

基于均匀设计法的边坡稳定性分析

刘煌海¹, 刘鸿山²

(1. 广东省建筑设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510000;

2. 莆田市水利水电勘测设计院有限公司, 福建 莆田 351100)

摘要 边坡失稳造成的地质灾害往往阻断现状道路及破坏建筑等构筑物, 危害人民的生命安全, 产生较大的经济损失。通过均匀设计多因素不同水平组合的试验方案, 基于Midas-GTS NX和DPS数据处理系统, 综合探究坡度、边坡高度、黏聚力、内摩擦角以及重度等不同因素对边坡稳定性的影响, 拟合了边坡安全系数与各影响因素的关系式, 并设计试验组验证拟合关系式的可靠性。关系式表明安全系数与坡度、坡高以及重度成负相关, 与黏聚力、摩擦角成正相关。安全系数与黏聚力、坡度、坡高以及重度等为线性相关, 与摩擦角存在非线性关系, 摩擦角对安全系数的影响较其他因素更为明显。本研究旨在为研究多因素影响边坡稳定性提供参考。

关键词 均匀设计; 边坡稳定性; 安全系数

中图分类号: U12

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0094-03

1 研究背景

随着城市经济和交通的发展, 城际交通的建设也越来越广泛, 城际道路建设常常穿山过河, 边坡工程在其中扮演着重要的角色。边坡稳定性作为边坡工程关键环节一直是重点研究方向。

李元松等^[1]对边坡稳定的研究现状和发展做了较为全面的阐述, 吴书晨等^[2]理论推导了初始含水率非均匀分布下的边坡安全系数计算公式, 孙东等^[3-4]基于非饱和土理论和数值模拟分析了不同含水量、渗透特性下边坡的稳定。

单一或者关联因素对边坡稳定的影响, 避免了其他影响因素的干扰, 保证研究结果直观性和明确性, 有利于加深因素或交互因素不同工况下边坡稳定的分析与理解。实际工程中, 不同影响因素相互影响, 单一因素单独作用的情况少之又少, 因此研究多因素多水平对边坡稳定性的影响是十分必要的。

2 试验简介

2.1 试验方法

选定边坡稳定性系数作为评定边坡稳定性的表征值, 探究坡度、坡高、土体黏聚力、摩擦角以及重度等因素对边坡稳定性的影响, 建立边坡安全系数和5个因素之间的关系模型。

探究过程分为试验方案设计、数值模拟求算、关系模型拟合与验证以及分析等步骤。

1. 试验设计: 采用均匀设计方法在坡度、坡高、土体黏聚力、摩擦角以及重度的取值区间内分别取10

个水平进行参数组合。

2. 数值模拟: Midas-GTS NX软件数值模拟不同参数组合边坡, 求算边坡稳定性系数。

3. 数据处理及验证: 利用数据处理系统(DPS)处理数据, 基于不同试验组的数值结果, 拟合边坡稳定性系数与坡度、坡高、土体黏聚力、摩擦角以及重度之间的定量关系式。选取单一因素的不同水平试验组, 对比数值模拟求算结果和拟合公式的预估值验证关系式的可靠性。

4. 模型分析: 基于稳定性系数与不同影响因素之间的关系式, 逐一分析各因素与稳定性的相关性及其影响机理。

2.2 试验设计

均匀设计只需与因素水平数(假定因素水平数为 q)相等次数的 q 次模拟即可达到正交设计的至少做 q^2 次模拟所能达到的模拟效果^[5]。

根据坡度、坡高、土体黏聚力、摩擦角以及重度等5个3因素、10水平设定, 采用 $U_{11}(11^{10})$ 均匀设计表及其使用表, 得到 $U_{10}^*(10^5)$, 上标5表示因素数, 下标10表示水平数。方案设计各因素的不同水平参数取值, 如表1。

2.3 建模

边坡的模型计算可以简化为平面应变问题, CAD绘制的.dxf边界图形导入Midas-GTS软件。选取Mohr-Coulomb模型作为各土层本构模型, 杨氏模量和泊松比取定值, 分别为10 MPa和0.25。不同试验组的模型材

