



# 社会主义 核心价值观

人民有信仰 民族有希望 国家有力量  
一个国家的强盛，离不开精神的支撑；一个民族的进步，有赖于文明的成长。

- 国家 富强 民主 文明 和谐
- 社会 自由 平等 公正 法治
- 公民 爱国 敬业 诚信 友善



价值工程  
二〇二三年九月中旬刊

中国核心期刊（遴选）数据库 收录期刊

## Value Engineering

中国商界文联 会刊  
 中国技术经济研究会价值工程专业委员会 会刊  
 中国高等教育学会价值工程分会 会刊  
 中国期刊网 全文收录期刊  
 中国学术期刊（光盘版）  
 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊  
 万方数据—数字化期刊群入网期刊  
 中文科技期刊数据库收录期刊

ISSN 1006-4311  
CN13-1085/N

# 价值工程

JIAZHI GONGCHENG  
2022 9  
中旬刊（总第646期 / 第41卷）



# 某边坡岩体结构特征及变形破坏影响因素研究

## Study on the Structural Characteristics of a Slope Rock Mass and the Influencing Factors of Deformation and Failure

袁明 YUAN Ming; 李亨 LI Heng; 郭代泉 GUO Dai-quan

(四川志德岩土工程有限责任公司, 成都 610094)

(Sichuan Zhide Geotechnical Engineering Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

**摘要:** 岩质边坡的稳定性主要受到岩体结构面及自身强度控制, 在野外现场基于节理特征分析的 Barton 模型、岩体结构面强度试验、点荷载强度试验, 快速得到了岩体及结构面强度参数的可靠取值。利用赤平投影法得出边坡自然条件下处于失稳滑动状态。采用离散单元法计算分析了不同抗剪强度指标对边坡位移、变形速度、最大压应力的影响, 结果表明当抗剪强度参数取值与现场试验接近时, 边坡变形趋于稳定状态。

**Abstract:** The stability of rock slope is mainly controlled by the structural plane of rock mass and its own strength. Based on the Barton model of joint characteristics analysis, rock mass discontinuity strength test and point load strength test, the reliable value of rock mass and discontinuity strength parameters is quickly obtained in the field. Using stereographic projection method, the unstable sliding state of slope under natural conditions is obtained. The influence of different shear strength indexes on slope displacement, deformation speed and maximum compressive stress is calculated and analyzed by using discrete element method. The results show that when the shear strength parameter is close to the field test, the slope deformation tends to be stable.

**关键词:** 岩质边坡; 结构特征; 变形破坏

**Key words:** rocky slope; structure characteristics; deformation failure

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1006-4311(2022)26-151-03 doi:10.3969/j.issn.1006-4311.2022.26.049

## 0 引言

岩质边坡的稳定性问题一直是岩土工程的一个重要研究内容, 岩质边坡的稳定性及变形破坏主要受到岩体结构面及自身强度控制, 故结构面强度参数及岩体强度参数取值是岩土稳定性研究的基础<sup>[1-2]</sup>, 在野外现场调查时, 如何快速获得结构面强度参数及岩体强度参数显得尤为重要。

### 1 边坡现状

根据现场调查, 某边坡坡表植被发育, 基岩裸露, 坡脚落石堆积。地层岩性为板岩, 节理裂隙发育, 见图 1。



图 1 边坡现状

## 2 岩体结构特征

### 2.1 结构面强度参数取值

20 世纪 60 年代以来, Barton 与其合作者们 (1973, 1976) 在大量天然结构面的剪切试验的基础上, 结

**作者简介:** 袁明 (1985-), 男, 重庆人, 本科, 工程师, 主要从事岩土工程施工管理工作。

合结构面的几何特征和岩体力学特性, 研究了结构面抗剪强度估算方法, 提出了以下的巴顿 (Barton) 模型<sup>[3]</sup>:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[ \varphi_b + JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

式中: JRC 为结构面粗糙度系数 (Joint Roughness Coefficient); JCS 为结构面壁面抗压强度 (Joint Compression Strength), MPa;  $\varphi_b$  为基本摩擦角;  $\sigma_n$  为结构面上的有效正应力, MPa。

