许书雅,王平,钟秀梅,等.强震作用下抗震陷黄土改良地基的微观特征分析[J].地震工程学报,2019,41(3):724-730.doi:10. 3969/j.issn.1000-0844.2019.03.724

XU Shuya, WANG Ping, ZHONG Xiumei, et al. Microscopic Characteristics of Improved Aseismic Subsidence Loess Foundations under Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 724-730. doi: 10.3969/j.issn.1000 – 0844.2019.03.724

# 强震作用下抗震陷黄土改良地基的微观特征分析

许书雅<sup>1,2</sup>,王 平<sup>1,2,3</sup>,钟秀梅<sup>1,2</sup>,王会娟<sup>1,2</sup>,于一帆<sup>1,2</sup>,刘红枚<sup>1,2</sup>

(1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000; 2.中国地震局黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000;3.西安理工大学岩土工程研究所,陕西西安 710048;)

摘要:基于动三轴试验和 SEM 细观结构测试试验,结合图像分析处理软件,对强震荷载前后宝兰客 运专线沿线典型震陷性黄土及其经物理、化学和复合改良方法处理后的试样进行微观尺度的结构 变形演化规律研究,探讨不同改良方法对土体微结构的影响及其与震陷系数之间的内在联系。结 果表明:(1)物理改良方法对于消除大孔隙和架空孔隙结构的效果最为明显,同时对颗粒级配和结 构也有调整;(2)化学改性方法则从颗粒接触方式、粒间胶结程度等方面影响土体强度,且不同化学 反应的参与可生成独特的玻璃微珠或絮凝状细结构,从而大大提升土体某项参数指标,进而在强震 中分别起到填充、胶结或缓冲作用;(3)强震作用前后不同改良方法对各微观要素的改变与相应的 残余应变现象吻合较好,说明微结构能有效反映改良黄土残余变形的强弱。

关键词: 地基改良; 微结构; 强震荷载; 残余应变

**中图分类号:** TU47 **文献标志码:**A **文章编号:** 1000-0844(2019)03-0724-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.724

# Microscopic Characteristics of Improved Aseismic Subsidence Loess Foundations under Strong Earthquakes

XU Shuya<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Xiumei<sup>1,2</sup>, WANG Huijuan<sup>1,2</sup>, YU Yifan<sup>1,2</sup>, LIU Hongmei<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

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

Abstract: To evaluate the relationship between micromechanisms and different physical and chemical improvement methods on the seismic subsidence loess engineering site, soil samples were obtained along the Baoji—Lanzhou High-speed Railway, and dynamic triaxial and SEM microstructural tests were conducted. Combining image processing software with the appropriate threshold, the evolution law of microstructure deformation of samples was applied and studied. Results showed that: (1) Physical improvement is the most effective way to eliminate macropores and porous pore structures; moreover, the particle size distribution and structure can be al-

第一作者简介:许书雅(1993-),女,硕士研究生,主要从事黄土地震工程研究。E-mail:xushuya16@mails.ucas.ac.cn。

收稿日期:2018-07-20

基金项目:地震科技星火计划(XH17037Y);甘肃省重点研发计划(18YF1FA101)

通信作者:王 平(1977-),男,副研究员,主要从事土动力学与黄土地震工程研究。E-mail:lanzhouwang\_p@126.com。

so adjusted. (2) Chemical modification affects the strength of the loess from the aspect of particle contact and intergranular cementation; moreover, the participation of different chemical reactions can produce unique glass beads or flocculent fine structures, which can greatly reinforce the strength of loess and play a role in filling, cementing, or buffering in strong earthquakes. (3) The differences between loess microcosmic parameters and residual strain coefficients, with the above improved methods before and after strong earthquakes, were compared, and it was found that they are in good agreement, indicating that the microstructure can generally reflect the residual deformation strength of the loess.

