

## 基于正交试验的隧道开挖面位移释放分析\*

苏永华<sup>†</sup>, 孙旺, 方砚兵

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对目前关于位移释放系数的计算方法比较复杂的问题,基于二次回归正交组合试验设计方法,提出了位移释放系数公式构建方法,应用该方法对静水应力场中圆形隧道进行了一系列数值试验,建立了考虑多个因素的开挖面位移释放系数拟合公式,比较了各影响因素的敏感性大小,通过数值算例和工程实例分析,初步验证了该方法的有效性.研究表明:对于不同级别岩体,同一因素对开挖面位移释放系数的影响程度不一;地应力水平、岩体扰动、地质强度指标、H-B常数和泊松比对开挖面位移释放系数的影响较大,而岩石单轴抗压强度和变形模量影响较小.

**关键词:**位移释放系数;纵向变形曲线;正交设计;回归分析

**中图分类号:**TU458

**文献标志码:**A

## Analysis on Displacement Release of Tunnel Face Based on Orthogonal Tests

SU Yonghua<sup>†</sup>, SUN Wang, FANG Yanbing

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The existing computational methods of displacement release coefficient are too complex. Based on quadratic regression orthogonal design, a construction method of displacement release coefficient formula was given, and a series of numerical experiments of a circular tunnel in hydrostatic stress field were carried out by the above method. The regression equation of displacement release coefficient was established, and the sensitivity of parameters was determined. Through analysis of numerical examples and a case history, the equation was proved to be reasonable and effective. The results indicate that for different levels of surrounding rock, the effect of the same factor on the displacement release coefficient of the tunnel face is different. Stress level, disturbance of rock mass, GSI, H-B material constant and Poisson's ratio have a great influence on the displacement release of tunnel face, while the intact rock strength and deformation modulus have little influence.

**Key words:** displacement release coefficient; longitudinal displacement profiles; orthogonal design; regression analysis

在应用收敛-约束法进行隧道支护结构设计时, 确定支护设置时隧道洞壁已经产生的前期位移量,

\* 收稿日期:2016-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578232,51378195), National Natural Science Foundation of China(51578232,51378195)

作者简介:苏永华(1966—),男,湖南涟源人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: yong\_su1965@126.com

对支护结构的设计至关重要.前期位移量可通过位移释放系数得到.位移释放系数即为某一时刻隧道某处的位移量与该处能达到的最大位移量的比值.在隧道工程中,沿隧道纵向(轴线方向)洞壁各点位移释放系数与到开挖面的距离的关系曲线称为纵向变形曲线(Longitudinal Displacement Profiles, LDP).

由于隧道开挖面附近呈现复杂的三维力学状态,理论分析困难,故目前关于隧道前期位移量与位移释放系数的研究多是通过现场实测和数值模拟进行.Carranza-Torres 等<sup>[1]</sup>和李煜龄等<sup>[2-3]</sup>根据现场监测资料,提出了关于 LDP 的拟合公式;周建春等<sup>[4]</sup>考虑时间效应,采用 BP 神经网络算法对隧道围岩变形监测数据进行了拟合;方勇等<sup>[5]</sup>通过室内模型试验对上下台阶法隧道和单侧壁导坑法隧道的拱顶位移进行了对比分析.数值模拟方面,Unlu 等<sup>[6]</sup>给出了弹性条件下开挖面位移释放系数与泊松比的关系式;Panet<sup>[7]</sup>、李煜龄等<sup>[8]</sup>基于三维弹性有限元分析给出了 LDP 拟合公式;Vlachopoulos 等<sup>[9]</sup>考虑塑性区范围的影响,采用三维有限差分法得出了 LDP 拟合公式;张平等<sup>[10]</sup>给出针对城门形隧洞上下台阶开挖工况的 LDP 拟合公式;吴顺川等<sup>[11]</sup>提出了基于岩体基本质量指标(BQ)的 LDP 拟合公式.然而上述研究中,根据特定工程监测资料得出的结论难以适用于其他情况;基于数值模拟得出的拟合公式不是考虑因素太少就是过于复杂,限制了该类方法的使用.因此,应充分考虑各个因素的影响,建立一个较简单的位移释放系数公式,以适应工程需要.

本文针对开挖面位移释放系数,基于二次回归正交试验设计,提出了位移释放系数公式构建方法,以静水应力场下的圆形隧道为例详细说明了该方法的应用过程.利用数值模拟技术,考虑多个因素的影响,探讨了各因素对开挖面位移释放系数的影响程度,得到了位移释放系数的回归方程,通过数值算例和工程实例分析,初步验证了该方程的准确性.

