

不同应力水平下结构性黏土动力特性试验研究

雷华阳^{1,2}, 刘景锦¹, 霍海峰¹

(1. 天津大学 土木工程系, 天津 300072;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:对天津滨海地区典型结构性软黏土进行了压缩试验和不同固结应力下的循环三轴试验。结果表明:结构性软黏土的静力变形特性以先期固结应力和结构屈服应力为分界点可分为 3 个阶段;不同固结应力下的动应变—振次关系曲线上存在着一个临界动应力比,且该值随着围压的增大而降低;孔隙水压力的变化以结构屈服应力为转折点呈现出不同的变化规律;当振动频率为 2 Hz 时固结应力的改变对轴向动应变的影响不明显。

关键词: 应力水平;结构性软黏土;动力变形特性;试验研究;屈服应力

中图分类号: TU411.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)03-0228-05

Experimental Study on Dynamic Properties of Structural Soft Clay with Different Stress Level

LEI Hua-yang^{1,2}, LIU Jing-jin¹, HUO Hai-feng¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: A series of compression tests and cyclic triaxial shear tests under different consolidation stress are performed on the typical structural soft soil in Binhai region of Tianjin, which reveals the law of cyclic deformation under dynamic loading. The results show that the static deformation of structural soft clay can be divided into three parts by preconsolidation stress and structural yield stress. The relation curves of cyclic strain with cycle number under different consolidation stress has a critical dynamic stress ratio, which is not a fixed value, but reduces as the pressure increases. The changes of pore water pressure show different variation law taking the structural yield stress as a turning point. When vibrating frequency is 2 Hz, the influence of different consolidation stress on the dynamic strain is so little.

Key words: Stress level; Structural soft clay; Dynamic deformation property; Experimental study; Yield stress

0 引言

为解决城市交通拥挤问题,大力发展城市快速路、城市轻轨、城市地铁已成为每个城市的重点工程。但是对于东部沿海地区深厚软黏土地质条件,由于受到车辆荷载作用软黏土会产生较大变形和差异沉降,已有多数由于行车振动荷载作用而导致基

础破坏的实例。如何正确认识这种现象、解决这种现象是每位岩土工程工作者急需解决的难题,也是天津滨海新区大面积开发建设所面临的重要的实际工程难题之一。

近年来,随着人们对于土体结构性重视程度的增加,不同应力水平下结构性软土的变形特性成为

诸多学者研究的热点之一。然而这种研究多集中于利用室内压缩试验分析土体在不同压力阶段的静力学特性,无法获得其动力特性变化规律。

许多学者曾对循环荷载作用下土体变形问题开展过研究。如 Diyaljee 和 Raymond 在静止应力—应变数据和反复荷载试验的最小循环次数数据的基础上,建立了一个预测长期反复荷载作用下永久变形的方案^[1];Behzadi 和 Yandell 采用矩形波的形式进行加载,提出了一个预测路基土永久变形的模型^[2];王建荣等通过动三轴试验研究振动频率对原状黄土动本构关系的影响^[3];周建建立了综合反映软黏土孔压变化和应变软化的弹塑性模型^[4];钟辉虹通过一系列应力控制的循环三轴试验,分析研究了软黏土在不排水条件下循环荷载作用下的累积残余变形规律^[5];Sakai 和 Miura 提出了一个模拟不同围压下软黏土部分排水特性的模型^[6],顾中华等提出循环荷载作用下饱和粘土强度计算方法以及参数的确定方法^[7];黄茂松等通过不同静偏应力和动

应力组合情况下的饱和软黏土不排水循环三轴试验,引入相对偏应力水平参数,分析给出了累积变形特征方程式^[8]。

前人的研究成果侧重于应力—应变本构关系及变形规律的描述,很少涉及到应力水平对软黏土动力变形特性的影响规律。为了进一步了解应力水平对结构性软黏土动力变形特性的影响,本文针对天津滨海新区典型软黏土在不同固结应力下进行循环三轴试验,探讨不同应力状态下土体的动力变形规律,以加深对结构性饱和软黏土在动力荷载作用下变形特性的了解。

