

DOI: 10.11779/CJGE201611025

# 水泥改性黄土的抗液化特性与机制

王 谦<sup>1, 2, 3</sup>, 刘红玫<sup>\*1, 3</sup>, 马海萍<sup>3</sup>, 王 峻<sup>1, 3</sup>, 李 娜<sup>1, 3</sup>

(1. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;  
3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 以改性处理减轻饱和黄土的液化势为目标, 通过对不同配比的水泥改性黄土进行 SEM 细观结构测试和动三轴液化试验, 研究了水泥改性黄土的液化特征, 得出了不同配比水泥改性黄土的动残余应变和动孔隙水压力发展趋势, 分析了水泥固化饱和黄土的物化机制, 并基于试验结果, 提出了水泥改性黄土的最佳配比。结果表明: 水泥改性处理在黄土中形成了凝块状胶接结构, 优化了土中孔隙分布, 增大了土体的结构强度; 水泥对土体的密实效应、掺加水泥导致的细粒增加和离子交换对黄土结构的胶结效应和黏粒增加对土中游离水的吸附作用共同提高了水泥改性黄土地基的抗液化稳定性; 水泥掺量大于 3% 后, 水泥改性黄土的动残余应变和孔隙水压力随着振次的增加均增长缓慢, 且在  $m=5\%$  时峰值最小, 表明 5% 是水泥改性黄土地基抗液化处理的最佳配比。

**关键词:** 水泥改性; 饱和黄土; 动残余应变; 动孔隙水压力; 最佳配比

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)11-2128-07

作者简介: 王 谦(1985-), 男, 甘肃临夏人, 助理研究员, 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。

## Liquefaction behavior and mechanism of cement-stabilized loess

WANG Qian<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Hong-mei<sup>1, 3</sup>, MA Hai-ping<sup>1, 3</sup>, WANG Jun<sup>1, 3</sup>, LI Na<sup>1, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration & Gansu Province, Lanzhou 730000, China;  
2. Schools of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA,  
Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Using modification treatment to reduce the liquefaction potential of saturated loess, on the basis of SEM tests and dynamic triaxial tests on the cement-stabilized loess with different proportions, the evolution laws of its dynamic residual strain and pore water pressure are obtained, and its physical and chemical mechanism are analyzed. In addition, the optimum proportion of the cement-stabilized loess is suggested based on the test results. The results show that the cement modification treatment leads to clotted cementation structure in the soil, which optimizes the pore distribution in the soil and increases the structural strength of the loess. The anti-liquefaction stability of the cement-stabilized loess foundation is improved by the compact effect of the cement to the soil, the cementation effect of loess structures caused by adding cement to increase fine particles and ion exchange and the adsorption effect of free water caused by the increase of clay in the soil. The dynamic residual strain and pore water pressure of the cement-stabilized loess increase slowly with the increase of vibration times when the cement content is larger than 3%. Their peak values are the smallest when the cement content is 5%, which shows that 5% is the optimum proportion of anti-liquefaction treatment for the cement-stabilized loess foundation.

**Key words:** cement stabilization; saturated loess; dynamic residual strain; dynamic pore water pressure; optimum proportion

## 0 引言

黄土具有特殊的结构性和水敏性, 饱和状态下结构强度急剧降低, 处于亚稳态, 从而使其在动力作用下的灾变风险大大增加<sup>[1]</sup>。黄土高原是国家“一带一路”战略的起点与核心区, 这些地区的城镇多沿河谷展布, 或位于大厚度黄土塬区, 受季节性降水的影响, 低阶地的黄土在丰水季节多达到饱和; 同时随着城镇

化建设的全面推进、农业灌溉条件的改善, 黄土塬区地下水位逐年上升, 人口密集、人为作业繁多地区, 黄土也会处于饱和状态。在此背景下, 饱和黄土地震

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH16038Y); 国家自然科学基金项目(51408567, 51478444, 41472297)

收稿日期: 2016-01-04

\*通讯作者(E-mail: liuhm@gsdzj.gov.cn)

