

文章编号:1006 - 2106(2014)02 - 0033 - 05

基于可靠度方法的既有铁路边坡稳定性分析^{*}

李 杰^{**}

(上海铁路局, 上海 200071)

摘要:研究目的:在山区既有铁路沿线进行工程项目建设时,常常会影响原有边坡的稳定性,甚至形成工程滑坡,因此合理评价边坡稳定性是保证既有铁路安全运营的重要前提。本文建立了结合有限元强度折减法和点估计法的边坡可靠度分析方法,并以修建厂房开挖坡脚引起的既有线隧道口边坡失稳为例进行系统分析。

研究结论:(1)基于可靠度理论的边坡稳定性评价方法,能较全面地反映岩土参数的空间离散性、时间变异性等不确定性因素的影响,分析结果更为符合工程实际;(2)将有限元强度折减法与点估计法相结合,用于既有铁路边坡稳定性的可靠度分析,克服了传统的安全系数法的缺点,可较为全面地反映岩土体参数变异性对边坡稳定性的影响;(3)计算结果与 Monte - Carlo 法计算结果基本一致,但计算过程较为简单,因此工程实用性较好,可为类似工程提供借鉴。

关键词:既有铁路边坡;边坡稳定性;强度折减法;点估计法;可靠度

中图分类号:U2 **文献标识码:**A

Slope Stability Analysis of the Existing Railway Based on the Reliability Method

LI Jie

(Shanghai Railway Bureau, Shanghai 200071, China)

Abstract: Research purposes: When there was new construction project near the existing railway, the excavation activities often affected the slope stability. Even worse, the landslide would be caused as a result of the construction project and associated accidents occurred frequently. So it is essentially important to evaluate the slope stability properly in order to ensure the safe operation of existing railway. In this paper, a new reliability slope stability method was established based on the finite element strength reduction method and the point estimate method, and it was applied to an actual project.

Research conclusions: (1) Slope stability evaluation method based on reliability theory, can comprehensively reflect the influence of the geotechnical parameters of spatial discreteness and time variability, the analysis result more accord with the engineering practice. (2) The reliability slope stability method established in this paper can overcome the shortcomings of traditional safety factor method and can show a better interpretation for the slope stability analysis with the variation of geotechnique parameter. (3) By using the new reliability slope stability method established in this paper, the analysis process is simple and the calculation results is consistent with the Monte - Carlo method, so it is reliable method and has a good promotional value. It can provide a good reference for the similar engineering.

Key words: existing railway slope; slope stability; strength reduction method; point estimate method; reliability

我国是一个多山的国家,边坡失稳破坏是一种常见的山区地质灾害,每年由于边坡失稳造成巨大的生命财产损失,边坡的稳定性与否是山区铁路与公路选线及其他工程选址建设的重要影响因素,由于边坡失

^{*} 收稿日期:2013 - 10 - 12
^{**} 作者简介:李杰,1966 年出生,男,高级工程师。

稳的孕育机理受到多种不确定因素的影响,如何科学准确地描述和评价边坡稳定问题的困扰是岩土工程界一直面临的热点和难点问题。目前边坡稳定性分析主要采用定性分析法(如极限平衡法、有限元法等),该方法采用固定的安全系数作为评价指标,未能考虑岩土参数在时间、空间上的变异性及不确定性,边坡分析是一个受多方面因素影响的复杂问题,定性分析方法无法解释定性计算是稳定的、实际却发生了失稳破坏的滑坡工程事故的原因^[1-4]。近年来,发展起来的基于可靠度理论的边坡稳定性评价方法,可以考虑岩土参数变异性对边坡状态的控制作用,它的判定标准包括稳定系数、可靠性指数和破坏概率等。相比传统的单一安全系数法,它能较全面的反映岩土参数的空间离散性、时间变异性等不确定性因素的影响,分析结果也更为符合工程实际,可以更加合理的评价边坡工程的稳定程度^[5-7]。

