

---

# 黄土结构性动力 本构模型及其应用

◎ 胡 伟 秦立科 著

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

---

10435  
2013/

# 黄土结构性动力 本构模型及其应用

胡 伟 秦立科 著



中国铁道出版社

2012年·北京

## 内 容 简 介

本书是作者近五年来研究成果的一个系统总结,其内容涉及黄土力学试验研究、土体本构模型理论研究和工程实践数值模拟三个方面。首先基于对典型地下结构(构件)的地震震害调查和已有研究成果的概述分析,指出了黄土地区土-地下结构体系研究中存在的问题;然后基于全面的非饱和、饱和黄土原状、重塑土样的静、动力三轴试验研究多种因素对各自力学特性的影响规律;引入应力分担率的概念和结构性发挥系数分别构建针对饱和黄土、非饱和黄土两者的结构性动力本构模型,实现了其程序化并进行相应的验证;最后将所构建的土体本构模型应用于黄土场地、桩基础、地铁车站的地震反应分析中,深入探讨多因素的影响机理和规律,对黄土地区类似工程实践的抗震设计提供了相应的理论依据和建议。

本书可为从事黄土等特殊土力学特性、本构模型研究,土-结构系统动力相互作用研究的科研人员,以及从事结构抗震设计方面的设计人员提供参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

黄土结构性动力本构模型及其应用/胡伟,秦立科  
著. —北京:中国铁道出版社,2012. 12  
ISBN 978-7-113-15630-5

I. ①黄… II. ①胡…②秦… III. ①黄土-结构  
动力学-研究 IV. ①TU435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 258993 号

书 名:黄土结构性动力本构模型及其应用  
作 者:胡 伟 秦立科 著

策 划:江新锡  
责任编辑:曹艳芳  
编辑助理:张卫晓  
封面设计:崔丽芳  
责任校对:胡明锋  
责任印制:郭向伟

电话:010-51873017

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)  
网 址:<http://www.tdpress.com>  
印 刷:北京铭成印刷有限公司  
版 次:2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷  
开 本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:12.375 字数:326千  
书 号:ISBN 978-7-113-15630-5  
定 价:46.00元

## 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

## 作者简介



**胡伟**,男,湖北荆州人,1982年7月生,博士,副教授,硕士生导师。

2008年毕业于西安建筑科技大学岩土工程专业,获工学博士学位;同年起任海南大学土木建筑工程学院专职教师;2010年9月晋升副教授;2011年6月起担任硕士生指导老师;2011年12月至2012年12月至加拿大皇家军事学院师从国际土工合成材料协

会前主席、现任加拿大岩土工程协会主席 Richard J. Bathurst 教授从事博士后研究。

主要从事岩土体静动力本构关系、桩基静动力特性、加筋挡土墙等方面的理论与数值模拟研究。至今已在《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》、《工程力学》等国内权威学术期刊及国际国内会议论文集上发表学术论文30余篇,其中EI检索14篇。出版专著一部,参编《土力学与基础工程》教材一部,主编一部《地基处理理论与技术进展》(副主编)。主持和参与多项国家、省级自然科学基金项目。



**秦立科**,男,江苏淮安人,1982年1月生,博士,讲师,国家一级注册结构工程师,国家注册土木工程师(岩土)。

2007年毕业于西安建筑科技大学土木工程学院,获硕士学位;2010年毕业于长安大学公路学院,获博士学位。同年任西安科技大学建筑与土木工程学院专职教师。主要从事岩土本构关系、地下结构抗震、边坡支护等岩土工程方面的研究和教学工作。发表论文10余篇。参与多项纵向和横向研究项目。

## 序

两位年轻的同行请我给他们的著作写序,但我自知才疏学浅,难以胜任。无奈盛情难却,出于一个在黄土地地区长期工作的老岩土工作者的激情和责任感,我这个笨鸭子决定就上一次架,不怕出丑了。

