

南岭隧道坍方破坏分析

第四勘测设计院桥隧处 刘忠晋

一、前言

南岭隧道全长6058m,是京广铁路衡广段增建第二线重点工程,为了在浅埋、软弱围岩中推广采用新奥法,实现大断面开挖,施作喷锚支护和复合式衬砌,铁道部第五工程局会同各有关单位组成试验组进行现场试验。试验地段位于南岭隧道进口端70余米处,长123.4m。

1982年5月试验段从北端(第一试验段)开始施工,到9月份完成隧道初期喷锚支护13.4m。10月12日当掘进到26m处时发生了坍方破坏。隧道破坏长度13m,千余方坍体堵塞了整个隧道断面。虽未造成伤亡事故,但坍方处理耗资费时,直到翌年6月才告结束。

试验段的坍方破坏是南岭隧道试验工作的一大损失,但并非是新奥法本身造成的,更不能说新奥法在南岭隧道试验中已经失败,恰恰证明新奥法的基本原则是不能违背的。

二、地质概述

南岭隧道穿越横断东西的南岭山脉。隧道进口端位于南岭北麓,通过剥蚀低山的坡脚,地形极为低缓。试验段埋深7~30m,属浅埋双线隧道。

试验段工程地质纵断面如图1所示,隧道通过下石炭系地层:上部为石英砂岩与泥质、炭质页岩互层;下部为灰岩与砂页岩互层,岩层呈小型褶曲形态。

洞内地质素描见图2。洞体上半部为断层破碎带,严重风化为粘土夹岩块,呈泥包块松软状态;石英砂岩层厚10~30cm,岩质坚硬、性脆,节理很发育,稳定性很差。

洞体下半部砂质页岩为薄层,软致密坚硬。灰岩为中厚层,岩质坚硬,节理发育,溶蚀现象发育,在洞体左下部及左边墙均遇溶洞。

地下水不发育。壤中水水量微小,开挖面呈间歇或连续滴水。岩溶裂隙水呈小股径流,流量 $Q=300\text{m}^3/\text{d}$ 。

总之,试验段围岩遭受地质构造作用剧烈影响,不同构造部位岩体的破坏程度有明显差异,岩体强度及完整性也有较大差别。从隧道总体稳定性考虑,按铁路隧道围岩分类属Ⅱ类围岩。

