

考虑围岩破坏条件时优化小净距隧道最小净距的研究

门妮, 代树林, 俾磊

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘 要:小净距隧道由于不受地形条件以及总体线路线型的限制,较连拱隧道有施工工艺简单、造价较低等优点,越来越受到青睐。用有限单元法对小净距隧道不同中柱厚度进行数值模拟,通过格里菲斯破坏判据以及德鲁克-普拉格判据,拟合出最大拉应力及各判据屈服函数与净距的拟合曲线,在保证其稳定的基础上,对小净距隧道最合理净距做出分析。

关键词:小净距隧道;有限单元法;破坏判据;合理净距

中图分类号:U452.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2008)08-0073-04

Study on Super-small Interval in Optimized Small Interval Tunnel with Surrounding Rock Damage/MEN Ni, DAI Shu-lin, NAI lei (Construction Engineering College of Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Construction technology of small interval tunnel is more favorable because of its simple and economy than double-arched tunnel without limitation on topographical condition and line type. Numerical simulation was made on the thickness of mid-pillars in small interval tunnel with finite element method; fitting curve of maximum tensile stress, yield function criteria and small interval was obtained through Griffith damage criteria and Drucker-Prager criteria. And analysis was made on most reasonable interval of small interval tunnel.

Key words: small interval tunnel; finite element method; damage criteria; reasonable small interval

在隧道建设中,由于受地形及总体线路线型(洞口地形狭窄或有特殊要求)的限制,双洞隧道左右线间距不能保证达到规范要求,必须采用小净距隧道及连拱隧道等特殊结构型式。经过多年隧道建设的实践,小净距隧道相比于普通分离式双洞隧道和连拱隧道有以下优点:第一,其造价和施工工艺同普通分离式双洞隧道相比相差不大,同连拱隧道相比其造价要低得多;第二,施工工艺相对简单,工期短;第三,采用小净距隧道有利于公路整体线形和线形的优化。基于上述因素,小净距隧道有着广阔的发展前景,并将产生巨大的社会效益和经济效益。近年来,在我国已建成许多小净距隧道,如京福高速金旗山隧道、宁波镇海招宝山隧道等,并积累了大量的经验,但是对小净距隧道的理论研究尚未成熟。本文运用有限单元法对小净距隧道不同中柱厚度进行数值模拟,对小净距隧道最合理净距做出具体分析结果。

1 问题的提出及模型的建立

1.1 模型的建立

地下洞室开挖常能使围岩的性状发生很大变化,一般说来,洞室开挖后,如果围岩岩体承受不了

回弹应力或重分布的应力的作用,围岩即将发生塑性变形或破坏。这种变形或破坏通常是从洞室周边,特别是那些最大压或拉应力集中的部位开始,而后逐步向围岩内部发展的。围岩变形破坏的形式与特点,除与岩体内的初始应力状态和洞形有关外,主要取决于围岩的岩性和结构。围岩的变形破坏是渐进式逐次发展的。从开挖→应力调整→变形、局部破坏→再次调整→再次变形→较大范围破坏。

由于在岩体内开挖洞室,会发生围岩应力重分布。围岩应力重分布的主要特征是:径向应力随着向自由表面的接近而逐渐减小,至洞壁处变为零。切向应力在一些部位愈接近自由表面愈大,并于洞壁达最高值,即产生所谓压应力集中;在另一些部位,愈接近自由表面切向应力愈低,有时甚至于洞壁附近出现拉应力,即产生所谓拉应力集中。这样,地下洞室的开挖就将于围岩内引起强烈的主应力分异现象,使围岩内的应力差愈接近自由表面愈增大,至洞室周边达最大值。

由于围岩内某一点的总应力等于2个或多个洞室在该点引起的应力之和,故相邻洞室的存在通常使围岩应力(主要是压应力)的集中程度增高,对洞室围岩稳定不利。因此,不同的业务部门规定了不

收稿日期:2007-12-07

作者简介:门妮(1982-),女(汉族),辽宁人,吉林大学硕士在读,地质工程专业,研究方向为岩土工程,吉林省长春市西民主大街6号,niar1982@126.com。

