

文章编号: 1008-2786-(2020)4-571-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000535

基于核磁共振技术的结合水含量 对重塑黄土抗剪强度影响试验研究

何攀, 许强*, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘 要: 重塑黄土抗剪强度对黄土重大工程的长期稳定与安全有着极其重要的影响, 然而, 由于传统测试方法的限制, 对于结合水与抗剪强度之间关系的认识并不充分。本文基于无损、可靠、精确与便捷的核磁共振技术, 针对不同含水率的重塑黄土开展了结合水发育特征与重塑黄土抗剪强度的试验研究。利用结合水与自由水的冰点不同, 寻找二者的核磁共振信号界限— T_2 截止值, 然后获取不同含水量直剪试样的核磁共振弛豫曲线, 最后结合快剪试验分析结合水含量与土体抗剪强度的关系。试验结果表明: (1) 重塑黄土内结合水含量随含水量的上升而增多, 且增长趋势逐渐变缓, 结合水所占比例也在不断地下降。(2) 当土体内含水量增大时, 并不会单独发育某一赋存状态的水, 而是在某个含水率区间内主要发育某一种赋存状态的水。(3) 重塑黄土中结合水的增加会导致粘聚力的降低, 对内摩擦角没有明显影响。重塑黄土试样内结合水主要是通过削弱土体的粘聚力从而降低黄土土体抗剪强度, 且土体内结合水含量与粘聚力 c 值及抗剪强度大小呈线性负相关。本文研究成果可为非饱和黄土边坡与高填方工程的稳定性计算等方面提供技术支持与理论参考。

关键词: 重塑黄土; 抗剪强度; 结合水; 核磁共振; T_2 截止值

黄土高原地区的城市发展与农业活动, 受沟壑纵横的地貌与水土流失严重的环境制约严重, 当地政府为改善城市空间布局与生态环境, 先后规划建设了平山造城、治沟造地与固沟保塬等黄土重大工程^[1]。重塑黄土的抗剪强度是影响边坡稳定性与工程长期安全的重要参数^[2-3], 由于特殊的结构性与矿物组成, 黄土具有很强的水敏性, 因此水的含量是影响土体抗剪强度的关键因素。边坡土体的含水率会随地表降雨量的变化发生显著改变, 当水进入黄土内部后会以不同的微观状态赋存, 离土颗粒表面近的水由于与土颗粒存在强烈的范德华力与离子

吸附力, 从而形成结合水^[4]。结合水性质与液相水显著不同, 当物理性质特殊的结合水存在于结构复杂的黄土孔隙中时, 其表现出来的性质就更为复杂。结合水在水中的独特性质使得它一直是岩土工程、工程地质等领域密切关注的重点之一^[5-6], 黄土中结合水的发育特征与对土体强度影响的研究工作具有重要的理论和实践意义。

结合水对黄土的多项物理参数都有着不同程度的影响, 有学者^[7]通过大量的试验数据与计算发现结合水对黄土比重的测定有着重要的影响。另外, 普遍认为结合水含量越高的土样, 其液限和塑性指

收稿日期 (Received date): 2019-10-23; 改回日期 (Accepted date): 2020-06-23

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重大项目 (41790445); 国家自然科学基金重点项目 (41630640)。[Major Projects of the National Natural Science Foundation of China (41790445); Key Projects of National Natural Science Foundation of China (41630640)]

作者简介 (Biography): 何攀 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩土体稳定性及工程环境效应。[HE Pan (1995-), male, M. Sc. candidate, research on stability of rock and soil mass and engineering environmental effect] E-mail: 502751270@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 许强 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究工作。[XU Qiang (1968-), male, Ph. D., professor, specialized in teaching and research of geological disaster prediction and evaluation and prevention and treatment] E-mail: xq@cdut.edu.cn

数也越高^[8],土体渗透性也越差,这是因为在细粒土尤其是粘土中主要是结合水在运动,要使水在细粒土中流动,必须先克服结合水的抗剪强度,结合水膜越厚,土体渗透性越差^[9]。

结合水对于各类土体强度的影响也有相应的研究。已有研究^[10]发现随着软土中的结合水的排出,土颗粒表面的水膜厚度在逐渐变薄,结合水对软土的强度与流变性质有较大的影响。此外,强结合水是粘土体抗剪强度的主要因素,而弱结合水则会削弱土体强度^[12]。随着检测技术的进步,核磁共振技术也逐渐被运用到岩土研究领域,如 Jaeger 等^[11]应用该技术在研究恒温下土壤膨胀过程时发现结合水会影响土体的工程力学以及物理化学性质。

传统结合水的测试方法主要有 X 射线衍射法、加压排水法、离心机法以及滤纸法,冷镜湿度计、双压湿度控制法等方法^[7-14],但上述方法对试验条件要求较高,且受其他因素制约较大,对于结构复杂、易损坏的黄土适用性不强,测试结果往往不够准确。另外,由于测试手段的限制,一些方法^[7-8,10]还可能损害试样。此外,前人一般采用先建立土体中含水量与结合水含量的函数关系,再根据该函数关系计算出强度试验中某含水量的土体内的结合水含量进行研究分析,这些方法虽能一定程度反映试样中的结合水含量,但由于是估算值,且精度较低,所以未能直接准确地反映结合水含量与黄土抗剪强度的关系。