岩土工程界把黄土划归为一种特殊土,又称为区域性土,所谓“特殊”是指它的工程性质,而“区域”则是指它的分布。在全世界,中国的黄土是得天独厚的,它的厚度最大、地形地貌最全、工程性质也最复杂,因此在中国研究黄土可谓是天赐良机,大自然赋予了我们最优越的条件,但黄土的研究工作也是困难的,因为它是最典型的结构性土之一,复杂的结构性往往使一些基本的土力学理论难以解决,常用的一些工程措施失效。尽管黄土的分布是区域性的,但人们常常把它作为所有土地的代表,例如人们常把在农田里的劳作比作“面朝黄土背朝天”,而不管它是不是在黄土分布区。

在历史上,中华民族曾经在这一地区创造了人类的辉煌,我们的三皇五帝,周、秦、汉、唐都是在这一地区向全世界展示了他的雄风,对人类的进步作出了不可磨灭的贡献。但是在近代,由于共知的原因,我们落伍了。黄土的成因“风成说”最早是由一个外国人 Richthofen F. V 在考察了中国西部的黄土后提出来的;20 世纪 70 年代之前我们的研究工作也始终落后于前苏联……,改革开放为我们创造了赶超的机会,在黄土地地区的工程建设中取得了举世瞩目的成就:建成

黄土地层上的第一条高速铁路,并迅速向工程性质更复杂的黄土地区延伸;世界上最高的黄土填方工程(85 m)已经顺利完工,并正在向 100 m 高度冲刺;黄土地层中第一条地铁已在西安通车运营;横跨中国的西气东输工程正源源不断地把能源输向东部……与工程实践的需求相比,我们的科学研究工作却相对落后,即使如此,也还有一大批科研成果躺在资料室里睡大觉。综观我们的黄土规范,与发达地区的相比,几十年来变化不大,使在这一地区的岩土工作者倍感汗颜。为此,本人更为本书两位作者的精神所感动,尽管他们的工作可能不是十全十美,甚至还有这样那样的不足,但在这浮躁、炒作风气盛行、充满欲望的时代,年轻人能逆势而行,老老实实坐下来做些学问,实在是难能可贵。黄土结构性的研究是困难的,其动力性质的研究是复杂的,其本构模型的研究是枯燥的,我在这本书里不仅学到了作者的研究成果,更重要的是看到他们的敬业精神,同时也是对老一代岩土工作者的一种安慰,我们的事业后继有人。

我国是一个多地震的国家,黄土多分布于地震高烈度区,在人们已知的大地震中,死亡人数最多(83 万人)的地震(1556 年的关中大地震)就发生在这里,因此黄土结构动力性质的研究对这一地区尤为重要,其成果尽快用于工程实际对这一地区人民生命财产的安全及经济建设具有决定性的作用。该书不仅丰富了土动力学的理论,而且紧密结合工程实际,它一定会对黄土地区的经济建设产生重要的影响。

刘明振 教授

2012 年 8 月 4 日

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第 1 章 绪 论                   | 1   |
| 1.1 研究背景及意义                 | 1   |
| 1.2 典型地下结构(构件)的地震震害调查分析     | 2   |
| 1.3 土-地下结构(构件)地震反应分析方法      | 13  |
| 1.4 黄土地区土-地下结构(构件)体系研究存在的问题 | 26  |
| 1.5 本书的研究内容                 | 35  |
| 第 2 章 饱和黄土静、动力试验研究          | 38  |
| 2.1 引 言                     | 38  |
| 2.2 饱和黄土静力特性试验研究            | 39  |
| 2.3 饱和黄土动力特性试验研究            | 58  |
| 2.4 构建饱和黄土结构性动力本构模型的若干建议    | 71  |
| 2.5 本章小结                    | 84  |
| 第 3 章 非饱和黄土静、动力试验研究         | 87  |
| 3.1 引 言                     | 87  |
| 3.2 试验试样                    | 87  |
| 3.3 非饱和黄土静力三轴试验研究           | 88  |
| 3.4 非饱和黄土动力三轴试验研究           | 109 |
| 3.5 本章小结                    | 116 |
| 第 4 章 考虑结构性的饱和黄土动力本构模型研究    | 118 |
| 4.1 引 言                     | 118 |
| 4.2 基本应力应变关系的构建             | 119 |