其中结构面壁面抗压强度 JCS 根据回弹仪测定的  $R_e$ , 使用巴顿推荐的米勒经验关系公式计算:

$$\log_{10}(JCS) = 0.00088\gamma_d R_e + 1.01$$

式中:  $\gamma_d$  为岩石的干容重,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

等效内摩擦角  $\varphi_i$  根据下式计算:

$$\varphi_i = \arctan \left( \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} \right)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left( \varphi_b + JRC \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

$$- \frac{\pi \cdot JRC}{180 \cdot \ln 10} \left[ \tan^2 \left( \varphi_b + JRC \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + 1 \right]$$

等效粘聚力  $C_i$  根据下式计算:

$$C_i = \tau - \sigma_n \cdot \tan(\varphi_i)$$

在计算结构面强度参数时, 根据现场试验结果, 片理面基本内摩擦角取  $36^\circ$ , 节理面取  $32^\circ$ , 最大正应力取 5MPa, 计算结果如表 1 所示。

通过上述计算可以得到边坡岩体的抗剪强度为 5MPa, 等效粘聚力为  $C=0.29\text{MPa}$ , 内摩擦角为  $\varphi=34^\circ$ 。

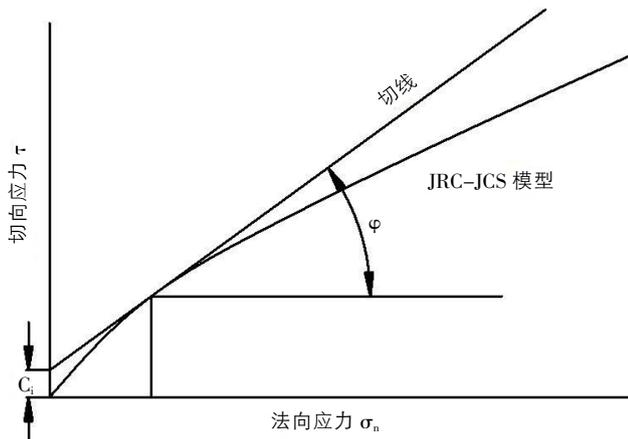


图2 巴顿(Barton)模型的等效处理方法

表1 基于巴顿(Barton)模型等效抗剪强度参数计算结果

结构面分组	回弹值	内摩擦角(°)	JRC	JCS	τ(MPa) (σn=5MPa)	JCS~JRC 模型方 (σn=5MPa)	
						φ(°)	C(MPa)
片理面	45.8	36	5	30.9	3.63	33.71	0.289
结构面 J1	31.6	32	3	35.3	3.67	34.0	0.291
结构面 J2	29.7	32	4	35.7	3.67	34.0	0.292

2.2 点荷载试验

点荷载试验是利用一对端部为直径极小的加荷锥,将岩石试样夹在两个锥形压头之间施加集中荷载,使岩石拉裂,通过计算求得试样点荷载强度,再依据经验关系,间接估算岩石单轴抗压强度和抗拉强度,或者直接用于岩石分类、划分风化带以及评价岩石各向异性程度等<sup>[4]</sup>。

设用卡尺或仪器立柱上的标尺量得两压头间距离为D,破坏荷载为P,那么点荷载强度指数为:

$$I_s = P/D_c^2$$

式中: \$I\_s\$ 为未经尺寸修正的点荷载强度指数; \$P\$ 为试样破坏时的点荷载; \$D\_c\$ 为等效岩心直径,对岩心径向试验, \$D\_c^2 = D^2\$ 对岩心轴向、岩块或不规则块试验, \$D\_c^2 = 4A/\pi\$, \$A = WD\$, \$A\$ 为过两压头接触点平面的最小截面积, \$W\$ 为试样的平均宽度。