三、施工简介

根据地质条件和施工机械设备情况,试验段开挖采用上、下半断面短台阶法,阶长度为3~5m,每开挖循环进尺1m,上、下半断面一次爆破成型,以喷锚网作为初期支护。隧

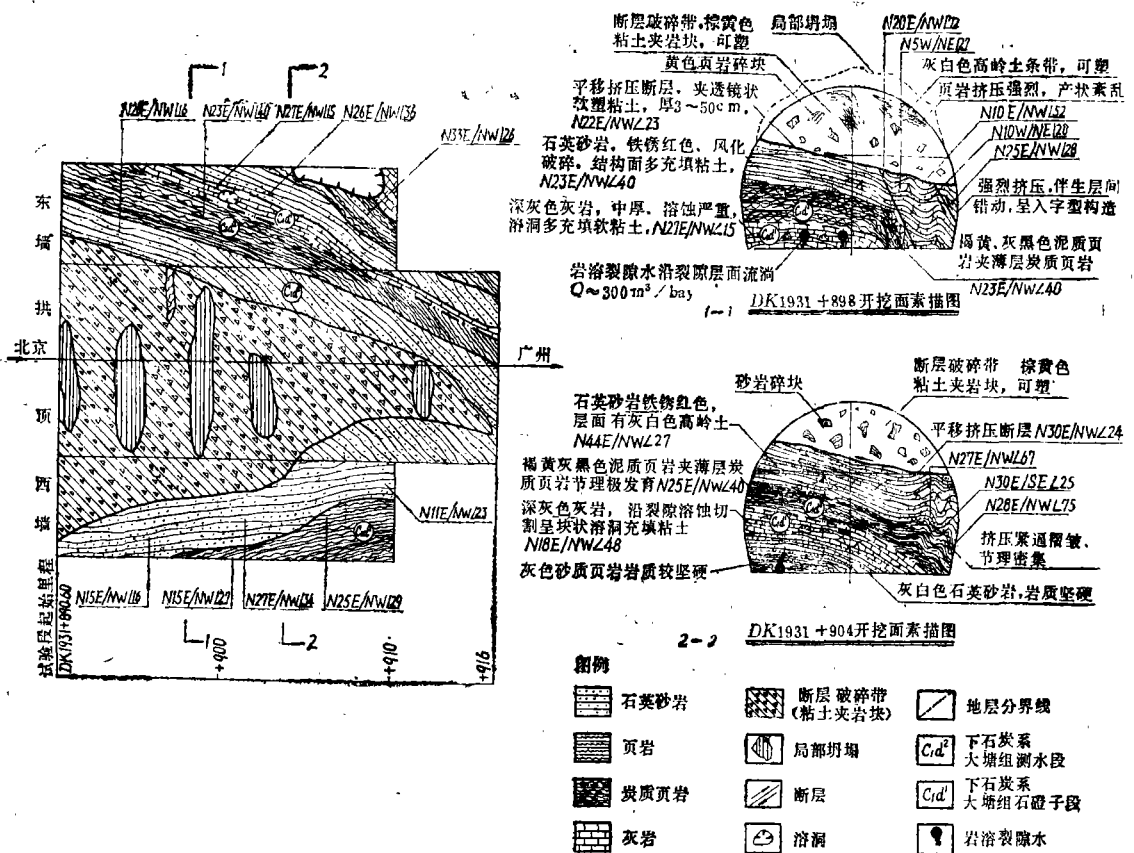


图 2

道支护参数见下表:

项 目	支 护 参 数	项 目	支 护 参 数
法向锚杆	φ22 1-3m 间距1m 交错布置 (25根/延米)	喷混凝土	初喷5cm, 一次网喷5m, 二次网喷8cm (总厚18cm)
超前锚杆	φ22 1-2m 间距1m (15根/延米)	二次模注衬砌	拱顶厚50cm, 拱脚厚70cm, 墙中厚110cm
双层钢筋网	一层网φ6 网格40×40cm, 二层网φ8 网格20×20cm		

施工顺序: 爆破开挖后先喷混凝土, 然后安设锚杆, 挂钢筋网后再喷混凝土。为防止局部坍塌, 增添了超前锚杆和挂临时钢筋网护顶等措施。上半断面齐头作业循环时间约需30小时。

上、下半断面施工分别采用流水作业。下部开挖不挂临时网、不打超前锚杆, 其余与上部工序基本相同。待下部开挖累计长度为5m时, 进行拱、墙一起挂钢筋网喷混凝土, 完成隧道初期支护闭合。

自1982年5月开始至10月12日坍方前, 共完成上部开挖25.4m, 下部开挖20.4m, 全隧

道断面的初期支护43.4m。由隧道开挖到初期支护的完成需经72~112天时间。随着施工进展,喷层反复出现了开裂现象。另外,开挖过程中曾多次发生局部坍塌,致使施工作业循环始终不能正常进行。

