

# 南水北调中线穿黄工程南岸黄土强度特性研究

邢义川<sup>1</sup>, 李振<sup>2</sup>, 安鹏<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了查明南水北调中线穿黄工程南岸黄土的工程性质, 研究不同工况下的黄土边坡稳定性, 并为后续渠道开挖方案的确定提供设计依据, 对该区域非饱和黄土强度特性进行了试验研究, 内容包括黄土的物理性质试验、饱和黄土三轴 CU 试验、土-水特征曲线试验和非饱和黄土的抗剪试验。试验结果表明, 该区域的黄土为低液限黏土, 粉粒含量较大, 持水能力较差, 吸力内摩擦角  $\varphi^0 = 7.58^\circ$ 。

**关键词:** 南水北调中线; 非饱和黄土; 物理力学试验; 基质吸力; 强度规律

**中图分类号:** TV 68; TV 223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0129-04

## Shear Strength Properties of Loess on South Bank of Crossing the Yellow River Project in the Middle Route of South to North Water Diversion Project

XING Yi chuan<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>2</sup>, AN Peng<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to investigate the characteristics of loess on south bank of crossing the Yellow River Project in the Middle Route of South to North Water Diversion Project, and the slope stability of loess under different working conditions to provide design support for the subsequent channel excavation scheme, the strength tests of unsaturated loess were conducted in the study area. The experimental tests included the tests of physical properties of loess, the CU triaxial tests of saturated loess, the tests of soil water characteristic curve, and the shear tests of unsaturated loess. The results showed that the loess in the study area is clay with low liquid limit, large quantity of silt, low water holding capacity, and a suction internal friction angle of  $\varphi^0 = 7.58^\circ$ .

**Key words:** Middle Route of South to North Water Diversion Project; unsaturated loess; physical mechanics test; matrix suction; shear strength

## 1 研究背景

南水北调中线穿黄工程南岸连接明渠长约 5 km, 位于邙山黄土丘陵区, 为挖方渠道。渠道地面高程 140~181 m, 渠底高程 111~112 m, 边坡高度 20~60 m; 地下水位高程约 102~140 m, 埋深约 4~61 m。边坡地层主要为中更新统冲积层(alQ<sub>2</sub>)、上更新统冲积层(alQ<sub>3</sub>)和全新统冲积层(alQ<sub>4</sub>)。

在桩号 4+500 以北, 边坡高度超过 40 m, 原始地下水高出渠底约 30 m, 施工期将采用井点降水和施工开挖形成临空面降低地下水位, 但由于边坡黄土渗透系数较小, 降水之后边坡土体的含水率依然较高, 抗剪强度指标较低。为了查明穿黄工程南岸黄土的工程性质, 研究不

同工况下的黄土边坡稳定性, 并为后续渠道开挖方案的确定提供设计依据, 迫切需要开展该区的非饱和黄土强度试验研究。

根据现场实际情况, 选取 alQ<sub>3</sub> Á<sub>-1</sub>、alQ<sub>3</sub> Á<sub>类</sub> 两层黄土土样进行室内试验。

## 2 土样的物理性质

土粒比重用比重瓶法测定, 颗粒分析采用密度计法测定, 土的界限含水率采用液塑限联合测定法测定, 试验结果<sup>[1]</sup>见表 1。

原状土样的密度采用环刀法测定, 含水率采用烘干法测定。试验结果为: Á<sub>类</sub> 层原状土样的含水率平均值为 21.2%, 干密度的平均值为 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 孔隙比的平均值为

收稿日期: 2013-06-15 修回日期: 2014-01-15 网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.003.html>

作者简介: 邢义川(1956-), 男, 陕西镇安人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: xingyech@iwhr.com

0.85, 孔隙率的平均值为 45.9%, 饱和度的平均值为 67.0%;  $\dot{A}_{-1}$  层原状土样的含水率平均值为 14.4%, 干密度

的平均值为  $1.43 \text{ g/cm}^3$ , 孔隙比的平均值为 0.88, 孔隙率的平均值为 46.8%, 饱和度的平均值为 44.0%。

表 1 黄土样物理性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of loess

土样 编号	比重 $G_s$	液限(%) $W_L$	塑限(%) $W_P$	塑性指数 $I_P$	颗粒组成(%)			不均匀系数 $d_{60}/d_{10}$	曲率系数 $d_{30}^2/(d_{60} \times d_{10})$	土壤类别
					砂粒	粉粒	黏粒			
					2~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm			
$\dot{A}_{夹}$	2.68	30.1	17.6	12.5	12.5	72.0	15.5	22.67	5.02	低液限黏土(CL)
$\dot{A}_{-1}$	2.69	29.8	17.2	12.6	10.0	74.5	15.5	21.33	4.69	低液限黏土(CL)

