

# 黄土场地震陷的灾害特征及成因研究综述\*

王 强<sup>1,2</sup>, 邵生俊<sup>2</sup>, 王 峻<sup>1</sup>, 张振中<sup>1</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 基于文献史料记载和现场科考成果, 考证了黄土地区几次中强以上地震引发的黄土震陷灾害, 分析了黄土震陷灾害的破坏模式、发育特征及其形成条件。依据大量不同地区黄土的动三轴试验结果, 比较分析了黄土震陷形成的物性指标的区域性变化规律, 并进一步研究了震陷临界动应力的影响因素。研究显示, 黄土地区的几次中强以上地震的极震区均有黄土震陷事例; 黄土震陷的灾害模式可区分为振密型震陷、震陷型滑坡和液化型震陷, 并由土性条件、地形地貌和地震动作用形式决定; 孔隙比大于0.8时, 黄土高原地区的黄土需要考虑不同含水量条件下的震陷性, 而黄土高原地区东南部的河南、河北和晋东南地区的黄土则可根据缩限含水量判定其震陷性; 临界动应力的大小由黄土的结构强度所主导, 临界动应力比与含水量之间存在很好的幂函数关系。

**关键词:** 场地震害; 黄土震陷; 历史地震; 物性指标; 临界动应力

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)04-0692-11

## 0 引言

场地震陷灾害是岩土地震工程研究领域的一项重要课题。根据场地土类及其震陷形成机理的不同, 场地震陷可区分为砂土和粉土液化、干砂震密、软土和黄土震陷。其中, 砂、粉土液化最早为人们所熟识, 于1964年新泻地震和阿拉斯加地震后受到地震科研和工程技术人员的广泛关注, 同时期我国1966年邢台地震、1975年海城地震和1976年唐山地震中出现的大量液化破坏事例对我国的砂、粉土液化问题研究也起到了极大的推动作用(Seed *et al.*, 2001; 王刚, 张建民, 2007a)。然而, 早期的砂、粉土液化问题较多关注液化势的判别方法研究, 而对其引发的场地沉降量估算涉及不多。近年来, 随着性态抗震设计概念的提出, 液化大变形研究和液化后的本构关系研究逐渐得到重视(刘汉龙等, 2002; 王刚等, 2005, 2007b; 周云东, 2003; Meneses *et al.*, 1998)。但是, 目前对于液化大变形的力学机制问题仍存在不同观点, 相应地, 液化大变形的计算方法也就区分为震害经验法、基于固体力学的数值分析法和基于流体力学的数值分析法。干砂震密现象在1971年圣费尔南多地震和1994年诺思里奇地震中均有发现, 尤其是在诺思里奇地震中

有超过2000处的边坡填土地产生了严重的干砂震陷现象(Pradel, 1998; Stewart *et al.*, 1995)。Silver和Seed(1971), Seed和Silver(1972)最早基于大量动单剪试验数据提出了干砂震陷量的估算方法, 陈青生等(2013)、Chen(2009)、Ghayoomi(2004)、Ramadan(2007)、Stewart和Whang(2003)也开展了类似的研究工作。其中, 以Silver和Seed等(1971, 1972)提出的砂土震陷方法在工程实践中应用最为广泛, 其它研究多是在此基础上进一步考虑了砂土组成成分、多维地震动和随机地震荷载特性等因素的影响。软土震陷在历次大地震中也均有报道(安徽省地震局, 1996; 刘恢先, 1985), 刘汉龙(1994)、王建华等(1993)、郁寿松和石兆吉(1989)、袁晓铭等(2004)和张向东等(2014)针对软土震陷机理、影响因素分析和震陷量估算等方面开展了大量研究工作。针对软土震陷问题, 尽管已在上述几个方面取得了一定的进展, 但目前所提出的大量软土震陷估算模型仍属于经验性公式, 普遍存在公式繁琐、参变量多和应用性差等缺点。

相对于近代几次破坏性大地震中砂土液化、干砂和软土震陷灾害在地震工程界所引起的受重视程度, 黄土震陷问题在首次提出时因缺少实际震例而并未引起足够重视, 从而使得相关研究也

\* 收稿日期: 2015-11-24.

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2014IESLZ02、2015IESLZ05)联合资助.

相对滞后(王强等, 2012)。近年来, 随着我国西部大开发战略的加速实施, 加之中西部黄土地区的强震多发背景, 大量专家学者与工程技术人员已逐渐意识到了黄土地震灾害的潜在威胁和巨大危害(王兰民等, 2001a)。目前, 黄土场地震陷灾害研究已由早期所关注的成因机制、震陷性判定和震陷量估算等问题逐步转移到实际工程场地震陷灾害的评价预测及防治技术理论之上, 并取得了一些具有理论意义和应用价值的科研成果。在震陷性判定方面, 张振中(1999)和王兰民(2003b)针对新黄土提出的根据孔隙比、含水量、剪切波速和相对密实度等指标判定黄土震陷性的技术标准现已纳入地方性抗震设计规范。在场地震陷量估算方面, 现有的震陷系数估算公式仍存在计算繁琐、涉及参变量过多和适用性差等问题(王兰民, 张振中, 1993; 邓津等, 2007; 陈永明等, 2003; 孙军杰等, 2012), 仍以采用室内动三轴试验获取震陷系数的评价方法最为直接可信。在抗震陷处理技术方面, 王兰民等(2001b, 2003a)借鉴湿陷性黄土地基处理技术研究了强夯法、挤密桩法和化学灌浆法等手段在改善黄土抗震陷性方面的效果, 并提出了相应的黄土抗震陷性的处理技术和标准。

经过近30年的研究, 尽管在黄土震陷机理、震陷性判别、震陷量估算和抗震陷处理技术方面取得显著进展, 但在历史震害考证、不同地区黄土的物性指标变化导致的震陷性界定差异和临界动应力的影响机制问题等方面仍有待深入探讨。本文首先基于黄土地区几次破坏性地震的历史考证和震害考察, 阐明了黄土场地震陷灾害的3种不同的破坏模式及其成灾机制和生成发育特征。之后, 基于大量的微结构电镜扫描实验和动三轴试验数据, 分析了黄土震陷形成的物性指标和应力条件, 并综合黄土的微结构、孔隙比、含水量及其区域分布规律给出了黄土震陷性形成的判定标准, 总结了临界动应力存在的物理力学机制及固结围压、固结比、含水量和孔隙比对临界动应力的影响规律。

