

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201812084

基于细观结构的压实黄土抗剪特性试验研究*

马金莲^{1,2}, 钟秀梅^{1,2}, 王 谦^{1,2}, 刘钊钊^{1,2}, 柴少峰^{1,2}, 车高凤^{1,2}

(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. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 压实度是填方工程质量验收的主要控制项目之一, 较高压实度对改善黄土力学性能效果显著。为全面系统分析压实对黄土抗剪特性的影响规律, 更好地揭示较高压实度提高黄土抗剪能力的内在原因, 利用室内三轴剪切试验和电镜扫描试验, 基于4种不同压实度, 对甘肃省临夏市北塬地区压实黄土的抗剪特性和细观结构进行了研究。研究表明: 压实黄土应力—应变满足双曲线形式, 较高压实度对提高黄土体抗剪强度和剪切模量作用显著; 较高压实度通过改变土体颗粒之间的接触形式以改善黄土体抗剪特性, 主要表现为压实黄土颗粒之间的接触形式随着压实度的增加由棱边接触、支架镶嵌向面接触逐渐过渡; 较高压实度通过改变土体孔隙尺度特征和形态分布以改善土体抗剪特性, 主要表现为随着压实度的增加孔隙分布范围内微、小孔隙的含量增加, 中、大、特大孔隙含量减小, 孔隙形状也相对变得圆滑。

关键词: 压实度; 黄土; 抗剪特性; 细观结构; 孔隙特征

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0350-07

Experimental Study on Shear Characteristics of Compacted Loess based on Micro-structure

MA Jinlian^{1,2}, ZHONG Xiumei^{1,2}, WANG Qian^{1,2}, LIU Zhaozhao^{1,2},
CHAI Shaofeng^{1,2}, CHE Gaofeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Agency & Gansu, Lanzhou 730000, China;
2. Gansu Earthquake Agency, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The compaction degree is one of the main control items for quality acceptance of filling engineering, the research shows that higher compaction degree has a significant effect on improving the mechanical properties of loess. In order to comprehensively and systematically analyze the influence of compaction on the shear properties of loess and better reveal the internal reasons for the improvement of the shear strength of loess by high pressure compaction, the shear properties and micro-structures of compacted loess in the Beiyuan area of Linxia City, Gansu Province were studied by means of triaxial shear test and scanning electron microscopy test based on four different compaction degrees. It is found that the stress-strain relation of the compacted loess satisfies hyperbolic form, and higher compaction degree has a significant effect on improving the shear strength and shear modulus of loess; Higher compaction improves the shear resistance of loess by changing the contact form between soil

* 收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-04-11

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(2017IESLZ04)资助

作者简介: 马金莲(1988—), 女, 研究实习员, 硕士。主要从事黄土动力学与地震工程理论与试验研究方面的工作。

E-mail: 1278462667@qq.com

particles, which transforms gradually from edge contact and bracket to surface contact with the increase of compactness; Higher compaction improves the shear resistance by changing the characteristics and morphological distribution of soil pore size, showing a gradual increase of pore scale of micro and small pores with the increase of compaction, while the content of medium, large and extra large pores decreases, and the pore shape becomes relatively smooth.

Keywords: compaction degree; loess; shear characteristic; micro-structure; pore character

引言

随着西部黄土地区城镇化建设的加快和国家“一带一路”战略的实施,黄土地区工程建设项目日益增多,由于黄土地区独特复杂的梁塬峁地貌地形条件限制了城市的发展空间,为解决这一人地矛盾,延安、兰州等城市陆续开展了大规模的削山填沟、人工造地工程,另外黄土地区公路、铁路、机场路基等修建过程中同样面临着需要用填方来补足建设用地的情况,因此黄土高填方工程屡见不鲜^[1-2]。

