Vol. 27 No. 3 Jun., 2016

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.03.41

基于 Unwedge 程序的地下洞室围岩 力学参数敏感性分析

蒋 兵

(新疆水利水电勘测设计研究院,乌鲁木齐 830000)

摘 要:以某导流隧洞为工程背景,运用 Unwedge 程序以关键块体的重量为目标,对比优选出设计开挖隧洞的合理 洞室走向和开挖断面型式,并以左边墙 6 号块体为研究对象,关键块体的安全系数作为评价指标,对拟定的 6 个影 响块体围岩稳定的力学参数进行敏感性分析,得到黏聚力 Sc 的敏感度最高,其敏感度为 0.922,对工程稳定性影响 最大,内摩擦角 S_f 敏感度最低,敏感度为 0.002,对工程稳定性影响最小。因此,通过围岩力学参数敏感性计算可为 勘察设计人员合理确定参数值精度提供依据。

关键词: 隧洞; Unwedge 程序; 安全系数; 参数敏感性; 围岩力学参数; 地下洞室 中图分类号:TU929 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)03-0209-04

Sensitivity analysis of mechanical parameter of wall rock in underground cavity based on Unwedge program

JIANG Bing

(Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Xinjiang, Urumqi 830000, China)

Abstract: Taking a diversion tunnel as engineering background, the paper applied Unwedge program and took the rock mass of key block as a target to choose the reasonable direction of tunnel and type of excavated section. Meanwhile, it took No. 6 block of left wall as the research object, and safety coefficient as e-valuation indicator, and carried out sensitivity analysis on six parameters and the highest sensitivity of co-hesion Sc is 0.922 which has the greatest influence on engineering stability and the lowest sensitivity of internal friction angle S_f is 0.002 which has the least influence on engineering stability. Therefore, the sensitivity calculation of mechanics parameter for wall rock can provide the basis for designer to reasonably determine the precision of parameter value.

Key words: tunnel; Unwedge program; safety factor; parameter sensitivity; mechanical parameter of wall rock; undergr-ound cavity

1 研究背景

岩体经过多年地质作用生成诸如层面、片理、节 理、软弱夹层以及断层破碎带等^[1]不连续结构面, 在此类岩体中开挖地下洞室不可避免的遇到由于结 构面和开挖临空面互相切割而形成的块体滑落问 题,造成一定的安全隐患。

鉴于此,1985年我国学者石根华和加拿大学者 Goodman 在前人研究的基础上共同提出块体理 论^[2],杨继华等^[3]又以块体理论为基础开发研究出 可视化块体稳定性分析程序 Unwedge,该程序假定 结构面相切形成的块体为四边形,仅考虑块体的重 力及结构面的力学性质,而不考虑地应力作用,另外 假定结构面为平面,岩体的变形仅为结构面的变形, 结构体为刚体,结构面贯穿研究区域,在重力驱动下 计算潜在不稳定楔体的安全系数,并分析支护系统 对楔体稳定性的影响。

朱玉龙等^[4]运用 Unwedge 程序考虑不同结构 面组合、不同洞轴线走向情况下关键块体的大小及 评价围岩稳定性。邵冠慧等^[5]借助 Unwedge 程序 在不同开挖深度、不同隧洞断面形状下计算安全系 数,最后得到马蹄形隧洞的安全系数最大的结论。

收稿日期:2015-10-24; 修回日期:2016-01-11

作者简介:蒋兵(1977-),男,湖南衡阳人,本科,高级工程师,主要从事水利水电工程设计和研究工作。

虽然 Unwedge 程序已经被工程设计人员在地下工 程中得到广泛的应用,但是鲜有将其与影响围岩稳 定的力学参数敏感性分析相结合,围岩力学参数敏 感性分析是进行工程设计较为重要的依据,参数的 准确性直接影响工程的稳定性,而实际工程中又不 可能将所有参数一一通过试验获取,因此需要根据 参数对工程稳定的敏感性进行分析,主次参数排序, 做到哪些参数需要精确测量,而哪些参数可以大致 估算^[6-7]。

