

DOI: 10.11779/CJGE2021S1016

非饱和原状黄土的湿剪破坏特性

张登飞¹, 王家鼎¹, 张文博², 陈存礼³

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 深圳能源资源综合开发有限公司, 广东 深圳 518301;
3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:用非饱和土三轴剪切渗透仪,对原状黄土进行了常吸力三轴剪切与常剪应力增湿两类水力路径试验,分析了应力剪切与增湿剪切作用下原状黄土的应力应变及临界状态特性,探讨了水力路径对原状黄土增湿抗剪特性的影响,明晰了发生湿剪破坏时需满足的必要条件。研究表明:常吸力三轴剪切试验获得的不同吸力原状黄土的偏应力与净平均应力表示的 $q-p$ 临界状态线为非平行直线,偏应力与有效平均应力表示的 $q-p'$ 临界状态线可归一为一条直线,且可近似用饱和土临界状态线表示。常剪应力增湿试验获得的原状黄土 $q-p'$ 临界状态点可归一,可用莫尔-库仑强度理论的线性形式描述;吸力对原状黄土抗剪强度贡献与水力路径有关,后者试验确定的抗剪强度参数比前者的低;定义了剪应力水平阈值与吸力阈值,用以判定是否会发生湿剪破坏及其发生湿剪破坏时吸力丧失程度,结合提出的考虑剪应力影响的持水模型获得了该阈值的表达式。

关键词:非饱和原状黄土;湿剪破坏;水力路径;吸力;临界状态

中图分类号:TU411 文献标识码:A 文章编号:1000-4548(2021)S1-0087-06

作者简介:张登飞(1987—),男,陕西人,博士,主要从事黄土灾害与黄土力学研究。E-mail: dfzhang87@nwu.edu.cn。

Behaviors of wetting-induced failure for unsaturated intact loess

ZHANG Deng-fei¹, WANG Jia-ding¹, ZHANG Wen-bo², CHEN Cun-li³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Shenzhen Energy Comprehensive Resource Development Co., Ltd., Shenzhen 518301, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi Province, Xi'an 710048, China)

Abstract: The tests are performed on intact loess under two separate hydro-mechanical paths: constant-suction triaxial shearing and constant-shear stress wetting in steps, using the triaxial equipment for shearing and permeability of unsaturated soils. The variation characteristics of stress-strain and critical state identified from shearing and wetting are analyzed. The influences of hydro-mechanical path on the wetting-induced failure of intact loess are discussed. The necessary conditions are clarified when wetting-induced failure occurs. The results show that the critical state lines (CSLs) on the deviator stress versus the net mean stress ($q-p$) plane from constant-suction triaxial shearing tests are non-parallel straight lines, while the data of the critical state points collapse along a single line much closer to the saturated CSL on the deviator stress versus effective mean stress ($q-p'$) plane. The data of critical state points from constant- q wetting tests tend to merge together on $q-p'$ plane, which can well be described by the linear form of the Mohr-Coulomb strength theory. The contribution of suction to the shear strength of the loess is dependent on the hydro-mechanical path, and the values of strength parameters are lower obtained by the latter tests than those of the former tests. The threshold values of shear stress level and suction are identified, which can be used to judge whether the wetting-induced the intact loess failure may occur. The expressions for those threshold values are obtained by combining with the proposed water retention model considering the influences of shear stress.

Key words: unsaturated intact loess; wetting-induced failure; hydro-mechanical path; suction; critical state

0 引言

黄土作为典型非饱和土,在天然状态下具有良好的工程性质,但因降雨、灌溉或管道渗漏等遭受水的增湿作用时,常会发生强度骤降甚至出现增湿剪切破坏现象,即黄土水敏性所表现出的湿剪性^[1]。这一特性使得黄土滑坡、崩塌、地基失稳等灾害分布广泛,造成严重的人员伤亡和经济损失,已成为该地区最为典型

的地质灾害。对非饱和黄土的增湿抗剪特性研究通常采用两种方法:其一是基于不同湿度黄土的剪切试验(应力变化),通过含水率或吸力对应力抗剪特性的影

基金项目:国家自然科学基金项目(41907233);支撑服务川藏铁路规划建设地质调查(20190505);川西-藏东地区交通廊道活动构造与地质调查(DD20201123)

