

岩溶工程论文集

YANRONG GONGCHENG
LUNWEN JI

陈国亮 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

岩溶工程论文集

陈国亮 著

中国铁道出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本论文集中的主要内容曾在国际、国内一些重要刊物或会议发表过,也曾出版过专著。岩溶地面塌陷的研究曾获国家科技进步奖和铁道部科技进步奖,并获联合国TIPS系统、中国国家分部发明创新科技之星奖。岩溶洞穴顶板安全厚度的研究曾获铁道部科技进步奖。治理滑坡的新技术方法获国家发明专利权及世界发明博览会“尤里卡”金奖。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶工程论文集/陈国亮著. —北京:中国铁道出版社,
2009.12

ISBN 978-7-113-10567-9

I. 岩… II. 陈… III. 岩溶—文集 IV. P642.25-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 213720 号

书 名: 岩溶工程论文集

作 者: 陈国亮

责任编辑: 曹艳芳

电话: 010-51873065

电子信箱: chengcheng0322@163.com

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 张玉华

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

版 次: 2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 11.25 字数: 267 千

印 数: 000 1~1 500 册

书 号: ISBN 978-7-113-10567-9/TU·1069

定 价: 25.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电(010) 51873170, 路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504, 路电(021) 73187

陈国亮简介

1956年毕业于中南土木建筑学院(其前身湖南大学,后为长沙铁道学院)四年制铁道工程系。在铁道部第二勘察设计院从事工程地质工作40余年。主编《岩溶工程地质》、《中国山区道路灾害防治》及《国际交流论文集》三书,编著《岩溶地面塌陷的成因与防治》中英文合订本一书。在国内外发表过30余篇论文,其中岩溶基准面的模式,坑道通水量计算的新概念,治理滑坡的一种新技术及岩溶危害的防治等10余篇论文、被国际工程地质大会发表与交流。曾参加布宜诺斯艾利斯第五届、里斯本第七届国际工程地质大会及国内两次国际地质学会交流。



负责“岩溶地面塌陷”课题研究:岩溶地面塌陷造成房屋坍塌、道路沉陷、农田干涸、水库漏水、铁路断道及列车颠覆等极大危害。在进行广泛实地调查的基础上,结合模拟试验进行了长时间的研究,得出岩溶地面塌陷的成因、机制及预防与治理等系列成果,获得铁道部及国家科技进步奖,并获联合国TIPS(技术信息促进系统)中国国家分部“发明创新科技之星”奖、及入选“中华优秀专利技术精选”。

负责“岩溶洞穴顶板安全厚度的研究”,获铁道部科技进步奖,已选入“中国技术大全”。

1995年获《加固山体滑动面防治滑坡》的发明专利,为防治中浅层滑坡及顺层滑坡提供了新的技术方法,已在几十处滑坡治理中证实其技术可靠,费用较省等显著优点。1997年参加布鲁塞尔第46届国际发明博览会,并获“尤里卡发明金奖”。

2002~2003年在马来西亚治理厂房及道路地基软土沉降工作,申请了埋管压浆的发明专利。

曾任实习生、技术员、工程师、高级工程师等技术职称及铁二院地质队长、地质处副总,昆明院副总,院岩土公司总工程师等技术职务。先后担任中国地质灾害研究会理事,中国岩溶专业委员会委员,中国铁道学会地路专业委员会委员,四川省勘察协会副理事长,云南省地质灾害研究会副理事长及中国岩溶研究所客座研究员等职。现任广东泰山岩土工程技术有限公司董事长兼总经理。入选中国工程师名人大全,世界华人英才录及世界名人录,中国当代发明家大辞典及中国铁路工程总公司科技名人录。1992年起享受国务院政府特殊津贴。

前 言

本论文集中的主要内容曾在国际、国内一些重要刊物或会议发表过,也曾出版过专著。岩溶地面塌陷的研究曾获国家科技进步奖和铁道部科技进步奖。并获联合国 TIPS 系统、中国国家分部发明创新科技之星奖。岩溶洞穴顶板安全厚度的研究曾获铁道部科技进步奖。治理滑坡的新技术方法获国家发明专利权及世界发明博览会“尤里卡”金奖。但因文章发表距今时间久远,不时有同行询问或反映查找困难,便启迪我重印的思想,以献给有兴趣的读者。

本文集有不少内容:岩溶洞穴顶板安全厚度的评价,隐藏岩溶大厅的预测,岩溶化基准面的模式,岩溶地区线路位置选择的许多原则,岩溶蓄水构造的分类,水均衡法估计坑道涌水量的新作法,岩溶地面塌陷的机制、预测、预防措施以及滑坡治理的一种新方法等,都是在实践过程中总结、提炼的一些新概念,至今仍有参考价值。

本文集均为作者执笔撰写,文中有些内容,岩溶研究组的陈裕昌、张江华及其他同行,都起了重要作用,特此谢忱!

