

王强、孙军杰、王兰民, 2012, 黄土震陷研究及相关问题探讨, 中国地震, 28(4), 351 ~ 359。

# 黄土震陷研究及相关问题探讨

王强<sup>1,2,3)</sup> 孙军杰<sup>1,2,3)</sup> 王兰民<sup>1,2,3)</sup>

1) 甘肃省地震局(中国地震局黄土地震工程重点实验室), 兰州市东岗西路 450 号 730000

2) 中国地震局兰州地震研究所, 兰州市东岗西路 450 号 730000

3) 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 兰州市东岗西路 450 号 730000

**摘要** 回顾了 30 多年来关于黄土震陷的研究工作和成果。黄土震陷已为微结构特征、动三轴和现场爆破试验所证实, 成为黄土地震工程研究领域的一项重要课题, 但仍缺少典型震例, 且停留在饱和土理论研究阶段。应用微结构形态学方法表征土体结构性变得困难, 土力学方法将是微结构应用于震陷性研究的有效途径。震陷性判定仅是在多个参变量值区间内的确定性判定, 概率性震陷预测应得到开展。震陷系数估算多是基于室内试验数据的经验公式或半经验半理论公式, 并未完全解决其物理过程和力学机制问题, 比如参变量多、计算繁琐和实用性差等, 故应从黄土震陷的物理力学机制出发, 厘清影响黄土震陷的主导因素及其表征参变量, 建立具有物理力学意义的数学理论估算模型。抗震陷处理技术的关键是消除土体的震陷性, 并减缓震陷时土与土工结构物的相互作用。

**关键词:** 黄土震陷 震陷机理 震陷性判定 震陷量估算 微结构

[文章编号] 1001-4683(2012)04-0351-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

黄土是一种典型的第四纪松散沉积物, 在其沉积过程中独特的地质营力、生成环境和物质来源等因素的影响, 形成了黄土特殊的粉粒性、富盐性、大孔性、欠压密性、非饱和性的多孔隙弱胶结架空结构(刘东生, 1985; 雷祥义, 1989; 谢定义, 2001)。这种特殊的物理性质和结构特征, 使得黄土具有较高的水敏性和地震易损性, 是形成黄土湿陷、震陷和液化等工程地质灾害的主要原因。我国拥有世界上分布最广、厚度最大、成因类型最复杂的黄土地区, 包括黄土类土在内, 分布总面积达 64 万  $\text{km}^2$ , 且分布区多为干旱半干旱的高烈度区 ( $\text{PGA} \geq 2.0\text{g}$  的区域约占 50%,  $\text{PGA} \geq 1.5\text{g}$  的区域约占 80%), 历史上的多次强震均不同程度地引起过黄土震陷、震陷型滑坡和液化等震害(王兰民, 2003; 谢定义, 2001)。可以看出, 黄土地震灾害是黄土地区的主要安全问题, 地震作用下的黄土动力稳定性是岩土界的一项重要课题。然而, 受研究认识深度所限, 早期黄土工程领域研究的重点关注问题主要集中于黄土湿陷现象, 对黄土震陷、液化问题未能予以重视。自 1966 年邢台地震、1976 年唐山地震等之

[收稿日期] 2012-04-20

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2011IESLZ03)资助

[作者简介] 王强, 男, 1983 年生, 助理研究员, 主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: wangqiangbj@163.com

后的几十年来,随着我国对地震灾害防御领域的重视程度日益提升,黄土地震灾害的相关研究逐渐浮出水面,而早先未能给予重视的黄土震陷、液化等可能诱致地质灾害与工程病害的震害现象已成为黄土动力学这一新兴学科的主要研究内容(王兰民,2003)。

