DOI：10.16285/j.rsm.2017.02.019

膨胀土原位孔内剪切试验与强度响应特征

李晶晶[1, 2]，孔令伟[1, 2]，穆　坤[1, 2]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：针对膨胀土堑坡防护工程中不同的施工工序和降水入渗诱发灾害频发现象，基于原位孔内剪切试验，通过施加不同法向应力水平，以及成孔后注水浸泡等工况下的现场剪切试验，获得南阳某堑坡膨胀土强度特性随荷载施加方式与浸水条件的变化规律。结果表明：膨胀土孔内剪切试验所得的剪应力-剪切位移曲线总体上呈现弱硬化变形特征；浸水对抗剪强度影响很大，最大降幅达 56.9%，主要表现为黏聚力的降低，最大值达 18.1 kPa。预加载荷对浸水软化效应具有一定抑制作用，但当预加载荷超过某一应力水平时，难以发挥更大的抑制效果。黏聚力与预加载荷呈线性正相关；内摩擦角与预加载荷呈线性负相关，但降幅甚微。在实际工程中，膨胀土边坡稳定性分析应考虑降雨入渗对强度参数的影响，同时充分利用抗剪强度参数和预加载荷的线性关系，可根据工程要求达到的安全系数反推出所需的预加载荷大小，从而指导实际工程施工。该研究可为膨胀土工程场地评价、参数选取与灾害评价提供技术依据和参考。

关　键　词：孔内剪切试验；膨胀土；抗剪强度；荷载施加方式；浸水
中图分类号：TU 443　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2017) 02－0453－09

In-situ borehole shear test on expansive soil and its strength characteristics

LI Jing-jing[1, 2], KONG Ling-wei[1, 2], MU Kun[1, 2]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the impact of different construction procedures for cut slope protection of expansive soils and to prevent disasters triggered by rainfall infiltration, in-situ borehole shear tests (BST) were conducted under different normal stress levels and soaking conditions. Strength characteristics of expansive soils cut slope in Nanyang were obtained with various loading paths and soaking conditions. Results show that the relationship between shear stress and displacement from BST presents weak hardening as the shear strain increases. A max drop of 56.9% in shear strength, and a decrease of 18.1 kPa in cohesion are observed. Preloading inhibits softening but fails when it increases to some threshold. The cohesion has a positive linear relationship with the preloading stress, while the internal friction angle has a negative linear relationship with the preloading stress, but internal friction angle rarely varies. In engineering practices, effect of rainfall infiltration on strength parameters should be considered. Meanwhile, the linear relationship between parameters of shear strength and preloading stress should be used to back-calculate the preloading needed according to the safety factor that the project should satisfy. The study results provide technical reference for site evaluation, parameters selection and disaster assessment of the similar sites of expansive soils.

Keywords: borehole shear test; expansive soil; shear strength; loading added way; soaking

1　引　言

膨胀土是一类结构性不稳定的高液限黏土，吸水膨胀软化，失水收缩干裂，被称为工程界的癌症[1]。膨胀土分布极广，我国 20 多个省市均有膨胀土分布，约 10 万 km^2 以上。在总干渠约 1 432 km 长的南水北调中线工程中，沿线频频遇到膨胀土，其中强膨胀土、中等膨胀土和弱膨胀土渠段分别长约 5.69、103.5、170.5 km[2]，仅南阳段出现膨胀土边坡滑坡 70 多处[3]。由于膨胀土性质的复杂性和膨胀土灾害的严重性，国内外学者对其工程特性研究格外重视，至今已有 50 余年的研究历史[4]，在膨胀土

收稿日期：2016-06-06
基金项目：国家自然科学基金重点项目（No.41430634）。
This work was supported by the Key Program of National Nature Science Foundation of China (41430634).
第一作者简介：李晶晶，女，1989 年生，博士研究生，主要从事特殊土的力学特性与边坡工程方面的研究。E-mail: smilinglee@hotmail.com
通讯作者：孔令伟，男，1967 年生，博士，研究员，博士生导师，主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

堑坡力学特性、灾害防治及工程防护方面已取得丰硕成果[1−11]。

近年来，我国三纵两横城市化战略格局逐步建立，城市群不断发展，膨胀土路堑边坡和基坑随处可见，堑坡防护工程实际施工中存在着开挖滞后支护、及时支护和超前支护等施工工序，不同工况对应着不同的应力路径，土体强度指标存在差异；同时，膨胀土的物理力学性质受气候影响显著[6, 10−11]，因此，不能简单使用单一的常规加载路径下土体的强度指标。

然而至今，边坡稳定性分析使用的土体强度参数值一般通过室内直接剪切试验或常规三轴试验获得[12−13]，室内土工试验不仅试样尺寸小，不可避免地存在尺寸效应，而且试样经现场挖取过程中的应力释放，运输、制样、饱和等过程的扰动，对于具有裂隙性、超固结性和对水极其敏感的膨胀土来说，其天然性状和力学特性必然受到影响，难免造成一些室内试验结果的偏差[8, 13]。原位试验弥补了室内试验的诸多不足，可以基本保持岩土体原有的含水率、应力状态和结构进行力学性质指标的测定，为工程施工确定合理有效的施工参数或更实际的设计计算指标提供了可能[14]。但大多原位测试方法需要对试验数据进行理论公式或经验公式的反馈分析，间接获取土体参数，如旁压试验、扁铲侧胀试验等；而以往获取土体强度指标的原位试验以现场大型直剪试验为主[8]，其仪器体积庞大、操作繁琐且只能对浅层土体进行试验，不便于应用工程实践中；再者，其不易用于不同工况下土体原位力学性状研究的开展。

