含水量对黄土结构强度影响的定量分析

张伯平[1] 袁海智[2] 王 力[3]
(1.3西北农业大学水利系与建筑工程系,陕西杨陵·712100)
(2石门水库管理局,陕西汉中·72300)

摘 要 分析了黄土强度的特点和各种影响因素,并以杨陵地区渭河北台原黄土为例,对影响黄土强度的主要因素,即黄土的结构强度和含水量对强度的影响进行了试验研究,探讨了不同生成时代风成黄土的结构强度与含水量的关系,建立了黄土结构强度随含水量变化的回归关系。

关键词 黄土,结构强度,含水量,原状土,重塑土,抗剪强度
中图分类号 Tu444,Tu432

众所周知,由于黄土的特殊生成与存在的历史和环境,使得黄土具有低容重、低含水、柱状节理发育、大孔隙结构明显等特点,所以天然原状黄土当其含水量很低时,表现出很高的强度,但当其受到水的强烈作用后,强度显著降低,往往对工程造成很不利影响,很多地区在连阴雨季节多发生黄土滑坡现象就是这种情况的反映。近年来很多学者分别从各个方面做了很多工作,从各种不同的侧面说明含水量的变化对黄土强度的影响。作者是在前人研究的基础上分析了黄土强度的特点和各种影响因素,并以杨陵渭河北台原黄土为例,对其主要影响因素进行了试验研究,探讨了黄土的强度与其结构强度和含水量变化的关系,从而得出评价结构强度的定量分析。

1 黄土强度的理论分析

黄土是西北地区重要区域性土类,影响黄土强度的因素较多,如黄土成因、时代、结构特性、密度和含水量以及试验方法等。为了便于研究,简化影响因素,我们取一地区同一部位(成因、时代均相同)的黄土进行试验研究,在此情况下,影响强度的主要因素就是黄土的结构性,含水量和试验方法,下面仅就这些影响因素分别进行研究分析。

黄土由于其成因和生成及存在的历史条件使其具有显著的结构性,结构性与欠压密状态同时存在是黄土区别于其他土类的基本特征。黄土的强度应是这些基本特性的反映。按灵敏度的概念,黄土属于高灵敏度土体,即当天然黄土的原始结构被破坏后,其强度显著降低,从这个概念分析,黄土强度应包括两部分,其中一部分是由黄土结构所具有的强度;另一部分是正常压密情况下的强度。我们称黄土由其结构影响的强度为结构强度,正常压密情况下的强度为正常压密强度,它不受结构的影响。

所谓结构强度是指原状黄土由于其原始结构(即天然结构)形成的强度,其大小取决于黄土的微结构胶结和固结情况,当土体在外界营力作用下结构被破坏后,其结构强度相

收稿日期:1993-03-03.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应丧失。结构强度的定量分析可以用天然原状黄土与重塑黄土(同密度同含水量)的无侧限抗压强度的差值表示)。

即
$$\triangle q = q_u - q'_u \tag{1}$$

式中：$\triangle q$——表示黄土的结构强度(KPa)

q_u，q'_u——黄土无侧限抗压强度(KPa)

一般粘性土所具有的抗剪强度(即剪切强度)仍按传统的方法用库仑公式表示，即
$$\tau = \sigma \lg\varphi + C \tag{2}$$

式中：τ，σ——分别为土体抗剪强度和剪切时受到的法线应力(KPa)

φ，C——土体的抗剪强度参数

按以上分析，讨论含水量对黄土强度影响问题时分为二方面问题讨论，一方面是讨论含水量对黄土结构强度的影响，另一方面是讨论含水量对黄土剪切强度的影响。

2　含水量对黄土结构强度的影响

为了研究含水量对黄土结构强度的影响，我们分别对杨陵地区渭河北台原 Q_2 黄土和 Q_3 黄土进行了原状黄土与同含水、同密度下黄土重塑土的无侧限抗压强度试验。

Q_2 黄土取样于渭河北台原半坡地形地面下7m左右深度，土样外观特征呈褐黄色，土质均匀、针状大孔发育、有虫孔、根孔和钙质结核，基本土性指标和无侧限抗压强度试验结果见表1和表2.

