

铁路岩石边坡

蒋爵光等 编著

中国铁道出版社

1997年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书主要对铁路岩石边坡坡度确定及稳定性分析的技术和方法,特别是近年出现的新理论和新技术作了比较全面的论述和介绍。

本书可供铁路工程地质、路基工程等技术人员及其它部门岩石边坡工程技术人员参考。

铁 路 岩 石 边 坡

蒋爵光 等编著

*

中国铁道出版社出版发行

(100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑 张苍松 封面设计 宋长青

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787× 1092 1/32 印张: 7 字数: 154 千

1997 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 1- 00000 册

ISBN7-113-02613-3/TU · 539 定价: 15.20 元

前 言

铁路岩石边坡工程是铁路建设,特别是山区、丘陵地区铁路建设的重要组成部分。铁路岩石边坡的坡高一般很少超过三四十米,它在山区铁路建设工程中的数量多、所占的比重大。因而,合理地确定边坡的坡度,不仅是关系边坡工程造价是否经济的问题,而且也是关系边坡岩体是否稳定,从而影响到铁路行车安全和运输畅通的重要问题。

一条长数十千米以至数百千米的山区铁路,岩石边坡工程的数量很大。由于对一条铁路进行勘测的时间有限,因而,根据勘测设计的要求,只能对少量高度大或地质条件复杂的特殊岩石边坡,按工点进行单独的工程地质勘测和设计;对于大量的一般路基岩石边坡都不逐个进行详细的工程地质勘测和设计工作,而是采用经验判断的方法,结合边坡的高度,来确定其边坡坡度的。

凭经验确定铁路一般路基岩石边坡坡度的方法,是从大量实践经验中总结出来的。但是,由于缺乏充分的科学依据和具体的确定方法,因而难于为人们所具体掌握。确定出的边坡坡度大小,可能会因人而异。所定出的边坡坡度是否稳定,也缺乏明确的判定标准。这样做就容易出现过分偏于安全或不稳定的情况。因此,结合我国铁路工程建设实际,研究并制订出有科学依据和明确判定标准的铁路岩石边坡坡度的确定及其相应的稳定性分析方法,对于合理地设计铁路岩石边坡,正确判定岩石边坡的稳定性,保障铁路施工、运营的安全和铁路

运输的畅通,无疑都是一项具有重要实际意义的工作,对进一步促进铁路工程地质科技的发展也有着积极的作用。

由西南交通大学承担的铁道部科研项目《铁路岩石边坡坡度的确定及稳定性分析》就是在这一方面所做的努力。通过研究,建立了一套铁路岩石边坡坡度确定及稳定性分析的分析系统,为我国铁路岩石边坡坡度的确定从经验判断向定量评价发展探索出了一条新的途径。这一分析系统不仅适用于新建铁路岩石边坡的勘测设计,也可用于既有铁路岩石边坡的稳定性分析和预测。这一研究成果,经铁道部科技司组织评审鉴定,给予了较高的评价,并获得铁道部科技进步二等奖。参加此项目研究的课题组成员有蒋爵光、李隽蓬、钱惠国、魏安、谢强、傅永胜、李秉生等。本书即是以课题组完成的《铁路岩石边坡坡度的确定及稳定性分析》科研项目等研究成果和多年的工程实践为基础,并参阅有关文献资料,撰写而成的一本有关我国铁路岩石边坡方面的著作。

本书的内容包括以下几个方面:铁路岩石边坡的特征;铁路岩石边坡坡度确定的经验方法;铁路岩石边坡坡度确定的岩体质量分析方法;铁路岩石边坡稳定性分析;铁路岩石边坡坡度确定及稳定性分析系统;单独工点岩石边坡的稳定性分析研究;铁路岩石边坡的防护措施和支挡加固工程。

参加本书的编写人员及分工为:

蒋爵光:第一章的一、二、四;第六章的一、二;第七章的一、二等几部分。

李隽蓬:第二章的一、二、三;第三章的一;第五章的三等几部分。

钱惠国:第四章的三和第六章的四两部分。

魏安:第三章的一;第四章二、三等部分。

谢 强:第一章的三;第四章的一;第五章的一、二等部分。

傅永胜:第三章的二、四、五;第六章的三等部分。

李秉生:第三章的第三部分。

全书由蒋爵光统筹并校正定稿。

作者热忱欢迎读者对本书的错误和不足提出批评和指正。

编 者

1997年3月

目 录

第一章 铁路岩石边坡的特征.....	1
一、铁路岩石边坡的形态	1
二、铁路岩石边坡的地质环境	3
三、铁路岩石边坡的应力状态	4
四、铁路岩石边坡的破坏类型.....	15
第二章 铁路岩石边坡坡度确定的经验方法	19
一、铁路岩石边坡坡度确定的现行方法.....	19
二、现行经验方法的分析和评述.....	27
三、现行经验方法的问题及发展.....	45
第三章 铁路岩石边坡坡度确定的岩体质量分析方法 ...	47
一、铁路岩石边坡的稳定性分类.....	47
二、影响铁路岩石边坡稳定性因素的关联分析.....	53
三、影响因素指标的确定方法.....	61
四、岩体质量及其计算方法.....	82
五、边坡坡度确定的岩体质量分析方法.....	83
第四章 铁路岩石边坡的稳定性分析	87
一、铁路岩石边坡稳定性分类的模糊综合评判.....	87
二、铁路岩石边坡稳定性分类的逐步判别分析.....	99

三、岩石边坡稳定性的验证及稳定坡角的确定	115
第五章 铁路岩石边坡坡度确定及稳定性分析系统.....	121
一、铁路岩石边坡坡度确定及稳定性分析	
系统软件包	121
二、DBRRS 应用程序库说明及普及版程序清单 ...	128
三、铁路岩石边坡坡度勘测设计建议方法	153
第六章 单独工点岩石边坡的稳定性分析研究.....	159
一、分析节理岩体边坡稳定性的赤平投影方法	160
二、岩石边坡楔形体的破坏分析	167
三、岩石边坡稳定性的破坏概率研究	175
四、边坡稳定性的模拟试验研究	183
第七章 铁路岩石边坡的防护措施和支挡加固工程.....	196
一、防护措施和支挡加固工程的类型	196
二、铁路岩石边坡防护加固实例	200

第一章 铁路岩石边坡的特征

铁路岩石边坡是铁道这一带状工程建筑物的组成部分。边坡形态、所处的地质环境以及边坡岩体应力状态等均受铁道这一带状建筑工程的线路整体方案所制约和影响,因而有其自身的特点。

一、铁路岩石边坡的形态

铁路通过山区或丘陵地区修建路基工程时,往往需要开挖岩石边坡。根据路基的平面、纵断面位置,该地段的地貌形态和地质特征以及岩体的力学特性等,开挖的岩石边坡,在形态上可有如下的一些特征:

1. 按照路基开挖成路堑或半路堑的形式,在路基的两侧或一侧具有岩石边坡,如图 1- 1 所示,可分别称为路堑岩石边坡和半路堑岩石边坡。路堑边坡又可分为内侧边坡和外侧边坡,通常内侧边坡的高度均大于外侧边坡。除

(a) 路堑岩石边坡 (b) 半路堑岩石边坡

图 1- 1 路基岩石边坡

1—内侧边坡; 2—外侧边坡。

在设置车站的地段,一般说来,路堑或半路堑边坡的高度很少

超过三四十米。因为,若开挖边坡太高,就需要从边坡稳定和工程费用等方面的综合考虑与是否采用隧道方案进行比较。关于开挖的岩石路堑的路基面宽度则视线路等级、轨道类型等有所不同,单线宽为 5.4 ~ 5.7m,双线宽为 9.4 ~ 9.7m,若在曲线地段,路基面的宽度还应在曲线外侧按规定予以加宽。

2. 开挖边坡坡面的断面形式,视边坡的高度、边坡岩体的性质、边坡的稳定情况以及工程的需要等,有直线型的(即所谓的“一坡到顶”),有折线型的,也有台阶型的,如图 1- 2 所

(a) 直线型 (b) 折线型 (c) 台阶型

图 1- 2 路基岩石边坡坡面的断面形态

示。边坡岩体性质较均匀一致的多开挖成直线型断面;对上下部的岩性或岩体稳定性有明显差异的边坡,可考虑分层开挖成折线型断面以适应各自的稳定性;对于坡高较大的边坡或由不同地层组成的深路堑,可在边坡上不同层的分界处附近或按一定高度设置边坡平台,以增强边坡的稳定性。

3. 当把人工开挖的边坡与其所处的自然山坡联系起来考虑时,则铁路岩石边坡在自然山坡中所处的位置通常可见到如图 1- 3 所示的几种形态。在山区,线路往往在陡峻的山坡脚下通过,路基开挖成半路堑或路堑的形式,开挖的边坡高度

与上百米,甚至数百米高或更高的自然山坡相比,仅占很小的一部分,如图1- 3(a),因而在许多情况下,所谓的边坡稳

(a) 山区

(b) 丘陵区

图 1- 3 在不同自然山坡上开挖路基边坡

定问题,不仅指开挖的路基边坡的稳定,也包括开挖所在自然山坡的稳定问题。当线路通过丘陵地区,路基可在自然山坡坡脚或山丘中部开挖通过,如图 1- 3(b)所示,由于自然山坡不高,这类地段的岩石边坡问题则主要是人工开挖的路基边坡本身的稳定性问题。显然,由于不同自然山坡形成的地质条件和变迁历史不同,在不同地貌形态的自然山坡上开挖的路基岩石边坡,其应力状态、变形破坏特征和稳定性等也必然会有其自身的特点。