压实度是填方工程中质量验收的主要控制项目之一,严格控制较高的压实度对填方工程的安全施工和正常运营至关重要。大量研究表明,压实对改善黄土的力学性质有非常显著的积极作用^[1-7]。马闫等^[1]、黄雪峰等^[2]、胡长明等^[3]基于大量室内试验对压实黄土的变形特性开展了深入研究,并结合黄土特殊的湿陷特性,分析了压实度对控制黄土变形和湿陷的积极作用;陈开圣^[4]结合道路建设工程实际问题,基于室内试验对压实黄土的强度、变形进行了系统研究,研究发现较高压实度可以很好地提高黄土的抗剪强度;袁俊平等^[5]、王来贵等^[6]、贾亮等^[7]也基于压实度,对影响压实黄土力学性质的各个因素开展了全面的研究工作,得到了很多具有实用价值的指导性规律。目前关于压实度对黄土力学性质的研究已经取得了较为明确的结论,但仍存在不足:(1)目前关于压实对黄土抗剪强度(参数)影响和变形的研究颇多,但很少将两者结合起来较为全面系统地分析压实对黄土抗剪特性的影响;(2)目前的研究并没有很好解决较高压实度可以改善黄土力学性质的内在原因。

针对上述两个不足,考虑土体力学性质是土体细观结构特性的宏观表现,而土体内部孔隙的特征及分布情况是土体细观结构变化的内因,也是决定土体物理力学性质的主要因素^[8-10]。本文通过室内剪切试验总结压实度对黄土抗剪特性(强度、变形)

的影响规律,同时结合电镜扫描技术,以土体孔隙特征为目标着力分析不同压实度下黄土细观结构特性(孔隙接触形式、孔隙尺度特征和孔隙形态分布特征),以此揭示较高压实度可以有效改善黄土力学性质的内在原因。

1 应力—应变关系分析

1.1 基本参数取值

本文选取甘肃临夏北塬地区的黄土为研究对象,通过室内常规试验测定的黄土基本物性参数取值见表1。

表1 基本物理参数取值

Table 1 Value of basic physical parameters

比重	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %	颗粒组成/%		
				黏粒	粉粒	砂粒
2.65	1.74	28.6	19.4	24.4	69.1	6.5

1.2 压实黄土应力—应变关系分析

为了总结压实度与黄土抗剪强度参数、剪切模量间的规律性,本文基于80%、85%、90%、95%等4种压实度,采用千斤顶静压的方法制备了含水率为9%条件下的黄土试样4组,利用南京土壤仪器厂生产的应变控制式三轴仪完成了4组试样在固结不排水(cu)条件下的三轴剪切试验。笔者对剪切试验数据分析发现,不同压实度下黄土的应力—应变关系基本上满足双曲线形式,根据Duncan—Chang模型^[11],土体应力—应变之间应满足:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon} \quad (1)$$

这里:

$$\begin{cases} \frac{1}{a} = E_0 \\ \frac{1}{b} = (\sigma_1 - \sigma_3)_u \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_0 为土体初始弹性模量, 即三轴试验应力—应变曲线原点处的切线模量; $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 为土体极限剪应力, 即三轴试验应力—应变曲线渐进线对应的剪应力; a, b 为拟合参数。

结合试验数据分析得到的 4 种不同压实度下黄土的应力—应变关系曲线如图 1 所示。可以看到不同围压条件下, 压实黄土体应力—应变关系符合式 (1) 形式, 即满足双曲线形式。