收稿日期:2020-12-28

表1 原状 Q_3 黄土的物理性质
Table 1 Physical properties of intact Q_3 loess

相对质量 密度 G_s	含水率 $w_n/\%$	干密度 $\rho_{d0}/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	颗粒组成/ $\%$		
					>0.075 mm	$0.075 \sim 0.005$ mm	<0.005 mm
2.70	15.2	1.28	30.9	19.8	4	73	23

响来间接反映增湿抗剪特性,如对非饱和黄土进行常吸力或常含水率下三轴剪切或直剪试验,定量描述了抗剪强度及其强度参数与含水率或吸力之间关系^[2-4];其二是基于不同常剪应力水平下黄土的浸水试验(湿度变化),直接探讨增湿抗剪特性,如对非饱和黄土进行常剪应力水平下分级或直接增湿至饱和试验,探讨了黄土的增湿剪切破坏特性及其定量化描述^[5-6]。应该指出的是增湿引起黄土破坏的直接诱发因子是水而非应力,且多增湿至非饱和状态即发生了破坏,采用后者方法研究更符合实际。但目前多局限于前者方法研究,有关这两种方法是否对非饱和黄土的增湿抗剪特性有影响,发生湿剪破坏时需满足的必要条件是什么,以及如何描述等这些问题尚不清楚。基于此,本文以原状黄土作为研究对象,开展常吸力三轴剪切与常剪应力水平分级浸水两种水力路径试验,初步探讨非饱和和原状黄土的增湿抗剪特性及其水力路径的影响。

1 试验方案及方法

1.1 试验用土及试样制备

试验用土为西安某基坑的原状 Q_3 黄土,取土深度3~4 m,其初始吸力 $s_0 = 175$ kPa,其他物理性质指标见表1。用削样器制备直径约3.91 cm,高度为8 cm的三轴试样进行试验。

1.2 试验仪器

试验仪器是在已有非饱和三轴仪上改装而成,主要是增设了轴向应力控制装置与浸水装置。前者是通过气压加载装置驱动气压缸中活塞以施加目标应力,后者是利用气体反压将增湿管(与试样帽相连)的目标水量注入到试样中以实现增湿。该仪器可进行常吸力或常含水率下不同应力路径三轴压缩试验,常应力状态下分级浸水试验;其测定的精度:试样的体变与排水量为 0.01 cm^3 ,轴向变形为 0.01 mm,孔隙水压力为1 kPa。具体的仪器结构详见文献[7]。

1.3 试验方案及方法

为了研究非饱和和原状黄土的增湿抗剪特性及其水力路径的影响,在已开展控制吸力和净围压的固结排水三轴剪切试验^[4]的基础上,进一步开展控制净围压与剪应力水平分级浸水试验,简称常剪应力分级增湿试验,控制的净围压 σ_3 分别为50,100,200,400 kPa,

控制的剪应力水平 R_s 分别为0.25,0.50,0.75,其中 $R_s = q/q_t$, $q(q = \sigma_1 - \sigma_3, \sigma_1$ 为净轴向应力)为偏应力, q_t 为 $s = 175$ kPa时不同 σ_3 对应的抗剪强度。

试验主要包括等吸力固结、排水剪切和常剪应力分级浸水三个阶段。首先,对天然含水率试样($s_0 = 175$ kPa)进行等吸力固结;其次,待排水与变形稳定后,沿 s 和 σ_3 保持不变的三轴剪切路径加载至目标剪应力水平 R_s ;最后,待排水与变形稳定后,进入 R_s 和 σ_3 保持不变的分级浸水至饱和,其中浸水控制标准为:分级数大于6,每级含水率增量 $\Delta w \geq 2\%$ 。具体浸水方法详见文献[7]。

试验过程中,采集系统测记轴向变形,体变和孔隙水压力。以体变的增量小于 0.01 $cm^3/2h$,轴向变形小于 0.005 mm/h,吸力增量小于1 kPa/2h作为等吸力固结、剪切及浸水的稳定标准。