黄土震陷研究始于上世纪 80 年代初,其概念的正式提出是在 1986 年的地震区工程地质问题国际研讨会(Proceedings of the international symposium on engineering geology problems in seismic areas)上,并在本次国际会议论文集上正式发表,标志着黄土震陷研究的正式开启,此前主要经历黄土震陷现象的认识、震陷机理的揭示和震陷概念的提出<sup>①</sup>(张振中,1983;Zhang et al,1986)。此后,随着各种试验技术手段和研究方法的改进,如振动三轴仪、微结构电子扫描镜、地震模拟振动台和现场爆破技术等,使得黄土震陷研究在震陷机理揭示、震陷性判定方法、震陷量值估算、震陷性黄土地基处理技术等方面取得了不同程度的进展,震陷量也作为评价黄土场地震陷灾害等级的判据纳入地方抗震规范。然而迄今为止的 30 多年,黄土震陷研究虽已取得一定进展,但仍存在如下方面的问题:黄土震陷虽然已从多方面取得佐证,但仍缺少近期典型震害实例的强有力例证;针对黄土震陷影响因素的试验研究开展较多,为震陷机理的进一步揭示、震陷性判定和震陷量估算等方面提供了试验证据和基础数据,然而这些研究多着眼于对试验数据的统计分析,获取规律性认识和经验性公式,并未能从黄土震陷的力学机制和物理过程出发,结合试验数据给出黄土震陷量的理论估算模型;借助黄土微观结构研究,宏观震陷现象得以微观结构的合理解释,微观结构尺度上的黄土震陷量估算也已取得进展,但结果仍不乐观,需要开启新的思路;等等。简言之,黄土震陷研究发展的 30 年间,虽已取得诸多成果性研究进展及工程应用,但对已有进展仍存在疑点,使研究仍处困境。当前,针对黄土震陷尚缺少综述及探讨性的文献现状,本文总结了近年来黄土震陷及相关研究领域的已有研究成果,并针对黄土震陷研究中的关键科学问题及其解决思路进行探讨,以期对黄土震陷的进一步深入研究有所裨益。

## 1 黄土震陷机理

对黄土震陷的认识始于上世纪 80 年代初,张振中<sup>②</sup>从地震引发崩塌性黄土滑坡、动三轴试验中形变量的急剧增长和微观架空孔隙结构等现象中发现,类似悬空珠子排列的土颗粒大孔隙架空结构,任一环节上的颗粒塌落都可能引起连锁反应而造成该种结构的全面崩塌,宏观上则表现为突然的大幅度沉陷、滑坡或崩塌。这是黄土震陷认识上的理论雏形,明确了黄土的大孔隙和弱胶结是造成崩塌效应的本质因素,结构崩塌是引发大幅度沉陷、滑坡和崩塌等宏观震害的诱因。随后的国内及国际学术会上<sup>①</sup>(Zhang et al,1986),黄土震陷(Seismic Subsidence of Loess)概念被提出,黄土震陷是指动荷载作用下土体产生的附加沉陷,与土的残余变形密切相关,宏观表现为建筑物地基受地震影响产生的附加不均匀沉陷引起建筑物不同程度的破坏或斜坡失稳现象。这一定义准确描述了黄土震陷概念的内涵和外延,明确了黄土震陷与土体动残余应变的本质联系,并为黄土震陷研究做了严格的学术界定。相继研究中,在大量动三轴试验的基础上,从动残余应变与黄土震陷的

① 张振中、段汝文,1986,黄土震陷问题的探讨,全国土工建筑物级地基抗震学术讨论会论文集汇编,43~46

② 张振中,1982,地震工程中的黄土动力特性问题,全国黄土学术会议论文

本质关系切入, 针对黄土震陷形成机制对应的应力-应变关系开展研究, 并结合形成黄土震陷的物理基础(微结构), 在黄土震陷机理认识和震陷性判定方面展开了深入细致的探讨(张振中, 1999、1987、1990)。就笔者针对目前相关的研究文献了解, 黄土震陷作为一种主要的岩土地震工程灾害, 其机理和工程震害已经为学界认识和重视, 并日益受到广泛关注。但是, 限于以往研究条件和技术手段的限制, 对黄土震陷的现有认识和研究仍存在如下三方面的问题:

(1) 黄土是一种典型的非饱和土, 为固、水、气三相复合介质, 土孔隙中气-水界面的表面张力是影响其力学特性和工程性质的重要原因(陈正汉等, 2001)。然而, 在黄土震陷研究初期, 受非饱和土测试技术的限制, 较多采用常规动三轴试验和土体微结构分析技术, 在饱和土力学理论下开展黄土震陷机理、影响因素和震陷量估算方面的研究, 使得现有工作仍停留在饱和土力学理论基础之上。然而, 黄土震陷的问题实质是非饱和黄土的动残余应变, 对黄土震陷的进一步深入研究必然要在非饱和土力学理论下开启思路(谢定义, 2001; 孙军杰等, 2012)。

(2) 黄土震陷是一种地震灾害, 而地震是一种小概率事件。黄土震陷虽已从室内动三轴试验方面得到证实, 但至今尚缺少黄土震陷的典型震例。确切地说, 在实际地震中黄土场地能否产生震陷, 仍缺少十足可信的现场震例(Zhang et al, 2005)。而设计实际地震作用下的黄土震陷试验几乎是不可实现。这种情况下, 采用大型振动台模拟试验和爆破模拟地震动的现场试验, 开展黄土震陷研究, 将不失为更能近似模拟震陷形成的技术手段, 它一方面可以为黄土震陷提供较之动三轴、微结构和数值方法等更具可信度的模拟试验, 另一方可以借此开展大尺度的场地震陷时空发展规律、场地震陷量值预测及震陷作用下地下结构抗震方面的研究(翁效林, 2007; Wang et al, 2011)。

(3) 黄土震陷和湿陷均是土体结构遭受外界作用破坏, 孔隙压缩, 土颗粒致密而引起的土体沉降现象, 区别在于震陷是外部地震惯性力引起的土体结构失稳, 而湿陷是土体结构构成物质在浸水环境下的物质失衡而导致原有力平衡的破坏, 从而引起的土体结构失稳。因此说, 黄土震陷与黄土湿陷在破坏形式上存在相似性, 但其形成机理上存在本质的区别。黄土震陷的主导因素是地震动荷载, 而黄土湿陷的主导因素是水。黄土震陷的形成过程中虽然受到水的重要影响, 但水并不是形成黄土震陷的必要条件。

## 2 黄土震陷与微结构

黄土的微结构是在黄土物质沉积和沉积后的成土作用过程中形成的(雷祥义, 1983)。黄土堆积过程中的生成环境和成岩作用必然在其微结构上留有烙印, 它反映了黄土特有的土体结构, 决定着黄土的震陷性和其它工程地质性质(廖胜修, 1990; 王永焱等, 1982)。黄土沉积过程一般比较缓慢, 在漫长的沉积过程中, 上覆压力增长速率比颗粒间固化联结键强度的增长速率要慢的多, 颗粒接触点间的结构强度始终超过上覆荷载, 使得黄土颗粒间保持着比较疏松的高孔隙结构而未在上覆荷重作用下固结压密, 形成了黄土独特的大孔隙结构, 处在欠压密状态, 是黄土震陷形成的必要物质条件(张苏民, 2001)。作为一种土体的宏观性状, 黄土震陷是微观性状对外部主导因素作用的综合响应, 黄土微结构特征是其微观性状的具体表征。因此, 研究黄土的微结构特征, 不仅有助于理解黄土震陷的宏观性状, 而且对

厘清黄土震陷各种影响因素的作用机制有重要意义。

自1925年Terzaghi首次提出土的微结构(microstructure)概念和思想以来,有关土体的微结构研究已经历了80多年,其间取得的大量成果为解释土体的力学行为及其物理本质发挥了非常重要的作用。我国利用扫描电子显微镜研究黄土微结构始于20世纪70年代(胡瑞林等,1995;齐吉琳等,2001)。黄土震陷研究之初,诸多学者即利用微结构对黄土震陷现象做出解释,认为架空孔隙结构与黄土震陷具有密切联系,可以对震陷的形成做出解释(张振中等,1983、1987、1990、1999;王兰民,2003;Zhang et al,1986)。随后的黄土微结构研究多集中探讨震陷性黄土的微结构特征、孔隙分布对震陷性的影响及震陷形成机理等方面,取得一些用于黄土震陷分析、判定的研究认识,如震陷性强的黄土均具有明显的架空孔隙结构、中大孔隙含量对黄土震陷性影响显著、孔隙分布规律对黄土震陷的影响规律及引入分形理论的震陷机理分析等(邓津等,2005;王兰民等,2000;石玉成等,2002、2003;刘红玫等,2005;李兰等,2005a、2005b)。不难看出,这些结论仍属基础性认知,在理论应用方面尚显不足。直至王兰民等(2007)基于数字扫描电镜获取的微观架空孔隙面积量化数据,利用黄土气固表面原理分析颗粒-孔隙的相互作用,建立了黄土震陷系数计算公式,并以此公式的数学分析结果,提出了黄土震陷过程中应力-应变发展的5个阶段,合理解释了黄土震陷是因不同大小的架空孔隙不断破坏而导致的多个突变过程的最终宏观结果,开启了将微结构用于黄土震陷的量化研究。

