



基于结构可靠性理论的 黄土隧道结构设计 及工程应用研究

BASED ON THE STRUCTURAL RELIABILITY THEORY RESEARCH
ON STRUCTURE DESIGN AND ENGINEERING
APPLICATION IN THE LOESS TUNNEL

牛泽林 著

基于结构可靠性理论的黄土隧道 结构设计及工程应用研究

牛泽林 / 著

西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于结构可靠性理论的黄土隧道结构设计及工程应用
研究 / 牛泽林著. — 成都: 西南交通大学出版社,
2017.9

ISBN 978-7-5643-5788-7

I. ①基… II. ①牛… III. ①土质隧道—隧道工程—
结构设计—结构可靠性—研究 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 229671 号

基于结构可靠性理论的黄土隧道结构设计及工程应用研究

牛泽林 著

责任编辑	柳堰龙
封面设计	墨创文化
	西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	11.75
字 数	200 千
版 次	2017 年 9 月第 1 版
印 次	2017 年 9 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5788-7
定 价	68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

从 20 世纪 80 年代开始, 各国的专家学者们开始对岩土与隧道等地下结构进行可靠性研究, 并取得了不少的研究成果。但隧道与地下结构工程作为岩土工程领域的一个重要组成部分, 它具有地层参数多、区域差异性大、作用荷载多变等特点, 过多的非定值参数严重地制约了结构可靠性理论在隧道与地下结构工程中的设计和应用。

黄土是第四系堆积的大陆沉积物, 是在漫长的地质历史过程中经历各种动力地质作用改造而成的, 且仍然是处于演化过程中的地质体。我国黄土的分布面积为 63.5 万平方千米, 约占全国陆地面积的 6.6%, 从整个黄土的分布来看, 我国黄土主要分布在我国西北、华北等地, 我国黄土以分布广、厚度大、地层层序完整、古土壤清楚而闻名于世界, 它具有不同于南方的软土, 更不同于岩石的、独有的物理力学特性。黄土隧道作为特有的土质隧道, 它与其他隧道 (如南方的软土隧道) 有着明显的力学特性区别, 黄土所特有的物理力学性质和较强的水敏性等特点, 给黄土隧道衬砌结构的可靠性分析与应用带来了不小的困难, 使得结构可靠性理论在这个领域内的理论发展和应用出现了“瓶颈”。

因此, 本书以黄土区隧道工程为研究对象, 在总结已有隧道结构可靠性研究成果的基础上, 以衬砌结构可靠性设计和现役隧道衬砌结构的安全评价为研究主线, 系统研究结构可靠性理论在黄土隧道衬砌结构设计中具体应用方法和手段, 提出从黄土隧道衬砌结构作用效应的分布特征来评价隧道结构安全可靠性的基本思路和方法。同时, 对运营中的黄土隧道衬砌结构的可靠性评价方法和手段进行深入研究, 建立黄土隧道衬砌结构的内力及结构厚度

的概率分布模型,提出一种应用结构可靠性理论对现役黄土隧道结构安全进行评价的方法,并试探性地提出和验证了在保证隧道衬砌结构必要的可靠性前提下,如何靠减少隧道衬砌结构的施工厚度以降低施工成本的方法,最终形成一整套黄土隧道衬砌结构设计和安全评价的可靠性分析方法和手段,为黄土隧道乃至其他隧道的衬砌结构可靠性分析和研究提供必要的技术支持,对今后结构可靠性理论在地下结构中的广泛应用有着重要的理论指导意义和借鉴价值。

本书第一作者牛泽林在攻读博士及以后的博士后工作期间,对结构可靠性理论在黄土隧道衬砌结构设计和安全评价等方面做了系统的研究,本书为以上研究工作的总结和深化,书中第2章和第8章由牛泽林、李德武和宋战平共同撰写,其余章节由牛泽林撰写完成。

本书的研究得到了西安建筑科技基金(RC1250)和陕西省教育厅专项科研基金(16JK1443)以及住房和城乡建设部科学技术计划项目(2016-K4-021)的资助,特此感谢。