在山区既有铁路沿线进行工程项目建设时,常常会破坏原有的地表形态,会对原有边坡的稳定性产生一定的影响,甚至导致工程滑坡的形成,相关工程事故屡有发生,因此合理的评价边坡稳定性是保证既有铁路工程的安全运营的重要前提。由于边坡稳定性是一个受多方面因素影响的复杂问题,传统的单一安全系数法较难全面反映岩土参数的空间离散性、时间变异性等不确定性因素对边坡稳定性的影响,而基于可靠度理论的边坡稳定性评价方法可以较好的解决该问题,本文建立了结合有限元强度折减法和点估计法的边坡可靠度分析方法,并以修建厂房开挖坡脚引起的既有线隧道口边坡失稳为例进行了系统分析,以期为类似工程的分析评价提供参考和借鉴。

1 边坡可靠度分析模型的建立

1.1 边坡极限状态方程

边坡可靠性分析方法建立在概率论与数理统计原理的基础上,假定影响边坡稳定的各个参数以及边坡的安全系数均为具有一定概率分布特征的随机变量,进一步采用合理的方法结合各个参数概率分布特性以及它们与安全系数之间的关系研究,得到边坡安全系数的概率分布形式并确定边坡工程的可靠度指标及失稳破坏概率。

可靠度分析首先要建立边坡工程的极限状态方程 Z : 当 $Z > 0$ 时边坡处于稳定状态,当 $Z = 0$ 时边坡处于临界失稳破坏状态,当 $Z < 0$ 时边坡处于失稳破坏状态。通常边坡工程极限状态方程定义为其安全系数减 1,即:

$$Z = F_s(c, \varphi) - 1 \quad (1)$$

边坡稳定性受到边坡岩土参数、外部荷载、环境等多种因素的影响,本文分析时只考虑对边坡安全系数影响最大的粘聚力 c 、摩擦角 φ 两个参数,将边坡安全系数 $F_s(c, \varphi)$ 假设为这两个随机参数的函数, $F_s(c, \varphi)$ 采用有限元强度折减法计算。相应的边坡失稳破坏的概率可表示为:

$$P_f = P(Z < 0) = P[F_s(c, \varphi) < 1] \quad (2)$$

1.2 有限元强度折减法原理

有限元强度折减法是近些年来发展起来的一种边坡稳定性分析的新方法,相比与传统的极限平衡条分法,它具有如下优点:(1)无需假定滑动面的位置和形状,不需要进行分条,可直接求解边坡安全系数;(2)可自动分析预测滑动面的形式,并动态模拟边坡的失稳破坏过程;(3)分析过程不受边坡形状、支挡结构形式的影响;(4)可以考虑多种类型的岩土材料本构关系;(5)可以模拟支挡结构与岩土体间的相互作用,因此可以对支挡结构施加前后边坡的稳定性进行评价。

采用有限元强度折减法计算边坡整体安全系数时,一般采用岩土材料常用的 Mohr - Coulomb 强度准则,表达式为:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

$$f = \tan \varphi \quad (4)$$

有限元强度折减法的计算原理为:建立有限元分析模型后,将边坡坡体的强度参数 c, f 值同时除以一个折减系数 F_{trial} 得到一组 c_i, f_i 值,将每一组 c_i, f_i 值输入到计算模型中进行计算,在 c, f 值不断减小的过程中边坡的安全系数也随之降低,可以得到一组临界值 c_0, f_0 ,即:当 $f \leq f_0, c \leq c_0$ 时边坡将发生失稳破坏, $f > f_0, c > c_0$ 时边坡处于稳定状态。计算时:通过预设折减系数 F_{trial} 进行逐次计算,得到特征点的位移与折减系数 $(S - F_{\text{trial}})$ 关系曲线,研究表明,对于有限元软件,可以将 $S - F_{\text{trial}}$ 曲线上发生突变的拐点位置的作为边坡的安全系数 F_s ,该方法计算结果与极限平衡条分法基本一致^[8]。

1.3 点估计法原理

目前常用的可靠度方法有一次二阶矩法、随机响应面法、Monte - Carlo 法、点估计法等^[5-7]。一次二阶矩法需要通过多次迭代计算,求解过程繁琐复杂,因此这两种方法在实际应用时受到一定的制约;随机响应面法基于线性无关原则及概率配点法,计算过程复杂;Monte - Carlo 法建立在大量随机采样的基础上,工作量大。点估计法是 Rosenbleuth 于 1975 年提出一种可靠度计算方法,该方法不必预先分析随机变量的分布类型,只需求出随机变量的均值和方差,即可计算出

