

# 平面应变条件下原状黄土结构性定量研究

王晓峰 石怀清 王东红

(机械工业勘察设计研究院, 陕西西安 710043)

**【摘要】** 天然原状黄土由于自身颗粒之间的大孔隙和颗粒间相互胶结, 从而具有显著的结构性。结构性及其变化显著影响土的力学特性及其稳定性。在诸如边坡、隧道、路基、基坑等平面应变问题的实际工程中所采用的理论大多是基于重塑土建立的, 并没有考虑土的结构性。通过分析原状黄土的工程特性, 定量研究结构性黄土和重塑黄土之间的力学行为差异, 建立土体强度变形稳定分析理论, 完善土力学体系, 指导工程实践。

**【关键词】** 平面应变; 原状黄土; 结构性; 量化参数;

**【中图分类号】** TU 411.3

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.06.004

## Quantitative Research of the Structural Parameters of Loess Under the Plane Strain Conditions

Wang Xiaofeng Shi Huaiqing Wang Donghong

(China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710043, Shanxi, China)

**【Abstract】** Due to its natural loess large gap between the particles and particles cemented with each other, and thus have a significant structural. Structural changes significantly influence their mechanical properties and stability of soil. Such as slope, tunnel, embankment, excavation and other problems of practical engineering plane strain used in the theory are mostly based on established remolded, it does not take into account the soil's structural. This paper analyzes the engineering properties of loess, Quantitative study of the structural remodeling of loess and loess difference between the mechanical behavior, establish the soil strength and stability analysis of the deformation theory, Improve the system of soil mechanics, guidance the engineering practice.

**【Key words】** plane strain; intact loess; structural; quantitative parameter;

### 0 引言

自然界中的土一般都具有一定的结构性。土力学的奠基人 Terzaghi 早就强调指出, 在评价粘性土的变形与强度特性时应当注意其结构的重要性<sup>[1]</sup>。在土力学发展早期, Mitchell<sup>[2]</sup>、Lambe<sup>[3-4]</sup>、Seed<sup>[5]</sup> 和 Olson<sup>[6]</sup> 等人非常重视土的结构性对土力学与工程特性的影响, 他们尝试通过认识土的结构性来解释实际工程所表现出的复杂特性。此后, Levoueil<sup>[7]</sup> 通过大量的实验证明了土结构性对土力学特性的影响。然而, 由于天然土的复杂性, 以往人们主要以给定级配条件下人工制备的正常固结土、超固结土和松砂、密砂为研究对象, 揭示它们的强度变形特性, 建立相应的强度变形本构模型<sup>[8-10]</sup>。广泛应用于岩土工程领域的 M-C 强度准则、Duncan-Chang 非线性模型模型、

剑桥模型等。大量的细观研究资料表明, 土的结构性及其变化显著地影响其力学特性和土体的稳定性。开展土结构性的研究, 揭示其在土力学特性变化规律中的内在本质, 建立土体强度变形稳定分析理论, 完善土力学体系, 越来越得到土力学界的高度重视。这就说明, 要想更好更深入的认识原状土的力学特性, 就必须充分考虑土体的结构性变化所带来的宏观上的强度变形特性。

平面应变问题在实际工程中经常遇到, 如边坡、挡土墙、基坑、路基、隧道等。而现有的实际工程中所采用的理论基本上都是基于正常固结土或超固结土, 不考虑土的结构性变化所带来的影响, 这将为设计和施工中采用真实合理的计算模型和参数带来困难。

为此, 真实合理有效地确定具有结构性的天然

黄土在平面应变条件下的力学参数,了解其力学行为变化规律,量化描述结构性问题,为平面应变这一类工程问题提供真实有效的计算模型和参数,将显得尤为必要。

### 1 平面应变条件的原状黄土结构性参数

结构性是天然土体本身固有的属性,是继现有描述土体基本物理属性的粒度、密度、湿度之后的又一重要物理指标。因此,人们试图找出一个能全面表征土结构性的量化参数。谢定义等<sup>[11]</sup>提出的综合结构势具有概念直接明了、易于测试分析等特点,目前对黄土结构性参数的研究主要基于综合结构势(CSP)思想,结合压缩试验、常规三轴试验和真三轴试验等建立相应的结构性参数<sup>[12-14]</sup>来描述结构性黄土剪切过程中结构性的变化规律。而平面应变情况下黄土结构性参数的变化规律及其对力学特