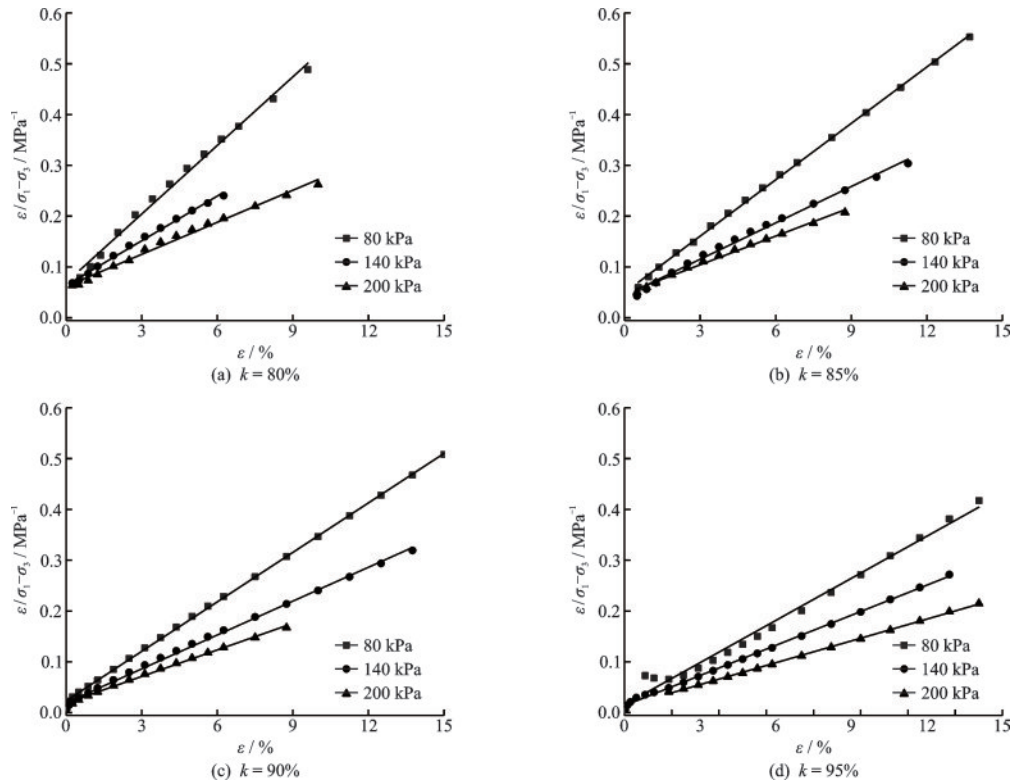


图1 压实黄土应力—应变曲线
Fig.1 Stress-strain curve of compacted loess

2 压实黄土抗剪特性

2.1 抗剪强度参数和极限剪应力

土体抗剪强度参数是进行边坡、路堤等工程设计、加固和稳定性分析等的主要力学参数, 反应了土体抵抗外力或者破坏的能力, 结合试验数据笔者得到了不同压实度条件下黄土的抗剪强度参数和不同围压条件下的极限剪应力取值, 如图 2 所示。可以看到, 随着压实度的增大, 强度参数 c 和 φ 均呈现出明显的增长趋势, 但 c 的增长幅值较 φ 要大, 说明强度参数 c 对压实度的敏感程度更高一些; 不同围压下黄土极限剪应力也是随着压实度的增大呈现出比较明显的增长趋势。可见, 较高的压实度可以有效提高黄土体抗剪强度能力。

2.2 压实黄土变形特性

土体的变形特性主要是通过模量来表征的, 表

示土体抵抗变形的能力大小, 目前用来表征土体变形特性的参数主要有: 压缩模量、初始弹性模量、割线模量、变形模量等。现阶段对各种模量取值方法、适用和应用范围的研究基本上已形成了成熟的定论^[12-13]。考虑本文主要研究压实黄土抗剪特性, 故这里将以三轴剪切试验得到的初始弹性模量和割线模量作为基础, 并结合弹性模量与剪切模量之间的数学关系, 研究分析压实度对(初始)剪切模量的影响规律。

结合上述式(1), 土体的割线模量可以表示为:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon} = \frac{a}{(a + b\varepsilon)^2} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4)$$

考虑土体初始剪切模量的取值偏大, 在实际的计算分析中作为参数计算的变形相对实际变形值将会偏小, 不利于工程安全。为了更好地满足客观实际需要以分析压实度对黄土剪切模量的影响, 笔

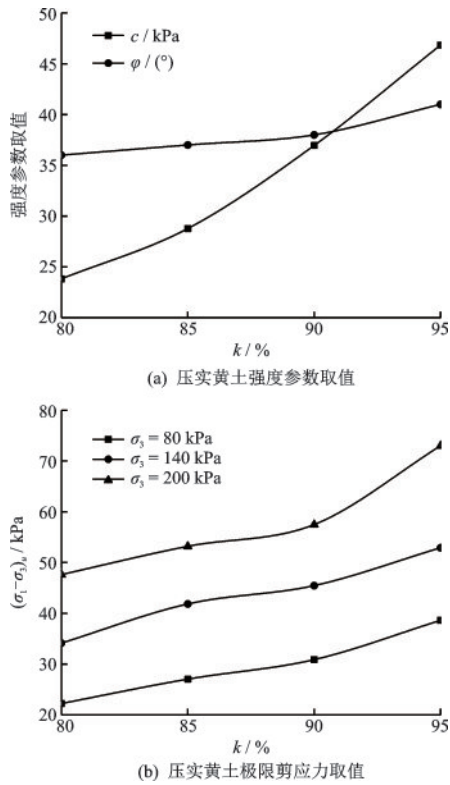


图2 压实黄土强度参数、极限剪应力取值

Fig.2 The strength parameters and ultimate stress of compacted loess

者取土体应变 ϵ 在5%~10%的剪切模量来展开分析。图3是结合式(2-3)和式(4)计算得到的不同压实度条件下黄土初始剪切模量 G_0 和一定应变下剪切模量 G 的取值。可以看到:黄土的初始剪切模量 G_0 和剪切模量 G 均呈现出增长趋势,但在80%~85%较低压实度下增幅相对较小;随着压实度增加到90%以上,黄土的初始剪切模量 G_0 、剪切模量 G 增幅显著提高。且从初始剪切模量 G_0 的变化可以发现:随着围压的增大,这种趋势越为明显。