2 常吸力三轴剪切试验结果及分析

三轴剪切条件下,净平均应力 $p = q/3 + \sigma_3$,有效平均应力(平均骨架应力) $p' = p + S_r s$ 。对于本文研究的黄土,其 $q-\varepsilon_1$ 曲线属硬化型;以 $\varepsilon_1 = 15\%$ 作为破坏标准,确定出不同试验条件下常吸力三轴剪切试验破坏时的应力(p_t, q_t)及饱和度 S_{rt} (篇幅所限,未示出)。将其破坏应力点分别绘于 $q-p$ 与 $q-p'$ 平面上,如图1所示。可以看出:

(1) s 相同时, $q-p$ 临界状态线皆可拟合为直线(图1(a)),其直线的截距与斜率分别用 h 和 M 表示。在试验的吸力范围内($0 \sim 175$ kPa),随着 s 的减小,斜率 M 略有增大,即不同 s 下 $q-p$ 临界状态线并非平行,而是随 p 增大逐渐逼近饱和和临界状态线;截距 h 随之显著减小。说明原状黄土的抗剪强度对吸力非常敏感,且主要体现在与吸力相关的黏结强度上。

(2) 不同 s 下 $q-p'$ 关系试验点分布在很窄带内, $q-p'$ 临界状态线(CSL)可以归一为一条直线,且可近似用饱和 $q-p'$ 临界状态线表示,其斜率 $M = 1.136$ (图1(b))。这一规律使得确定非饱和黄土抗剪强度大为简便,即只需确定饱和和状态时抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)与非饱和状态破坏时饱和度与吸力即可,避免了确定 $q-p$ 临界状态线与吸力之间关系时而引入新的参数。

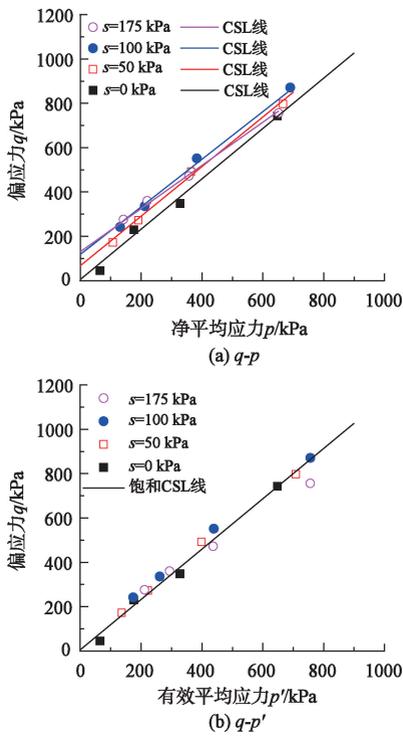


图 1 $q-p$ 和 $q-p'$ 平面上常吸力三轴剪切试验的临界状态线
Fig. 1 Critical state lines (CSL) from constant-suction shearing tests

3 常剪应力分级增湿试验结果及分析

3.1 应力应变与吸力变化特性

对于常剪应力分级增湿试验,根据固结与剪切及增湿时轴向变形与体变,得到试样的轴应变与体应变;根据体变量、固结时排水量、增湿时浸水量及孔隙水压力,可得到孔隙比 e 、含水率 w 、饱和度 S_r 及吸力 s 。不同净围压 σ_3 与剪应力水平 R_s 下剪切及增湿过程中的 $q-\varepsilon_1$ 和 $s-\varepsilon_1$ 曲线如图 2 所示。此外,把 $s=175$ kPa 三轴剪切时 $q-\varepsilon_1$ 曲线也绘于此图中。可以看出:

(1) 在恒定剪应力水平下增湿过程中,吸力 s 从 175 kPa 逐渐降低,导致轴应变单调增加,体现了增湿引起黄土的剪切行为,即黄土的湿剪特性。

(2) 增湿过程中, ε_1 随 R_s 增加而增加,其速率随 σ_3 增大而减小。当以 $\varepsilon_1 = 15.0\%$ 为破坏标准时,如除 $R_s = 0.25, R_s = 0.50$ ($\sigma_3 = 400$ kPa) 下未达到破坏标准外,其余均已发生湿剪破坏,破坏时的吸力 s_f 标记在图 2 中,其值及相应的饱和度 S_{r_f} 列于表 2。发现 s_f 随 R_s 的增加而增加,随 σ_3 增加先增加后减小。换言之,增湿引起黄土的破坏行为依赖于剪应力水平,净围压和吸力丧失程度。

