

文章编号:1673-9469(2026)04-0064-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.008

低液限黏土应力松弛特性三轴试验研究

李建¹, 朱材峰^{2*}, 罗启迅¹, 张丹¹, 马付龙¹, 吴刚³

(1. 中国电建成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610000; 2. 河海大学 岩土力学与
堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 中国雅江集团有限公司, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为探究土体流变特性, 针对某覆盖层深部低液限黏土, 进行了排水条件下的应力松弛三轴试验, 研究了不同围压下黏土的应力松弛特性。分析发现: 不同围压下初始阶段体变变化较快, 但是整体的体变量较小; 黏土应力松弛性质随围压的增大明显减弱; 在半对数坐标系中, 不同围压下应力松弛曲线的初始段并不符合直线关系, 但经过一定时间后满足直线关系; 基于试验结果进一步拓展了 Lacerda 和 Houston 的应力松弛经验公式; 引入新的参数应力松弛率 Q , 发现不同围压下应力松弛率 Q 随时间延长先快速减小, 而后逐渐趋于稳定。基于此, 建立了应力松弛率与围压和时间的经验关系式, 揭示了应力随时间松弛的规律; 基于体变结果, 建立了应力松弛条件下体变随围压和时间变化的关系, 为推广建立相关流变模型提供可能。

关键词: 三轴试验; 黏土; 流变特性; 应力松弛

中图分类号: TU411

文献标识码: A

Triaxial Test Study on Stress Relaxation Behavior of Low Liquid Limit Clay

LI Jian¹, ZHU Caifeng^{2*}, LUO Qixun¹, ZHANG Dan¹, MA Fulong¹, WU Gang³

(1. PowerChina Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;
3. China Yajiang Group Co., Ltd., Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: Stress relaxation is one of the typical manifestations of soil rheology. For further investigation, drained triaxial stress relaxation tests were carried out on deep low liquid limit clay from an overburden layer, and the stress relaxation characteristics of the clay under different confining pressures were studied. It was found that the initial volume change was rapid under different confining pressures, but the overall volume change was small. The stress relaxation property of the clay decreased significantly with the increase of the confining pressures. In the coordinate system with time on the logarithmic axis, the initial section of the stress relaxation curves under different confining pressures did not follow a linear relationship, but did after a certain period of time. The empirical formulae for the stress relaxation proposed by Lacerda and Houston was further extended based on the test results. A new parameter Q was introduced and defined as the stress relaxation rate, and it was found that the stress relaxation rate Q under different confining pressures decreased rapidly with time and then gradually tended to be stable. Based on this, an empirical equation associated with the stress relaxation rate, confining pressure and time is established, which reveals the law of stress relaxation with time. Based on the volume change results, the relationship of volume change with confining pressure and time under stress relaxation conditions is established, which provides a basis for the generalization and establishment of relevant

收稿日期:2024-10-20 修回日期:2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2040221); 华能集团总部科技项目(HNKJ20-H45); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目(LSDP202305)

第一作者: 李建(1981—), 男, 四川成都人, 硕士, 正高级工程师, 从事水工岩土力学方面的研究。

***通信作者:** 朱材峰(1996—), 男, 河南鲁山人, 博士研究生, 从事土体基本力学性质方面的研究。

rheological models.

Key words: triaxial test; clay; rheological behavior; stress relaxation

土体,尤其是黏性土,具有流变性。土体的流变性主要体现在蠕变、应变率效应、应力松弛及长期强度特性4个方面^[1-2]。除蠕变外,针对其他3种流变现象的研究很少。在恒应变条件下,应力随时间延长而衰减的过程称为应力松弛。蠕变和应力松弛是土体流变性的两种不同表现形式。事实上,蠕变试验达到稳定状态所需时间较长,而且开展高应力水平的剪切蠕变试验时可能发生蠕变破坏,进入不稳定阶段,研究难度大;相比之下,应力松弛试验稳定所需时间较短,而且最终趋于稳定。因此,开展土体的应力松弛特性研究,对于研究土体的流变性、建立流变模型具有重要的意义。

