

## 基于正交试验的锚杆支护参数对综合管廊基坑边坡稳定性影响研究

李金沟, 李勇, 施乐麟, 田亮

中建科技集团有限公司四川分公司 四川成都

**【摘要】**为了研究锚杆不同支护参数对边坡稳定性的影响,选取绵阳市在建综合管廊为工程背景,基于正交试验,运用 Geo-Studio 有限元软件计算管廊边坡在不同锚固参数下的安全系数,选取了锚杆长度、锚杆间距和锚固角度三个因素,针对各因素对边坡稳定性的影响规律进行了分析,并且运用 Matlab 软件对因素间进行三次样条插值分析,结果表明:锚固参数对边坡稳定性影响从大到小依次为:锚杆长度、锚固角度、锚杆间距,边坡安全系数和锚杆长度成正比,和锚固角度以及锚杆间距成反比,基于正交试验给出了理论上安全系数最高的锚固方案;通过插值结果得到了安全系数在因素两两组合情况下对各因素敏感性的大小,并且分析了各因素间互相影响的规律,同时给出了双因素作用时的最优匹配方案。

**【关键词】**公路路基; 敏感性分析; 数值计算; 安全系数; 锚固方式; 边坡稳定; 正交试验; 插值分析

### Study On Influence Of Bolt Supporting Parameters On Slope Stability Of Integrated Pipe Corridor Foundation Pit Based On Orthogonal Test

Jingou Li, Yong Li, Lelin Shi, Liang Tian

Sichuan Branch of China Construction Technology Group Co., LTD., Chengdu, Sichuan, China

**【Abstract】**In order to study the influence of different bolt supporting parameters on slope stability, the integrated pipe corridor under construction in Mianyang City was selected as the engineering background. Based on orthogonal test, Geo-Studio finite element software was used to calculate the safety factor of pipe corridor slope under different anchoring parameters, and three factors including bolt length, bolt spacing and anchoring Angle were selected. The influence rule of each factor on the slope stability is analyzed, and the Matlab software is used to carry out cubic spline interpolation analysis between the factors. The results show that the influence of anchorage parameters on the slope stability is as follows: The anchoring length, anchoring Angle, anchoring distance, the slope safety factor is proportional to the anchoring length, and inversely proportional to the anchoring Angle and the anchoring distance. Based on the orthogonal test, the anchoring scheme with the highest theoretical safety factor is given. Based on the interpolation results, the sensitivity of the safety factor to each factor is obtained, and the law of the mutual influence of each factor is analyzed. At the same time, the optimal matching scheme is given when the two factors act.

**【Keywords】**highway subgrade; Sensitivity analysis; Numerical calculation; Factor of safety; Anchorage mode; Slope stability; Orthogonal test; Analysis of interpolation

#### 引言

改革开放以来随着我国建设化进程不断发展,在公路、铁路、桥梁、水利、市政等工程中随处可见边坡施工,然而边坡在自然条件下容易发生滑坡等一系列问题,一旦失稳极易造成人员伤亡、工期停滞和经济损失,因此对于边坡的加固一直备受国

内外学者广泛关注。

对边坡进行加固主要有锚杆、土钉、挡土墙、抗滑桩、注浆等手段,其中锚杆在能满足边坡稳定性要求的前提下同时兼具造价低廉、兼容性好和施工便捷等优点,因此在各类岩土工程获得广泛应用。由于锚杆在施工时的各个参数均会对边坡稳定性产

生影响, 故研究如何平衡优化这些参数来保证边坡的稳定性显得尤为重要。

本文依托绵阳科技城集中发展核心区在建综合管廊, 利用正交试验手段分析了锚杆长度、锚杆布置间距以及锚固角度三个因素在组合情况下对边坡稳定性的影响, 给出了最佳支护方案。同时对因素进行交互性分析, 得到了因素在两两组合情况下对边坡稳定性的影响规律。

## 1 计算模型

### 1.1 工程背景

绵阳科技城集中发展核心区综合管廊, 场地地势较开阔, 地形起伏不大, 地面标高介于 505.76~570.83m 之间, 道路全长 11 km, 设计车速 40Km/h, 红线宽 50m, 双向六车道, 沿道路左侧布置地下综合管廊, 为预制拼装综合管廊结构。

根据地质勘测报告表明, 场地地基填土、淤泥为软弱土, 粉质黏土为中软土, 黏土、卵石、全风化泥岩、强风化泥岩为中硬土, 中等风化泥岩为岩石。在建管廊采用明挖法施工, 本次研究选取某一段为研究对象。

