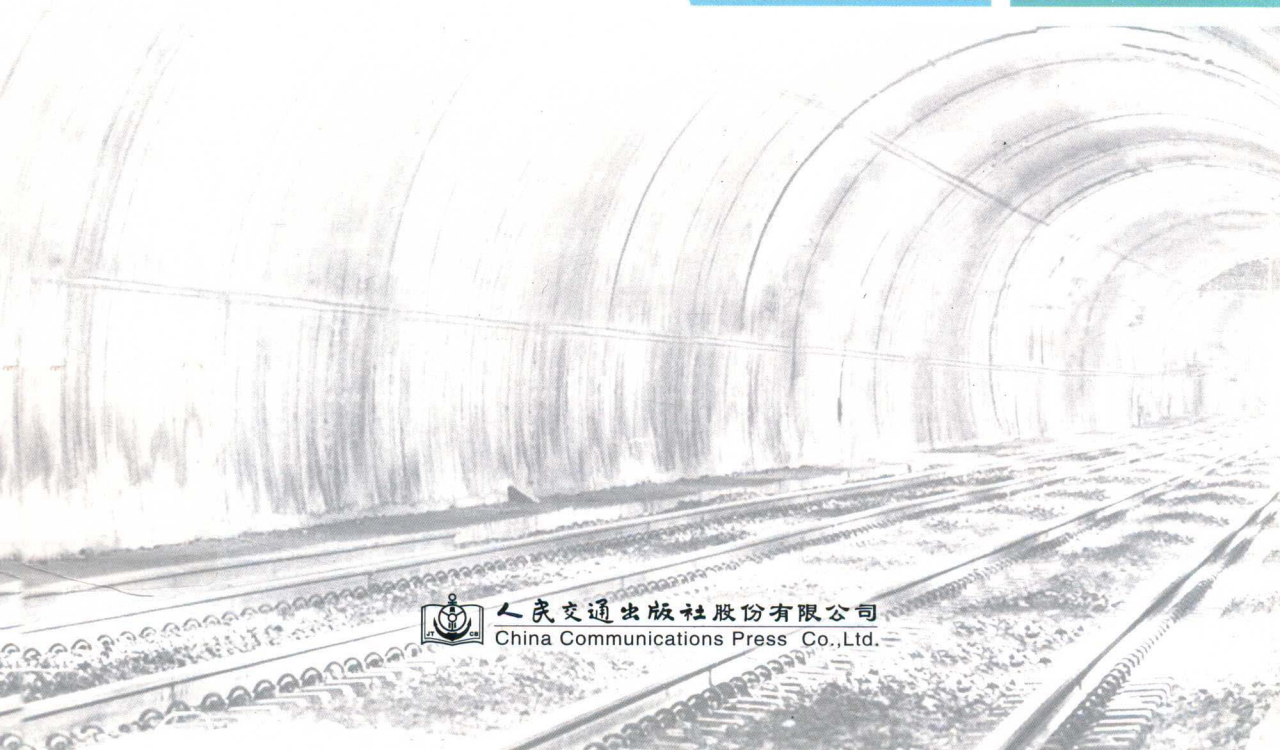
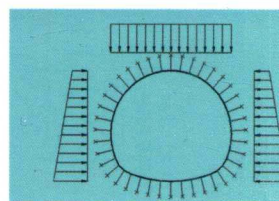
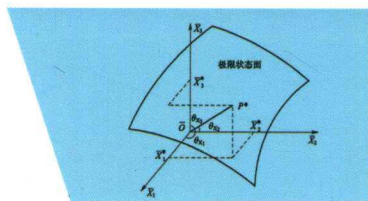
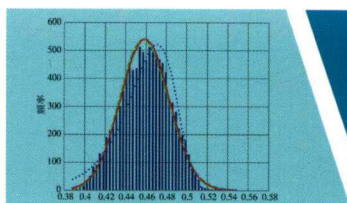
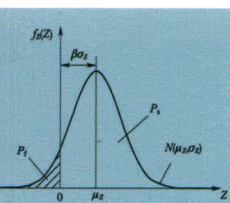


Probabilistic Limit State Design Method
for Railway Tunnel and Its Application

铁路隧道概率极限状态 设计方法及应用

喻 渝 赵东平 路军富 谭信荣 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Probabilistic Limit State Design Method
for Railway Tunnel and Its Application

铁路隧道概率极限状态 设计方法及应用

喻 渝 赵东平 路军富 谭信荣 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书共八章,两个附录。内容包括:绪论、隧道结构可靠度基本概念及计算方法、铁路隧道结构极限状态方程、铁路隧道随机变量统计特征、铁路隧道结构目标可靠指标、铁路隧道作用分类及作用组合、铁路隧道概率极限状态设计表达式及分项系数、铁路隧道概率极限状态法算例;隧道衬砌截面内力特征计算代码、隧道衬砌截面可靠指标迭代计算过程。

本书可供工程技术人员在应用概率极限状态法进行隧道结构设计时参考使用,也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁路隧道概率极限状态设计方法及应用 / 喻渝等著.

