

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.01.013

基于收敛-约束原理的岩质隧道初衬安全系数计算

刘少峰¹, 刘云¹, 苏永华²

(1.常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:以越岭公路岩质隧道为研究对象, 构建隧道围岩与支护结构的安全系数。首先, 基于围岩开挖后二次应力场的空间效应, 确定隧道模型的边界条件、尺寸要求及应力条件。结合实际的隧道工程施工工艺, 建立具备开挖支护功能的隧道三维数值模拟研究模型, 以该模型作为研究隧道开挖与支护结构耦合分析的基础。基于数值模拟计算, 分别构建围岩收敛曲线及纵向变形规律曲线。其次, 建立隧道围岩与支护系统的收敛-约束图, 并基于收敛-约束原理建立岩质隧道初衬安全系数求解方法。最后, 通过案例分析, 详细展示上述过程。结果表明该安全系数法可以量化表征围岩开挖与支护过程中的隧道安全性问题。同时, 若以安全系数为量化分析指标, 则能够对隧道施工工艺进行优化。

关键词:隧道工程; 围岩; 安全系数; 收敛-约束原理; 收敛曲线

中图分类号: U 451+.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2021)01-0085-08

Calculation Method for Safety Factor of Primary Lining of Rock Tunnel Based on Convergence-Confinement Principle

LIU Shaofeng¹, LIU Yun¹, SU Yonghua²

(1.School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2.School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the rock tunnel over mountains as the study object, the safety factor between the surrounding rock and the supporting structure of the tunnel was established. Firstly, the boundary conditions, dimensional requirements and stress conditions were studied based on the spatial effect of secondary stress after the excavation of surrounding rock. Combining with the actual construction technology of tunnel engineering, a three-dimensional numerical simulation model of tunnel with excavation and supporting function was built, which was the basis of coupling analysis of tunnel excavation and supporting structure. Secondly, the ground reaction curves and longitudinal deformation profiles of surrounding rock were also established respectively based on the numerical simulation analysis.

收稿日期: 2020-09-30。

基金项目: 江苏省高校自然科学基金面上资助项目(18KJB560001)。

作者简介: 刘少峰(1986—), 男, 河南郑州人, 博士, 讲师。E-mail: mrsfliu@126.com

引用本文: 刘少峰, 刘云, 苏永华. 基于收敛-约束原理的岩质隧道初衬安全系数计算[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 85-92.

Thirdly, the convergence-confinement diagrams between surrounding rock and supporting system were established, and the solving method of safety factor for primary lining of rock tunnel was also presented based on convergence-confinement principle. Finally, through case analysis, the above process was fully demonstrated. The results show that the safety factor method can quantitatively characterize the tunnel safety during excavation and support of surrounding rock. In addition, if the safety factor is used as the quantitative analysis index, the construction technology of tunnel can also be optimized.

Key words: tunnel engineering; surrounding rock; safety factor; convergence-confinement principle; ground reaction curve

隧道工程所处环境十分复杂,使得隧道围岩的开挖工艺、支护方法及开挖与支护间的动态耦合分析较为繁琐,相关过程具有一定的不确定性^[1-2]。加之中国相关规范对支护结构的设计建议仍以半经验法为主^[3-4],没有成熟的安全系数概念,使得在隧道工程中难以量化评估隧道围岩的稳定性或支护结构的安全性,给广大设计人员带来了一定的困惑。

现有尝试中,一些研究通过理论解析法或模型试验法来解决上述问题。如在考虑支护反力作用的情况下,结合 Schwarz 交替法获得隧道原位扩挖围岩力学特性的解析算法^[5],该研究丰富了围岩力学响应机制。再者,在围岩大变形控制中,可以通过现场试验或模型试验^[6-7],研究隧道开挖中的围岩渐进性破坏过程及位移和应力变化规律,从而优化施工方案,对保障围岩安全具有较强的实际意义。此外,在数值模拟中,通过分析隧道围岩破坏模式的差异性,获得了与试验方法吻合较好的数值模拟结果^[8],其建模方法及模拟过程具有较好的借鉴性。