液化问题日益成为黄土地区经济发展和城镇化建设所面临的新的抗震问题<sup>[2]</sup>。

为了消除和减轻饱和黄土地震液化灾害, 学者们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, 取得了阶段性的研究成果, 且在一定范围内得到了应用。刘汉龙等<sup>[3]</sup>通过室内饱和击实黄土动三轴试验来模拟强夯黄土地基的液化势, 研究了强夯处理后饱和黄土的抗液化性能; 何开明等<sup>[4]</sup>研究了碎石桩挤密处理对黄土地基抗液化性能的影响; 王谦等<sup>[5]</sup>通过不同干密度的饱和击实黄土的动三轴试验, 提出了不同地震动强度下饱和黄土地基液化的干密度阈值; 然而这些研究结果均表明, 密实处理技术仅能在一定的地震动强度下完全消除饱和黄土地基的液化势, 当地震动强度超过一定的限度时, 经过密实处理的饱和黄土地基仍会发生液化破坏。何开明等<sup>[6]</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, 结果表明经过化学灌浆处理后的饱和黄土地基在 IX 度地震作用下不会发生液化, 较好地消除了饱和黄土地基的液化势。然而化学灌浆处理成本高昂, 对于黄土地区的一般工业与民用建筑地基的液化势处理的工程适用性较差。

地基土改性处理可有效解决建筑地基的变形与沉降问题, 提高建筑地基的稳定性。而水泥作为最常用的固化改性剂, 按照一定比例与黄土混合压实可有效提高黄土地基的强度和水稳定性, 因此在黄土地基、路基和岸坡加固中得到了较为广泛的应用<sup>[7]</sup>。国内外针对水泥改性黄土的工程性能开展了较多的研究, 但这些研究成果多集中静力学行为方面<sup>[8-11]</sup>。王家鼎等<sup>[12]</sup>通过高速列车振动荷载下水泥改良黄土动力学试验, 研究了水泥掺和比、压实系数、浸水条件和振动次数对土样动力特性参数的影响。而对于水泥改性黄土的抗液化特性与机制方面的研究则相对较少。为此, 本文基于不同水泥掺合比的水泥改性黄土的动三轴试验和 SEM 细观结构试验, 通过对试验结果的综合分析, 得出水泥改性黄土的动残余应变、孔隙水压力演化特征及抗液化强度增加的物化机制, 提出黄土地基水泥改性处理的最优水泥掺量。研究结果可为黄土地区建设工程地基抗液化水泥改性处理提供理论参考。

## 1 试验情况

### 1.1 不同配比水泥改性黄土的制备

试验用的原状土取自甘肃临夏县北塬, 试样均为 Q<sub>3</sub> 黄土, 取样深度均为 4 m。试样的物性指标如表 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

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
1.436	13.3	26.8	15.3	18.3	72.8	8.1

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。选用#425 硅酸盐水泥, 按照不同水泥掺量  $m$  进行配比,  $m$  分别为 0, 1%, 3%, 5%, 10%。采用静压法进行土样的重塑, 为便于比较, 统一按照天然黄土的最优含水率(如图 1 所示)加水拌和均匀。考虑到施工现场的具体条件, 重塑土样的压实系数  $K$  为 0.93。试样养护按照相关规范进行, 已有的试验结果证明水泥黄土的抗压强度在养护龄期为 0~14 d 时增长较快, 而在 14~28 d 时趋于平缓<sup>[13-14]</sup>, 因此试验中试样的养护龄期选择 14 d。

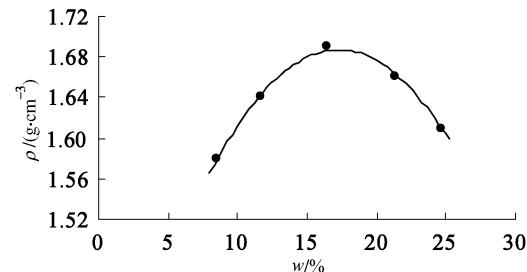


图 1 最大干密度-最优含水率试验结果

Fig. 1 Compaction test results of loess

### 1.2 SEM 细观结构试验

将经过自然干燥后的原状黄土及水泥改性黄土制备成 10 mm×10 mm×2 mm 的方形薄片状试样, 并在其表面喷金, 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均为 400 倍。

