

# 基于密度控制理论的饱和黄土地基抗液化处理指标研究

王 谦<sup>1,2</sup>, 王兰民<sup>1,2</sup>, 王 峻<sup>1,2</sup>, 高中南<sup>2</sup>

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 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:** 选择兰州市典型场地挖取 Q<sub>3</sub> 黄土, 制备不同干密度的击实黄土试样, 在 WF-12440 型动三轴 - 扭剪试验系统上进行了动三轴液化试验。通过整理和分析试验结果, 得出了干密度与液化应力比之间的定量影响关系, 分析了不同干密度的饱和击实黄土的动残余变形发展特征, 并根据 Seed 简化判别法计算了不同地震烈度下饱和黄土地基液化的临界液化应力比, 从而得出了不同抗震设防烈度下饱和黄土地基抗液化处理的干密度阈值, 为工程中地基抗液化密实处理提供了理论依据。

**关键词:** 黄土液化; 干密度; 地基处理; 指标

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2013)S2 - 0844 - 04

**作者简介:** 王 谦(1985 - ), 男, 甘肃临夏人, 主要从事黄土动力学与地震工程理论与试验研究工作。E-mail: wangq0930@126.com。

## Indices of anti-liquefaction treatment of saturated compacted loess foundation based on theory of density control

WANG Qian<sup>1,2</sup>, WANG Lan-min<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>, GAO Zhong-nan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Several compacted loess samples with different dry densities are prepared, which are the typical loess in Lanzhou City. The dynamic triaxial liquefaction tests are conducted by using the WF-12440 hollow cyclic apparatus. Through analysis of the experimental data, the relationship between liquefaction stress ratio and vibration times of the saturated compacted loess with different dry densities is proposed, the quantitative relationship of influence on liquefaction stress of saturated compacted loess by the initial void ratio is established, and the dynamic strain characteristics of saturated compacted loess with different dry densities are analyzed. Moreover, the critical liquefaction stress ratio and the critical dry density under different seismic intensities are calculated according to the Seed simplified procedure for liquefaction evaluation. The results are expected to provide guidance for the anti-liquefaction treatment of the site in real projects.

**Key words:** loess liquefaction; dry density; foundation treatment; index

## 0 引 言

20世纪60年代以来, 世界范围内地震活动频繁, 发生在国内外有影响的几次强震均引起了严重的土体液化灾害<sup>[1]</sup>。研究资料表明, 约有50%的地震震害起因于地基土的液化及伴随而来的地基变形<sup>[2-3]</sup>。可见, 饱和土层液化是导致大规模地基失稳, 建、构筑物坍塌和城市生命线工程破坏的主要原因。

自1964年美国阿拉斯加地震和日本新潟地震之后, 关于土壤液化问题的研究已经取得了阶段性的进展, 但这些研究大多是针对砂土展开的<sup>[4-5]</sup>。然而在20世纪80年代末以来, 大量的野外考察和室内试验结果证明了饱和及高含水量的黄土在动力荷载作用下也会

产生液化<sup>[6-8]</sup>。Ishihara等<sup>[9]</sup>对1989年前苏联塔吉克5.5级地震引起黄土液化, 导致大规模泥石流的事件进行了现场调查研究, 证明该地区由于农业灌溉造成了地下黄土层饱和或者湿化, 从而产生地震液化。美国学者<sup>[10]</sup>对1811年—1812年New Madrid 地震调查也表明存在黄土液化引起大面积沉陷, 继而引发密西西比河水倒灌灾害的证据。白铭学等通过对石碑塬黄土液化现场调查, 提出了高烈度地震作用下黄土液化引起地层移动的问题; 笔者等在汶川地震后对灾区震害情况考察

基金项目: 中国地震局黄土地震工程重点实验室开放基金项目 (KLLEE-12-003); 国家自然科学基金项目 (50978239)

