软弱围岩隧道台阶法与 CD 法施工对比分析

袁江鹏　金郑察

浙江交工路桥建设有限公司　浙江　杭州　310000

摘　要：软弱围岩整体结构破碎、自稳性能薄弱，是隧道工程施工中的重难点地质类型，极易诱发围岩变形、掌子面坍塌等病害。为明确适配此类围岩的高效开挖模式，本文分别从施工工序、围岩控制效果、作业效率及经济成本多个维度，系统性剖析台阶法与 CD 法的应用特性，梳理两类工法的优劣与适用场景，以此为软弱围岩隧道开挖方案选型提供科学化参考依据。

关键词：软弱围岩；隧道工程；台阶法；CD 法；围岩支护

引言：当下国内隧道工程的建设范围，正逐步拓展至复杂地质区域，软弱围岩路段也随之不断增多；这类岩体整体结构松散，自身抗剪能力较差，开挖作业产生的扰动，极易引发内部应力重组，进而加大施工管控难度。本文以台阶法、CD 法两类常用开挖方式为研究对象，结合围岩受力变化特征，对比分析两种工法的实际施工特点，以此适配不同施工场景。

1 软弱围岩基本特性概述

在隧道施工当中，软弱围岩一般包含风化岩层、泥质岩层、破碎碎屑岩以及松散堆积土体等常见地质类型；和坚硬岩体相比，这类围岩内部会生成大量细微裂缝，岩体整体的完整度不足，岩土颗粒之间的粘结强度偏弱，很难承载隧道开挖过程中产生的各类应力。该类围岩还具备一定的时间变形特性，施工人员完成开挖卸荷作业后，围岩并不会立刻发生损毁，而是会慢慢产生塑性变形，一旦支护作业出现滞后，就容易出现拱顶沉降、边墙内缩等病害。除此之外，水体变化也会对围岩造成较大影响，地下水能够直接削弱岩体强度，加快岩土崩解软化的速度；同时它对应力变化十分敏感，大范围开挖扰动会破坏原始应力状态，因此施工时必须选用扰动更小的分步开挖模式，这也是我们挑选施工工法的重要依据[1]。

2 两类核心施工工法作业原理及施工流程

2.1 台阶法作业原理

在隧道施工项目里，台阶法经常被用于浅埋条件、中等截面尺寸的软弱围岩隧道当中，也是业内最为基础的开挖方式；该工法主要是从竖向方向拆分隧道断面，工作人员会把整体断面划分成上下两个作业区域，依靠台阶之间的纵向间距，去分散开挖带来的集中应力，以此缩短岩土裸露在外的时间。施工团队会放弃整体一次性开挖的方式，利用分层卸荷的手段缓解应力集中问题，也能让开挖与支护作业同步开展。简单来说，施工人员完成上台阶掘进后，配套的初期支护能够组合成闭环承载结构，用来承受上部围岩压力；下部断面施工时，成型的上部支护又能限制侧壁变形，以此提升断面整体稳定性，我们还能根据实际工况，选择双层或三层台阶模式，进一步优化围岩防护效果。

2.2 台阶法施工完整流程

正式启动台阶法施工之前，施工人员需要依据隧道断面规格，还有围岩实际的破碎程度，以此敲定台阶高度以及纵向错开的距离；常规施工环境下，上台阶高度建议设置为 3.5~4.5m，上下台阶之间的纵向间距，可设置在 8~15m 区间内。作业时优先掘进上部台阶，施工过程需要秉持小幅进尺、低扰动的作业准则，单次循环掘进长度不得超出 1.5m，同时及时清理掌子面松动碎石；随后开展上部初期支护作业，通过喷射混凝土、安置锚杆、架设钢拱架的方式，封堵围岩表层裂缝；待支护结构积攒足够基础强度后，再分层开挖下部区域，先掘进两侧边墙，最后处理中部核心土体；完善下半断面支护并衔接整体支护结构，结合现场监测数据，在围岩变形逐步平稳后，便可开展二次衬砌浇筑工作[2]。

2.3 CD 法作业原理

CD 法也被叫做中隔壁法，该类开挖方式，一般会被用于深埋状态、超大截面以及岩体破碎程度极高的软弱围岩隧道之中；施工人员会结合竖向分层、横向分块两种方式，搭配临时隔墙构件，把隧道横截面横向划分成左右两处单独的作业区域。和台阶法相比，该工法最大的特点，就是可以从侧向限制围岩产生变形，临时隔墙

能够阻隔应力的传播路径，进而缩小单次掘进作业所影响的围岩范围。当单侧断面完成开挖与支护作业后，隔墙结构能够抵消另一侧施工带来的侧向挤压作用，避免两侧施工作业互相造成负面影响；施工人员还能依据围岩实时变形数据，动态调整掘进进尺与支护参数，以此适配高危地质环境，从侧面降低掌子面出现坍塌病害的可能性。