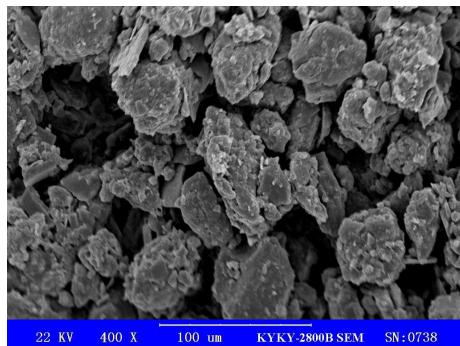
### 1.3 动三轴试验

不同掺量水泥改性黄土的动三轴液化试验在 WF-12440 型动三轴-扭剪试验系统上完成。试验严格按照 SL237—032—1999《土工试验规程》进行<sup>[15]</sup>。试验过程分饱和、固结和循环剪切三步进行。其中饱和方法采用低反压饱和法。试样在固结时轴向固结压力为 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  $U_d/\sigma'_0>0.2$ 。试验过程中记录动应力  $\sigma_d$ 、动应变  $\varepsilon_d$  和动孔隙水压力  $U_d$  变化过程曲线。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 SEM 细观结构试验结果与分析

原状与水泥改性黄土的电镜扫描试验结果如图 2 所示。由图 2 可知, 原状黄土颗粒清晰, 粒间存在较少的胶结物质, 镶嵌的颗粒以点接触为主, 架空孔隙十分明显。而水泥改性黄土由于土样重塑和水泥的掺入, 原有的颗粒上清晰可见细小的粒状或絮状附着物, 颗粒之间的架空孔隙较大幅度的被破坏, 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。



(a) 原状黄土

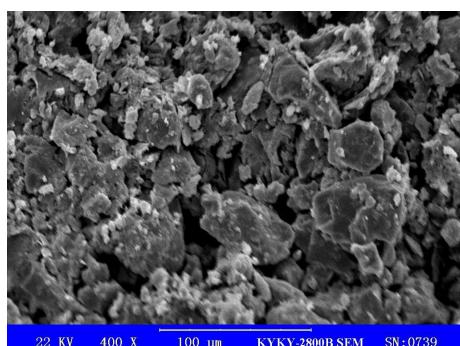
(b) 水泥改性黄土 ( $m=5\%$ )

图 2 原状与水泥改性黄土的 SEM 试验结果

Fig. 2 Micro-structural photos of undisturbed loess and cement-stabilized loess

为了进一步探讨黄土添加水泥前后的细观结构的变化, 采用 imagej2x 图像分析系统定义图像像素与长度之间的转换关系, 利用颗粒与孔隙之间的灰度反差, 通过对 SEM 图像的灰度变换、灰度反向、分割和二值编辑后, 分别对原状及水泥改性黄土的细观结构参数进行定量统计分析, 结果如图 3 所示。孔隙大小的分类标准参照雷祥义<sup>[16]</sup>分类方案, 即定义孔隙面积  $S < 3.14 \mu\text{m}^2$  的孔隙为微孔隙,  $3.14 \mu\text{m}^2 < S < 50.24 \mu\text{m}^2$  的孔隙为小孔隙,  $50.24 \mu\text{m}^2 < S < 803.8 \mu\text{m}^2$  的孔隙为中孔隙,  $S > 803.8 \mu\text{m}^2$  的孔隙为大孔隙。图 3 显示, 原状黄土的孔隙以中、大孔隙为主, 而水泥改性黄土的孔隙以中、小孔隙为主; 水泥改性黄土的孔隙总面积仅为原状黄土的 58.65%, 具体表现为中、大孔隙的明显减少。水泥改性黄土中大孔隙所占总孔隙面积的

百分比较原状土有了明显的减少, 变化量达 37.82%; 小孔隙和中孔隙所占总孔隙面积的百分比较原状土有了明显的增加, 变化量分别为 16.77% 和 16.44%; 微孔隙所占总孔隙面积的百分比较原状土有一定的增加, 变化量为 4.60%。

