

文章编号: 1000-7598 (2010) 08-2459-06

不同地区非饱和黄土动力结构性研究

王志杰, 骆亚生, 杨永俊

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 对兰州、洛川、杨凌地区黄土在不同含水率与不同应力状态下进行动扭剪三轴试验, 测定了黄土的动剪应力-应变关系曲线; 同时, 依据 Hardin-Drnevich 双曲线模型, 改进了基于动剪应力考虑的土结构性量化参数, 并应用该参数对三地区非饱和黄土的动力结构性进行了分析。结果表明, 三地区非饱和黄土的动力结构性参数随动剪应变的增大先降低, 而后保持在一个稳定的水平; 含水率与固结应力对黄土的动力结构性影响显著, 在相同的固结应力条件下, 含水率越低, 黄土的动力结构性参数越大, 在相同的含水率条件下, 固结应力越小, 黄土的动力结构性参数越大; 在相同的条件下, 杨凌地区黄土的动力结构性最强, 洛川地区黄土次之, 兰州地区黄土最弱, 即黄土的动力结构性在地理空间分布上存在从西北向东南方向增强的规律。

关 键 词: 非饱和黄土; 动扭剪试验; 动力结构性; 结构性参数; 区域间对比

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Study of dynamic structural characteristics of unsaturated loesses in different regions

WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, YANG Yong-jun

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

Abstract: The dynamic torsional shear triaxial tests are carried out on loesses of Lanzhou, Luochuan and Yangling under different water contents and different stress states; and then the dynamic shear stress-strain curves of loesses are obtained. Besides, according to Hardin-Drnevich hyperbolic model, the soil structural quantitative parameters, which are based on the dynamic shear stress, are developed; and the dynamic structural characteristics of unsaturated loesses in Lanzhou, Luochuan and Yangling are analyzed by using the parameters. Results show that the structural parameters of Lanzhou, Luochuan and Yangling loesses firstly reduce along with the increase of the dynamic shear strain; and then remain at a stable level; water content and consolidation stress have significant influence on the structural parameters. Under the same consolidation stress condition, the lower water content, the greater dynamic structural parameters of the loess; and under the same water content, the smaller consolidation stress, the greater dynamic structural parameters of the loess. In conclusion, under the same condition, the dynamic structural characteristics of Yangling loess is the strongest; the following is Luochuan loess; and Lanzhou loess is the weakest; in other words, the structural characteristics of loesses in the geographical spatial distribution exists a law of increment from the northwest to the southeast.

Key words: unsaturated loess; dynamic torsional shear test; dynamic structural characteristics; structural parameters; district comparison

1 引 言

现实的土体都具有结构性, 结构性对土的力学特性有很大的影响, 以致研究能够反映土结构性的本构关系被称为是21世纪土力学的核心问题^[1]。

我国黄土地区分布广泛, 而且多集中在地震多

发且烈度较高的中西部地区^[2-3], 黄土地区在地震作用下大量的滑坡、震陷和地裂等自然灾害给人民的生命和财产造成巨大损失。黄土由于其特定的生成环境和存在的历史环境, 使其具有明显的柱状节理和大孔隙结构, 这种独特的结构性对黄土的力学性状和工程性质影响巨大。

收稿日期: 2008-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NECT-06-0864)。

第一作者简介: 王志杰, 男, 1985年生, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土工程理论与计算。E-mail: toylandx@163.com

鉴于此, 众多学者关注于黄土的结构性研究。谢定义等^[4]以人工制备黄土的侧限压缩试验为基础, 首先提出了以原状土、重塑土和饱和土在某一压力下的最终变形量表达的结构性参数。由于侧限压缩试验中压力与压缩变形量之间的关系仅反映了体应变的变化特性, 不存在工程意义上的强度破坏, 它与复杂应力条件下黄土的应力-应变关系以及强度破坏有显著的差异, 因此, 以侧限压缩试验为基础建立的结构性参数不能很好地反映复杂应力条件下土结构性的变化规律。骆亚生^[5]将上述方法予以拓展, 通过三轴剪切试验提出了基于强度考虑的土结构性参数, 并建立了基于动剪应力考虑的土结构性参数。由于其在求取方法上存在无初始结构性参数、人工插值求点计算繁琐且不准确等缺点, 在实际应用中受到限制。Dibben、陈存礼、邵生俊等^[6-11]在黄土的结构性方面也进行了较为系统、深入的研究。

