

# 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究

巫德斌,徐卫亚

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要** 将边坡开挖弱化因子引入广义 Hoek-Brown 强度准则,并对其进行定量表述,以研究爆破开挖对边坡岩体力学参数的影响程度.工程实例表明:开挖对不同边坡岩体的力学参数的影响程度不同,对坚硬岩体的影响比对软弱岩体的影响大;开挖弱化因子与变形模量、黏结力和内摩擦角呈线性相关,与抗拉强度呈指数相关.

**关键词** 边坡开挖;广义 Hoek-Brown 强度准则;开挖弱化因子;岩体力学参数

**中图分类号** :TU457      **文献标识码** :A      **文章编号** :1000-198X(2005)01-0089-05

Hoek-Brown(HB)强度准则综合考虑了岩体结构、岩块强度、应力状态等多种因素的影响,不仅能更好地反映岩体的非线性破坏特征,而且能解释低应力区和拉应力区对强度的影响,符合边坡岩体的变形特征和破坏特征,由该准则所估算的岩体力学参数可为最终确定边坡岩体力学参数提供重要依据.但该准则只适用于能看作均质和各向同性的完整岩体和严重节理化岩体,并且提出扰动和未扰动岩体后,只是经验地判断其分界值,没有定量分析扰动程度,限制了 HB 强度准则在实际工程中的应用.本文把边坡开挖弱化因子引入该准则,以探讨边坡开挖后的岩体力学参数的变化规律.

## 1 广义 Hoek-Brown 强度准则

HB 强度准则<sup>[1]</sup>,从 1980 年提出以来,经过多次改进,已由根据 Bieniawski 的 RMR 估计材料常数  $m$  和  $s$  值,发展到根据 Hoek<sup>[2,3]</sup>提出的地质强度指标(GSI)估计  $m$  和  $s$  值.GSI 根据岩体结构、岩体中岩块的嵌锁状态和岩体中不连续面质量,综合各种地质信息进行估值,用以评价不同地质条件下的岩体强度,突破了 RMR 法中 RMR 值在质量极差的破碎岩体结构中无法提供准确值的局限性,使得该准则从适用于坚硬岩体强度估计扩展到适用于极差质量岩体强度估计.广义 HB 强度准则<sup>[4]</sup>关系表达式为

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中: $\sigma'_1, \sigma'_3$ ——破坏时的最大和最小有效主应力,以压为正; $\sigma_{ci}$ ——岩块单轴抗压强度; $m_b$ ——岩体 HB 常数,与完整岩石的  $m_i$  相关; $s, a$ ——取决于岩体特性的系数.

开挖爆破的不断震动作用会损伤或破坏边坡一定深度范围内的岩体及结构面,即产生一定范围的扰动区,因此扰动区与边坡岩体的开挖爆破施工是紧密联系在一起.扰动区形成的内因是岩体为非连续性的地质体,被各种结构面切割,外因则为开挖引起的地应力松弛及爆破震动,表现形式为岩块沿原有结构面的张裂和错动,岩体中结构面的力学特性发生本质的变化,结构面弱化了岩体质量,岩体完整性下降,进而弱化了岩体力学参数.岩体在未扰动区的力学特性与开挖扰动区的力学特性有本质的区别,其力学参数有很大差异.可以把爆破开挖后的边坡岩体分成扰动区岩体和未扰动区岩体,边坡爆破开挖影响范围内岩体应属于扰动区岩体,深部岩体为未扰动区岩体.在边坡开挖扰动区仍采用未扰动状态的岩体力学参数会出现很大误差,而且在边坡设计过程中使用未扰动岩体 HB 准则,会导致岩体力学参数取值偏高<sup>[5,6]</sup>.因此,在边坡工程稳定分析中必须考虑开挖爆破对边坡岩体力学参数的影响.

为了减小对边坡扰动区岩体的作用, Sonmez 等<sup>[7]</sup>引进 Kenorski 等<sup>①</sup>提出的开挖方法影响系数  $d_f$ , 并推导出参数  $m_b$  和  $s$  的计算公式:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right) \quad b_m \in (14, 28) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right) \quad b_s \in (6, 9) \quad (3)$$

其中

$$b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 34(1 - d_f)}\right) + 28 \quad (4)$$

$$b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 34(1 - d_f)}\right) + 9 \quad (5)$$

式(2)~(5)比较复杂, 不便于工程应用. 为此, 根据开挖方法影响系数的概念, 引入边坡开挖弱化因子 (excavation softening factor)  $D_e$ :

$$D_e = 1 - \left(\frac{V_{pe}}{V_{po}}\right)^2 \quad (6)$$

其中  $V_{po}$  和  $V_{pe}$  分别为未扰动(开挖前)和扰动后岩体的纵波速.

