

文章编号: 1674—8247(2022)02—0025—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.02.005

支挡结构安全风险识别与设计参数自洽

魏永幸 王占盛 罗一农 刘会娟

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:支挡结构在铁路路基工程中极为常用,对于铁路工程的整体安全至关重要。本文先以桩板墙为例分析了支挡结构面临的主要风险及因素,并从极限状态设计的角度分析了这些因素的类型以及可在设计中予以风险规避的措施。再从可靠性设计的基本原理出发,提出了支挡结构设计中设计变量之间的相关性广泛存在,且是导致自洽规律不满足的主要原因,并给出了保证设计参数自洽的计算方法和流程。最后,从提升极限状态设计适用性、完善极限状态设计功能项、基于极限状态梳理材料参数取值、给出满足自洽规律的设计参数4个方面提出了支挡结构极限状态设计建议。

关键词:支挡结构; 风险识别; 安全系数; 分项系数; 自洽性

中图分类号:U213.1⁺5 文献标志码:A

Study on Identification of Safety Risks of Retaining Structures and Self-consistency of Design Parameters

WEI Yongxing WANG Zhansheng LUO Yinong LIU Huijuan

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

Abstract: The retaining structure is commonly used for railway subgrade, and is of great importance to the overall safety of railway. Taking the sheet-pile wall as an example, this paper analyzed the main risks and factors for the retaining structure, classified these factors from the perspective of limit state design, and proposed the risk avoidance measures that can be taken in the design. Based on the basic principle of reliability design, this paper put forward the general existence of correlation among the design variables in the design of retaining structure, which is the main cause of the non-satisfaction of self-consistency law, and proposed the calculation method and procedure to ensure the self-consistency of the design parameters. Finally, some suggestions on limit state design of retaining structure were put forward from four aspects: improving the applicability of limit state design, perfecting the function terms of limit state design, sorting out the values of material parameters based on limit state, and giving the design parameters that meet the self-consistent law.

Key words: retaining structure; risk identification; safety factor; partial factor; self-consistency

支挡结构是用来支撑、加固岩土体,以保持其稳定性的结构,常见的支挡结构形式有挡土墙、抗滑桩、加筋土挡墙、预应力锚索等。支挡结构在我国铁路工程

中应用较多,西部山区铁路尤其如此,常设置于路堤和路堑边坡、滑坡、岩堆等地段。由于支挡结构对整个铁路工程的安全性至关重要,因此识别其安全风险、研究

收稿日期:2022-04-02

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,王占盛,罗一农,等.支挡结构安全风险识别与设计参数自洽[J].高速铁路技术,2022,13(2):25-30.

WEI Yongxing, WANG Zhansheng, LUO Yinong, et al. Study on Identification of Safety Risks of Retaining Structures and Self-consistency of Design Parameters[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2):25-30.

其设计参数是一项极有价值的工作。

在风险识别研究方面,国外一些国家开展此工作较早,已制定了相关技术标准,如2002年国际隧道协会编制的《隧道工程风险管理指南》。在国内,铁道部于2007年颁布了《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》^[1],交通部于2010年和2011年先后颁布了《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南(试行)》^[2]和《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》^[3],建设部于2007年颁布了《地铁及地下工程建设风险管理指南》^[4],住房和城乡建设部于2011年颁布《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》^[5]。具体到铁路路基工程领域,文献[6]认为路基工程具有3个特点:①工程由岩土材料构成;②处于露天环境;③由人工在现场建造,这3个特点决定了路基工程必然存在许多潜在的影响其安全质量的不确定因素,也是路基工程风险的三大来源。文献[6]还将风险识别方法分为了三大类:①经验类比法,该类方法基于经验对风险因素或风险事件进行核对、排查,这是风险识别的常用方法,需识别人员掌握系统的工程知识并具备相当的工程经验;②理论分析法,该类方法借助理论分析方法或工具对风险事件发生部位、发生概率以及风险因素的敏感性等进行计算分析,为风险识别提供依据;③试验求证法,该类方法是在面对复杂或影响重大的风险问题时采取的必要手段。三大类方法中经验类比法应用最多。文献[7]详细列出了目前风险识别常用的具体方法,包括专家调查法、分解分析法、核对应表法、头脑风暴法、故障树分析法、图解法、敏感性分析法、蒙特卡洛模拟分析法、影响图分析法、层次分析法、专家打分法、仿真分析法、模型试验法等,并结合路基工程的特点,给出了以上各方法的技术特点和适用条件,并从填方路基、挖方路基、特殊土路基、路基支挡结构、滑坡与岩堆地段路基、斜坡异物侵入灾害等具体工程的特点入手,分析了其风险特点,提出了相应的工程风险管理对策。