2.4 CD 法施工完整流程

正式开展 CD 法施工之前，技术人员需要提前规划隧道截面布局，对断面做横向分区处理，划分出左上、左下、右上、右下四块作业区域，同时提前标记临时中隔壁的安装位置。施工环节需要依照固定顺序推进，先对隧道左上区域进行掘进，单轮开挖长度需要严控在 1m 以内，开挖工作结束以后，就要同步布设初期支护以及竖向临时隔墙；再对左下区域土体进行开挖，完善左侧区域的支护结构，促使左半断面形成封闭承载结构；后续再参照对称施工的思路，依次完成右侧上下区域的开挖与支护作业，并借助隔墙削弱开挖带来的扰动；待整体初期支护趋于稳定，围岩变形速度回落至标准范围后，便可分层拆除临时隔墙，最后施作仰拱与二次衬砌结构，以此完成整套施工作业。

3 台阶法与 CD 法多维度综合对比分析

3.1 围岩形变控制能力对比

围岩变形管控效果，是衡量各类隧道开挖工法适配性的重要评判标准，变形监测内容主要包含拱顶下沉、洞壁收敛两项指标，这类数据也能够直观体现隧道施工阶段的安全储备水平。台阶法主要依靠竖向分层的形式完成掘进作业，断面侧向位置并不会增设隔离支护结构；开挖上部台阶时，上层围岩会出现明显的卸荷反应，拱顶位置也就容易出现不间断的下沉现象；开挖下部台阶的过程中，台阶衔接位置容易产生应力叠加的问题，进而造成边墙向内收缩。该工法能够在围岩完整性较好、破碎程度偏低的区域，把变形幅度维持在合理范围，不过面对松散度高、具备流变特性的软弱岩层时，侧向约束力不足的缺陷就会暴露，围岩超限变形的概率也会随之增加。

反观 CD 法，临时中隔壁构件可以有效提升围岩防护效果；该工法通过横向分块的掘进方式，缩小单次作业的岩土裸露面积，以此减缓卸荷作用对原有岩体结构的损伤。永久支护搭配临时隔墙所组成的复合支护体系，能够同时抵御竖向沉降以及侧向挤压变形，隔墙还可以承接侧向多余应力，限制掌子面周边岩体发生偏移。分步开挖的模式，也能放缓应力释放节奏，有效规避突发应力波动造成的结构损坏；在相同施工条件下，该工法的拱顶沉降、周边收敛数值，会比台阶法分别减少 20%~35%、30%~45%，更加适合高危软弱围岩隧道的施工作业[3]。

3.2 施工扰动效应对比

隧道掘进作业的过程，其实就是岩体原始应力状态被重新调整的过程，施工扰动的强弱程度，还有扰动覆盖的区域范围，都会直接影响围岩的完整状态，偏大的施工扰动，还会催生大量新生裂缝，从而削弱岩体本身的承载基础。台阶法的作业流程相对简约，整体开挖作业次数并不多，主要的应力扰动，基本来自上下台阶两处大规模卸荷施工，扰动也大多集中在拱顶、仰拱以及台阶交接位置；不过该工法单次开挖截面面积较高，岩体内部应力释放速度会更快，在含水占比偏高的软弱围岩区域，这种急速卸荷现象，容易连通内部裂缝并积聚地下水，最终让岩体软化进而出现失稳问题，但低频的开挖作业，也能规避围岩承受反复扰动而出现疲劳损坏的情况。反观 CD 法，施工人员会把隧道整体断面划分成四块独立作业区域，单区域开挖体量更小，瞬时产生的扰动幅度更低，应力释放节奏也更加平缓；繁杂的施工步骤，同样存在相应弊端，分区掘进、支护布设以及隔墙拆除等工序，都会多次扰动浅表围岩，拆除中隔壁时还会引发二次应力调整。从实际施工角度来讲，岩体破碎程度较低时，台阶法综合表现更好，围岩破碎程度较高时，CD 法分步卸荷的施工模式会更加合适。

