

考虑含水量和密度影响的压实黄土 抗剪强度特性研究

王娟娟¹, 张秀丽², 王铁行¹

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.中国航天建设集团有限公司, 北京 100071)

摘要: 在干旱半干旱地区, 压实黄土广泛用于建造路堤、土坝、基坑回填等工程中, 受降雨入渗等因素影响, 压实黄土的含水量经常会发生变化, 其抗剪强度也会随之改变. 通过直剪试验研究了压实黄土的抗剪强度参数随含水量和干密度的变化规律. 得出在干密度相同的条件下, 压实黄土的粘聚力、内摩擦角随含水量的增大而减小的结论; 归纳出粘聚力、内摩擦角与含水量均呈二次抛物线关系. 进一步分析得到了考虑含水量和干密度影响的压实黄土抗剪强度计算公式.

关键词: 压实黄土; 含水量; 干密度; 抗剪强度

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0687-05

黄土是一种第四纪沉积物, 主要分布于中纬度半干旱、干旱地区. 因具有一系列特殊的内部物质成分、外部形态和性质在工程土类中具有特殊的地位. 工程上为了防止黄土湿陷性造成的不均匀沉降, 在施工时一般对其进行压实, 以此来获得足够的强度. 压实黄土的原有结构、物理力学状态不同于原状黄土^[1-3]. 正确评价压实黄土的强度影响, 关系到黄土地区路基压实质量的评定, 也是对黄土公路工程性质进行研究的基础. 目前对压实黄土的性质已做了相关的研究^[4-11], 但从含水量和干密度两个方面对压实黄土性质的研究尚有一些不足. 基于此, 本文拟对压实黄土按不同的含水量和干密度制样, 系统分析在增减湿过程中其强度特性随物理指标的变化规律, 为黄土地区路基工程设计的参数选取提供依据.

1 试验材料及方法

试验用黄土取自西安曲江池附近的某工地, 取土深度为 5 m, 呈黄褐色, 土质均匀, 结构较致密, 以粉质粘粒为主, 具硬塑性. 根据试验规程, 土颗粒的分布情况及主要物理性质指标见表 1.

表 1 黄土主要物理性质指标

Tab.1 The main indicators of the physical properties of loess

粒度组成/%			最佳含水量/%	塑限/%	液限/%	比重
>0.074 mm	0.074~0.002 mm	<0.002 mm				
2.35	51.52	36.13	20.1	18.9	32.72	2.72

土样的初始含水量(天然含水量)为 15%, 在相同干密度下使含水量增湿到 16%, 19%, 22%, 25%, 减湿到 11%, 13% 共六组. 以土的击实试验所得的最大干密度为参照, 并结合所取土样的具体情况, 取 1.5 g/cm^3 , 1.6 g/cm^3 , 1.7 g/cm^3 三个干密度若干组试样进行试验. 试验采用应变控制式直剪仪, 取相同含水量的四个试样, 在垂直压力分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa 的条件下进行直剪试验, 手轮速率控制在 10~12 转/min, 使土样在 3~5 min 内剪损. 试样在各级压力下的抗剪强度取峰值强度, 对无明显峰值者, 取应力应变曲线上应变量为 4mm 所对应的强度.

2 试验结果与分析

对试样进行快剪试验, 整理试验结果, 得到了不同含水量、不同干密度试样的抗剪强度. 应用莫尔-库伦强度准则分别得到了粘聚力、内摩擦角随含水量和干密度的变化曲线.

