

南宁膨胀土非线性剪切应力松弛特性试验

肖宏彬¹, 贺 聪¹, 周 伟^{1,2}, 肖 果¹

(1. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 长沙 410004; 2. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘 要: 利用四联装等应变直剪仪, 对南宁非饱和和重塑膨胀土进行一系列室内剪切应力松弛试验, 探讨南宁非饱和和重塑膨胀土的剪切应力松弛特性, 得到诸多有益的结论。试验结果表明, 不同初始条件下的剪切应力松弛曲线均属于不完全衰减型, 剪切应力逐渐减少并趋于一个稳定值; 膨胀土的松弛曲线都可以明显的分成 3 个阶段: 瞬间松弛阶段、衰减松弛阶段、稳定松弛阶段。不同初始条件下不同时刻的剪切应力-应变等时关系曲线都是非线性的曲线, 说明南宁膨胀土具有明显的非线性流变特性, 是弹、黏、塑性体。膨胀土的含水率越高, 或者竖向荷载越小, 或者初始应变越大, 或者时间越长, 则膨胀土的流变特性及其非线性程度就越高。对试验结果的分析, 通过改进剪切应力对数与时间对数的线性关系, 建立南宁膨胀土在直剪条件下的非线性剪切应力松弛经验方程, 能较好地拟合试验结果。非线性经验模型考虑了应变水平对应力松弛的影响, 直观地反映出南宁膨胀土的非线性应力松弛特性, 更加符合工程实际, 可为膨胀土非线性应力松弛问题的计算分析提供理论依据。

关 键 词: 膨胀土; 应力松弛; 非线性流变; 松弛方程

中图分类号: TU 475

文献标识码: A

Experimental study of nonlinear shear stress relaxation characteristics of Nanning expansive soil

XIAO Hong-bin¹, HE Cong¹, ZHOU Wei^{1,2}, XIAO Guo¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412008, China)

Abstract: On the basis of a series of indoor shear stress relaxation tests for unsaturated remolded expansive soils by using a quadruple load equal strain-controlled direct shear apparatus, the shear stress relaxation characteristics of this kind of soils were researched. Many useful conclusions are obtained. The results show that shear stress relaxation curves under different initial conditions are all incomplete attenuation type; but the shear stress decreased gradually and eventually tending to stable values. The relaxation curves can be clearly divided into three stages, i.e. the instantaneous relaxation stage, attenuation relaxation stage and stable relaxation stage. Shear stress-strain curve at different moments is nonlinear under different initial conditions, which indicates that expansive soil in Nanning is nonlinear, indeed bomb, sticky, as well as plastic. The conclusions show that the soil is the higher the nonlinear degree of the rheological properties of expansive soil with higher the moisture content, or the smaller the vertical load, or the greater initial strain, or the longer the time. Based on the analysis of tested results, an empirical shear stress relaxation equation of Nanning expansive soils under the condition of direct shearing has been established by improving the linear relationship between logarithm of shear stress and time. The regression curves of empirical relaxation equation are in good agreement with those of the observed data. The strain level of stress relaxation was taken into nonlinear empirical models. It intuitively reflect the nonlinear stress relaxation properties of Nanning expansive soils. The model is more corresponded with the actual engineering, so as to provide a theory for analytical calculation of nonlinear stress relaxation problems of expansive soils.

Key words: expansive soil; stress relaxation; nonlinear rheology; relaxation equation

