

文章编号: 1006 - 2106(2012) 02 - 0050 - 05

隧道围岩挤压变形预测方法研究^{*}

孙元春^{1**} 高 波² 许再良¹ 李怀鉴¹

(1. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251; 2. 西南交通大学, 成都 60031)

摘要: 研究目的: 围岩挤压变形预测是高地应力地区软弱围岩隧道勘察和设计阶段的一项重要工作。目前常用的临界埋深法和临界应力比值法均有局限性, 迫切需要提出更加符合实际的隧道围岩挤压变形预测方法。

研究结论: 围岩挤压变形预测可采用强度应力比进行, 建议采用 Hoek - Brown 经验强度公式和 GSI 法对岩体强度进行估算, F 中地应力应取垂直于隧道走向的最大地应力。挤压变形破坏大都发生在 $F \leq 1$ 的情况下, 而剧烈挤压变形一般发生在 $F \leq 0.5$ 时, 可将 0.5 和 1 分别作为不同级别挤压变形的临界预测值。实践表明, 采用 F 值法对围岩挤压变形进行预测是可靠的。

关键词: 软弱围岩; 高地应力; 挤压变形; 预测

中图分类号: U451⁺.2 **文献标识码:** A

Research on Prediction Method for Squeezing Deformation of Surrounding Rock of Tunnel

SUN Yuan - chun¹, GAO Bo², XU Zai - liang¹, LI Huai - jian¹

(1. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Research purposes: To predicate the squeezing deformation of the surrounding rock of tunnel is an important work for the survey and design of the weak surrounding rock tunnel in high stress area. There are limitations when using commonly - used prediction ways such as critical burying method and critical stress ratio method. So it is urgent to need a new and available method for prediction of the squeezing deformation of the surrounding rock of tunnel.

Research conclusions: The squeezing deformation of surrounding rock can be predicted by strength stress ratio value F , and it is proposed to use the Hock - Brown strength criterion and GSI method to estimate the rock mass strength and use the maximum crustal stress trending to the tunnel as the crustal stress in the strength stress ratio value F . Usually, the destroy of the squeezing deformation happens when the F is less than or equal to 1 and the severe squeezing deformation happens when the F is less than or equal to 0.5. Therefore, the 0.5 and 1 can be separately used as the critical values for the squeezing deformation with different degrees. The practice shows the value F method is reliable for prediction of the squeezing deformation of the surrounding rock.

Key words: weak surrounding rock; high stress; squeezing deformation; prediction

围岩挤压变形是指隧道开挖后, 洞室周边重分布应力超过岩体承受能力而发生的持续变形, 这种变形可以持续数周甚至数月^[1]。国际岩石力学学会^[1]将

其定义为“洞周应力超过围岩抗剪强度极限后发生的蠕变变形。”挤压变形具有变形量大、变形速度快、变形持续时间长、围岩破坏范围大、支护破坏形式多样

* 收稿日期: 2011 - 10 - 18

** 作者简介: 孙元春, 1981 年生, 男, 工程师。

等特征,严重制约隧道施工安全、造价和工期。随着我国基础设施建设力度的逐步加大,近年来遇到的挤压性隧道可谓层出不穷,如南昆线家竹菁隧道、青藏线关角隧道、兰新线乌鞘岭隧道、张集新线旧堡隧道等。对拟建隧道发生挤压变形的可能性,以及挤压变形的严重性进行科学预测,是隧道勘察、设计工作中的一个重要问题^[3]。

目前常用的隧道围岩挤压变形预测方法主要有临界埋深法和临界应力比值法,两者各自考虑的因素差异很大,具体选用的计算指标也不同。比如在围岩强度方面,有的采用岩石强度计算,有的则采用岩体强度。具体到岩体强度估算方法,有的采用岩石强度系数折减法,有的采用 Q 质量指标法,还有的采用地质力学指标法(GSI)等。在地应力方面,有的采用最大地应力,有的采用垂直于隧道走向的最大地应力,还有的采用埋深换算得到垂直地应力。岩体强度和临界埋深的计算方法更是五花八门,具体应用时常常让人莫衷一是。

针对上述问题,本文首先探讨了挤压变形的发生条件,在分析临界埋深法和临界应力比值法的局限性后,提出了 F 值预测法,并分别给出了发生挤压变形和严重挤压变形的临界值。最后,以旧堡隧道为例,对 F 值预测法的具体应用及效果进行了介绍。