限于作者水平,书中难免有疏漏之处,敬请各方面专家学者和广大读者批评指正。

著者

2017年6月11日

目 录

第 1 章 绪 论	001
1.1 黄土隧道的特点	001
1.2 隧道与地下结构工程可靠性发展现状	002
1.3 黄土隧道结构可靠性发展现状	004
1.4 本书的研究内容	006
1.5 本书的主要研究方法	008
第 2 章 定值参数在黄土隧道结构设计中的应用研究	010
2.1 隧道结构设计计算模型的建立原则及其分类	010
2.2 定值参数的黄土隧道结构力学分析与安全评价	013
2.3 隧道衬砌结构力学分析及安全评价程序的研发	029
2.4 定值参数在黄土隧道结构与结构安全评价中的应用	031
第 3 章 结构可靠度理论与数理统计	051
3.1 结构可靠度与极限状态和失效概率的关系	051
3.2 工程结构可靠度和可靠指标	056
3.3 工程建筑结构可靠性的计算方法	060
3.4 随机变量的数理统计知识和方法	066
第 4 章 计算模型的构建与隧道结构可靠性相关程序的研发	080
4.1 隧道衬砌结构作用效应分析的随机有限元方法	080
4.2 随机变量的随机数生成程序	082
4.3 隧道衬砌结构可靠性指标计算程序	083
4.4 隧道结构可靠性设计计算模型的确定	084
4.5 隧道结构作用效应特征值计算程序	085
4.6 基于蒙特-卡罗有限元法的衬砌结构可靠性分析程序	085

第 5 章	黄土地区相关物理力学参数的统计分析	087
5.1	基于概率论的黄土隧道围岩压力的确定	088
5.2	基于概率论的围岩弹性抗力的确定	090
5.3	隧道结构分析中其他参数统计特征的确定	091
第 6 章	结构可靠性在黑山寺黄土隧道结构设计中的应用研究	093
6.1	用于黄土隧道结构计算的相关参数	094
6.2	随机变量的抽样	095
6.3	黄土隧道衬砌结构作用效应的计算及统计分析	099
第 7 章	结构可靠度在现役秦东大断面黄土隧道中的应用	113
7.1	秦东隧道衬砌结构尺寸现场采样	113
7.2	秦东隧道衬砌结构可靠性指标的计算	118
7.3	结构可靠性与隧道施工成本	120
第 8 章	结构可靠度在现役九龙山黄土隧道中的应用	122
8.1	隧道衬砌结构尺寸的采样	122
8.2	九龙山隧道衬砌结构可靠性指标的计算	130
8.3	结构可靠性与隧道施工成本	132
第 9 章	研究结论	134
参考文献		136
附 录		145

第 1 章 绪 论

随着我国经济建设脚步的加快,基础建设也得到了大力发展。作为基础建设的一个重要的领域——线路工程,同样也得到了大力发展,与此同时,隧道工程作为整个线路上的控制工程,在各个方面也在不断发展、壮大。通过这几十年的建设,隧道工程在定值的结构设计、施工方法和运营管理等方面积累了不少的经验。但是,由于隧道工程较地面结构工程来说,有复杂多变的围岩物性参数,因而有太多的不确定性。这使得可靠性理论在隧道与地下结构中的实际应用与发展受到了很大的限制。而黄土隧道作为一种特有的土质隧道,由于它本身固有的一些特性,结构可靠性理论和概率极限状态设计在其结构设计中也很难全面推行。

1.1 黄土隧道的特点

随着我国基础建设步伐的加快,国家加大了对西部基础建设的扶持,促进了西部大开发战略决策的进一步实施,西部地区的高速公路和高速铁路也相继开始了大规模的建设。继而穿越黄土地区的铁路和公路隧道也越来越多,大断面或特大断面黄土隧道也层出不穷,黄土作为隧道的围岩有着不可替代的作用,它的结构状态、物理力学指标的好坏都直接影响着隧道在衬砌结构设计和使用中的安全可靠性能。

众所周知,黄土是第四系堆积的大陆沉积物,是在漫长的地质历史过程中经历各种动力地质作用改造而成的,且仍然是处于演化过程中的地质体,我国黄土的分布面积 63.5 万平方千米,约占全国陆地面积的 6.6%。从整个黄土的分布来看,我国黄土主要分布在我国西北、华北等地,我国黄土以分布广、厚度大、地层层序完整、古土壤清楚而闻名于世界。它具有不同于南方软土、更不同于岩石的独有物理力学特性。就黄土隧道和其他围岩的隧道来说,黄土隧道具有以下几个明显的特点:

(1) 黄土隧道的围岩主要以粉土为主, 无明显的层理状且垂直节理较发育, 有较强的直立性。

(2) 黄土隧道的围岩孔隙率大, 且大部分黄土有较大的、肉眼可见的大孔隙, 围岩结构疏松, 密度较低。

(3) 黄土隧道在无水状态下, 其围岩强度较高。

(4) 当黄土隧道遇到水后, 围岩的强度立刻降低, 围岩松弛压力立刻急剧增加, 对隧道结构的破坏较严重, 且这个变化基本没有预兆性, 这也是黄土区别于其他岩体最显著的工程特性。

正是由于黄土隧道具有这样与众不同的特点, 黄土隧道的建设和发展相对缓慢, 同时也制约了结构可靠性理论在黄土隧道中的应用和实践。

1.2 隧道与地下结构工程可靠性发展现状

隧道与地下结构工程作为岩土工程领域的一个重要的组成部分, 它具有地层参数较多且变化范围大等特点, 同时, 隧道与地下结构作为一个结构物来说, 它也要受到荷载的作用, 这些荷载又成为一个不确定性的问题。这些因素有的可以通过大量的实验数据整理分析得到, 而有的因素由于缺乏实验资料或者它的数据资料变异性太大而无法使用。因此, 对于隧道与地下结构按照概率极限状态进行结构设计时, 它们较地面结构来说难度是非常大的, 致使结构可靠性理论在这个领域内的理论发展和应用情况长期得不到有效的发展。从 20 世纪 80 年代开始, 各国的专家学者们开始对岩土与隧道等地下结构进行可靠性研究, 并取得了不少的研究成果。1983 年, Matsuo^[1]和 Kawamura^[2]用概率的概念计算了松散岩体支护系统的失效概率, 从而确定最优设计; 1984 年, 松尾稔^[3]编著的《地基工学》于 1984 年出版, 他对边坡的稳定、板桩、挡土墙以及地下埋管等用概率论知识进行了详细的阐述, 其中对新奥地利法支护系统的设计提出了以“动态可靠度设计”为主的概念; 同年, Dershowitz^[4]和 Einstein^[5, 10]提出对于隧道或边坡岩石楔体的稳定分析问题也可以采用概率法进行; 后来, 苏联学者也提出了隧道毛洞可靠性评价的方法, 并将这种评价方法用到了地铁隧道衬砌结构的可靠性分析当中; 1989 年, H.-S.^[11]在前人的理论基础上, 对隧道衬砌结构的可靠性问题进行了分析, 最终提出了隧道支护系统体系可靠度的概念及分析方法^[12]; 1991 年, 美国的

A. Longinow^[13]等人针对人防工程结构在动荷载作用下的可靠性设计理论方面做了许多的工作,随之提出了RDSF可靠性设计方法;1999年,Kok-Kwang Phoon^[14-16]和Fred H. Kulhawy^[17]提出了分析地下结构监测中的内在随机性、测量误差和尺寸效应等的不确定性的方法;2000年,N. O. Nawari 和 R. Liang^[18]共同提出用模糊方法估计岩土参数的标准值;2001年,Andrzej S.^[19]等人提出了地下结构的可靠度水平应高于地面结构的见解;E. Laso, M. S. Gomez Lera 和 E. Alarcon^[20]等人采用基于连续介质模式的响应面法对Ⅱ类围岩的衬砌结构进行了可靠度计算分析。

