

程选生 著

黄土隧道结构的地震动稳定



科学出版社

黄土隧道结构的地震动稳定

程选生 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍黄土隧道地震动稳定的分析方法,给出具体的基于有限元强度折减法的分析方法,并针对多种因素耦合作用对黄土隧道的地震动稳定性分析做出相应的介绍。全书共12章,主要内容包括:强度折减法的基本原理,隧道结构地震动稳定性分析的动力有限元静力强度折减法和动力有限元强度折减法,地震作用下黄土隧道结构的稳定性分析,地震-渗流-列车荷载作用下黄土隧道结构的断面形式,列车荷载和雨水渗流及二者共同作用下黄土隧道结构的地震动稳定以及考虑黄土动参数情况下隧道结构的地震动稳定。

本书可作为土木工程、水利水电工程等领域的工程设计、科学研究、施工技术人员和研究生等的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黄土隧道结构的地震动稳定/程选生著. —北京: 科学出版社, 2017.2
ISBN 978-7-03-051622-0

I. ①黄… II. ①程… III. ①土质隧道-地震-稳定分析 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 012378 号

责任编辑: 亢列梅 周 莎 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017年2月第一次印刷 印张: 13 7/8

· 字数: 280 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



程选生，兰州理工大学教授，工学博士，博士研究生导师，国家一级注册结构工程师。1995 年郑州工学院工民建专业获工学学士学位，2001 年兰州大学固体力学专业获工学硕士学位，2007 年兰州理工大学结构工程专业获工学博士学位，2009 年和 2011 年分别进入中国人民解放军后勤工程学院和北京工业大学土木工程博士后流动站从事博士后研究工作，2012 年国家公派赴美国西北大学访学一年。

现为国际隔震与消能减震控制学会（ASSISI）理事、国际土力学协会委员、中国力学学会计算力学委员会特邀委员、中国地震工程学会岩土防震减灾委员会委员、中国岩石力学与工程学会岩土工程信息技术与应用分会理事、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会青年工作委员会委员、中国土木工程学会防震减灾工程技术推广委员会青年分委员会委员及甘肃省建设科技与建筑节能协会委员，*Ocean Engineering*、*Engineering Geology*、*Journal of Vibration Engineering and Technologies*、*Journal of Central South University of Technology*、*Plos One*、*Journal of Traffic and Transportation Engineering*、*Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*、*Structure and Infrastructure Engineering*、《振动与冲击》《中南大学学报（自然科学版）》《四川大学学报（工学版）》《中国公路学报》等期刊审稿人，教育部学位中心通讯评议专家，国家自然科学基金项目和中国博士后基金项目通讯评议专家，甘肃省震后房屋建筑应急评估专家。主持国家自然科学基金项目 2 项、教育部博士点基金（博导类）1 项、甘肃省科技支撑项目 1 项、甘肃省建设科技攻关项目 3 项；参与国家 973 项目和教育部创新团队发展计划项目各 1 项。发表论文 100 余篇（SCI/EI 检索 46 篇，ISTP 检索 10 篇），申请发明专利 15 项。获甘肃省科技进步奖一等奖 1 项、三等奖 3 项，甘肃省建设科技进步奖一等奖和二等奖各 1 项，获第 16 届甘肃省高等学校青年教师成才奖。主要研究方向：隧道结构的地震响应、动力稳定及其施工技术；特种结构的液-固耦合振动及减隔震性能；混凝土结构的热力学性能；结构设计理论和方法。

序

随着国家“一带一路”政策的落实和深入，我国西部地区在交通运输方面正面临着前所未有的发展机遇。由于西部地区特殊的地形、地貌，大量的公路隧道和铁路隧道需要开山建设才能实现，且这些地区的隧道多处在黄土区和高烈度地震区。一旦发生地震，这些隧道的安全程度能否满足正常运营是一个非常重要的问题，因此黄土隧道的地震动稳定问题是摆在我们面前亟待解决的难题。

该书作者多年来一直从事黄土隧道结构方面的研究工作，始终秉持锲而不舍的钻研精神和求真务实的学术态度，勇于创新，已成为该领域的资深学者，在黄土隧道稳定性方面颇有建树，取得了大量的研究成果。

