DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X. 2016.01.004
刘春龙, 张志强, 袁继国, 等. 岩质边坡稳定坡角影响因素及其确定方法[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 23-29. (LIU Chun-long, ZHANG Zhi-qiang, YUAN Ji-guo, et al. Rock slope stability influence factors of slope angle[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 23-29.)

岩质边坡稳定坡角影响因素及其确定方法

刘春龙, 张志强, 袁继国, 刘莹莹
(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 目前研究岩质高边坡稳定性的方法很多,但研究边坡开挖后稳定性及边坡坡角与结构面倾角的关系却较少,且多运用数值分析方法确定岩质高边坡的稳定性,很少用解析解的方法。基于块体的极限平衡理论,岩质高边坡发生整体破坏,其滑移面为顺层直面,推导出岩质高边坡受结构面控制的最小安全系数解析解。分析解析表达式中各个参数对确定影响边坡稳定性的敏感性因素,表明受结构面影响的岩质高边坡安全系数与岩体的黏聚力、内摩擦角成线性正比关系,与岩体重度、边坡高度和边坡坡角成反比,随着结构面倾角的增加而呈先减后增的趋势,据此得出在既定的安全系数下岩质高边坡稳定坡角的解析解,分析得出受结构面控制的岩质边坡稳定坡角与黏聚力、内摩擦角、边坡坡高和安全系数等的关系曲线。通过对已有工程实例的计算分析,比较理论公式和数值模拟计算结果的差异,证明理论公式可以应用于实际工程之中。

关 键 词: 岩质边坡; 平面滑动; 极限平衡; 参数敏感性; 稳定坡角
中图分类号: TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)01-0023-07

目前,我国大多数山区工程建设项目(路桥或水电工程等)都是在高边坡地形条件下进行,随着工程建设的增多,人们越来越意识到边坡稳定性对工程安全的重大影响。近年来,国内外研究人员对岩质高边坡的稳定性进行了大量研究。黄润秋[1-2]对岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制进行了总结分析,提出高边坡稳定控制应该在时效变形的阶段完成,且越早控制越有利。李宁等[3-4]讨论了岩质边坡在动力荷载作用下的稳定性,认为在动力荷载下应以动安全系数的变化分析边坡的稳定性。徐卫亚等[5]对滑石板顺层岩质高边坡稳定性及其加固措施进行了研究,认为滑石板边坡的稳定性主要受边坡体下部拉裂区控制,一旦拉裂区岩体失稳破坏,边坡的整体稳定性必将受到影响。赖志生等[6]对散体结构岩质高边坡的开挖参数进行了研究,从理论分析的角度出发,对散体结构岩质边坡进行了数值模拟,比较分析了不同平台宽度、各阶边坡的坡比及平台台阶开挖高度变化下对边坡位移场应力场的影响。张金龙等[7-8]对锦屏一级水电站的左岸边坡受开挖卸荷影响的变形进行了监测和分析,认为受开挖影响的范围较大,应力释放及转移时间较长,边坡完全自稳所需时间较长。刘立鹏等[9]基于 Hoek 等提出的岩体等级标准,生成了边坡安全系数分布图,可粗略估算安全系数的范围。这些研究都是分析不同条件下岩质边坡的应力场、变形场的自稳调节变化,没有针对岩土体边坡各参数变化对边坡稳定性的影响进行专门研究,边坡安全系数与稳定坡角的关系及稳定坡角的确定方法等更是鲜有涉及。

本文基于块体极限平衡理论,根据岩质边坡的主要破坏特点[10-13],推导了受结构面控制的岩质高边坡安全系数解析表达式,分析影响岩质边坡稳定性的因素,并进一步得出了边坡稳定坡角与工程设计安全系数的解析解。以常吉高速 K169+460~K169+735 段内顺层边坡为例,根据已有资料对边坡的稳定性及稳定坡