## 1 纵向变形曲线与位移释放系数

纵向变形曲线是收敛-约束法的重要组成部分,描述了隧道开挖一段距离后开挖面前后洞壁收敛沿隧道纵向的变化情况,反映了开挖面的空间约束效应.图 1 为纵向变形曲线示意图,图中  $x$  表示离开

开挖面的距离( $x < 0$  表示该位置在开挖面前方, $x > 0$  表示在开挖面后方), $u_r$  表示该位置隧道洞壁收敛位移.从图 1 可以看到,隧道开挖后,开挖面前方岩体已被扰动并产生位移,开挖面上洞壁收敛位移为  $u_0$ ,开挖面后方洞壁收敛位移急剧增大后趋于稳定,该稳定值即为隧道洞壁能达到的最大位移  $u_{r,max}$ ,开挖面位移释放系数  $u_0^*$  由下式得到:

$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{r,max}} \quad (1)$$

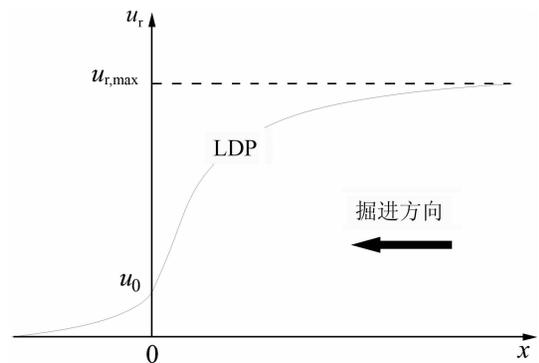


图 1 LDP 示意图

Fig.1 Longitudinal displacement profiles

## 2 基于回归正交的位移释放分析

回归正交组合试验设计是将正交设计和回归分析结合起来的一种试验设计方法,它能在因素的试验范围内选择适当的试验点,用较少的试验建立起一个精度高、统计性质好的回归方程,还能够解决试验优化问题.

### 2.1 位移释放系数公式构建方法

本文给出一种基于二次回归正交组合设计的位移释放系数公式构建方法,设计者可根据实际情况改变围岩参数范围、隧道洞形、开挖方式、应力类型等条件,得到更具针对性的、更加精确的位移释放系数公式.具体步骤如下:

- 1) 确定开挖面位移释放的影响因素;
- 2) 建立数值模型;
- 3) 因素水平编码:确定各影响因素的变化范围和零水平试验次数,对因素水平进行编码,得到规范变量;
- 4) 确定试验方案:根据因素数选择合适的正交表,确定二水平试验方案,将二次项中心化处理,得到具有正交性的二次回归正交组合设计方案;
- 5) 试验方案实施;
- 6) 回归方程的建立和显著性分析,确定各影响

因素敏感性大小,得出关于开挖面位移释放系数的回归方程.

### 2.2 开挖面位移释放影响因素

基于广义 Hoek-Brown 准则,对该准则中各个参数对位移释放系数的影响进行分析.

Hoek-Brown 准则由 E. Hoek 和 E. T. Brown 于 1980 年首次提出,经多次补充与改进,已成为现今影响最大、应用最广的岩石强度准则.它反映了岩体的非线性破坏特征,以及岩石强度、结构面、应力状态对岩体强度的影响,而且弥补了 Mohr-Coulomb 强度准则的不足,能够解释低应力区、拉应力区和最小主应力对岩体强度的影响,并适用于破碎岩体和各向异性岩体<sup>[12]</sup>.其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为岩体的最大和最小有效主应力;  $\sigma_{ci}$  为完整岩石的单轴抗压强度;  $m_b, s, a$  为反映岩体破碎程度和节理特征的常数,由式(3)确定.

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \\ s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $m_i$  为反映岩石软硬程度的 H-B 常数,取值范围为 0.001~25; GSI 为地质强度指标 (Geological Strength Index);  $D$  为考虑爆破破坏和应力释放对节理岩体扰动程度的岩体扰动参数,取值从非扰动岩体的  $D=0$  到扰动性很强岩体的  $D=1$ .

在工程实际中,不仅要对上述参数做一个估计,还要对岩体的整体质量行为做一个判断,为此 E. Hoek 和 E. T. Brown 引入岩体整体强度  $\sigma_{cm}$  的概念,具体表达式如下:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) (m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (4)$$

考虑 3 个方面 7 个因素及其相互作用对开挖面位移释放的影响.1) 岩石基本参数:泊松比  $\nu$ 、变形模量  $E_m$ 、单轴抗压强度  $\sigma_{ci}$ ; 2) Hoek-Brown 准则参数:  $m_i, GSI, D$ ; 3) 应力水平:以初始应力  $\sigma_0$  与岩体整体强度  $\sigma_{cm}$  的比值  $\sigma_0/\sigma_{cm}$  表示.