目前,与蠕变研究相比,针对应力松弛特性的研究相对较少,但仍取得了不少研究成果。其中,Lacerda等^[3]较早对土体应力松弛特性进行了研究,通过多种土的三轴试验及不排水试验,发现松弛过程中孔隙水压力几乎保持不变,并基于此提出了反映土体应力松弛特性的经验公式。Sheahan等^[4]进行的试验也得出了松弛过程中孔隙水压力几乎不变的结论。Sánchez-Girón等^[5]基于试验综合分析了不同种类土的应力松弛规律,提出了一个三参数倍增压实模型。Zolotarevskaya^[6]研究结果表明,含水率、初始密度和变形速率等是影响土体应力松弛的重要因素。

国内方面,崔德山等^[7]对黄土滑坡饱和滑带土进行了三轴压缩应力松弛试验研究,分析了不同围压和应变增量条件下滑带土的应力松弛特征。汪明武等^[8]基于分数阶微积分理论讨论了四元件松弛本构模型中分数阶阶数的敏感性。刘身伟等^[9]对某黄土滑坡原状滑带土样进行了分级加载条件下的蠕变和应力松弛试验,得到不同应力等级下的蠕变曲线和应力松弛曲线,选取西原模型作为该滑带土的流变模型,并对应力松弛的本构方程进行了参数拟合。张春晓等^[10-11]对南宁膨胀土在不同恒应变分级加载条件下的三轴应力松弛特性开展试验研究,探讨了南宁膨胀土的应力松弛特征和松弛模量的变化规律,提出了可描述南宁膨胀土非线性应力松弛特性的经验模型,基于分数阶微积分理论构造软体元件,建立了体现膨胀土应力松弛特性的三元件模型。刘佳龙等^[12]对三峡库区某滑坡土样开展了不同基质吸力的非

饱和土松弛试验,建立了能反映基质吸力影响的非饱和土松弛模型。王志俭等^[13]对万州安乐寺滑坡滑带土进行了排水条件下的三轴松弛试验研究,结果表明,滑带土应力松弛速率与初始应变呈线性关系,而围压对应力松弛速率影响不明显;在松弛过程中,土体体变几乎可以忽略不计。杨爱武等^[14]针对某透水性较差的饱和软黏土进行不固结不排水三轴剪切试验,探究了不同初始应变、围压、剪切速率、取样深度和结构性等因素对应力松弛的综合影响。王松鹤等^[15]开展了一系列室内高温冻土松弛试验,发现预应变变量越大,高温冻土的瞬时松弛量越高。亦有其他学者^[16-17]采用不同材料或者不同试验方法进行了应力松弛方面的研究。

尽管学者已针对土体开展了多方面的应力松弛试验研究,并建立了能够反映土体松弛特性的模型,但目前关于围压对应力松弛影响的研究仍相对较少。基于此,本文拟采用覆盖层深部低液限黏土开展三轴排水应力松弛试验,分析围压对应力松弛的影响规律,以期对土体流变模型研究提供依据。

1 试验仪器及方法

如图1所示,三轴排水应力松弛试验在常规应变控制式三轴仪上进行。应变控制式三轴仪配置轴力传感器和体变传感器,其中,轴力传感器量程为4 kN,精度为4 N;体变传感器量程为20 mL,精度为0.002 mL。具体试验方法如下:采用压实重塑法制备试样,试样干密度为1.42 g/cm³,直径为39.1 mm,高度为80 mm,通过抽真空使试样饱和;待完全饱和后,将试样安装到压力室内,施加围压使试样固结;固结完成后,在排水条件下以0.01 mm/min的剪切速率进行剪切^[18];剪切至预设轴向附加应力 q_0 或应变达到15%,保持轴向应变恒定,开始应力松弛试验。通过采集不同时刻轴力传感器和体变传感器的数据,记录试验过程中轴向附加应力及试样排水量,数据采集时间间隔 Δt 为60 s。本次试验的围压设定为100、500、1 000、1 500 kPa。试验所用土样的基本物理性质指标如表1所示,级配情况如图2所示。