性的影响研究则未见报道。因此,研究平面应变条件下结构性原状黄土的力学行为和工程特性显得尤为必要。

#### 1.1 平面应变条件下原状黄土结构性参数研究思路

基于综合结构势(CPS)思想,通过对天然原状黄土进行加荷、扰动、浸水作用量化描述土体的结构性。具体方法是通过原状土、重塑土、饱和土的平面应变剪切试验,寻求建立能反映平面应变条件下土结构性的量化指标。

通过真三轴改装来实现平面应变试验。其工作原理与真三轴试验基本相同,不同的是在中主应力方向使用刚性挡板来模拟平面应变状态,以保证中主应力方向的应变  $\epsilon_2 = 0$ 。压力室见图 1。

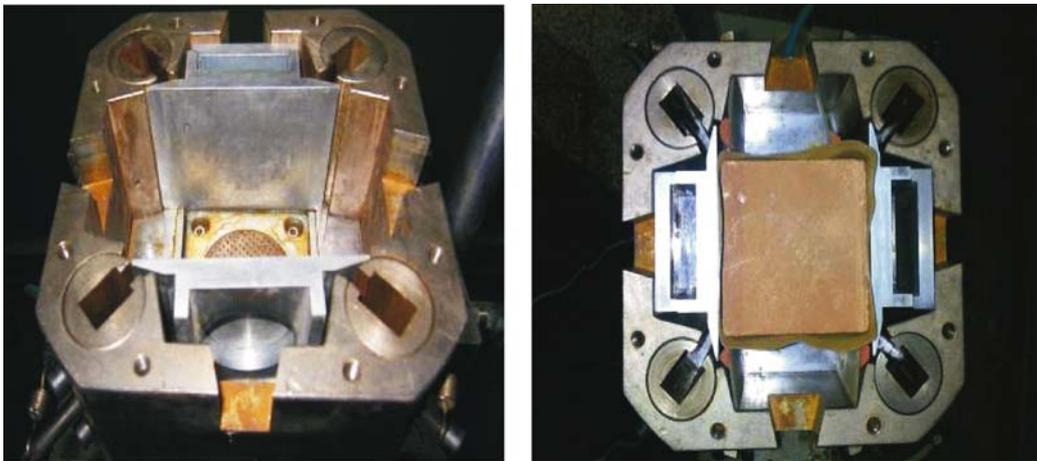


图 1 压力室结构图

#### 1.2 平面应变条件下原状土结构性参数测试方案与方法

基于综合结构势(CPS)思想下的应力比结构性参数与强度参数之间的关系。应力比结构性参数的表达式<sup>[15]</sup>为:

$$m_\eta = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)_i^2}{\left(\frac{q}{p}\right)_r \times \left(\frac{q}{p}\right)_s} \quad (1)$$

式(1)能较为全面的反映球应力和剪应力对土体性质的影响。

### 2 平面应变试验结果分析

本文试验土样取自西安白鹿原某塬处,取土深度为 5—6 m,土样颜色呈黄褐色,局部粉核较多,偶然结成粉砂团,有虫孔,为粉质粘土。白鹿原 Q<sub>3</sub> 黄土的物性指标见表 1 和图 2。

表 1 天然黄土的物性指标

相对密度	天然含水率 $w_0/\%$	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数	初始孔隙比 $e_0$
2.71	14	16	37.28	23.9	13.35	0.92

