

田兆阳,李平,郑志华,等.软土动力特性动三轴试验研究[J].地震工程学报,2017,39(1):0095-0099.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0095

TIAN Zhao-yang, LI Ping, ZHENG Zhi-hua, et al. Dynamic Triaxial Tests on Dynamic Characteristics of Soft Soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 0095-0099.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0095

# 软土动力特性动三轴试验研究<sup>①</sup>

田兆阳<sup>1,2</sup>, 李 平<sup>1</sup>, 郑志华<sup>1</sup>, 肖瑞杰<sup>1</sup>

(1.防灾科技学院,北京 101601; 2.山东省地震局,山东 济南 250014)

**摘要:**许多学者对软土在动力作用下的变形特性进行了大量的研究,并提出了相应经验公式,但其经验公式参数较多且试验复杂,不易被一般工程技术人员掌握运用。本文采用天津滨海地区软土为研究对象,进行钻探取样、波速测试、室内静力学和动三轴试验,获取该地区软土的静、动力学参数,并利用相对简单的模型对残余应变和软化指数随振次的变化规律采用最小二乘法进行拟合,取得很好的效果。成果表明,利用简单的模型对软土的动力特性进行区域性研究是可行的。该成果可为今后软土动力特性和软土震陷计算方法研究提供参考和基础性资料。

**关键词:**软土; 动三轴试验; 动力特性; 残余应变; 软化指数

中图分类号:TU435

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2017)01-0095-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0095

## Dynamic Triaxial Tests on Dynamic Characteristics of Soft Soil

TIAN Zhao-yang<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-hua<sup>1</sup>, XIAO Rui-jie<sup>1</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China;

2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

**Abstract:** The settlement of a soft-soil foundation due to earthquake is a considerable threat to buildings. To accurately calculate this settlement, a great number of studies have been carried out regarding the deformation characteristics of soft soil under dynamic loading, and a variety of empirical formulas have been proposed. These formulas, however, are not easy to apply by engineers without specific training because there are a large number of parameters and the experiments are complex. Based on the results from drilling sampling, wave velocity tests, and indoor static and dynamic triaxial tests, we obtained the static and dynamic parameters of 16 soil specimens at nine different depths in the coastal region of Tianjin, which experienced a large settlement following the 1976 Tangshan earthquake. We grouped the specimens into three categories with respect to their components and density, and used relatively simple models and the least squares method to fit the change law of the residual strain and the degradation index of the specimens. The research results show that: (1) The density of soft soil can be used to determine its composition and dynamic characteristics, and also as a main parameter to establish the relationship between the static and dynamic characteristics of soft soil. (2) Silty soil and shell interlayers

① 收稿日期:2015-11-05

基金项目:中央高校基本科研业务专项资金(ZY20140206);中国地震局地震科技星火计划项目(XH15067Y)

作者简介:田兆阳(1993—),男,助理工程师,主要从事场地效应及岩土工程抗震方面的研究。E-mail:tzy\_eqsd@foxmail.com。

通信作者:李 平(1981—),男,博士,副教授,主要从事场地效应及岩土工程抗震方面的研究。E-mail:chinaliping1981@126.com。

can increase the modulus of soft soil. To obtain accurate parameters, the soil layers should be classified carefully before performing experiments. (3) The experimental results suggest that exponential models are advantageous when doing regional research on the deformation characteristics of soft soil under dynamic loading. (4) Dynamic loading has little influence on the degradation index of soft soil. In addition to these results, this study also provides some references and basic data for future research on the dynamic characteristics and seismic settlement of soft soil.