表 1 土的物理性质指标

Tab. 1 Indicators of physical properties of soils

制样干密度 /(g · cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重
1.42	37.1	17.7	19.4	2.75

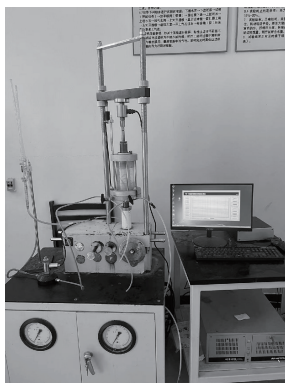


图 1 应变控制式三轴仪

Fig. 1 Strain-controlled triaxial instrument

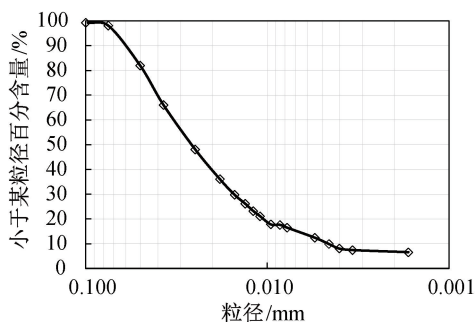


图 2 试验土料级配曲线

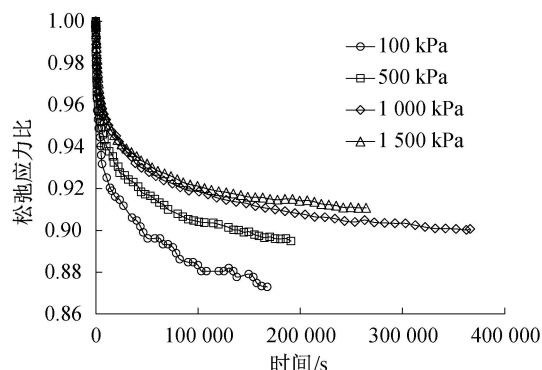
Fig. 2 Test soil gradation curve

2 试验结果及分析

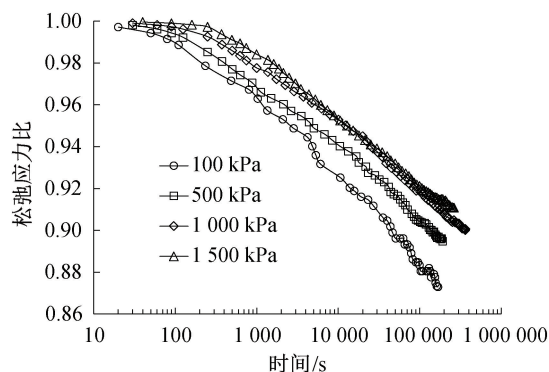
本文定义应力松弛试验开始后某时刻的轴向附加应力 q 与试验开始时轴向附加应力 q_0 的比值为松弛应力比,用 R_q 表示,即

$$R_q = q/q_0 \quad (1)$$

依据试验结果,整理了试样在 4 个围压下 15% 应变(破坏时)的轴向附加应力松弛曲线,如图 3 (a)所示。由图 3(a)可以发现,不同围压下的应力松弛过程表现出典型的松弛曲线特征,松弛过程可分为强松弛阶段和弱松弛阶段。应力松弛初始阶段为强松弛阶段,该阶段应力松弛显著,轴向附加应力随试验的进行明显减小;随着时间的推移,曲线趋于平缓,轴向附加应力下降的速率逐渐减慢,即弱松弛阶段。此外,图 3(a)还可以看出,随着围压的增大,应力松弛程度减弱,对应相同应力松弛时间,围压越大,松弛应力比越大。