—北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017. 1

ISBN 978-7-114-13294-0

I. ①铁… II. ①喻… III. ①铁路隧道—结构设计—研究 IV. ①U459. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 216885 号

书 名: 铁路隧道概率极限状态设计方法及应用

著 作 者: 喻 渝 赵东平 路军富 谭信荣

责任编辑: 卢 珊

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15.5

字 数: 361 千

版 次: 2017 年 1 月 第 1 版

印 次: 2017 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13294-0

定 价: 75.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

第一作者简介



喻渝(1967.9—),教授级高级工程师,中国中铁二院工程集团有限责任公司副总工程师,四川省有突出贡献的优秀专家,兼博士后流动站导师,长期从事铁路勘察设计、科研和规范标准的编制工作。在高速铁路黄土隧道修建技术、隧道空气动力学、长大隧道通风、特殊复杂地质隧道设计、计算机软件的研发及应用等方面积极创新,成绩突出,多项设计和科研成果达到国内或国际领先水平。曾获

得国家级、省部级、总公司级科技进步奖或优秀工程设计奖 20 余项,获得发明专利和实用新型专利 20 项,编制行业标准、规范 10 余项,发表学术论文 20 余篇,参与出版学术专著和高校教材各 1 部。

第二作者简介



赵东平(1979.2—),工学博士,高级工程师,中国中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究院工程所所长,兼西南交通大学、石家庄铁道大学硕士研究生导师。长期从事铁路隧道结构设计、科研和标准规范的编制工作。在隧道维修养护技术、隧道结构计算及程序开发、隧道结构可靠度理论及应用等方面成绩突出。主持完成了铁路隧道极限状态设计系列科研课题研发工作,提出了铁路隧道衬砌目标可靠指标和基于围岩荷载及结构自重的分项系数。曾获得省部级、总公司级科技进步奖或优秀工程设计奖10余项,获得发明专利和实用新型专利10余项,编制《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)及《铁路隧道极限状态法设计暂行规范》(Q/CR 9129—2015)等行业标准、规范7部,发表学术论文30余篇,参与出版学术专著1部。

前 言

由于围岩的作用与抗力的统计特征值难以准确获得,再加上岩土工程结构解析计算方法的不完善,如何运用可靠度理论采用极限状态法进行隧道设计一直是隧道工程界的难题。20 世纪 90 年代初,原铁道部就开展了铁路工程按极限状态法设计的基础研究工作,专门安排了隧道等专业的科研课题。但由于该项工作技术难度大、牵涉面广,取得的能应用于设计的研究成果有限。到目前为止,铁路隧道衬砌也仅单线整体式结构可采用极限状态法进行设计,而大量的铁路双线和断面隧道以及常用的隧道复合式衬砌,仍需按传统的容许应力法或破损阶段法进行设计。

为进一步提高铁路隧道设计的科学性,同时加强我国隧道工程界与其他发达国家开展技术交流,2011 年原铁道部再次启动了由传统容许应力法向极限状态法设计标准的转轨工作,并提出了先“形式转轨”、再“建立体系”两步走的实施原则。在原铁道部的统一部署下,由中国中铁二院工程集团有限责任公司牵头,联合石家庄铁道大学、北京交通大学、西南交通大学等国内高校,开展了新一轮的课题研究工作。这些课题主要包括:《铁路隧道结构极限状态设计方法研究》《铁路隧道复合式衬砌可靠指标及分项系数确定研究》《铁路隧道洞门可靠指标及分项系数确定研究》以及《铁路隧道参考图可靠指标及分项系数研究》等。通过研究,基本解决了隧道设计参数特征值、目标可靠指标、分项系数、极限状态设计表达式等极限状态法设计的关键技术问题,为铁路隧道设计方法的“形式转轨”和“建立体系”,以及铁路隧道极限状态法设计规范的编制提供了有力的技术支撑。

本书是上述研究课题成果的总结和提炼,共分为 8 章和 2 个附录。第 1 章绪论,第 2 章隧道结构可靠度基本概念及计算方法,第 3 章铁路隧道结构概率极限状态方程,第 4 章铁路隧道随机变量统计特征,第 5 章铁路隧道结构目标可靠指标,第 6 章铁路隧道作用分类及作用组合,第 7 章铁路隧道概率极限状态设计表达式及分项系数,第 8 章铁路

