

文章编号: 1006-4710(2014)03-0366-06

黄土平面蠕变特性试验研究

胡连信, 骆亚生, 王鹏程, 丁红丽

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 岩土工程中的许多工程问题可归结为平面应变问题。对其长期稳定性的研究中, 采用平面蠕变试验比三轴蠕变试验更符合其实际受力情况。为此, 采用改进的平面蠕变仪对黄土试样进行一系列的室内固结平面蠕变试验, 并与常规三轴蠕变试验结果进行了对比分析。试验结果表明, 含水率、固结压力、剪应力水平对黄土的蠕变特性均有很大的影响, 表现为蠕变量在低固结压力、高含水率、高剪应力水平的条件下较大。平面蠕变试验结果与三轴蠕变试验结果存在明显不同, 表现为: 在小剪应力条件下, 平面蠕变量较三轴蠕变量明显; 在大剪应力条件下, 三轴蠕变量反而明显大于平面蠕变量。

关键词: 黄土; 平面蠕变; 三轴蠕变; 重塑土

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A

Testing research on plane creep behaviors of loess

HU Lianxin, LUO Yasheng, WANG Pengcheng, DING Hongli

(College of Water Resources and Architectural Engineering,
Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In geotechnical engineering, there are lots of problems which can be boiled down to the issues of plane strain, and apparently the plane creep tests would be more suitable to the actual stress state than triaxial creep tests for the study of long-term stability. Therefore, a series of laboratory consolidated plane creep tests of loess specimens are conducted by reformed plane creep-meter, and its results are compared with the results of conventional triaxial creep test. The results show that the creep behaviors of loess are obviously influenced by water content, confining pressure and deviatoric stress. The creep values are comparatively higher under the condition of low confining pressure, high water content and high deviatoric stress. From the comparison results, it can be obviously found that the value of plane creep is slight higher than the triaxial creep's under the condition of low deviatoric stress, while the value of triaxial creep is obviously higher than the plane creep's when the deviatoric stress is high.

Key words: loess; plane creep; triaxial creep; remoulded soil

分布于我国西北地区的黄土, 由于其特殊的结构性及对水的特殊敏感性, 常容易产生地基沉降、边坡变形和滑坡等工程地质问题, 而对黄土高原地区修建的建筑物的长期沉降, 地下工程引起的地面沉降等均与黄土的蠕变特性有着密切关系。

长期以来, 国内外许多学者对上述岩土工程问题作了大量研究, 并取得了许多成果^[1-6]。因此, 对黄土蠕变特性的研究不仅可以完善黄土的蠕变理

论, 也可以在查明蠕变影响因素的同时采取相应的工程措施来预防和治理因蠕变引起的工程地质问题, 为黄土地区的工程建设提供有效的理论指导和实践参考依据。

黄土蠕变性质的研究方法中, 常见有单轴压缩试验、直接剪切蠕变试验和三轴蠕变试验等室内蠕变试验方法^[7-10], 而很少采用平面蠕变试验手段。但对于那些在长度方向断面形状不变, 且上部受有

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178392)。

作者简介: 胡连信, 男, 硕士生, 研究方向为岩土工程与环境。E-mail: 524758591@qq.com。

骆亚生, 男, 教授, 博导, 研究方向为黄土力学与工程。E-mail: 771545499@qq.com。

不容忽视荷载情况的工程结构,如路堤、土石坝、挡土墙、机场跑道、地下隧道、河堤等,其上覆荷载产生的应力变形状态为平面应变状态,故对其土体变形研究采用平面蠕变试验要比常规三轴蠕变试验更符合土体实际受力变形。本文通过不同先期固结压力、含水率条件下黄土的平面蠕变试验,分析了剪应力($\sigma_1 - \sigma_3$)值、含水率(w)和先期固结压力(σ_3)对黄土平面蠕变特性的影响,并同常规三轴蠕变试验进