注:本文中岩溶与卡斯特(karst)为同义词;岩溶塌陷即岩溶地面塌陷。

目 录

第一篇 岩溶洞穴顶板安全厚度研究

一、完整顶板安全厚度的评价	1
(一)近似的结构分析法	2
(二)电阻应变片测试法	4
(三)厚跨比法	4
(四)成拱分析法	5
二、不完整顶板安全厚度的评价	5
(一)洞穴顶板坍塌堵塞估算法	5
(二)结构力学分析法	6
三、有限元分析法	6
(一)计算分析中的几个基本问题	6
(二)有限元分析的电算程序	8
(三)计算成果及数据处理	9
(四)沙坡隧道基础以下溶洞的计算分析	10
四、松散层洞穴顶板坍塌高度的估算	18
(一)破裂拱法	18
(二)经验公式法	19
(三)坍塌平衡法	19
(四)洞顶板坍塌堵塞法	19
(五)算 例	20
(六)讨 论	20

第二篇 岩溶化基准面的模式

一、侧限型	22
二、底限型	23
三、河谷裸露型	24
四、河谷覆盖型	25
五、河谷深岩溶型	25

第三篇 岩溶地区线路位置选择原则

一、不同岩溶地貌单元的线路位置选择原则	27
(一)溶原、孤峰平原与峰林谷地区	28
(二)溶丘洼地与峰丛洼地区	28
(三)地形分水岭地区	29

(四)岩溶河谷区	31
(五)河谷斜坡地区	32
二、其他岩溶地质条件下的线路位置选择原则	33
(一)线路避开碳酸盐岩与非碳酸盐岩的接触带	33
(二)线路避开有利于岩溶发育的构造带	36
(三)线路避开岩溶发育的极强地区	37
(四)线路绕避网状洞穴和巨大空洞区	38
三、隧道内纵坡形式与平行导坑位置的选择	39
(一)隧道纵坡形式的选择	39
(二)平行导坑的位置与坡度选择	39
四、岩溶地区的总体性选线	40

第四篇 隐伏岩溶大厅的预测

一、质纯、层厚、缓倾角的可溶岩——形成岩溶大厅的物质条件	43
二、通畅的地下径流场所——形成岩溶大厅的水动力条件	44
三、地形相对高差大——影响岩溶大厅形成的重要因素	44
四、地貌形态——形成岩溶大厅的有利因素	45
五、岩溶负地形景观——岩溶大厅的信息反映	46
六、隐伏岩溶大厅的预测	46

第五篇 覆盖型岩溶地区的桩基础问题

一、基础岩溶地质问题	48
(一)岩溶洞穴的误判与漏判	48
(二)隐伏的岩溶异状	49
二、岩溶地质导致的设计和施工问题	49
三、应对工程措施	50

第六篇 岩溶研究的经验与问题

一、岩溶组的研究内容	52
二、取得的主要经验	53
三、存在问题	55

第七篇 坑道水害防治

一、坑道水害概述	57
(一)隧道水害统计	57
(二)涌水特征与规律	59
二、坑道中的非岩溶水害	60
(一)构造断裂蓄水危害	60
(二)构造褶曲蓄水危害	61
(三)构造断裂与褶曲蓄水危害	61

三、坑道中的岩溶水害	61
(一)增加施工难度	62
(二)危及人身安全	62
(三)淹没机具设备	62
(四)地质环境破坏	62
(五)运营中的贻害	62
四、坑道岩溶水害的预测	63
(一)定性预测	63
(二)半定量和定量预测	64

第八篇 岩溶水的运动特征

一、岩溶水与地表水及其他类型的地下水之间的补给关系	74
二、岩溶化山区地下水的运动特征	75
(一)单一碳酸盐岩层的岩溶区的地下水运动特征	75
(二)碳酸盐岩层与非碳酸盐岩层呈互层地区的岩溶水运动特征	75
三、岩溶化山区岩溶水动力剖面分带与岩溶蓄水构造类型	79
(一)岩溶水动力剖面分带	79
(二)岩溶蓄水构造类型	82

