

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.19

黏粒含量对黄土物理力学性质的影响

王力¹,李喜安^{1,2},赵宁¹,洪勃¹

(1. 长安大学地质与测绘工程学院,陕西西安 710054;

2. 国土资源部岩土工程开放研究实验室,陕西西安 710054)

摘要:黏粒是黄土主要的胶结材料,其含量、赋存位置与赋存状态的不同,直接影响黄土骨架颗粒排列、孔隙特征和颗粒接触关系等微观结构,从而导致其物理力学性质的不同。本文通过自制负压湿筛装置筛取不同黏粒含量的黄土试样,并利用激光粒度仪对土样的黏粒含量进行跟踪测定,然后进行一系列物理力学实验。试验结果表明:黄土中黏粒含量与液塑限及塑性指数呈正比关系;随着黏粒含量的增长,黏聚力均呈增大趋势,而内摩擦角呈先下降后上升的趋势;黏粒含量对黄土试样的压缩变形不具有单调关系,存在某一临界含量,当黏粒含量大于临界含量时,压缩量开始上升;动剪切模量随着黏粒含量的增加呈先减小后逐渐增大的变化趋势,在临界含量时达到最小值;阻尼比随着黏粒含量的增加而增大,在临界含量后呈相反变化趋势;随黏粒含量的增多,黄土的渗透性逐渐降低,渗透系数与黏粒含量呈指数函数负相关关系。

关键词:黏粒含量;液塑限;黏聚力;内摩擦角;压缩变形;渗透系数;动剪切模量

中图分类号: P580.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0133-11

Effect of clay content on physical and mechanical properties of loess soils

WANG Li¹, LI Xi'an^{1,2}, ZHAO Ning¹, HONG Bo¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Clay particle is the main cementation material in the loess. Its content, the occurrence position and the occurrence state are different, which directly affect the microstructure of the loess skeleton and the pore structure and so on, which leads to the different physical and mechanical properties. The clay content of loess samples was determined based on the self-made wet sieve device under negative pressure, and then a series of physical and mechanical experiments were carried out. Laser particle analyzer was carried out to track measurement clay content of the soil. The results show that the clay content in the loss is proportional to the plastic limit and plasticity index. With the increase of clay content and the cohesive force increases with the increase of the cohesion, and the internal friction angle decreases first and then increases. The clay content has no monotonous relation to the compressive deformation of the loess specimen, and there is a definite critical content. When the clay content is greater than the critical content of the shear modulus increases with the increase in the clay content, and then decreases with the increase of the clay content. And the permeability of loess reduced gradually with the clay content increasing. In addition, dates demonstrate the exponential function negative correlation between the permeability coefficient and the content of clay.

Keywords: clay particle content; liquid-plastic limit; cohesion; internal friction angle; compression deformation; permeability coefficient; dynamic shear modulus

收稿日期: 2017-09-10; 修订日期: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41572264)

第一作者: 王力(1988-),男,地质工程专业,博士研究生,主要研究方向黄土工程地质及地质灾害防治。Email: cadxwangli@163.com

通讯作者: 李喜安(1968-),男,地质工程专业,教授,博士生导师,主要从事黄土地质灾害方面的教学与科研工作。Email: dclixa@chd.edu.cn

0 引言

黄土是第四纪以来干旱、半干旱气候条件下形成的特殊陆相沉积物,它主要经受过,并正在经受着常温常压下的表生成岩作用,成岩程度很差,它的胶结材料是碎屑岩中作为杂基的粒径小于 0.005 mm 的黏土物质,其中包括黏土矿物如伊利石、蒙脱石、高岭石、蛭石等,还包括黏土粒级的微细碎屑,如石英、长石、云母、碳酸盐等。这些微细物质将骨架颗粒相互连结起来构成整个土体,并使之具有一定的强度。由于黏粒物质的赋存状态不同,胶结程度不同,从而形成了不同性质的黄土。深入进行这方面的研究,不仅对恢复或重建黄土形成时的生物气候环境有着重要意义,而且对鉴别黄土的风化成土程度及解决黄土的工程地质及水文地质问题如湿陷性、渗透性有着重要的实际意义^[1]。

黏土颗粒是黄土中粒径小于 0.005 mm 的颗粒,是黄土粒组的主要组成部分,也是影响黄土活性的最活跃部分^[2]。具有高活动性,且有巨大的比表面积,能聚集和吸附在较大颗粒表面上,有助于集粒的形成或在碎屑颗粒表面上形成一定厚度的黏土薄膜(被碳酸钙胶结成集粒或胶结在碎屑颗粒的周围),作为一个整体成为骨架。同时黏土颗粒也是黄土的主要胶结材料,其含量不同,赋存状态不同,胶结程度不同,对黄土的物理力学性质影响不同。

我国黄土的粒度在区域分布有一定的变化规律,从西北向东南黄土颗粒组成由粗变细,砂粒含量逐渐减少,黏粒含量逐渐增多^[3]。随着黏粒含量的增多,黄土从砂黄土过渡至黏黄土,其胶结作用及物理力学性质都有着明显的差异。各国学者对黏粒组分的研究从未间断。Constantinescu 等^[4]研究了冰川沉积物中黏粒含量与液塑限、液性指数、黏聚力和内摩擦角之间的关系;Jong E D 等^[5]研究了南萨斯喀彻温省土壤中黏粒含量与液塑限的关系;朱慧鑫等^[6]研究了崩岗剖面土壤中黏粒含量与液塑限的关系;帅常娥等^[7]探讨了不同土颗粒级配下滑带土黏粒含量对黏聚力和内摩擦角等强度参数的影响;张晓丽等^[8]对不同黏粒含量的原状膨胀土进行快剪试验,研究了黏粒含量对抗剪强度的影响;Dafalla M. A. ^[9]通过对黏土与砂土混合物进行直剪试验发现混合物的凝聚力随着黏土含量的增加而不断增加;Jiaozhen^[10]研究了蒋家沟土壤中黏粒含量与黏聚力和内摩擦角等强度参数之间的关系;王勇等^[11]通过对不同细粒含量的砂土进行动三轴试验,分析细粒含量对动

模量、阻尼比的影响,得出砂土动力特性主要由细粒影响,并从微观结构出发讨论了其内在机理。

然而,由于成土作用、风化过程等多方面的差异,天然黄土级配的差异性较大,通过现场取样难以获得较为理想的在其他粒组含量相同条件下的不同黏粒含量序列,因此关于在其他粒组含量基本相同的条件下黏粒含量对黄土物理力学性质影响的相关研究工作尚少,导致黏粒含量对黄土物理力学性质的影响及其微观机理尚难以把握。基于此,本文通过自制负压湿筛装置筛取了在其他粒组基本不变条件下的不同黏粒含量的黄土试样,分析了其他粒组不变情况下黏粒含量对黄土物理力学性质的影响规律,其相关认识为黄土及其物理力学性质的相关理论与工程实践提供了重要的基础依据。