## 1 黄土震陷考证及灾害发育特征

### 1.1 几次地震中的黄土震陷考证

在我国中西部黄土地区, 历次强震( $M_s \geq 8$

地震6次,  $M_s \geq 7$ 地震22次,  $M_s \geq 6$ 地震52次)都曾引起过严重的地震滑坡、震陷和液化等黄土场地地震灾害, 人口伤亡达百万人以上。其中, 1718年甘肃通渭7½级地震、1739年宁夏平罗—银川8级地震和1920年宁夏海原8½级地震都存有黄土场地震陷的史料记载或现场遗迹(王兰民, 2003b)。近年如1995年甘肃永登5.8级地震和2013年岷县—漳县6.6级地震的现场科学考察中也都发现了黄土场地震陷的例证(王兰民, 吴志坚, 2013; 中国地震局岷县漳县6.6级地震现场工作队应急科考组, 2013; Zhang *et al.*, 2005)。

1718年通渭7½级地震共造成约337个长度大于500 m的滑坡体, 它们密集分布在长约40 km、宽约18 km的极震区范围内(王兰民, 2003b)。这些滑坡体的原始地形坡角较小, 土层含水量较低, 从理论上讲这类坡体并不具有形成大面积滑坡的条件; 然而, 事实上它们普遍具有滑速快和滑距远的滑动特征(陈永明, 石玉成, 2006; 张振中, 1999)。张振中(1999)认为这种特殊的黄土地震滑坡现象是由场地震陷引起的“流滑”效应所致, 这与王家鼎和张倬元(1999)、Shreve等(1968)所认为的“气垫效应”是一致的。

1920年海原8½级大地震引发的总滑坡面积达5万km<sup>2</sup>, 其中, 密集区域性的滑坡面积达4万km<sup>2</sup>以上(王兰民, 2003b)。同1718年通渭地震引发的黄土滑坡类似, 海原大地震中的地震滑坡同样具有滑速快和滑距远的滑动特征。国家地震局兰州地震研究所和宁夏回族自治区地震队(1980)发现海原大地震烈度VII度以上的整个震区普遍分布有震动重力型裂缝, 即由场地震陷引发地表不均匀沉降所造成的地表裂缝。王兰民等(1991)对回回川黄土开展了动强度试验分析, 显示该地区黄土的动强度较低, 地震烈度VII度强的地区即可发生低坡脚黄土滑坡。

川陕总督查郎阿在上报1739年平罗—银川地震的奏折中描述“城垣虽未塌倒但已下陷, 以致城门不能开启。”国家地震局兰州地震研究所(1985)对这次地震的史料也做了整理, 其中有“城南门下陷数尺”和“民房、仓廩俱陷入地”的地基沉降记录。由于震灾区地处典型的黄土高原地区, 其中城楼、民房和仓廩地基产生的不均匀沉降在很大程度上与黄土场地震陷相关。

1995年甘肃永登地震(震中烈度VIII度, 图

1) 造成的黄土梁场地震陷(图2)和2013年甘肃岷县—漳县地震所引发的震陷地质灾害和房屋地基沉降都是黄土场地震陷的最新例证。由图2可以看出,梁顶中间位置沉降最为显著,两侧位置沉降量则逐渐减小,呈阶梯状下错。该黄土梁场地顶部地形比较平坦,两侧以 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 的坡脚向山坡过渡,山坡坡度为 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,该黄土梁场地顶部产生显著震陷的同时,下部斜坡却并没有出现变形或滑动迹象(Zhang *et al.*, 2005)。由此可见,该黄土梁场地顶部的沉降显然是由土体震陷致密引发,并非由坡体滑动所致。Zhang 等(2005)、王峻等(2005)、刘红玫和张振中(2005)、张冬丽和王兰民(2003)分别从土体动力学特性、微结构特征和数值模拟等方面论证了上述结论。

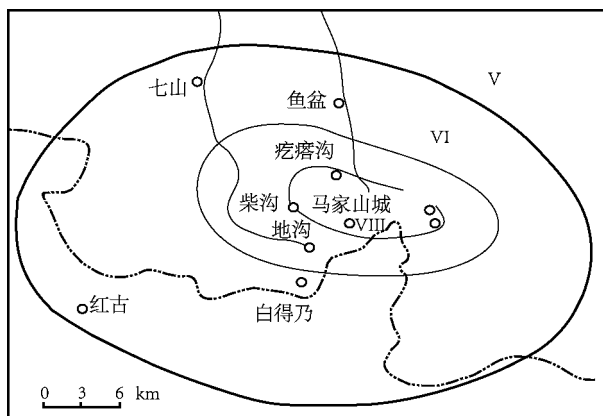


图1 1995年永登地震烈度图

Fig. 1 Seismic intensity of the Yongdeng earthquake in 1995



图2 1995年永登地震中的黄土梁场地震陷

Fig. 2 Seismic subsidence at a loess mountain ridge area induced by the Yongdeng earthquake in 1995

## 1.2 黄土场地震陷的灾害发育特征

通过回顾我国黄土地区的几次重大历史地震,发现震中位于黄土区域时的中强及以上地震均引发了不同程度的黄土震陷灾害,如永登5.8级地震中黄土梁顶的不均匀沉降、岷县—漳县6.6级地震引发的地基沉降、通渭7½级地震和海原8½级地震造成的震陷型滑坡和震动重力型裂缝、平罗—银川8级地震造成的城楼下陷。早期几次历史地震中所记载的震陷场地事例均处在极震区,根据震级估算其极震区烈度至少在X度以上;近期两次地震引发黄土震陷的极震区烈度则为VIII度;而纵览上述地震的VII度震害区,包括汶川地震在黄土地区的烈度VII异常区,均未见有黄土震陷的破坏实例。由此可初步推断,黄土震陷形成的最小地震烈度为VIII度(不包括液化型震陷)。