我国从20世纪70年代末才逐渐开展了岩土工程可靠度问题的研究。进入80年代后,我国各部门相继开始开展对岩土及隧道等地下结构的可靠性设计等方面的探索性研究。1983年《概率论与统计学在岩土工程中的应用》的专题学术座谈会议在上海举行。同时,各个高校和工程院校也都投入了大量的人力、物力以及财力来进行岩土与隧道等地下结构的可靠性问题研究,并发表了一些文章,这些研究成果可以说是我国在隧道与地下结构设计领域中较早的实际应用。为了将结构可靠性理论和概率极限状态法更好地推广到隧道和地下结构的设计中去,我国的专家学者在随后的几十年内也做了不少的研究工作。在1987年,石家庄铁道学院的景诗庭教授^[21]就提出了对隧道与地下结构应用可靠性理论和推行概率极限状态设计的必要性,同时,他也为隧道与地下结构开展可靠性设计指明了工作的方向;西南交通大学关宝树教授^[22]1987年针对隧道与地下结构可靠度研究提出了几点建议;北方交通大学的张弥教授^[23]1988年提出了铁路隧道结构按可靠性理论设计的方法;长沙铁道学院的宋振熊教授^[24]1990年提出了按可靠性理论修订隧道规范的几点建议;同年,兰州铁道学院的谢锦昌教授^[25]在国际会议上也提出了铁路隧道塌方高度和荷载的统计分析,并进行了实例计算,最终得到了最佳的概率分布类型;在1994年《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216—94)^[26]编制完成并发布之后,第三层次按可靠度理论修订各铁路工程专业设计规范的工作随即提上日程。铁道部建设司工程建设部随后开展了“按可靠性理论修订隧道设计规范的基础性研究”的科研项目,其分别为“铁路隧道明洞荷载的统计特征研究”,由北方交通大学承担完成^[27];“浅埋(含偏压)隧道荷载的统计特征和结构可靠度的分析研究”,由兰州铁道学院承担完成^[28];“深埋隧道荷载的统计特征研究”,由西南交通大学承担完成^[29];“隧道洞身衬砌混凝土偏压构件强度的统计特征和抗力计算公式的试验研究”,由石家庄铁道

学院承担完成^[30]；“铁路隧道洞身衬砌几何尺寸变异性的结构可靠度分析”，由长沙铁道学院承担完成^[31]。这五个方面研究工作取得了可喜的成绩，这些成果最终被列入了《铁路隧道设计规范》（TB 10003—2001）中，至此我国实现了将结构可靠性理论和概率极限状态设计法推广到隧道与地下结构的工程结构设计中这一目标，这也是一个质的飞跃，对隧道与地下结构的可靠性分析来说，这是具有划时代意义的，但只适用于单线铁路整体式衬砌、浅埋偏压衬砌和明洞以及洞门的概率极限状态法设计。1994年张清^[32]教授对围岩弹性抗力系数进行了统计分析，并用随机有限元法计算了隧道衬砌结构的可靠度。1996年高波^[33]教授对深埋隧道荷载的统计特征及衬砌可靠度进行了研究；同年，张弥^[34-36]教授对明洞荷载统计特征及其可靠度设计方法进行了系统的研究，并发表了多篇论文；在1996年景诗庭^[37-40]教授通过对混凝土偏压构件进行大量的试验研究，提出了混凝土受压构件偏心影响系数的统计参数计算公式，并对模糊可靠度和复合衬砌可靠度进行了研究；朱永全^[41-43]教授在1995年提出了分析隧道稳定可靠度的极限位移法；当然，在此期间，王梦恕^[44-45]院士和谭忠盛^[46]教授等人也在隧道与地下结构可靠度的计算理论和实践研究方面作出了较大的贡献。此外，据不完全统计，在我国已有十多本教科书和一些学术专著来介绍及研究工程结构的可靠度，这些教材^[47-49]、专著^[50-53]、会议论文^[54-56]和期刊^[57-59]对于普及和发展可靠度的相关知识，指导可靠性的研究和设计起到至关重要的作用。

1.3 黄土隧道结构可靠性发展现状

随着社会的发展，在黄土地区修建隧道的数量日益增多，人们对黄土隧道的结构设计和建成后的安全运营也逐渐开始关注，大量的新颖的计算方法和理论也不断的应用到了黄土隧道衬砌结构的设计中。结构可靠性理论就是这样作为新理论被引进了黄土隧道衬砌结构的设计中的，但是由于黄土隧道所特有的围岩性质，使得这项工作迟迟没有实质性的进展，加之这些年来，针对黄土地层变量参数的试验开展较少，故要得到黄土地层随机变量和相关围岩压力等参数的统计数据难度是比较大的，这些困难都使得结构可靠性理论在黄土隧道结构设计中、在衬砌结构安全运营的评价方面，都无法真正发挥它的作用。由此可见，对黄土隧道的结构可靠性分析的研究已经刻不容缓。

