

软弱破碎围岩中浅埋隧道稳定性问题的研究

铁科院铁建所 徐祯祥

一、前言

隧道是否稳定取决于临近于它的围岩是否稳定,而恰如其分的支护系统又促成它获得必要的稳定性。这个问题既是地下工程的岩石力学研究方法中的重要课题,又是施工与设计者们普遍关心的问题。

稳定性问题的研究包括分析确定它的判据以及探索促成隧道稳定的合理支护系统两个方面。近年来施工的不少浅埋隧道都位于软弱或者破碎的复杂地层之中,其稳定性更为人们所重视。本文通过对若干隧道的施工过程及量测资料的分析,讨论了浅埋隧道的稳定性判据以及与之相应的支护参数的确定这两个基本问题。

二、隧道稳定性的一般判据

隧道的开挖破坏了原来处于平衡稳定状态的岩体。此时,地层内的应力重新分布。重新分布的过程因围岩条件,支护方法,洞室参数等情况而异。换言之,在不同的情况下,这种应力重新分布的过程在不同的时间内完成。应力重新分布所造成的最明显最直观的结果就是使围岩内部和洞室的周边产生位移。

严格地说,只有在应力重新分布和位移的全过程最终结束时,才标志着围岩和隧道本身达到了新的平衡和稳定。通常,这个过程要经历一个相当长的时间。但是对于工程实践来说,只要这个过程基本上结束就认为隧道已进入稳定状态。

从稳定性的判断原则看,现场的观察和测试数据具有决定性的意义。到目前为止已有十余个铁路隧道和为数众多的水电、冶金、煤炭和军用洞室巷道等地下工程进行了系统的现场测试。表1为举例说明在一些地下工程中的测试项目和根据各自的工程特点确定基本稳定的判据。

从表1中各隧道和地下工程的不同测试项目和结果看出,尽管工程性质不同,但所选定的基本稳定的判据很相近,也即都用 $0.1\sim 0.3\text{mm/天}$ 的位移速率作为标准。

但是,这个位移速率值只是隧道和围岩达到基本稳定的一个起码标准。也就是说。仅仅用这个数值还不能判断它的最终稳定性。因此只把它称为“最初判据”。为了推断最终稳定性,还必须经过长期稳定性观测,以确认这个速率进一步减小,而且在相当长的时间内都没有增大的迹象。图1中的曲线a就是这种现象。之所以要提出长期稳定的问题,是由于有少数隧道在现场实测的过程中出现如图1中曲线b的情况。即初期阶段也曾出现过位移速率达到基本稳定的数值,但此时速率没有进一步减小,随着各施工工序的实施,位移不断增大,

几个地下工程基本稳定的最初判据

表1

工程名称	工程概况	测试项目	最初判据
南岭隧道(第四、五试验段)	通过破碎岩层,夹粘土层和劣质煤层。正台阶和弧导施工。复合式衬砌。	① 收敛计 ② 拱顶下沉 ③ 地表下沉 ④ 围岩压力	① 收敛速率 $\leq 0.2 \text{ mm/天}$ ② 地表拱顶下沉速率 $\leq 0.2 \text{ mm/天}$
南岭隧道(第二试验段)	通过破碎岩层,表层为砂粘土夹碎石,正台阶和弧导施工。复合式衬砌。	①、②、③同上 ④ 三点位移计	同上
大瑶山隧道(出口第一试验段)	处于断层破碎带的砂页岩岩层,节理发育。弧导施工。复合式衬砌。	① 收敛计 ② 单点位移计 ③ 拱顶下沉	三者位移速率 $\leq 0.1 \text{ mm/天}$
下坑隧道	处于风化严重的千枚岩中,夹碎石块。短台阶施工。二次喷锚网支护及复合式衬砌	① 收敛计 ② 单点位移计 ③ 地表下沉	三者位移速率 $\leq 0.1 \text{ mm/天}$
金川二矿区(双轨运输巷道)	稳定性极差的变质岩,断层及影响带。二次喷锚支护。	① 测杆 ② 多点位移计 ③ 钢弦应变计	$\leq 0.1 \text{ mm/天}$ (不包括③)
张家洼铁矿	第四系地层及粘土质粉砂岩。喷锚支护。	双点式位移计	$\leq 0.1 \text{ mm/天}$
鹤壁煤矿(三矿岩中巷)	软硬岩互层,泥质胶结,节理发育,受震动易塌落。喷锚支护	① 双点式位移计 ② 钢弦式量测锚杆	$0.1 \sim 0.2 \text{ mm/天}$ (不包括②)
引滦入津输水隧洞	通过断层,裂隙间绿泥石化严重。采用正台阶施工。早强喷射混凝土和早强砂浆锚杆	① 收敛计 ② 单点位移计	开挖后一个月内收敛速率 $< 10 \text{ mm/月}$