1 试验土样和试验方法

1.1 试验土样

天津滨海地区分布有广泛海相沉积的淤泥质黏性土,具有较强的结构。试验取用滨海新区典型的淤泥质粉质黏土,取样深度为 4~8 m,基本的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 试验用土的基本物理力学指标

土样编号	埋深/m	容重 $\gamma/[\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}]$	含水量 $\omega/\%$	比重 G_s	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
#1	4	17.5	54.0	2.72	1.01	32.2	15.7	13.8	1.06
#2	8	17.8	42.8	2.71	1.21	38.0	21.2	16.8	1.15

1.2 固结试验

固结试验采用的设备为杠杆式高压固结仪。固结压力采用 12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、800 kPa、1 600 kPa 加荷等级,进行不同固结压力条件下的卸荷—再加荷过程。土样面积为 30 cm²,高度为 2 cm。

1.3 动三轴试验

为研究应力水平和土体结构性对软黏土动力特性的影响,以压缩试验测定的原状软黏土先期固结应力和结构屈服应力为分界点,选取不同固结应力对原状土样进行动力试验。

试验仪器选用英国 GDS 动三轴试验系统,固结应力分别为小于先期固结应力 σ_{v0} 、先期固结应力 σ_{v0} 与结构屈服应力 σ_{vy} 之间以及大于结构屈服应力 σ_{vy} 。振动频率为 1 Hz、2 Hz 和 5 Hz。土样高为 10 cm,直径为 5 cm。

2 结构性软黏土的先期固结应力和结构屈服应力

土的先期固结应力是指土层在历史上受到的最大竖向有效固结压力。土的结构屈服应力是指原状土在受压缩过程中,以土骨架弹性压缩为主的变形

阶段基本结束,土的结构和粒间联系开始出现破坏时所对应的压力。

众多研究表明,软黏土作为一种典型的结构性土,用传统方法测得的先期固结应力值往往大于其上覆土层的应力,这就给判断其固结状态带来了一定的困难。因此,沈珠江指出,这类土的原状土压缩曲线的拐点所对应的应力应称为结构屈服应力而不应称为先期固结应力^[9-11]。超固结比应为结构应力比。

对于室内压缩试验曲线,许多学者都提出校正方法,这里结合郝玉龙等^[12]针对温州结构性软土所提出的确定原位压缩曲线及土体结构屈服应力的方法,确定天津滨海地区典型软黏土的先期固结应力 σ_{v0} 和结构屈服应力 σ_{vy} 。结果见图 1 和表 2 所示。

表 2 土样的先期固结应力和结构屈服应力

土样编号	埋深/m	先期固结应力 σ_{v0}/kPa	结构屈服应力 σ_{vy}/kPa
#1	4	36	48
#2	8	75	94

3 软黏土在不同固结应力状态下的动力特性

前面指出天津滨海地区软黏土具有明显的先期

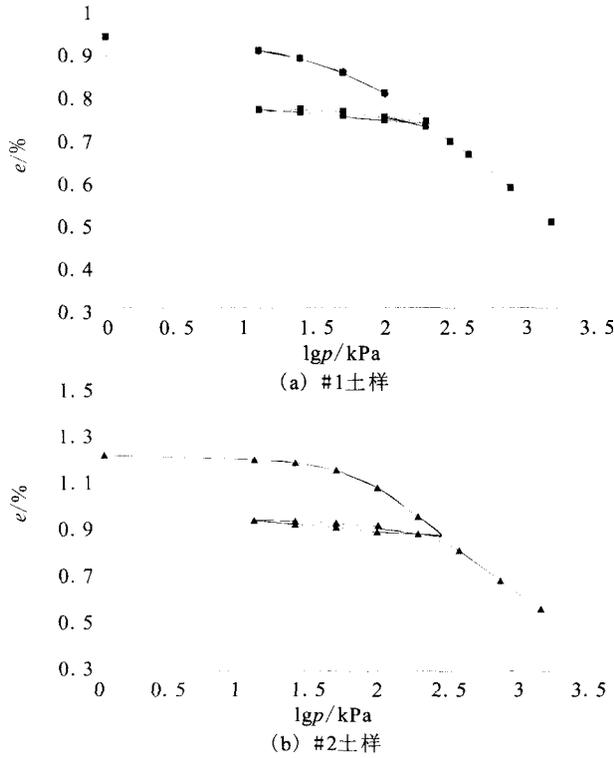


图 1 原状土样的压缩曲线

Fig. 1 Compression curves of natural soft clay samples.

