

两组节理控制下的公路岩质边坡稳定性分析及防控措施研究

杜光勤¹ 鲁志强¹ 汤华²

(1 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室 650011 昆明;

2 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 430071 武汉)

摘要: 节理岩质边坡的稳定性很大程度上取决于节理的抗剪强度及节理分布形式, 多组节理控制下的岩质边坡稳定性分析存在参数选取和计算方法方面的问题。本文以某公路的节理岩质边坡为研究对象, 采用节理抗剪强度折减的有限元方法研究了两组节理控制下的岩质边坡滑动机理, 通过节理室内剪切试验和边坡稳定性反分析相结合的方法给出了合理的节理抗剪强度参数: 节理 1 的强度参数是内聚力 30kPa、内摩擦角 40°; 节理 2 的强度参数是内聚力 5kPa、内摩擦角 5°。在此基础上, 考虑爆破施工对边坡岩体节理抗剪强度的弱化作用, 对边坡稳定性进行了评价, 分析结果得到了边坡的潜在滑动模式为节理控制下的浅层滑动。针对该边坡实际情况建议了以预应力锚索地梁为主的防控措施, 即坡面中部采用三排 1000kN 级预应力锚索, 间距 3m, 钢筋混凝土地梁水平间距 5m。

关键词: 节理; 岩质边坡; 稳定性; 强度折减; 防控措施

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11776/cjam.33.01.B011

1 引 言

公路边坡稳定性直接影响到线路、结构物施工及后期的安全运营。节理岩质边坡是高山峡谷地区公路建设中常见的边坡类型, 因对其稳定性评价或防控措施不当而引发的滑坡灾害十分常见, 给公路施工或运营造成了严重影响^[1-3]。节理岩质边坡的稳定性很大程度上取决于节理的抗剪强度及节理分布形式^[3], 多组节理控制下的具有复杂形状滑面的岩质边坡稳定性采用严格的极限平衡法如 Spencer 法、Morgenstern-Price 法进行分析通常很难有收敛解答, 节理的抗剪强度参数单纯通过室内剪切试验也

很难准确确定^[4-5]。

近年来持续发展的有限元强度折减法在边坡稳定性分析中应用越来越广泛。Zienkiewicz 等人在 1975 年首次在土工弹塑性有限元数值分析中提出了抗剪强度折减系数概念^[6]。从上世纪九十年代后期开始, 国内外许多学者发展了多种有限元强度折减分析方法, 并运用在了边坡稳定性分析和坝基抗滑稳定分析中, 简略综述如下: 文献[7]探讨了有限元强度折减法在岩土工程稳定性分析中的应用; 文献[8]研究了填土边坡和开挖边坡的稳定性; 文献[9]研究了剪胀角对边坡强度折减安全系数的影响; 文献[10]对边坡稳定有限元强度折减法中的失稳判据进行了详细讨论; 文献[11]对有限元强度折减法的计算精

收稿日期: 2015-01-22

修回日期: 2015-11-23

第一作者简介: 杜光勤, 男, 1966 年生, 云南省交通规划设计研究院, 高级工程师; 研究方向——道路、桥梁等方面的规划、勘察、设计。

E-mail: 1428867078@qq.com

度、影响因素、破坏判据、破坏准则等进行了深入研究; 文献[12]通过理论证明强度参数和变形参数应满足一定数学关系, 对强度折减法做出了较大改进; 文献[13]研究了考虑岩土软化特性的三维边坡强度折减方法。

以上强度折减法的研究中, 尚未针对岩质边坡中节理强度折减进行研究。针对节理控制下的岩质边坡稳定性计算不易收敛问题, 本文采用节理抗剪强度折减的有限元法进行两组主要节理控制下的岩质边坡稳定性分析, 并通过节理室内剪切试验和边坡稳定性反分析相结合的方法给出了合理的节理抗剪强度参数。在此基础上, 考虑爆破施工对边坡岩体节理抗剪强度的不利影响, 给出了具体的边坡稳定性综合防控措施的建议。

