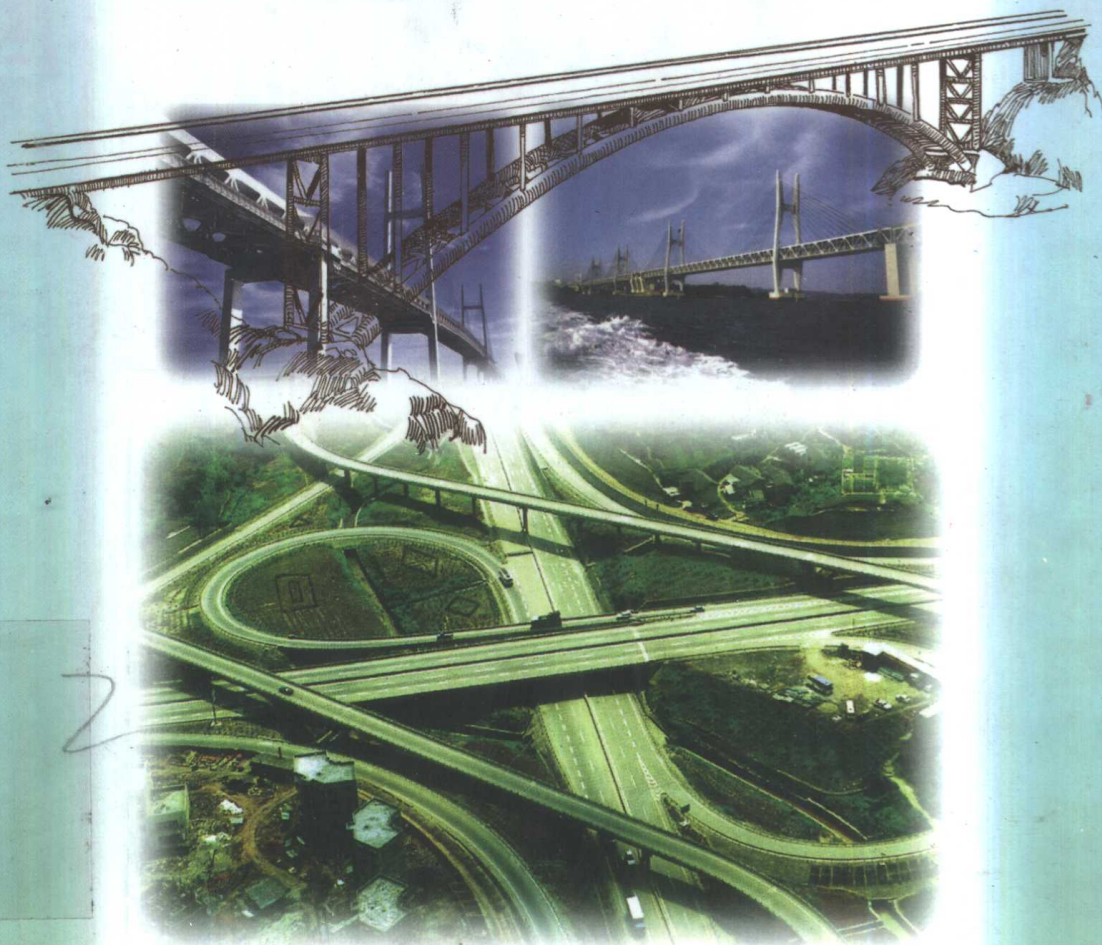




“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之四

桥梁延性抗震设计

范立础 卓卫东 著



人民交通出版社

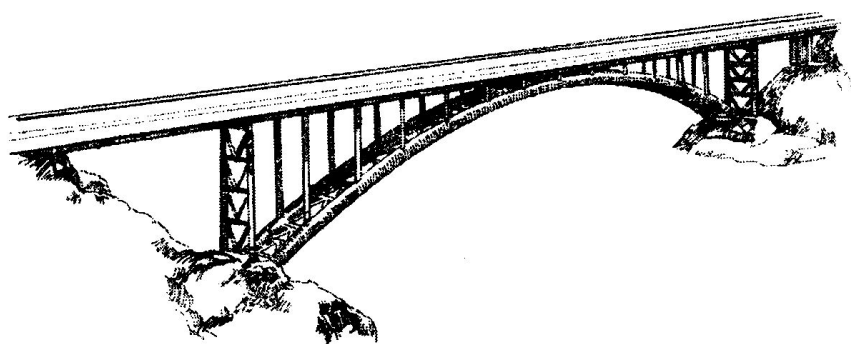


“桥梁抗震设计理论及应用”丛书之四

Qiaoliang yanxing Kangzhen Sheji

桥梁延性抗震设计

范立础 卓卫东 著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书针对当前国内公路桥梁抗震设计中存在的主要缺陷,论述了桥梁延性抗震设计的基本概念、理论和方法。其中,重点介绍桥梁简化的延性抗震设计理论及改进的抗震设计方法。书中还对如何保证结构的整体延性,进行了详细的讨论。本书介绍的内容,为作者近年来在该领域的研究成果,也是作者正在编写的《城市桥梁抗震设计规范》的理论背景材料之一。

本书可供从事抗震工程设计、研究和施工的工程技术人员参考,也可作为高等院校桥梁专业研究生和高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁延性抗震设计/范立础等著. —北京:人民交通出版社, 2001. 4

ISBN 7-114-03888-7

I. 桥... II. 范... III. 桥梁工程-抗震-设计 IV. U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 15690 号

桥梁延性抗震设计

范立础 卓卫东 著

正文设计:王静红 责任校对:张捷 责任印制:张凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.625 字数: 258 千

2001 年 5 月 第 1 版

2001 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—3000 册 定价: 30.00 元

ISBN 7-114-03888-7

U · 02829

序 言

国内外的地震灾害表明,震区桥梁的损坏坍塌,不仅阻碍当时的救灾行动,而且影响灾后的恢复工作。所以各方都对桥梁抗震给予十分重视。