收稿日期: 2015-04-03
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(05JS34)
作者简介: 刘春龙(1989—),男,黑龙江哈尔滨人, 博士研究生,主要从事岩土力学试验研究。
E-mail:lchlong1989@ 126.com

角进行评价,对类似工程具有一定参考价值。

1 边坡稳定理论计算

边坡稳定理论计算时作如下假设:边坡滑动破坏面为直线;岩体按照摩尔库仑破坏条件进入屈服;边坡坡面为单一直线。

1.1 边坡安全系数

简单顺层岩质边坡如图 1 所示。边坡高度为 h,边坡由于工程作用所形成上部开挖体的高度为 h_2,h_1 为开挖后边坡坡体高度,开挖区域为 $BDEF$,所形成边坡的平台宽度为 a,开挖后边坡坡角为 β($\beta < \alpha$,α 为初始边坡坡角),令 x 为结构面水平投影距离,γ 为岩体重度,φ 为岩体内摩擦角,c 为岩体黏聚力,结构面倾角为 θ。假定边坡滑动面为 AC,边坡选取 ABC 为滑坡体。推导可得安全系数 f_s 的表达式:

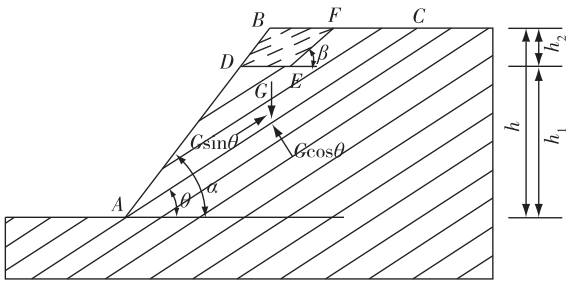

图 1 边坡几何关系

Fig. 1 Geometric diagram of slope

$$f_s = \frac{2c(\tan^2\theta + 1)}{\gamma h\tan\theta(1 - \cot\alpha\tan\theta - \eta\tan\theta)} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta} \tag{1}$$

由式(1)可见,对于受结构面控制的顺层岩质边坡,当岩层倾角一定时,安全系数 f_s 随着边坡坡高 h 的增加而降低。即通过边坡坡脚处的结构面为最危险滑裂剪出面;当边坡高度一定时,安全系数 f_s 是关于岩层倾角 θ 的函数,对式(1)进行变换可得:

$$f_s = \frac{2c + (h^2 + x^2)}{\gamma h^2[x - h(\cot\alpha + \eta)]} + \frac{x\tan\varphi}{h} \tag{2}$$

由式(2)可见,随着岩层倾角的变化,安全系数 f_s 必定存在一个最小值。为求安全系数的最小值,可以对上式求导并令导数为零可得:

$$x_{\min} = h(\cot\alpha + \eta) + h\sqrt{\frac{2c[1 + (\cot\alpha + \eta)]^2}{2c + \gamma h\tan\varphi}} \tag{3}$$

其中 $x_{\min}$ 就是边坡坡高一定时所对应的最小安全系数的顺层边坡结构面水平投影距离。根据 $x_{\min}$,可得出边坡最小安全稳定系数 $f_{s\min}$。

$$f_s = \left\{(4c + \gamma h\tan\varphi)(\cot\alpha + \eta) + 2\sqrt{2c[1 + (\cot\alpha + \eta)^2](2c + \gamma h\tan\varphi)}\right\}/\gamma h \tag{4}$$

当 $h_2 = 0$ 时,即 $\eta = 0$。式(4)变为简单岩质边坡安全系数,其表达式如下:

$$f_s = \left[(4c + \gamma h\tan\varphi)\cot\alpha + 2\sqrt{2c(1 + \cot^2\alpha)(2c + \gamma h\tan\varphi)}\right]/\gamma h \tag{5}$$

