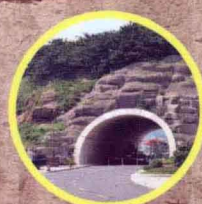
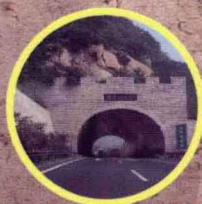


隧道

Tunnel Seismic and Shock Absorption

抗震与减震

王明年 林国进 于丽 崔光耀 著



科学出版社

隧道抗震与减震

王明年 林国进 著
于 丽 崔光耀

科学出版社

北 京

内 容 简 介

5·12 汶川地震使震区公路隧道严重损坏,为提高我国公路隧道的抗震水平,交通部组织相关院校和科研机构开展了公路隧道抗震及减震技术研究。本书是作者对近4年研究成果的总结。本书总结的研究成果对公路隧道的抗减震技术及设计提供了参考,对于解决我国山岭隧道洞口浅埋段及断层破碎带段的合理的抗震设计有着重要的理论意义,这将有助于降低建设成本,同时提高人员、车辆的安全性,对我国公路及铁路隧道的建设具有推广应用价值,对提高西部地区交通科研技术水平和促进西部经济发展也具有十分重要的意义。

本书可作为隧道及地下工程抗震的教科书,也可作为从事土木工程抗震、减震研究及设计人员的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道抗震与减震/王明年等著. —北京:科学出版社, 2012.11

(地下工程与技术丛书)

ISBN 978-7-03-035869-1

I. ①隧… II. ①王… III. ①隧道工程-防震设计-研究 IV. ①U452.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 252726 号

责任编辑: 杨 岭 于 楠 / 封面设计: 陈思思

责任校对: 陈 靖 / 责任印制: 邝志强

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年11月第 一 版 开本: 787*1092 1/16

2012年11月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 460千字

定价: 86.00元

前 言

2008年5月12日14时28分,四川汶川发生了8.0级特大地震,地震造成的灾害是近60年来破坏性最强、波及范围最广、救灾难度最大的一次灾害。四川汶川特大地震重灾区范围超过10万 km^2 ,死亡和失踪人数8万余人,造成直接经济损失8450多亿元。地震共造成21条高速公路、16条国省道干线公路、2.4万 km 农村公路上的隧道、桥梁、涵洞、边坡、路基、路面等建(构)筑物不同程度受损,其中隧道受损较为严重,影响了抗震救灾和灾后重建的顺利进行。

汶川大地震发生后,交通运输部在第一时间组织了全国几十家设计、施工、监理、科研、高校等单位,组成数十个调查组奔赴地震重、极重灾区,对高速公路、国省道干线、典型县乡道路公路隧道现场进行了广泛、详细的调查。调查组冒着余震、落石、塌方、泥石流等危险,克服道路不通、食物短缺、通信不畅等重重困难,经历了调查、复核、分析、补充、完善等多个阶段,获得了大量第一手可靠和珍贵的隧道震害资料。同时,交通部西部交通建设科技项目管理中心立即开展了“公路隧道抗震及减震技术研究”(200831800026)和“汶川地震公路震害评估、机理分析及设防标准评价”(200831800098)等项目的研究工作。四川省交通运输厅也及时开展了“交通科技与汶川地震灾后重建”(100199022)等项目的研究工作。这些科研项目的研究成果不但支撑和满足了汶川地震灾区抗震救灾和灾后重建的需要,而且极大地提高了我国隧道抗震减灾技术水平。作者作为这一事件的亲历者和参与者,觉得有义务和责任总结推广这些用我国广大隧道科技工作者的汗水甚至生命凝结成的科研成果,为我国隧道抗震减灾服务。

本书通过对地震烈度为6~11度条件下56座隧道震害调查资料的统计和分析,揭示了断层破碎带、洞口、普通段隧道的震害特征,给出了隧道设防分区的划分原则,评价了现行隧道抗震设防技术;通过理论研究,深入探讨了隧道洞外结构、洞口浅埋隧道、软硬围岩交界面附近隧道、偏压隧道、错动和非错动断层破碎带隧道、普通段隧道的震害机理;研究了坡率、坡高、隧道埋深、地震波振幅等因素对山岭隧道洞口浅埋段地震动最大加速度的影响规律,建立了山地情况下地震动加速度的计算方法;探明了浅埋隧道上方土柱地震力传递机制,给出了浅埋隧道上方土柱地震力计算方法,提出了隧道衬砌与围岩间弹性抗力系数折减方法,完善了隧道拟静力抗震设计方法;基于隧道洞口鞭梢和临空效应,依据反应位移理论推导出了隧道洞口纵向抗震设计计算公式;在分析断裂粘滑隧道结构变形特性基础上,利用反应位移理论的基本原理,建立了断裂粘滑隧道抗震设计方法;对于隧道抗震技术,提出了洞口浅埋段和断层破碎带(核心)段采用双层钢筋混凝土衬砌,而洞口过渡段和断层破碎带影响段采用单层钢筋混凝土衬砌进行抗震设计思路;对围岩加固抗震措施,提出了根据隧道设计施工条件采用围岩局部注浆和