隧道概率极限状态法算例。

本书由喻渝、赵东平、路军富和谭信荣撰写成文。第1章由喻渝撰写并由其负责全书统稿,第2、3、4章由路军富撰写,第5、6、7章由赵东平撰写,第8章由谭信荣撰写。全书由宋玉香教授、谭忠盛教授及王明年教授主审。为本书成果做出重要贡献的还有赵万强、郑长青、周佳媚、刘大刚、匡亮、张东卿、吴林、孙正兵、马婷婷、孙庆旭、齐建旭、张晓静、蒙国往、李磊等,在此对他们表示感谢。本书还参考了国内外已有的文献、书籍、规范和专题报告等成果,在此对相关作者一并表示感谢。

本书的主要编写目的是推广可靠度理论在铁路隧道工程中的应用,书中的研究思路和算例可供隧道工程技术人员在应用极限状态法进行设计时参考,希望对大家有益。

由于作者理论水平和实践经验所限,本书必定存在很多不足,敬请专家和读者给予批评指正。

作 者

2016年8月于成都

目 录

第1章 绪论 /1

- 1.1 隧道工程结构设计方法 /1
- 1.2 隧道概率极限状态法设计应用现状 /3
- 1.3 铁路隧道极限状态设计方法存在的主要问题 /5
- 1.4 铁路隧道极限状态设计方法研究取得的主要成果 /6

第2章 隧道结构可靠度基本概念及计算方法 /8

- 2.1 结构可靠度基本概念 /8
- 2.2 结构可靠度计算方法 /12
- 2.3 隧道结构可靠指标计算方法 /23

第3章 铁路隧道结构概率极限状态方程 /25

- 3.1 隧道衬砌结构极限状态方程 /25
- 3.2 隧道洞门结构极限状态方程 /30
- 3.3 铁路隧道结构极限状态验算 /36

第4章 铁路隧道随机变量统计特征 /38

- 4.1 随机变量统计特征确定方法 /38
- 4.2 隧道衬砌随机变量统计特征 /40
- 4.3 隧道洞门随机变量统计特征 /63

第5章 铁路隧道结构目标可靠指标 /67

- 5.1 目标可靠指标确定方法 /67
- 5.2 铁路隧道衬砌结构目标可靠指标 /67
- 5.3 铁路隧道洞门结构目标可靠指标 /71

第6章 铁路隧道作用分类及作用组合 /78

6.1 作用与荷载的概念 /78

6.2 铁路隧道作用分类 /78

6.3 铁路隧道作用组合 /85

第7章 铁路隧道概率极限状态设计表达式及分项系数 /88

7.1 隧道概率极限状态设计表达式 /88

7.2 隧道概率极限状态设计分项系数 /91

第8章 铁路隧道概率极限状态法算例 /112

8.1 隧道衬砌结构设计算例 /112

8.2 隧道洞门结构设计算例 /165

附录 /196

附录一 隧道衬砌截面内力统计特征计算代码 /196

附录二 隧道衬砌截面可靠指标迭代计算过程 /216

参考文献 /236

第1章 绪 论

隧道结构设计常用方法有容许应力法、破损阶段法和概率极限状态法,其中容许应力法和破损阶段法中均规定有安全系数,因此上述两种方法也称为安全系数法。概率极限状态法是目前国际上通用的一种结构设计方法,以可靠度理论为基础,采用该方法设计的结构或构件具有规定的可靠概率。为更好地理解本书的内容,本章就这三种设计方法的发展过程及核心内容进行简单的阐述。

1.1 隧道工程结构设计方法

1.1.1 容许应力法

容许应力法是对材料和作用荷载的离散性、设计荷载的推定精度、构造模式及结构计算方法等不确定因素,完全用材料强度的安全系数进行综合评价,并确认结构物中产生的应力必须小于容许应力值以确保结构安全性的设计方法。

容许应力法的基本思想是结构构件的计算应力不得大于结构设计规范所给定的容许应力。结构构件的计算应力是以线弹性理论为基础,按照规定的标准荷载,采用材料力学中的应力计算方法进行获取,而容许应力则是某种建筑材料的屈服应力或破坏应力除以由经验判断的大于1的安全系数而确定^[1]。由于本方法是侧重于将材料假定为弹性体进行设计的,因此有时也称为“弹性设计法”。容许应力法设计表达式为:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\max}}{K} \quad (1-1)$$

式中: σ ——结构的计算应力;

$\sigma_{\max}$ ——屈服应力或破坏应力;

K ——安全系数。

一般对塑性材料,取材料的屈服点 σ_y 为 $\sigma_{\max}$,相应的安全系数 K 取1.4~1.6;对脆性材料,取材料的强度极限为 $\sigma_{\max}$,相应的安全系数 K 取2.5~3.0。

