

高中南,周仲华,王峻,等.粉煤灰改良饱和黄土的抗液化特性[J].地震工程学报,2018,40(1):105-110.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.105

GAO Zhongnan, ZHOU Zhonghua, WANG Jun, et al. Anti-liquefaction Properties of Saturated Loess Improved by Fly Ash[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 105-110. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.105

## 粉煤灰改良饱和黄土的抗液化特性<sup>①</sup>

高中南<sup>1,2</sup>, 周仲华<sup>1</sup>, 王峻<sup>2</sup>, 郑和祥<sup>2</sup>, 钟秀梅<sup>2</sup>, 赵乘程<sup>2</sup>

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局 兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**为了经济、环保地达到改良处理减轻饱和黄土地基液化震害的目的,通过配备不同粉煤灰掺量的改良黄土进行动三轴试验,研究饱和粉煤灰改良黄土的动应力、动应变和动孔隙水压力变化特征,分析粉煤灰掺量对饱和改良黄土液化应力比、动残余变形和动孔隙水压力的影响规律,并结合微结构试验结果,探讨饱和粉煤灰改良黄土抗液化的物理化学机制。结果表明:粉煤灰掺量对饱和改良黄土的液化应力比、动应变和动孔隙水压力比均具有较为显著的影响。随着粉煤灰掺量的增加,饱和改良黄土的液化应力比持续增加,且当掺量达到15%后,继续增加粉煤灰掺量时改良黄土的液化应力比增加显著。饱和改良黄土的动应变和动孔隙水压力比均随着粉煤灰掺量的增加而减小;掺量达到25%后,饱和改良黄土不液化。饱和粉煤灰改良黄土的SEM细观结构试验照片中呈现大量的圆球状、粒状粉煤灰颗粒和絮凝状胶结物,表明其抗液化的物理化学机制主要包括粉煤灰的水化作用、胶体生成物和颗粒的填隙作用和粉煤灰对游离水的吸附作用。

**关键词:**动三轴试验;动残余应变;动孔隙水压力;抗震机制

**中图分类号:** TU435

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2018)01-0105-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.105

## Anti-liquefaction Properties of Saturated Loess Improved by Fly Ash

GAO Zhongnan<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhonghua<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, ZHENG Hexiang<sup>2</sup>,  
ZHONG Xiumei<sup>2</sup>, ZHAO Chengcheng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

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

**Abstract:** To economically reduce seismic liquefaction damage to saturated loess foundations, variations in the characteristics of dynamic stress, dynamic strain, and dynamic pore water pressure are analyzed using dynamic triaxial tests on improved saturated loess with different dosages of fly ash. The law of influence of this dosage on the liquefaction stress ratio, dynamic residual deformation, and dynamic pore water pressure of the improved loess is then studied. Combined with microscopic test results, the physical-chemical anti-liquefaction mechanism of saturated loess improved by fly ash is also discussed. Results show that the dosage of fly ash has a significant influence on the liquefaction stress ratio, dynamic strain, and dynamic pore water pressure of the improved loess. With an increase in the dosage, there is a respective increase in the liquefaction

① 收稿日期: 2017-12-10

**基金项目:** 中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费资助项目(2016IESLZ01); 国家自然科学基金资助项目(51778590, 51408567); 地震科技星火计划资助项目(XH16038Y)

**作者简介:** 高中南(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事土动力学与地基抗震研究。E-mail: 373754363@qq.com。

stress ratio of the improved loess; after the dosage reaches 15%, there is an evident increase in the liquefaction stress ratio with a continued increase in the dosage. In addition, the dynamic strain and dynamic pore water pressure of the improved loess increase with a decrease in the fly ash dosage; after the dosage reaches 25%, the saturated improved loess cannot be liquefied. Scanning electron microscope (SEM) results indicate that the physical—chemical anti-liquefaction mechanism of saturated loess improved by fly ash is mainly related to the hydration process of the fly ash with respect to the filling effect of the colloid product and particles and adsorption of free water by fly ash.