孔内剪切试验（borehole shear test，简称 BST）是通过测定原位土体在不同法向应力下的抗剪强度，利用库仑原理直接得到土体强度指标的原位试验方法，试验结果不需要进行经验公式拟合修正，具有操作便捷、可重复性高、试验时间短等特点，虽然试验前需要预先钻孔，但其扰动程度较室内试验来说，几乎可以忽略不计[14]。BST 适用于黏性土、砂土、软岩等地层，尤其适用于不易于取得原状样和土层性质变化较大的堑坡稳定性分析[15]，与此同时，还可以模拟不同工况下土体原位力学特性演化规律。Yang[16]于 1987 年对 Indianola、Osrpola 和 Guthrie 3 处超固结裂土滑坡进行 BST 和原位水平应力试验，试验结果成功应用于滑坡分析和治理中。然而，我国对于 BST 在岩土工程中的应用研究较少，鲜见相关文献报道，更无不同施工工序和降雨入渗等工况对土体原位力学特性影响研究。

综上所述，本文依托内（乡）邓（州）高速公路工程背景，选取南阳典型膨胀土进行 BST 测试，分析不同法向载荷施加方式、浸水条件以及两者耦合作用对膨胀土抗剪强度及其强度指标的影响，为膨胀土边坡工程强度指标的选取和施工工序的确定提供参考。

2　堑坡工程地质特性

2.1　试验地层

试验场地位于河南南阳内邓高速公路旁，内邓高速公路师岗服务区正西方向约 500 m，选取有代表性的地层进行钻探和取样。原位试验利用 XP−100 型钻机进行回转钻进，由于试验土层对水的敏感性和土层自身的稳定性，且考虑到泥浆对试验结果的影响，钻孔过程中采用干钻且未使用泥浆护壁。

根据现场的钻探（见图 1）揭露，该地层属于中更新统冲洪积沉积土层。表层 1 m 左右为黑褐色根植土；1～2 m 土体呈黄褐色，硬塑状；3～8 m 土层较均匀，呈红褐色，硬塑−坚硬状，各土层中均含有黑色的铁锰结核与黄白色的姜石。选取土质均匀的地层为试验土层，同时，边坡高度约为 6 m，因此，确定孔内剪切试验的试验深度为 3～6 m。钻探揭露深度内无地下水出露。

图 1　南阳原位试验土层岩芯样
Fig.1　Coring samples of in-situ test soils in Nanyang

2.2　试验土层物性指标

根据《公路土工试验规程》[17]对所取得的试验深度内的原状土样进行物性指标及 XRD 衍射试验，其基本物理性质指标和矿物成分如表 1、2 所示。从颗粒分析试验结果可知，南阳膨胀土黏粒含量（小于 0.005 mm）占 44.8%，其中，小于 0.001 mm 的颗粒占 27%，而土样的自由膨胀率主要由土样中小于 0.001 mm 粒径的颗粒含量所决定[4]，因此，南阳膨胀土具有较高的塑性（$I_P = 29.2\%$）和膨胀性（$\delta_{ef} = 62\%$）。同时，南阳膨胀土的黏土矿物含量高达 52%，且以强亲水性矿物蒙脱石和绿泥石为主，

表 1　试验土层的物理性质指标
Table 1　Physical properties of tested soil

含水率ω / %	密度ρ / (g/cm^3)	土粒相对密度G_s	饱和度S_r / %	自由膨胀率δ_{ef} / %	塑限ω_P / %	塑性指数I_p / %	颗粒（mm）组成/%				
							>0.05	0.05～0.005	0.005～0.002	<0.002	<0.001
24.7	1.98	2.71	95.3	62	26.2	29.2	5.5	49.7	13.4	31.4	27.0

表 2　试验土层的矿物成分
Table 2　Mineral compositions of tested soil

石英 / %	长石 / %	黏土总量 / %	黏土矿物分量（以100%计）/ %			
			蒙脱石	绿泥石	伊利石	高岭石
40	8	52	30	35	15	20

分别占黏土矿物总量的 30%和 35%。

2.3　先期固结压力

图 2 为原状膨胀土水平方向压缩曲线，由 Cassagrande 方法[18]确定膨胀土水平方向的先期固结压力 $p_c = 120$ kPa。膨胀土竖向 $p_c = 149～186$ kPa[19]，当前上覆土层压力约 80 kPa，该膨胀土具有一定的超固结性。

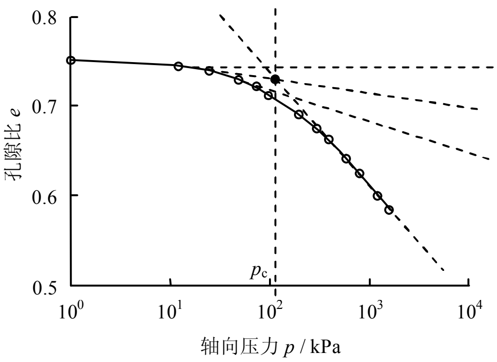


图 2　膨胀土水平方向压缩曲线
Fig.2　Consolidation curve of expansive soil in horizontal compression