第九篇 水均衡法预测岩溶区坑道涌水量的见解

一、集水面积与汇水面积	85
二、降雨量与人渗量并非线性关系,应观测求得	86
三、人渗系数并非常数,不宜用经验数据	86
四、人渗量并非坑道涌水量	87
五、不同岩溶垂直分带中的涌水量计算方法	87
六、坑道分段涌水量较总涌水量有意义	88

第十篇 岩溶危害的防治

一、岩溶洞穴危害的防治	89
(一)岩溶洞穴危害的判别	89
(二)岩溶洞穴的防治措施	89
二、岩溶水危害的防治	95
(一)岩溶水具有的特征	95
(二)岩溶水危害的防治措施	95
三、岩溶地面塌陷的防治	97
(一)岩溶地面塌陷的概述	97
(二)岩溶地面塌陷的防治措施	97
四、绕 避	98
(一)区域绕避	98
(二)局部绕避	98

第十一篇 岩溶地面塌陷的危害

一、岩溶地面塌陷的概念	100
(一)概 述	100
(二)名词与定义	100
(三)塌陷分类	101
二、我国岩溶地面塌陷的分布	101
(一)城市岩溶塌陷的分布	101
(二)铁路岩溶塌陷的分布	102
(三)矿山岩溶塌陷的分布	105
(四)水利工程岩溶塌陷的分布	107
三、岩溶地面塌陷的危害及事例	109
(一)对铁路运输的危害	109
(二)对矿山的危害	112
(三)对农田水利的危害	113
(四)对城市建设的危害	114

第十二篇 岩溶地面塌陷的勘察与试验

一、勘察工作	116
(一)综合勘察	116
(二)体积勘探	119
(三)勘察提供的成果	119
二、模型试验	121
(一)模型设计	121
(二)试验项目与内容	122
(三)试验资料分析	122
三、现场试验	126
(一)抽水致塌试验	126
(二)土洞致塌试验	128
(三)钻孔真空测试	128
(四)塌陷追踪试验	129
(五)其他试验	129

第十三篇 岩溶地面塌陷的地质环境

一、基本地质环境	130
(一)覆盖型岩溶之基岩面具有开口的岩溶形态	130
(二)覆盖土体或砂页岩	130
(三)动 力	130
二、影响岩溶塌陷的环境因素	130
(一)水	130

(二)覆盖层	133
(三)岩 溶	135
(四)其 他	136

第十四篇 岩溶地面塌陷的成因与机制

一、岩溶塌陷的成因	138
(一)抽取地下水致塌	138
(二)坑道排水、突水致塌	139
(三)地表雨水入渗致塌	139
(四)河水位涨落致塌	140
(五)振动致塌	140
(六)地震致塌	140
(七)荷载致塌	141
二、岩溶塌陷的受力分析	141
(一)致塌力	141
(二)抗塌力	142
三、岩溶地面塌陷的机制	142
(一)潜蚀效应	142
(二)真空吸蚀效应	143
(三)压强差效应	144
(四)垂直渗压效应	144
(五)自重效应	145
(六)浮力效应	145
(七)土体强度效应	145
(八)其他效应	145
四、岩溶塌陷的成因、机制关系	146

第十五篇 岩溶地面塌陷的防治技术

一、预 测	147
(一)定性预测	147
(二)半定量预测	147
(三)定量预测	149
(四)综合预测	152
二、预 防	152
三、监测预报	153
(一)地面监测	153
(二)井孔内、泉点、矿坑与水库渗漏点监测	153
(三)报警装置	154
四、岩溶地面塌陷的整治技术	154

第十六篇 采煤沉降有关问题的初步探讨

一、现行的作法	158
二、坍塌堵塞法与顶板稳定	158
三、坍塌沉降与路基稳定	160

第十七篇 治理滑坡的新技术方法

一、技术方法与原理	161
二、工程实例	161
(一)压浆构成“类挡墙”作用	161
(二)压浆固结滑动面,提高抗滑力作用	162
(三)检算实例	165
(四)压浆效果	167

第一篇 岩溶洞穴顶板安全厚度研究

岩溶洞穴含基岩中岩溶洞穴及第四系松散覆盖层中洞穴,其顶板常因失去稳定而致坍塌。前者顶板坍塌突然,时间短暂,事先几乎无任何直观信息。后者在一个地区常成群塌陷,延续时久,且有重复性,坍塌之前虽或多或少有些信息,一旦发生,则数量多,规模大,造成的危害严重。上述两类顶板坍塌因其发生的时间和空间很难预测,对行车安全构成严重威胁。因此,如何评价顶板稳定性问题,是铁路建设中急待解决的课题。