1 试样制备

本次试验所用黄土为晚更新世 Q_3 黄土,原始土样取自延安新区 I 期工程挖山填沟挖方工程新鲜剖面,自地表以下 4 m 深度处人工切取土样,土样取出后标定其上下表面并用保鲜膜包裹。为了制备不同黏粒含量的黄土试样,需对风干后的黄土土样进行分选,同时为了更好的研究黏粒对黄土物理力学性质的影响,本次试验所用土样首先根据《土工试验规程》SL237-1999 过 2 mm 的圆孔标准筛,再通过自制负压湿筛装置筛取不同黏粒含量的黄土土样,以实现黄土试样中黏粒含量的人为可控,并利用激光粒度仪对土样的黏粒含量进行跟踪测定。由于延安地区原始黄土土样的黏粒含量均在 20% ~ 25%,故本次试验以 24% 黏粒含量为上限建立序列,通过自制负压湿筛装置分别获得黏粒含量为 12%、16%、20%、24% 的黄土土样,经过激光粒度仪测定,颗粒分布曲线(图 1)。

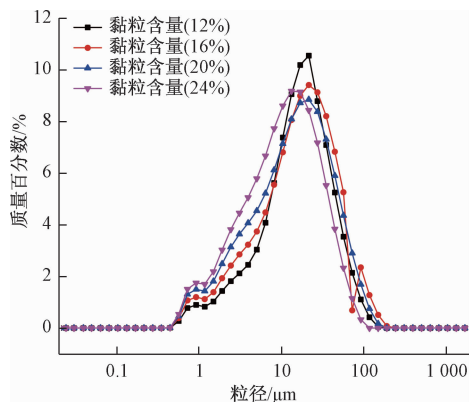


图 1 颗粒分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of test loess

将筛选后的其他粒组不变而黏粒含量不同的黄土样加水调和静置,分别配制成不同含水率的土样,并按照《土工试验规程》(SL237-1999)将土样制成各试验所需的试样。

2 实验结果与分析

2.1 粒度组成的影响

黄土的粒度组成和分布既能够反映其沉积环境,又在很大程度上决定了黄土的物理力学及水理性质。在黄土研究中,黄土的粒度大小有非常重要的意义。颗粒组成不仅是松散堆积体分类、命名的基础,也是查明这些沉积物的来源、搬运介质、沉积环境及其变化的主要依据^[12]。在工程地质性质方面,随着土颗粒组成的变化,土的结构也发生相应的改变(图 2),从而影响了土的物理力学性质(孔隙比、干密度、变形和强度等)和水理性质(湿陷性、渗透性和持水性等)^[13],因此,黄土的粒度组成特征是评价其工程地质性质和水文地质性质的一个重要指标^[14]。

延安 Q₃ 马兰黄土主要由砂土、粉土和黏土三部分

组成。黄土粒度组以 5~50 μm 的粉土颗粒为主,本文根据《土工试验规程》SL237-1999 将黄土的组成界限定为:黏土<5 μm,粉土 5~50 μm,砂土>50 μm。因此,为了探讨黄土粒度组成的变化,选择了粒度参数中 D₁₀、D₃₀、D₅₀、D₇₀、D₉₀ 的平均粒径和<5 μm、<50 μm、>50 μm 粒度的百分含量等粒径数据(表 1)。

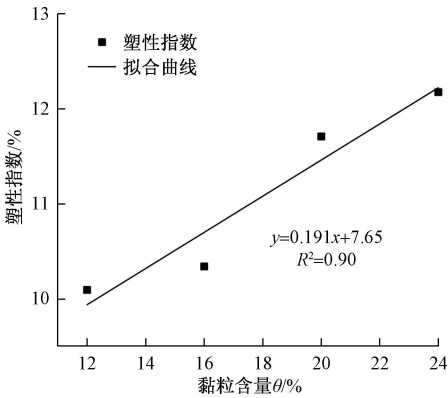


图 2 塑性指数与黏粒含量关系
Fig. 2 Relationship between the loess's plastic index and the clay content

表 1 不同黏粒含量的黄土粒径变化对比

黏粒含量/%	平均粒径/μm					含量/%		
	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₇₀	D ₉₀	<5 μm	<50 μm	>50 μm
12	4.24	12.43	20.78	33.42	62.25	11.65	87.49	12.51
16	3.20	10.54	19.56	32.09	64.42	15.60	89.83	10.17
20	2.61	8.21	16.24	29.28	55.74	19.86	90.13	9.87
24	2.28	6.37	12.12	20.70	39.39	24.07	96.19	3.81

表 1 所示为不同黏粒含量的黄土粒径变化对比。从表 1 中可以看出,随着黏粒含量的增长,中值粒径 D₅₀ 逐渐减小,>50 μm 的颗粒含量呈减小趋势,<50 μm 的细颗粒含量呈递增趋势,其它平均粒径也相对减小,说明随着黏粒含量的增加,土的颗粒变细。

2.2 黏粒含量和液塑限指标的关系

黏粒含量是影响黄土液塑限的一个重要因素。液塑限与黏粒含量呈正相关的线性关系,且液限与黏粒含量的相关程度明显高于塑限(图 3)。这与王永炎等^[1]、王志良等^[15]、Jong E D 等^[16]、Constantinescu J 等^[4]的结论基本一致。其主要是由于黏粒作为黄土颗粒中最细的部分,较其它粒径颗粒具有巨大的比表面积和表面电荷,具有极强的吸附水分子的能力,能形成较厚的吸附水膜,且黏粒间的孔隙细微,黏粒吸附的水膜就有可能填充这些细微的孔隙,而吸附水膜也可

能在毛管力作用下保持一定量的水分,进而影响黄土的液限。

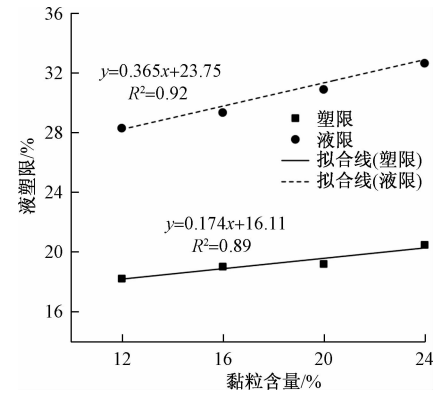


图 3 液塑限与黏粒含量关系
Fig. 3 Relationship between the loess's liquid plastic limit and the clay content