但我国黄土分布广泛、成因类型复杂, 现有的这些成果也只是局限于某一特定的区域, 研究地点零散, 研究成果不够系统。由于黄土地区自然地理位置不同, 气候特点和自然地理环境的差别, 所以

黄土在形成条件上、成岩作用的程度上以及演变的过程中均有其区域特征。对黄土进行不同区域研究, 分析比较黄土结构性(尤其是动力结构性)在各自区域内的内在联系以及在不同黄土区域间的分布规律等研究尚不多见。基于这一前提条件, 本文以兰州、洛川、杨凌地区黄土为对象, 研究黄土的动力结构性, 力求从空间上把握其分布规律, 有效地预测由于所处工程环境和所受荷载条件的改变而给土体动力性质带来的不确定性, 为黄土地区的工程建设提供参考。

针对普通动三轴仪存在施加动荷载不均匀、不对称以及试样易与试样帽脱离或被拉断等缺点, 本文采用动应力状态更符合实际情况的动扭剪三轴仪, 以期更好地测定黄土的动剪应力-应变关系曲线, 进而更好地分析非饱和黄土的动力结构性。

2 试验方法

2.1 试验土料及试样制备

试验所用黄土土料分别取自兰州、洛川、杨凌地区, 取土深度均为3~5 m, 属于Q₃黄土。试验土样物理性质指标见表1。

表 1 黄土土样的物理性质指标
Table 1 The basic physical properties of loess samples

土样类型	相对密度 G_s	液限 w_l / %	塑限 w_p / %	塑性指数 I_p / %	按塑性图分类	黏粒含量 / %
兰州黄土	2.71	28.8	18.0	10.8	CL	16.0
洛川黄土	2.72	31.8	19.4	12.4	CL	18.0
杨凌黄土	2.68	28.7	17.5	11.2	CL	20.7

表 2 黄土动扭剪三轴试验及试样的制备一览表
Table 2 The list of dynamic torsional shear triaxial test and samples of loess

土样类型	干密度 ρ_d / g·cm ⁻³	固结比 K_c	含水率 w / %	$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa	
				原状	重塑	原状	重塑	原状	重塑
兰州黄土	1.40	1.5	5	√	√	√	√	√	√
			12	√	√	√	√	√	√
			19	√	√	√	√	√	√
			26	√	√	√	√	√	√
			35 (饱和)	√		√		√	
洛川黄土	1.32	1.5	12	√	√	√	√	√	√
			19	√	√	√	√	√	√
			26	√	√	√	√	√	√
			38 (饱和)	√		√		√	
杨凌黄土	1.28	1.5	12	√	√	√	√	√	√
			19	√	√	√	√	√	√
			26	√	√	√	√	√	√
			41 (饱和)	√	√	√	√	√	√

试验所用试样为空心圆柱形, 外径为70 mm、内径30 mm、高100 mm, 分原状样和重塑样两类。

原状样直接由天然黄土用特制削样器削制而成, 重塑样由原状黄土削落后碾碎过筛后的土料参照原状

样干密度用动扭剪三轴压样器分4次缓慢、匀速压制而成。试样制成后,分别用风干法和水膜转移法(配水法)对试样进行含水率控制,然后将不同含水率的试样用保鲜膜包裹,放入密闭养护缸进行养护,待内部水分分布均匀后备用。饱和样试验时在扭剪仪上直接从底部进水饱和(必要时可用真空泵提供一定反压)。黄土动扭剪三轴试验及试样的制备情况见表2。

2.2 试验仪器及方法

试验在日本诚研株式会社生产的DTC-199型电液伺服周期扭转荷载三轴仪上进行,仪器由主机、压力系统、动力控制系统和测量系统组成,试验过程中试样的各个静压力、动扭矩、动孔隙水压力、动转角及轴向变形等均可由配套的电脑数据采集处理系统记录。