若干年来我们在处理基岩洞穴的实践中,在顶板安全厚度的评价方面曾作过一些探索,但对松散覆盖层洞穴顶板稳定性的研究才开始。故本文仅讨论基岩中洞穴稳定性的问题。

苏联 T. M 沙湖年慈提出的坍塌理论计算顶板厚度,必须搜集洞穴的较多数据,其中一些数据难于获得,且方法过于理论化,计算繁琐,不易推广使用。苏联 M. M 普洛特尼可夫提出的压力拱计算法,可引用于松散介质的人工洞穴顶板厚度评价,用于基岩洞穴则不适宜。

随着大规模的国民经济建设的需要,我国山区铁路的日益增多,由岩溶洞穴顶板坍塌导致的铁路工程病害也增加,根据我国铁路建设中处理基岩洞穴顶板的实践经验,认为评价洞穴稳定性必须分析两个因素。

一是内在因素:内因是指洞穴顶板岩层固有的几何特征,地质条件、构造及岩性特征,亦即包括洞穴顶板的厚度、洞穴的跨度及形态,岩层产状,节理、裂隙状况,以及由岩性决定的岩石的物理力学指标等。

二是外在因素:包括洞穴顶板的受载状况(时间长短、荷载大小、动载或静载),岩石含水量及温度变化的影响,洞内水流搬运的机械破坏作用以及振动作用等。此外,洞穴的坍塌有一个发展变化的过程。一般分为三个阶段,以水平顶板为例:①变形阶段,开始顶板在静载作用下,产生初始应力;②坍塌阶段,变形过大,顶板拉裂,处于松动阶段;继而逐步坍塌;③成拱阶段,坍塌成拱形后,顶板可以自承其上的压力,而趋于稳定。因此,评价洞穴稳定性问题,是一个复杂的问题。目前,只能把以上诸因素加以概化,提出近似的办法,现仅将我们过去评价洞穴稳定性的方法简略介绍如后,并有待在今后长期实践中加以检验。

一、完整顶板安全厚度的评价

完整顶板系指未被节理裂隙切割或虽被切割但胶结良好,可视为整体的洞穴顶板。否则即为不完整顶板。完整顶板的实例见表 1-1。

表 1-1 在运营线路下溶洞具有完整顶板的实例表

例号	线名及工程名称	顶板厚度 h (m)	跨长 L (m)	h/L	顶板形态	洞内特征
1	贵昆线 K243+738 路基	8.5	3	2.85	斜面	完整顶板,有水流
2	盘西线沙坡隧道	2.5	3	0.85	倾斜 $2^{\circ}\sim 8^{\circ}$	完整顶板,节理被石灰华充填,作有浆砌片石支柱

注:本文主要内容曾于 1982 年 10 月在印度新德里第四届国际工程地质大会交流。并获铁道部科技进步三等奖。

续上表

例号	线名及工程名称	顶板厚度 h (m)	跨长 L (m)	h/L	顶板形态	洞内特征
3	枝柳线融安车站石砟线路基	4	8	0.50	近水平	完整顶板有小支洞,有流水
4	贵昆线 K15+500 路基	14	3	4.66	水平	层薄,完整顶板
5	襄渝线老鱼泉隧道	22	8	2.75	近水平	完整顶板,有水流
6	贵昆线四旗路基	17	6.5	2.60	近水平	岩层倾角 28° ,完整顶板,有流水,水深 2 m
7	来合线白鹤站路基	3	1	3.00	略成拱形	不详
8	贵昆线 K145+900 路基	2.7	3	0.90	略成拱形	干砌片石支顶,不密贴,完整顶板
9	贵昆线 K173+100 路基	12.5	10	1.25	拱形	完整顶板
10	川黔线响水河桥头路基	25~30	30	0.91	拱形	完整顶板,有水流
11	宝成线 冉家河路基 K341+295	5.45	7	0.78	近水平	完整顶板,洞高 6 m 底部有水流
12	湘黔线 小龙洞路基 K750+345	13.5	4.0	3.37	水平	洞高 1 m,完整,无水
13	贵昆线秧田冲站内	4.0	6.4	0.62	近水平	完整顶板 1986 年前未作处理,以后工区补作了支柱
14	京广线 坪石站 K2063+305 路基	0.1~0.2 最厚 1.5	8.0	0.025~ 0.19	水平	顶板过薄,于 1986 年 1 月 19 日坍塌
15	贵昆线 K591+881 路基	3.6	1.8	1.24	近似拱形	通车 23 年未作处理,偶然发现后作了处理