同样,在围岩变形的安全分析中,有研究针对软弱质岩石环境下的围岩变形机制建立极限状态方程^[9],可以为岩质隧道工程设计及安全分析提供参考依据。此外,掌子面稳定岩体的最小安全厚度计算方法^[10]的提出,可以为隧道穿越断层破碎带的稳定性及安全防护提供清晰的求解方案,进一步解答围岩稳定相关机理,具有显著的实际工程价值。同时,结合强度折减法^[11],评估围岩参数与隧道工程稳定性间的演化关系,对控制施工进度、优化支护方案、提高开挖效率有一定的指导意义。

然而,在理论研究中,隧道模型大多以圆形开挖断面为主,而现实中隧道为非圆形断面居多,与实际状况有一定差异性。同时,隧道围岩开挖与支护系统间的动态耦合机理尚未形成统一意见,为促进施工工艺的优化,相关研究亟待加强。整体上,隧道工程的复杂性使其一直未有诸如房屋建筑结构所用的理论清晰、方法简易的安全系数求解方法,以致在隧道的设计、施工与后期评价等环节中,难以量化表述、分析或评估支护结构的安全性或围岩的稳定性,给隧道工程的设计与施工带来一定的困扰。

本文以表征隧道围岩与支护结构间动态耦合关系的收敛-约束方法为基础,通过构建隧道安全系数,对支护结构的安全性及围岩的稳定性进行量化分析。该方法在评估支护设计与优化施工工艺方面具有一定的实际意义。主要工作有:①结合围岩开挖扰动时力学响应机制,建立岩质隧道三维数值模拟研究模型;②根据数值模拟分析,确定隧道围岩与支护结构间收敛-约束关系;③根据收敛曲线与支护特征曲线的力学响应机理,建立隧道围岩稳定及支护结构安全性的量化分析方法;最后,通过一个开挖断面为曲墙拱形的岩质隧道工程案例,对上述方法进行完整展示与说明。

1 数值模型及支护结构特征函数

1.1 数值模型

隧道围岩开挖与支护结构的安装显然是一个三维动态过程。一个大尺寸的隧道数值模型可以获得较为精确的结果。基于隧道洞室开挖后岩体二次应力场的空间效应(如图 1 所示),发现沿隧道径向大约 4~6 倍半径范围外,由于应力重分布作用而造成的影响逐渐趋向稳定,切向应力基本恢复到初始状态。因此,为提高数值模拟的计算效率,文中拟建的大尺寸隧道模型的开挖断面边界取 5 倍半径。隧道横断面的网格划分采用放射式方法,即靠近隧道断面中心,网格越密集,远离隧道区域则较为疏松。沿隧道纵向的网格划分尽量保持较好的长宽比,使各个单元尽量均衡化。

模型中岩体采用实体单元,衬砌采用壳单元。在隧道横断面($x-z$ 向),两边及底部设置固定边界条件,顶部为自由边界条件,在各边界施加相应的应力场 σ_v, σ_{hx} , 如图 2 中所示。在纵断面($y-z$ 向),各范围的边界条件与横断面保持一致。在模型建立时,依据实际的隧道施工工艺,通过设置开挖步进行围岩开挖的模拟过程。在模拟开挖过程中,根据设置的监测点,自动记录围岩的收敛位移。