根据相关的地质勘测报告得到了管廊边坡岩土体的物理力学性质参数, 如表 1 所示。

### 1.2 数值模型建立

本次研究利用 Geo-studio 软件进行建模计算, 根据管廊边坡的地质构造和地形参数等将其边坡模型分为三部分, 共建立了 8257 个节点和 8104 单元。结合地质勘探报告等资料, 对边坡加固方式进行对比筛选最终选择锚杆支护此边坡, 考虑到第一根锚杆距离边坡顶部需要有一定的土层厚度, 因此将第一根锚杆安置在距离坡顶垂直距离为 2m 处, 此后锚杆按相同间距沿坡面依次向下加固边坡, 其中锚杆力学参数如表 2 所示, 管廊边坡模型如图 1 所示。

### 1.3 Morgenstern-Price 极限平衡法

目前极限平衡法在求解岩土体工程边坡稳定性问题中较为常用, 其主要可分为 Bishop 法、Janbu 法和 Morgenstern-Price 极限平衡条分法等, 前两种忽略了条间切向力仅考虑了法向力, 计算结果均具有一定的局限性, 本次研究采用的 Morgenstern-Price 法将条间正应力和剪应力均考虑进去, 并且还能达到力平衡及力矩平衡的要求, 在边坡稳定性计算领域获得了较高的认可度<sup>[3-4]</sup>。

力平衡安全系数方程:

$$F_f = \frac{\sum c' \beta \cos \alpha + (N - \mu \beta) \tan \phi' \cos \alpha}{\sum N \sin \alpha - \sum D \sin \omega} \quad (1)$$

力矩平衡安全系数方程:

$$F_m = \frac{\sum c' \beta R + (N - \mu \beta) \tan \phi'}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (2)$$

式中:  $c'$  为粘聚力;  $\alpha$  为倾斜角;  $\mu$  为孔隙水压力;  $\phi'$  为有效摩擦角度;  $N$  为条块底部法向力;  $D$  为线荷载;  $W$  为条块重量;  $\beta$ 、 $\omega$ 、 $R$ 、 $x$ 、 $f$ 、 $d$  为几何参数。

取模型底面为不透水边界; 模型两侧边界按地下水头值取, 左侧为 8m, 右侧为 2m。自然状态下处于地下水位以上的土体为非饱和状态, 孔隙水压力值在此区间为负值并且基本呈线性分布, 地下水位以下为饱和区, 依托 SLOP 模块中的 Morgenstern-Price 极限平衡法计算了边坡在自然状态下的稳定性, 其安全系数  $F_s=1.057$ , 表明边坡在自然状态下处于稳定。

## 2 正交试验

### 2.1 试验设计

在日常试验研究中影响试验结果的因素通常有多个, 同时每个因素也具有众多水平, 因此无法将其全部考虑进去。故本次试验采取正交试验法进行设计, 可以减少试验次数并且可以考虑到多因素多水平对试验结果的影响, 后续可通过极差分析等方法对数据进行处理, 从而获得相应结论。根据以往研究表明锚杆长度、锚杆间距和锚固角度会直接波及到边坡的安全, 通过正交试验可得到参数在最优边坡安全系数下的组合。

选取锚杆长度、锚杆间距和锚固角度作为正交试验的三个因素, 每个因素再考虑四个水平。

### 2.2 试验结果

根据三因素四水平共设计 16 组正交试验, 同时统计了这 16 组组合方案下的边坡安全系数范围为 1.285~1.860, 均大于边坡在自然状态下的安全系数  $F_s=1.057$ , 说明加固锚杆后边坡稳定性均得到了提高。

### 2.3 极差分析

通过正交实验能均匀地挑出具有代表性的实验方案, 同时基于少量实验的结果, 可以推出最优的实验方案组合, 并且可以得到实验结果之外的信息。

因此本此试验采取极差法处理所得结果, 计算数据主要包括  $k_i$ 、 $R$ , 根据所得边坡安全系数数据, 对试验所设三个因素进行极差分析, 所得结果如表 3 所示。通过计算得到表 3 中各因素的极差均值  $k_i$  和极差值  $R$ , 排序为  $R_A > R_C > R_B$ , 说明对边坡安全影响的权重由大到小依次为锚杆长度、锚固角度、锚杆

间距。结合极差分析表绘制了不同因素在不同水平下和安全系数之间的直观分析图像。

由分析图像可以看出, 安全系数随锚杆长度的增大而增大, 两者呈现出正相关性; 而安全系数会随着锚杆间距和锚固角度的增大而减小, 呈现出负相关性, 其中锚杆间距对安全系数的影响最小。