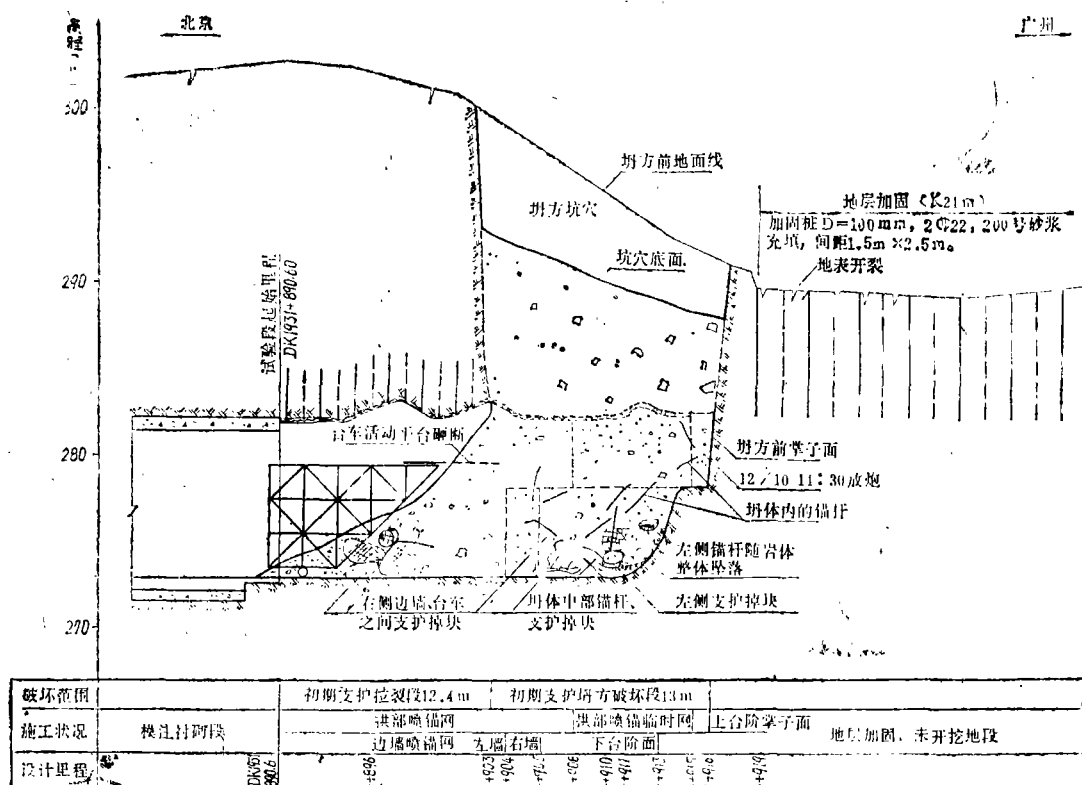


图 3

四、试验段坍方经过及坍方处理

试验段坍方前施工情况如图3所示。

坍方前六天以来,初期支护喷层又出现开裂现象,右拱脚附近纵向开裂最为明显,坍方前一天。

下部放炮发生台阶正面坍滑。10月12日坍方这天上午发现DK1931+905~910地段拱部喷层有新裂缝出现。下午2时40分DK1931+915上部放炮,开挖面为破碎石英砂岩,爆破成型较好,仅拱部有零星掉块。但险情却出现在后方——DK1931+905~910地段:拱部喷层普遍开裂,并有掉块。炮后一小时右拱脚附近围岩随同喷层一起坍塌。DK1931+906处环裂发展异常迅速,仅过3小时这条裂缝从左拱腰延伸至右拱肩(增长约5m)。至晚9时坍塌掉块越来越严重,从DK1931+905~910右拱脚内挤,接着拱部支护不断破坏坍塌,破坏范围迅速扩展,最后于23时43分发生坍方冒顶破坏。从DK1931+915上部放炮至最终坍方崩溃共经历9小时。

坍方发生之前曾多次看地表,未发现地表开裂现象,发生坍方的当天,拱顶下沉20.5 mm,地表下沉15mm。坍方前各项量测最大位移值见下表。

坍方前各项量测最大位移值

项目名称	设 置 里 程	测点编号	最大位移值 (mm)	附 注
地表沉陷	DK1931+901	X_1	104	
拱顶下沉	DK1931+902.4	Δ_{IV}	95.8	
断面收敛	DK1931+893	S_{I-I}	74.54	
单点位移	DK1931+914	D_{IV8}	46.2	有倒缩现象