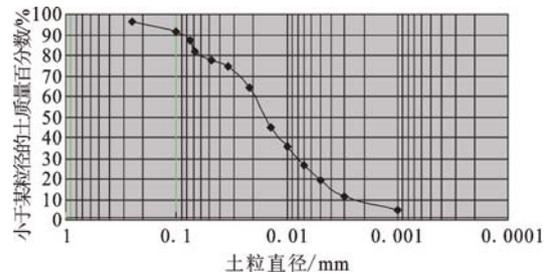


图 2 白鹿原 Q<sub>3</sub> 黄土的颗粒级配曲线

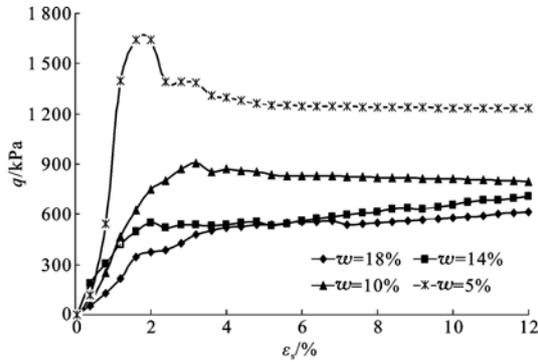
以白鹿原 Q<sub>3</sub> 黄土为研究对象,采用计算机控制的真三轴改装平面应变试验仪器进行 4 个不同含

水率(5%、10%、14%、18%)、4个不同围压(50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa)、三种状态(原状土、重塑土、饱和土)的土样进行试验。

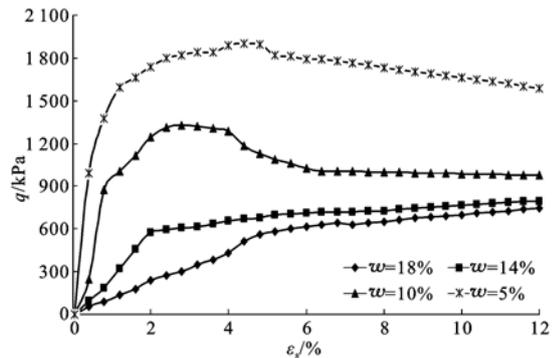
2.1 平面应变条件下的应力应变曲线变化规律

几组不同含水率情况下的应力应变曲线见图3。从中可以看出:随着含水率的减小,土体的抗剪强度在逐渐增大。随着含水率的降低,土的应力

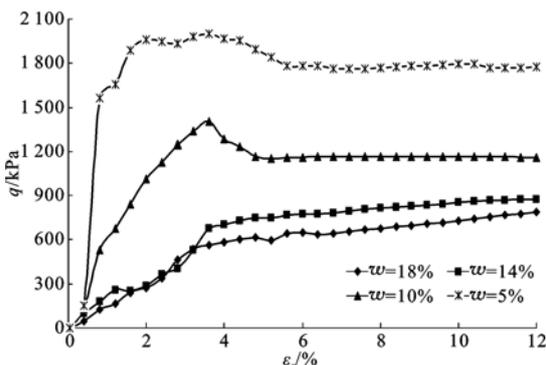
应变曲线由硬化逐渐向软化过渡。这主要是因为含水率是影响土体强度的主要因素,在含水率增大的过程中,土颗粒之间充斥的水膜逐渐增厚,导致溶解在土体中存在的一些胶结物质慢慢增多,这时通过公共结合水膜的胶结作用就逐渐降低,使得土体的粘聚力逐渐降低,最终表现为土体的抗剪强度降低。