注: ① 例 8 顶板上作有涵洞。

② 例 3 路基面至洞顶板间尚有约 3 m 厚的人工建筑碎石。

③ 表中各例均为基岩溶洞,到目前为止,均正常行车,少者 30 年,多者 50 年。

(一)近似的结构分析法

1. 荷载传递线交汇法

对于完整的水平顶板参照桥梁设计规范,假定荷载按 $30^\circ \sim 35^\circ$ 扩散角向下传递,此传递线交于顶板与洞壁的交点以外时,即认为溶洞壁直接支撑顶板上的外荷与自重,顶板是安全的(图 1-1)。在表中的实例 2 盘西线沙坡隧道下溶洞顶板即采用此法对顶板进行评价。

岩层为中三叠统关岭组灰岩,走向 $NW48^\circ$,倾角 $2^\circ \sim 8^\circ$,溶洞顶板沿线路中线的左侧坍塌较高,呈反台阶状,其余绝大部分都很完整。该洞顶板,从横断面看,处于坍塌阶段;从纵断面看,顶板近乎成拱阶段,岩石完整。两条构造节理胶结良好,但拱度平坦,几近倾斜直线。据此分析:顶板纵、横向都处于受弯下挠状态,其下缘具有一定的初始拉

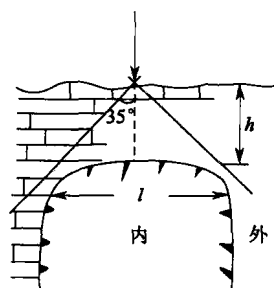


图 1-1 荷载传递线交汇法

应力;横向的稳定较差,岩石强度较高,在自然状态下尚能保持平衡;隧道建成通车,增加了列车的振动,顶板初始拉应力有所改变,应予加强。为了运营安全,在横向加强支顶,防止左侧顶板继续坍塌,危及隧道衬砌安全;在纵向加四个支柱,将 26 m 跨度顶板划分为净距 3 m 的小跨。假定支柱反力按 35° 扩散角向上传递,用荷载传递交汇法计算两柱净距 3 m,顶板最小安全厚度为 2.14 m。而溶洞顶板最薄的部位在 AB 支柱间,平均厚也有 2.2~2.6 m,可以说是安全的。

2. 双向板分析法

完整的水平顶板,可近似地作为四周嵌制的矩形板检算其稳定性。检算内容为板的长边支点的中间挠曲力矩(板中心点的挠曲力矩不控制),长边中间的剪力冲切破坏。长边支点中间的挠曲力矩 M_{ar} 为:

$$M_{ar} = -\frac{q_a l_a^2}{12} (tf \cdot m) \quad (1-1)$$

$$q_{ar} = q \frac{\lambda^4}{1+\lambda^4} (tf/m^2)$$

式中 q_a ——长边每延米均布荷载(tf/m);

q_{ar} ——长边的均布荷载(tf/m²);

q ——单位面积荷载(tf/m²);

λ ——系数; $\lambda = l_b/l_a$;

l_b, l_a ——板的长边及短边的长度(m)。

表 1-1 中例 3 融安站石砟线用此法评价路基下溶洞顶板的安全厚度,如图 1-2 所示。石砟线路路基下溶洞概况:洞顶填筑有碎石、块石,经勘察查明,该洞顶板完整,平均厚 4 m,最薄处厚约 4 m,近水平并有小支洞,雨季洞内充水,线路跨越溶洞的长度为 8 m,横向宽 30 m。机车与轨道荷载分布在 5.8 m 宽的路基上,换算均布荷载为 5.83 tf/m²,总重量 $Q_0 = 2705$ tf。人工填筑碎、块石路基厚 3.8 m,顶宽 5.8 m,坡脚宽 13.4 m,纵长 8 m,容重 1.9 tf/m³,总重 554.5 tf。洞顶自重,按坡脚宽 13.4 m,纵长 8 m,顶板平均厚 4 m,岩石容重 2.5 tf/m³计,总重为 1072 tf。