1.2 安全系数影响因素的讨论

影响边坡稳定性的因素较多,根据式(1)可定量分析边坡体的几何及力学参数对安全系数的敏感性。顺层岩质边坡稳定性主要受结构面控制,结构面处不仅力学参数较小且破坏了岩体完整性。根据《建筑边坡工程技术规范》,岩质边坡结构面力学参数及边坡几何参数的一般范围见表 1。

表 1 边坡力学参数和几何参数

Tab. 1 Mechanical and geometric parameters of slope

参数	c/kPa	φ/(°)	γ/(kN·m^{-3})	a/m	h_2/m	α/(°)	β/(°)	θ/(°)	h/m
范 围	20~130	12~35	23~27	5~15	10~30	20~60	30~60	10~45	30~300
基准值	100	25	26	10	20	45	40	30	100

根据表 1 中的力学参数及几何参数,可以得到边坡岩体黏聚力、内摩擦角、边坡高度、边坡坡角、边坡开挖高度、边坡平台宽度和结构面倾角与安全系数的关系曲线,如图 2 所示。

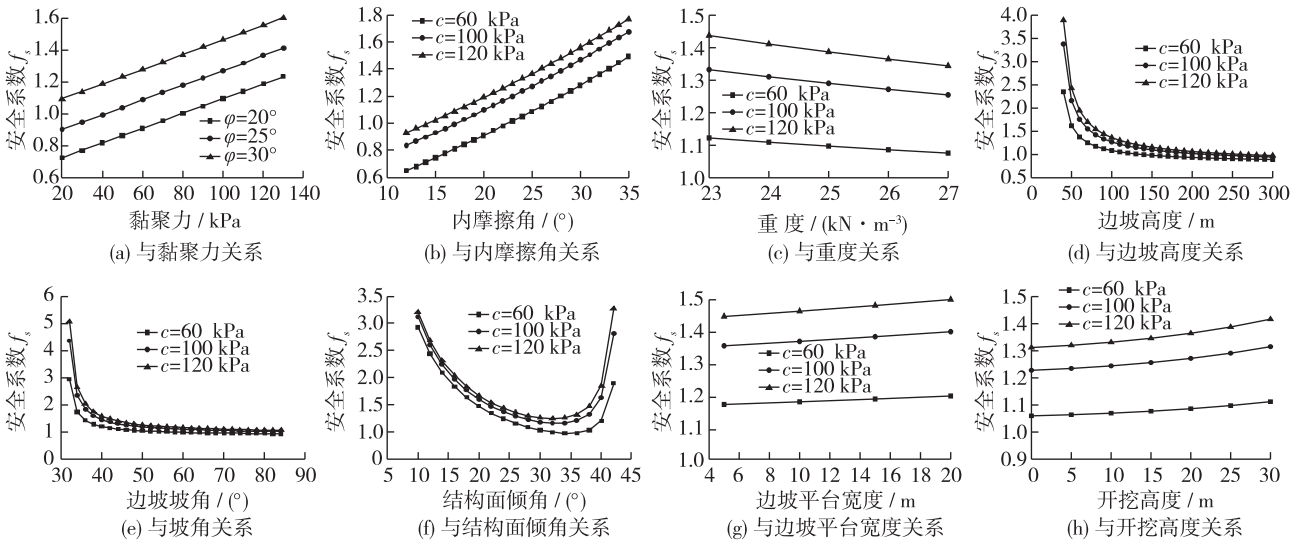

图 2　边坡安全系数与力学参数和几何参数的关系曲线

Fig. 2　Relationship curves between safety factor and mechanical and geometric parameters

由图 2 可见，黏聚力对岩质边坡的安全系数影响较大，随着黏聚力的增加安全系数呈线性增加；随着岩体重度的增大，安全系数呈略减小趋势；随着边坡高度、边坡坡角的增加，安全系数呈迅速减小趋势；受结构面影响的岩质边坡安全系数随结构面倾角的增加先增后减，其中结构面倾角在 25°～40°之间时安全系数有最小值，这也是自然界大多数顺层边坡在此坡度范围大量失稳的理论依据；随着开挖边坡高度 h_2 和边坡平台宽度 a 的增加，边坡安全系数呈略微增大趋势。