塑性指数说明了土的可塑程度,是指液限与塑限

的差值含水量,代表了土体从半固态到流体状态可以吸收水分的范围与土的粒径级配及其黏粒含量有着至关重要的联系^[16-17]。塑性指数与黏粒含量有显著的线性关系。

2.3 黏粒含量对黄土直剪强度影响

黏聚力 c 与内摩擦角 φ 作为抗剪强度的两个重要指标,是研究黏粒含量对黄土抗剪强度的关键依据。黏聚力一般受黏粒间胶结作用及分子化学键等因素影响,与黏粒含量、矿物成分、含水率及干密度等密切相关;内摩擦角主要由颗粒间摩擦与镶嵌作用产生,与级配因素、颗粒间接触面积联系紧密^[18]。因此探讨黏粒含量对黄土直剪强度的影响,其成果对研究抗剪强度参数的变化规律有着极其重要的理论意义。

在不同含水率情况下,随着黏粒含量的增长,黏聚力均呈现出上升的变化趋势。当黏粒含量小于 20% 时,整体变化趋势较缓,这是由于在此阶段黏粒含量整体较小,其大部分赋存于骨架颗粒间孔隙及颗粒间接触点,黏聚力的产生主要是黏粒与骨架颗粒共同作用的结果。当黏粒含量大于 20% 时,整体变化趋势变陡,这是表明在此阶段随着黏粒含量的增长,骨架颗粒基本被黏粒包裹,在剪切破坏过程影响很小,黏聚力主要由黏粒间的胶结作用引起,黏粒越多,胶结作用越大,黏聚力增长迅速(图 4)。

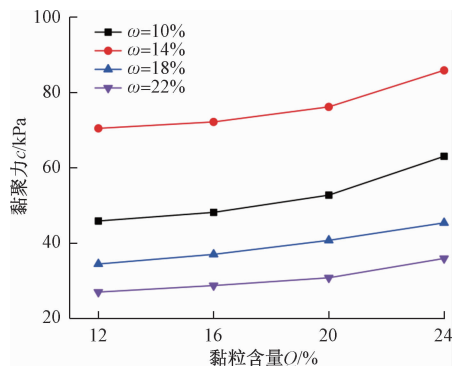


图 4 不同含水率条件下黏聚力与黏粒含量的变化关系

Fig. 4 Relationship between changes of cohesion and clay content under different water content

黏粒含量对黄土试样黏聚力的影响可以从黏粒含量赋存状态的变化角度分析,随着黏粒含量的增加,赋存在骨架颗粒周围的黏粒及团粒会逐渐聚集,直至形成骨架颗粒的胞衣。在此变化过程中,原本游离在大颗粒间孔隙呈零散分布的微细颗粒在分子间引力的影响下会逐渐“抱团”,并开始向大颗粒间接触点聚集,随着黏粒含量的进一步增加,集粒形成的“粒链”将大颗粒分开,黏聚力在胶结作用的影响

下迅速增加,试样的宏观力学性状开始由黏粒起主要作用,同时集粒完全将大颗粒包裹,成为试样的骨架颗粒。

在不同含水率条件下,黏粒含量在小于 20% 时,随着黏粒含量的增长内摩擦角均呈现递减的变化趋势。这是由于在此阶段摩擦作用主要由骨架大颗粒间相互作用引起,随着黏粒含量的增加,部分黏粒开始向骨架颗粒间接触点聚集,致使大颗粒之间相对稳定的骨架结构产生“润滑”效果,镶嵌作用逐渐减小,摩擦力随之下降。随着黏粒含量的持续增加,黏粒逐渐将骨架颗粒完全隔开,摩擦作用开始由黏粒间相互作用引起,故黏粒含量在大于 20% 时,内摩擦角随着黏粒含量的增长开始呈现增大趋势(图 5)。

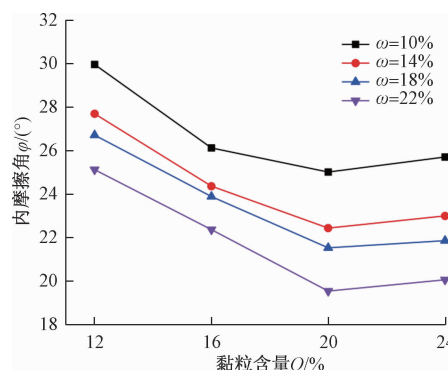


图 5 不同含水率条件下内摩擦角与黏粒含量变化关系

Fig. 5 Relationship between changes of friction angle and clay content under different water content

黏粒含量对黄土试样内摩擦角的影响可以从黏粒与骨架颗粒赋存状态的微观结构特征来解释。骨架颗粒与胶结物等大小不一的粒团通过多种连接方式聚集而成,其不同形式的连接、接触方式导致了不同的宏观力学形态。在黏粒含量较少时,大部分游离的黏粒存在于骨架颗粒所形成的孔隙内,极少以粒团形式吸附于骨架颗粒表面,黄土试样以相互接触的粗颗粒为主骨架阶段,颗粒间摩擦作用在此过程中主要由粒径较大的粗颗粒引起,颗粒间的摩擦作用较大。随着黏粒含量的增加,黏粒开始聚集并向骨架颗粒周围靠近,此时黏粒部分存在于骨架颗粒孔隙中,部分存在于骨架颗粒间接触点,并逐渐隔开骨架颗粒,参与骨架形成,此时土体架构并不稳定,黏粒对骨架颗粒的润滑作用明显,颗粒间摩擦作用进一步下降;随着黏粒含量的进一步增加,黏粒已完全隔开骨架颗粒,骨架颗粒间摩擦作用将至最低点,颗粒间相互作用开始由细颗粒主导,但由于以聚

集状态的黏粒较少,胶结作用尚未达到形成试样主骨架的强度。随着黏粒含量的继续增加,黏粒间胶结作用加强,形成“链状”结构的黏粒集料开始成为新的骨架;最后,以相互接触、胶结作用较强的黏粒为试样骨架阶段,颗粒间摩擦作用在此过程中主要由粒径较小的黏粒引起,此时粗颗粒被完全隔开,近似为“悬浮”状态,几乎无粗颗粒间摩擦作用,试样宏观力学性状由黏粒承担,随着黏粒含量逐渐填充试样孔隙,颗粒间摩擦相互呈上升趋势,但由于黏粒颗粒间摩擦作用相比粉粒颗粒较小,故上升趋势较缓。