固结应力 σ_{v0} 和结构屈服应力 σ_{vy} , 为了解结构性软黏土在不同应力水平下的动力变形特性, 利用同种土样以这两个关键应力点为界限, 进行了循环三轴试验。

3.1 不同固结应力下的动应变—循环振次关系

图 2、3 为原状土样 #1 和 #2 的轴向动应变—循环振次关系曲线。从图中可以看出, 在初期的循环荷载作用周数内, 无论动应力多大, 土样的轴向动应变 ϵ_d 均表现为增长较快, 只有当循环荷载作用到一定次数后, 随着动应力的增大土样发生破坏所需的循环振次 N 不断减少, 表现为很小的循环振次 N 范围内就达到破坏, 呈现脆性破坏特征。即存在一个临界动应力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ 。

当固结应力 σ_c 小于先期固结应力 σ_{v0} 情况下, #1 和 #2 的临界动应力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ 分别为 0.4 和 0.306; σ_c 介于 σ_{v0} 和 σ_{vy} 之间时, #1 和 #2 的 $\sigma_d/2\sigma_c'$ 分别为 0.326 和 0.224; 当 σ_c 大于 σ_{vy} 情况下, #1 和 #2 的 $\sigma_d/2\sigma_c'$ 分别为 0.244 和 0.214。由此可见, 结构性土体的临界动应力比并不是一个定值, 而是与围压大小相关的。

图 4 为不同应力条件下轴向动应变—循环振次关系曲线。从图中可以看出, 当 σ_c 小于 σ_{v0} 情况下, 变形转折点对应的应变 ϵ_d 与 σ_c 介于 σ_{v0} 和 σ_{vy} 之间时

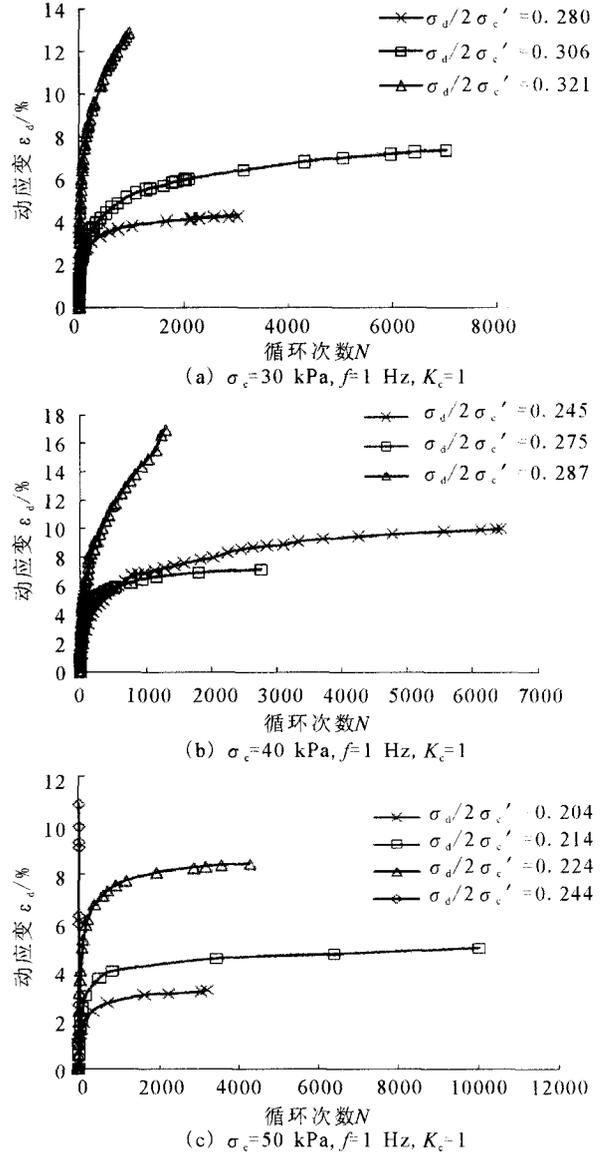


图 2 1 号原状土样轴向动应变—循环振次关系曲线

Fig. 2 Relation curves of cyclic axial strain with cycle number of undisturbed clays #1.