表 1 岩土体物理力学性质

参数	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	粘聚力/(kpa)	内摩擦角/(°)	泊松比	含水率/(%)	渗透系数/(m/s)
素填土	18.5	10	10	0.40	34	$9.5 \times 10^{-5}$
粉质黏土	19	12	15	0.42	26	$1.8 \times 10^{-7}$
中风化	23.5	160	30	0.30	—	—

表 2 锚杆物理力学参数

锚杆周长/(mm)	弹性模量/(Gpa)	屈服荷载/(kN)	泊松比	岩体黏结刚度/(N/m <sup>2</sup> )	砂浆黏结刚度/(N/m <sup>2</sup> )
314	200	500	0.25	$1.0 \times 10^9$	$2.0 \times 10^7$

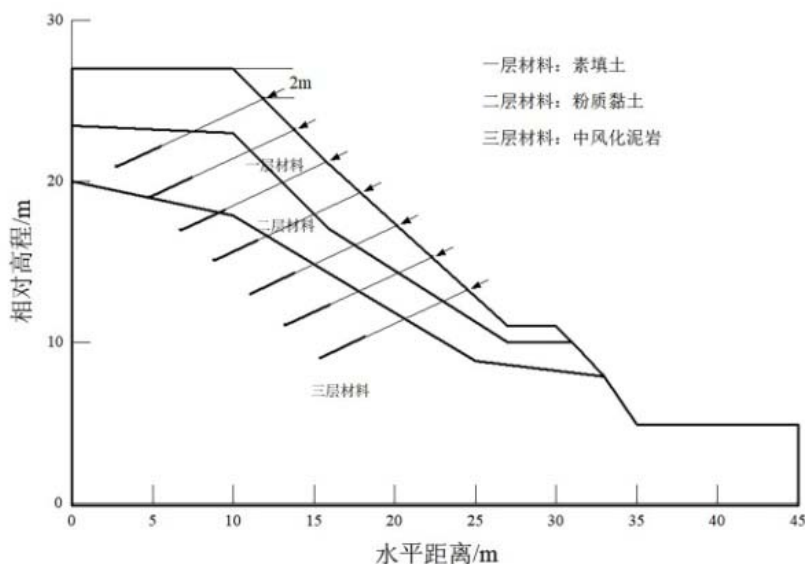


图 1 管廊边坡计算数值模型

表 3 安全系数极差分析值

水平	因素		
	A:锚杆长度/m	B:锚杆间距/m	C:锚固角度/°
$k_1$	1.355	1.548	1.543
$k_2$	1.446	1.485	1.512
$k_3$	1.461	1.479	1.477
$k_4$	1.694	1.453	1.433
极差 $R$	0.339	0.095	0.110

### 3 交互因素分析

本文考虑了三个因素, 每个因素考虑了四水平,

用正交法设计并进行了 16 组试验, 但因素并没有进行因素两两之间的组合, 即存在试验因素两两组合

的情况下对边坡稳定性有较大影响, 因此通过 Matlab 软件对试验所得数据进行三次样条插值, 最终获得了两种因素共同作用下边坡安全系数变化的曲面图和等值线图, 根据软件所得图片结合极差数据可以分析双因素互相作用下对安全系数产生的影响。

### 3.1 锚杆长度和锚杆间距

从软件所得曲面图中可以看出, 当锚杆长度固定不变时, 边坡安全系数随锚杆间距变化基本保持不变, 仅在锚杆长度为 12m 左右时随锚固间距增大而增大; 当锚固间距不变时, 安全系数随锚杆长度的增大呈现出先增大再减小再增大的变化规律, 由此可以说明和锚杆间距相比, 边坡安全系数对锚杆长度更为敏感。

从等值线图中可以看出当锚杆长度为 6~9m 时, 安全系数变化区间为 1.3~1.4, 当锚杆长度为 9~12m 时, 安全系数变化区间为 1.4~1.9, 说明在锚杆长度较大时, 安全系数受锚杆间距影响较大。每一个锚杆长度对应一个能使安全系数达最大的锚杆间距值, 对锚杆间距来说, 同样存在一个能使安全系数达最大的锚杆长度值, 这说明两因素间存在一个最佳匹配系数, 即一个因素值固定不变时存在一个能使结果最优的其他因素值。例如当锚杆长度固定 8m, 此时锚固间距取 2m 可使安全系数达最大。关于这部分定量化的研究待后续充分进行, 但可以看出在施工时应尽量找到最佳匹配方式, 使结果最优化。

