

隧道施工中软弱围岩变形地质施工技术探讨

潘华翔

广州建筑股份有限公司

摘要：隧道软弱围岩变形施工控制是隧道施工过程中非常重要的一个方面，软弱围岩容易发生变形，并引起相关的地质灾害，不利于隧道施工。为此，本文以软弱围岩变形地质隧道施工作为切入点，简要叙述软弱围岩的概念、特征与变形机理，掌握软弱围岩变形问题。从超前地质预报、超前支护、隧道开挖、初期支护、二次衬砌、隧道加固、掌子面变形控制等方面，分析隧道软弱围岩变形地质施工操作要点，旨在为工程软弱围岩变形的有效控制和工程的顺利完工提供保障。

关键词：隧道施工；软弱围岩；变形地质；施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.16.035

引言：现阶段，部分隧道工程处于软弱围岩的地质条件下，其变形大、施工成本高、工期时间长，如果处理不当，会出现隧道坍塌等安全事故。当前，一些施工人员对软弱围岩变形地质问题缺乏重视，针对这类地质条件，仍采取常规的隧道施工技术，无法有效应对复杂的地质条件，不利于实现安全生产目标和工程建设目标。因此，在施工期间，要加强对特殊地质条件的研究，掌握软弱围岩变形隧道施工技术要点，保障现场作业安全与工程建设质量。

一、隧道软弱围岩概述

（一）软弱围岩概念

从地质学角度来看，根据岩性来划分软弱围岩与坚硬围岩，软弱围岩多为泥岩、千枚岩和页岩等单轴抗压强度不足25MPa的岩石层，或是受到构造面切割、长期风化等因素影响形成的松散岩层。相比于普通围岩，软弱围岩的强度较低、胶结程度较差、孔隙度较大。

（二）软弱围岩特征

从隧道施工角度来看，软弱围岩特征主要体现在地质、变形两方面，对现场施工活动开展造成明显影响。第一，地质特征，软弱围岩的抗拉、抗压与抗剪强度较低，在施工扰动情况下容易形成塑性区，进而导致围岩结构和隧道支护结构产生一定程度的变形现象，严重时还会由此引发包括拱顶崩塌、掌子面失稳、初期支护结构失效、围岩涌水等一系列问题出现。第二，变形特征，软弱围岩变形量较大，在隧道施工期间会出现显著塑性变形现象，围岩洞壁位移值普遍在0.1-1.0m不等。同时，在隧道开挖过程中，坚硬围岩的变形速率较小，可在短时间内重新恢复至稳定状态，而软弱围岩则保持为长时间的持续变形状态，变形延续时间长、变形速度

快，出现软弱围岩蠕变现象^[1]。

（三）软弱围岩变形机理

软弱围岩变形是在隧道施工期间持续释放围岩应变能，在所产生剪切力等多重作用力的共同影响下，导致岩体保持相互错动状态，最终因围岩结构丧失自承能力、发生塑性变形，而出现断裂破坏、向开挖洞室方向挤压变形、隧道整体结构失稳等一系列问题。根据同类隧道工程现场施工情况来看，软弱围岩变形问题主要分为弹性变形、塑性变形、黏性变形三种类型。第一，弹性变形是在围岩承受外力作用时出现变形的现象，后续待外力去除后立即恢复变形部分，这也被称为弹性后效现象。第二，塑性变形是围岩结构承受外力时进行变形，外力去除后无法完全恢复如初，在围岩应力超出岩体弹性极限后也会出现这一问题，这是隧道围岩最为常见的变形形式。第三，黏性变形有着缓慢变形的特点，在围岩结构受力情况下，不会在短时间内完成变形过程，而是随着时间推移缓慢增加变形量，且应变速率和应力增加保持正比关系。

二、隧道施工中的软弱围岩变形地质施工技术

（一）超前地质预报

考虑到不同隧道工程的现场地质条件、软弱围岩变形程度存在明显差异，同类工程施工案例缺乏实际参考价值，无法完全贴合本工程现场情况。因此，施工单位需要提前组织开展超前地质预报工作，灵活运用地质调查法、钻探法、TSP203探测法等方法，根据调查结果来准确把握隧道沿线的地质构造条件，预测软弱围岩结构在施工期间的变形程度，将其作为挑选工艺技术、制定施工技术方案的重要依据。第一，地质调查法是由地质工程师前往现场观察地表裸露情况，对比现场情况与设计图纸内容，再运用GPS定位等技术手段来获取三维空间坐标值、地表特征等数据，绘制地形图，判断是否存在大型断层、软弱围岩等不良地质问题^[2]。第二，钻探法分为超前钻孔、加深炮孔两种形式，超前钻孔是在作业面前方地段内钻设若干孔洞并取芯检验，加深炮孔是在隧道内循环布设浅孔，孔内起爆药包。第三，TSP203探测法是在地层内人工激发地震波，地震波在隧道围岩内传播过程中遇到围岩强度变化部位后发生反射现象，再根据地震波反射信号处理结果来掌握反射界面位置、确定软弱围岩分布范围。