表1　Q_2 黄土基本物理性质指标

天然含水 W(%)	天然密度 ρ(g/cm³)	比　重 G	孔隙比 e	流　限 WL(%)	塑　限 $W\rho$(%)	塑性指数 IP
11～21	1.53～1.56	2.72	1.09	33	21	12

表2　Q_2 黄土无侧限抗压强度试验结果

含水量 W(%)	干密度 ρd(g/cm³)	无侧限抗压强度峰值		结构强度 $\triangle q$(KPa)	$lg\triangle q$
		原状土 q_u(KPa)	重塑土 q'(KPa)		
15.23	1.43	269.0	85.5	183.5	2.26
17.00	1.41	232.0	83.0	149.0	2.17
17.60	1.39	221.1	82.0	142.2	2.15
18.85	1.43	204.6	78.9	122.7	2.09
21.20	1.39	169.6	69.8	99.8	2.00
22.10	1.38	147.9	59.5	88.4	1.95
24.03	1.39	101.5	22.6	78.9	1.90

Q_3 黄土取样于杨陵地区渭河北台原原顶地面下6m左右深度，该土样外观特征呈淡黄色，土质均匀、针状小孔发育，白色钙质粉末较多，有植物根须出现，基本土性指标和无侧限抗压强度试验结果见表3和表4.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 Q_3黄土土体基本物理性质指标

天然含水 W(%)	天然密度 ρ(g/cm³)	比 重 G	孔隙比 e	流 限 W_L(%)	塑 限 $W\rho$(%)	塑性指数 IP
19～21	1.67	2.71	0.95	30	20	10

表4 Q_3黄土无侧限抗压强度试验结果

含水量 W (%)	干密度 ρd(g/cm³)	无侧限抗压强度峰值		结构顶度 $\triangle q$(KPa)	$lg\triangle q$
		原状土 q_u(KPa)	重塑土 q_u'(KPa)		
14.0	1.35	249.1	110.5	138.6	2.142
20.0	1.37	159.2	63.7	95.5	1.978
20.6	1.34	156.2	83.3	72.8	1.862
21.1	1.44	184.4	108.9	75.5	1.878
22.4	1.35	80.5	40.5	40.0	1.602
24.0	1.35	65.8	24.2	41.6	1.613