本文以某导流洞为工程背景,在应用 Unwedge 程序对洞室轴线和洞型进行优选的基础上,对典型 边墙块体进行参数敏感性分析,从而对高敏感度参 数慎重选取,减小计算误差。

2 地质概况

新疆某导流洞位于莫钦乌拉山北坡低中山地带,南高北低,隧洞位于坝址左岸山体内,区域内大部分为侵蚀构造的中、低山,山顶及山坡基岩裸露, 沟谷为第四系松散沉积物,且隧洞属于傍山隧洞,隧 洞埋深 20~100 m,全长 630 m,岩性单一,相变不 大,主要以硬质凝灰岩为主。根据地质资料,该隧洞 段除局部出现强风化夹层,岩体破碎,结构松散,强 度极低外,大部分岩体被结构面切割呈镶嵌状 - 次 块状,通过统计分析该隧洞段主要发育有 3 组优势 结构面,在 3 组结构面中,取每组结构面参数的平均 值,详见表 1。结构面力学参数见表 2。

表1 结构面参数统计

结构面	倾角/(°)	均值	倾向/(°)	均值	间距/cm	均值	延伸/cm	均值
第1组结构面(J1)	60.01 ~67.48	63.74	74.46~78.39	76.43	12.47 ~19.36	15.92	48.28 ~70.03	59.16
第2组结构面(J2)	53.65 ~ 58.42	56.04	241.04 ~251.92	246.48	24.35 ~ 39.75	32.05	46.58~92.34	69.46
第3组结构面(J3)	72.30~76.26	74.28	312.23 ~ 320.87	316.55	33.39 ~70.48	51.94	32.77 ~120.58	76.68

表 2 结构面抗剪断力学参数

结构面	结构体	黏聚力 c/MPa	内摩擦角/ (°)	f_k'
软弱、泥化夹层	松散体	0.13	18.4	0.15
节理硬化结构面	镶嵌状 – 块状	0.25	24.7	0.23

3 基于 Unwedge 程序洞室优化及参数 敏感性分析

3.1 洞室参数优选^[8]

由表2知结构面黏聚力为0.25 MPa,摩擦角为 24.7°,不考虑结构面抗拉强度,结构面滑动准则为 摩尔库伦滑动,安全系数为2.0(即块体安全系数大 于2.0视为稳定,否则视为失稳),洞室走向分析范 围是0°~180°。依据开挖断面面积一致原则,分别 选取4种典型隧洞开挖形式:圆形半径3m、城门洞 形4m×7.5m(宽×高)、矩形4m×7m(高×宽) 和马蹄形5m×7m(宽×高),通过对4种洞型在不 同洞轴走向下的参数进行优选,得到当洞轴走向 100°、洞形为城门洞时,与结构面组合切割出不稳定 块体质量最小,为该区域导流洞的最优轴线走向和 开挖形态。

3.2 参数敏感性分析

敏感性分析是系统分析中对系统稳定性研究的

一种重要方法^[9]。为了研究结构面各参数对围岩 安全系数的敏感性,设系统特性为安全系数F,选取 内摩擦角 a_f 、黏聚力 a_c 、水平地应力系数 a_s 、地下水 位 a_w 、抗拉强度 a_t 和节理结构面起伏角 a_j 等6个参 数,安全系数为6个因素变量的函数,即 $F = g(a_f, a_c, a_s, a_w, a_t, a_j)$ 。根据上述得到的最优洞型和洞室 走向,选取围岩边墙围岩6号块体作为参数敏感性 分析的研究对象,如图1,基准状态6个参数见表3。



图 1 左边墙 6 号块体示意图

表3 基准参数集

$a_{\!\scriptscriptstyle f}^{*}$ /	a_{c}^{*} /	a*	$a_{\scriptscriptstyle w}^{*}$ /	$a_{\scriptscriptstyle w}^{*}$ /	a_i^* /
(°)	MPa	u_s	m	m	MPa
24.7	0.25	0.15	0.10	0.05	15