所对应的应变值基本接近, 然而, 当 σ_c 大于 σ_{vy} 后, 土样发生破坏所需的循环振次 N 不断减少, 表现为很小的循环振次 N 范围内就达到破坏, 土样的轴向动应变 ϵ_d 均表现为增长较快。

以上现象的产生可从土体的微观结构角度出发给予解释。由于土体结构性的存在, 在低围压条件下, 尤其是在低于土体的结构屈服应力情况下, 土体的结构性基本上没有遭到破坏, 刚度较高, 受到外力作用很难发生变形, 所以达到破坏时所需要的循环应力比数值较大; 而当应力水平超过结构屈服应力时, 会出现结构性的大量破坏, 土骨架刚度急剧变小, 轴向应变则随着振动次数的增加出现急剧增大

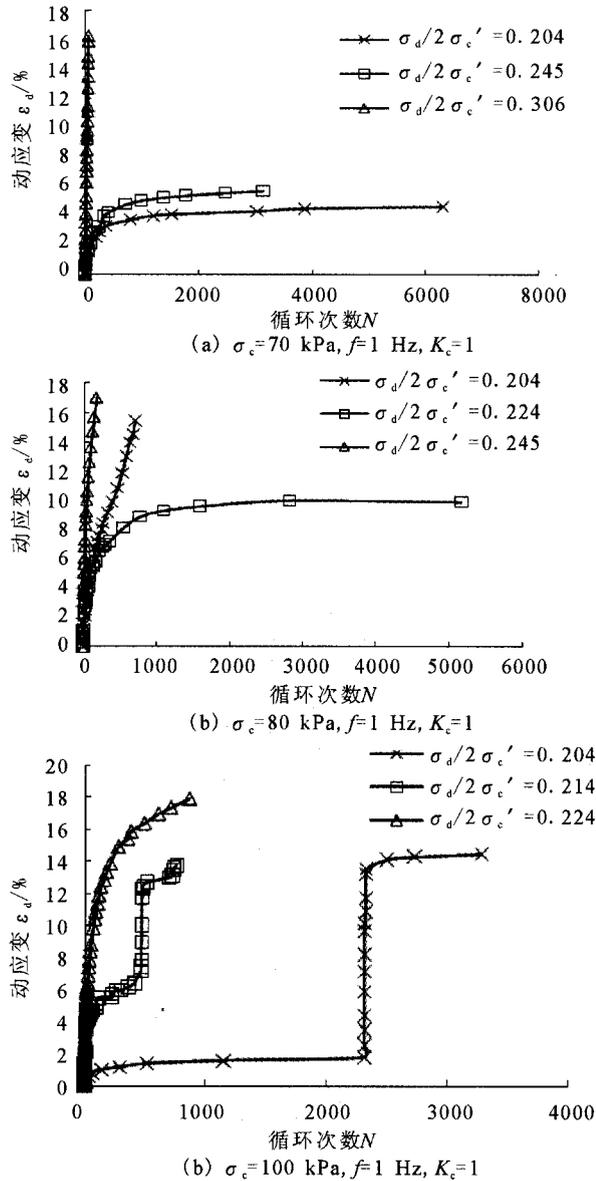


图3 2号原状土样轴向动应变—循环振次关系曲线
Fig.3 Relation curves of cyclic axial strain with cycle number of undisturbed clays #2.