3 压实黄土微观结构特性分析

上述分析表明:较大压实度可以有效改善黄土的抗剪能力。考虑到土体内部孔隙的特征及分布情况是土体微观结构变化的内因,也是决定土体物理力学性质的主要因素。因此,本文结合室内电镜扫描技术,对不同压实度下黄土颗粒间接触形式、微观孔隙尺度特征和孔隙形态变化特征进行分析,从微观上揭示较高压实度能够有效改善黄土力学性质的原因。

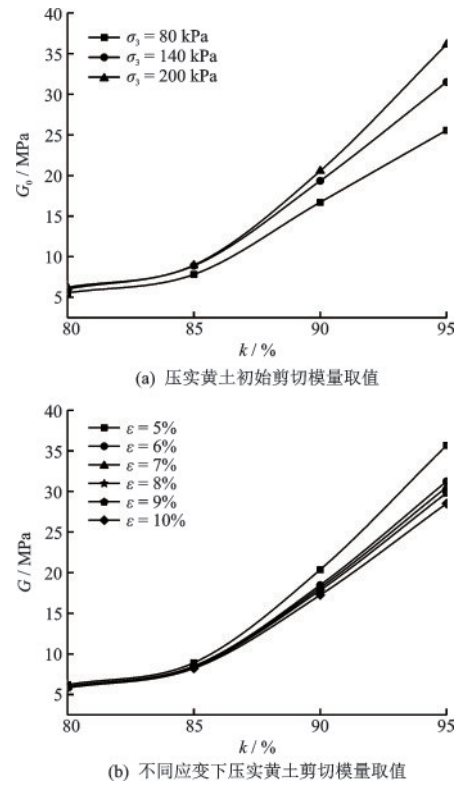


图3 压实黄土(初始)剪切模量取值

Fig.3 Values of (initial) shear modulus of compacted loess

3.1 压实黄土接触形式

本文结合试验要求制备了不同压实度下黄土风干试样,选取有代表性的区域在放大500倍的条件下观察了4种压实度下黄土的微观结构特性,得到的具有代表性的微观结构如图4所示。

由图4可以看到:80%压实度下,黄土的颗粒和孔隙均比较明显,颗粒表面和孔隙中有少量的胶结物,粗颗粒间接触形式主要以棱边接触和支架镶嵌

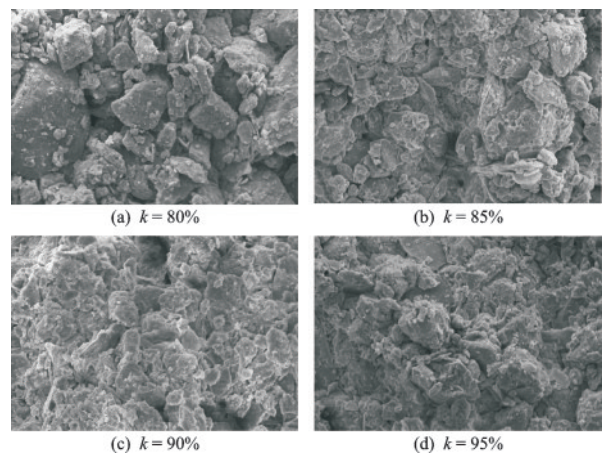


图4 压实黄土SEM图

Fig.4 SEM diagram of compacted loess

过渡结构为主, 粒间孔隙较大; 85% 压实度条件下, 黄土颗粒和孔隙相对比较明显, 颗粒表面和孔隙内部的胶结物明显增多, 粗颗粒之间的接触形式主要以面接触和支架镶嵌过渡结构为主; 90% 压实度条件下, 黄土颗粒和孔隙已不明显, 颗粒之间的孔隙明显减小, 黄土的结构变得比较紧密, 颗粒之间的接触形式主要以镶嵌胶结为主; 95% 条件下, 黄土 SEM 图呈现出絮状形式, 黄土结构之间变得更为紧密, 颗粒之间的接触形式也主要以镶嵌胶结为主, 几乎看不到架空孔隙。