此外，施工单位要重复多次进行超前地质预报，在隧道施工前开展一次地质预报，根据预报结果来掌握现场地质条件、软弱围岩分布范围、隧道尺寸等信息，确

定施工工法。而在隧道施工期间，定期开展监控量测作业，对比实测数据和隧道围岩预测变形量，以此来保障地质预报结果准确性、真实性，如果发现预料之外的软弱围岩变形问题，及时修改施工方案内容。

（二）超前支护

在隧道施工期间，考虑到现场地质构造条件过于复杂，为避免在隧道开挖过程中出现坍塌等安全事故，应提前做好超前支护作业，采取纵向刚性梁构造支护形式或是横向刚性拱形构造支护形式，进而改善围岩结构状态。其中，梁构造支护形式包括超前小导管、超前管棚、水平旋喷注浆等，拱形构造支护形式包括钢拱架、拱形桁架等，具体根据加固部位来选择支护形式。

以隧道掌子面超前支护为例，可采取玻璃纤维锚杆加固桩支护形式，提前在施工现场进行放线定位，设置多处放线定位孔，要求把孔位偏差控制在2cm内。随后，施工人员操纵钻机开展钻孔作业，沿隧道开挖轮廓线环向布置钻孔，钻孔深度控制在15-20cm左右即可，根据钻孔情况来描述地质情况，对比描述结果和设计地质图内容。确定无误后，向孔眼内旋喷注浆来形成旋喷桩，待喷射完毕后在孔眼内中心位置垂直插入玻璃纤维锚杆，静置一段时间等待加固桩固化成型，在表面进行封孔处理。同时，提前根据工程情况来确定旋喷压力、浆液配比、旋喷喷嘴直径等工艺参数的最佳值，在成桩后检查临桩间咬合情况是否达标、是否存在缩径断桩等质量问题，必要时挖除加固桩后在原位重新开展支护作业。

（三）隧道开挖

现代隧道工程常用的隧道开挖工法包括双侧导坑法、中隔壁法、预留核心土法以及台阶法，根据隧道水文地质条件来选择恰当的开挖方式。正常情况下，普遍采取台阶法，把隧道结构断面拆分为上台阶、中台阶和下台阶三部分，各台阶开挖高度基本一致，开挖长度略有不同。第一，上台阶开挖。待超前支护作业完毕后，施工人员沿隧道开挖轮廓线向前挖设上台阶，把核心土预留量保持在2.0-3.0m以内，开挖进尺保持为每循环1榀钢拱架，台阶挖设成型后在围岩表面均匀喷涂厚度在4cm左右的混凝土面层起到封闭作用，以及搭设钢拱架结构^[3]。同时，在必要情况下，还应在作业面内设置临时仰拱，仰拱结构由钢架和混凝土面层组成，使用钢筋作为纵向连接件，把钢筋环向间距值控制在1.0m左右。第二，中台阶开挖。中台阶与上台阶的开挖做法基本一致，重复上述操作来控制开挖进尺、搭设钢拱架与喷射混凝土面层封闭围岩。随后，施工人员打入锁脚锚管与支护系统锚杆，必要情况下设置临时仰拱。第三，下台阶开挖。把开挖进尺控制在2-3m，搭配采取机械开挖、人工开挖形式来开挖隧道与清底处理，开挖结束后立即喷射混凝土面层来封闭围岩，打入锁脚锚管、支护锚杆