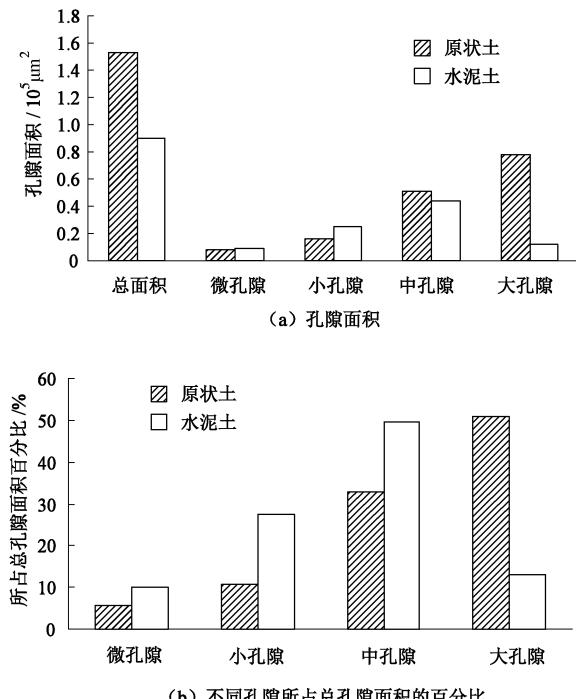


图 3 原状及水泥黄土细观结构参数定量统计分析结果

Fig. 3 Results of quantitative statistical analysis of microstructural parameters of loess and cement-stabilized loess

## 2.2 动三轴试验结果与分析

图 4 为动三轴试验记录的素土与不同掺合比的水泥改性黄土动应力、动应变和动孔隙水压力发展曲线。由图 4 可知, 素土试样在动荷载作用下动应变在几个周期内急剧增长, 在此过程中孔隙水压力表现出由缓慢到急剧的增长模式, 试样最终产生液化破坏。而水泥改性黄土的动三轴液化试验结果随水泥掺量的不同表现出迥异的演化形态。当水泥掺量  $m=1$  时, 水泥改性黄土在动荷载作用下孔隙水压力与动残余应变演化规律与素土类似, 最终也达到液化破坏; 但由于水泥的掺入稳定了土体结构和土中的自由水, 尽管作用的动应力幅值远大于素土试验的动应力幅值, 试样的破坏振次仍远大于素土破坏的振次; 掺入水泥的固水效应使得孔隙水压力上升缓慢, 试样发生大变形破坏时孔隙水压力峰值仅达到 8.66 kPa。当水泥掺量  $m=5$  时, 水泥改性黄土在动荷载作用下孔隙水压力与动残余应变几乎不出现增长, 土体最终动残余变形仅为 0.095 mm, 动孔隙水压力最大值仅为 0.545 kPa, 土体未产生破坏。