由此可知,容许应力法设计的核心思想主要包括两个方面:①假设材料的工作状态符合线性弹性理论,以线弹性理论为基础,确定结构达到极限状态时的计算应力;②结构在正常使用过程中的可靠性,主要通过规定标准荷载或容许应力,并将影响结构安全的各种不确定因素归结为一个综合安全系数 K 来考虑。

在结构工程发展的初期,结构材料主要是石材和铸铁等脆性材料,在当时采用容许应力法进行结构设计是相对合理的,比较符合工程结构的实际受力状态。但随着建筑材料的不断发展和进步,工程中大量地采用了钢材和混凝土材料,由于这些材料具有不同程度的塑

性,仍然采用容许应力法进行设计,将出现计算结果与工程结构的实际受力状态不一致,计算结果不合理的问题。例如,对于受弯、偏心受压或偏心受拉以及受扭的构件,按线性弹性理论进行应力计算时,其应力分布是不均匀的,按此方法设计的结构,由于没有考虑结构在塑性阶段能继续承受荷载的潜力,采用固定不变的安全系数时,其实际安全水平将高于应力分布均匀的受拉或受压构件^[2]。

此外,容许应力法不能直接考虑材料的强度、构件尺寸、荷载和外力等的离散性和变异性,所有这些因素的不确定性均通过综合安全系数纳入材料的容许应力内。特别是针对荷载的变异性,不同性质的荷载就无法区别对待。众所周知,恒载的变异性要比活荷载小,设计中对前者取值的估值比后者要准确得多,但在容许应力设计方法中一般就没有考虑这两种荷载的不同变异性,致使承受不同比例恒载和活荷载的结构,其安全水平极不一致,尤其当这两种荷载引起结构效应的符号相反时,还会增加结构的危险性。

现行《铁路隧道设计规范》(TB 1003—2005)规定,铁路隧道洞门采用容许应力法设计。

1.1.2 破损阶段法

破损阶段法设计要求按材料非线性性质计算求得的结构构件截面的承载能力应大于作用在结构构件截面上的设计内力,其克服了容许应力法仅按照材料线弹性性质进行结构计算的不足^[3]。容许应力法设计时,只要结构截面中某点的应力达到容许应力,则可判定结构破坏,而破损阶段法设计时,重点利用的是结构截面的承载能力。

破损阶段法的设计原则是结构构件达到破损阶段时的计算承载能力 R_k 应不小于标准荷载引起的构件设计内力 S_k 乘以安全系数 K ,破损阶段法设计表达式,如式(1-2)所示:

$$K \cdot S_k \leq R_k \quad (1-2)$$

破损阶段的设计方法于 20 世纪 30 年代由苏联首先提出,当时塑性理论和钢筋混凝土结构的试验研究已取得大量成果,为钢筋混凝土结构按破损阶段法设计奠定了基础,从理论上可计算结构构件截面的最终承载能力。与容许应力法不同,破损阶段法是考虑结构材料的塑性性质及其极限强度,从而确定结构截面的最终承载能力,但在工程结构可靠性方面,同样由安全系数来保证,这与容许应力法基本相同,并存在相似的不足之处。

现行《铁路隧道设计规范》(TB 1003—2005)规定,一般铁路隧道或明洞衬砌结构均可采用破损阶段法设计。

1.1.3 概率极限状态设计法

随着对荷载和材料强度的变异性的进一步研究,苏联在 20 世纪 50 年代又率先提出了极限状态设计法。极限状态设计法是破损阶段设计法的发展,它规定了结构的极限状态,并把单一安全系数改为荷载系数、材料系数和工作条件系数三个分项系数,从而把不同的外荷载、不同的材料以及不同构件的受力性质等,用不同的分项系数区别开来,使不同的构件具有比较一致的安全度,而部分荷载系数和材料系数基本上是根据统计资料用概率方法确定的。该设计方法提出以后,在欧美等国得到发展,这些国家先后制定了极限状态设计法的设计标准。这些标准的应用表明土木工程结构的设计理论和设计方法进入了一个新的阶段。

我国直到 20 世纪 70 年代中期,才开始在建筑结构领域开展结构可靠度理论和应用研

究工作,1984年发布的《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—1984)首次提出了以可靠度为基础的极限状态设计统一原则^[4]。1994年发布的《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216—1994)全面引入了结构可靠性理论,统一了铁路工程结构极限状态设计的原则和方法^[5]。

概率极限状态设计法的含义是:用结构的失效概率或可靠指标度量结构可靠度,在结构极限状态方程和结构可靠度之间以概率理论建立关系。这种设计方法即为基于概率的极限状态设计法,简称为概率极限状态设计法。采用概率极限状态设计法设计时,一般将工程结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两大类,按照各种结构的特点和使用要求,给出极限状态方程和具体的限值,作为结构设计的依据。概率极限状态设计法能够全面跟踪反映影响安全的各种因素,明确结构的可靠性水准,量化施工和制造质量指标,并随着工程数据的积累可持续优化相应系数,使整个工程结构体系趋于协调,标准参数更加经济合理。