支护出现裂缝。这时,如不采取紧急补强措施,则裂缝不断张开,位移迅速增大,以致支护和围岩最后破坏。若干隧道由于支护参数,施工工序或围岩膨胀,流变等原因而出现的局部塌方和直至地表的大塌方就是这种位移发展所导致的结果。而位移发展又与围岩内部的应力变化有密切的关系。

当然,也不是所有隧道都必须做长期观测才能判断其最终稳定性。从大量隧道的现场观测结果看出,除了那些在膨胀流变的围岩中而支护工序又不得当的隧道以外,绝大多数的隧道工程经过初期阶段(通常2~3个月,少数为半年以上)测试数据的分析就能判断隧道已稳定或趋于稳定。

综上所述可知,在一般情况下,隧道稳定性的判断应遵循以下几项原则:

1. 隧道内周壁各特征点的位移速率应明显地和不断地减小。各特征点的总位移量应小于允许位移量。

2. 在有明显塑性流变特性的地层中,除了上述原则外,还应考虑围岩与支护间接触应

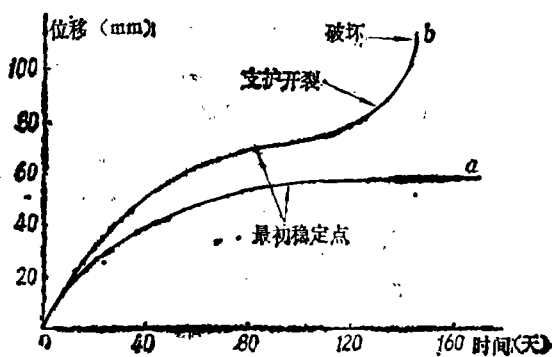


图1 两种位移—时间曲线

力变化的速率明显减小并且在一个相当长时间内应力不增长。

3. 围岩和支护表面无明显的裂缝。如果出现少量的裂缝, 这些裂缝应该不继续张开。

上述几条原则中, 周壁各特征点通常指隧道的拱顶, 拱腰, 拱脚, 墙中等各点。在有底鼓的隧道中还加上仰拱中部点。各特征点的总位移量指的是根据初期位移实测数据用回归分析的方法推求出来的最终位移值。允许位移量可由不同隧道的埋深, 跨度, 围岩类别, 支护类别等因素确定。

三、浅埋隧道稳定性的判据

(一) 关于浅埋隧道的定义

目前, 对于深埋隧道和浅埋隧道还没有严格的定义。但是, 在隧道施工实践中又经常引用这两个名词。因此, 应该对这两个名词作一个符合经验的大致区分。

隧道埋深的区分取决于下列因素: 围岩的类别, 隧道的跨度, 支护类型和施工方法。鉴于目前越来越多的隧道采用喷锚作为初期支护, 并以全断面或短台阶作为主要施工方法, 因此就以该两项为前提进行研究。