收稿日期: 2013 - 07 - 17

时发现在甘肃清水县也因液化引起了黄土体的滑移。对于工程振动引起的黄土液化, 廖胜修等对多起黄土地基夯实处理过程中机械振动引起的黄土液化的实例予以报道和分析, 以实际资料说明了饱和及高含水率的黄土在一定的振动条件下容易发生液化的, 黄土地基液化后抗剪强度部分或全部丧失, 不再具备承载力。

干密度是影响黄土液化的重要因素之一, 而各种振密、挤密等密实处理方法在减轻或消除黄土地基湿陷性和震陷性处理中得以广泛采用, 其处理效果在一定程度上也获得了工程界的认可。因此, 基于密度控制理论, 采用密实处理技术对饱和黄土地基进行处理, 是减轻或消除饱和黄土地基液化势的一种经济、有效的手段, 具有较好的工程实用价值。

## 1 试样、仪器和试验概况

试验所用土样取自甘肃兰州桃树坪兰渝铁路#4斜井工程场地, 原状土为 $Q_3$ 黄土, 其基本物理性质指标如表1所示。

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

| 试样<br>编号 | 取样深<br>度/m | 干密度<br>$/(g \cdot cm^{-3})$ | 天然含水<br>率/% | 颗粒组分/% |      |      |
|----------|------------|-----------------------------|-------------|--------|------|------|
|          |            |                             |             | 粘粒     | 粉粒   | 砂粒   |
| TSPU-1   | 5.00       | 1.26~1.32                   | 4.44~4.57   | 17.3   | 68.2 | 14.5 |

根据《土工试验规程》(SL237—1999) 制备击实黄土试样, 不同组试样的干密度范围如表 2 所示。为了提高试验结果的可对比性, 试样制备过程中控制每组试样的含水率范围在 9.8~10.2 之间。

表 2 击实黄土试样的主要物性指标

Table 2 Physical parameters of compacted loess

| 试样组编号 | 平均干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$ | 含水率范围/%    |
|-------|----------------------------|------------|
| TSP-1 | 1.59                       | 9.81~10.11 |
| TSP-2 | 1.50                       | 9.85~10.18 |
| TSP-3 | 1.42                       | 9.80~10.09 |
| TSP-4 | 1.35                       | 9.84~10.20 |
| TSP-5 | 1.29                       | 9.91~10.06 |
| TSP-6 | 1.23                       | 9.85~10.20 |

动三轴液化试验仪器为英国制造的 WF-12440 型动三轴 - 扭剪试验系统, 试验方法严格按照《土工试验规程》(SL237—017—1999)。试样制备规格为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 重塑黄土试样采用分层击实法按不同密度分三层击实。试验过程分饱和、固结和循环剪切 3 个步骤进行。其中饱和方法采用低反压饱和法, 试样在固结时固结压力分别选用 100 kPa, 150 kPa 和 200 kPa, 固结比  $K_c=1.0$ 。循环剪切时动荷载选用频率为 1 Hz 的等幅正弦荷载, 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  $\varepsilon_d=3\%$ , 且动孔隙水压力系数  $U_d/\sigma_0>0.2$ 。

## 2 试验结果

采用液化应力比 ( $\sigma_d/2\sigma'_0$ ) - 振次 ( $N_f$ ) 曲线表示不同地区结构性饱和黄土试样动三轴液化试验的结果, 如图 1 所示。

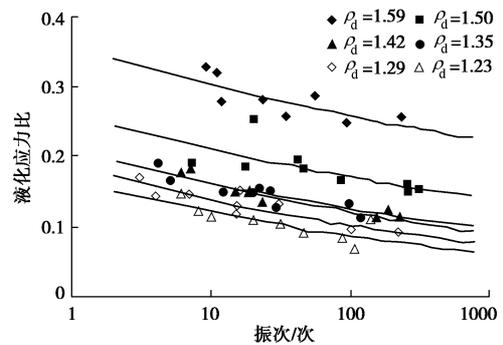


图 1 不同干密度的饱和击实黄土的液化应力比 - 振次曲线  
Fig. 1 Liquefaction stress ratio-vibration time curves of saturated compacted loess with different dry densities