二、铁路岩石边坡的地质环境

铁路是一带状的综合性的建筑工程,除包括路基工程外,还包括桥梁、隧道、车站以及其它附属建筑等个体工程。这些工程的布局 and 位置,均受到铁路线路平面、断面位置、高程和技术要求的约束,在设计中必须要统一考虑。

山区铁路建设的大量实践表明,不论是河谷线或越岭线,有时为了减少工程量大、工期长、造价高的桥梁、隧道工程,或缩短桥梁、隧道的长度,线路往往尽可能地选择在山坡坡脚、河谷岸坡、山谷垭口等地形相对较为平缓的地带通过。而在这些地带开挖路基岩石边坡,其所处的一般地质环境,又常与下列的一些特点相联系:

1. 山坡坡脚、河谷岸坡或山谷垭口往往有断层通过;
2. 山坡、岸坡表层岩体的风化、卸荷等表生地质作用强烈;
3. 坡脚、岸坡地带的地下水运动活跃,地表水对山坡的冲蚀以及河水对岸坡的冲刷强烈;
4. 山区河谷特别是高山峡谷自然斜坡的不良地质现象,如崩塌、落石分布广、发生频繁。

由此可见,从山区铁路路基岩石边坡所处的一般地质环境分析,对开挖岩石边坡的稳定性可能存在着许多不利因素。因此,应在岩石边坡的设计、施工和运营中,充分重视和认真分析研究岩石边坡所处的地质环境,按照相应的地质条件和岩体特性设计边坡,并对不利因素的影响及时采取相应的工程措施,以保证岩石边坡的稳定性。

三、铁路岩石边坡的应力状态

1. 边坡岩体中应力状态的一般特征

了解边坡岩体中的应力分布状态,对于深入认识边坡岩体的变形破坏特征,正确分析边坡岩体的稳定性,合理进行边坡设计以及有针对性地采取相应的工程措施都是十分必要的。但是要真正做到了解边坡岩体中的实际应力分布状态,却是十分困难的,其原因是自然界的岩体并非均质的人为材料,

而是在物质成分、结构特征、所处地质环境等方面均十分复杂的地质体。因此,人们多采用对边坡岩体加以概化,抽象成一定的计算模型,从理论上进行分析的方法,来计算分析边坡岩体中的应力分布状态,作为指导分析边坡岩体的变形破坏和稳定性的依据。

从理论上计算分析边坡的应力分布,有许多方法可以采用,但由于边坡边界形状的复杂以及从计算的成熟和简便看,有限元不失为一种较实用的方法。

许多学者,采用有限元方法,对边坡岩体的应力状态做了多方面的分析工作,有助于人们认识边坡岩体中应力分布状态的某些特征。

图 1- 4 所示为用有限单元法解出的边坡岩体在原岩水平应力是垂直应力的 $1/3$ 条件下的主应力迹线图和位移迹线图(如图 1- 4),表明岩石边坡形成后,由于应力的重分布,愈

(a) 主应力迹线图

(b) 位移迹线图

图 1- 4 在重力条件下边坡岩体的应力和位移(据科茨,1981)

靠近边坡临空面,最大主应力愈平行于临空面,而最小主应力则愈垂直于临空面。在坡脚处最大主应力显著增高,而最小主应力显著降低,因而形成一剪应力增高带,故在坡脚处易产生剪切破坏。

据斯特西(Stacey T.R.) 1970年的分析表明, 边坡的坡面及坡顶, 在一定条件下可形成拉张应力带如图 1- 5 所示。从图和分析计算表明, 侧向水平应力较高, 且坡度较陡的边坡, 拉张应力区范围相对较大, 坡脚最大剪应力值也较高, 因而边坡也易于产生变形和破坏表(1- 1)。

斯特西(1970年), 还分析了坡底宽度(W), 对坡角应力状态的影响, 如图 1- 6 所示。结合铁路路堑边坡开挖, 可以认为, 在坡高相同的高边坡情况下, 单线路堑边坡坡脚的最大剪应力要较之

图 1- 5 边坡拉张应力分布状况与水平应力(H)、坡角(α)关系示意图(据斯特西, 1970)

