

# 第 1 章 单线铁路隧道坍方处理

## § 1 - 1 西康线大岭铺隧道坍方处理

### 一、工程概况

#### (一) 工程地质情况

西康线大岭铺隧道全长 1 372.68 m，位于陕西省旬阳县境内，为单线电气化铁路隧道，设计采用曲墙式衬砌，仰拱铺砌。隧道埋深 46~160 m 两端洞口山体自然坡度 40°~60°，出口端见砂卵石古沉积层出露。洞身穿过泥盆系中统千枚岩地层，岩体呈北西走向，倾向北东的单斜构造。受南秦岭印支褶皱带的构造作用影响，岩体扭曲褶皱多见，层间结合差，基岩裂隙水丰富，多呈线状、股状，出水点多，岩体遇水软化呈泥状，不利施工。

#### (二) 施工情况

该隧道于 1997 年 4 月 8 日开工。在出口 DK195 + 283~DK195+070 段的 213 m 范围内，石质破碎，节理风化发育密集，隙间多充填云母状泥质矿物粉尘，岩体呈松散堆积，多软弱滑动面，裂隙水发育。施工中以正台阶法开挖，锚喷网 + 格栅联合支护，先拱后墙法施工。

尽管采取了较为稳妥的施工方法和支护措施，但终因对破碎围岩认识不足，缺乏经验，加之裂隙水对破碎围岩的加速软化，缩短了围岩自稳时间，一度发生了拱顶坍塌和边墙滑坍，使施工陷入困境。其中较大而典型的坍方和滑坍发生过 3 次。一次是发生在 DK195 + 274~DK195 + 254 段的通天坍方，另两次分别发生在 DK195 + 160~DK195 + 085 段的拱部坍方和 DK194 + 270~DK194 + 450 段 270 m 范围内的边墙顺层坍滑。

## 二、坍方情况

### (一) 洞口段坍方

1997 年 6 月 12 日 15 时，上导施工至 DK195 + 254 处发生了大坍方，坍方自掌子面开始纵向沿线路左侧由里向外连续坍塌至 DK195 + 278 处，总长 24 m 坍方量约 2 700 m<sup>3</sup>。

至次日上午 8 时坍穿地表，陷坑呈椭圆形，沿陷坑周边地表出现多条环行裂缝，裂缝最宽达 42 cm。

## （二）隧道内拱部坍方

1997 年 12 月 9 日隧道掘进至 DK195 + 163~DK195 + 114 时，突然发生一次较大的坍方，坍方长度 25 m，高度 3~5 m，坍方量 1 250 m<sup>3</sup>。

## 三、坍方原因分析

### （一）洞口段坍方原因

引起洞口段坍方的主要原因有如下两点：

（1）洞口段为千枚岩夹泥层，受地质构造影响较大，裂隙水及节理发育，风化严重。特别是雨季，地表易滑坍，地表水对围岩的软化、剥蚀是一个很重要的因素。

（2）设计地质情况和实际不符，对软弱围岩认识不足，没有采取足够的预防措施，仅在 DK195 + 283~DK195 + 273 段设置每米一榀钢格栅支护措施。

### （二）隧道内拱部坍方原因

坍方段围岩为泥质、碳质千枚岩、页岩，岩层走向与隧道轴线一致，风化较严重，呈黑色，有滑腻感，层间结合差，见水易膨胀，基岩裂隙水丰富，拱顶普遍渗漏，左侧拱腰出水成股状，造成围岩软化快，自稳时间短，无应急措施时间，这是此次坍方的主要原因。

## 四、坍方处理方法与措施

### （一）洞口段坍方处理方法与措施

#### 1. 处理方案比选

经过分析和讨论，提出了两种方案：一是钢轨棚架通过；二是小管棚预注浆通过。因为第一种方案操作方便安全，速度快，循环次数少，所以采取了第一种方案。

#### 2. 坍方处理措施

在洞口段采用了如下几种处理措施：

（1）卸荷防水。从坍方产生的地表裂缝处向陷坑内刷坡，坡度为 1 : 0.5，打入长 3.0 m 锚杆，@ 1.2 m × 1.2 m，裂隙以上 10 cm 处设横向排水沟截水，截水沟以下陷落处用篷布覆盖。

（2）钢轨棚架。从明洞顶部顺线路方向打入 24 kg/m 钢轨，共打入 15 根，每段长 5 m，段与段之间采用围焊。加强支护，采用 I16 型环向钢架，直顶棚架钢轨，按 3 根/2 m 布置，

施工时采用超前小导管  $\phi 42 \text{ mm}$  , 长  $4.0 \text{ m}$  , @  $30 \text{ cm}$  外插角度  $10^\circ \sim 15^\circ$  , 双液注浆, 小导管钢架焊接, 钢架纵向拉杆采用  $\phi 22 \text{ mm}$  钢筋, 环向 @  $1.0 \text{ m}$  , 纵向 @  $1.0 \text{ m}$  , 喷混凝土包裹钢架, 每天两个循环, 每个循环  $0.8 \text{ m}$

(3) 衬砌紧跟。采用先拱后墙法施工, 即上导先行, 步距  $2.4 \text{ m}$  , 衬砌内设  $\phi 12 \text{ mm}$  、@  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  钢筋网, 外留  $3 \sim 5 \text{ cm}$  保护层。同时在拱脚设置托梁, 并沿拱脚设置  $\phi 20 \text{ mm}$  @  $0.5 \text{ m}$ 、长  $3.0 \text{ m}$  的锁脚锚杆。

(4) 地表处理。陷落坑分层回填夯实, 并用粘土铺设厚  $50 \text{ cm}$  垫层, 地表用  $50 \text{ cm}$  厚的  $75\#$  浆砌片石护面, 护面与原山坡顺接。

## (二) 隧道内坍方处理方法与措施

### 1. 处理方案选择

坍方体松散, 不利清方, 故采用全断面超前小导管预注浆固结松散体后再进行开挖的方法通过该段。

### 2. 坍方处理措施

(1) 做好坍方的排水工作, 把地下水引出洞外。

(2) 导管预注浆, 分以下几步:

导管参数选择长  $3.0 \sim 4.0 \text{ m}$  , @  $0.4 \text{ m}$  外插角  $10^\circ \sim 15^\circ$  掌子面喷层  $8 \text{ cm}$  , 浆液扩散半径  $0.3 \text{ m}$  左右, 注浆终压  $2 \sim 3 \text{ MPa}$ 。

