

高烈度地震区山岭隧道 工程抗减震技术

申玉生 高 波 著
王英学 周佳媚



科学出版社

高烈度地震区山岭隧道 工程抗减震技术

申玉生 高波 王英学 周佳媚 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要以作者所参与的科研项目及汶川地震后隧道工程抗减震技术发展状况为背景,基于隧道震害调研的资料分析,分别针对隧道洞口破碎段和洞身不良地质段两种情况,分析强震区山岭隧道结构动力响应特性,提出不同条件下隧道结构的抗减震技术措施,同时研发一种穿越不良地质地段隧道抗震型结构(获得发明专利),并通过大型振动台模型试验的验证,成功应用于雅西高速公路强震区隧道工程建设,取得良好的抗减震效果。

本书可供高烈度地震区隧道工程抗减震措施的设计、施工人员以及科研工作者参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高烈度地震区山岭隧道工程抗减震技术/申玉生等著. —北京:科学出版社,2015.6

ISBN 978-7-03-044521-6

I. ①高… II. ①申… III. ①地震地区-山岭隧道-隧道工程-防震设计
IV. ①U452.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 121796 号

责任编辑:张晓娟 孙 芳 乔丽维 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:21 1/2

字数:420 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

20 世纪以来,我国已经经历了 4 个地震活跃期,现正在经历第 5 个地震活跃期。近段时间在欧亚地震带(西南地区)地球内部活动强烈,地震活动频繁。新疆于田 7.3 级地震、汶川 8.0 级地震、玉树 7.1 级地震、芦山 7.0 级地震同属一个地块(巴颜喀拉板块边缘)。作为我国交通命脉的铁路、公路和城市地铁遍及各地,在高烈度地震区复杂地质条件下修建隧道工程是无法回避的问题。

长期以来,人们一直认为地下结构受到周围岩体的约束,其抗震性能比地面结构好,对地震区内地下结构的动力响应和抗减震问题没有给予足够的重视。但是近二十年来,在世界范围内发生的几次强震中,隧道结构均遭受了严重破坏,如 1995 年日本阪神地震(7.2 级),灾区 10% 的山岭隧道受到了严重破坏,必须进行修复加固;1999 年中国台湾集集地震(7.6 级),在调查的 57 座隧道中有 49 座受到了不同程度的破坏,包括衬砌混凝土块龟裂、掉落,甚至钢筋弯曲等;2008 年汶川地震(8.0 级),在调查的 56 座隧道中有 33 座受到了不同程度的破坏,其中处于发震断层附近的龙溪隧道、龙洞子隧道等更是遭受严重毁坏。

大量山岭隧道工程震害实例证实传统的隧道结构抗减震技术已经很难满足高烈度地震区的隧道抗震设计要求,同时目前尚无高烈度地震区隧道工程抗震设计规范,隧道工程的设计与施工只能根据经验及地上建筑物的相关规范进行设计,具有一定的随机性。隧道工程在穿越洞口段明暗分界处和不良地质地段(尤其是活动断层)时,结构与岩土体之间的地震动的相互作用关系非常复杂,强震作用下不良地质地段山岭隧道结构抗减震新技术需要进行深入研究,同时隧道新型抗减震设防理念应贯穿山岭隧道选线、设计、施工和维修等各个阶段,才能够提高强震区山岭隧道结构的抗震性能。

本书在隧道震害调研的基础上,采用理论分析、振动台模型试验和数值模拟的方法,重点针对高烈度地震区山岭隧道洞口段和不良地质段的结构动力响应特性进行研究,通过采取不同抗减震技术措施和新型抗减震结构,减弱地震动对隧道结构的动力响应。最后提出强震区山岭隧道结构抗震技术可以概括为“减”、“让”、“抗”设计施工理念,即:“减”是改善围岩地质条件,减弱地震荷载传递;“让”是允许隧道衬砌随地震发生永久变位,释放地震的变形能;“抗”是提高衬砌自身刚度,抵抗地震破坏荷载。同时本书提出的一些山岭隧道抗减震技术措施和抗震型结构已经在雅西高速公路隧道工程中得到应用,取得了良好的抗减震效果。