2.1 压实黄土的粘聚力与物理指标的关系

(1) 压实黄土的粘聚力与含水量的变化关系

收稿日期: 2014-01-29

修改稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078309)

作者简介: 王娟娟 (1980—), 女, 博士, 主要从事黄土地区工程地质、环境地质等方面的教学与科研工作. E-mail: juanjuan0022@163.com

由图1可得,不同干密度压实黄土的粘聚力均随含水量的增大而逐渐减小.当含水量较小时曲线斜率较大,粘聚力减大幅度较大;当含水量大于最佳含水量后曲线斜率较小,不同干密度压实黄土粘聚力的变化趋于一致.粘土颗粒间存在着复杂的相互作用力,当总的引力大于斥力时,就表现为静引力,当总的斥力大于引力时,就表现为斥力.随着含水量的增加,土颗粒之间的水离子浓度增大,两个土粒之间出现渗透斥力使土粒相互排斥,因而土粒间的粘聚力减小.除此之外,当含水量越高,土中水以弱结合水膜形式存在的水分子越多,自由水增加,甚至其中有些表现为重力水.这些水压力使土颗粒有分开的趋势,而且随着含水量的增大,颗粒间的咬合机会变少,因咬合作用产生的强度变小,二者的综合作用使得粘聚力随含水量的增大而减小.

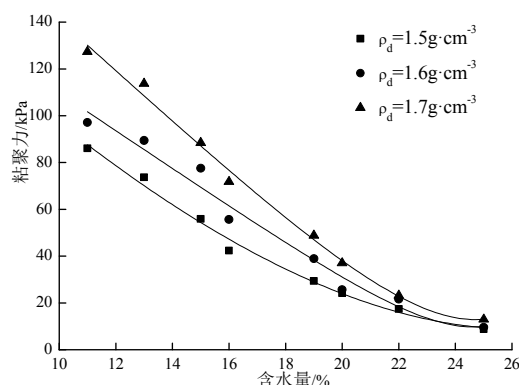


图1 压实黄土的粘聚力与干密度的变化关系图
Fig.1 Relationship between cohesion and moisture content of compacted loess

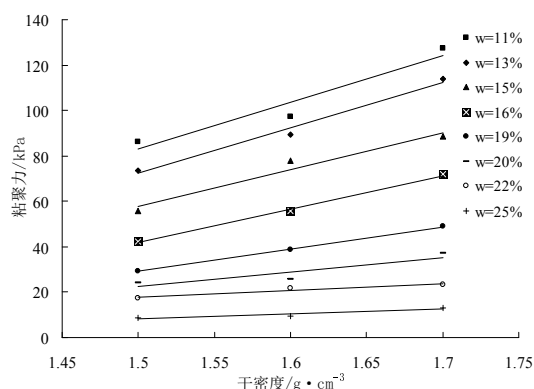


图2 压实黄土的粘聚力与含水量的变化关系图
Fig.2 Relationship between cohesion and dry density of compacted loess

(2) 压实黄土的粘聚力与干密度的变化关系

由图2可以得出:压实黄土的粘聚力随着干密度的增大而增大.当含水量较低时,粘聚力随干密度增大的幅度较大.原因可以解释为:干密度越大,土粒之间的接触越紧密,故而相互之间的咬合作用增大,土粒之间的万有引力也变大,产生的强度就有增大的趋势;干密度越大,土粒之间的接触越紧密,孔隙比越小,有利于土中水表面张力作用的发挥.因此土的干密度越大,粘聚力也随之增大.

2.2 压实黄土的内摩擦角与物理指标的关系

(1) 内摩擦角与含水量的变化规律

由图3可知,不论干密度的大小如何,压实黄土的内摩擦角 φ 值均随着含水量的增大而减小.其原因是随着含水量的增大土粒周围的结合水膜越来越厚,结合水膜之间的润滑作用使得内摩擦角减小.