黄土微结构研究在认识黄土震陷形成机理、影响因素的作用机制等方面有重要作用,同时在黄土震陷量估算方面也取得进展。但是,目前的微结构研究存在着较难逾越的障碍:首先,微结构是一个笼统且宏观的概念,需要引入某些参数对其进行定量刻画,土体结构自身的复杂性致使这些参数的量值通常具有极大的随机性与离散性,这种不确定性直接影响通过微结构分析所得定量分析结果的可信度和应用性,造成了微结构研究在直接定量解决土力学领域关键问题方面仍徘徊于探索阶段的现状;其次,土体微观结构特征与其宏观力学现象之间的定量关系,仅靠统计分析描述二者的试验参数之间的可能关系远嫌不够。如果不能从理论上架构微观与宏观之间的有效桥梁,只能使相关研究工作陷入数据迷阵,将使直接应用土体微观结构特征来描述其宏观力学现象的道路变得困难。基于微结构形态学研究方法在全面描述结构性几何特征和联结特征方面的困难以及测试技术上的复杂性,应用土力学研究方法寻找一种能够全面反映土颗粒的排列特征和联结特征,且与土体变形和强度密切相关的量化指标,将是土体微结构应用于震陷研究的有效途径(齐吉琳等,1997、2001;谢定义等,1999)。

### 3 黄土震陷性判定及震陷量的估算

影响黄土震陷的因素较多,按其属性可归类为3个方面:一是黄土的固有性质,如密度、孔隙比、含水量和微结构特征等因素;二是与黄土的形成和赋存条件相关的因素,如前期固结压力和埋深等;三是与动荷载特征有关的荷载条件,如振次、荷载类型、卓越周期、有效持时和峰值等。在研究黄土震陷之初,影响因素的研究即已成为学界的重点关注对象。这是对事物认知的必然过程,对影响因素的关注有利于理解其产生的物理过程和力学机制,对建立发展黄土震陷理论具有基础性作用。

### 3.1 震陷性的判定

黄土震陷影响因素研究结果最为直接的应用,是由此提出了黄土震陷性的初判指标,对未曾开展细致研究工作的黄土场地,可依此获取该场地黄土震陷性的初步认识,并可由震陷性决定是否需要进一步通过室内动三轴试验给出具体的震陷特征和量值。因此,震陷性判定不仅可以用于黄土震陷灾害的危险性初判,而且可以为场地震陷性评价提供进一步的工作依据。

震陷性是地震作用下土体产生附加沉陷的性质,黄土是否具有震陷性与地震作用荷载和土体性质相关,即震陷性是涉及多种因素参变量共同影响制约的变量。从理论上讲,在黄土震陷性的判定问题中,当依据影响黄土震陷的某一参变量值来判定其震陷性时,只有针对某种特定的土,在特定的外界条件下判定其震陷性才具有确定性。然而,事实是在自然界中决定黄土性质的参变量是随机变量,即使是同一场地范围内同一类型的黄土,其影响参变量也具有很大的随机性。因此,对于同一类型黄土,影响其震陷性的参变量值服从某一函数分布,震陷性判定问题属于场地区域内的概率性问题,而并不可能对黄土的震陷性给出严格的界定。

