

文章编号:1005-0523(2016)02-0114-07

基于正交试验法的边坡稳定因素敏感性分析

吴科亮,丁春林

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:京新高速韩集段某路堑高边坡,土体强度低,开挖稳定性差。为防止边坡施工和运营阶段时产生边坡失稳现象,基于控制变量法和正交试验法,考虑边坡稳定因素的相互影响关系,模拟分析了各因素对边坡稳定性影响的敏感程度。研究结果显示:在所研究的边坡稳定性影响因素中,土体内摩擦角对边坡稳定性影响最为显著,土体粘聚力和重度次之,土体弹性模量和泊松比则对边坡的稳定性影响不够明显;弹性模量和泊松比主要以两者相互作用共同影响边坡稳定性,其他因素并不以相互作用的形式影响边坡稳定性;最后,提出一些对路堑高边坡设计与施工有参考价值的建议。

关键词:路堑高边坡;稳定性安全系数;控制变量法;正交分析法;敏感性分析

中图分类号: TU432

文献标志码: A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.02.017

随着我国近年来交通基础设施建设的不断发展,偏远地区开始建设大量的高等级公路,随之产生了大量的高大边坡。随着边坡数量的不断增加以及边坡高度的不断增高,边坡失稳的问题也愈发显著。而边坡的稳定不仅仅直接关系着工程本身的经济效益,还密切地关系到人民生命财产的安全,对边坡的稳定性研究具有十分重要的理论意义和实践意义^[1-3]。

由于影响边坡稳定的因素十分复杂,不仅有边坡本身几何构造的因素(坡脚、坡高、坡面形状等);还有边坡岩土体的物理力学参数等因素(粘聚力、内摩擦角、弹性模量等);除以上边坡本身的影响因素外,外界的因素(降雨、地震等),同样会对边坡的稳定性造成影响^[4]。同时这些因素有些是确定的(坡高等),然而大部分因素由于测量的误差存在随机性。这样在研究中需要重点关注边坡稳定因素的敏感性,区分主要因素与次要因素。从而在设计施工过程中,将主要精力集中在分析影响边坡稳定最为敏感的因素上。

在建的京新高速公路韩家营至集宁段全长 42 km,其中某断面土质路堑高边坡高达 35 m,其路基边坡土层分布自上而下主要分为粉土、粘土、泥岩和泥质砂岩。由于该边坡的土质吸水性强而透水性弱,在其开挖过程中因土体强度低、开挖稳定性差,易发生失稳滑坡情况,造成人员伤亡和财产损失,所以有必要针对该段开展边坡稳定性评价和研究^[5-7]。本文基于正交分析原理,采用有限差分程序(Flac3D)进行数值模拟,考虑影响边坡稳定性因素的相互作用,分析计算各因素的敏感程度,比较各影响因素的主次顺序和相互关系,从而为边坡的安全施工提供理论依据。

1 计算原理

1.1 计算模型与范围

为了减少有限元模型中边界约束对计算结果产生的不利影响,计算模型的边界范围在水平方向宽度取 125 m,在竖直方向上取 70 m,边坡共分为五级台阶,在一级、二级及三级坡处采用锚索加固,每级坡高 6 m,坡度 1:1.5~1:1。边界条件假定为:两侧边假定为竖向滑动,底边假定为固支,模型如图 1 所示。

收稿日期:2016-01-18

作者简介:吴科亮(1989—),男,在读硕士研究生,主要从事隧道工程与岩土工程相关研究。

通讯作者:丁春林(1968—),男,副教授,博士生导师,研究方向为隧道与地下结构、岩土工程。

计算时假定土体均为连续、各向同性的弹塑性介质,同时假定土体塑性破坏遵从摩尔-库伦屈服准则,土体使用实体单元模拟,锚索使用锚杆单元模拟。

1.2 强度折减法

强度折减法将边坡稳定性安全系数的定义为:边坡刚好达到临界破坏状态时,对其强度参数进行的折减程度,即岩土体的原抗剪强度与折减到临界破坏时的抗剪强度的比值。目前边坡失稳临界状态的判据主要有以下几种:①以不平衡力的发展的收敛性作为失稳判据;②以特征部位位移的突变性作为失稳判据;③以塑性区的贯通性作为失稳判据。本文所使用的 Flac3d 数值分析程序以第一点为判断依据。

