

文章编号: 1007-2993(2022)02-0122-07

深埋软岩隧道让压支护结构化实现方法

赵 伟

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

【摘要】 为了使让压支护更科学地应用于深埋软岩隧道变形控制, 改变常规初期支护以弯曲变形让压为主的力学模式, 基于结构稳定理论和大变形力学理论, 研究让压支护的结构化实现方法。研究结论包括: (1) 围岩稳定以拱结构为基本力学模型进行分析, 应采取整体性、系统性的控制措施; (2) 初期支护应降低几何非线性的影响, 实现变形大的让压需求, 同时规避力学大变形效应; (3) 初期支护在“柔刚-刚柔-强刚”的变刚度调平过程中, 必须以承载能力和稳定性得到保证为前提; (4) 围岩与初期支护形成叠合结构的关键是两者力学性能匹配程度和接触面抗剪切能力。

【关键词】 隧道工程; 软岩; 让压支护; 结构化实现方法

【中图分类号】 U 45

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.02.007

Structural Implementation Method of Yielding Support for Deep Tunnel in Weak Rock

Zhao Wei

(China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

【Abstract】 In order to make the yielding support scientifically applied in deformation control of deep tunnel in weak rock, the conventional support mode which mainly based on bending deformation yielding is changed, and the structural implementation approaches of yielding support is studied based on the theory of structural stability and large deformation mechanics. The conclusions can be listed as follows: (1) the stability of surrounding rock is analyzed with the arch structure as basic mechanical model, the integral and systematic control measures should be taken; (2) the influence of geometric nonlinearity should be reduced in the initial support, so as to realize the yielding demand of deforming largely, and avoid the occurrence of large deformation mechanical effect; (3) in the leveling process of variable stiffness "rigid-soft-rigid" of the initial support, it must be based on the premise that the bearing capacity and stability are guaranteed; (4) the key to the formation of composite structure between surrounding rock and primary support is the matching degree of mechanical properties and the shear resistance of contact surface.

【Key words】 tunnel engineering; weak rock; yielding support; structural implementation method

0 引言

进入 21 世纪后, 我国的交通工程、水利工程、矿山工程快速发展, 随着国家战略性基础设施建设往西部复杂艰险山区推进, 在建的川藏铁路、滇藏铁路等都面临深埋软岩隧道挤压性大变形的困扰。目前, 深埋软岩隧道大变形灾害的预防与治理, 已经成为山岭隧道建设和运营维护亟待解决的难题之一。常规锚喷支护结构往往失效, 导致侵限换拱, 更严重的导致围岩失稳垮塌, 工程进度迟缓, 风险加大。

从隧道的力学特征上讲, 围岩既有自己的材料

属性, 亦有其结构属性, 隧道采用分部开挖并控制循环进尺, 以及采用的各种辅助工法, 均需要结合简洁的力学模型加以分析和应用; 对初期支护, 核心的问题则是其变形能力和承载能力。李小红^[1]结合兰渝铁路大变形隧道施工经验, 依据“抗放结合”的原则, 提出了软岩隧道大变形控制的一些具体措施; 汪波等^[2]比较了强支护、分层支护和可缩式让压支护的力学特点, 提出让压支护具有边支边让等特性, 可充分发挥围岩及支护材料的性能, 应为软岩大变形隧道支护的最优措施。

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技重大专项(2019-A05); 中铁十八局集团有限公司科技研究开发计划项目(G18-07)

作者简介: 赵 伟, 男, 1977 年生, 汉族, 河南南阳人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程技术工作。

E-mail: swjtu_zhao@126.com

结构上的概念分析,是在对基础力学的共同特点抽象、概括与总结的基础上,着重从力学概念上分析结构的构造和受力特点,抓住结构强度、刚度、稳定性和动力反应问题等力学特性的关键要素。其意义在于,在工程设计和处理实际问题时,对结构的合理形式及相应的结构变形和内力等具有总体的概念和定性的分析判断^[3]。

地质力学中,用梁的弯曲研究皱褶的形成机制^[4];岩体力学中,用压力拱承载结构理论解释隧道开挖引起应力转移表现形式^[5];在地下大跨车站实践中,预应力锚索的应用^[6];在软岩隧道让压支护研究方面,环向让压支护^[7]、恒阻大变形锚杆(索)支护^[8]、钢格栅混凝土核心筒支护结构体系^[9]、限阻释能型支护^[10]、新型半刚性网壳支护^[11]等均可看做是对结构概念分析的应用。