为及早处理坍方、防止坍方扩展,经会议决定坍方处理方案:

(1) 地面处理

- (a) 清顺坍体坡面,铲除陡壁、陡坎,粘土夯填裂缝;
- (b) 搭设一面坡简易防水雨棚,防雨水冲刷;
- (c) 坍体外缘3~5 m挖环形截水沟,水泥砂浆抹面;
- (d) 坍坑周壁用喷锚网加固;
- (e) 采用泥浆泵注浆加固坍体和低洼地段地层,低洼地段地表用喷混凝土封闭。

(2) 洞内处理

- (a) 对拉裂的12.4m喷层立即进行喷锚网加固,及时进行二次模注衬砌。采用插板、插钎先支后挖法开挖。清一段衬砌一段;
- (b) 对13m坍方段采用沿拱外缘预打钢轨,侧壁导坑,先墙后拱、分段开挖衬砌;
- (c) 模注衬砌均加设双层钢筋

坍方处理过程中,山体尚属稳定,坍方未继续外延。从地表向坍体内压浆加固所用水泥80 t,因坍体大部是较密实粘土,压浆效果不甚显著。但坍体自稳性尚好,坍方处理施工还比较顺利。

五、坍方破坏形态及支护破坏过程分析

1. 坍方破坏形态

试验段坍方破坏纵断面如图3所示。坍方将已施工地段分为两段;

洞外地面坍陷坑穴近似于直径16m的圆筒形,坍壁陡直、坑深3~10m。沿坑壁外缘10~20m范围内地表出现裂缝。坍方体积近3000m³,其中千余方涌入隧道。

初期支护破坏形态见图4。拉裂段的支护受坍方破坏的冲击性荷载作用,拱顶下沉达25~116mm,洞壁严重破损,喷层开裂,剥离掉块、钢筋网拉出等等比比皆是,但毕竟经受住坍方破坏的严峻考验。仍保持着洞体支护结构形态。

坍方破坏段的支护破坏全部在拱部发生。

综上所述,坍方破坏形态有以下特征:

- (a) 地表坑穴坍壁陡直,坍方岩体呈垂直坐落;