3.2 持水特性

σ_3 相同, R_s 不同条件下,典型的饱和度 S_r 与吸力 s 关系表征的持水曲线如图 3 所示。可见,常剪应力下从天然状态增湿至饱和过程中, S_r 增大, s 减小, S_r-s 曲线皆呈先陡变后缓变的上升趋势。随着剪应力水平的增大, S_r-s 曲线向上移动;随着净围压的增大,转折处

对应的吸力明显增大。说明原状黄土常应力增湿持水特性与剪应力水平及净围压密切相关。

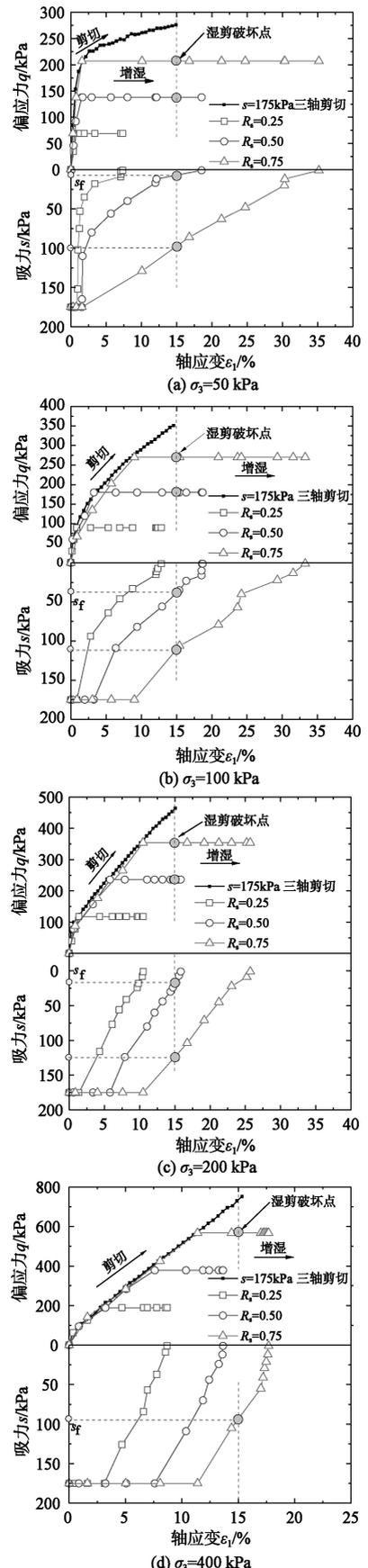


图 2 常剪应力增湿试验的 $q-\varepsilon_1$ 和 $s-\varepsilon_1$ 曲线
Fig. 2 $q-\varepsilon_1$ and $s-\varepsilon_1$ curves for wetting tests at constant- q

表2 常剪应力增湿试验中试样的状态特性

Table 2 State properties from wetting tests at constant- q

σ_3 /kPa	R_s	q /kPa	S_{r0}	s_f /kPa	S_{rf}	α /kPa $^{-1}$	n	R^2
50	0.25	69	0.365	—	—	0.071	1.421	0.994
50	0.50	138	0.366	7	0.920	0.059	1.423	0.998
50	0.75	207	0.375	100	0.496	0.049	1.428	0.979
100	0.25	90	0.366	—	—	0.064	1.422	0.985
100	0.50	180	0.385	37	0.723	0.044	1.429	0.975
100	0.75	270	0.416	110	0.491	0.033	1.429	0.966
200	0.25	118	0.385	—	—	0.050	1.422	0.989
200	0.50	236	0.412	16	0.933	0.034	1.427	0.964
200	0.75	354	0.457	124	0.539	0.028	1.424	0.979
400	0.25	189	0.438	—	—	0.036	1.424	0.998
400	0.50	378	0.487	—	—	0.029	1.423	0.999
400	0.75	567	0.539	92	0.647	0.024	1.420	0.998