由图 1 可知, 干密度对饱和黄土液化应力比的影响表现为: ①饱和击实黄土的液化应力比随着干密度的增加而增大, 当干密度大于  $1.42 \text{ g/cm}^3$  时, 液化应力比随着干密度的增大而显著增大; ②不同干密度击实黄土液化应力比 - 振次曲线的斜率不随干密度的变化而变化, 证明干密度不是控制黄土液化曲线衰减趋势的主要因素之一。

## 3 试验结果分析

### 3.1 干密度对饱和击实黄土抗液化强度的影响

根据 Seed 简化算法<sup>[11]</sup>, 液化应力比决定了一定应力条件下土体的抗液化强度, 研究中采用液化应力比表征击实黄土的抗液化强度。

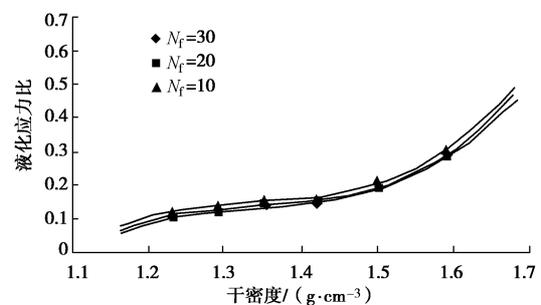


图 2 饱和击实黄土的液化应力比 - 干密度关系曲线  
Fig. 2 Relationship between liquefaction stress ratio and dry density of saturated compacted loess

根据图 1 绘制不同振次下饱和击实黄土干密度 - 液化应力比之间的关系, 结果如图 2 所示, 运用不同

的函数关系对所得数据点进行拟合, 结果发现三次多项式拟合拟合度较高, 拟合公式为式(1), 其中  $a, b, c, d$  为拟合参数。不同等效地震烈度下饱和和重塑黄土初始孔隙比-液化应力比关系拟合公式中各参数如表3所示。可见饱和击实黄土的液化应力比随着干密度的增加而增加, 二者的关系在采用三次多项式函数拟合时具有很好的相关性。

$$\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} = a\rho_d^3 + b\rho_d^2 + c\rho_d + d \quad (1)$$

表3 拟合参数与相关系数

Table 3 Fitting parameters and correlation coefficients

| $N_f$ | 参数     |         |        |         | $R$    |
|-------|--------|---------|--------|---------|--------|
|       | $a$    | $b$     | $c$    | $d$     |        |
| 10    | 7.5843 | -30.647 | 41.449 | -18.609 | 0.9971 |
| 20    | 7.2952 | -29.451 | 39.803 | -17.868 | 0.9976 |
| 30    | 6.8847 | -27.712 | 37.354 | -16.730 | 0.9978 |

### 3.2 干密度对击实黄土动残余变形特征的影响

为了进一步研究一定动应力和振次条件下干密度对击实黄土动残余应变发展特性的影响, 研究中选用动应力大小、饱和度相近、固结条件相同的一组试样, 利用动三轴液化试验记录结果研究动应变随干密度的变化趋势, 试样的干密度、饱和度和所施加的动应力如表4所示。

表4 所选的饱和击实黄土试样的物性指标

Table 4 Physical parameters and dynamic stress of saturated compacted loess

| 试样编号    | $\rho_d$<br>/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $S_r$<br>/% | $\sigma_3$<br>/kPa | $\sigma_d$<br>/kPa |
|---------|--|-------------|--------------------|--------------------|
| TSP-1-1 | 1.59   | 86.1        | 150                | 40                 |
| TSP-2-1 | 1.50   | 82.9        | 150                | 30                 |
| TSP-3-2 | 1.42   | 97.2        | 150                | 30                 |
| TSP-4-2 | 1.35   | 84.2        | 150                | 30                 |
| TSP-5-3 | 1.29   | 92.3        | 150                | 30                 |
| TSP-6-1 | 1.23   | 96.4        | 150                | 30                 |