从上述压实黄土颗粒间的接触形式变化可以发现: 较高的压实度可以增大黄土颗粒之间的接触面积, 减小孔隙体积的分布, 使黄土颗粒之间变得更为密实, 从而表现出较高的抗剪强度和抗变形能力。

3.2 压实黄土孔隙尺度特征

本文采用 Ch. Liu 等^[14]开发的图像处理软件 PCAS 来实现对压实黄土孔隙特征的定量分析。结合文献[8, 15], 像素面积小于 50 (换算为 $1.81 \mu\text{m}^2$) 为微孔, 50~200 (换算为 $7.25 \mu\text{m}^2$) 像素为小孔, 200~800 (换算为 $27.25 \mu\text{m}^2$) 像素为中孔, 800~3 200 (换算为 $115.94 \mu\text{m}^2$) 像素为大孔, 大于 3 200 像素为超大孔。

从图 5 不同压实度下黄土的孔隙尺度分布含量和分布范围中可以看到随着压实度的增加, 微小孔隙的数量逐渐增加, 中、大、特大孔隙的数量在逐渐减小, 尤其是 95% 压实度时, 微小孔隙的含量达到了 82.3%。压实黄土呈现出来的这些孔隙尺度特征说明了较大压实度有效减小了黄土颗粒之间的较大孔隙分布面积, 使得土体颗粒之间有效应力增加, 以此增强了土体颗粒之间的有效联接, 使得土体之间胶结能力提高, 从而在宏观上也表现出较高的抗剪强度和抗变形能力。

3.3 压实黄土孔隙形态的变化特征

分维反映了复杂形体占有空间的有效性, 它是复杂形体不规则性的量度。若孔隙的形态存在分形特征, 则图像中孔隙的等效面积 A 和周长 L 之间存在下面关系^[16]:

$$\lg L = \frac{D}{2} \times \lg A + C \quad (5)$$

式中, A 为任意一个多边形的等效面积; L 为与之对

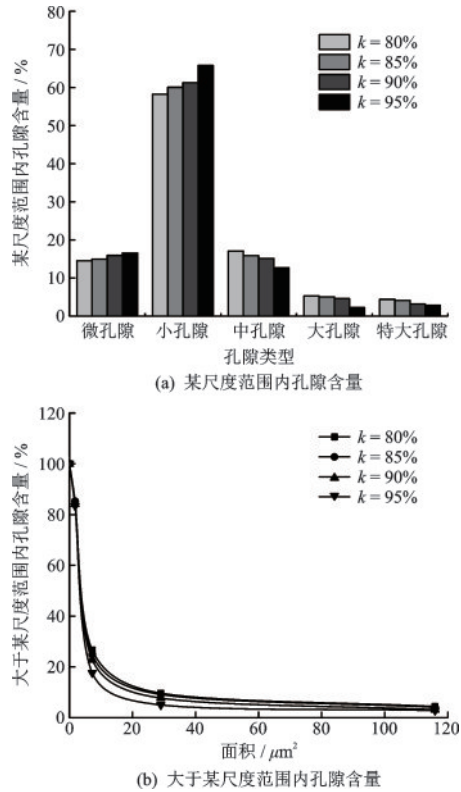


图 5 压实黄土孔隙尺度特征分布

Fig.5 Distribution map of pore size characteristics of compacted loess

应的多边形的等效周长; C 为常数; D 为该图像对应的孔隙形态分形维数。 D 的取值介于 1~2, D 越大, 孔隙结构越复杂, 孔隙的空间形貌特征偏离光滑表面的程度越远。

图 6 是通过 SEM 图像得到的黄土孔隙形态分形维数曲线变化图, 可以看到随着压实度的增大孔隙分形维数在逐渐减小, 即随着压实度的增大孔隙结构的复杂程度降低, 表明随着压实度的增大孔隙的形态逐渐变得圆滑, 孔隙形状变得相对均一。我们知道微小孔隙的形态相对比较圆滑, 这也从侧面