根据统计和实测资料分析, 建议按下述公式进行估算:

$$H = C\sqrt{B}(R - 0.5)$$

式中 H ——深浅埋隧道分界深度 (m)。

C ——支护系数 $C = 3.0 \sim 3.5$, 一般喷锚支护时取接近上限值, 喷锚支护加模注混凝土衬砌时取接近下限值。

B ——隧道跨度 (m)。

R ——隧道围岩类别值 (按国标锚喷规范) $R = 1 \sim 5$ (相应于 I ~ V 类)。

按上式计算, 对于铁路双线隧道 ($B \approx 12\text{m}$) 和单线隧道 ($B \approx 6.5\text{m}$) 可列表 2 如下:

深浅埋隧道经验分界深度 (m)

表 2

隧道类别 围岩类别 R 相当于铁路规定	I	II	III	IV	V
	V ~ VI 之 间	IV ~ V 之 间	III ~ IV 之 间	II ~ III 之 间	I ~ II 之 间
双线隧道	5 ~ 6	16 ~ 18	26 ~ 30	36 ~ 42	47 ~ 55
单线隧道	4 ~ 5	11 ~ 13	19 ~ 22	27 ~ 31	34 ~ 40

(二) 浅埋隧道位移特性

洞体开挖以后, 其四周岩体向洞内位移 (只有在极少数情况下局部围岩向洞外位移)。在其顶部的围岩表现为向下沉陷。对于浅埋隧道来说, 其位移有如下特性:

1. 洞内拱顶点的下沉毫无例外的会向上传递直至地表。地表点的下沉值一般比拱顶点下沉值小而且地表下沉点滞后一段时间。当埋深很浅, 围岩又异常破碎时, 地表下沉值接近于拱顶下沉值, 也即近于整体下沉。这一特性从图 2、3、4 三个隧道的实例可以明显地看出。

2. 在众多的位移测试项目中,通常以拱顶下沉和地表下沉两项为主要控制项目。这两项测试数据比其他测试数据都显著地大,因此往往成为浅埋隧道稳定性的主要因素。

3. 按照正常工序进行施工并选用了正确的支护参数的浅埋隧道,其顶部位移值尽管较大,但其变化规律仍然可以用回归分析的方法进行分析和估计。通常选用的对数,指数和双曲线函数都可以得到理想的回归精度和相关系数。

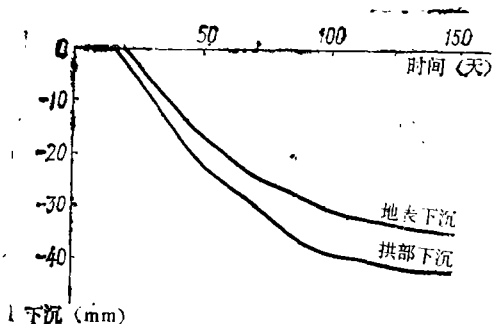


图2 下坑隧道2946+06段下沉值—时间曲线

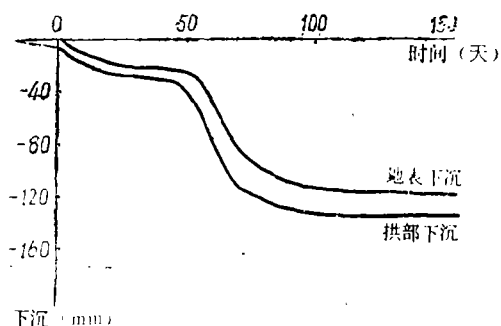


图3 南岭隧道第二试验段下沉值—时间曲线

(三) 浅埋隧道稳定性的判据

既然在通常情况下浅埋隧道的拱顶和地表下沉数值是它的稳定性的主要因素,因此我们可以主要从研究和控制地表的下沉来研究浅埋隧道的稳定性。

1. 下沉值与其它位移值的比较从表3可以看出在浅埋隧道中下沉值是主要的。但是应该指出,这里所列的数据都是就整体稳定而言。某些浅埋隧道也常有局部地段水平位移较大以致片帮的现象,这是就局部稳定而言。这种局部失稳只要经过局部补强就能制止,并不影响整体稳定性。