众所周知,隧道与地下结构的作用机理是复杂多变的,地层地质情况又是千变万化的。对于黄土隧道来说,它的围岩变化情况更是如此,对于黄土隧道,如果运用各种定值分析方法也肯定是不太符合工程实际情况的。因为黄土隧道和其他地下结构一样较地面结构来说,它存在着太多的不确定性,例如:荷载或者作用力的不确定性,结构的材料参数的不确定性;结构几何尺寸的不确定性,边界条件和初始条件的不确定性以及计算模型的不确定性。由于这些不确定性因素的存在,使得要对它们进行结构可靠性设计与计算分析则被认为是一项难度非常大的、进度非常缓慢的工作。但是,如果用结构安全系数法来评价黄土隧道衬砌结构是否安全可靠,这就意味着不能考虑任何影响结构安全计算和检算的不确定性因素以及设计变量的变异性,这样一来,就为准确评价黄土隧道衬砌结构是否安全可靠埋下了无法根除的隐患。国内的权威人士也指出^[60,61]:在当今日新月异的计算科学条件下,就工程实际情况和计算参数的精度来说,如果设计过程中不考虑设计参数的不确定性,那么结构的精确分析所取得的那点效益将会被粗略的和经验性的安全指标所掩盖或者淹没。因此,应用建筑物的结构可靠性理论,并积极推行概率极限状态设计法,同时严格制定相应的设计标准和规范,是当今国内外工程结构物合理设计和发展的必然趋势,同时也是提升我们国家工程结构物设计水平的有效途径之一。

关于黄土地层各个随机变量统计特征的试验、分析研究工作起步较晚,可供借鉴的研究资料和成果寥寥无几。在2000年,孙有斌等^[62]人通过对1000个黄土样品进行统计分析得到了黄土容重的均值和标准差;在2007年9月,由兰州交通大学和铁道部第一勘测设计院共同完成的《郑西客运专线专题报告(四)之黄土物理力学参数试验报告》^[63]中明确提出了黄土的容重、弹性模量等随机地层参数的统计特征值;在2008年,靳春胜^[64]等人在《末次间冰期以来黄土古土壤容重特征》一文中也提出了黄土容重的均值;在2009年,方钱宝^[65]在进行大量的样品试验后,给出了黄土的容重、弹性抗力系数等参数的数学特征值。这就是为数不多的关于黄土地层随机变量的统计数据。这些统计数据都有一个共同的缺点,那就是都没有总结归纳出各变量的概率分布类型,这也是本书在进行黄土隧道衬砌结构可靠性分析时,必须解决的关键性问题之一,也是可靠性分析成败的关键。

而对于服役期间的隧道结构可靠性分析工作,就目前这个阶段对隧道结

构可靠性的研究水平和研究成果来说,基本是无法顺利实施的。作为特有的黄土隧道也是如此。因此,为了保证隧道的施工安全和建筑物的施工质量,利用监控量测结果的回归分析来修正其设计与施工,这就是现阶段隧道施工安全控制的主要技术手段和结构安全评价的唯一方法。对于现役的隧道尤其是黄土隧道来说,其在施工过程中的种种原因,可能会给已建成的隧道衬砌结构遗留较多的安全隐患,而用传统的监控量测方法已不能解决衬砌结构上的问题,但是对于目前正在使用的黄土隧道,它的结构到底是否安全可靠?又怎样来评价这个结构的可靠性?关于这些问题的解决就必须引入工程结构可靠性理论。那怎样把这个理论应用到实际工程中去呢?目前来说,尚未有一个较好的解决办法。

因此,本书以西部大开发为契机,以黄土区隧道工程为研究对象,在已有的隧道结构可靠性研究成果上,以结构可靠性设计和现役结构的安全评价为研究主线,系统研究结构可靠性在黄土隧道衬砌结构设计中具体应用的方法和手段,同时,对运营中的黄土隧道衬砌结构的可靠性评价方法进行详细的研究,为以后黄土隧道乃至其他隧道的衬砌结构可靠性分析和研究积累经验,提出具体研究技术路线,对今后结构可靠度在地下结构中的广泛应用有着非常重要的指导意义。