和喷射砼面层。

此外，在隧道开挖期间，还应重点关注预留变形量、掌子面稳定分析两项问题。第一，预留变形量问题。为避免在后续施工期间出现过于严重的隧道围岩变形问题，施工人员应提前在工程现场预留略大于原始开挖轮廓的变形空间。在选择预留变形量范围时，主要参照《公路隧道设计规范》（JTD D70-2004）规范要求，并结合现场实测数据来选择最佳的取值范围。第二，掌子面稳定分析问题。掌子面稳定情况与隧道开挖效果密切相关，如果掌子面稳定性不达标，难以在开挖后形成拱效应、有可能形成滑动带并造成剪切破坏，最终在掌子面上因围岩脱落而形成临空面。因此，施工单位应提前根据已掌握资料信息来判断掌子面稳定程度，分为不稳定、暂时稳定、稳定三种状态，在不稳定情况下，综合采取上台阶掌子面核心土预加固、上下台阶支护结构相互连接等措施^[4]。例如，在中下台阶拱脚部位，采取锁脚旋喷工艺技术，在拱脚处额外设置锁脚旋喷桩，在旋喷完毕后埋设长度和桩身等同、直径略大于桩径的钢管，再使用槽钢把钢管和拱架进行焊接连接，以此来改善隧道开挖过程中的钢拱架结构稳定性能。

（四）初期支护

在隧道初期支护环节，主要采取混凝土封闭、钢拱架、锚杆、锚喷网等支护形式，根据隧道围岩变形等级来选择支护形式、确定锚杆长度、混凝土面层厚度等工艺参数。为取得理想支护效果，不但要选择恰当的初期支护形式，同时，也要求施工人员全面掌握各类支护工艺的正确做法。

第一，混凝土封闭支护。提前清除掌子面上分布的灰尘杂质，制备混凝土浆料，操纵喷射机向掌子面上喷射混凝土，把喷头与受喷面间隔距离控制在0.6-1.2m内，保持二者垂直状态，喷射压力控制在0.15MPa内，喷射速度控制为10-15m³/h。随后，按照从下到上顺序完成混凝土喷射作业，检查面层厚度是否达标，把面层抹压整平处理，在厚度不达标部位开展补喷作业，全部喷射完毕后静置一段时间，养生期间保持混凝土表面湿润状态，直至混凝土面层固化成型。

第二，钢拱架支护。施工人员提前在现场标记拱架脚部位置，施作厚度在0.15-0.2m的坚固地基，或是把地面整平后放置强度等级不低于C25的混凝土垫块。随后，在洞外把钢拱架加工成型，洞内打入定位系筋与放置钢拱架，把系筋一端和钢拱架焊接固定，系筋另一端插入围岩结构后使用砂浆锚固处理。最后，待钢拱架搭设就位后，立即开展混凝土喷射作业，以拱脚作为起始点，分层在钢拱架上喷射混凝土面层，单层厚度控制在5cm左右，直至混凝土面层完全覆盖钢拱架，后续由钢拱架和混凝土层共同受力^[5]。

第三，锚杆支护。可选用D25中空锚杆、R25预应力

注浆锚杆等材质的锚杆件，在洞内外侧按照梅花形来钻设锚孔，清理孔内残渣与锚杆件表面灰尘锈迹，在孔内垂直插入锚杆后注浆加固，待锚杆孔内浆液注满后使用螺帽来封堵锚杆头。随后，重复上述操作完成剩余锚杆打入作业，再把锚杆外露部位联结成整体结构，重点检查锚杆头变形程度是否超标。

第四，锚喷网支护。锚喷网支护体系由锚杆、钢筋网和混凝土面层三者组成，共同承受在隧道施工期间的各种作用力。在现场施工期间，率先在洞内外侧钻设孔洞与打入锚杆件，注浆锚固后在锚杆外露部位上使用铅丝绑扎挂靠钢筋网，或是把钢筋网和锚杆头的相接部位进行焊接连接，必须保持钢筋网和隧道表面紧密贴合状态。随后，在钢筋网上分层喷射混凝土面层，严格控制喷射顺序、喷射压力、喷射距离和面层厚度，后续把面层压实整平与保湿养护一段时间即可。

（五）二次衬砌

在隧道二次衬砌环节，提前检查隧道开挖情况，如果存在拱部超挖等问题则使用与衬砌结构相同强度等级的混凝土进行浇筑填补。确定无误后，在衬砌部位支设模板、模板内绑扎钢筋、清理模板积水和涂抹脱模剂，依次完成仰拱超前、墙、拱等部位的混凝土浇筑作业，再把混凝土养护一段时间等待结构成型，到达养护时间、试块强度达标后拆除模板。最后，为避免衬砌结构受到水体侵蚀，还应在隧道两侧拱脚部位设置纵向排水管、仰拱中心部位挖设排水沟、防水层背后挖设盲沟，持续排出洞内积水。