比较不同地震烈度区的黄土场地震陷事例显示,黄土震陷的主导成因机制、灾害发育模式和致灾类型因受到土的物性条件、场地地形条件和地震动特性等因素影响而表现出不同。一方面,土的物性条件是震陷形成的物质基础,黄土的成土过程决定了其在物性条件上存在区域性差异。我国黄土呈现出由西北向东南颗粒大小逐渐变细和粘性逐渐增强的规律。相应地,由西北向东南方向随着粘粒含量的增加,黄土的动强度也随之增强(杨永俊, 2009)。海原8½级地震和通渭7½级地震造成的滑坡密集程度重于华县8½级地震诱发的滑坡密集程度,这在一定程度上与黄土动强度的区域性差异相关。中强地震作用下永登5.8级地震和岷县—漳县6.6级地震引发一定规模的地震滑坡也佐证了这一结论。另一方面,黄土的地形地貌对黄土震陷灾害发育也有着重要的影响(张振中, 1999)。黄土塬的塬内平坦场地通常不易产生黄土震陷,而塬边则由于土质疏松和地震动放大效应易产生震陷,高差较大的陡峭边坡则伴随有震陷型滑坡和崩塌。黄土梁、峁则通常由于土质疏松和显著的地震动放大效应易于产生阶梯错动式的场地震陷,强地震作用下则发展为震陷型滑坡。黄土盆地多分布黄土状土和新黄土,粉粒含量相对较高,其下普遍有粉细沙层。由于黄土盆地地层的地下水埋藏较浅使得土体含水量较高,致使黄土的结构强度降低,黄土

震陷灾害更加易于发生,饱水状态下则可发展为液化型震陷。永登地震的梁顶阶梯错动型震陷、海原地震和通渭地震引发的大量震陷型滑坡、平罗—银川地震造成的城楼地基沉降现象证实了不同地形地貌条件下的震陷灾害发育模式。再者,地震动特性对场地震害的重要影响也早已为大量场地震害和地震反应分析结果所证实。张振中(1999)通过室内动三轴试验分析了加速度峰值和振动持时对震陷的影响,而针对振动主频和振动方向对场地震陷的影响研究方面尚未开展深入探讨。大量研究业已证实黄土具有很强的水敏性,这使得黄土在低含水量条件下通常具有较高的动强度,而高含水量条件下的强度则显著降低(谢定义,2001)。低含水量条件下的黄土对地震动高频成分的响应也会相应地强于其对地震动低频成分的响应,高含水量条件下的黄土体则相反。竖向加速度效应对土体产生上下往复的拉压作用,而水平加速度作用对土体主要产生水平向剪切作用。已有研究显示,近场地震动相较于近场地震动具有显著的速度脉冲效应、方向性效应、竖向加速度效应和优势高频振动效应(张令心,张继文,2010)。永登地震近场区黄土梁的阶梯错位式震陷而并未引发滑坡和海原地震远场区引发大量震陷型滑坡等表现出不同的震陷特征可能都与近远场地震作用相关。由此可见,不同地区黄土的物性条件、地形地貌特征和地震动作用形式会导致黄土震陷表现出不同类型的发育模式,如平坦场地的地基震陷、梁阶阶梯错位式震陷、震陷型滑坡和液化型震陷等,其成因机制和物理过程也显著不同。

黄土是一种典型的第四纪松散沉积物,其沉积过程中独特的地质营力、生成环境和物质来源等要素,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(雷祥义,1989;谢定义,2001)。地震作用下黄土原生结构会受到拉、压和剪应力的共同作用。当这种地震作用力大于土颗粒之间的连接强度时,原生大孔隙结构产生崩溃性破坏,继而散落的颗粒填充大孔隙并伴随孔隙气体的压缩和排出,颗粒组构在重力作用下重新排列而致密,地表表现出突然沉降和后续的缓慢沉降。该过程即是非饱和条件下平坦黄土场地的震陷形成过

程,文中为区别于其它震陷灾害模式称其为振密型震陷。震陷型滑坡作为黄土地震陷的一种灾害模式,与振密型震陷的形成机制不同。震陷型滑坡主要受到水平地震作用的影响,而黄土边坡体在水平地震作用下必然存在一个最大剪应力连续面。当最大剪应力大于土颗粒之间的连接强度时,黄土边坡体的原生大孔隙结构在沿最大剪应力连续面的位置也同样会产生崩溃性破坏而重排致密。然而,此时上下接触面的孔隙通道并未完全畅通,这将会引起边坡体的破坏连续面内的孔隙气压力迅速增加,从而造成土体内有效应力的急剧降低而产生“气化”现象,外部则表现为黄土边坡的滑动破坏。液化型震陷则是高含水量条件下黄土震陷的一种特殊形式,但其震陷机理有别于振密型震陷。张振中(1999)研究发现,当黄土试样的含水量高于塑限时,在动应力和水的共同作用下,孔隙水压力会上升,有效应力降低,抗剪强度减小。因此,当含水量高于塑限的黄土层遭遇地震作用时,也可以产生液化现象,而随着孔隙水的上涌则会引发地表沉降,这里称之为液化型震陷。

综合黄土地震陷实例、不同类型黄土地震陷形成的主导因素分析及其形成机制分析,表1给出了黄土震陷的3种破坏模式及其生成条件。从表1可以看出,振密型震陷和震陷型滑坡多发生在 $Q_3$ 和 $Q_4$ 时期的黄土地层,主要是由于该时期的黄土地层多为具有大孔隙、弱胶结结构的非饱和黄土;而液化型震陷则多发生在黄土盆地的粉、砂含量较高的黄土状土和新黄土层,多处于饱水条件下。此外,黄土震陷的破坏模式受场地地形条件的制约显著,如振密型震陷产生在塬、梁和峁,液化型震陷多发于黄土盆地内的饱水场地,而震陷型滑坡则出现在塬边和黄土边坡。在引发震陷的起始烈度方面,振密型震陷多发生在VIII度以上的极震区,震陷型滑坡则多出现在受远场地震影响的VIII度及以上烈度区。液化型震陷基本不受近远场地震的影响,唐山地震中砂土液化出现的最小地震烈度区为VII度(刘恢先,1985),汶川地震中也在VII度区甘肃清水发现一处黄土液化场地(王谦等,2012),由此认为产生液化型震陷所需的最小地震烈度低于产生非液化型震陷所需的最小烈度,为烈度VII度。

表 1 黄土震陷灾害模式及其多发条件

Tab. 1 Different damage formations of the seismic subsidence of loess and their general generating conditions