一个国家或地区的桥梁抗震质量如何和它实行的桥梁抗震设计规范密切相关。我国的桥梁抗震设计规范制订于许多年前。可以理解,它不能反映众多新的桥梁震害的启示,未能吸收许多新的研究成果,不能适应我国当前桥梁建设的需要。各方致力于修订新的铁路桥梁和公路桥梁的抗震设计规范,并首次编写城市桥梁的抗震设计规范,是值得欢迎的。姑不置论三个规范可否统一的问题,如果它们都力求能反映客观实际,达到经济合理和相当安全的抗震目的,则三者所依据的抗震设计理论与原则无疑应当是相同的。众所周知,规范条文只使人知其然,而不知其所以然。所以常常配以说明。但是,即使如此,人们还是不能了解其理论依据,希望有更深入的阐述,以使透彻得知其所以然。

有鉴于此,范立础教授,凭借其多年从事桥梁抗震的工程实践和科学研究的经验积累,在参加修订公路桥梁抗震设计规范和负责首编城市桥梁抗震设计规范的同时,组织同济大学土木工程防灾国家重点实验室里从事

桥梁抗研究的同事和研究生,一起编写出版《桥梁抗震设计理论与应用》丛书。

本丛书重点针对桥梁抗震的工程实践中亟待解决或回答的问题,结合震害实例,阐明当前国内外的理论研究成果和相关抗震设计方法的依据。它将有助于深入理解和正确运用我国桥梁抗震设计规范,提高我国桥梁抗震的工程实践水平,同时将有助于对桥梁抗震的学习的研究,发展我国桥梁抗震的科学技术。特为之序。

李国豪

中国科学院资深院士

中国工程院资深院士

同济大学名誉校长

2001年3月

前 言

近 20 年的地震灾害经验表明,随着城市现代化的发展,交通网络在整个城市生命线抗震防灾系统中越来越重要。1997 年美国圣费南多(San Fernando)地震、1976 年中国唐山地震、1989 年美国洛马·普里埃塔(Loma Prieta)地震、1994 年美国北岭(Northridge)地震、1995 年日本的阪神地震及 1999 年台湾的集集地震均给当地的交通网络造成严重的破坏,导致直接和间接经济损失总和极为巨大,如以当时的美元币值分别计约为:10 亿、20 亿、70 亿、200 亿、1000 亿、120 亿。在此期间,各国地震工作者与结构工程师对桥梁结构抗震展开了大量的研究,都在修改或制定新的桥梁抗震设计规范。主要问题是研究涉及风险决策的工程抗震设计标准与设防目标,结构抗震设计方法,包括动力概念设计、强度设计、位移设计、延性设计、减隔震设计;最近还提出了基于性能(性能、功能)设计(Performance Based Design)的基本思想,以及行之有效的抗震措施。