2 节理强度折减方法

文献[14]将边坡稳定安全系数 F 定义为沿整个滑移面的抗剪强度与实际抗剪强度之比, 工程中广为应用的各种条分法便是以此来定义坡体稳定安全系数, 有限元强度折减法的基本思路与此一致。有限元强度折减法的基本原理^[1]是将土体抗剪强度参数 c 、 $\tan\varphi$ 值同时除以一个折减系数 F , 得到一组新的 c' 、 $\tan\varphi'$ 值, 然后进行有限元计算, 当计算不收敛时, 对应的折减倍数 F 就是边坡的安全系数, 同时可得到临界滑面。

节理岩质边坡的滑动失稳主要是沿层面或节理面发生, 即滑动面是层面和节理面的组合滑面。本文提出了一种节理强度折减的有限元法, 节理抗剪强度采用摩尔-库伦准则描述, 借鉴有限元强度折减法的基本原理, 在节理岩质边坡稳定性计算中, 对节理的抗剪强度参数 c 、 $\tan\varphi$ 进行折减, 但保持岩体的抗剪强度参数不变, 即不改变岩体内部的应力场, 这样处理更符合实际情况, 折减至计算不收敛时的折减系数 F 即为节理岩质边坡的安全系数, 并能得到多组节理组合成的滑面。

利用摩尔圆写出摩尔-库伦准则的主应力表达式为

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin\varphi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - c \cos\varphi = 0 \quad (1)$$

其中: σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; φ 为内摩擦角; c 为内聚力。

用应力不变量来表达, 有如下形式

$$\frac{1}{3} I_1 \sin\varphi + \sqrt{J_2} (\cos\theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\theta \sin\varphi) - c \cos\varphi = 0 \quad (2)$$

其中: I_1 、 J_2 分别是应力张量的第一不变量、应力偏量的第二不变量; θ 为洛德角。

节理抗剪强度折减按下式进行

$$c_i = \frac{c}{F} \quad (3)$$

$$\tan\varphi_i = \frac{\tan\varphi}{F} \quad (4)$$

式中 c_i 、 $\tan\varphi_i$ 为第 i 次有限元计算时所用的节理抗剪强度参数, 直至边坡破坏为止。

3 工程实例分析

3.1 边坡工程概况

某公路桩号为 K179+860 段~K180+050 段的自然坡高陡, 切坡后坡顶厚约 30m 处出现裂缝, 垮塌的后缘高度约高出路基 130m, 垮塌坡顶上还有几百米的高陡自然山坡。坡面岩石主要为中厚层砂岩、薄层粉砂岩、页岩, 其中薄层粉砂岩板岩较破碎。该段坡面倾向约为 205° , 岩层产状从 $95^\circ \angle 67^\circ$ 到 $98^\circ \angle 60^\circ$ 。边坡岩体发育多组节理, 调查得知有两组明显的节理对边坡稳定性起到控制作用: 节理 1 产状为 $200^\circ \angle 42^\circ$, 贯通性强, 贯通长度可达十几米到几十米, 节理稍有起伏, 有少量钙质薄层和次生泥质充填; 节理 2 产状为 $322^\circ \angle 84^\circ$, 节理面部分充填次生泥土, 厚度为 1mm~5mm, 贯通性相对较差, 贯通长度大部分为几米, 整个坡面还分布有多个破碎条带。边坡全景见图 1, 边坡的层面和节理见图 2。

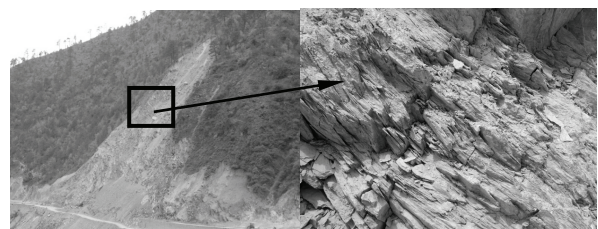


图1 边坡全景
Fig.1 Photo of the slope

图2 岩体层面和节理
Fig.2 Bedding plane and joints

3.2 滑动模式分析

该边坡岩体节理发育, 边坡稳定性受控于两组主要节理(节理 1 和节理 2)的组合, 节理 1 倾向与坡向一致, 倾角明显小于切坡角, 节理 2 为一组陡倾节理, 节理组合边界的剪切滑移、张拉破裂、错动变形是造成边坡岩体失稳的主要原因。另外, 岩层面与坡面大角度直交, 三种结构面将岩体切割成一