F 为边坡稳定性安全系数,其表达式为

$$F = \frac{K}{K^{\text{cr}}} = K = \frac{c^0}{c^{\text{cr}}} = \frac{\tan\phi^0}{\tan\phi^{\text{cr}}} \quad (1)$$

其中, $\tan\phi^0$ 与 c^0 为计算开始前定义材料属性时输入的强度参数; $\tan\phi^{\text{cr}}$ 与 c^{cr} 为计算分析中经折减后的强度参数。临界状态时边坡对应的安全系数 $K_{\text{cr}}=1$, 折减系数 K 一直递增,直到边坡达到临界破坏状态时趋于常数,即原始边坡的稳定性安全系数。

1.3 控制变量法原理

物理学中对于多因素(多变量)的问题,常常采用控制因素(变量)的方法,把多因素的问题变成多个单因素的问题,而只改变其中的某一个因素,从而研究这个因素对事物影响,分别加以研究,最后再综合解决,这种方法叫控制变量法^[8]。

运用控制变量法研究时,可以将边坡的稳定性系数 K 视为各因素的函数,即:

$$K=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2)$$

1.4 正交试验设计原理

正交试验设计是一种可以研究多因素多水平的重要设计方法,它主要根据正交性从全面试验中选择部分有代表性的点进行试验,其具有均匀分散,整齐可比的特点。日本著名的统计学家田口玄一将正交试验选择的水平组合列成表格,称为正交表。使用正交表进行正交试验,是一种简单有效的设计正交试验的方法^[9]。

正交试验所得出的结果,可通过极差分析或方差分析来评价因素的敏感性大小,极差(或方差)越大,说明该因素的水平改变对试验结果影响也越大,极差(或方差)最大的因素也就是最主要的因素,极差(或方差)较小的因素为较次要的因素,依此类推。

1.5 计算参数

本文对影响边坡稳定性的重度、弹性模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角等五种物理力学指标分别展开分析。根据勘察设计资料,该边坡土体的物理力学参数见表1。

表1 土体物理力学指标
Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

层序	名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 ν	粘聚力 $c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
1	粉土	16.6	1.8×10^4	0.3	3.34	30.3
2	粘土	17.3	2.2×10^4	0.35	63.46	20.1
3	泥岩	20	4.0×10^4	0.25	97.94	22.32
4	泥质砂岩	19	3.0×10^4	0.25	5.0	32.45