为保证所选取岩体参数的代表性,以 Hoek 等<sup>[13]</sup>根据大量工程实践总结得到的典型岩体参数为基础进行分析,具体数值见表 1.根据表 1 将岩体分为 poor-average(P-A)和 average-good(A-G)两个

级别,并以 P-A 级别岩体为例详细说明位移释放系数公式构建方法的应用过程.

表 1 典型岩体参数

Tab.1 Typical parameters of rock mass

岩体	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	$m_i$	GSI	$\sigma_{cm}/\text{MPa}$	$E_m/\text{MPa}$	$\nu$
差	20	8	30	1.7	1 400	0.3
一般	80	12	50	13	9 000	0.25
好	150	25	75	64.8	42 000	0.2

### 2.3 数值模型建立

数值试验采用有限差分软件 FLAC3D 进行计算.假设一处于静水应力场的圆形无支护隧道,岩体均质且各项同性,隧道开挖不考虑地下水及时间的影响.隧道半径  $R=6\text{ m}$ ,采用全段面开挖,进尺为 1 m,模拟范围径向取 6 倍半径,纵向取 20 倍半径.由于几何形状与边界条件的对称性,取 1/4 模型进行计算.模型尺寸及边界条件如图 2 所示.

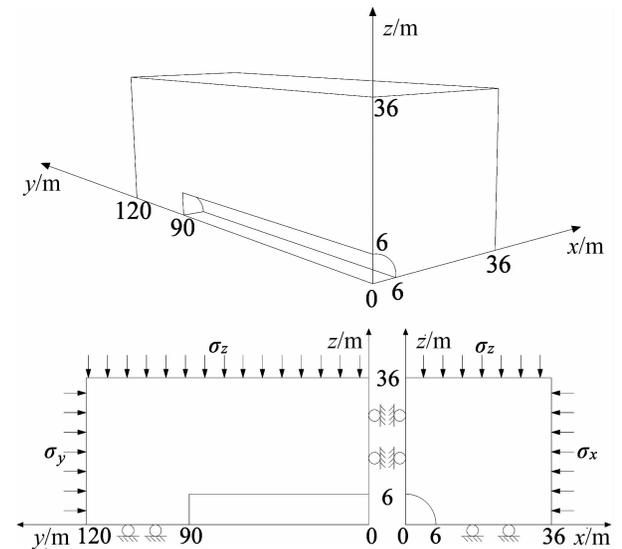


图 2 模型尺寸及边界条件

Fig.2 Geometry and boundary conditions of the model

### 2.4 因素水平编码

分别以表 1 中一般岩体和差岩体的参数作为各参数的上下限,  $\sigma_0/\sigma_{cm}$  取值范围从 1~5,  $D$  取值范围从 0~1.各因素水平编码见表 2.

### 2.5 二次回归正交组合试验方案

选用正交表  $L_{16}(2^{15})$ ,二水平试验次数为 16,星号试验次数为 14,零水平试验次数为 1,总试验次数为 31.将  $Z_1 \sim Z_7$  分别置于正交表的第 1,2,4,8,11,13,14 列,将交互作用  $Z_4 Z_5, Z_4 Z_6, Z_5 Z_6, Z_3 Z_6, Z_3 Z_7, Z_3 Z_4, Z_3 Z_5$  分别置于第 3,5,6,9,10,12,15 列,第 7 列空白.该试验方案的回归方程为:

$$u_0^* = a + \sum_{j=1}^7 b_j Z_j + \sum_{j=1}^7 b_{jj} Z_j^2 + b_{45} Z_4 Z_5 + b_{46} Z_4 Z_6 + b_{56} Z_5 Z_6 + b_{36} Z_3 Z_6 + b_{37} Z_3 Z_7 + b_{34} Z_3 Z_4 \quad (5)$$

式(5)有 21 项未知系数,小于试验次数,试验方案可行.二次回归正交组合试验方案见表 3.

表 2 因素水平编码

Tab.2 The codes and levels of factors

规范变量 $Z_j$	自然变量 $X_j$						
	$n$ $X_1$	$E_m/\text{MPa}$ $X_2$	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$ $X_3$	$m_i$ $X_4$	GSI $X_5$	$\sigma_0/\sigma_{cm}$ $X_6$	$D$ $X_7$
上星号臂 $\gamma$	0.300	9 000.000	80.000	12.000	50.000	5.000	1.000
上水平 1	0.289	7 345.680	66.940	11.129	45.647	4.129	0.782
零水平 0	0.275	5 200.000	50.000	10.000	40.000	3.000	0.500
下水平 -1	0.261	3 054.320	33.060	8.871	34.353	1.871	0.218
下星号臂 $-\gamma$	0.250	1 400.000	20.000	8.000	30.000	1.000	0.000
变化间距	0.014	2 145.680	16.940	1.129	5.647	1.129	0.282