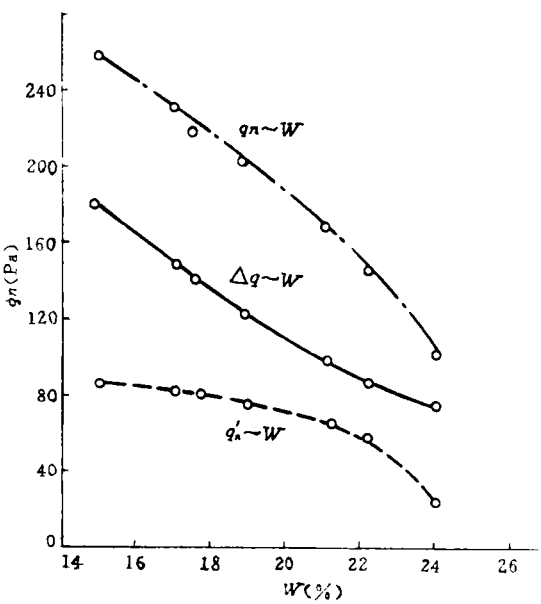

图1 q 与含水量变化的关系

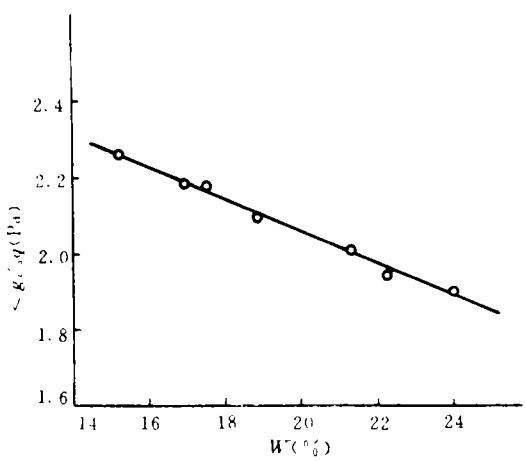

图2 $lg\triangle q$ 随含水量的变化

将表2中结果用图表示如图1(为了节省篇幅只用Q_2黄土资料表示规律),图中曲线表明,随着含水量的增大,无侧限抗压强度 q_u 与q_u' 值均逐渐减少,且原状黄土的 q_u 值随含水量变化的影响远大于重塑土样,这说明黄土结构强度受含水量的影响非常敏感。分析其原因,黄土的结构强度应包括黄土原始结构联结强度,存在历史上受上覆土层和荷载形成的固结强度和黄土土体中胶结盐类、水溶盐粒子形成的胶结强度以及或多或少存在于土中的毛细压力产生的假粘聚力。这些联结强度的大小都与土体含水量的大小直接有关,当土体含水量增大时,土粒表面结合水膜变厚和水分在土粒间的大量楔入,使土体原始结构被破坏,原始结构强度和固结强度变小;颗粒间的胶结盐类被水溶解而联结强度逐渐减弱,土体中毛细压力产生的假粘聚力丧失,黄土中原有的结构强度迅速减少,可以设想,当黄土中含水量增大到一定程度,黄土的结构强度将接近于零。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对表中$\triangle q$取对数，将$\lg\triangle q$与含水量变化的关系用图2表示（限于篇幅，文中只用Q_2黄土的资料作图表示，后文类似），可以看出$\lg\triangle q$随含水量变化的关系曲线近似直线。为了说明问题，将表2和表4中数据经相关分析得

对Q_2黄土

$$\lg\triangle q = 2.877 - 0.041\omega$$
$$\gamma = -0.997$$

和对Q_3黄土

$$\lg\triangle q = 2.97 - 0.055\omega$$
$$\gamma = -0.904$$

由此可见，$\lg\triangle q$随含水量的变化呈很好的负相关关系，从该关系可以推算，对天然原状黄土当土体含水量增大5%，则该黄土结构强度将降低40%左右，所以含水量的变化对天然原状黄土的结构强度影响甚为显著。

3　含水量对黄土抗剪强度的影响

对于无原始结构影响的黄土的研究可以用黄土重塑土进行。为此，我们对前述的两种土体Q_2和Q_3黄土分别进行了原状的和重塑的土样直剪（快剪）试验，试验土样的基本土性和制样情况与前述相同，试验结果见表5和表6.

表5　Q_2黄土直剪（快剪）试验结果

含水W（%）	干密度ρd(g/cm³)	原状土				重塑土			
		C(KPa)	$\lg C$	φ(度)	$\lg\varphi$	Cs(KPa)	$\lg Cs$	φ(度)	$\lg\varphi$
15.67	1.44	86	1.93	26.9	1.43	1.76	26.8	1.43	
17.33	1.42	73	1.86	24.2	1.38	48	1.68	23.0	1.36
20.49	1.43	60	1.78	23.5	1.37	43	1.63	22.2	1.35
22.30	1.44	53	1.72	22.0	1.34	38	1.58	21.7	1.34
24.27	1.44	50	1.70	19.8	1.30	37	1.57	19.3	1.29

表6　Q_3黄土直剪（快剪）试验结果

含　水 W(%)	干密度ρd(g/cm³)	原状土				重塑土			
		C(KPa)	$\lg C$	φ(度)	$\lg\varphi$	Cs(KPa)	$\lg Cs$	φ(度)	$\mathrm{tg}\varphi$
15.50	1.38	73	1.86	28.5	1.45	50	1.70	26.6	1.42
19.85	1.39	53	1.72	23.8	1.38	37	1.57	23.9	1.38
20.35	1.35	52	1.71	20.0	1.30	40	1.60	19.5	1.29
20.86	1.44	60	1.78	21.8	1.34	48	1.64	21.0	1.32
22.00	1.35	30	1.48	15.0	1.18	23	1.36	14.5	1.16
24.00	1.25	20	1.30	13.0	1.11	14	1.15	11.0	1.04

表5和表6结果表明，随着含水量的变化，原状黄土和重塑黄土的抗剪强度参数都在变化，若将内摩擦角φ值用$\lg\varphi$表示，将粘结力系数用对数表示（表5和表6），可以画出它们的变化曲线（如图3）