上述研究成果很好地诠释了结构概念分析在隧道工程中的重要价值,但缺少对隧道开挖工法及各种辅助措施应用的力学机理进行系统地论述,初期支护的让压机理亦缺乏从结构稳定和大变形力学理论进行深入研究,有必要选择简单统一的力学模型,便于隧道工程技术人员掌握利用。

论文以深埋软岩隧道挤压性变形控制为出发点,从围岩结构和初期支护让压两个方面,运用结构概念分析理论研究围岩的结构特征、支护结构让压特征以及围岩和支护结构共同工作的力学机制,研究让压支护的结构化实现方法,并讨论了让压支护在深埋软岩隧道中的适用条件。对深入理解软岩隧道大变形控制的各种措施具有重要理论意义和实用价值。

1 围岩的拱结构分析及应用

1.1 围岩拱结构分析

新意法将隧道的开挖支护过程中的变形分为三种类型,即预收敛变形、挤出变形和收敛变形^[12],基于隧道稳定性与拱效应的密切相关性,建立了以控制掌子面稳定为核心的岩土控制变形方法。

隧道在开挖和支护过程中形成围岩的自承载体,可以看作有若干个不连续的承载拱组成。围岩稳定前,拱的位置和形状是动态的,从隧洞表面向深部发展,并趋于合理拱轴。由于拱的不连续性,当某一拱脚处在临近拱的塑性区内,围岩会沿拱脚作用力方向发生剪切滑动,导致围岩挤出或垮塌。

图1为围岩拱结构概念模型,拱结构的最大特点是利用支座的水平反力来减小跨间的弯矩,以便适应软弱围岩的强度特性(抗拉强度远低于抗压强度)。从围岩拱结构概念模型图上可以看出,围岩结构拱的

承载力除了和拱的跨度 l 、矢高 f 、围岩结构拱所受的荷载 q 的大小和分布特点有关外,还受到围岩的强度特征(黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和弹性模量 E)的影响。围岩稳定前,其拱结构的几何形状及材料物理参数也处于动态调整中;此外,拱脚的稳定对围岩拱结构承载能力有重要影响,拱脚的集中作用力,易造成拱脚处围岩的剪切破坏,导致拱脚的失稳。

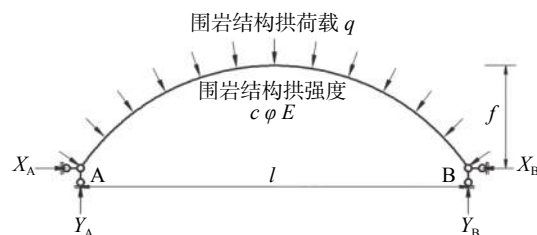


图1 围岩拱结构概念模型

1.2 围岩拱结构应用

隧道工程中,围岩中的拱结构既有横向的、也有纵向的,既有拱部的、也有边墙和底部的,围岩拱结构的稳定既取决于围岩本身特有的力学性质,也受开挖扰动的影响。软岩隧道采用小断面分部开挖(比如双侧壁导坑法、三台阶七部开挖法)可以看作减小横向拱的跨度;使用大缩脚锚管,则是为了稳定横向拱的拱脚;在纵向,控制循环进尺,控制台阶长度等,是为了减小纵向拱的拱跨;掌子面预留核心土或对掌子面进行加固,既稳定了纵向拱的拱脚,又加强了掌子面拱壳的稳定。以上措施均可看作拱结构在隧道工程中的应用,实现简单力学模型下对各种变形控制措施的系统化分析。

隧道开挖工法及辅助措施选择的前提条件是围岩要具有一定的抗剪强度,在开挖跨度内具备一定的自稳能力,如果围岩抗剪强度过低,或者地下水丰富,围岩拱结构难以形成,上述提高围岩结构稳定的措施便无从谈起,这正是进行超前引排水和超前预加固的原因,包括超前旋喷注浆、长大管棚、超前小导管等。

深埋软岩隧道常见地质为层状岩层(薄层状),层间走向及倾角复杂多变,往往存在地质偏压现象。因此,对于地质偏压情况,可以利用锚杆的叠合作用,提高结构面间的抗剪切能力,使之成为整体,避免岩层出现大量弯折碎胀。