全环注浆（接触注浆和深层注浆）的方法；对于隧道减震技术，讨论了改变隧道结构本身性能（减震缝）和在隧道衬砌与围岩之间内置减震层的减震原理，并通过动力模型试验，研究了单独设置减震缝和减震层以及两者组合的减震效果，给出了它们最优设计参数；根据震后隧道抢通、保通和恢复重建三阶段的特点和目标，制定了合理的隧道结构震害等级评估方法及相应的处治对策，为隧道震后分阶段修复提供了科学保障。

本书共分为 10 章和 2 个附录，第 1 章为绪论，第 2 章为隧道震害调查方法及设防区段划分原则，第 3 章为隧道震害评估方法及统计特征，第 4 章为隧道震害机理，第 5 章为山岭隧道坡形对地震动峰值加速度的影响，第 6 章为浅埋隧道抗震设计计算方法，第 7 章为断裂粘滑隧道抗震设计计算方法，第 8 章为公路隧道抗震技术，第 9 章为公路隧道减震技术，第 10 章为公路隧道震后修复技术，附录 1 为隧道振动台模型试验，附录 2 为断裂粘滑隧道错动试验。

本书是在总结 5·12 汶川大地震后公路隧道抗震减震技术研究成果基础上完成的，同时书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等，在此对相关作者一并表示感谢。同时感谢西南交通大学土木工程学院学术专著出版基金给予经费资助。虽然我们尽了很大努力，但由于学识水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2012 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国发生的强震情况	1
1.2 影响隧道震害的主要因素	2
1.3 隧道抗震设计计算理论研究现状	6
1.4 隧道抗震技术研究现状	9
1.5 隧道减震技术研究现状	9
第 2 章 隧道震害调查方法及设防区段划分原则	16
2.1 隧道震害调查范围	16
2.2 隧道结构分类	20
2.3 隧道震害分类	20
2.3.1 隧道拱墙震害类型	20
2.3.2 隧道底部震害类型	22
2.4 隧道震害调查方法	23
2.4.1 洞口区域检测	23
2.4.2 隧道掉块坍塌情况调查	23
2.4.3 衬砌强度检测	23
2.4.4 衬砌(初期支护)、路面(仰拱)等背后缺陷检测	23
2.4.5 隧道断面净空检测	24
2.4.6 衬砌、路面(仰拱)结构裂缝及渗漏水调查	24
2.4.7 隧道附属设施震害调查	25
2.5 隧道震害长度确定方法	31
2.6 隧道设防区段划分原则	32
第 3 章 隧道震害评估方法及统计特征	38
3.1 隧道震害评估方法	38
3.2 隧道震害统计特征	39
3.2.1 断层破碎带段隧道结构震害统计	40
3.2.2 洞口结构震害统计	44
3.2.3 普通段隧道结构震害统计	49
3.3 隧道震害总体特点	53
3.3.1 不同烈度区内隧道分布	53

3.3.2	不同烈度区内隧道震害情况	54
3.3.3	隧道不同震害程度所占比例	55
3.4	现行隧道抗震设防技术的评价	55
第4章	隧道震害机理	59
4.1	隧道洞外结构震害机理	59
4.1.1	研究情况	59
4.1.2	地震惯性力分析	60
4.1.3	位移分析	62
4.1.4	位置分析	65
4.1.5	现场震害情况	66
4.1.6	震害机理	67
4.2	洞口浅埋隧道震害机理	67
4.2.1	研究情况	67
4.2.2	洞口段软硬围岩交界面影响分析	67
4.2.3	洞口段覆盖层岩性影响分析	70
4.2.4	现场震害情况	71
4.2.5	震害机理	74
4.3	偏压隧道震害机理	74
4.3.1	研究情况	74
4.3.2	位移分析	75
4.3.3	地震惯性力分析	77
4.3.4	震害机理	77
4.4	断层破碎带段隧道震害机理	77
4.4.1	研究情况	77
4.4.2	无错动断层破碎带段隧道震害机理分析	79
4.4.3	错动断层破碎带段隧道震害机理分析	83
4.4.4	震害机理	89
4.5	断层错动方向对隧道震害影响	90
4.5.1	研究情况	90
4.5.2	隧道纵向影响范围	90
4.5.3	二次衬砌安全性影响	91
4.5.4	围岩安全性影响	93
4.5.5	震害影响	94
4.6	平行断层隧道安全设计距离	94
4.6.1	研究情况	94
4.6.2	二次衬砌安全性影响	95
4.6.3	围岩安全性影响	97
4.6.4	安全设计距离	99