行对比分析,从而为实际工程提供有效依据,预防和减少工程事故的发生。

1 试验材料和方法

试验所取土样为陕西省泾阳县太平镇崔师某砖厂,取土深度 3.0~4.0 m,干密度 1.28 g/cm^3 ,天然含水率 16.2%,孔隙比 1.14,属 Q_3 黄土。试样的基本物理性质指标见表 1。

表 1 黄土的物理性质指标
Tab. 1 Loess indexes of physical property

土样来源	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	按塑性图 分类	颗粒组成/%		
						>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
泾阳	2.74	32.7	16.5	16.2	CL	0.9	69.9	29.2

为解决平面应变工程中的长期沉降问题,采用改造的平面蠕变仪来模拟实际问题,研究其变形规律。

如图 1 所示,采用文献[11]的方法,先将原先日本谷藤机械工业株式会社生产的 TS-525 式真三轴仪改造成平面应变仪,再在压力室不变的前提下,将压力室移至自制的铁架上,构成简易平面蠕变仪。其中,将原先柔性加压的 2 个作用面($88.9 \text{ mm} \times 88.9 \text{ mm}$)作为零应变面,即加侧限约束,模拟土体在实际工程中受到的侧限条件,将这个方向定为中主应力 σ_2 方向;小侧面($88.9 \text{ mm} \times 35.56 \text{ mm}$)由侧板上的气压(空压机提供)加压,模拟实际土体在长期沉降过程中受到的侧向压力,将这个方向定为小主应力 σ_3 方向;在轴向方向上,通过铁架由砝码提供轴向压力,模拟实际工程中的上覆荷载,将这个方向定为大主应力 σ_1 方向。在小主应力 σ_3 方向和大主应力 σ_1 方向分别采用自动采集系统和高精度百分表量测其形变大小,所有加压砝码和百分表均经过国家计量认证。

图 1 为试样尺寸和改造平面蠕变压力室,其中

试样表面 a 、 b 、 c 分别对应刚性约束面(σ_2 方向),侧压面(σ_3 方向)和轴压面(σ_1 方向)。经后期试验^[12],改造的压力室能较好适用于平面应变的相关试验。

试样为非饱和和重塑土样,由黄土风干、碾碎、过筛后的土料压实制作而成,控制干密度为 1.53 g/cm^3 (压实度为 90%)。采用水膜转移法控制试样含水率在 10%、20% 和 30% 三种,并置于保湿缸中静置 48 h 以上,使得试样水分均匀分布。试验黄土试样作 3 个固结压力水平($\sigma_1 = \sigma_3$)的平面蠕变试验,包括 50 kPa、100 kPa 和 150 kPa,轴向应力采用分级加载方式,轴向剪应力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。数据记录采用间隔时间 0.5 min、1 min、1.5 min、2 min、5 min、10 min、10 min、30 min、1 h、1 h、2 h、2 h、4 h、11 h。

为便于试验数据的记录与处理,每级荷载至少加载 24 h,试样稳定后加下一级荷载,稳定以变形小于 $0.01 \text{ mm}/(4 \text{ h})$ 为标准,试验过程中允许排水排气,试样破坏以轴向形变大于轴向尺寸的 15%,或试样出现急剧变形为准。