试验参照《土工试验规程》SL237-1999中振动三轴试验进行操作。试样采用排水排气固结,固结比为1.5,固结围压选用100、200、300 kPa。固结过程中测轴向变形量与孔隙水压力,以30 min轴向变形量不大于0.01 mm且孔隙水压力变幅不超过2 kPa为稳定标准。固结完成后,进行动扭剪三轴试验。试验时,按等效正弦波的形式,在试样顶部施加周期性水平剪应力,频率为1 Hz。试验采用同一固结状态下逐级加荷的方法,即对一个固结变形稳定的试样,在不排水、不排气的条件下,逐级施加固定振次(10次)的动荷载,直到试样破坏,本文以轴向应变达到5%为破坏标准。

3 土结构性量化参数的改进

大量黄土动力试验资料表明,黄土在动荷载作用下的应力-应变关系呈双曲线型,表现为非线性特性,可用Hardin-Drnevich双曲线模型^[12]描述:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_{d\max}}} = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (1)$$

$$\frac{1}{G_d} = \frac{\gamma_d}{\tau_d} = \frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_{d\max}} = a + b\gamma_d \quad (2)$$

式中: τ_d 、 γ_d 分别为动剪应力、动剪应变; $\tau_{d\max}$ 为最大动剪应力; G_d 为动剪切模量; G_0 为最大动剪切模量或初始动剪切模量; a 、 b 为式(2)所对应直线的截距和斜率,截距 $a=1/G_0$,斜率 $b=1/\tau_{d\max}$ 。

在某一试验条件下,原状黄土、重塑黄土与原状饱和黄土的动剪应力-应变关系曲线及 $1/G_d$ - γ_d 关系曲线如图1、2所示, $1/G_d$ - γ_d 关系曲线线性回归所得参数见表3。从表可以看出: 本文试验结果与

Hardin-Drnevich双曲线模型预测的结果吻合较好。

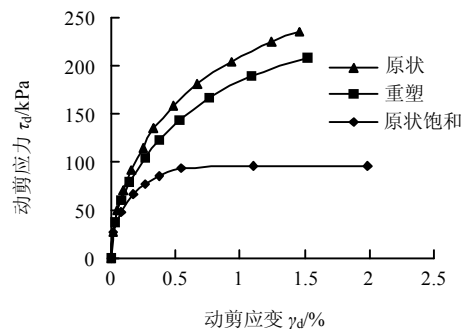


图1 黄土的动剪应力-应变关系曲线

Fig.1 Dynamic shear stress-strain curves of loesses

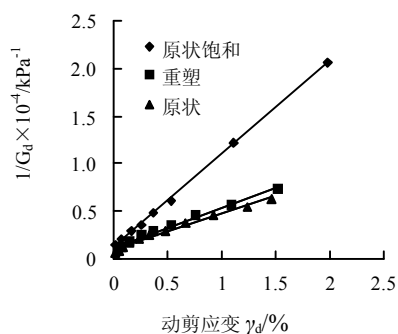


图2 黄土的 $1/G_d$ - γ_d 关系曲线

Fig.2 $1/G_d$ - γ_d curves of loesses

表3 试验拟合参数一览表

Table 3 The list of test fitting parameters

试样类型	$a / 10^{-5}$	$b / 10^{-5}$	R^2
原状饱和黄土	1.27	9.71	0.999
重塑黄土	1.20	4.17	0.984
原状黄土	0.891	3.83	0.967

骆亚生^[5]提出的基于动剪应力考虑的土结构性量化参数公式如式(3)所示:

$$m_{\gamma d} = \frac{\tau_{do}^2}{\tau_{ds} \cdot \tau_{dr}} \quad (3)$$

式中: $m_{\gamma d}$ 为基于动剪应力考虑的土结构性量化参数; τ_{do} 、 τ_{dr} 、 τ_{ds} 分别为原状黄土、重塑黄土与原状饱和黄土的动剪应力。

本文在式(3)的基础上,引入Hardin-Drnevich双曲线模型对其进行了改造,改造后的土结构性量化参数公式如式(4)所示:

$$m_{\gamma d} = \frac{(a_r + b_r \gamma_d)(a_s + b_s \gamma_d)}{(a_o + b_o \gamma_d)^2} \quad (4)$$