为了得到统一可比的点荷载强度值,定义岩样经尺寸修正的点荷载强度指数 \$I\_s(50)\$ 为在 \$D=50\text{mm}\$ 岩心上进行径向试验所测得的值。对于在其他情况下进行的试验,使用尺寸修正系数 \$K\_p\$ 将试验结果归一化为 \$I\_s(50)\$:

$$I_s(50) = I_s K_p$$

$$K_p = (D_c/50)^{0.45}$$

\$I\_s(50)\$ 与单轴抗压强度 \$\sigma\_c\$ 的经验关系:

$$\sigma_c = 22.82 I_s(50)^{0.75}$$

选取边坡坡脚处的岩石进行点荷载试验,试验结果见表2。

计算结果表明,岩石的平均抗压强度约为 \$83.379\text{MPa}\$,抗拉强度约为 \$5.426\text{MPa}\$。

表2 点荷载试验计算结果表

编号	D/mm	W/mm	\$D_c\$/mm	P/kN	\$I_s\$/MPa	\$I_{s(50)}\$/MPa	\$\sigma_c\$/MPa	\$\sigma_t\$/MPa
1	28	58	45.5	18	8.701	8.338	111.972	7.754
2	40	55	52.9	20	7.136	7.322	101.577	6.810
3	30	71	52.1	30	11.056	11.262	140.290	10.474
4	36	71	57.1	6	1.843	1.956	37.738	1.819
5	40	66	58.0	11	3.271	3.497	58.350	3.252
6	44	46	50.8	12	4.654	4.687	72.687	4.359
7	39	65	56.8	8	2.477	2.624	47.050	2.440
8	38	72	59.0	13	3.730	4.019	64.780	3.738
9	30	46	41.9	20	11.377	10.510	133.206	9.774
10	33	80	58.0	13	3.866	4.132	66.139	3.843

3 边坡稳定性分析

边坡下部出露基岩岩性为板岩,受区域地质构造和浅表生改造,以及公路施工人工开挖边坡的影响,岩体出露部分节理裂隙发育,现场调查统计得到两组节理,节理面 J1 产状: \$104^\circ \angle 80^\circ\$, 节理面 J2 产状: \$313^\circ \angle 41^\circ\$, 节理间距 \$10\text{--}50\text{cm}\$, 片理面 L 产状: \$208^\circ \angle 72^\circ\$, 层厚 \$15\text{--}20\text{cm}\$, 坡面产状: \$73^\circ \angle 53^\circ\$。

根据岩体结构特征,赤平投影分析如图3所示。

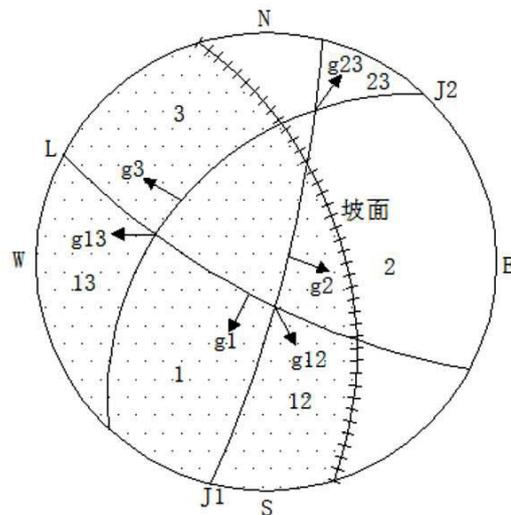


图3 边坡岩体稳定性分析图

由边坡稳定性分析知,图中坡面投影区穿越单滑面 1、2、3,双滑面 12、13,坠落体 G,故不在边坡面上形成滑塌体,而只有双滑面 23 的滑塌形式是在边坡临空面出露的滑塌体。从稳定性系数分析得知,双滑面 23 的稳定性系数为 0.46,处于失稳滑动状态,会产生掉块、落石,这与现场调查结果一致。