表 3 试验方案及结果

Tab.3 Testing program and results

$i$	$v$	$E_m/\text{MPa}$	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	$m_i$	GSI	$\sigma_0/\sigma_{cm}$	$D$	$u_0^*/\%$
1	0.289	7345.68	66.94	11.129	45.647	4.129	0.782	15.71
2	0.289	7345.68	66.94	8.871	34.353	1.871	0.218	25.58
3	0.289	7345.68	33.06	11.129	45.647	1.871	0.218	25.90
4	0.289	7345.68	33.06	8.871	34.353	4.129	0.782	2.293
5	0.289	3054.32	66.94	11.129	34.353	4.129	0.218	20.90
6	0.289	3054.32	66.94	8.871	45.647	1.871	0.782	24.58
7	0.289	3054.32	33.06	11.129	34.353	1.871	0.782	22.43
8	0.289	3054.32	33.06	8.871	45.647	4.129	0.218	22.44
9	0.261	7345.68	66.94	11.129	34.353	1.871	0.782	22.07
10	0.261	7345.68	66.94	8.871	45.647	4.129	0.218	22.05
11	0.261	7345.68	33.06	11.129	34.353	4.129	0.218	20.56
12	0.261	7345.68	33.06	8.871	45.647	1.871	0.782	24.08
13	0.261	3054.32	66.94	11.129	45.647	1.871	0.218	25.35
14	0.261	3054.32	66.94	8.871	34.353	4.129	0.782	2.474
15	0.261	3054.32	33.06	11.129	45.647	4.129	0.782	15.51
16	0.261	3054.32	33.06	8.871	34.353	1.871	0.218	24.99
17	0.3	5 200	50	10	40	3	0.5	22.87
18	0.25	5 200	50	10	40	3	0.5	22.18
19	0.275	9 000	50	10	40	3	0.5	22.54
20	0.275	1 400	50	10	40	3	0.5	22.52
21	0.275	5 200	80	10	40	3	0.5	22.49
22	0.275	5 200	20	10	40	3	0.5	22.50
23	0.275	5 200	50	12	40	3	0.5	23.32
24	0.275	5 200	50	8	40	3	0.5	21.32
25	0.275	5 200	50	10	50	3	0.5	24.35
26	0.275	5 200	50	10	30	3	0.5	18.52
27	0.275	5 200	50	10	40	5	0.5	12.55
28	0.275	5 200	50	10	40	1	0.5	26.05
29	0.275	5 200	50	10	40	3	1	4.417
30	0.275	5 200	50	10	40	3	0	24.94
31	0.275	5 200	50	10	40	3	0.5	22.31

2.6 试验方案实施

根据试验方案进行数值试验,试验结果见表 3.

2.7 回归方程及显著性分析

按照表 3 的试验方案和结果整理分析可得到式(5)各项系数.对试验结果进行回归分析,各因素的

相应统计量见表 4,表中  $F'$  为剔除不显著项后该因素的  $F$  统计量.

对于因素 A,若  $F_A > F_{0.01}(df_A, df_e)$ ,就认为因素 A 对试验结果有非常显著的影响;若  $F_{0.05}(df_A, df_e) < F_A < F_{0.01}(df_A, df_e)$ ,则因素 A 对试

验结果有显著影响;若  $F_A < F_{0.05}(df_A, df_e)$ , 则因素 A 对试验结果的影响不显著。

表 4 各因素 F 统计量

Tab.4 F-statistic for various parameters

因素	F	F'
Z <sub>1</sub>	0.239	—
Z <sub>2</sub>	0.002	—
Z <sub>3</sub>	0.004	—
Z <sub>4</sub>	8.33	12.3
Z <sub>5</sub>	30.1	44.5
Z <sub>6</sub>	142	209
Z <sub>7</sub>	136	201
Z <sub>6</sub> Z <sub>7</sub>	35.9	53.0
Z <sub>5</sub> Z <sub>7</sub>	15.2	22.5
Z <sub>5</sub> Z <sub>6</sub>	12.8	18.8
Z <sub>3</sub> Z <sub>6</sub>	0.001	—
Z <sub>3</sub> Z <sub>7</sub>	0.006	—
Z <sub>3</sub> Z <sub>4</sub>	0.033	—
Z <sub>3</sub> Z <sub>5</sub>	0.02	—
Z <sub>1</sub> '	0.56	—
Z <sub>2</sub> '	0.56	—
Z <sub>3</sub> '	0.52	—
Z <sub>4</sub> '	0.337	—
Z <sub>5</sub> '	0.021	—
Z <sub>6</sub> '	3.60	—
Z <sub>7</sub> '	32.4	47.7

注:  $F_{0.05}(1,9)=5.12, F_{0.01}(1,9)=10.56, F_{0.01}(1,22)=7.95$ .