浆液组成 使用的浆材主要有 CS 双液浆和速凝单液水泥浆, 水泥浆一次搅拌, 水玻璃一次稀释。

注浆量计算 各参数取值为:

扩散半径:  $R = 0.28 \text{ m}$ ;

单管注浆量:  $Q' = 0.074 \text{ m}^3$ ;

每个断面的注浆量:  $Q = 25Q' = 1.84 \text{ m}^3$ 。

注浆完毕待岩体固结到一定强度后, 即用“眼镜法”开挖, 一般停息时间  $6 \sim 8$  小时, 每个开挖循环长度根据注浆段长度而定, 开挖后初喷混凝土  $4 \text{ cm}$  , 然后架设格栅钢架, 最后喷射混凝土到设计厚度。

(3) 加强支护措施。锚杆  $\phi 22 \text{ mm}$ 、 $L = 2.5 \text{ m}$ 、@  $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$  布置, 钢筋网 @  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  , 三角形格栅钢架支护  $1$  榀/ $\text{m}$ , 纵向连接筋  $\phi 12 \text{ mm}$ 、 $1$  根/ $\text{m}$ , 并且连接筋与格栅、格栅与管棚焊接牢固, 喷射混凝土覆盖钢格栅。

## 五、处理效果分析与评价

### (一) 洞口坍方段

(1) 为了观察坍方及处理后隧道的稳定情况, 采取了地表下沉量测观察, 判断隧道坍方的处理效果和稳定性。

(2) 量测仪器：位移计、精密水准仪。

(3) 每 8 m 取一量测断面进行布点，如图 1-1 所示。

(4) 量测频率：0~15 天之间，2 次/天；15~30 天之间，1 次/天；31 天以后，1 次/周。

(5) 整理测试资料，绘图：经过一个月的量测，绘制  $u-t$  曲线如图 1-2 所示。

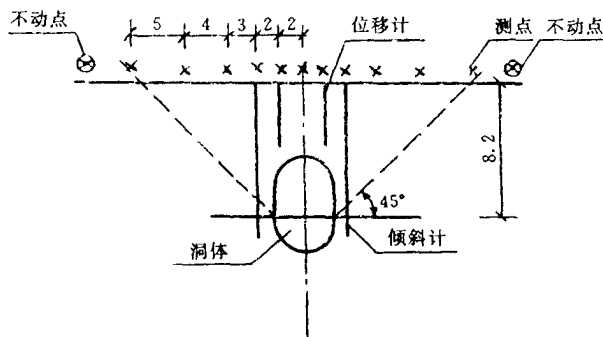


图 1-1 量测断面布点 (单位:m)

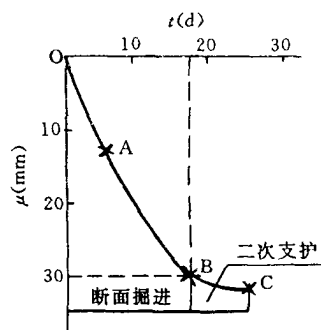


图 1-2 DK195+254~+278 段地面沉降与时间关系

(6) 稳定分析：由图 1-2 可以看出，围岩变形分 3 个阶段：① 急剧增长阶段 (OA 段)；② 缓慢增长阶段 (AB 段)；③ 基本稳定阶段 (BC 段)。一次支护后 16 天围岩处于稳定状态，稳定后地面沉降达到 32 mm。

(7) 处理效果分析：这次大坍方前后处理共用了 28 天时间，处理速度快，节省了处理费用。

## (二) 洞内坍方段

通过前述洞内的坍方处理，加强了支护措施和衬砌结构措施，较稳妥、安全、顺利、快速地通过了该坍方段。经过设点观测，未发现衬砌开裂下沉等现象，处理效果较好。

## 六、几点说明

从大岭铺隧道坍方处理工作中可以得出如下几点对隧道施工有参考价值的说明。

(1) 对不同的坍方情况应采用不同的处理方法。本文介绍的钢轨棚架法、管棚预注浆法对通过不同的坍方体，切实可行；较之传统方法如插板法、清方法等有显著经济效益，且有时间短、见效快、便于操作等优点。

(2) 应重视量测技术。不采用测设仪器，仅从外表变形情况判断其稳定性，无法定量预见坍方的出现，在以后的施工中应大力加强量测技术的应用。

(3) 应用光面和预裂爆破技术后，隧道周边轮廓圆顺，避免了棱角突变处的应力集中，减少了对围岩的扰动。

(4) 地下水对软弱围岩有侵蚀、软化作用，必须及时做好地表及隧道内的防排水工作。

## § 1-2 侯家湾四号隧道坍方处理

### 一、工程概况

侯家湾四号隧道位于内昆线昭通彝良县境内三层展线段的中间一层，全长 2 228 m，里程为 DK346 + 187~DK348 + 425 隧道纵坡 19.5‰，进口端位于  $R = 500$  m 的曲线上，隧道线路上部建筑按重型轨道设计，后期铺设 60 kg/m 钢轨，隧道建筑界限按隧限 - 2A(单线电化铁路)设双侧高式水沟和双侧电缆槽为 I 级电气化铁路。

#### (一) 地质情况

隧道所在地区气候条件恶劣，地质复杂，溶槽、溶沟发育，其中进口端 DK346 + 187~+370 段长达 183 m，为埋深 20 m 左右、风化极严重的玄武岩破碎层，自稳能力极差；其余地段均为灰岩。

#### (二) 施工情况

该隧道设计用新奥法施工，II 类复合衬砌，台阶法开挖，先墙后拱法衬砌，初期支护喷 200# 混凝土(厚 25 cm)，格栅钢架间距为 1 m，用  $\phi 22$  mm 钢筋纵向连接。超前锚杆环向间距 0.4 m，每根长 3.5 m，每环 20 根，系统锚杆长 3 m，纵横间距 0.8 m  $\times$  1 m，设置钢筋网拱墙。二次衬砌和仰拱用 200# 混凝土，水沟和电缆槽用 150# 混凝土，盖板用 150# 钢筋混凝土，隧底填充 200# 混凝土。该隧道由中国铁路工程总公司第五工程局施工。

