

文章编号: 1001-1986(2014)05-0077-04

含水量对晋西黄土抗剪强度影响的试验

曹晓毅¹, 李萍²

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 以晋西黄土为研究对象, 采用常规直剪试验和不排水不固结三轴试验, 对不同含水量下土样的抗剪强度参数进行了测定, 得出晋西黄土抗剪强度随含水量变化的规律。试验表明: 直剪试验条件下, 随着含水量的增加, 土的抗剪强度降低。当含水量小于 12%左右时, 随着含水量的增大, 黏聚力 c 降低迅速; 当含水量在 12%~23%时, 随含水量的增大, 黏聚力降低缓慢, 降低幅度较小, 当含水量大于 23%左右时, 随含水量的增大, 黏聚力降低趋势再次变陡; 抗剪强度参数内摩擦角 φ 随着含水量的增大, 变化趋势不明显, 其取值大致在 14° ~ 32° 。三轴不固结不排水剪切试验中, 随着含水量的增加, 抗剪强度参数 c 降低, 在小于 12%含水量时, 降低趋势陡, 大于 12%含水量后, 降低趋势变缓; 内摩擦角 φ 随着含水量的增大呈线性降低, 且相关性较好。

关 键 词: 黄土; 含水量; 抗剪强度; 试验

中图分类号: P642.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.05.015

Experiment study on relationship between water content and shear strength of loess in west Shanxi Province

CAO Xiaoyi¹, LI Ping²

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China;
2. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the direct-shear tests and unconsolidated-undrained triaxial tests, the authors study the relationship between shear strength and water content of loess in West Shanxi Province. The experimental results show that the value of shear strength decreases as the water content increases in direct shear test, when water content is smaller than about 12%, the value of cohesion decreases quickly as water content increases. And with water content between about 12% and 23%, it decreases slowly as the water content increases. When the water content is larger than about 23%, it decreases quickly again. The value of internal friction angle has no obvious change as water content increases. The value of internal friction angle ranges from 14° to 32° . In triaxial compression test, shear strength parameter “ c ” decreases when the water content increases. With the water content less than 12%, the decreasing tendency is steep, and it is slow as the water content is larger than about 12%. With the water content increasing, internal friction angle decreases linearly and has a good correlation.

Key words: loess; water content; shear strength; test

土的抗剪强度参数是边坡工程、路基工程及基坑工程稳定性评价中的关键指标。晋西地区除紫金山、人祖山等孤立山体外, 整个地区表层皆被黄土覆盖。含水量作为影响黄土强度的一个重要因素, 由于降雨入渗或地下水上升, 导致黄土建构筑物基础破坏和黄土边坡失稳等事故频频发生^[1-2], 造成的经济损失和人员伤亡较大。

本文通过直剪试验和不排水不固结三轴试验, 研究了晋西地区含水量变化对黄土抗剪强度的影响

规律, 其结果可用于该区黄土地质灾害预防和边坡设计及稳定性评价。

1 含水量对黄土抗剪强度的影响

目前, 国内外关于含水量对黄土抗剪强度的影响研究主要有 3 种观点。第一种认为: 随着含水量的增加, 黄土的抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均减小, 持有该观点的有刘祖典^[3]、李兆平等^[4]、赵慧丽等^[5]、Drumright 等^[6]和 Rohm 等^[7]。第二种

认为：含水量与抗剪强度之间存在指数关系，持有该观点的有刘春等^[8]、刘熙媛等^[9]。第三种观点认为：随着含水量的增加，黏聚力变化趋势为先升高后降低，摩擦角的变化趋势与黏聚力刚好相反。持有该观点的有曹小平等^[10]、景宏君等^[11]、李保雄等^[12-13]。对于晋西黄土，抗剪强度参数与含水量之间的关系是否为以上结论的一种，还是具有其他规律，本文开展了研究。

2 试验材料与方法

2.1 试验用土的基本物理性质

试验选取土样为晋西地区 Q₂—Q₃ 黄土，土样自野外取回后密封保存，制备试样后先测试原状土的物理指标。本次土样的天然含水量较低，在 5.5%~20.3%，天然密度为 1.48~2.11 g/cm³，相对密度为 2.69~2.72，液限 24.3%~30.4%，塑限 14.9%~19.7%，孔隙比为 0.489~0.980。塑性指数 8.1~13.1，液性指数 $I_L < 0$ ，为坚硬状态。

2.2 试验方法

要测试含水量对抗剪强度的影响，需要测定不

同含水量下土样的抗剪强度，并由此得出强度参数 c、 φ 随含水量的变化规律。黄土在剪切的过程中易出现孔隙水压力，为了保证土样含水量不变化，直接剪切和三轴剪切均采取不固结不排水法。