式中: $m_{\gamma d}$ 为基于动剪应力考虑的土结构性量化参数; a_r 、 b_r 分别为重塑黄土 $1/G_d$ - γ_d 关系曲线所拟合直线中的截距和斜率; a_s 、 b_s 分别为原状饱和黄土 $1/G_d$ - γ_d 关系曲线所拟合直线中的截距和斜率; a_o 、

b_0 分别为原状黄土 $1/G_d-\gamma_d$ 关系曲线所拟合直线中的截距和斜率。

新的公式在求取结构性参数时可以直接代入Hardin-Drnevich模型的试验参数,不仅有效地避免了式(3)在计算结构性参数时人工插值求点的繁琐与不准确,而且克服了该公式在动剪应变为0时无法求取初始结构性参数值的固有缺陷。故新的结构性参数公式不仅是对原公式的简单改造,它使得结构性参数求取的效率大为提高,同时合理地联系了土应力-应变曲线的相关参数,物理意义更趋明确,具有了在数值分析中广泛应用的前景。

4 非饱和黄土动力结构性分析

根据兰州、洛川、杨凌地区黄土在不同含水率、不同固结应力条件下动剪应力-应变关系曲线以及 $1/G_d-\gamma_d$ 关系曲线,按式(4)计算出的土结构性参数随动剪应变变化曲线如图3~10所示。

4.1 土结构性参数随动剪应变变化规律

非饱和黄土的动力结构性参数在小变形下由于土体结构的初期损伤有一个较大幅度的降低,之后随着土体结构的逐渐愈合,次生结构强度逐渐形成,其动力结构性参数随动剪应变的发展表现出逐渐稳定在一定的水平,如图3所示。这表明,动荷载作用下黄土土体在变形过程中的初期损伤对土体结构的影响较大,变形初期以损伤为影响土体结构的主导因素,黄土动力结构性参数表现为随动剪应变发展而减小;反之,动剪应变较大时,土体结构的愈合因素慢慢上升为主导因素,土体次生结构强度抑制了损伤因素对土体结构的继续削弱,使得黄土动力结构性参数表现为稳定在一定的水平。

4.2 含水率对土结构性参数的影响

含水率对兰州、洛川、杨凌地区黄土的动力结构性影响显著。在某一相同固结应力条件下,含水率越低,黄土的动力结构性参数越大,如图4~6所示。这说明含水率作为一种“广义力”,对黄土的动力结构性影响很大,低含水率下的黄土具有很强的动力结构性,随着含水率的增大,黄土的动力结构性逐渐减弱且变化幅度也愈来愈小。

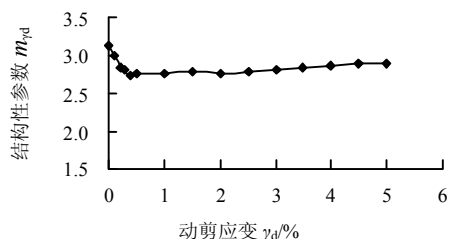


图3 非饱和黄土动力结构性参数典型曲线

Fig.3 Typical dynamic structural parameter curve of unsaturated loess

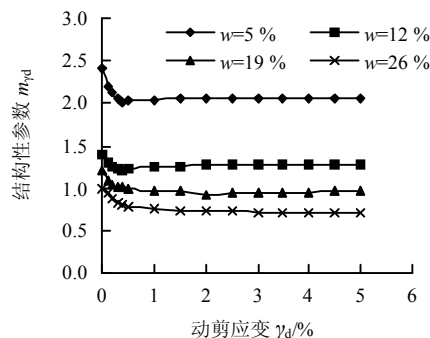


图4 兰州地区黄土动力结构性参数曲线($\sigma_3=200$ kPa)

Fig.4 Dynamic structural parameters of Lanzhou loess($\sigma_3=200$ kPa)

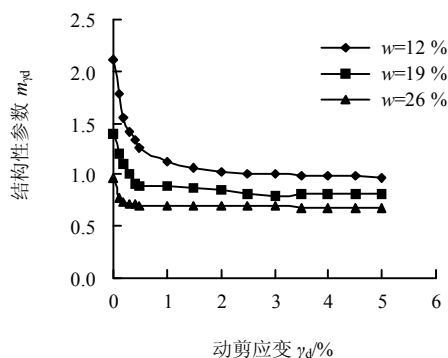


图5 洛川地区黄土动力结构性参数曲线($\sigma_3=300$ kPa)