同的最小安全洞室间距。但是这种间距虽然保证了洞室的安全稳定,却极大地影响了经济效益。

本文就是针对此类问题分析小净距隧道的最优净距的选择。

假设 2 种极限情况:当隧道净距无限小时,中柱受应力重分布影响,将产生严重的应力集中,致使岩体破坏——即会产生应力极值;当隧道净距无限大时,按照前人的研究,应力集中多会发生在洞顶和洞底——即应力极值趋于稳定。因此,本文将 2 个极限趋近运用在分析模型上,并另外建立净距分别为 0.1D、0.2D、0.3D、0.5D、1.0D、1.5D、2.5D 以及单洞的小净距模型。通过有限单元法进行数值模拟,拟合屈服曲线,直观形象地找出小净距隧道的最优合理净距。根据隧道的受力及尺寸,可以将隧道作为平面应变问题来解决。分析范围在水平方向左右各取约 40 m(约 4 倍洞径),垂直底部 50 m(约 4 倍洞径)。隧道开挖断面宽度 $D = 12\text{ m}$,埋深 $H = 50\text{ m}$ 。

有限元模型和网格剖分图见图 1。

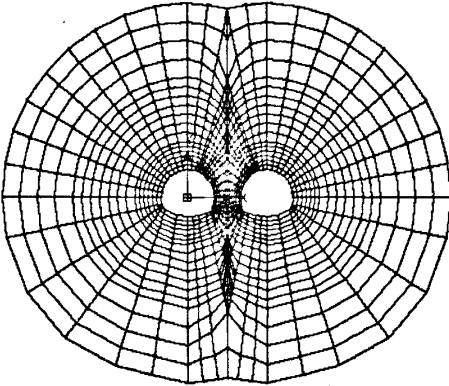


图 1 有限元网格剖分图

1.2 物理力学参数的选取

IV 级围岩的物理力学参数根据《公路隧道设计规范》(JTGD 70 - 2004)中相应的参数确定。在本文中各参数取值如表 1 所示。

表 1 隧道围岩物理力学参数表

围岩级别	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ /($^\circ$)	粘聚力 c /MPa
II	26	25	0.23	55	1.8
III	24	12	0.28	45	1
IV	22	4	0.33	30	0.5
V	19	1.5	0.4	25	0.1

2 IV 级围岩最小净距优化分析

由于 IV 级围岩在隧道围岩级别中比较常见,且

具有代表性,因此本文采用 IV 级围岩作为分析研究的重点。

2.1 屈服拉应力分析

运用有限元软件计算,得出不同净距其屈服拉应力,见表 2,并通过屈服拉应力数据拟合出不同净距屈服拉应力曲线,如图 2。

表 2 小净距隧道不同净距屈服拉应力(IV 级)

隧道净距	屈服拉应力/ 10^6 N	隧道净距	屈服拉应力/ 10^6 N
0.1D	10.95623	1.0D	0.21449
0.2D	0.37607	1.5D	0.149
0.3D	0.29711	2.5D	0.12458
0.5D	0.2449		

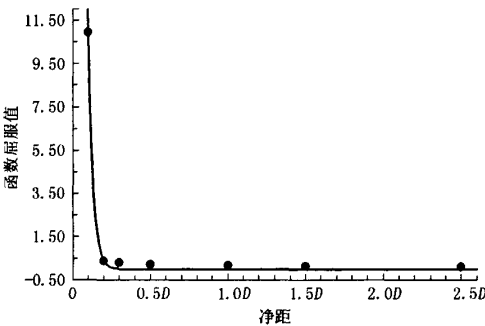


图 2 IV 级围岩屈服拉应力拟合曲线

隧道开挖后,围岩某些部分愈接近自由表面切向应力愈低,有时甚至于洞壁附近出现拉应力,即产生所谓拉应力集中。当最大拉应力大于岩体抗拉强度时,围岩将破坏。通过分析拟合曲线特点,可以找到曲线上某点斜率变化率最大,即当两隧道间距减小到某一值时,其最大拉应力明显迅速增大,超过围岩抗拉强度,隧道围岩屈服破坏。

2.2 格里菲斯判据分析

格里菲斯理论认为:脆性材料中包含有大量的微裂纹和微孔洞。材料受力作用时,在某一方向上的裂纹端部附近产生强烈的拉张应力集中。当拉张应力超过材料固有的结构连接力时,就发生开裂,并迅速扩展导致固体材料的破坏。材料的破坏正是由于这些微裂纹或孔洞在局部拉应力作用下产生扩展、联合的结果,而岩石中不同程度存在有各种裂隙,所以格里菲斯理论适合研究岩石的破坏问题。

格里菲斯判据如下:

$$\begin{cases} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = 8\sigma_t & \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \\ \sigma_3 = -\sigma_t & \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \end{cases}$$

从洞室围岩的潜在裂纹扩展情况和洞室周围的

拉应力分布特征可以发现,在拉应力分布的区域容易产生裂纹扩展。格里菲斯判据中也可以得到体现:因为当有拉应力出现,即 σ_3 为负值时, $(\sigma_1 - \sigma_3)^2/(\sigma_1 + \sigma_3)$ 将明显提高,与其他应力区比较,更易满足格里菲斯判据。