(a) 直角坐标系



(b) 半对数坐标系

图 3 不同围压下应力松弛曲线

Fig. 3 Stress relaxation curves under different confining pressures

Lacerda 等^[3]提出了一个用于反映土体应力松弛性质的经验公式,见式(2)。

$$\frac{q}{q_0} = 1 - S \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (t > t_0) \quad (2)$$

式中: q 为松弛开始后 t 时刻的试样轴向附加应力, kPa; S 和 t_0 为拟合参数。

为了进一步分析式(2)对描述应力松弛特性的适用性,在半对数(横坐标为时间的对数)坐标系下整理出应力松弛曲线,如图 3(b)所示。可以看出,应力松弛曲线初始段与式(2)不符,这与文献[3]的研究结果相似。因此,Lacerda 等^[3]建议,仅利用式(2)拟合半对数坐标系中松弛曲线的直线段数据点,确定参数 S 和 t_0 。为此,本文对 4 个围压下的应力松弛曲线直线段进行拟合,如图 4 所示,并利用式(2)确定各围压下的参数 S 和 t_0 。结果发现,这两个参数均随围压 σ_3 呈线性变化。如图 5 所示,用标准大气压 p_a (101 kPa) 对 σ_3 进行归一化处理,具体表达式见式(3)(4)。

式(3)表明,应力松弛与围压有显著的相关性,这与王志俭等^[13]的研究结果相悖。

$$S = a_0 \sigma_3 / p_a + b_0 \quad (3)$$

$$t_0 = a_1 \sigma_3 / p_a + b_1 \quad (4)$$

式中: a_0 、 b_0 、 a_1 和 b_1 为拟合参数,取值分别为 -6×10^{-4} 、0.038 7、13.11 s 和 110.77 s。

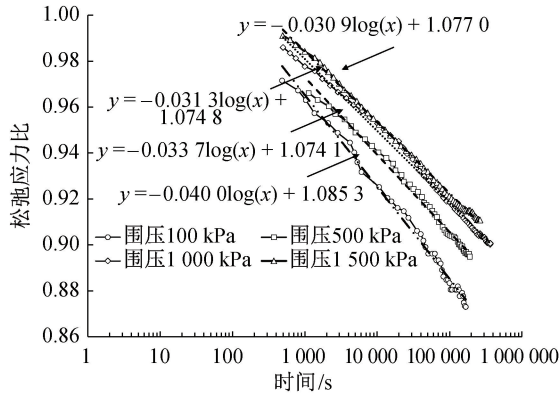


图4 应力松弛曲线(直线段)

Fig. 4 Stress relaxation curves (straight line segments)

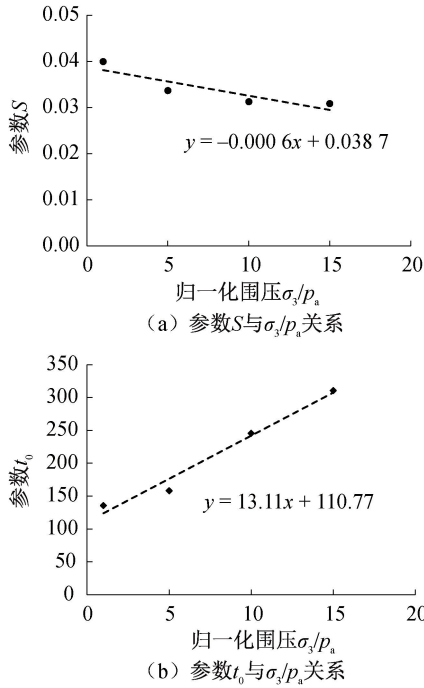


图5 参数与归一化围压 σ_3/p_a 关系

Fig. 5 Relationship between model parameters and normalized confining pressure (σ_3/p_a)