1.3　边坡稳定坡角计算式的建立

式(1)为岩质边坡安全系数的解析表达式，将式(1)的最小安全系数确定为已知值，即可求得安全系数所对应的边坡稳定坡角，当安全系数 $f_s=1$ 时，所对应的坡角为边坡极限坡角。将边坡稳定坡角 α 求解为显式公式，由式(1)得出边坡稳定坡角 α 与安全系数 f_s 的关系表达式。

$$\cot\alpha=\frac{\gamma(f_s\tan\theta-\tan\varphi)\left[h^2-(2ah_2+h_2^2\cot\beta)\tan\theta\right]-2ch(\tan^2\theta+1)}{\gamma(h^2-h_2^2)(f_s\tan\theta-\tan\varphi)} \tag{6}$$

1.4　边坡稳定坡角影响因素的讨论

式(6)为岩质边坡稳定坡角的解析解形式，现将其用于边坡在一定要求安全系数($f_s=1.0\sim2.0$，基准值为 1.25)条件下坡角的讨论。岩质边坡的高度等几何尺寸同表 1。

根据表 1 中的边坡参数范围，可以得到顺层岩质边坡在既定安全系数条件下稳定坡角的变化规律，边坡岩体黏聚力、内摩擦角、边坡开挖高度、边坡高度、安全系数以及结构面倾角与边坡稳定坡角的关系曲线如图 3 所示。

由图 3 可见，随着黏聚力和内摩擦角的增加稳定坡角呈抛物线形增加，且边坡受结构面控制，其黏聚力往往较小，随着内摩擦角的增加稳定坡角呈迅速增大趋势；随着边坡开挖高度的增加，稳定坡角呈略增大趋势，随着边坡高度的增加稳定坡角逐渐减小；随着边坡设计安全系数的增加稳定坡角逐渐减小；随着结构面倾角的增加，稳定坡角呈先减后增的趋势。本文所讨论的理论解析解适用于结构面倾角均小于边坡坡角的情况。