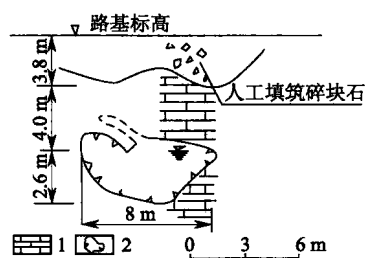


图 1-2 枝柳线融安站
石砟线溶洞纵剖面
1—石灰岩;2—溶洞。

(1) 检算顶板沿路坡脚线冲切破坏。在长 8 m, 宽 13.4 m 的范围内, 顶板荷载为 1897 tf, 按冲切厚度平均 3 m 计算, 沿路基坡脚的剪力为 15 tf/m², 岩石极限抗剪强度 τ 为 (0.06~0.15)R。考虑顶板有支洞, 抗压强度 R 取 6000 tf/m², 故 τ 为 360~900 tf/m²。顶板偏安全。

(2) 检算顶板受弯破坏。

溶洞顶板为四周固定, 短边为 8 m, 长边为 30 m, 顶板荷载(包括自重)为 3225 tf, 考虑此荷载均布于 (8×30) 的矩形面积上, 均布荷载 q 为 13.4 tf/m², 按式 (1-1) 近似计算长边支点中的负弯矩, 长边支点最薄处厚以 2 m 计, 并取 $q_a = q$, 得 $M_{ar} = 71.7$ tf·m(指横向延米)。

该处顶板的抗弯拉应力 $\sigma = (M_{ar}/W) = 71.7 / (1 \times 2^2 / 6) = 107.5$ tf/m², 抗弯强度按 0.119 R 计算为 7.14 tf/m², 安全系数约为 6.6, 顶板足够安全。

(3) 如果在整个 30 m 横宽都填至与路基平, 顶板平均厚度 4 m, 则换算均布荷载 $q =$

18.34 tf/m^2 , $M_{ax}=97.8 \text{ tf} \cdot \text{m}$ (横向延长米), $\sigma=146.7 \text{ tf/m}^2$, 安全系数 $k=4.8$, 即使出现这种情况安全值也不是很小。

通过以上冲切和弯矩的近似检算, 其顶板安全厚度受弯矩控制, 但安全系数在 6 上, 故洞顶是安全的。

襄渝线老鱼泉隧道路基下溶洞顶板也曾按冲切及弯曲检算其受力情况, 以弯曲受力求得的安全顶板厚度约为 8 m, 顶板实际厚 22 m, 偏于安全, 故未作处理。

(二) 电阻应变片测试法

为了解荷载作用下, 溶洞水平顶板的应力分布状态及节理是否有变形等, 铁道部第二勘测设计院于 1973 年曾对沙坡隧道顶板作过静、动荷载电阻应变片及挠度测试。

电阻片按 A—B 单跨荷载及 A—B—C 双跨荷载布置, 电阻片与隧道中线成 90° 、 45° 及 0° (图 1—3)。测试结果: 横向应力甚小, 纵向应力控制顶板稳定, 单跨静载时 13# 电阻片应力 $\sigma_0=5.61 \text{ kgf/cm}^2$ 。双跨静载时 10# 电阻片 $\sigma_0=8.67 \text{ kgf/cm}^2$, 13# 电阻片 $\sigma_0=6.80 \text{ kgf/cm}^2$ 。在 40 km/h 的行车速度下, 13# 电阻片动荷最大应力 8.5 kgf/cm^2 , 比该片最大静荷应力大 1.25 倍, 由此推算 A—B 跨顶板的最大动荷应力 $\sigma_{\max}=1.25 \times 8.67=10.84 \text{ kgf/cm}^2$, 该处灰岩的抗弯强度采用 $0.119 R=0.119 \times (600 \sim 1\,000) \text{ kgf/cm}^2$, 此值大于最大动荷应力约 7~11 倍。设岩石顶板的初始应力与动荷应力大致相近, 则安全系数约等于 3.5~5.5, 略偏小。