同时,我国也进行了大量的研究工作,“建筑抗震设计规范”已提出修改新版,1999 年 12 月已提交了“供试设计用”稿,“公路工程抗震设计规范”也已启动修改工作,提出了修改工作大纲与编写大纲。作者受建设部委托主编首部“城市桥梁抗震设计规范”,主编单位是同济大学土木工程防灾国家重点实验室。

当前,城市桥梁抗震设计乃参照“公路工程抗震设计规范”执行,但该规范仅适用于跨径 150m 以下的梁桥与拱桥。工程师们面对城市中立交工程、曲线高架桥、轨道高架桥、主跨径大于 150m

的跨河大桥等的抗震设计无章可循。在实践工作中,有的列了专题研究,有的各自采用简化计算方法,这就导致了结构抗震设防、设计方法、安全准则不统一。同济大学土木工程防灾国家重点实验室桥梁抗震研究室在近20年中曾承担了各类城市桥梁抗震设计研究项目30余项,桥梁抗震理论研究项目十余项,获得并累积了较多理论、试验的研究成果与设计经验。同时,我们亦组织和参与了有关国际会议与学术交流,广泛收集了美国、日本、新西兰和德国在桥梁抗震领域内相关的研究资料、报告和各种规范。由于我国的规范(国标或部标)是强制性的,因而我国首编的“城市桥梁抗震设计规范”比之我国其他行业的桥梁抗震设计规范将有较大扩充和改动,诸如规范使用范围、抗震设防标准、结构抗震设计方法、性能准则和抗震验算、结构延性设计、桥梁减隔震设计和抗震措施等。规范除了条文外还附有条文说明。但有关桥梁抗震理论的近年进展与讨论,抗震设计的新思想,如多级抗震设防多阶段设计原则,延性抗震与延性设计方法、位移设计准则、桥梁减隔震设计原则和方法以及最新提出的基于性能(性态、功能)的设计思想(Performance Based Design)不可能在规范的条文说明详细介绍。此外,我们在完成30余项城市大跨桥梁(悬索桥、斜拉桥、拱桥)、城市高架桥、轨道交通高架桥和城市大型立交工程的抗震设计、分析和研究工作的过程中,在完成10余项的桥梁抗震的理论研究和科学试验的工作中,特别是在最近为编写“城市桥梁抗震设计规范”收集资料、调查研究、分析归纳、借鉴引用的实践中,深感亟需在桥梁工程界普及与提高桥梁工程抗震的科学技术知识。为此,我组织了土木工程防灾国家重点实验室桥梁抗震研究室的几位同事和我的博士生,分工执笔编写一套“桥梁抗震设计理论及应用”丛书:之一是桥梁延性抗震设计,之二是桥梁减、隔震设计,之三是高架桥梁抗震设计,之四是大跨度桥梁抗震设计。

丛书编写的工程对象仅限于桥梁。丛书介绍一些基本原理,其中融合了我们的一些研究成果,也提供一些应用算例或实例。书中每章都附有主要的参考文献供读者进一步查阅和研究。丛书的各分册既有各自的独立性也有互为联系的相关性。因而,某些阐述部分可能有少量的重复,反映了不同角度的分析论述或应用。

我衷心感谢我们桥梁抗震学科组的胡世德教授、李建中教授、王君杰副教授和我的博士生卓卫东副教授(福州大学)、叶爱君讲师、王志强讲师的通力合作及杨新宝、毕桂平的工作。同时,也感谢人民交通出版社的大力支持,使这套丛书在新规范审定发行之前出版,谨献给我的老师和母校同济大学。

桥梁抗震设计理论尚有不少问题处在深入研究阶段,实践应用中也尚有不少问题有待解决。本套丛书对桥梁抗震理论若干问题的讨论,难免挂一漏万、错误失当之处,敬希同行与读者批评指正。