在黄土震陷性判定的已有研究中(谷天峰,2007;栗润德等,2007;李启鹞等,1985;徐舜华等,2006;张振中等,1990),通过分析影响因素中土体物性参数、应力条件、加载条件等与动残余应变之间的关系,得出了依据微结构、孔隙比、干密度、波速、标贯击数等指标判定黄土震陷性的方法,以参变量的区间值对黄土震陷性进行确定性判定。例如:具有架空孔隙结构、临界动应力处在  $0.2 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 、孔隙比大于 0.8 时,黄土具有震陷性;含水量小于缩限、孔隙比小于 0.75 或击实黄土干密度大于  $1.63 \text{ g/cm}^3$  的黄土不具有震陷性。可以看出,这些震陷性判定仍属于用参变量的取值范围进行的确定性判定,没有给出黄土震陷发生的概率性预测;另外,判定中涉及参变量过多,均存在两种或两种以上影响因素的耦合作用,但文献中并未给出其耦合关系。

针对上述问题,黄土震陷性判定的研究需要从以下两方面着手,一是需要开展场地区域范围内的黄土震陷判定的概率性预测,首先从黄土震陷形成的物理过程和力学机制出发,分析影响黄土震陷的主导参变量或反映主导因素的间接物理量,通过统计这些参变量在场地区域范围内的分布特征及震陷系数分布特征,根据它们之间的变化关系,建立依据某一特定或多种变量综合判断下的黄土震陷概率性判定。二是需要开展影响黄土震陷性判定的多因素耦合作用分析。由于黄土震陷性是多因素耦合作用下的土体性质,各因素之间存在相互制约的耦合关系,所以震陷性判定问题才会陷入考虑多因素的乱局中。给出黄土震陷性判定中的多因素耦合关系,无论是对于厘清黄土震陷的主要因素,还是对于明确震陷性判定影响因素之间的关系,都具有一定的意义。

### 3.2 震陷量的估算

震陷量作为评价黄土场地震陷的基础依据,是划分黄土震陷灾害等级并采取适当地基处理技术的根本判据。计算震陷量的关键是获取黄土的震陷系数,然后利用“分层总和法”估算出某黄土场地在特定动荷载作用下的震陷量(王兰民等,1993)。震陷系数的获取以室内动三轴试验方法最为直接可信,但其应用于场地震陷灾害评价时,需要面对大量的室内动三轴试验,耗时耗力。黄土震陷量是随影响因素参变量变化的量,客观上二者间必然存在某

种数学关系。通过建立黄土震陷系数与参变量间的函数关系,进而由易于获取的参变量推算出震陷系数,基于这种思路的震陷系数估算方法成为黄土震陷研究中的一项重要内容。

目前,针对黄土震陷系数的计算方法已有多种,其中有基于试验数据统计分析给出的经验公式,如王兰民等(1993)根据大量室内动三轴试验数据,建立了考虑含水量、孔隙比、固结应力、振次和动应力等因素的西北黄土震陷系数的经验计算公式;也有从特定物理原理出发建立的半经验半理论公式,如邓津等(2007)通过研究黄土微结构与震陷性之间关系,应用黄土土固表面原理,建立了应用微结构特征参数(架空孔隙面积和粒径偏斜度)估算黄土震陷系数的半经验半理论公式;也有根据黄土物性参数与震陷之间的统计关系,建立的震陷系数估算公式,如陈永明等(2003)根据黄土震陷试验和原位波速测试数据,建立了考虑含水量影响下应用剪切波速和动应力计算震陷系数的公式。可以看出,这些方法未能从黄土震陷形成的实际物理过程和力学机制出发,未能充分考虑并纳入影响黄土震陷的主导因素,使得估算公式繁琐并涉及参变量过多,适用性和应用性较差。

黄土震陷量估算方法中的“分层总和法”是不同土层震陷量的均值叠加,这里假设同一类土层具有相同的震陷系数,震陷系数不随土层深度变化。实际上,黄土震陷与黄土自身性质、应力环境和外部动荷载条件等相关,而土层随深度增加,其物性参数和应力环境必然变化,另外,黄土震陷是一个地震能量的消耗过程,不同深度的动荷载条件也随之变化(丁伯阳等,2001)。显然,“分层总和法”并不完全适用于黄土场地震陷量的计算。如何提出一种适用于黄土场地震陷量估算的方法,其一需要获得地震动随黄土场地深度的衰减规律,其二要明确震陷系数随深度的变化规律。