$D_e$  变化范围为 0~1. 当  $V_{po} = V_{pe}$  (即岩体未受任何扰动)时,  $D_e = 0$ ; 当  $V_{pe} \ll V_{po}$  (即岩体遭受强烈扰动)时,  $D_e \approx 1$ . 因此,  $D_e$  是用来表示边坡岩体遭受开挖扰动(爆破破坏和应力松弛)程度的参数.

现利用开挖弱化因子  $D_e$  对式(2)~(5)进行简化, 则可得  $m_b$ ,  $s$  和  $a$  的边坡开挖弱化因子表达式

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D_e}\right) \quad (7)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D_e}\right) \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-0.023GSI} - e^{-2.3}) \quad (9)$$

式中系数  $s$  和  $a$  不需要以  $GSI = 25$  作为分界值分别进行计算. 其中  $a$  的变化范围为 0.5~0.65, 与文献[2, 8]中  $a$  的变化范围一致.

## 2 边坡岩体力学参数估算

Hoek 等<sup>[9]</sup>建立了  $\sigma_{ci} \leq 100$  MPa 时岩体变形模量  $E_m$  (单位为 GPa) 与  $GSI$  的关系式

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (10)$$

引入开挖弱化因子  $D_e$  后, 可得岩体变形模量与  $GSI$  和  $D_e$  的关系式

$$\begin{cases} E_m = \left(1 - \frac{D_e}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} & (\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}) \\ E_m = \left(1 - \frac{D_e}{2}\right) 10^{(GSI-10)/40} & (\sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (11)$$

岩体单轴抗压强度  $\sigma_{cm}$ , 假定式(1)中  $\sigma'_3 = 0$  就可求得, 即

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a \quad (12)$$

岩体抗拉强度  $\sigma_t$  为

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (13)$$

式(13)是在假定式(1)中  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$  的情况下求得的, 为双轴拉伸的情况. 对于脆性岩体材料, 单轴抗拉强度等于双轴抗拉强度<sup>[9]</sup>.

① KENORSKI F S, CUMMING R A. Rock mass classification for block caving mine drift support. Proc 5th Int Rock Mech ISRM, 1983. 51-63.

用广义 HB 强度准则估算岩体抗剪强度参数(黏结力  $c'$  和内摩擦角  $\varphi'$ )的方法有 2 种:一是根据式(1)所给定的  $\sigma'_1$  与  $\sigma'_3$  的关系绘制摩尔包络线,由此包络线就可得到岩体抗剪强度参数  $c'$  和  $\varphi'$ ;二是根据式(1)拟合出真实的摩尔包络线方程,由此方程就可确定岩体瞬时抗剪强度参数  $c'_i$  和  $\varphi'_i$ 。

方法 1:HB 准则与摩尔包络线之间关系的求解。首先用式(1)生成一系列  $\sigma'_1$  和  $\sigma'_3$  的数据点,以模拟现场试验,然后在  $\sigma_1 < \sigma'_3 < \sigma'_{3max}$  条件下(其中  $\sigma'_{3max}$  为 HB 准则与 MC 准则关系限制应力的上限值),对根据式(1)得出的曲线进行线性拟合(图 1),最后推导出岩体  $\varphi'$ ,  $c'$  的表达式:

$$\varphi' = \arcsin\left(\frac{3\xi}{(1+a)(2+a)+3\xi}\right) \quad (14)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}]}{am_b(1+a)(2+a)\sqrt{1+\frac{6\xi}{(1+a)(2+a)}}} \quad (15)$$

其中

$$\xi = am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1} \quad (16)$$

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (17)$$

通过对边坡圆弧破坏面的分析,可得出关系式<sup>①</sup>

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72\left(\frac{\sigma'_{cm}}{\rho g H}\right)^{-0.91} \quad (18)$$

式中: $\rho$ ——岩体密度; $g$ ——重力加速度; $H$ ——边坡高度; $\sigma'_{cm}$ ——岩体整体强度,当  $\sigma_1 < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$  时,有

$$\sigma'_{cm} = \frac{\sigma_{ci}[m_b+4s-a(m_b-8s)](m_b/4+s)^{a-1}}{(1+a)(2+a)} \quad (19)$$