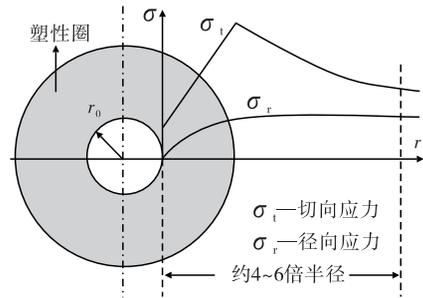


图 1 岩体二次应力的影响范围

Fig.1 Influence range of two stress of rock mass

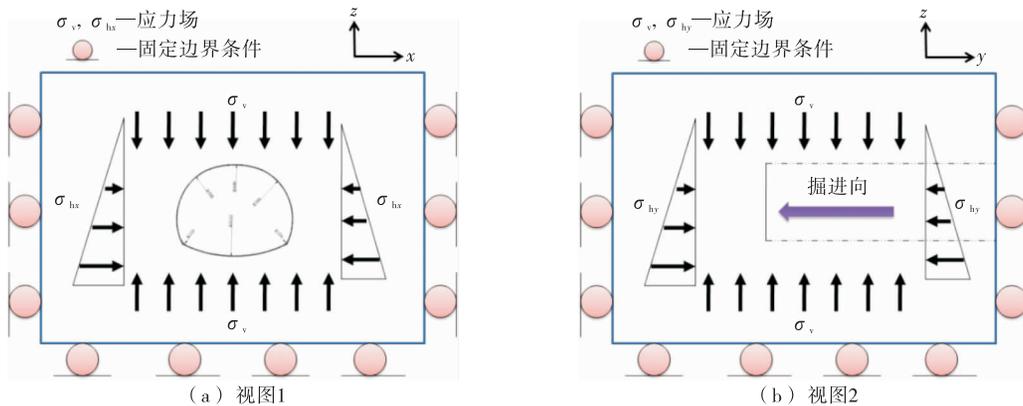


图 2 数值模型的边界条件

Fig.2 Boundary conditions of numerical model

按照文献[12],当隧道掘进是在一个非均匀的初始应力场时,初始应力场可由地层的两向的水平应力 σ_{h1}, σ_{h2} 确定,可参照文献[13-14]所建议的求解方法。

1.2 支护结构特征函数

RABCEWICZ^[15]、朱浮声^[16]等提出了巷道按组合拱原理进行加固设计的方法,分别可以获得喷射混凝土、锚杆、金属网及岩石承压拱的支护抗力。文献[17-18]建议了复合支护结构的极限抗力。基于上述成果,结合各支护材料的刚度、支护单元的抗力,按照组合支护理论建立支护结构特征函数:

$$p_{lim} = p_{sho} + p_{bol} + p_{roc} + p_{net} \quad (1)$$

$$p_{lim} = k \cdot u_{lim} \quad (2)$$

$$u_{sho} = \frac{p_{sho}}{k_{sho}} \quad (3)$$

$$k_{sho} = \frac{E_{sho}}{1 + \nu_{sho}} \times \frac{r^2 - (r - t_{sho})^2}{r [(1 - 2\nu_{con})r^2 + (r - t_{sho})^2]} \quad (4)$$

式中： p_{sho} 、 p_{bol} 、 p_{roc} 、 p_{net} 为喷射混凝土、锚杆、岩石承压拱、金属网的支护抗力； k_{sho} 、 u_{lim} 、 E_{sho} 、 ν_{sho} 、 t_{sho} 为喷射混凝土的刚度、变形量、弹性模量、泊松比及厚度； r 为隧道半径； p_{com} 为复合支护系统的极限抗力。

式(2)则为基于支护结构单元的材料属性建立的支护结构特征曲线。在确定组合刚度 k 及极限变形值 u_{lim} 后,则式(2)可以获得求解。

2 隧道结构安全系数建立方法

2.1 收敛-约束原理

通常,将反映围岩变形特征的曲线称为收敛曲线。在支护结构安装后,作用在支护结构上的荷载与支护变形的关系曲线称为支护结构特征曲线。收敛-约束原理是以圆形洞室为基础的弹塑性分析方法,主要解释围岩收敛变形与支护抗力间的动态耦合关系,从而为工程设计与实践提供理论依据。根据围岩收敛曲线及支护结构特征曲线,则可以建立隧道围岩开挖与支护结构间的收敛-约束图,如图 3 所示。

文中,收敛曲线由数值模拟计算而得。在收敛-约束关系中,关于支护特征曲线起始位置的确定,如图 3 中的 B 点,则是支护时机的确定问题,对施工工艺的优化有重要意义。确定方法为依据施工工艺,在岩体开挖后到支护结构安装时,所对应的围岩收敛值。图 3 中, p_{lim} 为支护结构的极限抗力。 u_0 为支护结构安装时围岩已产生的径向变形,由围岩爆破开挖后所产生的二次应力产生。同时,收敛曲线与支护特征曲线的交汇点 $A(u_{equ}, p_{equ})$,即为围岩变形与支护抗力之间动态耦合的平衡点。

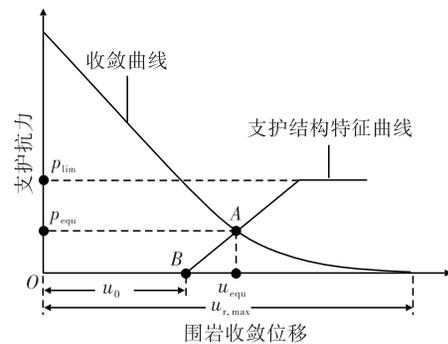


图 3 收敛-约束原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of convergence-confinement principle