### 3.2 锚杆长度和锚固角度

从软件所得曲面图中可以看出当锚杆长度一定时, 随着锚固角度的增大, 安全系数呈现出先增大后减小的变化规律; 当锚固角度一定时, 随着锚杆长度的增大, 安全系数呈现出持续增大的变化趋势, 且变化幅度较大, 说明和锚固角度相比, 边坡安全系数对锚杆长度更为敏感。

从等值线中可以看出当锚杆长度为 6~9m 时, 安全系数变化区间为 1.30~1.50, 当锚杆长度为 9~12m 时, 安全系数变化范围为 1.40~1.80, 说明当锚杆长度较大时, 锚固角度对安全系数影响较大。从图中可以看出当锚杆长度为 12m 时, 安全系数在锚固角度为 20°时达最大值, 表明锚杆长度和锚固角度不是单方面越大或者越小越好, 而是一个因素值固定时, 另一因素存在一个最佳匹配值可以使得安

全系数达最大值。

### 3.3 锚杆间距和锚固角度

从软件所得曲面图中可以看出安全系数随锚杆间距和锚固角度的变化起伏不定, 变化规律不明显。从等值线图中可以看出当锚固角度处于 30°~35°之间, 随着锚杆间距的增大, 安全系数逐渐减小; 当锚固角度处于 25°、30°之间, 随着锚杆间距的增大, 安全系数起伏不定; 当锚固角度处于 20°~25°间时, 随着锚杆间距的增大, 安全系数逐渐增大。根据样条插值结果分析两因素的敏感性较为模糊, 结合 2.3 节极差分析结果得知安全系数对锚固角度更为敏感。

综合以上来看, 当锚固间距和锚固角度进行组合时, 将一个因素进行固定, 可以找到另一因素的某个水平可以使安全系数在此情况下最大值, 例如间距为 2.5m 时, 锚固角度取 25°可使安全系数达 1.60 (此工况下最大值); 当锚固角度为 20°时, 锚杆间距取 4m 时安全系数达 1.70 (此工况下最大值)。因此在实际施工过程中, 应将这两因素协调到最佳配比。

## 4 结论

基于正交试验和数值模拟研究了不同锚固参数对边坡稳定性的影响规律, 得到以下结论:

(1) 经过极差分析排序为  $R_A > R_C > R_B$ , 说明对边坡安全影响的权重由大到小依次为锚杆长度、锚固角度、锚杆间距。

(2) 边坡安全系数和锚杆长度成正比, 和锚固角度及锚杆间距成反比, 进而得出最优锚固方案: 即锚杆长度 12m, 锚固间距 1m, 锚固角度 20°。

(3) 通过 Matlab 对因素两两组合情况下进行三次样条插值后, 锚杆长度和锚杆间距组合时, 安全系数在锚杆长度为 12m、锚杆间距为 4m 时最大; 锚杆长度和锚固角度组合时锚杆长度为 12m、锚固角度为 20°时最大; 锚杆间距和锚固角度组合时, 锚杆间距为 4m、锚固角度为 20°时最大。

(4) 因素两两组合时, 当其中一个因素固定时, 另存在一个最佳匹配值能使结果最优, 施工过程中应结合这个规律合理搭配各因素参数。

## 参考文献

- [1] 徐宏, 夏琼, 王旭. 边坡安全系数影响因素敏感性分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(08): 98-101.

- [2] 陈圣刚, 于威, 李国维, 等. 引江济淮试验工程河道边坡锚杆检测对比试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 69-75.
- [3] 林杭, 陈宝成, 钟文文. 锚杆对称分布形式对边坡稳定性影响分析[J]. 铁道建筑, 2014, 000(008): 62-65.
- [4] 黎海滨, 谭捍华, 袁维, 等. 考虑横向约束作用的锚杆锚固参数优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7731-7738.
- [5] 姚国强, 言志信, 龙哲, 等. 基于正交设计的锚杆支护参数对土质边坡稳定性影响的研究[J]. 公路, 2019, 64(01): 37-45.
- [6] 王珍, 曹兰柱, 王东. 非均质边坡稳定性上限分析评价研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(02): 323-328

**收稿日期:** 2022年10月12日

**出刊日期:** 2022年11月18日

**引用本文:** 李金沟, 李勇, 施乐麟, 田亮, 基于正交试验的锚杆支护参数对综合管廊基坑边坡稳定性影响研究[J]. 工程学研究, 2022, 1(5): 92-96  
DOI: 10.12208/j.jer.20220174

**检索信息:** RCCSE 权威核心学术期刊数据库、中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**