2.4 黏粒含量对黄土固结特性影响

黄土的固结过程实质上是颗粒结构的破坏与重新排列过程,黏粒含量的增加会使黄土内粗颗粒间的摩擦作用与细颗粒间的胶结作用发生改变,直接影响着固结压缩的最终状态,因此有必要通过控制黏粒含量,对不同黄土试样进行室内固结试验,研究黏粒对黄土

固结压缩过程的影响机制,其研究结果对认识固结过程中黄土的结构性变化有着重要的理论意义。

利用单轴侧限压缩试验测定不同含水率条件下不同黏粒含量黄土试样随压力的变形特征(图 6)。从图 6 中可以看出,在同一含水率下,试样的压缩变形量都随压力的增大而增大,黏粒含量不同,试样的变化曲线不同。是由于黏粒主要分散在黄土骨架颗粒所形成的孔隙间,起着胶结和填充作用,当土颗粒在压力作用下被迫产生相对错动,对于黏粒含量较少的土体,错动后的土颗粒与颗粒之间黏粒变少,大的团聚颗粒或集粒在竖向应力作用下有可能会发生破裂重组形成更小的颗粒;而对于黏粒含量较多的土体,错动后的土颗粒之间黏粒含量变动较小,在黏粒缓冲作用下其不易破裂,土体会在较高的势能达到稳定状态。同时,土的变形特性与其颗粒的胶结形态以及排列方式都有密切的联系^[19-21]。

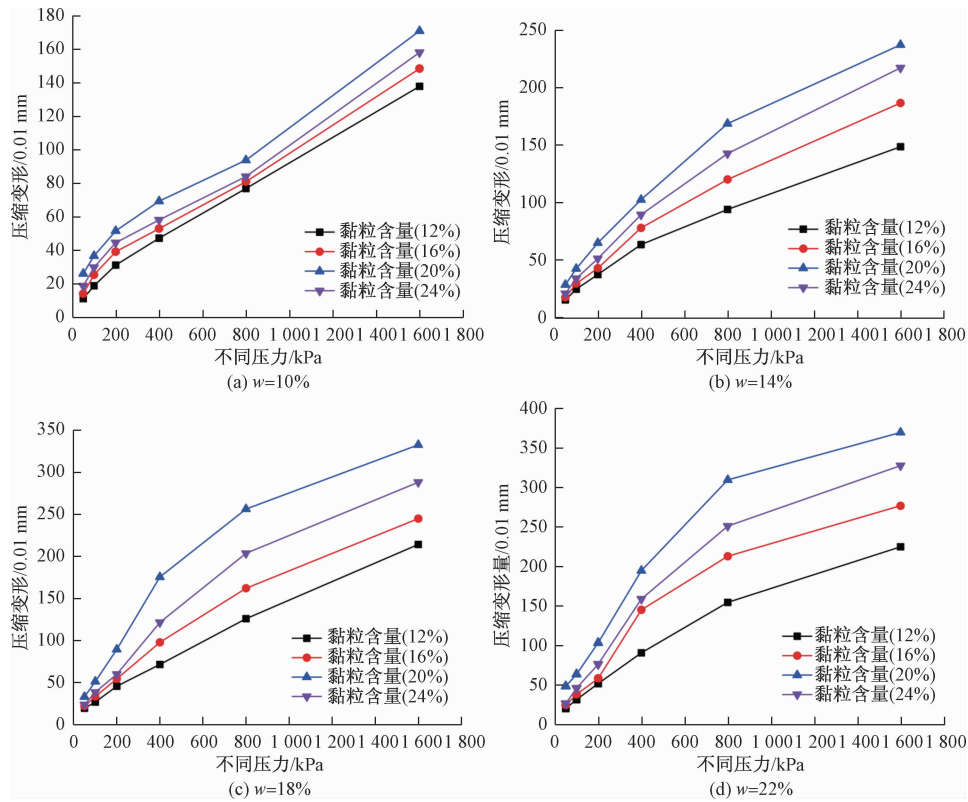


图 6 不同含水率条件下不同黏粒含量压缩变形曲线

Fig. 6 Compression deformation curve of different clay content under the different moisture content

图 7 所示为不同含水率不同压力条件下压缩变形量与黏粒含量的变化曲线。由图可以看出,在黏粒含量小于 20% 时,随着黏粒含量的增加,压缩变形量逐渐增大,黏粒含量大于 20% 后,压缩变形量有下降趋势,这说明黏粒含量的多寡是黄土压缩变形量

的主要影响因素,其作用机理是复杂的。由于重塑试样的结构性和胶结作用是在击实过程中短时间产生的,在承担固结应力后的稳定性并不理想,在压缩过程中随着结构性的衰减,胶结强度开始破坏,颗粒发生相对位移并开始重新排列。在此过程中由于黏

粒含量的增加,其影响逐渐由对粉粒颗粒坍塌、重排过程中的润滑作用过渡到聚集的胶结“力链”对外部荷载起承担作用。结合上述分析可以得到,试样内

部颗粒间对固结应力的抵抗作用随黏粒含量的增加呈先减小后增大的变化趋势,并在黏粒含量为 20% 时最小。

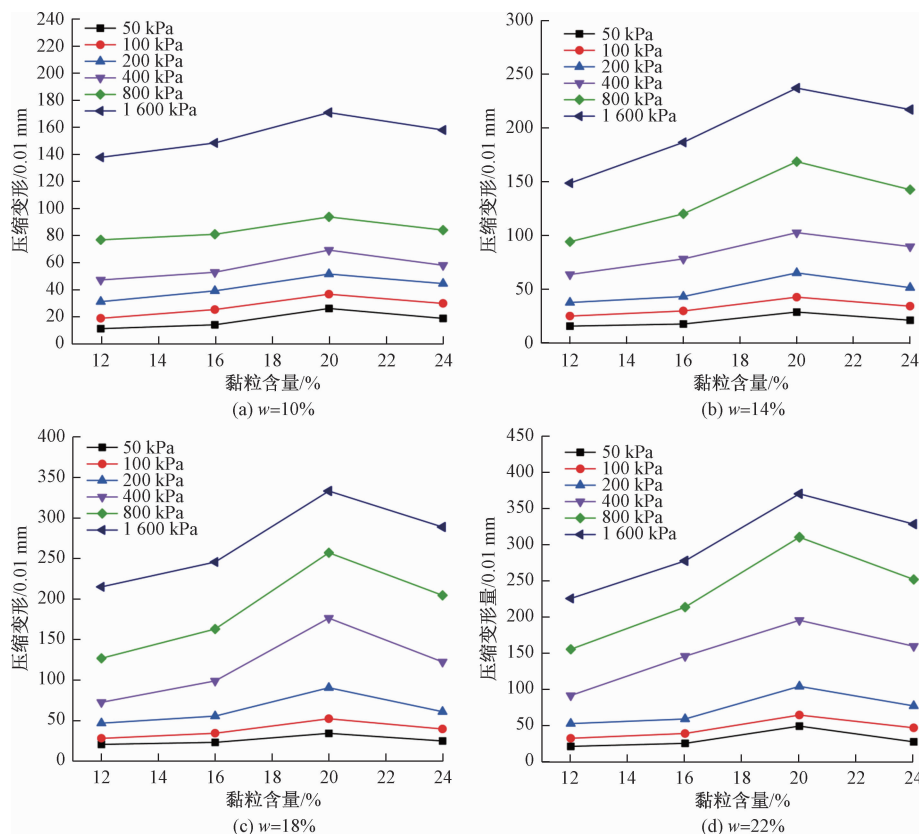


图 7 不同含水率不同压力条件下压缩变形量与黏粒含量的变化曲线

Fig. 7 The curve of compression deformation with different clay content under different moisture content and pressure conditions