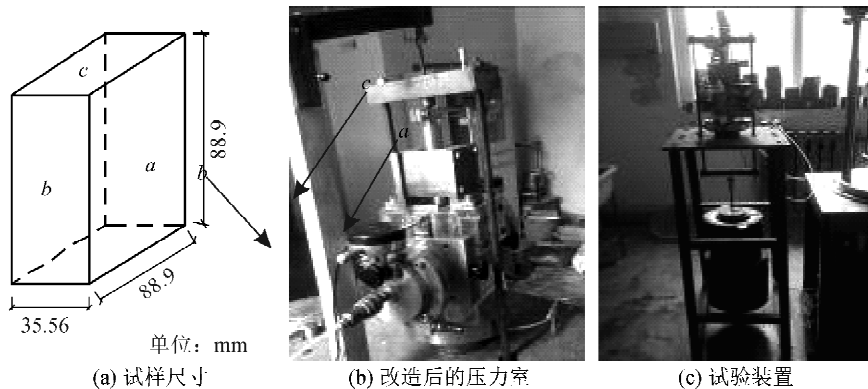


图 1 试样尺寸、压力室及试验装置

Fig. 1 Samples' dimension, pressure chamber and test device

2 试验结果分析

本次平面蠕变试验采用分级加载方式,故需要采用 Boltzmann 叠加原理对试验数据进行处理,具体结果见图 2 和图 3。

2.1 剪应力对平面蠕变特性的影响

以 $w=10\%$ 、 $\sigma_3=150\text{ kPa}$; $w=20\%$ 、 $\sigma_3=100\text{ kPa}$ 和 $w=30\%$ 、 $\sigma_3=50\text{ kPa}$ 三种条件下试样的平面蠕变状态为例(见图 2)。

分析可知,在剪应力水平较低的情况下,重塑土体内部结构调整较快,轴向变形在较短时间内达到

稳定状态,表现为衰减蠕变趋势,蠕变现象不明显。当剪应力较大时,土体内部结构调整所需时间延长,其蠕变现象也明显,表现为剪应力越大,试样达到蠕变稳定所需时间越长。这种变化规律类似于三轴蠕变试验规律。

从平面蠕变试验和三轴蠕变试验的完整数据对比发现,在含水率、固结压力同等条件下,当剪应力水平较低时,平面蠕变量较大,当剪应力水平较大时,平面蠕变量明显小于三轴蠕变量。