本书的研究成果具有广阔的应用前景和实际应用价值,可以为高烈度地震区

山岭隧道抗减震新技术的优化设计、施工和推广应用提供重要的理论依据和技术支撑。

全书共9章,包括绪论、隧道震害调研、地震动力分析理论、洞口段和不良地质地段隧道结构动力响应及其抗减震措施、隧道结构安全模糊综合评判方法、强震区山岭隧道结构模型试验及其抗减震措施的应用等。主要分工如下:第1章由高波撰写;第2~4章由申玉生撰写;第5章由申玉生、邹成路撰写;第6章由高波、吴耀宗撰写;第7章由靳宗振、朱长安撰写;第8章由申玉生、周佳媚、吴冬撰写;第9章由王英学撰写,全书由申玉生统稿定稿。

本书是西南交通大学高波教授团队长期从事强震区山岭隧道工程科研成果的积累和总结。在撰写本书过程中,高波教授对本书内容的规划给予了悉心指导;团队成员王英学、周佳媚、全晓娟等提供了部分宝贵资料;同时本书成稿得到了西南交通大学土木工程学院地下工程系何川教授、仇文革教授及广大同事的支持;在资料收集、文档整理等方面,陶双江博士、闻毓民博士、信春雷博士、吴冬博士、王帅帅博士、周裕硕士、陈明奎硕士、侯瑞彬硕士、王京伟硕士等做了大量的工作,在此一并表示感谢。

本书出版获得中国博士后科学基金(20080431267)、国家自然科学基金(41102220、51178398、50878187)、教育部创新团队发展计划(IRT0955)资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者指正。

作者

2014年11月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 发展背景与趋势	1
1.2 地下结构地震响应特性和震害形式	2
1.2.1 地下结构地震响应特性	2
1.2.2 隧道结构震害分析	4
1.3 隧道与地下工程的抗震分析方法	7
1.3.1 地震动分析理论方法	7
1.3.2 地震动计算分析方法	8
1.4 国内外隧道结构抗减震技术研究与应用现状	11
1.4.1 隧道结构抗减震技术发展现状	11
1.4.2 隧道及地下结构减震措施研究	14
1.4.3 大型振动台模型试验研究	16
第 2 章 山岭隧道震害机理分析及修复加固措施	19
2.1 汶川地震概况	19
2.1.1 地震区区域地质构造	19
2.1.2 地震形成机制	20
2.1.3 地震波的形成	22
2.2 汶川地震山岭隧道震害特征	23
2.2.1 隧道震害基本概况	23
2.2.2 隧道洞口段结构震害分析	26
2.2.3 隧道洞身段结构震害分析	30
2.2.4 隧道震害的基本特点	33
2.3 山岭隧道地震影响因素	33
2.4 山岭隧道震害机理	38
2.4.1 山岭隧道震害破坏形态	38
2.4.2 山岭隧道震害破坏原因	43
2.5 灾后隧道结构修复加固应用技术	45
2.5.1 洞口及边坡	46
2.5.2 洞门	47

2.5.3	隧道初期支护处理	47
2.5.4	隧道衬砌开裂破坏、渗水	48
2.5.5	仰拱及路面、排水沟等整治修复措施	49
2.5.6	隧道侵限	49
第3章	地下结构地震动力分析理论基础	50
3.1	地震动力理论分析	50
3.1.1	运动方程	50
3.1.2	空间差分方程	51
3.2	动力计算的本构及力学阻尼	52
3.2.1	岩土动力本构模型	52
3.2.2	力学阻尼	55
3.3	动力计算的边界条件	58
3.3.1	边界元	58
3.3.2	黏性边界	59
3.3.3	黏弹性边界	60
3.3.4	自由场边界	61
3.4	地震波校正与输入	63
3.4.1	基线校正	63
3.4.2	时频分析	66
3.4.3	滤波	68
3.4.4	地震动的输入	69
3.4.5	地震波处理实例——徐店子隧道地震波处理	72
第4章	强震区隧道洞口结构动力响应及其减震措施	76
4.1	高烈度地震区山岭隧道洞口段结构的地震动响应研究	76
4.1.1	依托工程概况	76
4.1.2	计算模型参数及模型监测方案	78
4.1.3	隧道结构横向地震动力响应分析	81
4.1.4	隧道结构纵向地震动力响应分析	85
4.2	强震区山岭隧道围岩注浆预加固方案优化	88
4.2.1	隧道围岩的注浆加固形式	88
4.2.2	不同注浆形式下隧道结构动力响应研究	89
4.2.3	隧道围岩全环间隔注浆预加固方案研究	93
4.3	山岭隧道减震层参数优化研究	99
4.3.1	减震层位置变化对隧道结构动力响应的影响分析	100
4.3.2	减震材料变化对隧道结构动力响应的影响分析	109