范立础

同济大学土木工程防灾国家重点实验室

2000年10月

目 录

第一章 桥梁抗震概论	1
1.1 地震灾害与国策	1
1.2 桥梁的震害现象与教训	4
1.2.1 地震灾害概说	4
1.2.2 桥梁的震害现象	9
1.2.3 桥梁震害教训及启示	32
1.3 桥梁地震反应分析方法的演变	43
1.3.1 静力法	44
1.3.2 反应谱法	46
1.3.3 动态时程分析方法	54
1.3.4 各种分析方法总结	55
1.4 桥梁工程的抗震设防	57
1.4.1 地震危险性分析	57
1.4.2 地震区划	58
1.4.3 桥梁工程的抗震设防原则	60
1.5 桥梁工程的抗震设计原则	64
1.5.1 桥梁抗震设计的极限状态	64
1.5.2 抗震设计参数	66
1.5.3 抗震设计原则	67
参考文献	69
第二章 桥梁延性抗震设计理论	74
2.1 引言	74

2.1.1	结构抗震设计理论的发展历史	74
2.1.2	延性抗震设计理论提出的背景	79
2.2	延性抗震设计的基本概念	81
2.2.1	延性的基本概念	81
2.2.2	延性概念对结构抗震的意义	95
2.3	桥梁实用的简化延性抗震设计理论	98
2.3.1	引言	98
2.3.2	基本假定	99
2.3.3	简化的延性抗震设计理论	118
	参考文献	131
第三章	桥梁延性抗震设计方法	136
3.1	抗震设计中的材料性能	136
3.1.1	无约束混凝土	136
3.1.2	约束混凝土	142
3.1.3	钢筋	151
3.2	能力设计原理	155
3.2.1	能力设计原理的基本概念	156
3.2.2	能力设计方法的主要特点	158
3.2.3	能力设计方法的主要步骤	160
3.3	总体设计思想	161
3.3.1	三级设防原则	161
3.3.2	桥梁抗震等级分类	164
3.3.3	抗震性能准则	164
3.3.4	标准设计流程	165
3.4	抗震概念设计	168
3.4.1	结构体系选择	169
3.4.2	延性类型选择	192

3.4.3 塑性耗能机制选择	194
3.5 延性构件二次设计	195
3.5.1 罕遇地震下延性构件抗弯强度验算	196
3.5.2 延性构件抗剪强度验算	197
3.5.3 延性设计	198
3.6 能力保护构件设计	199
3.7 延性桥梁的抗震构造设计	201
3.7.1 延性桥墩中纵向钢筋的考虑	201
3.7.2 延性桥墩中横向箍筋的考虑	202
3.7.3 延性桥墩塑性铰区长度的规定	203
3.7.4 延性桥墩中钢筋的锚固与搭接	204
参考文献	205
第四章 箍筋约束混凝土桥墩的延性	208
4.1 已有的研究概况	209
4.1.1 国外研究概况	209
4.1.2 国内研究概况	212
4.2 箍筋约束混凝土桥墩的延性试验研究	215
4.2.1 结构抗震试验方法简介	215
4.2.2 箍筋约束混凝土桥墩的拟静力试验研究	223
4.3 截面弯矩—曲率分析	244
4.4 箍筋约束混凝土桥墩延性的设计考虑	247
4.4.1 影响钢筋混凝土桥墩延性的因素	247
4.4.2 试验数据回归分析	249
4.4.3 箍筋约束混凝土桥墩的最低约束箍筋用量	253
4.4.4 与规范相关公式的比较	254
4.4.5 其它设计考虑	260
参考文献	260

附录 A	分析采用的四类场地地震动记录	265
附录 B	三类场地强度折减系数谱表	291

第一章 桥梁抗震概论

1.1 地震灾害与国策

地震,是地球内部某部分急剧运动而发生的传播振动的现象。大地震爆发时,释放出巨大的地震能量,造成地表和人为工程的大量破坏,严重危及人民生命和财产的安全。

据统计,地球上平均每年都要发生近千次的破坏性地震,其中破坏力巨大的灾难性大地震达十几次,这些地震在它们波及的范围内,均造成惨重的生命财产损失。如 1976 年我国河北唐山大地震,使整个城市在片刻之间沦为一片废墟,地震造成 24 万余人丧生,直接经济损失近 100 亿元人民币(按当时的币值计算)。在国外,同样也有类似的惨重地震灾难记录:比较典型的如 1906 年的美国旧金山大地震和 1923 年的日本关东大地震,前者事件使 7 万余人丧生,后者使 10 万余人死亡,4 万余人下落不明。即使是在最近 10 年里,在人类对地震知识和工程抗震均取得长足进步的情况下,地震仍然造成了令人触目惊心的惨重损失,表 1.1 列出了近 10 年来造成较为严重灾害损失的主要地震情况。从表 1.1 中可见,随着社会经济和文明的发展,现代中心城市地区一旦遭遇破坏性的地震,造成的经济损失将越来越严重。