|                                          |                               |            |
|------------------------------------------|-------------------------------|------------|
| 4.3                                      | $K_0$ 正常固结饱和黄土不排水强度理论推导 ..... | 123        |
| 4.4                                      | 超固结饱和黄土不排水强度变化规律理论推导 .....    | 127        |
| 4.5                                      | 考虑拉压不同性质以及中主应力影响进行修正 .....    | 131        |
| 4.6                                      | 退化模型 .....                    | 132        |
| 4.7                                      | 孔压模型 .....                    | 143        |
| 4.8                                      | 本章小结 .....                    | 155        |
| <b>第 5 章 饱和黄土结构性动力本构模型程序实现及验证 .....</b>  |                               | <b>157</b> |
| 5.1                                      | 引 言 .....                     | 157        |
| 5.2                                      | 结构性的考虑 .....                  | 157        |
| 5.3                                      | 饱和黄土动力本构模型建立步骤 .....          | 172        |
| 5.4                                      | ABAQUS 有限元分析软件介绍 .....        | 175        |
| 5.5                                      | 饱和黄土结构性动力本构模型的程序实现步骤 .....    | 177        |
| 5.6                                      | 模型验证 .....                    | 181        |
| 5.7                                      | 本章小结 .....                    | 187        |
| <b>第 6 章 非饱和黄土结构性动力本构模型 .....</b>        |                               | <b>188</b> |
| 6.1                                      | 引 言 .....                     | 188        |
| 6.2                                      | 经典弹塑性本构模型 .....               | 188        |
| 6.3                                      | 边界面模型 .....                   | 192        |
| 6.4                                      | 重塑非饱和黄土的模型构建 .....            | 195        |
| 6.5                                      | 原状非饱和黄土的模型构建 .....            | 210        |
| 6.6                                      | 本章小结 .....                    | 216        |
| <b>第 7 章 非饱和黄土结构性动力本构模型程序实现及验证 .....</b> |                               | <b>217</b> |
| 7.1                                      | 引 言 .....                     | 217        |
| 7.2                                      | 本构模型参数 .....                  | 217        |
| 7.3                                      | 非饱和黄土动力本构模型实现 .....           | 219        |
| 7.4                                      | 模型验证 .....                    | 232        |
| 7.5                                      | 本章小结 .....                    | 234        |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| <b>第 8 章 饱和黄土地地区场地地震反应分析</b> .....       | 235 |
| 8.1 引 言 .....                            | 235 |
| 8.2 场地反应分析的研究现状 .....                    | 236 |
| 8.3 场地动力反应数值研究中的几个问题 .....               | 239 |
| 8.4 上覆土层厚度对场地动力反应的影响 .....               | 248 |
| 8.5 超孔隙水压力对场地动力反应的影响 .....               | 253 |
| 8.6 土体结构性对场地动力反应的影响 .....                | 257 |
| 8.7 层状场地地震反应分析 .....                     | 260 |
| 8.8 单、双向地震作用下场地地震反应对比分析 .....            | 266 |
| 8.9 本章小结 .....                           | 270 |
| <b>第 9 章 非饱和黄土地地区场地地震反应分析</b> .....      | 272 |
| 9.1 引 言 .....                            | 272 |
| 9.2 场地分析模型 .....                         | 272 |
| 9.3 场地地震反应影响因素分析 .....                   | 272 |
| 9.4 双向地震作用下场地地震反应分析 .....                | 285 |
| 9.5 本章小结 .....                           | 290 |
| <b>第 10 章 单桩-饱和黄土-上部结构动力相互作用分析</b> ..... | 292 |
| 10.1 引 言 .....                           | 292 |
| 10.2 地震作用下桩-土-结构动力相互作用的物理过程<br>分析 .....  | 293 |
| 10.3 单桩-土-结构数值计算模型 .....                 | 295 |
| 10.4 桩土界面的处理 .....                       | 296 |
| 10.5 超孔隙水压力的影响 .....                     | 298 |
| 10.6 桩土界面黏结滑移的影响 .....                   | 304 |
| 10.7 桩长细比的影响 .....                       | 308 |
| 10.8 土体结构性的影响 .....                      | 312 |
| 10.9 层状土-桩-结构反应分析 .....                  | 315 |