由表 4 可知,  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_3 Z_6, Z_3 Z_7, Z_3 Z_4, Z_3 Z_5, Z_1', Z_2', Z_3', Z_4', Z_5', Z_6'$  对结果的影响不显著, 将其计入残差, 重新计算各因素的 F 统计量. 剔除不显著项后的回归方程 F 统计量为  $F_R = 76.15$ , 相应的判别值为  $F_{0.01}(8, 22) = 3.45, F_R > F_{0.01}(8, 22)$ , 回归方程仍是显著的, 回归方程为:

$$u_0^*(\%) = 20.32 + 1.05Z_4 + 2.01Z_5 - 4.35Z_6 - 4.26Z_7 - 2.58Z_6Z_7 + 1.68Z_5Z_7 + 1.54Z_5Z_6 - 2.21Z_7' \quad (6)$$

将自然变量回代到式(6), 得到:

$$u_0^*(\%) = 48.49 + 0.93m_i - 0.90GSI - 9.46(\sigma_0/\sigma_{cm}) - 5.28D + 0.24GSI \cdot (\sigma_0/\sigma_{cm}) + 1.06GSI \cdot D - 8.10(\sigma_0/\sigma_{cm}) \cdot D - 27.75D^2 \quad (7)$$

由上述分析可知, 在 P-A 级别内, 影响开挖面位移释放系数的 7 个因素中, 参数敏感性由大到小依次为:  $(\sigma_0/\sigma_{cm}), D, GSI, m_i, v, \sigma_{ci}, E_m$ . 其中,  $v, \sigma_{ci}$  和  $E_m$  的影响很小, 计算时可不考虑。

### 2.8 A-G 级别岩体

应用 2.1 节中所述的位移释放系数构建方法, 可得到 A-G 级别岩体开挖面位移释放系数的回归公式:

$$u_0^*(\%) = 33.06 + 21.28v - 0.28GSI - 1.13(\sigma_0/\sigma_{cm}) -$$

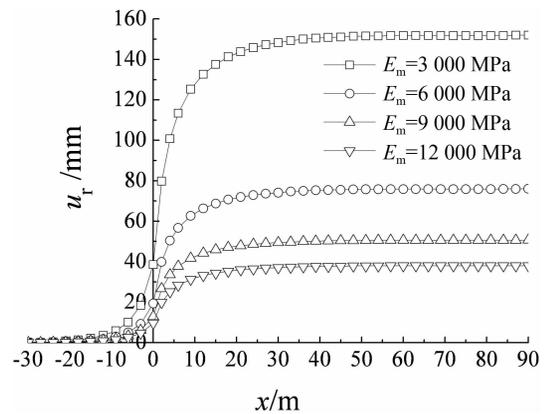
$$12.22D + 0.05GSI \cdot (\sigma_0/\sigma_{cm}) + 0.26GSI \cdot D - 1.31(\sigma_0/\sigma_{cm}) \cdot D - 0.22(\sigma_0/\sigma_{cm})^2 \quad (8)$$

与 P-A 级别岩体不同, 在 A-G 级别岩体范围内, 泊松比成为影响开挖面位移释放系数的最显著因素, 各参数对开挖面位移释放系数影响程度由大到小依次为:  $v, (\sigma_0/\sigma_{cm}), m_i, D, GSI, E_m, \sigma_{ci}$ ; 其中  $E_m, \sigma_{ci}$  的影响不显著。

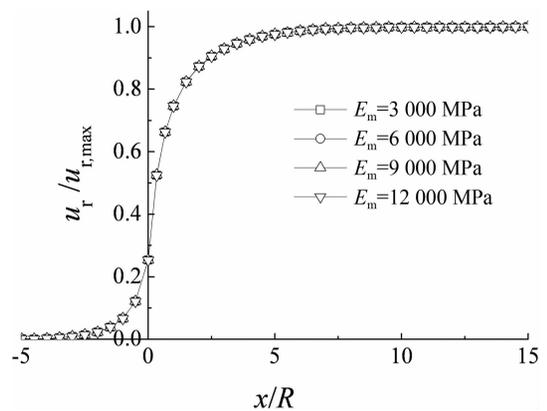
### 2.9 变形模量的影响

一般认为, 围岩的变形模量对隧道洞壁变形有重要影响. 然而, 从以上分析可以看到, 无论对于哪种级别的岩体, 变形模量的变化对开挖面位移释放系数的影响很小以至于在计算时可以忽略. 为进一步研究其中的机理, 应用控制变量法对变形模量的影响进行研究。