1.4 本书的研究内容

结合目前结构可靠性理论在隧道与地下结构工程的应用和发展状况,本书拟主要开展以下几个方面的研究工作:

(1) 根据以往研究分析经验,并结合隧道中最常用的数值计算模型,本书将通过黄土隧道衬砌结构内力的计算和衬砌结构截面安全系数的检算来进行黄土隧道衬砌结构受力特性的分析研究。

(2) 考虑相关围岩地层参数为定值参数的情况下,研究典型断面的黄土公路隧道衬砌结构截面强度的安全性和安全系数的具体分布,以此来研究黄土隧道衬砌结构处于结构设计阶段时的最不利部位,同时根据以往隧道应力和围岩收敛量测的经验,对其做出必要的验证,并总结隧道衬砌结构的破坏机理和防止结构破坏的建议。

(3) 针对在设计环节中与黄土隧道结构精确设计息息相关的地层物理力

学参数资料的稀缺,本书将有针对性的收集、整理计算这些物理力学设计参数,具体的研究内容为:

① 从荷载或者作用力的不确定性出发,大量研究黄土地区隧道的塌方高度以及塌方范围,总结、分析、归纳出黄土隧道的塌方高度,最终确定用于进行黄土隧道结构可靠性分析的围岩松动压力的计算思路、方法以及符合它的概率分布类型。

② 从地层参数的不确定性出发,搜集、整理分析,获得黄土地区地层参数的实验数据,并应用数理统计知识,对这些基础数据进行必要的分析总结,最终得到黄土地层各个地层参数的概率统计特征值和与其相适应的概率分布的类型。

③ 从建筑材料的不确定性出发,查阅、搜集、整理相关建筑材料的试验资料,并应用统计分析知识,紧密结合相关文献资料,最终总结出与黄土隧道衬砌结构设计密切相关的建筑材料参数的概率数学特征值和概率分布类型。

本书将以这三个方面研究结果为基础,针对典型断面的黑山寺黄土公路隧道衬砌结构,开展全面而系统的隧道衬砌结构的结构可靠性状态的研究工作,从而计算得出黄土隧道衬砌结构的结构可靠性指标和可靠性概率。

(4) 比较分析在隧道结构设计环节中,传统的定值设计法与概率设计法的差异性和共同性,验证概率设计法的正确性,同时进一步分析得到与隧道衬砌结构设计有关的地层参数的数学统计特征值和相适应的概率分布类型。

(5) 通过将可靠性指标与现行的衬砌结构截面强度安全系数加以比较和分析研究,将得出该黄土隧道在诸多不确定因素的情况下,其结构的薄弱部位以及它的安全性。同时,经过统计分析得出黄土隧道结构内力的概率分布类型。本书还将提出,在隧道衬砌结构设计环节中,可用于评价黄土地区隧道衬砌结构可靠度的一套完整的、详细的、易实现的方法手段。

(6) 在前面的经验和方法上,把评价隧道衬砌结构可靠性理论应用于工程实际中去。也就是对现役秦东等黄土隧道衬砌结构的结构可靠性进行分析和安全性评价工作。通过这些具体而细致的研究分析工作,从而对该现役黄土隧道衬砌结构的可靠性做出正确的、合理的评价。最终,提出可用来评价现役隧道衬砌结构可靠性的一种简单、易行的方法,为将来现役隧道衬砌结构的可靠性评价工作顺利实施,做好理论上的沉淀和实践上的经验积累。

1.5 本书的主要研究方法

(1) 为了保证计算结果的精度和计算的简便性, 将以隧道衬砌结构内力四个计算模型中的某一个作为隧道衬砌结构内力计算的计算模型。结合实际情况, 本书选择了“结构-荷载”模型作为计算隧道衬砌结构内力的计算模型。

(2) 为了充分体现围岩对衬砌结构的抗力, 并结合温克尔的局部变形理论, 选用弹性链杆来代替围岩, 实现了对隧道衬砌结构的弹性抗力作用。

(3) 在数值计算方面, 考虑到要进行隧道衬砌结构的结构内力计算和进行结构可靠性的分析计算以及还要进行大量的数理统计分析等烦琐的工作, 故本书应用 FORTRAN 语言程序, 结合相关计算理论和算法, 研发了隧道衬砌结构作用效应计算程序、结构截面安全检算程序、结构可靠性分析程序、随机变量随机数的生成程序、结构截面可靠性指标的计算程序和统计假设检验程序等计算分析程序。