2. 下沉速率与塌方预兆 下面几个实例进一步说明下沉值与下沉速率是判断稳定的依据。

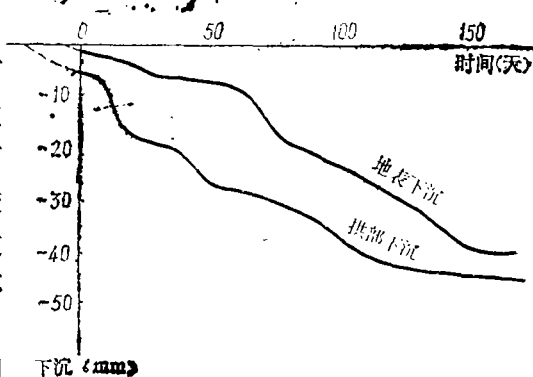


图4 南岭隧道第五试验段下沉值—时间曲线

浅埋隧道拱顶下沉值与收敛值比较

表 3

隧 道 名	测 试 项 目	拱顶(或地表)最大 累计下沉值 (mm)	水平最大累计收敛值 (mm)
南岭隧道 (第五试验段)		72	30
南岭隧道 (第二试验段)		65	17
下坑隧道		70	65
岷峨河隧道		16	7

(1) 南岭隧道第五试验段拱部在+92m处曾发生过一个约20m³的小塌方。为了监视其

周围岩体是否稳定,在+93.5m处和+94m处设置拱部下沉测点。在继续爆破掘进后发现该两点的下沉速率急剧增大,在爆破四小时后下沉分别为5mm和7mm(爆破前后下沉值尚未计入),也即其速率分别达到1.25mm/小时和1.75mm/小时,而且喷层表面出现了宽达10mm以上的纵横裂缝。从这些数据 and 现象判断该处将可能出现较大的塌方。故立即停止掘进,并用钢拱架和二次模筑混凝土进行加固。此时,顶部下沉很快就被控制,保证了支护和洞体的稳定。在顶部急剧下沉的过程中,拱部的水平收敛值变化始终很小,最大时约为0.48mm/天,二次支护以后降为0.01mm/天。

(2) 同一隧道第一试验段曾发生过一次直通地表的大塌方。塌方的直接原因是在已经不稳定的岩层中又进行大断面爆破掘进,导致围岩整体失稳。爆破前第二天,塌体上方地表下沉值为6mm,前天下沉值为15mm。这种位移速率猛增的反常现象,是岩层整体失稳的警报和浅埋隧道大塌方的预兆,如果在发现反常现象的初期即停止掘进,并进行紧急加固,大塌方是可能制止的。塌方点地表下沉发展趋势见图5所示。

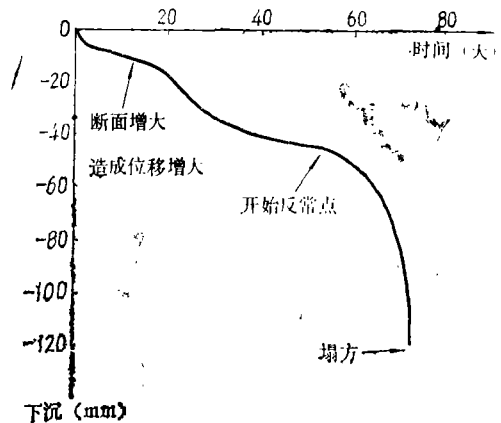


图5 塌方点地表下沉发展趋势

3. 稳定性的判据

综上所述可以认为,浅埋隧道的整体稳定性主要由拱顶或地表的下沉值和下沉速率的变化趋势来判断;隧道周边的局部稳定性则应根据地质描述或围岩的构造特性初步确定,然后根据对局部不稳定块体进行监测的数据判断。