Fig.5 Dynamic structural parameters of Luochuan loess($\sigma_3=300$ kPa)

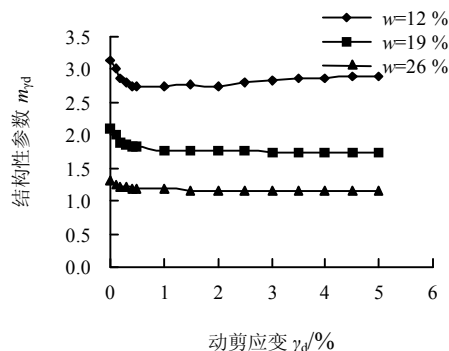


图6 杨凌地区黄土动力结构性参数曲线($\sigma_3=300$ kPa)

Fig.6 Dynamic structural parameters of Yangling loess($\sigma_3=300$ kPa)

4.3 固结应力对土结构性参数的影响

固结应力对兰州、洛川、杨凌地区黄土的动力结构性影响也尤为突出。在某一相同含水率下,固结应力越小,黄土的动力结构性参数越大,如图7~9所示。这说明黄土在某一含水率下对应着一个使土体结构损伤的屈服应力,当固结应力小于这个结构屈服应力时,黄土的动力结构性在固结应力作用下损伤不大或几乎没有损伤,所对应的黄土动力结构性参数较大;当固结应力大于这个结构屈服应力时,

固结应力的作用就已经使土体结构有较大的损伤破坏, 黄土的动力结构性大大削弱, 动力结构性参数也明显减小。

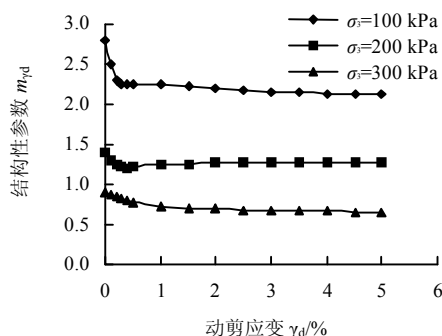


图7 兰州地区黄土动力结构性参数曲线($w=12\%$)

Fig.7 Dynamic structural parameters of Lanzhou loess ($w=12\%$)

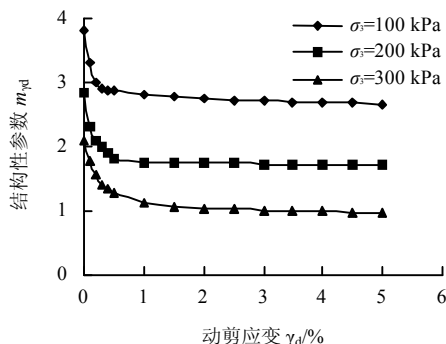


图8 洛川地区黄土动力结构性参数曲线($w=12\%$)

Fig.8 Dynamic structural parameters of Luochuan loess ($w=12\%$)

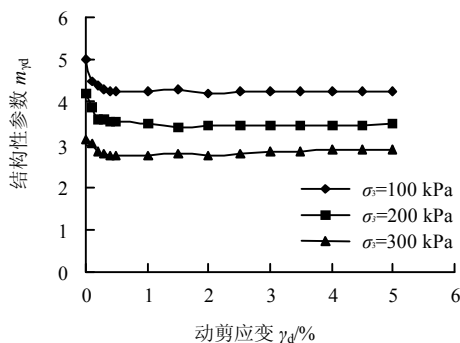


图9 杨凌地区黄土动力结构性参数曲线($w=12\%$)

Fig.9 Dynamic structural parameters of Yangling loess ($w=12\%$)

4.4 土结构性参数的区域间对比分析

从统计的角度来看, 在相同含水率、固结应力的情况下, 杨凌地区黄土的动力结构性参数量值最大, 洛川地区黄土次之, 兰州地区黄土最小, 即杨凌地区黄土的动力结构性最强, 洛川地区黄土次之, 兰州地区黄土最弱。换言之, 黄土的动力结构性在