## 二、坍方情况

在该隧道的施工中，考虑到围岩比较破碎，分上、下两层台阶开挖，在按设计施作初期支护的情况下，DK346 + 282~+299 段 17 m 拱部初期支护于 1999 年 1 月 21 日 8 时 20 分在事先没有任何迹象的情况下，突然响声大作，瞬间发生坍塌，初期支护全被压垮，洞内全断面封堵，地表形成直径 8 m、深 4 m 的口小肚大的坍穴，坍方数量为 3 630 m<sup>3</sup>。

### 三、坍方原因分析

#### (一) 降雪和地下水的激发原因

1 月 10 日至 14 日，昭通地区连降大雪，侯家湾四号隧道所处地区积雪厚度达 50 cm，由于隧道穿越的山体自然坡度近 45°，穿山背进入低凹地形，积水面积大。因此，冰雪融化后渗入土体内，增加了土体重量，降低了土体胶结性，使土体自稳能力降低，极易造成坍方。

## （二）地质因素

隧道拱顶上方埋深为 21 m，埋深上部为松散的砂粘土，下部为风化破碎的玄武岩，经雪水渗透浸泡，达到饱和状态，失去自稳能力。

## （三）人为因素

施工工序安排欠科学，上半断面开挖拉得过长，比下半断面超前 85 m，只做初期支护，却未及时做拱部衬砌，造成松动应力过大，对台阶后部已开挖、只做初期支护段形成较大的松散压力，极不安全。

# 四、坍方段处理与防治措施

## （一）地面塌陷的处理方法

对坍塌凹部壁施作挂网、锚喷支护，对坍塌漏斗地表进行截水，必要时搭遮雨棚，防止地表水灌入坍体内。待洞内处理完毕，采用土石夯填到高于原地面，等填土下沉稳定后，用 50# 浆砌片石铺砌。

## （二）坍体洞内的处理方法

对坍体开挖面轮廓线外加设管棚和小导管注浆进行预加固，固结后进行坍体段的开挖。

（1）在坍体段 DK346 + 282 ~ + 299 拱部采用  $\phi 89$  mm 大管棚和  $\phi 42$  mm 小导管注浆，挂钢筋网、格栅钢架并施作混凝土初期支护，边墙施以侧壁小导管注浆和锚喷加固。

（2）坍体段拱部、边墙初次衬砌设钢轨钢架（1 榀/0.7 m）并灌注混凝土。

（3）坍体段按先拱后墙法施工，拱脚内增设钢轨托梁并向坍体内端延伸约 10 m，防止拱部下沉。

（4）DK346 + 282 ~ + 385 两端 10 m 长范围的衬砌均需加强，拱墙施作钢筋混凝土衬砌。DK346 + 270 ~ + 280 段边墙已按原设计衬砌，也应采取措施给予加强。

（5）DK346 + 309 ~ + 385 段的上半断面已开挖且已做初期支护，待坍方处理后立即先做拱部衬砌再进行下半断面开挖，以确保该段安全。

## （三）管棚注浆设计参数

### 1. 注浆加固范围

注浆范围半径为  $R = (3 \sim 4)R_a$ 。 $R_a$  为隧道开挖平均半径（m）。

### 2. 注浆压力

注浆压力一定要大于周围坍体、裂隙水压、坍体层压力等各种阻力的总和，注浆压力大，

浆液扩散范围也大，但压力过大会造成窜浆，扩散到坍塌体范围以外，造成材料的浪费。因此，可根据地层深度采用经验公式计算，注浆压力随深度增加而增大，即

$$P = K \cdot H$$

式中  $H$ ——注浆深度( m )，取最大注浆深度 17.5 m；

$K$ ——压力系数 ( MPa/m )，通常注浆深度小于 200 m 时，取  $K = 0.023$  MPa/m。

则  $P = 0.023 \times 17.5 = 0.4$  MPa

### 3. 注浆量确定

注浆量受水压和坍塌体的松散条件等多种因素影响，可通过下列经验公式计算：

$$Q = V \cdot \eta$$

式中  $V$ ——注浆范围坍塌体体积 ( $V = 3\ 630\ \text{m}^3$ )；

$\eta$ ——填充率，按 60% 计。

则  $Q = 3\ 630 \times 60\% = 2\ 178\ \text{m}^3$

## (四) 坍塌体段施工

### 1. 工艺要求

(1) 小导管与大管棚的安装制作：小导管与大管棚的前部都钻注浆孔，孔径分别为 6~8 mm、10~16 mm，呈梅花形布置，尾部留 100 cm 作为不钻孔的止浆段，小导管前端加工成锥形，大管棚分段安装，每段长 6 m，两段之间用“V”形对焊。前端安装硬质钻头，采用直接撞击法将导管撞击至设计位置。

(2) 注浆：浆液水灰比为 1:1，外掺 3# 速凝剂。注浆开始时，水灰比大，后逐渐变小，注浆压力逐渐升高，当达到设计终压时再注 20 分钟，注浆量大致与设计注入量接近。

### 2. 上半断面施工

采用人力或风镐开挖，每次进尺不超过 1.2 m，紧跟网喷和格栅支护 (1 榀/5 m)，纵向之间用钢筋连接，开挖 5 m 后，施作拱脚加纵向钢轨托梁的钢拱架二次混凝土衬砌。待上半断面坍塌体衬砌贯通后再进行下半断面坍塌体施工。

### 3. 下半断面施工

侧壁小导管注浆加固时，为防止右侧坍塌体产生侧压，开挖支护分三层进行，纵向每次进尺 3 m 开挖后马上初喷混凝土紧跟挂网和格栅钢架支撑并复喷纵向待下半断面开挖 6 m 后，作钢架混凝土边墙衬砌，最后作仰拱。

### 4. 施作盲沟

为防止坍塌体完工后漏水，在衬砌背后按 6 m 一环预埋稻草绳作引水盲沟，效果较好。

## 五、处理效果与分析评价

钻孔时间从 1999 年 3 月 6 日开始至 3 月 23 日结束 共钻孔 32 个 钻孔深 16.72~18.33 m，注浆从 3 月 23 日 16 时开始至 4 月 6 日 21 时结束，注浆管安装长度为 16~17.5 m。注浆时从大于注浆静水压力开始，然后缓慢增大注浆压力，终压值达到 0.4 MPa 时停止，实际注浆