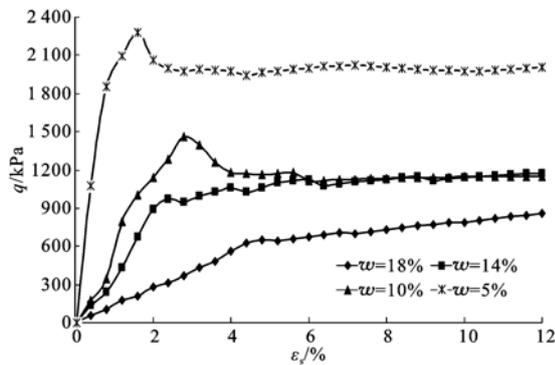
(a) 围压50kPa不同含水率



(b) 围压100kPa不同含水率



(c) 围压200kPa不同含水率

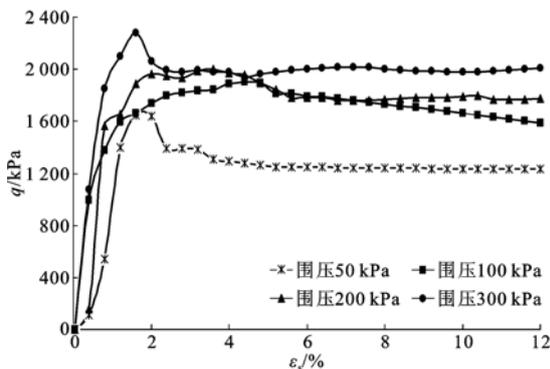


(d) 围压300 kPa不同含水率

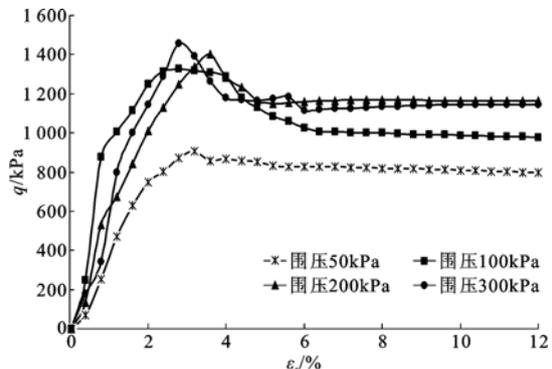
图3 不同围压下原状土体的应力应变曲线

不同围压情况下的应力应变曲线见图4。从图4中可得出:围压对土应力强度的影响较为明显,随着围压的增大,土体的应力强度值逐渐增大,这主要是由土的压硬性所致。重塑黄土的应力应变曲线在低含水率、低围压下,应力应变曲线表现为弱软化部

分曲线有峰值点见图5,重塑黄土在制样时形成了一定的次生结构和弱胶结作用,使其具备一定的结构性,随着含水率的增大,颗粒间连接的水膜增厚,土颗粒的弱胶结作用遭到破坏,土的应力应变曲线表现为硬化曲线。



