偏大、底部较小的曲线分布形式。

(2)随着荷载作用距离的变化,动荷载和静荷载对挡土墙的影响程度不同。当荷载距离较近时,动荷载土压力大于同等幅值静荷载所产生的土压力;当荷载距离较远时,静荷载土压力大于同等幅值动荷载所产生的土压力。

(3)动荷载土压力与荷载作用距离之间基本符合线性关系。室内模型试验结果表明,在目前高速铁路路基面标准宽度条件下,列车动荷载对挡墙的影响不大。



(4)动荷载土压力实测结果沿深度的衰减速率明显高于计算结果。在2.0 m深度以下,动荷载土压力实测值很小,甚至可忽略。因此,可认为列车动荷载土压力的影响范围为路肩式挡土墙墙顶以下2.5 m。

基于上述研究,为避免列车动荷载循环作用对路基支挡结构造成损伤,设计时可优化支挡结构的布设位置,将支挡结构布设在列车动荷载影响范围之外。如图6所示。

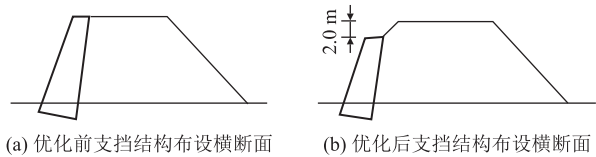


图6 考虑列车动荷载循环作用的支挡结构布设优化图

4.3 支挡结构变形控制

过大变形会影响支挡结构的正常使用。高速铁路对线下基础沉降变形有严格的限制标准,如路基工后沉降不大于15 mm,路基与桥梁、隧道等构筑物之间的过渡段差异沉降不大于5 mm。路基支挡结构的侧向变形会引起路基面沉降变形,因此,对于高速铁路路基支挡结构,应研究路基面竖向沉降变形与支挡结构侧向变形的映射关系,计算基于路基面沉降控制的支挡结构侧向变形限值。路基面竖向沉降变形与桩板式挡土墙侧向变形的映射关系如图7所示。

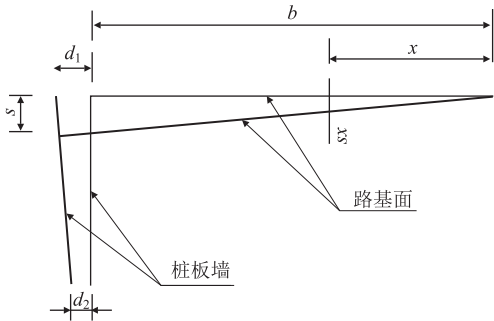


图7 路基面竖向沉降变形与桩板式挡土墙侧向变形映射关系图

为有效控制支挡结构的侧向变形,对于高大支挡结构,可采取限制支挡结构后背填土侧向变形的构造措施,如后背填土采用加筋土(竖向间隔一定高度水平铺设土工格栅)或改良土(掺入3%水泥改良)等,如图8所示。

4.4 超常荷载特殊支挡结构

超常荷载特殊支挡结构包括承受大推力的框架式

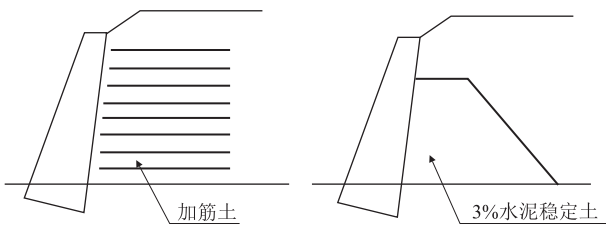


图8 高大支挡结构后填土侧向变形措施图

抗滑桩、椅式桩板墙、桩基础悬臂挡土墙等,主要满足高大边坡处治、巨型滑坡治理的需要,如图9所示。

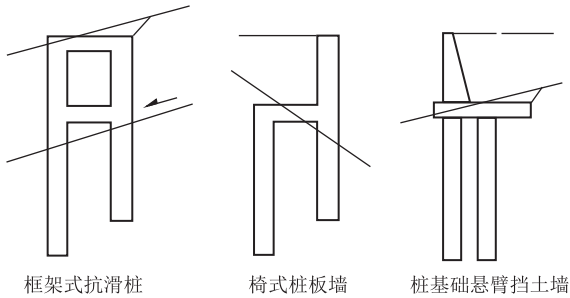


图9 超常荷载特殊支挡结构示意图

对巨型滑坡多排抗滑锚固结构、长大边坡多级支挡和高烈度地震区支挡结构减震,应改进设计方法。

(1)巨型滑坡治理常采用多排抗滑锚固结构。设计应注重多排抗滑锚固结构协同分担滑坡下滑力,合理确定多排抗滑锚固结构的下滑力分担比例。

(2)长大边坡常采用多级支挡。应采用“分级支挡、协同支挡”的支挡结构设计方法。

(3)从汶川“5.12”地震震害调查看,强震区边坡锚索加固的效果总体是好的,但也有锚索锚头脱落、损伤的情况出现。高烈度地震区支挡结构应采取减轻强震作用的措施,如锚索减震锚具,遭遇强震时可吸收地震作用,起到保护锚索、避免锚索损坏的作用<sup>[12]</sup>。