综合式(1)~(4),可以得到松弛应力比在不同围压下随时间变化的关系:

$$R_q = 1 - \left(a_0 \frac{\sigma_3}{p_a} + b_0 \right) \log \left(\frac{t}{a_1 \sigma_3/p_a + b_1} \right) \quad (5)$$

由以上分析可知,不同围压下松弛应力比 R_q 有较大不同。为全面探究围压对应力松弛的影响规律,定义应力松弛率 Q 为单位时间内轴向附加应力 q 的变化量,见式(6)。

$$Q = \frac{dq}{dt} \approx \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (6)$$

在横坐标为时间对数的半对数坐标系中,本文整理了不同围压下应力松弛率 Q 随时间 t 的变化曲线,如图6所示。由于图4中数据点较密、测读时间间隔较小,应力测读值存在一定波动。直接整理 Q 的计算值时,如果时间间隔 Δt 较小,会导致 Q 的计算值波动偏大。为减小波动的影响,利用式(6)整理应力松弛率 Q 时,本文采用了数值较大、非常数的 Δt 。因此,图6中的数据点比图4明显减少。

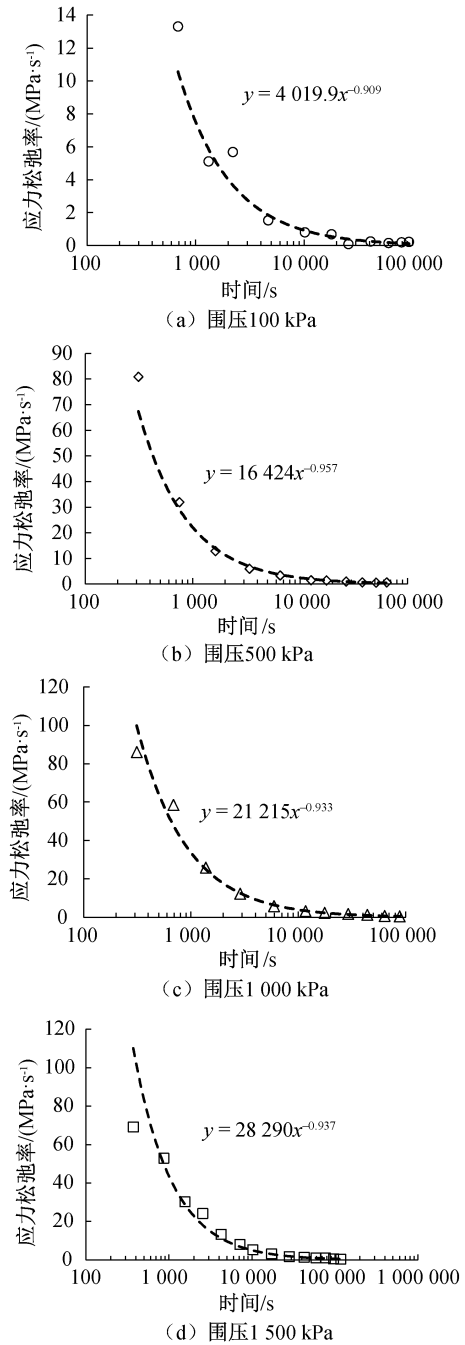


图6 不同围压下应力松弛率 Q 与时间 t 关系

Fig. 6 Stress relaxation rate Q as a function of time under varying confining pressures

从图 6 可以看出,在同一围压下,初始阶段黏土的应力松弛率 Q 较大,随着松弛时间的延长, Q 迅速减小,此阶段对应于图 3(a)中松弛应力比急剧下降区;随后,应力松弛率 Q 减小的速率逐渐减慢,最后趋于稳定,此阶段对应于图 3(a)中松弛应力比减缓区域。应力松弛率 Q 随时间的延长呈先快后慢最后稳定的变化特点,与应力松弛曲线随时间的变化趋势一一对应。分析不同围压下应力松弛的原因,可能是在外力作用下,土体内部结构沿力的方向被迫舒展,因此其内部产生的应力与外力相抗衡;当应变恒定时,部分土体结构势必会重分布,此时内应力逐渐消除,与之相平衡的外力随之衰减,宏观上表现为应力松弛。不同围压下,应力松弛率 Q 随时间 t 的变化趋势基本一致,但 Q 值差异较大,表现为围压越大, Q 越大。可见,围压对应力松弛率的影响是不可忽略的。