(a) 原状黄土含水率5%不同围压



(b) 原状黄土含水率10%不同围压

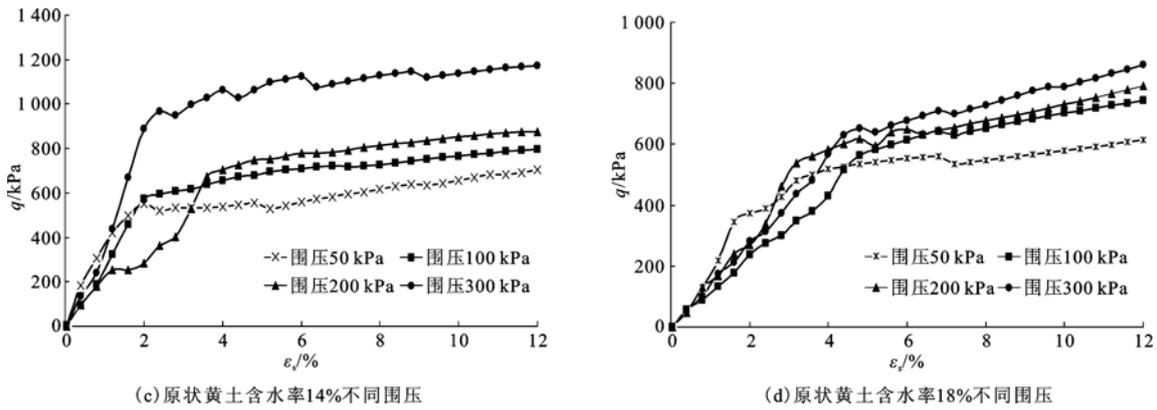


图4 不同含水率原状黄土应力应变曲线

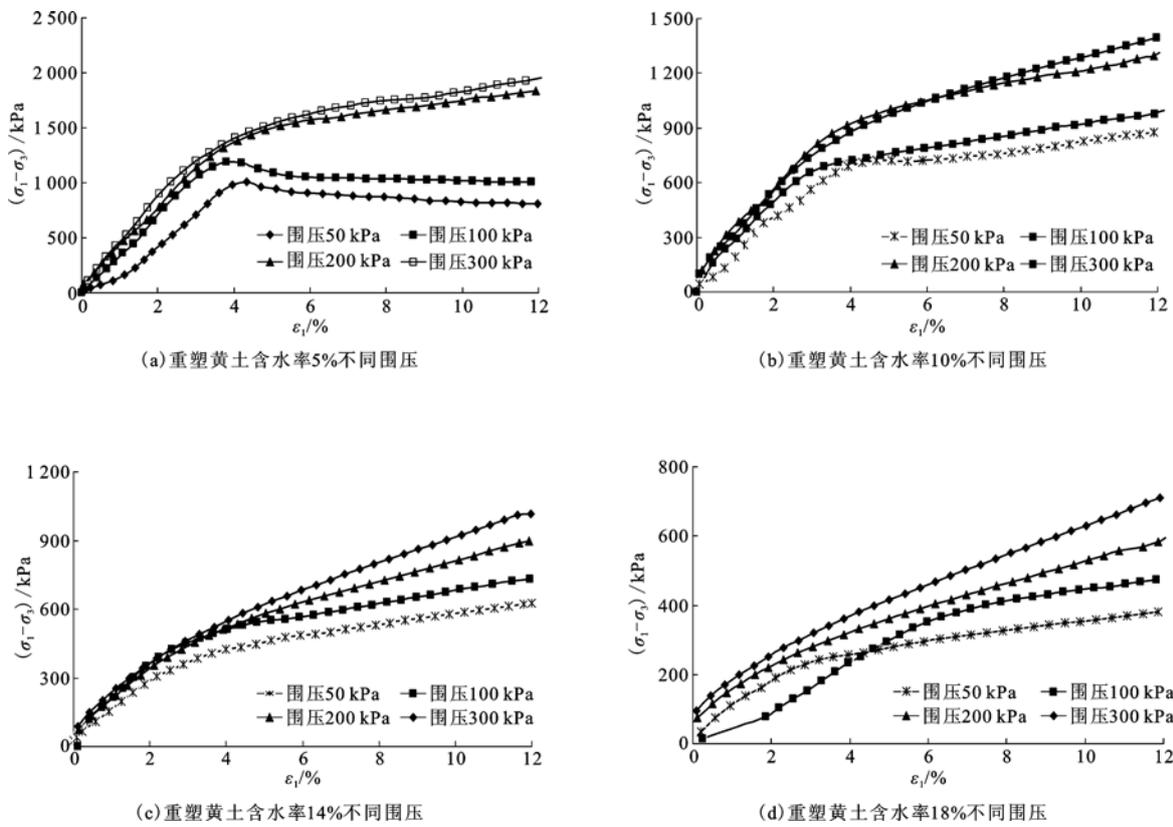


图5 不同含水率下重塑黄土应力应变曲线

原状黄土经过饱和后,根据综合结构势思想,土颗粒间的胶结作用得到释放而保留了原状土的排列结构见图6,从而使得土的应力应变曲线表现为硬化性,曲线规律一致性较好。

综上所述,土的结构性是影响原状黄土土力学性质的一个根本的内在因素,它除了在一定程度上反映土体的粒度、密度、湿度的影响外,还补充了与土生成和赋存条件密切相关的结构联结所产生的影响。

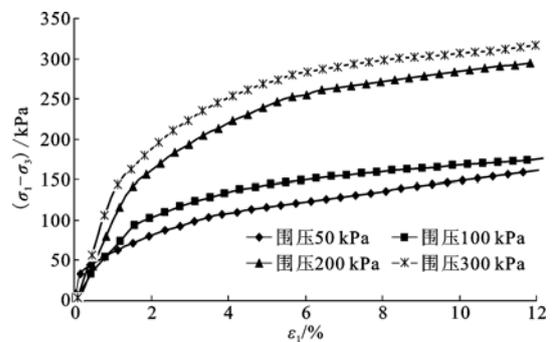
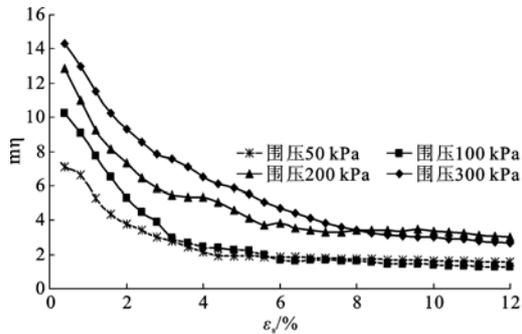