状态函数的一阶矩(均值)和二阶矩(方差),进而得到边坡的可靠指标和破坏概率。该方法计算过程简单实用,并且计算结果与一次二阶矩法等较为吻合,是一种较实用的边坡可靠度分析方法。

点估计法不用考虑分布函数的变化形态,直接取变量的均值±标准差,来构建基本取值点。在边坡工程中,主要考虑 c 、 φ 值对边坡可靠度的影响,相应的取值有:

$$\begin{cases} c_+ = \mu_c + \sigma_c \\ c_- = \mu_c - \sigma_c \\ \varphi_+ = \mu_\varphi + \sigma_\varphi \\ \varphi_- = \mu_\varphi - \sigma_\varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\mu_c, \mu_\varphi, \sigma_c, \sigma_\varphi$ ——分别为 c 、 φ 值的均值和标准差。

当分析边坡只考虑单一的岩土层时,则可以通过 c 、 φ 值的组合,得到该边坡对应的4个不同的安全系数,如下式:

$$\begin{cases} F_1 = F_s(c_+, \varphi_+) \\ F_2 = F_s(c_+, \varphi_-) \\ F_3 = F_s(c_-, \varphi_+) \\ F_4 = F_s(c_-, \varphi_-) \end{cases} \quad (6)$$

当分析边坡考虑2层岩土体时,此时由4个随机参数(2组 c 、 φ 值)进行组合,可得到对应的16个安全系数;同理,当分析边坡考虑 n 层岩土体时,不同随机参数值进行组合后可得到对应的 2^{2n} 个安全系数。

建立数值分析模型,对于每一组随机参数的组合,采用有限元强度折减法进行一次计算,得到一组对应的边坡安全系数,可由式(7)~式(10)求出边坡安全系数的平均值 μ_F 、标准差 σ_F 、可靠度指标 β 、失稳破坏概率 P_f ,进而对边坡工程可靠度进行评价。

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (7)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_F - F_i)^2} \quad (8)$$

$$\beta = (\mu_F - 1) / \sigma_F \quad (9)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (10)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数,可在概率统计著作中查表取值。

2 工程实例分析

本文以修建厂房开挖坡脚引起的既有线隧道口边坡失稳为例,根据现场调查和试验结果,分析、确定了该边坡稳定性的控制因素,采用结合有限元强度折减

法和点估计法的边坡可靠度分析方法,分析了坡脚开挖前后改边坡的安全系数、可靠度和破坏概率,并将与边坡工程实际状态、以及其他计算方法进行了对比分析。

2.1 工程概述

某铁路增建二线的隧道出口段高边坡,位于湖北省十堰市境内,由于在边坡下方修建工业厂场地整平时,对边坡坡脚进行了开挖,并且没有及时采取合理有效的支护措施对边坡进行防护,伴随着降雨过程导致边坡岩土体力学特性出现恶化,隧道出口段右侧山体出现坍塌,边坡变形出现偏压导致隧道衬砌产生羽状纵向、环向裂缝,对铁路运营安全构成极大威胁^[10]。隧道出口段,地势南高北低,地层岩性以全~强风化的云母片岩为主,表层局部分布有少量的粉质黏土。

2.2 滑坡失稳特性

开挖坡脚引起的该工程滑坡属于破碎岩体滑坡,片理倾向与滑坡滑动方向基本一致,滑带主要为软化的云母片岩,云母含量高且手感滑腻,抗剪强度值低。

在1、2、4号钻孔内采用测斜技术探测边坡滑动面深度,现场变形监测数据分析表明该滑坡存在以下两个滑动面(如图1所示):(1)浅层滑动面,埋深约为6~10 m,监测滑体已产生10~130 mm的水平位移,变形明显,是场区的主要滑动面,由于公路北侧的挡土墙没有发现明显破坏迹象分析,因此该滑动面前缘(剪出口)位于山体坡脚处。(2)深层滑动面,2、4号钻探测斜成果均有反映,滑动面的深度约为5~17 m,监测已发生位移为1~5 mm,尚未形成贯通性滑动面。