在给定的基准状态 $a^* = \{a_f^*, a_c^*, a_s^*, a_w^*, a_t^*, a_t^*$

*a_j** } = {24.7,0.25,0.15,0.1,0.05,15} 下,系统特 性为 *F** = 27.796。分别令各因素在其各自的可能 范围内变化,通过 Unwedge 程序分析由于这些因素 的变动,系统特性 F 偏离基准状态 F* 的趋势和程度,这种分析方法称为敏感性分析,系统特性曲线见图 2。





S

在实际系统中,决定系统特性的各因素往往是 不同的物理量,单位各不相同,无法对各因素之间的 敏感程度进行比较。因此,有必要进行无量纲化处 理。为此引人无量纲形式的敏感度函数和敏感因 子^[10]。即将系统特性 F 的相对误差 $\delta_F = \frac{|\Delta F|}{F}$ 与 参数 a_k 的相对误差 $\delta_{a_k} = \frac{|\Delta a_k|}{a_k}$ 的比值定义为参数 a_k 的敏感度函数 $S_k(a_k)$

$$S_{k}(a_{k}) = \left(\frac{|\Delta F|}{F}\right) / \left(\frac{|\Delta a_{k}|}{a_{k}}\right)$$

$$= \left|\frac{\Delta F}{\Delta a_{k}}\right|^{\frac{a_{k}}{F}} \quad (k = f, c, s, w, t, j) \quad (1)$$

$$\underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{a_{k}}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}} \underbrace{\operatorname{de}^{\left(\frac{|\Delta a_{k}|}{F}\right)}_{\frac{a_{k}}{F}}} \underbrace$$

由式(2) 可绘出 a_k 的敏感函数曲线 $S_k - a_k$,取



图 3 安全系数 S_f - 内摩擦角 a_f 关系曲线

 $a_k = a_k^*$ 时,得 a_k 的敏感因子 S_k^* ,可表示为

$${}^{*}_{k} = S_{k}(a_{k}^{*}) = \left| \left(\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}a_{k}} \right)_{a_{k}=a_{k}^{*}} \right| \frac{a_{k}^{*}}{F^{*}}$$
(3)
$$(k = f, c, s, w, t, j)$$

S^{*} 值越大,表明在基准状态下,*F* 对 *a*^k 越敏感。 通过对 *S*^{*} 的比较,就可以对系统特性对各因素的敏 感性进行对比评价。

以內摩擦角和黏聚力为代表,求解其敏感因子, 观察图 2 特性曲线,用曲线拟合的方法得到 $F = F(a_f)$ 和 $F = F(a_e)$ 函数关系:

$$F(a_f) = 0.0022a_f + 27.746$$
(4)

$$F(a_c) = 102.46a_c + 2.1801$$
(5)

将公式(4)、(5)代入式(2)得:

$$S_f(a_f) = 0.0022 a_f / (0.0022 a_f + 27.746)$$
 (6)

 $S_c(a_c) = 102.46a_c/(102.46a_c + 2.1801)$ (7)

相应的敏感度曲线 $S_f - a_f S_c - a_c$ 如图 3 和 4。 从图 3 和图 4 可以看到,敏感度函数 S_f 虽然略

有增长态势,但是增加幅度很小,说明安全系数对内



图 4 安全系数 S_c - 黏聚力 a_c 关系曲线

2016 年

摩擦角的敏感度低,将基准值 $a_f^* = 24.7^\circ$ 代入式 (6)中得敏感因子 $S_f = 0.02$;随着 a_c 的增大,敏感 度函数 S_c 值趋于 1,说明安全系数对黏聚力很敏感, 将基准值 $a_c^* = 0.25$ MPa代入式(7)得 $S_c = 0.922_\circ$ 限于篇幅,其他参数不在赘述,只将计算出的敏感度 因子列于表 4。

