

水敏性黄土的湿剪试验研究

李 鹏^{1, 2, 3}, 胡再强¹, 焦黎杰¹, 田春亮¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 应用改制的应力式直接剪切仪, 首先对不同剪应力水平作用下原状黄土浸水饱和湿剪演化规律进行了研究; 其次选取了一个剪应力水平对不同增湿浸水量作用下原状黄土和扰动黄土湿剪演化规律进行了进一步探索, 并在此基础上定义了黄土水敏性结构参数 m_w 。结果表明, 黄土在湿剪过程中剪位移随时间变化曲线可以分为两个阶段: 湿剪迅速发展阶段和湿剪稳定阶段; 浸水饱和增湿后试样抗剪强度值受剪应力水平影响较小, 坚向变形以增湿湿陷变形为主; 而其水敏性结构参数在低固结压力、低含水率条件下对水的敏感性较强, 在高固结压力、高含水率条件下对水的敏感性较小。

关键词: 结构性黄土; 湿剪; 不同增湿量; 水敏性结构参数

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)09-1434-05

作者简介: 李 鹏(1963-), 男, 副教授, 从事土工试验研究工作。E-mail: yt00@nwsuaf.edu.cn。

Wet shear tests on structural loess

LI Peng^{1, 2, 3}, HU Zai-qiang¹, JIAO Li-jie¹, TIAN Chun-liang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Loess Soil Mechanics and Engineering Key Laboratory of Shaanxi Province, Xi'an 710048, China; 3. Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A modified direct shear stress instrument is employed to study wet shear evolution of saturated loess under different levels of shear stress. The wet shear evolution rules of undisturbed and disturbed loess are further discussed under different humidifying water volumes according to a certain level of shear stress. On such a basis, a structural parameter of loess m_w is defined. The results show that during the wetting process of loess, the curves of shear displacement over time can be divided into two stages: rapid development stage and stability shear stage. The shear stress has small impact on the shear strength of the saturated loess samples, and the vertical deformation is mainly the collapsible one. The structural parameter exhibits strong sensitivity to water under low consolidation pressure and low water content, and weak sensitivity to water under high consolidation pressure and high water content.

Key words: structural loess; wet shear; different amount of humidifying; structural parameters of loess

0 引言

黄土地处干旱、半干旱气候区, 降雨量偏小。多年平均降雨量多集中在7~9月份, 占全年降水量的60%~80%, 且以暴雨为主, 降水量集中而短暂^[1]。工程实际中, 湿陷性黄土边坡、渠道、地基等由于天然情况下湿度较低抗剪强度较高, 未浸水前大多处于安全稳定的状态, 一旦由于降雨、灌溉、地下水位上升、管道漏水等遭受浸水作用, 湿陷性黄土的结构性弱化强度大幅度降低就会触发产生增湿剪切变形甚至增湿剪切破坏现象。

张苏民^[2]指出, 黄土在某一压力作用下, 变形达到稳定后, 由于含水率增加而产生的附加变形称为增湿变形。同时指出增湿变形产生的原因有两个, 即力

的作用和水的作用。并指出由于力水作用先后顺序的不同, 将增湿分为后湿和预湿, 且随增湿路径的不同变形曲线也有所不同。沈珠江^[3]指出, 含水率增加既可引起易溶盐的溶解而造成颗粒之间胶结力的丧失, 也可引起吸力的丧失, 而后者是可以恢复的。陈正汉^[4]认为, 湿化变形是一个独立的变形阶段, 最方便的办法就是把它分离出来单独研究。文献[5~8]对黄土的增湿变形机理进行了大量的试验研究, 但大多采用预湿增湿法, 而实际工程中, 地基、边坡等都是在一定应力作用下, 由于降雨、灌溉的影响而产生增湿变形或是增湿破坏。本文采用改制的应力式直接剪切单线

表 1 黄土土性指标

Table 1 Physical and mechanical parameter of loess

黄土种类	比重	天然空隙比 e	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	颗粒组成/%			湿陷系数
						>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm	
杨凌	2.71	0.91	30.9	20.5	10.5	6.5	61.4	32.1	0.047