相对而言,核磁共振技术是一种无损、安全、快速的检测手段,核磁信号响应直接来自于样品中赋存的流体,且对样品无任何损害,测试方便快捷,适用于对黄土中不同赋存状态的水进行定量以及定性评价。本文基于核磁共振试验,对不同含水率的黄土环刀试样中结合水含量进行直接测量,消除由于估算带来的误差,使试验结果更为准确可靠。因此,本文主要思路是通过核磁共振技术先探究随含水量的增加,土体中结合水含量变化,然后结合直剪试验,对重塑黄土内结合水含量与抗剪强度参数相关性进行研究。

1 试验方法

1.1 核磁共振试验

1.1.1 试验原理

核磁就是原子核自旋产生的磁场,在永磁场中

通过射频磁场将原子核磁化,使其获得能量进入高能状态,产生共振,即核磁共振,在这个过程中核磁共振信号随时间改变的曲线称为 FID 曲线^[15]。其中,磁信号来源于样品中的原子核,但并不是所有的原子核都可以产生核磁,在该核磁共振中采集¹H 的核磁信号,且只对液态水中的¹H 产生信号,所以采集到的 FID 信号均来源于土体内部的水,同时 FID 曲线的形态与土体中孔隙水的横向弛豫时间 T_2 有关^[16]。将 FID 曲线通过傅里叶转换就可以得到信号幅值随 T_2 横向弛豫时间变化的曲线,该曲线能反映岩土介质中孔隙水的分布,曲线下方的峰面积对应孔隙内的含水量。在核磁共振弛豫理论中,多孔介质中的流体存在三种弛豫机制,即自由弛豫、表面弛豫与扩散弛豫。对土体中的液态水而言,自由弛豫与扩散弛豫对弛豫时间的影响基本可以忽略不计,土体中的液态水的 T_2 值只与表征孔隙结构的表面弛豫强度 ρ_2 有关,大孔隙水较小孔隙水弛豫时间更长,因此核磁共振技术能测量岩土介质中的各类孔隙水的含量,此理论已被大量的实验与应用证明^[17]。自由水赋存于大孔隙中,结合水赋存于小孔隙中,两者的弛豫时间显著不同,而它们的弛豫时间界限值被称为 T_2 截止值, T_2 截止值左边的曲线峰面积代表了结合水含量,右边的峰面积则代表了自由水的含量。

1.1.2 试样制备

试验土样取自陕西省延安市顾屯流域原生黄土,对其进行一系列物理力学试验,获得试验黄土基本物理指标(表 1),使用马尔文粒度分析仪获取其颗粒级配曲线(图 1)。

为防止铁磁物质对主磁场强度及均匀性产生影响,采用定制的聚四氟乙烯冻融试验管(直径 25 mm、高 60 mm)和直剪环刀(直径 61.8 mm、高 20 mm)进行 1 组冻融试样与 9 组直剪试样的制备。

将烘干黄土碾碎过 0.5 mm 筛,取筛后土样加入计算好的蒸馏水,均匀搅拌,保湿静置 24 h,因已有研究^[9]指出土体中强、弱结合水发育的界限含水率与塑限($W_p = 16.9\%$)接近,为尽量保证试样内结合水发育完整,控制试样质量含水率为 25%(本文含水率均为质量含水率),干密度为 1.6 g/cm^3 ,本研究采用分层击样法制取低温冻融试样(图 2a);按照相同制样方法进行不同目标含水率的环刀试样(图 2b)制备。将冻融试样编号为 D1,直

表 1 试验黄土基本物理指标
Tab.1 Basic physical index of test soil

土粒比重 G_s	最大干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	塑限 $W_p / \%$	液限 $W_L / \%$	塑性指数 I_p	颗粒组成 / %		
					粒径小于 0.005 mm	粒径 0.075 ~ 0.005 mm	粒径大于 0.075 mm
2.68	1.79	16.9	31.2	14.3	3.99	86.81	9.2

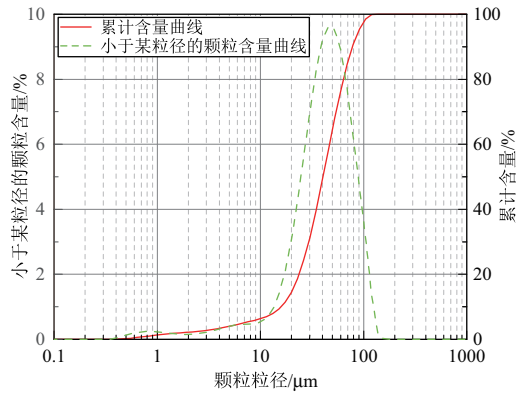


图 1 土样颗粒级配曲线
Fig.1 Grain grading curve of soil sample

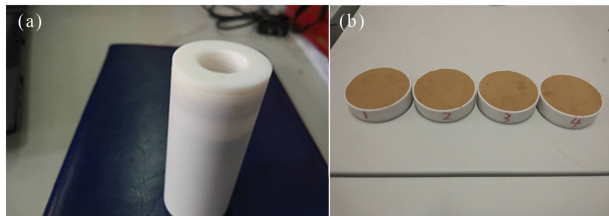


图 2 低温冻融试样 (a) 与直剪试样 (b)
Fig.2 Low temperature freeze-thaw sample and direct shear test sample

剪试样按含水率大小分别编为 S1 ~ S9, 试验结束后将所有土样置于 105℃ 环境温度下烘干 24 h, 测定试验时土体内的实际含水量, 具体制备标准见表 2。