以 $w=20\%$ 、 $\sigma_3=150\text{ kPa}$ 试样为例(见表 2),当剪应力足够大时,三轴试样甚至出现蠕变破坏。

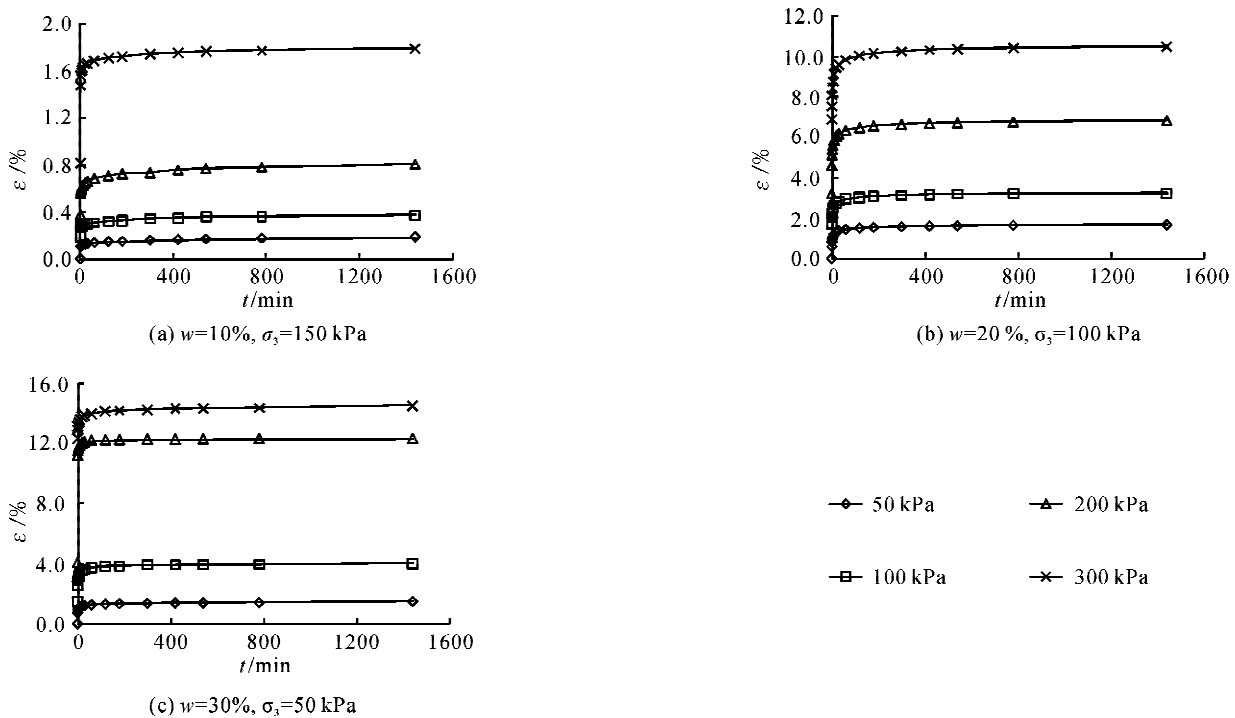


图 2 各级剪应力下的蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves under different deviatoric stress

表 2 不同剪应力下平面蠕变和三轴蠕变比较($w=20\%$, $\sigma_3=150\text{ kPa}$)

Tab. 2 Comparison table between plane creep and triaxial creep under different deviatoric stress($w=20\%$, $\sigma_3=150\text{ kPa}$)

$(\sigma_1 - \sigma_3) / \text{kPa}$	$t=60\text{ min}$			$t=300\text{ min}$			$t=540\text{ min}$			$t=1\ 440\text{ min}$		
	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ
50	1.539	0.808	0.731	1.700	0.843	0.857	1.748	0.851	0.897	1.816	0.880	0.936
100	3.215	1.210	2.005	3.427	1.542	1.885	3.481	1.568	1.913	3.561	1.627	1.934
200	6.556	5.693	0.863	6.816	6.018	0.798	6.854	6.050	0.804	6.975	6.149	0.826
300	8.839	—	—	9.193	—	—	9.285	—	—	9.403	—	—

说明:表中 P_c 、 T_c 、 Δ 分别表示平面蠕变值、三轴蠕变值和两者的差值,“—”表示试样已破坏,无法计算其形变值和两者的差值。

当剪应力水平较低时,即外荷载引起的剪切应力低于黄土试样内部初始结构强度时,土体的原生结构不会发生破坏,颗粒间的相对移动较小,表现为轴向位移较小,蠕变曲线呈衰减趋势。随着剪应力

水平的增大,土体内部颗粒之间产生滑移,颗粒团体发生破损和碎裂,最终导致原生结构逐渐破坏,同时由于颗粒的滑移和压密而形成次生结构。当剪应力水平达到一定时,剪切应力超过次生结构强度,土样

强度迅速衰减和降低,迅速产生变形,直至土样发生破坏。三轴蠕变土样在固结阶段,受力较平面蠕变土样均匀,固结程度比较完全,所以在先期剪应力低时表现出较小的蠕变量。在后期剪应力较大时,平面蠕变试验土样因有刚性侧限约束,表现出的蠕变量反而小。

2.2 含水率对平面蠕变特性的影响

由图 3 可知含水率对平面蠕变特性的影响。在黄土工程中,一般认为含水率是一种广义的力^[13],当固结压力、剪应力值较小时,蠕变变形量随着含水

率的增大而增大;当固结压力、剪应力值较大时,高含水率下的试样的蠕变变形差异不大,甚至出现低含水率试样变形量大于高含水率试样变形量的情况。

对比平面蠕变和三轴蠕变试验完整结果发现,在同等固结压力、剪应力水平条件下,当土样含水率不高时,平面蠕变量相对三轴蠕变量较大,当含水率较大时,三轴蠕变量明显大于平面蠕变量。以 $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}, \sigma_1 - \sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 试验为例(见表 3),当含水率足够大时,三轴试样甚至发生蠕变破坏。