量为 2 150 m<sup>3</sup>，与施工设计注浆量 2 178 m<sup>3</sup> 基本相符。注浆完毕，从开挖情况显示，坍体中玄武岩破碎体及土石松散体已凝结成一个整体，相当于一个低标号的混凝土体。拱部也有自稳能力，在施作小导管等初期支护后，经过量测资料分析，坍体处于稳定状态，坍方段再无变形和下沉，完全达到了预期目的。

此次坍方处理中拱部设计为大管棚和小管棚注浆、喷混凝土及钢筋网等方法，边墙设计为挖井法施工，采取了加强拱部临时支撑，防止拱部下沉的有力措施及竖井护壁。由于挖井法每井只挖 2 m，存在工作面狭窄、施工不利等因素，加之注浆效果明显及拱部衬砌中增设了钢性托梁，因此实际施工时下半断面开挖采用了拉槽开挖马口法。施工时先打边墙小导管并注浆再开挖马口，边墙临时支撑为加强的初期支护，从实际边墙马口开挖看，注浆后的围岩为一个低标号混凝土整体，这相当于边墙后面先施作了护墙，此做法既完全满足稳定的要求，又弥补了挖井法小段衬砌质量较难保证的缺陷，具有内实外美之特点。

侯家湾四号隧道进口坍方从 2 月 25 日开始处理，5 月 19 日处理完毕，历经两个半月的时间。在处理过程中，从未发生一起事故。这说明选定的处理方法是正确、合理的。

## § 1-3 岩顶隧道突泥石流坍地段综合治理

### 一、工程概况

岩顶隧道为单线铁路隧道，全长 2 582 m，是漳（平）泉（州）肖（厝）铁路控制全线的重点工程，也是福建省利用日元贷款兴建的第一条地方铁路。隧道穿越剥蚀低山丘陵区，突泥石流不良地质地段位于该隧道浅埋的出口，其里程为 DIK109+089~+187，出口端自然山坡 10°左右，两侧冲沟，下部为泥石流堆积而成的洪积扇地貌，地层岩性为极严重风化的花岗闪长岩，呈砂土状，岩质软弱。其上为第四系坡洪积块石土，表层基岩裂隙水发育，大地降雨补给，以泉水形式出露，长年流水不断，施工中实测地下水流量达 100 m<sup>3</sup>/d，隧道围岩属于 I 类围岩。

隧道土质取样化验分析为：天然状态下的含水量 23%，孔隙比 0.762，饱和度 80.3%，土粒比重 2.06，液限 45%，塑限 24%，颗粒比以 0.5~2 mm 及 0.005~0.05 mm 为主，各占 26% 压缩系数  $3.8 \times 10^{-4}$  kPa 压缩模量  $4.6 \times 10^{-3}$  kPa，干密度 1.548 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比 0.727，渗透系数（垂直） $3.2 \times 10^{-5}$  cm/s。

### 二、突泥石流坍情况

隧道于 1992 年 9 月开工，出口挖沟施工时，由于围岩为土夹孤石，岩性软弱且水量丰富而无法进洞。至 1993 年 2 月，在挖沟两侧（距线路中心 4.1 m 以外）采用 2~3 排  $\phi 130$  mm、长 8~14 m C20 钢筋混凝土锚固桩（3 根  $\phi 18$  mm 钢筋束在桩心）锚入路肩下 4~6 m，开挖后，由于侧压力过大而失败，后又改为  $\phi 150$  mm 钢管桩（内灌混凝土）并

加钢支撑也未获成功。隧道出口曾多次发生坍塌通天，最大的一次是 1993 年 8 月 19 日，上半断面突然流坍达  $1700\text{ m}^3$ ，致使隧道施工受阻。

### 三、突泥流坍处理方法与措施

#### (一) 处理原则

当施工严重受阻时 各级领导和福建人民都非常重视和关注。建设单位曾多次邀请有关专家商讨对策，组织设计、施工等单位人员进行技术攻关，针对本隧道的具体情况，确定了洞内外整治相结合，稳住洞外，确保洞内，洞内施工应遵循“管超前、强支护、短开挖、勤量测、快衬砌、早成环”的原则。具体来讲，洞外明洞和出口深路堑施作挖孔桩墙，成桩过程以钢管混凝土桩护壁，并铺以地表锚杆加固边仰坡；洞内则是以管棚周边预注浆和钢架为核心的超前预支护系统，控制每循环的开挖长度，及时地施作衬砌支护并形成封闭圈，采取稳扎稳打、步步为营的突泥流坍不良地质地段的综合整治技术措施。

#### (二) 处理措施

##### 1. 洞外工程的整治

原设计隧道的出口里程为 DK109+200，多次坍塌后，已塌至 DK109+176.5，为此，进行了变更设计。变更设计的情况为，DK109+176.5~+187 段设计为挖孔桩边墙的明洞，DK109+188.5~+201 段两侧设桩板墙，墙高 4 m，桩长 9 m，锚固长 5 m，桩的截面尺寸  $2.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 。洞外工程的整治采取了以下具体措施：

##### (1) 边仰坡地表锚杆加固

为防止进一步坍塌，在边仰坡的坡面未经扰动的土体下方设置两排斜锚管，锚管采用  $\phi 108\text{ mm}$  长 7.8 m 的钢管，间距 0.4 m。施工时利用机械钻孔，插入钢管后灌混凝土、在其上方设置了药包锚杆，锚杆尺寸为  $\phi 22\text{ mm}$ ，长度 3.5 m，间距为 1 m，梅花形布置，同时，对坡面进行挂网、喷混凝土封闭，喷层厚 5 cm。此做法稳定了边仰坡。