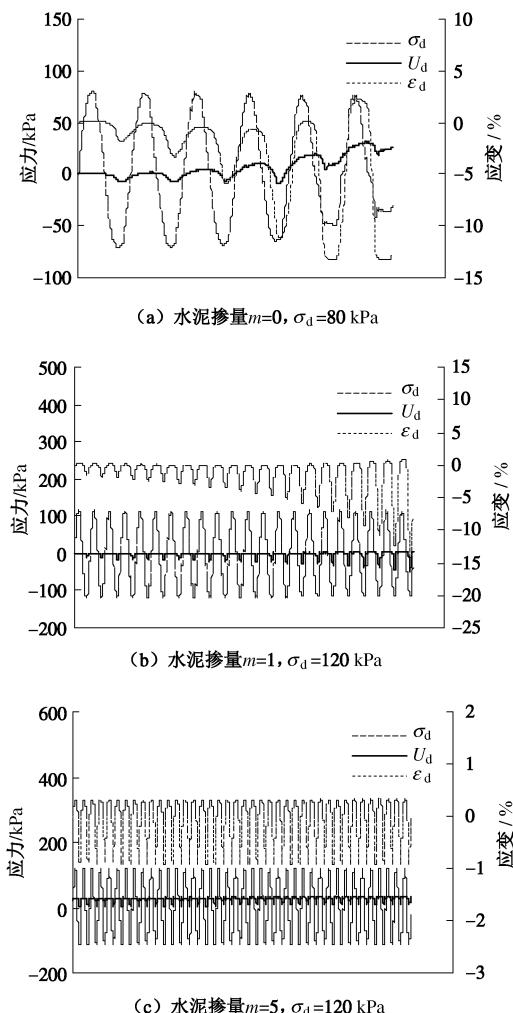


图4 动三轴液化试验结果

Fig. 4 Results of dynamic triaxial tests

### 3 饱和水泥改性黄土的液化特性

#### 3.1 饱和水泥改性黄土的动变形特征

土体的变形特性直接影响着建筑地基的稳定性,研究地基土的动力变形特性对于地基抗震设计具有十分重要的意义。图5为不同掺合比水泥改性黄土的动残余应变随振次的演化曲线。由图5可知,素土的动残余应变在几个周期内迅速增加,掺入水泥后,动残余应变的增长趋于缓慢,但当水泥掺合比 $m=1\%$ 时仍出现先缓慢后急剧的增长,在 $N_f=20$ 左右动残余应变超过10%。当水泥掺合比 $m>3\%$ 时,水泥改性黄土的动残余应变随着振次的增加均出现缓慢地增长, $m=3\%$ 时动残余变形最大值仅为0.59%, $m=5\%$ 时动残余变形最大值仅为0.10%, $m=10\%$ 时动残余变形最大值仅为0.31%,土体均处于动力较稳定状态。水泥掺合比 $m=5\%$ 时动残余变形较 $m=3\%$ 和 $m=10\%$ 时均小,表明5%是黄土地基抗水泥改性液化处理的最优水泥掺量。

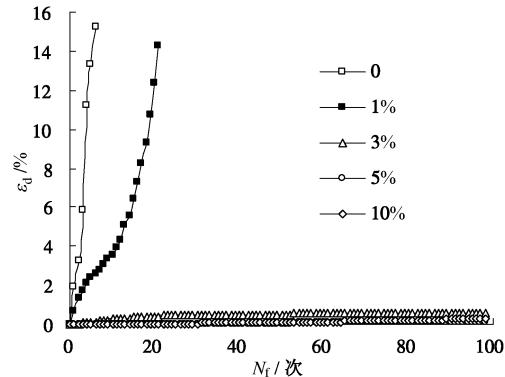


图5 不同掺合比水泥改性黄土的动变形特征

Fig. 5  $\varepsilon_d$ - $N_f$  curves of saturated cement-stabilized loess

#### 3.2 饱和水泥改性黄土的孔隙水压力特征

孔隙水压力演化特征是土体液化问题中不可忽略的特性。对于黄土,尽管其特殊的结构性和水敏性决定了动力作用下孔隙水压力增长与消散并存,孔隙水压力难以达到有效围压,然而孔隙水压力增长导致有效应力降低是导致土体变形和破坏的最直接因素。图6为不同水泥掺量的水泥改性黄土的孔隙水压力随振次的演化曲线。由图6可知,素土在动力作用下孔隙水压力出现急剧的增长,试样破坏前的最大孔隙水压力达30.97 kPa。当水泥掺量 $0 < m < 5\%$ 时,孔隙水压力的增长随着 $m$ 的增加逐渐趋于缓慢,试样破坏前的孔隙水压力逐渐减小;其中 $m=3\%$ 和 $m=5\%$ 时水泥改性黄土的孔隙水压力具有相同的演化形态,试样破坏时的最大孔隙水压力也较接近,而当 $m \geq 5\%$ 后,水泥改性黄土的孔隙水压力随着振次的增加呈近线性增长, $m=5\%$ 时孔隙水压力演化曲线的斜率较 $m=10\%$ 时小,证明了5%是水泥改性黄土地基抗液化处理的最佳配比。