1 挤压变形的发生条件

Anagnostou^[4]认为,挤压作用主要取决于岩石强度和覆盖层厚度,原则上在任何类型的岩石中都可以发生。Singh^[5]指出挤压变形是在软弱围岩与高地应力结合前提下发生的。类似地,喻渝^[6]认为挤压性围岩就是指高地应力下的软弱围岩,挤压变形发生的两个必要条件是高地应力和围岩软弱。赵旭峰^[7]提出挤压现象是一种在隧道开挖过程中与时间有关的大变形,与岩体的弹粘塑性时效力学行为具有相当程度的关联性,表现为在工程扰动力作用下,当岩体所承受的剪应力超过某极限值时,将发生随时间发展的显著粘弹塑性变形。

如图1所示,在平面应变的假设条件下,岩体中任意一点的应力状态可用莫尔应力圆来表示。

图1(a)中,直线 $\tau = \sigma \tan \phi + c$ 表示围岩自身特性,称为破裂线。当围岩处于稳定状态时,它与莫尔应力圆不相交;隧道开挖后,开挖面主应力方向卸荷, σ_3 减小,开挖边界处 $\sigma_3 = 0$,所以应力圆左移,应力圆与破裂线的距离变小。应力圆与其破裂线相切时,表示围岩已达到剪切破坏的极限状态,随即开始发生塑性变形,最终导致剪切破坏。软弱围岩的 c 、 ϕ 值一般都

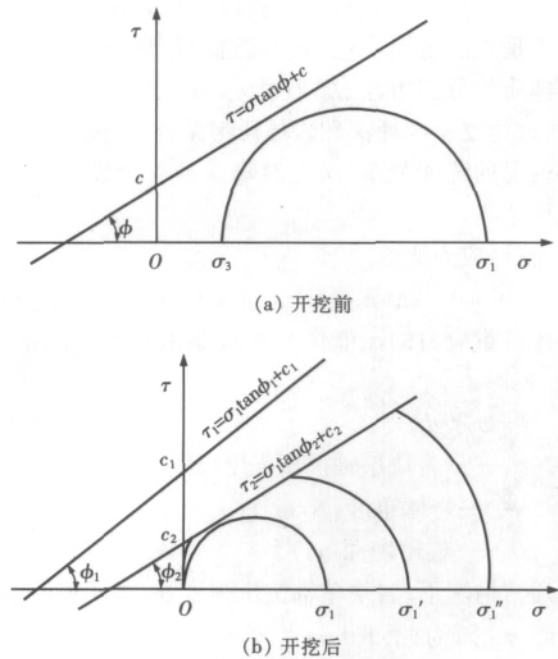


图1 隧道开挖前后围岩的应力状态

较小,所以其破裂线与坐标原点的距离很近,如图1(b)所示。当地应力较高时,即 σ_1 较大,应力圆也较大,这时很容易出现破裂线与应力圆相切的现象。可见,高地应力(σ_1 大)和围岩软弱(c 、 ϕ 小)是挤压变形发生的基本条件。

2 挤压变形的预测方法

2.1 临界埋深法

Singh^[8]通过分析隧道实测数据,得到了由围岩质量 Q 与隧道埋深 H 两个参数控制的挤压性围岩与非挤压性围岩的界限,并据此求得了挤压变形发生的临界埋深,即:

$$H_{\text{临界}} = 350Q^{0.33} \quad (1)$$

Jimenez等人^[9]采用统计学方法对Singh提出的方法进行了修正,认为挤压变形发生的临界埋深应为:

$$H_{\text{临界}} = 424.4Q^{0.32} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中 Q 表示围岩质量,且:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (3)$$

Goel等^[10]将 Q 指标中的 SRF 设定为1,定义了岩体质量系数 N ,即:

$$N = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_n} \right) \cdot (J_w) \quad (4)$$

考虑隧道开挖跨度因素,提出了隧道围岩发生挤压变形的临界埋深,即:

$$H_{\text{临界}} = 275N^{0.33}B^{-0.1} \quad (5)$$

式中 B ——隧道开挖直径。

采用临界埋深法对围岩挤压变形情况进行预测,实质上是先假定围岩应力与隧道埋深成正比,然后采用岩体质量分类方法,如 Q 指标,对围岩质量进行评估,通过建立不同埋深和岩体质量条件下隧道围岩的变形情况的统计关系,从而对隧道是否会发生挤压变形进行预测。

2.2 临界应力比值法

Muirwood^[11]最先提出以岩块单轴抗压强度与上覆岩体自重应力的比值作为评价隧道稳定性的指标,即:

$$f = \sigma_c / \gamma H \quad (6)$$

式中 σ_c ——岩块单轴抗压强度(Pa);