2.2 支护结构安全系数计算

图 3 中, p_{lim} 为支护结构极限承载力,点 A 所对应的纵坐标值 p_{equ} 为围岩处在平衡状态时所施加在支护结构上的变形压力。则根据安全系数的定义(通常为结构抗力与荷载之比),安全储备 Δp 及支护结构安全系数 f_s 分别为:

$$\Delta p = p_{lim} - p_{equ} \quad (5)$$

$$f_s = p_{lim} / p_{equ} \quad (6)$$

式(6)为根据收敛-约束原理建立的隧道支护结构安全系数,若对该式进行求解,则还需获取隧道的纵向变形规律曲线,用该曲线或函数确定图 3 中 B 点的位置,即支护时机的确定问题。

2.3 纵向变形规律曲线建立方法

围岩开挖断面的纵向变形规律函数(Longitudinal Deformation Profile,文中简称 LDP 曲线)能直观地反映围岩径向变形随掌子面推进而动态变化的关系,对施工有很好的指导作用,如图 4 所示。

LDP 曲线可由模拟的围岩开挖掘进过程获得。此外,建议设置较多数量的模拟开挖循环过程,才能获得较为完整的 LDP 曲线,所以模型轴向长度建议取 20~30 倍洞径。每个循环中,围岩掘进进尺依据实际取 1~3 m。每个开挖循环后,布置的监测点自动记录断面的径向位移。将离掌子的间距设置为

横坐标,径向位移为纵坐标,则依据监测点数据可以建立隧道开挖的 LDP 曲线。

2.4 支护时机与施工优化分析

LDP 曲线能够指导支护结构的安装时机。将其加入到收敛-约束图中,则能够确定不同施工工艺下,支护结构特征曲线(如图 5 中 $S_{r,1}, S_{r,2}, S_{r,3}$)在收敛-约束图中的起始位置 u_1, u_2, u_3 。在图 5 中,假定 l_1, l_2, l_3 分别代表 3 种施工工艺,即分别为 1,2,3 个施工循环后再进行支护结构的安装。则各掘进进尺在 LDP 曲线上的对应点分别为 $Q_{r,1}, Q_{r,2}, Q_{r,3}$,这 3 点的横坐标即支护结构安装时隧道径向位移分别为 $(u_1, 0), (u_2, 0), (u_3, 0)$ 。支护特征曲线与收敛曲线的相交点所对应的纵坐标值即为求解安全系数时的平衡点支护压力 $p_{equ,1}, p_{equ,2}, p_{equ,3}$ 。

对于施工优化分析,根据极限状态下的支护抗力 $p_{equ,1}, p_{equ,2}, p_{equ,3}$,结合图 5,不难发现当 l_1, l_2, l_3 不同,支护效果也不尽一致。总体上,3 个位置所对应的平衡点值由大到小为 $p_{equ,1}, p_{equ,2}, p_{equ,3}$ 。该关系表明经施工工艺的优化,即经多次开挖循环后再进行支护结构的安装,所需的最小支护抗力逐渐减少,则根据计算式(5)、式(6),相应的安全富余量及安全系数显著提升。具体过程在本文案例分析中进行详细介绍。

2.5 隧道围岩变形控制方案

为利用岩体自稳能力,允许爆破后岩体出现一定的变形,释放部分变形压力。但是,为保障隧道施工安全,支护结构安装前的变形量应有严格的约束。量化表征时,图 5 中 u_1, u_2, u_3 作为 3 个不同的支护系统安装起始位置,代表了支护结构安装时围岩已发生的径向位移量,对其值应严格控制。即隧道安全定量描述方法除满足式(6)要求外,为约束围岩变形量、保障岩体稳定性,还应满足式(7)要求。

$$\epsilon_{equ,l} = \frac{u_{equ,l}}{R} \times 100 \quad (7)$$

式中: $\epsilon_{equ,l}$ 为围岩的径向应变; $u_{equ,l}$ 为采用不同施工工艺时围岩径向位移量; R 为隧道半径。

式(7)中,根据研究成果,径向应变 $\epsilon_{equ,l}$ 的值不宜大于 1%^[19-20]。所以,基于不同的施工工艺,则可以获得不同的安全系数。结合式(7),以安全系数为量化分析指标,则可以对施工工艺进行优化。