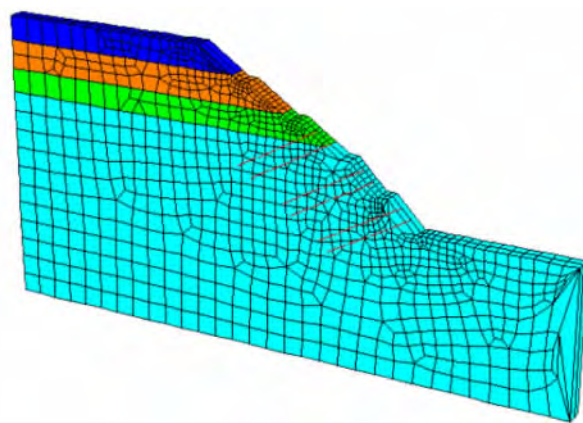


图1 有限元网格模型

Fig.1 Finite element mesh model

2 边坡稳定因素敏感性分析

2.1 各因素对边坡稳定性的影响趋势

对原始状态的边坡运用 flac3D 有限差分软件进行数值模拟分析后,可以得到边坡如图 2 的塑性区分布云图,以及相应的边坡稳定性系数为 1.957。

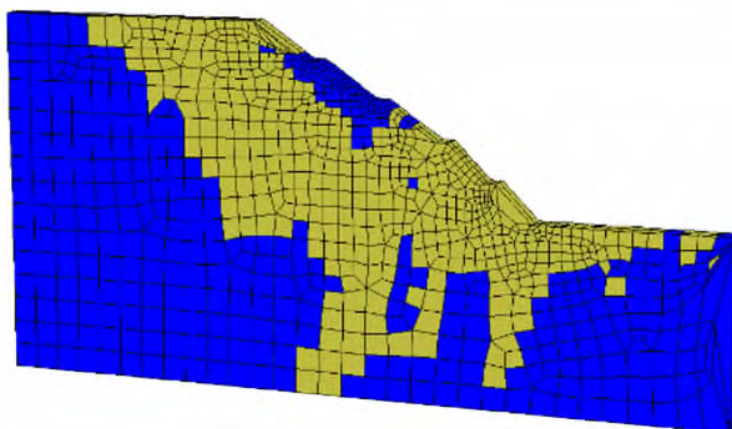


图 2 强度折减法分析边坡塑性区分布图

Fig.2 Slope plastic zone distribution by strength reduction method

在原始模型参数的基础上对各因素分别进行控制变量分析,将各因素分别改变-20%、-10%、+10%以及+20%等不同幅度时,相应的边坡稳定性系数的变化情况归纳如下表 2:

表 2 边坡稳定性安全系数表

Tab.2 Factor of slope safety

稳定性安全系数		影响因素				
		重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	弹性模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比	粘聚力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
变化幅度	-20%	2.040	1.941	1.934	1.891	1.566
	-10%	1.999	1.941	1.957	1.939	1.754
	+10%	1.910	1.934	1.941	1.973	2.157
	+20%	1.871	1.941	1.949	2.017	2.365

从以上图表分析可以得出,内摩擦角以及粘聚力越大则对边坡越稳定,而重度越大则边坡越易失稳。从图中还可以定性的观察出内摩擦角对边坡稳定性的影响最大,重度与粘聚力次之,泊松比和弹性模量对其影响最小。

2.2 边坡稳定单因素敏感性分析

为了更加精确地、定量地研究各因素对边坡稳定性的影响情况,可用敏感度表示各因素的敏感性的程度,其中第 i 个影响因素的敏感度 S_i 可表示如下:

$$S_i = \left| \frac{\Delta K_i}{K_i} \right| / \left| \frac{\Delta x_i}{x_i} \right| \quad (1)$$

运用式(1)分析表 2 中结果,归纳总结出各因素的敏感度如图 3 所示。

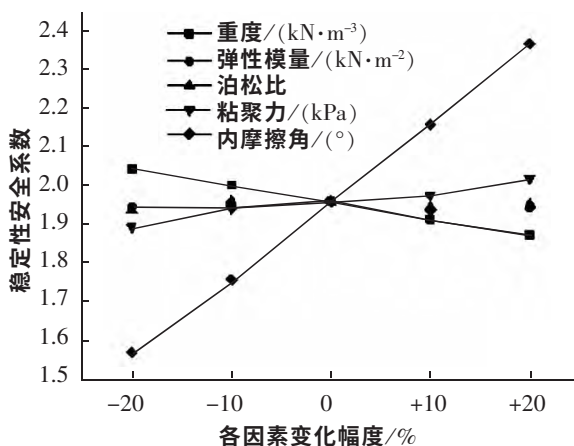


图3 各影响因素对边坡稳定性影响趋势图

Fig.3 Various factors influencing slope stability

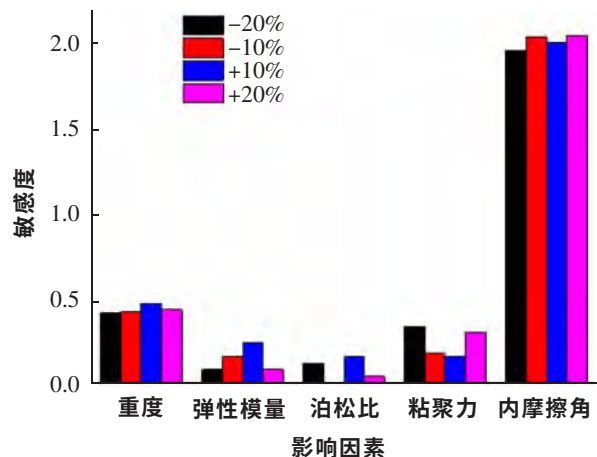


图4 边坡稳定性影响因素敏感度柱状图

Fig.4 Histogram of sensitivity factors affecting slope stability

由以上图表分析可知:在所研究边坡稳定性影响因素的波动范围内(-20%~+20%),各因素的敏感度保持相对稳定;各因素敏感度从大到小进行排列为:内摩擦角>重度>粘聚力>泊松比>弹性模量。