强度折减法不需要考虑弹性模量和泊松比的影响，且不需要预先指定破裂面，可通过不断折减岩土体的抗剪强度指标自动寻找破坏面，因此，强度折减法可广泛应用于边坡工程、隧道工程等地下工程当中。该书基于强度折减法提出的两种分析方法——动力有限元静力强度折减法和动力有限元强度折减法，可通过不同的方式考虑重力对地震动稳定的影响，它不仅适用于黄土隧道工程，还可延伸到水利工程、边坡工程和基坑支护工程等。

为了全面评估黄土隧道的安全性，该书考虑车辆振动、渗流及地震等重要因素，对比研究了单因素及多种因素组合作用下黄土隧道的地震动稳定性，探讨了黄土隧道的破坏机理，其学术思想很有前沿性，研究成果对于黄土隧道动力灾变问题的控制及预防具有重要的意义，无疑将产生显著的经济和社会效益。此外，通过对黄土隧道地震动稳定性的研究，在校企结合、科研深化教学及人才培养等方面也将取得丰硕的成果。

该书的出版是对黄土隧道动力稳定性问题的一次有益探索，能为黄土隧道的地震动稳定研究提供理论依据，并为黄土隧道结构的工程设计及工程应用提供参考。



中国工程院院士

中国人民解放军后勤工程学院教授

2016年10月

前 言

黄土主要分布于中国、美国的中西部和俄罗斯的南部等国家和地区，总面积约 1300 万 km^2 ，而在我国黄土总面积达 63.1 万 km^2 ，主要分布在陕西、山西、河南、甘肃、宁夏等 12 个省（自治区）。近年来，随着西部大开发和国家“一带一路”战略的实施，大量的黄土隧道正在建设或有待建设，这些黄土隧道多处在高烈度地震区。因此，研究黄土隧道的地震动稳定性具有重要的理论意义和现实意义。

2009 年 5 月以来，作者有幸结识中国工程院郑颖人院士，并在他的指导下在中国人民解放军后勤工程学院从事博士后研究工作。本书提出的两种方法就是在郑院士研究的基本框架下实现的，在此，对他的无私付出表示由衷的感谢！博士后出站后，作者与所指导的研究生继续开展这方面的工作，系统研究了多种因素作用下黄土隧道的地震动稳定特性。

全书共 12 章，第 1 章为绪论，介绍国内外研究的现状；第 2 章为强度折减法的基本原理，介绍基本原理、屈服条件和破坏准则；第 3 章为隧道结构地震动稳定性分析的动力有限元静力强度折减法；第 4 章为隧道结构地震动稳定性分析的动力有限元强度折减法；第 5 章为无衬砌黄土隧道的地震动稳定性分析；第 6 章为有衬砌黄土隧道的地震动稳定性分析及工程应用；第 7 章为地震-渗流-列车荷载作用下的黄土隧道断面形式；第 8 章为列车荷载作用下黄土隧道结构的地震动稳定；第 9 章为雨水渗流作用下黄土隧道结构的地震动稳定；第 10 章为列车荷载和雨水渗流作用下黄土隧道结构的地震动稳定；第 11 章为考虑黄土动参数的隧道结构地震动稳定；第 12 章为工程应用，针对已建黄土隧道进行动力稳定分析。

本书编写过程中，得到了博士研究生景伟及硕士研究生齐尚榕、聂俊、赵亮、石玮、范晶等的支持，在此对他们表示衷心的感谢；另外，本书还参考了很多国内外专家和同行学者的论文及专著，对所有参考文献的作者表示衷心的感谢！

本书出版得到了国家自然科学基金项目（51478212）和教育部博士点基金项目（博导类）（20136201110003）的支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，本书难免存在不足，欢迎广大读者批评指正。

程选生

2016 年国庆节于兰州

目 录

序 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 黄土隧道静力稳定的国内外研究现状	2
1.2.2 黄土隧道地震动稳定的国内外研究现状	4
1.2.3 黄土动参数研究现状	7
1.3 本书的主要内容	9
参考文献	11
第 2 章 强度折减法的基本原理	14
2.1 弹性常数对地震动安全系数的影响	14
2.1.1 弹性模量对安全系数的影响	14
2.1.2 泊松比对安全系数的影响	15
2.2 基本原理	15
2.3 屈服条件和破坏准则	16
参考文献	17
第 3 章 隧道结构地震动稳定性分析的动力有限元静力强度折减法	19
3.1 分析模型	19
3.1.1 动力分析模型	19
3.1.2 静力分析模型	20
3.2 动力有限元静力强度折减法	21
3.2.1 模态分析	21
3.2.2 边界顶点水平位移时间历程曲线	21
3.2.3 竖向边界各节点的水平位移	22
3.2.4 动力稳定分析	22
3.3 小结	26