生成条件	振密型震陷	液化型震陷	震陷型滑坡
土性	大孔隙且弱胶结结构;粘粒含量少;低含水量	粉、砂粒含量高;高含水量	大孔隙且弱胶结结构;粘粒含量少;低含水量
场地地形	塬、梁或崩	黄土盆地	塬边或黄土边坡
烈度	≥VIII 度	≥VII 度	≥VIII 度
实例	1995 年永登地震中梁顶震陷	1556 年华县地震中城郭下陷	1920 年海原地震引发的大面积滑坡

## 2 黄土震陷形成的物性和应力条件

黄土是一种典型的非饱和结构性土，其特有的物质来源、颗粒级配、颗粒间组构和连接特征是黄土震陷形成的物理基础。黄土震陷是黄土体在外部地震荷载作用下的力学响应，是土颗粒连接破坏继而在振动和重力耦合作用下致密的物理过程。由此可见，影响黄土震陷形成的物性条件为土颗粒的疏密程度和它们之间的连接强度。其疏密程度既可以直接通过扫描电子显微镜的成像观测，又可以用孔隙比和干密度等物性指标反映。颗粒间的连接强度主要受土颗粒的排列组构、胶结矿物质成分和土的含水量影响，其排列组构可用于区分颗粒性状、孔隙结构和颗粒连接形式等几个方面特征的微结构类别反映其性质（石玉成，李兰，2003），胶结矿物质成分及其含量则可以根据土的成土年代和分布区域确定其指标的变化范围，而含水量则由含水百分比直接表示。

### 2.1 孔隙结构和颗粒连接形式

黄土所特有的大孔隙、弱胶结结构是形成震陷最为根本的物性基础。永登地震震区的黄土即具有这种架空孔隙结构，震陷与未震陷的试样微结构变化也证实了其振密型震陷的物态变化（石玉成，李兰，2003）。石玉成和李兰（2003）应用扫描电子显微镜和动三轴试验，基于高国瑞（1980）提出微结构分类标准分析了不同微结构类型的黄土的震陷性，结果表明以粒状架空结构为主的黄土具有明显的震陷性，而具有粒状镶嵌、粒状胶结特征的黄土的震陷性则相对较低。张振中（1999）也通过大量试验研究指出，凡架空孔隙结构不明显的凝块镶嵌胶结结构的黄土，不具震陷型；凡是震陷性强的黄土都具有明显的架空孔隙结构。黄土的成土过程决定了其微结构特征具有明显的区域性。首先是构成结构骨架的集粒

形态具有区域性变化，位于黄土高原地区的兰州、大同、清边、固原、镇原和西峰等地的黄土集粒具有一定的刚性，传力性能好，在堆积过程中较易形成架空的松散结构，为产生震陷创造了条件；而位于黄土地区东南部的河南、河北和晋东南地区的集粒，不仅传力性能差而且外形柔软，无法构成震陷所需的架空结构。其次，骨架颗粒之间的连接形式也呈现出区域性变化。西北部黄土中骨架颗粒之间以接触连接为主，连接处仅有少量粘胶粒或无定形物质；而东南部黄土中骨架颗粒之间以胶结连接为主，连接处有很厚的粘土层，无定形物质和盐晶。显然，胶结连接的强度远比接触连接的强度高（高国瑞，1984）。高国瑞（1984）还通过 X-射线衍射法分析了不同地区黄土的矿物成分，结果显示中国各地的黄土矿物成分基本一致。由此可见，我国黄土的微结构类别可分为架空孔隙结构、镶嵌孔隙结构和架空-镶嵌孔隙结构，连接形式包括接触、胶结和接触-胶结。震陷性黄土应具有架空孔隙结构，且土骨架颗粒之间的连接以接触连接为主。黄土高原地区的黄土需要考虑其震陷性，而黄土地区东南部的河南、河北和晋东南地区的黄土在通常情况下则不需要考虑其震陷性。

### 2.2 孔隙比和干密度

土的密实度决定了黄土震陷产生的最大可变形量，而干密度和孔隙比均反映了土的密实度。干密度是表示单位体积土质量的一项指标，无法反映土的颗粒级配和孔隙结构特征，因此也不能准确反映土的密实程度。孔隙比是土中孔隙体积与土颗粒体积的比值，是一项可以直接反映土密实度的指标。由此可见，孔隙比在考量土的疏密程度方面比密实度更为准确。张振中（1999）曾指出孔隙比小于 0.75~0.85 时，黄土将不易产生动残余应变；孔隙比大于 1.0 可作为震陷与否的判

别标准。本文统计整理了谷天峰 (2007)、王峻等 (1999, 2004, 2005, 2007, 2014)、陈永明等 (2000)、孙军杰等 (2012)、何光和朱鸿博 (1990)、翁效林等 (2006)、郭乐 (2010) 和巫志辉等 (1994) 的黄土震陷试验数据, 分别得到了震陷系数与孔隙比和干密度的变化关系图, 见图 3、4。图 3、4 中统计了不同地区黄土、不同土性、不同试验条件下的所有试验数据点, 具有统计学意义上的普遍性和客观性, 因此该统计结果可以真实反映出统计量之间内在关联。图 3 显示, 震陷系数的最大值随孔隙比的增大而增大, 呈现出线性增长规律; 试验数据点均落在包络线  $\varepsilon_p = 0.3e - 0.225$  ( $\varepsilon_p$  为震陷系数,  $e$  为孔隙比) 以内。由震陷性黄土的判别标准为  $\varepsilon_p = 0.015$  可知, 可产生黄土震陷的最小孔隙比为 0.8。由图 4 可以看出, 震陷系数与天然干密度之间存在比较大的离散性, 表现为较大的干密度条件下仍可能产生较大的震

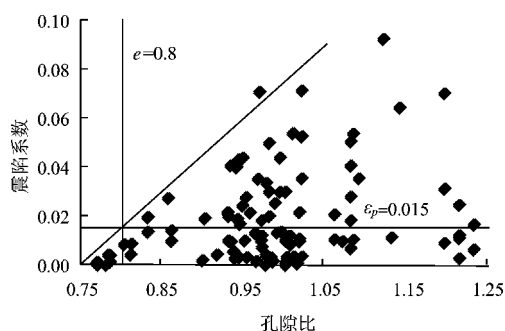


图 3 震陷系数 ( $\varepsilon_p$ ) 与孔隙比 ( $e$ ) 关系散点图

Fig. 3 Scatter diagram of the relationship between the coefficient of seismic subsidence ( $\varepsilon_p$ ) and void ratio ( $e$ )