3　试验方法与试验结果

3.1　试验方法

孔内剪切设备主要由控制箱、剪切盘和剪切探头 3 部分组成，外接气源提供压力（设备见图 3，测试系统示意图见图 4）。孔内剪切设备的法向应力 σ 和剪应力 q 量程分别为 500 kPa 和 350 kPa，应力精度为 2 kPa；剪切探头可从初始径向长度 75 mm 通过施加压力膨胀到 90 mm。

BST 加载方式有两种，一种是逐级加载剪切，即在同一试验位置逐级增加固结压力，逐级进行剪切；另一种是单级加载剪切，即在不同的位置进行各级压力的固结剪切试验。许多学者[15, 20–21]都验证了只要剪切头能完全嵌入土中使得压力完全施加于土体，逐级加载剪切方式得到的试验结果是可靠的，此外，逐级加载剪切的固结时间为累积时间，节约了大量的试验时间。Wineland[22]建议第 1 级压力固结时间为 10 min，之后每级压力固结时间可缩减为 5 min，剪切速率一般为 0.05 mm/s。本文采用逐级加载剪切方式，由于原状膨胀土的渗透系数（1.06×10^{-6} cm/s）较小，为了使膨胀土进行充分固结，适当延长固结时间，第 1 级σ 稳压时间为 20 min，之后每级σ 稳压时间为 10 min。

(a) 控制箱　　(b) 剪切盘　　(c) 剪切探头

图 3　孔内剪切试验设备
Fig.3　Instruments of borehole shear test

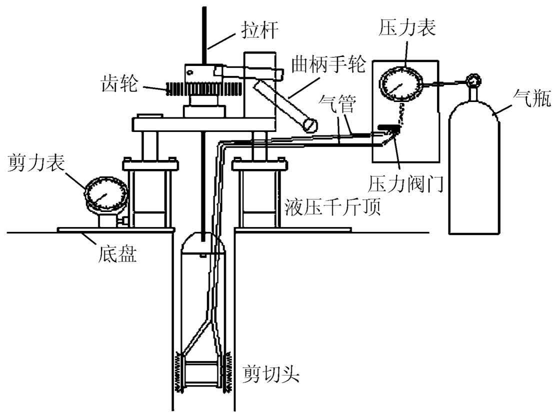


图 4　孔内剪切试验测试系统示意图
Fig.4　Experimental setup of borehole shear test system

针对膨胀土堑坡防护工程实际施工中存在开挖滞后支护、及时支护与超前支护方式，以及降雨入渗诱发灾害频发，利用 BST 开展成孔后施加不同法向应力水平的固结剪切、先施加较高法向应力固结（这里称为预加载荷 p_r ）后卸载至某一应力水平再固结剪切和成孔后先注水浸泡再固结剪切等工况的原位试验，分别模拟开挖滞后支护（ $p_r = 0$）、及时支护（ $p_r > 0$，其中 $p_r > p_c$ 以排除膨胀土所受 p_c 的影响）和降雨入渗（浸水前和浸水后）对膨胀土

原位强度特性的影响，其中 $p_r>0$ 包括 $p_r=200$、300、400 kPa 这 3 个应力水平，以期得到膨胀土原位强度随预加载荷大小演化规律。

在试验场地内共进行了 8 组 BST 试验，具体步骤如下：

（1）钻孔（孔径一般为 75 mm）至预设试验深度。

（2）剪切头置于孔内试验深度，通过控制箱连接气源（一般为压缩氮气或惰性气体）对该处膨胀土施加垂直孔壁方向的法向应力 σ 。

（3）经过充分的固结时间（20 min）后转动剪切盘上的曲柄手轮使拉杆带动剪切头向上运动，对膨胀土施加平行于孔壁方向向上的剪应力 q，记录此过程中膨胀土位移与对应的 q 值，直到土体破坏。

（4）通过曲柄手轮将剪切头摇回到原试验深度，重复步骤（2）和（3），不同的是此时增加 σ 且固结时间减为 10 min。得到不同 σ 下的 q 值，通过库仑理论得到膨胀土的抗剪强度参数。（步骤（1）～（4）为 $p_r=0$ kPa 工况全过程）。

（5） $p_r>0$ 的 3 种工况试验过程为成孔后立即对试验深度膨胀土分别施加 $p_r=200$、300、400 kPa，固结 20 min 后卸载到一定值，重复步骤（3）和（4）。

（6）浸水后状态即模拟雨水对不同工况下坡体强度指标的影响。成孔后先对试验深度膨胀土注水浸泡，为了防止孔壁因浸水膨胀以及孔壁表面坍塌，注水后直接将剪切探头放置试验深度[20]重复步骤（2）～（5）。该试验从孔底开始，每次注水到试验深度，试验完成后再将剪切探头往上移至下一个试验土层，逐层进行试验。具体试验方案见表 3。

表 3 孔内剪切试验方案

Table 3 Borehole shear test program

工况	预加载荷 / kPa	法向应力 / kPa	状态
滞后支护	0	25，50，75，100，150，200，300，400	浸水前，浸水后
及时支护	200	25，50，100，200	
	300	38，75，150，300	
	400	50，100，200，400	