分析图 6 发现,应力松弛率 Q 与 t 之间关系可用幂函数拟合,即

$$Q = M \cdot t^N \quad (7)$$

式中: M 和 N 为拟合参数,具体取值如表 2 所示。

表 2 不同围压下参数 M 、 N 取值

Tab. 2 Values of parameters M and N under different confining pressures

围压/kPa	参数	
	M	N
100	4 020	-0.909
500	16 424	-0.957
1 000	21 215	-0.933
1 500	28 290	-0.937

由表 2 可知,随着围压的增大,参数 M 逐渐增大,参数 N 逐渐减小,参数 M 、 N 与围压之间可以用线性关系进行拟合,从而建立应力松弛率 Q 与围压 σ_3 、时间 t 之间关系:

$$Q = (m_0 \sigma_3 / p_a + n_0) \cdot t^{m_1 \sigma_3 / p_a + n_1} \quad (8)$$

式中: m_0 、 n_0 、 m_1 和 n_1 为拟合参数,取值分别为 1 630、4 853.8、 -1×10^{-3} 和 -0.93。

针对不同土料,只需要进行 3 组不同围压下的应力松弛试验,即可根据式(8)确定某一围压下任一时刻的应力松弛率。

为了研究应力松弛过程中试样的体积变化规律,本研究绘制出试验过程中不同围压下试样体变随时间的变化关系,如图 7 所示。由图 7 可以看出,在初始阶段不同围压下试样体变增加均较快,随着时间的延长,体变增量明显减缓,最终基本趋

于稳定。应力松弛试验过程体变较小,最大仅为 0.52%。试验开展约 9 h 后,不同围压下的体变波动范围均不超过 0.1%。

参考沈珠江^[19]提出的三参数蠕变模型,描述应力松弛过程中试样体变 ε 随时间 t 的变化关系,如式(9)所示。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_f (1 - e^{-\beta \cdot t}) \quad (9)$$

式中: ε_f 和 β 均为参数,可由试验数据拟合得到; e 为自然常数。

采用式(9)对应应力松弛过程中试样的体变与时间数据进行拟合,可以看到,该方程能较好地反映不同围压下体变随时间的变化关系,如图 7 所示。

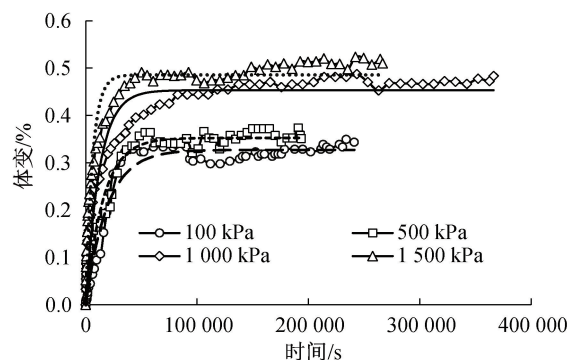


图 7 体变与时间关系

Fig. 7 Volumetric strain versus time curves

在直角坐标系中点绘出参数 ε_f 和 β 随归一化围压(σ_3/p_a)变化关系,发现参数 ε_f 和 β 随着归一化围压的增大而增大,且呈现较好的线性关系,如图 8 所示,具体表达式如下:

$$\varepsilon_f = g_0 \sigma_3 / p_a + h_0 \quad (10)$$

$$\beta = g_1 \sigma_3 / p_a + h_1 \quad (11)$$

式中: g_0 、 h_0 、 g_1 和 h_1 为拟合参数,取值分别为 0.011 8、0.297 2、 7.7×10^{-5} 和 3.1×10^{-5} 。