1 引 言

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种裂隙较

多、吸水膨胀、失水收缩, 具有显著胀缩特性的黏性土, 其主要黏土矿物成分是伊利石和蒙脱石, 是一种具有明显流变特性的灾害性土^[1]。膨胀土的流

变主要表现在四方面：蠕变、应力松弛、长期强度和应变率效应^[2]。蠕变和松弛的微观机制都是由岩土结构调整引起的，应力松弛不同于蠕变，不存在历时过程中外力能源的能量消耗，只是由于土内部颗粒间结构强度的弱化和松弛而引起的内部应力降低^[3]。膨胀土的剪切应力松弛特性可以客观地反映膨胀土的长期强度。但是，由于松弛试验需要特殊的设备，要绝对保证应变恒定常规仪器不能胜任，目前专门针对土的应力松弛试验相对较少。本课题组的研究表明，南宁膨胀土的流变是非线性的^[4]，对于蠕变柔量和松弛模量之间的非线性数学关系，尚未见有公开发表的研究结果，剪切应力松弛特性无法简单地由蠕变特性推导获得，需对剪切应力松弛特性单独进行研究，建立对应的流变模型。研究土的剪切应力松弛特性，可使边坡稳定性计算更加精准，在防治滑坡、泥石流等地质灾害的工程中具有重要作用。

李军世^[5]用 Mesri 应力-应变-时间关系函数^[5]描述了黏土的蠕变-应力松弛耦合效应，并比较了数值计算结果与试验结果，取得了较好的效果，并讨论了影响耦合效应的相关因素。尹清杰^[6]借助于英国产 GDS 三轴仪对某滑坡滑带土进行了一系列松弛试验，分析拟合了松弛曲线，建立了松弛模型。谢宁^[7]对上海地区的饱和软黏土做了较多的蠕变和应力松弛试验，表明上海地区饱和软黏土有明显的非线性流变特性，并且建立了统一反映蠕变和应力松弛的非线性流变经验本构关系。刘保健等^[8]研究表明，压实黄土在动力下的应力松弛和围压、频

率、初始应变、湿度与时间有关。Lacerda 等^[9]分析了应力松弛过程中偏应力、孔隙水压力的变化规律，研究显示孔隙水压力在松弛过程中变动很小，发现偏应力与时间对数间存在线性关系。之后，诸多学者进一步描述和分析了上述线性关系。

上述研究中对应力松弛的试验方法、应力松弛规律、影响因素及其松弛方程等方面做了一定的探讨，但大部分研究是对于饱和软黏土的应力松弛特性研究，对于膨胀土的应力松弛特性研究相对较少，鉴于松弛模型解析的相对复杂性，对于膨胀土松弛特性的非线性模型研究就更较少。本文针对南宁膨胀土进行一系列剪切应力松弛试验，分析不同含水率、竖向荷载和初始应变下的膨胀土剪应力松弛特性，并探讨其非线性经验模型。

2 土样制备及试验方法

本试验所使用的土样取自广西省南宁市东北角环城道路工程，属于冲洪积中等膨胀土，土体呈灰白色，物理性质指标及化学成分组成见表 1 和表 2。

表 1 膨胀土的物理性质指标

Table 1 Physical characteristics of expansive soil sample

参数	量值
液限/%	61.4
最优含水率/%	15.8
最大干密度/(g/cm ³)	1.89
塑限/%	22.8
塑限指数	38.6

表 2 土样化学成分

Table 2 Chemical components of sample

元素	Al ³⁺	Si ⁴⁺	Fe ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ti ⁴⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	Cr ²⁺	S ²⁺
含量/%	23.64	57.63	8.85	4.24	1.37	2.32	0.91	0.73	0.09	0.03	0.19

2.1 土样制备

膨胀土试样的制备步骤如下：①将已过 2 mm 筛的自然风干膨胀土，采用室内烘干法测定风干膨胀土样含水率，并根据设计含水率，配置好试验所需膨胀土土样，装入塑料袋，扎紧袋口放进保湿罐内静置 24 h 以上，使膨胀土样中的水充分扩散，达到水分分布均匀。②按试验要求的压实度和含水率计算制备环刀试样所需的膨胀土质量，然后，称取土样。③将 2 个高 20 mm 的环刀的一上一下钝面相触，用金属环套牢，将膨胀土样倒入两环刀形成的高 40 mm 柱体内，再在土样顶面置放一个高 20

mm 的金属垫块并用液压推土器将其均匀压实，直到垫块顶面与环刀上部刀口齐平及可。

2.2 试验方法

采用南京电力自动化设备总厂生产的 DJY-4A 型四联装等应变直剪仪，人工采集试验数据。取含水率均 20.3%，压实度均为 90% 的 3 组试样，分别加恒定竖向荷载 100、300、600 kPa，固结 3 d。另取 2 组含水率分别为 16% 和 22.2%、压实度均为 90% 的试样，分别加恒定竖向荷载 600 kPa，固结 3 d。每组试样在排水条件下采用逐级加剪应变的方法进行应力松弛试验，控制其应变为 0.015、0.03、0.045、