以表 1 中一般岩体为基础, 控制其他变量保持不变, 对不同大小变形模量的岩体进行模拟, 结果见图 3. 图 3(a) 为一般形式的 LDP 曲线, 图 3(b) 为归一化 LDP 曲线, 图中  $u_r/u_{r,max}$  即位移释放系数。



(a)一般形式的 LDP 曲线



(b)归一化 LDP 曲线

图 3 变形模量对纵向变形曲线的影响

Fig.3 Effect of  $E_m$  on LDP

从图 3(a) 可以看到, 隧道各处收敛位移和最大位移都随变形模量的增大而减小, 正是这种同比例

的增减,导致洞壁位移与最大位移的比值即位移释放系数随变形模量的变化而保持不变,如图 3(b)所示,不同变形模量岩体的归一化 LDP 曲线几乎重合。

### 3 数值算例

数值算例中岩体的参数见表 5,其中岩体 A,B,C,D 来源于文献[13]和[14]中的实际工程.取地应力水平  $\sigma_0/\sigma_{cm}=3.5$ ,岩体扰动参数  $D=0.7$ .数值模拟结果见表 5.

表 5 数值算例岩体参数及数值模拟结果

Tab.5 Parameters and results of numerical examples

	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	$m_i$	GSI	$E_m/\text{MPa}$	$\nu$	$\sigma_0/\sigma_{cm}$	$D$	$u_0^*$ (FLAC3D)/%	$u_0^*$ (本文方法)/%	误差/%
差	20	8	30	1 400	0.3	3.5	0.7	5.66	6.14 (式(7))	8.48
A	38.74	12	44	5 600	0.259	3.5	0.7	20.38	19.41(式(7))	4.76
B	41.5	12	47	7 640	0.251	3.5	0.7	21.33	21.46(式(7))	0.61
一般	80	12	50	9 000	0.25	3.5	0.7	22.74	23.50(式(7))	3.34
									23.82(式(8))	4.75
C	51	16.3	75	30 000	0.23	3.5	0.7	24.10	44.55(式(7))	84.85
									25.32(式(8))	5.06
D	110	17.7	75	42 000	0.2	3.5	0.7	23.64	24.68(式(8))	4.40
好	150	25	75	42 000	0.2	3.5	0.7	24.23	24.68(式(8))	1.86

### 4 实例分析

纵向变形曲线和位移释放系数是收敛-约束法的重要组成部分.通过位移释放系数公式可求得隧道开挖后开挖面处洞壁收敛位移,即支护特征曲线的起点,结合围岩收敛曲线,由收敛-约束原理得到支护结构的稳定性系数,从而对支护结构的稳定性进行定量评价.苏永华等<sup>[15]</sup>通过案例分析详述了位移释放系数在地下结构稳定性分析中的应用.

#### 4.1 工程简介

湖南湘西某公路隧道全长约 3.4 km,最大埋深约 700 m,隧道轴向为南北方向,断面型式为马蹄形,高度为 8.6 m,跨度为 11.6 m.

按隧道洞身所处地质环境,可分为南北两段.北段岩层岩性主要为粗砂质、结构致密的中厚至厚层状页岩,层间结合良好,无地下水.南段主要为泥质细砂岩,岩体节理裂隙发育,涌水量达每小时 20 m<sup>3</sup>.岩体参数见表 6.

根据 Bienawski 提出的岩体分类 RMR 法,北段隧道围岩 RMR=55,属于质量良好的岩体;南段隧道围岩 RMR=39,属于质量差的岩体.根据 Barton 等人提出的岩体分类 Q 法,北段隧道围岩 Q

由于一般岩体既属于 P-A 级别岩体也属于 A-G 级别岩体,C 岩体多数参数在 A-G 级别岩体范围内而个别参数在 P-A 级别岩体范围,故对这两种岩体从式(7)和式(8)两方面进行了检验.

由表 5 可知,式(7)和式(8)具有较高的准确性.针对 C 岩体的比较分析可知,当岩体的参数不能完全归入某一级别时,需对该岩体进行判断,若总体上属于质量较差的岩体则采用式(7)进行计算,反之则应采用式(8)进行计算.C 岩体总体上质量较好,采用式(7)所得结果的误差远小于采用式(8)的误差.

=10.74,属于质量好的岩体;南段隧道围岩 Q=0.78,属于质量很差的岩体.综合围岩参数的分布情况、RMR 法和 Q 法,将北段隧道围岩归为 A-G 级别岩体,南段围岩归为 P-A 级别岩体.