2.5 黏粒组分对黄土动力特性的影响

土的动剪切模量和阻尼比是描述土动力特性的两个基本参数,也是土层地震反应分析和场地地震安全性评价中的必备指标^[23]。本文通过进行室内固结不排水动三轴试验,获得动剪切模量与阻尼比两个动力特性参数,探讨其在不同黏粒含量下的变化特征。

2.5.1 动剪切模量

图 8 所示为不同黏粒含量试样在不同围压条件下的动剪切模量与动剪应变关系曲线。由图可以看出,随着动剪应变的增加,不同黏粒含量的黄土试样的动剪切模量均逐渐降低,出现刚度软化现象,这与王勇等^[23]的结论一致。在相同动剪应变条件下,黏粒含量对动剪切模量的影响表现为非单调变化,随着黏粒含量的增大,该黄土模型的动剪切模量逐渐减小,并在黏粒含量为 20% 时达到最小

值,在此之后随着黏粒含量的增大,动剪切模量呈现增大趋势。

2.5.2 阻尼比

图 9 所示为不同黏粒含量黄土试样在不同围压条件下的阻尼比与动剪应变关系曲线。由图可以看出,随着动剪应变的增大,不同黏粒含量的黄土试样的阻尼比均逐渐增加。在小应变时,阻尼比变化幅度较小,动剪应变较大时,阻尼比增长速度明显加快,直至最后趋于稳定。在相同剪切应变条件下,黏粒含量对阻尼比的影响也表现为非单调变化,随着黏粒含量的增大,该模型黄土的阻尼比呈现先增大后减小的变化趋势,当黏粒含量达到 20% 左右时出现最大值,并且这种趋势在高剪应变水平时表现更加明显。该结果表明在黏粒含量逐渐增大的情况下,该黄土试样对动荷载响应的滞后性呈先增大后逐渐降低的变化特征。

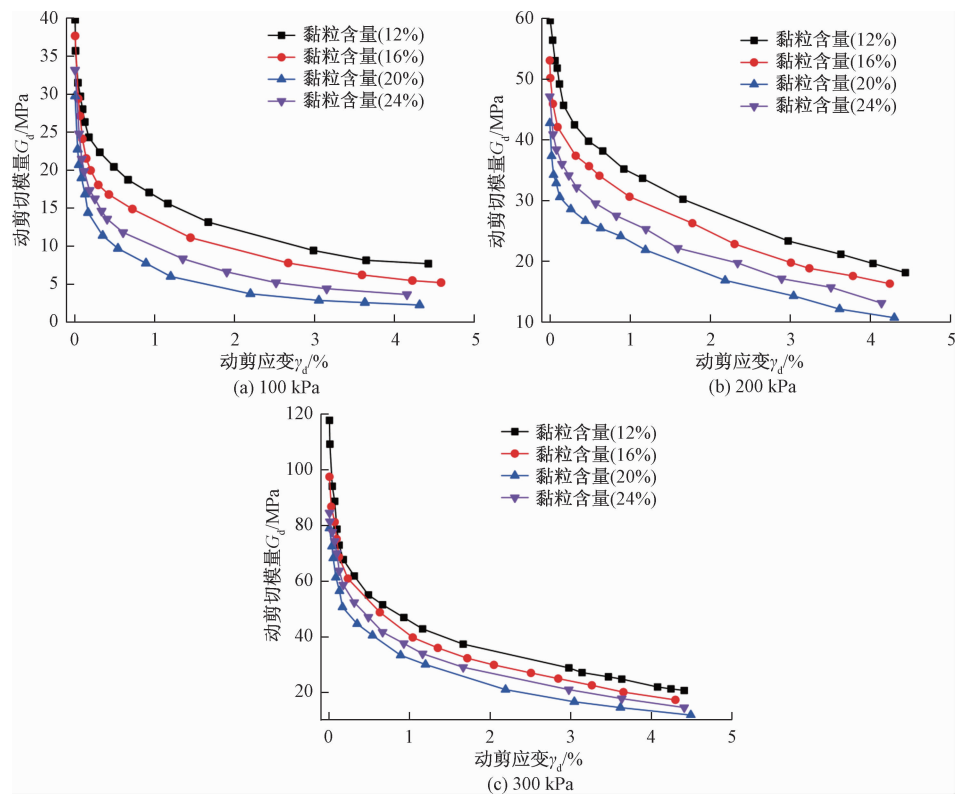


图 8 不同黏粒含量条件下 G_d - γ_d 关系曲线

Fig. 8 Curve G_d - γ_d relationship under the conditions of different clay content