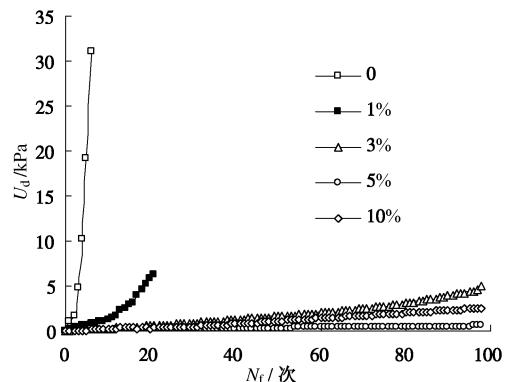


图6 不同掺合比水泥改性黄土的孔隙水压力特征

Fig. 6  $U_d$ - $N_f$  curves of saturated cement-stabilized loess

### 4 水泥改性黄土的抗液化机制

根据图5,6可知,水泥掺量 $m \leq 5\%$ 时,随着水泥掺量的增加,动力作用下饱和水泥改性黄土的动残余应变与孔隙水压力均减小,地基的抗液化能力具有

明显的提高。这主要与水泥对土体的密实效应、掺加水泥导致的细粒增加和离子交换对黄土结构的胶结效应、以及黏粒增加对土中游离水的吸附作用有关。

根据原状黄土与压实素土的孔隙比计算结果, 按照压实度为 0.93 压实后, 压实素土中孔隙体积为原状黄土孔隙体积的 64.26%; 而 SEM 细观结构试验得到的水泥掺量  $m=5\%$  时水泥改性黄土的孔隙总面积仅为原状黄土孔隙总面积的 58.65%。这说明水泥的掺入使微小的颗粒落入黄土颗粒间的孔隙中, 使土体更加趋于密实。而密度是影响黄土液化的主要因素之一, 随着密度的增加, 饱和黄土的抗液化强度显著提高<sup>[3, 5]</sup>。因此, 水泥改性黄土中水泥对土体的密实效应可有效提高改性黄土地基的抗液化强度。

其次, 图 2 中原状与水泥改性黄土的 SEM 试验结果显示, 原状黄土颗粒表面较为光滑, 轮廓清晰, 颗粒之间的接触方式多为点接触; 而水泥改性黄土颗粒轮廓较为模糊, 颗粒上及粒间存在大量的细小颗粒附着。这是由于水泥在遇水后产生水化反应, 形成水化产物水化硅酸钙 ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) 胶体和  $\text{CaOH}_2$  晶体。与此同时, 黄土中的易溶盐  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  在浸水及动荷载作用下逐渐溶解, 其中  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{CaOH}_2$  反应生成难溶于水的  $\text{CaSO}_4$ , 进而与黄土中的矿物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成稳定的针状晶体水化硫酸铝钙 ( $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), 水化硅酸钙胶体和水化硫酸铝钙晶体附着在黄土颗粒表面并填充于颗粒间的孔隙之中, 增强了土颗粒之间的连接强度, 从而使土体的黏聚力和稳定性增大。同时, 黄土中的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等阳离子可被水泥中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子等效置换, 有助于细小颗粒形成团絮状结构(图 7), 这些小颗粒形成的团絮状胶结可极大地提高土体的动力稳定性。而溶液中的  $\text{Cl}^-$  吸附于水泥中硅酸三钙和硅酸二钙的表面, 增加水泥颗粒的分散度, 可起到加速水泥水化反应的作用<sup>[17-20]</sup>。

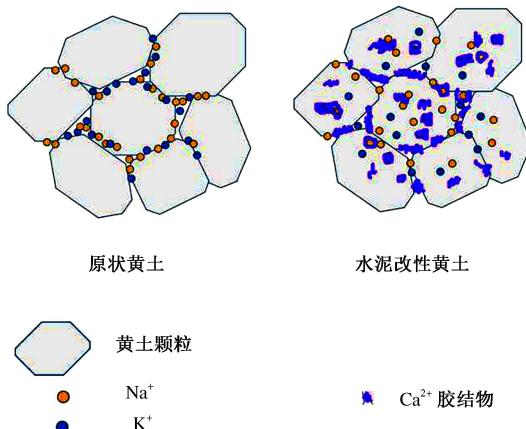


图 7 水泥改性黄土化学胶结作用示意图

Fig. 7 Chemical cementation of cement-stabilized loess

最后, 水泥的颗粒组成以黏粒为主, 水泥在黄土中的掺加可提高黄土中的黏粒含量, 使改性土颗粒的比表面积较原状土增大, 从而使得颗粒对土中游离水的吸附作用有效增强。再者, 水泥水化产生的水化硅酸钙及与黄土进一步反应产生的水化硫酸铝钙也使得土中部分游离水转变为结合水。土中游离水的减少对动力作用下孔隙水压力的增长具有明显的抑制作用, 从而使土体有效应力的减小趋缓, 最终达到地基抗液化的效能。