γ ——岩体重量(N/m^3);

H ——隧道埋深(m)。

通常情况下,岩块单轴抗压强度 σ_c 并不能代表岩体强度 σ_{cm} 。为此, Jethwa^[12]建议采用岩体单轴抗压强度 σ_{cm} 与上覆地压 γH 的比值作为围岩是否会发生挤压变形的预测指标。张祉道^[13]则建议选取岩体抗压强度 σ_{cm} 与地应力 σ_{av} (隧道断面上最大主应力和最小主应力平均值) 的比值作为挤压变形预测指标。

众所周知,挤压性围岩是指高地应力下的软弱围岩,临界应力比值法选用岩块(岩体)单轴抗压强度表示岩体的软弱程度,并将地应力直接引入 f 值中,其概念比临界埋深法更为明确。不足之处在于计算应力比时,选用岩块还是岩体的单轴抗压强度,以及地应力怎么取值等方面还存在争议,需进一步研究。

2.3 基于 F 值的预测法

挤压变形预测属于工程勘察和初步设计阶段的任务,其目的是为下一步施工设计和工程施工提供基础依据。按照现代隧道信息化施工理念,该阶段尚不能确定隧道的具体设计和施工参数,难以考虑工程因素对挤压变形的影响。实践证明,围岩稳定性受结构面控制^[14]。与整体性较好的岩块相比,岩体更能体现围岩的结构面效应。此外,隧道作为一种线状工程,通常简化为平面应变问题进行处理,所以在考虑地应力对围岩变形影响时,应主要考虑垂直于隧道走向的最大地应力值。为此,本文建议采用强度应力比指标 F 对挤压变形进行预测,定义:

$$F = \sigma_{cm} / \sigma_{max} \quad (7)$$

式中 σ_{cm} ——岩体单轴抗压强度;

σ_{max} ——垂直于隧道走向的最大地应力。

F 值是对 f 的进一步发展,其思路基本一致,不同的是,在采用 F 值对围岩挤压变形进行预测时,计算参数的选取更加明确。下面分别介绍 σ_{cm} 、 σ_{max} 、 F 临界值的取值方法。

2.3.1 岩体强度估算

岩体强度的确定是一个重要而又困难的问题,在无原位试验资料的情况下,可采用间接方法求得。建立岩体强度与某些地质因素之间的经验关系是岩体强度估算的重要途径。

Hoek 和 Brown 等在分析和修正 Griffith 理论的基础上,通过对大量岩石三轴试验资料和岩体现场试验成果的统计分析,提出了广义 Hoek - Brown 经验强度准则^[15],其表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha \quad (8)$$

式中 σ_1 ——最大主应力;

σ_3 ——最小主应力;

σ_c ——岩石单轴抗压强度;

m_b ——经验参数 m_i 的值;

s 、 α ——与岩体特征有关的常数。

将 $\sigma_3 = 0$ 代入式(8),便可得到岩体的单轴抗压强度 σ_{cm} :

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^\alpha \quad (9)$$

Hoek 等人在考虑岩体地质环境的情况下,提出了一种新的岩体质量指标 GSI (Geological Strength Index),并建立了 GSI 与 s 、 α 之间的经验关系,如式(10)、式(11)所示:

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (11)$$

式中 D ——岩体扰动因子,主要考虑爆破破坏和应力松弛对节理岩体的扰动程度,一般认为无扰动时为 0,部分扰动时为 0.5,严重扰动时为 1;

GSI——取值可根据文献[16]提供的方法进行。

2.3.2 地应力取值

地应力主要由重力作用和构造运动引起,一般在地质钻孔中采用水压致裂法进行直接测量。大量的地应力测量资料表明,地应力是一个具有相对稳定性的非稳定应力场。实测垂直应力基本等于上覆岩层的重量,水平应力则普遍大于垂直应力,且随着深度加深而增大,由图 2 可见,在隧道埋深小于 600 m 时,水平地应力普遍大于垂直地应力;当埋深大于 600 m 时,地应力场基本呈静水压力状态,即:

$$\sigma_{max} = \sigma_v = \gamma H \quad (12)$$

式中 σ_v ——垂直地应力;

γ ——岩体密度;