图3中各点近乎线性关系，用相关分析可得：

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对 Q_2黄土

$$\lg C = 2.34 - 0.027\omega \qquad \gamma = -0.988$$
$$\lg Cs = 2.08 - 0.022\omega \qquad \gamma = -0.968$$
$$\lg\varphi = 1.61 - 0.013\omega \qquad \gamma = -0.922$$

对于 Q_3黄土

$$\lg C = 2.94 - 0.064\omega \qquad \gamma = -0.855$$
$$\lg Cs = 2.75 - 0.061\omega \qquad \gamma = -0.83$$
$$\lg\varphi = 2.15 - 0.043\omega \qquad \gamma = -0.89$$

以上分析表明黄土的粘接力的对数值与含水量的变化呈较好的线性关系，内摩擦角的正切函数值与含水量的变化也近似直线关系。

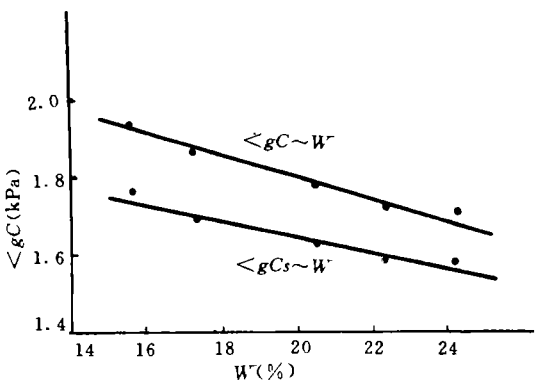

图3 lg$C$ 与含水量的变化关系

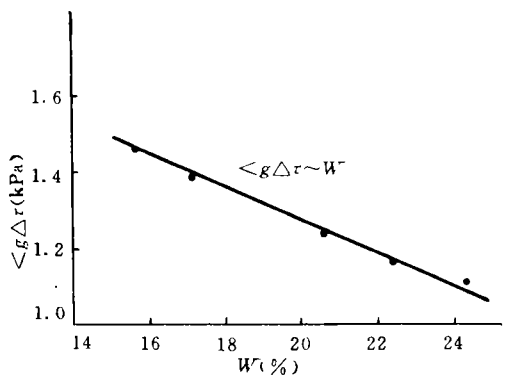

图4 Q_2黄土 lg$\triangle\tau$ 随含水变化

4 结构强度与抗剪强度的关系

从表5和表6还可看出，当土体含水量不变时，原状黄土与重塑黄土的内摩擦角几乎相等，而粘结力系数的差异较大，这反映了由土粒间内摩擦和咬合力构成的土体内摩擦角的大小与土体结构性关系甚微，相反地黄土的粘结力系数受黄土的结构性的影响却很敏感，所以当原状黄土的结构被破坏后，其 C 值就大大降低。

根据库仑定律 $\tau=\sigma\lg\varphi+C$，可以将同含水，同密度的黄土原状土与重塑土的抗剪强度之差写为下式：

$$\triangle\tau = (\sigma\lg\varphi + C) - (\sigma\lg\varphi s + Cs)$$
$$= \sigma(\lg\varphi - \lg\varphi s) + (C - Cs)$$

式中：$\triangle\tau$——原状黄土与重塑黄土抗剪强度之差；

C，φ——原状黄土抗剪强度参数；

Cs，φs——重塑黄土抗剪强度参数。

由上述已知，土体原始结构的丧失对黄土内摩擦角影响甚微，即 $\lg\varphi-\lg\varphi_s=0$，因此当垂直压力较小时可得 $\triangle\tau=C-C_s=\triangle C$，将不同含水量土样的 $\triangle\tau)\approx\triangle C)$ 取对数（如表7和表8），并将 lg$\triangle\tau$ 随含水量变化的关系用图（如图4）表示，可以看出 lg$\triangle\tau$ 与含水量变化