土的抗剪强度的敏感度最高,是由于目前对边坡稳定性的研究中将边坡整体失稳破坏视为边坡土体受到了剪切破坏,而土体抗剪强度是边坡抗滑力的重要体现;同时重度对边坡稳定性的影响也较为明显,是因为模拟的土坡只考虑受到自重荷载的影响,边坡所受的重力是稳定性研究中边坡下滑力的主要来源。

2.3 边坡稳定考虑多因素交互敏感性分析

由于现实情况复杂多变,外界条件的改变会同时影响到多种影响因素的变化,例如降雨过程既改变了边坡土体的粘聚力与内摩擦角,同时还影响到土体的重度等因素,因此对各因素之间的相互影响状况进行研究是有必要的。控制变量法的研究中仅仅控制单一因素变化,并没有考虑各因素之间的相互作用,这种研究方法是不够全面的。张旭辉曾运用正交试验设计的思路研究边坡稳定影响因素的敏感性,但并未考虑各因素间的相互作用^[10]。

现选用考虑交互作用的正交表 $L_{32}(2^{31})$,分析 3.1 节中的五种因素及其两两相互作用,两种水平分别表示因素在初始值的上下波动 20% (1,2),共计对 32 种不同情况分别进行模拟分析,得出相应的边坡稳定安全系数,如下表 3 所示。(其中因素 A~E 分别代指重度、弹性模量、泊松比、粘聚力以及内摩擦角;因素 A×B 表示因素 A 与因素 B 的相互作用;剩余空白列作为误差列使用,其方差是由随机误差所引起。)并对所得稳定性系数进行方差分析,得到方差分析表如下表 4 所示。

表3 考虑影响因素间交互作用正交分析表

Tab.3 Orthogonal analysis table considering the interaction between factors

项 目																																	
次数	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	稳定 安全 系数 Fos	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1		
	A	B	×	C	×	×		D	×	×						E	×	×						×									
	A	B	×	C	×	×		D	×	×						E	×	×						×									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.365	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.557	
3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2.192	
4	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1.451	
5	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2.354

续表 3

项 目																																		
次数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	稳定 安全 系数 Fos	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1			
	A	B	A × B	C	A × C	B × C		D	A × D	B × D	C × D					E	A × E	B × E	C × E					D × E										
6	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1.553
7	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2.192
8	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1.443
9	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2.365
10	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1.539
11	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2.192
12	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	1.451
13	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2.345	
14	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1.541
15	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2.198	
16	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1.436
17	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2.564
18	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1.730
19	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1.566
20	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1.574
21	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2.564
22	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1.730
23	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2.365
24	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1.574
25	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2.529
26	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1.723
27	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2.377	
28	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1.574	
29	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2.553
30	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1.723	
31	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2.365	
32	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1.574	

表 4 方差分析表
Tab.4 Analysis of variance

因素	A	B	A	C	A	B	D	A	B	C	E	A	B	C	D	误差列
			× B		× C	× C		× D	× D	× D		× E	× E	× E	× E	
ss	0.11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.32	0.04	0.03	0.02	4.44	0.01	0.02	0.02	0.04	0.32
df	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16
Ms	0.11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.32	0.04	0.03	0.02	4.44	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
F	5.77	0.79	0.98	0.91	1.17	0.98	16.2	1.86	1.30	0.96	223	0.48	1.04	1.03	2.16	
P	0.07	0.43	0.38	0.39	0.34	0.38	0.02	0.25	0.32	0.38	0.01	0.53	0.37	0.37	0.26	

ss 为各因素偏差平方和;df 为各因素自由度;Ms 为各因素方差;F 为各因素 F 统计量;P 为各因素 F 检验值

通过方差分析,比较各因素的 M_s 值的大小可知,5 种因素的影响程度分别为 $E>D>A>C>B$,即内摩擦角对边坡稳定性的影响最为敏感,粘聚力与重度次之,泊松比和弹性模量的影响最小。这与此前采用控制变量法分析所得的结论是相同的。