Keywords: foundation improvement; micro-structure; strong earthquake load; residual strain

# 0 引言

历史上,黄土高原区皆为大震、强震频发的区域, 由于黄土的震敏性较强,极易导致地震动荷载下地基 发生震陷灾害。黄土地基的震陷性主要受其微观结 构控制这一观点早在 20 世纪 80 年代就已得到众多 学者的认可,其中石玉成等<sup>[1]</sup>、邓津等<sup>[2]</sup>探讨了中大 孔隙、粒径偏斜度等对黄土震陷性的影响,肯定了微 结构研究黄土结构变化的可行性;王兰民等<sup>[3]</sup>、李兰 等<sup>[4-5]</sup>通过电镜照片获得架空孔隙面积的量化数据, 建立黄土震陷系数计算公式并提出震陷过程中应力-应变发展的 5 个阶段。后一些学者据此建立起了黄 土震陷特性与土体本构模型之间的关系<sup>[6-7]</sup>。同时, 微结构分析理论的发展,如分形理论<sup>[8]</sup>等的引入、CT 技术和图像处理技术的完善,为更好地从微观角度研 究黄土地震灾害提供了新的可行手段。

在抗震陷地基的改良方面,一般场地地基及湿 陷性黄土地基的抗震处理方法琳琅满目,归结起来 分为物理改良(如强夯法、挤密桩法等)和化学改性 (如水泥改性、酸改性、石灰改性和水玻璃改性等)处 理。其中,一般地基广泛采取强夯地基处理方法,对 于具有较高要求的重大工程路基、地基等,多采用桩 基础和水泥灌浆的方法,粉煤灰则在20世纪80年 代就被添加于高标准工程地基的夯筑中。但这些改 良方法在黄土场地中的应用还不是很广泛。而黄土 震陷、不均匀沉降这一多出现在西北地区建筑和公 路地基中的问题,至今在黄土工程领域尚缺少相关 的施工要求和规范,其试验研究也不多见。针对这 一问题,本文选择有代表性的3种物理和化学改良 (改性)方法(分别是强夯法、添加粉煤灰改性以及添 加水泥改性),以消除黄土地基震陷性为目的,从微 结构的角度分析土体孔隙、颗粒在物理或化学作用 下的变化过程,进一步研究物理和化学方法对于其 震陷性消除的作用机理和效果评价,以期为土体地 基抗震陷改性材料以及黄土震陷性地基改良方法的

选择提供指导和借鉴。

# 1 改性材料化学原理

不同于一般土体的微结构形态,西北地区的黄 土在颗粒间多为点接触,构成了粒间架空的特点。 同时,颗粒粒度级配不合理,加之含水率低,因此颗 粒胶结性差,一旦发生振动荷载,粒间的弱胶结极易 断裂,结构发生坍塌,小颗粒落入架空孔隙中,进而 产生震陷<sup>[9]</sup>。因此,改善震陷量可从调整颗粒级配、 粒间接触方式、胶结程度以及消除架空孔隙或大孔 隙入手。

本试验选用 C 类粉煤灰。其主要成分有 SiO<sub>2</sub> (50%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(22.3%)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10.5%)、Cao (7.2%)及少量 Na、Mg 氧化物。其中,可溶氧化物 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在碱性条件下发生水化反应, 其反应式如下:

 $\operatorname{SiO}_{2} + x \operatorname{Ca}(\operatorname{OH})_{2} + n \operatorname{H}_{2} \operatorname{O} = x \operatorname{CaO} \cdot \operatorname{SiO}_{2} \cdot m \operatorname{H}_{2} \operatorname{O}$ (1)

$$Al_{2}O_{3} + xCa(OH)_{2} + nH_{2}O = xCaO \cdot Al_{2}O_{3} \cdot mH_{2}O$$
(2)

 $\mathrm{Al}_{2}\mathrm{O}_{3} + x\mathrm{Ca}(\mathrm{OH})_{2} + y\mathrm{CO}_{2} + n\mathrm{H}_{2}\mathrm{O} =$ 

$$x \operatorname{CaO} \cdot \operatorname{Al}_2 \operatorname{O}_3 \cdot y \operatorname{CaCO}_3 \cdot m \operatorname{H}_2 \operatorname{O}$$
 (3)