法一次性增湿试验(其简单可行,更符合实际工况的应力路径和增湿路径),对黄土的湿剪演化规律进行了系统的研究,并提出了黄土的水敏性结构参数 m_w 。

1 试验方法

试验用土取自杨凌某建筑基坑,取土深度为天然地表下2~4 m,天然含水率为17%~21%,平均干密度 $r_d=1.42 \text{ g/cm}^3$,属渭河二级阶地。土料特征:黄褐色,有钙质线纹,土质均匀,含少量虫孔及植物根茎,土的状态为坚硬,其土性指标见表1。

试验仪器采用改制的应变式直剪仪,该仪器为改制的四联直接剪切仪,直剪仪上的法向垂直压力仍采用原直剪仪上的杠杆式加压方式进行施加,水平剪应力采用由钢丝绳绕过定滑轮后加砝码来实现。

试验选用含水率5%的原状试样在固结压力为50,100,200,400 kPa下的峰值抗剪强度的0.1,0.2,0.3,0.4 MPa,作为不同的剪应力水平 R_s 。首先在4个剪应力水平 R_s 下,分别进行了固结压力为50,100,200,400 kPa的黄土一次性浸水饱和湿剪试验,研究黄土在不同剪应力水平下湿剪特性;其次选取剪应力水平 $R_s=0.3$,进行了不同浸水量下,固结压力亦为50,100,200,400 kPa的黄土增湿直剪试验,研究黄土在不同增湿量下湿剪性状。

在试验之初,首先对含水率5%原状黄土试样进行了应变式直剪切试验,测定其抗剪强度值,所得结果见表2。

表 2 含水率5%原状黄土抗剪强度值及指标

Table 2 Values of shear strength and indices for undisturbed loess

with water content of 5%

不同固结压力破坏剪应力 τ_f/kPa				内摩擦角 $j/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
50	100	200	400		
85	119	170	289	30.0	57.6

2 浸水饱和试验结果及分析

2.1 浸水饱和湿剪位移随时间变化规律

本文首先进行了不同剪应力水平下,一次性浸水饱和湿剪试验,总结了同一固结压力不同剪应力水平浸水饱和湿剪位移随时间变化曲线,如图1~4所示。从图1~4可以看出,对于同一固结压力,随着剪应力

水平 R_s 的增大,其增湿剪位移随时间变化曲线逐渐增高,这是由于随着剪应力水平的增大剪应力增大,湿剪位移逐渐增大所致。而对比图1~4也可以发现,对于同一剪应力水平来说,随着固结压力的增大,湿剪位移曲线逐渐降低,随着固结压力的减小,湿剪位移曲线逐渐升高。这是由于在固结压力较低时,固结压力不足以破坏黄土的原生结构和天然强度。而一旦黄土浸水,其原生结构和天然强度遭到破坏,就会产生显著的湿剪变形。但在固结压力较高时,黄土的原生结构和天然强度在固结压力作用下就被破坏,导致土体被压密生成新的次生结构和强度。在浸水过程中,试样表现为湿剪变形较小,说明在高固结压力作用下生成的次生结构,具有较高的强度。同时发现,在固结压力50 kPa,剪应力水平0.4时,试样在浸水饱和时发生了增湿剪切破坏,说明在固结压力较低时,剪应力水平较高时即将引发湿剪破坏。

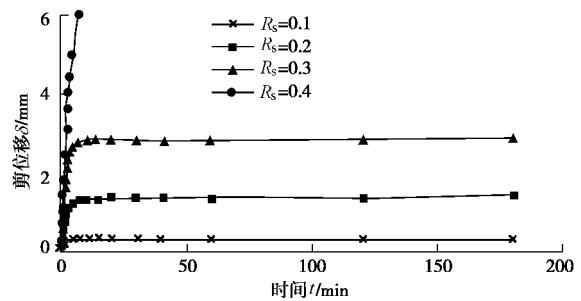


图1 固结压力50 kPa湿剪位移随时间关系曲线

Fig. 1 Relationship between wet shear displacement and time under consolidation pressure of 50 kPa