此外, 当水泥掺量  $m=10\%$  时, 水泥改性黄土的孔隙水压力较水泥掺量  $m=5\%$  时出现增大, 而动残余应变几乎相等。这一现象主要由黄土特殊的结构性和水泥改性黄土的物理力学特性有关。黄土中的孔隙可分为两种, 一种是未封闭孔隙, 饱和过程中水容易进入; 另一种是封闭孔隙, 饱和过程中难以进水, 而在振动作用下由于孔隙周边颗粒胶结的破坏进水, 从而使孔隙水压力出现消散<sup>[21]</sup>。而对于水泥改性黄土, 水泥水化及其与黄土反应产生的胶结物增强了土颗粒之间的连接强度, 有关水泥改性黄土静力特性的研究成果表明, 试样的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随着水泥掺量的增加而增大, 且水泥掺量对黄土黏聚力的贡献大于其对内摩擦角的贡献<sup>[14, 20]</sup>。可以证明,  $m=10\%$  的水泥改性黄土的黏聚力较  $m=5\%$  时会出现明显增大, 胶结作用使得封闭孔隙周围土颗粒连接强度明显增强, 振动作用下孔隙周边颗粒胶结难以破坏, 孔隙水压力难以消散, 从而使其出现一定程度的增长。另外, 研究表明水泥改性黄土的塑性指数  $I_p$  随着水泥掺量的增加呈减小趋势, 且其在  $m>5\%$  后显著减小<sup>[22]</sup>, 而塑性指数的减小会使土的抗液化强度显著降低, 从而使水泥改性黄土的抗液化稳定性减弱。

## 5 结论与讨论

(1) 水泥改性处理后黄土由于密实和水泥的掺入, 颗粒之间的架空孔隙较大程度的被破坏, 孔隙明显减少且以中、小孔隙为主, 颗粒上及颗粒间的絮状胶结物明显增多, 颗粒间以面接触为主, 形成了凝块状胶结结构。

(2) 水泥掺合比  $m>3\%$  时, 水泥改性黄土的动残余应变和孔隙水压力演化形态出现明显的变化, 随着振次的增加动残余应变和孔隙水压力均增长缓慢, 且在  $m=5\%$  时峰值最小, 表明 5% 是水泥改性黄土地基抗液化处理的最佳配比。

(3) 水泥改性黄土的抗液化机制主要包括水泥对土体的密实效应、细粒增加和离子交换对黄土结构的胶结效应和黏粒增加对土中游离水的吸附作用; 结构

强度的增加和游离水的固化共同提高了水泥改性黄土地基的稳定性。

(4)本文有关水泥改性黄土的抗液化特性与机制方面的认识是基于室内土力学试验得到的, 试验中水泥黄土的均匀性及试验过程和结果的有效可重复性得到了较好地保证。而在地震模拟振动台试验、离心机试验等物理模型试验中, 由于试样尺寸较大, 试件制备过程中水泥改性黄土的不均匀性可能会对试验结果的有效性和可重复性造成影响。实际工程中, 由于合理的施工工艺对地基改性处理的最终质量起关键作用, 为了使水泥改性黄土更好的应用于工程实践, 还需在室内试验工作的基础上, 对大尺寸试件制备的均匀性和合理的工程施工工艺等问题展开更为深入的研究工作。

## 参考文献:

- [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 Lan-min, SHI Yu-cheng, LIU Xu, et al. Loess dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 85–143. (in Chinese))
- [2] 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 Xiu-mei, et al. Soil liquefaction characteristics and disaster prediction of the valley cities in the Loess Plateau[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S1): 301–306. (in Chinese))
- [3] 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 Han-long, SHE Yue-xin, WANG Lan-min. Liquefaction experimental research of dynamic compacted loess foundation[C]// Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 218–223. (in Chinese))
- [4] 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 Kai-ming. Studies on the anti-liquefaction behavior of the loess ground improved by several method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))
- [5] 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 Lan-min, 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(S2): 844–847. (in Chinese))
- [6] 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 Kai-ming, ZHOU Jian, WANG Lan-min. Research on the anti-liquefaction behavior of loess subsoil improved by chemical grouting[J]. Journal of Seismological Research, 2003, 26(4): 396–399. (in Chinese))
- [7] 李满良, 杨朝阳. 水泥黄土的工程特性探讨[J]. 山西建筑, 2012, 38(30): 63–64. (LI Man-liang, YANG Zhao-yang. Research on the properties of the cement-loess[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(30): 63–64. (in Chinese))
- [8] 蒋关鲁, 房立凤, 张俊兵, 等. 高速水泥改良黄土路基填料填筑试验研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 1–7. (JIANG Guan-lu, FANG Li-feng, ZHANG Jun-bing, et al. Test study on cement improved loess as the filling material for subgrade construction of passenger dedicated line[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 1–7. (in Chinese))
- [9] 刘保健, 陈鹏郎, 达马. 水泥黄土的应力–应变本构方程[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(3): 27–30. (LIU Bao-jian, CHEN Peng-lang, DA Ma. The stress-strain constitutional equation of loess-cement[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(3): 27–30. (in Chinese))
- [10] 张军丽, 刘保健. 水泥黄土的力学特性试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(2): 6–9. (ZHANG Jun-li, LIU Bao-jian. The experiment research on the characteristics of cement loess[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(2): 6–9. (in Chinese))
- [11] 任新, 杨有海. 水泥搅拌饱和黄土强度特性试验研究[J]. 兰州工业学院学报, 2014, 21(3): 33–36. (REN Xin, YANG You-hai. Experimental study on strength of mixed cement with saturated loess[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2014, 21(3): 33–36. (in Chinese))
- [12] 王家鼎, 彭淑君, 马闫, 等. 高速列车振动荷载下水泥改良黄土地力学试验[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 35–41. (WANG Jia-ding, PENG Shu-jun, MA Yan, et al. Dynamic tests on the cement-improved loess under the vibratory load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 35–41. (in Chinese))
- [13] 王毅敏, 梁波, 马学宁, 等. 水泥改良黄土在高速铁路路基中的试验研究[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 28–31. (WANG Yi-min, LIANG Bo, MA Xue-ning, et al. Experimental study of cement-loess for high-speed railway embankment[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University (Natural sciences), 2005, 24(4): 28–31. (in Chinese))