现象,达到破坏所需要的循环应力比相应减小。

3.2 不同固结应力下的孔隙水压力—循环振次关系

图5为原状软土在不同固结压力下的孔隙水压力与振动次数之间的变化过程曲线。

从图中可以发现:总的变化规律是随着循环次数的增大孔隙水压力不断增大。当围压低于先期固结应力时,孔压随着振次的变化分两种情况,一种是动应力比较小时,在最初的振次内孔压随着振次的增加而增加较快,当孔压达到一定程度以后孔压随着循环振次的增加得非常缓慢,达到稳定状态;另一种情况为动应力较大时,孔隙水压力基本上随着振

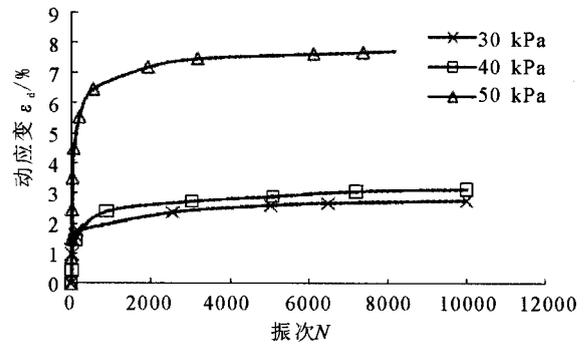


图4 不同围压下应变—振次关系曲线
Fig.4 Relation curves of cyclic axial strain with cycle number of the samples in different stress level.

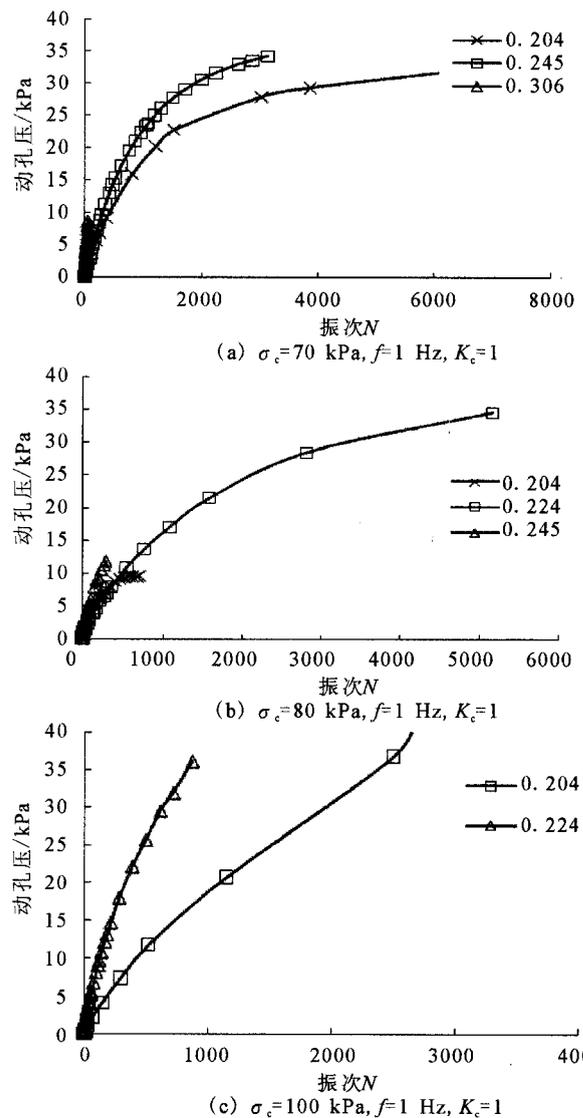


图5 不同固结压力下轴向动孔压—振次关系曲线
Fig.5 Relation curves of dynamic pore water pressure with cyclic number under different confining pressures.

次改变呈线性关系,并且增加的速率随着动应力比

的增大而增大。该临界应力比和土体的轴向应变临界循环应力比相同。

当围压超过先期固结压力后,孔隙水压力的变化基本上呈现出线性增长关系,同时动应力比的改变对于孔隙水压力值的影响也趋于不明显状态。尤其是围压超过结构屈服应力后,这种现象更加明显。其原因一方面是由于土体结构破坏,另一方面是试样的渗透系数较小,从而使得孔隙水压力在短期内不能得以消散,从而造成孔压的线性增长。