4.3.3	减震层厚度变化对隧道结构动力响应的影响分析	115
4.3.4	隧道洞口段结构抗震与减震动力分析	118
第5章	洞口段软硬岩交界面隧道结构抗减震技术	123
5.1	依托隧道工程概况	124
5.2	穿越软硬岩交界面隧道洞口段结构动力响应	125
5.2.1	交界面倾角对隧道结构地震动力影响分析	125
5.2.2	交界面位置对隧道结构地震动力影响分析	138
5.3	洞口段软硬岩交界面隧道结构抗减震措施	147
5.3.1	隧道围岩全环注浆技术方案	147
5.3.2	隧道结构减震缝的减震效果研究	153
第6章	强震区公路隧道结构安全模糊综合评判方法	160
6.1	隧道结构安全评价因素集的建立	160
6.1.1	隧道衬砌特征	161
6.1.2	工程地质特征	163
6.1.3	地震烈度	165
6.1.4	隧道结构安全性评价体系	167
6.2	隧道结构安全等级及其评判基准	168
6.2.1	隧道安全等级划分	168
6.2.2	隧道结构安全影响因素的评判基准	169
6.2.3	综合评判模型中隶属函数的确定	170
6.2.4	综合评判模型中权重的确定	172
6.3	强震区山岭隧道结构安全模糊综合评判	175
6.3.1	依托隧道工程概况	175
6.3.2	隧道结构安全综合评判	175
6.3.3	强震区公路隧道结构安全性评价软件	180
6.4	隧道结构安全性数值验算	184
6.4.1	V级围岩段隧道结构安全评估	184
6.4.2	IV级围岩段隧道结构安全评估	186
第7章	强震区穿越断层破碎带山岭隧道抗减震技术	190
7.1	隧道走向与断层位置关系	190
7.2	跨断层隧道结构纵向地震动力响应	191
7.2.1	隧道工程计算模型	191
7.2.2	跨断层隧道地震动力响应规律	193
7.2.3	断层倾角对隧道结构地震动力响应的影响	199
7.2.4	断层宽度对隧道地震动力响应的影响	203

7.2.5	变形缝对隧道结构地震动力响应的影响	207
7.3	跨断层山岭隧道横向地震动力响应	211
7.3.1	隧道计算模型建立	211
7.3.2	隧道结构横断面动力响应特性	213
7.3.3	隧道结构纵向动力响应特性	231
7.4	穿越断层区山岭隧道柔性结构减震技术	233
7.4.1	跨断层隧道柔性减震结构的设计构思	233
7.4.2	隧道柔性减震结构的关键参数优化	235
7.4.3	柔性结构的减震机理探讨	240
第8章	强震区山岭隧道结构抗减震措施验证与分析	243
8.1	洞口段隧道结构动力特性及其减震效果试验研究	243
8.1.1	模型试验依托工程概况	243
8.1.2	模型试验振动台基本参数	243
8.1.3	模型试验动力相似参数设计	244
8.1.4	试验相似材料配制	246
8.1.5	模型试验方案	247
8.1.6	动力模型试验及结果分析	248
8.2	跨断层隧道结构抗减震措施振动台试验研究	266
8.2.1	依托工程概况	266
8.2.2	振动台模型试验概况	267
8.2.3	模型试验动力相似关系	268
8.2.4	模型试验的相似材料	270
8.2.5	模型试验方案	272
8.2.6	模型试验结果分析	276
8.3	强震区山岭隧道振动台模型试验相关技术问题	286
8.3.1	振动台模型箱设计	286
8.3.2	模型试验相似参数及材料确定	290
8.3.3	模型试验测试注意问题	293
8.3.4	振动台隧道断层模型设计	294
第9章	强震区穿越断层山岭隧道抗减震措施应用	296
9.1	跨断层山岭隧道结构震害特征	296
9.1.1	阪神大地震跨断层隧道震害情况	296
9.1.2	汶川地震跨断层山岭隧道震害情况	300
9.2	穿越不良地质段隧道抗减震结构形式	310
9.3	强震区跨断层隧道抗震型结构的工程应用	314