- (in Chinese))
- [14] 刘红玫, 高 鹏. 不同配比水泥黄土强度的试验研究[J]. 西北地震学报, 2013, 35(增刊): 139 - 142. (LIU Hong-mei, GAO Peng. Test research on the strength of cement loess of different ratio[J]. Northwest Seismological Journal, 2013, 35(S0): 139 - 142. (in Chinese))
- [15] SL237—032—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—032—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [16] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(化学), 1987, 17(12): 1309 - 1316. (LEI Xiang-yi. Pore types of Chinese loess and its collapsibility[J]. Science in China, (SER.B), 1987, 17(12): 1309 - 1316. (in Chinese))
- [17] 王银梅, 张咸恭. 水泥对黄土湿陷灾害防治的机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(2): 50 - 53. (WANG Yin-mei, ZHANG Xian-gong. Analysis on controlling mechanism of loess collapse disaster of cement[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(2): 50 - 53. (in Chinese))
- [18] 王银梅. 水泥黄土增强措施初探[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(1): 95 - 98. (WANG Yin-mei. Preliminary study on measures increasing strength of loess-cement[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29(1): 95 - 98. (in Chinese))
- [19] 谷天峰, 孙忠弟, 骆凤涛, 等. 水泥—黄土注浆充填材料的试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 98 - 105. (GU Tian-feng, SUN Zhong-di, LUO Feng-tao, et al. Experimental research on loess grouting material for coal gob filling[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 98 - 105. (in Chinese))
- [20] 郭 星, 张齐齐, 刘博榕, 等. 水泥改良黄土试验研究[J]. 地下水, 2015, 37(3): 223 - 225. (GUO Xin, ZHANG Qi-qi, LIU Bo-rong, et al. Experimental investigation on cement-stabilized loess[J]. Ground Water, 2015, 37(3): 223 - 225. (in Chinese))
- [21] 王 平, 王 谦, 王兰民, 等. 黄土室内液化试验饱和方法的研究现状及前景展望[J]. 世界地震工程, 2011, 27(4): 86 - 90. (WANG Ping, WANG Qian, WANG Lan-min, et al. Status quo and prospect of research on saturated methods in loess liquefaction test[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(4): 86 - 90. (in Chinese))
- [22] 刘潇敏, 何小亮. 水泥改良黄土力学特性试验研究[J]. 地下水, 2011, 33(5): 147 - 149. (LIU Xiao-min, HE Xiao-liang. Experiment study on mechanical properties of cement loess[J]. Ground Water, 2011, 33(5): 147 - 149. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 南京嘉兆仪器设备有限公司  
 封 3 北京理正软件股份有限公司  
 封 4 南瑞集团水利水电技术分公司  
 后插 1 江苏三恒科技股份有限公司  
 后插 2 重庆地质仪器厂