3.2 试验结果

试验得到了 4 个预加载荷（ $p_r=0$、200、300、400 kPa）、两种状态（浸水前和浸水后）下南阳膨胀土剪应力 q 与位移 s 关系曲线如图 5 所示，图中 dry 和 wet 分别表示浸水前（试验孔为干燥状态）和浸水后（试验孔为浸水状态）两种状态，其后压力大小表示作用于土体的法向应力大小，如 wet-300 kPa 表示试验土层浸水后在 300 kPa 法向应力下固结剪切。

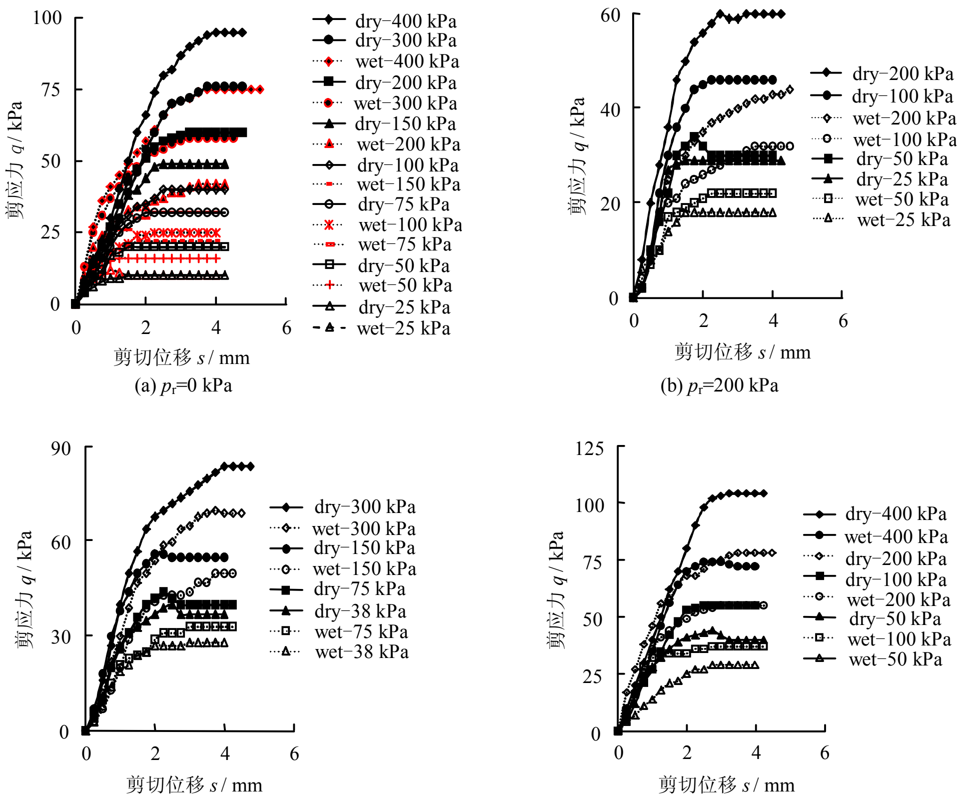


图 5 剪应力与剪切位移关系曲线

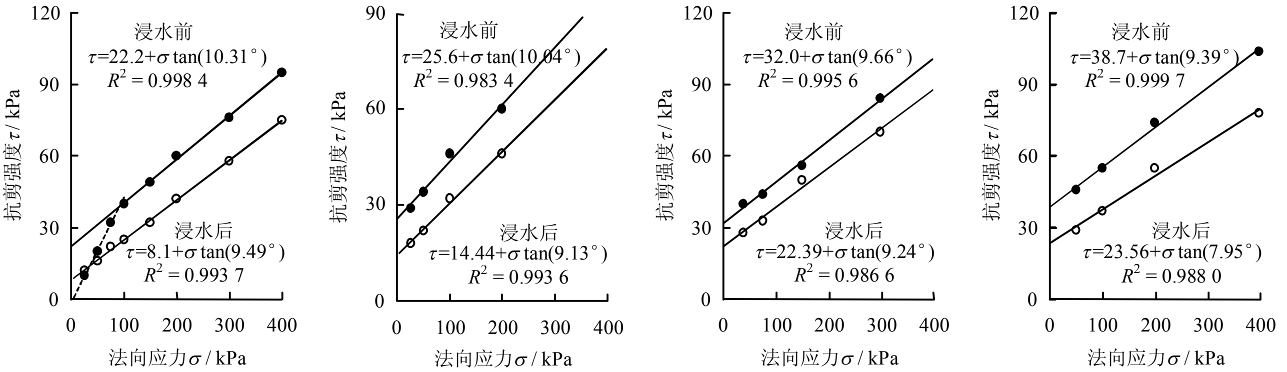
Fig.5 Relationships between shear stress and shear displacement

4　试验结果分析与讨论

4.1　荷载施加方式对膨胀土原位强度特性影响

预加载荷施加与否以及预加载荷大小对南阳膨胀土应力随位移变化曲线形态基本没有影响，*q-s* 曲线呈弱硬化变形特征（见图 5）。浸水状态相同时，相同 σ 作用下膨胀土的刚度随着 p_r 的增加逐渐增加直至稳定，说明膨胀土经历了较高外荷载的压密作用后抵抗变形的能力增强。