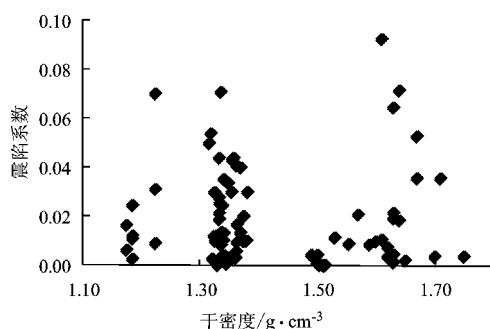


图 4 震陷系数与干密度关系散点图

Fig. 4 Scatter diagram of the relationship between the coefficient of seismic subsidence and dry density

陷量。这也表明了天然干密度无法反映土的颗粒级配和孔隙结构特征, 因此天然干密度在判定黄土震陷性方面是不适宜的。

### 2.3 含水量的影响

土是由固、水和气组成的三相体系, 土的物理状态和力学性质必然受到水的影响。黄土由于其自身的水敏性使得其变形和强度与含水量的变化有着非常密切的关系, 其初始含水量的不同会使黄土的动变形-强度特性有明显差异。干型黄土 (初始含水量小于缩限含水量) 的高强度和低变形使黄土对动、静力的反映均比较迟钝, 震陷不大; 湿型黄土 (初始含水量大于缩限含水量小于液限含水量) 的震陷随初始含水量的增大而增大; 饱和黄土则会表现出类似振动液化的现象 (谢定义, 2001)。图 5 中统计了不同孔隙比条件下黄土震陷试验的含水量、震陷系数和动应力的散点分布。从图 5 可以看出, 不同孔隙比条件下对黄土试样所加载的动应力取值范围大致是相同的, 因此应用该图分析含水量对震陷性的影响时可以不考虑动应力取值的影响。图 6 给出了以震陷系数等于 0.015 区分震陷与非震陷所对应的含水量散点图, 可以看出, 低孔隙比的黄土即使在较高含水量条件下仍可能不具有震陷性, 而高孔隙比的黄土在低含水量情况下也表现出了震陷性。由此认为, 在工程场地地震安全所考虑的地震风险水平下, 低孔隙比的黄土存在震陷性与否的界限含水量, 高孔隙比的黄土则不需考虑界限含水量。当进一步考虑黄土的区域分布特征时则可初步认定, 黄土高原地区的黄土需要考虑不同含水量

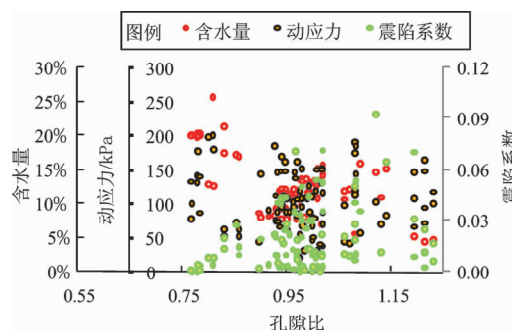


图 5 含水量、动应力和震陷系数与孔隙比关系散点图

Fig. 5 Scatter diagram of the relationship between water content, dynamic stress, the coefficient of seismic subsidence and void ratio



条件下的震陷性,而黄土地地区东南部的河南、河北和晋东南地区的黄土则可根据缩限含水量判定其震陷与否。

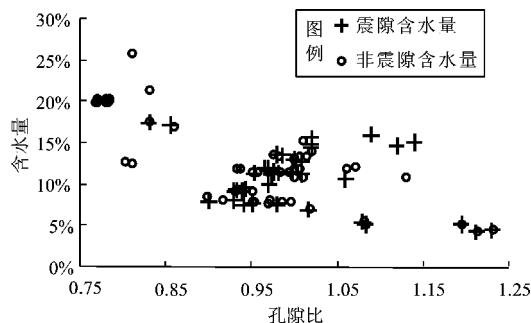


图6 含水量和震陷系数与孔隙比关系散点图

Fig. 6 Scatter diagram of the relationship between water content, the coefficient of seismic subsidence and void ratio

## 2.4 震陷临界动应力

震陷的临界动应力是土试样发生明显震陷时的动应力,可作为判断黄土是否发生震陷的标准。参照黄土湿陷性判定标准——湿陷系数 $=0.015$ ,黄土震陷性的判别标准亦可取为震陷系数 $=0.015$ 。相应地,当振次一定时,震陷系数 $=0.015$ 时的动应力幅值即为震陷临界动应力(栗润德等,2007)。黄土特有的微结构特征是临界动应力存在的物理基础。当附加动应力作用在黄土体时,土颗粒之间的连接由于土颗粒的不均匀排列而遭受拉、压、扭、剪力的作用。当这些作用力大于土颗粒之间的连接强度时,土颗粒骨架产生破坏,土颗粒重新排列而趋于稳定。此时,土颗粒之间的排列也逐渐密实而表现为震陷。显然,产生震陷的必要条件之一即是附加动应力大于土颗粒之间连接强度,而使得土颗粒致密到一定程度的附加动应力即是临界动应力。由此可见,黄土震陷的产生存在临界动应力,临界动应力与土颗粒之间的连接强度和密实度相关。临界动应力的大小受到固结围压、固结比、含水量和孔隙比等因素的影响。

基于王峻和刘旭(2004)和高鹏(2006)所开展的动三轴试验数据,分析临界动应力随固结围压、固结比、含水量和孔隙比的变化关系,如图7~9所示。图7和图8中的试验土样取自西安