地理空间分布上有一定的规律性, 即从西北向东南方向增强, 如图10所示。产生这种区域差异性的原因, 笔者认为, 与黄土的物质成分与微结构自西北向东南存在很明显的区域性有关^[13]: 自西北向东南, 黄土的“骨架”颗粒变细、黏粒等胶结物增多(由表1可知, 兰州、洛川、杨凌地区黄土的黏粒含量分别为16.0%、18.0%和20.7%), 胶结类型由接触式过渡为基底式, 其粒间孔隙也变得越来越细, 且孔隙的数量也越来越少。同时, 土的沉积过程对土体的结构性也有较大的影响, 土体在沉积过程中若形成絮凝块状结构则可能会形成结构性很强的欠压密的土; 若沉积过程中形成散凝粒状结构, 则土体的结构性就不会太强。我国降雨量从西北向东南越来越丰富, 黄土从西北向东南也越来越容易受到水分的浸湿, 处在东南向(相对而言)的黄土正是在一定水分的长期反复的增湿减湿及自重作用下, 增强了土颗粒间的粘结力并积聚成絮凝块状结构, 这种结构在水分再度散失后便会使具有很强的结构性。而处在西北部的黄土由于缺少了水分的“揉和”作用, 颗粒间的胶结机会较少, 相互间保持较为独立的个体, 处在一种易变的“亚稳定状态”, 土的结构性相对较弱。

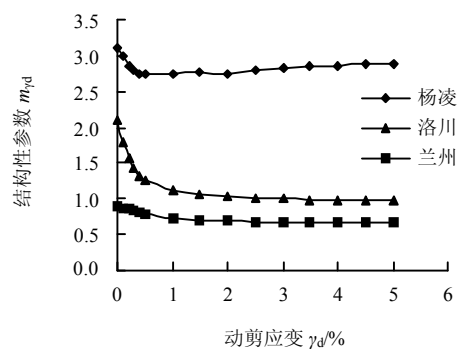


图10 不同地区黄土动力结构性参数曲线($w=12\%$ 、 $\sigma_s=300$ kPa)

Fig.10 Dynamic structural parameter curves of loesses in different regions ($w=12\%$ 、 $\sigma_s=300$ kPa)

5 结 论

以不同含水率与不同应力状态下兰州、洛川、杨凌地区黄土为研究对象, 利用动扭剪三轴仪对其动力结构性进行了较为深入的研究, 结果表明:

(1) 兰州、洛川、杨凌地区黄土的动力结构性参数随动剪应变的增大先降低, 而后保持在一个稳定的水平。

(2) 含水率与固结应力对黄土的动力结构性影

响显著:在相同固结应力条件下,含水率越低,黄土的动力结构性参数越大;在相同含水率条件下,固结应力越小,黄土的动力结构性参数越大。

(3)从统计的角度来看,在相同含水率、固结应力的情况下,杨凌地区黄土的动力结构性参数量值最大,洛川地区黄土次之,兰州地区黄土最小,即杨凌地区黄土的动力结构性最强,洛川地区黄土次之,兰州地区黄土最弱。换言之,黄土的动力结构性在地理空间分布上存在从西北向东南方向增强的规律。

参考文献

- [1] 沈珠江. 土体结构性数学模型—21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. Mathematics model of soils structure——The key issue of 21st century soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [2] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [3] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [4] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [5] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4248—4251.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4248—4251.
- [6] DIBBEN S C, JEFFERSON I F, SMALLEY I J. The “loughborough loess” Monte Carlo model of soil structure[J]. **Computers & Geosciences**, 1998, 24(4): 345—352.
- [7] 陈存礼, 何军芳, 杨鹏. 考虑结构性影响的原状黄土本构关系[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2284—2290.
CHEN Cun-li, HE Jun-fang, YANG Peng. Constitutive relationship of intact loess considering structural effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2284—2290.
- [8] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531—536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.
- [9] 邓津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 29(4): 542—548.
DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong. Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 29(4): 542—548.
- [10] 张腾, 胡再强, 吴兴辉, 等. 不同应力路径下非饱和黄土的结构变化特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1945—1948.
ZHANG Teng, HU Zai-qiang, WU Xing-hui, et al. Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess under different stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1945—1948.
- [11] 李俊连, 姚仰平. 结构性黄土临界状态力学性状[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 63—68.
LI Jun-lian, YAO Yang-ping. Mechanical characteristics of structural loess under critical state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 63—68.
- [12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations**, ASCE, 1972, (7): 667—692.
- [13] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京: 科学出版社, 1966.