4.7 普通段隧道震害机理	99
第5章 山岭隧道坡形对地震动峰值加速度影响	102
5.1 山坡坡面地震动峰值加速度影响因素分析	102
5.1.1 坡率影响	102
5.1.2 坡高影响	109
5.1.3 基岩上覆土厚度影响	113
5.1.4 地震烈度影响	116
5.1.5 平地与山坡基岩上覆土层地震动峰值加速度放大系数比较	119
5.2 山岭隧道洞口浅埋段地震动峰值加速度确定方法	120
5.2.1 山坡基岩上覆土层地震峰值加速度变化规律	120
5.2.2 山岭隧道洞口浅埋段地震峰值加速度	123
5.3 振动台动力模型试验检验	124
5.3.1 试验数据分析	124
5.3.2 试验检验	126
第6章 浅埋隧道抗震设计计算方法	128
6.1 横断面抗震设计计算方法	128
6.1.1 隧道抗震性能随埋深变化规律	128
6.1.2 浅埋隧道上方土柱地震力传递机制	140
6.1.3 浅埋隧道衬砌的水平地震力计算	146
6.1.4 衬砌与围岩间弹性抗力计算	147
6.2 纵向抗震设计计算方法	151
6.2.1 理论推导	151
6.2.2 理论验证	158
第7章 断裂粘滑隧道抗震设计计算方法	164
7.1 理论推导	164
7.1.1 基本假设	164
7.1.2 变形特性	164
7.1.3 受力约束条件及计算长度	164
7.1.4 内力公式	167
7.2 理论验证	170
7.2.1 理论方法计算分析	170
7.2.2 计算分析	171
7.2.3 对比分析	172
第8章 公路隧道抗震技术	173
8.1 公路隧道抗震衬砌设计方法	173
8.1.1 理论分析	174
8.1.2 洞口段隧道抗震衬砌设计	174
8.1.3 断层破碎带段隧道抗震衬砌设计	177

8.2 公路隧道围岩抗震加固技术	180
8.2.1 浅埋隧道围岩局部注浆抗震技术	180
8.2.2 隧道洞口段围岩全环注浆抗震技术	187
8.2.3 活动断层隧道围岩全环注浆抗震技术	192
第9章 公路隧道减震技术	195
9.1 隧道设置减震缝的减震技术	195
9.1.1 软硬岩交界段设减震缝的减震效果分析	195
9.1.2 断层粘滑隧道设减震缝的减震效果分析	201
9.1.3 断层粘滑隧道设减震缝模型试验	203
9.2 隧道设置减震层的减震技术	221
9.2.1 隧道设置减震层的减震原理	221
9.2.2 减震层的减震效果	235
9.2.3 减震缝和减震层组合试验	250
第10章 公路隧道震后修复技术	256
10.1 隧道抢通技术	256
10.1.1 震害隧道抢通技术	256
10.1.2 汶川地震公路隧道抢通技术	256
10.2 隧道应急保通加固技术	258
10.2.1 震害隧道保通技术	258
10.2.2 汶川地震公路隧道保通技术	259
10.3 隧道恢复重建综合技术	261
10.3.1 震害隧道恢复重建技术	261
10.3.2 汶川地震公路隧道恢复重建技术	264
附录1 隧道振动台动力模型试验	276
附录2 断裂粘滑隧道错动试验	298
主要参考文献	307

第 1 章 绪 论

我国地处欧亚板块、印度洋板块和环太平洋板块之间,是一个多地震国家。强烈地震给人民生命财产和国家经济建设造成了巨大损失,也给公路工程造成了不同程度的破坏。在抗震救灾中,公路交通运输是抢救人民生命财产和尽快恢复生产、重建家园的重要环节。我国大量的公路隧道修建于 20 世纪 90 年代以后,2008 年 5 月 12 日前尚未经受过破坏性地震的考验,因此我国对于公路隧道抗震及减震技术的研究工作还进行得很少,缺乏系统性的研究资料。5·12 汶川大地震对我国公路隧道进行了一次实实在在的检验,在这次地震中,出现了多座公路隧道受到严重破坏的情况,因此有必要重新检视现行的公路隧道修建技术,并对公路隧道的抗震及减震技术进行系统性研究。

1.1 我国发生的强震情况

100 多年来,我国共有约 60 多万人死于地震灾害,基础设施多次受到严重的破坏。我国 7%的国土承受了世界 33%的陆地强震,是全球最大的大陆浅源强震活动区,其中东南部的台湾和福建沿海,华北太行山沿线和京津唐地区、山东中南部,西南青藏高原及其边缘的四川和云南两省西部,西北的河西走廊、天山沿线、青海及宁夏等都是地震灾害多发地区。20 世纪以来,我国发生的强震如表 1.1 所示。

表 1.1 1900 年以来中国强震表

序号	年份	地点	级别/级
1	1920	宁夏海原	8.5
2	1933	四川叠溪	7.5
3	1950	西藏察隅	8.5
4	1970	云南通海	7.7
5	1975	辽宁海城	7.3
6	1978	河北唐山	7.8
7	1983	上海近海	6.0
8	1999	台湾集集	7.3
9	2008	四川汶川	8.0
10	2010	青海玉树	7.1