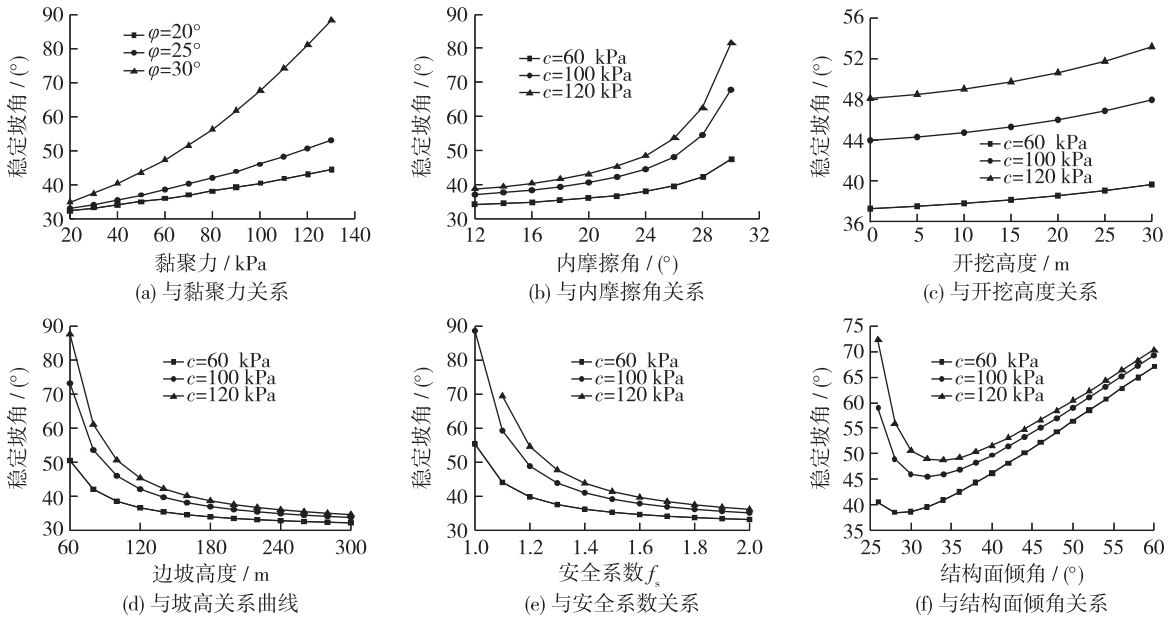

图 3 稳定坡角与其他力学参数和几何参数的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between stable slope angle and mechanical and geometric parameters

2 工程实例应用及数值模拟

2.1 工程概况

湖南省常德至吉首高速公路是国家重点规划的公路网中宁波至樟木的一段,也是长沙至重庆公路通道的一部分,为湖南西部地区重要的交通要道之一[14-16]。公路沿线穿越低山丘陵区,地势复杂多变,其中 K169+460~K169+735 段为穿越泥质粉砂岩、红砂岩所形成的顺向边坡或反倾向边坡段,该路段边坡大部分基岩出露,岩性以白垩系 K_2粉质泥砂岩和泥质粉砂岩为主。砂岩厚度为 2~5 m,中间夹有 0.2~0.5 m 厚的软弱夹层,边坡坡面表层有 2~4 m 强风化层,岩层总体呈单斜构造,产状为 N60°~80°E · NW∠16°~25°,其走向基本与坡向一致。根据已有室内直剪试验结果,砂岩软弱夹层抗剪强度受其含水量影响较为显著,其含水量由 10%增至 17%时,泥岩夹层内摩擦角由 33.4°降至 21.8°,而黏聚力从 58.2 kPa 逐渐降到 32.2 kPa,随着含水量进一步增加强度会更低。在该路段某边坡修筑的公路路基,其边坡高 72 m,开挖宽度 8.5 m,开挖深度 13.5 m,开挖坡角与岩层倾角基本一致为 24°。边坡力学参数取路基边坡设计时的参数与几何参数(见表 2),其几何模型如图 4 所示。

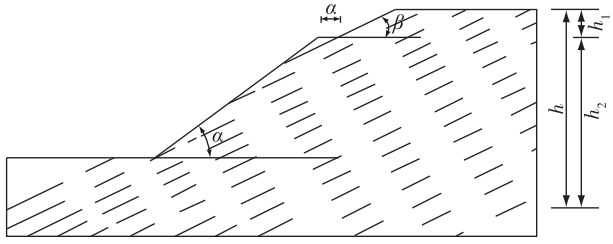

图 4 边坡几何关系

Fig. 4 Slope geometry diagram

表 2 边坡力学参数和几何参数

Tab. 2 Mechanical and geometric parameters of slope

参数	c /MPa	φ /(°)	γ /(kN · m^{-3})	a /m	h_2 /m	α /(°)	β /(°)	θ /(°)	h /m
数值	37	23	26	8.5	13.5	34	24	24	72

2.2　本文方法计算边坡稳定性

本例主要研究边坡在开挖后所形成的路基边坡整体安全系数，根据式(1)，可以得出顺层边坡在未开挖前边坡的安全系数为 1.266，而开挖后的安全系数有所增加，为 1.298。

2.3　数值计算边坡稳定性

采用数值分析软件 GEO-SLOPE 对顺层红砂岩岩质边坡的稳定性进行分析，边坡模型几何参数与实际工程相同。现分别计算开挖前、后边坡的稳定性。边坡总高度 72 m，其中上部岩体开挖坡高 13.5 m，坡角与结构面倾角几乎一致为 24°，其基本计算模型如图 5 所示。模型 X 轴方向为 200 m，Y 轴方向为 100 m，Z 轴方向取单位 1 宽度，模型共划分1 080个单元。