 $\operatorname{Fe}_{2}\operatorname{O}_{3} + x\operatorname{Ca}(\operatorname{OH})_{2} + n\operatorname{H}_{2}\operatorname{O} = x\operatorname{CaO} \cdot \operatorname{Fe}_{2}\operatorname{O}_{3} \quad (4)$ 

从式(1)~(4)可见,粉煤灰在加入的过程中能 够生成有凝胶性质的水化硅酸钙和水化铝酸钙等, 这些胶结物将固体颗粒胶粘结在一起形成更大的团 粒。同时,由于粉煤灰粒径细小,集中在 2~30 μm 间<sup>[10]</sup>,因此其多分布于粒径更大的土颗粒表面或颗 粒间的空隙中,化学反应多在孔隙间进行,并且生成 的水化物体积远大于反应物,可起到填充粒间孔隙 的作用,且较大的比表面积带来的"活性效应"使其 转化率更为高效和快速。

而水泥的化学反应表现为凝结和硬化的过程,

两者连续进行,互相促进,其主要成分为 3CaO · SiO<sub>2</sub>(48%)、2CaO · SiO<sub>2</sub>(23%)、4CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14%)和 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10%)。这4种主要 矿物在改性作用中均进行了水化反应,使松散的干燥水泥粉粒变成具有胶结性质的水泥浆体,粘结周 围的黄土颗粒,即水化硅酸钙和水化铝酸钙。需注 意的是,同时生成的三硫型和单硫型的水化硫铝酸 钙以及游离状态的 Ca(OH)。加大了水泥的脆性。

### 2 试验介绍

#### 2.1 试验材料

试验中取得宝兰客运专线渝中场地沿线天然的

高震陷性黄土,削制原状试样,并分别采用强夯、添 加粉煤灰、添加水泥三类方法重塑黄土试样。以上 三种改良方法中的相关参数与配比制作方法与文献 [11]中动三轴试验采用的参数与方法保持一致。

(1)原状土样:取自宝兰客运专线榆中县沿线 范家窝地区,取样深度4m。所取土样为原状Q。黄 土,以粉粒为主,其部分物性指标如表1所列<sup>[11]</sup>。

(2)粉煤灰试样:粉煤灰为取自国电兰州热电有限责任公司的II级粉煤灰,其属C类水硬性粉煤灰。 选择添加粉煤灰进行土体改性一方面是由于它作为 燃煤发电的废弃物,在西北地区排放量大,原料获取 廉价且便捷,大大降低了工程造价;另一方面其本身作

	表1 土体物性参数表	
Table 1	Physical parameters of loess sample	es

类型	土类	$ ho_{\rm d}/({ m g}\cdot{ m cm}^{-3})$	е	$\omega/\frac{0}{0}$	土粒组成/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
原状	粉质黄土	1.30	1.08	9.31	13.0	76.5	10.5

为废料的再利用,缓解了耕地占用和环境保护的压力。为排除改性物质掺入量多少对震陷改良效果的 影响,便于对各类改性方法进行横向对比,本试验直 接取改性物质的最优配比。根据粉煤灰掺量对黄土 震陷特性的三轴试验研究结果<sup>[12]</sup>,折算得到本试验 抗震陷处理的最佳粉煤灰掺量为 18%。

(3) 水泥土试样:选用 # 425 硅酸盐水泥,已有 的试验结果表明水泥掺量大于 3%时可显著增加土 体强度,且掺量达 5%时达到峰值,后逐渐稳定<sup>[13]</sup>, 因此按照最佳水泥掺量 5%进行配比。试样养护龄 期选择 25 d。

(4) 强夯处理试样:考虑到工程场地对黄土地 基的压实要求,以1.75 g/cm<sup>3</sup>为击实密度制备强夯 试样,其他物性参数与原状土样保持一致。

#### 2.2 试验仪器与参数

土样的微结构图像采用 KYKY2800B 电子显 微镜获取,其最高放大倍数为 10 000 倍。对土样进 行扫描后,统一选取同一放大倍数的图像进行定量 分析,注意选择颗粒及孔隙清晰的二次像。