利用格里菲斯屈服函数计算出不同净距条件下函数屈服值,并绘出拟合曲线,如图 3。

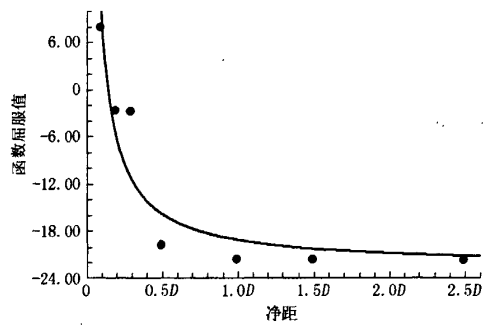


图 3 IV 级围岩格里菲斯屈服曲线

2.3 德鲁克 - 普拉格判据分析

德鲁克 - 普拉格 (Drucker - Prager) 准则是岩石力学中最为重要的强度理论之一,在岩土工程设计

与研究中,尤其是在岩土工程数值分析中应用极为广泛,该强度理论同时反映了体积应力、剪应力和中间主应力对岩石强度的影响,较其它强度理论更能反映工程实际。该判据适用于以延性破坏为主的岩石,对巷道围岩的破坏可以做出合理全面的解释。理论与实际研究表明,D - P 准则在有限元分析中能较好地模拟岩体的力学特性的弹塑性破坏,一方面它克服了库仑准则在角点处导数不连续的问题,另一方面也很容易与库仑准则结合起来确定计算参数,故计算中弹塑性破坏准则采用的是 D - P 准则。德鲁克 - 普拉格屈服表达式为:

$$F = \alpha I + \sqrt{J_2} - k$$

式中: $I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, 为第一应力不变量; $J_2 = (1/6)[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$, 为第二应力偏量不变量; $\alpha = \sin\varphi/\sqrt{9 + 3\sin^2\varphi}$; $k = \sqrt{3}ccos\varphi/\sqrt{3 + \sin^2\varphi}$, 为德鲁克 - 普拉格准则系数,其中 φ, c 分别为巷道围岩的内摩擦角和粘聚力;应力符号规定压应力为正,拉应力为负。

D - P 准则函数屈服值见表 3,拟合曲线见图 4。

表 3 D - P 准则函数屈服值 (II、III、IV、V 级)

围岩级别	净 距						
	0.1D	0.2D	0.3D	0.5D	1.0D	1.5D	2.5D
II	4.67953	2.88136	2.44284	2.01604	1.52416	1.58837	
III	3.05597	2.97254	2.31555	1.92189	1.50089	1.545	1.52112
IV	4.19299	2.71793	1.40745	1.3448	1.31891	1.35169	1.29164
V	3.41902	3.1065	1.19448	0.80683	0.950673	0.863972	0.879578

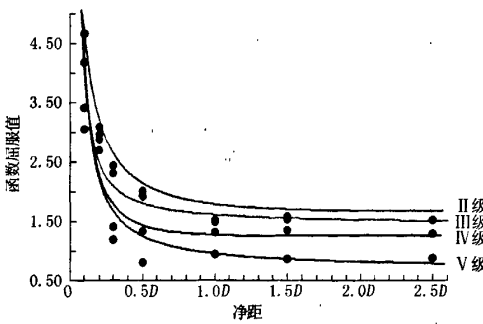


图 4 II、III、IV、V 级围岩 D - P 屈服曲线

此拟合曲线在 X 和 Y 方向上都有渐进线,随 X 和 Y 值增大逐渐趋近。可以运用数学方法在曲线上找出某点其斜率变化最快,即当净距减小到某一值时,德鲁克 - 普拉格屈服函数最大值会明显迅速增大,围岩产生屈服破坏。用这种方法进行小净距隧道合理净距的判断,不仅可以保证隧道的安全稳定,还能够在此基础上大大缩小小净距隧道中柱厚

度的要求,获得巨大的经济效益,给施工带来便利条件。

如果在地形容许的条件下,IV 级围岩小净距隧道的净间距 $\leq 1.0D$,但在实际工程岩体中,岩体质量将会受到地下水,节理裂隙等软弱结构面,初始应力等因素的影响,而且在隧道开挖过程中,应力重分布,中央岩柱二次应力场的叠加,拱脚易出现应力集中。隧道围岩边墙处,中柱,拱顶以及拱脚等都是容易产生破坏的部位。但是,如果在对这些部位进行特殊处理之后,小净距隧道净距可以适当减小,不应小于 $0.6D$ 。这样不仅可以保证隧道的稳定性,还能够大大节省施工费用,获得经济效益。