**Key words:** dynamic triaxial test; dynamic residual strain; dynamic pore water pressure; seismic resistant mechanism

## 0 引言

黄土是广泛分布于我国中西部地区的一类特殊土。天然黄土具有显著的大孔隙结构,使得其在外营力作用下表现出强烈的水敏性和震敏性特征<sup>[1]</sup>。黄土高原历史上强震频发,新构造运动十分强烈,根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)<sup>[2]</sup>,其超过 70% 的面积位于Ⅶ度以上设防区,且受黄土地区城镇化建设水平提升、农业灌溉条件改善和气候变化等因素的影响,河流低阶地和台塬区地下水位的上升导致黄土层局部或整体处于饱和状态。在此背景下,作为国家“一带一路”战略的重要节点,黄土地区城镇建设所面临的饱和黄土地震液化问题受到了学者们的广泛关注。

王兰民等<sup>[3]</sup>、王峻等<sup>[4]</sup>、王谦等<sup>[5]</sup>和邓龙胜等<sup>[6]</sup>对饱和黄土的液化特性开展了研究,结果表明动荷载作用下饱和黄土极易产生残余变形,但相比于砂土和粉土,其孔隙水压力比难以达到初始液化标准。国内外对黄土地震液化灾害的调查结果也证实了黄土液化以不均匀沉降和泥流为主要特征,致灾性十分强烈。

为了减轻和消除饱和黄土地基的液化势,国内外基于不同的地基处理方法对饱和黄土地基的抗液化处理技术开展了研究和应用。刘汉龙等<sup>[7]</sup>、王谦等<sup>[8]</sup>、何开明等<sup>[9]</sup>研究了密实处理后饱和黄土的抗液化性能,发现密实处理难以完全消除饱和黄土的液化势。何开明等<sup>[10]</sup>研究了化学灌浆处理对饱和黄土地基抗液化特性的影响,发现化学灌浆处理能够较好地消除饱和黄土地基的液化势。王谦等<sup>[11]</sup>发现在黄土中掺入 5% 的水泥并经过密实处理后可完全消除饱和黄土地基的液化势,然而水泥改良黄土地基和化学灌浆改良黄土地基处理成本高昂,且容易造成资源浪费,环保效益较差。

与水泥、硅液等相比,粉煤灰作为火电厂固体废弃物,其颗粒呈多孔状,具有比表面积大、孔隙率高的特点,具备高吸附活性和强吸水性,且其在掺拌过程中发生水化反应产生的胶体物质可增强土体颗粒之间的黏性。良好的经济性和环保性使其成为一种较为理想的地基改良材料。国内外针对煤灰改良黄土的力学特性已开展了较多的研究,且在粉煤灰改良黄土的压缩性、湿陷性、水稳定、静强度特性和固化机制方面取得了一些成果<sup>[12-17]</sup>。然而有关粉煤灰改良黄土的动力特性研究则仅见于王峻等<sup>[18-20]</sup>开展的非饱和粉煤灰改良黄土的动本构关系和震陷性的研究,目前尚未见到对于饱和粉煤灰改良黄土动力特性方面的研究。

为此,本文通过对不同粉煤灰掺合比的改良黄土进行动三轴试验,研究饱和粉煤灰改良黄土的动力特性,分析不同粉煤灰掺量的饱和改良黄土的液化应力比、动残余变形和动孔隙水压力的变化规律,并通过对改良黄土微观结构特征的分析,得到粉煤灰改良固化饱和黄土地基的机制。研究结果可为饱和粉煤灰改良黄土地基动力稳定性分析和抗震设计提供基础数据和理论参考。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 不同配比粉煤灰改性黄土的制备

试验用的原状土取自甘肃省临夏县,采用人工开挖探井的方法进行试样取备,试样均为  $Q_3$  黄土,取样深度为 4 m。试样的物性指标如表 1 所列。

将现场取得的土样风干、碾碎,过 2 mm 的筛,形成制备试验用的土料。试验中所用的粉煤灰来自甘肃省兰州市某热电公司,粉煤灰的基本参数如表 2 所列。

按照不同粉煤灰掺量  $m$  进行配比,  $m$  分别为:

表 1 试验所用原状土样的主要物性参数

Table 1 Basic physical parameters of undisturbed loess samples used in the test

| 深度/m | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 天然含水率/% | 液限/% | 塑限/% | 颗粒组成/% |      |     |
|------|--------------------------|---------|------|------|--------|------|-----|
|      |                          |         |      |      | 黏粒     | 粉粒   | 砂粒  |
| 4    | 1.436                    | 13.3    | 25.6 | 16.4 | 18.3   | 72.8 | 8.1 |

表 2 粉煤灰性质指标

Table 2 Property indices of fly ash

| 化学成分                           | 含量/%  | 物理性质                  |       |
|--------------------------------|-------|-----------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 52.04 | 细度/%                  | 23.2  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.22 | 烧失量/%                 | 4.93  |
| CaO                            | 5.47  |                       |       |
| MgO                            | 12.57 | 堆积密度/                 | 0.802 |
| SO <sub>3</sub>                | 0.45  | (g·cm <sup>-3</sup> ) |       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.19  | 含水率/%                 | 2.5   |

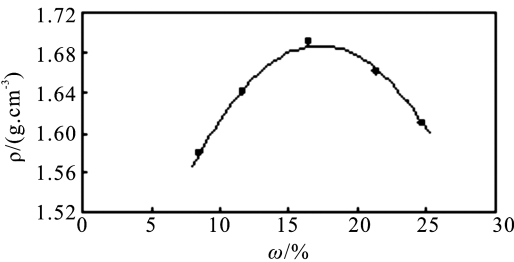


图 1 最大干密度-最优含水量试验结果

Fig.1 Test results of maximum dry density vs. optimal moisture content

0% (压实素土)、5%、10%、15%、20%、25% 和 30%。采用两端静压法进行土样的制备,考虑试样的均匀性和试验结果的可对比性,试样制备前首先将素土料和粉煤灰干拌混合均匀,然后统一按照天然黄土的最优含水率(图 1)计算需要加入水的质量,将三者拌均。考虑到施工现场的具体条件,根据公路路基相关规范,确定重塑土样的压实系数  $K$  为 0.93。试样制备完成后在实验室内控制温度场和湿度场不变的条件下养护 28 d。

1.2 SEM 细观结构试验

将饱和压实素土及饱和粉煤灰改良黄土在冷冻干燥仪中冻干后,制备成 10 mm×10 mm×2 mm 的方形薄片状试样,并利用离子溅射仪在试样的表面喷金;采用 KYKY-2800B 型扫描电子显微镜观察所用土样的微结构并进行拍照。为了便于比较,显微图像的放大倍数统一选择 400 倍。

1.3 动三轴液化试验

不同粉煤灰掺量的饱和改良黄土的动三轴液化试验在中国地震局黄土地震工程重点实验室的 WF-12440 型动三轴-扭剪试验系统上完成。试验参照《土工试验规程》(SL237-032-1999)<sup>[21]</sup> 中振动三

轴试验进行操作。试验过程饱和、固结和循环剪切三步进行,其中饱和方法采用反压饱和法,设置饱和压差为 20 kPa,通过多级饱和直至  $B$  值达到 0.95,确定为土体饱和;固结采用各向同性固结,固结压力  $\sigma_1=\sigma_3=100$  kPa;待固结应变小于 0.05%/(5 min)时,认为固结稳定。循环动荷载选择频率为 1 Hz 的正弦荷载。为了便于结果的比较,试样的液化破坏标准统一选用应变标准,即动应变  $\epsilon_d=3\%$ ,且动孔隙水压力系数  $U_d/\sigma'_0>0.2$ 。试验中记录动应力、动应变和动孔隙水压力的变化。

2 试验结果及分析

2.1 粉煤灰改良饱和黄土的抗液化强度

根据动三轴试验结果,计算压实素土与不同粉煤灰掺量的饱和改良黄土液化破坏时的振动次数对应的液化应力比,绘制液化应力比-振次曲线(图 2)。

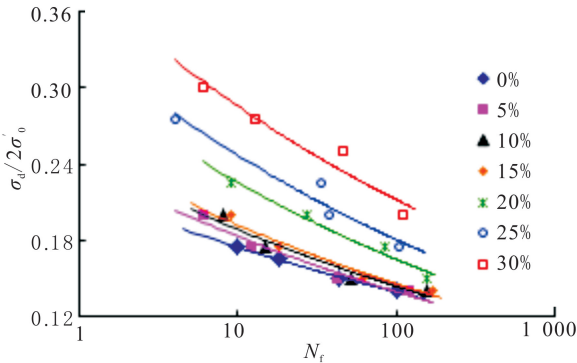


图 2 粉煤灰改良饱和黄土的液化应力比-振次曲线

Fig.2 Relationship between liquefaction stress ratio of saturated fly ash improved loess and the number of cycles