在设计参数研究方面,铁路行业工程结构设计自2011年开始了新阶段的系统性修编工作,目前已发布了铁路工程结构可靠性设计统一标准及路基、桥梁、隧道、隧道专业的极限状态设计规范^[8-11]。支挡结构属于重要的路基工程结构,《铁路路基支挡结构设计规范》^[12]也进行了相应的修编工作。在此过程中,中铁二院工程集团有限责任公司作为该规范修编的主持单位,先后对支挡结构分项系数进行了验算提取、设计验证、合理性分析、工程试设计等工作,部分成果已纳入了此规范。

整体来说,支挡结构安全风险识别与设计参数都有较丰富的研究成果,但同时将二者联合起来的研究成果却较少。将二者联合起来研究不仅可提供更系统的视角以理解问题本身,还可更有力地支撑设计、施工人员的工作。

2 支挡结构安全风险识别

从我国支挡结构的使用情况来看,各类支挡结构面临的安全风险事件及风险因素都比较多,为做好安全风险防控,需对风险事件及相应因素进行梳理、分析、归纳和总结,下面以桩板墙为例作进一步分析。

2.1 安全风险事件

桩板墙在形式上是一种在桩间设置挡土板以稳定岩土体的支挡结构,在使用过程中面临的安全风险事件可以分为以下三大类^[13]:第一类是桩体部分承载能力极限状态失稳,包括桩身出现横向或斜向裂纹、桩身发生明显断裂的断桩以及桩身向前倾斜超过一定位移或承载力允许值的倒伏等;第二类是桩体部分正常使用极限状态失稳,主要是桩顶水平位移超过规范限定值的桩顶位移超限;第三类是挡土板部分正常使用极限状态失稳,主要是挡土板的开裂问题。桩板墙安全风险类型示意如图1所示。

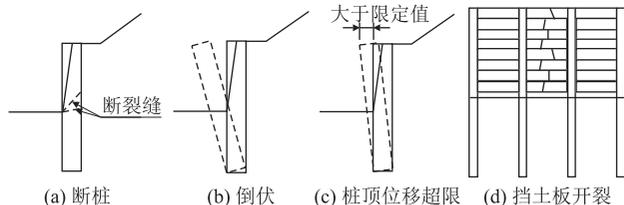


图1 桩板墙安全风险类型示意图

2.2 风险因素

支挡结构面临的风险因素,从极限状态设计的角度,可分为作用(S)不确定性、计算不确定性、抗力(R)不确定性三大类,如图2所示。其中作用不确定性包括列车荷载、土压力等,抗力不确定性包括材料参数、几何尺寸等,计算不确定性包括力、位移、应力、应变等力学量的计算方法。

采用层级分析与专家打分综合评估的方法对桩板墙三类安全风险的风险因素进行分析,得到各因素的风险值(此处为风险概率),结果如表1所示。由表1可知,每一种风险因素对三类安全风险的影响程度不同,每一种风险的主控因素也不同。因此,需依据结构的具体风险及因素进行针对性设计。

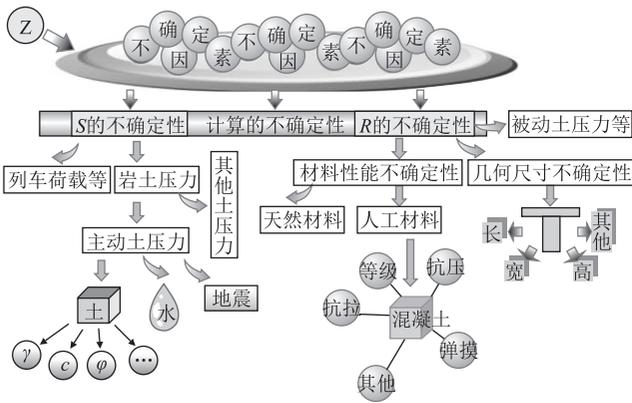


图 2 支挡结构安全风险因素图

2.3 可在设计中考虑的风险因素

根据风险因素的性质,在设计阶段可从以下几个方面予以规避。

(1) 完善不同设计状况下的设计规定。大(暴)雨冲刷及洪水、填料不透水导致的水压力过大、地震、施工临时荷载大等风险因素可分别通过完善偶然(洪水水位)、地震、短暂(临时荷载)等设计状况下的稳定性检算规避风险。