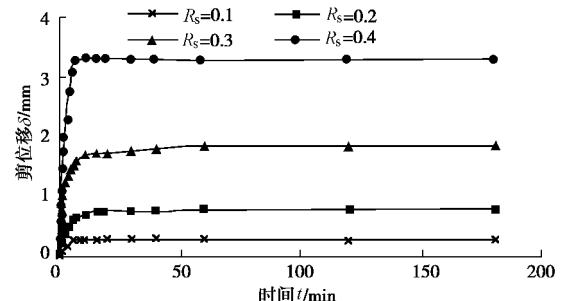


图2 固结压力100 kPa湿剪位移随时间关系曲线

Fig. 2 Relationship between wet shear displacement and time under consolidation pressure of 100 kPa

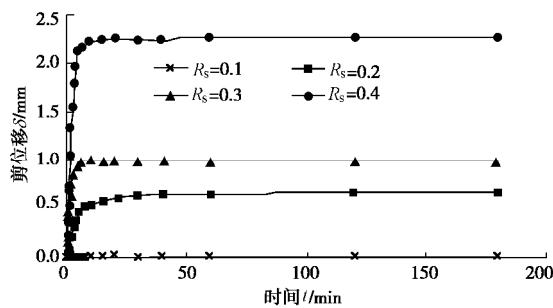


图3 固结压力200 kPa湿剪位移随时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between wet shear displacement and time under consolidation pressure of 200 kPa

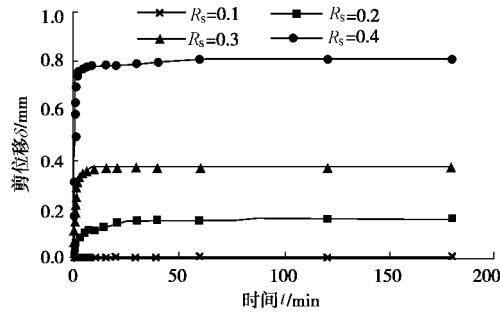


图4 固结压力400 kPa湿剪位移随时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between wet shear displacement and time under consolidation pressure of 400 kPa

仔细观察还可以发现，浸水饱和湿剪曲线在剪应力水平较大时，可以分为两个阶段：湿剪迅速发展阶段和湿剪稳定阶段。湿剪迅速发展阶段是因为随着水分的充分入渗，土的固化联结键遭到弱化，继而在剪应力的作用下迅速发生湿剪变形；而伴随着湿陷变形的发展，土体被压密生成新的次生结构，在其作用下增湿剪切变形逐渐趋于稳定。此外，在剪应力水平 R_s 较低时，浸水饱和湿剪曲线基本呈一条斜直线，在高固结压力作用下较为明显。

2.2 浸水饱和竖向位移随时间变化规律

在湿剪试验过程中，同时记录了试样竖向位移的变化规律，尽管由于湿剪过程中上剪切盒的移动，引起百分表接触点的变化而产生误差，但是总体规律还是很明显的，列举剪应力水平0.3时的浸水饱和竖向位移随时间的关系曲线如图5所示。

根据实测的竖向位移随时间变化曲线，发现竖向位移随固结压力的增大而增大，在不同剪应力水平下其规律一致，这是由于竖向变形主要由增湿湿陷引起。也可以看出，竖向位移随时间变化曲线也可以分为两个阶段：变形迅速发展阶段和变形稳定阶段。在浸水稳定后剪切过程中，其竖向位移变化较小，只有在固结压力较小的情况下，竖向位移才产生微小的回弹，剪胀现象不明显。说明在湿剪试验过程中，竖向位移