（六）隧道加固

根据现场施工情况来看，在部分隧道工程中，由于地处围岩偏弱地段，存在上覆盖层风化严重、围岩破碎软弱、结构稳定性差等多项问题，尽管采取超前支护、初期支护与二次衬砌等多项技术措施，但实际支护效果并不理想，支护沉降量超标、侵限现象时有发生。因此，施工单位应在技术方案中额外对地表、洞内部位采取加固措施。

第一，地表加固。可在地表层采取注浆加固技术，在压力作用下把浆液填充至地层裂缝当中，同时起到防渗、挤密和劈裂作用，有利于提高隧道上覆土层整体强度，预防隧道围岩变形、涌水等问题出现。施工人员率先在隧道上覆土层表面按照梅花形来布设若干处注浆孔，保持前后排注浆孔交错状态，相邻注浆孔间距值为0.5m，使用水泥—水玻璃浆液作为注浆液。在注浆过程中，施工人员持续观测注浆压力、注浆量参数情况，任意参数到达设计要求后停止注浆，静置一段时间等待浆液固化成型后即可完成地表加固作业。

第二，洞内加固。在围岩强度等级过低情况下，可采取超前小导管注浆加固技术，从而取代常规前期加固方法，通过提升围岩整体强度来预防突水涌泥等问题出

现。随后，施工人员在隧道洞内的中侧、两侧拱腰中心部位纵向设置若干道工字钢作为竖向支撑，在隧道开挖期间同步开展初期支护、仰拱、填充作业，尽早封闭成环，并在仰拱作业完毕后在出现局部侵限现象的钢拱架部位进行换拱处理，进而在隧道开挖节段内形成完整受力体系。

（七）掌子面变形控制

施工人员应根据掌子面变形位置来采取具体控制方法，常见变形部位包括前方位置、挤出位置和后方位置。第一，在掌子面前方位置，需要开展超前支护作业，以此来承担开挖后所释放荷载，具体可采取小导管支护、插板法、预衬砌等方法。其中，小导管支护是在隧道开挖前于掌子面前方拱部位置斜向插入钢管，后续每掘进一段距离后重复打入钢管来防止拱顶坍塌。插板法是在拱顶部位插入若干数量的钢插板，保持插板相互搭接状态，适用崩塌性围岩和砂质围岩。预衬砌是在隧道结构表面施作厚度在0.2m左右的砂浆壳，或是厚度在0.3m的混凝土拱壳，起到控制地表下沉、稳定掌子面作用。第二，在掌子面挤出位置，可以着手改变掌子面形状、预留核心土。改变掌子面形状是施作倾斜掌子面或是球形掌子面，倾斜掌子面有利于预防坍塌、球形掌子面可以充分发挥承载拱效果。预留核心土是在开挖期间预留掌子面中心部位的土体，核心土以填土形态来维持掌子面稳定状态^[6]。第三，在掌子面后方位置，既可以采取锚杆、钢拱架或是喷射混凝土作为初期支护形式，起到承担开挖后释放全部荷载的作用，也可额外施作二次衬砌结构作为安全储备。

三、结语

综上所述，软弱围岩变形控制是隧道施工期间面临的重要工艺难题，同时，也是保障现场施工作业安全的重要举措。施工单位务必提高对软弱围岩变形问题的重视程度，着手推动现有隧道施工技术体系的创新优化，全面掌握多项变形控制工序的操作要点，严格把控现场作业质量，顺利实现隧道工程预期建设目标。

参考文献

- [1] 刘万全. 软弱围岩隧道变形及施工技术[J]. 交通世界, 2019, No. 494 (08): 89-90.
- [2] 姚欣鹏. 大干溪 I 号隧道软弱围岩大变形机理及其处治技术研究[D]. 长沙理工大学, 2015.
- [3] 张宇斐. 巴杰若隧道软弱围岩大变形施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017, No. 286 (07): 85-89.
- [4] 宗泽. 隧道软弱围岩变形控制技术研究[D]. 长安大学, 2019.
- [5] 邓胜强. 隧道软弱围岩变形特征及处治技术研究[J]. 西部交通科技, 2019, No. 142 (05): 125-127.
- [6] 王永军. 探析隧道软弱围岩施工技术[J]. 科技视界, 2016, No. 174 (15): 210+237.