我国是世界上地震活动最强烈的国家之一,地震灾害历来是我国最大的自然灾害之一。在我国古代,很早就有诸如“鳌鱼翻身”之类的神话传说,描绘了古人对地震现象的恐惧心理。在我国



近 10 年来国内外主要灾害性地震简况

表 1.1

发震时间	地点	震中位置		震级	震源深度	死亡人数	伤残人数	直接经济损失 (按当时币值)
		纬度	经度					
1989.10.17	美国加州洛马·普里埃塔(Loma Prieta)	37.3N	123.8E	7.1	18 km	64	3.7 千余	约 70 亿美元
1994.01.17	美国加州北岭(Northridge)	34.2N	118.5E	6.7	18 km	65	5 千余	约 200 亿美元
1995.01.17	日本神户(Kobe)	34.6N	135.0E	7.2	20 km	6 千余	3.4 万余	约 1 000 亿美元
1999.08.17	土耳其伊兹米特(Izmit)	40.7N	29.9E	7.4	17 km	1.4 万余	2.7 万余	超过 200 亿美元
1999.09.21	中国台湾	23.8N	121.1E	7.6	1.0km	2 千余	1 万余	118 亿美元

有史记载的最为惨重的地震灾难,发生在 1556 年陕西的关中地震;在这次地震中,有名可查的死亡人数即达 83 万余人。据统计,除个别省(如贵州省)外,全国绝大多数行政省(自治区)历史上都曾发生过震级大于 6 级的地震。20 世纪以来,世界上发生的 1 200 多次 7 级以上的地震中,有十分之一就发生在我国。仅从建国至 1988 年以来,在大陆地区发生的 7 级及 7 级以上的强震就多达 13 次,这 13 次地震造成的人员伤亡及经济损失见表 1.2。当前,以 1985 年新疆乌恰 7.4 级地震为标志,我国大陆地震活动开始进入活跃期,这种状态可能一直要持续到本世纪初。



1950 ~ 1988 年中国大陆 7 级以上地震的灾害 表 1.2

发震时间	地点	震级 (M)	基本 烈度	震中 烈度	受灾面积 (km ²)	死亡人数 (人)	伤残人数 (人)	直接经济损失 (亿元)
1955.4.14	康定	7.5	10	9	5 000	84	224	
1955.4.15	乌恰	7.0	9	9	16 000	18		
1966.3.22	邢台	7.2	6	10	23 000	7 938	8 613	10.0
1969.7.18	渤海	7.4			9	300		
1970.1.5	通海	7.7	9	10	1 777	15 621	26 783	30
1973.2.6	炉霍	7.9	9	10	6 000	2 199	24 73	
1974.5.11	永善	7.1	8	9	2 300	1 641	1 600	0.9
1975.2.4	海城	7.3	6	9	920	1 328	4 292	4.0
1976.5.29	龙陵	7.6	8	9		73	279	1.4
1976.7.28	唐山	7.8	6	11	32 000	242 769	164 851	近 100
1976.8.16	松潘	7.2	6~9	8	5 000	38	34	
1985.8.23	乌恰	7.4	9	8	526	70	200	1.0
1988.11.6	澜沧	7.6	8	9	91 700	748	7 751	20.5

注:表中空白处表示缺乏统计数据。

鉴于地震灾害的严重性,我国政府于 1994 年 11 月 25 日在广州召开的全国防震减灾工作会议上,明确提出:在各级政府和全社会的共同努力下,争取用十年左右的时间,使我国的大中城市和人口稠密、经济发达地区具备抵御 6 级左右地震的能力。从 1998 年 3 月 1 日开始,我国政府正式实施了第一部规范防震减灾工作的重要法律——《防震减灾法》,使防震减灾工作步入法制化管理的轨道。在《防震减灾法》中规定,“新建、扩建、改建建设工程,必须达到抗震设防要求;重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程,必须进行地震安全性评价,并根据地震安全性评价的结果,确定抗震设防要求,进行抗震设防”。