由此可见,黄土场地震陷量的估算存在两个关键问题,一是提出一种反映黄土震陷物理过程和力学机制,纳入主导因素参变量的震陷系数估算方法;二是明确震陷系数和地震动随场地深度的变化及衰减规律,建立一种更为合理的黄土场地震陷量估算模型。

## 4 黄土震陷灾害及防治技术

在黄土震陷引发的工程灾害中,以地基不均匀沉陷导致建筑物倾斜或倒塌的灾害现象最为直观,自然在黄土震陷研究中较早得到关注,并开展了相应的抗震技术理论研究。由于黄土震陷与湿陷的机理过程相似,即都是由于架空结构的破坏而致压密固结,因此,黄土震陷处理技术研究之初,多借鉴湿陷性黄土处理中较常采用且行之有效的强夯法、挤密桩法、化学灌浆法等技术手段,通过开展大量室内试验和现场测试,研究黄土地基湿陷性处理技术对改善其抗震陷性的效果,并提出了抗震陷性的处理技术和标准(王兰民等,2001;王兰民,2003),为震陷性黄土地基处理提供了技术手段和科学依据。以上可见,建筑物地基不均匀沉陷是黄土震陷产生的直接致灾后果,防治技术措施的关键在于消除地基土的震陷性,湿陷性黄土处理技术对消除黄土震陷性通常行之有效。

土体震陷过程中必然引起土中构筑物与周围土体的相互作用,可造成地下管线、地铁隧道和桩基等地下构筑物产生位移或破坏,进而引发各种工程灾害。通常情况下,采用消除地下构筑物周围土体震陷性以避免此类工程震害的方法不甚可取。因此,开展土体震陷时地下构筑物与周围土体的相互作用研究,是解决地下工程震害的重要途径,可以为相应的土工抗震设计提供必要的理论依据。相关研究中,软土震陷中的地下构筑物与土体相互作用研

究开展较多,如软土震陷中的地下管线、地铁、隧道等地下构筑物的地震安全问题(董鹏,2004;胡煜文,2008;隋来才,2007)。相比较而言,黄土震陷涉及的地下工程安全问题开展较少,仅在桩土相互作用方面见零星研究(孙军杰,2010;赵琦,2007)。显然,黄土震陷涉及的地下工程地震安全研究滞后于其它类型土,与黄土震陷理论研究发展不相适应,需要进一步对黄土震陷中的隧道、地铁和地下管线等开展研究。

## 5 结语与讨论

(1)黄土震陷是多孔隙弱胶结黄土受动载作用后土体结构的崩溃性破坏,宏观表现为地基沉陷。目前,虽然尚缺少现场震陷的实际资料,但已从多方面进行了推理论证。黄土地区的历史地震曾造成地裂缝普遍、平地裂隙、“气化”滑坡和缓坡沉陷开裂等现象,三轴动力形变试验和微结构特征变化是人们对其进行的理论研究,人们还通过爆破模拟地震动的现场震陷试验进行了现场试验研究。

(2)黄土震陷的影响因素多且作用机制复杂。因此,从物理过程和力学机制出发,厘清影响黄土震陷的主导因素和从属因素,开展黄土震陷影响因素关系研究,将使黄土震陷机理、震陷性评定和震陷量估算的研究脉络清晰,否则会杂乱无序。现有的震陷性评价指标过多且仍是区间范畴上的判定,这与震陷量估算公式中存在的参变量多且计算繁杂等不无关系。

(3)黄土微结构研究对震陷机理认识具有重要作用,但由于对其特性的参变量表征存在困难,且表征其特征的物理量值具有很大的随意性和离散性,致使对黄土微结构进行量化研究仍处在探索阶段。土体微结构与宏观力学现象之间的定量关系,不能仅是从二者试验参数的关系着手,而应从理论上建立二者之间的关系。