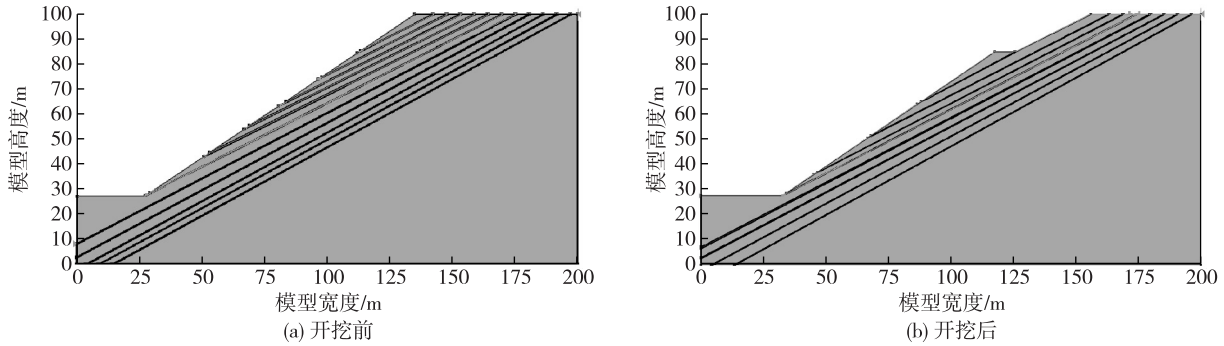

图 5　开挖前后边坡几何模型

Fig. 5　Geometric model before and after slope excavation

采用数值分析软件 GEO-SLOPE 分析结果如图 6 所示。由图可见，边坡开挖前后，边坡的危险滑动体均位于通过边坡坡脚的软弱剪出口处，其中开挖前边坡的安全系数为 1.234，开挖后边坡的安全系数为 1.267，其计算结果与采用本文推导结果基本一致。

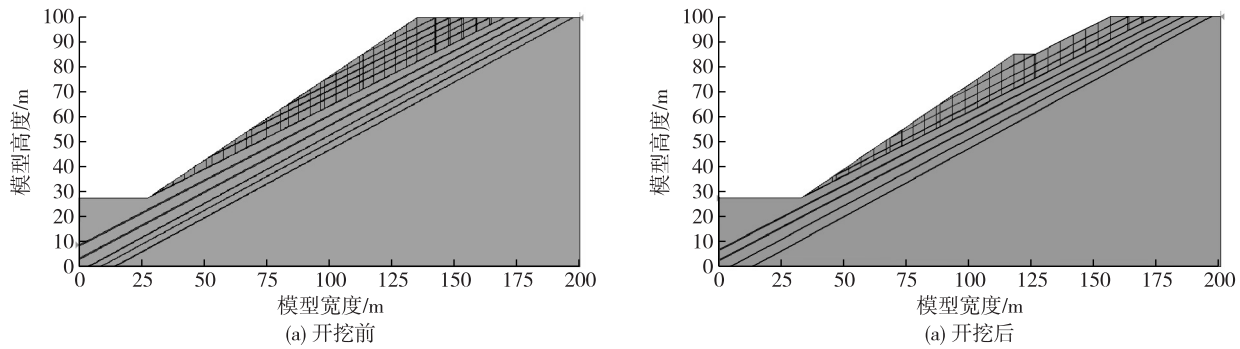

图 6　边坡开挖前后数值模拟结果

Fig. 6　Numerical simulation results before and after slope excavation

3　结　语

本文对受结构面控制的岩质边坡稳定性与稳定坡角及其影响因素进行了研究，通过块体极限平衡理论得出边坡安全系数与边坡岩体力学参数、几何尺寸的理论计算式，并得出边坡稳定坡角与边坡安全系数、边坡几何尺寸和岩体力学参数间的关系。最后将得出的解析表达式用于具体实际工程中，并对比用 GEO-SLOPE 计算的工程实例，验证理论计算式的计算结果，得出以下结论。