参考文献	26
第4章 隧道结构地震动稳定性分析的动力有限元强度折减法	27
4.1 模态分析和边界条件	27
4.1.1 模态分析	27
4.1.2 边界条件	27
4.2 动力有限元强度折减法	29
4.2.1 分析模型	29
4.2.2 地震动稳定分析	30
4.2.3 数值算例	30
4.3 小结	36
参考文献	36
第5章 无衬砌黄土隧道的地震动稳定性分析	37
5.1 计算范围的确定	37
5.2 动力有限元静力强度折减法在无衬砌黄土隧道中的应用	39
5.2.1 无衬砌圆形黄土隧道的地震动稳定分析	39
5.2.2 无衬砌直墙式黄土隧道的地震动稳定分析	60
5.2.3 底脚处应力集中对安全系数的影响	72
5.3 动力有限元强度折减法在无衬砌曲墙式黄土隧道中的应用	76
5.4 小结	82
参考文献	82
第6章 有衬砌黄土隧道的地震动稳定性分析	83
6.1 衬砌混凝土结构的本构关系	83
6.2 混凝土的本构关系的ANSYS实现	85
6.3 利用动力有限元静力强度折减法进行有衬砌黄土隧道的地震动稳定性分析	86
6.4 利用动力有限元强度折减法进行有衬砌黄土隧道的地震动稳定性分析	92
参考文献	98
第7章 地震-渗流-列车荷载作用下的黄土隧道断面形式	99
7.1 材料参数	99
7.2 计算模型和边界条件	99
7.3 地震-渗流作用下不同断面形式黄土隧道的动力响应	100

7.4 地震-列车荷载下黄土隧道断面形式研究	112
7.4.1 高速列车荷载	112
7.4.2 地震-列车荷载下不同断面形式黄土隧道的动力响应	113
7.5 地震-渗流-列车荷载下黄土隧道断面形式研究	132
参考文献	153
第 8 章 列车荷载作用下黄土隧道结构的地震动稳定	154
8.1 计算参数与分析模型	154
8.1.1 材料参数	154
8.1.2 分析模型	155
8.2 模态分析	156
8.3 不同埋深黄土隧道结构的地震动稳定	157
8.3.1 浅埋隧道	157
8.3.2 深埋隧道	161
8.3.3 超深埋隧道	163
参考文献	167
第 9 章 雨水渗流作用下黄土隧道结构的地震动稳定	168
9.1 计算参数和分析模型	168
9.1.1 计算参数	168
9.1.2 分析模型	168
9.2 渗流作用下黄土隧道结构的地震动稳定	169
9.2.1 中雨作用下的地震动稳定	169
9.2.2 大雨作用下的地震动稳定	171
9.2.3 暴雨作用下的地震动稳定	174
参考文献	176
第 10 章 列车荷载和雨水渗流作用下黄土隧道结构的地震动稳定	177
10.1 计算参数及分析模型	177
10.1.1 计算参数	177
10.1.2 分析模型	177
10.2 列车荷载和不同降水条件下黄土隧道结构的地震动稳定	178
10.2.1 列车荷载和中雨作用下的地震动稳定	178
10.2.2 列车荷载和大雨作用下的地震动稳定	180
10.2.3 列车荷载和暴雨作用下的地震动稳定	183
参考文献	186

第 11 章 考虑黄土动参数的隧道结构地震动稳定	187
11.1 边界条件	187
11.2 分析模型	187
11.3 计算参数	188
11.4 不同含水率情况下黄土隧道结构的地震动稳定	189
11.4.1 含水率 5%	189
11.4.2 含水率 10%	191
11.4.3 含水率 15%	193
11.5 不同振次情况下黄土隧道结构的地震动稳定	195
11.5.1 计算参数和地震波	195
11.5.2 振次 20	195
11.5.3 振次 30	198
11.6 结果分析	200
参考文献	201
第 12 章 工程应用	202
12.1 工程概况	202
12.2 动力有限元静力强度折减法	202
12.2.1 分析模型	202
12.2.2 计算参数	203
12.2.3 时程分析	203
12.2.4 安全系数	204
12.3 动力有限元强度折减法	206
12.3.1 动力分析模型和计算参数	206
12.3.2 静力分析以及热分析	207
12.3.3 动力分析	208
12.3.4 结果分析	209
参考文献	210