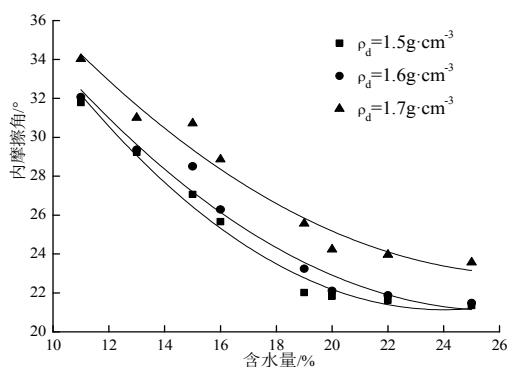


图3 压实黄土的内摩擦角与含水量的变化关系图
Fig.3 Relationship between internal friction angle and moisture content of compacted loess

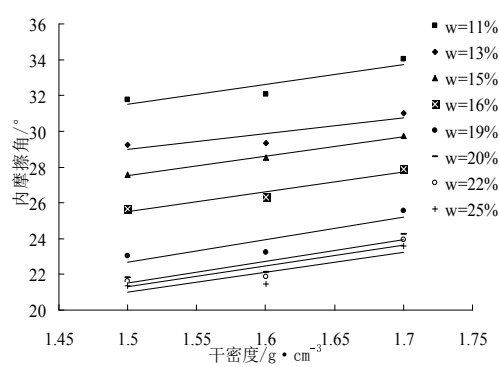


图4 压实黄土的内摩擦角与干密度的变化关系图
Fig.4 Relationship between internal friction angle and dry density of compacted loess

(2) 压实黄土的内摩擦角与干密度的变化关系

由图4的关系曲线可以得出:压实黄土的内摩擦角随着干密度的增大而增大.干密度越大,土粒之间的接触越紧密,孔隙比越小,土中的水主要以土粒周围强结合水膜的形式存在,而强结合水膜的水不能移动,所以随着干密度的增大强度增大,内摩擦角增大;在高含水量下,干密度较小时,颗粒之间的距离较

大,土粒周围的结合水膜相对较厚,结合水膜之间的润滑作用使得内摩擦角较小.总之,随着干密度的增大,孔隙比的减小,在同一含水量下,结合水膜变薄,部分结合水水转化为自由水,润滑作用减小,内摩擦角增大.在含水量较低时,土中水主要以结合水膜的形式存在,且结合水膜较薄,干密度对结合水膜厚度的影响较小,表现出干密度对内摩擦角的影响较小.