3.3 施工工序与操作难度对比

在隧道工程的方案筛选工作中，工序繁琐程度，能够直接影响现场施工组织难度，还有整套施工方案的容错上限。台阶法的施工逻辑较为直白，整体作业流程并不复杂，整套施工内容主要分为分层掘进、初期防护、衬砌浇筑三个部分，全程不需要加装以及拆卸临时支护构件；上下台阶的作业区域能够同时施工，各个作业面之间不会产生互相干扰，施工班组也不用适配复杂的工序衔接节奏，整体容错性能相对出色。该工法还能够兼容市面上大部分常规施工设备，像钻机、混凝土喷射机、挖掘设备都可直接投入使用，设备采购与调配难度偏低，一线作业人员的岗前培训周期也会被大幅缩短。CD 法的施工流程会更加冗长，对应的操作门槛也会有所提升，除基础开挖与永久支护作业以外，该工法还需要额外完成临时中隔壁的搭建、加固和拆除工作；技术人员不仅要把控分区开挖的施工质量，还要实时监测隔墙受力状态，以此规避结构开裂、形变等问题，隔墙拆除

时机也需要精准把控，不合理的拆除时间，会直接影响围岩稳定性或是耽误整体工期，复杂的交叉作业模式，也让该工法容错率远不及台阶法[4]。

3.4 施工效率与工期适配性对比

隧道项目的掘进速度以及工期适配能力，一般可以参照单循环作业耗时、月度掘进长度两项指标，工序繁琐程度、作业面数量、单次开挖深度，都会间接对施工效率造成影响。台阶法本身的工序结构比较简单，整套循环作业耗时会更少；上下台阶的双作业面，可以同步开展施工作业，以此减少多余的闲置工时，该工法还可以适当加大单次掘进深度。只要围岩状态能够满足施工标准，掘进速度就能得到有效提升，在常规中等断面的软弱围岩隧道内，台阶法每月掘进距离能够维持在90~120m，施工节奏相对平稳，比较适配地质条件良好、工期压力偏大的建设项目。CD 法的施工模式则有所不同，分区开挖、临时隔墙搭设与拆除等多项流程，都会拉长单循环作业时长；为保障施工安全，单侧区块的掘进深度还会被严格限制，叠加多工序交叉作业带来的统筹难度，设备闲置、工序滞留等问题也时有发生。同等施工条件之下，该工法月掘进量仅有 50~70m，工期投入成本相对更高，不过其能够有效规避围岩失稳、病害整改带来的停工问题，可依靠偏低的掘进效率，换取高危围岩地段施工过程的整体稳定性。

3.5 资源投入与经济成本对比

隧道施工产生的整体经济开销，大致可以划分为材料消耗、设备租借、人员薪资三个组成部分，不同工法在资源投入层面的区别，也会直接改变项目整体的造价成本。台阶法不需要额外搭建临时支护结构，施工所需材料，基本都用于混凝土、钢拱架、锚杆这类永久性支护构件，耗材种类偏少，用量也便于管控；该工法还能直接使用市面上普及的常规施工设备，并不需要额外采购或是租借专用器械；双台阶作业面还能共用同一批施工人员，精简在岗人员数量，以此压缩人力方面的支出。从单位掘进成本来看，台阶法具备明显的经济优势，很适合用来开展常态化、规模化的隧道施工作业。CD 法的造价短板主要体现在临时支护层面，中隔壁大多采用型钢与钢筋混凝土材料，前期搭建、后期拆除都会消耗大量物料，废旧构件的回收利用价值也比较低；复杂繁琐的施工流程，还需要配备更多作业人员与专项设备，进一步增加项目开支。虽说 CD 法前期投入成本更高，但该工法能够减少围岩坍塌、变形超限等病害的整改费用，综合对比下来，简单围岩工况更适配台阶法，高危破碎围岩场景，则更适合投入 CD 法保障项目长期效益[5]。

结束语：文章结合多项施工指标完成横向对比，同时划定台阶法与 CD 法对应的适用范围；台阶法整体流程简单，施工速度较快且造价更低，能够应用在浅埋、岩体完整性较好的常规隧道工程；CD 法的抗扰动与变形控制性能更强，比较适合深埋、破碎程度较高的危险围岩区段。两类开挖方式各有优缺点，施工阶段可结合地质条件、断面规格以及工期预算进行选用，后续也可优化改良工法，完善对应的隧道施工技术体系。

参考文献

[1] 李准, 王剑虹, 宁宇. 软弱围岩铁路隧道不同开挖方法数值模拟分析 [J]. 铁道工程学报,2026,43(2):54-58.

[2] 都俊宇. 软弱围岩隧道台阶法施工拱脚稳定性的控制技术 [J]. 建材发展导向,2026,24(7):79-81.

[3] 贾晓旭, 赵玉成. 软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析 [J]. 铁道标准设计,2016,60(7):121-125.

[4] 赵树林, 孟令东, 刘中欣. 隧道 CD 法施工不同开挖台阶长度对围岩稳定的影响 [J]. 水力发电,2025,51(3):64-70.

[5] 刘泽清. 顺向坡隧道 CD 法施工对围岩稳定性影响分析 [J]. 山西交通科技,2025(3):78-81.