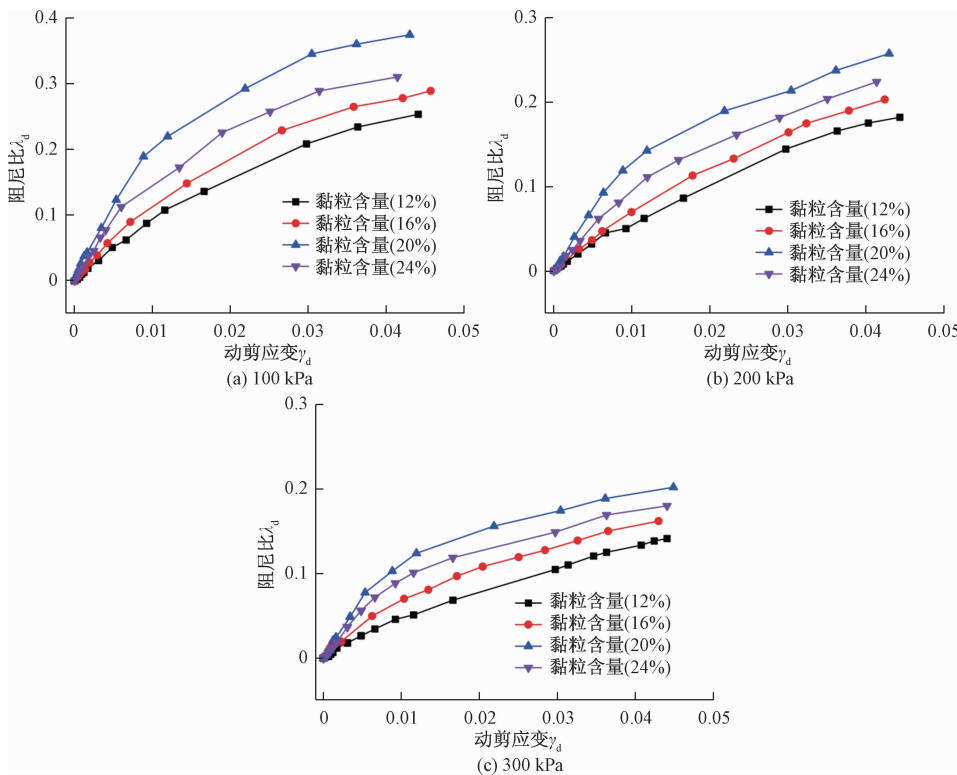


图 9 不同黏粒含量条件下 λ_d - γ_d 关系曲线

Fig. 9 Curve λ_d - γ_d relationship under the conditions of different clay content

2.6 黏粒含量对黄土渗透系数影响

作为黄土重要组成部分的黏粒,巨大的比表面积使其具有很大的吸附能力进而影响土中的水流速度,同时,细小的黏粒对较大孔隙的镶嵌填充也对土中的水流通道的阻挡作用。因此,黏粒含量对土的渗透能力必然有较大影响。本文采用静压法将不同黏粒含量的扰动黄土制备成相同天然干密度水平下不同含水率的试样进行饱和渗透试验,分析其他粒组不变情况下黏粒含量对黄土渗透系数的影响规律。

图 10 所示为黄土渗透系数与黏粒含量之间的关系曲线。从图中可以看出,黏粒含量对黄土渗透性影响显著,在同一含水率条件下,随着黏粒含量的增多,其渗透系数减小。分析其原因,首先,随着黏粒含量的增加,赋存在骨架颗粒周围的黏粒逐渐聚集,或者在骨架颗粒的周围呈薄膜状(葱皮结构)。随着黏粒含量的进一步增加,骨架颗粒就被包埋在细粒物质中,颗粒之间完全由细粒物质连接。黄土骨架颗粒的形态、排列方式及胶结物的作用形式决定了黄土中孔隙的分布及有效连通孔隙的比例,这种微观胶结结构导致了其独特的渗透特性。

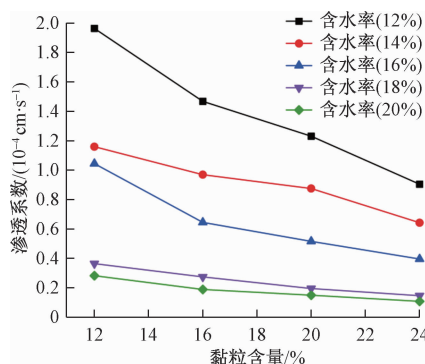


图 10 黄土渗透系数与黏粒含量关系曲线

Fig. 10 Relationship between loess's permeability coefficient and clay content

其次,黏粒中的黏土矿物特别是强亲水的黏土矿物由于其高分散性和巨大的表面积而具有显著的粘着性和吸附性。黄土高原黄土的主要黏土矿物成分为中等混层比的蒙脱石/伊利石混层矿物,作为一种膨胀性黏土矿物,中等混层比的蒙脱石/伊利石混层矿物不仅具有很强的的亲水性,而且具有胀缩特性,在渗透过程会引起晶体膨胀和絮凝作用,导致黏土胶团体积变大,从根本上来说,渗透系数的降低是由于黄土在浸水后产生膨胀所引起的^[24]。黄土的膨胀主要决定于它的黏土矿物、吸附阳离子、可溶盐等的成分和含量,土在浸水后,黏粒进一步水化,吸附水膜厚度增加,因而土

粒产生了膨胀。由于土样周围上下均受到刚性限制,不能向四外扩展,所以膨胀的土粒只好向粒间的孔隙发展。土中可溶盐的不断溶出,土中水的可溶盐浓度逐渐减少,土粒表面吸附水膜随之逐渐增厚, ζ 电位也因之增高,因而土粒获得了新的膨胀,且继续向粒间孔隙发展。同时,渗透系数随着黏粒含量的增加而减小,黏粒含量的增加还会引起引起土体孔隙弯曲因子的增加,也会导致渗透系数的减小^[25]。这主要是因为黏粒含量越多,则在相同的孔隙比条件下相对形成的微孔隙通道越多,大孔隙通道相对较少。

2.7 不同黏粒含量微观结构

土体微观结构可通过颗粒形态,颗粒排列和连接形式,孔隙特征(孔隙大小,孔隙分布情况),颗粒接触关系等特性来描述。图 11 为不同黏粒含量黄土试样放大倍数为 800 倍的微观 SEM 图片。由图可以看出,随着黏粒含量的增加,黏粒以不同形式充填于孔隙中使土样由颗粒体结构变为颗粒-团粒体结构,骨架颗粒之间的连接由接触连接逐渐变为胶结连接,颗粒的排列方式由架空变为架空-镶嵌渐变为镶嵌。黏粒含量较低时,土颗粒相互支撑、排列疏松,形成较大的孔隙。随着黏粒含量的增多,骨架颗粒排列明显变得紧密,黄土微观结构逐渐趋于密实,同时大量黏粒物质吸附于颗粒表面,形成缝隙状狭长孔隙。大、中孔隙数量明显减少,孔隙的分布不再均匀,孔隙内填充着大量黏粒和微细物质,或使得孔隙喉道堵塞,形成更多微细孔隙,孔隙连通性降低。