表 2 直剪试验土样目标含水率与实际含水率
Tab.2 Target moisture content, actual moisture content during direct shear test

试样编号	目标含水率 / %	试验含水率 / %	试样编号	目标含水率 / %	试验含水率 / %
D1	25	24.9	S5	18	17.8
S1	11	10.8	S6	19	18.5
S2	12	11.8	S7	21	20.4
S3	14	14.1	S8	23	22.9
S4	16	15.7	S9	25	24.2

1.1.3 低温冻融试验

结合水含量的测定采用纽迈科技生产的 MacroMR12-150H-I 大口径核磁共振可控温核磁共振系统, 其主要组成部分有: 永磁体、试样管、射频系统、温控系统和数据采集分析系统 (图 3)。获取试样中结合水与自由水的弛豫时间界限, 即 T_2 截止值, 需利用两者冰点与热力学性质不同的特性。低温冻融试验选用直径 25 mm × 高 60 mm 低温冻融线圈, 采用 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 射频率列, 设定回波次数 10 000, 等待时间 TW 1500 ms。将冻融试样置入低温冻融线圈内, 设置系统内 -12、-9、-6、-5、-4、-3、-2.7、-2.3、-1、-0.6、-0.5、-0.4、-0.3、-0.2、-0.1、0、0.5℃ 的升温序列, 等候时间为 1 h。核磁共振低温控制系统具有自动采集功能, 在线圈腔内温度到达目标温度 1 h 后会自动对样品进行 CPMG 序列下的 FID 信号采集, 直到所有设定的温度序列采集完毕。

直剪环刀试样核磁共振试验选用直径 110 mm 常温线圈, 基本设置与上述低温冻融试验一致。依次扫描环刀试样, 获取不同含水率试样在常温下的 T_2 弛豫曲线, 结合已获取的 T_2 截止值求算出各试样内的结合水含量。

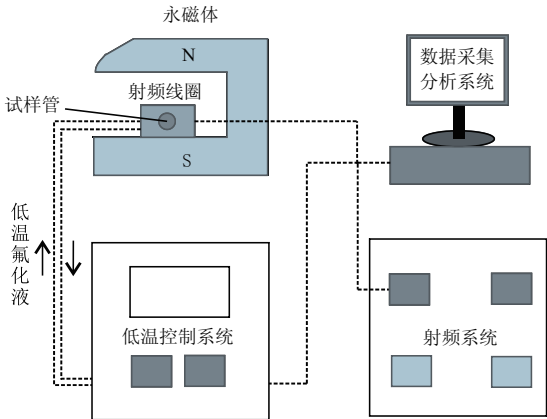


图 3 可控温核磁共振测试系统
Fig.3 Controlled temperature nuclear magnetic resonance testing system

1.2 直剪试验

直剪试验采用国电南京自动化有限公司生产的DJY-4L 四联等应变直剪仪进行快剪试验,设定剪切速率为 0.8 mm/min,最大剪切量 6 mm,剪切历时 4~5 min,垂直压力分别为 100、200、300 和 400 kPa。分别测定不同试验含水率试样的应力—应变曲线,取试样在各级压力下的峰值强度或应力—应变曲线上变形量为 4 mm 所对应的强度作为抗剪强度,直剪试验结果用 Mohr-Coulomb 定律整理得到各土样的抗剪强度指标。

2 结果分析

2.1 直剪试样内结合水含量的获取

2.1.1 T_2 截止值的确定

由于结合水与自由水的热力学势能不同,理论上结合水拥有更低的冰点。在黄土试样的降温过程中,自由水先于结合水结冰,在升温过程中结合水也先于自由水解冻^[17]。由于核磁共振试验仅对液态水中的 ^1H 产生核磁信号,利用两者冰点不同的特性,采集土体内不同温度下的核磁共振信号,可得出它们之间的弛豫时间界限 T_2 截止值。

图 4 为低温冻融试样在不同温度下的 T_2 弛豫曲线,根据核磁共振信号随温度的变化,可将整个过程分为两个阶段。阶段一(−12℃~−2.3℃)内核磁信号少量缓慢增大,但波峰在横轴上的回落点一致,均为 1.65 ms。此阶段内随温度升高有少量冰解冻,且解冻的水具有相似的热力学性质。已有

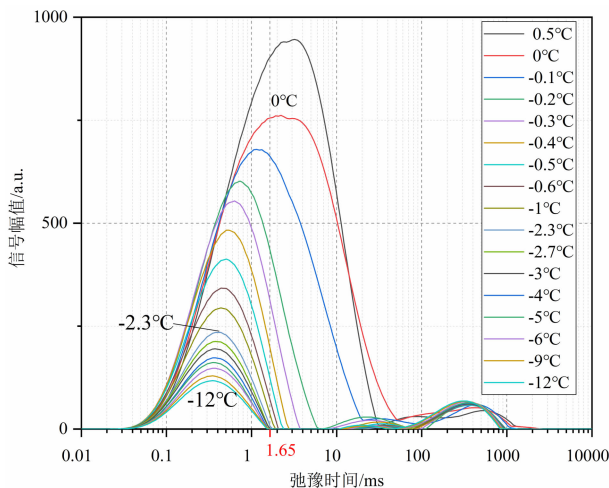


图 4 低温冻融试样在升温序列下的 T_2 弛豫曲线

Fig. 4 T_2 relaxation curve of low temperature freezing-thawing samples under heating sequence