(2) 合理选择材料参数取值。填料参数、基底岩土参数、基底摩擦系数、地层类型参数、基底承载力标准值等风险因素均可通过可靠性方法合理选择。

表 1 桩板墙各风险因素及风险值表

风险因素	风险值			风险因素	风险值		
	断桩和倒伏	桩顶位移超限	挡土板开裂		断桩和倒伏	桩顶位移超限	挡土板开裂
大雨、暴雨、地下水、洪水	0.092	0.056	0.055	锚固段计算长度不合适	0.011 3	0.015 7	-
水泥、粗集料、细集料质量或级配不满足要求	0.071	-	0.045	锚固段岩土参数不合理	0.011 2	0.015 4	-
地基软弱	0.068	0.054	-	桩顶未按设计要求设平台	0.011 1	0.010	0.012
混凝土强度不满足要求	0.063	-	-	地层的类型不正确	0.010 5	0.020	-
钢筋强度不满足要求	0.062	-	-	选择的填料参数不正确	0.010 7	0.008 8	-
地震	0.041	0.040	0.039	土压力计算的边界条件不正确	0.010 6	0.007 6	-
锚固长度不足	0.020	-	-	填料参数不正确	0.009 6	0.018	0.054
桩顶平台上堆载	0.015	0.013 4	0.013 4	土压力增大系数不合理	0.009 3	0.007 4	-
路堤边坡陡于设计值	0.014	0.013 5	0.023	荷载分项系数不合适	0.008	0.007 3	-
施工荷载太大	0.013	0.013 7	0.029	选择的计算公式不合适	0.006 8	0.008 3	-
填料压实度不够	0.012	0.014 3	0.013 5	悬臂太大	0.006 4	0.021	-
锚固段岩土参数不正确	0.011 6	0.029	-	板上泄水孔向填土内倾斜;泄水孔不通;未设反滤层;桩顶平台有裂缝	0.005	0.016	0.015 5
锚固点选择不合理	0.011 4	0.014 6	-	施工注意事项交代不完善	0.004	0.006	0.018
桩身材料刚度不满足要求	-	0.164	-	锚固长度不足	-	0.029	0.011
板上的设计荷载不合适	-	-	0.034	钢筋保护层厚度不合适	-	-	0.03
混凝土强度等级不合适	-	-	0.03	振动压路机靠板太近	-	-	0.029
挡土板安装错误	-	-	0.027	土压力增大	-	-	0.023
未进行裂缝宽度验算	-	-	0.02	箍筋间距太大	-	-	0.017
主筋保护层厚度不够	-	-	0.015 4	设计的桩间距太大	-	-	0.014
外挂板与桩身整体连接	-	-	0.013 3				

(3) 制定优化的设计参数。若安全系数、分项系数较小,设计将不安全;若二者较大,设计将不经济。因此,工程设计应优化设计参数,确保安全的同时达成工程经济性的目标,这对提高工程设计质量极为重要。

(4) 明确抗力与作用的计算方法。明确长大边坡、高边坡地段支挡结构土压力的计算方法将有利于极限状态设计中作用部分的准确计算。

3 支挡结构设计参数自洽

为防控各风险因素可能导致的不良影响,工程上一般采用可靠性设计方法,具体来说就是对每个风险因素采用一定的设计参数(如安全系数、分项系数)以

保证设计结果的可靠性。TB 10025 - 2019《铁路路基支挡结构设计规范》中,抗滑、抗倾、基底承载力等结构外部稳定性检算采用的设计参数为安全系数,抗压、抗拉、抗弯、抗剪、抗扭等结构内部稳定性检算采用的设计参数为分项系数。本文将对二者的自洽性展开论述。

3.1 设计参数的内涵及类别

从发展历程来看,安全系数是可靠性设计方法最早采用的设计参数。该参数为单一参数,各种风险因素笼统考虑,给出的是结构安全程度的整体轮廓。由于安全系数并不能与概率确切挂钩,安全系数难以清楚地表现真实的安全程度,但由于该参数使用时间较