系列大小不一的楔形块体,但由于楔形块体主要沿缓倾的节理1发生滑动,可近似看作一侧有一定约束的平面滑动,因此可简化为平面问题进行分析。由于边坡内发育有多组近似平行的节理组合,边坡可能的滑动面由节理1和节理2组合形成,边坡的滑动模式见图3。

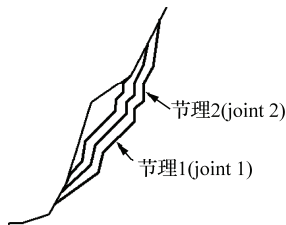


图3 边坡的滑动模式
Fig.3 Sliding mode of the slope

3.3 岩体节理抗剪强度参数的确定

节理岩质边坡的稳定性由主要节理的抗剪强度参数控制,为了对边坡稳定性进行准确评估,并为加固方案提供必要的理论依据和力学参数,需要得到岩体节理准确的抗剪强度参数。岩体节理抗剪强度试验取样困难,通常试验结果的离散性较大,故单纯的试验方法很难准确确定抗剪强度,需结合其他方法综合确定。本文探讨了一种在室内抗剪强度试验基础上通过边坡稳定性反分析方法综合确定节理抗剪强度的分析方法。

由边坡滑动模式可知,边坡稳定性由两组主要节理的抗剪强度参数决定,其中缓倾的节理1抗剪强度对边坡稳定性起到控制作用,需要得到节理1准确的抗剪强度参数。

3.3.1 岩体节理抗剪强度室内试验

剪切试验方法、试验装置和操作步骤严格参照交通部颁布的《公路工程岩石试验规程》(JTGE41-2005)^[15]。试验时采用方形人工切割试样,外形不规则处采用水泥砂浆找平,加工后的试验样品剪切面尺寸为20cm×20cm、试样高大于20cm。试验共分6组,均为节理1,其中3组是中间有夹层的岩体结构面,3组为无夹层的岩体结构面。

已有研究成果表明,岩体结构面在浸水状态下强度明显降低^[16]。很多边坡工程实践也证明降雨后更易发生滑坡现象^[1-2]。所以本次试验前先将试样放在水中浸泡一天,再把样品放入上下两个剪切盒中,分别利用液压千斤顶对岩块试件施加法向荷载、切向荷载,法向荷载分别为100kPa、200kPa、300kPa、400kPa。

试验结果见表1。由表1可知,试验结果具有

一定的离散性,有夹层的岩体结构面抗剪强度略低,无夹层的岩体结构面抗剪强度稍高。由于实际情况下节理1中有些含有夹层,有些不包含夹层,因此节理1的平均抗剪强度应介于两个试验结果之间,即节理1的内聚力 c 在28kPa~33kPa之间,内摩擦角 φ 在35°~44°之间。

表1 岩体节理的剪切试验结果
Tab.1 Shear test results of the rock joint

| 节理 (joint) | 剪切面积 (shear area)/cm ² | c /kPa | φ (°) |
|-----------------------------|--------------------------------------|----------|---------------|
| 有夹层 (with interlayer) | 320 | 27 | 35 |
| | 286 | 28 | 40 |
| | 315 | 30 | 37 |
| 无夹层 (without interlayer) | 271 | 32 | 44 |
| | 304 | 29 | 41 |
| | 262 | 33 | 38 |

3.3.2 岩体节理抗剪强度的反分析

在节理1抗剪强度试验的结果基础上,对开挖后边坡节理1和节理2的抗剪强度参数进行反分析。节理1和节理2的强度参数取值见表2,采用表中的节理抗剪强度参数分别对边坡进行稳定性计算,结果也列在表中。由计算结果可知,边坡稳定性对节理2的强度参数并不敏感,由于节理2的抗剪强度参数值本身并不大,因此可取节理2的强度参数为内聚力 $c=5$ kPa、内摩擦角 $\varphi=5^\circ$ 。