南郊,天然干密度为 $1.31\text{ g/cm}^3$ ,天然含水量为 $19.3\%$ ,孔隙比为 $1.062$ ,液限为 $32.3\%$ ,塑限为 $20.5\%$ 。图9中的试验土样取自白银—兰州高速公路沿线的8个不同探井,天然容重为 $13.52\sim 16.46\text{ kN/m}^3$ ,天然含水量为 $7.18\%\sim 19.15\%$ ,孔隙比为 $0.908\sim 1.195$ ,液限为 $25.4\%\sim 26.8\%$ ,塑限为 $16.5\%\sim 16.9\%$ 。图7~9中,固结均压( $\sigma_c$ )为3方向固结围压的均值,临界动应力比为临界动应力与固结均压的比值。图7a和8a显示,临界动应力随含水量的增加、固结均压的降低和固结比的增加均呈现出变小趋势,同一含水量条件下临界动应力随固结均压的增加和固结比的减小而呈变大趋势,且这种变大趋势随含水量的增加减弱。这是由于临界动应力的大小主要是由黄土的结构强度所主导,而黄土具有极强的水敏性,所以含水量的增加必然会引起临界动应力的减小。另一方面,固结均压的存在可以抵抗附加动应力的破坏作用,而随着固结比增大而增加的偏应力则会增强对土结构的破坏作用,故而临界动应力随着固结均压的增加和固结比的减小而变大。此外,黄土的结构性随着含水量的增加而减弱,所以在高含水量条件下固结围压和固结比对临界动应力的影响幅度也相应地的变弱。

为去除固结均压对临界动应力的影响,图7b和8b进一步给出了临界动应力比随含水量和固结均压的变化关系。从图7b和8b可以看出,临界动应力比随含水量、固结均压和固结比的增加而减小;临界动应力比与含水量之间存在很好幂函数关系,相关系数 $R^2$ 处在 $0.961\ 3\sim 0.992\ 4$ 之间。低含水量条件下临界动应力比受固结均压和固结比的影响较大,而高含水量条件下则较小,该现象进一步说明了临界动应力受结构强度主导,高含水量条件下黄土结构性的释放使得其临界动应力趋于一致。图9a给出了同一固结条件下不同天然含水量条件下临界动应力随孔隙比的变化关系,可以看出临界动应力随孔隙比的增大基本呈现降低趋势。由图7a可见,临界动应力与含水量的变化关系可粗略认为存在负线性相关。由此,为消除含水量对临界动应力的影响,图9b给出了临界动应力与含水量乘积随孔隙比的变化关系,更为明显地反映出临界动应力随孔隙比增大而减小的变化规律。

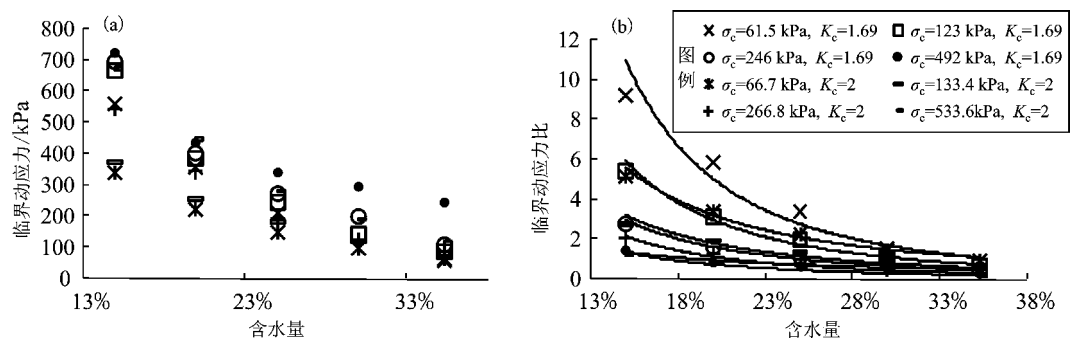


图 7 不同固结均压和固结比条件下临界动应力 (a) 和临界动应力比 (b) 与含水量的散点关系图 (高鹏, 2006)

Fig. 7 Scatter diagram of the relationship between critical dynamic stress (a), critical dynamic stress ratio (b) and water content under different mean consolidation pressures and consolidation ratios (from Gao, 2006)

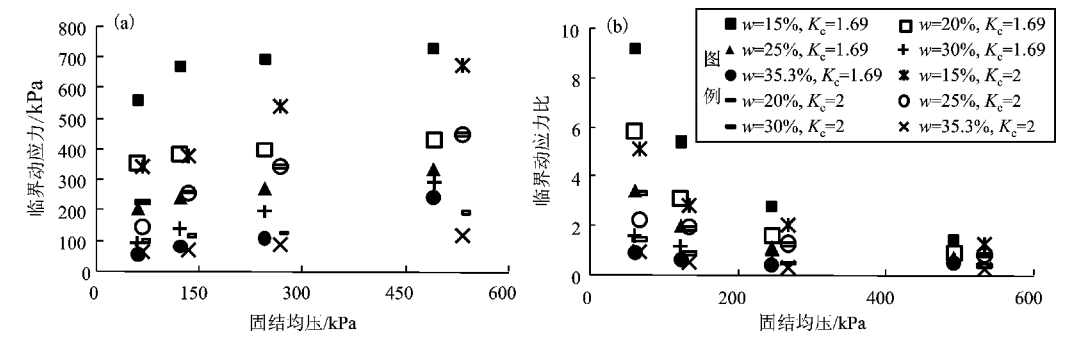


图 8 不同含水量和固结比条件下临界动应力 (a) 和临界动应力比 (b) 与固结均压的散点关系图 (高鹏, 2006)

Fig. 8 Scatter diagram of the relationship between critical dynamic stress (a), critical dynamic stress ratio (b) and mean consolidation pressure under different water contents and consolidation ratios (from Gao, 2006)

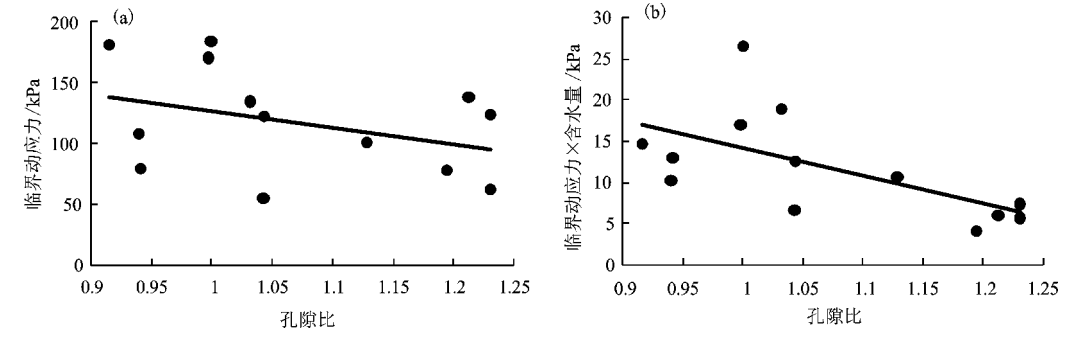


图 9 临界动应力 (a) 和临界动应力  $\times$  含水量 (b) 与孔隙比的散点关系图

Fig. 9 Scatter diagram of the relationships between critical dynamic stress (a) and the product of a critical dynamic stress and the corresponding water content (b) and void ratio