3 工程案例分析

3.1 工程背景

某岩质隧道的开挖高度、跨度等信息如图 6 所示。该隧道最大覆盖层厚度约 350 m。岩体的弹性

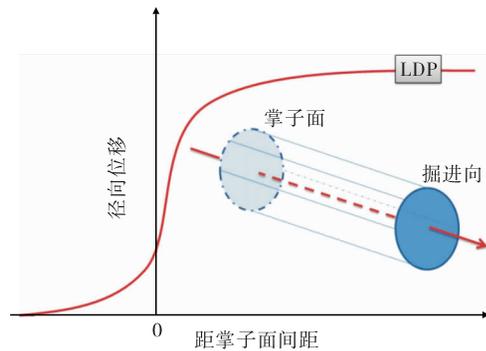


图 4 LDP 曲线与开挖掌子面关系示意图

Fig.4 Relationship between LDP curve and tunnel excavation face

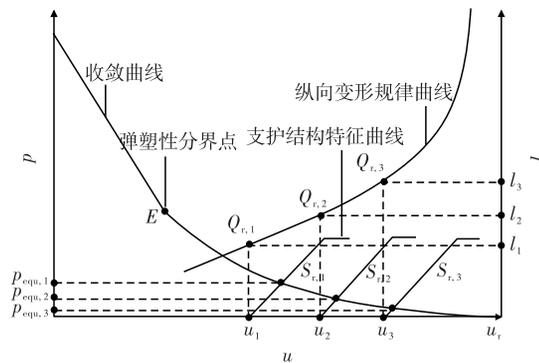


图 5 支护结构安装时机示意图

Fig.5 Schematic diagram of installation time of supporting structure

模量为 1.7 GPa、泊松比为 0.33、黏聚力为 0.45 MPa、内摩擦角分比为 30.85°。该隧道为曲墙拱型开挖断面,钻爆法施工,同时岩体质量适中,具有较强的代表性。所以,选取该工况作为文中方法示例对象。依据文献[17],可以求得该工程实例支护系统极限变形 $u_{lim}=3.083$ mm,极限抗力 $p_{lim}=0.693$ MPa。

3.2 计算结果分析

根据工程资料,建立该案例的数值模型,如图 7(a)所示。经逐级减小支护抗力,结合监测点记录数据,则可以绘制该工程实例的收敛曲线,如图 7(b)所示。LDP 曲线需要考虑隧道围岩开挖与支护过程的动态变化关系,因此,采用三维模型建立方法十分必要。根据前述二次应力影响范围,该工程实例模型及边界尺寸分别如图 8 所示。

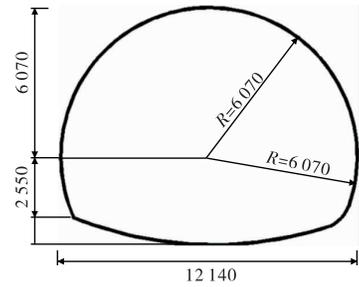
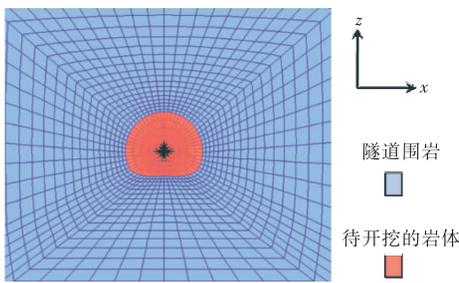
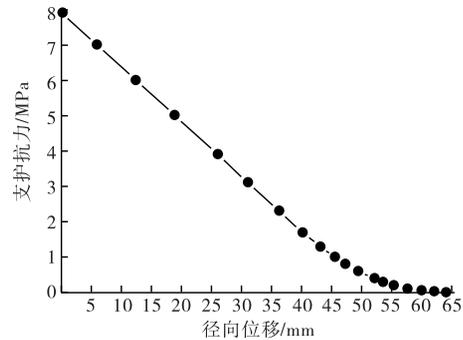


图 6 隧道断面轮廓简图(单位:mm)

Fig.6 Schematic diagram of tunnel section profile(unit: mm)