H ——隧道埋深。

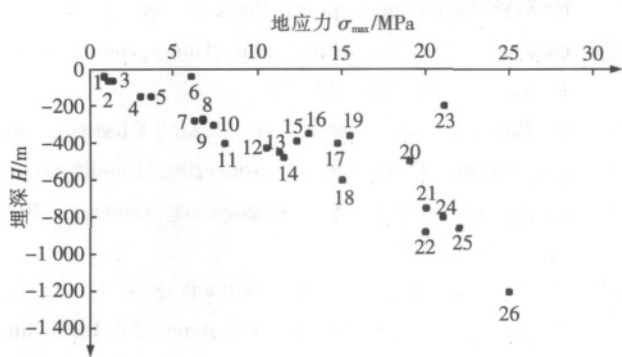


图2 国内外26个挤压性隧道最大地应力与埋深关系图

垂直于洞轴方向的最大地应力值 σ_{\max} 是强度应力比指标 F 中的一个关键指标,如果前期已测量过场地地应力,则直接采用测量值进行分析。在没有实测资料的情况下,且埋深较大时,可用上覆岩体自重 γH 作近似代替。

2.3.3 F 临界值的选取

隧道围岩的挤压程度可根据标准挤压值 NSI (Normal Squeezing Index) 进行分级^[17],当时,即可认为隧道发生了挤压变形;当时,隧道发生了剧烈挤压变形。如图3所示,由26个挤压性隧道实例强度应力比 F 与 NSI 关系的统计结果可知:93%的挤压性隧道围岩强度应力比在 $F \leq 1$ 的情况下;剧烈挤压变形一般发生在 $F \leq 0.5$ 时。据此,本文建议将1和0.5分别作为挤压变形的临界值进行预测分析。

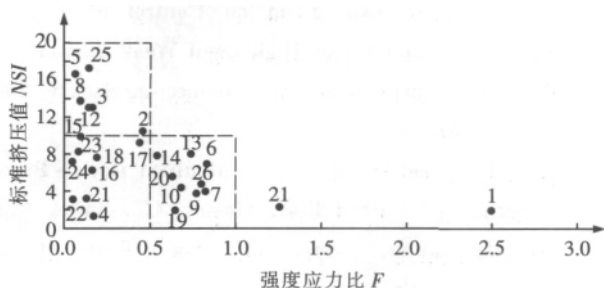


图3 标准挤压值与强度应力比关系图

3 实例分析

3.1 工程概况

旧堡隧道位于万全县旧堡乡与尚义县土天村之间,起讫里程 DK 25 + 270 ~ DK 34 + 855,全长 9 585 m,最大埋深 493 m,是新建张家口至集宁铁路控制性工程之一。设计为单洞双线,洞形为 3 心圆,开挖断面宽 13.84 m,高 12.22 m,面积 137.92 m²。

该隧道地处区域性构造交汇部位,受多期构造运动作用,断裂构造极为发育,岩浆活动强烈。洞身范围

内主要出露太古界变质岩,局部侵入花岗伟晶岩及绿帘岩脉。

3.2 挤压变形预测及验证

以旧堡隧道 DK 30 + 860 ~ DK 30 + 910 段为例,围岩主要为麻粒岩,结构面多有镜面擦痕,并普遍含泥化夹层。采用 GSI 法估算岩体饱和单轴抗压强度为 8.34 MPa,水压致裂法测得研究段附近地应力分布状态为 $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$,垂直于洞轴方向的最大地应力为垂直地应力,大小为 11.25 MPa,求得 F 值为 0.74。由此可以预见,DK 30 + 860 ~ DK 30 + 910 段围岩会发生挤压变形。

经施工证实,该段围岩特征与勘察阶段认识基本一致,岩体软弱破碎,呈碎裂结构,为 V 级围岩,如图 4 所示。变形监测结果表明,该段围岩变形量为 33.8 ~ 52.5 cm,标准挤压值 NSI 为 5.0 ~ 7.8,属严重(IV 级)挤压变形,与预测结果吻合。



图4 DK 30 + 890 断面处围岩

4 结论

围岩挤压变形预测就是根据勘察资料对隧道开挖后是否会发生挤压变形以及挤压变形的程度进行初步预测,是高地应力地区软弱围岩隧道勘察和设计阶段的一项重要工作内容。本文对临界埋深法和临界应力比值法的原理及局限性进行了分析和总结,并针对性地提出了 F 值预测法,主要研究结论如下:

(1) 临界埋深法实质上先假定围岩压力与隧道埋深成正比,然后采用岩体质量分类方法,如 Q 指标,对围岩质量进行评估。通过建立不同埋深和岩体质量条件下,隧道围岩变形情况的统计关系,从而对隧道是否会发生挤压变形进行预测。临界应力比值法则选用岩块(岩体)单轴抗压强度指标表示岩体质量,并将地应力直接引入 f 值中,其概念比临界埋深法更为明确,不