根据表4中不同饱和击实黄土试样的动三轴液化试验结果, 绘制不同干密度的饱和击实黄土动应变随振次的变化曲线, 如图3所示, 考虑地震持时一般在几十秒, 研究中的液化振次最大值取为40次。由图可知, 干密度越大, 液化时产生的动残余应变的增加越趋缓慢。当  $\rho_d \leq 1.29 \text{ g/cm}^3$  时, 击实黄土动残余应变几乎呈直线增长, 在几个振次内动残余应变超过了3%, 从而使土样产生了液化破坏; 当  $1.35 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.50 \text{ g/cm}^3$  时, 在最初的几个振次内, 动残余应变缓慢增长, 然而随着振次的增加, 残余变形量超过3%并急剧增大, 造成了土体的液化破坏;  $\rho_d >$

$1.50 \text{ g/cm}^3$  后, 振次在40次以内, 饱和击实黄土的动残余应变发展特征发生了明显的变化; 当  $\rho_d > 1.50 \text{ g/cm}^3$  时, 击实黄土的动残余应变随着振次的增加缓慢增长, 振次在40次以内其残余变形量仅为1%左右; 当  $\rho_d > 1.59 \text{ g/cm}^3$  时, 由于击实黄土具有较为稳定的结构, 动残余应变随着振次的增长几乎不发生变化, 振次在40次以内其残余变形量仅为0.3%左右。

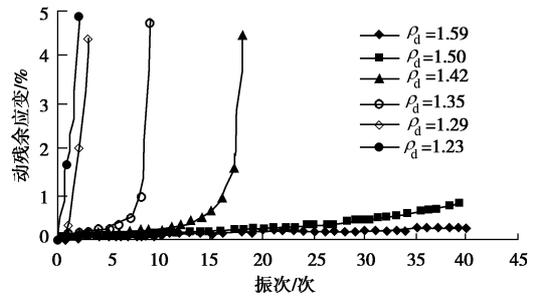


图3 不同饱和击实黄土的动应变特征

Fig. 3 Dynamic strain characteristics of saturated compacted loess with different dry densities

综合图2和图3的分析表明, 干密度的增加对于黄土地基的抗液化效能具有显著的提高, 当夯实土的干密度  $\rho_d > 1.50 \text{ g/cm}^3$  时, 其抗液化强度具有显著的提高, 随着振次的增加动应变的增加趋势明显减缓, 黄土地基抗液化能力明显。

### 4 饱和黄土地基抗液化夯实处理指标

夯实处理是黄土地区应用十分广泛的地基处理方法之一, 其作用机理是利用夯锤自由落下产生的冲击波使地基密实, 从而在夯实层的范围内, 土的物理、力学性质获得显著改善, 平均干重度明显增大, 压缩性降低, 湿陷性消除, 透水性减弱, 承载力提高。

上述研究表明, 干密度是影响击实黄土液化的最重要因素之一, 干密度的增大对饱和黄土地基的抗液化强度有显著的提高。因此, 夯实处理也是防止饱和和黄土地基液化的有效措施之一。而在实际工程中, 确定不同的地震烈度下的饱和黄土地基液化的临界干密度是解决黄土地基液化的关键性问题。

Seed 简化判别法认为, 当土层的抗液化强度大于地震作用的平均剪应力时, 地基土不再液化, 土层的抗液化强度和地震作用的平均剪应力为

$$\frac{\tau}{\sigma'_v} = C_r \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \quad (2)$$

式中,  $\sigma'_v$  为黄土层在天然埋藏状态下的液化剪应力比,  $C_r$  为修正系数,  $\sigma_d/2\sigma'_0$  为液化应力比。

$$\tau_c = 0.65K \frac{a_{max}}{g} \gamma d_s \quad (3)$$

式中,  $K$  为应力折减系数,  $\gamma$  为深度  $d_s$  以上的上覆土层天然重度,  $a_{\max}$  为地震中产生的地面峰值加速度,  $g$  为重力加速度。