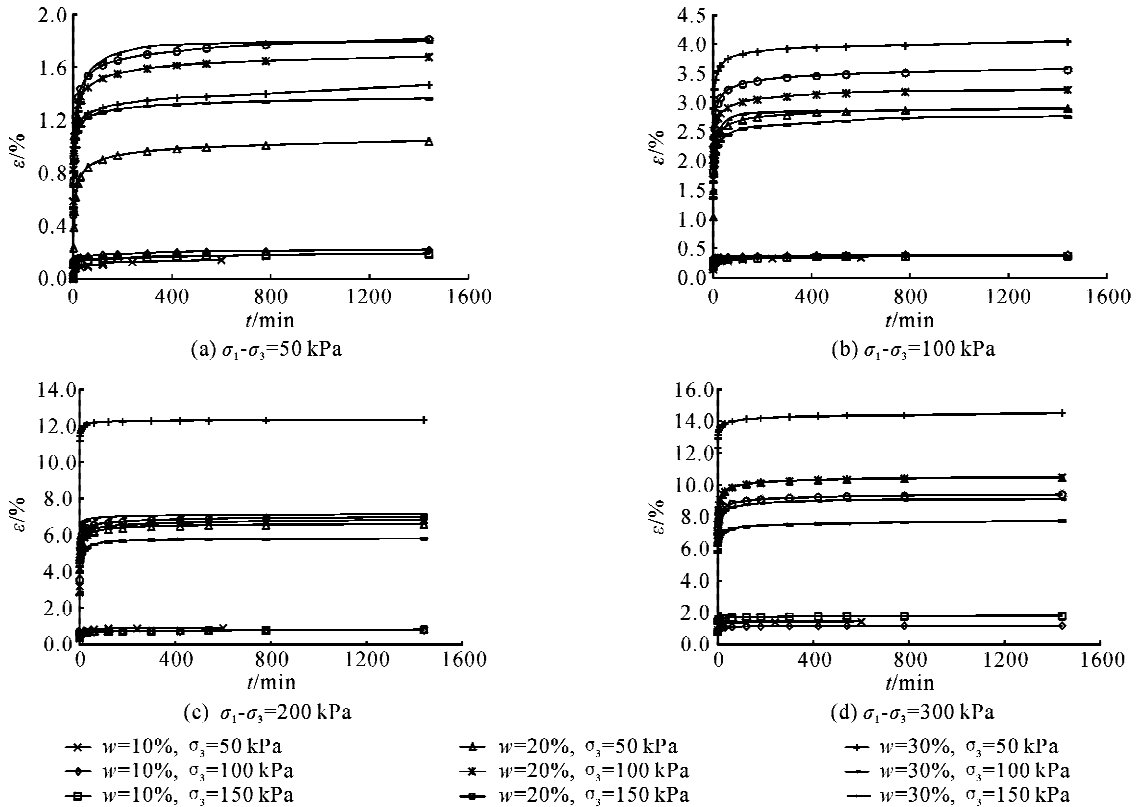


图 3 不同剪应力下的应变时间曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different deviatoric stress

表 3 不同含水率下平面蠕变和三轴蠕变对比($\sigma_3 = 50 \text{ kPa}, \sigma_1 - \sigma_3 = 100 \text{ kPa}$)

Tab. 3 Comparison table between plane creep and triaxial creep under different water content($\sigma_3 = 50 \text{ kPa}, \sigma_1 - \sigma_3 = 100 \text{ kPa}$)

w/%	t=60 min			t=300 min			t=540 min			t=1 440 min		
	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ
10	0.378	0.223	0.155	0.399	0.267	0.132	0.410	0.275	0.135	0.422	0.303	0.120
20	2.609	0.743	1.866	2.783	0.829	1.954	2.845	0.842	2.003	2.902	0.890	2.012
30	3.749	—	—	3.924	—	—	3.955	—	—	4.045	—	—

说明:表中 P_c 、 T_c 、 Δ 分别表示平面蠕变值、三轴蠕变值和两者的差值,“—”表示试样已破坏,无法计算其形变值和两者的差值。

从土体双电层理论的扩散膜厚度变化进行分析,固结压力和剪应力水平较低时,若含水率较高,则土体内部自由水多,扩散膜厚度大,从而有颗粒之间的静电吸力弱,土体颗粒容易在外界作用力下发