孔隙是不同粒径的颗粒及胶结物等基本单元体以不同形式组合排列而成的,是微观结构分析的重要研究对象之一。本文按照雷祥义^[26]对孔隙的分类标准,将孔隙分为四类:大孔隙(直径 $> 32 \mu\text{m}$)、中孔隙(直径 $8 \sim 32 \mu\text{m}$)、小孔隙(直径 $2 \sim 8 \mu\text{m}$)、微孔隙(直径 $< 2 \mu\text{m}$)。对放大 800 倍的 SEM 图像借助 Image-Pro Plus 6.0 (IPP) 软件处理后,按照以上分类标准,对不同黏粒含量下黄土微观结构进行定量分析,结果见表 2、图 12 和图 13。图 12 为不同黏粒含量黄土样各类孔隙数量百分比直方图,从图中可以看出,随着黏粒含量的增加,微孔隙所占比例增加,中、小孔隙所占比例减少,大孔隙趋于消失。图 13 为各类孔隙截面积及总孔隙截面积直方图,从图中可以看出,随着黏粒含量的增加,中、小和微孔隙面积减小,大孔隙面积逐渐消失,黄土试样的总面积呈减小趋势。说明黏粒含量的变化可以改变土样样的粒级配和土样孔隙孔径,进而改变土体的孔隙大小。同时,随着黏粒含量的增加,土样

孔隙率会逐渐减小,从而改变了土体的微观结构,导致土体孔隙结构发生变化。

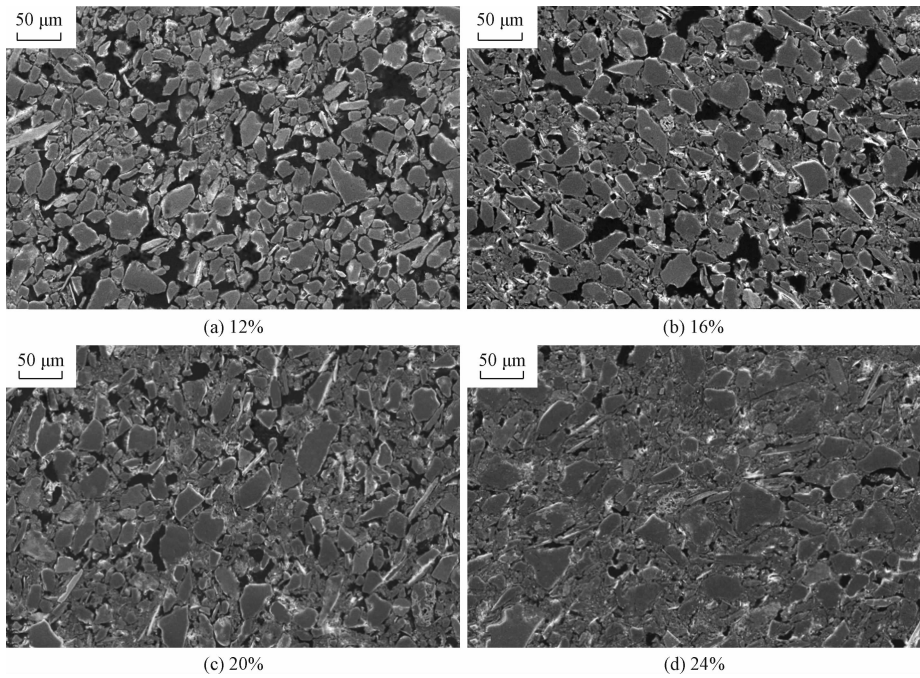


图 11 不同黏粒含量黄土试样微观结构

Fig. 11 Microstructure of different clay content of the loess samples

表 2 微观结构定量分析结果

Table 2 Quantitative analyses of microstructure

试样	孔隙面积/ μm^2					孔隙数量分布/%			
	大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙	总面积	大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙
黏粒含量(12%)	606.68	5 296.03	25 987.85	17 837.43	49 728.00	1.22	10.65	52.26	35.87
黏粒含量(16%)	407.22	3 554.81	17 443.61	11 972.87	33 378.51	0.18	8.67	48.92	42.23
黏粒含量(20%)	0.00	2 581.51	13 269.53	12 208.87	28 059.91	0.00	9.20	47.29	43.51
黏粒含量(24%)	0.00	1 290.32	6 632.53	6 102.38	14 025.23	0.00	2.33	42.45	55.22

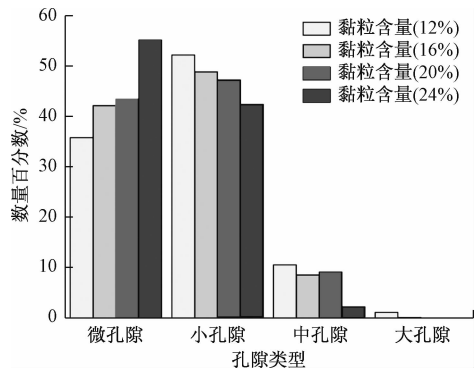


图 12 不同黏粒含量黄土样各类孔隙数量直方图

Fig. 12 Various pore number histogram with different clay content of the loess samples

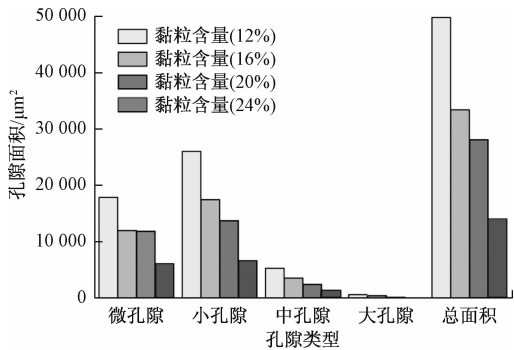


图 13 各类孔隙截面积及总孔隙截面积直方图

Fig. 13 Histogram of all sorts of pores area and total pores area

3 结论

通过对不同黏粒含量黄土试样进行的一系列物理

力学试验,获得了各物理力学参数随黏粒含量变化的规律,并借助 SEM 图像分析了不同黏粒含量黄土试样微观结构的变化。通过试验可以得到以下结论:

(1) 黏粒含量增多,中值粒径 D_{50} 减小, $> 50 \mu\text{m}$

的颗粒含量减小, <50 μm 的细颗粒含量增加, 其它平均粒径也相对减小。

(2) 黄土中黏粒含量与液塑限及塑性指数呈正比关系, 且黏粒含量与液限的相关程度明显高于塑限与黏粒含量的相关程度。

(3) 随着黏粒含量的增长, 黏聚力均呈增长趋势; 而黏粒含量小于 20% 时, 内摩擦角随黏粒含量的增长逐渐降低, 黏粒含量大于 20% 时, 内摩擦角开始缓慢上升。

(4) 黄土试样的压缩变形随黏粒含量的增加呈先上升后下降的变化趋势。

(5) 动剪切模量随着黏粒含量的增加呈先减小后增大的变化趋势, 在黏粒含量为 20% 时达到最小值; 阻尼比随着黏粒含量的增加呈先增大后减小的变化趋势, 在黏粒含量为 20% 时达到最大值。

(6) 随黏粒含量的增多, 黄土试样的渗透系数逐渐降低。

(7) 随着黏粒含量的增多, 其微观结构由分散结构变为致密结构, 颗粒接触由支架接触变为镶嵌接触, 颗粒连接由小桥连接(葱皮连接)变为嵌埋状连接, 孔隙由支架大孔变为黏粒间微小孔隙。

参考文献:

- [1] 王永焱. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.