根据浅埋隧道的施工实践,对它的整体稳定性,可以用下述几条准则来判断。

(1) 在初期支护以后拱顶和地表的下沉速率应该明显下降,在最终支护前,速率应 $\leq 0.1\text{mm/天}$;最终支护以后下沉速率应进一步下降,以至趋近于零。

(2) 在非爆破因素影响下,拱顶和地表的下沉应呈减速趋势。当累计下沉值接近允许值时,下沉速率应趋近于零。

(3) 当掘进工作面通过测点断面时,由于一次爆破影响造成的地表下沉值一般应小于5mm,而且其后每一次爆破造成地表和拱顶下沉值均应小于前一次。

(4) 拱顶和地表的下沉允许相对值应该小于表4所列数值。

浅埋隧道下沉允许相对值

表4

围岩类别	III	IV	V
下沉允许相对值(%)	0.1~0.2	0.15~0.4	0.2~0.6

注:① 下沉允许相对值系指累计下沉实测值与隧道跨度之比的允许范围;

② 硬岩取下限附近值,软岩取上限附近值。

(5) 支护表面无大量的明显的裂缝。

上述五个准则全部满足时,才能判断围岩和洞体是稳定的。

四、浅埋隧道的支护

处于软弱和破碎地层中的浅埋隧道,其围岩变形的特点是以垂直下沉为主。在埋深很浅的情况下可以认为隧道上覆岩层接近于整体沉陷。在这种情况下,新奥法的某些原则并不适用。例如发挥围岩自承作用的原则,以及应用柔性的初期支护让围岩变形,然后逐渐稳定的原则。但是,其他原则和要素在施工中仍适用。

处于复杂条件下的浅埋隧道一般不能形成岩石承载拱,这是和它的变形特点相关的。因此,拱部的喷射混凝土和锚杆虽然能及时支护一定范围的围岩,但是由于岩层之破碎,喷层只能使相当薄的一层围岩起“薄壳”的作用。而且由于上覆岩层近于整体沉陷,锚杆的优势也不能如深埋情况那样充分发挥。在这种情况下,仅仅用一般隧道中的柔性初期支护就无法抑制围岩的变形,因此隧道也不会逐渐趋于稳定。前面提及的南岭隧道第一试验段发生的直至地面的大塌方,尽管有种种客观原因,但是重要的一条是当时我们对于在上述复杂条件下的浅埋隧道变形特性以及相应的支护条件没有充分的认识。在其后的几段施工中接受了这种认识,并得到了成功。

处于复杂条件下的浅埋隧道的支护一般应遵循下述原则:初期支护应该具有相当的刚度和足够的强度,尤其要加强拱部支护。通常可以应用加大喷混凝土厚度,采用双层抗弯钢筋,应用早强喷射混凝土和早强砂浆锚杆,增加超前锚杆,必要时增加钢拱架等支护类型。最终支护(二次支护)的工作时间应以上面提及的基本稳定的标准予以控制。但是,它的前端面应比深埋隧道的情况更接近掘进工作面。根据围岩条件,它的前端面与工作面的距离应不大于跨度的1~2倍。

按照铁路浅埋隧道的施工经验,提出如表5所示的支护参数作为设计参考。

浅埋隧道支护参数表

表 5

围岩类别 隧道类别 支护类别	单 线 隧 道		双 线 隧 道	
	初期支护	最终支护	初期支护	最终支护
Ⅲ (铁路Ⅲ~Ⅳ之间)	喷射混凝土: 12~15cm厚; 锚杆: 2.0~2.5m长,间距1.2m 必要时设置仰拱	35cm厚模筑混凝土	喷射混凝土: 15~20cm厚; 钢筋网: φ6~12,20×20 锚杆: 2.0~2.5m长,间距1.0m 设置仰拱	40cm厚模筑混凝土
Ⅳ (铁路Ⅱ~Ⅲ之间)	喷射混凝土: 15~20cm厚; 钢筋网: φ6~8,20×20cm 锚杆: 2.0~2.5m长,间距1.2m 设置仰拱	40cm厚模筑混凝土	喷射混凝土: 20~25cm厚; 钢筋网(双层) φ6~12,20×20cm 锚杆: 2.5~3.0m长,间距1.0m 设置仰拱,和早强超前锚杆 必要时设钢架	50cm厚模筑混凝土