按照《防震减灾法》的要求,我国未来防震减灾的任务十分艰巨:根据现行的地震烈度区划图,我国地震基本烈度在6度及以上的地震区面积占到全国面积的60%,7度和7度以上的地震区面积占全国面积的1/3;我国有46%的城市位于基本烈度7度或7度以上的地震区。随着城市化进程的加快以及社会人口和财富向现代中心城市的集中,城市的防震减灾问题将更显突出。因此,对防震减灾问题、尤其是人口稠密、经济发达的中心城市的防震减灾问题,必须引起足够的重视,并加大对防震减灾的投入。

1.2 桥梁的震害现象与教训

1.2.1 地震灾害概说

地震事件具有突发性和毁灭性。一次破坏性地震的爆发,往往伴随有一次灾害、二次灾害和三次灾害。所谓一次灾害,系指地震造成的直接灾害,如地表和工程结构的破坏等;二次灾害是指由一次灾害诱发的次生灾害,如地震后的火灾、水灾、海啸、泥石流、有毒物质污染等;三次灾害是指由一、二次灾害引起的停工停产、城市瘫痪、社会混乱、瘟疫蔓延等。在人口稠密、经济发达地区爆发的地震,其引起的二次灾害和三次灾害的损失,可能远远高于直接灾害的损失。以下,简要介绍与工程抗震有直接联系的地震直接灾害现象。

1. 地表的破坏

地震造成的地表破坏现象主要有地表断裂、滑坡、砂土液化、软土震陷等。

(1) 地表断裂

地表断裂又称地裂缝,地裂缝有构造地裂缝与重力地裂缝两



种,两者不能混淆。构造地裂缝与地质构造有关,是地震断层错动后在地表留下的痕迹。一般说来,构造断裂切割很深,可以从地壳内的岩层断裂起,直达地表,而且不受地形地貌的影响。沿着震源体错动方向,构造地裂缝可断断续续地延伸数十甚至上百公里,如著名的美国圣·安德列斯(San Andress)断层即为典型的构造地裂缝(图 1.1a)。

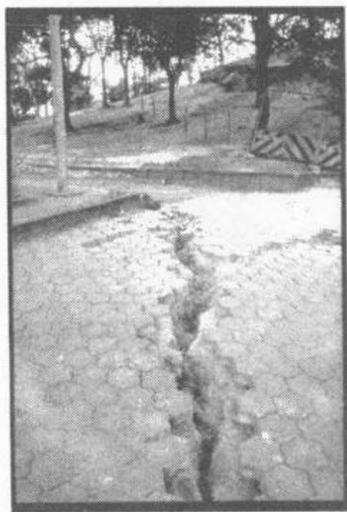
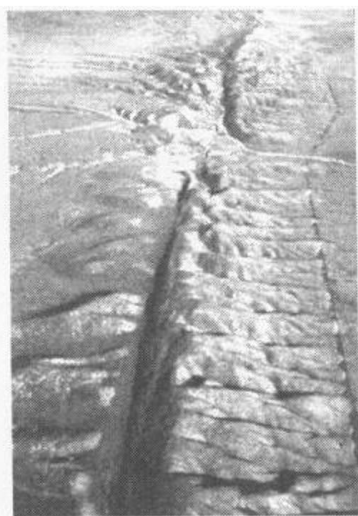


图 1.1 地表断裂现象

a) 圣·安德列斯断层(航空照片)

b) 重力地裂缝

重力地裂缝是由于地面土质软硬不匀及微地貌重力影响,在地震动作用下形成的。它与震前土质的稳定状态密切相关,其规模不能反映地震动的强烈程度。这种地裂缝在地震区分布极广,在道路、古河道、河岸、堤上等松软潮湿土壤处常可见到(如图 1.1b 所示)。

地裂缝穿过的地方可引起房屋开裂以及道路、桥梁等工程设施的破坏,并对地下管道造成严重破坏。

(2) 滑坡