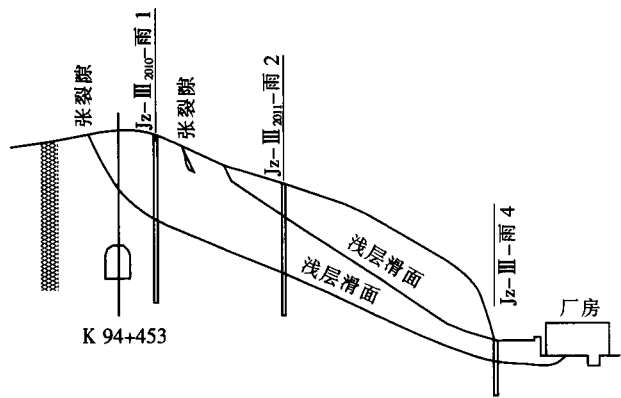


图1 滑坡工程地质剖面图

2.3 随机参数的选取

可靠度分析时,选择对滑坡安全系数影响较大的 c 、 ϕ 值作为随机变量。滑带土成分主要为全~强风化云母片岩,多呈块碎石土状,研究表明滑带土峰值强度指标分别为 $\mu_c = 11.6 \text{ kPa}$ 、 $\mu_\varphi = 25.3^\circ$,变异系数分别

为 $\delta_c = 0.22$ 、 $\delta_\varphi = 0.16$,标准差分别为 $\sigma_c = 2.55$ kPa、 $\sigma_\varphi = 4.05^\circ$ ^[9]。

2.4 原边坡可靠度分析

调查资料表明,截至坡脚下工业厂房修建前,隧道出口段边坡一直处于稳定状态。根据设计尺寸建立了坡脚开挖前边坡的有限元分析模型,如图2所示。图3为坡脚开挖前潜在的滑动面示意图(强度参数取均值)。分析得到边坡在不同强度参数组合条件下的安全系数分别为:

$$\begin{cases} F_1 = F_s(14.15 \text{ kPa}, 29.35^\circ) = 1.67 \\ F_2 = F_s(14.15 \text{ kPa}, 21.25^\circ) = 1.22 \\ F_3 = F_s(9.05 \text{ kPa}, 29.35^\circ) = 1.57 \\ F_4 = F_s(9.05 \text{ kPa}, 21.25^\circ) = 1.14 \end{cases}$$

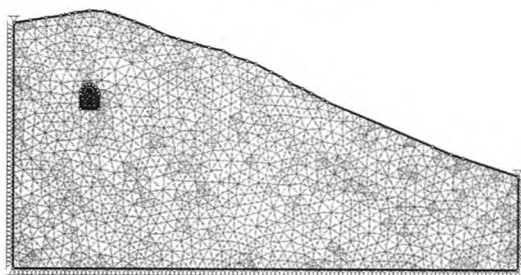


图2 边坡分析模型(坡脚开挖前)



图3 潜在滑动面示意图(坡脚开挖前)

按照上节方法计算得到坡脚开挖前,边坡安全系数的均值为 $\mu_F = 1.40$ (边坡强度参数取均值时安全系数也为1.40)、标准差为 $\sigma_F = 0.2236$,原边坡的可靠度指标为 $\beta = 1.790$,失稳破坏概率为 $P_f = 1 - \Phi(1.790) = 3.67\%$,表明原边坡处于稳定状态,与实际状况一致。

Monte - Carlo 法计算得到原边坡安全系数的均值 μ_F ,失稳破坏概率 $P_f = 3.43\%$ ^[9],与本文采用有限元强度折减法结合点估计法计算的结果基本吻合,但本文方法的计算过程大大简化、较为简便快捷。

2.5 病害边坡可靠度分析

进一步对坡脚开挖后边坡的安全系数进行了可靠度分析,计算模型如图4所示。结合有限元强度折减

法和点估计法,分析得到病害边坡在不同强度参数组合条件下的安全系数分别为:

$$\begin{cases} F_1 = F_s(14.15 \text{ kPa}, 29.35^\circ) = 1.20 \\ F_2 = F_s(14.15 \text{ kPa}, 21.25^\circ) = 0.90 \\ F_3 = F_s(9.05 \text{ kPa}, 29.35^\circ) = 1.09 \\ F_4 = F_s(9.05 \text{ kPa}, 21.25^\circ) = 0.81 \end{cases}$$