续表 5

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);"> 隧道类别 围岩类别 支护类别 </div>	单 线 隧 道		双 线 隧 道	
	初期支护	最终支护	初期支护	最终支护
V (铁路 I ~ II 之间)	喷射混凝土: 20cm 厚 钢筋网: $\phi 6 \sim 10$, $20 \times 20\text{cm}$ 锚杆: 2.0~2.5m 长 间距 1.0m 设置仰拱和早强超前锚杆必 要时设置钢架	45cm 厚模筑混 凝土	喷射混凝土: 25cm 厚, 钢筋网 (双层): $\phi 8 \sim \phi 12$, $20 \times 20\text{cm}$ 锚杆, 3.0m 长, 间距 1.0m, 加 早强超前锚杆, 设置仰拱和全断面钢架。	55cm 厚模筑混 凝土

- 注: ① 在施工的各阶段必须应用监控测试, 并以下沉观测为主;
 ② I, II 类围岩中的隧道, 其初期支护可参照 III 类围岩, 其中喷层厚度可减薄, 最终支护可适当减薄。
 ③ 当地层异常破碎, 自稳时间很短时, 可考虑从地表注浆加固地层。
 ④ 边墙的初期支护参数可根据情况适当减小。

五、结 语

浅埋隧道与深埋隧道在正常施工情况下的变形趋势和回归特性是一致的。这就使二者的稳定性判断的某些准则很相近。但是浅埋隧道又有它的特殊的变形特点, 因此在设计和施工中必须予以特殊的处理。本文提出的浅埋隧道稳定性判据是从若干塌方和未塌方隧道的施工监控和长期观测的数据分析而得到的, 并经过近年施工的几个隧道的检验, 因此可作为今后施工的借鉴。表 5 所建议的浅埋隧道支护参数是从已正常运营 4 年或已建成 2 年以上的若干隧道的实际调查而来的, 其中有些参数略有增高, 可以作为工程类比设计的参考。

当然, 目前还有一些问题尚待解决。例如深浅埋隧道分界深度如何从理论和试验的角度作进一步的研究; 浅埋隧道的围岩压力规律的研究以及根据这种规律进行支护结构计算方法的研究; 在浅埋隧道中更有效的测试技术的研究, 等等。这些问题的解决无疑会对浅埋隧道的稳定性以及合理的支护系统的进一步探索起到促进作用。

参 考 文 献

- 铁道部四工程局, 铁科院西南所铁建所, 铁道部四设计院, 专业设计院“皖赣线下坑隧道总结”1983. 12 “下坑隧道软弱围岩采用光面爆破锚喷支护大断面开挖试验总结”1981. 2.
- 铁科院铁建所隧道室“南岭隧道进口试验段第四、五区段现场试验总结”1981. 10.
- 铁科院西南所, 铁五局五处, “特浅埋软弱围岩隧道修建技术——南岭隧道采用新奥法通过洼地段”1984. 9.
- 中华人民共和国国家标准——锚杆喷射混凝土支护设计施工及验收规范 (报批稿) 1985. 3.
- 铁科院铁建所隧道室“大瑶山隧道出口试验段技术报告”1984. 7.
- 铁科院铁建所“引滦入津输水隧洞通过 $F_1 \sim F_{10}$ 断层的开挖与支护”1984. 1.
- 汪钟德“软岩巷道围岩变形破坏特性和锚喷支护”1984. 9.
- 铁科院西南所隧道室支护组“锚喷支护在金家岩双线铁路隧道软弱围岩中的运用”1982. 9.
- 铁科院铁建所西南所“铁路隧道现场测试技术要点”1985. 1.
- 铁路专业设计院标准处“双线电化铁路隧道复合衬砌 (专隧0025)”1984.