通过方差分析,比较各因素间的相互作用的 M_s 值大小可知,内摩擦角和其他因素的交互作用对边坡稳定性的较为明显,甚至会高于其他因素单独造成的影响(例如 $M_{SB} \times E > M_{SB}$),但是仍比内摩擦角产生的影响要小(即 $M_{SE} > M_{SB} \times E$),这说明该现象仅仅是由内摩擦角对边坡稳定性的影响十分巨大所引起的,而不是由两者之间的相互作用所引发的。

特别的,弹性模量和泊松比的相互作用比弹性模量或泊松比各自对边坡稳定性的影响都要明显($M_{SB} \times C > M_{SC} > M_{SB}$),这说明土的弹性模量和泊松比之间的相互作用可以较强地影响边坡稳定性,即这两个因素更多地以其相互作用的形式共同地影响边坡稳定性。

选取显著性水平 $\alpha=0.05$ 检验各因素的 F 分布,可以得出在设计的试验因素的波动范围内,只有内摩擦角、粘聚力以及重度对边坡稳定影响程度是具有统计意义的($P \leq \alpha=0.05$),即所选定的研究范围内因素内摩擦角、粘聚力、重度对边坡稳定性有显著影响,其他因素对边坡稳定性的影响不明显。

3 结论

通过对京新高速韩集段某路堑高边坡的各因素进行敏感性分析研究,可得到以下几点结论:

- 1) 在影响边坡稳定性的 5 个土性参数中,以内摩擦角对边坡稳定性的影响最为显著,粘聚力与重度次之,泊松比和弹性模量的影响最小。即内摩擦角、粘聚力和重度属于主要因素,泊松比和弹性模量属于次要因素。
- 2) 弹性模量和泊松比之间的相互作用对边坡稳定性的影响,比两者单独对边坡稳定性的影响均要明显,即此两者更多的以其相互作用形式共同影响边坡的稳定性,而其他因素间并没有明显地以相互作用影响边坡稳定性。今后在边坡工程设计及施工中涉及到弹性模量或泊松比时需考虑两者相互作用的影响。
- 3) 在设计的试验因素波动范围内,只有内摩擦角、粘聚力以及重度对边坡稳定影响程度是显著的、具有统计意义的,在边坡的设计施工过程中,需要对这些主要因素的变化情况进行更多的关注。

本文在各参数的取值变化中考虑两种方法的对比以及参数的合理性,并没有任意取值,在今后的研究中还需要选择的更大的合理范围对更多的因素进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 郑颖人. 岩土数值极限分析方法的发展与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1 297-1316.
- [2] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- [3] 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.
- [4] 杨航宇, 颜志平, 朱赞凌, 等. 公路边坡防护与治理[M]. 人民交通出版社, 2002: 8-13.
- [5] 张咸恭, 王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学[M]. 科学出版社, 2000: 186-207.
- [6] 杨有成, 李群, 陈新泽, 等. 对强度折减法若干问题的讨论[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1103-1106.
- [7] 陈谦应. 堤坡可靠度设计极限状态方程及参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 1995, 16(3): 13-20.
- [8] 吴志青, 谢丽辉, 左威, 等. 彭湖高速公路高填路堤稳定性敏感分析[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(3): 44-46.
- [9] 马希文. 正交设计的数学理论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981: 13-21.
- [10] 张旭辉, 龚晓南, 许日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.

Sensitivity Analysis on Slope Stability Factor Based on Orthogonal Test

Wu Keliang, Ding Chunlin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: High cutting slopes at the Hanji Section of Jing-Xin Highway have low soil strength and excavation stability. Aiming at controlling the setting and slipping in excavation and operation, this study, based on control variable and orthogonal test, in light of effects of stability factors, conducted simulation analysis of the sensitivity of different factor effect on the slope stability. Results showed that the effect of internal friction angle on slope stability was the most significant with cohesion and unit weight followed by. Elastic modulus and Poisson's ratio didn't have significant effects on slope stability, but had a certain impact on stability when they interacted together. Finally, it presented some valuable suggestions for designing and constructing the high cutting slopes.

Key words: high cutting slope; safety factor of stability; controlling variable method; orthogonal test; sensitivity simulation

(责任编辑 王建华)