表 1.1 中,四川汶川特大地震是近 60 年来我国发生的破坏性最强、波及范围最广、救灾难度最大的一次灾害,其极重灾区有 10 个:汶川、北川、绵竹、什邡、青川、茂县、安县、都江堰、平武、彭州,四川省、甘肃省、陕西省交通基础设施遭受的损坏十分严重,通往汶川、北川、茂县、青川等地的交通完全中断。地震共造成 21 条高速公路、16 条国省道干线公路、2.4 万 km 农村公路的路基、路面、桥梁、隧道等构(建)筑物不同程度受损。

1.2 影响隧道震害的主要因素

隧道结构虽然是一种抗震性能比较优越的建筑形式,但在强震条件下震害仍时有发生,表 1.2 列出了一些强震条件下隧道的破坏情况。

表 1.2 强震条件下的隧道的破坏情况

年份	地震地区和震级	隧道破坏情况
1906	旧金山(8.3 级)	严重损坏了横穿圣安德列斯断层的 2 座隧道,主要是木梁柱折断和轨道上凸,奈特一号隧洞水平错动 1.37 m
1923	日本关东(7.9 级)	震区铁路上 116 座隧道有 82 座遭到破坏,发生变形、边墙塌落及衬砌开裂等震害。严重损坏了东京附近的 24 座隧道,这些隧道距震中很近,损害主要由地震振动引起,隧道未穿越断层,破坏情况主要为拱部和边墙坍落、衬砌裂缝和变形错动,以及洞门砖石墙碎裂
1930	日本伊豆(7.1 级)	丹那断层再次活动造成丹那隧道水平错动 2.39 m,竖向错动 0.6 m,隧道内部边墙产生数处裂缝
1948	日本福井(7.3 级)	隧道发生落石、裂隙等轻度破坏
1952	北海道(8.1 级)	地震中有隧道发生落石、裂隙等轻度破坏
1952	美国克恩(7.7 级)	穿越发震断裂带白狼断层的 4 条铁路隧道边墙扭曲,地面(洞壁)出现大裂缝和洞顶穿透等严重破坏
1964	日本新潟(7.5 级)	地震中有隧道发生落石和裂隙等轻度破坏
1970	云南通海(7.7 级)	地震造成公路涵洞及隧道洞口段坍塌
1971	美国洛杉矶(6.6 级)	地震造成穿越西尔玛断裂的圣佛南都隧道累计垂直位移 2.29 m,另有 2 座隧道出现了非破坏性的裂缝,1 座隧道轻度损坏
1978	日本宫城(7.4 级)	9 条铁路和公路隧道受到不同程度的破坏,其中稻取隧道两侧发生 0.62 m 的水平位移,产生围岩膨胀、断面变形、混凝土挤出等现象
1983	上海近海(6 级)	打浦路管片隧道出现了 5 条可见裂缝,泥水挤入隧道与竖井的结合部
1985	墨西哥近海(8.1 级)	墨西哥市地铁出现混凝土剥落、裂缝等轻度破坏
1995	日本阪神(7.2 级)	震区内有 111 座山岭隧道,遭受破坏的有 12 座,超过隧道总数的 10%。神户市地下铁道多数车站有震害现象发生,尤其是大开站和止泽站破坏最为严重,混凝土中柱开裂倒塌、顶板和楼板断裂坍塌、侧墙开裂等破坏现象随处可见。山阳新干线的新神户站的東西两侧有 2 条隧道:1 条是通大坂的六甲隧道,另 1 条是通西明石的神户隧道,其中六甲隧道横切六甲断层系,穿过几条活断层。两条隧道的内壁有 100 多处出现裂缝,六甲隧道受害严重一些,但裂缝造成破坏并不严重,很容易修复。六甲隧道中,裂缝长达数十米的地方有 3 处
1999	台湾集集(7.6 级)	震区内 57 座隧道有 49 座隧道出现震害,主要是衬砌混凝土块龟裂、掉落及钢筋弯曲等不同程度的破坏

(续表)