双线或车站开挖堑坡坡脚的最大剪应力要大, 因而其稳定性也相对要差些。

坡脚最大剪应力值与侧向水平应力的关系

(据斯特西, 1973) 表 1- 1

2. 铁路岩石边坡应力状态分析

(1) 开挖岩石边坡的计算模型及选用参数

在边坡的设计(坡度及坡高的确定)及稳定性分析

侧向水平应力	坡脚处最大剪应力
$H(H)$	$\max(H)$
0	0.60
1	3.75
3	11.77

的研究中, 边坡中(这里主要指开挖边坡)应力的分布及随坡度、高度的变化而使其应力产生变化的规律是研究的基本内容之一。在边坡设计的实际工作中, 大量遇到的对一个可能失稳的边坡改变设计时, 是改变坡度还是改变高度的问题, 在分析这类问题时, 也须对坡度和高度对边坡中应力的影响程度

有相应的了解。对铁路边坡而言,绝大多数情况下都是对自然山坡作部分开挖,因此,为了研究部分开挖边坡中的应力分布及变化规律,我们采用了如图 1-7 所示的计算边坡的几何模型进行有限元分析。在几何模型中,考虑自然山坡坡顶尚有一倾角($\alpha = 5^\circ$)。设自然边坡坡角为(β),高度为 H (m),开挖边坡坡角为(γ),高度为 h (m)。

图 1-6 坡脚最大剪应力与坡底宽 (W) 的关系(据斯特西,1970)

因考虑开挖自然边坡,故作用于各单元节点的荷载,仅有自重产生的垂直荷载。所采用的力学模型,为线弹性常应变三角形单元模型。

假定组成边坡的材料为连续、均质和各向同性。参考某种

图 1-7 开挖边坡的计算模型
T—坡顶;P—变坡点;F—坡脚。

砂岩的试验结果,计算时取弹模 $E = 3.0 \times 10^4 \text{MPa}$, 剪切模量 $G = 1.2 \times 10^4 \text{MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.25$, 密度 $\rho = 2.6 \text{t/m}^3$ 。

计算时,所选用的边坡几何参数如下:自然山坡坡高 $H = 50\text{m}$ 、 75m 、 100m 、 150m ;自然山坡坡角 $\beta = 35^\circ$ 、 45° 、 55°

75°、90°；开挖边坡坡高 $h = 10\text{m}$ 、 20m 、 30m 、 40m ；开挖边坡坡度 = 未开挖, 45°、53°、63°、68°、73°、78°、84°；(分别对应于边坡率($\tan \alpha$)未开挖、1、1、0.75、1、0.5、1、0.4、1、0.3、1、0.2、1、0.1)。

(2) 开挖不同设计边坡时应力的变化特征

不同设计坡度下应力的变化特征

由于设计边坡的开挖坡度不同, 边坡应力将有所变化, 在此, 我们选择了一组计算结果加以分析, 其山坡高度 $H = 50\text{m}$, 山坡坡角 = 35°。当设计边坡坡度 分别为未开挖、53° (坡率 1、0.75)、68° (1、0.4) 和 78° (1、0.2) 时, 其计算结果见图 1- 8 ~ 图 1- 10, 并可用图 1- 11 综合表述。从图上清

图 1- 8 垂直应力(σ_v/H)等值线
随开挖坡度(α)的增加而变化

图 1- 9 水平应力($\times 0.1\text{MPa}$)等值线
随开挖坡度(α)的增加而产生的变化

图 1- 10 最大剪应力($\times 0.1\text{MPa}$)等值线
随开挖坡度(α)的增加而产生的变化

图 1- 11 坡顶、变坡点及坡脚处的
应力值与开挖坡度的关系
× — σ_v ; — ; — σ_H 。

楚可见,随着开挖坡度的增加,变坡点附近及坡脚附近的应力变化明显,尤以变坡点处的水平应力及坡脚处最大剪应力的变化对边坡设计具有重要意义。

不同设计高度下应力的变化特征

为比较在相同自然山坡上开挖不同高度边坡时应力的变化规律,并与开挖不同坡度时应力变化特征对比,选择的参数如下:边坡高 $H = 50\text{m}$,自然山坡坡角 $= 45^\circ$;开挖边坡坡度分别为 $= 53^\circ$ 及 $= 73^\circ$ 。开挖坡高为未开挖、 $h = 10\text{m}$ 、 20m 、 30m 和 40m 。其计算结果按坡顶、变坡点及坡脚处的应力值与未开挖时相同高度处的应力值的增量与开挖坡高绘成关系曲线(图 1- 12)。图中表明:在开挖边坡时,坡顶处的各应力值(σ_v 、 σ_H 、 σ_{\max})变化不明显。随着开挖边坡坡高的增加,变坡点处各应力值均呈下降趋势。其中,以水平应力 σ_H 变化最大。