方法 2:广义 HB 强度准则中岩体破坏面上广义正应力  $\sigma_n^*$  及剪应力  $\tau^*$  的表达式为

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho_a} = \cos\varphi'_i \left(\frac{1-\sin\varphi'_i}{\sin\varphi'_i}\right)^{\frac{a}{1-a}} \quad (20)$$

$$\sigma_n^* = \frac{\sigma_n}{\rho_a} + \zeta_a = a \left(1 + \frac{\sin\varphi'_i}{a}\right) \left(\frac{1-\sin\varphi'_i}{\sin\varphi'_i}\right)^{\frac{1}{1-a}} \quad (21)$$

式中: $\varphi'_i$ ——给定正应力  $\sigma_n$  及剪应力  $\tau$  时的瞬时内摩擦角(instantaneous friction angle); $\rho_a = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left(\frac{am_b}{2}\right)^{\frac{a}{1-a}}$ ;

$$\zeta_a = as \left(\frac{am_b}{2}\right)^{\frac{1}{a-1}}$$

若已知  $\sigma_n/\sigma_{ci}$ ,  $m_b$ ,  $s$  和  $a$ , 则可通过式(20)和(21)计算出  $\varphi'_i$  和  $\tau$ , 然后根据式(22)就可以计算出瞬时黏结力  $c'_i$ 。

$$c'_i = \tau - \sigma_n \tan\varphi'_i \quad (22)$$

### 3 工程实例

某水电站左岸高边坡山势总体倾向下游,边坡比较低缓,相对高差 130~270 m,微地貌形态呈阶梯状,以厚至巨厚层状的砂岩在地表形成阶梯状陡坎,相对软弱岩石形成缓坡地形,整体上沿线岸坡地形比较单一,自然边坡走向 282°~40°,临江坡高 105~305 m,边坡长 1300 m,最大开挖高程 425 m,最大坡高约 150 m,左岸

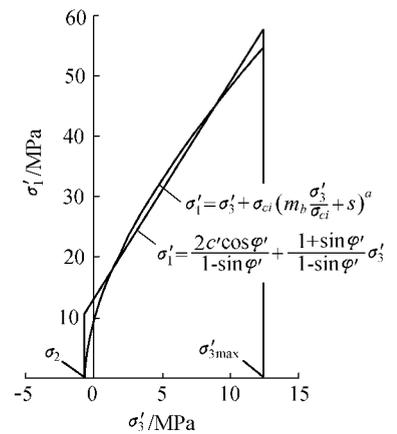


图 1 HB 准则和 MC 准则的最大主应力与最小主应力关系

Fig.1 Relationships between major and minor principal stresses for HB and MC criteria

① HOEK E, CARRANZA-TORRES C T, CORKUM B. Hoek-brown failure criterion—2002 edition. Proc North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto in July 2002.

垂直升船机段将形成高约 110m 的开挖边坡,边坡稳定分析与处理设计是工程需要研究的重要问题之一.高边坡区地层出露基岩为三叠系上统须家河组的厚至巨厚层石英砂岩  $T_3^{2-6}$ ,薄至中厚层粉细砂岩  $T_3^3$  夹 7 层分布比较稳定的煤层  $T_3^3$ (煤),厚至巨厚层中细砂岩  $T_3^4$ ,侏罗系中下统自流井组的粉砂质泥岩  $J_1^{3,5,7}$  夹 3 层厚至巨厚层石英砂岩  $J_1^{2,4,6}$ .

本文结合边坡研究区域的实际工程地质条件,对边坡岩体运用广义 HB 准则进行了岩体力学参数研究,并利用岩石的单轴抗压强度  $\sigma_{ci}$ 、岩体强度指数  $GSI$ 、完整岩石的  $m_i$  值预测了 HB 准则参数  $m_b$ ,  $s$  和  $a$ ,最后据此参数计算出了自然边坡区域各种岩体的力学参数,如表 1 所示.

表 1 自然边坡岩体的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of natural slope rock mass