(a) 收敛曲线数值模型



(b) 围岩收敛曲线计算结果

图 7 收敛曲线数值模型及其求解结果

Fig.7 Ground reaction curve numerical model and its solution result

根据不同施工工艺所建立的 LDP 曲线如图 9 所示。图 9 则可以展示不同施工工艺下隧道断面的最大径向位移与掌子面间的动态变化关系。基于该关系,则可以确定收敛-约束图中支护结构特征曲线的起始位置,即支护时机确定问题。例如,依托该工程案例,为对比分析,本文共计列举了 3 种施工工艺,分别为开挖循环 1~3 m。

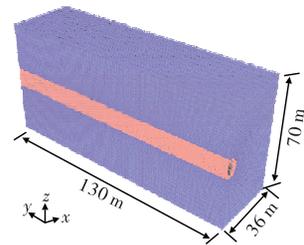


图 8 LDP 曲线求解模型建立结果

Fig.8 Establishment result of solution model of LDP curve

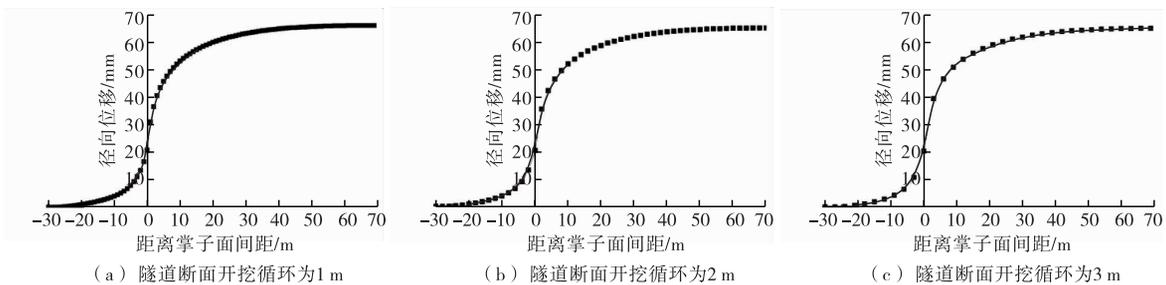


图 9 LDP 曲线建立结果

Fig.9 Results of LDP curves

根据图 9,选取 7 组数据,建立不同施工工艺下的隧道围岩与支护结构收敛-约束图,如图 10 所示。在图 10 中,可清晰的看到各施工工艺下的支护结构特征曲线,如(2,3; 6 m),则表示开挖循环为 2 m,在 3 个开挖循环后进行支护结构的安装(即未支护的岩体距离掌子面间距为 6 m)。所以,根据安全系数求解方法,结合收敛-约束图,则可以求解各个施工工艺下的隧道结构安全系数,见表 1。

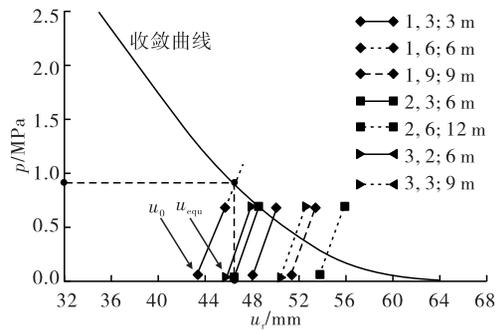


图 10 围岩收敛-约束图建立结果

Fig.10 Result of convergence-confinement curve of surrounding rock

3.3 基于安全系数的施工工艺优化方法

该案例中,有几组施工工艺的安全系数小于 1,理论上该隧道支护结构处在危险状态,如(1,3),(2,3),(3,2)组。解决方式可以采用加大支护抗力或采用施工工艺优化方法。对于施工工艺的优化,若在开挖进尺不变的情况下,待多个爆破开挖循环后再进行支护结构安装,即允许释放部分围岩压力。此时,正如表 1 计算的结果,可以发现在支护参数不变的情况下,隧道支护结构的安全系数获得逐步提高,如 $f_s(1,6) > f_s(2,3) > f_s(3,2)$ 。

表 1 隧道支护系统系数计算结果

Table 1 Calculation results of safety factor of tunnel supporting system

支护方案	p_{equ}/MPa	p_{lim}/MPa	$\Delta p/\text{MPa}$	u_{equ}/mm	$\epsilon_{equ, t}/\%$	f_s
1, 3	0.91		-0.27	46.52	0.77	0.70
1, 6	0.56		0.08	49.43	0.81	1.14
1, 9	0.38		0.26	52.51	0.87	1.78
2, 3	0.65	0.64	-0.01	48.56	0.80	0.98
2, 6	0.20		0.44	55.17	0.91	3.20
3, 2	0.71		-0.07	48.03	0.79	0.90
3, 3	0.44		0.20	51.67	0.85	1.45