(1)根据极限平衡理论推导出受结构面控制的边坡安全系数解析解，并得出边坡最小安全系数解析形

式与在既定安全系数条件下所对应的边坡坡角,为类似边坡的稳定性设计提供理论依据。

(2)根据安全系数的解析表达式,确定岩质边坡安全系数的敏感性为随岩体的黏聚力和内摩擦角的增加而呈线性增大趋势,随边坡高度的增加而显著降低,随边坡开挖尺寸的增加安全系数呈略增加趋势,随结构面倾角的增加而呈先减后增的趋势。

(3)根据稳定坡角的解析表达式,得出边坡稳定坡角随黏聚力的增加而增大,且黏聚力相对影响较小时,内摩擦角的增加其安全系数显著增大,随着边坡高度和设计边坡安全系数的增加而显著降低;随着岩体结构面倾角的增加,稳定坡角呈先减后增的变化趋势。

(4)对常吉高速某边坡开挖形成的路堑边坡稳定性进行评价,其开挖前后采用理论公式计算的安全系数分别为 1.266 和 1.298,而用 GEO-SLOPE 计算的对应结果分别为 1.234 和 1.267,两者计算的结果几乎一致。

参 考 文 献:

[1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8): 1525-1544. (HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525-1544. (in Chinese))

[2] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005(3): 292-297. (HUANG Run-qiu. The main characteristic of high rock slope and its evolution, southwest China[J]. Advances in Earth Science, 2005(3): 292-297. (in Chinese))

[3] 李宁,钱七虎. 岩质高边坡稳定性与评价中的四个准则[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(9): 1754-1759. (LI Ning, QIAN Qi-hu. Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1754-1759. (in Chinese))

[4] 李宁,姚显春,张承客. 岩质边坡动力稳定性分析的几个要点[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(5): 873-881. (LI Ning, YAO Xian-chun, ZHANG Cheng-ke. Several point in dynamic stability analysis of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 873-881. (in Chinese))

[5] 徐卫亚,周家文,石崇, 等. 滑石板顺层岩质高边坡稳定性及加固措施的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7): 1423-1435. (XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen, SHI Chong, et al. Investigation on slope stability and reinforcement method of Huashiban high rock bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(7): 1423-1435. (in Chinese))

[6] 赖志生,吴建英,马建勋. 散体结构岩质高边坡的开挖参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12): 2183-2187. (LAI Zhi-sheng,WU Jian-ying,MA Jian-xun. Study on excavation parameters high rock slope of scattered structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2183-2187. (in Chinese))

[7] 张金龙,徐卫亚,金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(9): 1819-1827. (ZHANG Jin-long,XU Wei-ya,JIN Hai-yuan,et al. Safety monitoring and stability analysis of large-scale and complicated high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(9): 1819-1827. (in Chinese))

[8] 黄昌乾,丁宝恩. 边坡工程常用稳定性分析方法[J]. 水电站设计,1999,15(1): 53-58. (HUANG Chang-qian,DING Bao-en. Slope engineering stability analysis methods[J]. Design of Hydroelectric Power Station,1999,15(1): 53-58. (in Chinese))

[9] 刘立鹏,姚磊华,陈杰, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增 1): 2879-2886. (LIU Li-peng,YAO Lei-hua,CHEN Jie,et al. Rock slope stability analysis based on Hoek-Brown failure criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(Suppl1): 2879-2886. (in Chinese))

[10] 郑颖人,时卫民. 不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(17): 3020-3026. (ZHENG Ying-ren,SHI Wei-min. Discussion on imbalance thrust force method and Sarma method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(17): 3020-3026. (in Chinese))

[11] 郑颖人,赵尚毅, 时卫民,等. 边坡稳定分析的一些进展[J]. 地下空间,2001, 21(4): 262-271. (ZHENG Ying-ren,ZHAO Shang-yi,SHI Wei-min,et al. Progress in analysis of slope stability[J]. Underground Space,2001,21(4): 262-271. (in Chinese))