3.3 不同固结应力下振动频率的影响

图 6 为不同固结应力下采用三种振动频率得到的轴向动应变与振动次数的关系曲线。

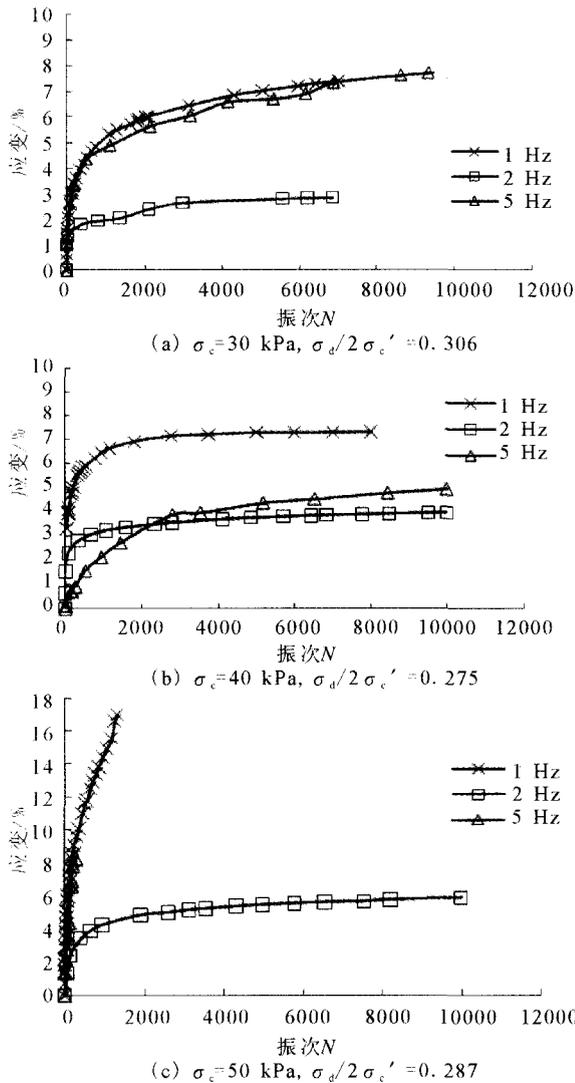


图 6 不同频率下轴向动应变—振次关系曲线

Fig 6 Relation curves of dynamic axial strain with cyclic number under different vibration frequencies.

从图中可以看出,总的变化规律是无论固结应力的大小,均存在一个转折频率。当振动频率低于或高于 2 Hz 时,若围压低于结构屈服应力,轴向动应变随着振次的变化表现为:在最初的振次内动应变随着振次的增加增长较快,当动应变达到一定程度以后,随着循环振次的增加增长得非常缓慢,达到稳定状态;当围压高于结构屈服应力后,轴向动应变随振次的变化基本上呈现出线性增长的关系。

振动频率为 2 Hz 时,轴向动应变与振次之间的关系曲线均表现为振次较少时动应变增长较快,之后,随着振动次数逐渐增加动应变趋于稳定状态,基本上不受固结应力大小的影响。

4 结论

本文以天津滨海新区典型结构性软土为研究对象,通过一系列动三轴试验,研究不同应力水平下结构性软黏土的动力变形特性。据试验结果可以得到以下一些结论:

(1) 在动应变发展过程中存在一个临界动应力比 $(\sigma_d/\sigma_c)_t$,该临界动应力比并不是一个定值,而是与围压大小相关的,随着围压的逐渐增大而降低。

(2) 孔隙水压力的变化以先期固结压力和结构屈服应力为转折点呈现出不同的变化规律:围压低于先期固结压力时,孔压随着振次的变化分两种情况;当围压超过先期固结压力后,孔隙水压力的变化基本上呈现出线性增长关系,同时动应力比的改变对于孔隙水压力值的影响也趋于不明显状态;尤其是围压超过结构屈服应力后,这种现象更加明显。

(3) 无论固结应力为多少,均存在一个转折频率:当振动频率低于或高于 2 Hz 时,围压逐渐增大,轴向动应变随着振次的变化从增加较快,之后趋于稳定状态转变为基本上呈现出线性增长关系;当振动频率为 2 Hz 时,固结应力的改变对轴向动应变的影响呈现不明显状态。

(下转 242 页)