注：“—”表示未发生湿剪破坏。

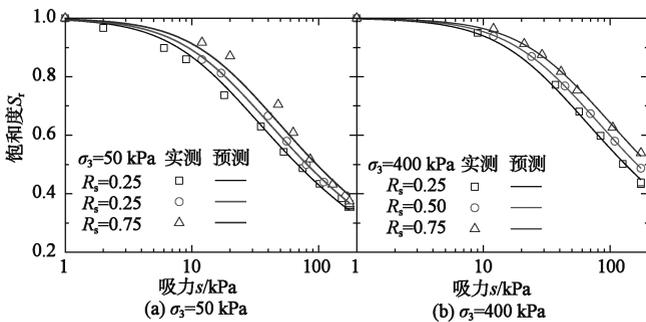


图3 常剪应力增湿试验的持水曲线

Fig. 3 Water retention curves from wetting tests at constant- q

Van Genuchten 模型(简称 VG 模型)广泛应用于描述土的持水特性,该模型用总饱和度 S_r 表示为

$$S_r = [1 + (\alpha s)^n]^{-m}, \quad (1)$$

式中, α, n, m 为土性参数,且 $m = 1 - 1/n$ 。在双对数坐标系中, $mn (mn = n - 1)$ 为 $S_r \sim s$ 曲线渐进线斜率,即 n 反映了脱(吸)湿率; $1/\alpha$ 为渐进线与直线 $S_r = 1$ 交点,对应的吸力即为进气(脱气)吸力值^[8]。

采用 VG 模型描述常剪应力增湿持水特性,不同试验条件下 VG 模型中拟合参数汇总于表 2,典型试验与预测对比如图 3 所示。可见,在所研究的吸力范围内, VG 模型很好地描述常剪应力下增湿持水特性。另外,参数 n 随净围压及剪应力水平变化很小,可取其平均值 $n = 1.424$; 参数 α 随剪应力水平及净围压增大而减小(即脱气值越大)。说明剪应力水平及净围压对原状黄土增湿持水特性的影响主要通过脱气值的变化来体现。

不同净围压下参数 α 与剪应力水平 R_s 近似呈平行直线(图 4(a)),其表达式为

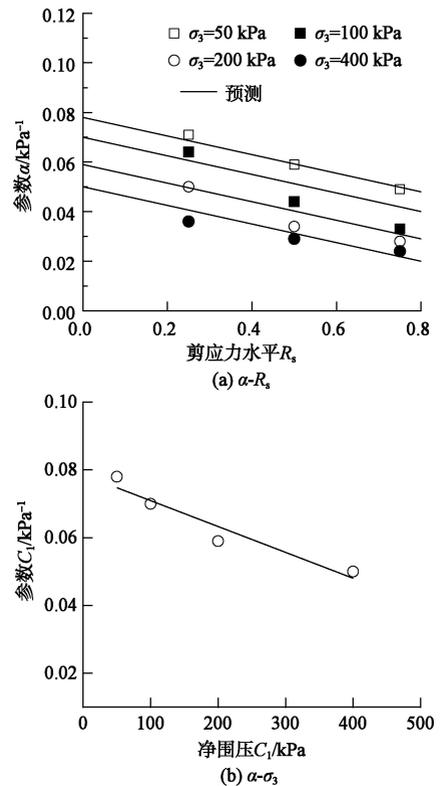
$$\alpha = C_1 - C_2 R_s, \quad (2)$$

式中, C_1, C_2 为土性参数,分别为 $\alpha-R_s$ 关系直线的截距与斜率,且 C_2 与 σ_3 无关,而 C_1 随 σ_3 增大近似呈线性减小趋势(图 4(b)),其表达式为

$$C_1 = C_3 - C_4 \sigma_3, \quad (3)$$

式中, C_3, C_4 为土性参数,分别为 $C_1-\sigma_3$ 关系直线的截距与斜率,且 C_3 表示无应力下持水曲线参数 α , C_4 表示参数 C_1 随 σ_3 增大而减小的速率。对于本文研究的原状黄土, $C_2 = 0.038 \text{ kPa}^{-1}$, $C_3 = 0.079 \text{ kPa}^{-1}$, $C_4 = 3.38 \times 10^{-5} \text{ kPa}^{-2}$ 。将式(2), (3)代入式(1),可得到常剪应力下增湿持水曲线模型,其表达式为

$$S_r = \{1 + [(C_3 - C_4 \sigma_3 - C_2 R_s) s]^n\}^{-m} \quad (4)$$

图4 VG模型参数 α 与剪应力水平 R_s 及参数 C_1 与净围压 σ_3 关系Fig. 4 Parameter α of VG model as functions of shear stress ratio R_s and parameter C_1 as functions of net confining pressures σ_3