当然,在施工工艺的优化过程中,循环次数不能过多,即围岩变形不能过大。依据文中式(7)所列控制条件,即在采用的施工工艺下,未支护的岩体径向应变不能大于 1%。若经支护优化设计后安全系数仍小于 1,同时径向应变已超 1%,则建议重新设计支护单元及支护参数。所以,在安全系数及围岩允许变形量双重指标的控制下,可以有效利用围岩自稳能力,提高支护效力,促进施工工艺的进一步优化。

4 结 论

1)根据地下工程开挖扰动时围岩应力响应原理,确定数值模型的建模方法,梳理收敛-约束图构建的主要过程,并建议围岩收敛曲线、支护结构特征曲线、LDP 曲线的数值模拟建立方法。

2)基于数值模拟研究,确定隧道围岩与支护结构收敛-约束关系。根据收敛-约束图中支护结构与隧道收敛变形的平衡状态,并结合安全系数定义,提出隧道工程支护结构安全系数求解方法。

3)通过工程实例分析,完整展示了上述方法的计算流程。研究表明,安全系数方法能够量化分析隧道支护结构的安全性及围岩的稳定性。隧道开挖掘进时,围岩爆破循环进尺、循环次数、支护安装时机等施工工艺对安全系数值影响较大。若以安全系数为量化分析指标,则能够对施工工艺进行合理优化。此外,根据围岩变形量、施工工艺的优化应结合围岩自身稳定能力而综合考虑。

参考文献:

- [1]李术才,朱维申,陈卫忠,等.弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):466-470.
- [2]丁文其,郑康成,金威.某深埋分岔隧道空间荷载结构计算方法[J].中国公路学报,2016,29(2):90-97.
- [3]招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范:JTGD70-2-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [4]中铁二院工程集团有限责任公司.铁路隧道设计规范:TB10003-2016[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [5]杨宾,林从谋,张在晨,等.隧道原位单侧扩挖围岩力学特性解析分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1458-1465.
- [6]杨忠民,高永涛,吴顺川,等.隧道大变形机制及处治关键技术模型试验研究[J].岩土力学,2018,39(12):4482-4492.
- [7]崔光耀,祁家所,王明胜.片理化玄武岩隧道围岩大变形控制现场试验研究[J].岩土力学,2018,39(s2):231-237,262.
- [8]文海家,胡晶,谢朋,等.含2条软弱夹层的隧道围岩开挖过程破坏模式研究[J].中国公路学报,2018,31(10):220-229.
- [9]李翔,李夕兵,周子龙.围岩变形准则下考虑目标失稳概率的岩石隧道可靠度逆向计算[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(7):1734-1741.
- [10]张骞,白松松,高昱,等.穿越破碎带隧道掌子面力学模型及最小安全厚度研究[J].中国公路学报,2018,31(10):141-149,219.
- [11]郑颖人,邱陈瑜,张红,等.关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):1968-1980.
- [12]GUROCAK Z, SOLANKI P, ZAMAN M M. Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site, eastern Turkey[J]. Engineering Geology, 2007, 91(2/3/4): 194-208.
- [13]SHEOREY P R, MOHAN G M, SINHA A. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(8): 1211-1216.
- [14]SARI Y D, GUNHAN P A, CETUNER E, et al. Numerical analysis of a tunnel support design in conjunction with empirical methods[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(1): 74-81.
- [15]RABCEWICZ L V, GOLSER J. Principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian Tunnelling method"[J]. Water Power, 1973, 3: 88-93.
- [16]朱浮声.锚喷加固设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1993.
- [17]刘少峰,苏永华,李帅.基于Duncan-Fama收敛曲线的隧道结构安全系数计算[J].岩土工程学报,2016,38(7):1307-1315.
- [18]ORESTE P P. Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence-confinement approach[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(4): 347-363.
- [19]HOEK E, MARINOS P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels & Tunnelling International, 2000, 32(11): 45-51.
- [20]LYU Q, SUN H Y, LOW B K. Reliability analysis of ground-support interaction in circular tunnels using the response surface method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1329-1343.

(责任编辑:李艳)