研究结果^[18-19]显示弱结合水的冰点在 −1℃~−4℃间,强结合水的冰点则更低,甚至可低至 −70℃。借此可推断阶段一内少量核磁信号的增强均来自于解冻后离土颗粒更近的结合水。

阶段二(−2.3℃~0.5℃),可见波峰回落点逐渐向右移动,说明有热力学性质与阶段一不同的水开始解冻。另外,核磁信号峰值也大幅度增大,增加趋势较阶段一要大,且增加的峰面积多集中于弛豫时间小于 1.65 ms 部分曲线,这表明土体中阶段二解冻的水含量多于阶段一解冻的水含量。由于自由水的解冻温度比结合水的高,分析可知随着温度上升,试样孔隙内大量结合水与少量自由水开始解冻,后温度达到自由水的解冻温度,自由水开始大量解冻。因此推断试样内弱结合水冰点在 −2.3℃左右的某个温度区间内,其具体值与其微观结构有很大关系^[19]。综合两阶段曲线变化可知,将顾屯流域黄土中结合水与自由水的 T_2 截止值确定为 1.65 ms。

2.1.2 不同含水量试样中的结合水含量

将不同含水率的环刀试样进行常温下的核磁共振 T_2 扫描,得到反映各试样内水在常温下赋存状态的 T_2 弛豫曲线(图 5)。前文已获取试样 T_2 截止值为 1.65 ms,其左侧曲线峰面积代表了结合水含量,右侧曲线峰面积则代表了自由水的含量。分析可知,随着试样含水率的增加,核磁信号峰值与峰面积均逐渐增大,波峰在横轴上的回落点不断向右移动,说明随含水率的变化试样孔隙内水的赋存状态在不断的发生改变。通过 CAD 绘图功能提取 T_2 截止值两侧曲线与横轴围成的相对峰面积,计算出不同含

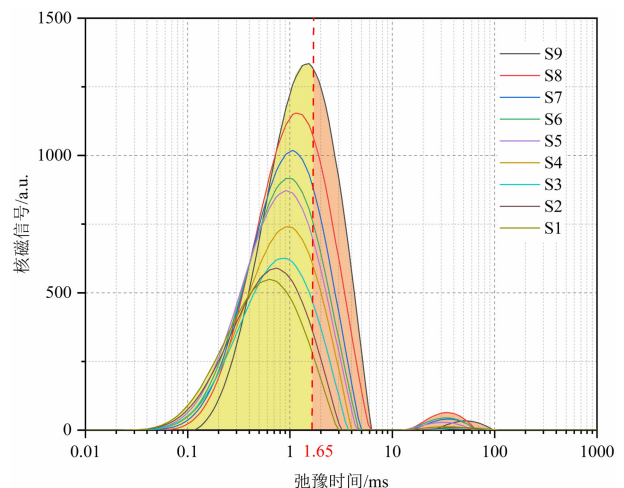


图 5 各含水率试样的 T_2 弛豫曲线

Fig. 5 T_2 relaxation curve of each moisture content sample

水率试样内结合水占比(表 3)。

表 3 不同含水率试样内结合水与自由水含量
Tab.3 The content of combined water and free water in samples with different moisture content

试样 编号	含水率 $w/\%$	结合水波 峰面积 S_c	自由水波 峰面积 S_f	结合水含 量 $w_c/\%$	自由水含 量 $w_f/\%$
S1	10.8	11833	959	9.99	0.81
S2	11.8	12207	1416	10.57	1.22
S3	14.1	12164	2167	11.97	2.13
S4	15.7	13860	3146	12.80	2.90
S5	17.8	16595	4089	14.28	3.52
S6	18.5	16742	4745	14.41	4.09
S7	20.4	17527	5844	15.29	5.10
S8	22.9	18578	8419	15.76	7.14
S9	24.2	19518	10069	15.96	8.24

本试验结果中土样结合水含量(9.99%~15.96%)比文献[6]中^[6]的试验结果(15%~26%)稍小,首先吴凤彩采用的试验土样为黏质砂土含量高的黏土以及壤土,且是散土试样,本试验的试样为压实后的黄土环刀样,黏粒含量较少(3.99%)。前人认为^[12,20]黏土矿物具有较高的比面积与活性,其表面能形成比普通矿物表面的更厚的结合水膜,另外,干密度的增加会使土体内结合水含量减少^[17],因此我们排除土样矿物成份与干密度对结合水含量的影响,两种试验手段得出的结果相近,说明通过本试验方法可行,测试结果可信。

对试验结果进行分析发现,随着含水率的增加,试样中结合水的含量相应增大,但结合水在土体中所占比例不断下降。结合水在含水率低于塑限时(16.9%)发育较快,高于塑限之后发育速度明显变缓(图 6),这是由于试样含水率低于塑限时大部分水都以结合水的赋存形式包裹在土粒周围^[21],当含水率不断增加至高于塑限后,此时土粒周围已包裹了大量结合水,多余水分由于毛细力的存在开始填充粒间间隙,因此自由水含量的上升趋势随试样含水率的增加而变快,但仍以结合水发育占主导。

一般认为,塑限是强结合水与弱结合水的界限含水率^[21-22],当含水率低于塑限时,土体内水赋存为强结合水。但通过本试验研究发现,在不同含水率下,土体中可同时发育不同状态的水(强、弱结合水以及自由水),但仍以某一种状态的水发育为主。含水率低于塑限时,自由水与结合水均可以在黄土中缓慢发育,但结合水仍占主导地位,这可