预加载荷（$p_r > p_c$ 时）对土体的作用，相当于土体受到较大的先期固结压力，类似于超固结土的应力历史。借鉴超固结土受不同 p_c 影响下强度特性，整理不同 p_r 下膨胀土抗剪强度与法向应力关系曲线如图 6 所示，各种工况下膨胀土强度包络线均呈较好的线性关系，线性相关系数能达到 0.98 以上。由此得到不同预加载荷下膨胀土的抗剪强度参数列于表 4。可以看出，预加载荷对膨胀土抗剪强度的影响主要体现在黏聚力上，p_r 从 0 kPa 增加到 400 kPa，浸水前、后，膨胀土的 c 值增幅分别达 20.7 kPa 和 16.6 kPa；而 φ 值变化甚微，大体上随着 p_r 的增加略有减小。究其原因可能是：① p_r 作用引起土体损伤，p_r 越大，损伤越严重；② p_r 越大即意味着土体被压得越密实，颗粒之间的接触点越多，因而结构的接触连结强度也有所增强，仅从物理压



(a) p_r=0 kPa　(b) p_r=200 kPa　(c) p_r=300 kPa　(d) p_r=400 kPa

图 6　抗剪强度与法向应力关系曲线

Fig.6　Relationships between shear strength and normal stress

表 4　抗剪强度参数

Table 4　Parameters of shear strength

p_r / kPa	状态	深度 z / m	c / kPa	φ / (°)	c 均值 / kPa	φ 均值 / (°)
0	浸水前	3	22.2	10.31	20.1	11.14
		4	22.5	10.85		
		5	15.6	12.26		
	浸水后	3	8.1	9.49	7.0	10.92
		4	4.4	10.89		
		5	8.5	12.37		
200	浸水前	3	25.6	10.04	27.2	11.64
		4	24.3	13.18		
		5	31.6	11.71		
	浸水后	3	14.4	9.13	14.4	9.13
300	浸水前	3	32.0	9.66	32.9	10.52
		4	31.8	11.33		
		5	34.8	10.56		
	浸水后	3	22.4	9.24	22.4	9.24
400	浸水前	3	38.7	9.39	40.8	9.55
		4	40.6	10.32		
		5	43.0	8.93		
	浸水后	3	23.6	7.95	23.6	7.95

密的角度来看，已固化的结构连结强度不会被破坏[23]，即使是短暂的应力状态也会在峰值荷载卸除后在一定程度上保留。p_r 的压密作用和损伤效应共同作用，p_r 越大，压密作用越显著，超过了由其引起的土体损伤，因此，φ 值降幅很小。

图 7 给出了相同浸水状态和预加载荷下抗剪强度参数均值随 p_r 变化关系。可以发现，膨胀土的 c 值、φ 值随 p_r 变化规律可用线性关系近似表示，即

$$c = Ap_r + B \tag{1}$$

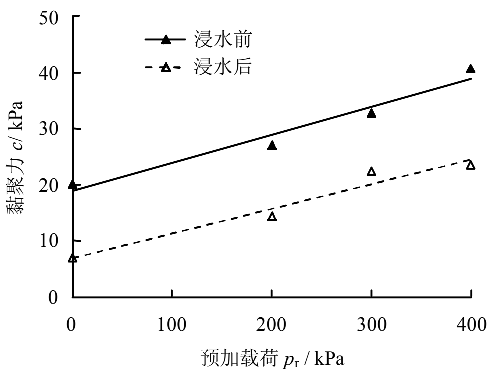
$$\varphi = Mp_r + N \tag{2}$$

式中：A、B、M、N 均为拟合参数。

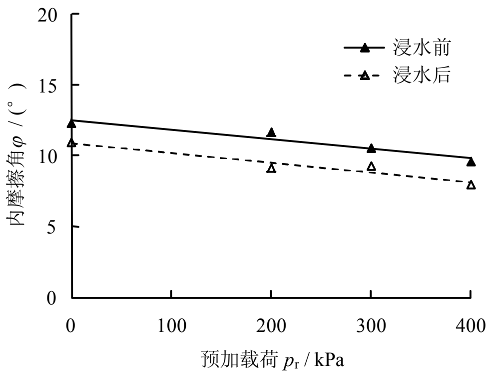
浸水前、后土体 c 值、φ 值与 p_r 关系拟合曲线参数如表 5 所示，可以看到其线性相关系数 R^2 达到 0.92 以上。c 和 p_r 关系曲线斜率，浸水后比浸水前的稍缓；浸水前后的 φ 和 p_r 关系曲线近乎平行，但其曲线很缓，可以不考虑内摩擦角的变化。在实际工程坡体稳定性分析中，可以根据工程要求达到的安全系数计算出所需的土体抗剪强度参数，利用式

（1）和表 5 反推出所需的预加载荷大小，从而指导实际工程设计与施工。

从图 6(a)可以发现，当 $p_r = 0$ 时浸水前的膨胀土强度包络线可近似为两条直线，在σ较小的情况下，得到的抗剪强度包络线较陡，随着σ增大，抗剪强度包络线较平缓，出现这种现象有两种可能性：①在较小压力下，土体剪切过程中视为排水剪切，而随着σ的增加，土体剪切过程中产生正的孔隙水压力，使得有效应力减小，因而强度较排水剪切强度小，强度包络线变缓；②在较小的σ下，剪切板不易嵌入坚硬或超固结土体，使得测得的抗剪强度偏小，随着σ的增加，剪切板充分嵌入土体，得到真实的强度。文献[21，24]试验结果中也出现了上述现象。