由图 2 可知,饱和压实素土(0%)与饱和粉煤灰改良黄土(5%~30%)的液化应力比随着振次的增加呈非线性减小,且减小逐渐趋于缓慢。随着粉煤灰掺量的增加,饱和改良黄土的液化应力比增加。粉煤灰掺量小于 15%时,饱和改良黄土的液化应力比增加不明显;粉煤灰掺量达到 15%后,随着掺量的增加,改良黄土的液化应力比显著增加。通过分析振次为 10 次和 100 次时饱和压实素土和不同粉煤灰掺量饱和改良黄土的液化应力比可知,粉煤灰掺量为 20%的饱和改良黄土的液化应力比分别较

压实素土增加 1.29、1.21 倍;粉煤灰掺量为 25% 的饱和改良黄土的液化应力比分别较击实素土增加 1.41、1.31 倍;粉煤灰掺量为 30% 的饱和改良黄土的液化应力比分别较击压素土增加 1.63、1.53 倍。

此外,随着粉煤灰掺量的增加,饱和改良黄土的液化应力比-振次拟合曲线的斜率逐渐增大,表明粉煤灰掺量对饱和改良黄土液化曲线的衰减存在一定的影响。

2.2 粉煤灰改良饱和黄土的动变形特性

地基的动力变形特性是衡量其抗震稳定性的关键性指标。根据动三轴试验记录的动应变结果,绘制饱和和压实素土和不同粉煤灰掺量的饱和改良黄土的动应变-振次曲线,如图 3 所示。为了便于结果对比,选择动应力为 45 kPa,最大振次为 100 次。

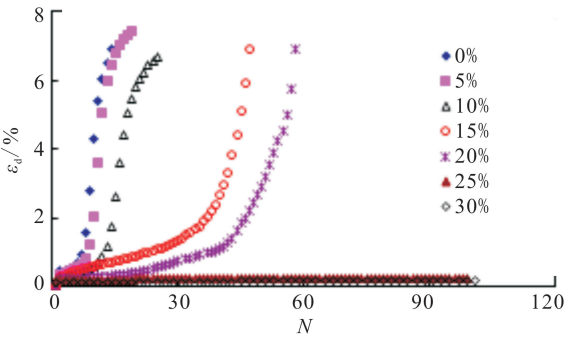


图 3 粉煤灰改良饱和黄土的变形特性  
Fig.3 Deformation characteristics of the saturated fly ash-improved loess

由图 3 可知,随着振次的增加,饱和压实素土的动应变在几个周期内迅速增加。掺入 5% 的粉煤灰后,饱和改良黄土的动应变发展趋势仍与素土相近。掺入 10% 的粉煤灰后,饱和改良黄土动应变的增长趋于缓慢,但演化形态仍与饱和压实素土和粉煤灰掺量为 5% 的饱和改良黄土类似。掺入 15% 的粉煤灰后,饱和改良黄土的动应变出现先缓慢后急剧的增长,动应变最大仍可达到 7% 左右。粉煤灰掺量为 20% 时,饱和改良黄土的动应变增长形态与粉煤灰掺量为 15% 时相近,但曲线较 15% 时的曲线右移,表明其抗液化性能更优。当粉煤灰掺量  $m \geq 25\%$  后,饱和改良黄土的动应变随着振次的增加缓慢增长,动应变-振次曲线近线性。 $m = 25\%$  时动残余变形最大值仅为 0.29%, $m = 30\%$  时最大值仅为 0.10%,土体仅在动力作用下产生微小的变形,抗动力变形能力较好。