|               |                                |            |
|---------------|--------------------------------|------------|
| 10.10         | 地震输入方式的影响 .....                | 321        |
| 10.11         | 本章小结 .....                     | 326        |
| <b>第 11 章</b> | <b>非饱和黄土地区地铁车站地震反应分析 .....</b> | <b>329</b> |
| 11.1          | 引 言 .....                      | 329        |
| 11.2          | 计算模型 .....                     | 329        |
| 11.3          | 地震反应计算结果 .....                 | 333        |
| 11.4          | 结构埋深对地震反应的影响 .....             | 355        |
| 11.5          | 本章小结 .....                     | 359        |
| <b>第 12 章</b> | <b>结论与展望 .....</b>             | <b>361</b> |
| 12.1          | 结 论 .....                      | 361        |
| 12.2          | 展 望 .....                      | 366        |
| <b>参考文献</b>   | <b>.....</b>                   | <b>368</b> |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

地震在历史上给人类造成了极大的人员伤亡和财产损失,世界各国都积极地投入巨大的人力和财力来研究这种自然灾害,寻找对策,尽可能地降低其带来的损失。进入新千年以来,全球各地大地震更是频频发生:2001年1月26日,印度西部古吉拉特邦发生里氏7.9级大地震,夺走了两万多人的生命,逾45亿美元的财产顷刻间化为乌有,作为印度最富庶地区之一的古吉拉特邦的经济一下子倒退了20年;2003年12月26日,伊朗克尔曼省东南180 km的巴姆古城发生里氏6.6级强地震,几乎完全摧毁了这座古城,造成了至少5万人死亡;2004年12月26日,位于印尼苏门答腊以北的海底发生1900年以来强度第二强的9.3级地震,引发的海啸给沿海国家造成空前的灾难,近30万人死亡,还有十万人失踪,财产损失不计其数;2011年3月11日,日本东北部海域发生里氏9.0级地震并引发海啸和核电站泄漏,造成重大人员伤亡(已确认造成14 063人死亡、13 691人失踪)和财产损失。我国自古以来就是一个地震多发、深受其害的国家。据统计,从1964年至1998年间,我国共发生6级以上地震336次,其中大于7级的25次;2003年至2012年(截至2012年6月10日止),我国共发生5.0级以上地震381次,其中8.0级以上一次;7.0~7.9级7次;6.0~6.9级67次。2008年5月12日的8.0级汶川大地震造成了自1976年唐山大地震以来,国内最为严重的一次地震灾害,地震瞬间夺走了近7万人的生命,数百万人无家可归。这一串串数字震撼着人们的心灵,与此同时,也给研究工作提出更紧迫的要求。然而由于地震的突发性和人们对其认识的缺乏,人类目前只

能从各方面采取一些措施进行积极的预防,这其中很重要的一方面就表现在建筑工程领域。历次地震灾害表明:地震对建筑物的破坏是造成地震直接灾害和次生灾害的一个重要方面,所以从抗震的角度来进行建筑物的设计和加固具有十分重要的意义,这在目前世界各国相应的结构设计规范里面已有所体现。

我国自改革开放以来,从各大城市老城区改造、新城区建设的地方战略到新农村建设、西部大开发、中部崛起等国家战略,都掀起了一波又一波大规模的国民基础设施建设,这在人类历史上是绝无仅有的。而伴随着高层建筑、桥梁、输气输水管道、城市地铁等项目在高度(超高)、长度(超长)、深度(超深)和地域(黄土、软土、冻土等各种特殊土地地区)上的一次次突破,一旦发生地震,随之带来的灾害风险和程度也已不可同日而语。为了应对地震的不可预测性并最大限度降低由其可能引发的灾害,需更进一步、更全面地深入开展有关建筑物抗震方面课题的研究。而在此类研究中,不能再单纯地只针对地下结构(构件)或是上部结构,而是需要着眼于土-结构这样一个整体系统。研究中涉及结构工程、岩土工程与地震工程众多学科领域方面的知识,因此结构的抗震问题也变得异常复杂。经过各国学者近几十年的努力,虽然已取得了非常显著的成果,但近年来发生的地震所造成的破坏表明:人们对土-结构系统的地震性态还远没有充分认识,结构抗震设计的理论研究还不够成熟,现行设计方法在一定程度上还依赖于经验,而这种经验目前又是远远不够的。地震的频发、灾害的严重后果、认识的不足都需要我们更加重视结构的抗震研究,亟待从各个角度、各个环节对其进行进一步的探索。这种需要对于地下结构(构件)的抗震性能研究而言则显得更为迫切。