第1章 绪 论

1.1 引 言

隧道工程广泛应用于铁路、公路、矿井和水利等工程建设的诸多领域。根据用途,可以将隧道分为铁路隧道、公路隧道、煤炭和金属等矿山运输的巷道和洞室、水工隧道、军工工程和人民防空用地下通道和洞库、市政隧道和窑洞等。隧道工程结构由人工衬砌和天然围岩共同构成,由于地质作用形成的历史不同,天然围岩可分为岩体围岩和土体围岩。随着工程建设的飞速发展,隧道工程正面临着更大的机遇和严峻的挑战,岩体围岩隧道和土体围岩隧道的建设均得到了迅猛的发展。

气候环境的变化促使黄土的形成。黄土广泛分布于中国、美国的中西部和俄罗斯的南部等世界许多国家和地区,总面积约 1300 万 km^2 , 占陆地面积的 9.3%。我国黄土总面积达 63.1 万 km^2 , 主要分布在陕西、山西、河南、河北、山东、内蒙古、辽宁、吉林、新疆、青海、甘肃、宁夏等 12 个省(自治区), 占国土总面积的 6.6% 左右, 其中黄土最厚的区域在黄河支流泾河与洛河流域的中游——陕甘地区。黄土包括老黄土和新黄土。老黄土包括早更新世的午城黄土(Q_1)和中更新世的离石黄土(Q_2), 一般没有湿陷性。新黄土^[1,2]包括晚更新世马兰黄土(Q_3)和全新世的新近堆积黄土(Q_4), 均具有湿陷性。随着我国交通建设的迅速发展和西部大开发的不断深入, 黄土围岩隧道已经成为土体围岩隧道的重要组成部分, 并已广泛应用于铁路、公路、城市地下工程、水利、矿山建设、军事和人防等工程建设之中。

黄土隧道破坏分为静力条件下的破坏和动力条件下的破坏。静力条件下的破坏一般是由临空围岩结构的自重力、地应力、湿陷和动水压力等引起。动力条件下的破坏一般是由地震、环境振动、火山爆发和爆炸等引起, 其中地震作用是黄土隧道破坏主要的地质灾害原因。根据现有文献^[3], 仅在我国, 基本烈度在 7 度以上的高烈度区覆盖了国家领土的一半, 黄土地区 12 个省(自治区)的绝大部分地方为高烈度区。过去, 人们普遍认为地下构筑物受周围土体约束, 在地震时构筑物和土体一起运动, 地下结构遭受破坏的比例很低, 因此除特殊情况外一般认为地震对地下结构的影响很小, 然而近几年世界范围内发生的一系列大地震中, 不少隧道遭受破坏。“5·12”汶川大地震就是一个典型例子, 这次地震造成大量的隧道塌方, 使得铁路和公路交通中断、水利水电工程设施毁坏等, 给国家和人民的生命财产造成了巨大损失, 同时也给人们敲响了警钟。因此, 研究地震作用

下黄土隧道的结构稳定性成为岩土工程界和地震工程界的重要课题之一。

1.2 国内外研究现状

地下工程是多学科交叉的复杂工程,具有学科的边缘性、复杂性和系统性等特点,这类结构的稳定取决于围岩结构是否破坏或产生过大的变形。对于地下工程结构围岩稳定的研究至今已有 100 多年的历史,其稳定性分析方法主要有:块体理论支持分析法、模型试验法和数值分析法^[4]。李世辉^[5]、于学馥等^[6]介绍了隧道围岩稳定的系统分析,并编制了 BMP-84A 程序。王思敬等^[7]介绍了地下工程岩石围岩结构的稳定性分析等。随着工程建设的飞速发展和西部大开发的顺利推进,各种型式的地下工程结构在黄土地区已经建成或正在建设。比较全面地研究地震作用下黄土隧道的动力稳定性,要全面了解目前国内外学者关于黄土隧道静力、动力及地震动稳定的研究现状。

1.2.1 黄土隧道静力稳定的国内外研究现状

黄土隧道在我国发展最早,至今已有几千年的历史^[7-9],尽管起步很早,但对其设计理论的系统研究是从 20 世纪 60 年代开始的。以往地下隧道采用“荷载-结构”模型,将围岩压力视为作用在衬砌上的荷载,利用结构力学的理论进行衬砌结构的设计计算,因此围岩压力的确定就成为隧道设计的关键。对于黄土隧道设计理论的研究,新中国成立后大致经历了四个阶段^[8]。