### 3 饱和黄土的强度参数

分别对两个黄土层( $\dot{A}_{-1}$ 、 $\dot{A}_{夹}$ )的土样各进行了 3 组三轴固结不排水剪切试验。试样采用抽气饱和, 饱和度均大于 98%。通过整理得到:

$\dot{A}_{夹}$  层饱和黄土的总应力强度指标  $c = 31.8 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 12.8^\circ$ , 有效应力强度指标  $c' = 17.2 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 27.2^\circ$ 。

$\dot{A}_{-1}$  层饱和黄土的总应力强度指标  $c = 25.1 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 12.6^\circ$ , 有效应力强度指标  $c' = 17.5 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 27.4^\circ$ 。

### 4 土-水特征曲线试验

土-水特征曲线试验采用的仪器为美国进口的压力板仪, 具有进气值 15 bar(约相当于 1.5 MPa)的陶土板, 陶土板下的底板上设有一排水管, 供土样排水之用, 陶土板和底板在试验过程中紧密连接在一起。

试验前, 首先对压力板(陶土板)采用无汽水浸泡饱和, 浸泡时间在 10 d 以上; 之后, 将高为 2 cm、直径为 6.18 cm 的圆形试样放入压力板仪中, 并使试样与陶土板紧密结合; 连接好底板与压力板仪侧壁上的排水管, 然后盖上盖板并上紧螺栓, 开始进行试验。

试验时, 采用调压系统分别按 5 kPa、10 kPa、20 kPa、35 kPa、50 kPa、80 kPa、145 kPa、250 kPa、400 kPa、500 kPa、770 kPa 十一级压力对压力板仪内的试样施加气压力。同一级压力下, 测定试样的排水量的变化。在 48 h 内连续两次测定的试样失水重量小于 0.01 g 时, 认为在该压力下, 试样的持水能力(基质吸力)与压力室内的气压力平衡。测记试样的重量后, 再进行下一级压力下的试验。试验结果见图 1 和图 2。

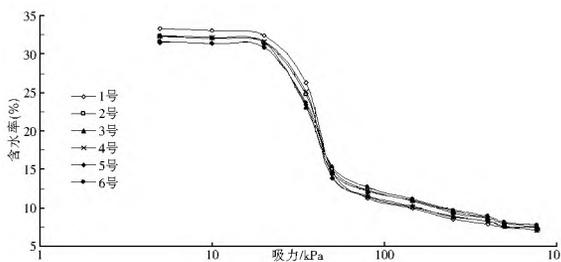


图 1  $\dot{A}_{-1}$  号土样土-水特征曲线

Fig. 1 Soil water characteristic curves of  $\dot{A}_{-1}$  soil samples

从图 2 和图 3 可以看到, 两层土样的土-水特征曲线其形状和变化规律完全相同, 即随着基质吸力的增大含水率减小。在吸力约为 20 kPa 以前和吸力大于 50 kPa 以后, 试样的含水率变化不大; 而在 20 kPa 到 50 kPa 之间, 试样的含水

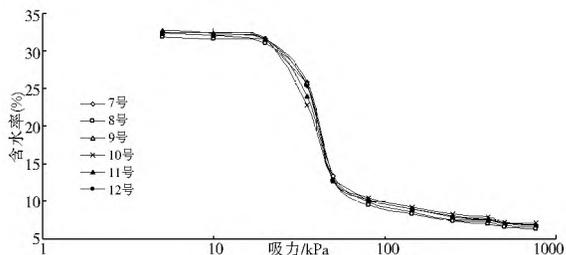


图 2  $\dot{A}_{夹}$  号土样土-水特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curves of  $\dot{A}_{夹}$  soil samples

率变化很大,  $\dot{A}_{夹}$  土层的土样在该吸力范围内含水率的减小量占全部减小量约 71.8%,  $\dot{A}_{-1}$  土层的土样在该吸力范围内含水率的减小量占全部减小量约 67.1%。

从试验结果可以看到, 含水率减小量较大而所需的压力变化范围却较小, 这是由于两个土层的土样均以粉粒和砂粒为主, 其含量已达到了 84.5%。一般粉粒和砂粒的持水能力较差, 在较小压力作用下, 土样粉粒和砂粒中的水分很容易被排出。在试验过程中, 饱和土样粉粒和砂粒的某一持水能力在较小的压力下就能与压力室内的气压力平衡, 因而相应的基质吸力的变化范围就较小。