| 岩性            | $\sigma_{ci}/\text{MPa}$ | $m_i$ | $GSI$ | $E_m/\text{GPa}$ | $-\sigma_t/\text{MPa}$ | 方法 1                  |                   | 方法 2                       |                     |                            |                     |
|---------------|--------------------------|-------|-------|------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
|               |                          |       |       |                  |                        | $\varphi' / (^\circ)$ | $c' / \text{MPa}$ | $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ |                     | $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$ |                     |
|               |                          |       |       |                  |                        |                       |                   | $\varphi'_i / (^\circ)$    | $c'_i / \text{MPa}$ | $\varphi'_i / (^\circ)$    | $c'_i / \text{MPa}$ |
| $J_1^{2,4,6}$ | 66.4                     | 18    | 67.18 | 21.91            | 0.311                  | 40.71                 | 5.08              | 49.23                      | 3.10                | 44.18                      | 4.54                |
| $J_1^{3,5,7}$ | 18.7                     | 6     | 61.69 | 8.48             | 0.173                  | 25.91                 | 1.00              | 28.32                      | 1.26                | 23.26                      | 1.87                |
| $T_3^4$       | 66.4                     | 18    | 66.71 | 21.32            | 0.300                  | 40.57                 | 5.05              | 49.28                      | 3.03                | 44.12                      | 4.48                |
| $T_3^3$       | 40.7                     | 9     | 59.86 | 11.25            | 0.219                  | 32.49                 | 2.32              | 37.67                      | 1.86                | 32.20                      | 2.76                |
| $T_3^3$ (煤)   | 30.6                     | 8     | 39.11 | 2.96             | 0.039                  | 25.50                 | 1.18              | 28.50                      | 1.08                | 23.31                      | 1.68                |
| $T_3^{2-6}$   | 66.4                     | 18    | 70.26 | 26.16            | 0.392                  | 41.61                 | 5.35              | 49.82                      | 3.37                | 45.04                      | 4.80                |

利用表 1 中的边坡岩体力学参数,计算出了不同  $D_e(0 \sim 1)$  值对应的边坡岩体的变形模量  $E_m$ 、抗拉强度  $\sigma_t$ 、黏结力  $c'$  和内摩擦角  $\varphi'$ ,同时得出了  $E_m$ ,  $c'$  和  $\varphi'$  与开挖弱化因子  $D_e$  之间的相关关系(相关系数均大于 0.97),见图 2~图 5.由此可知: $D_e$  对  $\varphi'$  的影响,在软弱和坚硬岩体中为同等速率的降低; $D_e$  对  $E_m$  和  $c'$  的影响,在坚硬岩体中的降低速率大于在软弱岩体中的降低速率.本文还根据广义 HB 准则分析了  $\sigma_t$  与  $D_e$  之间的关系.分析结果表明: $\sigma_t$  与  $D_e$  呈指数相关,相关系数均大于 0.99; $D_e$  对  $\sigma_t$  的影响,在坚硬岩体中的降低速率大于在软弱岩体中的降低速率.

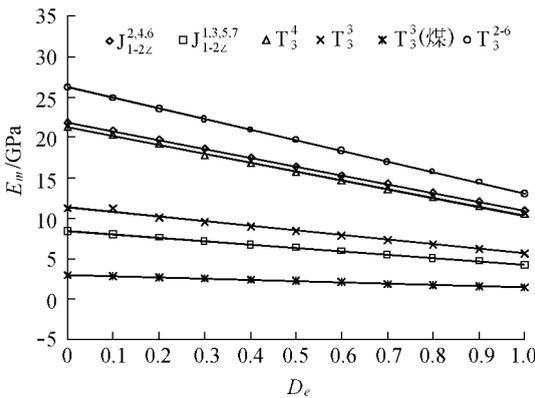


图 2 开挖弱化因子与边坡岩体变形模量关系曲线

Fig.2 Deformation modulus of slope rock mass vs. excavation softening factor

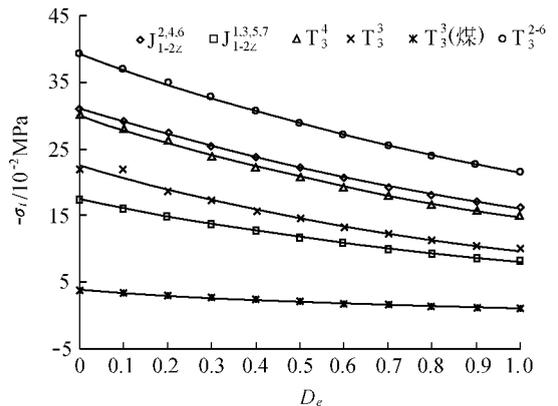


图 3 开挖弱化因子与边坡岩体抗拉强度关系曲线

Fig.3 Tensile strength of slope rock mass vs. excavation softening factor

### 4 结 语

为了考虑爆破开挖对岩体力学参数的影响,本文把边坡开挖弱化因子引入广义 HB 强度准则,并对其进行了定量表述.工程实例研究表明: $E_m$ ,  $c'$  和  $\varphi'$  与  $D_e$  线性相关, $\sigma_t$  与  $D_e$  指数相关;开挖对不同岩体的力学参数的影响程度是不同的,一般而言,对坚硬岩体的影响大于对软弱岩体的影响.