表 6 围岩基本参数

Tab.6 Parameters of surrounding rock

参数	北段	南段
$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	27.204	48.02
$E_m/\text{MPa}$	10 503	8 143
$\nu$	0.29	0.3
$\rho$	26.8	27.1
$m_i$	10	10
GSI	52	48
RMR	55	39
Q	10.74	0.78
$\sigma_0/\text{MPa}$	5.402	5.024
$\sigma_{cm}/\text{MPa}$	4.956	3.072
$\sigma_0/\sigma_{cm}$	1.090	1.635

根据南北段隧道不同的地质条件,北段采用锚喷支护结构,南段采用锚杆+喷射混凝土+钢拱架支护结构.支护结构的计算采用 Carranza-Torres 等<sup>[1]</sup>的建议,将支护结构的总刚度视作各单元刚度之和.北段支护结构总刚度为 65.850 4 MPa/m,允许极限变形为 4.003 mm,极限抗力为 0.263 MPa;南段支护结构总刚度为 86.178 6 MPa/m,允许极限

变形为 4.003 mm, 极限抗力为 0.345 MPa.

隧道按新奥法组织施工, 采用光面爆破, 开挖后立即进行支护. 北段爆破效果良好, 岩体扰动参数  $D=0$ ; 南段爆破效果差, 岩体扰动参数  $D=1$ .

#### 4.2 围岩收敛曲线和支护特征曲线

利用 FLAC3D 软件建立平面应变模型, 得到隧道各段围岩收敛曲线(GRC)如图 4 所示. 由围岩收敛曲线可知, 隧道洞壁最大位移为: 北段  $u_{r,max}^N = 5.189$  mm; 南段  $u_{r,max}^S = 16.136$  mm.

将北段围岩参数代入式(8)得:  $u_0^{*N} = 26.01\%$ ; 将南段围岩参数代入式(7)得:  $u_0^{*S} = 22.56\%$ . 由式(1)可知, 当南北两段支护架设时, 隧道洞壁产生的前期位移量分别为: 北段  $u_0^N = 1.350$  mm, 南段  $u_0^S = 3.640$  mm. 结合支护结构的力学特征, 分别作南北两段支护结构的支护特征曲线(SCC), 见图 4.

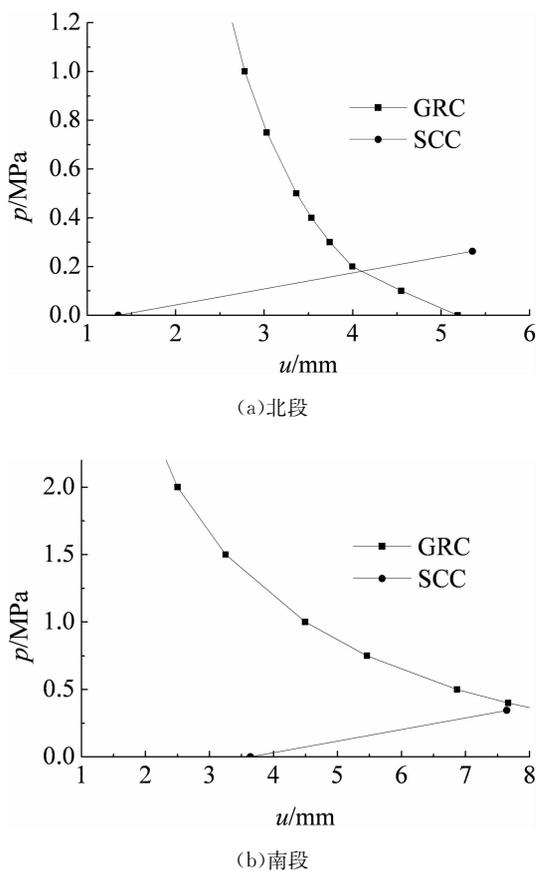


图 4 隧道收敛-约束图(局部)

Fig.4 Convergence-confinement curves

#### 4.3 支护结构的稳定性系数

图 4(a)中, 北段围岩收敛曲线和支护特征曲线交点处  $p=0.178$  MPa, 由收敛-约束原理可知隧道北段支护结构的稳定性系数  $F_s = 1.48$ . 图 4(b)中, 南段围岩收敛曲线和支护特征曲线无交点, 故隧道南段支护结构的稳定性系数  $F_s < 1$ .

#### 4.4 隧道支护结构稳定情况

该隧道于 2010 年初建成通车, 根据监测资料, 隧道北段自通车至今, 支护结构表面素混凝土衬砌没有变形和裂纹, 稳定状况良好. 对于隧道南段某些区域, 素混凝土衬砌浇筑后不久即出现环向裂纹, 当时进行了修补, 然而裂纹不断出现并持续发展, 形成宏观裂缝. 通车 3 个月后, 支护结构破坏, 隧道被迫封闭, 重新支护.