9.3.1	乌鞘岭隧道跨断层超挖设计	314
9.3.2	土耳其 Bolu 公路隧道铰接设计	315
9.4	雅西高速公路跨断层扯羊隧道结构隔离效能设计	316
9.4.1	过断层带隧道结构设计方案研究	316
9.4.2	跨断层隧道结构数值模拟分析	319
9.4.3	跨断层隧道减震构造措施应用	323
参考文献	327

第 1 章 绪 论

1.1 发展背景与趋势

近年来全球各地地震频繁密集,根据中国地震信息网的相关记录,自 2012 年 1 月到 2014 年 6 月,全球 6 级以上地震共计 363 次,7 级以上地震共计 55 次,最大震级是 8.6 级(2012 年 4 月印度尼西亚苏门答腊北部附近海域)。其中圣克鲁斯群岛在 2013 年 2 月两天内连续发生 5 次 7 级以上地震,最大震级为 7.6 级。强震往往沿着与地质构造有一定联系的地震带分布,地震越大,分布的成带性越明显,图 1.1 绘出了 20 世纪全球 7 级以上强震分布。从图 1.1 可以看出,全球大部分 7 级以上地震集中分布在两大地震带:环太平洋地震带和地中海-南亚地震带。

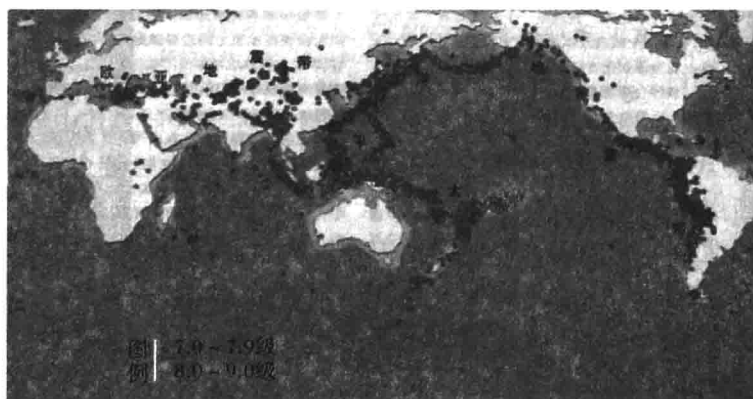


图 1.1 20 世纪世界强震震中分布图

我国处在世界两个最活跃的地震带上,东部濒临环太平洋地震带,西部和西南部位于地中海-喜马拉雅地震带,是世界上最大的大陆浅源强震活动区,震害具有分布广、强度高、危害大等特点。另外由于断裂的分布与断裂的活动是地震发生的主要原因,尤其是一些深大活动断裂,往往是一些发生强烈地震的构造条件,在我国西部和西南部分布着大陆断裂地震带,断层、节理裂隙发育,断裂破碎带密布,所以强震发生相对频繁,地震灾害是我国最主要的地质灾害。

地震将给人们带来严重的生命和财产损失,而对建筑结构进行合理的设防是减少损失的重要途径。交通和土建工程都不同程度地受到了破坏,交通工程的破坏

使抗震救灾工作陷入极大的困难中,地震不仅造成公路设施路、桥、隧的直接毁坏,而且地震引发的崩塌、滑坡、泥石流以及落石(飞石)等次生灾害数量多、分布广、类型复杂、破坏巨大,举世罕见,这些次生地质灾害对公路设施造成了极大毁坏。