##### (2) 路基桩板墙

DK109+188.5~+201 段，设计为 6 根挖孔桩，左、右各 3 根，桩间距 5 m，桩截面尺寸  $2.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ ，桩靠线路侧边缘距线路中心 3.6 m，单根桩长 9 m，埋入侧沟以下（锚固长）5 m，桩板墙施工间隔进行。施工前原开挖路基部分回填至桩顶，平整后开始挖孔作业。第一根挖孔桩施工时，虽在挖孔时随挖随灌注钢筋混凝土护壁，但由于该段的土体处于流塑状态，挖孔不到 2 m 深时出现护壁歪斜，孔内涌泥，有坍孔的迹象。在此情况下，为克服流泥、流坍引起的挖孔困难，采用  $\phi 108\text{ mm}$  钢管围护桩，每根桩比挖孔桩深 1.0 m，每个挖孔桩四周密排围护桩，数量 90 根左右。此后，对于未开工的挖孔桩先打入围护桩并取消护壁，钢管由 5 台轻型打桩机打入，人工挖土，并对围护桩间的缝隙流泥采用普通型散装锚固剂和稻草束等方法逐一封堵，卷扬机提升，泥浆泵抽水，人工绑扎钢筋，搅拌机拌合混凝土，手推车运输，插入式振动器捣固。挖孔桩完成后混凝土强度达到 70% 时用装载机逐段

按路面高度向洞口方面清土，并及时插入预制好的钢筋混凝土板（板部位开挖利用两桩间的围护桩加撑插木板），使其路堑两侧的边坡趋于稳定

### （3）挖孔桩边墙的明洞

边墙设计 6 根挖孔桩，左、右各 3 根，桩间距 4 m，桩截面尺寸 2.0 m×2.0 m 各桩靠线路侧边缘距线路中心 2.5 m 单根桩长 8.85 m，埋入边墙底（锚固段）以下 4.44 m。同样，挖孔桩四周密排打入  $\phi 108$  mm 钢管作围护桩，施工方法同路基挖孔桩。挖孔桩做好后立即分别做好左右托梁、拱圈及防水层，然后两侧夯填土至拱半以上，稳定了两侧边坡 明洞边墙两侧各挖孔桩间的空档施工，是当土清除到位时由上而下，随开挖随利用两桩间围护桩加撑插木板直至边墙底，防止流坍，完成混凝土作业。

### （4）从地表打入钢管桩加固围岩

DK109+166.9~+176.5 段，该段为洞内施工最困难的地段，由于受到前方坍塌体的牵扯，围岩有所松动。为了稳定边坡不再坍塌和下步开挖边墙时不致因过大的侧压力而引起坍塌，在此 9.6 m 范围内的隧道边墙外侧采用机械钻孔，从地表垂直打入  $\phi 108$  mm 钢管桩各两排，梅花形布置，间距 30 cm 深入墙底 1.0 m。另外，在 DK109+176.5 处，正面斜插  $\phi 108$  mm 钢管三排予以加强，正面与左、右侧面均用  $\phi 108$  mm 钢管支撑，互相连成整体，防止坍塌继续发展和扩大。

## 2. 洞内工程的设计与施工

### （1）管棚及周边预注浆

#### 机理分析

管棚及周边预注浆技术是近年来发展起来的处理不良地质条件下隧道修筑的一种超前预支护手段，即在隧道开挖之前，将带孔的钢管，在掌子面周边按一定的角度插（钻）入围岩，并以管棚钢管为注浆管，向围岩内进行注浆。一方面，钢管组成的管棚与钢架联合支护作骨架；另一方面，浆液使松散的围岩胶结，在管棚周围一定的范围内形成一个半封闭的承载壳，既提高了围岩的自承能力，达到加固围岩、防止坍塌的目的，又在一定程度内阻隔了地下水的通道，起到止水的作用，使得在隧道掘进的过程中有一个安全的区域来实现作业。

#### 管棚主要参数

参考国内外一些隧道及地下工程的管棚施工的成功经验，选用参数如下：

管棚钢管直径及壁厚：采用  $\phi 108$  mm×9 mm 热轧无缝钢管，壁厚 7 mm；

管棚钢管间距（中至中）：30 cm，布置在上半断面；

管棚钢管预留倾角（仰角）按  $1^\circ$  考虑；

管棚每节长度按 4~6 m 设计，纵向连接采用丝扣，长度不小于 15 cm；

每段循环管棚的长度为 10~15 m；

钢管两端嵌入围岩不小于 2 m，钢管内放置钢筋笼（由 4 根  $\phi 16$  mm 钢筋组成），并灌混凝土。

#### 注浆主要参数

材料：水泥加水玻璃浆液

水泥浆液的水灰比：1:1

水泥和水玻璃的体积比：1:0.5

水玻璃模数： $n=2.4$

水玻璃浓度：35 Be'（玻美度）注浆压力：初压 0.5 MPa，终压 1.0 MPa

### （2）洞内施工过程

为保证隧道工期，在处理上述洞外部分工程的同时，在 DIK108 + 959 处设一斜井，从斜井内向进口端掘进，另外也可从斜井向出口端突泥石流坍的不良地段攻关。

洞内施工分上半断面和下半断面进行。上半断面施工步骤为：钻孔→设置管棚→周边预注浆→开挖→架设钢架→挂网、喷混凝土→衬砌。

从突泥石流的不良地质段（DIK109 + 079）始，衬砌紧跟掌子面。测量定位采用潜孔钻，钻机放在简易固定架上打眼。从掌子面开始架设钢架，终墙距衬砌外轮廓线大约 20~30 cm。每打好一个眼，用人工撞击法（用 43 kg/m 钢轨吊在未拆的拱架上）将  $\phi 108$  mm 钢管打入。采用间隔法打眼，以防坍孔。其数量是 24~30 根，深度 10 m，管棚环搭接长度均不小于 2.0 m，然后注浆。开始时，注入水泥浆液；随着压力的增大，逐渐加入水玻璃，形成水泥—水玻璃浆液，同时，根据工作进度、人力安排和机械调配等现场具体情况，适当掺入速凝剂和缓凝剂，以调节浆液的凝固时间。在凝固期之后，再开挖围岩，每次开挖长度为 1.2 m。开挖后，立即架立格栅钢架、挂网、喷混凝土。在两侧拱脚处各埋设 3 根长度不小于 1.0 m 的 18 kg/m 轻轨作连接用。施作上半断面衬砌时，一个管棚环完成 6 m × 1.2 m 后，再打下一个环节的钢管，如此循环，直至完成上半断面的施工。

下半断面的开挖采用台阶法，上口开挖长度为 2.4 m，下口开挖长度为 1.2 m。在拱脚处开挖后，横放水平撑（ $\phi 108$  mm 钢管）两道及焊接纵、斜撑（固定点在施工完的连墙端头处），使其形成稳定结构，防止拱部由于压力过大而下沉。每循环间的开挖面用大锤将木板打入，防止土体的松动和流坍。人工将开挖土装入 1.0 m<sup>3</sup> 运输车运至洞外。流泥在集水井内沉淀后，将水用泥浆泵抽到已完成的水沟内排出。