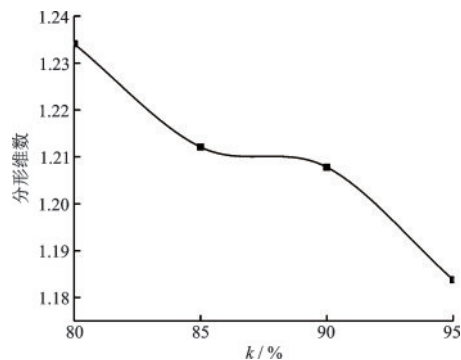


图 6 压实黄土分形维数变化曲线

Fig.6 Fractal dimension variation curve of compacted loess

说明了较高压实度使得孔隙面积较小,微小孔隙数量增加,土体变得密实。

4 结 论

为了更好揭示较高压实度可以有效改善黄土抗剪特性的原因,基于不同压实度下黄土抗剪强度和剪切模量的试验研究,总结压实度对黄土抗剪强度和弹性模量的影响规律,并结合电镜扫描技术对不同压实度黄土微观结构颗粒间的接触形式、孔隙尺度特征进行了较为全面系统的分析,得到的相关结论如下:

(1)压实黄土应力—应变满足双曲线形式,随着压实度增加黄土的抗剪切能力增强,表现在强度参数和极限剪应力均随着压实度的增大而增加,黄土的初始弹性剪切和不同应变值下的剪切模量也随着压实度的增大而增加。

(2)高压实度通过改变土体颗粒之间的接触形式以改善土体抗剪特性。主要表现在压实黄土颗粒之间的接触形式随着压实度的增加由棱边接触、支架镶嵌向面接触逐渐过渡,从而表现为颗粒之间的接触面积逐渐增大,使得土体颗粒之间变得更为密实。

(3)高压实度通过改变土体孔隙尺度特征和孔隙形态分布以改善土体抗剪特性。主要表现为孔隙尺度分布范围随着压实度的增加逐渐表现为微、小孔隙的含量增加,中、大、特大孔隙含量减小的趋势,且随着压实度增大孔隙形状变得更为圆滑,颗粒之间的有效联接增强,有效应力增大。

参考文献:

[1] 马闫,王家鼎,李彬,等. 压实黄土变形影响因素与计算模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 44-52.
Ma Y, Wang J D, Li B, et al. Influence factors on the compressibility of compacted loess and empirical constitutive models[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 44-52. (in Chinese)

[2] 黄雪峰,孔洋,李旭东,等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(增2): 37-44.
Huang X F, Kong Y, Li X D, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup2): 37-44.

(in Chinese)

[3] 胡长明,梅源,王雪艳. 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 108-114.
Hu Ch M, Mei Y, Wang X Y. Deformation and shearing strength characteristic of compacted malan loess in lüliang region [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 108-114. (in Chinese)

[4] 陈开圣. 公路工程压实黄土的强度与变形及其微观结构的研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
Chen K Sh. Study on strength, deformation and microstructure of compacted loess in highway engineering [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)

[5] 袁俊平,詹斌,陈胜超,等. 含水率和压实度对路基填土力学特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 98-102.
Yuan J P, Zhan B, Chen Sh Ch, et al. Effects of water content and compaction degree on mechanical characteristics of roadbed [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 98-102. (in Chinese)

[6] 王来贵,张鹏,李喜林. 含水率及压实度对排土场岩土抗剪强度的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 699-703.
Wang L G, Zhang P, Li X L. Water content and compactness influence on waste disposal site rock shearing strength [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34(6): 699-703. (in Chinese)

[7] 贾亮,朱彦鹏,朱鋆川. 兰州马兰、离石压实黄土抗剪强度影响因素探讨[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 37-44.
Jia L, Zhu Y P, Zhu J Ch. Influencing factors for shear strength of Malan and Lishi compacted loess in Lanzhou [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Sup2): 37-44. (in Chinese)

[8] 曹洋,周建,严佳佳. 考虑循环应力比和频率影响的动荷载下软土微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 735-743.
Cao Y, Zhou J, Yan J J. Study of microstructures of soft clay under dynamic loading considering effect of cyclic stress ratio and frequency [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 735-743. (in Chinese)

[9] 周建,邓以亮,曹洋. 杭州饱和软土固结过程微观结构试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 735-743.
Zhou J, Deng Y L, Cao Y. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process [J]. Journal of Central South Univer-