2.3 粉煤灰改良饱和黄土的动孔隙水压力特征

动荷载作用下孔隙水压力的变化特征是饱和土

动力学不可忽略的性质。根据动三轴试验记录的孔隙水压力结果,通过归一化处理计算得到动孔隙水压力比(动孔隙水压力与有效围压的比值),绘制饱和和压实素土和不同粉煤灰掺量饱和改良黄土的动孔隙水压力比随振次的变化曲线(图 4)。与动变形结果分析类似,为了便于试验结果的对比,选择动应力为 45 kPa,最大振次为 100 次。

据图 4 可知,随着振次的增加,饱和压实素土在动力作用下的动孔隙水压力出现急剧的增长,试样破坏前的最大动孔隙水压力比达 0.39。当粉煤灰掺量  $m$  在 5%~20% 间时,动孔隙水压力比的增长随  $m$  的增加逐渐趋于缓慢;其中  $m = 5\%$  和  $m = 10\%$  时饱和改良黄土的动孔隙水压力比具有近似的演化形态, $m = 15\%$  和  $m = 20\%$  时其也具有相近的发展特征,试样破坏时的最大孔隙水压力比也较接近。而当  $m \geq 25\%$  后,饱和改良黄土的动孔隙水压力比随着振次的增加增长十分缓慢,动孔隙水压力比-振次曲线形态近似,最大孔隙水压力比小于 0.08。

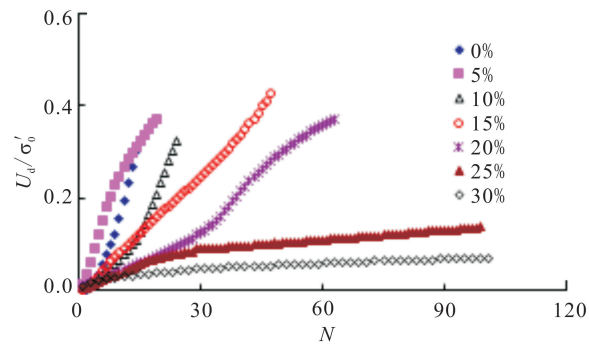


图 4 不同掺量粉煤灰改良饱和黄土的孔隙水压力特性

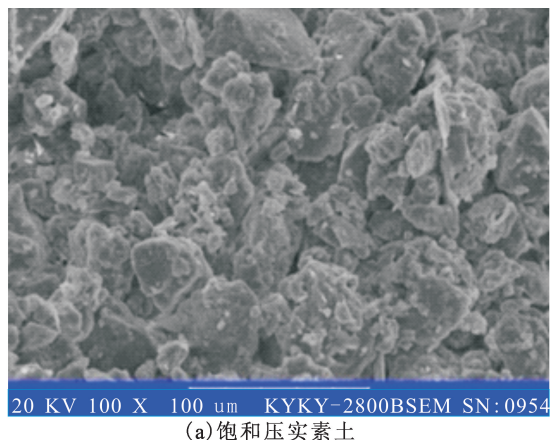
Fig.4 Pore water pressure characteristics of the saturated fly ash-improved loess with different fly ash dosages

2.4 粉煤灰改良饱和黄土的抗液化性能

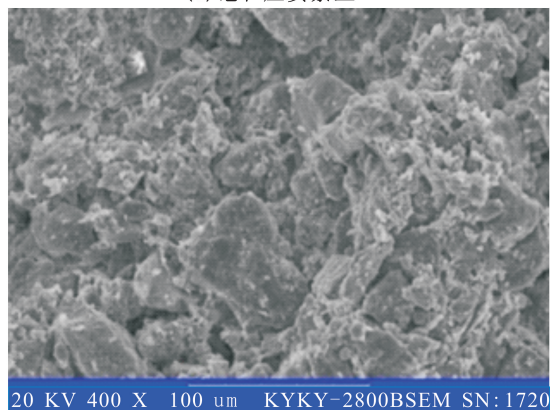
王兰民等<sup>[1,3]</sup>基于大量的饱和黄土动力学试验提出了室内动三轴试验判别饱和黄土液化的两个标准:(1)应变标准:动应变  $\epsilon_d = 3\%$ ,且动孔隙水压力系数  $U_d/\sigma'_0 > 0.2$ ;(2)孔隙水压力标准:动孔隙水压力系数  $U_d/\sigma'_0 > 0.7$ 。考虑黄土的地域差异性和特殊性,具体判别时采用这两个标准中首先达到的标准判定饱和黄土液化。根据图 3、图 4,当粉煤灰掺量达到 25% 后,饱和改良黄土的动应变  $\epsilon_d$  均小于 0.29%,且动孔隙水压力比  $U_d/\sigma'_0$  均小于 0.08。因此可以判定,当粉煤灰掺量达到 25% 后饱和改良黄土具有良好的抗液化性能。

