

含水量对压实粘土的变形及强度性能的影响

胡海英, 王 钊

(武汉大学土木建筑工程学院 武汉市 430072)

摘 要: 通过室内压缩试验和直剪试验, 研究了含水量对压实粘土的压缩变形与抗剪强度的影响, 并从土体结构与土中基质吸力变化两个方面分析了作用机理。试验表明: 随压实含水量增大, 粘土的压缩变形增加、抗剪强度降低; 粘聚力随压实含水量增加并非单调变化, 其曲线形式类似于“ \wedge ”形; 内摩擦角随压实含水量增加, 大体上是减小的。压实粘土浸水饱和后, 压缩变形显著增加, 抗剪强度和粘聚力则显著降低。且压实含水量越小的土体在其他条件相同时, 因饱和引起的压缩变形、抗剪强度和粘聚力损失较大, 内摩擦角受浸水饱和的影响较小。

关键词: 粘土; 含水量; 压缩; 粘聚力; 内摩擦角

粘土因其高塑性、不易透水性、高压缩性、低强度以及对环境条件变化的敏感性等性质, 一般不用于土工结构物的填料, 但随着土木、水利、交通等工程建设的蓬勃发展, 地理环境的复杂性和兼顾的经济效益使得粘土用作土工结构物填料的工程越来越多, 应用情况也越来越复杂。作为土工结构物的填料, 粘土压实后的力学性质是岩土工程界关注的重点, 因为它直接影响土工结构物的稳定性和耐久性。变形与强度是土的两个重要力学性质, 一般对粘土压实后力学性质的研究重点都放在这两个方面。粘土表现出的诸多不适于作填料的性质, 主要与其组份中矿物成分的性质有关, 在诸多影响因素中, 矿物性质对水的作用尤为敏感^[1]。而用粘土填筑的土工结构物, 无论在施工期间(在一定含水量下压实), 还是竣工后的使用期间(雨水入渗、地下水上升、河水渗流等), 都离不开水的作用。

含水量对粘土压实后力学性质的影响, 早期的研究不少。Lambe(1958 年)在总结前人研究成果的基础上经过进一步的试验得出了以下结论: 在压实能和干密度相同的条件下, 最优含水量干侧压实的土比湿侧压实的土更趋于呈絮凝式的结构, 这使得前者比后者具有较高的强度、较低的侧限压缩性(限于较低作用应力下)和较高的渗透性^[2]。这些结论后来得到广泛认可^[3~7]。国外的 Micheals(1959 年)、Diamond(1970 年)、Brackley(1973 年, 1975 年)、

Zein(1985 年)、Delage et al(1996 年)、Kong 和 Tan(2000 年)、Toll(2000 年)以及 Cokca et al(2004 年), 先后揭示了在最优含水量干侧压实的土中团聚体结构的发展规律, 指出在最优含水量湿侧压实的土结构中没有发现这种团聚体, 并据此阐释了粘土在最优含水量干湿两侧压实呈现不同力学性质的原因。Micheals(1959 年)在试验中观察到非饱和的压实粘土中, 当压实含水量低于最优含水量时, 随着含水量的减少, 粘聚力也减小。Kong 和 Tan(2000 年)对一种压实膨胀土试验得到的抗剪强度与压实含水量之间的关系为: 含水量小于塑限的范围内, 随含水量的增加, 粘聚力减少, 内摩擦角亦明显降低; 含水量大于塑限后, 内摩擦角趋于一定值。Cokca et al(2004 年)在上述成果基础上从非饱和土理论出发, 通过对压实粘土进行直剪试验和吸力测量, 得到了吸力和内摩擦角随压实含水量的增加而减小、粘聚力在最优含水量附近出现峰值等一些结论^[6]。国内近年来, 在这方面的研究多集中于对特种土压实后工程性质的研究^[8~10]。本文拟在前人研究成果的基础上, 针对已有研究中缺乏定论和缺少大量试验验证的内容, 通过常规的剪切试验和压缩试验, 对压实粘土的变形及强度特性与含水量的关系做进一步的探讨。

1 试验研究

试验所用粘土为珞珈山粘土, 其基本物理指标

列于表 1 中。

表 1 试验用土物理性质指标

土样类型	土粒相对密度 G_s	液限 ω_L %	塑限 ω_P %	塑性指数 I_P	重型击实试验		粘粒含量(粒径 <0.005 mm)/%
					最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水量 $\omega_{opt}/\%$	
重塑土样	2.73	47.3	20.6	26.7	1.84	15.3	44

1.1 备样

试验中将所用的粘土风干、碾碎、过筛后,分别配制成含水量 ω 为13.3%、15.3%、17.3%和19.3%的4种土样。前3种含水量土样每种分别制成压实度 D_c 为90%、93%的压缩和直剪试样各两组,一组直接用于非饱和土的试验,另一组浸水24 h待饱和后再进行试验。含水量为19.3%的试样仅配制了以上两种压实度的直剪试样,进行非饱和剪切试验。

1.2 压缩试验

压缩试验中将备好的试样装入固结仪。对于非饱和土样,周围用与试样含水量相近的湿棉花围住,尽可能避免试样与外界进行气水交换;对于饱和土样,在试验过程中使其始终浸在水中,以保证试样的饱和性。试样装好后逐级施加荷载,每级荷载下压缩24 h后变形趋于稳定(即变形小于0.005 mm/h)时再施加下一级荷载^[11]。

1.3 直剪试验

剪切试验中将备好的试样装入直剪仪的剪力盒中,试样上下两面均依次为湿滤纸和透水石。对于非饱和土试样,湿滤纸含水量尽可能接近试样含水量,直剪盒上的活塞周围用与试样含水量相近的湿棉花围住,以防止试样水分发生较大变化。饱和土样在试验过程中,使其始终浸在水中以保证试样的饱和性。试样装好后加载固结,每组试验有4个试样,分别在100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa的垂直压力下固结,24 h后固结基本稳定(即垂直变形量不超过0.005 mm/h),以0.8~1.2 mm/min的速率进行剪切,使试样在3~5 min内剪损,获得每级垂直荷载下的最大剪力^[11]。

2 结果分析

2.1 压缩试验结果分析

2.1.1 非饱和样试验结果分析

从图1的 $e-p$ 曲线可以看出,相同压实度、不同初始含水量的土体具有相同的初始孔隙比,开始施

加荷载后,虽然受力相同,但压实含水量越大的土体表现出越大的压缩变形性。随着受力增加,各压缩曲线先后达到各自曲线上的第一个“特征点”,从图1的 $e-\lg p$ 曲线图上看类似于原状土的先期固结压力,但并不是先期固结压力,而是土体结构强度的一种反映^[4]。在该点处曲线的斜率发生较明显的转折;该点后的曲线斜率大于该点之前的。从图1(2)中可以看到,该“特征点”对于不同压实含水量的曲线对应着不同的应力,表2归纳了各曲线上该“特征点”对应的应力值。从表2可以看出,在压实度相同的前提下,该“特征点”对应的应力值随着压实含水量的增加而降低。过了第一个“特征点”,应力进一步增加,此时压实含水量相同的土体,不管初始孔隙比是否相同,在同等外力作用下表现出相同的压缩性,且具有相近的孔隙比;而压实含水量不同的土体尽管初始孔隙比相同,在此应力范围内同等外力作用下孔隙比相差却较大,这说明在此受力阶段压实含水量对土体压缩变形总量的影响大于压实度的影响。随着应力继续增加,在图1中的各条压缩曲线达到第二个“特征点”(图1中大约为应力3 000 kPa的对应点)后,各曲线的压缩变形性均大大降低,相对于应力增加变形很小,且对于相同的应力增量,各曲线的变形增量基本相同,说明该点后压实含水量对土体的压缩变形几乎不产生影响。

2.1.2 浸水饱和对压缩变形的影响

图2绘制了各含水量下压实的土样浸水饱和前后的压缩曲线。可以看出,不管压实时的含水量为多少,压实后的土体经过浸水饱和和以后的压缩性总是远大于饱和前的。并且对于压实含水量不同的土体,在压实度和外力作用相同的条件下,由土体饱和引起的变形是不同的,一般压实含水量大的土体因饱和和引起的变形相对要小些。从图2可以观察到:同为90%或93%的压实度,压实含水量依次递减,浸水饱和和在相同应力作用下的变形增加量则是依次递增。压实度相同的土体,虽然初始含水量不同,但饱

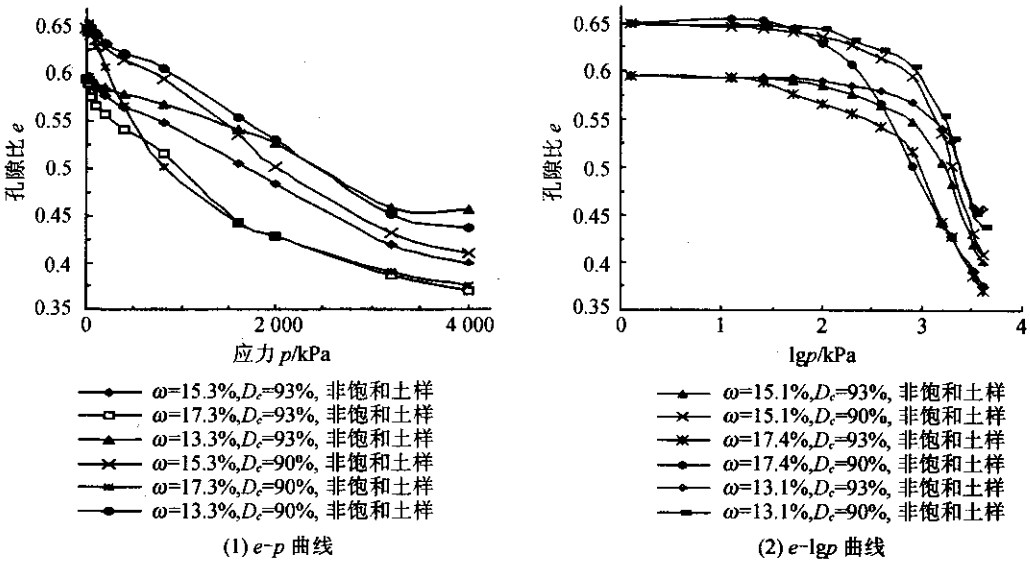


图 1 不同含水量下压实土的非饱和压缩曲线

表 2 各曲线上第一“特征点”对应的应力

项 目	含水量 $\omega/\%$	各压实度 $D_c(\%)$ 下第一“特征点” 对应的应力 /kPa	
		90	93
第一“特征点” 对应的应力值	13.3	约 1 000	约 2 000
	15.3	约 600	约 1 600
	17.3	约 100	约 1 000

和后的压缩性是相似的。

2.2 直剪试验结果分析

2.2.1 抗剪强度随含水量变化关系

图 3 反映了抗剪强度随压实含水量的变化关系。从图 3 可以看出,无论是在 90% 还是 93% 的压实度下,压实含水量小的土样具有较大的抗剪强度,且随着压实含水量的增加抗剪强度降低。土样浸水饱和

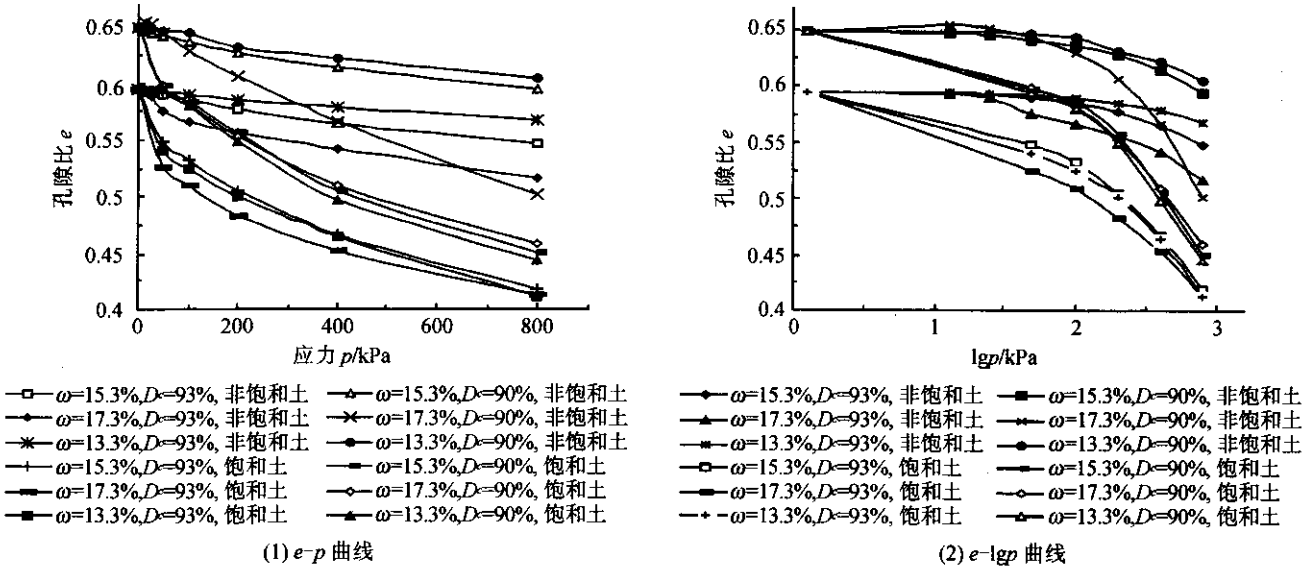
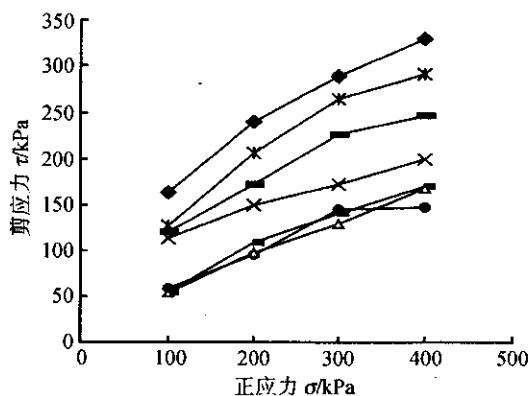


图 2 不同含水量下压实的土体饱和前后的压缩曲线

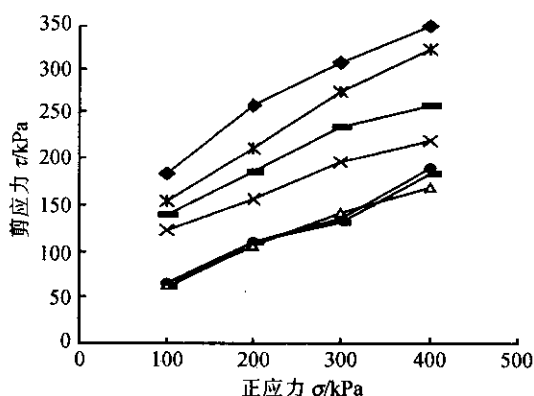
后,抗剪强度较饱和前大大降低,并且压实含水量越小的土样浸水饱和后其抗剪强度降低值相对越大,如图 3 中压实度同为 90% 时,17.3% 含水量的土样饱和后抗剪强度降低 60~100 kPa,含水量为 15.3% 和

13.3% 的土样浸水饱和后强度则分别降低了 75~135 kPa 和 110~160 kPa。同样,对于 93% 压实度的土样也具有类似的情况。

2.2.2 粘聚力随含水量变化关系



(1) 压实度 90%



(2) 压实度 93%

图3 90%和93%压实度下的抗剪强度随含水量变化曲线

抗剪强度受含水量变化影响,主要是由于含水量对抗剪强度的两个参数——粘聚力 c 与内摩擦角 φ 产生影响所致。此处的粘聚力 c 为有效总粘聚力,包括有效粘聚力 c' 及吸附强度 $\tau_s = (u_a - u_w)\tan\phi^b$ [6]。

粘聚力随含水量的变化关系见图4。可以看出,试样饱和前粘聚力随着压实含水量的变化过程不是单调增加或降低,两者的关系曲线上存在着两个特征点。对于本文中的土样,这两个特征点分别对应的压实含水量为15.3%和17.3%。当含水量小于15.3%时,粘聚力随着含水量的增加而降低;在15.3%含水量处降至最低;在含水量大于15.3%后,粘聚力随压实含水量的增加也有所增加,在17.4%含水量处达到极值;当压实含水量大于17.4%以后,粘聚力则随着含水量的增加又降低。试样饱和后,粘聚力大大降低,如压实度为93%和90%的试样,饱和后粘聚力分别减小了71~115 kPa和48~97 kPa。从图4还可观察出,压实含水量小于最优含水量的试样,饱和前的粘聚力远大于最优含水量及其湿侧压实土样的粘聚力。但一旦浸水饱和,压实含水量小的试样粘聚力损失反而大。如图4中的各条曲线,压实含水量为13.3%的试样饱和前粘聚力最大,浸水饱和后其粘聚力损失也最大。

2.2.3 内摩擦角随含水量变化关系

图5给出了内摩擦角随含水量变化的情况。从图5中的各曲线来看,压实含水量对内摩擦角的大小有影响,但规律性不强。图5中曲线大体上的趋势是:最优含水量干侧压实的非饱和土样,内摩擦角比最优含水量湿侧压实的土样要大些;试样浸水饱和

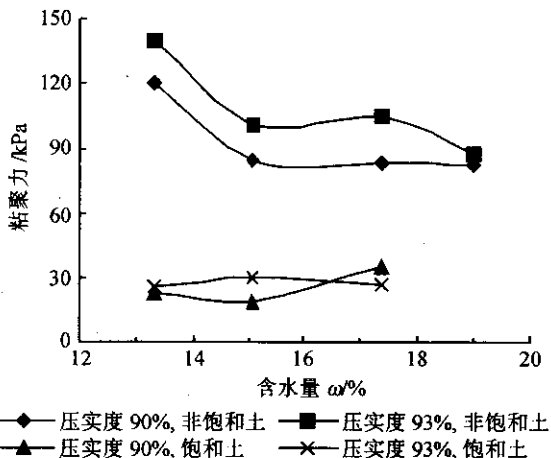


图4 粘聚力随含水量变化曲线

后低含水量(如13.3%、15.3%)的试样,内摩擦角稍有减小;其他试样饱和前后内摩擦角几乎没有变化。

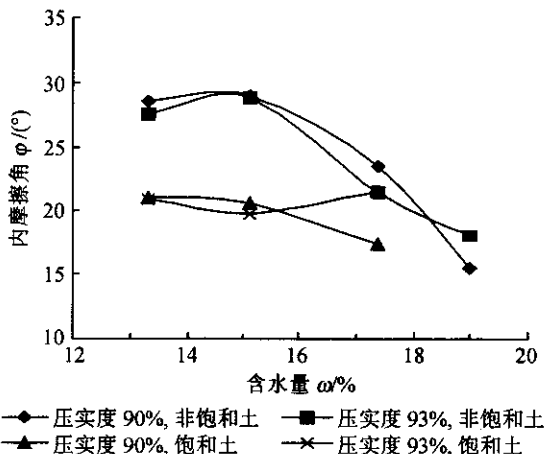


图5 内摩擦角随含水量变化曲线

2.3 土体结构与基质吸力对压缩变形和抗剪强度参数的影响

含水量对压实粘土的压缩变形与抗剪强度所产生的影响,主要是由于含水量变化引起了土体结构和土中基质吸力发生变化所致。不同含水量下压实到相同压实度的粘土,虽然孔隙比相同,但结构和土中的吸力均不同。低于最优含水量压实的土体形成颗粒“桁架式”排列、颗粒间强联结的结构形式。这种结构中存在两种形态:被较大孔隙分开的团粒结构以及团粒内的结构。这种结构的孔隙尺寸分布曲线上有两个峰值,分别对应团粒之间的较大孔隙和团粒内的较小孔隙^[12],同时因为含水量低、土体饱和度小,因此土中的基质吸力大。此时的土体因结构强度高、基质吸力大,其压缩变形较小,粘聚力较大,内摩擦角因结构中存在大的团粒结构(类似于粗颗粒^[13])以及较大的基质吸力也随之较大,从而抗剪强度也较大。随着含水量的增加,土体中颗粒排列向定向化趋势发展,颗粒间强联结亦减弱,团粒间的大孔隙逐渐减少,小孔隙不断增加,土中吸力因含水量(饱和度)增加而降低,使得土体的压缩变形有所增加,粘聚力和内摩擦角均有所减小。在含水量达到和超过最优含水量以后,土中颗粒排列更加定向化,颗粒间的联结亦很弱,团粒间的孔隙大小与团粒内的孔隙大小相差不大、难以区分^[14]。但此时吸力如何变化还有待于进一步研究,一般认为基质吸力随含水量增大单调减小,延伸为基质吸力随饱和度的增大而单调减小,当饱和度最小时基质吸力最大,当饱和度为100%时基质吸力为0;也有文献^[5,15]提出基质吸力与含水量并非一一对应的单调线性关系,文献^[15]还给出了基质吸力随含水量变化的“ \wedge ”形曲线;本文的试验研究没有进行基质吸力的量测,但粘聚力在最优含水量以后又有所增长,有可能是基质吸力有所回升造成的。但总的抗剪强度仍是随含水量的增加而降低、压缩变形随含水量的增大而增大,这可能是土体结构与基质吸力共同变化的结果。

压实粘土浸水饱和后压缩变形量显著增加,抗剪强度(和粘聚力)大大降低,是由于土中含水量的极大增加导致基质吸力大幅度降低所致。压实度相同、压实含水量越小的土样,浸水饱和引起的压缩变形量和强度损失越大,是因为压实含水量小的土体初始基质吸力相对较大,当土体饱和时,基质吸力的绝对减小值也较大所致。

3 结语

(1)压实含水量对粘土的压缩变形有很大的影响。压实含水量不同的土体,尽管初始孔隙比相同,在同等外力作用下所产生的压缩变形有很大差别,一般在最优含水量附近随着压实含水量的增大,土体的压缩变形也增加。压实含水量的这种影响只在土体的一定受力范围内起作用(如本试验中约为3 000 kPa以内),在极高的应力作用下,压实含水量对粘性土体的压缩变形基本上不产生影响。

(2)粘土压实后饱和与否对土体压缩变形的大小也有明显的影响。一般来说,压实土体饱和后的压缩变形远大于饱和前的变形。在同样的外力作用下,初始孔隙比相同的压实土体,压实含水量大的土体因饱和引起的变形要小于压实含水量小的土体。

(3)粘土压实后的抗剪强度受压实含水量以及土体饱和状态的影响。通常压实含水量小的土体抗剪强度大。浸水饱和后,土体的抗剪强度会有很大的损失,并且压实含水量越小,土体浸水饱和后抗剪强度损失越多。

(4)粘土抗剪强度受含水量影响所表现出的特征,归因于其对抗剪强度的两个参数——粘聚力 c 和内摩擦角 φ 的影响。粘聚力 c 随压实含水量的改变并不是单调变化的,在两者的关系曲线上存在两个特征点,对应两个不同的含水量。在压实含水量小于第一个特征含水量(本试验采用的土样约为15.3%)时, c 值是随含水量增加而减小的;在两个特征含水量之间, c 值随含水量增加略为增大;在第二个特征含水量(本试验中为17.4%左右)以后, c 值又随含水量的增大而减小。压实含水量对内摩擦角 φ 也有影响,大致为低含水量下压实的粘土 φ 值大于高含水量下压实的粘土。

(5)浸水饱和与否对粘聚力 c 值的影响很大,饱和后的粘聚力 c 比饱和前大大降低,且压实含水量低的土体饱和后粘聚力的降低值更大。而内摩擦角 φ 值受饱和状态影响不大,仅是低含水量下压实的粘土 φ 值在饱和后略有减小。

(6)压实含水量以及饱和状态对压缩变形及强度参数产生影响,是因为其引起了土体结构和土中的基质吸力发生改变,是两者的共同作用所致。

参考文献:

- [1] Mitchell J K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.

- [2] Lambe T W. The Engineering Behavior of Compacted Clay [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1958, 84.
- [3] Gulhati S K. Engineering Properties of Soil[M]. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1978.
- [4] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [5] Fredlund D G, Rahardjo H. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] Braja M Das. Principles of Geotechnical Engineering [M]. Pacific Grove, CA: Brooks Cole/Thompson Learning, 2002.
- [7] Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, (22).
- [8] 缪林昌, 刘松玉. 南阳膨胀土的水分特征和强度特性研究[J]. 水利学报, 2002, (7).
- [9] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红粘土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, (3).
- [10] 景宏君, 张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报, 2004, (4).
- [11] JTJ 051—93. 公路土工试验规程[S].
- [12] Sivakumar V, Wheeler S J. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay, Part 1: Wetting and isotropic compression[J]. Geotechnique, 2000, 50 (4).
- [13] Delage P, Audiguier M, Cui Y J, Michael D H. Microstructure of a compacted silt [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, (33).
- [14] Sudhakar M Rao, Revanasiddapa K. Role of soil structure and matric suction in collapse of a compacted clay soil [J]. J. Geotechnical Testing, 2003, 26(1).
- [15] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生. 重塑粘性土的基质吸力与土水分及密度状态的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2).

Effects of Moisture Content on Compression Deformation and Shear Strength of Compacted Clay

HU Hai-ying, WANG Zhao

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The effects of moisture content on the compression deformation and shear strength of a compacted clay by carrying out compression tests and direct shear tests are studied, and the mechanism of the influence from two aspects of soil structure and variation of matrix suction in clay are analyzed. The results of the tests show that with compaction water content increasing, the compression deformation increases, the shear strength decreases and angle of friction also decreases. Cohesion doesn't increase simply with compaction water content increasing, and the curve of cohesion versus compaction water content looks like a shape of “ \sim ”. Soaking leads to a significant increase in compression deformation and a significant reduction in shear strength and cohesion. The lower is compaction water content, the greater is compression deformation and the more loss is shear strength and cohesion by soaking at same other conditions. Angle of friction has few loss by soaking.

Key words: clay; moisture content; compression; cohesion; angle of friction