年份	地震地区和震级	隧道破坏情况
2008	四川汶川(8.0级)	震区内有6座穿越断层破碎带隧道受到较为严重的震害,分别是友谊隧道、白云顶隧道、紫坪铺隧道、龙洞子隧道、龙溪隧道和酒家垭隧道。位于地震烈度为6度的区域的隧道洞口结构未出现震害。位于地震烈度为7度和8度的区域的隧道均有1座隧道洞门墙冒石被落石砸坏。位于地震烈度为9度的区域的隧道中单坎梁子、草坡和耿达隧道仅边仰坡、洞门墙和明洞出现了震害,且主要为次生灾害引起的;酒家垭隧道洞口段衬砌出现了二次衬砌垮塌和混凝土掉块、剥落等影响车辆通行的严重震害。位于地震烈度为10度的区域的盘龙山、紫坪铺、友谊和马鞍石隧道边仰坡崩塌、滑塌及落石,洞口段衬砌破坏较严重,出现了衬砌开裂等震害;白云顶隧道边仰坡崩塌、滑塌及落石,洞门端墙被砸坏,洞口段衬砌破坏严重,出现了混凝土掉块、剥落以及二次衬砌垮塌等影响车辆通行的严重震害。位于地震烈度为11度的区域的毛家湾、福堂、皂角湾、彻底关和桃关隧道仅边仰坡、洞门墙和明洞出现了震害,且主要为次生灾害引起的;龙洞子、牛角垭和烧火坪隧道边仰坡出现崩塌、滑塌,掩埋洞口,洞门墙被砸坏,洞口段衬砌破坏较严重,出现了衬砌开裂等震害;龙溪和龙池隧道边仰坡出现小的滑塌,洞口段衬砌破坏严重,出现了混凝土掉块、剥落以及二次衬砌垮塌等影响车辆通行的严重震害

从表 1.2 中可以看出,汶川地震对多座隧道造成了破坏。通过对震区隧道震害的调查,发现隧道洞口段和断层破碎带段破坏具有以下特点:

(1)按地震烈度 7 度设防的隧道洞口段衬砌在地震烈度为 8 度及 8 度以下时震害较轻(少数隧道出现轻微裂缝),未出现二次衬砌垮塌、隧道垮塌等严重震害;在地震烈度为 9~10 度时,出现了二次衬砌垮塌这样严重的震害类型,但未出现隧道垮塌(包括二次衬砌、初期支护、围岩破坏,出现坍方);在地震烈度为 11 度时,出现了隧道垮塌这样最为严重的震害类型。

(2)软岩隧道洞口浅埋段由于考虑了抗震设防,未出现二次衬砌垮塌这样严重的震害类型;软岩隧道洞口过渡段出现了二次衬砌垮塌这样严重的震害类型(如龙溪隧道和酒家垭隧道)。

(3)错动断层的隧道出现了二次衬砌垮塌、隧道垮塌等严重的震害类型;未错动断层隧道震害未出现二次衬砌垮塌、隧道垮塌等严重的震害类型,仅出现施工缝开裂,衬砌剥落、开裂、渗水等受损较轻的震害类型。

造成隧道震害的原因主要有两个:地震惯性力和强制位移。地震惯性力造成的隧道震害多发生在边仰坡、洞门、明洞结构以及洞口浅埋段隧道衬砌等处;强制位移造成的隧道震害主要发生在断层破碎带段隧道结构、软硬岩交接面附近等处。

断层破碎带对隧道的影响主要有两个方面:断层错动对衬砌结构的破坏以及断层带软弱破碎岩体在地震作用下发生塌落松动和涌水等。后者较容易发现,可视做不良地质围岩进行加固处理;前者对工程危害最大,原因也较复杂。

边仰坡、洞门及明洞结构是隧道唯一出露的部分,也是震害较严重的区域。发生震害的原因主要有:地震惯性力、地形、洞门型式、边仰坡设计防护参数以及洞口段地质情况等。软硬岩交接面处强制位移破坏主要发生在隧道洞口浅埋段,约束较少,所受地震力较大,软岩部分易发生滑动,对隧道衬砌造成破坏。

Sunil Sharma 等在前人研究的基础上,收集了世界范围内 85 次地震中反映隧道稳定性的 192 篇报告,通过归类分析,将隧道地震破坏分为 6 种情况,即洞室变形、洞室顶部的

偶然落石、洞顶或洞壁倒坍、沿相交断层的位移、洞室围岩的剥落、支护或衬砌的扰动或变形等,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,主要包括:

(1)在同一烈度地震下,隧道一般较地面建筑物遭受破坏的程度小得多。

(2)隧道的破坏程度随覆盖层厚度的增加而降低,当覆盖层厚度小于 50 m 时,隧道容易遭遇地震破坏(表 1.3),如隧道洞口浅埋段是经常受到地震破坏的地段。

(3)隧道的震害程度与峰值地面加速度(PGA)有关,当 $PGA \leq 0.15g$ 时,隧道损害轻微;当 $0.15g < PGA < 0.45g$ 时,隧道损害严重;当 $PGA > 0.45g$ 时,隧道损害非常严重(表 1.4、图 1.1)。

(4)建筑在崩积层内的隧道要比建筑在坚固岩石内的隧道更易受到严重破坏,穿越活断层或断层破碎带的隧道在地震中也易受到严重破坏(表 1.5)。

表 1.3 覆盖层厚度与破坏程度的关系

埋深/m	破坏程度(隧道座数)/座				破坏例所占比例/%	
	轻	中等	重	未破坏	占同组	占总体
<50	14	9	10	24	58	35
50~100	2	1	2	12	29	5
100~200	3	0	1	6	40	4
200~300	3	2	1	13	32	7
300~500	4	3	0	4	64	8
500~1000	9	1	0	2	83	11
1000~1500	0	1	0	4	20	1
不详	14	6	7	33		29
合计	49	23	22	98		100