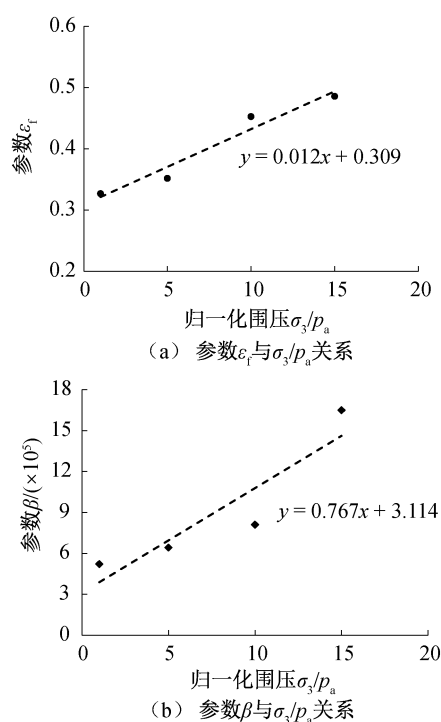
综合式(9)~(11),可以得到低液限黏土在应力松弛时,体变随围压和时间变化的关系:

$$\varepsilon(t) = (g_0 \sigma_3 / p_a + h_0) [1 - e^{-(g_1 \sigma_3 / p_a + h_1) \cdot t}] \quad (12)$$

利用式(12)即可推出给定围压下黏土在应力松弛条件下任一时刻的体变。

3 结论

本文对低液限黏土进行了排水条件下的三轴应力松弛试验,研究了不同围压下低液限黏土的应力松弛特性,主要结论如下:

图8 参数与归一化围压 σ_3/p_a 关系Fig. 8 Relationship between parameters and normalized confining pressure (σ_3/p_a)

1) 低液限黏土在应力松弛曲线的初始段不符合直线关系,在半对数坐标系中一定时间后满足直线关系。当围压增大时,同一时间内应力松弛性质随之减弱。

2) 围压对低液限黏土应力松弛特性有一定的影响。围压越大,应力松弛性质越弱。基于此进一步拓展了应力松弛经验公式,提出了应力松弛比与围压和时间之间的经验关系式。

3) 不同围压下应力松弛率均随时间延长先迅速减小,之后缓慢减小至趋于稳定。基于试验结果建立了应力松弛率与围压和时间之间的经验关系式。

4) 土体在不同围压下的应力松弛过程中体变较小,整体随时间的延长先快后慢;基于试验结果建立了应力松弛条件下黏土体变随围压和时间变化的经验关系式。

土体应力松弛特性影响因素较多,本文得出结论仅仅考虑了围压的影响,具有一定的局限性,后续将开展更多影响因素的研究,进一步丰富研究内容。

参考文献:

[1] 陈琦,寇海磊,魏道凯,等. 基于温控直剪装置温度变

化对土体力学特性影响试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 30-37.

Chen Qi, Kou Hailei, Wei Daokai, et al. Experimental study on influence of temperature change on mechanical properties of soil based on temperature-controlled direct shear device [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 30-37.

[2] 朱其志,陈毓栋,余健,等. 不同状态灰砂岩应力松弛特性试验及本构模型研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 38-45.

Zhu Qizhi, Chen Yudong, Yu Jian, et al. Experimental and constitutive modeling study on stress relaxation properties of sandstone in different states [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 38-45.

[3] Lacerda W A, Houston W N. Stress relaxation in soils [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, 1973: 221-228.

[4] Sheahan T C, Ladd C C, Germaine J T. Time-dependent triaxial relaxation behavior of a resedimented clay [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 444-452.

[5] Sánchez-Girón V, Andreu E, Hernanz J L. Stress relaxation of five different soil samples when uniaxially compacted at different water contents [J]. Soil and Tillage Research, 2001, 62(3/4): 85-99.