主要由于浸水湿陷引起，其体变以剪缩为主。

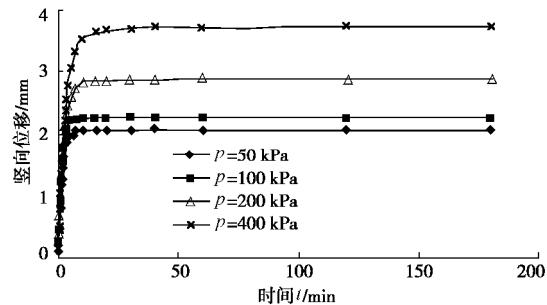


图5 剪应力水平0.3浸水饱和竖向位移曲线

Fig. 5 Curves of saturated vertical displacement under shear stress level of 0.3

2.3 浸水饱和抗剪强度随 R_s 变化规律

在浸水饱和稳定（稳定标准为湿剪位移在1 h内变化范围在0.01 mm以内）后，对未在湿剪过程中破坏的试样，进行的剪切试验，按应力式直剪切每级加载17 kPa，稳定1 min后加下一级荷载，直至试样剪切破坏，其实测抗剪强度破坏包线如图6所示，抗剪强度值及指标如表3所示。

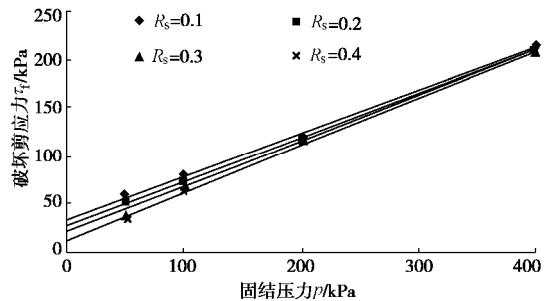


图6 不同剪应力水平浸水饱和强度包线

Fig. 6 Envelope of saturated strength under different levels of shear stress

表3 不同剪应力水平下浸水饱和黄土抗剪强度值及指标

Table 3 Values of shear strength and indices for soaking saturated loess under different shear stresses

剪应力水平 R_s	不同固结压力破环剪应力 τ_f /kPa				内摩擦角 j /°	黏聚力 c /kPa
	50	100	200	400		
0.1	60	80	119	216	24.0	34.6
0.2	51	75	119	211	24.5	28.5
0.3	43	70	119	206	25.0	22.5
0.4	34	65	119	208	26.0	14.5

从图6和表3可以看出，在4个剪应力水平下，试样抗剪强度值有一定的差距，随着剪应力水平的增大，不同固结压力作用下抗剪强度呈减小趋势，在小的固结压力作用下较明显。这是由于在小的固结压力作用下，黄土的原生结构没有被完全破坏，而随着剪应力水平的增大，黄土的原生结构在剪应力作用下被进一步弱化，故其抗剪强度值减小。此外，其内摩擦

角随剪应力水平的增大有小幅上升，而黏聚力则有所减小。说明黄土在湿剪试验中，由于浸水的作用使其胶结力弱化，而随着剪应力水平的增大，湿剪位移逐渐增大，其摩擦力逐渐得以发挥，以弥补由于黏聚力减小其抗剪能力的不足。由以上分析认为，剪应力水平 R_s 对黄土湿剪抗剪强度基本没有影响。

3 浸水增湿试验成果及水敏性结构参数的提出

3.1 浸水增湿剪位移变化规律

浸水饱和只能揭示浸水饱和对黄土湿剪变形的影响，不能揭示不同增湿含水率对黄土湿剪的影响，为了研究不同增湿含水率对黄土湿剪变形的影响，本文选取剪应力水平 0.3，按文献[3]定义的增湿剪切变形，总结了原状黄土与扰动黄土的不同增湿含水率湿剪变形曲线，如图 7、8 所示。

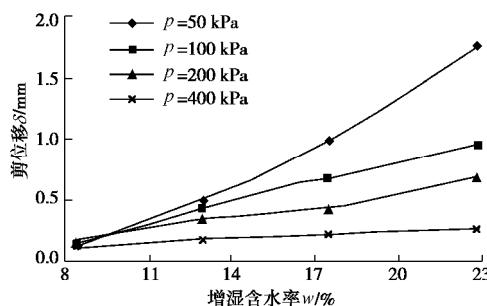


图 7 原状黄土不同增湿含水率湿剪变形曲线图

Fig. 7 Curves of wet shear deformation of undisturbed loess under different moistening water contents