3 II、III、IV、V 级围岩最小净距优化分析

鉴于计算结果图表,数据繁多,限于篇幅不能一一列举,下面简单给出另外几个计算结果。

各级围岩小净距隧道处理前后最优净距及易破

坏部位如表 4 所示。

表 4 各级围岩小净距隧道处理后最优净距及易破坏部位				
围岩 级别	特殊处理前		特殊处理后	
	最优净距	容易破坏部位	最优净距	容易破坏部位
Ⅱ	0.5D	两侧拱脚附近	0.3D	拱脚及靠近边墙处
Ⅲ	0.8D	两侧拱脚附近	0.5D	两侧拱脚及中部边墙处
Ⅳ	1.0D	靠近隧道边墙处	0.6D	中柱中下部
Ⅴ	1.3D	中柱中上部	0.7D	中柱中上部

5 结论及建议

小净距隧道是解决狭窄地带展线的有效结构型式,它具有独立双洞造价低、工期较快的优点,又具有连拱隧道占地少,接线方便的优点。从使用角度讲,隧道净距越小,线型布置越灵活。但从安全角度讲,跨度越大,净距越小,风险越大。因此,当采用小净距隧道时,应通过科学分析确定合理间距。

本文运用有限元法,计算出隧道围岩的应力和位移,并通过岩石破坏判据屈服函数求出最大值来拟合曲线,找出曲线最小曲率点,从而判断小净距隧道的合理净距。应用这种方法比较直观形象,且有数据说服力。

几点建议:

(上接第 72 页)

90%,表现出了仿生非光滑表面较普通表面更耐磨的特性。

(2)仿生钻头与相邻孔段的普通钻头,其机械钻速变化不大,机械钻速主要与地层、钻头胎体硬度和金刚石参数有关,要提高钻头的钻进速度,应该根据地层情况选择适合的胎体硬度和金刚石参数,就仿生钻头来说,还需要选择合适的非光滑度。

(3)相邻孔段钻头胎体的磨损,仿生钻头内径较普通钻头磨损小,但外径和高度磨损都较大,胎体底唇面磨损形态大部分都为内低外高的碟形状,可适当提高内胎体金刚石浓度。

(4)比较适合该金矿复杂地层钻探的金刚石钻头应该是采用仿生非光滑的底唇面形状,根据地层的研磨性选择适合的胎体硬度和合理的金刚石参数,最好内外胎体采用不同的金刚石浓度或不同的

(1)一方面数值模拟需要理论和试验的支持,另一方面数值模拟又可作为理论和试验的延伸。如果有条件,应进行其施工过程及最优安全净距的试验研究。

(2)本文是按照平面弹性应变理论进行分析,只考虑自重荷载作用下小净距隧道最小安全净距的确定,实际还可以同时考虑小净距隧道在动力荷载,如地震荷载、邻近工程爆破等动力因素作用下,小净距隧道的最小安全净距的确定。

(3)建立平面应变模型对隧道进行数值模拟只是对实际情况的一种近似,若想更好地贴近实际,最好进一步考虑围岩的流变特性。

参考文献:

[1] JTGD 70-2004,公路隧道设计规范[S].
[2] 齐伟.岩体力学[M].长春:吉林大学出版社,2001.
[3] 伍磊.岩土工程数值法[M].长春:吉林大学出版社,1994.
[4] 翟所业,贺宪国.巷道围岩塑性区的德鲁克-普拉格准则解[J].地下空间与工程学报,2005,(2).
[5] 潘昌实.隧道力学数值方法[M].北京:中国铁道出版社,1995.

非光滑度。

参考文献:

[1] 任露泉,王再宙,等.仿生非光滑表面滑动摩擦磨损试验研究[J].农业机械学报,2003,(2):86-89.
[2] 任露泉,杨卓娟,韩志武.生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J].农业机械学报,2005,(7):144-147.
[3] 张毅,孙友宏,任露泉.钻头泥包的土壤动物仿生学分析研究[J].探矿工程,2003,(2):41-43.
[4] 孙友宏,徐良,等.JBD-75S 仿生非光滑绳索取心金刚石钻头的研制[J].探矿工程,2007,34(S1):291-294.
[5] 常领,陈华忠.PDC 钻头在胜利油田深井钻井中的应用[J].石油钻探技术,2007,35(4):92-93.
[6] 刘晓东,霍宇翔,李子章.电镀金刚石钻头镀前超声清洗机理及工艺研究[J].地质与勘探,2006,42(1):89-92.
[7] 马保松,张祖培,孙友宏.钻井工程用超硬材料及钻头的发展[J].地质与勘探,1998,34(2):50-54.
[8] 鄢泰宁,孙友宏,等.岩土钻掘工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.