(a) 黏聚力随预加载荷变化曲线



(b) 内摩擦角随预加载荷变化曲线

图 7　抗剪强度参数随预加载荷变化曲线
Fig.7　Relationships between parameters of shear strength and preloading

表 5　c、φ与 p_r 关系拟合参数
Table 5　Fitting parameters between c, φ and p_r

状态	c 与 p_r 拟合参数			φ 与 p_r 拟合参数		
	A	B / kPa	R^2	M / (kPa^{-1})	N / (°)	R^2
浸水前	0.050	18.91	0.96	−0.006 7	11.58	0.92
浸水后	0.044	6.90	0.96	−0.006 9	10.86	0.92

本文试验结果与后者相似，首先，该区超固结膨胀土处于坚硬状态，在较小σ下，剪切板难以充分嵌入土中，使得测得的抗剪强度偏小；当膨胀土浸水后，由于土体遇水软化，即使在较小的σ下，剪切板亦能充分嵌入土中，得到的抗剪强度包络线不再呈现两段式。进一步分析可知，浸水前τ-σ关系曲线与预期刚好相反，即较低σ作用下膨胀土处于超固结状态，其强度包络线应较正常固结状态（即$\sigma > p_c$）强度包络线更缓。但发现两条直线的交点处法向应力为 100 kPa，与固结试验得到的 p_c 相近。可以认为，在固结压力小于 p_c 时，剪切头不能充分嵌入土体，而当外界压力超过 p_c 后，压力才能完全施加在土体上，所以，测试硬黏土时也可以通过 BST 大致确定膨胀土的 p_c。

4.2　浸水对膨胀土原位强度特性影响

浸水与否对南阳膨胀土 q-s 曲线形态也影响甚微，曲线仍呈弱硬化变形特征（见图 5）。由图 5 可以看到，相同 p_r 和σ作用下，浸水后膨胀土的 q-s 曲线基本位于浸水前相应曲线的右下方，说明浸水后膨胀土刚度小于相同应力路径下浸水前的刚度，浸水后膨胀土抵抗变形的能力明显减弱。

当 p_r 相同时，膨胀土浸水后较浸水前的抗剪强度有明显降低，如 $p_r = 0$ 时，浸水后膨胀土的抗剪强度较浸水前抗剪强度有明显降低，强度最大降幅达到了 56.9%，而经室内试验计算得到该处膨胀土初始饱和度为 95.3%（见表 1），已处于饱和状态。同时，不同 p_r 影响下，浸水后较浸水前膨胀土的抗剪强度也有不同程度衰减，降幅在 10%～40%之间，但整体上较 $p_r = 0$ 时的强度降幅小。说明浸水对膨胀土的软化作用十分显著，预加载荷对浸水软化效应有一定的抑制作用。

膨胀土浸水软化的原因可能是：膨胀土具有特殊的双孔隙结构[25]，其吸湿变形特性与初始状态和应力状态相关，包括团粒结构（组成聚集体的团粒间孔隙）和宏观孔隙（聚集体间及其与非黏土矿物间孔隙）的体积变形[26]。团粒结构的体积变形主要取决于含水率（吸力）的变化，宏观孔隙的体积变形主要由外荷载引起，同时团粒结构的体积变形也会引起宏观孔隙的体积变形。膨胀土浸水后，黏土矿物吸水膨胀，含水率由天然状态的 24.7%增加到近饱和状态的 31.3%，使得团粒结构的变形量增大，同时引起了宏观孔隙体积增大，抗剪强度降低。从应力路径角度来看，膨胀土吸水过程即为应力释放的卸荷过程，吸水引起有效应力减小，从而减弱了土体抗剪强度。

浸水后膨胀土抗剪强度的降低主要表现在 c 值显著降低（见表 4），其最大降幅达到 18.1 kPa，而 φ 值变化不大。这是由于土样浸水后水膜充填在土颗粒之间破坏了土中化合物的胶结，削弱了分子引力提供的原始黏聚力；虽然浸水对颗粒有润滑作用，但膨胀土初始饱和度已经达到了 95.3%，水的润滑作用不明显，因此，浸水后膨胀土强度的降低主要由 c 值减小引起的。李雄威等[27]开展不同水化作用时间和温度影响的膨胀土强度特性试验，发现膨胀土饱和后还会经历相当长的膨胀时间，不难想象，如果加长浸泡时间，膨胀土原位强度将发生更大幅度的下降。所以，膨胀土堑坡施工要尽量避开雨季，同时要充分考虑降雨入渗、灌溉入渗等对坡体强度的影响。

4.3　浸水软化效应与预加荷载抑制作用讨论

图 8 为膨胀土抗剪强度与预加载荷关系曲线，由于在相同 p_r 作用下，膨胀土强度包络线呈很好的线性关系（见图 6），因此，利用插值法得到部分未进行试验的固结压力下的抗剪强度。