研究中采用 Seed 简化判别法, 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 中推荐的不同抗震设防烈度所对应的峰值加速度值, 通过式 (2)、(3) 计算了不同地震烈度下饱和击实黄土地液化的临界液化应力比, 并通过式 (1) 计算不同烈度下击实黄土地液化的干密度阈值, 结果如表 5 所示。

表 5 饱和击实黄土地液化的临界液化应力比及干密度阈值  
Table 5 Critical liquefaction stress ratios and critical dry densities

| 地震烈度 | 临界液化应力比 | 干密度阈值/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|------|---------|---|
| VI   | 0.092   | 1.249                                   |
| VII  | 0.184   | 1.484                                   |
| VIII | 0.369   | 1.641                                   |
| IX   | 0.739   | 1.767                                   |

根据表 5 可知, 地震烈度为 VI, VII, VIII 度, 夯实处理后黄土地基的干密度分别大于 1.249, 1.484, 1.641  $\text{g}/\text{cm}^3$  时, 可消除地基的液化势。IX 度地震作用下饱和击实黄土地液化的干密度阈值为 1.767  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 而对黄土地基进行夯实处理时往往难以达到这一密度, 因此在 IX 度地震作用下夯实处理不能完全消除饱和黄土地基的液化势, 但是对于提高黄土地基的抗液化性能来说仍具有积极意义。

## 5 结 论

通过研究可得出以下主要结论:

(1) 干密度是影响饱和击实黄土地液化的重要因素, 随着干密度的增加, 饱和击实黄土的抗液化强度显著提高, 动残余应变的衰减趋势十分明显, 夯实处理是提高饱和黄土地基抗液化效能的有效手段之一。

(2) 地震烈度为 VI, VII, VIII, IX 度时, 饱和击实黄土地液化的临界干密度分别为 1.249, 1.484, 1.641, 1.767  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 地震烈度为 VI, VII, VIII 度时, 夯实处理可完全消除饱和黄土地基的液化势, 而 IX 度地震作用下夯实处理仅可部分消除饱和黄土地基的液化势。

### 参考文献:

[1] 汪闻韶. 土的动力强度与液化特性[M]. 北京: 中国水电出版社, 1996. (WANG Wen-shao. Dynamic strength and liquefaction characteristics of soil[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996. (in Chinese))

[2] 陈文化. 地震液化流滑震害[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4):

88 - 93. (CHEN Wen-hua. Slipping disaster induced by seismic liquefaction[J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(4): 88 - 93. (in Chinese))

[3] SEED H B, HON M. Design problems in soil liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(8): 827 - 745.

[4] VAID Y E, THOMAS J. Liquefaction and postliquefaction behavior of sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(2): 163 - 173.

[5] 张建民, 时松孝次, 田屋裕司. 饱和砂土液化后的剪切吸水效应[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 398 - 404. (ZHANG Jian-min, TOKIMATSU Kohji, TAYA Yuhji. Effect of water absorption in shear of post-liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 398 - 404. (in Chinese))

[6] 白铭学, 张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化滑移[J]. 工程勘察, 1990, 20(6): 1 - 5. (BAI Ming-xue, ZHANG Su-min. Loess liquefaction flow in high intensity earthquake[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1990, 20(6): 1 - 5. (in Chinese)).

[7] 王 谦, 王兰民, 袁中夏, 等. 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, 2012, 39(2): 116 - 120. (WANG Qian, WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, et al. A study of loess liquefaction induced by the Wenchuan Ms8. 0 Earthquake in Tianchuan, Qingshui County, Gansu Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 116 - 120. (in Chinese))

[8] 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 Lan-min, WANG Ping, et al. Study on liquefaction characters of saturated loess in different regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 54 - 56. (in Chinese))

[9] ISHIHARA K, OKUSA S, OYAGI N, et al. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in soviet Tajik[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 73 - 89.

[10] PRAKASH S, PURI V K. Liquefaction of loessial soils[C]// Anon Proc of Third International Conference on Seismic Microzonation. Seattle, 1982: 1101 - 1107.

[11] SEED H B, IDRIS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1983, 109(3): 458 - 482.