根据野外取样的数量并结合实际情况，每组试样配制 4 种含水量，分别命名为风干含水率、天然含水率、饱和含水率和介于天然和饱和含水率之间的某一含水率，即为风干、稍湿、饱和及增湿。配置以上 4 种不同的含水量，采取锯末保湿法，具体步骤为：将干锯末放入保鲜盒中，根据试验要求在锯末中加水，将土样用纱布包好放入锯末中同一水平位置，密封保鲜盒，静置一定时间，使土样含水量与锯末保持一致。该方法只按从小到大的序列配置含水量，不能精确按给定的含水量值进行配水。

3 试验结果及数据分析

直剪试验结果见表 1，三轴剪切试验结果见表 2。根据表 1 中数据绘制了直剪试验中含水量与黏聚力及摩擦角的关系(图 1、图 2)。

表 1 直剪试验的含水率与抗剪强度指标列表
Table 1 Water content and shear strength index (direct-shear tests)

编号	含水量 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	含水量分组	编号	含水量 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	含水量分组
H-1	13.6	84	31.1	风干	H-2	4.4	66	18.3	风干
	19.0	71	17.4	稍湿		10.7	20	22.5	稍湿
	20.9	63	15.0	增湿		27.9	17	21.8	增湿
				饱和		28.7	8	27.0	饱和
H-3	10.0	101	1.3	风干	H-4	3.3	88	29	风干
				稍湿		8.5	49	22.3	稍湿
	24.4	38	18.9	增湿		22.1	17	25.5	增湿
	26.6	38	18	饱和		23.3	25	21.5	饱和
H-7	8.5	113	13.1	风干	H-8	9.4	118	27.9	风干
	11.4	76	19.9	稍湿		14.7	83	22.3	稍湿
	23.3	71	14.1	增湿		21.7	79	11.3	增湿
	27.9	32	24.5	饱和		25.5	30	24.7	饱和
H-9	9.7	124	13.3	风干	H-12	8.4	73	18.1	风干
	13.3	73	19.4	稍湿		11.3	43	26.1	稍湿
	25.5	34	21.3	增湿		24.5	49	16.0	增湿
	26.2	57	19.3	饱和		28.4	11	27.0	饱和
H-13	8.4	73	18.1	风干	H-14	9.3	44	25.1	风干
	11.3	43	26.1	稍湿		11.0	43	24.7	稍湿
	24.5	49	16.0	增湿		23.1	17	26.9	增湿
	28.4	11	27.0	饱和		25.6	32	19	饱和
H-15	3.8	156	22.8	风干	H-23	3.4	109	29.0	风干
	9.6	63	26.8	稍湿		12.6	50	22.1	稍湿
	23.9	21	24.2	增湿		22.3	25	25.6	增湿
	25.6	7	28.1	饱和		24.5	7	31.7	饱和

表2 三轴试验的含水量与抗剪强度指标列表
Table 2 Water content and shear strength index(triaxial tests)

编号	含水量 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	含水量分组	编号	含水量 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	含水量分组
H-3	3.2	191.9	34	风干	H-4	3.1	225.8	30	风干
	10.4	78.9	26	稍湿		8.0	121.6	28	稍湿
	20.1	45.4	13	增湿		31.2	15.5	4	增湿
	28.2	28.1	7	饱和		31.8	9	4	饱和
H-5	3.6	131.3	26	风干	H-6	4.9	333.6	32	风干
	5.8	66.8	27	稍湿		15.8	125.8	18	稍湿
	34.0	38.3	1	增湿		26.0	31.3	19	增湿
	36.8	10.9	3	饱和		27.1	50.9	12	饱和
H-7	6.5	105.1	28	风干	H-8	13.1	162.3	29	风干
	11.8	82.3	24	稍湿		25.6	77.2	15	稍湿
	29.1	70.6	12	增湿		28.8	40.3	2	增湿
	32.9	39.9	13	饱和					饱和
H-9	2.0	179.1	44	风干	H-12	8.3	110.3	24	风干
	12.9	121.4	25	稍湿		11.4	97	12	稍湿
	28.5	105.2	1	增湿		19.1	161	23	增湿
	33.5	30.5	3	饱和		34.0	13	9	饱和
H-13	7.7	248.9	33	风干	H-14	8.5	101.9	25	风干
	17.4	60.5	30	稍湿		11.4	99.2	17	稍湿
	26.7	93.2	8	增湿		19.7	78.1	13	增湿
	29.0	14.1	14	饱和		29.8	14	12	饱和
H-15	6.4	232.5	28	风干	H-19				风干
	11.2	80.3	27	稍湿		15.2	69.6	32	稍湿
	21.8	84.5	9	增湿		21.3	68	27	增湿
	31.3	36.8	4	饱和		23.2	59.2	25	饱和