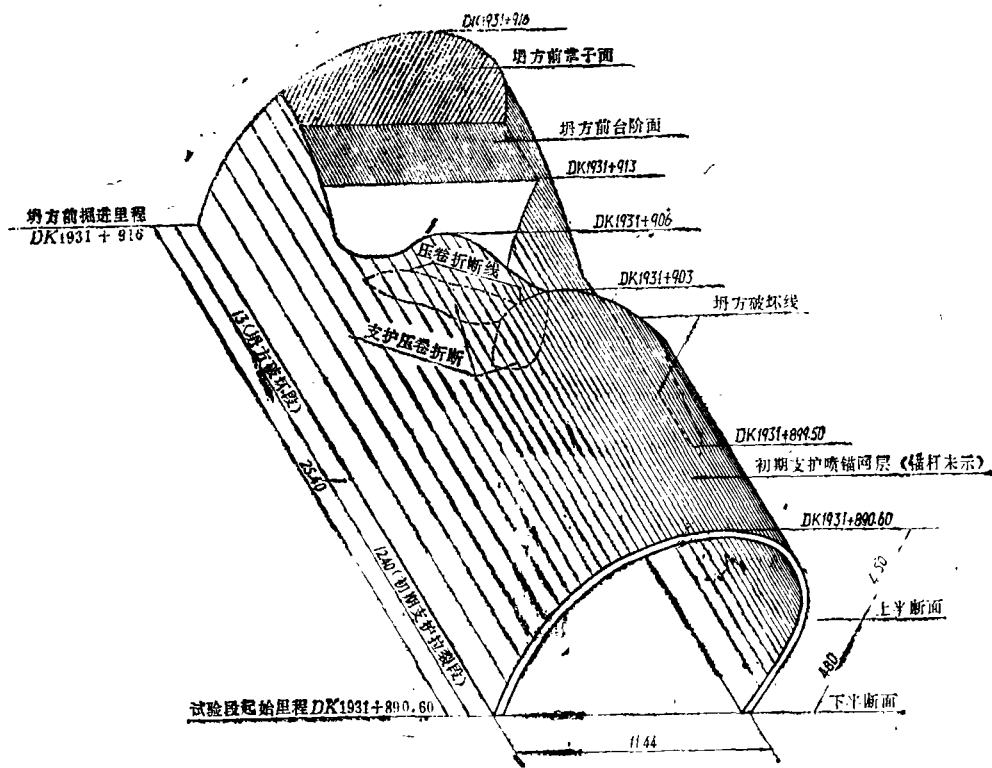


图 4

- (b) 坍体主要从隧道右侧涌入;
- (c) 支护破坏局限于拱部, 尤以右侧严重;
- (d) 支护破坏主要表现为拱部断裂、坍落, 并有压卷折断现象。

因此, 坍方破坏形态属于掉拱冒顶破坏类型。破坏的发展主要因垂直荷重引起, 由于拱部破坏坍落而导致上复岩体坍塌坐落, 造成坍方冒顶。

2. 支护破坏过程分析

坍方破坏过程如图 5 所示。分析清楚表明, 坍方地段拱部的失稳起始于右拱脚的局部失稳、然后引起局部地段的拱部失稳, 继而扩展到更大破坏范围, 最终导致坍方冒顶。也就是说, 隧道拱部的破坏是经历一个从局部、表层的破坏到整体、深部的破坏; 从集中破坏到全面破坏的发生、发展过程。