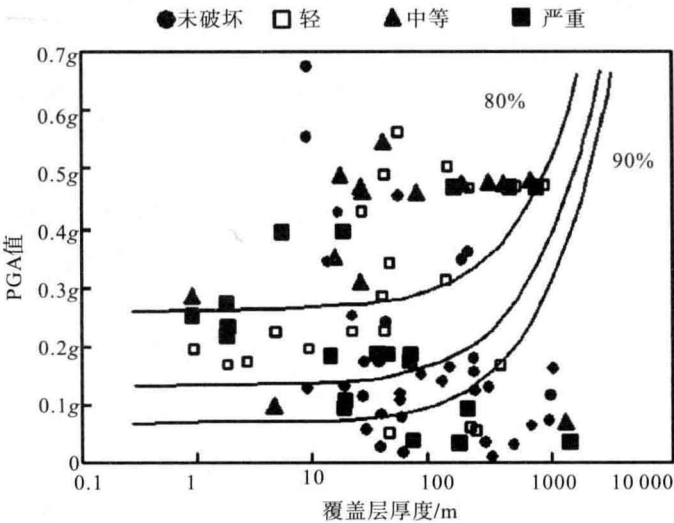


图 1.1 PGA 值、覆盖层厚度与震害关系

表 1.4 峰值地面加速度(PGA)与破坏程度的关系

PGA	破坏程度(隧道座数)/座				破坏例所占比例/%	
	轻	中等	重	未破坏	占同组	占总体
<0.05g	5	2	0	29	19	7
0.05g~0.15g	6	3	2	31	29	14
0.15g~0.25g	14	1	11	17	60	28
0.25g~0.35g	4	4	2	5	67	11
0.35g~0.45g	2	2	2	5	55	6
0.45g~0.55g	13	8	1	0	100	23
0.55g~0.65g	1	0	0	1	50	1
≥0.65g	0	0	0	1	0	0
不详	4	1	4	9		10
合计	49	23	22	98		100

表 1.5 岩石类型与破坏程度的关系

岩石类型	破坏程度(隧道座数)/座				破坏例所占比例/%	
	轻	中等	重	未破坏	占同组	占总体
硬岩	9	5	1	35	30	16
沉积岩	19	6	4	11	73	31
火成岩	5	3	7	21	42	16
变质岩	0	0	1	8	11	1
崩积岩	4	4	3	3	79	12
不详	12	5	6	20		24
合计	49	23	22	98		100

(5)在有限的资料范围内,还看不出不同的内部支护形式对破坏程度有重要影响的趋势(表 1.6),但施工质量未能保证、采用木支撑、回填不密实的隧道容易遭受地震破坏。

表 1.6 支护结构与破坏程度的关系

支护形式	破坏程度(隧道座数)/座				破坏例所占比例/%	
	轻	中等	重	未破坏	占同组	占总体
未支护	21	12	7	66	38	42
木支护	1	1	1	0	100	3
砖石衬砌	8	3	2	4	76	14
混凝土衬砌	8	2	8	6	79	19
钢筋混凝土衬砌	4	1	3	1	89	9
不详	7	4	1	21		13
合计	49	23	22	98		100

由此可见,要减少隧道的震害,必须从规划、施工质量、抗震或减震措施等几方面着手,才能获得良好的效果。

1.3 隧道抗震设计计算理论研究现状

研究地震运动对隧道的影响所采用的理论有两类,即波动理论和振动理论。具体的计算方法有数值计算法、解析法、简化计算法三类。

目前,在隧道抗震研究中,所采用的方法主要以振动理论为主,并采用数值方法。常用两种模型求解问题,即弹簧—质点系模型和连续体模型。

在盾构隧道的抗震研究中,所采用的计算模型就是弹簧—质点系模型,即将隧道结构离散化为质点和弹簧,将围岩作用用弹簧代替,减震层作用和管片接头都用弹簧模拟,通过调整弹簧刚度来模拟各种因素的影响。该方法是田村—冈本模型和地层反应位移法的推广。

在研究地层变化对隧道抗震的影响时,通常采用有限元方法,用实体单元模拟围岩、隧道衬砌和减震层。该方法可以考虑较多因素作用,如各种不同的地震波作用、不同的本构模型、不同的减震层厚度、不同的地形等情况。

在进行爆炸冲击震动的抗震分析时,减震地板的减震研究主要以单质点体系为主,而整体和多层减震采用有限元方法分析,以及迁移矩阵法和积分方程法等。该方面的研究已经考虑了几何非线性、物理非线性,如采用弹塑性、全量拉格朗日法(total Lagrangian formulation)研究爆炸冲击减震问题等。