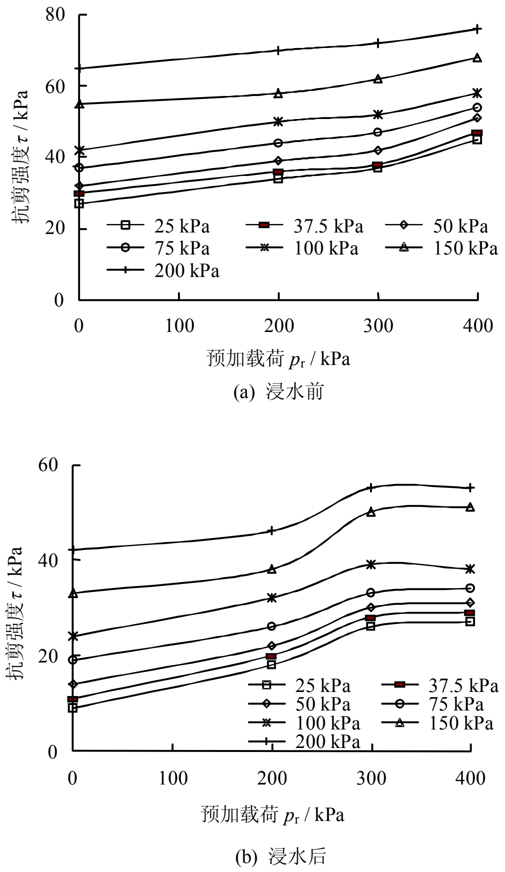


图 8　抗剪强度随预加载荷变化关系曲线
Fig.8　Relationships between shear strength and preloading

浸水前、后膨胀土抗剪强度随 p_r 变化趋势相同，p_r 由 0 kPa 增加到 400 kPa，各级 σ 作用下膨胀土抗剪强度增幅近似，且随 σ 的增大，增幅减小。抗剪强度的增幅都由 25 kPa 压力下的 18 kPa 减小到 200 kPa 压力下的 13 kPa。当 $p_r = 0$ kPa 时，膨胀土所处状态位于压缩回弹曲线中加载段（图 9 中的 A_0 点），当 $p_r > 0$ kPa 时，膨胀土状态处于曲线卸载段（A_1、A_2、A_3 点）。由图 9 可以明显看出，随着 p_r 增大，膨胀土的孔隙比减小；同时，随着 σ 的增加（由 A 到 B），不同 p_r 间孔隙比减幅减小。因此，预加荷载作用下，膨胀土宏观孔隙减小，抗剪强度增大。

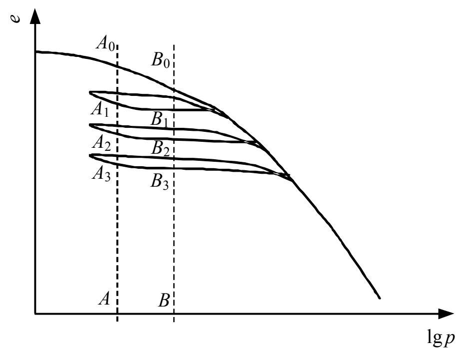


图 9　压缩回弹曲线
Fig.9　Compression and resilience curves

进一步分析发现，浸水前、后膨胀土抗剪强度随 p_r 增长路径不同，浸水前呈现先缓后陡，而浸水后呈现先陡后缓的趋势。说明在外载荷作用下，大孔隙体积变形增大，而浸水膨胀又使土体大孔隙体积变形减小，当外载荷达到一定值时，两种作用达到了近似平衡状态，膨胀土抗剪强度趋于恒定，即预加载荷对浸水软化效应有一定的抑制作用，但当预加载荷增加到一定值后，无法发挥更大的抑制作用，如预加载荷从 300 kPa 增加到 400 kPa，浸水后膨胀土抗剪强度几乎不增加。因此，在坡体稳定性分析时，要综合考虑水和预加载荷的作用，合理选取预加载荷以达到既安全又经济的目的。

从应力路径（施加预加载荷与否和预加载荷大小）对膨胀土强度特性影响的 BST 可以认为，预加载荷对膨胀土强度参数影响较大，说明施工工序和支护载荷影响着边坡的稳定程度。$p_r = 0$ kPa 相当于坡体开挖滞后支护的施工工序；$p_r > 0$ kPa 相当于开挖后及时支护的施工工序。从试验结果来看，采取后者坡体较稳定。不难想象，如果进行先支护后开挖的施工工序，坡体稳定性将较前两者更稳定，但考虑到边坡开挖支护的施工工艺以及施工的可行性，以开挖滞后支护和及时支护为主，膨胀土边坡

支护宜采用后者。

浸水条件对膨胀土强度特性影响的 BST 试验结果充分验证了膨胀土边坡易在雨季发生滑塌的原因，水对膨胀土的软化作用十分显著，膨胀土遇水软化，强度大幅减小，增加预加载荷对强度降低有一定抑制作用，但效果有限。在实际工程中应注意施工工艺安排，规避环境作用对工程安全的影响。

5　结论与建议

（1）膨胀土原位孔内剪切试验所得到的剪应力−位移关系曲线总体上呈现弱硬化变形特征，浸水对南阳膨胀土抗剪强度影响很大，最大降幅达 56.9%，主要表现为黏聚力的减小，最大降幅达 18.1 kPa，但内摩擦角变化不大。

（2）膨胀土的抗剪强度随着预加载荷的增加而增大，且主要体现在黏聚力的增加上，黏聚力与预加载荷近似呈线性正相关，p_r 从 0 kPa 增加到 400 kPa，浸水前、后 c 值增幅分别达 20.7 kPa 和 16.6 kPa。浸水前、后，膨胀土的 φ 值随 p_r 近似呈线性负相关，但降幅甚微。