0.06、0.075 五级。在施加每一级应变的时候, 根据计算所得的位移值以等应变速率 (0.8 mm/min) 推进剪切盒, 当试样的剪切应变值达到预期的值后立刻停止推进剪切盒, 形成应力松弛状态。考虑到时间尺度效应^[10], 每级应力松弛持续 7 d, 连续 24 h 以内应力值变化小于 1% 即视为应力松弛稳定, 再进入下一级。为了避免温度和湿度对试验的影响 (文献[2]研究表明温差在 10°C 小范围影响很小), 整个试验过程都是在恒温 (25 ± 5) $^\circ\text{C}$ 恒湿条件下完成。

3 试验结果分析

3.1 剪切应力松弛曲线

不同含水率和不同竖向压力条件下膨胀土的剪应力松弛曲线如图 1 所示。由图可见, 南宁膨胀土的剪应力松弛具有如下特性: (1) 在不同的初始条件下, 膨胀土具有相同的应力松弛规律, 剪应力应变刚加上时, 剪应力衰减较快, 即剪应力松弛速率较大。随着时间的增加, 剪应力逐渐衰减至某稳定值, 属于非完全松弛, 这与以往各种不同土样的研究成果是一致的, 说明膨胀土具有明显的流变特性。(2) 松弛曲线可以明显的分成 3 个阶段, ①瞬时松弛阶段: 应力松弛速率较大, 剪应力瞬时降低, 其剪应力瞬时松弛量与初始剪切应变、

含水率、竖向荷载等有关。其影响机制可以如下解释: 不同的含水率和竖向荷载使膨胀土内部颗粒间的结构强度不同, 当试样受到固定的剪切应变时, 内部颗粒间的结构产生的破坏程度, 积聚的变形能也就相应不同, 故瞬时降低的松弛力也就不同。

②衰减松弛阶段: 此阶段内剪应力松弛速率迅速减小, 表明随着时间的增加, 土体内部颗粒间的连接在重新调整, 内力重分布在逐步发展, 积累的变形能在逐步被消耗, 此阶段剪应力松弛量占全过程松弛的较大部分。③稳定松弛阶段: 48 h 左右剪应力松弛速率已经基本接近衰减到 0, 之后剪应力进一步松弛到一稳定值, 说明土体内连接被破坏的颗粒重新调整到了新的稳定位置, 使新的颗粒间的连接作用能与外力抗衡。

3.2 剪应力-应变等时曲线

含水率分别为 16% 和 20.3% 的土样部分剪应力-应变等时曲线如图 2 所示。由图可以看出, (1) 各不同初始条件下的剪应力-应变等时曲线都是非线性的, 有明显的转折点和峰值, 说明南宁膨胀土具有明显的非线性流变特性。剪应力应变水平越高, 松弛时间越长, 等时曲线向剪应力应变轴的偏移量越大, 说明应变水平越高或时间越长, 膨胀土的非线性流变特性就越明显。