表2 岩体节理抗剪强度反分析方案和结果
Tab.2 Back analysis schema and results of joint shear strength

| 编号 (number) | 节理1(joint1) | | 节理2(joint2) | | F |
|----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|------|
| | c /kPa | φ (°) | c /kPa | φ (°) | |
| 1 | 20 | 36 | 0 | 0 | 0.92 |
| 2 | 20 | 36 | 5 | 5 | 0.94 |
| 3 | 20 | 40 | 0 | 0 | 1.00 |
| 4 | 20 | 40 | 5 | 5 | 1.04 |
| 5 | 30 | 40 | 0 | 0 | 1.09 |
| 6 | 30 | 40 | 5 | 5 | 1.15 |
| 7 | 40 | 40 | 0 | 0 | 1.18 |

3.3.3 岩体节理抗剪强度取值

不考虑开挖造成的不利影响,边坡基本能保持稳定,表2中算例3、算例4、算例5、算例6、算例7均能满足要求。将这些算例的节理1抗剪强度参数和室内试验结果对比,可以发现算例6的节理1抗剪强度参数正好在室内试验结果范围内,此时边坡的安全系数为1.15。边坡的破坏模式见图4。由于岩体节理的室内试验结果存在一定的离散性,综合考虑室内试验和节理抗剪强度反分析结果,取节理1的抗剪强度参数为内聚力30kPa、内摩擦角40°;节理2的抗剪强度参数为内聚力5kPa、

内摩擦角 5° 。

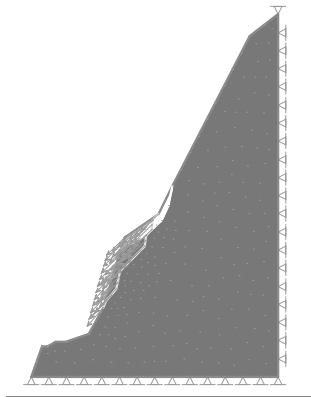


图4 边坡的破坏模式
Fig.4 Failure mode of the slope

3.4 边坡稳定性分析

由图4可知,该工程边坡的滑面形状近似台阶状,采用工程上常用的严格极限平衡方法进行稳定性计算无法收敛,因此本文采用节理强度折减有限元法来实现多组节理控制下的边坡稳定性分析。计算软件为 Rocscience Phase2,岩体节理采用软件内的 Joint 单元模拟,松散体和岩体假设为弹性材料,节理采用摩尔-库伦强度准则。

爆破震动对边坡稳定性的主要影响是由于爆破荷载的反复作用,导致节理的强度参数降低。爆破震动力造成节理裂隙张开,节理充填物质变得松散,一般情况下节理的内聚力降低较多,而内摩擦角下降相对较小^[16-17]。

鉴于边坡岩体中节理裂隙非常发育,岩体完整性较差,根据文献[17]和文献[18]中实测数据可知,爆破产生的地震波在此类岩体中衰减较快,地震波在距离6m处已极大衰减,因此估算爆破震动对该边坡的影响深度为6m。根据文献[17]和文献[18]试验结果和该公路边坡施工的具体情况,考虑爆破造成节理抗剪强度弱化,将距坡面6m以内的节理抗剪强度进行弱化处理:节理1的内聚力降低为20kPa,内摩擦角降低为 36° ;节理2的内聚力和内摩擦角均降低为0。计算得到边坡安全系数为0.92,此时边坡将发生浅层失稳。

3.5 边坡稳定性综合控制措施

根据上文分析结果,在爆破施工作用下,若不采取支护手段,K179+860~K180+050边坡浅层稳定性无法保证。可采用两种加固方案:锚杆加固、预应力锚索地梁加固。