2.3 考虑含水量和干密度影响的抗剪强度的确定方法

(1) 压实黄土的抗剪强度与含水量的变化关系

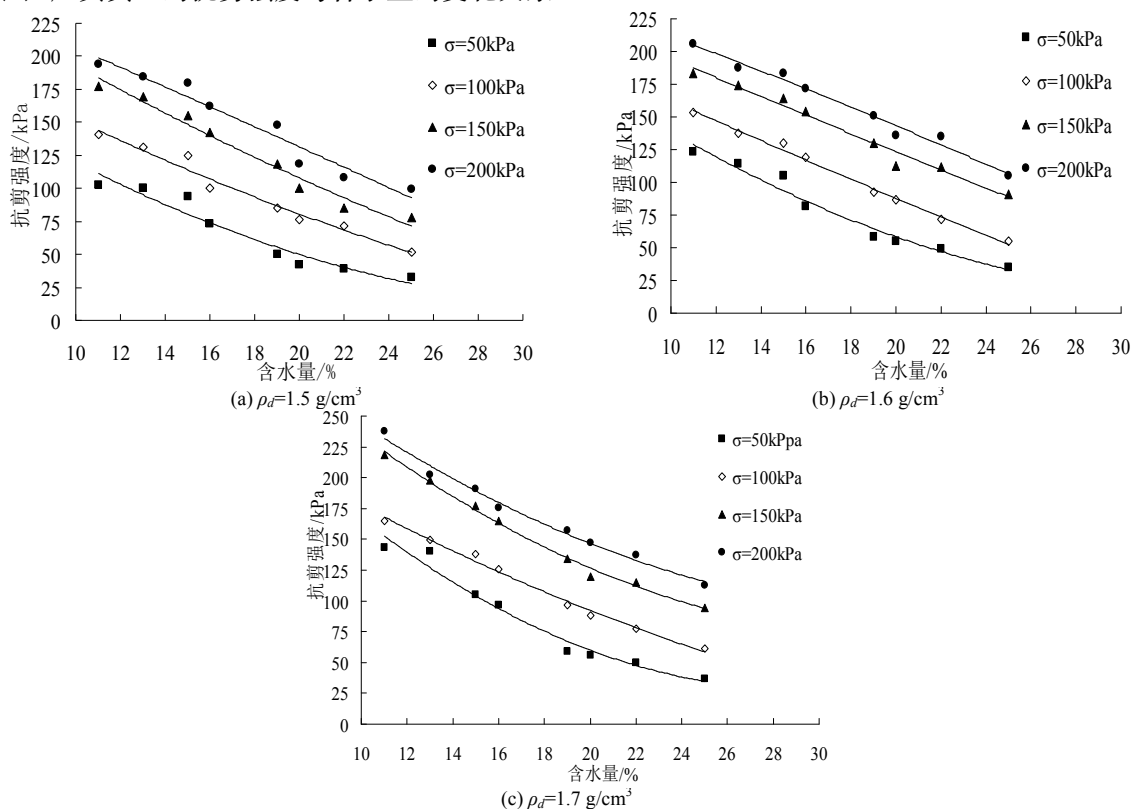


图5 压实黄土的抗剪强度与含水量的变化关系图

Fig.5 Relationship between shear strength and moisture content of compacted loess

从图中可以看出压实黄土的抗剪强度与含水量的变化呈二次多项式关系.不论干密度多大,抗剪强度随着含水量的增加呈减小的趋势,且在最佳含水量之前抗剪强度减小的幅度较大,在最佳含水量之后,抗剪强度随着含水量的增加减小的幅度比最佳含水量之前减小的幅度小.

在相同的竖向压力下,干密度越大,抗剪强度随含水量的增大变化范围增大,说明高密度下的黄土对水的敏感性很强.相同干密度,竖向压力越大,抗剪强度随含水量的增大变化范围越大,从而表明了竖向压力对压实黄土抗剪强度的影响较大,所以工程上常采用振动夯实的方法压实地基土提高抗剪强度,达到提高地基承载力的目的.

(2) 压实黄土的抗剪强度与干密度的变化关系

对不同含水量不同干密度的试样进行快剪试验,对得出的试验结果进行分析,得到了抗剪强度与干密度的变化关系图.图 6(a)~(h)分别表示了试样的含水量在 11%, 13%, 15%, 16%, 19%, 22%, 25% 时,不同应力水平下抗剪强度随着干密度的变化关系图.从图中可以看出压实黄土的抗剪强度与干密度的变化近似呈线性关系,所以用线性关系拟合粘聚力与干密度的关系和内摩擦角与干密度的关系是合理的.

由库伦公式可得,抗剪强度的大小与粘聚力、内摩擦角、正应力有关,将试验结果代入库伦公式就得到了一个考虑含水量和干密度影响的抗剪强度公式,即:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

其中: $c = \alpha \cdot w^2 + \beta \cdot w + \gamma$; $\phi = X \cdot w^2 + Y \cdot w + Z$; $\alpha = 0.59\rho_d - 0.66$; $\beta = -35.87\rho_d + 40.13$; $\gamma = 543.4\rho_d - 607.79$,
 $X = -0.11\rho_d + 0.23$; $Y = 3.96\rho_d - 9.04$; $Z = -19.75\rho_d + 87.88$.

采用上式对不同正应力作用下,不同干密度、不同含水量压实黄土的抗剪强度进行计算,计算值与实测值的相对误差均在 12% 以下,所以采用该拟合公式计算压实黄土的抗剪强度是合理的.应当说明的是,

土样取自西安附近的黄土,该公式具有其特殊性.但抗剪强度随含水量和干密度的表达形式是固定的,其含水量和干密度只进行简单的物理性质试验就可以得到.