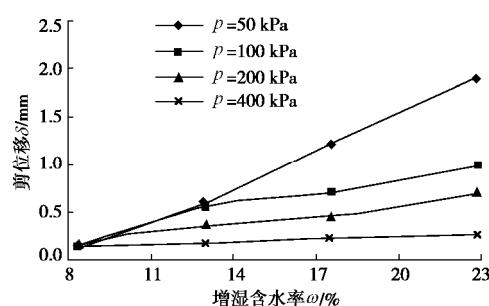


图 8 扰动黄土不同增湿含水率湿剪变形曲线

Fig. 8 Curves of wet shear deformation of disturbed loess under different moistening water contents

从图 7、8 可以看出，增湿剪切变形随增湿含水率的增大而增大，且在高增湿含水率情况下受固结压力影响明显，随固结压力的增大而减小，在低增湿含水率作用下受固结压力作用影响较小。

3.2 水敏性结构参数的提出

黄土的结构性一直是岩土界研究的热点，其根本目的在于定量描述黄土的结构性及其对黄土的力

学特性的影响。谢定义、齐吉琳^[9]等认为结构性的强弱可以由颗粒联结的可稳性和颗粒排列的可变性两个方面来衡量，在压缩条件下，通过扰动、加荷、浸水的方式使土的结构势释放出来。扰动能破坏土的联结作用，使土颗粒之间的联结强度降低；加荷既能改变土的颗粒排列方式，又能改变土颗粒的联结特征；浸水既可使土中的化学物质弱化、溶解、吸力丧失，水膜的楔入作用又可使土所固有的胀缩势释放出来。在此基础上提出了黄土的结构性参数，开创了黄土结构性研究一个新的里程碑。本文基于以上思想定义了基于应力量直剪试验湿剪变形的黄土水敏性结构参数 m_w ，其表达式为

$$m_w = \left(\frac{d_s}{d_o} \right) / \left(\frac{d_o}{d_r} \right) , \quad (1)$$

式中， d_s 分别为原状样浸水饱和的湿剪变形， d_o ， d_r 为原状样和扰动样增湿至某一含水率时的湿剪变形。

从式(1)的定义可以看出，土的联结越强，扰动重塑引起的强度损失越大，在浸水作用下发生的湿剪变形也越大，即可稳定性 m_2 越小；土的排列越不稳定，在力的作用下浸水其结构破坏也越大，发生的湿剪变形也越大，即可变性 m_1 越大。用一个越小的 m_2 值去除一个越大的 m_1 值来得出土的水敏性结构参数 m_w 其值会更大，说明黄土具有更大的敏感性，其与黄土的水敏性结构强弱有直接而灵敏的联系。根据试验数据，水敏性结构参数 m_w 与固结压力、浸水量的关系曲线如图 9 所示。

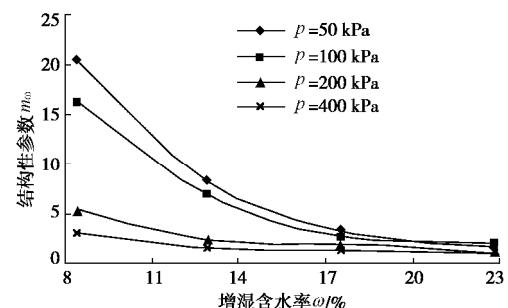


图 9 结构性参数与不同浸水量的关系曲线

Fig. 9 Relationship between structural parameter and different moistening water amount

如图 9 所示，在同一固结压力下，当含水率较小时，水敏性结构参数随含水率的增大迅速减小，而当含水率较大时水敏性结构参数随含水率的增大减小较小；并且在同一含水率下，当固结压力较小时，水敏性结构参数随固结压力的增大迅速减小，而当固结压力较大时，水敏性结构参数随固结压力的增大减小较小。如当增湿至含水率 8.39% 时，固结压力为 50 kPa 时水敏性结构参数为 20.4，而固结压力为 400 kPa 时