1.2 隧道概率极限状态法设计应用现状

概率极限状态法是设计理念的革新,目前国外规范已经较为普遍地采用了极限状态法理论体系,概率极限状态设计代表了结构设计的发展方向。欧美等发达国家隧道工程采用概率极限状态设计较我国早,对这些发达国家现行设计规范进行整理和分析,其成果对我国铁路隧道采用概率极限状态法设计具有一定的参考价值。

1.2.1 国外隧道概率极限状态设计方法应用现状

(1) 英国及欧洲其他国家应用现状^[6]

极限状态法在设计中的应用直接体现在设计规范的采用上。在英国,没有专门为隧道编制的设计规范,隧道设计主要参考混凝土结构设计规范、钢结构设计规范、地基基础规范或挡水结构设计规范。例如,对作为隧道永久支护的钢筋混凝土衬砌(如复合衬砌的二次衬砌)采用《钢筋混凝土规范》(BS 8110)设计;对临时支护中的钢拱架设计,采用《钢结构规范》(BS 5950)设计;对隧道底板下的承载地基,采用《地基基础设计规范》(BS 8004),并结合当地地基基础规范进行验算;特别是隧道通常都在地下水位以下,对其结构耐久性的要求与对地面以上的建筑有所不同,对隧道结构耐久性的验算,采用《挡水结构设计规范》(BS 8007)。

欧洲其他国家的情况与英国相似,隧道结构的设计主要参考地面建筑结构设计通用规范。常用的欧洲规范(EN 1990~EN 1999)全套10卷,共60余册。这套规范最基础的一本为《结构设计基础》(EN 1990:2002),该规范采用了以可靠性原理为基础的极限状态设计理论,规定了结构设计的基本原则和方法、各种作用和组合以及作用分项系数推荐值。

在极限状态法中,荷载与抗力被假定为不同的互为独立的变量,或者说荷载的变化不影响结构构件的抗力,反之也一样。但是位于土体(岩体)中的隧道却未必如此,因为作用在隧道支护结构上的土体(岩体)荷载有可能是抗力的一部分。地层与隧道支护结构的相互作用使得极限状态法在隧道支护结构设计中受到限制。在欧洲规范中,也明确说明极限状态

法不适用于矿山法隧道初期支护的结构设计。

鉴于隧道结构与地面建筑的不同特点,目前在英国或欧洲其他国家大致采用以下方法设计隧道结构:

①永久支护结构设计,如复合衬砌的二次衬砌,一般按概率极限状态法设计。

②对于考虑与地层相互作用的构件设计,如复合衬砌的初期支护,一般按容许应力法设计。

③临时支护结构中无直接与水土接触的构件设计,一般按概率极限状态法设计。

也就是说,在英国及欧洲其他国家,概率极限状态法只适用于永久支护(复合衬砌的二次衬砌),复合衬砌的初期支护仍然采用容许应力设计法设计。

(2) 日本隧道概率极限状态设计法应用

概率极限状态设计法在日本隧道工程的应用与英国及欧洲其他国家的情况相似,也仅对部分工法施工的隧道二次衬砌采用极限状态设计方法进行结构设计。例如,在日本 2006 年版的《隧道标准示方书(土木学会)》,根据隧道采用的工法不同,结构设计方法也不同,其中对极限状态设计法在隧道中的应用进行专门的规定。对明挖法修建的隧道,明确规定采用极限状态设计方法;对采用盾构法修建的隧道,建议采用极限状态设计方法;而对用矿山法修建的隧道,则规定仍然采用容许应力设计方法。城市矿山法隧道《铁道结构物等设计标准(城市矿山法隧道)》(2002 年版)则规定隧道二次衬砌采用极限状态设计方法^[7-9]。

鉴于矿山法施工的隧道地层与支护结构之间相互作用的不确定性,国外发达国家隧道工程界的一般做法是对采用矿山法施工的隧道二次衬砌按概率极限状态法设计,初期支护仍然按传统的容许应力法设计。

1.2.2 国内隧道结构概率极限状态设计方法应用现状

可靠性理论是概率极限状态设计法的理论基础,20 世纪 70 年代以来,我国相关行业对岩土工程、隧道及地下工程的可靠性设计开始进行探索,许多高等院校都涉足这方面的研究,铁路行业的科研、设计单位也开展了隧道结构可靠性研究,并积极为设计方法从传统的容许应力法设计向概率极限状态法设计转轨开展前期准备工作。1988 年景诗庭教授发表《对开展地下结构可靠度设计研究之浅见》的文章,对地下结构当前通用的设计模型如何处理承载能力和正常使用两种极限状态提出设想^[10];关宝树教授发表的《隧道结构可靠度研究的几点建议》、1988 年张弥教授发表的《铁路隧道按可靠度理论设计的方法初探》以及 1990 年宋振熊教授发表的《按可靠性理论修订隧道规范的刍议》等文章,对随后的可靠度理论在铁路隧道工程中的推广应用都具有指导性的意义^[11]。