六、坍方原因分析

南岭隧道试验段坍方的原因是综合性的, 是由多方面因素造成的, 现仅从以下几个方面进行分析。

1. 地质条件不良是基本内因

南岭隧道试验段属于 II 类围岩, 这类围岩多位于挤压强烈的断裂带内, 岩体软弱破碎、稳定性很差。

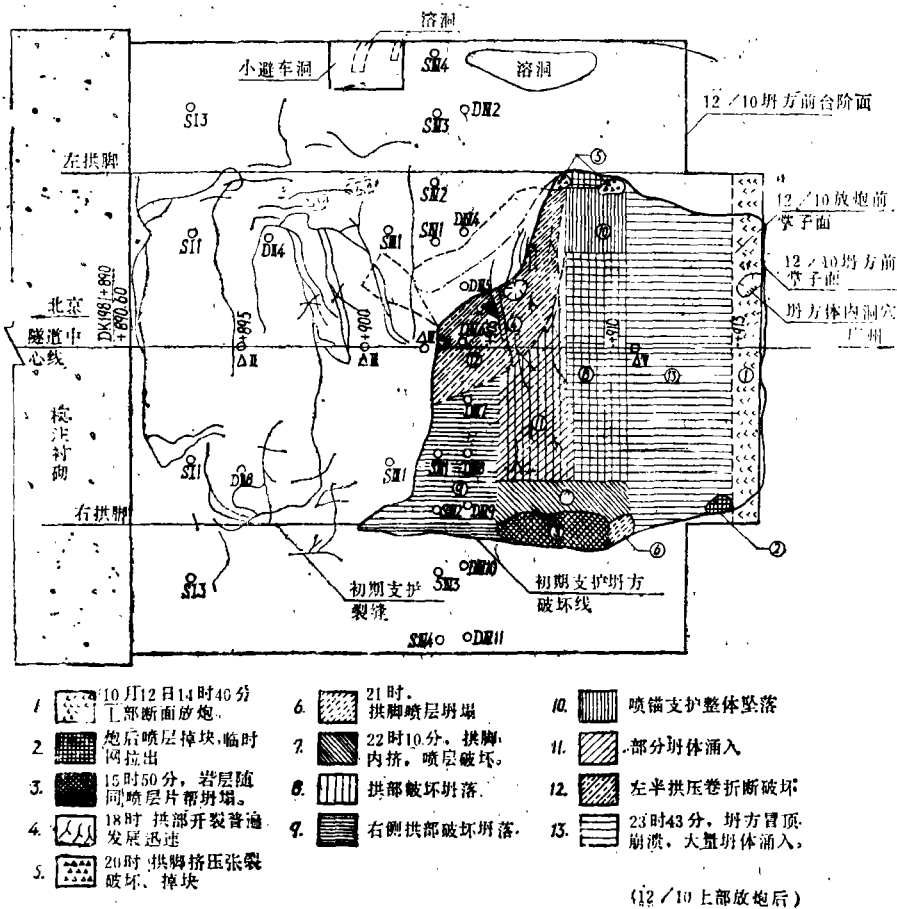


图 5

影响南岭隧道试验段坍方地段围岩稳定性的主要地质因素有以下特点:

(1) 地质构造作用影响严重

对于南岭隧道试验段这种浅埋。软弱围岩, 经自然营力剥蚀, 切割作用和长期的应力释放过程, 可以认为残余地质构造应力场已不复存在。因此对南岭隧道试验段隧道稳定性分析, 可不考虑地质构造应力作用的影响。

地质构造应力场虽已消失, 但由它所塑造的构造形迹却依然存在。诸如断层, 褶曲和节理等将岩体切割成破碎状态, 并于岩体内部形成了一些软弱结构面, 成为控制围岩稳定性的主要因素。

(2) 隧道围岩软弱, 影响支护效果

围岩软弱是控制隧道稳定性的基本因素。坍方地段岩体, 特别是洞体上部为粘土夹岩块, 呈泥包块松软状态。土体本身及与锚杆、喷层之间的粘结力和摩擦力都很弱, 严重影响了喷锚支护效果。

2. 根本原因在于变形未能有效控制

隧道围岩的变形是岩体力学动态的直接体现, 喷锚支护的破坏和围岩的坍塌都是隧道变

形发展的结果,南岭隧道试验段的坍方破坏根本原因在于变形没能有效控制造成的。这主要是由于对浅埋软弱围岩双线隧道变形规律认识不足所引起的。

(1) 隧道位移控制基准问题

新奥法所阐明的隧道工程概念:允许隧道初期支护与围岩共同产生一定变形的,因为这种变形正是充分调动围岩自承能力的一个象征但是,必须对隧道变形控制在有限的范围,以免围岩产生松弛过渡而导致破坏瓦解。这样就提出一个围岩所能允许的最大位移值(临界值)问题,即隧道位移控制基准问题。

迄今为止,要定量地确定出隧道位移的临界值,在理论上和实践上都有一定困难。

现在来看,南岭隧道坍方地段初期支护变形值宜控制在50mm以内。而现场实测数据是拱顶下沉95.8mm,断面收敛74.54mm显然已超过一般限值较多了。

(2) 对浅埋、软弱围岩隧道变形特点认识不足

浅埋、软弱围岩隧道与一般隧道相比,具有不同的应力状态和变形特点,同时也表现出不同的破坏形态。通过有限元计算分析结果表明:浅埋、软弱围岩隧道开挖后,围岩应力重分布往往会使拱顶拉裂区与地表拉裂区连成一体。拱部拉裂破坏将成为洞体稳定性的主要威胁。从试验段实测资料也可看出,隧道变形以竖向位移为主,同时产生了‘整体下沉’——即地表下沉量与隧道拱顶下沉量相当接近的现象倘若对隧道变形控制不力,则会导致围岩迅速松弛,产生拉伸破坏,以致发生坍塌,直通地表。故对隧道变形必须进行严格控制。