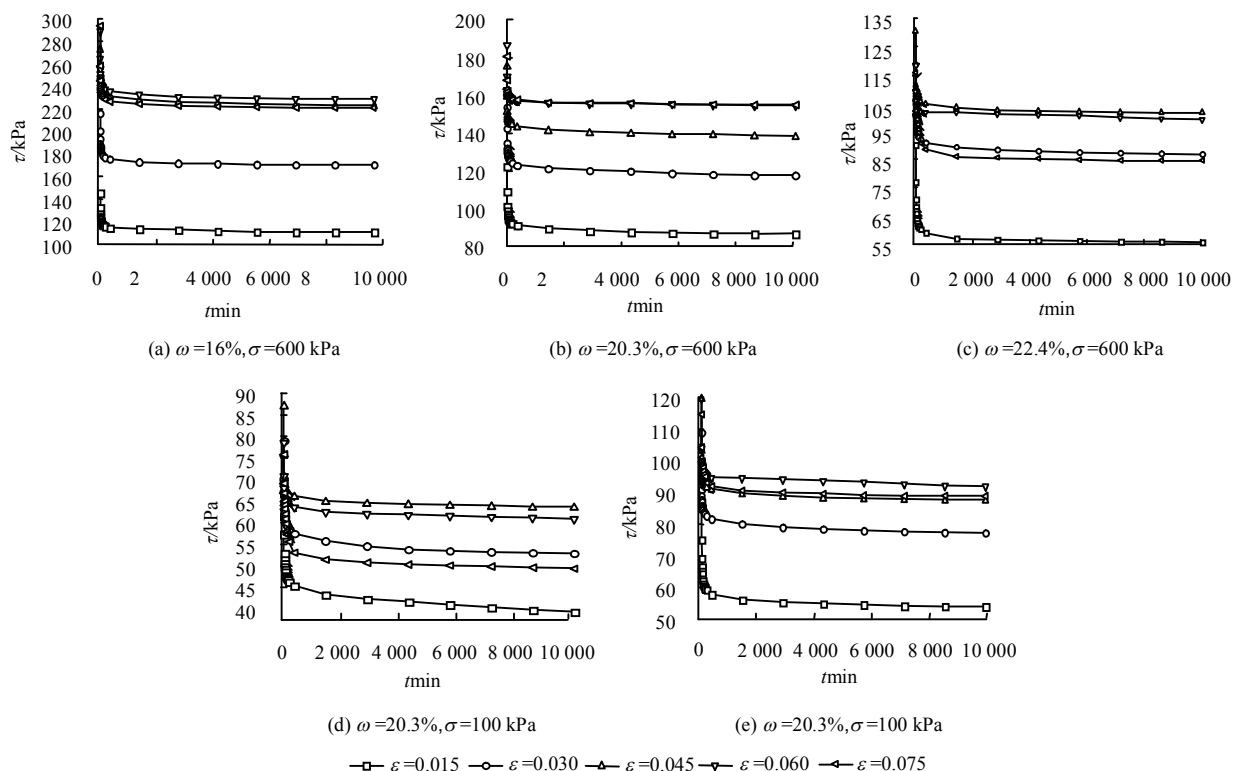


图 1 不同初始条件下的剪应力松弛曲线

Fig.1 Shear stress relaxation curves under different initial conditions

(2) 峰值剪切应力所对应的应变即达到了土样的破坏应变, 且理论上应约等于直剪试验所得抗剪强度相对应的应变, 表明相同的竖向荷载条件下破坏应变随含水率的增加而减小, 试验中含水率由 16%→20.3%→22.4% 增加, 相应的破坏应变由 0.075→0.06→0.045, 这是由于含水率的增加, 水分渗入裂隙面和土颗粒间, 使土体颗粒周围的水膜增厚, 同时裂隙面的膨胀与软化导致强度降低, 从而达到极限强度所需的应变就相应减

小; 相同含水率下破坏应变随着竖向应力的增加而增加, 是由于竖向应力的增加使土颗粒间的摩擦加大、结构强度加大的缘故。(3) 对比图 1 剪切松弛曲线和图 2 应力-应变等时曲线, 剪切应力峰值和对应的破坏应变与不同初始条件的关系, 随着含水率的增加, 或者竖向荷载的减小, 则相应的破坏应变减小, 且等时曲线向剪切应变轴的偏移量增大, 说明膨胀土的非线性流变特性越明显。