3.3 湿剪强度特性

将图 2 试验结果绘于 $q-p'$ 平面上,如图 5 所示。此外,为了比较将常吸力三轴剪切试验确定的临界状态线也绘于图 5 中。可以看出:

(1) 从天然状态沿恒定 q 路径增湿过程,吸力丧失而导致有效平均应力减小,部分试样增湿至吸力 s_f 时发生破坏,即在 $q-p'$ 平面上可直观地描述黄土湿剪破坏过程。同时,发生湿剪破坏的试验点位于狭窄带内,可用过原点的直线拟合,其斜率 M_s 为 0.919。表明原状黄土湿剪破坏特性可用莫尔-库仑强度理论的线性形式来描述。

(2) 常剪应力增湿试验比常吸力剪切试验确定的

CSL 线低 (即 $M_s < M$), 即增湿至前者试验确定的 CSL 线时已发生了破坏。利用 M_s 、 s_f 及 S_{rf} (表 2), 确定出湿剪破坏时 s_f 对应的抗剪强度参数 (c 和 φ), 与常吸力三轴剪切试验确定的抗剪强度参数进行比较 (见图 5 (b))。发现吸力对黄土抗剪强度的贡献取决于水力路径, 基于常吸力三轴剪切试验获得的抗剪强度参数 (即 c 和 φ) 随吸力的变化关系, 用于描述增湿引起的黄土破坏行为, 对于工程应用偏于不安全。

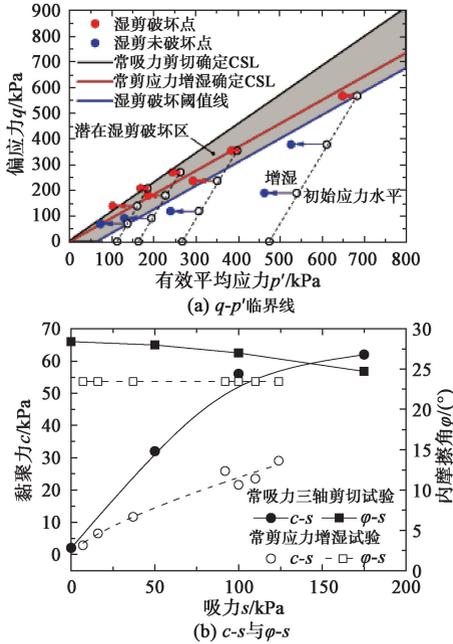


图 5 常剪应力增湿试验与常吸力三轴剪切试验确定临界状态特性比较

Fig. 5 Comparison of critical state lines on q - p' planes and strength parameters from constant- q wetting tests and constant-suction shearing

(3) 相同 σ_3 下, R_s 较低时, 从天然状态增湿至接近饱和时也未发生破坏, 如 $\sigma_3 = 200$ kPa、 $R_s = 0.25$ 下增湿情况; R_s 较高时, 从天然状态增湿至吸力 s_f 时就发生了破坏, 如 $\sigma_3 = 200$ kPa、 $R_s = 0.50$ 下增湿情况。因此, 可以推断出存在剪应力水平阈值 R_{sr} , 当在该应力水平下增湿至饱和时恰好发生湿剪破坏, 而小于该值增湿至饱和时也不会发生湿剪破坏。可见, 它对由稳定条件出发判定黄土增湿过程中是否会剪切破坏具有实际的工程意义。

推求 R_{sr} 的表达形式的示意图如图 6, 图中 A 点表示天然吸力 s_0 时当前应力状态 (p'_1, q_1), 其抗剪强度和剪应力水平为 q_1 和 R_s ($R_s = q_1/q'_1$)。当在 A 点状态增湿至饱和时恰好发生破坏, 对应的应力状态从 A 点移到临界状态线的 B 点 (p'_2, q_1) 上, 则 R_s 为剪应力水平阈值 R_{sr} 。假设饱和时的吸力为 0, 则 AB 路径有效平均应力减小量为 $\Delta p' = S_{r0}s_0$, S_{r0} 为增湿前饱和度。基于图 6 几何关系, p'_1 与 p'_2 亦可表示为

$$p'_1 = \frac{q_1}{M}, p'_2 = \frac{q_1}{M_s} = \frac{q_1 R_{sr}}{M_s} \quad (5)$$