震陷系数的室内试验测定采用 WF-12440 型动 三轴-扭剪试验系统。试样统一制成100 mm(长)× 50 mm(直径)的圆柱样,试验类型为固结不排水试 验(CU)。固结时轴向应力为200 kPa,固结比 K。 为1.69,震陷试验中加载频率为1 Hz的正弦波。在 模拟强震时,引用 Seed 提出的方法,选取等价幅值 比为0.65,此时地震烈度与等价作用次数的关系如 表2所列<sup>[14]</sup>。本文主要分析强震作用下(振次30 次 及以上时)试样的相关变形参数。

表 2 地震荷载等价作用次数与地震烈度的关系

Table 2 Relationship between equivalent times of

earthqu	ake load and	magnitude	
震级/ $M$	7.5	8	9
等价作用次数	20	30	40

#### 2.3 试验过程

对原状试样、强夯试样、粉煤灰改性试样以及水 泥改性试样分别进行动三轴试验,记录其产生的残 余应变,这部分研究的试验结果在文献[11]中已有 详细说明。随后,将动三轴试验前、后的原状黄土、 强夯、粉煤灰、水泥改性黄土共8组,经过自然干燥、 掰取断面,制备成10 mm×10 mm×2 mm 的薄片 状试样。利用 KYKY-2800B 型扫描电子显微镜观 察土样的微结构并拍照,同时将二次像通过 PHO-TOSHOP 和 ARCGIS 进行归一化及二值化处理, 进而开展分析计算,得到所需参数。以室内动三轴 试验的震陷系数为标准,旨在揭示改良黄土地基微 结构变化特征及其与震陷性之间的内在联系。通过 定性与定量分析相结合,重点关注改性或改良方法 对黄土孔隙和颗粒的影响,探索其变化本质及其与 改良方法或材料间的关系。

#### 3 显微结构分析

大量的科学研究已经证实<sup>[7,15]</sup>,黄土的震陷性 本质是由其独特的大孔隙、弱胶结的架空孔隙结构 所造成的,因此本文在定量分析上以黄土颗粒及孔 隙变化为主,探讨不同改良材料或方法对震陷性黄 土在颗粒和孔隙的数量、大小、形态、胶结形式、分形 特征等方面的影响。

#### 3.1 震陷前颗粒特征

图 1 给出了不同改性方法或材料的施加下 4 类 黄土试样的微结构图像。对一般黄土试样来说,除 少量以单粒形态存在的黏粒、粉粒和砂粒以外,土颗 粒主要以集粒和凝块堆积形态呈现。在 400 倍放大 倍数下可清晰地看出:原状黄土的显微结构表现为 集粒粒径较大,粗矿物颗粒多且粒间以点接触形式 为主。强夯过后的黄土形成了明显的絮凝状结构,

大的集粒由于压实作用崩溃而进一步破裂为小集 粒,颗粒排列更加密集且呈面状接触。粉煤灰改良 试样的显微结构则表现为土颗粒表面遍布独特的球 状颗粒,即在粉煤灰中含量超过 70%以上的玻璃微 珠,这些微珠多粘结在黄土颗粒表面或填充于中大 孔隙,无疑对土体起到了致密和均质作用;另一方面 粉煤灰中的可溶氧化物 SiO<sub>2</sub> 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等成分与水 及土中水化物生成水合盐类,增加了粒间胶结强度。 添加水泥改良后的黄土在颗粒粒径上变化不大,但 其明显改变了颗粒间的胶结形式,颗粒叠置,甚至胶 结成为更大的凝块。



(a) 原状试样

(c) 粉煤灰改良试样 原状及改性黄土微结构 图 1



Microstructure of undisturbed and modified loess samples Fig.1

对大量原状及不同改良方法黄土试样的微结构 图像颗粒形态参数进行定量统计,其粒径-数量分布 如图2所示。从图中可看出:总体上来说,无论哪种 改良试样,都和原状黄土一样具有粒径越大颗粒数 量越少的规律,且 60%以上的颗粒都集中在 15 μm 内。但改良方法的不同也显现出了一些差别:强夯 作用在相同面积下可识别并统计到数量最多的土颗 粒,其主要是将 30 µm 以上的中大颗粒挤压破碎为 5~20 µm 左右的颗粒;颗粒数量其次的为粉煤灰改