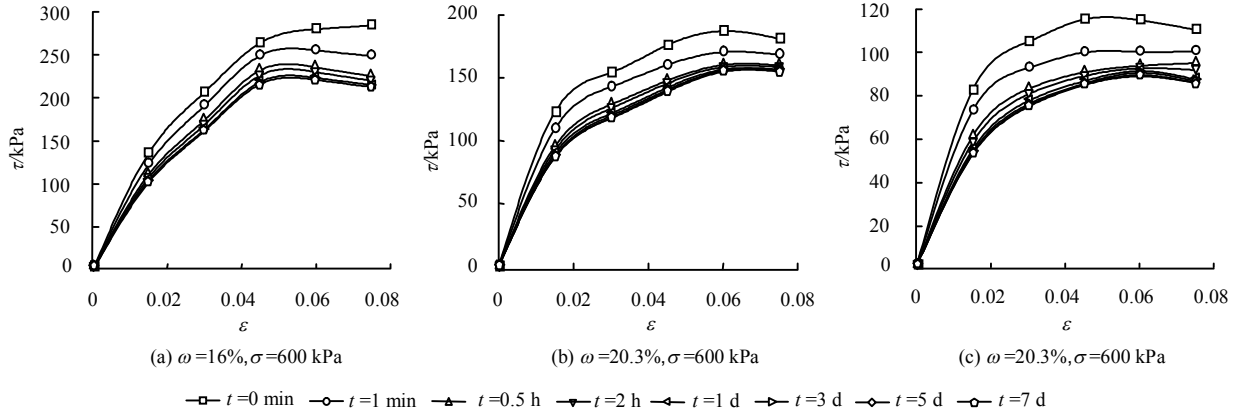


图 2 剪切应力与应变等时曲线
Fig.2 Isochronal curves of shear stresses vs. strains

4 非线性松弛经验模型的建立

Lacerda 等^[9]在分析松弛过程中提出应力与时间对数间存在线性关系, 并进行了拟合验证, 提出的应力松弛的经验公式类型:

$$\tau(\varepsilon_i, t) = \tau(\varepsilon_i, t_0) - \beta(\varepsilon_i) \ln(t/t_0) \quad (1)$$

式中: $\beta(\varepsilon_i)$ 为对应于初始应变 ε_i 的应力松弛速率及松弛曲线的斜率。对比剪切应力-时间对数的线性关系发现, 双对数坐标系下用线性关系来描述剪切应力对数-时间对数的关系时拟合度更高, 并且可以用式 (2) 来描述其线性关系。

$$\ln \tau(\varepsilon_i, t) = \ln(\tau(\varepsilon_i, t_0)) - \beta(\varepsilon_i) \ln(t/t_0 + 1) \quad (2)$$

本文的研究表明, 膨胀土的松弛为非完全松弛, 对式 (2) 两边去对数并进行改进, 经试算推出了幂函数型经验方程:

$$\tau(\varepsilon_i, t) = e^a (t+1)^b + d \quad (3)$$

式中: a 、 b 为试验确定的参数, 与土的物理化学性质、应变值、温度、竖向荷载等因素有关, 且 $-1 < b < 0$; d 为松弛的极限应力, 也是由试验来确定。

对上述松弛方程进行分析发现该方程能较好的反映应力松弛过程的一些特性:

当 $t=0$ 时,

$$\tau(\varepsilon_i, t)|_{t=0} = [e^a (t+1)^b + d]|_{t=0} = e^a + d = \tau_0 \quad (4)$$

式中: τ_0 为松弛的初始剪切应力。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 对式 (3) 求导可得式 (5), 剪切应力松弛速率最后衰减至 0, 松弛达到稳定。

$$\frac{\partial \tau(\varepsilon_i, t)}{\partial t} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} [be^a (t+1)^{b-1}] = 0 \quad (5)$$

对式 (3) 求极限, 可以说明该流变关系是非完全松弛的。

$$\tau(\varepsilon_i, t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} [e^a (t+1)^b + d] = d \quad (6)$$