### 3 结论与讨论

本文回顾了国内外在砂、软和黄土地震陷

研究方面所取得的成果进展, 并针对黄土震陷研究中的震陷性判定、震陷量估算和抗震陷处理技术等关键问题展开了深入探讨, 并着重就现存的缺少黄土震陷实例、区域性黄土的震陷性差异和



震陷临界动应力的影响因素分析等问题展开了细致分析。

震陷性判定标准现已纳入地方性规范,但面对我国广大的黄土区域是否具有适用性尚需进一步开展大量的室内试验工作。场地震陷性评价仍以室内动三轴试验手段为准,现有的震陷量估算方法尚处在理论研究阶段而并不具有工程应用性。震陷量估算模型构建需要摆脱众多影响因素之间的关系谜局,从黄土震陷形成的物理力学机制着手或借助土力学方法着手。常用的湿陷性黄土地基处理技术如强夯法、挤密桩法和化学灌浆法等对震陷性黄土地基改良同样具有很好的适用性。

黄土震陷实例在黄土地区的历次强震甚至中强震中均有发现,历史震害中发现的建筑物基础沉降、平坦场地重力型裂缝和低缓坡度的黄土地震滑坡可作为黄土震陷的例证。黄土场地震陷灾害受土性条件、地形地貌和地震动作用等因素的影响而表现出不同类型的发育模式,如震密型震陷、液化型震陷和震陷型滑坡。黄土场地震陷的力学机制研究不仅需要考虑黄土微结构特征和颗粒组分的区域性差异,还需要考虑干湿型黄土的水敏性差异以及场地地形条件差异等因素的影响。震陷临界动应力受黄土的结构强度所主导,同时受水的影响作用显著。

## 参考文献:

- 安徽省地震局. 1996. 中外典型震害[M]. 北京:地震出版社.
- 陈青生,熊浩,高光运. 2013. 基于 R-N 非线性疲劳损伤累计模型的砂土震陷计算方法[J]. 岩土工程学报,35(12):2203-2211.
- 陈永明,石玉成,徐晖平等. 2000. 1995 年永登地震黄土震陷变形特征及其形成机理[J]. 西北地震学报,22(4):465-475.
- 陈永明,石玉成. 2006. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J]. 地震研究,29(3):276-280.
- 陈永明,王兰民,刘红玫. 2003. 剪切波速预测黄土地震陷量的方法[J]. 岩石力学与工程学报,22(增刊2):2834-2839.
- 邓津,王兰民,张振中. 2007. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. 岩土工程学报,29(4):542-548.
- 高国瑞. 1980. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报,25(20):945-948.
- 高国瑞. 1984. 中国黄土的微结构与地理、地质环境的关系[J]. 地质学报,58(3):266-272.
- 高鹏. 2006. 不同湿度原状黄土静、动力学特性及其与结构性关系研究[D]. 西安:西安理工大学.
- 谷天峰. 2007. 郑西客运专线黄土地基(震)陷研究[D]. 西安:西北大学.
- 郭乐. 2010. 宝鸡市台塬黄土震陷特性研究[D]. 西安:西北大学.
- 国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队. 1980. 一九二〇年海原大地震[M]. 北京:地震出版社.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1985. 陕甘宁青四省(区)强地震目录(公元前 1177 年-公元 1982 年)[M]. 西安:陕西科学技术出版社.
- 何光,朱鸿博. 1990. 黄土震陷研究[J]. 岩土工程学报,12(6):99-103.
- 雷祥义. 1989. 黄土的显微结构与古气候的关系[J]. 地质评论,35(4):333-341.
- 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[J]. 工程地质学报,15(5):694-699.
- 刘汉龙,周云东,高玉峰. 2002. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报,24(2):142-146.
- 刘汉龙. 1994. 土地地震永久变形分析[D]. 南京:河海大学.
- 刘红玫,张振中. 2005. 永登震后黄土微结构特征研究[J]. 西北地震学报,27(2):174-177.
- 刘恢先. 1985. 唐山大地震震害(一)[M]. 北京:地震出版社.
- 石玉成,李兰. 2003. 黄土震陷变形特征的细观分析[J]. 岩石力学与工程学报,22(增刊2):2829-2833.
- 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[J]. 岩石力学与工程学报,31(2):382-391.
- 王刚,张建民. 2007a. 地震液化问题研究进展[J]. 力学进展,37(4):575-589.
- 王刚,张建民. 2007b. 砂土液化大变形的弹塑性循环本构模型[J]. 岩土工程学报,29(1):51-59.
- 王刚. 2005. 砂土液化后大变形的物理机制与本构模型研究[D]. 北京:清华大学.
- 王家鼎,张倬元. 1999. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报,21(6):670-674.
- 王建华,要明伦,贾有权. 1993. 软土地基震陷分析[J]. 天津大学学报, (4):67-72.
- 王峻,刘旭. 2004. 白兰高速公路沿线黄土场地震陷区判定与评价[J]. 水文地质工程地质, (3):13-16,65.
- 王峻,王兰民,刘红玫. 2005. 永登 5.8 级地震中黄土震陷灾害的探讨[J]. 地震研究,28(4):393-397.
- 王峻,王兰民. 2007. 地震荷载作用下黄土地基震陷研究[J]. 世界地震工程,23(4):44-47.
- 王峻,王谦,王兰民等. 2014. 随机地震荷载作用下高速铁路黄土路基震陷试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,22(增刊2):4239-4245.
- 王峻. 1999. 黄土震陷试验与评价[J]. 甘肃科学学报,11(1):6-9.
- 王兰民,梁守信,莫庸等. 2003a. 黄土地基震陷性和液化势处理技术[C]//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). 北京:清华大学出版社.
- 王兰民. 2003b. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社.
- 王兰民. 2001a. 西部大开发中的黄土地震灾害问题[J]. 地学前缘,8(1):122.
- 王兰民,王峻,张冬丽等. 2001b. 黄土地震陷和液化的工程评价和处理技术[C]//湿陷性黄土研究与工程. 北京:中国建筑工业出版社.