(1) 20 世纪 50~60 年代以普氏理论为基础。通过大量工程实践,人们发现普氏理论对黄土隧道并不适用,按普氏理论计算所得的围岩压力值大大超过现场实测结果,所假定的压力分布形式及侧向荷载系数也与实际不符,这样一方面造成衬砌设计厚度普遍偏大,引起不必要的浪费,另一方面衬砌控制断面上的设计弯矩与实际相反,致使不少工程建成后衬砌开裂。

(2) 20 世纪 60 年代以工程地质类比法来指导设计。这一阶段人们根据地下隧道稳定性的要求对黄土进行了分类。

(3) 20 世纪 70 年代提出以工程地质类比为主、力学计算为辅的设计理念,必要时再用实测的方法来指导设计。

(4) 近 20 多年来,随着科学技术的发展,人们对土体应力-应变关系的研究逐渐深入,各种各样的弹塑性应力-应变本构模型应运而生,并随着计算机技术和岩土本构关系的建立,隧道及地下工程的强度分析开始以数值模拟为主。来弘鹏等^[10]通过数值仿真分析了单心圆、尖三心圆、坦三心圆等三种隧道衬砌结构型式的结构各部分的力学性状,比较了各种衬砌断面型式的优缺点。李国良^[11]结合郑西客运专线大断面黄土隧道的设计、施工情况,提出了大断面黄土隧道安全施工的对策。来弘鹏等^[12]对黄土公路隧道的衬砌开裂进行了分析。李鹏飞等^[13]以兰渝铁

路胡麻岭隧道为工程背景,采用现场监测方法得到大断面黄土隧道初期支护与二次衬砌之间的接触压力,对大断面黄土隧道二次衬砌受力特性进行了研究。牛泽林等^[14]对黄土地区单洞双层公路隧道进行了有限元分析。陈建勋等^[15]对黄土隧道洞口段的支护结构进行力学特性分析。师伟^[16]探讨了黄土隧道的最小净距。张金柱等^[17]、罗禄森^[18]、李宁^[19]结合郑西客运专线,对其大断面黄土隧道的围岩变形、二次衬砌设计和施工方法进行了研究。赵占广等^[20]通过对浅埋黄土公路隧道衬砌结构的现场测试,研究了围岩压力和衬砌应变与时间的变化规律。韩桂武等^[21]通过对三十里铺隧道的现场测试,研究了浅埋黄土隧道初衬和围岩接触应力、锚杆轴力、喷射混凝土表面应变、二衬中钢筋应力和浇注混凝土应变随时间变化规律及分布特征。来弘鹏^[22]对黄土公路隧道的合理衬砌断面型式进行了试验研究。刘坚等^[23]通过有限元分析探讨了黄土隧洞与建筑物连体结构的计算方法。轩俊杰^[24]以国道主干线青岛—银川陕西境吴堡至子洲段高速公路 N12 标—N16 标七座黄土隧道为依托,结合隧道的地质条件和工程条件,在隧道施工过程中埋设了大量的拱顶下沉、周边位移测点,对隧道的变形规律及稳定性进行了现场监控测量,并应用有限元软件(MIDAS-GTS)对黄土隧道的施工过程进行有限元仿真分析,从而探讨了黄土双车道公路隧道的变形规律。齐占国^[25]对老黄土隧道的施工技术进行了探讨。李宁等^[26]针对南水北调中线穿黄连接段大断面饱和黄土隧洞的成洞条件问题,应用岩土工程软件 FINAL 对几种可能的方案进行了分析。

可以看出,以上文献利用数值模拟计算隧道围岩和衬砌结构的应力和应变,甚至对施工过程进行的分析,其实质是强度分析。为了判断隧道的稳定性,现有文献采用有限元法计算应力、位移和塑性区大小来判断围岩的稳定性。张华兵等^[27]采用黏弹塑性模型对黄土隧道围岩进行有限元分析,研究围岩的变形规律,探讨了围岩位移场分布,并同真实试验黄土隧道的侧面无衬砌和半衬砌两种工况各三种状态的变形破坏结果进行比较,发现用有限元方法模拟的结果与真实隧道的变形破坏过程基本吻合。Zienkiewicz 等^[28]探讨了土力学中的黏塑性和塑性。朱汉华等^[29]系统介绍了公路隧道的围岩稳定与支护技术。张伟^[30]对大断面黄土隧道的稳定性参数指标进行了研究。虽然这些研究能通过有限元法计算所得的应力、位移和塑性区大小来判断围岩的稳定性,但由于不知道围岩的真正破坏状态,因此这种判断依赖于人的经验性。