按照上节方法计算得到病害边坡安全系数的均值为 $\mu_F = 1.00$ 、标准差为 $\sigma_F = 0.1536$,病害边坡的可靠度指标为 $\beta = 0$ 、失稳破坏概率为 $P_f = 1 - \Phi(0) = 50\%$,表明病害边坡处于滑动失稳破坏状态,与实际状况一致。本文方法与 Monte - Carlo 法^[9]计算结果基本一致。

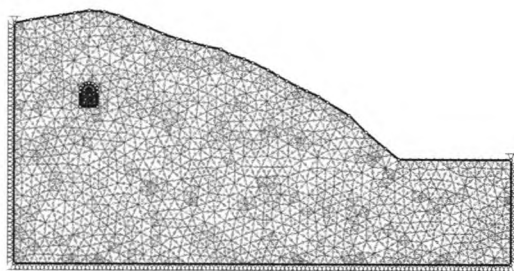


图4 病害边坡分析模型

图5、图6分别为折减系数 F_{trial} 为1.00、1.25时(强度参数取均值),病害边坡潜在滑动面示意图。图中可知,不同的折减系数对应的滑动面位置有一定区别。进一步对比图1可知:折减系数 F_{trial} 为1.00时,潜在滑动面的位置与浅层滑动面基本一致,表明浅层滑动面处于失稳破坏状态;折减系数 F_{trial} 为1.25时,潜在滑动面的位置与深层滑动面基本一致,表明深层滑动面稳定性相对较好;不同折减系数与钻孔内采用测斜技术探测得到的两个滑动面位置基本一致,与实际稳定状态也比较吻合。

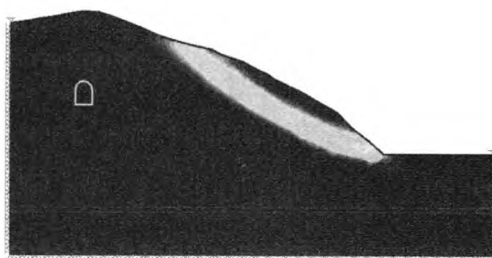


图5 折减系数为1.00时的潜在滑动面示意图

2.6 小结

(1)坡脚开挖前原边坡安全系数的均值为1.40、失稳破坏概率为3.67%,表明原边坡处于稳定状态,与实际状况一致。

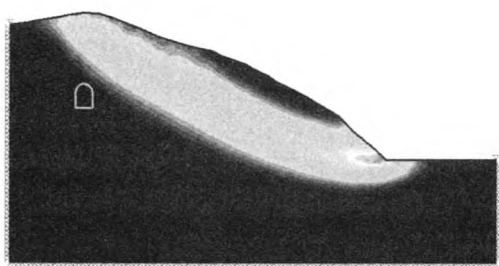


图6 折减系数为1.25时的潜在滑动面示意图

(2) 坡脚开挖后边坡安全系数的均值降低为1.00、失稳破坏概率提高至50%,坡脚开挖后隧道口边坡将处于滑动失稳状态,与实际状况一致。

3 结论

(1) 基于可靠度理论的边坡稳定性评价方法,能较全面的反映岩土参数的空间离散性、时间变异性等不确定性因素的影响,分析结果更为符合工程实际。

(2) 本文将有限元强度折减法和点估计法相结合,用于既有铁路边坡稳定性的可靠度分析,克服了传统的安全系数法定性分析的缺点,能够较为全面地反映岩土体参数变异性对边坡稳定性的影响。

(3) 分析结果与 Monte - Carlo 法计算结果基本一致,表明该方法计算结果较为可靠,由于该方法计算过程较为简单,因此工程实用性较好,可为类似工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Chen Zuyu. Analysis of the Soil Earth Slope Stability [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [2] 詹学启. 武广客运专线 DK1824 高边坡坍塌病害特征和整治[J]. 土工基础, 2011(2):30-34.
Zhan Xueqi. Characteristics and Remedy of High Slope Landslide in DK1824 Section of Wuhan - Guangzhou Railway Passenger Dedicated Line[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011(2):30-34.
- [3] 赵晋乾. 降雨入渗对边坡稳定性的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2011(5):19-21.