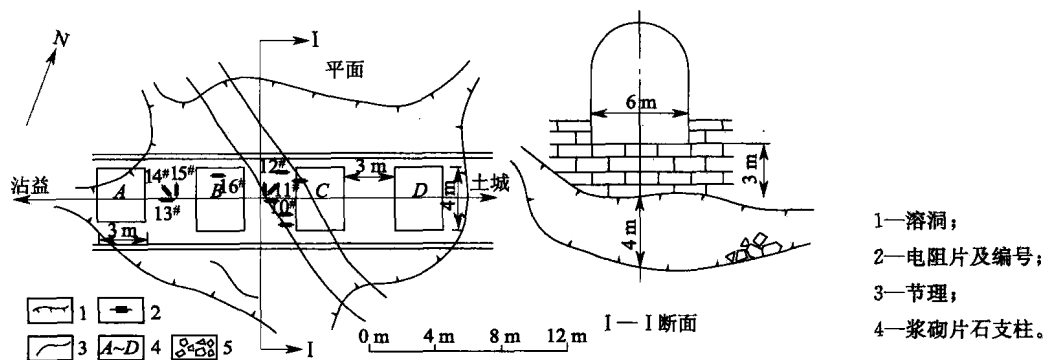


图 1—3 沙坡隧道溶洞顶板节理及电阻片编号示意图

测试时发现在靠近支柱处顶板的相对挠度为 $0.005 \sim 0.006 \text{ mm}$; 当 A—B 单跨受力时, B 柱顶板上缘 (道砟下) 的 16# 电阻片出现负应变, 余为正应变; 当 A—B—C 双跨受力时顶板上下的所有电阻片均为正应变。以上情况可以说明 B 柱为顶板不密贴。在双跨荷载下顶板下沉较大时, B 柱才与顶板接触。如能顶紧, 则上述测试应变较实际偏大, 这时安全系数可大于 3.5~5.5。据此, 在测试后对各柱顶作了压浆处理, 1981 年又一次进行了顶板动荷挠度测试, 结果是在靠近支柱处顶板挠度 $y=0$, 即压浆后 B 支柱与顶板密切, 改善了顶板受力条件, 可认为顶板是偏于安全的。

为了了解节理是否有应力集中和变形发生, 在节理缝上及一侧贴片测试无差异, 且均未超过跨中的应力值, 说明节理并未降低顶板的完整性。

(三) 厚跨比法

影响岩溶洞穴顶板稳定因素固然很多, 但最主要的有四个: 顶板的完整程度; 洞顶板形态 (水平或拱形); 顶板厚度及建筑物跨过溶洞的长度。其中又以水平洞顶板受力条件最为不利。因此, 当洞顶板都属完整时, 则可将实例中水平洞顶板的厚度 h 与跨长 l 之比作为最小者, 作为

评价完整顶板安全厚度的判别值。大于此比值的水平顶板或拱形顶板都属安全。

表1-1中的例2至例6,例11至例13完整顶板,近于水平。其中例3融安站石砟线溶洞 $h/l=0.5$,例11中 $h/l=0.78$,例13中 $h/l=0.62$,例2沙坡溶洞 $h/l=0.71\sim 1.00$,按结构分析和有限元法检算及运营时动载试验考验,是安全的。据此,可以认为:完整顶板的安全厚度,其厚跨比 h/l 可定为 $0.5\sim 0.87$ (和应力传递线交汇法对比, $h/l=0.5$,相当于混凝土应力扩散角为 45° , $h/l=0.87$ 相当于应力扩散角为 30°)。

(四)成拱分析法

对于略成拱形的完整顶板及成穹隆形(拱形)但并不十分完整的顶板,且拱脚以下围岩稳定,溶洞无横向扩大可能者,可近似地用石砌拱桥的拱圈厚度作类比来评价溶洞拱顶的安全厚度。

类比时,用拱形溶洞的矢跨比和跨度与矢跨比相近的铁路石砌拱桥比较,如溶洞顶板厚度大于石拱桥拱圈厚度,则拱形溶洞是稳定的。如溶洞的矢跨比很小,无近似的石砌拱桥作类比时,可用同跨度拱桥的最小矢跨比的拱矢作为溶洞稳定拱顶的下缘,再检验这以上的溶洞顶板厚度是否足够。

二、不完整顶板安全厚度的评价

(一)洞穴顶板坍塌堵塞估算法

洞内无地下水搬运的情况下,溶洞顶板坍塌时,岩块体积松胀,当坍塌至一定高度,溶洞将被完全堵塞,顶板即不再坍塌,这个坍塌高度 h_1 可用下式估算:

$$V_1 K = V_0 + V_1 \quad (1-2)$$

式中 V_0 ——洞穴原体积;

V_1 ——可能坍塌的岩体体积;