20 世纪 90 年代初,由原铁道部组织,中国中铁二院工程集团有限责任公司牵头,联合西南交通大学、北方交通大学、兰州铁道学院和石家庄铁道学院 4 所高校深入开展了隧道结构荷载统计特征、衬砌混凝土偏压构件强度统计特征及抗力计算公式、衬砌几何尺寸变异性的结构可靠度分析等基础性研究工作,取得了大量研究成果。

1991 年谭忠盛采用蒙特卡洛法分析隧道衬砌荷载效应的统计特征,得出荷载效应的统计参数,并用检验法得出其分布类型^[12];1993 年张弥通过模型试验研究了明洞荷载统计特征及其计算模式不定性,并利用响应面方法分析了铁路明洞结构的荷载效应,是响应面方法

在我国隧道可靠度分析中的首次应用^[13];1994年张清等对围岩弹性抗力系数进行了统计分析,用随机有限元法结合一次二阶矩法计算了隧道衬砌结构的可靠度^[14];之后,谢锦昌等和高波等分别对浅埋、深埋隧道荷载的统计特征进行了相关研究^[15,16];1996年景诗庭对混凝土偏压构件进行了大量的试验,提出了混凝土受压构件的偏心影响系数的计算公式^[17]。隧道洞门也是隧道工程的主体结构,同样对其开展了大量的研究工作。1998年高波、谭忠盛等对隧道洞门土压力进行了离心模型试验,探讨了隧道洞门土压力的计算模式不定性等问题,并建立了洞门极限状态设计表达式^[18,19];同时还对隧道洞门可靠度分析关键技术参数中的基底摩擦系数统计特征开展了模型试验研究,取得了十分有益的研究成果^[20]。

在此基础上,原铁道部组织相关设计院及高校对《铁路隧道设计规范》进行了修编,修编后的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—1999)于1999年发布,从而以规范的形式将可靠度理论引入隧道结构设计^[21]。

1999年《铁路隧道设计规范》(TB 10003—1999)发布后,由于新的设计方法与传统的设计方法差别较大,再加上对新的公式验证不足,工程技术人员一时还难以接受,在短期内全面推广应用概率极限状态法尚存在一定问题。因此,2000年原铁道部重新对《铁路隧道设计规范》(TB 10003—1999)进行修编,修编后的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2001)将容许应力法、破损阶段法和概率极限状态设计法三种隧道结构设计方法同时纳入规范^[22],并调整了概率极限状态设计法的适用范围。设计人员可根据所设计隧道结构的特点,选择采用能够确保结构安全性和耐久性的合理设计方法。现行《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)中的隧道结构设计方法,仍然沿用2001年版的相关章节内容,基本上没有进行修改。

另外,我国水工及公路隧道结构设计方面,衬砌结构设计已采用了概率极限状态设计法,确定了各自行业的隧道结构目标可靠指标、概率极限状态设计表达式及对应的分项系数等内容。

1.3 铁路隧道极限状态设计方法存在的主要问题

近年来随着我国铁路建设,特别是高速铁路和城际铁路建设的迅速发展,铁路双线、大断面隧道数量不断增加,加之修建过程中新技术、新材料、新工艺和新设备“四新技术”的不断应用,铁路隧道的可靠性水平得以较大幅度的提升。因此,如何确定现阶段我国铁路隧道结构可靠指标,完善铁路隧道结构概率极限状态设计方法,成了工程技术人员普遍关注的问题。虽然,2005年开始实施的现行规范《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)制定了隧道按照概率极限状态设计的有关规定,但在应用过程中发现还存在以下一些问题需要解决。

(1)现行规范中概率极限状态设计相关的规定仅适用于旅客列车行车速度小于或等于140km/h、货物列车行车速度小于或等于80km/h,且不运行双层集装箱列车的单线铁路隧道整体式衬砌及洞门、单线铁路拱形明洞衬砌及洞门结构的设计。双线、大断面隧道衬砌以及喷锚复合衬砌仍按照破损阶段法和容许应力法进行设计。