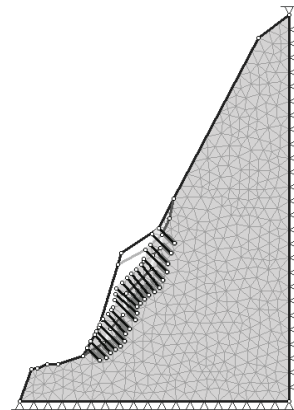
3.5.1 锚杆加固方案

为安全起见,考虑爆破造成的最不利影响,对

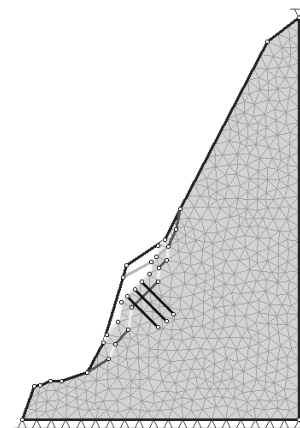
距坡面6m处节理强度参数取爆破后弱化的强度参数。锚杆材料用 $\Phi 32$ 钢筋、锚杆长12m、设计抗拔力150kN、间隔2.5m呈梅花形布置、锚杆倾角 12° ,锚杆锚固体采用水泥砂浆,其强度等级为M20,加固后边坡稳定性分析模型见图5(a),加固后边坡安全系数为1.22。

3.5.2 预应力锚索地梁加固方案

在边坡中部采用三排1000kN级预应力锚索,锚索长30m,倾角 10° ,锚索间距3m。钢筋混凝土地梁采用C25混凝土制作,截面尺寸80cm \times 80cm,地梁水平间距5m。当混凝土基本达到预定强度时,采用超出1.2倍的锚索设计荷载锁定。预应力锚索地梁顺坡表在高出路基约65m~95m范围内,每一上下条带布置5孔锚索。预应力锚索地梁加固后边坡计算模型见图5(b),加固后边坡的安全系数为1.22。



(a) 锚杆加固
(anchor reinforcement)



(b) 预应力锚索地梁加固
(prestressed anchor-rope and groundtill reinforcement)

图5 边坡加固计算模型

Fig.5 Analysis model of the reinforced slope

3.5.3 加固方案选择

对两种方案加固的边坡稳定性进行比较发现,两种加固方案下边坡稳定性提高程度相当。鉴于卸

载作用、风化作用、地下水、爆破施工对边坡浅层影响较大,采用锚杆加固方案,一方面需要的锚杆长度较长;另一方面,由于浅部岩体较为破碎,呈散体-碎裂结构,成孔难度较大;此外锚杆方案造孔数量多、施工面积大、施工难度大。而预应力锚索地梁加固方案适用于各种岩体介质,由于地梁尺寸大于锚墩,会对坡面产生一定的箍束作用,从而有效地改善锚索四周浅表岩体的应力状态,提高岩体的整体性,防止边坡浅表面破坏。

针对 K179+860~K180+050 边坡节理裂隙发育的实际情况,建议对此边坡采用预应力锚索地梁加固方案,加固工作量可大大减少。

4 结 论

以某公路节理岩质边坡为研究对象,提出了一种节理强度折减的有限元方法,通过该方法研究了多组节理控制下的岩质边坡滑动机理和稳定性,通过室内剪切试验和边坡稳定性反分析相结合的方法给出了合理的节理抗剪强度参数取值,分析了爆破施工对边坡稳定性的不利影响,并建议了综合防控措施,主要结论如下。

- 1) 提出了一种节理强度折减的有限元方法,建议了具体实现方法。
- 2) 边坡潜在滑动面由两组节理组合形成,呈台阶状,边坡稳定性受两组主要节理控制,其中节理 1 起到决定性作用。室内剪切试验和边坡稳定性反分析相结合是一种较好地确定节理抗剪强度参数的方法。
- 3) 考虑了爆破施工对边坡岩体节理抗剪强度的弱化作用,爆破荷载作用下边坡稳定性不满足要求,边坡发生浅层滑动。
- 4) 从施工难易程度、加固工作量等方面对两种边坡防控措施进行了比较,建议采用预应力锚索地梁加固方案。

参 考 文 献 (References)

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2007.(Zheng Yingren, Chen Zuyu, Wang Gongxian, et al. Engineering treatment of slope and landslide[M]. Beijing: China Communications Press, 2007(in Chinese)).
- [2] 张俾元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1997.(Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Engineering geological analysis principle[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997(in Chinese)).