这些研究为黄土隧道结构的稳定性分析奠定了坚实的基础,但由于不能确定围岩的真正破坏状态,无法算出隧道的安全储备系数,因此进行隧道围岩稳定性分析迫在眉睫。对于土体围岩隧道,由于土体是均质的,而且强度参数可通过试验得到,因此可以通过计算引入安全系数作为土体围岩隧道的稳定性判据。郑颖人等^[31]已将有限元强度折减法应用于土体隧洞中,提出了黄土隧洞的剪切破坏与拉力破坏安全系数。邱陈瑜等^[32]利用 ANSYS 对覆土厚度 30m 的无衬砌黄土隧洞进行了准静态分析。张红等^[33]对黄土隧洞的重力作用安全系数进行了探讨,指出

黄土隧洞的稳定必须同时满足两个要求,即初期支护后土体围岩的安全系数不小于 1.15,二次支护后衬砌结构的安全系数大于 2.0。李树忱等^[34]提出了隧道围岩稳定分析的最小安全系数法。江权等^[35]基于强度折减原理对地下洞室群的整体安全系数计算方法进行了探讨。熊敬等^[36]对 Druker-Prager 型屈服准则与强度储备安全系数的相关性进行了分析。张黎明等^[37]将有限元强度折减法应用到公路隧道之中。张永兴等^[38]基于强度折减法对小净距隧道的合理净距进行了研究。刘小文等^[39]对强度折减理论中塑性区贯通、特征点位移突变与基于力和位移准则判断计算是否收敛等三种较为广泛使用的判据加以比较。乔金丽等^[40]将强度折减法应用在盾构隧道开挖面的稳定分析。贾蓬等^[41]采用损伤力学和统计理论的单元本构模型提出了 RFPA 强度折减法运用于隧道的稳定性评价。杨臻等^[42]探讨了强度参数对岩质隧洞围岩稳定性分析的影响。郑颖人等^[43]对土质隧洞的围岩稳定性进行了分析,研究了隧洞围岩安全系数与衬砌安全系数的算法以及隧洞设计计算方法。陈星等^[44]通过 ANSYS-ADINA 和 ANSYS-FLAC 接口程序,建立了 ADINA、ANSYS 和 FLAC 同套网格模型,较全面地剖析了不同计算程序(有限元法和有限差分法)、不同屈服准则(M-C 和 D-P 准则)对强度折减安全系数的影响。肖强等^[45]对无衬砌黄土隧洞的静力稳定性进行了探讨。郑颖人等^[46]通过试验研究了隧洞的破坏机理和深浅埋分界标准,指出浅埋拱形隧洞的破坏来自拱顶,深埋隧洞的破坏来自侧壁。

1.2.2 黄土隧道地震动稳定的国内外研究现状

根据文献[47],地下结构的地震响应分析理论是基于地上建筑结构的分析理论发展而来。20 世纪 50 年代以前,国内外地下结构的抗震设计以日本学者大森房吉提出的静力理论为基础。20 世纪 60 年代初,苏联学者应用弹性理论求解地下结构均匀介质中关于单连通和多连通域中的应力应变状态,从而得出了地下结构地震力的精确解和近似解。20 世纪 70 年代,日本学者通过现场观测和模型试验,建立了数学模型,提出了反应位移法、应变传递法和地基抗力法等实用分析法。20 世纪 80 年代末至 20 世纪 90 年代初, Wolf 和 Song 又提出了递推衍射法。

随着科学技术的发展,地震作用下地下结构的研究得到了长足的发展,其研究方法主要有三种,即地震观测、实验研究和理论分析。通过地震观测得到影响地下结构地震反应的因素是地基变形而不是地下结构的惯性力。实验研究有人工震源实验和振动台实验。对于人工震源实验,由于起振力较小,因此实验结果很难反映出结构物的非线性和周围介质等因素对地下结构地震反应的影响;对于振动台实验,由于能较好地把握地下结构的地震反应特性、地下结构与周围介质之间的相互作用等问题,得到广泛应用,但也存在着尺度效应、实验室条件与现场条件不同的缺陷。理论分析大致分为解析法、半解析半数值法和数值法,具体介绍如下。

1. 田村重二郎的质量弹簧模型法

田村重二郎的质量弹簧模型法^[48]是针对地震作用下沉管隧道分析提出的,假定:

(1) 地面以下一定深度处存在着一基岩面。

(2) 地表的振动不受隧道存在的影响。

(3) 剪切振动是地表层产生位移的主要因素,同时它对隧道中产生的地震应变影响最大。

(4) 根据质量弹簧模型计算所得的隧道纵向地表层位移,将隧道按弹性地基梁进行动力分析。

(5) 忽略隧道本身的惯性力。

2. 福季耶娃法

福季耶娃法认为:对于P波和S波,当波长大于隧道洞径的3倍、隧道埋深较大(大于洞径3倍)和隧道长度大于洞径5倍时,地震反应的动力学问题可用围岩结构在无限远处承受一定荷载的弹性力学平面问题求解解答,即拟静力法^[49]。

3. John 法

John 等^[50]认为,由地震波引起的地下结构承受的地震荷载按其受载方式可分为弯曲荷载、横向荷载和轴向荷载。

4. Shukla 法

Shukla 等^[51]采用拟静力方法来考虑土体与结构的相互作用,建立了地下结构的数学模型,并认为地震波在长大的地下结构内传播时会产生横向应力、轴向应力和弯曲应力。

5. 反应位移法

20世纪70年代,日本学者从地震观测着手,提出了地下线状结构物的反应位移法,即用弹性地基梁来模拟地下线状结构物,从而计算隧洞、管道等的地震反应^[47]。同时,日本学者还根据长期地震观测和波动理论分析的结果提出了两种实用分析方法,即围岩应变传递法和地基抗力系数法。

6. BART 法

BART 法是针对地下结构的实际破坏特点,提出了地下结构应具有吸收强变形的延性,而且不丧失承受静载的能力^[52]。

7. 递推衍射法

递推衍射法由 Dasgupta 提出,而后经过 Wolf 和 Song 的发展^[47]。它的基本思想是为了计算边界阻抗,将一无限域 $B(a)$ 当做由无限个几何形状相同的单体域 $F(m)$ 组成,前者的边界阻抗可通过后者的动力刚度矩阵运用一般的有限元列式求得。

8. 地震系数法

地震系数法是把地震作用简化为静止作用的力进行分析,将力施加在结构的

重心处,其大小为结构的重量乘以设计地震系数^[53]。

9. 等代地震荷载法

该方法旨在对地铁车站和区间隧道衬砌结构的设计,建立用于计算地震响应的等代结构力学方法,并力求将动力问题的计算简化为等效静力问题求解^[54,55]。

10. 数值方法

随着计算机技术的飞速发展,数值方法在近30年来得到长足的发展。按照求解域的不同,有频域分析法和时域分析法;按求解方法的不同,包括有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、有限差分法(FDM)、离散元法(DEM)和嫁接法(cloning method)等。

现有文献已利用解析法和数值方法对隧道等地下结构的地震反应分析进行广泛的研究。例如,Krauthammer等^[56]采用解析法求解了自由场地在近场和远场边界上的动位移和动应力,并求解了地下结构的地震反应。杨光等^[57]采用设置人工透射边界的有限元方法计算了含有地下隧道的地基在SH波和Rayleigh波作用下的地震反应,并验证了有限元-人工透射边界法求解此类问题的有效性。姜忻良等^[58]采用有限元-无限元耦合法进行了地下隧道-土动力相互作用分析,并用该法分析了均质软土中地下隧道结构侧壁顶端的动位移反应。Chen等^[59]基于子结构法开发了土-结构动力相互作用分析专业软件SASSI 2000,并对日本大开地铁车站结构进行地震反应分析。周健等^[60]研究了行波情况下地下建筑物动力反应。陈国兴等^[61]、庄海洋等^[62]采用整体有限元法分析了软土隧道的地震反应,讨论了软土地基上浅埋隧道的地震内力反应分布特征和对周围场地设计地震动的影响规律。刘晶波等^[63]采用复反应分析法研究了地铁盾构隧道的地震反应特性。李彬等^[64]利用Flush软件对一双层地铁车站进行了地震反应分析。庄海洋等^[65]采用动力塑性损伤模型模拟混凝土在循环荷载下的非线性特性,对两层双柱岛式地铁车站结构、双洞单轨地铁区间隧道进行了非线性地震反应分析。张鸿等^[66]对地震作用下地铁隧道进行了非线性分析。杨军^[67]研究了截面形式对浅埋隧道抗震性能的影响。孔戈等^[68]研究了盾构隧道的横向地震响应规律研究。余芳涛^[69]探讨了施工过程中地应力释放率对隧道动力稳定性的影响。杨小礼^[70]对浅埋大跨度连拱隧道进行了地震反应分析。赵源等^[71]研究了地震动入射角度对地下结构地震响应的影响。杨小礼等^[72]对水平地震力作用下浅埋偏压隧道的松动围岩压力进行了研究。陈灿寿等^[73]研究了浅埋地下结构顶板在竖向地震作用下的动力响应。王兰民等^[74]研究了利用爆破模拟地震动条件下黄土场地的震陷情况。