对于水平层状岩层,顶部岩体处于层状受弯的状态,容易发生弯曲变形,或发展为竖向剪断。此类岩层,应根据围岩破坏情况,开挖前增设大倾角超前小导管,或在支护封闭后增设竖向锚杆,使围岩形成叠合结构或把松散岩体悬吊在深部岩体中,以此避免

顶部围岩的失稳。

软岩隧道中,处在顶部自承载拱下的围岩劣化,自重作用下必然松散垮塌,产生比较大的松散压力,因此矿山法隧道掘进前,拱部范围超前小导管是必不可少的预支护措施。在极软岩或水平薄层状岩体中,隧道开挖容易形成塌腔,则需要采取管棚支护的措施。

深埋软岩储存的势能高,隧道开挖后,发生应力重分布,同时,伴随着围岩内部能量的转移、耗散和集中。尽管隧道的切向应力增大是形成围岩承载拱的重要条件,但如果能量在切向过于集中,围岩应力超过岩体强度,将导致围岩发生破坏。深埋软岩的卸压技术通过将隧道周边围岩局部“掏空”,在围岩内部主动预留变形空间,以此降低应力的过于集中,同时实现围岩承载拱往深部转移,在围岩深部形成拱结构力学模型,在隧道周边形成低应力圈。

让压支护则是基于深埋软岩隧道在初期支护实施后仍具有较大的流变变形特性,初期支护在提供一定支护阻力、实现与围岩同步较大变形的过程中,其承载能力不降低的一种支护技术,并以此降低隧道周边围岩的切向应力和法向应力,降低围岩稳定需要的支护阻力。

2 让压支护的结构概念分析

2.1 让压支护基本原理

图2为让压支护原理示意图^[7],实线表示刚性支护的情形,虚线表示允许适当变形的让压支护情形,让压支护一方面降低了围岩中的切向应力,另一方面降低了围岩压力,对围岩和支护结构均起到让压保护的作用。

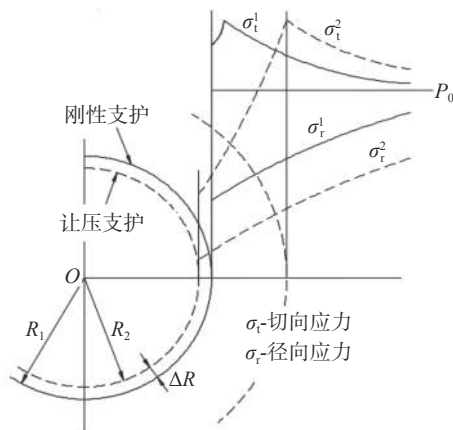


图2 让压支护原理

常规初期支护的刚度主要指的是结构的抗弯刚度。初期支护在大变形条件下,弯曲变形引起环向压力的偏心增大,产生附加弯矩,加速了支护的破坏和

围岩的失稳。当受到较大弯曲应力时,喷射混凝土出现拉应力破坏。因此,常规的弯曲让压支护实际上是一种先刚后柔的支护形式,且以牺牲支护的抗弯刚度和承载能力实现柔性,难以适应深埋软岩大变形隧道对支护结构变形能力和承载能力的要求,必须改变让压方式,确保支护结构的变形让压过程中,其抗弯刚度和承载能力不降低。

深埋软岩的强流变特性意味着能量释放具有时间和空间的相关性,让压支护通过动态的变形让压使得岩体能量释放,围岩应力和围岩压力以及保持围岩稳定需要的支护阻力得以降低。因此,“柔刚-刚柔-强刚”变刚度特性是深埋软岩隧道让压支护应具有的最重要的力学特征,也因为初期支护承担结构的功能,控制软岩隧道大变形最终必须依靠强而有力的刚性支护,让压的目的主要在于降低后期强刚支护的成本。

2.2 环向让压和让压预应力锚索的联合支护

图3为环向让压支护示意图。环向让压支护^[7]充分利用喷射混凝土抗压强度高的特点,在初期支护的弯矩或弯曲变形较小处设置低抗压刚度的金属让压装置,通过环向压力使得让压装置屈服,既能提供一定的支护阻力,又通过环向周长的缩短调整围岩应力和围岩压力,根本上改变了常规支护弯曲变形让压的模式,降低了几何非线性诱发的力学大变形效应的不利影响,确保了支护结构的承载力不因变形而降低,体现了“实现变形大,规避大变形”的让压支护原则。环向让压支护具有以下特点:

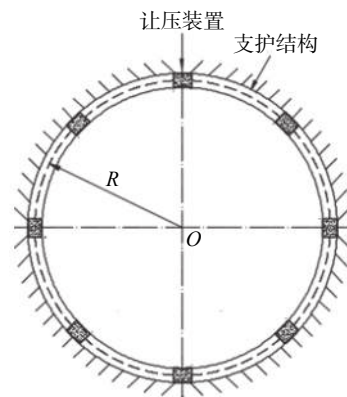


图3 环向让压支护示意图

(1)隧道初期支护属于压弯构件,喷射混凝土的弯曲变形能力较低,是支护结构破坏的主要原因。环向让压支护通过环向压力(轴力)使得让压装置屈服,与支护结构的内力特点相一致,通过让压装置的弹塑性变形吸收和消耗能量,符合围岩压力变化特点及支

护结构的受力性能;

(2)环向让压支护的让压装置应设置在弯矩较小处,同时,该区域剪力较大,应确保让压装置的剪切刚度和承载力,降低剪切错动,让压装置应具有“强剪弱压”的特点;

(3)Q235 钢具有延性好、对环境和温度适应性强的特点,且造价低廉,在工程结构耗能领域得到广泛应用,是制作金属屈曲型让压装置的理想材料,屈曲型环向让压装置的结构材料选用 Q235B 级钢。

短而密系统锚杆对围岩具有“加筋”作用,但由于其在实际工程中实施率低,对深埋软岩隧道变形控制的有效性有待实践的检验。长锚杆(索)在深埋软岩大变形隧道中可以发挥更好的作用。长锚杆(索)的结构作用,一是传递荷载,将围岩压力传递到深部稳定岩体,二是给支护结构提供支点,降低支护结构的荷载作用效应。锚杆(锚索)的应用可根据围岩稳定的时空变化择机选择,施工快,具有立即生效的特性,因此,深埋软岩隧道大变形控制应重视长锚杆(索)对围岩和支护结构的力学作用。

图 4 为外置式让压锚垫板结构构造图。外置式让压预应力锚索^[13]既可以加固围岩,将围岩压力转移至深部稳定岩体,又可以对支护结构起到减跨作用。通过预紧力的外置式让压锚索和环向让压支护联合,实现预应力锚索让压与初期支护环向让压的协调工作。外置式让压预应力锚索具有以下特点:

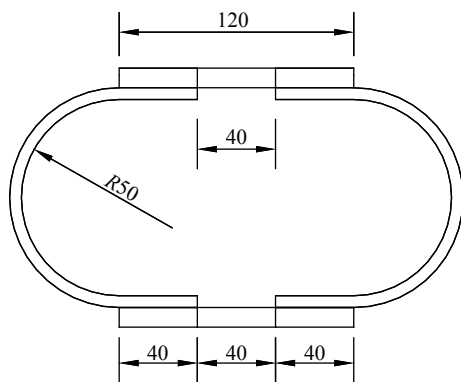


图 4 外置式让压锚垫板(单位:mm)

(1)预应力锚索通过外置式让压锚垫板的设计,在柔性支护阶段提供主动支护阻力同时,通过锚垫板的压缩实现支护阻力下的变形;

(2)预应力锚索在刚性支护阶段对初期的主要作用是减小跨度,提高支护结构的抗弯刚度,降低支护结构的内力。

联合让压支护的目的是适应深埋软岩隧道变形特点,从时间和空间上研究围岩、锚索、初期支护的

相互作用关系,从支护体系的刚度、强度、稳定性方面实现隧道的最终稳定。本文提出的联合让压支护是综合考虑预应力锚索与初期支护的协调变形和同步让压的作用,除了锚索发挥加固围岩,降低围压压力的作用外,更重视和强调锚索对支护结构的减跨效果,发挥锚索在调整支护内力和在强刚支护阶段的力学作用。