- [3] 刘可定,贺续文.基于离散单元法密集节理岩体边坡稳定性分析[J].路基工程,2011(2): 56-59. (Liu Keding, He Xuwen. Stability analysis of densely jointed rock slope based on discrete element method[J]. Subgrade Engineering, 2011(2): 56-59(in Chinese)).
- [4] 周太全,华渊,宿树波.基于强度折减法的节理岩质边坡支护稳定性分析[J].金属矿山,2009,39(1): 37-40. (Zhou Taiquan, Hua Yuan, Su Shubo. Stability analysis of strengthened jointed rock based on strength reduction method[J]. Metal Mine, 2009, 39(1): 37-40(in Chinese)).
- [5] 范金星,柳厚祥.带节理的边坡非线性有限元分析[J].公路工程,2009(3): 147-150, 161. (Fan Jinxing, Liu Houxiang. Nonlinear finite element analysis of the slope with joint in highway engineering[J]. Highway Engineering, 2009(3): 147-150, 161(in Chinese)).
- [6] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [7] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, 49 (3): 387-403.
- [8] Matsui T, San K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 59-70.
- [9] Manzari M T, Nour M A. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(1): 75-80.
- [10] 刘金龙,栾茂田,赵少飞,等.关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J].岩土力学,2005,26(8): 1345-1348. (Liu Jinlong, Luan Maotian, Zhao Shaofei, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1345-1348(in Chinese)).
- [11] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝.用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J].中国工程科学,2002,4(10): 57-61, 78. (Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Zhang Luyu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 57-61, 78(in Chinese)).
- [12] 郑宏,李春光,李焯芬,等.求解安全系数的有限元法[J].岩土工程学报,2002,24(5): 626-628. (Zheng Hong, Li Chunguang, Li Chaofen, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626-628(in Chinese)).
- [13] 孙聪,李春光,郑宏,等.基于软化特性的三维边坡强度折减有限元分析[J].岩土力学,2014,35(s1): 407-413. (Sun Cong, Li Chunguang, Zheng Hong, et al. A strength reduction finite element

- method based on softening properties analysis for 3D slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(s1): 407-413(in Chinese).
- [14] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. *Géotechnique*, 1955, 5(1): 7-17.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程岩石试验规程 JTG E41-2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (MOT. Test method of rock for highway engineering. JTG E41-2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2006(in Chinese)).
- [16] 李克钢, 许江, 李树春. 三峡库区岩体天然结构面抗剪性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(7): 1063-1067. (Li Kegang, Xu Jiang, Li Shuchun. Study on property of rock mass discontinuity shear strength in the Three Gorges reservoir area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(7): 1063-1067(in Chinese)).
- [17] 李洪涛, 舒大强. 爆破震动衰减规律的影响因素[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2005, 38(1): 79-82. (Li Hongtao, Shu Daqiang. Influential factors analysis of blasting vibration attenuation law[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005, 38(1): 79-82(in Chinese)).
- [18] 张继春, 彭琼芳. 岩体爆破地震波衰减规律的现场试验与分析[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2001, 20(4): 399-401. (Zhang Jichun, Peng Qiongfang. Field experiment and its analysis of attenuation law for seismic waves resulting from rock blasting[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2001, 20(4): 399-401(in Chinese)).

the finite element analysis. This result can provide a reference for the revision of the standard formula of this kind of section. An appropriate section form, S4, is proposed, according to the production requirement and the analysis of the results.