南岭隧道试验段的变形控制,恰恰忽略了隧道浅埋的特点。在引用已有隧道试验经验的同时。缺乏切合实际的具体分析片面地以某某隧道拱顶下沉400mm来衡量南岭试验段的变形量。于是滋长了麻痹思想、产生盲目的安全感。从而对加强控制隧道变形的工程措施,缺少客观慎重的考虑。这是酿成南岭隧道试验段坍方的重要思想根源。

(3) 没有采用钢支撑是导致本次坍方的重要原因。

3. 施工过程是不容忽视的重要环节

新奥法施工必须通过施工监测掌握围岩的动态信息,严格控制施工工序时间,使各工序能与岩体变形的发展过程相适应。

(1) 钻爆开挖对隧道变形影响显著

爆破对隧道拱顶下沉有较显著影响,爆破瞬间拱顶下沉量将占总下沉量的50%以上,占一天下沉量的90%左右。只要采用钻爆法开挖,这种影响是难免的。

对于南岭隧道试验段这样的浅埋、软弱围岩,从保护围岩、使围岩破坏和扰动减少到最小限度出发,如能采用机械切削开挖当然是最为适宜的。但是,目前我国隧道开挖方法,不管地质的好坏几乎一概采用钻爆法施工显然是有问题的。还应该着手引进或研制新的开挖机械,使新奥法施工设备更加完善配套。

(2) 初期支护闭合时间过迟

所谓‘早期闭合’,一般应控制在30天以内。南岭隧道试验段初期支护分三段施作,每段支护闭合时间为72~112天,坍方地段已经75天尚未挂网封底,实际上并未达到早期闭合的目的。

初期支护不能及时闭合,很不利于隧道稳定。因隧道上半部呈偏平的割圆形状,若保留时间过久则会引起拱顶急剧下沉而导致松散压力。全断面形状近似于圆形。受力状态比上半

断面优越得多。及时开挖下部断面,及早完成支护封闭环有利于围岩应力重分配和控制变形的发展。

此外,采用上、下半断面台阶法施工往往会使拱脚部位成为初期支护的薄弱环节。这是因为拱部支护基本上是在台阶面上进行,拱脚附近有喷混凝土回弹虚碴,常有喷层不密实现象;钢筋网在拱脚搭接影响了喷网层的整体性;锚杆施作受场地限制,一般很难满足设计要求。尤其当下部开挖后不能及时挂网封闭,拱脚围岩较长时间处于一侧临空的不利状态,并且随着时间的推移围岩强度亦趋于恶化,更加促使拱脚附近支护力降低。这种状况在未进行全隧道断面挂网封闭之前,始终未能得到根本改善。

(3) 施工工序安排不当

南岭试验段坍方破坏形态及破坏过程分析表明,坍方破坏首先是从右拱脚局部坍塌开始,从而诱导了坍方破坏的发展。试验段施工中,采用挂临时网喷混凝土对防止局部坍塌是卓有成效的。因此,右拱脚的局部坍塌也是可以通过及时完成初期支护的闭合加以制止的。

坍方地段的施工断面:拱部已经两次挂网、三次喷混凝土,喷层厚度足以达到设计要求(局部厚度达40cm)。系统布置锚杆除按设计安设外,拱顶尚增设超前锚杆加强。然而,下半部边墙只喷一次混凝土,喷层厚度仅3~5cm。锚杆尚未补齐,右侧墙顶已出现纵向开裂,左边墙下部溶洞未经处理。从全隧道断面来看,支护系统的整体性很差,很不利于洞体稳定。

此外,坍方前未挂网封闭段长度7~9m。距离上部掌子面10~12m,从施工过程中的“三维效应”分析,此时坍方地段正处在围岩压力急剧增加范围。如果施工工序安排紧凑,将遗留的后道工序及时跟上,能在围岩压力急剧增加之前构成一个封闭的壳体支护结构,则可改善拱脚部位围岩的受力状态。从而防止局部失稳发生。