K ——岩石的涨余系数(石灰岩一般的涨余率为20%,即 $K=1.2$)。

在坍塌前,溶洞可视为柱体,底面积为 F ,柱体体积为 V_0 ,在坍塌过程中,一般不会变化或变化很小。顶板坍塌后,可能形成穹隆或棱锥体,其体积为 $V_1 = \frac{1}{3} F h_1$ 。也可能形成柱体,其体积为 $V_1 = F h_1$ 。如为棱锥体,从式(1-2)得

$$h_1 = \frac{3h_0}{K-1} = 15h_0 \quad (1-3)$$

如为柱体,则得

$$h_1 = \frac{h_0}{k-1} 5h_0 \quad (1-4)$$

式中 h_0 ——洞穴原高度;

h_1 ——坍塌的岩体高度。

从上两式可看出,当为穹隆或棱锥体坍塌时,所需坍塌高度大于柱体坍塌高度。但是形成穹隆或棱锥体的顶板受力条件比柱体坍塌的顶板有利。因此,可以认为,坍塌所需高度只需按柱体坍塌考虑已足够安全。

式(1-4)即洞穴的坍塌高度是原洞穴高度的5倍时,洞穴被全部堵塞。此时, h_1 以上的顶板即不再坍塌。当 h_1 以上有外荷载作用时,应视上部铁路建筑物的类型区别对待。如洞穴顶为路基, h_1 即为顶板安全厚度,在填筑路堤时,适当考虑坍塌体的压密即可;如为桥隧等建

筑物,则顶板安全厚度 h 应大于 h_1 ,即 $h=h_1+\Delta h$,此 Δh 可按成拱阶段的顶板安全厚度确定。

贵昆线六枝站西端,线路横穿一早期发育的无水洞穴,平均高 2.5 m,沿线路纵向长 10 m,与六枝向斜轴成 45° 的剪切断裂发育。因向斜轴部岩层产状平缓,下部岩石受拉,岩层破碎,层间结合受到破坏,致使洞内坍塌严重。按式(1-3)估算需坍塌高 12.5 m,路基下顶板实际厚 21 m,故未作处理。其上采用填石路堤通过,运营 38 年,情况良好。

(二)结构力学分析法

顶板不完整时,还可根据裂隙、节理的分布状况,分别用不同受力条件的板(梁)计算顶板厚度。

三、有限元分析法

应用弹性力学有限单元法,可以分析溶洞的整体和局部稳定性,计算出溶洞周围的围岩应力场及位移场,较上述诸法评价溶洞的稳定性更为优越。现介绍如下。

(一)计算分析中的几个基本问题

1. 关于岩体力学模型的选择

从现有调查资料表明,溶洞围岩从整体来看是连续完整的,局部有少数断裂或夹层,考虑岩体力学模型时,可将岩体视为连续介质,同时考虑非连续面的影响。资料表明,板岩,灰岩等成层岩石,在不同方向上的力学特性有差异,有的相差较大,有的相差甚小(表 1-2)。当相差甚小时,可采用各向同性力学模型,否则应采用正交各向异性力学模型分析计算。

表 1-2 层状岩石弹性特性的部分量测数值

岩石	E_1 (tf/m ²)	E_2 (tf/m ²)	μ_1	μ_2	τ
板岩	7 900 000	1 500 000	0.19	0.18	47 000
灰岩	3 300 000	3 000 000	0.24	0.24	96 000
灰岩	5 100 000	5 100 000	0.34	0.26	—
灰岩	860 000	840 000	0.24	0.20	34 000

注: E_1, μ_1 ——分别为平行层理方向的弹性模量和泊松比;

E_2, μ_2 ——分别为垂直于层理方向的弹性模量和泊松比;

τ ——剪切系数。

在未修建铁路建筑物前溶洞的围岩具有由岩体自重和岩层构造引起的初始应力,实测资料表明,初始应力状态的水平应力随深度有规律地递增。可以认为在地表侵蚀基准面以上的孤山岩体中,初始应力状态以覆盖岩体自重引起的应力为主,构造应力的影响较小。如无条件进行现场测定,可从溶洞的埋置深度和形成过程进行分析。如果埋深小于 3 倍洞径时,称为浅埋,可取侧压系数 $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$, μ 为泊松比;如埋深大于 3 倍洞径时,即称深埋,可采用 $\lambda=1$ 。当溶洞处于较大构造应力场中,则应测定构造应力的方向和大小以便在计算分析中考虑。

2. 计算模型和计算参数的选择

(1)计算模型的选择与溶洞埋藏深度,溶洞与铁路建筑物的关系和荷载方式有关。通常有以下几种考虑:

注:有限元分析法由李典璜帮助完成。