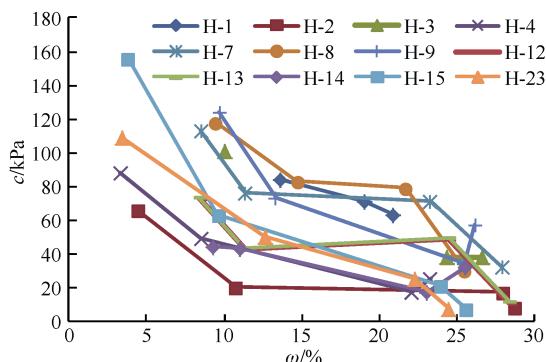


图1 黏聚力与含水量关系图(直剪)

Fig.1 The relationship between cohesion and water content

从图1可以看出,直剪试验条件下,随着含水量 ω 的增大,黏聚力 c 值明显下降,黏聚力从最大值 160 kPa 降低到最小值 0 kPa。同时,纵观所有的曲线,可以发现,含水量在 12% 左右和 23% 左右时曲线有两个拐点。在第一个拐点之前,黏聚力随着含水量的增高迅速降低,在两个拐点之间,随着含水量的增加,黏聚力下降不明显,第二个拐点之后,含水量降低趋势变陡,这与文献[5]的结果是一致的。拐点 1 含水量略小于塑限含水量,拐点 2 含水量介于塑限和

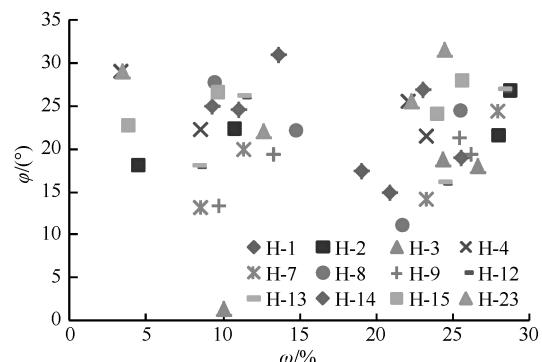


图2 内摩擦角与含水量关系图(直剪)

Fig.2 The relationship between internal friction angle and water content (direct-shear tests)

液限之间,略小于黄土的液限。拐点 1 之前土的黏聚力较高,拐点 1 和 2 之间即塑限和液限之间,土体属于可塑的范围,曲线较平缓,当含水量接近液限时,土样失稳破坏。对于同一组试样,土的黏聚力决定于存在土颗粒之间的胶结物质的胶结作用,土粒间通过黏土矿物、游离氧化物、碳酸盐和有机质等胶体连接在一起,当含水量增大时,这些胶结物质就会逐步溶解在水中,其胶结作用逐渐消失,此阶段黏聚力降低

迅速，而当大部分胶体溶于水之后，含水量的增大，对胶结作用影响较小，黏聚力降低便比较缓慢，即处于曲线的平缓段，当土体含水量继续增大，土体由可塑状态向流性发展，颗粒间由最开始的强结合水，外层结合水变为自由水，导致土体的黏聚力再次迅速降低。

从图 2 中可看出，直剪试验条件下，随着含水量的增加，内摩擦角没有明显的变化趋势，大多数都在 $14^{\circ}\sim32^{\circ}$ 范围内，所以在直剪试验条件下，内摩擦角与含水量不相关。部分研究者在试验过程中，也采用直剪试验测试抗剪强度指标，同样也得出了黄土的内摩擦角和含水量不相关的结论^[4-5]。

据李萍^[14]《黄土路堑边坡稳定性的可靠度研究》的国家自然科学基金结题报告，发现黄土黏粒含量控制着 φ 值的大小，根据该基金项目 266 组数据得出的规律是：随着黏粒含量的增大，内摩擦角外包线中间大，两端小，黏粒含量在 20% 左右内摩擦角出现峰值。根据这一发现，对本次试验数据也进行了分析，将本次试样的黏粒含量和内摩擦角绘制曲线(图 3)，从图中可以看出，本次试验也符合上述规律，在黏粒含量达到 20% 左右内摩擦角出现峰值。同时，邢娇秀^[15]、高凌霞^[16]有关湿陷性与黏粒含量的关系也证明了此观点。出现这种现象是因为黄土是在干旱和半干旱气候下风成的，黏粒含量太多和太少都不易于形成大孔隙的架空结构，而适当含量的黏粒作为胶结物的条件下，可形成大孔隙的架空结构，具有较强的结构性，因而内摩擦角较大。