### 5 非饱和黄土的强度试验研究

#### 5.1 试样制备

采用切削制样, 试样尺寸为  $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ , 制样饱和度为 32.3%、44.0%、55.1% 和 75.3%, 原状样含水率为 14.4%, 饱和度为 44.0%。

#### 5.2 试验方法简介

试验仪器为自己研制的非饱和土三轴仪<sup>[2]</sup>。

选择  $\dot{A}_{-1}$  土层土样进行非饱和土常吸力三轴剪切试验, 饱和度分别采用试样制备饱和度; 对于每个饱和度, 控制试验净围压分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa; 对于每个净围压, 吸力分别按 30 kPa、60 kPa、90 kPa、150 kPa 进行控制。

具体试验步骤为: (1) 陶土板饱和及传递水压的管路充水<sup>[2]</sup>; (2) 装试样<sup>[2]</sup>; (3) 量测试样初始状态孔隙水压力, 安装试样的同时, 通过水压传感器测定试样初始状态孔隙水压力, 直到孔隙水压力不变为止; (4) 试样固结。固结时间约 12 h, 固结稳定标准为每小时体积变化量不超过 0.05 mL; (5) 剪切。剪切速率为 0.0064 mm/min, 剪切过程中始终保持孔隙水出口与试样中部在同一水平面上, 并与大气相通; 剪切过程中记录轴向变形, 外体变及剪应力值。

### 5.3 非饱和黄土的强度

#### 5.3.1 试样初始吸力

每个试样在装样后都测了初始吸力,从试验结果可以看到,随着饱和度的增大,初始吸力稳定值逐渐减小,饱和度分别为 32.3% (含水率约 10.6%)、44.0% (含水率约 14.4%)、55.1% (含水率约 17.5%)、75.3% (含水率约 24.4%),试样初始吸力稳定后的平均值分别约为 88.0 kPa、55.0 kPa、50.0 kPa、27.0 kPa;各饱和度下试样的初始吸力稳定值分别与土-水特征曲线上相对应含水率下的吸力值相一致。

#### 5.3.2 非饱和黄土的抗剪强度

目前最常用的非饱和土抗剪强度计算公式是弗雷德隆德(Delwyn G. Fredlund)提出的<sup>[3]</sup>,为:

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

表 2 各级围压下的及抗剪强度指标

Table 2 Shear strength values and  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  at different levels of confining pressure

初始饱和度 (%)	平均干密度 / (g · cm <sup>-3</sup> )	吸力 / kPa	净围压 $(\sigma_3 - u_a)_f$ / kPa				凝聚力 / kPa	内摩擦角 (°)
			100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		
32.3	1.42	30	278.95	453.19	597.30	854.63	21.98	29.03
	1.42	60	258.89	455.20	630.65	802.98	25.30	28.35
	1.43	90	321.50	486.89	730.90	923.90	29.09	30.46
	1.43	150	295.27	476.36	632.13	824.13	36.56	27.76
44.0	1.41	30	280.68	414.38	627.90	796.18	26.56	27.96
	1.43	60	277.09	438.42	584.52	790.58	30.47	27.27
	1.44	90	290.14	420.36	633.45	766.58	35.39	26.87
	1.45	150	341.58	547.37	748.38	952.38	39.92	30.27
55.1	1.44	30	251.54	406.43	570.00	751.34	24.15	27.01
	1.45	60	295.58	515.95	679.63	895.79	30.45	29.73
	1.45	90	291.10	482.15	683.72	835.90	33.68	28.62
	1.47	150	294.03	486.48	644.74	825.52	37.44	27.85
75.3	1.42	30	223.73	379.35	522.68	689.28	21.53	25.79
	1.43	60	229.17	418.30	581.41	718.91	24.00	26.74
	1.44	90	314.60	551.79	730.01	971.45	29.25	31.22
	1.46	150	294.67	470.76	650.24	812.67	37.39	27.67

从表 2 中可以看到,在相同围压作用下,相同初始饱和度的土样随着吸力的增大,其极限强度基本上呈增大的发展趋势,但增加的量并不大;在相同吸力作用下,相同初始饱和度土样的极限强度随着围压的增大呈线性规律增大;相同初始饱和度下,试样的凝聚力随着吸力的增大也几乎呈线性规律增大,而摩擦角的变化规律并不明显。从 4 个不同饱和度试样的试验结果看,摩擦角几乎在 25.79°~31.22° 之间变化,大部分在 28.0° 左右,其平均值约为 28.3°,这个摩擦角的大小与该土的饱和三轴 CU 试验得到的有效内摩擦角  $\phi' = 27.4^\circ$  相近。