**Key words:** soft soil; dynamic triaxial test; dynamic characteristics; residual strain; degradation index

## 0 引言

软土具有天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低、渗透性小和灵敏度高的特点,由于其本身的结构性、振动作用下孔压的变化以及惯性力的作用,在受扰动或震动后极易丧失强度。如天津滨海地区在1976年唐山大地震中曾出现了较为明显的震陷现象。我国有相当数量软土分布区处于高烈度区,而且随着沿海地区建设规模的不断扩大,将会有越来越多的建筑修建在软土地基上。因此,这些区域的软土地基在地震作用下的震陷问题越来越值得关注。软土震陷中的核心问题是软土残余应变特性,动应力作用下的残余应变是指动应力卸除后土体残留的应变值。从二十世纪六十年代开始,国内外的研究人员利用动三轴等设备对软土在动荷载下的残余应变特性进行了大量的研究。H.B.Seed等<sup>[1]</sup>发现土样在动应力作用下会产生附加变形;Monismith等<sup>[2]</sup>提出了用指数模型拟合残余应变与荷载循环次数的关系式;K.L.Lee<sup>[3]</sup>根据动三轴试验建立了含七个参数的估算动应力下土样产生残余变形的经验公式;谢君斐等<sup>[4]</sup>将Lee的参数简化为五个;郁寿松等<sup>[5]</sup>分析了残余应变的影响因素并改进了残余应变的测试方法,提出相应的经验公式;周建等<sup>[6]</sup>提出了与孔压有关的残余应变经验公式;王建华等<sup>[7]</sup>在动三轴试验的基础上引入了弱化参数;孟上九等<sup>[8]</sup>研究了不规则荷载下土的残余应变规律。目前,虽然研究人员提出了许多计算土体残余变形的经验公式,但仍存在着参数过多、试验复杂等影响实际应用的障碍。因此有必要利用相对简单的模型对特定区域内的土样进行试验研究,分析模型参数和静力学参数之间的相关性,为实际应用提供参考。土动力特性研究一直是土力学研究的热点问题,学者们通过动三轴试验进行了相关研究,取得了很多有意义的成果<sup>[9-10]</sup>。本文在借鉴已有研究的基础上,通过在天津滨海地区进行现场钻探取样、波速测试以及室内静力试验和动三轴试验,获取该地区软土的静、动力学参数,研究天津滨海地区原状软土在动应力下的残余变形和模量软化特性,并分析不同物理参数、沉积特性对软土动力特性的影响,进而为该

地区软土震陷计算提供参考。

## 1 试验介绍

### 1.1 场地勘察及钻探取样

按《岩土勘察规范》要求在天津滨海新区进行了场地勘察和钻探取样,并完成了钻孔波速测试等相关工作。钻探场地位于天津滨海新区南海路,临近1976年唐山7.8级地震中震陷较严重的塘沽望海楼及建岗村。该场地为华北平原东部滨海平原地貌,属海洋与陆相交互沉积地层,地形平坦,受人类活动影响表层土为人工填土。钻孔的等效剪切波速 $v_s=143\text{ m/s}$ ,覆盖层厚度 $>80\text{ m}$ 。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010),判定该场地土类型属软弱土,场地类别为Ⅳ类。此次在钻探中共采集了6、6.5、7、7.5、9.5、10.5、11.5、12.5及13.5m 9个不同深度处原状土样。

### 1.2 静力学试验

按《土工试验方法标准》相关规程对所采原状土样进行了基本物理参数的测定,密度测试采用环刀法,含水率测试采用烘干法,液塑限测试采用联合测定法。从试验结果可知,所取土样的孔隙比都大于1,且含水率都大于液限。根据《岩土勘察规范》相关规定试验土样为软土,因此所取土样可以用于软土特性动三轴试验研究。

### 1.3 动三轴试验

动三轴试验采用美国GCTS公司生产的STX-200型电液伺服控制双向动三轴测试系统,配备CATS试验控制软件。仪器最大轴向加载力为100 kN,最大围压2 MPa,加载频率0.01~20 Hz。试验用土为钻探中所取得的原状软土,现场取土后用铁皮封装后运至实验室保存,试验时采用削土器将原状土削成直径为38 mm、高度为76 mm的土柱。装样后分级施加固结压力对试样进行固结,固结完成后在不排水的条件下施加轴向动荷载激振。在激振过程中,观察试样状态并利用控制软件记录振次、轴压、应变等数据。

试验主要研究的是天津软土的残余应变随振次的发展规律,共对6.0、6.5、7.0、7.5、9.5、11.5、12.5

及 13.5 m 8 个不同深度共 16 组土样进行动三轴震陷试验。试验采用 100 kPa 的围压对试样进行等压固结, 动荷载采用频率为 1 Hz 的正弦波, 动应力选取为 50、60 kPa。为获取更多的数据, 当试样动应变达到 15% 或振次达到 200 周时结束试验。

## 2 试验数据整理与分析

### 2.1 原始激振现象

由于原状试样的土质不均匀, 虽然按规范划分都属于淤泥质土, 但在制样过程中发现土样还存在差别,

根据差别可以将所取土样划分为以下三类(图 1):