原状与改良黄土试样粒径-数量统计分布图 图 2 Fig.2 Particle size-quantity distribution diagram of undisturbed and modified loess samples

良试样,同时注意到其曲线在 30 μm 左右有一个小 的峰值,该现象与粉煤灰形成的玻璃微珠多在 30 µm不无关系;而水泥改良方法虽然也在一定程 度上增加了中小颗粒数量,减少了部分粒径较大颗 粒的数量,但相较其他两类方法而言效果稍弱。

#### 3.2 震陷前孔隙特征

同样,对试样的孔径-数量进行定量统计,其结 果如图 3 所示。由图可知,三类改良试样的孔径-数 量分布与原状黄土具有较为一致的趋势,这一点和 颗粒粒径-数量的表现有所不同,说明对不同改良方 法而言,孔隙的微结构特征参数与其残余应变趋势 的一致性更高。具体来看,粉煤灰方法显著提高了 10 μm 内的孔隙数量,水泥法次之,这可能是由于化 学方法生成了细颗粒物质,因而增加了中小孔隙的 数量,同时这些化学物质遍布或填充原先的颗粒孔 隙,起到了分割大孔隙的作用,从而将数量较少的大 孔隙分为数量较多的中小孔隙;强夯方法对 10 μm 以内的微、小孔隙数量改变并不明显,但对 10 μm 及以上的孔隙数量减少最多。总之,强夯法对中大 孔隙的消除较为明显,而两种化学改良方法虽然对 50 µm 以上的大孔隙或架空孔隙有一定的减少,但 效果不及强夯法,并且统计结果显示试样中10~50 µm 左右的中小孔隙甚至还有增加的趋势。





#### 3.3 震陷后颗粒特征

对4类试样分别进行动三轴试验,并收集试验 后的试样进行微结构扫描,如图4所示。结合振次 N=40的震陷试验结束后4类黄土试样的颗粒粒 径-数量分布(图 5),首先可以看出强震作用使得 粒径极小的单粒或集粒不同程度地压缩或振密, 形成更为致密的稍大的集粒,因此与震陷试验前 相比,10 μm 以下的土颗粒都不同程度地减少了。 相同放大倍数下,已产生震陷的原状黄土与原始 情况相比,5 μm 及以下的单粒或小集粒数量减 少,10~30 μm 间的中小型集粒数量明显增多,总 体上颗粒数量增多且平均粒径增加。在动三轴试 验中试样宏观上表现为 N=30 时早已发生了断裂 和破碎。结合图像可以推测动荷载的施加使原本 就脆弱的大团粒之间的胶结断裂,崩溃分解为小 团粒,迫使其分布与排列向更致密的方向进行,也 因此产生新的中小孔隙,另外还有部分小的团粒 或单粒直接掉入中大孔隙中。这些现象在地震波 来临的较短时间内同时发生,宏观表现为短时间 内残余应变发生极大变化,土体震陷并且产生剪 切变形和酥裂现象。













Fig.5 Particle size-quantity distribution for loess samples after seismic settlement test

对于两类化学改良方法来说:由粉煤灰形成的 玻璃微珠不仅起到了增加中小颗粒,填充并消除部 分架空和中大孔隙的作用,更重要的是接近标准形 态的独特的球状微珠在颗粒排列调整时起到了"缓 冲"作用,因而在三轴试验中试样并未发生剪切破 坏,而表现为试样中部的鼓胀,微观表现为20~30 um 间形成的颗粒或玻璃微珠造成曲线峰值由于极 小粒径颗粒的减少变得更加明显;对于添加水泥的 方法来说,其生成的化学物质同样如此。值得注意 的是,正如水泥化学原理中所提到的,其反应后土体 强度虽增强,但土体脆性也大大增强。这在实际工 程中的意义在于,在产生相同震陷量的情况下,添加 粉煤灰的地基在震害上表现为渐进的、均匀的沉降, 而水泥夯实地基则表现为无先兆的突然破坏,发生 剪切变形和断裂(这被三轴试验的宏观现象所印证), 并产生不均匀沉降,对其上的建筑物造成更大的 影响。