在同一初始饱和度下,以凝聚力为纵坐标,基质吸力为横坐标,进行绘图(图 3),并对各点进行线性拟合,直线的倾角为试样在该饱和度下的  $\phi^b$ ,则本次试验各饱和度下的  $\phi^b$  见表 3。可以看到,不同初始饱和度下的值变化不大,约等于 7.58°。

### 6 基质吸力对抗剪强度影响分析

分别取含水率 11%、14.4% (天然含水率)、17.2% (塑限含水率)、29.8% (液限含水率)、32.8% (饱和含水率),在土-水特征曲线(图 1)上分别查得对应的基质吸力为 90 kPa、

式中:  $\tau_f$  为非饱和土土样破坏时破坏面上的剪应力;  $c'$  为饱和土的有效黏聚力;  $(\sigma_f - u_a)_f$  为土样破坏时在破坏面上的净法向应力;  $u_a$  为土样破坏时在破坏面上的孔隙气压力;  $\phi'$  为饱和土的有效内摩擦角;  $(u_a - u_w)_f$  为土样破坏时在破坏面上的基质吸力;  $\phi^b$  为吸力内摩擦角,表示抗剪强度随基质吸力  $(u_a - u_w)_f$  而增加的速率。

在不同饱和度情况下的应力应变关系试验曲线上,取轴向应变为 15% 对应的主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  作为强度破坏值;对于同一个初始饱和度,同一个吸力,用不同围压破坏值的净大主应力  $(\sigma_y - u_{af})$  和净小主应力  $(\sigma_z - u_{af})$  在  $\tau - (\sigma - u_a)$  平面内绘制 Mohr 圆(即以  $(\sigma_1 + \sigma_3)_f / 2 - u_{af}$  为圆心,以  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$  为半径),做各 Mohr 圆的公切线,切线与剪应力  $\tau$  轴的截距为非饱和黄土的黏聚力  $c$ ,结果见表 2。

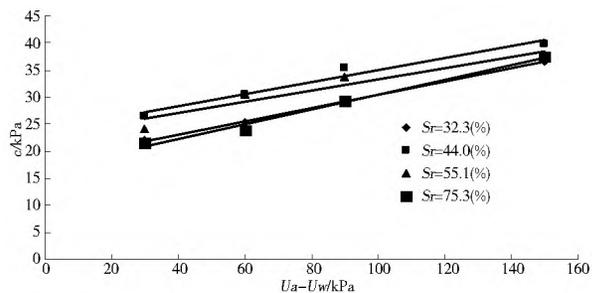


图 3 非饱和黄土的凝聚力与吸力的关系曲线

Fig. 3 Relationship between cohesion and suction of unsaturated loess

表 3 初始饱和度与  $\phi^b$  关系

Table 3 Relationship between  $\phi^b$  and initial saturation

初始饱和度 (%)	$\phi^b$ (°)	$\phi^b$ 均值 (°)
32.3	7.15	7.58
44	8.15	
55.1	7.47	
75.3	7.56	

50 kPa、45 kPa、22 kPa、0 kPa。然后同有效应力强度指标  $c' = 17.5 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 27.4^\circ$ ,  $\psi = 7.58^\circ$  一起代入抗剪强度式计算, 结果见表 4。

表 4 不同含水率土样在不同净法向应力下的抗剪强度

Table 4 Shear strengths under different soil net normal stresses of soil samples with different water contents

$\phi / \text{kPa}$	含水率 $w(\%)$				
	11	14.4	17.2	29.8	32.8
20	39.8	34.5	33.8	30.8	27.8
50	55.4	50.1	49.4	46.3	43.4
100	81.3	75.9	75.3	72.3	69.3
200	133	127	127	124	121
300	184	179	178	175	173