料对应影响因素参数取值按表 1 选取。边界约束条件为模型顶面自由，底面约束各方向位移，侧面约束法向位移。

表 1 均匀方案设计表

组号	坡度 (°)	坡高 (m)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	重度 (kN/m ³)
1	45	6	7.5	25	24
2	50	9	15	50	16
3	55	10	22.5	20	30
4	60	12	2.5	45	22
5	65	14	10	15	14
6	70	5	17.5	40	28
7	75	7	25	10	20
8	80	8	5	35	12
9	85	11	12.5	5	26
10	90	13	20	30	18

3 试验计算及拟合模型

3.1 试验组计算结果

为了便于影响因素与表征值之间关系的拟合，分别用 X1 ~ X5 表示影响因素的坡度、坡高、黏聚力、摩擦角以及重度，Fs 表示边坡安全系数。各试验组方案的计算结果，如表 2 所示。

表 2 边坡模型的因素组合及特征值

组号	X1 (°)	X2 (m)	X3 (kPa)	X4 (°)	X5 (kN/m ³)	Fs (/)
1	45	6	7.5	25	24	1.3477
2	50	9	15	50	16	2.9297
3	55	10	22.5	20	30	1.0742
4	60	12	2.5	45	22	1.1055
5	65	14	10	15	14	0.6426
6	70	5	17.5	40	28	1.8945
7	75	7	25	10	20	1.0820
8	80	8	5	35	12	0.7129
9	85	11	12.5	5	26	0.3369
10	90	13	20	30	18	0.7207

3.2 拟合模型

利用 DPS 数据分析软件选用二次多项式逐步回归分析。以边坡安全系数作为因变量，各个影响因素作

为自变量。选择二次多项式逐步回归进行分析。总共有 X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₁*X₁、X₁*X₂、X₁*X₃、X₁*X₄、X₁*X₅、X₂*X₂、X₂*X₃、X₂*X₄、X₂*X₅、X₃*X₃、X₃*X₄、X₃*X₅、X₄*X₄、X₄*X₅、X₅*X₅，19 个变量可供选择或剔除。系统给出每一个变量的显著水平 p 值。在方程中引进或剔除某一变量引起的方程相关系数 R 的变化和显著水平 p 值的变化。选取使方程的相关系数最接近 1、显著水平 p 值最小的变量组合，构建方程：

$$F_s = 1.5165 + 0.0008486X_4 * X_4 - 0.001960X_1 * X_2 + 0.000004357X_2 * X_3 - 0.0000007415X_4 * X_5$$

上述回归模型诊断如表 3 所示，其中 d 接近于 2；p = 0.0034 << 0.05，说明拟合方程可使用；相关系数接近 1，说明回归模型拟合精度高。

表 3 数据处理相关指标

参数	参数值
相关系数 R	0.9678
方程的方差分析 F	18.5036
F 值的显著水平 p	0.0034
剩余标准差 S	0.2529
调整后的相关系数 Ra	0.9413
Durbin-Watson 统计量 d	2.0374

3.3 模型验证

为了拟合公式的可靠性，在各影响因素的取值范围内，选择不同于方案的数值，设定一组模拟参数组合 (X₁=63, X₂=8, X₃=18, X₅=17)，其中 X₄，摩擦角作为单一因素变量。分别采用拟合公式和 Midas 软件数值求算随摩擦角变化的边坡稳定性系数，计算结果，见表 4。

表 4 拟合公式与数值求解稳定性系数对比

X4/ (°)	数值求解	拟合公式	相对误差 / (%)
12	1.0898	1.1270	3.4082
16	1.2227	1.1716	4.1746
20	1.3477	1.2434	7.7361
24	1.4727	1.3423	8.8489
28	1.6055	1.4684	8.5351
32	1.7383	1.6217	6.7069
36	1.8789	1.8021	4.0874
40	2.0391	2.0097	1.4411
44	2.1953	2.2444	2.2362
48	2.3828	2.5063	5.1818

以数值模拟软件求算结果作为真实值,拟合公式计算结果与数值计算结果的相对误差为1.44%~8.85%,皆小于10%。说明拟合模型求算坡度等影响因素(取值范围内)下的边坡稳定性表征值具备可靠性。

4 模型分析

模型计算、数据分析得到的拟合公式体现了边坡安全系数与坡度、坡高、黏聚力、摩擦角以及重度之间的关系。为了进一步明确各个因素对边坡安全系数的相关性和影响程度,分别将拟合公式整理成单个因素同类项及其他因素组合公式,分析各因素对边坡稳定性的影响与机理。