[12] 时卫民,郑颖人, 张鲁渝,等. 滑移面为直线假设下的斜坡稳定分析[J]. 公路交通技术, 2001(3). 1-3. (SHI Wei-min,

ZHENG Ying-ren, ZHANG Lu-yu, et al. Slip plane for slope stability analysis under the linear hypothesis[J]. Technology of Highway and Transport, 2001(3): 1-3. (in Chinese))

[13] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩土力学与工程学报,2004,19(2): 3381-3388. (ZHENG Ying-ren,ZHAO Shang-yi. The finite element strength subtraction in the application of the slope and the neutral-point earthing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,19(2): 3381-3388. (in Chinese))

[14] 卿笃干. 常吉高速公路湘西段路堑边坡结构特征与防护措施[J]. 工程地质学报,2008,16(5): 677-682. (QING Du-gan. Structural characteristics and protection measures of cut slopes on western Hunan section of the Changde-Jishou expressway in Hunan Province[J]. Journal of Engineering Geology,2008,16(5): 677-682. (in Chinese))

[15] 欧小祥,韩红桂,贺威. 某高速公路边坡稳定性评价[J]. 公路工程,2009,34(1): 120-124. (OU Xiao-xiang,HAN Hong-gui,HE Wei. Slope stability evaluation in highway[J]. Highway Engineering,2009,34(1): 120-124. (in Chinese))

[16] 黄向京,刘立群,彭立, 等. 常吉高速公路 K163+800~K163+000 段岩坪滑坡病害分析及处治措施研究[J]. 广东公路交通,2006,97(增 1): 76-80. (HUANG Xiang-jing,LIU Li-qun,PENG Li,et al. Yanping landslide's forming mechanism analysis and it's reatment methods reasearch in Chang(De)-Ji(Shou) express highway section of K162+800~K163+000[J]. Guangdong Highway Communications, 2006,97(Suppl1): 76-80. (in Chinese))

[17] 冯振,金福喜,龚裔芳. 红砂岩顺层边坡监测及变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增 2): 146-151. (FENG Zhen,JIN Fu-xi,GONG Yi-fang. Monitoring and deformation failure analysis of red sandstone bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(Suppl2): 146-151. (in Chinese))

Rock slope stability influence factors of slope angle

LIU Chun-long, ZHANG Zhi-qiang, YUAN Ji-guo, LIU Ying-ying

(*Institute of Geotechnical Engineering*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: At present, there are many ways for studies on the stability of high rock slope, but the studies of rock excavation slope stability as well as relationships between the slope angle and the inclination of structural plane are rarely reported. Lots of numerical analysis methods have been used to determine the stability of high rock slope, and few people use the method of analytical solutions in analysing the secondary terrace stability of the high rock slope. Based on the block limit equilibrium theory, assuming that the secondary terrace of the high rock slope is totally damaged, and that the slip plane is a straight surface, the analytical solutions of the minimum safety factor of the secondary terrace the high rock slope are derived. Analysis of various parameters in the analytic expressions to determine the sensitivity of factors influencing the stability of the slope shows that the stability coefficient of the secondary terrace of the high rock slope is linearly proportional to rock cohesion and internal friction angle, and inversely proportional to the slope height and slope angle, with the increase of the large slope angle of the first terrace. According to the analytic expressions, using the safety factor of the slope stability and the established secondary terrace analytical solutions of the high rock slopes stable slope angle, the secondary terrace stable slope angle and cohesive force, internal friction angle, slope height and safety coefficient curves are obtained. Through calculation and analysis of existing engineering examples, comparing the differences between the theoretical formula and the numerical simulation results, it is shown that the theoretical formula, which has guiding significance for the design of the rock slope and landslide treatment, can be applied to practical engineering.

Key words: slope engineering; plane sliding; limit equilibrium; parameter sensitivity; stable slope angle