波动理论是研究地震作用的主要理论之一,一直在隧道抗震中被广泛采用,建立了很多模型,主要包括地震波沿隧道纵轴传播和垂直于纵轴的横向传播两大类模型。如 St. John 法、SCRTD 法、SFBART 法、Shukla 法、福季耶娃法等。关于地震波沿纵轴传播的问题,通常认为大长度的隧道纵轴的变形受其周围地层变形的影响和控制,但要区分两种情况:对于结构刚度相对于地层刚度较小的隧道,可认为其变形与地层变形等同,对于刚度相对较大的隧道,则要考虑结构与土的相互作用,一般把隧道当作弹性地基上的梁来处理。对地震波沿隧道横断面传播问题的研究,焦点是土—结构相互作用问题以及结构横截面挠曲与应力集中问题,对于圆形洞室已有封闭解。对于其他洞形的隧道,常用静力法,如福季耶娃法等。

目前,我国公路和铁路隧道抗震设防现行规范是《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89)和《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)两规范中均规定“隧道的洞口浅埋和偏压地段,应为抗震设防地段。其设防长度可根据地形、地质条件确定”。两规范中隧道抗震验算范围大体为Ⅲ级围岩以上的洞口、浅埋、偏压隧道和明洞,抗震验算方法为地震系数法,仅验算隧道结构横向抗震性能,对于纵向以及隧道深埋段不作验算。另外,两规范仅考虑水平地震作用。地震系数法即地震附加力静力法,这与地面结构一致,但对于隧道来讲,计算结果比较保守。

5·12 汶川地震震害调查表明:隧道在断层错动段震害最为严重,洞口浅埋段次之。公路与铁路隧道抗震规范均仅对洞口浅埋段横断面抗震计算方法作了规定,对洞口浅埋段纵向和断层错动段抗震设计计算方法没有规定。而洞口浅埋段横断面抗震设计计算方法采用拟静力法(地震系数法),与之有关的地震参数仅为地震动峰值加速度,而洞口浅埋段

地震动峰值加速度确定方法目前还不明确。可见,现阶段我国隧道抗震设计主要在以下方面存在问题:隧道设计地震动峰值加速度取值、隧道动力响应设计计算方法、隧道抗(减)震技术、震后隧道修复技术等。

1. 拟静力法计算中隧道地震动峰值加速度如何确定

地震动参数主要包括地震幅值、频谱特性和持时。地震幅值为表征地震强弱的重要参数,主要是指地震加速度、速度、位移三者之一的峰值、最大值或有某种意义的有效值。频谱特性是指地震动对具有不同自振周期结构的反应特性,通常可以用反应谱、傅里叶谱与功率谱表示。持时对隧道结构的损坏具有重要影响,主要体现在两个方面:持时的延长会导致结构产生累积变形和破坏,以及低周疲劳可能导致结构局部强度丧失。

我国隧道抗震设计是随着地面建筑抗震设计发展而发展起来的,目前规范还未采用反应谱法,仍处于惯性力法阶段。我国现行公路和铁路隧道抗震设计规范采用拟静力法进行抗震设计计算。对于隧道结构所受的地震荷载,需要考虑两个方面,即隧道结构本身的地震荷载、隧道周围围岩对隧道结构作用的地震荷载。对于隧道结构本身的地震荷载计算,需要确定地震系数和影响系数;对于隧道周围围岩对隧道结构作用的地震荷载计算,需要确定洞顶上方土柱水平地震力和侧压力增量。而隧道结构所受的两方面地震荷载计算中与之相关的地震参数仅为地震动峰值加速度(PGA)。

隧道抗震设计 PGA 主要根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001)和工程地震安全性评价进行选取和确定。《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001)主要是针对地面建筑而制定的,对于地下工程存在适应性问题。工程地震安全性评价是针对具体工程开展的,一般仅给出隧道普通段(基岩)地震动峰值加速度。对于隧道洞口浅埋段抗震设计 PGA 取值,现行隧道抗震设计没有明确规定。无论洞口浅埋段围岩为硬质围岩或软弱围岩,洞口浅埋段设计 PGA 取值均与普通段(基岩)相同,而这与实际隧道震害现象不符。5·12 汶川地震中,映汶路 7 座隧道(皂角湾隧道、毛家湾隧道、彻底关隧道、福堂隧道、桃关隧道、草坡隧道、单坎梁子隧道)洞口段均为硬质围岩,地震中震害较轻,衬砌仅出现少量裂缝;都映路 3 座隧道(白云顶隧道、友谊隧道、马鞍山隧道)洞口段均为软弱围岩,地震中洞口段衬砌破坏严重,出现了衬砌错台、剥落、掉块等严重震害。硬质围岩洞口段地震动峰值小于软弱围岩洞口段,是出现这种结果的一个重要的原因。

国内外隧道震害实例表明,隧道洞口浅埋段是隧道抗震的薄弱部分。隧道随着埋深的增加,震害逐渐减轻。因此,隧道洞口浅埋段抗震设计 PGA 的选取对于隧道支护结构的合理设计、有效抗震措施的选取有着重要的意义。实际上,对于隧道洞口浅埋段,如围岩为硬质围岩,则洞口浅埋段设计 PGA 与普通段(基岩)取值相同;如围岩为软弱围岩,则洞口浅埋段设计 PGA 大于普通段(基岩)取值。