边墙混凝土作业采用先护壁后本体的施工方法，在开挖土方的同时作好护壁。护壁混凝土等级同本体。护壁在衬砌线外，一般厚度为 40 cm，将已完成边墙端头伸出的  $\phi 108$  mm 钢管头焊接接长，形成稳定框架，后立模，人工现场拌合混凝土就地入模，机械捣固。在护壁作完 24 小时后立格栅钢架两排，间距 0.6 m。同时立好钢立柱及模板，支撑加固。搭好灌注混凝土平台，机械拌合，人工运送并入模，机械捣固，24 小时后封马口。在完成三个环节后（3 m × 1.2 m）及时施作仰拱，形成封闭圈而稳定。

值得一提的是，原设计的 98.0 m 突泥石流不良地质段分两段管棚，其长度一次设置达 49.5 m。开始时，在 DIK109 + 079~ + 089 处开挖长 10 m 的工作室，其开挖轮廓线比设计大 40 cm，工作室范围喷锚加固。1993 年 10 月 14 日正式开始，采用两排弧形固定架以保证管棚各管的准确位置。钢管焊接，左、右侧下部各留三根花管（钻  $\phi 5$  mm 小孔）以利排水。钢管由钻杆旋转带入。由于无法扣丝而只能焊接，焊接扭矩不够而形成断管，且管子的端头误差超标较大。1994 年 1 月 11 日完成 20 m 钢管的设置，共计 89 天。按此进度无法保证工期，后改为潜孔钻，钻眼一次设置 10 m 长的管棚，施工进度明显加快。

## 四、处理效果

岩顶隧道突泥石流不良地质地段，采取了洞内外综合整治，以提高围岩的自承能力为基点。洞外采用地表锚杆加固边仰坡，路基深路堑及明洞边墙施以挖孔桩墙，桩开挖过程以钢管桩为护壁。洞内采取以管棚周边预注浆及钢架为核心的超前预支护系统，管超前、短开

挖、强支护、快衬砌、勤量测、早成环等一系列的综合整治措施是成功的。这为突泥流坍不良地质条件下修筑隧道积累了丰富的经验，值得借鉴。

## 五、几点说明

### 1. 加强地质勘探及施工地质预报

对于复杂的突泥流坍不良地质的隧道，应加强地质勘探，大力发展综合勘探手段，不断提高物探技术水平，使其能满足工程地质工作的要求，达到规范化应用的成熟程度。一方面，在勘测阶段，除按常规的隧道稳定性分类及流坍发育可能度区分外，还应重点查明地下水的分布情况及活动规律，以确定整治的规模，使设计具有准确性和可靠性；另一方面，在施工过程中，应加强超前地质预报工作，在开挖面用物探方法并结合超前钻探，具体查明衬砌周围和开挖前方 10~15 m 范围内的围岩地质情况，作为确定施工方案、调整支护参数和衬砌结构类型的重要依据，以弥补勘测阶段的不足。

### 2. 富水 I 类围岩地段的隧道设计施工必须采取强有力的支护措施

富水 I 类围岩地段的隧道设计与施工，由于隧道围岩呈易蠕动的松软结构或潮湿松散结构，尤其在有水时土体与水一齐涌出，形成突泥流坍，围岩自承能力极差，极易形成坍塌。所以，对于富水 I 类围岩地段隧道的设计与施工，必须采取强有力的支护措施，如管棚、钢架、注浆等一系列的措施，才能够奏效，岩顶隧道的综合整治措施就是一个证明。应该看到，水是造成围岩失稳的主要因素。因此，在富水 I 类围岩中修筑隧道时，应该把治水作为一项极为重要的内容来抓。岩顶隧道在施工过程中，由于建设、设计、施工等各方未能就“治水”达成共识，只是强调完善地表排水系统，没有采取如井点降水、冻结法等其他措施固结围岩，付出了很大的代价，是一个沉重的教训。在将来类似的工程中，应以此为鉴，采取强有力的措施，防患于未然。

### 3. 关于管棚长短的认识

从实践中认识到，长管棚的施作是件比较复杂的工艺。尤其是其钻孔位置的准确性较难掌握，不仅影响了管棚的有效支护，而且由于管棚施作的仰角，加大了开挖工作量和回填量（一般情况下管棚下的土体都坍塌了），造成了不必要的浪费，延长了工期。短管棚虽然在搭接上较浪费，但易掌握，进度快，操作容易，开挖量和回填量相对较少，乐于被施工单位接受。因此，管棚的长度不宜过长，一般情况下以 10 m 左右为宜。

## § 1-4 宝成复线新会龙场隧道坍方处理

### 一、工程概况

新会龙场隧道为单线铁路隧道，全长 4 275 m，位于宝（鸡）成（都）铁路复线马角坝与广元市之间。隧道于 1992 年底开工，1996 年 6 月竣工。

## （一）地质情况

隧道穿越的地层主要由页岩、板岩组成。地表有 2.0~5.0 m 的粘土层，围岩级别为 III~V 级，其中 IV、V 级围岩占 67.5%，岩层的节理发育，十分破碎，有较大的地下水，最大水量达 1 000~7 000 t/d。另外有 4 条断层，局部有泥岩夹层，厚度较小，一般为 0.2~0.6 m。

## （二）施工方法

隧道开挖采用正台阶法施工，按新奥法设计；采用喷锚支护，V 级围岩设有格栅钢支撑，IV 级围岩设有钢筋网，喷射混凝土厚度 10~20 cm，锚杆长 2.0~2.5 m。

# 二、坍方情况

坍方地处 DIIK440+804~+828 段，长 24 m，距洞口 986 m。坍方宽度 8~25 m。坍方于 1995 年 5 月 13 日早上 5 时 30 分发生，在右侧拱部首先开始出现局部坍塌、掉块，喷射混凝土呈小块掉下，约 15 分钟后出现了大规模的坍方，整个上半断面的初期支护全部坍下来，并一直坍塌至地表（冒顶）形成一个半径约 10.0 m 的圆形凹槽，坍方高度 26.0 m，坍方数量为 8 100 m<sup>3</sup>。