## 1.2 典型地下结构(构件)的地震震害调查分析

传统的建筑物按照结构与地基的相对位置关系,可分为三类:一类是上部结构(无地下部分)通过基础与地基相连,如房屋(无地

下室),桥梁等;第二类是上部结构的一部分置于地下,再通过基础与地基相连,如带地下室的房屋等;第三类是结构直接置于地基之中的纯地下结构,如隧道、输水管、地铁车站等。但无论哪种类型,在地震作用下,地震波都是首先经由地基传入建筑物的地下部分而引起建筑物的地震反应;而后的过程中,地上结构的震动也会经由地下部分向地基中传播。这也就意味着:在地震反应过程中,建筑物的地下部分同时承受两种相互作用,即与地基的相互作用和与建筑物地上部分的相互作用;也承受着两个波的作用,地震入射波和上部结构反应产生的下行波,整个过程的力学行为相当复杂,其受到破坏的可能性是非常大的。另一方面,与建筑物的地上部分相比,地下部分具有隐蔽性,地震中一旦发生破坏,不仅其具体位置和程度难以确定和估计,而且往往是不可恢复的,同时也会对地上部分产生非常严重的影响。从上述分析中可以看出:建筑物地下部分的抗震性能是保证地震中整个建筑物安全的一个关键。因此深入认识地震中建筑物地下部分的反应机理,对以往地震中地下结构(构件)的震害进行调查将是非常必要的。下面将分别对桩基(地下构件)和纯地下结构的震害进行调查分析。

### 1.2.1 桩基震害调查分析

桩基是深入地基中若干杆件的组合体。虽然大量的工程表明:和其他形式的基础相比,桩基础在抗震方面具有良好的性能。但由于人们对其在地震作用下的工作机理还不是完全清楚,设计与施工中还存在较多的盲点,再加上地震本身强大的破坏性,使得在历次大地震中,都存在桩基础破坏的情况,且一旦破坏,一般都会引起较严重的后果。地震中桩基础的破坏形式多种多样,程度也各不相同<sup>[1]</sup>。造成这种现象的因素有很多,大致可归纳为以下三类:一是场地的差异性,场地距震中的距离、局部地形、场地土的均匀性及其力学性能等;二是桩基本身的差别,单桩或群桩、摩擦桩或是端承桩、桩体的长径比、桩体本身的强度等;三是上部结构的异同,建筑物的高度、质量分布、平面布置、整体性、与桩基间的

连接形式等。为了对地震中桩基的破坏有一个更直观的认识,并在此基础上分析和归纳桩基破坏的模式和原因,为桩基的抗震研究以及设计提供依据,下面将介绍几次大地震中一些比较典型的桩基破坏实例。类似的实例总结见参考文献[2]~[4]。

### 1. 1976 年唐山地震

1976 年 7 月 28 日唐山发生 7.8 级强烈地震,震中烈度达 11 度。7~11 度地区 89 座大中型桩承桥梁的震后破坏情况统计资料显示:在 9~11 度高烈度区,桥梁倒塌或严重破坏的桥梁所占比例高达 78.3%,8 度区严重破坏或倒塌的占 30%,7 度区严重破坏的则只占 4.7%。破坏形式大致有三种:①各桩墩单向倾斜,下端开裂、折断;②各桩墩呈八字形倾斜;③各桩墩呈倒八字形倾斜。桩墩开裂是这次地震中梁式桥最普遍的震害现象,开裂部位有三种形式:桩柱下部开裂;桩柱顶与盖梁连接处开裂;桩柱与横系梁连接处或墩柱截面变化处开裂。此外,桩周围地面喷水冒砂,致使桩根部与四周土体分离。图 1-1~图 1-2 为唐山胜利桥破坏的情况。该桥是跨陡河的 5 孔 11 m 的装配式钢筋混凝土简支 T 型公路梁桥,柱墩为三柱式单排钻孔桩墩, $\phi 1.0$  m 长 18 m 的桩基础,桩底位于密实的粉质黏土层上。地震发生时桥址处烈度为 11 度,附近上下游两岸严重滑移塌落,有喷砂冒水现象。桥体 1~3 号墩柱接近平行地向河心倾斜滑移(图 1-2),4 号墩三个桩柱全部在接