用伸缩缝将初期支护断开,在伸缩缝处设置环向让压装置,环向让压初期支护^[7]和预应力锚索锚头让压^[13]的协调变形使得伸缩缝随着围岩变形而相应变窄,此时初期支护发生刚体位移为主的周长缩短,待让压量达到预定值后,对伸缩缝处让压装置空腔进行补喷予以加固,并可根据变形收敛检测情况,采取增设二次初期支护等措施,同时提高锚索的预紧力,形成强刚高承载力的支护体系。

图 5 为联合让压支护示意图,将环向让压初期支护与外置式让压预应力锚索相结合,让压锚索与环向让压支护协同工作,实现支护初期的“柔刚”,提供一定的支护阻力。环向让压支护通过让压装置的弹性变形存储和消耗能量,让压量可控,整个变形过程中,支护体系的承载力和刚度不降低,实现支护中期的“刚柔”。预定让压量完成后,支护体系进入后期的“强刚”支护阶段。预应力锚索一方面对围岩提供主动径向阻力,使围岩处于三向受力状态,限制松动圈的发展,另一方面,预应力锚索对支护结构有减跨作用,提高了支护的刚度,降低了支护结构的内力,从而提高了抗弯、抗剪和抗扭承载力,实现了支护后期的“强刚”。

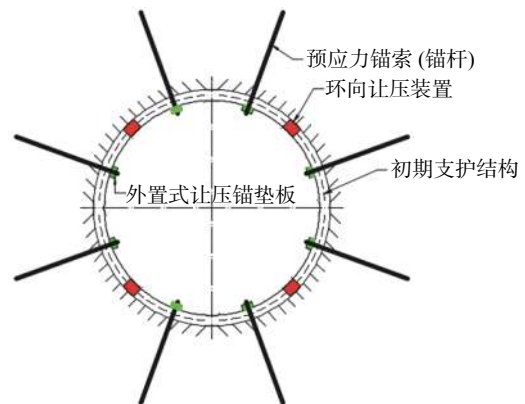


图 5 环向让压和预应力锚索让压联合支护

图 6 为联合让压支护的结构特征曲线,曲线①代表外置式让压预应力锚索的结构特征曲线;曲线②代表环向让压初期支护的特征曲线;曲线③代表联合让压支护的结构特征曲线。假定初期支护和预应力

锚索同步工作:

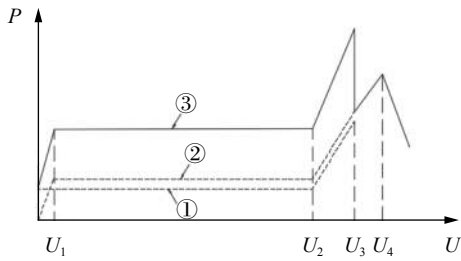


图6 联合让压支护结构特征曲线

(1)变形量达到 U_1 时,环向让压支护进入恒阻让压阶段,此时,预应力锚索也进入让压阶段;

(2)变形量达到 U_2 时,锚索和环向支护恒阻让压结束,随着围岩继续变形,锚索拉力快速增大,联合支护结构的承载能力和刚度得到提升;

(3)变形量到达 U_3 时锚索达到最大承载力,随后锚索失去作用,进入由初期支护单独工作阶段,直至初期支护达到极限变形量(U_4)后,进入后屈曲阶段。研究目标是变形达到 U_3 前围岩及支护体系取得稳定。

由上述结构概念的力学分析可知,联合让压支护,通过降低初期支护的局部抗压刚度实现柔性,通过提高初期支护的抗弯刚度实现刚性支护,更能体现先柔后刚的支护效果,材料利用率高,支护体系力学性能发挥更好。

2.3 围岩与初期支护一体化

图7为围岩和初期支护组成的支护体系示意图,由内到外依次是支护结构、围岩松散体和围岩挤密体,从力学效应上讲,三部分应形成叠合支护体。

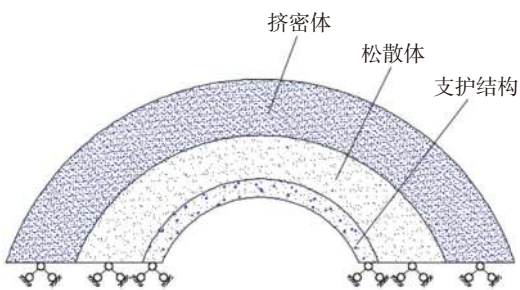


图7 支护体系的叠合结构模型

叠合支护不是几层结构单元的简单叠加,而是要实现一体化受力,组成刚度大、承载力高的叠合结构。叠合支护力学作用发挥的关键是叠合层接触面之间的抗剪强度和各叠合层之间物理力学性能的匹配。