从历次大地震及世界范围的工程结构物震害情况看,通常情况下隧道工程震害比房屋、桥梁等地面建筑轻微,而隧道工程以其独特的抗震性能经受了强震的考验。另外,在强震下,隧道工程震害依然比较突出,如中国汶川大地震、台湾集集地震、日本关东大地震、阪神大地震等强震都造成了断层破裂带、衬砌缺陷段隧道结构的破坏,且隧道破坏后修复困难,说明强震条件下的隧道抗减震问题同样需要引起高度关注。我国现有的山岭隧道有相当部分位于地震区,尤以西南、华北和西北的铁路、公路隧道为甚,而城市地铁区间隧道也有相当数量处于高地震烈度区。据不完全统计,在全国 300 多个城市中,有一半位于地震基本烈度为 7 度和 7 度以上的地震区,在 23 个百万以上人口的特大城市中,有 70% 为 7 度和 7 度以上的地震区。20 世纪以来,我国已经经历了 4 个地震活跃期,现在正在经历第 5 个地震活跃期,作为我国交通命脉的铁路、公路和城市地铁遍及各地,在高烈度地震区修建隧道难以避免,长大隧道作为国家生命线工程的主体结构之一,必须对其地震震害给予高度重视,并从中吸取经验教训,将隧道抗减震设防理念贯穿各类隧道选线、设计、施工和维修等各个阶段。

在山岭隧道选线时,高烈度地震区修建隧道工程的问题不可避免,以四川省高速公路网 2005~2030 年的规划为例,规划里程达 8600km,其中大量的隧道将建在高烈度地震区。目前在高海拔、高烈度地震区修建山岭隧道工程,尤其在隧道洞口段、断层破碎带等不良地质地段,大量的隧道工程抗减震技术问题亟须进一步解决,如在高烈度地震区修建隧道安全性评价方法、山岭隧道在强烈地震作用下的动力响应规律、山岭隧道抗震设防措施的设计新方法应用、隧道震害及其裂缝成因机理研究、穿越不良地质地段隧道新型结构的研发等,这些都是科研和设计人员所面临的急迫需要解决的问题。

我国在高烈度地震区山岭隧道的震害机理及抗减震技术方面的研究有些滞后,长期以来,我国隧道抗震设计主要沿用地面结构设计的方法,至今尚未正式颁布隧道及地下工程的抗震设计规范或指南。因而,开展对地下结构抗震方面的理论分析、试验研究、数值模拟分析及抗减震技术应用研究具有重要的工程应用价值,对西部山区高烈度地震区交通隧道工程的建设提供重要的技术支撑。

1.2 地下结构地震响应特性和震害形式

1.2.1 地下结构地震响应特性

地下结构由于受到周围岩体或土体的约束,一直被认为具有良好的抗震性能

(相对于地面结构而言),因而在很长时期内,地下结构的震害问题远不如地面结构那样受到重视。但是随着地下结构数量的增多和地下结构震害的频繁出现,地下结构的震害问题受到越来越多的关注。对隧道震害资料的收集,国内外都已做了很多工作,杜克、斯蒂文斯、道丁、欧文等分别对隧道震害进行了大量研究,并建立了相应的数据库。Sharma等在前人研究的基础上,又收集了自唐山地震以来的52个隧道震害实例,使建立的隧道震害数据库成为目前世界上占有资料最多的数据库,共收集世界范围内85次地震中反映隧道稳定性的192篇报告。国内的潘昌实、高波、王明年、周德培、李育枢等也对隧道和地下结构的地震灾害规律进行了研究,取得了一些重要的研究成果,分析隧道的震害形态及其机理,对正确采取相应的隧道结构的抗减震措施及强震区修建隧道工程具有重要意义。

地震时地下结构物的破坏是一个不断变化的、非线性的、累积性的复杂过程,包括结构或构件从出现裂缝至严重损坏过程中各种动力特性(结构基本周期、刚度、阻尼等)的非线性变化,结构变形导致结构内力的重分布,使结构发生破坏。地下结构地震反应的特点和地面结构有明显的差别。如果以入射的地震波作为输入,结构的地震反应作为输出,则地面结构相当于一个强的滤波系统,频率与结构自振频率相近的地震波由于共振效应将被显著放大,因而随着结构刚度和质量的变化,输出的结构反应的频率成分和振动的持续时间都将发生很大的变化。即使在入射地震波结束后,结构的衰减自由振动仍将持续一段时间。地下结构则不同,它受到周围岩土介质的强约束作用,其地震反应的波形与入射地震波相比,基本上不发生变化。而且,只要地下结构的尺寸与地震波波长相比较小,地下结构的存在对地震波的扰动就很小,其地震反应的波形与自由场所得到的波形基本一致,实际的观测资料也证明了这一点。