式中符号意义同式 (3)。

结合本文剪切应力松弛曲线, 利用数值分析软件, 对上述松弛方程进行拟合验证, 并计算所得相关参数。列举部分剪切应力松弛曲线拟合结果见表 3, 由表可以看出该方程的拟合效果较好。但上述回归方程仅能反映出剪切应力与时间的关系, 为了描述膨胀土的非线性松弛特性, 以下对不同剪切应变下的相关参数进行回归。

分析发现, $a_i - \varepsilon$ 和 $b_i - \varepsilon$ 可选用 3 次多项式回归, $d_i - \varepsilon$ 可选用 2 次多项式回归方程:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= A\varepsilon^3 + B\varepsilon^2 + C\varepsilon + D \\ b_i &= E\varepsilon^3 + F\varepsilon^2 + G\varepsilon + H \\ c_i &= K\varepsilon^2 + L\varepsilon + D \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： ε 为剪切应变（%）， a_i 、 b_i 、 d_i 均为式（3）中的相关系数。通过数值分析，得到经验方程中 a_i 、 b_i 、 d_i 的回归结果，见表 4。将数值分析计算结果代入到松弛方程式（3）中，可得不同含水率、不同竖向荷载下膨胀土的非线性剪应力松弛经验方程，见式（8）~（10）。

表 3 剪应力松弛曲线拟合结果

Table 3 Fitting results of shear stress relaxation curves

状态	$\varepsilon/\%$	a_i	b_i	d_i	R^2
$w=20.3\%$ $\sigma=100$ kPa	1.5	3.246 98	-0.163 89	34.773 41	0.986 41
	3.0	3.262 47	-0.272 89	51.434 47	0.986 68
	4.5	3.085 94	-0.489 84	64.207 54	0.984 68
	6.0	2.728 91	-0.373 74	61.360 95	0.941 96
	7.5	3.554 61	-0.145 48	39.964 06	0.985 94
$w=20.3\%$ $\sigma=600$ kPa	1.5	3.504 67	-0.410 13	87.018 65	0.979 51
	3.0	3.547 92	-0.323 26	117.179 86	0.984 55
	4.5	3.487 11	-0.449 14	140.049 19	0.955 19
	6.0	3.357 61	-0.686 44	156.403 28	0.958 23
	7.5	3.134 21	-0.576 81	156.249 18	0.956 46
$w=20.3\%$ $\sigma=300$ kPa	1.5	3.415 86	-0.330 07	53.121 96	0.990 87
	3.0	3.362 08	-0.355 89	77.195 94	0.968 87
	4.5	3.340 80	-0.527 82	88.785 66	0.952 21
	6.0	3.138 72	-0.709 49	94.123 21	0.928 93
	7.5	3.253 87	-0.219 34	85.581 93	0.947 99
$w=22.4\%$ $\sigma=600$ kPa	1.5	3.482 37	-0.381 88	55.044 16	0.985 07
	3.0	3.378 16	-0.352 88	86.371 13	0.974 74
	4.5	3.220 08	-0.504 57	102.238 61	0.939 12
	6.0	2.785 13	-0.595 33	100.525 47	0.947 86
	7.5	3.824 78	-0.107 09	66.456 93	0.950 36

表 4 经验方程参数

Table 4 Parameters of experience relaxation equation

参数	含水率/%				
	20.3		22.4		
荷载/kPa	100	300	600	600	
a_i	A_i	0.033 9	0.007 0	0.000 3	0.037 7
	B_i	-0.412 5	-0.089 9	-0.022 5	-0.445 7
	C_i	1.396 5	0.291 9	0.123 2	1.435 6
	D_i	1.946 6	3.146 4	3.370 5	2.176 1
	R^2	0.928 3	0.846 4	0.999 5	0.903 8
b_i	E_i	0.005 4	0.020 2	0.013 8	0.018 8
	F_i	0.041 4	-0.240 2	-0.188 7	-0.222 1
	G_i	-0.003 6	0.771 5	0.706 2	0.736 7
	H_i	-0.074 3	-1.022 9	-1.096 7	-1.054 4
	R^2	0.925 5	0.971 2	0.977 8	0.992
d_i	K_i	-2.9122	27.564	-1.612	0.966
	L_i	-2.269 3	25.88	19.466	0.997 2
	M_i	-2.131 6	31.03	44.502	0.997 1
	R^2	-4.710 2	44.857	-3.152 5	0.982 3