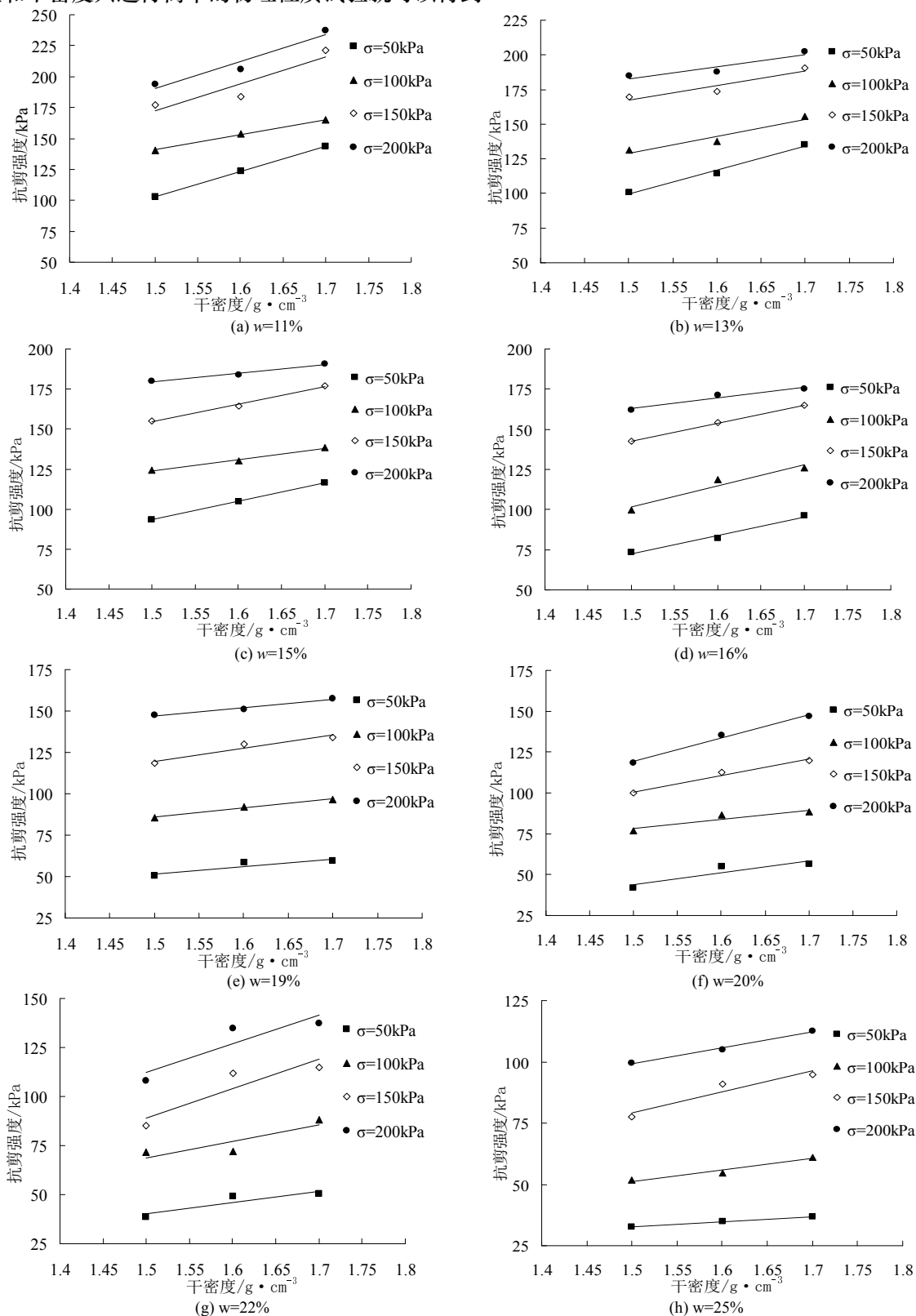


图6 压实黄土的抗剪强度与干密度的变化关系图
Fig.6 Relationship between shear strength and dry density of compacted loess

3 结论

采用增减湿的方法对扰动压实黄土进行了抗剪强度试验,分析了压实黄土的强度特性与物理力学指标的关系,取得的主要结论有:

(1) 压实黄土的粘聚力随着含水量的增大而减小,随着干密度的增大而增大。当含水量较低时,粘聚力随着干密度增长的幅度较大。

(2) 压实黄土的内摩擦角随着含水量的增大而减小,压实黄土的内摩擦角随干密度的增大而增大。

(3) 基于直剪试验的结果与库伦公式,得出压实黄土抗剪强度的大小与粘聚力、内摩擦角、正应力有关。抗剪强度随含水量的变化呈二次多项式关系,随干密度的变化呈线性关系。在实际工程中对压实黄土可进行简单的物理性质试验就可得到含水量及干密度,从而计算得出压实黄土的抗剪强度。

参考文献 References

- [1] 陈存礼, 杨鹏, 何军芳. 饱和击实黄土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1551-1556.
CHEN Cunli, YANG Peng, HE Junfang. Research on dynamic characteristics of saturated compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1551-1556.
- [2] 景宏君, 张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 14-18.
JING Hongjun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14-18.
- [3] 刘建民. 从压实土体的强度特征看黄土的现场压实控制[J]. 工业建筑, 1994, 24(10): 26-30.
LIU Jianmin. The in-situ compacted control of loess seen from strength characteristic[J]. Industrial Construction, 1994, 24(10): 26-30.
- [4] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1195-1200.
ZHANG Maohua, XIE Yongli, LIU Baojian. Analysis of shear strength characteristics of loess during moistening process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1195-1200.
- [5] 王铁行, 卢靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2364-2368.
WANG Tiehang, LU Jing, ZHANG Jianfeng. Experimental study on permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2364-2368.
- [6] 冯志焱, 邱本胜, 谢定义. 黄土的三轴试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(6): 803-806.
FENG Zhiyan, QIU Bensheng, XIE Dingyi. Experimental study of triaxial test of loess[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2010, 42(6): 803-806.
- [7] Minkov M, Evstatiev D, Donchev P, et al. Compaction and stabilization of loess in Bulgaria[C]//Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1981: 745-748.
- [8] Bowders J J, Loehr J E, Owen J W. Shear behavior of compacted silty loess[C]. ASCE, 2000.
- [9] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土回弹模量试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 748-752.
CHEN Kaisheng, SHA Aimin. Research on resilient modulus test of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 748-752.
- [10] 刘金龙, 刘洁群, 陈陆望, 等. 土的空间破坏面及其抗剪强度[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(1): 69-75.
LIU Jinlong, LIU Jiequn, CHENG Luwang, et al. The failure surface and relevant shear strength of soil[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2009, 41(1): 69-75.
- [11] 伍石生, 戴经梁, 彭波. 压实黄土的微结构及其渗水研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 10(4): 17-20.
WU Shisheng, DAI Jingliang, Peng Bo. On Micro-structure and Infiltration of Compacted Loess[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 10(4): 17-20.

The shear strength research of compacted loess considering the impact of moisture content and dry density

WANG Juanjuan¹, ZHANG Xiuli², WANG Tiehang¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and technology, Xi'an 710055, China;

2. China Aerospace Construction Group Co.Ltd, Beijing 100071, China)

Abstract: In arid and semi-arid regions, compacted loess is widely used in the construction of embankment, dam, excavation backfill and other projects. By rainfall infiltration and other factors, the moisture content of compacted loess will change frequently; so will the shear strength. Through direct shear tests, this paper studies the variation of shear strength parameters of compacted loess with water content and dry density. It gives the conclusion that under the same dry density conditions, compacted loess cohesion and internal friction angle increases with the decrease of water content; and the cohesion and internal friction angle have a quadratic parabolic relationship with water content. Further analysis has been calculated considering the impact of water content and dry density of compacted loess shear.

Key words: compacted loess; moisture content; dry density; shear strength

(本文编辑 吴海西)