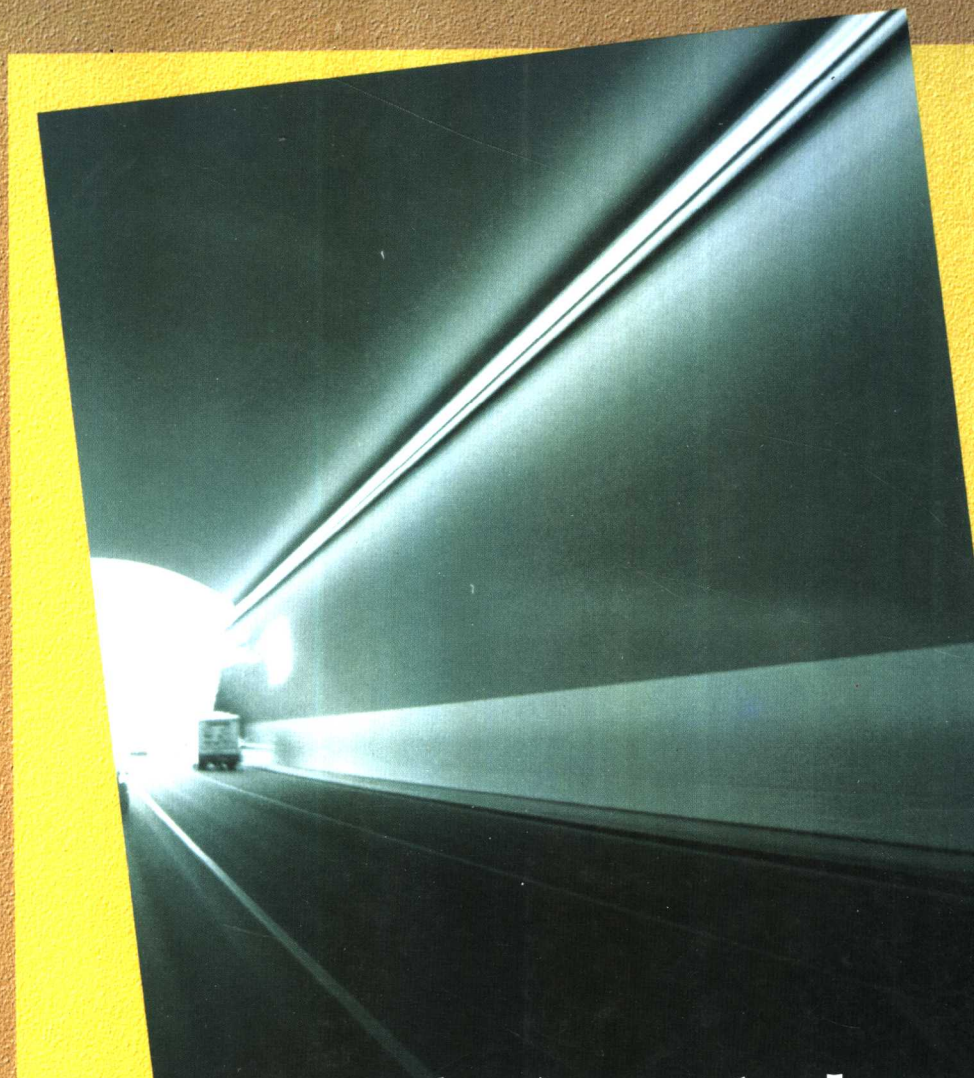




隧道坍方案案例分析

冯卫星 况 勇 陈建军

西南交通大学出版社

隧道坍方案例分析

冯卫星 况 勇 陈建军

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书介绍了几种主要的隧道坍方处理方法,包括单线铁路隧道坍方处理、双线铁路隧道坍方处理、公路隧道坍方处理、水工隧洞坍方处理和隧道衬砌裂损处理。本书以实际隧道坍方案例为背景,反映真实的隧道坍方处理方法与措施,叙述通俗易懂,使读者在阅读本书后,对隧道坍方的原因、处理方法及技术措施等有一个比较全面的了解,基本上可从事隧道坍方处理工作。