4.5 既有支挡结构补强加固

上个世纪90年代以前修建的铁路,限于当时的技术条件,加之环境的自然营力作用,部分路基支挡结构存在不同程度的劣化现象,提升其可靠性需采取补强加固措施。

既有支挡结构补强加固措施应以其安全风险评估结果为基础。通过现场勘察、测试及理论计算分析,可将既有支挡安全风险等级分为“稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定”四级,对应稳定安全系数如表6所示。

表6 既有支挡安全风险等级划分表

安全风险等级	稳定	基本稳定	欠稳定	不稳定
稳定安全系数	$\geq 1.3$	1.05 ~ 1.3	1.0 ~ 1.05	$\leq 1.0$

针对具体的既有路基支挡结构类型,其补强加固技术有重力式挡土墙锚杆注浆加固、帮宽加固、抗滑桩加固技术,桩板式挡土墙锚杆注浆加固、增设锚索加固技术,加筋土挡土墙锚杆注浆加固技术等。归纳而言,可分为注浆改良支挡结构后背岩土体加固技术、帮宽补强支挡结构加固技术和增设抗滑桩或锚索加固技术三类,如图10所示。

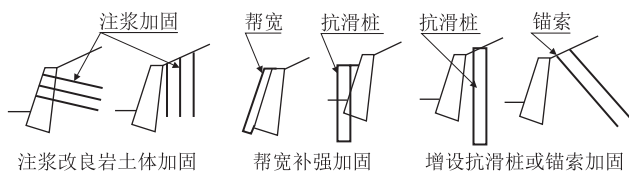


图10 既有支挡结构三类补强加固技术措施图

## 5 结论

支挡结构安全风险识别与防控成套技术的核心关键技术包括:

(1) 建立山区道路常用支挡结构安全风险库,提出支挡结构安全风险“量化识别+综合评估”方法,提出山区道路常用支挡结构风险防控对策表,建立支挡结构安全风险识别与防控技术体系。

(2) 基于支挡结构安全风险识别,提出考虑风险的支挡结构极限状态设计分项系数及基于参数“自洽”的支挡结构极限状态设计程式,构建基于风险识别、参数“自洽”的支挡结构极限状态设计方法体系。

(3) 基于安全风险识别及结构极限状态设计研究,创新支挡结构列车动力效应控制、支挡结构变形控制、超常荷载特殊支挡结构、既有支挡结构补强加固等复杂环境、特殊条件的路基支挡安全保障和性能提升技术。

## 参考文献:

- [1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 影响支挡结构安全性因素分析[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2005.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Analysis of Factors Affecting the Safety of Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2005.
- [2] 中铁二院工程集团有限责任公司, 西南交通大学. 西南山区铁路路基工程设计风险识别与防护对策研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2012.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Risk Identification and Protection Countermeasures for Railway Subgrade Engineering Design in the Southwest Mountainous Area[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2012.
- [3] 中铁二院工程集团有限责任公司. 支挡结构可靠度研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2007.

- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study of the Reliability of Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2007.
- [4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路路基支挡结构极限状态设计方法研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2014.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Limit State Design Method of Railway Subgrade Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2014.
- [5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路路基支挡结构极限状态及自洽性相关问题研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Limit State and Self-coordination of Railway Subgrade Retaining Structure[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 高速铁路陡坡路基桩板式挡墙变形控制研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Deformation Control and Research on the Pile-sheet Retaining Wall of Subgrade of Steep Slope for High-speed Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [7] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路既有有线支挡护坡病害整治对策研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Treatment Countermeasures for Retaining Slope Disease of the Existing Railway Lines[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [8] 魏永幸, 罗一农, 左德元. 路基工程风险识别与防范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.  
WEI Yongxing, LUO Yinong, ZUO Deyuan. Risk Identification and Prevention of Subgrade Works[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [9] 魏永幸, 罗一农, 刘昌清. 支挡结构设计的可靠性[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.  
WEI Yongxing, LUO Yinong, LIU Changqing. Reliability of the Design of Retaining Structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [10] 魏永幸, 郭海强, 罗一农. 支挡结构极限状态设计指南——以铁路路基支挡结构为例[M]. 北京: 人民交通出版, 2020.  
Wei Yongxing, Guo Haiqiang, Luo Yinong. Guide for Limit State Design of Retaining Structures-taking Retaining Structure for Railway Subgrade as an Example[M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [11] 王占盛, 罗一农, 魏永幸, 等. 变量相关性对可靠指标的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 19-23.  
WANG Zhansheng, LUO Yinong, WEI Yongxing, et al. The Effect of Correlation between Variables on Reliability Index[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 19-23.
- [12] 姚裕春, 魏永幸, 谢毅, 等. 一种高烈度地震区锚索减震结构: CN208219642U[P]. 2018-12-11.  
YAO Yuchun, WEI Yongxing, XIE Yi, et al. High Earthquake Intensity Seismic Area Anchor Rope Shock Absorbing Structure: CN208219642U[P]. 2018-12-11.