4.1 坡度影响分析

将拟合公式合并含坡度 X_1 的同类项,得到:

$$F_s = -0.001960X_2 * X_1 + f(X_2, X_3, X_4, X_5)$$

X_2 表示坡高,边坡的稳定性系数与坡度成负相关。

随着坡度的增加,边坡稳定性系数逐渐减小,降低幅度与坡高有关。坡高越大,相同的坡脚增量,边坡稳定性系数减小地越快。边坡内部潜在滑动面随着坡度的减缓向背离坡面方向移动,导致发生滑动的潜在滑动面的长度增大,抗滑力与下滑力的比值增大,边坡稳定性提高。

4.2 坡高影响分析

将拟合公式合并含坡高 X_2 的同类项,得到:

$$F_s = -(0.001960X_1 - 0.000004357X_3)X_2 + f(X_4, X_5)$$

当 X_1 、 X_3 为定值,边坡稳定性系数 F_s 与坡高 X_2 呈线性关系。工程中 X_1 和 X_3 的取值范围,负相关概率远大于正相关,且边坡坡度越大,坡高对安全系数的影响越明显。边坡工程的其他因素一致的前提下,边坡的高度越大,在等曲率的潜在滑动面上,边坡的自重增加,下滑力增加,使得安全系数减小,边坡稳定性降低。

4.3 黏聚力影响分析

拟合公式合并含黏聚力 X_3 的同类项,得到:

$$F_s = 0.000004357X_2 * X_3 + f(X_1, X_2, X_4, X_5)$$

当 X_2 取定值时,边坡稳定性系数 F_s 与坡高 X_3 成正相关,即土体的黏聚力越大,边坡稳定性系数越大,边坡越稳定。假定边坡的潜在滑动面相同,抗滑力随着土体黏聚力的增大而增大,边坡安全系数也增大。

4.4 摩擦角影响分析

拟合公式合并含摩擦角 X_4 的同类项,得到:

$$F_s = (0.02913X_4 - (1.2727e-5) * X_5^2) + f(X_1, X_2, X_3)$$

方程中 X_5 的系数较小,一元二次方程的对称轴基

本位于原点,说明边坡安全系数与摩擦角存在抛物线关系,摩擦角对边坡安全系数的影响比坡度、坡高、黏聚力以及重度等因素要明显。

4.5 重度影响分析

将拟合公式合并含重度 X_5 的同类项,得到:

$$F_s = -0.0000007415X_4 * X_5 + f(X_1, X_2, X_3, X_4)$$

X_4 表示摩擦角,边坡安全系数 F_s 与 X_5 容重成负相关。假定潜在滑动面相同,土体重度越大,下滑力也相应越大,边坡安全系数越小,边坡越容易发生失稳破坏。

4.6 关联因素分析

单一合并同类项时,各系数中往往存在其他影响因素,说明不同因素之间存在交互作用,系数中的因素影响其对边坡安全系数作用的强弱。

5 结束语

为研究多因素对边坡稳定性的影响,采用均匀设计法确定多个因素不同水平的试验组方案,利用Midas-GTS NX软件数值模型求解不同试验组的边坡安全系数,通过DPS数据处理系统拟合不同因素与边坡稳定表征值之间的关系式。

选取内摩擦角作为单一因素,验证拟合公式可靠性。基于合并同类项的方式,得出坡度、坡高、黏聚力以及重度等因素与安全系数存在线性相关性,而摩擦角与安全系数存在抛物线关系。不同因素之间存在着相互影响,例如边坡的坡高影响坡度、黏聚力对边坡稳定的作用强弱,等等。

参考文献:

- [1] 李元松,王玉,朱冬林,等.边坡稳定性评价方法研究现状与发展趋势[J].武汉工程大学学报,2021,43(04):428-435.
- [2] 吴书晨,侯超群,孙志彬.初始含水率非均匀分布的无限边坡稳定性计算模型研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(05):690-695.
- [3] JIA J Q, MAO C X, TENORIO V O. Slope stability considering multi-fissure seepage under rainfall conditions[J]. Scientific Reports, 2024, 14(01):11662-11662.
- [4] 孙东,周春梅.不同含水量及渗透特性下强风化砂岩土边坡稳定性分析[J].安全与环境工程,2024,31(03):178-187.
- [5] 庞超明,黄弘.试验方案优化设计与数据分析[M].南京:南京东南大学出版社,2018.