通过对已有震害的分析总结发现,地下结构地震响应特点不同于上部结构,有其独特的振动特性和致灾机理。地下结构的地震反应特性体现在以下几个方面:

(1) 地下结构的振动变形受周围岩土介质的约束作用显著,结构的动力反应一般不明显表现出结构自振频率的特征,地面结构的动力反应则明显表现出结构自振频率的特征。

(2) 地下结构的存在对周围地基地震波的影响一般很小(指地下结构的尺寸相对于地震波波长较小的情况),地面结构的存在则对该处自由场地的地震波发生较大的扰动。

(3) 地下结构的振动形态对地震波入射方向十分敏感,地震波的入射方向发生较小的变化,地下结构各点的变形和应力将发生较大的变化,而地面结构的振动形态受地震波入射方向的影响较小。

(4) 长线形的地下结构在振动中各点的相位差别十分明显,地面结构各点在振动中的相位差别不是很明显。

(5) 地下结构在振动中的主要应变一般与地震加速度大小的联系不是很明显,而对地震所产生的位移场大小反应比较明显,对地面结构来说,地震加速度是影响结构动力反应大小的一个主要因素。

(6) 对地下结构和地面结构来说,它们与地基的相互作用都对其动力反应产生重要影响,但影响的方式和影响的程度是不相同的,主要由结构的尺寸、质量、刚度以及地基的物理力学性质决定。

(7) 当地下结构的埋深超过一定深度后,埋深对地下结构的地震动力反应影响将不明显。

(8) 地震波的高频分量可能会导致岩石和混凝土的剥裂,但这仅对震中距很小的地下结构有显著影响。

1.2.2 隧道结构震害分析

1995年日本阪神地震造成灾区内10%的山岭隧道受到严重破坏;1999年中国台湾集集地震后,台湾中部距发震断层25m范围内的44座受损隧道中,严重受损者达25%,中等受损者达25%。2008年中国汶川大地震中,地下结构的基础设施同样遭受了较为严重的破坏,甚至出现了大范围隧道整体塌陷、封洞等极为罕见的震害。

国内外学者对地下结构的震害已经做了大量的收集工作。国外学者对资料进行了归类分析,将地下结构地震破坏分为6种情况:①洞室变形;②洞室顶部的偶然落石;③洞顶或洞壁倒塌;④沿相交断层的位移;⑤洞室围岩的剥落;⑥支护或衬砌的扰动或变形等。并总结了覆盖层厚度、岩石类别、支护类型、震级和震中距等因素对隧道震害的影响。

国内学者对影响震害的因素归纳如下:①同一地震烈度地震下,地下结构遭受破坏的程度一般比地上结构小得多;②地下结构随覆盖层厚度的增大,其破坏程度降低,当覆盖层厚度小于50m时,地下结构容易遭遇地震破坏;③地下结构的震害程度与地面加速度峰值有关;④基岩的物理力学性质对地下结构的破坏有直接影响,建筑在崩积层内的地下结构要比在坚固围岩的地下结构更易受到破坏,穿越活动断层或断层破碎带的地下结构在地震中也容易受到严重破坏;⑤施工质量不能保证、采用木支撑、回填不密实的隧道容易在地震中受到破坏;⑥当地下结构在地震作用下存在明显惯性或周围介质与结构间的刚度失配时,结构会产生过度变形而破坏;⑦结构断面形状及刚度发生明显变化的部位在地震作用下容易发生破坏。