含水率为 20.3%、竖向荷载 100 kPa 时剪切应力松弛经验方程为

$$\tau(t) = e^{0.0339\varepsilon^3 - 0.4125\varepsilon^2 + 1.3965\varepsilon + 1.9466} \cdot (t+1)^{0.0054\varepsilon^3 - 0.0414\varepsilon^2 + 0.0036\varepsilon - 0.0743} - 2.9122\varepsilon^2 + 27.564\varepsilon - 1.612 \quad (8)$$

含水率为 20.3%、竖向荷载 300 kPa 时，剪切应力松弛经验方程为

$$\tau(t) = e^{0.007\varepsilon^3 - 0.0899\varepsilon^2 + 0.2919\varepsilon + 3.1464} \cdot (t+1)^{0.0202\varepsilon^3 - 0.2402\varepsilon^2 + 0.7715\varepsilon - 1.0229} - 2.2693\varepsilon^2 + 25.88\varepsilon + 19.466 \quad (9)$$

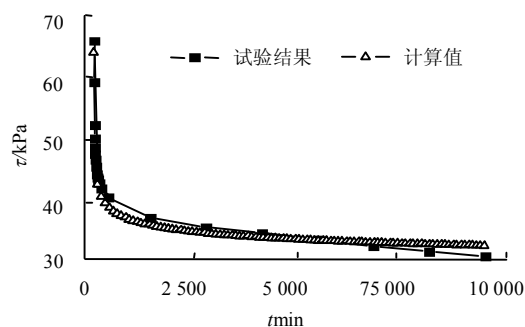
含水率为 20.3%、竖向荷载 600 kPa 时，剪切应力松弛经验方程为

$$\tau(t) = e^{0.0003\varepsilon^3 - 0.0225\varepsilon^2 + 1.1232\varepsilon + 3.3705} \cdot (t+1)^{0.0138\varepsilon^3 - 0.1887\varepsilon^2 + 0.7062\varepsilon - 1.0967} - 2.1316\varepsilon^2 + 31.03\varepsilon + 44.502 \quad (10)$$

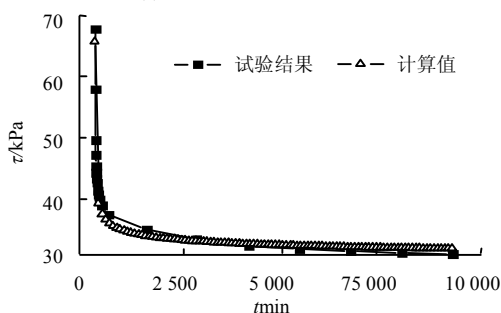
含水率为 22.4%、竖向荷载 600 kPa 时，剪切应力松弛经验方程为

$$\tau(t) = e^{0.0377\varepsilon^3 - 0.4457\varepsilon^2 + 1.4356\varepsilon + 2.1761} \cdot (t+1)^{0.0188\varepsilon^3 - 0.2221\varepsilon^2 + 0.7367\varepsilon - 1.0544} - 4.7102\varepsilon^2 + 44.857\varepsilon - 3.1525 \quad (11)$$

经验模型方程反映出南宁膨胀土的应力松弛过程中剪切应力与应变以及时间的关系，从理论上来说能够用来描述膨胀土的非线性剪切应力松弛特性。下面列举含水率为 20.3% 竖向荷载为 100 kPa、剪应变为 0.015 和 0.030 的情况，将试验值与经验模型计算值进行对比结果如图 4 所示。由图可以发现，试验值与计算值有较好的吻合度，而且拟合曲线形态也很符合试验数据的总体走势，能够反映出应力松弛的基本特性，表明本文所提出经验模型用于描述南宁膨胀土的剪应力松弛特性是可靠的。