隧道北段支护结构稳定性系数  $F_s = 1.48$ , 结构一直稳定. 南段支护结构稳定性系数  $F_s < 1$ , 该段部分支护结构破坏, 需重新支护. 初步验证了式(7)、式(8)在工程应用中的有效性.

## 5 结论

本文在二次回归正交组合设计方法的基础上, 以开挖面位移释放系数为对象进行了一系列数值试验, 得到以下主要结论:

1) 给出了一种位移释放系数公式构建方法, 运用该方法对静水应力场下的圆形隧道进行研究, 得到了考虑多个因素的开挖面位移释放系数公式.

2) 对于不同级别岩体, 同一因素对开挖面位移释放的影响程度不一. 总体而言, 地应力水平、岩体扰动、地质强度指标、H-B 常数和泊松比影响较大, 而岩石单轴抗压强度和变形模量影响较小.

3) 通过工程实例分析, 展示了位移释放系数公式在支护结构稳定性分析中的应用过程, 初步验证了公式的有效性.

4) 本文主要针对全断面开挖隧道进行分析, 对于采用其他开挖方法施工的情况, 需进一步深入研究.

## 参考文献

- [1] CARRANZA-TORRES C, FAIRHURST C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the hoek-brown failure criterion[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2000, 15(2): 187-213.
- [2] 李煜舫, 林铭益. 台湾东部铁路单轨隧道开挖支撑互制行为之探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 4823-4832. LEE Yulin, LIN Mingyi. Analysis of interaction of rock masses and support system of monorail tunnel in east Taiwan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4823-4832. (In Chinese)
- [3] 李煜舫, 许文贵, 林铭益. 以隧道变形量测资料分析掘进效应与约束损失[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 39-46. LEE Yulin, HSU Wenkuei, LIN Mingyi. Analysis of advancing

- effect and confinement loss by using deformation measurements in tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 39-46. (In Chinese)
- [4] 周建春, 魏琴. 公路隧道围岩变形时程曲线拟合的 BP 算法[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2002, 29(4): 79-84.  
ZHOU Jianchun, WEI Qin. Study on fitting of surrounding rock deformation time-history curve by BP neural network algorithm[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2002, 29(4): 79-84. (In Chinese)
- [5] 方勇, 周超月, 刘书斌, 等. 上覆薄煤层采空区公路隧道开挖稳定性试验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(7): 100-107.  
FANG Yong, ZHOU Chaoyue, LIU Shubin, *et al.* Model test of excavation stability for highway tunnel beneath mined-out thin coal seam[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(7): 100-107. (In Chinese)
- [6] UNLU T, GERCEK H. Effect of poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2003, 18(5): 547-553.
- [7] PANET M. Understanding deformations in tunnels[M]// HUDSON J A, BROWN E T, FAIRHURST C, *et al.* *Comprehensive rock engineering*. Pergamon; Oxford, 1993: 663-690.
- [8] 李煜龄, 林铭益, 许文贵. 三维有限元分析隧道开挖收敛损失与纵剖面变形曲线关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 258-265.  
LEE Yulin, LIN Mingyi, HSU Wenkuei. Study on relationship between convergence loss and longitudinal deformation curve in tunnel excavation by using three-dimensional finite element analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 258-265. (In Chinese)
- [9] VLACHOPOULOS N, DIEDERICHS M S. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2009, 42(42): 131-146.
- [10] 张平, 尹建军, 曹文贵. 上下台阶开挖下城门形隧洞纵向变形规律分析[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(2): 40-46.  
ZHANG Ping, YIN Jianjun, CAO Wengui. Analysis of longitudinal deformation profile in city-gate shaped tunnel using top heading and bench excavation method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(2): 40-46. (In Chinese)
- [11] 吴顺川, 耿晓杰, 高永涛, 等. 基于广义 Hoek-Brown 准则的隧道纵向变形曲线研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 946-953.  
WU Shunchuan, GENG Xiaojie, GAO Yongtao, *et al.* A study of the longitudinal deformation of tunnels based on the generalized Hoek-Brown failure criterion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 946-953. (In Chinese)
- [12] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]// *Proceedings of the North American Rock Mechanics Society NARMS-TAC 2002*. Toronto: University of Toronto Press, 2002: 267-273.
- [13] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165-1186.
- [14] GUROCAK Z. Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at the Kapikaya dam site, Turkey[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2011, 70(1): 41-52.
- [15] 苏永华, 付雄, 肖旺. 围岩收敛曲线形态对地下结构稳定系数影响分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(7): 87-92.  
SU Yonghua, FU Xiong, XIAO Wang. The analysis for stability coefficient of underground structure with the shapes of ground response curves[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(7): 87-92. (In Chinese)