Zhao Jinqian. Study on the Effect of Slope Stability with Rainfall Infiltration[J]. Railway Standard Design, 2011(5):19-21.

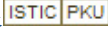
- [4] Luo, Z., Juang, C. H. Efficient Reliability - based Design of Drilled Shafts in Sand Considering Spatial Variability[J]. Journal of Geo Engineering, 2012(2): 59-68.
- [5] 王仲锦, 吴敏敏, 程爱君, 等. 铁路路堤边坡的可靠度设计方法研究[J]. 铁道工程学报, 2013(3):24-27,49.
Wang Zhongjin, Wu Minmin, Cheng Aijun, etc. Study on Design Method for Slope Reliability of Railway Embankment [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(3):24-27,49.
- [6] 唐亚明. 基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析[J]. 地质通报, 2008(8):1217-1222.
Tang Yaming. Loess Slope Stability Analysis Based on Reliability[J]. Geological Bulletin of China, 2008(8): 1217-1222.
- [7] 蒋水华, 李典庆. 基于随机响应面法和 Sarma 法的边坡可靠度分析[J]. 铁道工程学报, 2011(7):21-27,33.
Jiang Shuihua, Li Dianqing. Application and Discussion on Comprehensive Analysis Method in Evaluation of Slope Stability [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(7):21-27,33.
- [8] 陈世刚. 用有限元强度折减法分析谈山隧道进口高边坡稳定性[J]. 路基工程, 2012(3):151-152, 157.
Chen Shigang. Analysis on Stability of High Slope at Tanshan Tunnel Entrance by Finite Element Strength Reduction Method [J]. Subgrade Engineering, 2012(3):151-152,157.
- [9] 刘文清. 襄渝线雨泉沟滑坡成因分析及整治方案研究[J]. 交通科技, 2013(3):113-115.
Liu Wenqing. The Research on Causes and Reinforcement Scheme of Yuquangou Landslide in Xiangyu Railway [J]. Transportation Science & Technology, 2013(3):113-115.
- [10] 夏洪峰. 襄渝线雨泉沟滑坡稳定性评价分析[J]. 路基工程, 2013(3):180-185.
Xia Hongfeng. The Stability Analysis of Yuquangou Landslide in Xiangfan - Chongqing Railway [J]. Subgrade Engineering, 2013(3):180-185.

(编辑 梅志山)

基于可靠度方法的既有铁路边坡稳定性分析

作者：[李杰, LI Jie](#)

作者单位：[上海铁路局, 上海, 200071](#)

刊名：[铁道工程学报](#) 

英文刊名：[Journal of Railway Engineering Society](#)

年, 卷(期)：2014(2)

参考文献(10条)

1. [陈祖煜](#) [土质边坡稳定分析](#) 2003
2. [詹学启](#) [武广客运专线DK1824高边坡坍塌病害特征和整治](#)[期刊论文]-[土工基础](#) 2011(02)
3. [赵晋乾](#) [降雨入渗对边坡稳定性的影响研究](#)[期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2011(05)
4. [Luo, Z; Juang, C. H](#) [Efficient Reliability-based Design of Drilled Shafts in Sand Considering Spatial Variability](#) 2012(02)
5. [王仲锦; 吴敏敏; 程爱君](#) [铁路路堤边坡的可靠度设计方法研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2013(03)
6. [唐亚明](#) [基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析](#)[期刊论文]-[地质通报](#) 2008(08)
7. [蒋水华; 李典庆](#) [基于随机响应面法和Sarma法的边坡可靠度分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2011(07)
8. [陈世刚](#) [用有限元强度折减法分析谈山隧道进口高边坡稳定性](#)[期刊论文]-[路基工程](#) 2012(03)
9. [刘文清](#) [襄渝线雨泉沟滑坡成因分析及整治方案研究](#)[期刊论文]-[交通科技](#) 2013(03)
10. [夏洪峰](#) [襄渝线雨泉沟滑坡稳定性评价分析](#)[期刊论文]-[路基工程](#) 2013(03)

引用本文格式：[李杰, LI Jie](#) [基于可靠度方法的既有铁路边坡稳定性分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2014(2)