表4 各参数的敏感因子

S_{f}	S_{c}	S_s	S_w	S_t	S_{j}
0.002	0. 922	0. 088	0.032	0.076	0.010

以该导流洞左边墙围岩6号块体的安全系数作 为衡量围岩稳定性优劣指标,基于表4中所示的基 准参数集,得到结论如下:影响左边墙围岩6号块体 稳定性的最敏感因素是黏聚力 a_e,其敏感度为 0.922,也就是说当 a_e 的值与实际情况相差10%时, 6号块体安全系数计算结果与实际安全系数相差 9.22%。内摩擦角 a_f 对6号块体的稳定性最不敏 感,其敏感度为0.002,即当 a_f 与实际相差 10%时,6 号块体安全系数计算结果与实际安全系数相差 0.02%。因此,在选择参数时,应当特别注意 a_e 的 取值,尽量与实际值吻合,否则会引起较大的偏差。

4 结 论

(1)借助 Unwedge 程序在对某导流洞进行洞轴 走向和洞型优化的基础上进一步提出影响块体滑落 稳定性的力学参数,并以块体安全系数为目标,分析 各参数对块体稳定性的影响程度。

(2)为了将各个力学参数对围岩块体滑落安全 系数的影响程度进行对比分析,提出采用系统分析 理论进行敏感性分析,得到的结果能为实际工程参

(上接第208页)

- [6] 钱晓东,秦嘉政.小江断裂带及周边地区强震危险性分析[J]. 地震研究,2008,31(4):354-361.
- [7] 沈娅宏,张建国,毛燕,等.小江断裂带及其周边地区构造应力场特征[J].云南大学学报(自然科学版),2012,34(3):308-314.
- [8] 闻学泽,杜方,易桂喜,等.川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J].地球物理学报,2013,56 (10):3361-3372.
- [9] 杜平山.则木河断裂带的演化历史及变形机制[J].四川 地震,2000(1):65-79.
- [10] 韩渭宾,蒋国芳.大凉山断裂带与安宁河—则木河断裂 带的地震活动性分析[J]. 地震研究,2005,28(3):207

数重要性选择提供理论依据。

(3)需要指出的是,文中敏感性分析的结果只 对该研究区段才具有借鉴意义,对于其他结构面以 及力学参数不同的区段或者其他工程,文中结论并 不具有普适性,应根据实际情况应用本文方法进行 相关参数敏感性分析,才能得到符合实际的结果。

参考文献:

- [1] 刘锦华, 吕祖珩. 块体理论在工程岩体稳定性分析中的 应用[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [2] 刘义虎,张志龙,付 励,等. Unwedge 程序在画峰山隧道 围岩块体稳定性分析中的应用[J]. 中南公路工程, 2006,31(1):31-33.
- [3] 杨继华,郭卫新,姚阳,等. 基于 Unwedge 程序的地下洞 室块体稳定性分析[J]. 资源环境与工程,2013,27(4): 379-381.
- [4] 朱玉龙,徐娟花. Unwedge 程序在隧道围岩稳定性分析 中的应用[J].工程地质计算机应用,2012,(4):1-6.
- [5] 邵冠慧, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 基于块体理论安全系数的隧 道优化设计[J]. 工程地质学报. 2010, 18(4):581-585.
- [6] 聂卫平,徐卫亚,周先齐.基于三维弹塑性有限元的洞 室稳定性参数敏感性灰关联分析[J].岩石力学与工程 学报,2009,28(增2):3885-3893.
- [7] 王者超,李术才,吕晓庆,等.地下水封石油洞库施工期 围岩完整性参数敏感性分析[J].岩土力学,2011,32(增 2):488-495.
- [8] 郝杰,侍克斌.基于块体和松动压力理论的隧洞围岩稳定 性分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(3):626-631.
- [9] 于学馥,郑颖人,刘怀恒.地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭出版社,1983.
- [10] 章 光,朱维申.参数敏感性分析与试验方案优化[J]. 岩土力学,1993,14(1):51-58.

-212.

- [11] 王 虎,冉勇康,李彦宝.小型拉分盆地的生长与走滑断 层的位移速率——以青藏高原东南缘则木河断裂带为 例[J].地震研究,2011,33(4):818-827.
- [12] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版 社,2013.
- [13] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [14] 廖秋林,曾钱帮,刘彤,等.基于ANSYS平台复杂地质体FLAC3D模型的自动生成[J].岩石力学与工程学报,2005,24(6):1010-1013.