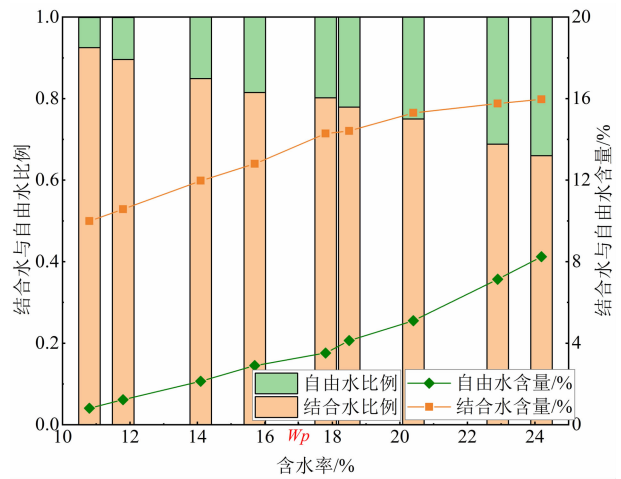


图 6 试样含水率与结合水含量的关系

Fig.6 The relationship between sample moisture content and the content of bound water

能与土中矿物成份的比表面积与活性有很大关系。另外,理论上来说,水应被作用力最强的范德华力与离子吸附力率先捕获依次形成强、弱结合水,但当土体含水率较低时,基质吸力较大,部分水可能被基质吸力捕获形成毛细孔水(自由水),造成水分在土中分布不均匀,实际上土体中水分分布也不可能完全均匀。

2.2 结合水含量对土体抗剪强度的影响

各含水率试样常温下在不同压力(100、200、300、400 kPa)下的抗剪强度如图 7 所示,随着含水率的增加,试样的抗剪强度不断降低,将直剪试验结果用 Mohr-Coulomb 定律整理得到各土样的抗剪强度指标,具体参数见表 4。

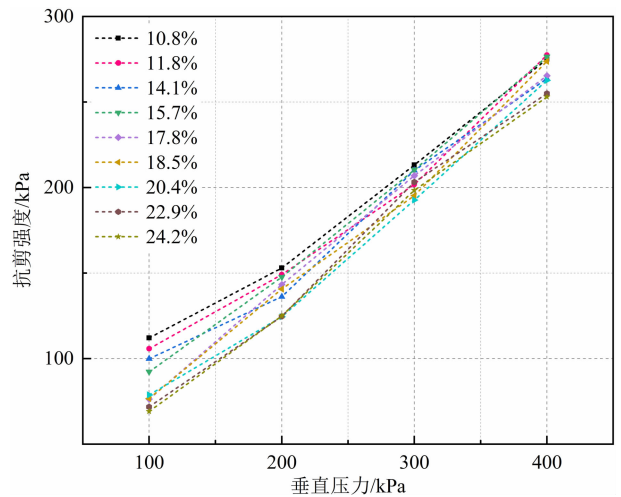


图 7 不同含水率试样在不同荷载下的抗剪强度

Fig.7 Shear strength of samples with different moisture content under different loads

表 4 直剪试验结果

Tab. 4 Direct shear test results

试样编号	含水率/%	抗剪强度/kPa				抗剪强度参数	
		100	200	300	400	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
S1	10.8	112.1	153	213.2	275.1	51.05	27.47
S2	11.8	105.8	149.1	201.8	277.5	41.60	29.60
S3	14.1	99.94	136.2	210	263.7	36.19	29.48
S4	15.7	92.3	147.7	210.3	273.1	29.60	31.19
S5	17.8	76.38	143.3	207	265.4	15.30	32.26
S6	18.5	76.69	140.7	195.3	273.8	10.14	32.87
S7	20.4	78.78	124.5	192.7	262.7	9.68	31.81
S8	22.9	71.8	124.7	203.2	255	6.65	32.15
S9	24.2	69.19	125	198.4	253	5.19	32.01

随着含水率不断上升,结合水增多,土体抗剪强度不断降低,其粘聚力也在不断地下降(图 8)。当含水率低于塑限时,黄土的粘聚力 c 值呈线性减小,当土体内含水率高于塑限时,其粘聚力 c 值下降趋势明显变缓。而随着含水率增大,内摩擦角 φ 值略微变大,但总体来说变化不大,均在较小范围内波动,本试验结果与前人研究基本相符,说明试验较为可靠。试样内结合水含量在含水率低于塑限时呈线性发育,当含水率高过塑性后,发育趋势变缓,这与粘聚力的发展过程刚好相反。

粘聚强度与摩擦强度是黄土土体抗剪强度主要组成部分,摩擦强度一般与矿物成份有关^[24],当土体密度不变时,内摩擦角只在很小的范围内波

动。粘聚强度包括了胶结物质形成的加固强度、由水膜或粘土颗粒之间的分子引力形成的原始粘聚力和基质吸力形成的强度^[5]。土体中含水率的增加并不会影响内摩擦角的大小,但会引起基质吸力大小与不同状态水(强结合水、弱结合水与自由水)的含量发生改变,从而导致粘聚强度的变化。