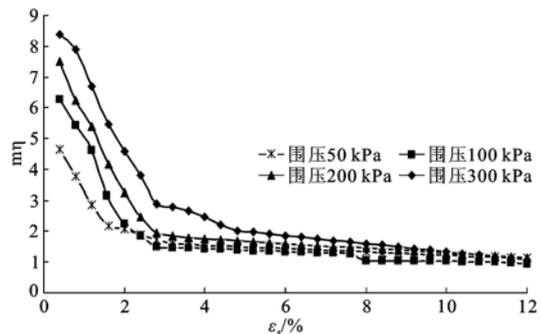
图6 饱和黄土的应力应变曲线

2.2 原状黄土的结构性参数变化规律分析

根据前述的应力比结构性参数(式1),图7和

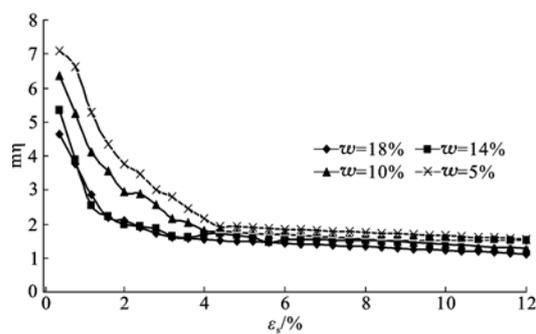


(a)原状黄土含水量5%不同围压

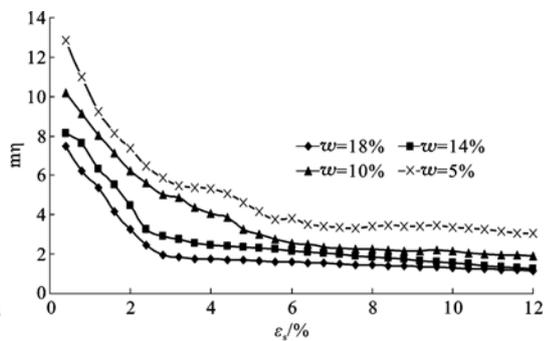


(b)原状黄土含水量18%不同围压

图7 不同含水率下的结构性参数变化规律



(a)原状围压50 kPa不同含水率



(b)原状围压200 kPa不同含水率

图8 不同围压下的结构性参数变化规律

不同含水率下的应力比结构性参数与剪切变形之间的变化规律见图7,从中可以看出,含水率的变化对应力比结构性参数的影响较为显著,而且呈现出一定的规律性:即在同一固结围压下,不同含水率对应的应力比结构性参数的变化规律基本相同。在同一含水率和围压情况下,在剪切变形较小时,同一含水率下的结构性参数随着剪切变形的发展表现出强烈的变化趋势,随着剪切变形的不断增大,结构性参数的变化逐渐平稳,最后趋近于1。这说明随着剪切的深入,土的结构性逐渐遭到破坏,最终土结构完全散失。同时,含水率对土结构性的影响也较大,在同一围压下,随着含水率的增大,土的结构性逐渐减弱,相同剪切变形时其应力比结构性参数值越小。这说明随着含水率的增大,土体内部的水分增多,水膜增厚,部分胶结物质溶于水,使得胶结强度降低。

不同固结围压下的应力比结构性参数随剪切变形的变化规律见图8。同样可以看出,固结围压的变化对应力比结构性参数的影响较为明显。具体表现为:在同一含水率下,随着围压的增大,土结构性逐渐增强。一方面,根据土的压损特性,围压的增大