(4) 在数值结果整理和数值处理分析方面, 针对本书计算的数量庞大、名目繁多, 在计算精度足够的情况, 多次采用了现今比较流行的数据整理工具和数据处理软件进行了相关数据的处理工作。具体来说, 在数据处理方面, 为了便于对计算结果作出准确的评价, 运用了 SPSS 商业软件对计算结果进行了分析处理, 也就是应用此软件根据所得到的计算数据绘制频率直方图、得出标准差和均值, 判断随机变量的概率分布; 而对于随机变量的概率以及统计分析中统计量等的计算分析, 利用 Excel 办公软件实现。

(5) 在随机数的生成过程中, 本书结合以往的经验 and 相关资料, 最终以乘同余法作为在 $(0, 1)$ 区间上伪随机数的生成方法。而对于伪随机数的检验一般要进行其均匀性和独立性的检验, 在对这些伪随机数进行检验时, 采用了 χ^2 检验和游程检验法。

(6) 对隧道衬砌结构进行结构可靠性分析时, 由于所用参数的不确定性, 本书引入了随机有限元法 (SFEM) [概率有限元法 (PFEM)]。这种方法是在确定性有限元法的基础之上, 根据相关参数具有的随机性来对相关建筑结构物的结构力学行为作出必要的分析和计算。随机有限元法可以被分成非统计逼近法和统计逼近法。而属于统计逼近随机有限元方法的是将确定性的有限元方法和蒙特卡罗模拟方法有机组合起来, 这种计算方法以其计算准确、计算速度快而被广泛使用, 本书也采用此种方法来对黄土隧道衬砌结构

的可靠性进行分析、计算，最终对黄土隧道的结构安全作出准确、合理的评价。

(7) 随机变量的概率分布类型假设一般有正态分布、对数正态分布、 Γ (伽马) 分布 (又称皮尔逊 III 型分布)、极值型分布，而本书根据随机变量的实际情况，多采用的是正态分布和对数正态分布。

(8) 在随机变量概率分布类型的判断方面，统计假设检验法是最主流的一种检验方法，统计检验包括 $K-S$ 检验， χ^2 检验。 $K-S$ 检验以其计算精度高被广泛使用，故在进行随机变量假设分布类型的检验时便采用了 $K-S$ 检验法。

第2章 定值参数在黄土隧道结构设计中的应用研究

2.1 隧道结构设计计算模型的建立原则及其分类

2.1.1 隧道结构计算模型建立的原则

一个理想的隧道工程的数学力学模型应能反映下列问题^[66]：

(1) 必须能描述有裂隙和破坏带，以及由于开挖面形状变化所形成的三维几何形状。

(2) 对围岩的地质状况和初始应力场不仅要能说明当时的状态，而且还要包括将来可能出现的状态。

(3) 应包括对围岩应力重分布有影响的岩石和支护材料的非线性特性，而且还要能准确地测定出反映这些特性的参数。

(4) 如果要知道所设计的支护结构和开挖方法能否获得成功，即想评估其安全度，则必须将围岩、锚杆和混凝土等材料的局部破坏和整体失稳的判断条件纳入模型中。当然，条件必须满足现行设计规范的有关规定。

(5) 要经得起实际的检验，这种检验不能只是偶然巧合，而是需要保证系统的一致性。

这样的理想模型对于科学研究是十分必要的，因为只有准确地模拟围岩性质和施工过程，才能更好地了解围岩与支护结构的实际工作状态，作出符合实际的决策。然而这种理想模型的参数太多又不易精确测定，将各种影响因素都机械地转换到模型中来也是十分困难的。因此，理想模型还不宜直接用于设计实践，必须在可能的情况下，由理想模型推演出一些较简单的计算模型，或称为工程师模型。这种模型应力求满足下列条件：

(1) 应能体现经济而安全的设计，即按这种模型所设计的支护结构既不应过于保守也不应冒险。