前文已指出在试验含水率梯度下增加的水大都为结合水,分析可知,结合水的含量与黄土土体粘聚力呈线性负相关。根据 Gouy-Stern 双电层扩散层理论,溶液里的离子与固体表面的电性中心形成电势差,根据电势差与结合力的不同将固体表面的溶液分为固定层与扩散层。强结合水为双电层中的固定层,与土颗粒之间有强烈的范德华力。弱结合水为双电层中的扩散层,扩散层由静电作用力与离子浓度差扩散所控制^[24-25],在扩散层中,电势与离土颗粒表面距离呈指数变化。当土体中水的含量增多,溶液浓度不变,部分水被离子吸附力捕获,使得结合水含量不断增加。特别是当弱结合水增加时,水-气-土颗粒的三相界面的弯液面水张力消耗在水的重力上,减小了张力对土颗粒的作用^[4]。另外,随着土体内部含水率增加,其基质吸力($u_a - u_w$)减小,孔隙水压力增加,也会削弱土体的抗剪强度,增加土体的变形。

在非饱和土力学中,描述非饱和土体抗剪强度常用 Fredlund 非饱和土抗剪强度公式^[26]:

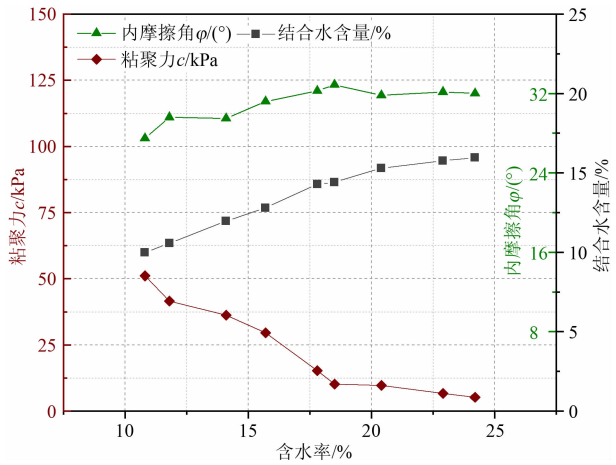


图 8 试样含水率与粘聚力、内摩擦角的关系

Fig. 8 The relationship between moisture content of sample and cohesion and internal friction angle

$$\tau = c'_0 + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$$

式中, τ 为抗剪强度 (kPa); σ 为主应力 (kPa); c' 为总粘聚力 (kPa); c'_0 为有效粘聚力 (kPa); φ' 为有效内摩擦角 ($^\circ$); $(u_a - u_w)$ 为基质吸力 (kPa)。

可见, 非饱和土的抗剪强度又由有效粘聚力 c'_0 、有效内摩擦角 $(\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi'$ 以及基质吸力产生的力 $(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$ 三部分组成。在饱和状态下, 基质吸力为 0, 该式可表达为摩尔-库伦抗剪强度准则。当土体处于非饱和状态时, 基质吸力与土中含水量存在某个函数关系, 所以式中第三项 $(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$ 也可表达成含水量的函数关系式, 如果将这项也看作是粘聚力, 那总的粘聚力为:

$$c' = c'_0 + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$$

那么, 上述抗剪强度参数中的粘聚力是由饱和粘聚力和随含水量增加而减小的基质吸力共同组成的, 显然在试验中随着含水量的增加而减小的粘聚力是由基质吸力引起的^[21]。在含水量低于塑限时, 粘聚力 c 呈线性减少, 含水量高于塑限后, 粘聚力 c 值减少趋势明显变缓, 而结合水含量的发展趋势刚好与之相反 (图 8)。由上述试验结果可知, 当含水量高于塑限时, 结合水已大量发育, 大部分土体中的土水结构类似于图 9(a) 中所示只存在土-水界面, 此时这些土体的基质吸力 $(u_a - u_w)$ 为 0^[26], 但由于仍有少量土体存在图 9(b) 中所示的土-水-气三相界面的土水结构, 所以整体试样仍存在基质吸力。随着含水量的继续增加, 土体中结合水含量增加趋势大大减缓, 所以由基质吸力产生的粘聚力 $(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$ 的数值减小趋势也会相应减缓, 那么总粘聚力 c 在含水量大于塑限后的减少趋势也就变

缓了; 而当含水量低于塑限时, 土体内土水结构组成与上述相反, 结合水在该含水量区间内快速增加, 存在着大量的土-水-气三相界面, 还有着少量的土-水 (或者气-水) 界面, 当含水量增加, 基质吸力快速减弱, $(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$ 的值也会快速减小, 所以总粘聚力 c 在含水量小于塑限时, 减弱的趋势较快, 这从粘聚力与结合水含量之间呈线性负相关关系中也得到很好的佐证。

将每组试样的结合水含量与其抗剪强度参数作为横纵轴作图 (图 10), 可见结合水含量的增加会削弱土体的粘聚力, 对内摩擦角影响较小。为更好研究弱结合水含量与粘聚力 c 的关系, 将其线性拟合, 得到方程:

$$c = -7.593w_c + 124.94, R^2 = 0.9761$$

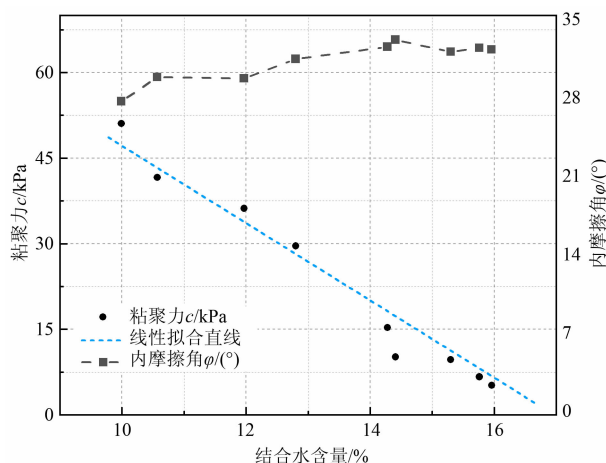


图 10 结合水含量与抗剪强度参数的关系

Fig. 10 The relationship between binding water content and shear strength parameters