由此可知,国内外学者对地下工程的震害已进行了大量分析,但每次地震成

因、机制不同,造成的隧道震害情况有较大的区别。

地震灾害具有突发性强、破坏性大的特点,通过对地下结构的震害进行调查分析,归纳出地下结构震害的主要表现形式有地下管道的破坏和隧道的破坏。

1. 地下管道的破坏形式

地下管道主要由管段和管道附件(弯头、三通和闸门等)组成,地震时一般有3种基本破坏类型:①管道接口破坏;②管段破坏;③管道附件以及管道与其他地下结构连接处破坏。其中以管道接口(或接头)破坏居多,与管段本身强度相比,接口是抗震薄弱环节。管道接口通常分为刚性接口和柔性接口两种,其中刚性接口有焊接、丝扣连接等,采用橡胶圈的承插式接口和法兰连接接口属于柔性接口。震害表明,柔性接口的震害率明显低于刚性接口,其原因是前者可以产生较大的变形,具有良好的延性。接口破坏形式有接头拉开(或拔脱)、松动、剪裂、坍塌等。管段的破坏形式有管段开裂(纵向裂缝、环向裂缝和剪切裂缝等)、折断、拉断、弯曲、爆裂,管体结构坍塌,管道侧壁内缩,管壁起皱等。管道破坏率及破坏形式因管道材料、接头形式等管道本身特点而有差异,并与周围场地土壤条件有关。

2. 隧道结构破坏形式

1) 衬砌的剪切移位或错位

当隧道建在断层破碎带上时,常常会发生这种形式的破坏。由于断层两侧围岩相对位移差,造成隧道发生剪切滑移,如图 1.2 所示,或者隧道在竖直方向发生拉裂破坏,在水平方向错位,整个隧道发生严重破坏。

2) 边仰坡破坏造成的隧道坍塌

在地震过程中,经常会发生隧道边仰坡失稳,造成衬砌结构承受更大的围岩压力,从而导致隧道坍塌破坏,如图 1.3 所示。

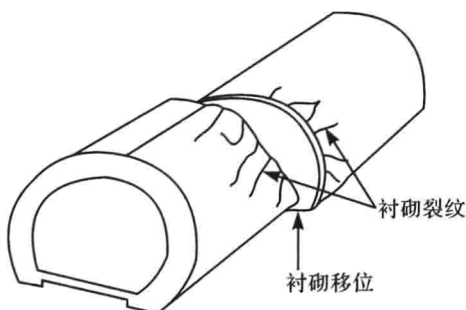


图 1.2 衬砌剪切移位图

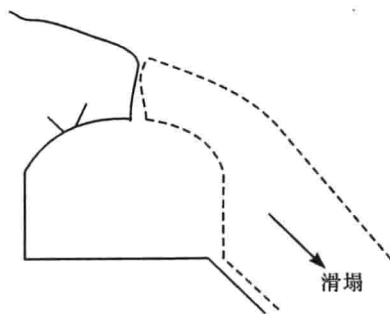


图 1.3 边仰坡破坏造成的隧道坍塌

3) 隧道衬砌开裂

在地震中,隧道衬砌开裂是最常发生的现象。这种形式的衬砌破坏又可分为

纵向裂缝(图 1.4)、横向裂缝(图 1.5)、斜向裂缝(图 1.6)、斜向裂缝进一步发展所致的环向裂缝(图 1.7)、底板裂缝(图 1.8)以及沿着孔口(如电缆槽、避车洞或避人洞)发生的裂缝(图 1.9)。