由于公路隧道洞口段一般位于山坡之上,其抗震设计 PGA 受地形地貌、传播介质、基岩上覆岩层厚度及地震烈度等因素影响有其自身的传播特点。国内外有关专家对平地 and 山坡基岩上覆岩层地震动传播规律的影响因素进行了一些研究,得出基岩上覆岩层厚度越大,地表 PGA 放大系数越大,地表以下 30 m 内为 PGA 迅速衰减区段,大于 30 m 后其变化对地表 PGA 影响很小;平地地表以下 25 m 处 PGA 为地表处的 1/2;日本抗震规范规定,平地地下 20 m PGA 为地表处的 1/2~2/3,中间位置可通过插值计算得出;随着坡率的增加,山体放大效应逐渐增大;地震烈度越大,地表 PGA 放大系数越小。山坡坡高对山坡覆

盖层 PGA 传播规律的影响研究很少。

由于隧道洞口浅埋段衬砌抗震设计 PGA 取值与衬砌在基岩上覆岩层中的位置有关,为了结构安全及设计的方便性,取洞口处位置(坡面)PGA(基岩上覆岩层中 PGA 最大值)作为隧道洞口浅埋段衬砌抗震设计 PGA 值。

对于隧道洞口浅埋段,如果围岩为硬质围岩,则洞口浅埋段设计 PGA 与普通段(基岩)取值相同;如围岩为软弱围岩,则洞口浅埋段设计 PGA 大于普通段(基岩)取值。所以,软弱围岩洞口浅埋段设计 PGA 取值是一个难点,目前还没有一个计算方法,对现行公路隧道抗震规范拟静力法在洞口浅埋段的应用造成了困难,为此,需要进行深入的研究。

2. 拟静力法计算中隧道与围岩交互作用如何考虑

根据震害调查和震害特征分析知,隧道洞口段为抗震设防的重点。我国现行公路和铁路隧道抗震设计规范仅对隧道洞口浅埋段横断面地震动力响应计算方法作了规定,即采用拟静力法进行抗震设计,但其地震荷载的确定却存在着较大的问题。现行规范中,将隧道洞顶上方土柱的水平地震惯性力直接移加到隧道拱顶衬砌上。对于复合式衬砌,由于围岩和衬砌之间设置有防水板,在地震作用下,衬砌与围岩变形不一致,因此,衬砌与围岩之间在切向方向会出现剪切滑移现象,在法向会出现脱空现象。

围岩与衬砌结构之间在切向方向出现剪切滑移,说明围岩与衬砌结构之间不能百分之百传递剪力,只能传递部分剪力,因此,隧道洞顶上方土柱的水平地震惯性力不能百分之百移加到隧道拱顶衬砌上。目前,关于围岩与衬砌结构之间剪力采用何种形式进行传递,即其大小、分布形式均不清楚。

衬砌与围岩之间在法向出现脱空现象,将引起弹性抗力发生变化。在隧道拟静力法中,用弹簧来模拟围岩对衬砌的作用,即用弹簧模拟弹性抗力作用。可见,脱空现象会导致围岩与衬砌间弹性抗力大小与分布发生变化,目前,该问题也没有探讨清楚。

国内外有关专家对拟静力法、反应位移法及时程分析法的特点和适应性进行过归纳、对比分析及系统研究,并对拟静力法进行了修正,提出了根据不同围岩级别和隧道不同跨度,选取不同计算埋深进行抗震计算的修正计算方法,但这些方法都存在一定的局限性,限制了推广应用。

3. 隧道洞口纵向抗震设计计算如何考虑

现有的隧道纵向抗震研究理论方法有:ST. John 法、Shukla 法、反应位移法、三维有限元整体动力计算方法。ST. John 法和 Shukla 法可以解决一般浅埋隧道纵向抗震设计问题,但由于隧道洞口存在鞭梢效应和临空面效应,因此,这两种方法是否适应于洞口设计计算还存在问题。三维有限元整体动力法可以解决该问题,但往往消耗计算机资源大,计算时间长,不适用于大量的设计计算。反应位移法是日本现行规范采用的方法,可以解决该问题,但我国现阶段还没有提出单位水平地震系数速度反应谱,因此,反应位移法进行隧道洞口纵向抗震设计还存在一定的难度。

综上所述,隧道洞口纵向抗震设计计算方法还需要进行深入的研究。

4. 断裂粘滑隧道如何进行抗震设计

由 5·12 汶川地震公路隧道震害调查及震害特征可知,隧道断裂粘滑段震害最为严重,其纵向是隧道结构抗震设防的重点。但目前国内外对断裂粘滑隧道抗震设计计算方法研究还很少,我国现行公路和铁路隧道抗震设计规范也没有对断裂粘滑隧道抗震设计计算