本书既可作隧道及地下工程技术人员的参考书,也可作土木工程专业本科生的专业课教材。

图书在版编目(CIP)数据

隧道坍方案例分析 / 冯卫星, 况勇, 陈建军. — 成都: 西南交通大学出版社, 2002. 1
ISBN 7-81057-604-6

I. 隧... II. ①冯...②况...③陈... III. 隧道 - 塌方 - 事故分析 IV. U458.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 079182 号

隧 道 坍 方 案 例 分 析

冯卫星 况 勇 陈建军

出版人 宋绍南

责任编辑 李彤梅

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 11.25

字数: 250 千字 印数: 1—3000 册

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-604-6/U · 049

定价: 15.00 元

前 言

随着我国经济建设的发展，基本建设的投入越来越大，其中铁路、公路和水利工程所占的比重较大，在这些工程中常常伴随大量的隧道工程。在国内、外的隧道施工中，坍方造成了工期延误、机械设备毁坏、人员伤亡、工程费用增加和施工企业信誉降低等严重后果，一次严重的隧道坍方可使整个工程按期投入使用的计划落空，使施工企业盈亏关系发生逆转，人员的伤亡可能会立即通报全国。因此，无论是业主、监理，还是施工企业，都对如何避免或减少隧道坍方的发生，以及在坍方发生后如何迅速有效地进行处理十分关心。

本书以真实隧道坍方案例为背景，比较全面地介绍了单线铁路隧道、双线铁路隧道、公路隧道和水工隧洞的坍方处理，内容包括工程概况、坍方情况、坍方原因分析、坍方处理方法与措施、坍方处理效果分析与评价等，另外还介绍了隧道衬砌裂损的处理方法。在编写过程中，编者参照了大量公开发表的有关隧道坍方处理的科技文献和研究报告。为了真实反映坍方的处理情况，有些地方直接引用了相关内容（详见参考文献）。在此谨向有关作者表示感谢；石家庄铁道学院景诗庭教授在百忙中抽出宝贵时间审阅了本书，在此一并致谢。

参加本书编写工作的有石家庄铁道学院的冯卫星（教授，博士，研究生导师）及中国铁道建筑总公司的况勇（教授级高级工程师）和陈建军（工程师）。

由于作者水平有限，本书疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者
2001年8月

目 录

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	1
§ 1-2	侯家湾四号隧道坍方处理	5
§ 1-3	岩顶隧道突泥石流坍地段综合治理	8
§ 1-4	宝成复线新会龙场隧道坍方处理	12
§ 1-5	内昆线田坝子隧道坍方处理	14
§ 1-6	新太阳冲隧道坍方处理	19
§ 1-7	草庵隧道进口坍方处理	23
§ 1-8	新翁沙隧道坍方处理	29
§ 1-9	张盘黄土隧道坍方处理	33
§ 1-10	刺桐关三号隧道坍方处理	37
§ 1-11	内昆线黄莲坡隧道坍方处理	46
§ 1-12	内昆线金竹林隧道坍方处理	50
§ 1-13	殿沟隧道坍方处理	56

第 2 章 双线铁路隧道坍方处理

§ 2-1	隧道 78 m 高通顶坍方处理	60
§ 2-2	西坪隧道坍方处理	66
§ 2-3	护壳暗挖处理东风隧道坍方	70
§ 2-4	京九线老营盘隧道坍方处理	74
§ 2-5	朔黄线寺铺尖隧道坍方处理	80

第 3 章 公路隧道坍方处理

§ 3-1	靠椅山隧道坍方处理	85
§ 3-2	缙云山隧道坍方处理	91
§ 3-3	飞鸾岭隧道南段洞口坍方处理	93
§ 3-4	青岭隧道坍方处理	97
§ 3-5	叉河岭隧道冒顶坍方处理	100
§ 3-6	白花山右线隧道大坍方处理	107
§ 3-7	蒿庄梁隧道坍方处理	114

第4章 水工隧洞坍方处理

§4-1 富尔江引水隧洞坍方处理	118
§4-2 小浪底水利枢纽工程2 [#] 导流洞坍方处理	120
§4-3 盘道岭隧洞两次坍方处理	125
§4-4 输水工程隧洞支洞洞口失稳处理	130

第5章 隧道衬砌裂损处理

§5-1 大秦线赵家2 [#] 隧道衬砌裂损处理	134
§5-2 黄土岭隧道衬砌裂损掉块处理	137
§5-3 贵昆线沙子坡隧道衬砌裂损处理	140
§5-4 西兰公路六盘山隧道衬砌裂损处理	144
§5-5 巷道变形处理	150
§5-6 宝中线堡子梁隧道衬砌变形处理	156
§5-7 浅层爆破渣洋隧道裂损衬砌	159

第6章 坍方案例分析总结

§6-1 坍方类型、发生机理及原因	163
§6-2 坍方的界定及分级标准	165
§6-3 坍方的技术处理措施	168
§6-4 坍方的综合预防措施	171

参考文献

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 m³，

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 m³。

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坍内刷坡，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 m ，@ 30 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 m ，纵向@ 1.0 m ，喷混凝土包裹钢架，每天两个循环，每个循环 0.8 m 。