引入考虑水力路径对湿剪强度影响的折减系数 ξ ($\xi = M_s/M$), 将 $\Delta p'$ 与 ξ 带入式 (5), 可推导得到 R_{sr} 表达式:

$$R_{sr} = \xi \left(1 - \frac{M \Delta p'}{q_1} \right) = \xi \left(1 - \frac{\Delta p'}{p'_1} \right) = \xi \left(1 - \frac{S_{r0}s_0}{p + S_{r0}s_0} \right) \quad (6)$$

由此可以得到发生湿剪破坏特性时剪应力水平 R_s 需满足的条件:

$$R_s \geq R_{sr} = \xi \left(1 - \frac{S_{r0}s_0}{p + S_{r0}s_0} \right) \quad (7)$$

对于本文研究的黄土, ξ 和 s_0 分别为 0.809 和 175 kPa, 加载至不同剪应力水平对应的 S_{r0} 值见表 2。根据式 (6) 可以在 q - p' 平面上确定湿剪破坏阈值线, 如图 5 所示。可见, 该阈值线可以很好地预判出是否可能会发生湿剪破坏, 若增湿前的应力状态低于阈值线, 则增湿至饱和也不会发生破坏; 反之, 则可能会发生破坏, 这与增湿时吸力丧失程度有关, 若发生湿剪破坏 ($R_r \geq R_{sr}$), 则吸力的丧失程度 $\Delta s \geq (s_0 - s_f)$ 。对于吸力 s_f 的阈值, 从稳定条件出发控制吸力的丧失程度具有实际的工程意义。

推导 s_f 的表达形式的示意图如图 6, 在恒定 q ($q \geq q_r$, 即 $R_r \geq R_{sr}$) 下增湿至吸力 s_f 时恰好发生了湿剪破坏, 相应的应力状态从 E 点移到临界状态线的 F 点上, 则有效平均应力减小量 $\Delta p' = S_{r0}s_0 - S_{rf}s_f$, S_{rf} 为破坏时吸力 s_f 对应的饱和度。与上述推导类似, 将式 (6) 中用 R_s 代替 R_{sr} , 将 $\Delta p'$ 代入即可得到

$$R_s = \xi \left(1 - \frac{S_{r0}s_0 - S_{rf}s_f}{p + S_{r0}s_0} \right) \quad (8)$$

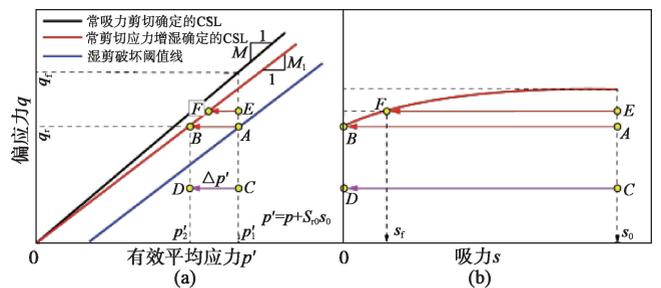


图 6 确定剪应力水平阈值 R_{sr} 与吸力阈值 s_f 的示意图

Fig. 6 Diagram for determining threshold values of stress level R_{sr} and matric suction s_f at failure

由此得到发生湿剪破坏特性时吸力 s_f 表达式为

$$S_{rf}s_f = S_{r0}s_0 - (1 - R_s/\xi)(p + S_{r0}s_0) \quad (9)$$

可见, R_s 越大或 p 越小, s_f 越大, 即发生湿剪破坏时吸力丧失量 $\Delta s = s_0 - s_f$ 越小, 反之亦然。此外, 当 $R_s = R_{sr}$ 时, s_f 等于零, 即式 (9) 退化为式 (6)。使用式 (9) 与持水曲线模型 (式 (4)), 利用图解法可得到相同 σ_3 下