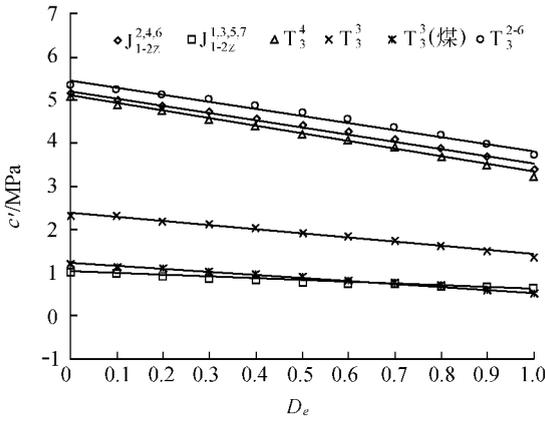


图 4 开挖弱化因子与边坡岩体黏结力关系曲线

Fig.4 Cohesion of slope rock mass vs. excavation softening factor

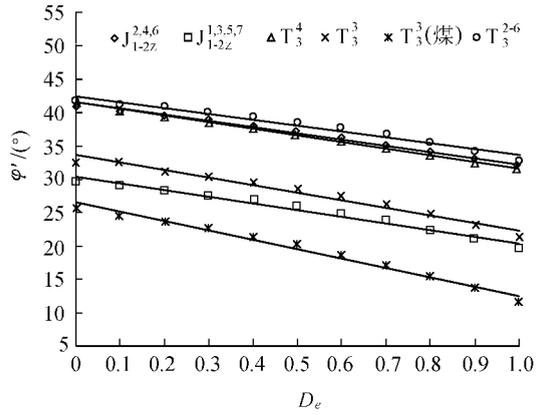


图 5 开挖弱化因子与边坡岩体内摩擦角关系曲线

Fig.5 Internal friction angle of slope rock mass vs. excavation softening factor

参考文献 :

[ 1 ] HOEK E , BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[ J ]. J Geotech & Geoenv Eng , 1980 , 10( 9 ) : 1013—1035.  
 [ 2 ] HOEK E , WOOD D , SHAS S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[ A ]. In : HUDSON J , eds. Proc Rock Characterization , Symp Int Soc Rock Mech : Eurock '92[ C ]. London : Institution of Mining and Metallurgy , 1992. 209—214.  
 [ 3 ] HOEK E. Strength of rock and rock masses[ J ]. ISRM News Journal , 1994 , ( 2 ) : 4—16.  
 [ 4 ] HOEK E. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion[ J ]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr , 1990 , 1( 3 ) : 227—229.  
 [ 5 ] SJÖBERG J , SHARP J C , MALOREY D J. Slope stability in surface mining[ M ]. Littleton : Society for Mining , Metallurgy and Exploration , Inc , 2001. 183—202.  
 [ 6 ] PIERCE M , BRANDSHAUG T , WARD M. Slope stability in surface mining[ M ]. Littleton : Society for Mining , Metallurgy and Exploration , Inc , 2001. 239—250.  
 [ 7 ] SONMEZ H , ULUSAY R. Modifications to the geological strength index( GSI) and their applicability to stability of slopes[ J ]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr , 1999 , 3( 6 ) : 743—760.  
 [ 8 ] HOEK E , KAISER P K , BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[ M ]. Rotterdam : Balkema , 1995. 34—76.  
 [ 9 ] HOEK E , BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion—a 1988 update[ A ]. In : CURRAN J H , eds. Proc 15th Canadian Rock Mech Symp[ C ]. Toronto : University of Toronto Press , 1988. 31—38.

## Hoek-Brown criterion-based study on mechanical parameters of excavated slope rock masses

WU De-bin , XU Wei-ya

( Research Institute of Geotechnical Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China )

**Abstract** : For discussion of the influences of explosive excavation on the mechanical parameters of rock masses , the slope excavation softening factor was introduced into the general Hoek-Brown strength criterion , and a formula for its calculation was also given. Practices show that the degree of the influence of slope excavation on the mechanic parameters varies with the kind of rock masses , the influence on the sound rock mass being greater than that on the soft one , and that the excavation softening factor is of linear relationship with the deformation modulus , cohesion and internal friction angle , and is of exponential relationship with tensile strength.

**Key words** : slope excavation ; general Hoek-Brown strength criterion ; excavation softening factor ; mechanical parameter of rock mass