水敏性结构参数为 3.0; 而当增湿至含水率 22.83% 时, 固结压力为 50 kPa 时水敏性结构参数为 1.5, 而固结压力为 400 kPa 时水敏性结构参数为 1.1。说明黄土的水敏性结构性在力与水的共同作用下, 在固结压力较小或含水率较低时, 其敏感性较强; 而随着固结压力的增大或含水率较高时, 其敏感性较小。

4 结 论

(1) 黄土浸水增湿剪位移随时间变化曲线可以分为两个阶段: 剪切变形迅速发展阶段和剪切变形稳定阶段。且剪位移在同一固结压力作用下, 受剪应力水平影响较大, 随剪应力水平的增大而增大, 在同一应力路径下, 剪位移随浸水量的增大而增大。此外, 在固结压力较小而剪应力水平较高时, 容易引发湿剪破坏。

(2) 黄土湿剪竖向位移随时间变化曲线也可分为两个阶段: 变形迅速发展阶段和变形稳定阶段, 体变形式以湿陷引起的剪缩为主。

(3) 对黄土在不同剪应力水平下浸水饱和后试样抗剪强度的变化进行分析, 发现随着剪应力水平的增大, 不同固结压力作用下破坏剪应力呈减小趋势, 在小的固结压力作用下较为明显。此外, 其内摩擦角随剪应力水平的增大稍有增大, 而黏聚力有所减小, 综合分析认为, 剪应力水平对黄土浸水饱和后的抗剪强度基本没有影响。

(4) 黄土水敏性结构参数在同一含水率下, 当固结压力较小时, 水敏性结构参数随含水率的增大迅速减小, 而当固结压力较大时, 水敏性结构参数随含水率的增大而减小的量较小。说明黄土的水敏性结构性在力与水的共同作用下, 在固结压力较小或含水率较低时, 对水的敏感性较强; 而随着固结压力的增大或含水率较高时, 对水的敏感性较小。

参 考 文 献:

- [1] 倪万魁, 牛富俊, 刘东燕. 降雨入渗对非饱和黄土强度的影响分析[J]. 工程勘察, 2002(3): 15 - 18. (NI Wan-kui, NIU Fu-jun, LIU Dong-yan. Rainfall infiltration effect on strength of unsaturated loess[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(3): 15 - 18. (in Chinese))
- [2] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土 (Q3) 的增湿变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 21 - 31. (ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. The deformation characteristics of collapsible loess during moistening process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 21 - 31. (in Chinese))
- [3] 沈珠江. 二元介质模型在黄土增湿变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 129 - 134. (SHEN Zhu-jiang. The application of binary medium model in deformation analysis of loess during moistening[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 129 - 134. (in Chinese))
- [4] 陈正汉. 岩土材料的损伤理论学习札记[C]// 第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 2008: 307 - 309. (CHEN Zheng-han. The study notes of damage theory for geological materials[C]// The First National Conference of Geotechnical Constitutive Theory. 2008: 307 - 309. (in Chinese))
- [5] 张原丁. 论黄土的湿陷敏感性[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 79 - 83. (ZHANG Yuan-ding. Discussion of collapsibility sensitivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 79 - 83. (in Chinese))
- [6] KATO Shoji, Kawai Katsuyuki. Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(5): 75 - 90.
- [7] MEILANI I, RAHARDJO H, LEONG E. Pore-water pressure and water volume of an unsaturated soil under infiltration condition[J]. Can Geotech J, 2005, 42: 1509 - 1531.
- [8] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1195 - 1200. (ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. The shear strength analysis of loess during moistening[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1195 - 1200. (in Chinese))
- [9] 谢定义, 齐吉琳. 土的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. The new approach of structural properties and its quantitative parameter of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651 - 656. (in Chinese))