(a) $w=20.3\%$, $\sigma=100$ kPa, $\varepsilon=0.015$



(b) $w=20.3\%$, $\sigma=100$ kPa, $\varepsilon=0.015$

图 3 试验实测值与拟合曲线对比

Fig.3 Comparison of tested results and fitting curves

5 结 论

(1) 在不同的含水率和竖向荷载条件下膨胀土具有相同的应力松弛规律, 松弛曲线可以明显地分为瞬时松弛阶段、衰减松弛阶段和稳定松弛阶段 3 个阶段, 属于非完全松弛型。应变刚加上时剪切应力松弛速率较大, 随着时间的增加, 剪切应力逐渐缓慢衰减至稳定值, 说明膨胀土具有明显的流变特性。

(2) 相同的竖向荷载条件下破坏应变随含水率的增加而减小, 相同含水率下破坏应变随着竖向荷载的增加而增加。

(3) 初始应变水平越高, 等时曲线随着时间的增加所表现出来的非线性就越明显, 说明应变水平越高或时间越长, 膨胀土的非线性流变特性就越明显。

本文建立的经验松弛方程拟合曲线与试验曲线有较好的吻合度, 能较好地反映南宁膨胀土的非线性剪切应力松弛特性。虽然经验模型反映的只是流变的表象, 缺乏理论依据, 参数物理意义不够明确, 无法从理论上对土体的结构和流变机理进行反映, 但本非线性经验模型考虑了应变水平对应力松弛的影响, 直观地反映了南宁膨胀土的非线性流变特性, 更加符合工程实际, 对于边坡失稳、地下隧道和基坑开挖等岩土工程中剪切应力松弛分析具有重要的理论和工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 李珍玉, 肖宏彬, 金文婷, 等. 南宁膨胀土非线性流变模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2298—2302.
LI Zhen-yu, XIAO Hong-bin, JIN Wen-ting, et al. Study of nonlinear rheological model of Nanning expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2298—2302.
- [2] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 李军世. 黏土蠕变-应力松弛耦合效应的数值探讨[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 294—297.
LI Jun-shi. Numerical discussion creep and stress on coupled effects of relaxation of clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 294—297.
- [4] 肖宏彬, 范志强, 张春顺, 等. 非饱和膨胀土非线性流变特性试验研究[J]. 公路工程, 2009, 34(2): 1—5.
XIAO Hong-bin, FAN Zhi-qiang, ZHANG Chun-shun, et al. Experimental study on non-linear rheological characteristics of unsaturated expansive soils[J]. **Highway Engineering**, 2009, 34(2): 1—5.
- [5] MESRI G, FEBRES-Cordero E, SHIELDS D R, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(4): 537—552.
- [6] 尹清杰, 王世梅. 饱和土松弛实验曲线模拟与试验验证[J]. 黑龙江水专学报, 2006, 33(2): 24—26.
YIN Qing-jie, WANG Shi-mie. The flabby model of saturated soil establishment and verification[J]. **Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College**, 2006, 33(2): 24—26.
- [7] 谢宁, 孙钧. 上海地区饱和和软黏土流变特性[J]. 同济大学学报, 1996, 24(3): 233—237.
XIE Ning, SUN Jun. Rheological behaviors of Shanghai clays[J]. **Journal of Tongji University**, 1996, 24(3): 233—237.
- [8] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1073—1076.
LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1073—1076.
- [9] LACERDA W A, HOUSTON W N. Stress relaxation in soils[C]// Proc, 8th ICSMFE. Moscow: [s. n.], 1973.
- [10] 谢宁. 土流变试验设计及有关问题研究[J]. 云南工学院学报, 1994, 10(4): 76—82.
XIE Ning. Study of some problems in rheological test of soils[J]. **Journal of Yunnan College of Engineering**, 1994, 10(4): 76—82.