对于深埋软岩隧道,隧道开挖变形引起表层围岩劣化,其物理力学性质(强度、弹性模量等)和喷射混凝土相比相差悬殊,松散体产生松散压力并将围岩压力传至初期支护,与喷射混凝土的叠合作用差,共

同工作的能力弱。因此,围岩和支护结构一体化受力的关键是提高围岩力学性质,提高支护和围岩接触面的抗剪切能力。图8为通过对松散体围岩注浆加固改良,支护体背面灌浆填充,以及利用注浆管提高围岩及围岩和支护接触面的抗剪强度,达到叠合支护的作用效应。



图8 围岩-支护叠合结构体系

3 深埋软岩隧道让压支护适用条件

围岩自承载能力的强弱和流变性质是决定支护结构刚度变化和支护时机的依据。若围岩的强度太低,无法形成自承载体,或围岩的流变不明显,隧道开挖引起的能量释放在短时间内(或瞬时)完成,则应尽早采用强刚支护,不应让压。

图9表示围岩压力、变形与支护成本之间的关系,水平轴代表围岩变形量或围岩从隧道开挖到稳定的时间。向上的竖轴表示围岩压力,向下的竖轴表示支护成本。

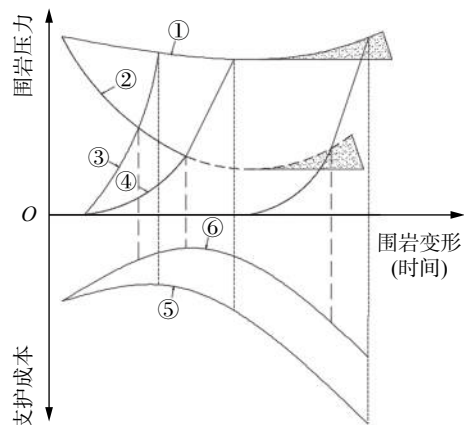


图9 围岩压力、支护成本与变形关系曲线

曲线①表示岩体强度极低,难以形成有效的自承载体,曲线②表示围岩通过一定的收敛变形能够形成自承载体,假定两种情况下,围岩均表现出强的塑性变形和流变性质。

曲线③表示刚性支护,曲线④表示让压柔性支护,假定两种支护结构在达到平衡状态前承载力不降低。

曲线⑤表示支护成本随着变形量的增加而增加,适用于围岩强度低,难以形成自承载体的围岩(曲线①),应该采用刚性支护(曲线③)。

曲线⑥表示一定变形量下,支护成本随着变形量的增大而降低,适用于能够形成自承载体的围岩(曲线②),应该采用柔性支护(曲线④),需注意,让压最大并非代表着成本最低。

曲线①所表示的围岩,其本身抗剪强度极低,仅具有荷载和传递荷载的作用,不能形成自承载体,任凭发生怎么大的塑性变形,围岩中的应力和稳定所需的支护阻力不会降低。过大的预留变形量必然导致开挖出渣工作量增大,支护结构跨度大,荷载作用效应大,提高支护的成本。因此,对于围岩强度很低的软岩隧道,除了在开挖前进行必要的围岩改良补强外,开挖后尽早实施强支护。

曲线②表示围岩具有一定的抗剪强度,围岩应力重分布能够形成自承载体,可以看出,此阶段围岩和支护结构共同变形,直至达到稳定状态。这个变形过程正是围岩卸压和支护结构让压的过程,在这个过程中,初期支护所受的围岩压力是逐渐增加的,但达到稳定平衡时所需的支护阻力降低了,控制软岩隧道大变形最终必须依靠强而有力的强刚支护,让压的目的主要在于降低后期强刚支护的成本。

本文所讨论的让压支护,应确保初期支护在让压的过程中承载能力不降低,也即其强度和稳定性在让压变形过程中必须得到保障,而这正是当前让压支护研究及工程实践中的核心问题。