(2)原铁路隧道目标可靠指标值是依据原单线电气化铁路隧道衬砌标准图校准结果确定的,因此由该目标可靠指标值确定的概率极限状态设计表达式和分项系数不适应现阶段

铁路隧道结构可靠度水平的要求。

(3) 现行规范铁路隧道结构承载能力和正常使用极限状态设计表达式中的分项系数仅有两个综合分项系数,即作用效应分项系数和抗力分项系数。由于隧道结构作用效应(轴力 N 或弯矩 M 等)由多种荷载引起,例如结构重力、围岩压力和水压力等,而每种荷载的变异性和概率分布特征不同,因此仅采用单个作用效应分项系数不能体现各种荷载对隧道结构可靠度的影响程度,从而导致隧道结构可靠度设计精度降低;同时,隧道结构主要为混凝土和钢材两种建筑材料,仅采用抗力分项系数也不能体现每种材料的统计特征对结构可靠性水平的影响。

1.4 铁路隧道极限状态设计方法研究取得的主要成果

针对我国铁路隧道概率极限状态法设计存在的问题,原铁道部于 2011 年重新组织开展了铁路隧道结构可靠度设计方法研究及规范修编工作,以期在铁路隧道全面推广应用概率极限状态法设计。但考虑到缺乏隧道围岩荷载等统计特征、复合式衬砌的作用机理尚未充分认识等因素,在短期内实现从容许应力法和破损阶段法向概率极限状态法设计转轨是比较困难的。因此,提出了分两个阶段开展设计方法转轨的工作思路:第一阶段先完成铁路隧道结构设计的形式转轨工作,即以原规范的以经验为主的安全系数法转为以概率分析为基础的极限状态设计法;第二阶段在形式转轨的基础上,形成正式的概率极限状态设计标准体系。第一阶段的目标,主要是按照“概率极限状态设计”确定一套完整的铁路隧道分析方法,确定隧道结构目标可靠指标、分项系数计算方法和程序,进而制订铁路隧道概率极限状态设计表达式及分项系数。第二阶段全面转轨,现场统计有关可靠度设计基本变量,即从大量的数据统计着手,更加精确各基本变量的统计特征,从而进一步优化隧道结构极限状态设计表达式及分项系数,真正实现我国铁路隧道按概率极限状态法设计的目标。

为实现第一阶段目标要求,原铁道部将“铁路隧道结构极限状态法设计方法关键技术研究”列入年度重大课题,由中国中铁二院工程集团有限责任公司牵头,联合西南交通大学、石家庄铁道大学、北京交通大学、中铁第四勘察设计院集团有限公司等高校和设计单位,对铁路隧道复合式衬砌及洞门结构概率极限状态设计相关问题进行研究,主要研究内容包括:隧道结构荷载分类及计算方法、隧道结构荷载组合规则、隧道复合式衬砌及洞门可靠度计算方法、隧道衬砌及洞门结构可靠度计算变量统计特征、隧道衬砌及洞门结构目标可靠指标、隧道衬砌及洞门结构设计表达式与分项系数等。通过以上研究取得了如下成果^[23]:

(1) 揭示了现阶段我国铁路隧道衬砌及洞门结构可靠度水平。对我国 2008 年以来发布的铁路工程建设通用参考图进行了可靠度校准。校准的衬砌通用图共计 10 套,包括:140km/h、160km/h、200km/h 的客货共线铁路单、双线隧道复合式衬砌,250km/h、350km/h 客运专线铁路单、双线隧道复合式衬砌,获得 60 多种衬砌结构隐含的可靠指标。校准的洞门通用参考图包括:140km/h 单线电化铁路 6 种隧道洞门、双线电化铁路 4 种隧道洞门,200km/h 单线电化铁路隧道 2 种洞门,250km/h 双线电化铁路 2 种隧道洞门,按不同洞门形式和边仰坡坡率比划分,共检算了 22 种类别洞门结构参考图可靠指标。同时,除对现行标准图进行校准外,还对现行《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)中破损阶段法设计的衬

砌结构可靠度进行了校准,获取了钢筋混凝土及混凝土衬砌结构在不同围岩级别的各安全系数对应的可靠指标。

(2)确定了现阶段我国铁路隧道衬砌及洞门结构目标可靠指标。主要依据现行铁路隧道参考图及规范的可靠指标校准成果,对目前国内外建筑、水工、公路等相关行业的工程结构目标可靠指标进行分类、对比分析,结合我国现阶段铁路隧道的安全度水平,确定了铁路隧道衬砌结构及洞门的目标可靠指标。隧道衬砌结构主要包括延性破坏和脆性破坏两种极限状态的目标可靠指标,且较原标准有所提高;隧道洞门结构主要包括端墙墙身抗裂和抗压、墙身倾覆、墙身滑动、基底承载力五种极限状态的目标可靠指标。