由拟合方程可知, 为获取含水率与粘聚力的关系需得到结合水与含水率之间的关系。将结合水含量与含水率的关系进行多项式拟合, 得到方程:

$$w_c = -0.0221w^2 + 1.2355w - 0.9075, R^2 = 0.9952$$

内摩擦角 φ 值取试验数据平均值 30.98° , 联立式上述两式, 结合莫尔库伦准则可得到在该次试验标准下 ($\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $\theta = 10 \sim 25\%$) 不同含水率试样常温下的抗剪强度:

$$\tau = 0.6\sigma - 7.593w_c + 124.94$$

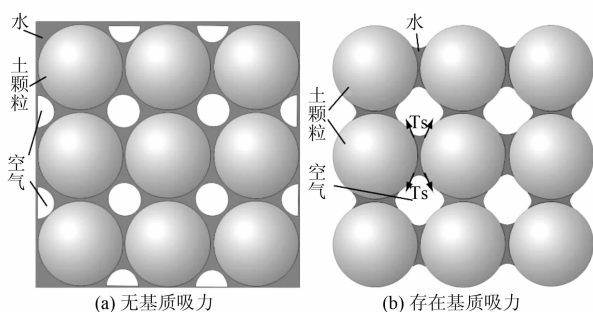


图 9 土粒、水、气组合结构和基质吸力的关系 (邢鲜丽, 2014)

Fig. 9 The relationships between the matric suction and composite structure of particle, pore water and air (XING Xianli, 2014)

3 结论

本研究以延安市顾屯流域重塑黄土为研究对象,开展了不同含水率环刀试样的核磁共振与直剪试验研究,探讨了结合水的发育特点与其对抗剪强度参数的定量变化关系,得到了以下结论:

(1)随着含水率的增加,黄土的抗剪强度不断降低,且含水率的增加会导致粘聚力的降低,对内摩擦角的大小没有明显影响。含水率低于塑限时粘聚力的降低趋势明显比高于塑限时大。重塑黄土试样内增加的结合水通过降低土体的粘聚力削弱黄土土体的抗剪强度,且土体内结合水含量与 c 值大小呈现线性负相关。

(2)重塑黄土内结合水随含水率的增加而增多,且增长趋势逐渐变缓。土体中结合水与自由水的发育并不存在一个确切的界限含水率,当含水率低于塑限时,自由水也可在黄土中发育,不过结合水仍占主导地位。也就是说当含水量增大时,土体内并不会仅赋存一种状态的水,而是某一赋存状态的水占主导地位。

基于核磁共振技术的无损与精确性,本文着重定量分析结合水的发育特征和结合水与抗剪强度参数的联系,建立了结合水与抗剪强度的拟合关系式,可为延安地区非饱和黄土边坡与高填方工程的稳定性计算等方面提供技术支持与理论参考。不足的是,本研究中拟合关系式仍有待于深入分析和验证,这也需在后期的研究中进一步加强。

参考文献 (References)

- [1] 王晓晨,许强,赵宽耀,等. 延安市宝塔区治沟造地工程的分布规律[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 141 - 148 [WANG Xiaochen, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, et al. Distribution rule of governing valleys project in Baota district of Yan'an city [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 141 - 148]
- [2] 杨志全,丁攀,雨德聪,等. 基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型[J]. 山地学报, 2019, 37(3): 392 - 399. [YANG Zhiquan, DING Pan, YU Dechong, et al. Shear strength of Yan'an loess interpreted by porosity [J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 392 - 399]
- [3] 梁谊. 基于敏感性分析方法和可靠度理论的黄土高边坡稳定性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018: 26 - 44. [LIANG Yi. Research on stability of loess high slope based on sensitivity analysis

- method and reliability theory [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 26 - 44]
- [4] 赵明华,刘小平,彭文祥. 水膜理论在非饱和土中吸力的应用研究[J]. 岩土力学, 2007(7): 1323 - 1327. [ZHAO Minghua, LIU Xiaoping, PENG Wenxiang. Application of aqueous film theory to study of unsaturated soil's suction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(7): 1323 - 1327]
- [5] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001(7): 79 - 83, 90. [DANG Jinqian, LI Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(7): 79 - 83, 90]
- [6] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984(6): 84 - 93. [WU FengCai. Some characteristics of adsorption-bonded water measurement and seepage of clay soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984(6): 84 - 93]
- [7] 胡小平. 结合水对黄土比重测定的影响[J]. 电力勘测, 1995(3): 20 - 22. [HU Xiaoping. The influence of combined water on the determination of loess specific gravity [J]. Electric Power Survey, 1995(3): 20 - 22]
- [8] 张中华. 黄土结合水含量及其与物理指标的关系研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 北京: 2016 年全国工程地质学术年会论文集, 2016(6): 1418 - 1423. [ZHANG Zhonghua. Study on the bound water content of loess and its relationship with physical indexes [C]. Engineering Geology Committee of China Geological Society. Proceedings of the 2016 national engineering geology annual conference. Beijing: Engineering Geology Committee of China Geological Society, 2016(6): 1418 - 1423]
- [9] 唐大雄,刘佑荣,张文殊,等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 16 - 90. [TANG Daxiong, LIU Yourong, Zhang Wenshu, et al. Rock and Soil Engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 16 - 90]
- [10] 何俊,肖树芳. 结合水对海积软土流变性质的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33(2): 204 - 207. [HE Jun, XIAO Shufang. The effect of combined water on the rheological properties of marine soft soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(2): 204 - 207]
- [11] JAEGER F, SHCHEGOLIKHINA A, AS H V, et al. Proton NMR relaxometry as a useful tool to evaluate swelling processes in peat soils [J]. Open Magnetic Resonance Journal, 2010, 3(2): 27 - 45.
- [12] 袁建滨. 粘土中结合水特性及其测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 7 - 32. [YUAN Jianbin. The study for properties of bound water on clayey soils and their quantitative methods [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012: 7 - 32]
- [13] 库沙柯夫,梅杰尼兹卡娅. 束缚水薄层的厚度: 第四届石油会议