[6] Zolotarevskaya D I. Mathematical modeling of relaxation processes in soils [J]. Eurasian Soil Science, 2003, 36(4): 388-397.

[7] 崔德山,陈琼,项伟,等. 黄土坡滑坡饱和滑带土三轴压缩应力松弛试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 209-216.

Cui Deshan, Chen Qiong, Xiang Wei, et al. Experimental study of stress relaxation characteristics of saturated sliding zone soils of Huangtupo landslide under triaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 209-216.

[8] 汪明武,徐新宇,周天龙,等. 网纹红土分数阶应力松弛模型[J]. 计算力学学报, 2020, 37(3): 362-367.

Wang Mingwu, Xu Xinyu, Zhou Tianlong, et al. The fractional order relaxation model of net-like red soil [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, 37(3): 362-367.

[9] 刘身伟,王菁菽,刘清秉. 黄土坡滑坡原状滑带土的蠕变与应力松弛性质[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 137-142.

- Liu Shenwei, Wang Jing'e, Liu Qingbing. Creep property and stress relaxation of undisturbed soil from huangtupo landslide[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 137-142.
- [10] 张春晓,肖宏彬,李珍玉. 南宁膨胀土三轴压缩应力松弛特性试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(4): 76-79+98.
- Zhang Chunxiao, Xiao Hongbin, Li Zhenyu. Experimental study of triaxial stress relaxation properties of Nanning expansive soil [J]. Industrial Construction, 2017, 47(4): 76-79+98.
- [11] 张春晓,肖宏彬,包嘉邈,等. 膨胀土应力松弛的分数阶模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1747-1752+1760.
- Zhang Chunxiao, Xiao Hongbin, Bao Jiamiao, et al. Stress relaxation model of expansive soils based on fractional calculus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1747-1752+1760.
- [12] 刘佳龙,王世梅,胡秋芬,等. 三峡库区某滑坡土非饱和和松弛特性试验研究及模型建立[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 79-82.
- Liu Jialong, Wang Shimei, Hu Qiufen, et al. Study on unsaturated relaxation properties of soils of a landslide in the Three Gorges Reservoir area and model construction [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 79-82.
- [13] 王志俭,殷坤龙,简文星,等. 万州安乐寺滑坡滑带土松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 931-937.
- Wang Zhijian, Yin Kunlong, Jian Wenxing, et al. Experimental research on stress relaxation of slip zone soils for Anlesi landslide in Wanzhou City[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 931-937.
- [14] 杨爱武,杨少朋,齐杰杰. 吹填软土 UU 三轴剪切应力松弛特性试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 76-84.
- Yang Aiwu, Yang Shaopeng, Qi Jiejie. Experimental study on stress relaxation characteristics of soft dredger fill under UU triaxial shear[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 76-84.
- [15] 王松鹤,齐吉琳. 高温冻土松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1660-1666.
- Wang Songhe, Qi Jilin. Experimental study of relaxation characteristics of warm permafrost [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1660-1666.
- [16] 陈琼,杨林筱,陶现雨. 三峡库区黄土坡滑坡滑带土直剪应力松弛特征试验研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(1): 18-25.
- Chen Qiong, Yang Linxiao, Tao Xianyu. Empirical study on stress relaxation characteristics of sliding zone soil in direct shear test on huangtupo landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(1): 18-25.
- [17] 刘啸,张晓君,魏金祝,等. 循环加卸载下直墙拱形巷(隧)道应力松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 476-484.
- Liu Xiao, Zhang Xiaojun, Wei Jinzhu, et al. Experimental study on the stress relaxation characteristics in straight-wall-top-arch roadway (tunnel) under cyclic loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 476-484.
- [18] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S].
- [19] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式[J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 1-14.
- Shen Zhujiang. A nonlinear dilatant stress-strain model for soils and rock materials [J]. Hydro-Science and Engineering, 1986(4): 1-14.

(责任编辑 张爱丽)