（3）水对膨胀土的软化作用明显，虽然预加载荷对浸水软化效应有一定的抑制，但当预加载荷增大到一定应力水平时，难以发挥更大的抑制作用。在膨胀土边坡稳定性分析时除优先选用浸水后土体强度参数外，宜充分利用黏聚力随预加载荷增加而增大的线性变化关系，根据工程要求达到的安全系数反推出所需的预加载荷的大小，从而指导实际工程施工。

参 考 文 献

[1] NELSON J D, CHAO K C, OVERTON D D, et al. Foundation engineering for expansive soils[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

[2] 陈尚法, 温世亿, 冷星火, 等. 南水北调中线一期工程膨胀土渠坡处理措施[J]. 人民长江, 2010, 41(16): 65－68.
CHEN Shang-fa, WEN Shi-yi, LENG Xing-huo, et al. Treatment measures of expansive soil canal slope with the first stage of the middle route south-to-north water transfer project[J]. **Yangtze River**, 2010, 41(16): 65－68.

[3] 陆定杰, 陈善雄, 罗红明, 等. 南阳膨胀土渠道滑坡破坏特征与演化机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 189－196.
LU Ding-jie, CHEN Shan-xiong, LUO Hong-ming, et al. Study of failure characteristics and evolution mechanism of canal slope of Nanyang expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 189－196.

[4] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Engineering behavior of special rock and soil[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[5] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141－161.
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(5): 141－161.

[6] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065－1073.
KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 1065－1073.

[7] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155－2161.
YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2155－2161.

[8] 杨果林, 滕珂, 谢兰芳. 膨胀土强度的室内直剪和原位推剪对比试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 1952－1959.
YANG Guo-lin, TENG Ke, XIE Lan-fang. Experimental study of direct shear and in situ clipper on strength of expansive soil[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2014, 45(6): 1952－1959.

[9] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 植被作用下膨胀土渗透和力学特性及堑坡防护机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 85－91.
LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 85－91.

[10] 张俊然, 孙德安, 姜彤. 吸力历史对非饱和弱膨胀土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3094－3100.
ZHANG Jun-ran, SUN De-an, JIANG Tong. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated weakly-expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3094－3100.

[11] 李雄威, 王爱军, 王勇, 等. 模拟日照条件下膨胀土的湿-热耦合性状及蒸发效应[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2821－2826.
LI Xiong-wei, WANG Ai-jun, WANG Yong, et al. Moisture-heat coupling behavior and evaporation effect of expansive soil in simulated solar[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 2821－2826.

[12] 廖红建, 李涛, 彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1939－1944.
LIAO Hong-jian, LI Tao, PENG Jian-bing. Study of strength characteristics of high and steep slope landslide mass loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 1939－1944.

[13] 张玉成, 杨光华, 苏卜坤, 等. 土质边坡土体抗剪强度室内外试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 45－49.
ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, SU Pu-kun, et al. Laboratory and field testing study on shear strength of soil slopes[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)**, 2007, 22(3): 45－49.

[14] 谢定义, 陈存礼, 胡再强. 试验土工学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
XIE Ding-yi, CHEN Cun-li, HU Zai-qiang. Experimental soil engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.

[15] BECHTUM T. Automation and further development of the borehole shear test[D]. Ames: Iowa State University, 2012.

[16] YANG J F J. Role of lateral stress in slope stability of stiff overconsolidated clays and clayshales[D]. Ames: Iowa State University, 1987.

[17] 交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
The Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E40-2007 Test methods of soil for highway engineering[S]. Beijing: People Communications Press, 2007.

[18] 东南大学, 浙江大学, 湖南大学, 等. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Southeast University, Zhejiang University, Hunan University, et al. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[19] 李新明. 膨胀土超固结应力释放的力学性状与堑坡稳定性分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
LI Xin-ming. Mechanical behaviors of expansive soil due to the over-consolidated stress release and stability analysis of cut slope[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.

[20] KHOURY C N, MILLER G A. Influence of flooding on borehole shear test (BST) results in unsaturated soil[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2006, (147): 235－246.

[21] HANDY R L, SCHMERTMANN J H, LUTENEGGER A J. Borehole shear tests in a shallow marine environment[J]. **Strength Testing of Marine Sediments: Laboratory and In-situ Measurements**, **ASTM STP**, 1985, 883: 140－153.

[22] WINELAND J D. Borehole shear device[C]//Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties. Raleigh: American Society of Civil Engineers, 1975: 511－522.

[23] 高国瑞. 近代土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
GAO Guo-rui. Neoteric soil geotechnology[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[24] LUTENEGGER A J, HALLBERG G R. Borehole shear test in geotechnical investigations[J]. **ASTM Special Technical Publication**, 1981, (740): 566－578.

[25] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54(1): 173－183.

[26] 张俊峰, 邹维列, 李志勇, 等. 压实膨胀土吸湿体变特征的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 3(11): 596－601.
ZHANG Jun-feng, ZOU Wei-lie, LI Zhi-yong, et al. Experimental research of wetting-induced deformation characteristics for compacted expansive soil[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2015, 3(11): 596－601.

[27] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3193－3198.
LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3193－3198.