- 论文集[C]. 北京:石油工业出版社,1957(4):8-14.
- [KUSHAKOV, MEJNIZKAYA. Thickness of bound water thin layer; Proceedings of the Fourth Petroleum Conference [C]. Beijing: Petroleum Industry Press,1957(4):8-14]
- [14] 王铁行,李彦龙,苏立君. 黄土表面吸附结合水的类型和界限划分[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 942-948. [WANG Tiexing, LI Yanlong, SU Lijun. Types and boundaries of bound water on loess particle surface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 942-948]
- [15] Alexander JÄger, Schaumann G E, Bertmer M. Optimized NMR spectroscopic strategy to characterize water dynamics in soil samples [J]. Organic Geochemistry, 2012, **42**(8):917-925.
- [16] ROGER MORIN, ARMAND J, SILVA. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, **89**(B1): 511.
- [17] 田慧会, 韦昌富. 基于核磁共振技术的土体吸附水含量测试与分析[J]. 中国科学:技术科学, 2014, **44**(3): 295-305. [TIAN Huihui, WEI Changfu. A NMR-based testing and analysis of adsorbed water content [J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, **44**(3): 295-305]
- [18] F JAEGER, S b OWE, H V AN AS, et al. Evaluation of ¹H NMR relaxometry for the assessment of pore-size distribution in soil samples [J]. European Journal of Soil Science, 2009, **60**(6): 1052-1064.
- [19] RAZUMOVA L A. Basic principles governing the organization of soil moisture observations [J]. Hydrology, 1965, 91-500.
- [20] 王平全. 粘土表面结合水定量分析及水合机制研究[D]. 成都:西南石油学院, 2001:92-101. [WANG Pingquan. The study for quantitative analysis for water absorbed on clays an their hydration mechanism [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2001:92-101]
- [21] 邢鲜丽,李同录,李萍,等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(3): 53-59, 97. [XING Xianli, LI Tonglu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, **41**(3):53-59, 97]
- [22] 苏俊霖,董汶鑫,冯杰,等. 黏土表面结合水的低场核磁共振定量研究[J]. 钻井液与完井液, 2018, **35**(1): 8-12. [SU Junling, DONG Wenxin, FENG Jie, et al. Quantitative study on surface bound sater of clay with low field NMR [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2018, **35**(1): 8-12]
- [23] 沈细中,管新建,兰雁. 非饱和黏土有效应力强度指标计算[J]. 岩土力学,2007,**28**(增): 207-210. [SHEN Xizhong, GUAN Xinjian, LAN Yan. Calculation of effective strength indexes of unsaturated low liquid limit clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S): 207-210]
- [24] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, **32**(4): 1-9. [LU Zhaojun. Research status and prospect of shear strength of cohesive soil [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, **32**(4): 1-9]
- [25] 钱勇先. 油藏条件下平面双电层的特性研究[J]. 江汉石油学院学报, 1996(3): 41-46. [QIAN Yongxian. Study on Characteristics of Planar Electric Double Layer under Reservoir Conditions [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 1996(3): 41-46]
- [26] NING LU, WILLIAM J. LIKOS. Unsaturated soil mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2004: 67-92.

Experimental Study on the Effect of Combined Water Content on Shear Strength of Remolded Loess based on NMR

HE Pan, XU Qiang*, LIU Jialiang, PU Chuanhao, CHEN Da

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Shear strength of remolded loess has a close connection with the stability and safety of major engineering projects in loess areas. Due to limitation of traditional testing methods, development characteristics of bound water and its influence on shear strength of loess were not clearly understood. In this study it performed some trials on loess based on reliable, accurate and convenient nuclear magnetic resonance (NMR) technique. In terms of the property of remolded loess, it firstly found boundary between combined water and free water according to the

differences in their freezing points. Then the NMR relaxation curves of direct shear samples were obtained so as to determine the content of bound water as well as the relationship between content of bound water and shear strength of loess. The results show that: (1) Content of bound water in remolded loess increased with the addition of water content; (2) When the water content of soil body increased, the bound water or free water didn't vary independently; in case one dominate, and the other still exist in small quantities; (3) Increase of combined water content leaded to the decrease of cohesion in remolded loess, but the angle of internal friction did not change significantly, and the content of combined water was negatively correlated with c value and shear strength. This research results can provide technical support and theoretical reference for unsaturated loess slope construction and filling engineering.

Key words: remolded loess; shear strength; combined water; NMR; T_2 cutoff value