将表 4 中计算结果用基质吸力对黄土强度的贡献率表示为  $\delta = (\tau_f - \tau_{f0}) / \tau_{f0}$ , 见图 4。

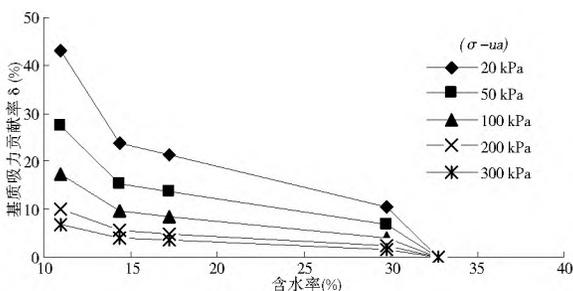


图 4 不同净法向应力下基质吸力贡献率与含水率的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of  $\delta$  and

water content under different net normal stresses

从图 4 可以看出, 基质吸力的贡献率随着含水率的增加而减小, 含水量在天然状态 (14.4%) 时, 基质吸力强度贡献率最大; 当土处于饱和时, 基质吸力为零。在净法向应力较小时基质吸力对强度的贡献较大; 随着净法向应力的增大, 基质吸力对强度的贡献程度逐渐减弱。对于南水北调中线穿黄工程南岸挖方渠道高边坡, 地下水位较高的黄土地区, 由于黄土的粉粒、细砂粒含量高, 持水能力差, 水易于排出, 而且含水量变化对强度的影响较大, 特别是在低应力条件下更为显著, 所以该处施工采用抽排地下水的方法是合适的。

## 7 结论与建议

(1) 试验结果表明, 现场取回的  $A_{-1}$  和  $A_{夹}$  两层黄土土样

的物理力学性质基本一样。

(2) 通过  $A_{-1}$  和  $A_{夹}$  两层饱和黄土的三轴固结不排水剪切试验, 建议  $A_{夹}$  黄土层强度参数选取为:  $c = 31.8 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 12.8^\circ$ ;  $c' = 17.2 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 27.2^\circ$ ; 建议  $A_{-1}$  黄土层强度参数选取为:  $c = 25.1 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 12.6^\circ$ ;  $c' = 17.5 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 27.4^\circ$ 。

(3) 土-水特征曲线反映了土体基质吸力随含水率变化的特性, 本次试验曲线规律性较好, 其特点是基质吸力在 0~20 kPa、50~770 kPa 这两个范围内含水率变化不大, 而在 20 kPa~50 kPa 之间, 试样的含水率变化很大, 反映出该两层土以粉粒和砂砾为主 (其含量已达到了 84.5%), 具有持水能力较差的特性。

(4) 通过对  $A_{-1}$  土层非饱和黄土三轴剪切试验资料进行整理, 得到该层非饱和黄土强度参数  $\psi = 7.58^\circ$ 。

(5) 南水北调中线穿黄工程的黄土易于排水, 且在低应力下基质吸力对黄土强度贡献率显著, 因此采用抽排地下水的施工办法是合适的。

## 参考文献 (References):

[1] SL 237-1999, 土工试验规程[S]. (SL 237-1999, Specification of Soil Test[S]. (in Chinese))

[2] 邢义川, 吴培安, 骆亚生. 非饱和和原状黄土三轴压缩试验方法研究[J]. 水利学报, 1996, (1): 47-52. (XING Yi chuan, WU Pei an, LUO Ya sheng. Triaxial Test on Undisturbed Unsaturated Loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (1): 47-52. (in Chinese))

[3] Delwyn G · Fredlund, Harianto Rahardjo. 非饱和土力学[M]. 中国建筑工业出版社, 1997. (DELWYN G · Fredlund, HARIARTO Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))

[4] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的抗剪强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1-6. (MIAO Lin chang, YIN Zong-ze. Shear Strength of Unsaturated Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 1-6. (in Chinese))

[5] 仲晓晨. 吸力在非饱和土强度中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(5): 11-13. (ZHONG Xiao chen. Effect of Suction Force on the Strength of Unsaturated Soil[J]. Water Resources and Hydropower Technology Progress, 2003, 23(5): 11-13. (in Chinese))

(上接第 70 页)

[5] 王四巍, 于怀昌, 高丹盈. 塑性混凝土弹性模量室内试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 73-76. (WANG Si wei, YU Huaì chang, GAO Dan ying. Experimental Study on Plastic Modulus of Elasticity Concrete[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(3): 73-76. (in Chinese))

[6] 过镇海. 混凝土的强度和变形试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 12-15. (GUO Zhen hai. The Test of Bar

sis and Constitutive Relation Concrete Strength and Deformation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 12-15. (in Chinese))

[7] Sargin M. Stress-strain Relations for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections[Z]. Canada, 1971.

[8] Hongstad E. Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design[J]. Journal of ACI, 1955, (12): 455-479.