随着我国西部地区水利、交通、城市等基础设施建设的发展,黄土地区隧道等地下结构的建设越来越多,同时,人们也在这方面开展了大量的研究工作。陈国兴等^[75]对黄土窑洞按最大拉应力理论进行了准静态和地震动力响应分析。高峰等^[76]分别按平面应变和空间三维问题对黄土窑洞按最大拉应力理论在各种地震作用下进行了时间历程分析。刘坚等^[77]对建筑物与黄土隧洞连体结构进行了抗震

分析。高丽等^[78]以某黄土公路隧道为研究对象,研究了其在8度地震载荷作用下的动力时程反应。史良^[47]对黄土隧道进行了抗震设计研究。

随着科学技术的发展,对地下结构进行强度分析的同时,人们也对地下结构的稳定性进行了较为广泛的研究。刘镇等^[79]运用协同学与混沌动力学,分析了隧道变形失稳过程的非线性动力学演化特征。陈立伟等^[80]、彭建兵等^[81]将黄土视为弹塑性材料,采用 Drucker-Prager 屈服准则对黄土洞穴进行了地震作用下的应力分析。张金柱等^[82]对郑西客运专线黄土隧道洞口高边坡稳定及隧道地震作用动力响应进行了研究。这些研究为地震作用下黄土隧道结构的强度和稳定分析奠定了坚实的基础,所不足的是强度和稳定分析中虽进行了应力、应变和位移变化规律的研究,但其重点是隧道衬砌结构的研究,且不能确定隧道结构的实际破坏情况,无法算出隧道的安全储备系数。为了得到地震作用下地下结构的破坏情况和安全储备系数,现有文献已做了一些工作,Wang 等^[83]利用强度折减法求解了重力坝的地震稳定系数。

由此可知,对于隧道结构的强度和稳定性分析,加速度法和惯性力法虽然已经被采用,但峰值加速度时应力和位移未必是最大,惯性力法的放大系数取值很大程度上取决于经验。现有文献虽利用时程分析法对隧道等地下工程进行了强度和稳定分析,但由于弹性模量 E 和泊松比 μ 很难测得近似值,致使结论与实际大相径庭。根据工程实践经验,对于隧道结构的稳定性分析重点应放在围岩结构和初次衬砌结构上,而对于黄土隧道结构,围岩结构的稳定直接关系到整个结构的稳定性。

综上所述,随着工程建设的飞速发展和西部大开发的顺利推进,高烈度黄土地区的隧道建设将越来越多,这些隧道的安全程度能否满足正常使用状态成为一个悬而未决的问题,定量估计黄土隧道的地震动安全储备迫在眉睫。

1.2.3 黄土动参数研究现状

李启鹗等^[84]在模拟地震荷载作用下,对西安地区原状黄土的动力特性进行循环三轴实验。结果表明,影响黄土剪切模量和阻尼比的主要因素除了剪应变幅值、孔隙比和平均有效周围压力外,还应当考虑黄土的结构性和湿度,包括地质成因等。Cui 等^[85]在非饱和土的扩展弹塑性本构关系模型的框架下,利用渗透控制吸力三轴仪进行了实验。各向同性加载试验证实了该模型的主要特点是吸入量变化的影响,并允许直接测定的液相曲线,显示了压实非饱和土与软土之间的一些相似之处,如倾斜的椭圆形式的收益率曲线,结果由各向异性的应力状态主要在压实。Vanapalli 等^[86]介绍了土-水特征曲线和非饱和土相对于基质吸力和剪切强度之间的关系。利用分析模型来预测土壤方面的剪切强度;该方法是利用土壤-水特征曲线和饱和抗剪强度参数,将预测剪切强度计算模型的结果与实验结果进行比较。骆亚生等^[87]选取西安、兰州、太原三个典型黄土地区作为研究对象,对不同初始