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的关系也近似直线，经相关分析：

对 Q_2黄土　　$\lg\triangle\tau=2.13-0.043\omega$　　$\gamma=-0.996$

对 Q_3黄土　　$\lg\triangle\tau=2.25-0.058\omega$　　$\gamma=-0.853$

比较同类土的结构强度与含水量变化的相关方程，

对 Q_2黄土　　$\lg\triangle q=2.897-0.041\omega$　　$\gamma=-0.997$

对 Q_3黄土　　$\lg\triangle q=2.97-0.055\omega$　　$\gamma=-0.904$

可以看出 $\lg\triangle\tau$ 与 $\lg\triangle q$ 随含水量变化规律方程的系数差异很小，相关系数也很接近，这表明二者之间有着密切的关系，把二者随含水量变化的关系列在同一表上比较（如表7和表8），很能说明问题。

表7和表8表明，对于同一黄土，$\triangle\tau$ 与 $\triangle q$ 的比值几乎是一个常数，不受含水量变化的影响。本文中的计算比值仅是结构强度与直剪快剪试验 $\triangle\tau$ 的比值，对于其他试验设备和试验方法的比值有待进一步试验研究。

表7　Q_2黄土结构强度与剪切强度比较

含水量 W(%)	干密度 ρd(g/cm³)	结构强度 $\triangle q$(KPa)	$\triangle\tau=C-Cs$ (KPa)	$\lg\triangle\tau$	$\triangle\tau/\triangle q$
15.67	1.44	176.7	29.0	1.46	0.164
17.33	1.42	147.7	24.5	1.39	0.166
20.49	1.43	104.3	17.0	1.23	0.163
22.30	1.44	88.0	14.5	1.16	0.165
24.07	1.44	78.2	13.0	1.11	0.165

表8　Q_3黄土结构强度与剪切强度比较

含水量 W(%)	干密度 ρd(g/cm³)	结构强度 $\triangle q$(KPa)	$\triangle\tau=C-Cs$ (KPa)	$\lg\triangle\tau$	$\triangle\tau/\triangle q$
14.0	1.35	138.6	23.0	1.36	0.166
20.0	1.37	95.5	16.0	1.20	0.167
20.6	1.34	72.8	12.0	1.08	0.167
21.1	1.44	75.5	12.0	1.20	0.161
22.4	1.35	40.0	6.6	0.82	0.165
24.0	1.25	36.4	6.0	0.77	0.165

5　小　结

1）黄土的强度是工程上常遇到的一个很复杂的重要问题，受黄土成因、时代、微结构特征，物理性质以及试验方法等因素的影响。对于同一地点的黄土，在容重相近的情况下，含水量是影响其强度的重要因素。本文通过室内无侧限和直剪试验对 Q_2和 Q_3黄土的强度进行了系统的试验研究。并建立了 $\lg\triangle q-W$ 和 $\lg\triangle\tau-W$ 等的回归线性关系，具体说明了含水量是影响黄土结构强度的重要因素。

2）在相同容重不同含水量情况下，$\triangle\tau/\triangle q$ 的比值相同，表示 $\triangle\tau$ 和 $\triangle q$ 的统一性，均是反映黄土结构强度的指标。

3）对于影响黄土结构强度的其他因素需进一步进行试验研究。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

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

2 吴侃,邓颖人.黄土结构性研究.中国土木工程学会第六届学术会议论文集.上海:中国建筑出版社,1991

3 〔苏〕Г.К克列因著.陈万佳译.散粒体结构力学.北京:中国铁道出版社,1983

4 张伯平著.黄土结构强度的研究.西安:陕西省力学学会92～93学术年会论文集,1993

The Quantitative Analysis of Effects of Soil Moisture upon the Loess Structure Strength

Zhang Beiping Wang Li

(The Department of Water Conservancy and Archtecture, Nrthwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

Yuan Haizhi

(Shimen Reserviir Managemental Bureau, Hanzhong, Shaanxi, 723000)

Abstract This paper analyses the basic behaviors of the loess strength and various factors affecting its strength. With the loess soil on the tablelang Yuan in the north of the Wei River in Yangling Area as the example, the main factors affecting the loess strength, viz. the loess soil structural strength and soil moisture affecting loess strength were studied. Also, this paper discusses the relationships between the structure strength of wing-born loess soil formed in different geological years and moisture contents, and establishes the regression relationship of loess structure strength with variations in moisture contents.

Key words loess soil; structure strength; moisture contents; virgin soil; heavy plastic soil shear strength

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net