(4)黄土震陷引发的工程灾害分为直接致灾(地基沉陷)和间接致灾(桩基下沉或折断)。直接致灾是由于地基土体的震陷累积,应设法消除其震陷性。间接致灾是由于土物相互作用导致的土中结构产生位移或变形,应在土工抗震设计中考虑这种相互作用。现有研究显示,涉及黄土震陷引发的地下工程震害研究滞后于其它类型土的相关研究,需要开展全面深入的研究。

## 参考文献

- 陈永明、王兰民、刘红攻,2003,剪切波速预测黄土地震陷量的方法,岩石力学与工程学报,22(supp.2),2834~2839。
- 陈正汉、卢再华、朱元青,2001,非饱和土的理论与实践,力学与实践,23(5),8~15。
- 邓津、王兰民、张振中,2007,黄土显微结构特征与震陷性,岩土工程学报,29(4),542~548。
- 邓津、王兰民、张振中等,2005,甘肃永登湿陷性新近堆积黄土的微观结构分析,西北地震学报,27(3),267~271。
- 丁伯阳、孟繁丽、樊良本,2001,黄土力学及工程学科的发展与黄土动力学,见:湿陷性黄土研究与工程,502~508,北京:中国建筑工业出版社。
- 董鹏、周健,2004,土与结构相互作用下的地下建筑物动力可靠性分析,建筑结构学报,25(2),124~129。
- 谷天峰,2007,郑西客运专线黄土地基振(震)陷研究[博士学位论文],西安:西北大学。
- 胡瑞林,1995,粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究,1~3,北京:地质出版社。
- 胡煜文,2008,场地震陷对地下管线影响研究[博士学位论文],哈尔滨:中国地震局工程力学研究所。
- 雷祥义,1983,西安黄土显微结构类型,西北大学学报(自然科学版),(4),56~63。
- 雷祥义,1989,黄土的显微结构与古气候的关系,地质评论,35(4),333~341。