4 边坡变形破坏影响因素分析

本文采用离散元数值模拟软件 UDEC 来模拟边坡基岩在不同粘聚力 \$C\$、内摩擦角 \$\varphi\$ 下的变形破坏模式<sup>[5]</sup>,其中以基岩裸露点作为边坡位移大小 \$d\$、变形速度 \$v\$、最大压应力 \$\sigma\$ 的采集点。其中 \$C\$ 取 \$2\text{MPa}\$、\$3\text{MPa}\$、\$4\text{MPa}\$、\$5\text{MPa}\$、\$8\text{MPa}\$、\$12\text{MPa}\$、\$15\text{MPa}\$、\$18\text{MPa}\$、\$22\text{MPa}\$ 共 9 个不同的值, \$\varphi\$ 取 \$0^\circ\$、\$8^\circ\$、\$15^\circ\$、\$22^\circ\$、\$30^\circ\$、\$38^\circ\$、\$45^\circ\$ 共 7 个不同的值,两两结合共 63 种不同的模拟情况。

#### 4.1 不同 C、 $\varphi$ 值对位移 d 的影响

位移大小可以直观地反应边坡变形的程度,位移大则边坡变形就大,通过统计分析得到如图 4 所示的点线图。从图中可以看出,当粘聚力 C 值小于 8MPa 时,边坡位移波动明显,C 值越小变形差别越大;当粘聚力 C 值大于 8MPa 时,外边坡变形趋于稳定。当内摩擦角  $\varphi$  值小于 15° 时,边坡位移波动较大,且  $\varphi$  值越小变形差异越大;当内摩擦角  $\varphi$  值大于 15° 时,边坡变形趋于稳定。综合不同 C、 $\varphi$  值可以看出,当 C 值大于 8MPa 且  $\varphi$  值大于 15° 时,边坡变形趋于稳定,在 0.5m-0.8m 范围内。

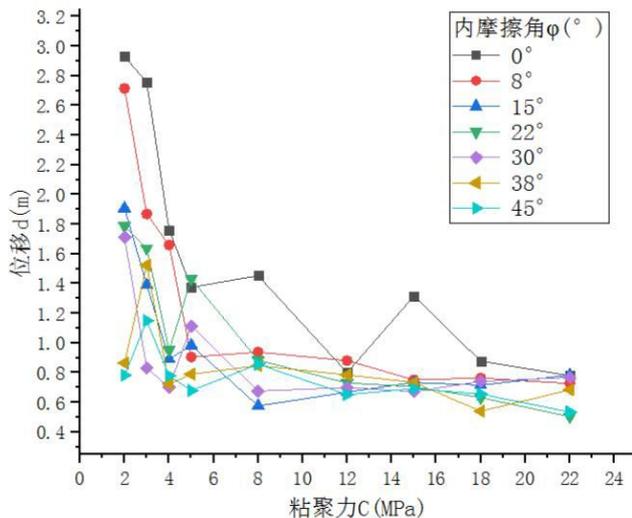


图 4 位移影响

#### 4.2 不同 C、 $\varphi$ 值对变形速度 v 的影响

边坡变形速度大小作为边坡变形监测的重点,对保证工程施工和运行的安全起重要作用,将数值模拟结果统计分析得到如图 5 所示的点线图。从图中可以看出,当粘聚力 C 值小于 8MPa 时,边坡变形速度变化明显,C 值越小变形速度差别越大;当粘聚力 C 值大于 8MPa 时,边坡变形速度趋于稳定。当内摩擦角  $\varphi$  值小于 30° 时,边坡变形速度波动明显,且  $\varphi$  值越小变形速度差异越大;当内摩擦角  $\varphi$  值大于 30° 时,边坡变形趋于稳定。综合不同 C、 $\varphi$  值可以看出,当 C 值大于 8MPa 且  $\varphi$  值大于 30° 时,边坡变形速度趋于稳定,在 0.1m/s-0.3m/s 范围内。

#### 4.3 不同 C、 $\varphi$ 值对最大压应力 $\sigma$ 的影响

数值模拟结果表明,最大拉应力都在 2MPa 附近波动,这与边坡的抗拉强度 t 取值为 2MPa 有关,故只讨论在抗拉强度 t 为 2MPa 时最大压应力的变化,通过统计分析得到如图 6 所示的点线图。从图可以看出,最大压应力  $\sigma$  随着粘聚力 C 值和内摩擦角  $\varphi$  的增加出现线性上升的趋势。