#### 3.4 震陷后孔隙特征

震陷试验后试样相应的孔隙特征与数量关系如

图 6 所示。可以看出,震陷试验后,改性及改良方法 在施加循环荷载作用后,试样的中大孔隙几乎完全 消除,同时压实与振密作用带来的集粒的分解又使 土样的中小孔隙增加,在这个动态变化过程中孔隙 在粒径较小区域的变化率最大。具体来说,改良方 法使得微孔隙大幅增加,并且使架空孔隙完全消除, 大孔隙大量减少。值得注意的是,在强夯试样中, 微、小孔隙数量虽然有了大幅增长,但总体孔隙面积 却大大降低,这说明虽然中大孔隙数量较少,但其消 除非常关键,相比而言微孔隙的增长并不影响黄土 震陷。对两类化学改性试样来说,微、小孔隙同样大 幅增长,但是虽然其孔隙数量变化很大,总孔隙面积 却与震陷前变化不大。结合上述动三轴实验得出的 动应力-残余应变曲线发现其抗震陷效果远优于强 夯法,进一步证明了对于化学材料添加的黄土试样 来说,其改良作用主要体现在颗粒接触和胶结方式 上,而非对孔隙的改善上。





# 4 结论

无论采取何种改良或改性方法,其目的都是设 法对颗粒、孔隙或粒间接触情况做出改变,包括改变 颗粒组分以及颗粒排列方式、减小或填充孔隙体积、 增大颗粒接触面积、增强粒间胶结程度等,以提高其 力学性能,从而增大黄土地基强度。

强夯作用对黄土地基抗震陷性能的提升是从两 个方面进行的,一方面压实作用使得大的疏松集粒 破裂,中小粒径的颗粒增多,颗粒级配变好;另一方 面使中大孔隙尤其是架空孔隙得到完全消除。

化学改良方法虽然使土样微小孔隙的数量有较

大提升,但土体总孔隙面积变化不大,其残余应变的 减小主要源自化学作用产生的物质颗粒间的胶结作 用和对集粒本身的粘结。

#### 5 展望

由于黄土震陷性消除的研究尚不完备,对于不同 改性方法有待开展大量的室内外试验以积累数据,得 到各类改性方法和配比与其物质成分、颗粒组成、物 理力学性质之间的定量关系,进而形成适用于工程建 设的技术标准,这是一个亟需大量工作的过程。

在实际工程应用中,对于场地条件较差的地区, 经常采取复合地基处理方式,例如在化学灌浆的过 程中往往伴随着密实处理。因此尚需对物理-化学、 化学-化学等复合改良方式的微结构机理甚至残余 变形行为进行进一步探讨。

本文仅探讨了普遍应用于湿陷性地区的 3 种具 有代表性的地基物理和化学改良(改性)方法的微结 构特征及其抗震陷效果,未来尚需进行更多尝试,以 开发出新型的具备工程适用性且经济环保的材料和 方法。

### 参考文献(References)

- [1] 石玉成,李兰,刘红玫.黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究[J].西北地震学报,2002,24(2):129-134.
   SHI Yucheng,LI Lan,LIU Hongmei.Study on the Relation of Loess Seismic Subsidence and Its Microstructure Characters
   [J].Northwestern Seismological Journal,2002,24(2):129-134.
- [2] 邓津,王兰民,张振中.黄土显微结构特征与震陷性[J].岩土工 程学报,2007,29(4):542-548.

DENG Jin, WANG Lanmin, ZHANG Zhenzhong, Microstructure Characteristics and Seismic Subsidence of Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4), 542-548.

- [3] 王兰民,邓津,黄媛.黄土震陷性的微观结构量化分析[J].岩石 力学与工程学报,2007,26(增刊1):3025-3031.
  WANG Lanmin, DENG Jin, HUANG Yuan. Quantitative Analysis of Microstructure of Loess Seismic Subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(Supp1): 3025-3031.
- [4] 李兰,王兰民,刘旭.极震区黄土微结构的试验研究[J].中国地 震,2005,21(3):369-377.