# 三、坍方原因分析

经过设计院、甲方、监理单位和施工单位一起进行现场调查分析，认为隧道坍方主要有以下四个方面的原因：

（1）该坍方地段，主要是板岩，厚度较薄，一般为 0.12~0.15 m，且节理裂隙十分发育，层理呈压扭性，层间结合力低，且有大量地下水活动，导致围岩的整体稳定性低。

（2）坍方地段正好处在断层破碎带中，从坍体的组成看，几乎呈碎石状，类似于第四纪的松散堆积层，说明该断层为挤压性断层。

（3）施工方法不当。当时采用的长台阶法施工，因台阶太长，二次衬砌施作时间太晚。

（4）由于施工单位计划采用衬砌台车施作二次衬砌，而衬砌台车又迟迟未进场，使初期支护维持的时间已达 9 个月。换句话说，开挖并施作初期支护后的时间太长，导致围岩及初期支护整体失稳，从而引发了大规模的坍方。

# 四、坍方处理措施

## （一）地表处理

坍方发生后，先用雨篷遮盖坍方口，并作好周围的排水设施。

## （二）洞内处理

洞内坍方处理采用注浆对整个坍体进行固结的方法，具体为：

- （1）设止浆墙：采用 1.0 m 厚的素混凝土；
- （2）架设注浆导管：管径  $\phi 7$  mm，长 3.0 m；
- （3）循环注浆：其注浆参数为：

注浆配合比	水：水泥：砂 = 1：2：1.86	注浆压力	0.8~2.5 MPa
注浆长度	每一循环 4.0 m	注浆扩散半径	1.5 m
注浆顺序	从下至上，最后注拱部以上的整个坍体		

- （4）洞内开挖：采用相当于Ⅲ级围岩的全断面岩面爆破法开挖；

（5）洞内支护：采用喷锚支护为主，局部设超前小导管，超前锚杆以及钢筋网，喷射混凝土厚度 10~15 cm；

- （6）二次衬砌：洞内开挖、支护完成以后，二次衬砌采用简易台车紧跟，每次灌注长度为 4.0 m

## 五、处理效果分析与评价

整个坍方处理于 1996 年 9 月 18 日处理完毕，耗时 3 个月，然后才恢复正常掘进。通过本次坍方处理发现，在坍体为碎石状的情况下，注浆效果十分良好。浆液的渗透半径比较大，在拱部以上的坍体注浆时，注浆顺着坍腔一直上升至地表坍口。一般情况下，采用 2.5 MPa 的压力，高度可以达到 30.0 m 左右，而且固结体就像素混凝土一样，强度可达到 10.0 MPa 左右，相当于岩层均匀的Ⅲ级围岩。开挖时，周边光爆眼的半边眼保留率可达 60%~70%，围岩的整体稳定性大大改善。但局部地方稍差，这些部位就是两个注浆孔之间的扩散交接地带（因浆液流到此处时压力已较小）和原坍体中含砂或粘土成团的地方。因此，在开挖这些局部地带时，增加了小导管预注浆和超前锚杆，以防止局部掉块。

## 六、几点说明

本次坍方处理，由于制定方案和等待注浆设备进场，耽误了半个月，实际处理时间为两个半月。

## § 1-5 内昆线田坝子隧道坍方处理

### 一、工程概况

田坝子隧道位于内昆铁路水富至昭通段，隧道里程为 DK289+006~DK290+375，设计全长 1369 m，为单线铁路隧道。

## （一）地质情况

隧道横穿山脊，出口自然纵坡较缓（ $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ），单斜地层，产状较平缓、紊乱，主要有两组节理发育。地下水较发育，主要为基岩裂隙水及土中孔隙水，受季节影响大，涌水量为  $1\ 648.8\ \text{t/d}$ 。DK290+300~+375 段位于堆积体上，技术设计地质勘察资料与实际出入较大，且堆积体与基岩交角为  $44^{\circ}$ ，沿隧道洞身纵向分布，出口段覆土较厚，地表及地下水发育，局部涌水量大，堆积体遇水呈塑状。

## （二）施工情况

出口段为 II 类围岩，由出口洞门向洞内 5 m 为明洞，20 m II 类加强衬砌，20 m 偏压 II 类衬砌，采用台阶法开挖、锚喷临时支护及整体式衬砌。

隧道开挖前首先对边坡进行锚喷支护，并按设计要求做好天沟等排水设施。

DK290+332~+371 段全环设格栅钢架，拱部设置  $\phi 42\ \text{mm}$  超前小导管，采用台阶法开挖和锚喷临时支护。

## 二、坍方情况

上部开挖支护至 DK290+355 时，台阶长度为 6 m，这时山顶沿天沟方向及顺线路方向的右上方出现裂纹，为此采取了应急措施，衬砌紧跟至 DK290+351 处。

1999 年 2 月 1 日，上部继续开挖至 DK290+332，下部开挖支护至 DK290+342 时，晚上 21 时 30 分左右，DK290+345 处已施作的拱部临时锚喷支护开始掉块，22 时 15 分掉块严重，洞内施工人员停止作业，24 时大量掉块。2 月 2 日凌晨 1 时 30 分拱部格栅钢架弯曲变形，发展较快，1 时 50 分拱部格栅钢架从右侧起拱线处拉开落下约 8 根，右侧起拱线处有泥石流塑状堆积物流出。凌晨 2 时左右该处坍方冒顶，土夹大块孤石塞满隧道（图 1-3）

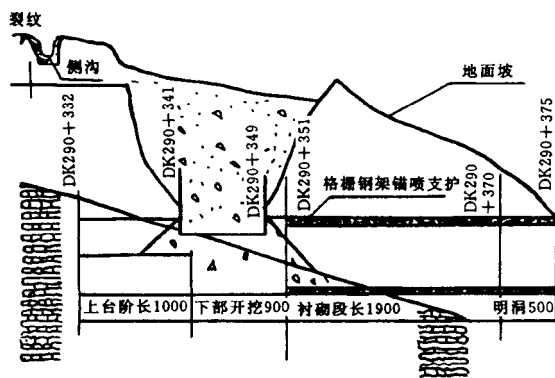


图 1-3 坍方断面示意（单位：cm）

坍方地段洞内长 8 m，地表下陷里程 DK290+349~+332 形成长 16 m、宽 12 m、深 2.3 m 左右的锅底坑，坍方量约  $4\ 400\ \text{m}^3$ 。