(3)确立了铁路隧道复合式衬砌及洞门结构概率极限状态设计表达式及分项系数。考虑隧道各种荷载及建筑材料的变异性差异对结构可靠性影响程度不同,本次研究对设计表达式中作用效应和抗力的计算形式进行了修改。作用效应设计值由各荷载标准值乘以相应荷载分项系数并组合计算获得,抗力设计值由建筑材料标准值除以相应的材料分项系数计算获得,同时为确保设计表达式隐含的可靠度水平与目标可靠指标一致,表达式中引入了结构调整系数,用来考虑荷载效应和抗力计算的不确定性、各分项系数未能考虑到的其他各种因素的变异性。最后,通过理论研究,提出了隧道衬砌及洞门结构各种承载能力极限状态设计表达式中的分项系数和结构调整系数值。

(4)优化了铁路隧道衬砌及洞门结构承载能力极限状态方程。极限状态方程为计算可靠指标的基础,本次研究重新对衬砌及洞门结构承载能力极限状态方程进行了优化分析,明确了各极限状态方程中基本变量及其统计特征,推导了极限状态方程中部分参数的计算方法。例如,重新推导了钢筋混凝土衬砌极限状态方程中受压区高度 x 的计算方法。

(5)完善了铁路隧道衬砌及洞门结构可靠度变量统计特征。基本变量统计特征分析的工作量大,短时间内无法完成。考虑到本阶段的目标主要为概率极限状态设计方法形式转轨,变量统计特征主要沿用了20世纪90年代初的研究成果。在此基础上,采用蒙特卡洛抽样、卡方检验等方法对荷载、侧压力系数、作用效应和抗力等综合变量统计特征进行了分析。

(6)补充完善了铁路隧道荷载种类。通过国内外资料调研,对作用在隧道复合式衬砌及洞门上的荷载进行归纳分类及统计分析,确定了铁路隧道荷载分类方式。在保留现有规范相关荷载种类基础上,结合铁路隧道建设发展现状,对荷载种类进行补充完善。

(7)确定了铁路隧道荷载组合规则。通过国内外资料调研及对比分析,确定了铁路隧道承载能力极限状态及正常使用极限状态设计荷载组合类型。针对复合式衬砌、明洞及洞门结构特点,分别考虑其永久荷载、可变荷载及偶然荷载,提出常用的作用组合及其组合表达式,以及可变作用的组合值系数计算方法。

以上研究成果已纳入2015年颁布的《铁路隧道极限状态法设计暂行规范》(Q/CR 9129—2015)中^[24],并为将来开展第二阶段概率极限状态设计全面转轨工作奠定了基础。

第2章 隧道结构可靠度基本概念及计算方法

目前各国规范中采用的工程结构概率极限状态设计法是一种近似概率结构设计法,以工程结构的失效概率或可靠指标来衡量结构的可靠度,并建立结构可靠度与其极限状态之间的数学关系。本章主要阐述铁路隧道结构可靠度基本概念以及可靠指标计算方法,结构可靠度计算方法中主要讲解中心点法、蒙特卡洛法、验算点法及分位值法等方法,并介绍各方法在隧道结构可靠度计算中的适用性。

2.1 结构可靠度基本概念

结构的可靠性是指结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。针对我国铁路隧道结构可靠性,规定的时间主要指铁路隧道设计基准期,即设计使用年限。设计使用年限为结构或结构构件不需要进行大修即可按规定目的使用的时间,我国《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(Q/CR 9007—2014)中明确规定,铁路隧道设计使用年限为100年^[24]。规定的条件指的是预先确定的铁路隧道结构全寿命期各种设计、施工和使用条件,隧道设计和施工必须由满足设计和施工资质的单位承担,并按照铁路隧道相关规范进行设计和施工,隧道运营期必须由运营单位按照规定对隧道结构进行日常维护;预定功能主要指我国铁路隧道结构的安全性、适用性、耐久性,以及在偶然事件发生时及发生后,能够保持整体稳定的功能,满足各项功能的标志则由极限状态来衡量,极限状态是区分结构工作状态为可靠或不可靠的标准。

工程结构采用概率极限状态设计法时,一般已知极限状态方程及其方程中各基本变量的统计特征,然后依据规定的结构目标可靠指标,按照结构可靠度分析方法进行结构设计,因此,掌握和熟悉工程结构可靠度相关概念和结构可靠指标求解方法至关重要。

2.1.1 结构的可靠度及可靠指标

与结构可靠性相对应,结构的可靠度是指结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。由定义可知,结构可靠度为可靠性的概率度量,以概率理论为基础的结构极限状态设计方法来分析确定^[25]。

将结构能够完成预定功能,并处于可靠状态的概率称为“可靠概率”,用 P_s (Safe Probability)表示,相对地,结构不能完成预定功能,处于失效状态的概率称为“失效概率”,用 P_f (Failure Probability)表示,即结构可靠概率与失效概率的和等于1。可以用 P_s 或 P_f 来度量结构的可靠度,由失效概率来度量结构的可靠性具有明确的物理意义,因而国际上公认一般采用失效概率表达结构的可靠度,则其计算表达式如下: