

# 填方边坡稳定性影响因素敏感性分析

段永坤

(上海核工程研究设计院,上海 200233)

**【摘要】**以重庆某核电场地填方边坡为例,采用均匀试验设计法安排试验,运用回归分析法对比分析各个因素对边坡稳定性影响的差异,得到各影响因素对填方边坡稳定的敏感性。影响边坡稳定性的主要因素为填料内摩擦角  $\varphi$ 、边坡坡度  $\alpha$  和地下水水位  $H_w$ 。根据各影响因素对边坡稳定性的敏感性大小,填方边坡的设计和施工中可采取更具针对性的工程措施。

**【关键词】**填方边坡;稳定性;影响因素;敏感性分析

**【中图分类号】** TU 413.62

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2014.04.010

## Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Fill Slope

Duan Yongkun

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

**【Abstract】**This paper takes a fill slope in Chongqing for example, uniform design method is adopted to arrange experiment, regression analysis is used to compare and analyze the differences that each factor influences on the stability of slope. The sensitivity of every influencing factor is obtained. The main factors affecting the slope stability are internal friction angle of filler  $\varphi$ , slope gradient  $\alpha$  and the groundwater level  $H_w$ . Based on the sensitivity of influencing factors, more pertinence engineering measures will be taken to the design and construction of fill slope.

**【Key words】** fill slope; stability; influencing factors; sensitivity analysis

### 0 引言

在场地平整阶段,为了平衡土石方和拓展工程建设空间,往往会在工程场地地势低洼地段回填土石方,从而在回填区域边界处形成填方边坡。受到填料强度、填方高度、边坡坡度及原始地形等诸多因素制约,填方边坡稳定性普遍不高,而填方边坡的稳定性不仅关系到场地可利用空间的大小,更关系到整个场地的稳定以及工程建设的安全。因此,填方边坡作为工程场地平整的边界,确保其稳定安全,对场地平整乃至后续工程建设具有重要意义。

影响填方边坡稳定性因素有很多,诸如坡体结构、地下水、岩土强度、工程活动等。通过分析各影响因素与填方边坡稳定性之间的关系,以及各影响因素的敏感性,从而区分影响填方边坡稳定性的主要因素和次要因素,为填方边坡设计和施工提供依据。

本文引入了均匀试验设计法,在填方边坡影响因素与稳定性系数组成的样本空间中选取代表性的试验样本,通过对试验样本的回归分析,得到影响因

素与稳定性系数之间的回归模型,进而找到影响填方边坡稳定性的敏感性因素。

### 1 常用的试验设计方法

在填方边坡稳定性影响因素敏感性分析中,各影响因素与边坡稳定性之间关系复杂,为研究二者之间的关系,需要做大量的试验和计算。常用的试验设计方法主要有优选法、正交试验设计法和均匀试验设计法。

优选法,即单变量的最优调试法<sup>[1]</sup>,是指按某一边坡破坏时的几何模型和数学模型,确定各因素的基准计算参数。然后在某一因素可能的变化区间内,按一定的步长变动该因素的值,其余参数保持不变,计算各量值下稳定性系数和各影响因素的单位量变化引起的稳定性系数的增量和百分率,按百分率的大小确定各因素的敏感顺序。通过这种方法能比较直观地看出各因素对稳定性系数的影响趋势,但各因素的单位变化增量不相同,也不能等效,很难从计算结果直观地判断各因素的敏感度,而且需要的样本数多,计算工作量大。

正交试验设计法<sup>[2-3]</sup>,它是根据正交性准则来安排试验,该方法是从全面试验点中选出部分代表性的试验点,这些代表性的试验点具有“均匀分散性”和“整齐可比性”,能够反映试验范围内各因素和试验指标间的关系。运用正交试验设计安排试验,可以较高效率地达到试验目的。

与正交试验设计法同属部分因子设计的还有均匀试验设计。相比正交试验设计,它具有更强的均匀性、准确性、推理性、更多的试验水平数和更少的试验次数。目前被广泛应用于医药、化学、航天、船舶、土木工程、力学、仿真与石化等领域,取得了显著的成效<sup>[4-7]</sup>。

综合对比上述三种试验设计方法,本文运用均匀试验设计法安排试验方案,借助回归分析法对试验结果整理分析,得到各影响因素敏感性的大小,最终得出制约填方边坡稳定性的主要因素。

## 2 均匀试验设计

均匀试验设计是由王元、方开泰于1978年提出的<sup>[8]</sup>,是我国独创的一种具有重要意义的科学试验方法。均匀试验设计属于“伪蒙特卡罗方法”的范畴。由于它们是特定数学模型下达到的最优方法,可以大幅度降低试验工作量,又能全面控制所有可能出现的试验组合,故运用均匀试验设计安排试验能取得事半功倍的良好效果。

均匀试验设计应用在分析边坡稳定敏感性的主要步骤包括<sup>[9]</sup>:①确定实验指标。稳定性系数一般被选作边坡稳定敏感性分析的唯一试验指标;②确定影响因素及水平数。根据已有研究成果及工程经验选取影响因素,确定各因素的取值范围及相应的水平数;③均匀试验设计。选取合适的均匀设计表及使用表,安排试验;④试验结果分析。通常采用回归分析法对试验结果分析,求得最优回归模型,从而确定各因素的敏感性。具体的分析流程见图1。

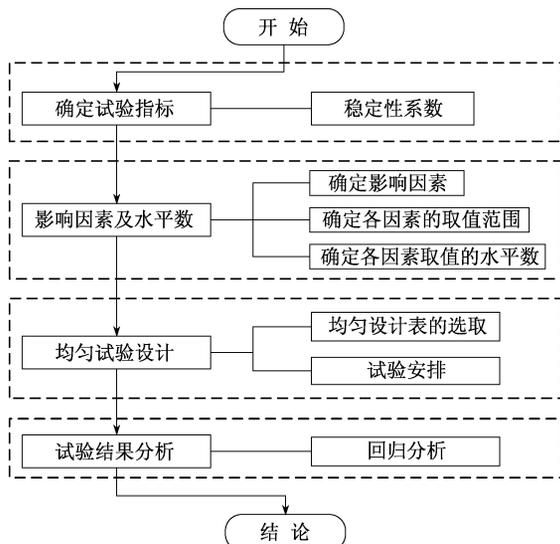


图1 分析流程图

## 3 填方边坡均匀试验设计及回归分析

本文以重庆某核场地填方边坡为典型实例展开研究。本工程为紧邻三峡库区的内陆核电厂,厂区边界处的填方边坡常年受到三峡库区水位涨落及长江冲刷侵蚀(见图2)。填方用料主要为物理力学性质相对软弱侏罗系遂宁组砂岩、粉砂岩和泥岩以及砂泥岩的风化产物。填方高度达38 m,而目前规范和研究成果主要针对15 m以下的填方边坡,超过15 m的填方边坡需要进行特殊设计。综上,该填方边坡稳定性受众多不利因素制约,研究其稳定的敏感性分析具有重要意义。



图2 场地原始边坡地貌图

### 3.1 确定试验指标

研究各影响因素对填方边坡稳定的敏感性分析,稳定性系数作为唯一的试验指标。

### 3.2 影响因素的确定及水平数

基于大量的填方边坡稳定性验算基础,在众多填方边坡稳定性影响因素中选取用于本文分析的七个影响因素:填料粘聚力 $c$ 、填料内摩擦角 $\varphi$ 、填方高度 $H_s$ 、边坡坡度 $\alpha$ 、基岩顶面倾角 $\beta$ 、地下水水位 $H_w$ 和坡顶荷载 $L$ 。相比其它的影响填方边坡稳定性的因素,此七个因素对填方边坡稳定性影响更为显著。实践证明,与上覆填料相比,基岩的强度对填方边坡稳定性影响很小,故在本文计算分析中没有考虑基岩对稳定性的影响。另外,本工程场地第四系土层的物理力学性质与填料相近,因此将第四系土层和填料对填方边坡稳定性的影响统一考虑。

以本场地勘察得到的岩土参数为基准值,参考《工程地质手册》3.1.3节经验值及当地已有工程经验,确定各影响因素的取值范围。为便于后续的均匀试验设计,每个因素取18个水平。各因素取值范围见表1。根据各影响因素的取值范围和水平数,确定各因素不同水平下的取值(见表2)。

表 1 各影响因素的取值范围

取值	1. 填料粘聚力 $c/\text{kPa}$	2. 填料内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	3. 边坡高度 $H_s/\text{m}$	4. 边坡坡度 $\alpha/(\text{°})$	5. 基岩顶高倾角 $\beta/(\text{°})$	6. 地下水位 $H_w/\text{m}$	7. 坡顶荷载 $L/\text{kPa}$
范围	10~44	15~32	20~54	18~35	0~17	0~17	0~51
步长	2	1	2	1	1	1	3
水平数	18	18	18	18	18	18	18

表 2 不同水平下的取值

水平	1. 填料粘聚力 $c/\text{kPa}$	2. 填料内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	3. 边坡高度 $H_s/\text{m}$	4. 边坡坡度 $\alpha/(\text{°})$	5. 基岩顶高倾角 $\beta/(\text{°})$	6. 地下水位 $H_w/\text{m}$	7. 坡顶荷载 $L/\text{kPa}$
1	10	15	20	18	0	0	0
2	12	16	22	19	1	1	3
3	14	17	24	20	2	2	6
4	16	18	26	21	3	3	9
5	18	19	28	22	4	4	12
6	20	20	30	23	5	5	15
7	22	21	32	24	6	6	18
8	24	22	34	25	7	7	21
9	26	23	36	26	8	8	24
10	28	24	38	27	9	9	27
11	30	25	40	28	10	10	30
12	32	26	42	29	11	11	33
13	34	27	44	30	12	12	36
14	36	28	46	31	13	13	39
15	38	29	48	32	14	14	42
16	40	30	50	33	15	15	45
17	42	31	52	34	16	16	48
18	44	32	54	35	17	17	51

3.3 均匀试验设计

选择均匀设计表  $U_{*18}(18^{11})$  [10] (见表 3), 按照其对应的使用表 (见表 4), 选用  $U_{*18}(18^{11})$  中的 1、4、5、6、8、9、11 列安排试验, 再根据各因素不同水平下取值 (见表 2), 确定试验组合 (见表 5)。选用自动搜索破裂面的方式, 利用 Morgenstern-Price 法建立计算模型 (见图 3), 借助 Geo-studio 软件计算各因素在取值范围内的不同水平下的稳定性系数。各

试验的稳定性系数见表 5。

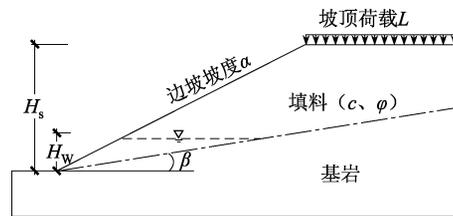


图 3 计算剖面

表 3 均匀设计表  $U_{*18}(18^{11})$

水平	因素										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	3	4	5	6	7	8	9	11	15	16
2	2	6	8	10	12	14	16	18	3	11	13
3	3	9	12	15	18	2	5	8	14	7	10
4	4	12	16	1	5	9	13	17	6	3	7
5	5	15	1	6	11	16	2	7	17	18	4
6	6	18	5	11	17	4	10	16	9	14	1
7	7	2	9	16	4	11	18	6	1	10	17
8	8	5	13	2	10	18	7	15	12	6	14
9	9	8	17	7	16	6	15	5	4	2	11
10	10	11	2	12	3	13	4	14	15	17	8
11	11	14	6	17	9	1	12	4	7	13	5
12	12	17	10	3	15	8	1	13	18	9	2
13	13	1	14	8	2	15	9	3	10	5	18
14	14	4	18	13	8	3	17	12	2	1	15

续表

水平	因素										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	15	7	3	18	14	10	6	2	13	16	12
16	16	10	7	4	1	17	14	11	5	12	9
17	17	13	11	9	7	5	3	1	16	8	6
18	18	16	15	14	13	12	11	10	8	4	3

表4 均匀设计表  $U_{18}^{*}(18^{11})$  的使用表

s	列号										均匀度偏差 $D$
2	1	7									0.0779
3	1	4	8								0.1394
4	1	4	6	8							0.1754
5	1	3	6	8	11						0.2047
6	1	2	4	7	8	10					0.2245
7	1	4	5	6	8	9	11				0.2247

表5 均匀设计试验及结果

试验号	因素							稳定性系数 $F_s$
	1( $c$ )/kPa	2( $\varphi$ )/ $^{\circ}$	3( $H_s$ )/m	4( $\alpha$ )/ $^{\circ}$	5( $\beta$ )/ $^{\circ}$	6( $H_w$ )/m	7( $L$ )/kPa	
1	10(1)	19(5)	30(6)	24(7)	8(9)	10(11)	45(16)	0.708
2	12(2)	24(10)	42(12)	31(14)	17(18)	2(3)	36(13)	1.086
3	14(3)	29(15)	54(18)	19(2)	7(8)	13(14)	27(10)	1.245
4	16(4)	15(1)	28(5)	26(9)	16(17)	5(6)	18(7)	1.004
5	18(5)	20(6)	40(11)	33(16)	6(7)	16(17)	9(4)	0.58
6	20(6)	25(11)	52(17)	21(4)	15(16)	8(9)	0(1)	1.719
7	22(7)	30(16)	26(4)	28(11)	5(6)	0(1)	48(17)	2.224
8	24(8)	16(2)	38(10)	35(18)	14(15)	11(12)	39(14)	0.609
9	26(9)	21(7)	50(16)	23(6)	4(5)	3(4)	30(11)	1.222
10	28(10)	26(12)	24(3)	30(13)	13(14)	14(15)	21(8)	1.337
11	30(11)	31(17)	36(9)	18(1)	3(4)	6(7)	12(5)	1.857
12	32(12)	17(3)	48(15)	25(8)	12(13)	17(18)	3(2)	0.875
13	34(13)	22(8)	22(2)	32(15)	2(3)	9(10)	51(18)	0.944
14	36(14)	27(13)	34(8)	20(3)	11(12)	1(2)	42(15)	2.354
15	38(15)	32(18)	46(14)	27(10)	1(2)	12(13)	33(12)	1.224
16	40(16)	18(4)	20(1)	34(17)	10(11)	4(5)	24(9)	1.185
17	42(17)	23(9)	32(7)	22(5)	0(1)	15(16)	15(6)	1.365
18	44(18)	28(14)	44(13)	29(12)	9(10)	7(8)	6(3)	1.244

注:表中括号内数据为各影响因素对应的水平数

3.4 试验结果分析

均匀设计试验结果分析方法有很多,例如:回归分析法、B样条函数法、人工神经网络法、灰色关联分析法等。回归分析应用更为广泛,它是通过因变量与自变量之间的因果关系,建立回归模型,并根据实测数据来求解模型的各项参数。回归分析法包括前进法、后退法和逐步回归法。本文采用后退法对均匀设计试验结果(见表5)进行多元线性回归分析。

均匀试验选定的7个影响因素为自变量,稳定性系数为因变量。将7个自变量逐个引入回归模

型,分别得到7个模型方程,计算得到各模型自变量与因变量的相关系数(见表6);然后对选入的自变量逐个检验,比较自变量引入后检验统计量  $t$  值与显著性水平  $\alpha=0.05$  的临界值(即  $P$  值)大小关系,将  $t < P$  的自变量剔除,直到模型中所有自变量都不能剔除为止,回归系数显著性检验见表7;计算各个模型下的回归平方和、残差平方和、总偏差平方和、检验统计量  $F$  值,比较  $F$  值和显著性水平  $\alpha=0.05$  的临界值(即  $P$  值)大小关系,若  $F > P$ ,则表明线性回归模型显著,进而得到各个模型的线性回归显著性。回归方程显著性检验见方差分析表8。

表 6 模型综述表

模型序号	相关系数 $R$	复相关系数 $R^2$	校正决定系数 $R^2$	估计值标准误差
1	0.249	0.062	0.003	0.499
2	0.675	0.456	0.383	0.393
3	0.703	0.494	0.385	0.392
4	0.806	0.650	0.543	0.338
5	0.965	0.748	0.643	0.299
6	0.921	0.848	0.765	0.242
7	0.921	0.849	0.743	0.254

注:各模型所包含的子项模型 1:常数, $c$ ;模型 2:常数, $c,\varphi$ ;模型 3:常数, $c,\varphi,H_s$ ;模型 4:常数, $c,\varphi,H_s,\alpha$ ;模型 5:常数, $c,\varphi,H_s,\alpha,\beta$ ;模型 6:常数, $c,\varphi,H_s,\alpha,\beta,H_w$ ;模型 7:常数, $c,\varphi,H_s,\alpha,\beta,H_w,L$

表 7 回归系数表

回归模型	子项	回归系数	标准差	标准回归系数	$t$ 值	$P$ 值
1	常数	0.951	0.328		2.898	0.010
	填料粘聚力	0.012	0.011	0.249	1.028	0.319
2	常数	-0.289	0.456		-0.634	0.536
	填料粘聚力	0.005	0.009	0.110	0.565	0.580
3	填料内摩擦角	0.060	0.018	0.643	3.296	0.005
	常数	0.006	0.540		0.012	0.991
	填料粘聚力	0.003	0.009	0.062	0.311	0.760
4	填料内摩擦角	0.065	0.019	0.697	3.453	0.004
	边坡高度	-0.010	0.009	-0.205	-1.022	0.324
	常数	1.751	0.860		2.035	0.063
5	填料粘聚力	0.005	0.008	0.100	0.575	0.575
	填料内摩擦角	0.050	0.018	0.529	2.818	0.015
	边坡高度	-0.017	0.009	-0.354	-1.930	0.076
	边坡坡度	-0.044	0.018	-0.468	-2.412	0.031
6	常数	1.288	0.790		1.631	0.129
	填料粘聚力	0.011	0.008	0.225	1.372	0.195
	填料内摩擦角	0.060	0.016	0.641	3.691	0.003
	边坡高度	-0.019	0.008	-0.404	-2.468	0.030
	边坡坡度	-0.050	0.016	-0.530	-3.051	0.010
7	基岩顶面倾角	0.035	0.016	0.375	2.158	0.052
	常数	1.571	0.649		2.421	0.034
	填料粘聚力	0.011	0.006	0.242	1.817	0.097
	填料内摩擦角	0.048	0.014	0.514	3.452	0.005
	边坡高度	-0.013	0.007	-0.268	-1.884	0.086
	边坡坡度	-0.045	0.013	-0.479	-3.368	0.006
8	基岩顶面倾角	0.023	0.014	0.247	1.661	0.125
	地下水水位	-0.034	0.012	-0.358	-2.689	0.021
	常数	1.631	0.735		2.218	0.051
	填料粘聚力	0.011	0.007	0.227	1.453	0.177
	填料内摩擦角	0.048	0.015	0.516	3.305	0.008
	边坡高度	-0.013	0.007	-0.278	-1.780	0.105
	边坡坡度	-0.044	0.015	-0.469	-3.005	0.013
9	基岩顶面倾角	0.022	0.016	0.231	1.340	0.210
	地下水水位	-0.035	0.015	-0.373	-2.388	0.038
	坡顶荷载	-0.001	0.005	-0.037	-0.212	0.836
	常数	1.631	0.735		2.218	0.051

表 8 方差分析表

模型序号	方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
1	回归	0.263	1	0.263	1.056	0.319
	残差	3.990	16	0.249		
	总和	4.253	17			

续表

模型序号	方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
2	回归	1.939	2	0.970	6.285	0.010
	残差	2.314	15	0.154		
	总和	4.253	17			
3	回归	2.100	3	0.700	4.550	0.020
	残差	2.154	14	0.154		
	总和	4.253	17			
4	回归	2.765	5	0.691	6.040	0.006
	残差	1.488	12	0.114		
	总和	4.253	17			
5	回归	3.181	5	0.636	7.122	0.003
	残差	1.072	12	0.089		
	总和	4.253	17			
6	回归	3.606	6	0.601	10.222	0.001
	残差	0.647	11	0.059		
	总和	4.253	17			
7	回归	3.609	7	0.516	8.007	0.002
	残差	0.644	10	0.064		
	总和	4.253	17			

由以上分析可得,在众多回归模型之中,回归模型 7 的复相关系数  $R^2$  最大,表明该回归模型中自变量与因变量之间存在较高的相关关系。另外,回归模型 7 的  $F$  值远远大于显著性水平  $\alpha=0.05$  的临界值(即  $P$  值),因此线性回归模型显著。通过以上分析,最终得到了最优线性回归模型为: $F_s=1.631+0.011c+0.048\varphi-0.013H_s-0.044\alpha+0.022\beta-0.035H_w-0.001L$ 。

3.5 试验结果的实际应用

本核电建设场地边坡高度 38 m,分四级填筑而成,第 I 级~第 IV 级边坡高度分别为 10 m、10 m、10 m 和 8 m,两级边坡之间设置 3 m 宽的马道。结合的工程实际情况,拟定了 8 个填方边坡工程设计方案(见表 9)。基岩顶面倾角平均值为  $10^\circ$ ,坡顶荷载为 20 kPa。借助 Geo-studio 软件计算得到填方边坡安全系数实际值,再运用本文 3.4 节得出的最优线性回归模型计算边坡安全系数预测值,将上述两个数值进行对比(见表 10 和图 4),可看出边坡安全系数的预测值与实际值相差很小,由此验证了最优线性回归模型的合理性。

表 9 填方边坡工程设计方案

填方边坡方案编号	各级填方边坡坡比				填料及第四系综合抗剪强度参数	
	第 I 级	第 II 级	第 III 级	第 IV 级	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
1	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5	30	28
2	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5	28	32
3	1:2	1:2	1:2	1:2	30	28

续表

填方边坡方案编号	各级填方边坡坡比				填料及第四系综合抗剪强度参数	
	第 I 级	第 II 级	第 III 级	第 IV 级	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
4	1:2	1:2	1:2	1:2	28	32
5	1:2	1:2	1:2.5	1:2.5	30	28
6	1:2	1:2	1:2.5	1:2.5	28	32
7	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	30	28
8	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	28	32

表 10 边坡安全系数实际值与预测值对比表

填方边坡方案编号	边坡安全系数实际值 $F_1$	边坡安全系数预测值 $F_2$	边坡安全系数 $(F_2-F_1)/F_1$ 绝对值
1	1.244	1.316	0.058
2	1.347	1.486	0.103
3	1.571	1.58	0.006
4	1.706	1.75	0.026
5	1.699	1.668	0.018
6	1.849	1.838	0.006
7	1.945	1.756	0.097
8	2.091	1.926	0.079

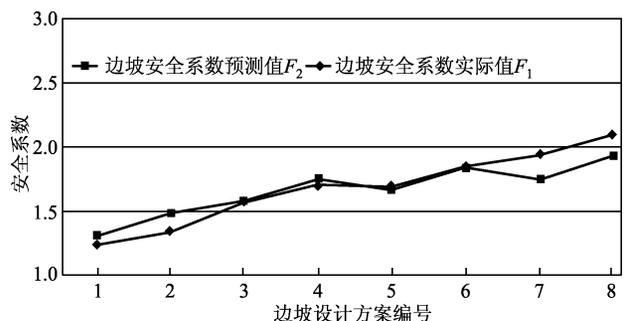


图 4 边坡安全系数实际值与预测值对比图

各因素的回归系数绝对值越大,其对边坡稳定性的敏感度越大。从分析得到的最优回归模型来看,各因素的敏感度以填料内摩擦角 $\varphi$ 最大,坡顶荷载 $L$ 最小,边坡坡度 $\alpha$ 与填料内摩擦角 $\varphi$ 相当,边坡高度 $H_s$ 和填料粘聚力 $c$ 大致相等。各因素的敏感度由大到小依次为(见图5):填料内摩擦角 $\varphi$ >边坡坡度 $\alpha$ >地下水水位 $H_w$ >基岩顶面倾角 $\beta$ >边坡高度 $H_s$ >填料粘聚力 $c$ >坡顶荷载 $L$ 。影响边坡稳定性的三个主要因素为填料内摩擦角 $\varphi$ 、边坡坡度 $\alpha$ 和地下水水位 $H_w$ 。

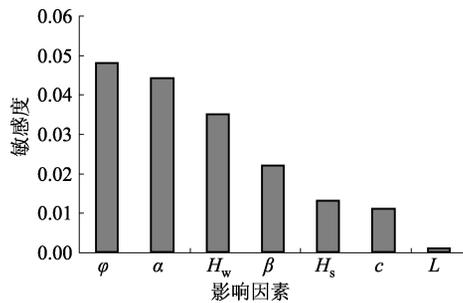


图5 各因素敏感性柱状图

#### 4 结论

应用均匀试验设计法安排边坡稳定性分析试验,再运用回归分析法对计算结果进行分析,最后得到各影响因素对边坡稳定性的敏感度由大到小依次为:填料内摩擦角 $\varphi$ >边坡坡度 $\alpha$ >地下水水位 $H_w$ >基岩顶面倾角 $\beta$ >边坡高度 $H_s$ >填料粘聚力 $c$ >坡顶荷载 $L$ 。影响边坡稳定性的三个主要因素为填料内摩擦角 $\varphi$ 、边坡坡度 $\alpha$ 和地下水水位 $H_w$ 。

根据各影响因素对边坡稳定性的敏感性大小,填方边坡的设计和施工中可采取更具针对性的工程措施。例如:提高填料的压实度,以增大填料内摩擦

角 $\varphi$ ;在场地空间允许的情况下,放缓边坡坡度 $\alpha$ ;采取有效排水措施以降低地下水水位 $H_w$ 等。

#### 参考文献

- [1] 罗常青,陈征宙,李文勇,等. 某加筋土边坡稳定性系数影响因素的敏感性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008,28(4):479-483.
- [2] 何本贵,高 谦,刘 芳. 公路路堑边坡稳定性影响因素正交分析与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6):716-719.
- [3] 张 健,孙巧根,长 铮. 基于正交试验的方法分析边坡稳定性影响因素的显著性[J]. 中外公路, 2005 (5):8-11.
- [4] 杨南林,瞿海斌,程翼宇. 用均匀设计和回归分析法优化黄连提取工艺[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18 (1):126-130.
- [5] 黄 芳,俞自涛,帅 欧,等. 基于均匀设计法的碳纳米管纳米流体稳定性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011,45(7):1254-1258.
- [6] 王 宇,余宏民,樊 涛,等. 路堑边坡稳定性影响因子的均匀设计和数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2011,39(3):58-62.
- [7] 梅松华,盛 谦,冯夏庭等. 均匀设计在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2694-2697.
- [8] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [9] 陈高峰. 基于均匀设计的边坡稳定性敏感性分析[J]. 水利学报, 2007,37(11):1397-1401.
- [10] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京:科学出版社,1994.

收稿日期:2014-03-18