长,工程工作者们累积了大量的经验,因此仍有很多规范采用此参数作为设计指标。

分项系数是概率方法引入可靠性设计后出现的设计参数,该参数为多个参数,因此能较为仔细地考虑与材料、荷载以及与工作条件有关的风险因素。如荷载分项系数主要反映荷载和内力中的风险因素,材料分项系数主要反映材料和构件抗力中的风险因素。从我国分项系数的使用情况来看,其实际内涵有以下两种。

(1)将分项系数视为多系数的安全系数。安全系数取值的思想是“放大荷载,折小抗力”,因此分项系数也将基于这一思想,在多个抗力与多个荷载的多重平衡中择优取值。当然,此分项系数也难以清楚地表现真实的安全程度。

(2)将分项系数与概率挂钩。分项系数取值取决于参数的统计特征和结构的可靠指标,因此此分项系数比多系数安全系数在概率意义上更进一步。

分项系数两种内涵的差异导致了分项系数取值方法的不同,因此,分析规范分项系数的合理性时,需把握好这种内涵上的差异。

根据支挡结构风险因素类型、设计参数内涵、以及可靠性设计规定的需求,设计参数可分为3个类别,具体如表2所示。

表2 设计参数类别表

类别	说明
风险等级系数	根据结构的风险等级取值
抗力部分系数	包括材料性能参数与结构几何参数的系数,如钢筋强度参数、岩土强度参数等
作用部分系数	包括持久作用、主可变作用、次可变作用参数的系数,如土压力、车辆荷载等

3.2 设计参数的自洽规律

工程结构设计参数的目的在于保证设计的可靠性,因此应首先考虑多种可能存在的设计工况。根据荷载出现的频率和持续时间,设计工况应包含持久、短暂、偶然、地震四类。各设计工况的设计参数应符合以下宏观规律:

$$\begin{cases} K_L > K_S > K_A \approx K_E \\ \beta_L > \beta_S > \beta_A \approx \beta_E \end{cases} \quad (1)$$

式中: K, β ——安全系数、可靠指标;

L, S, A, E ——持久、短暂、偶然、地震设计状况。

需要说明的是,在支挡结构设计规范中,安全系数是明确给出的,而可靠指标一般要基于分项系数反算才能得到。

自洽是规范设计参数必须遵循的基本规律。铁路行业分项系数是基于安全系数校准得到的满足自洽规

律的安全系数,在考虑不同变量统计特征的影响后,其分项系数对应的可靠指标未必仍能满足该规律,因此在工程设计实践中应予以高度重视。

3.3 设计参数的自洽算法

为使设计参数满足自洽规律,合理可靠的设计参数计算方法是必不可少的。目前,无论是我国工程结构可靠性设计通标,还是各行业的可靠性设计规范,给出的可靠指标与分项系数的计算式均为:

$$\begin{cases} \beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \\ \gamma_R = 1 - \beta \Phi_R \delta_R \\ \gamma_S = 1 + \beta \Phi_S \delta_S \end{cases} \quad (2)$$

式中: β, γ ——可靠指标与分项系数;

R, S ——抗力与作用;

μ, σ ——均值与标准差;

δ ——变异系数(标准差与均值的比值);

Φ ——分离系数, $\Phi_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \Phi_S =$

$$\frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

从适用性角度来讲,式(2)适用于抗力与作用互不相关情况下设计参数来计算,但许多工程结构的抗力和作用之间是高度耦合的,铁路路基支挡结构的抗力与作用也属于这种情况。以持久设计状况下的重力式挡墙为例,其抗滑、抗倾计算示意如图3所示。抗滑、抗倾极限状态方程分别如式(3)所示。

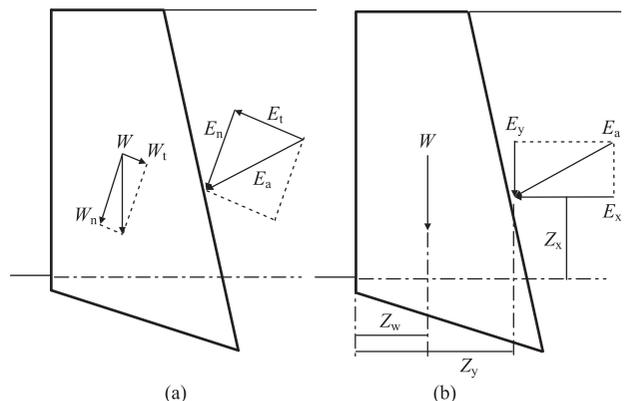


图3 重力式挡墙抗滑、抗倾计算示意图

$$\begin{cases} \text{抗滑: } R - S = (W_n + E_n)f - (E_t - W_t) \\ \text{抗倾: } R - S = (WZ_w + E_yZ_y) - E_xZ_x \end{cases} \quad (3)$$