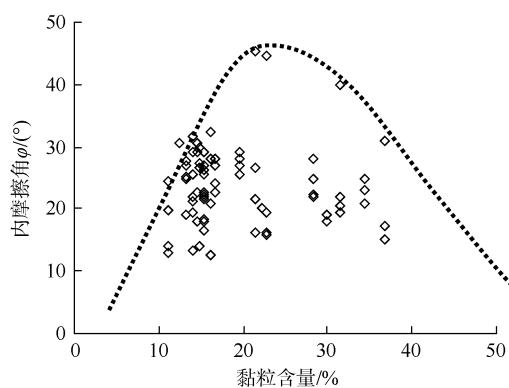


图 3 内摩擦角与黏粒含量关系图(直剪)

Fig.3 The relationship between internal friction angle and clay content (direct-shear tests)

根据表 2 中数据绘制了三轴剪切试验中含水量与黏聚力及摩擦角的关系(图 4、图 5)。

从图 4 可以看出，三轴试验中黏聚力 c 和含水量的关系与直剪试验相似，在含水量小于约 12% 情况下，随着含水量的升高， c 值表现为陡降，当含水量超过 12% 之后，含水量降低缓慢，该曲线与直

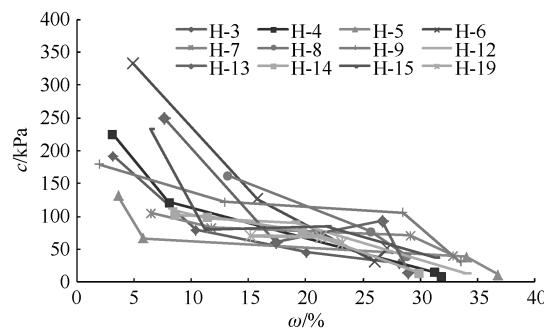


图 4 黏聚力与含水量关系图(三轴)

Fig.4 The relationship between cohesion and water content (triaxial tests)

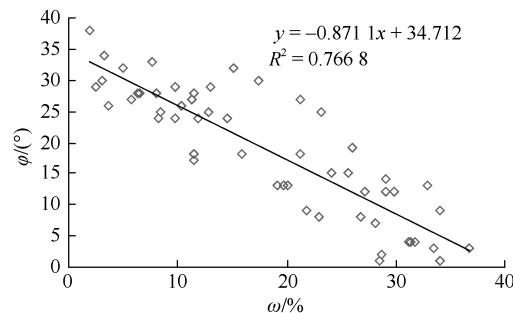


图 5 摩擦角与含水量关系图(三轴)

Fig.5 The relationship between friction angle and water content (triaxial tests)

剪试验黏聚力与含水量曲线比较，直剪试验下含水量与黏聚力曲线中的 2 拐点在三轴试验曲线中略向后偏移，部分试样拐点不明显。总体来说，直剪试验较三轴压缩试验黏聚力与含水量的关系曲线规律更明显，究其原因，因为直剪试验固定了剪切面，导致破坏面单一，所以 c 值影响比较规律。

图 5 是三轴试验中含水量与内摩擦角之间的关系曲线，从图中可以看出，随着含水量的增大，内摩擦角逐渐降低，将其相关关系拟合成一条直线，直线相关性较好。与直剪试验不同，三轴压缩试验没有限制土的侧向变形，土的破坏面不固定，因此内摩擦角与含水量关系明显。

4 结 论

a. 直剪试验条件下，随着含水量的增加，土的抗剪强度降低。抗剪强度参数黏聚力 c 与含水量 ω 的关系曲线呈座椅状。当含水量小于 12% 左右时，随着含水量的增大，黏聚力 c 降低迅速；当含水量在 12%~23% 时，随含水量的增大，黏聚力降低缓慢，降低幅度较小，当含水量大于 23% 左右时，随含水量的增大，黏聚力降低趋势再次变陡。

b. 直剪试验中，抗剪强度参数内摩擦角 φ 随着含水量的增大，变化趋势不明显，其取值大致在

(下转第 99 页)