生滑移和错动现象,表现为蠕变现象明显。由于平面蠕变固结和压缩过程中允许水分排出,所以当含水率较高时,试样在高固结压力和剪应力的作用下发生排水现象。随着内部水分的排出,水膜所起楔

入和润滑作用差别不大,表现的蠕变变形差异不太明显,甚至发生反常现象。实际黄土边坡工程中,可考虑通过改善边坡排水,降低土体内部含水率来减小边坡发生蠕变破坏的可能。

2.3 固结压力对平面蠕变特性的影响

理论上分析可知,当其他因素一定时,土体在高固结压力条件下的固结程度比在低固结压力条件下的程度要高,后期在外荷载的作用下产生的蠕变形变量要小。由图3可知,当土样含水率较低时,先期

固结压力对试样后期蠕变变形影响不大。当含水率较高时,先期固结压力对后期变形的影响比较明显,表现为试样在低固结压力条件下的蠕变变形较大,在高固结压力条件下后期蠕变变形较小,符合实际工程规律。对比平面蠕变和三轴蠕变试验,以 $w=20\%$, $\sigma_1-\sigma_3=100$ kPa试验结果为例(见表4)。结合上述剪应力对两类试验的影响规律发现,固结压力相同时,土样平面蠕变量明显高于三轴蠕变量,且两者都随固结压力的增大而减小。

表4 不同固结压力下平面蠕变和三轴蠕变对比($w=20\%$, $\sigma_1-\sigma_3=100$ kPa)

Tab. 4 Comparison table between plane creep and triaxial creep under different confining pressure($w=20\%$, $\sigma_1-\sigma_3=100$ kPa)

σ_3/kPa	$t=60$ min			$t=300$ min			$t=540$ min			$t=1440$ min		
	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ	P_c	T_c	Δ
50	3.215	1.210	2.005	3.427	1.542	1.885	3.481	1.568	1.913	3.561	1.627	1.934
100	2.911	0.743	2.168	3.105	0.829	2.276	3.160	0.842	2.318	3.217	0.890	2.327
150	2.609	0.371	2.238	2.783	0.420	2.363	2.845	0.433	2.412	2.902	0.476	2.426

说明:表中 P_c 、 T_c 、 Δ 分别表示平面蠕变值、三轴蠕变值和两者的差值。

从重塑样强度组成分析知,在固结过程中,颗粒或颗粒团之间在外力的作用下重新排列组合,相互之间的咬合和嵌挤作用加强,表现为土体强度的增大。

在试样固结阶段,当固结压力较小时,土体内部经过短时间的调整后达到稳定,强度增幅迅速但不明显;当固结压力较大时,试样内部颗粒先期明显变化,经过长时间的重新组合后达到稳定,试样强度增幅较大,历时较长,故在蠕变阶段,在较小固结压力条件下固结的试样蠕变变量,比在大固结压力条件下固结的大。

另外,在试样固结阶段,水膜有利于土体颗粒的重新组合,若含水率较低,这种作用不明显,若含水率较高,这种作用能使土样在固结过程中获得较高的强度,表现为含水率高时固结压力对后期蠕变变形明显。在实际工程中,可采用增加上部荷载、延长荷载覆盖时间和适当调整含水率来使得土体固结稳定,减小工后蠕变沉降。

3 结论

1) 平面蠕变类似三轴蠕变,蠕变变形随着剪应力水平的增大越来越明显,所需的时间也愈长,表现为从衰减蠕变阶段过渡到加速蠕变阶段。

2) 含水率的大小是蠕变变量的又一重要影响因素。若固结压力、剪应力较小,蠕变变量随含水率增大而增大,若固结压力、剪应力较大,高含水率试样形变差异不大,甚至出现低含水率试样形变