由图3和式(4)可知,主动土压力 E_a 的竖直分量 E_y 与水平分量 E_x ,在抗倾检算中分别属于抗力项与作用项;而主动土压力 E_a 的垂直底面分量 E_n 与平行底

面分量 E_i 在抗滑检算中也分别属于抗力项与作用项。这就表明抗滑与抗倾检算中均有部分抗力与作用有相同来源,二者存在一定程度的相关性也就不言而喻了。支挡结构设计的目的抵抗岩土压力,因此所有支挡结构的设计必然都会遇到抗力与作用相关的情况。

文献[14-15]对相关性这一普遍性问题进行了分析,给出考虑变量相关性后的可靠指标与分项系数表达式。

$$\begin{cases} \beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho\sigma_R\sigma_S}} \\ \gamma_R = 1 - \beta_Z(\Phi_R - \rho\Phi_S)\delta_R \\ \gamma_S = 1 + \beta_Z(\Phi_S - \rho\Phi_R)\delta_S \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ ——抗力 R 与作用 S 之间的相关系数;

$$\Phi = \text{分离系数}, \Phi_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho\sigma_R\sigma_S}},$$

$$\Phi_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho\sigma_R\sigma_S}}$$

对于抗力、作用有多项的情况,其可靠指标与分项系数表达式可根据式(4)类推得到,此处不再赘述。可以看到,当相关系数 $\rho = 0$ 时,式(4)与式(2)是一致的,这表明现行规范给出的计算式只适用于抗力与作用不相关的情况,因此并不具有广泛适用性。相比之下,式(4)具有更强的适用性。

3.4 支挡结构的自洽设计

基于设计参数的自洽算法,支挡结构可进行极限状态自洽设计,其流程如图4所示。与一般极限状态设计流程相比,自洽设计方法主要增加了设计参数自洽的流程,该流程的目的在于考虑设计参数之间相关性影响。采用极限状态自洽设计可显著提升结构安全可靠性与风险因素之间的针对性,在确保安全的同时达成良好的经济性。此外,由于自洽设计有坚实的理论基础,给出的设计参数对应有明确的安全度,因此有助于支撑支挡结构安全可靠性设计由半经验设计向理论设计的提升。

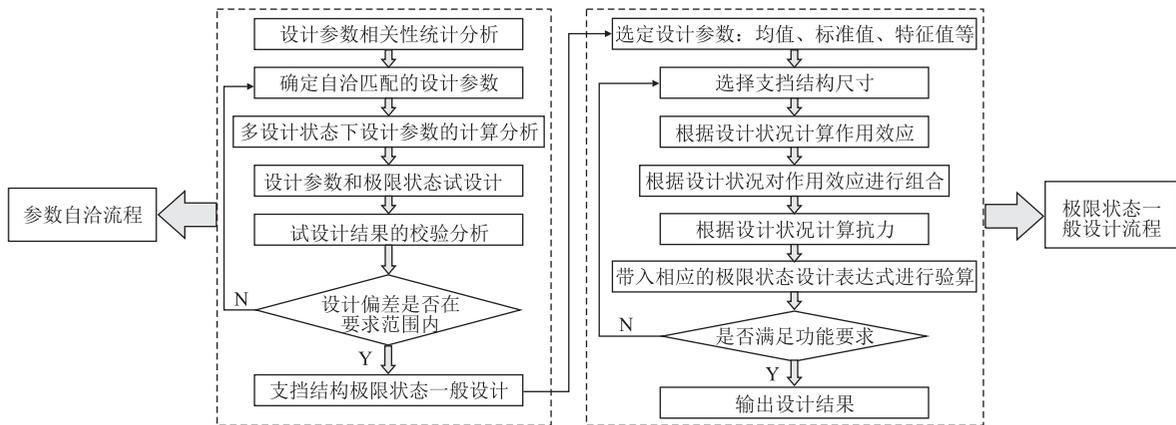


图4 支挡结构极限状态参数自洽设计方法流程图

4 支挡结构极限状态设计建议

基于对支挡结构安全风险识别及设计参数自洽的分析,提出支挡结构极限状态设计建议如下:

(1)完善各支挡结构极限状态设计的适用性。现行规范支挡结构设计整体偏重于承载能力设计(即强度控制设计),随着铁路运行速度和安全性的不断提升,正常使用设计(即变形控制设计)将扮演越来越重要的角色,支挡结构设计应对承载能力设计与正常使用设计并重,梳理不同设计状况下的正常使用极限状态功能需求。

(2)完善各支挡结构极限状态设计的功能项。各支挡结构设计均有约定俗成的功能项,而最终的设计

结果应由结构的某一项或某几项功能控制。若结构设计由功能之外的一些规定所控制,则应考虑将这些规定根据极限状态的分类设置为具体的功能项。如若“高速铁路路肩桩板墙桩顶位移不宜大于60mm”的规定,在某些情况下控制设计,则可考虑设置成相应的功能项。

(3)基于极限状态梳理材料参数的取值。可靠度设计方法的核心在于能较科学地衡量并分析考虑各个部分的不确定性,若不能明确材料参数的标准值,难免会影响可靠性设计方法的应用价值。目前,现有规范的参数取值多继承了安全系数,有些参数取值本身就蕴含了一定的可靠性,因此有必要基于材料应力应变试验的极限状态对材料参数取值进行梳理。

(4)给出满足自洽规律的支挡结构设计参数。安全系数、可靠指标、分项系数均应满足本文给出的自洽宏观规律。特别需要注意的是,经安全系数校准后的分项系数,即使安全系数满足自洽规律,分项系数也未必满足,在支挡结构极限状态设计中应尤其注意这一点。

5 结束语

支挡结构极限状态设计应在风险识别的基础上优化设计参数,以实现从设计源头上对风险因素进行针对性的规避,同时应注意设计参数的自洽性,进行参数自洽设计,以确保工程设计的合理、可靠,从工程源头上提升工程的可靠性。

参考文献:

- [1] 铁建设[2007]200号,铁路隧道风险评估与管理暂行规定[S]. Tie Jian She[2007]No.200, Interim Provisions on Risk Assessment and Management of Railway Tunnels[S].
- [2] 张喜刚.公路桥梁和隧道工程设计安全风险识别[M].北京:人民交通出版社,2010. ZHANG Xigang. Risk assessment for safety of road bridge and tunnel design[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [3] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程施工安全风险识别制度及指南解析[M].北京:人民交通出版社,2011. Department of Engineering Quality Supervision under the Ministry of Transport. Analysis of safety risk assessment system and guidelines for construction of highway bridges and tunnels [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [4] 中华人民共和国建设部.地铁及地下工程建设风险管理指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2007. Ministry of Construction of the People's Republic of China. Guideline of Risk Management for Construction of Subway and Underground Works[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2007.
- [5] GB 50652-2011城市轨道交通地下工程建设风险管理规范[S]. GB 50652-2011 Code for Risk Management of Underground Works in Urban Rail Transit [S].
- [6] 魏永幸.路基工程风险识别与管理研究[J].铁道工程学报, 2013, 30(3): 91-96. WEI Yongxing. Research on the Risk Identification and Control of Subgrade Engineering[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(3): 91-96.
- [7] 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.
- [8] Q/CR 9300-2018铁路桥涵设计规范(极限状态法)[S]. Q/CR 9300-2018 Code for Design on Railway Bridge and Culvert (Limit State Method) [S].
- [9] Q/CR 9127-2018铁路路基设计规范(极限状态法)[S]. Q/CR 9127-2018 Code for Design of Railway Earthworks (Limit State Method) [S].
- [10] Q/CR 9129-2018铁路隧道设计规范(极限状态)[S]. Q/CR 9129-2018 Code for Design of Railway Tunnel (Limit State Method) [S].
- [11] Q/CR 9130-2018铁路轨道设计规范(极限状态法)[S]. Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track (Limit State Method) [S].
- [12] TB10025-2019铁路路基支挡结构设计规范[S]. TB10025-2019 Code for Design of Retaining Structure of Railway Subgrade[S].
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王占盛,罗一农,李安洪,等.变量相关性对分项系数的影响分析[J].铁道工程学报,2017,34(2):37-42. WANG Zhansheng, LUO Yinong, LI Anhong, et al. The Effect Analysis of Correlation between Variables on the Partial Coefficient [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(2): 37-42.