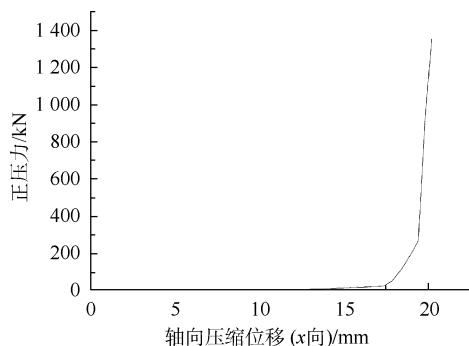


图5 孔壁上的正压力响应

Fig.5 Normal pressure on hole wall

筒的变形情况具有一定的难度。通过计算机非线性有限元分析软件，可对橡胶筒的变形规律、应力分布等情况进行定量分析，从而为注浆器的现场使用提供有益指导。

a. 橡胶筒在孔内轴向压缩过程中，随着压缩位移的持续增加，先与孔壁产生接触应力，然后与内管外壁之间产生接触应力，最后会发生挤出变形。

b. 为保证同时在橡胶筒与孔壁、橡胶筒与内管外壁上产生大于注浆压力的接触应力，以达到封堵作用，且橡胶筒未发生挤出变形以方便橡胶筒的回弹，压缩位移应控制在 17.8~19.4 mm。

在某巷道内开展新的注浆实验表明：依此范围

控制注浆器橡胶筒的压缩量，在大部分钻孔内均实现了有效的封堵，且未发生橡胶筒挤出变形而导致损伤撕裂等情况，有效延长了橡胶筒的使用寿命，提高了注浆器的可靠性和重复使用性。

参考文献

- [1] 付平, 常德功. 密封设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 119-120.
- [2] 张洪信, 管殿柱. 有限元基础理论与 ANSYS 11.0 应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 54-65.
- [3] 周振凯, 徐兵. 橡胶隔振器大变形有限元分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 171-175.
- [4] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005, 15(1): 50-58.
- [5] MOONEY R. A theory of large elastic deformation[J]. Appl Phys, 1940(11): 582-592.
- [6] 刘萌, 王青春, 王国权. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 橡胶工业, 2011, 58: 241-245.
- [7] 黄华元, 刘振兴. 巷道复杂岩层中钻孔原位注浆试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 67-72.
- [8] 赵斌, 王芝银, 伍锦鹏. 矿物成分和细观结构与岩石材料力学性质的关系[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 59-67.
- [9] 王柏生, 尹毅颖. 橡胶 - 地面石材摩擦性能的研究[J]. 材料导报: 研究篇, 2009, 23(9): 113-115.

(上接第 80 页)

14°~32°范围内。绘制内摩擦角与黏粒含量的关系曲线发现，随着黏粒含量的增大，内摩擦角外包线中间大，两端小，黏粒含量在 20%左右内摩擦角出现峰值。

c. 三轴不固结不排水剪切试验中，随着含水量的增加，抗剪强度参数 c 降低，在小于 12%左右含水量时，降低趋势陡，大于 12%含水量后，降低趋势变缓。随着含水量的增大，内摩擦角 φ 呈线性降低，且相关性较好。

参考文献

- [1] 张伟, 张苏民. 非饱和黄土的强度特性[J]. 水文地质工程地质, 1990, 17(4): 22-25.
- [2] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775-779.
- [3] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [4] 李兆平, 张弥, 赵慧丽. 含水量的变化对非饱和土强度影响的试验研究[J]. 西部探矿工程, 2001(4): 1-3.
- [5] 赵慧丽, 张弥, 李兆平. 含水量对北京地区非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2001, 14(4): 30-33.
- [6] DRUMRIGHT E E, NELSON J D. The shear strength of unsaturated tailings sand[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils. Parls. 1995: 45-50.
- [7] ROHM S A, VILAR O M. Shear strength of unsaturated sandy soil[C]. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils. Parls. 1995: 189-195.
- [8] 刘春, 丁力. 非饱和黄土强度特性的常规三轴试验研究[J]. 地质与勘探, 2002, 38(5): 89-91.
- [9] 刘熙媛, 樊申, 窦远明, 等. 河北省非饱和土含水量与抗剪强度参数关系的试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2006, 35(3): 96-99.
- [10] 曹小平, 李保雄. 马兰黄土的水敏感性特征[J]. 甘肃科技, 2004, 20(11): 85-87.
- [11] 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.
- [12] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1003-1008.
- [13] 李保雄, 牛永红, 苗天德. 兰州马兰黄土的水敏感性特征[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 294-298.
- [14] 李萍. 黄土路堑边坡稳定性的可靠度研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [15] 邢姣秀. 影响黄土湿陷性因素分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [16] 高凌霞. 西安地区黄土湿陷性的影响因素[J]. 大连民族学院学报, 2003, 5(1): 66-67.