### 3 饱和粉煤灰改良黄土的抗液化机理

图5为饱和压实素土和饱和粉煤灰改良黄土干燥后试样的SEM细观结构试验结果。



(a) 饱和压实素土



(b) 饱和粉煤灰改良黄土 ( $m=25\%$ )

图5 饱和压实素土和饱和粉煤灰改良黄土的细观结构试验结果

Fig.5 Mesostructural images of saturated compacted loess and saturated fly ash-improved loess

由图5可知,饱和压实素土颗粒较为清晰,粒间存在较少的胶结物质,镶嵌的颗粒尽管存在压密,但仍以点接触为主,架空孔隙较为明显。而饱和粉煤灰改良黄土由于粉煤灰的掺入,在原有的颗粒上清晰可见细小的圆球状、粒状或絮状附着物,颗粒之间的架空孔隙被较大程度地破坏,孔隙明显减少,胶结物明显增多,颗粒之间以面接触为主,形成了凝块状胶结结构。这是由于粉煤灰的水化反应和粉煤灰中的  $\text{Ca}^{2+}$  与黄土中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  之间的离子交换作用形成了水化硅酸钙等絮凝状的胶体物质附着在土颗粒之间,填充于孔隙之内,从而极大地增加了改良黄土的结构强度;同时,粉煤灰颗粒本身较为细小,细小的圆球状和粒状粉煤灰填入黄土颗粒之间的大孔隙内,进一步增加了土体的密实度。再者,胶体物质和

粉煤灰颗粒的填入堵塞了土体中的水流通通道,且粉煤灰活性颗粒增多极大地增加了改良土的比表面积,增强了对土中游离水的吸附作用,从而较好地抑制了改良土体中的孔隙水压力增长。

综上,粉煤灰的水化作用、胶体生成物和颗粒的填隙作用和对游离水的吸附作用共同提高了饱和改良黄土的抗液化性能。

### 4 结论

(1) 改良黄土的液化应力比随粉煤灰掺量的增加而增加,粉煤灰掺量达到  $15\%$  后,随着粉煤灰掺量的增加,改良黄土的液化应力比增加显著。

(2) 随着粉煤灰掺量的增加,相同振次下饱和改良黄土的动应变和孔隙水压力均减小。

(3) 粉煤灰掺量达到  $25\%$  后,饱和改良黄土具有较好的抗液化性能。

(4) 饱和粉煤灰改良黄土的抗液化机理包括粉煤灰的水化作用、胶体生成物和颗粒的填隙作用和粉煤灰对游离水的吸附作用。

### 参考文献(References)

- [1] 王兰民,石玉成,刘旭,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003:85-143.  
WANG Lanmin, SHI Yucheng, LIU Xu, et al. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 85-143.
- [2] 中国国家标准化管理委员会.中国地震动参数区划图: GB18306-2015[S].北京:中国标准出版社,2015.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB18306-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [3] 王兰民,刘红玫,李兰,等.饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):89-94.  
WANG Lanmin, LIU Hongmei, LI Lan, et al. Laboratory Study on the Mechanism and Behaviors of Saturated Loess Liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 89-94.
- [4] 王峻,王兰民,王平,等.不同地区饱和黄土液化特性研究[J].水文地质工程地质,2011,38(5):54-56.  
WANG Jun, WANG Lanmin, WANG Ping, et al. Study on Liquefaction Characters of Saturated Loess in Different Regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 54-56.
- [5] 王谦,王峻,钟秀梅,等.黄土高原河谷城市潜在地震液化特征及灾害预测[J].土木工程学报,2014,47(增刊1):301-306.  
WANG Qian, WANG Jun, ZHONG Xiumei, et al. Soil Liquefaction Characteristics and Disaster Prediction of the Valley Cities in the Loess Plateau [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Suppl1): 301-306.