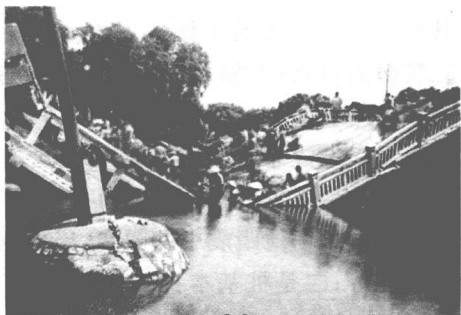


图 1-1 4 号墩桩基折断造成桥面垮塌

桩位置折断。桥台向河心倾斜并下沉,两孔折断,五十多米的桥梁震后缩短 2.6 m。



图 1-2 1~3 号墩柱平行向河心倾斜滑移

## 2. 1989 年 Loma Prieta 地震

Loma Prieta 地震导致一些桩支撑结构发生倒塌或严重的破坏。最显著的例子是奥克兰海湾大桥(图 1-3)和塞浦路斯双层高架桥(图 1-4)的部分坍塌。尽管前者的坍塌是由于桥梁面板和桩头连接部分的剪切破坏造成的,但桥梁是支撑在软弱土中大范围群桩基础上的,桩-土-结构的相互作用在其中起了重要作用。同样,后者的破坏归因于场地反应放大和结构细节设计不当的共同作用。支撑这个结构的桩体位于软弱至非常坚硬的过渡地层中。在这种情况下,高架桥的坍塌部分支撑在 0~25 ft 的海湾泥层上,下卧层为深度超过 500 ft 的硬土。高架桥南面没有倒塌的大部分只受到了很小的破坏,其坐落于深厚的冲积层上,而表面没有海湾泥层。在这次地震中,桩基破坏最典型的例子是通往 Watsonville 的 Struve Slough 桥。这座桥的垮塌是由于桩体侧向支撑不够引起的,桩周围很大的土体裂缝证明了这一点,如图 1-5 所示。这种不充分的侧向约束加上上部结构惯性力的作用,导致桩体较大的横向变形,使得一些桩和桩帽脱离并穿透桥梁面板。图 1-6 中桩头处连接良好,但桩周土体被挤开,桩整体从土中被拔出。图 1-7 中,大的侧向位移使得桩沿面板纵向移动,致使桩头与

桩帽脱离。图 1-8 中桩基顶部和中部发生弯剪破坏。

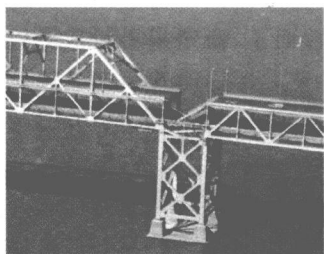


图 1-3 桥面落梁

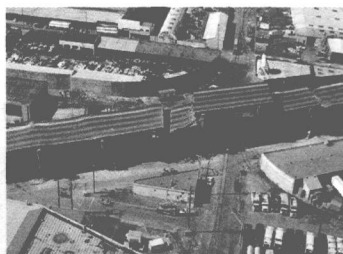


图 1-4 桥面坍塌



图 1-5 桩体分离

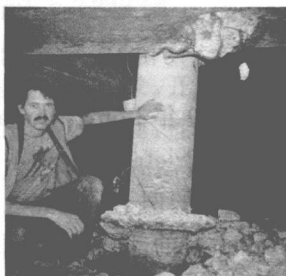


图 1-6 桩体拔出



图 1-7 桩头与桩帽脱离

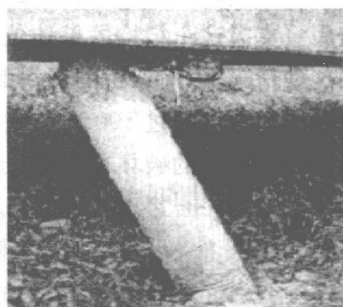


图 1-8 弯剪破坏

### 3. 2008 年汶川地震

2008 年 5 月 12 日发生在我国四川省汶川县的 8 级大地震给