### 三、坍方原因分析

引起本次隧道坍方的主要原因是技术设计地质勘察资料与实际出入较大，隧道出口段地质条件差造成的。出口端为堆积体，地表及地下水发育，堆积体遇水呈塑状，失去自稳能力。

### 四、坍方处理方法与措施

#### (一) 坍方处理方案

##### 1. 三个初步比拟方案

(1) 由洞内将整个坍方体全部清除，坍坑由地面刷成稳定的边坡，以明洞衬砌通过，再回填坍坑。

(2) 采用大管棚法，施作钢架锚喷支护，暗洞通过，对洞内坍方体进行预注浆，并采用先墙后拱法施作钢筋混凝土衬砌，进行地表回填。

(3) 进行超前小导管注浆，采用格栅钢架锚网喷混凝土强支护，拱部 3 m 范围花管注浆形成稳固圈，采用先拱后墙法施作钢筋混凝土衬砌，进行地表回填。

##### 2. 方案的确定

经过各方多次研究，认为第 (1) 方案工期长，工程量大，基岩上部土体地下水发育，可能滑动形成新的坍塌，施工不安全；第 (2) 方案大管棚在洞内不易施作，坍方体有大量孤石。因此认为第 (3) 方案可行。为保证万无一失，提出补充要求：环形开挖留核心土，钢架间距 0.5 m，钢架要纵向连接；为防止下沉，拱脚处对钢架设置锁脚锚杆，上部开挖做临时仰拱。首先挖通上部 15 m 长，钢筋混凝土拱部一次灌注；下部开挖进尺控制在 0.5 m，立格栅钢架并与上部连接，及时喷混凝土封闭，加设格栅仰拱形成环形整体。下部开挖 3 m 后，立即进行边墙衬砌，仰拱紧跟，对洞内坍方松散体注浆加固。

#### (二) 坍方处理过程

(1) 考虑到回填土体的增加对上部临时喷锚支护变形会产生影响，且坍方处理正处于 2 月份旱季，实际施工中地表锅底坑只进行原坍方体夯实。对原天沟拉裂部分进行夯填封闭，沿坍方体外施作截水沟，坍方通过后，对锅底进行夯填封闭，填至原地面以上 0.3 m。

(2) 洞内配备了充足劳力，用编织袋装土堆砌台阶，并对隧道内松散土体喷混凝土封闭（厚度 8~10 cm），之后对洞内坍方进行改良，采用  $\phi 42$  mm 花管注浆  $L=4$  m，间距 1 m，梅花形布置，注浆压力为 0.6 MPa，有效地控制了坍塌。

(3) 洞内上部施工按以下四点进行：

首先打入超前小导管并注浆，单排布置，拱部小导管间距 0.2~0.3 m，长 5 m，搭接长度不小于 2 m，小导管的后端焊接在两榀并联的 I18 临时拱架上，该两榀并联的拱架通过锚杆连接在已做好的二次衬砌上，所有的 I18 临时钢架以及格栅钢架全部支在上导坑的

临时仰拱上，有效地减小了锚喷支护的沉降变形。同时格栅钢架每侧用 4 根  $\phi 22$  mm 钢筋纵向连接 间距 1.0 m( 图 1-4 )

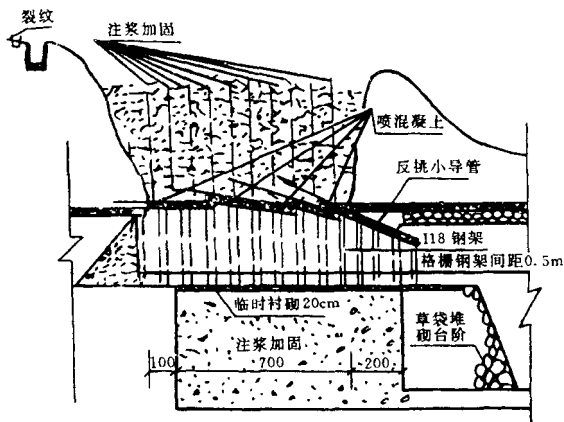


图 1-4 洞内上部施工和坍方处理示意 (单位: cm)

临时仰拱为 20 cm 厚的喷混凝土结构，内设格栅钢架（1.0 m/幅），下部开挖时，随挖随拆。由于核心土的影响，临时仰拱分段施作。

上部首先掘进，并对坍方体进行适当的土体改良，即花管注浆加固松散土体，开挖进尺不大于 0.5 m，留核心土防止掌子面坍塌，拱墙锚网喷 30 cm。

坍方地段约 10 m 处，上部通过坍方体时，实际打入超前小导管 4 个循环，且回头反打超前小导管，拆除侵入衬砌里的临时支护，随拆随立钢架并喷锚，15 m 长的拱部衬砌一次完成。

为防止拱部钢筋混凝土衬砌的不均匀沉降，减小变形，施工中采取如下措施：

- 凿除已衬完的混凝土端部，露出钢筋，与 15 m 拱部钢筋焊接。
- 在拱脚部位，加强纵向配筋，以形成底梁作用。
- 提高混凝土标号，实际施工时采用 250# 混凝土。
- 控制下部衬砌与开挖面间长度，不得超过 3.0 m。

(4) 洞内下部施工按以下三点进行：

下部开挖时，上导坑的临时仰拱随着下部的掘进随时拆除，并紧跟设置卡口梁（ $\phi 30$  cm 圆木顶紧）

开挖进尺 0.5 m，两侧边墙格栅钢架及时安装并与拱部格栅钢架焊接，之后喷混凝土封闭（厚 30 cm），钢架之间的纵向连接采用  $\phi 22$  mm 钢筋，环向间距 1.0 m。

下部开挖支护达到 3.0 m 时，即进行边墙二次衬砌，卡口梁不拆除，实际施工 6 个循环，完成边墙衬砌。

## 五、处理效果分析与评价

(1) 在施工过程中，无论对喷锚支护，还是对二次模筑衬砌，均进行了施工监测，尤其是采用先拱后墙衬砌施工的坍方地段。监测结果表明：上部临时支护完成时，拱顶、拱脚收