R_s-s_r 和 $q-s_r$ 预测关系曲线,并将其与试验值对比,典型结果见图7所示。可见,预测结果与试验结果较为接近。

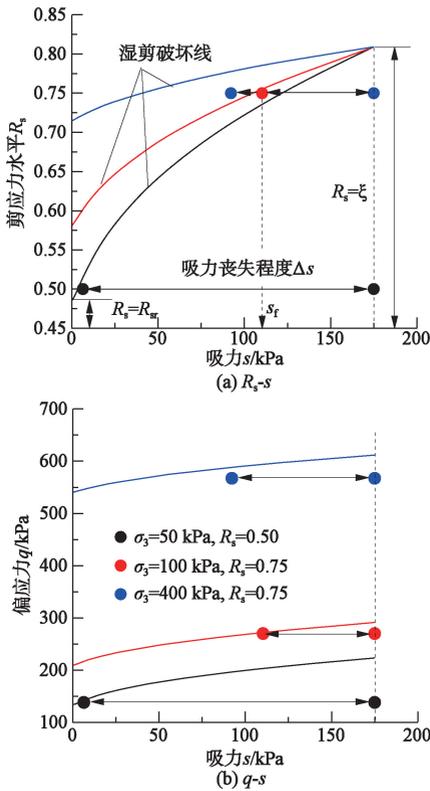


图7 剪应力水平或偏应力与破坏吸力试验结果与预测结果对比
 Fig. 7 Comparison of predicted and measured relationship between deviator stress level or deviator stress and matric suction

4 结 论

(1) 不同吸力下原状黄土的 $q-p$ 临界状态线为非平行直线, $q-p'$ 临界状态线可归一,且可近似用饱和土临界状态线描述。吸力对其抗剪强度的贡献取决于水力路径,基于常吸力三轴剪切试验获得的抗剪强度参数(即 c 和 φ)与吸力关系用以描述湿剪破坏行为,对于工程应用偏于不安全。

(2) 常剪应力水平下增湿会引起黄土产生明显的剪切变形,反映了增湿引起的剪切行为;其湿剪破坏行为取决于剪应力水平和吸力丧失程度,且可用莫尔-库仑强度理论的线性形式很好地描述。

(3) 明晰了原状黄土发生湿剪破坏时需满足的必要条件:定义的剪应力水平阈值可用于判定是否可能会发生湿剪破坏,且提出了其与净平均应力和初始吸力之间的定量化关系(式(7));定义的吸力阈值可用于判定从稳定状态到湿剪破坏时吸力需满足的丧失程度,结合提出的直接以剪应力水平和净围压为参量的持水模型(式(4)),定量化描述了其与剪应力水平和

初始吸力之间的关系(式(9))。

参考文献:

- [1] 谢定义,邢义川. 黄土土力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2016. (XIE Ding-yi, XING Yi-chuan. Soil Mechanics for Loess Soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82-90. (CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 82-90. (in Chinese))
- [3] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状 Q_2 黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 383-389. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess Q_2 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 383-389. (in Chinese))
- [4] 张登飞, 陈存礼, 李文文, 等. Q_3 原状非饱和黄土的水量变化和临界状态特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 197-201. (ZHANG Deng-fei, CHEN Cun-li, LI Wen-wen, et al. Characteristics of critical state and water volume change for Q_3 unsaturated intact loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 197-201. (in Chinese))
- [5] 高 帅, 骆亚生, 胡海军, 等. 非饱和原状黄土增湿条件下力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1313-1318. (GAO Shuai, LUO Ya-sheng, HU Hai-jun, et al. Triaxial tests on water immersion of unsaturated and undisturbed loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1313-1318. (in Chinese))
- [6] 李 鹏, 胡再强, 焦黎杰, 等. 水敏性黄土的湿剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1434-1438. (LI Peng, HU Zai-qiang, JIAO Li-jie, et al. Wet shear tests on structural loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1434-1438. (in Chinese))
- [7] 陈存礼, 张登飞, 张 洁, 等. 等向应力下原状黄土的压缩及增湿变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1736-1747. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, ZHANG Jie, et al. Compression and wetting deformation behavior of intact loess under isotropic stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1736-1747. (in Chinese))
- [8] GALLIPOLI D A. Hysteretic soil-water retention model accounting for cyclic variations of suction and void ratio[J]. Géotechnique, 2012, 62(7): 605-616.

(编校:明经平)