(3) 衬砌紧跟。采用先拱后墙法施工，即上导先行，步距 2.4 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 m 、长 3.0 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 cm 垫层，地表用 50 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：

① 导管参数选择 长 $3.0\sim 4.0\text{ m}$ ，@ 0.4 m ，外插角 $10^\circ\sim 15^\circ$ ，掌子面喷层 8 cm ，浆液扩散半径 0.3 m 左右，注浆终压 $2\sim 3\text{ MPa}$ 。

② 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。

③ 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 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/m ，纵向连接筋 $\phi 12\text{ mm}$ 、 1 根/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。

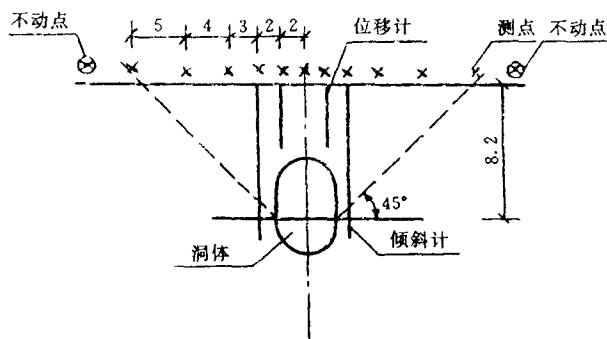


图 1-1 量测断面布点 (单位: m)

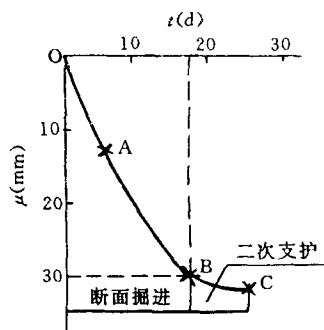


图 1-2 DK195+254~+278 段地面沉降与时间关系

(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 (单线电气化铁路) 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,横纵间距 $0.8\text{ m} \times 1\text{ m}$,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 m³。

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 ($V = 3\,630\text{ m}^3$);

η ——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

为防止坍塌方段完工后漏水,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 $2\,150\text{ m}^3$ ，与施工设计注浆量 $2\,178\text{ m}^3$ 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有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 $2\,582\text{ m}$ ，是漳（平）泉（州）肖（厝）铁路控制全线工程的重点工程，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 $\text{DIK}109+089\sim+187$ ，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 $100\text{ m}^3/\text{d}$ ，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 $0.5\sim 2\text{ mm}$ 及 $0.005\sim 0.05\text{ mm}$ 为主，各占 26% ，压缩系数 $3.8\times 10^{-4}\text{ kPa}$ ，压缩模量 $4.6\times 10^{-3}\text{ kPa}$ ，干密度 1.548 g/cm^3 ，孔隙比 0.727 ，渗透系数（垂直） $3.2\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ 。

二、突泥石流情况

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，岩质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 $2\sim 3$ 排 $\phi 130\text{ mm}$ 、长 $8\sim 14\text{ m}$ C20 钢筋混凝土锚固桩（3 根 $\phi 18\text{ mm}$ 钢筋束在桩心）锚入路肩下 $4\sim 6\text{ m}$ ，开挖后，由于侧压力过大而失败，后又改为 $\phi 150\text{ mm}$ 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 $1\,700\text{ m}^3$ ，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4m,桩截面尺寸 $2.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 。各桩靠线路侧边缘距线路中心2.5m,单根桩长8.85m,埋入边墙底(锚固段)以下4.44m。同样,挖孔桩四周密排打入 $\phi 108\text{ mm}$ 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9.6m范围内的隧道边墙外侧采用机械钻孔,从地表垂直打入 $\phi 108\text{ mm}$ 钢管桩各两排,梅花形布置,间距30cm,深入墙底1.0m。另外,在DK109+176.5处,正面斜插 $\phi 108\text{ mm}$ 钢管三排予以加强,正面与左、右侧面均用 $\phi 108\text{ mm}$ 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

① 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。

② 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 $\phi 108\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 热轧无缝钢管,壁厚7mm;

管棚钢管间距(中至中):30cm,布置在上半断面;

管棚钢管预留倾角(仰角):按 1° 考虑;

管棚每节长度按4~6m设计,纵向连接采用丝扣,长度不小于15cm;

每段循环管棚的长度为10~15m;

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

③ 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。

从突泥流坍的不良地质段(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,管棚环节搭接长度均不小于 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 $\times$ 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 m³ 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 $\times$ 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 突泥流坍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

岩顶隧道突泥流坍不良地质地段,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