- [6] 邓龙胜, 范文, 贺龙鹏. 随机地震荷载作用下黄土的液化特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1274-1280.  
DENG Longsheng, FAN Wen, HE Longpeng. Liquefaction Property of Seismic Loess under Stochastic Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1274-1280.
- [7] 刘汉龙, 余跃心, 王兰民. 强夯黄土地基液化试验研究[C]// 土动力学与岩土地震工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 218-223.  
LIU Hanlong, SHE Yuexin, WANG Lanmin. Liquefaction Experimental Research of Dynamic Compacted Loess Foundation [C]// Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 218-223.
- [8] 王谦, 王兰民, 王峻, 等. 基于密度控制理论的饱和黄土地基抗液化处理指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 844-847.  
WANG Qian, WANG Lanmin, WANG Jun, et al. Indices of Anti-liquefaction Treatment of Saturated Compacted Loess Foundation Based on Theory of Density Control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp2): 844-847.
- [9] 何开明. 经若干方法处理黄土地基抗液化性状的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.  
HE Kaiming. Studies on the Anti-liquefaction Behavior of the Loess Ground Improved by Several Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [10] 何开明, 周健, 王兰民. 化学灌浆黄土地基的抗液化性状研究[J]. 地震研究, 2003, 26(4): 396-399.  
HE Kaiming, ZHOU Jian, WANG Lanmin. Research on the Anti-liquefaction Behavior of Loess Subsoil Improved by Chemical Grouting[J]. Journal of Seismological Research, 2003, 26(4): 396-399.
- [11] 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 the Cement-stabilized Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2128-2134.
- [12] 杨有海, 梁波, 丁立. 粉煤灰与石灰、水泥拌合料的强独特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 227-230.  
YANG Youhai, LIANG Bo, DING Li. Experimental Study on the Strength Behaviors of Fly Ash-lime or Fly Ash-cement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 227-230.
- [13] NICHOLSON P G, KASHYAP V. Fly Ash Stabilization of Tropical Hawaiian Soils[C]. Washington D C: Geotechnical Special Publication, 1993, 36: 15-29.
- [14] 夏琼, 杨有海, 耿焯. 粉煤灰与石灰、水泥改良黄土填料的试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(3): 40-43.  
XIA Qiong, YANG Youhai, GENG Xuan. Experimental Study on Flyash-lime or Flyash-cement Loess Filling[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(3): 40-43.
- [15] 高振林, 刘嘉学, 韦寒波, 等. 粉煤灰影响湿陷性黄土工程性质试验[J]. 北方工业大学学报, 2007, 19(1): 91-94.  
GAO Zhenlin, LIU Jiaxue, WEI Hanbo, et al. Experimental Study of Effect of Fly Ash on Engineering Characteristics of Waterish Loess [J]. Journal of North China University of Technology, 2007, 19(1): 91-94.
- [16] KIM B, PREZZI M, SALGADO R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(7): 914-924.
- [17] 温明星, 骆亚生, 刘紫韦, 等. 掺粉煤灰压实黄土环剪试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 70-74.  
WEN Mingxing, LUO Yasheng, LIU Ziwei, et al. Ring Shear Test of Compacted Loess Blended with Fly Ash[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(3): 70-74.
- [18] 王峻, 王谦, 王平, 等. 粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 156-160.  
WANG Jun, WANG Qian, WANG Ping, et al. Effect of Adding Amount of Fly Ash on Dynamic Constitutive Relationship of Modified Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp1): 156-160.
- [19] 王峻, 王谦, 钟秀梅, 等. 粉煤灰与动载耦合作用下黄土震陷试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 70-75.  
WANG Jun, WANG Qian, ZHONG Xiumei, et al. Experimental Study of Loess Seismic Subsidence under the Coupling Effect of Fly Ash and Dynamic Loading[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(6): 70-75.
- [20] 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.
- [21] 南京水利科学研究院. 土工试验规程: SL237-032-1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
Nanjing Hydraulic Research Institute. Specification of Soil Test: SL237-032-1999 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.