- 版社.
- 王兰民,吴志坚. 2013. 岷县漳县 6.6 级地震震害特征及启示[J]. 地震工程学报,35(3):401-412.
- 王兰民,张振中,王峻等. 1991. 随机地震荷载作用下黄土动强度的试验方法[J]. 西北地震学报,13(3):50-55.
- 王兰民,张振中. 1993. 地震时黄土震陷量的估算方法[J]. 自然灾害学报,2(3):85-94.
- 王谦,王兰民,袁中夏等. 2012. 汶川地震中甘肃清水田川黄土液化的试验研究[J]. 水文地质工程地质,39(2):116-119.
- 王强,孙军杰,王兰民. 2012. 黄土震陷研究及相关问题探讨[J]. 中国地震,28(4):351-359.
- 翁效林,熊元克,裴凯. 2006. 黄土震陷变形特征的离心模型试验研究[J]. 矿物学报,26(4):460-464.
- 巫志辉,谢定义,余雄飞. 1994. 洛川黄土的动变形和强度特性[J]. 水利学报,(12):67-71.
- 谢定义. 2001. 讨论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,23(1):3-13.
- 杨永俊. 2009. 不同地区黄土动强度特性试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学.
- 郁寿松,石兆吉. 1989. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报,11(4):35-44.
- 袁晓铭,孙锐,孟上九. 2004. 软弱地基土上建筑物不均匀震陷机理研究[J]. 土木工程学报,37(2):67-77.
- 张冬丽,王兰民. 2003. 1995 年永登地震山体变形计算机模拟与机理分析[J]. 西北地震学报,25(1):77-81.
- 张令心,张继文. 2010. 近远场地震动及其地震影响分析[J]. 土木建筑与环境工程,32(增刊2):84-86.
- 张向东,刘家顺,兰常玉. 2014. 地震荷载作用下风积土震陷变形试验研究[J]. 自然灾害学报,23(1):87-93.
- 张振中. 1999. 黄土地震灾害预测[M]. 北京:地震出版社.
- 中国地震局岷县漳县 6.6 级地震现场工作队应急科考组. 2013. 甘肃岷县漳县 6.6 级地震应急科考取得初步结果[J]. 防灾博览,(4):10-11.
- 周云东. 2003. 地震液化引发的地面大变形试验研究[D]. 南京:河海大学.
- Chen Y. 2009. Evaluation of earthquake-induced settlement in dry sand layers[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering,(14):1-19.
- Ghayoomi M. 2004. Seismically induced settlement of partially-saturated sand[D]. Iran:University of Tehran.
- Meneses J, Ishihara K, Towhata I. 1998. Effects of superimposing cyclic shear stress on the undrained behavior of saturated sand under monotonic loading[J]. Soils and Foundations,38(4):115-127.
- Pradel D. 1998. Procedure to evaluate earthquake-induced settlement in dry sandy soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,124(4):364-368.
- Ramadan J. 2007. Settlement of dry cohesionless soil deposits under earthquake induced loading[D]. USA:University of Southern California.
- Seed H B, Silver M L. 1972. Settlement of dry sands during earthquakes[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE,98(4):381-397.
- Seed R B, Cetin K O, Moss R E S. 2001. Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation[C]//Fourth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics and symposium in honor of professor W. D. Liam Finn, San Diego, California, March 26-31, 2001: paper No. SPL-2.
- Shreve R. L. 1968. Leaking and fluidization in air layer lubricated avalanches[J]. Geological Society of America Bulletin,79(5):653-658.
- Silver M L, Seed H B. 1971. Volume changes in sands during cyclic loading[J]. Journal of the Soil mechanics and Foundations Division,97(9):1171-1182.
- Stewart J P, Bray J D, McMahon D J, et al. 1995. Seismic performance of hillside fills[C]. Landslides under static and dynamic conditions: Analysis, monitoring, and mitigation, Geotechnical Special Publication,76-95.
- Stewart J P, Whang D. H. 2003. Simplified procedure to estimate ground settlement from seismic compression in compacted soils[C]. Pacific Conference on Earthquake Engineering,046.
- Zhang Z Z, Zhang D L, Liu H M. 2005. Comprehensive study on seismic subsidence of loess under earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal,27(1):36-41,46.

## Review on Disaster Characteristics of the Seismic Subsidence of Loess Site and its Formation Causes

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, SHAO Shengjun<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Zhenzhong<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

### Abstract

Based on many historical materials and scientific investigations, we studied the seismic subsidence damages of loess induced by several moderately strong and strong earthquakes at loess area, and analyzed the damage types, developing characteristics and formation conditions of the loess seismic subsidence disaster. Then according to a large amount of dynamic triaxial test results on different regional loess, we comparatively investigated the variation laws of regional physical indexes, which meet the occurrence conditions of seismic subsidence of loess, furthermore, we researched several influencing factors of critical dynamic stress and presented variation laws between them. It can be concluded from this study that the loess subsidence cases of loess which were occurred at meizoseimal area of several moderately strong and strong earthquakes are confirmed. The mode of the seismic subsidence damage of loess can be classified into vibrated – compact seismic subsidence, seismic – subsidence landslide, and liquefaction seismic subsidence, whose formation are determined by the physical conditions of soil, terrains and landforms, and earthquake motion. The loess at loess plateau should take account of the seismic subsidence of loess under all water content levels once void ratio is larger than 0.8, while for loess distributed at Henan, Hebei and southeastern Shanxi provinces, the seismic subsidence of loess can be judged by shrinkage limit. The critical dynamic stress is mainly dependent on the structural strength, and critical dynamic stress ratio can be well expressed with the power function of water content.

**Key words:** earthquake disaster of site; seismic subsidence of loess; historical earthquake; physical indexes; critical dynamic stress