足之处在于计算应力比时,选用岩块还是岩体的单轴抗压强度,以及地应力怎么取值等方面存在争议。

(2) 围岩挤压变形预测可采用强度应力比 F 进行,这是对应力比值法的进一步发展。建议采用 Hoek - Brown 经验强度公式和 GSI 法对岩体单轴抗压强度进行估算, F 中地应力应取垂直于隧道走向的最大地应力。

(3) 国内外 26 个挤压性隧道实例的统计结果表明,挤压变形破坏大都发生在 $F \leq 1$ 的情况下,而剧烈挤压变形一般发生在 $F \leq 0.5$ 时,可将 0.5 和 1 分别作为不同级别挤压变形的临界预测值。实践表明,采用 F 值法对围岩挤压变形进行预测是可靠的。

参考文献:

- [1] O' rourke T D. Guidelines for Tunnel Lining Design [M]. New York: ASCE, 1984.
- [2] Barla G. Squeezing Rocks in Tunnels [J]. ISRM News Journal, 1995(4): 44 - 49.
- [3] 孙元春. 挤压性围岩变形机理及其控制技术研究 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2010.
Sun Yuanchun. Research on Mechanism and Controlling Technologies of Surrounding Rock in Squeezing Ground [D]. Beijing: Geology and Geophysics, Chinese Academey of Sciences, 2010.
- [4] Anagnostou G. A model for swelling rock in tunnelling [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993(4): 307 - 331.
- [5] Singh B, Goel R K, Jethwa J L, etc. Support Pressure Assessment in Arched Underground Openings Through Poor Rock Masses [J]. Engineering Geology, 1997(48): 59 - 81.
- [6] 喻渝. 挤压性围岩支护大变形的机理及判定方法 [J]. 现代隧道技术, 1998(1): 46 - 51.
Yu Yu. Serious Deformation of Surrounding Rock in Squeezing Ground [J]. Modern Tunnelling Technology, 1998(1): 46 - 51.
- [7] 赵旭峰. 挤压性围岩隧道施工时空效应及其大变形控制研究 [D]. 同济大学, 2007.
Zhao Xufeng. The Temporal and Spatial Effect in Construction and Control of Large Deformation of Tunnels in Squeezing Ground [D]. Shanghai: Doctoral Dissertation of Tongji University, 2007.
- [8] Singh B, Jethwa J L, Dube A K, etc. Correlation between Observed Support Pressure and Rock Mass Quality [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992(1): 59 - 74.
- [9] R. Jimenez, D. Recio. A linear Classifier for Probabilistic Prediction of Squeezing Conditions in Himalayan Tunnels [J]. Engineering Geology, 2011(121): 101 - 109.
- [10] Goel R. K, Jethwa J. L, Paithankar A. G. Indian Experiences with Q and RMR Systems [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995(1): 97 - 109.
- [11] Muirwood A M. Tunnels for Roads and Motorways [J]. Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1972(2): 111 - 126.
- [12] Jethwa J L, Singh B. Estimation of Ultimate Rock Pressure for Tunnel Linings under Squeezing Rock Conditions - a New Approach [C]//Design and Performance of Underground Excavations, ISRM Symposium, Cambridge, 1984.
- [13] 张趾道. 关于挤压性围岩隧道大变形的探讨和研究 [J]. 现代隧道技术, 2003(2): 5 - 12.
Zhang Zhidao. Discussion and Study on Large Deformation of Tunnel in Squeezing Ground [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003(2): 5 - 12.
- [14] 王丙堤. 高地应力软弱围岩变形控制方法 [J]. 铁道工程学报, 2006(4): 57 - 61.
Wang Bingdi. Exploration on Control Method for Deformation of Stressed High Land Weak Surrounding Rock [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(4): 57 - 61.
- [15] Hoek E, Wood D, Shah S. A Modified Hoek - Brown Criterion for Jointed Rock Masses [C]//Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, 1992.
- [16] H Sonmez, C Gokceoglu, R Ulusay. Indirect Determination of the Modulus of Deformation of Rock Masses Based on the GSI System [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004(41): 849 - 857.
- [17] 孙元春, 张巍. 挤压性隧道围岩变形分级研究综述 [J]. 现代隧道技术, 2011(S): 42 - 47.
Sun Yuanchun, Zhang Wei. Review on Classification Method of Squeezing Deformation in Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011(S): 42 - 47.

(编辑 曹淑荣)