Keywords: *cold-formed multi-roll lipped channel column, Direct Strength Method, Finite Strip Method, distortional buckling.*

The CFD based research of the parameters impact for aerostatic coefficients of tall-piered long-spaned girder bridge

An Lipeng Li Dejian Wang Yuanli Yuan Peng

(School of Civil Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China)

Abstract: Based on computational fluid dynamics(CFD) method, the wind field of continuous rigid frame bridge under different conditions is numerically simulated. The effects of attack angle, beam height and section across slop to tri-component force coefficients (resistance coefficient, lift coefficient and torque coefficient) were studied by this model, and the distributions of pressure and velocity are also analyzed. The results show the three parameters above have great influence on the tri-component force coefficients, while their focuses are different. Beam height mainly affects resistance coefficient, whose change amplitude is 0.494. Attack angle mainly affects lift coefficient, whose change amplitude is 0.382. Across slop mainly affects torque coefficient, the change amplitude of which is 0.17. The tri-component force coefficients are sensitive to the shape and size of the section. When the section of the beam faces the wind in the left or the right, the difference of resistance coefficient is between 0.04 and 0.21, the difference of lift coefficient is between 0.009 and 0.2, and the difference of torque coefficient is between 0 and 0.07. The larger the beam height the blunter the section and the more complex the distribution of flow field around.

Keywords: *computational fluid dynamics, box girder, static tri-component force coefficients, parameters impact.*

Stability analysis and disaster prevention of highway rock slope with two main joints

Du Guangqin¹ Lu Zhiqiang¹ Tang Hua²

(1 National Engineering Laboratory for Surface Transportation Meteorological Hazard Prevention Technology, Broadvision Engineering Consultants, 650011, Kunming, China; 2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 430071, Wuhan, China)

Abstract: The stability of jointed rock slope depends largely on the shear strength and its distribution form of the joints, there exist several problems such as shear strength selection and analysis methods for rock slope stability. Improper evaluation of jointed rock slope stability or control measures often result in landslide disasters. In this paper, a jointed rock slope stability of road is analyzed, and the sliding mechanism of the two joints controlled

rock slope is studied using the finite element method. Reasonable shear strength parameters of rock joints are presented through the joints shear test and slope stability back-analysis. Blasting working of the slope is studied by the weakening of joint shear strength. The results show that shallow slide will occur within a shallow depth, a comprehensive prevention and control measure based on prestressed cable is recommended to stabilize the slope.

Keywords: *joints, rock slope, stability, joint shear strength reduction, prevention and control measures.*

Vibration fatigue life prediction of blades based on weighted-strain factors

*Fan Junling*¹ *Chen Li*¹ *Chang Wenkui*¹ *Dong Dengke*¹ *Guo Xinlin*²

(1 AVIC Aircraft Strength Research Institute, 710065, Xi'an, China;

2 State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, 116024, Dalian, China)

Abstract: A nonlinear fatigue damage accumulation model for life predictions of low-cycle and high-cycle fatigue regimes is derived based on the cyclic stress-strain equation and the strain-life equation. The weighted elastic and plastic strain factors are introduced in the model to modify the fatigue strength exponent and the fatigue ductility exponent, so that the effects of the elastic and plastic strains on fatigue damage accumulation rate are taken into account. And then, the created model is applied to predict fatigue lives of the aero-engine compressor blades. Comparisons between the results of the present model and those of experiments, the Basquin equation and the modified Basquin equation are analyzed. The results show that the errors of predicted fatigue lives by the three models are less than 30% under lower stress levels ($\leq 700\text{MPa}$), but if the stress level is higher than 770MPa, the predicted fatigue lives by the present model are, respectively, 89.14% and 22.73%, better than the results determined by the Basquin equation and the modified Basquin equation.

Keywords: *Basquin equation, weighted-strain factor, fatigue life prediction, aero-engine, compressor blade.*

Analysis of the structure deteriorating of RC bridges under high-speed train run vibrations based on RTLCA

Cui Tiejun^{1,2,3} *Ma Yundong*³

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, 123000, Fuxin, China;

2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, 123000, Fuxin, China;

3 Tunnel & Underground Structure Engineering Center of Liaoning, Dalian Jiaotong University, 116028, Dalian, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the vibration produced by running high-speed trains on the structural reliability degradation of reinforced concrete bridge, to analyze the age, availability, and probability of ultimate failure of the bridge, the Renewal Theory-based Life-cycle Analysis is adopted to simulate the bridge structural reliability degradation process. In the simulation of the deteriorating process the bridge is considered to be maintainable and deteriorating is assumed to be produced by vibration only from the running trains. The results