施工过程中的“三维效应”,一般称为穹隆作用,理论分析和实测资料表明,隧道掌子面附近与离开掌子面一定距离以外两处的应力平衡状态是有明显差别的。而掌子面附近围岩是处于有利的受力状态。这种现象一般认为是由于掌子面处未开挖的岩体比已开挖区段有较大的刚度,沿掌子面四周围岩内存在径向剪切力,对坑道变形产生支持作用;此外,在围岩开挖后的应力动态变化过程中,产生一种沿隧道纵向轴线方向分布的竖向应力,对掌子面附近洞壁起支护作用的缘故。实践证明,施工过程中的“三维效应”是确实存在着的,这也是我们特别强调初期支护应早期闭合的一个重要原因。

在总结本次坍方教训的基础上,提出以下几点意见供今后借鉴:

(a) 目前对隧道位移监控基准问题,在理论研究上还不够完善,也缺少较多的工程实践资料。从南岭隧道现场试验情况来看,对于浅埋、软弱围岩双线隧道允许的最大位移量宜控制在50mm以内。即约为隧道开挖半径的1%。并且,为解决施工坍方预测问题,提出以拱顶下沉量为主要判据的坍方预测标准。(见下表)供施工监测参考。

(b) 初期支护应具有足够的刚度,宁刚勿柔。为及时有效地控制隧道变形,应考虑采用早强喷混凝土、早强锚杆和钢支撑等支护措施。鉴于浅埋、软弱围岩隧道坍方破坏发展的急促性,为确保施工安全型钢支撑是必备的应急的支护措施。

(c) 浅埋、软弱围岩隧道主要荷载来源是上复岩体。隧道变形以竖向位移为主,并易产生整体下沉现象。隧道应以刚性支护为主当采用初期喷锚支护施工时应考虑提前模注衬

砌。

坍方预测参考标准

预报等级	量 测 标 准	警 觉 水 平
I	一天下沉值达到20mm 围岩有明显整体下沉	紧急警报 坍方快要发生,采取紧急措施
II	一天下沉值达到10mm 围岩有整体下沉迹象	警告 坍方将要发生,采取加强措施
III	一天下沉值达到5mm 累积下沉值达到50mm	警戒 坍方可能发生,注意加强观测

(d) 砂浆锚杆在土夹石松软围岩内整体加固地层作用效果受到一定限制。锚杆受力状态受土体强度所控制,很难与围岩形成整体而有效地控制变形,而且往往只能在松弛区内起组合作用。所以早期完成喷锚网联合支护对防止围岩局部坍塌,提高隧道整体稳定性具有十分重要的意义。

(e) 施工必须谨慎,严格按照新奥法基本原则施工。设计、施工和科研紧密配合。加强施工中的地质工作,切实作到以量测信息指导施工、修改完善设计。

七、结 语

南岭隧道现场试验工作几经挫折,虽然试验项目进行过调整。但仍取得了一定科研成果。整个现场试验有成功的一面,也有失误的一面;即使在发生坍方的地段。还有十几米喷锚支护成功地保存下来。处理坍方虽然付出了一定代价,但如果能从中认真吸取有益的教训。也可作为今后工作的借鉴。因此,从正反两方面总结南岭隧道试验工作。对喷锚技术的推广使用更有特殊重要的意义。

新奥法比传统支护设计、施工方法具有非常明显的优越性。这种把整个隧道的开挖和支护过程都建立在围岩力学动态基础上的科学方法,使隧道工程技术提高到一个新的理论高度。南岭隧道试验段的坍方虽无损于新奥法的崇高声誉,但也应清醒的认识到:在喷锚技术向更大适用范围推广过程中,确实还存在一些尚未解决的课题。目前喷锚支护所遇到的问题。多数是同岩土力学的研究息息相关。特别是浅埋、软弱围岩,往往是严重风化破碎,自稳性极差的松散体或土体,在喷锚支护理论和施工方法上,尚有一些问题需要我们继续努力探讨和研究。