LI Lan, WANG Lanmin, LIU Xu. Research on Loess Microstructure in the Magistoseismic Area[J].Earthquake Research in China, 2005, 21(3):369-377.

[5] 李兰,王兰民,王峻,永登 5.8 级地震极震区黄土微结构孔隙性的定量研究[J].地震研究,2005,28(3):282-287.
 LI Lan,WANG Lanmin,WANG Jun,Quantitative Research on

the Porosity of Loess in the Meizoseismal Area of the Yongdeng M5.8 Earthquake[J].Journal of Seismological Research, 2005,28(3):282-287.

[6] 邓津,王兰民,吴志坚.弹塑性黄土微结构与动变形模型的建立 与分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊 2):3995-4001.

DENG Jin, WANG Lanmin, WU Zhijian. Establishment and Analysis of Elasto-Plastic Loess Microstructure and Dynamic Deformation Model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp2): 3995-4001.

[7] 石玉成,裘国荣.基于微结构的黄土震陷本构关系研究[J].岩 土工程学报,2011,33(增刊1):14-18.

SHI Yucheng, QIU Guorong. Constitutive Relation of Seismic Subsidence of Loess Based on Microstructure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Suppl):14-18.

[8] 任权,王家鼎,袁中夏,等.高速铁路地基黄土微结构的分形研究[J].水文地质工程地质,2007,34(6):76-78,82.
 REN Quan,WANG Jiading, YUAN Zhongxia, et al. Fractal Study on Loess Microstructure of one High-speed Railway

Foundation[J].Hydrogeology and Engineering Geology,2007, 34(6):76-78,82.
[9] 王强,邵生俊,王峻,等.黄土场地震陷的灾害特征及成因研究 综述[J].地震研究,2016,39(4):692-702.

WANG Qiang, SHAO Shengjun, WANG Jun, et al. Review on Disaster Characteristics of the Seismic Subsidence of Loess Site and Its Formation Causes [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(4):692-702.

[10] 刘园,李艳玲,杨蕾.粉煤灰改良软土路基稳定性试验研究[J].粉煤灰综合利用,2018,31(5):96-98.

LIU Yuan, LI Yanling, YANG Lei. Study on the Stability Test

of Improved Soft Soil Roadbed with Fly Ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2018, 31(5):96-98.

 [11] 许书雅,王平,王峻,等,强震作用下不同处理方式黄土地基抗 震陷性能评价[J].地震工程学报,2018,40(6):1198-1205.
 XU Shuya, WANG Ping, WANG Jun, et al. Evaluation of Aseismic Subsidence of Loess Foundation with Different Ground Treatments under Strong Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1198-1205.

[12] 王峻,高中南,车高凤,等.动荷载作用下粉煤灰改性黄土的震 陷特性[J].地震工程学报,2016,38(5):751-756.
WANG Jun, GAO Zhongnan, CHE Gaofeng, et al. Seismic Subsidence Behavior of Fly-ash-modified Loess under Dynamic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5):751-756.

- [13] 王谦,刘红玫,马海萍,等.水泥改性黄土的抗液化特性与机制
  [J].岩土工程学报,2016,38(11):2128-2134.
  WANG Qian,LIU Hongmei, MA Haiping, et al.Liquefaction Behavior and Mechanism of Cement-stabilized Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(11):2128-2134.
- [14] 张克绪,凌贤长..岩土地震工程及工程振动[M].北京:科学出版社,2016.

ZHANG Kexu, LING Xianchang. Geotechnical Earthquake Engineering and Engineering Vibration [M]. Beijing: Science Press, 2016.

[15] 张振中,张冬丽,刘红玫.黄土震陷灾害典型震例的综合研究
[J].西北地震学报,2005,27(1):36-41,46.
ZHANG Zhenzhong, ZHANG Dongli, LIU Hongmei. Comprehensive Study on Seismic Subsidence of Loess under Earthquake[J].Northwestern Seismological Journal,2005,27 (1):36-41,46.