WANG Yongyan. Structural features and physico-mechanical properties of loess in China[M]. Beijing: Science Press, 1990.

- [2] 郑晏武. 中国黄土的湿陷性[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 175-280.

ZHENG Yanwu. The collapsibility of loess in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 175-280.

- [3] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.

WANG Lanmin. Loess dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003.

- [4] Constantinescu J, Constantinescu D. Particularity of plasticity characteristics of fine glacial materials (North Chicago Area)[J]. Geocochina, 2010.

- [5] Jong E D, Acton D F, Stonehouse H B. Estimating the Atterberg limits of southern Saskatchewan soils from texture and carbon contents. [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1990, 70(4): 543-554.

- [6] 朱慧鑫, 邓羽松, 夏振刚, 等. 鄂东南花岗岩崩岗

剖面土壤液塑限特征及影响因子分析[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 1-7.

ZHU Huixin, DENG Yusong, XIA Zhengang, et al. Liquid and plastic limits and influencing factors for the profiles of collapse slope in Southeast of Hubei Province[J]. Science of Water and Soil Conservation, 2016, 14(5): 1-7.

- [7] 帅常娥, 石成, 彭鹏. 滑带土中黏粒含量及含水量的变化对其强度影响的试验研究[J]. 勘察科学技术, 2012(5): 1-5.

SHUAI Chang'e, SHI Cheng, PENG Peng. Experimental study on change of clay content and water content in sliding zone soils on strength[J]. Site Investigation Science and Technology, 2012(5): 1-5.

- [8] 张晓丽, 周进, 黄志全, 等. 黏粒含量对磁县段膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 109-115.

ZHANG Xiaoli, ZHOU Jin, HUANG Zhiqian, et al. Experimental study on effect of clay content on shear strength of expansive soil at county[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 109-115.

- [9] Dafalla M A. Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures [J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2013(4).

- [10] Jiaozhen WANG. Experimental analysis of shear strength of undisturbed Soil in Leucaena Forest in Jiangjia Ravine, Yunnan, China [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7(4): 386-395.

- [11] 王勇, 王艳丽. 细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2623-2628.

WANG Yong, WANG Yanli. Study of effects content on dynamic elastic modulus and damping ratio of saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2623-2628.

- [12] 刘小伟, 湛文武, 韩文峰. 黄土粒度的分布特征及其工程地质意义初探[J]. 地质科学, 2008, 43(4): 792-797.

LIU Xiaowei, ZHAN Wenwu, HAN Wenfeng. Particle size distribution of loess and its implications for engineering geology[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(4): 792-797.

- [13] 侯春梅, 刘小伟, 李明, 等. 甘肃黄土的粒度分维特征及意义[J]. 地质科学, 2005, 40(4): 539-546.

- HOU Chunmei, LIU Xiaowei, LI Ming, et al. Grain-size fractal dimension of the loess in gansu and its significance[J]. *Geologic Science*, 2005, 40(4): 539 - 546.
- [14] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 208 - 247.
- LIU Dongsheng. Loess and the environment[M]. Beijing: China Science Press, 1985: 208 - 247.
- [15] 王志良. 胶粒含量对土体物理力学特性的影响分析[C]// 全国工程地质大会. 2012.
- WANG Zhiliang. Study on the influence of colloidal particle content on physical and mechanical properties of soil [C]// National Conference on Engineering Geology. 2012.
- [16] 吴宏, 刘银宝. 土的分类中塑性指数与黏粒含量的关系[J]. *中国市政工程*, 2008(1): 62 - 63.
- WU Hong, LIU Yinbao. The relation between plasticity index and content of clay particles in soil Classification [J]. *China Municipal Engineering*, 2008(1): 62 - 63.
- [17] 舒玉, 侯兆霞, 杨广庆. 不同标准下细粒土塑性指数关系的研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2000, 13(4): 59 - 61.
- SHU Yu, HOU Zhaoxia, YANG Guangqing. The relationship of fine grained soil's plasticity index under different standard of liquid limit[J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2000, 13(4): 59 - 61.
- [18] 叶佰花. 直接剪切试验方法及应用分析[J]. *土工基础*, 2012, 26(3): 109 - 111.
- YE Baihua. Direct shear test method and the analysis of application [J]. *Journal of Geotechnical Foundation*, 2012, 26(3): 109 - 111.
- [19] 李建红, 张其光, 孙逊, 等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性的影响[J]. *清华大学学报自然科学版*, 2008, 48(9): 1431 - 1435.
- LI Jianhong, ZHANG Qiguang, SUN Xun, et al. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.)*, 2008, 48(9): 51 - 55.
- [20] 龚晓南, 熊传祥. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. *水利学报*, 2000, 31(10): 43 - 47.
- GONG Xiaonan, XIONG Chuanxiang. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(10): 43 - 47.
- [21] 程昌炳, 陈琼, 刘少军, 等. 土中胶结强度的微观研究[J]. *华中农业大学学报*, 1998, 17(2): 143 - 149.
- CHENG Changbing, CHEN Qiong, LIU Shaojun, et al. Microscopic study on cementation strength in soils [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1998, 17(2): 143 - 149.
- [22] 曾长女, 刘汉龙, 周云东. 粉土动力特性研究综述[J]. *防灾减灾工程学报*, 2005, 25(1): 99 - 104.
- ZENG Changnv, LIU Hanlong, ZHOU Yundong. Review of silty soil dynamic characteristics [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2005, 25(1): 99 - 104.
- [23] 王勇, 王艳丽. 细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2623 - 2628.
- WANG Yong, WANG Yanli. Study of effects content on dynamic elastic modulus and damping ratio of saturated sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2623 - 2628.
- [24] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. *工程地质学报*, 2005, 13(1): 18 - 28.
- ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Cements of sand loess and their cementation in north Shaanxi and west Shanxi [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(1): 18 - 28.
- [25] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1): 160 - 164.
- XU Yongfu, LAN Shouqi, SUN De'an, et al. New paratus for measurement of stress effect on permeability of unsaturated soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 160 - 164.
- [26] 雷祥义. 西安附近黄土孔隙特征[J]. *水文地质工程地质*, 1984(4): 33 - 38 + 41.
- LEI Xiangyi. Loess pore characteristics near Xi'an [J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 1984(4): 33 - 38 + 41.