- 李兰、王兰民、刘旭等,2005a,极震区黄土微结构的试验研究,中国地震,21(5),369~377。
- 李兰、王兰民、王峻,2005b,永登5.8级地震极震区黄土微结构孔隙性的定量研究,地震研究,28(3),282~287。
- 李启鹏、程显尧、蔡东艳,1985,地震荷载下黄土的动力特性,西安冶金建筑学院学报,43(3),9~37。
- 栗润德、张鸿儒、白晓红等,2007,不同含水量下原状黄土动强度和震陷的试验研究,工程地质学报,15(5),694~699。
- 廖胜修,1990,黄土显微结构的区域性变化与湿陷性的关系,见:中国黄土分类、定名及应用研讨会论文集,144~154,西安:陕西人民教育出版社。
- 刘东生,1985,黄土与环境,14~112,北京:地质出版社。
- 刘红玫、张振中,2005,永登震后黄土微结构特征研究,西北地震学报,27(2),174~177。
- 齐吉琳,1997,黄土结构孔隙性定量分析的孔隙分布曲线,西北地震学报,19(增刊),83~87。
- 齐吉琳、谢定义、石玉成,2001,土结构性的研究方法及其现状,西北地震学报,23(1),99~103。
- 石玉成、李兰,2003,黄土震陷变形特征的细观分析,地震工程与工程振动,22(supp.2),2829~2833。
- 石玉成、李兰、刘红玫,2002,黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究,西北地震学报,24(2),129~134。
- 隋来才,2007,地震作用下盾构隧道形状[博士学位论文],杭州:浙江大学。
- 孙军杰,2010,黄土场地震陷与桩基负摩阻力现场试验研究[博士学位论文],兰州:兰州大学。
- 孙军杰、徐舜华、王兰民等,2012,非饱和黄土动残余应变关键影响参量与量值估算,岩土力学与工程学报,31(2),382~391。
- 王兰民,2003,黄土动力学,5~6,北京:地震出版社,2003。
- 王兰民、邓津、黄媛,2007,黄土震陷性的微量量化分析,岩土力学与工程学报,26(supp.1),3025~3031。
- 王兰民、梁守信、莫庸等,2003,黄土地基震陷性和液化势处理技术,见:中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册),448~452,北京:清华大学出版社。
- 王兰民、王峻、张冬丽等,2001,黄土场地震陷和液化的工程评价和处理技术,见:湿陷性黄土研究与工程,519~528,北京:中国建筑工业出版社。
- 王兰民、袁中夏、王峻等,2000,干密度对击实黄土震陷性影响的试验研究,地震工程与工程振动,20(1),75~80。
- 王兰民、张振中,1993,地震时黄土震陷量的估算方法,自然灾害学报,2(3),85~94。
- 王永焱、腾志宏,1982,中国黄土的显微结构及其在时代上和区域上的变化,科学通报,27(2),102~105。
- 翁效林,2007,强夯黄土地基震陷性离心试验研究,岩土工程学报,27(7),1094~1097。
- 谢定义,2001,试论我国黄土力学研究中的若干新趋向,岩土工程学报,23(1),3~13。
- 谢定义、齐吉琳,1999,土结构性及其定量化参数研究的新途径,岩土工程学报,21(6),651~656。
- 徐舜华、王兰民、袁中夏,2006,黄土震陷初判指标的界定研究,西北地震学报,28(2),140~143。
- 张苏民,2001,黄土湿陷性的基本属性,见:湿陷性黄土研究与工程,99~103,北京:中国建筑工业出版社。
- 张振中,1983,黄土地区震害预测研究的新进展,西北地震学报,5(2),72。
- 张振中,1999,黄土地震灾害预测,96~102,北京:地震出版社。
- 张振中、段汝文,1987,黄土震陷研究与震害预测,西北地震学报,9(增刊),14~18。
- 张振中、段汝文、王兰民,1990,黄土震陷性的判别与预测,见:第三届全国土动力学学术会议论文集,505~510,上海:同济大学出版社。
- 赵琦,2007,震陷时黄土地层中桩土相互作用特征研究[博士学位论文],西安:西安建筑科技大学。
- Wang L M, Sun J J, Huang X F, et al, 2011, A field testing study on negative skin friction along piles induced by seismic subsidence of loess, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(1), 45~58.
- Zhang Z Z, Duan R, 1986, Discussion on seismic subsidence of loess sites in the northwest of China during earthquakes, Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology Problems in Seismic Areas, 65~76, Bari, Italy: Geologia Applicata E Idrogeologia.
- Zhang Z Z, Zhang D L, Liu H M, 2005, Comprehensive study on seismic subsidence of loess under earthquake, Northwestern Seismological Journal, 27(1), 36~41.



## Review and discussion on seismic subsidence of loess

*Wang Qiang*<sup>1,2,3)</sup>   *Sun Junjie*<sup>1,2,3)</sup>   *Wang Lanmin*<sup>1,2,3)</sup>

1) Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China

3) Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

**Abstract** The research works and achievements of seismic subsidence of loess, obtained over the past 30 years, were reviewed. Seismic subsidence of loess has been verified by microstructure characteristics, dynamic triaxial experiments, and in-site explosion test, and has been an important project in the research field of seismic loess engineering. However, the research remains on saturated soil theory, and there are no typical case studies of seismic subsidence of loess in historical earthquakes. It is difficult to express structure characteristic using microstructure morphology, therefore, soil mechanics is an available method for this. The seismic subsidence judgment is just absolute in some certain value ranges for several parameters, therefore, probability judgment should be developed. Seismic subsidence ratio is estimated to empirical formulas or semiempirical and semitheoretical formulas, which are on the basis of laboratory test data. These formulas are not established on the physical process and mechanics of seismic subsidence, leading to much more variables, complicated computation, and bad application. To solve these problems, it needs to distinguish main factors and corresponding variables firstly, and to establish mechanic model of seismic subsidence estimation, which can reflect physics and mechanic. The key of anti-seismic subsidence technology is to relieve seismic subsidence of soil body, and to lower the interreaction between soil body and underground structures.

**Key words:** Seismic subsidence of loess   Mechanics of seismic subsidence   Seismic subsidence judgment   Value estimation of seismic subsidence   Microstructure