图8给出了应力比结构性参数在不同围压、不同含水量时随广义剪应变变化的关系曲线。

导致土原生结构性会遭到一定的破坏,从而降低土的强度;而另一方面,根据土的压硬特性,固结围压的增大也会导致土体次生结构性的增强,同时围压的增大导致球应力的增大,球应力的增大势必引起土强度的增大。土体实际的固结剪切过程正是土压硬性和压损性两者的相互发挥作用过程。

3 结论

天然黄土一般均具有一定的结构性,本文根据综合结构势(CSP)思想,利用对真三轴仪进行改进的平面应变仪,通过不同试验定量化研究了平面应变条件下天然原状黄土的结构性变化规律,得出了以下结论:

- 1)通过对现有真三轴仪器的改进形成的平面应变仪,试验结果表明,该改进后的仪器能合理有效地进行平面应变的试验。
- 2)在平面应变状态下,天然原状黄土在含水率和围压较小的情况下,其应力应变曲线呈现出软化性质,随着含水率和围压的增大,其应力应变曲线呈现硬化特性。
- 3)在平面应变下,天然原状黄土的结构性在剪切过程中随着含水率的增大而减小,而随着围压的

增大而增大。

本文中天然原状黄土的平面应变试验反映了原状黄土的结构破坏特性和结构性演化规律,进而建立反映土体结构性参数的定量化指标。平面应变条件下原状黄土的力学性质的变化机理以及结构性参数的变化规律,为平面应变状态下理论研究原状黄土的结构性奠定了基础,同时也可为此类工程实践提供理论依据。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 太沙基. 理论土力学(中译本)[M]. 北京:中国地质出版社,1960.
- [ 2 ] Mitchell, J. K. Shearing resistance of soil as a rate process[J]. J. Soil Mech and Found. Div, 1964, 90(1), 29-61.
- [ 3 ] Lambe, T W The engineering behavior of compacted clay[J]. J. Soil Mech and fuound Div, 1958a, 84(2): 1-35.
- [ 4 ] Seed, H. B, and Chan, C. K. Structure and strength characteristics of compacted clays [J]. J. Soil Mech and Found. Div. 1959, 85(5):87-128.
- [ 5 ] Olson, R. E, and Mesri, G. Mechanisms ontrolling the compressibility of clay [ J ], J. Soil Mechand Found. Div, 1970, 96(6):1863-1878.
- [ 6 ] Levoueil S, Vaughan P R. The general and congruent

effects of structure in natural soil and weak rock[J]. Geotechnique, 1990, 40(3):467-488.

- [ 7 ] 谢定义,姚仰平,党发宁. 高等土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [ 8 ] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [ 9 ] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,2(1):1-13.
- [ 10 ] 谢定义,齐吉林. 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,1999,20(2):651-656.
- [ 11 ] 陈存礼,胡再强,高 鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学,2006,27(11): 1891-1896.
- [ 12 ] 陈昌禄,邵生俊,邓国华,等. 土的结构性参数与强度的关系及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):328-334.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 陈昌禄,邵生俊,余芳涛. 土结构性变化对开挖边坡稳定性的影响分析[J]岩土工程学报,2011,33(12): 1938-1942.
- [ 15 ] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构本构关系研究[D]. 西安:西安理工大学.

收稿日期:2012-08-28

(上接第 285 页)

进行主体施工;并应避免单侧大面积堆载,以减少周围区域的附加沉降。

2)对新近回填欠固结土、低渗透性土、有机质含量较高地基土需进行地基处理时,水泥土搅拌法慎用或应适当加大其置换率。

3)对沉降要求严格的建筑构筑物应尽量避免在同一单体工程中采用不同基础形式,若采用不宜按等基底压力原则确定基础尺寸,应按同沉降的原则确定其基础尺寸。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [ 2 ] 雷晓雨,谢立安,等. 中心受压独立基础下 CFG 桩复合地基设计[J]. 建筑结构,2011.
- [ 3 ] 中华人民共和国行业标准. 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

收稿日期:2012-09-25