从上图可以看出锥尖阻力随着触探深度的增加而增加,最后趋于一个稳定值;不同干密度下锥尖阻力的稳定值不同,稳定锥尖阻力随干密度的增大而增大。扭矩随触探深度的增加而增加,最后趋于一个稳定值;扭矩随干密度的增大而增大,这与锥尖阻力随干密度的变化趋势是相类似的。

表2是在这两级含水率条件下不同干密度的稳定锥尖阻力和稳定扭矩的汇总。

表2 不同干密度下稳定锥尖阻力与稳定扭矩

含水率 /%	干密度 /[g·cm ⁻³]	稳定锥尖阻力/kN	稳定扭矩 /[N·m]
12	1.4	1.65	24.34
	1.45	2.18	29.65
	1.5	2.40	31.55
	1.55	2.86	38.79
14	1.4	1.54	18.57
	1.45	1.76	19.79
	1.5	1.89	24.96
	1.55	2.50	25.89
		2.74	28.67

3 结论

(1) 对于试验研究的土类,锥尖阻力和扭矩随着触探深度的增加而增大,最后达到一个稳定值;

(2) 在试验范围内,锥尖阻力与扭矩随含水率的增大而减小,随干密度增大而增大;

(3) 这些试验结果不仅能分析上述定性规律,还将为旋转触探试验定量确定土层物理力学性质及合理划分地层,提供定量依据。

[参考文献]

[1] 孟高头. 土体原位测试机理方法及其工程应用[M]. 北京:地质出版社,1997.
 [2] 徐金明,刘绍峰. 岩土工程实用原位测试[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
 [3] 徐舜华,王兰民,孙军杰,等. 含水量对黄土震陷性定量影响研究[J]. 西北地震学报,2010,32(1):31-35.
 [4] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
 [5] 黄兴鹤. 无电缆全自动连续贯入静力触探试验[J]. 岩土工程界,2003,6(6):75-77.
 [6] 徐超,石振明,高彦斌,等. 岩土工程原位测试[M]. 上海:同济大学出版社,2005.
 [7] 毛玉坤,刘奉银,李宁,等. CPT理论分析及提高触探能力的新思路[J]. 西北地震学报,2007,29(1):40-44.
 [8] 毛玉坤. 旋转触探的阻力影响因素研究与仪器研制[D]. 西安:西安理工大学,2007.
 [9] 罗士梅. 新型旋转触探仪在坚硬黄土中应用的试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
 [10] 郑菲菲. 坚硬黄土新型旋转触探试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
 [11] 赵静源. 西安黄土旋转触探参数与土性指标关系的试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2011.

 (上接 232 页)

[参考文献]

[1] Diylajee V A, Raymond G P. Repetive Load Deformation of Cohesionless Soil[J]. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1982, 108(10):1215-1229.
 [2] Behzadi G, Yandell W O. Determination of elastic and plastic subgrade soil parameters for asphalt cracking and rutting prediction[J]. Transportation Research Record, 1996, 1540:97-104.
 [3] 王建荣,张振中,王峻,等. 振动频率对原状黄土动本构关系的影响[J]. 北地震学报,1999,21(3):310-314.
 [4] 周建. 循环荷载作用下饱和软粘土的孔压模型[J]. 工程勘察,2000,(4):7-9.
 [5] 钟辉虹,黄茂松,吴世明,等. 循环荷载作用下软黏土变形特性研究[J]. 土工程学报,2002,24(5):629-632.
 [6] Sakai A, Samang L, Miura N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1):33-46.
 [7] 顾中华,高广运. 循环荷载下饱和粘土强度等效计算探讨[J]. 西北地震学报,2005,27(1):13-16.
 [8] 黄茂松,李进军,李兴照,等. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报,2006,28(7):891-895.
 [9] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):100-111.
 [10] 何开胜,沈珠江. 天然沉积粘土的结构调查[J]. 东南大学学报(自然科学版),2002,32(5):818-822.
 [11] 刘恩龙,沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):2058-2064.
 [12] 郝玉龙,王立忠,陈云敏,等. 深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制[J]. 岩土工程学报,2001,23(3):345-349.