### 5 结论

基于现场调查、现场试验、数据整理、数值模拟等方法,本文得出以下结论:

① 巴顿(Barton)模型是一种快速确定较硬岩体结构面强度参数的方法,在野外可以方便快速确定岩体的强度参数。

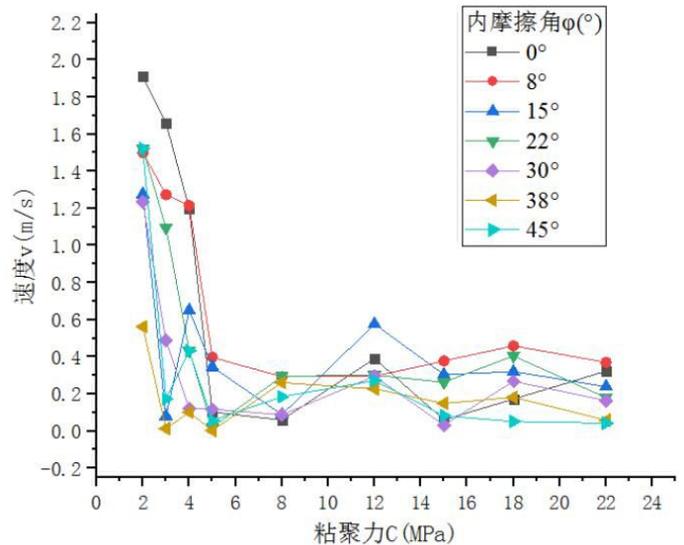


图 5 速度影响

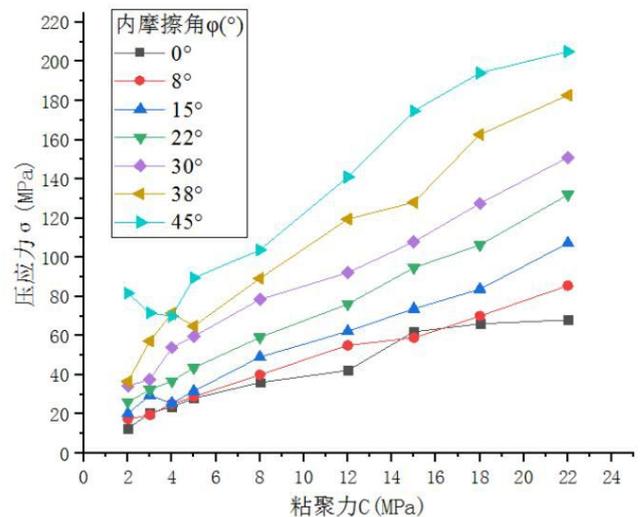


图 6 拉应力影响

② 野外应用点荷载试验初步测试岩石的抗压强度、抗拉强度是可行的,尤其是对于没有条件进行现场、室内试验的初步地质调查来说,较为实用。

③ 赤平投影分析结果表明,边坡最不利滑面稳定性系数为 0.46,处于失稳滑动状态,会产生掉块、落石,与现场调查结果一致。

④ 边坡变形破坏受岩体粘聚力和内摩擦角的影响较大,当抗剪强度参数取值与现场试验接近时,边坡变形趋于稳定,且此时边坡最大拉应力也与点荷载试验结果接近。

#### 参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅.危岩主控结构面强度参数计算方法[J].工程地质学报,2008(01):37-41.
- [2] 杜时贵.岩体结构面的工程性质[D].浙江:浙江大学,1999.
- [3] 刘明维,郑颖人.边坡岩体结构面抗剪强度参数确定方法探讨[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007(05):97-102.
- [4] 李先炜,付学敏.不规则岩块点荷载试验的研究[J].岩土工程学报,1987(01):1-11.
- [5] 雷远见,王水林.基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J].岩土力学,2006(10):1693-1698.