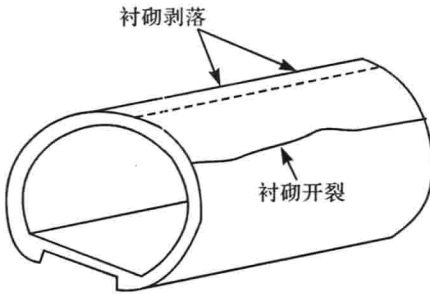


图 1.4 衬砌纵向裂缝图

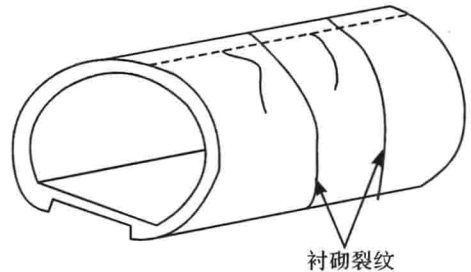


图 1.5 衬砌横向裂缝图

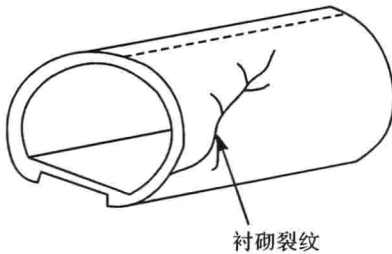


图 1.6 衬砌斜向裂缝图

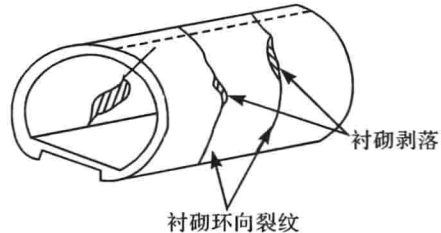


图 1.7 衬砌环向裂缝图

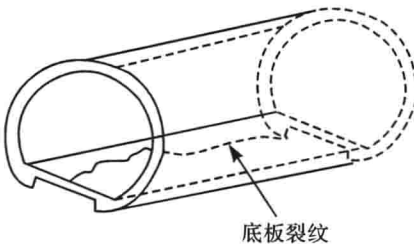


图 1.8 底板裂缝图

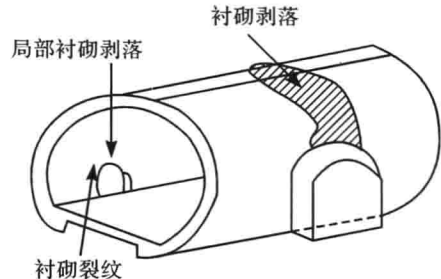


图 1.9 孔口附近衬砌裂缝图

4) 边墙变形或底板隆起

图 1.10 为由显著的边墙向内变形和底板隆起造成的隧道结构破坏。这种变形可以造成边墙衬砌的大量开裂,路面严重破坏,甚至导致边沟的倒塌。

通过对地下结构震害表现形式及具体发生条件的研究,人们将因地震造成的地下结构破坏分为两种类型:一种是由于围岩变位而在地下结构中产生强制变形所引起的破坏,如衬砌的剪切移位;另一种是结构在地震惯性力作用下产生的破坏。其中,第一种类型的破坏多发生在岩性变化较大、断层破碎带、浅埋地段或隧

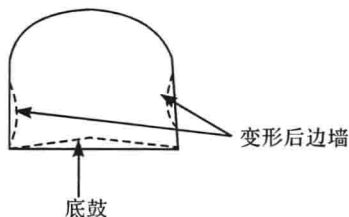


图 1.10 边墙变形

道结构刚度远大于地层刚度的围岩中;第二种类型的破坏多发生在洞口附近,这时地震惯性力的作用表现得比较明显。

1.3 隧道与地下工程的抗震分析方法

地下结构抗震理论是随着地面建筑抗震理论的发展而发展的,从 20 世纪 50 年代以后,日本学者从地震观测资料入手,通过模型试验,建立数学模型,根据地震波的多重反射理论,使地下软基隧道和成层地基的抗震研究获得重大进展,地下结构的抗震设计逐渐形成体系,并形成了不同的抗震设计方法。

总体来看,隧道及地下结构抗震问题的基本研究途径主要有:原型观测、试验研究和理论分析。

1.3.1 地震动分析理论方法

地下结构抗震设计计算理论是随着地面建筑抗震设计计算理论的发展而发展的。1900 年,日本大森房吉教授提出了计算地震荷载的静力理论,假定地震时结构各部分都有一个与地震加速度大小相同的加速度,作用于结构上的水平地震力等于结构自重乘以某一地震系数来计算结构的变形与内力(地震系数法)。该方法简单方便,且经受过一般地震的考验,许多国家的抗震设计规范都采用过,我国地下结构的抗震设计自 20 世纪 60 年代以来沿用地震系数法,至今仍被隧道设计规程所采用。该法目前仍然是国内外地下结构抗震设计的基础。

研究地震运动对地下结构的影响所采用的理论主要有两类,即振动理论和波动理论。振动理论以求解结构运动方程为基础,把介质的作用等效为弹簧和阻尼,再将它作用于结构,然后如同分析地面结构模型一样进行分析;波动理论以求解波动方程为基础,把地下结构视为无限线弹性(或弹塑性)介质中孔洞的加固区,将整个系统(包括介质与结构)作为对象进行分析,不单独研究荷载,以求解其波动场与应力场。两种理论具体的计算方法有数值算法、解析法和简化算法。