大于高含水率试样形变的情况。

3) 后期蠕变变形的大小与先期土体固结时的固结压力大小也有关,但在排水排气的固结条件下,固结压力大小与含水率的大小综合影响蠕变变量。低含水率时,固结压力对蠕变影响不太明显,高含水率时,表现为低固结压力固结后的蠕变变量较高固结压力固结的蠕变变量要大。

4) 所取地区土样平面蠕变规律与常规三轴蠕变规律大体相似。对于平面蠕变量和三轴蠕变量,当其他条件不变时,若剪应力较低,前者稍大于后者,若剪应力较高,后者明显大于前者,三轴土样甚至发生压缩破坏;在固结压力和剪应力水平一定时,高含水率下的平面蠕变量小于三轴蠕变量,低含水率时前者大于后者;在含水率和剪应力水平一定,当固结压力相同时,土样平面蠕变变形明显高于三轴蠕变变形。

参考文献:

- [1] 张长庆,苗天德,王家澄,等. 冻结黄土蠕变损伤的电镜分析[J]. 冰川冻土,1995,17(S):54-59.
Zhang Changqing, Miao Tiande, Wang Jiacheng, et al. An analysis on creep damage of frozen loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(S): 54-59.
- [2] 吴燕开,陈红伟,张志征. 饱和黄土的性质与非饱和黄土流变模型[J]. 岩土力学,2004,25(7):1143-1146.
Wu Yankai, Chen Hongwei, Zhang Zhizheng. Characteristics of saturated loess and rheological model of unsaturated loess in Xi'an[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1143-1146.

- [3] 刘同有. 西部大开发中的岩石力学与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2541-2543.
Liu Tongyou. Issues of rock mechanics and engineering geology in west China exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2541-2543.
- [4] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴实验研究[J]. 岩土力学, 2004, 28(6): 1073-1076.
Liu Baojian, Zhang Xiaorong, Cheng Haitao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 28(6): 1073-1076.
- [5] 蒋甫, 应荣华. 黄土粘弹性性质的室内外试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 269-273.
Jiang Fu, Ying Ronghua. Analysis on loess viscoelasticity by laboratory and field tests[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 269-273.
- [6] 郭增玉, 张朝鹏, 夏旺民. 高湿度 Q_2 黄土的非线性流变本构模型及参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 780-784.
Guo Zengyu, Zhang Chaopeng, Xia Wangmin. Nonlinear rheological constitutive models and their parameters of high moisture Q_2 loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 780-784.
- [7] 李军世, 孙钧. 上海淤泥质粘土的 Mesri 蠕变模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 74-79.
Li Junshi, Sun Jun. Mesri's creep model for ShangHai silt-clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 74-79.
- [8] 王松鹤, 骆亚生, 李焱. 黄土固结蠕变特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 643-647.
Wang Songhe, Luo Yasheng, Li Yan. Laboratory test of loess for consolidation creep behavior[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(5): 643-647.
- [9] 王常明, 肖树芳, 夏玉斌, 等. 海积软土的固结蠕变性状[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(1): 57-60.
Wang Changming, Xiao Shufang, Xia Yubin, et al. On consolidation creep behavior of marine soft soil[J]. Journal of ChangChun University of Science and Technology, 2000, 30(1): 57-60.
- [10] 王松鹤, 骆亚生. 复杂应力下黄土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 43-47.
Wang Songhe, Luo Yasheng. Research on creep characteristics of loess under complex stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 43-47.
- [11] 付中原. 真三轴仪的平面应变改造及黄土平面应变实验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
Fu Zhongyuan. The alteration of true triaxial apparatus and research of plane strain of loess[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.
- [12] 李浩东. 陕北子洲黄土平面应变试验及滑坡机理分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Li Haodong. Plane strain test and landslide mechanism analysis of loess from Zizhou of Northern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [13] 骆亚生. 非饱和黄土在动静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
Luo Yasheng. Variation characteristics of soil structure and structural constitutive relation of unsaturated loess under static and dynamic complex stress conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003.

(责任编辑 王卫勋)