深埋软岩隧道大变形控制要实现“刚柔-柔刚-强刚”的变刚度初期支护,让压变形量设计是核心的内容之一,变形量控制指标的确定应根据围岩能量释放需要和初期支护的变形能力综合考虑,进行一隧一议的力学计算和试验总结,从结构刚度上讲,通过“变形大”实现释放能量,从结构强度和稳定上讲,要规避“大变形”,确保承载力。

不同让压方式的初期支护,变形能力不同。控制变形量小时,可采用弯曲让压支护,控制变形量大时,则应采用环向让压支护。变形量的控制指标应考虑初期支护的力学特征,尤其是考虑初期支护在强刚阶段通过预应力锚索减跨和围岩-初期支护一体化后的承载能力,围岩必须在初期支护达到极限承载力前稳定,稳定前为让压阶段。

让压支护的目的之一是降低促使围岩稳定所需的支护阻力,降低到初期支护的承载范围之内,深埋软岩隧道的初期支护更多地承担结构的作用,从非线

性力学上讲,初期支护的变形能力和承载能力是一致的,极限承载力下的变形量即为极限变形量,深埋软岩隧道变形控制指标不应超过初期支护的极限变形量,或者说,初期支护的极限变形量既定的情况下,应采取措施进行围岩卸压或者提高初期支护后期刚度来控制围岩的变形。

深埋软岩隧道的让压支护应贯彻“柔刚-刚柔-强刚”的支护理念,其核心是支护结构的刚度控制,这里并非是把初期支护视为柔性阶段,二衬视为刚性支护,而是要实现初期支护本身的变刚度特性,并以初期支护的强度和稳定性得到保障为前提。深埋软岩隧道应加强变形监测分析,研判围岩的流变性质,适时加强初期支护的刚度。

4 结论

(1)结构概念分析是地下工程一种重要的力学分析方法,将深埋软岩隧道围岩自承载体简化为拱结构模型,围岩稳定应从岩体强度、纵横向拱跨、矢高和拱脚等方面综合施策,而非单一的治理措施。

(2)联合让压支护是解决深埋软岩隧道大变形的有效措施,常规锚喷支护较大弯曲变形情况下,力学大变形效应显著。环向让压护与让压预应力锚索联合让压支护,保证初期支护承载力不因变形大而降低,实现初期支护变形大,又规避了力学大变形效应的不利影响,且通过预应力锚索对初期支护的减跨作用,提高支护刚度,调整支护内力,达到了先柔后刚的支护效果。

(3)应用叠合结构的力学原理,实现围岩和初期支护的一体化受力,实现支护后期强刚的支护效果,其力学作用发挥的关键是提高围岩和喷射混凝土接触面之间的抗剪强度,并对围岩松散体进行改良加固。

(4)初期支护极限承载力下的变形量即为其极限变形量,深埋软岩隧道变形不应超过初期支护的极限变形量。

参 考 文 献

- [1] 李小红. 挤压性围岩隧道变形控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2019, (8): 64-67,103.
- [2] 汪 波, 郭新新, 何 川, 等. 当前我国高地应力隧道支护技术特点及发展趋势浅析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 1-10.
- [3] 彭俊生, 罗永坤. 结构概念分析与SAP2000应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
- [4] 刘国昌. 地质力学及其在水文地质工程地质方面的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1979.

- [5] 梁晓丹, 宋宏伟, 赵 坚. 隧道压力拱与围岩变形关系[J]. *西安科技大学学报*, 2008, 28(4): 647-650.
- [6] 陈学峰, 刘建友, 吕 刚, 等. 京张高铁八达岭长城站建造关键技术及创新[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(1): 21-28.
- [7] 雷升祥, 赵 伟. 软岩隧道大变形环向让压支护机制研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 1039-1047.
- [8] 何满潮, 郭志飏. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1297-1308.
- [9] 李术才, 徐 飞, 李利平, 等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1366-1376.
- [10] 仇文革, 王 刚, 龚 伦, 等. 一种适应隧道大变形的限阻耗能型支护结构研发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(8): 1785-1795.
- [11] 庞建勇. 软弱围岩隧道新型半刚性网壳衬砌结构研究及应用[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [12] LUNARDI P. 岩土控制变形分析法(ADECO-RS)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [13] 赵 伟, 雷升祥, 肖清华, 等. 让压预应力锚索在软岩隧道大变形控制中的作用机制研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(7): 1110-1117.

收稿日期: 2020-12-18