(1) 第一类: 试样土质较均匀, 整体均为淤泥质土, 灰色、质软, 密度在 1.7~1.8 g/cm<sup>3</sup> 间。

(2) 第二类: 试样上下土质不均, 夹少量的粉土薄层, 密度在 1.8~1.9 g/cm<sup>3</sup> 间。

(3) 第三类: 试样土质不均, 有互层, 夹大量的贝壳, 密度在 1.8~1.9 g/cm<sup>3</sup> 间。

其中, 埋深为 9.5 m、13.5 m 的土样属于第一类土; 埋深为 6.0 m、6.5 m、7.0 m、7.5 m 及 11.5 m 的土样属于第二类土; 埋深为 12.5 m 的土样属于第三类土。

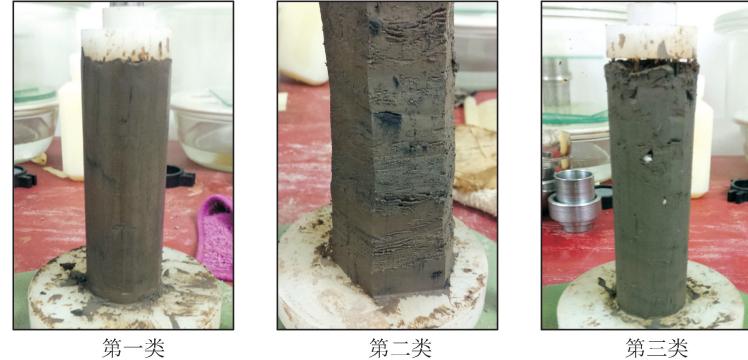


图 1 三种典型土样

Fig.1 Three typical soils

因此, 在激振过程中试样变形也表现为三类相似但有一定区别的情况:

(1) 第一类土在激振过程中变形较为均匀, 在动应力的作用下呈现一种整体变形的状态, 强度较低。

(2) 第二类土在激振过程中变形主要集中在淤泥段, 粉土夹层的变形很小。

(3) 第三类土在激振过程中变形情况与第一类土类似, 也比较均匀。但因为土中夹杂着大量的贝壳, 故其强度较高, 激振结束后变形小于前两类土。

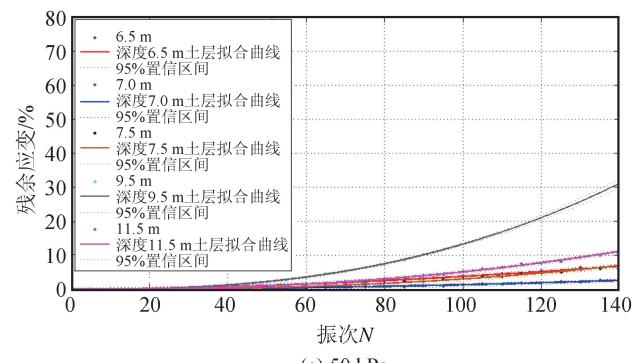
### 2.2 残余应变与振次的关系

残余应变的定义是指动应力卸除后土体的残余变形, 试验中为动应力作用后试样的变形量与作用前试样高度的比值。通过动三轴试验, 测试了天津滨海软土的残余应变与振次的关系, 并利用 Monismith 提出的指数模型来拟合二者之间的关系, 公式为:

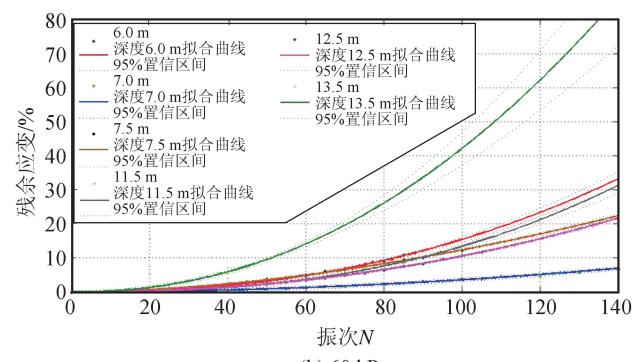
$$\epsilon_p = AN^b \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_p$  为残余应变;  $N$  为循环荷载振次;  $A$ 、 $b$  为试验参数。

图 2 给出了不同埋深土样在 50 kPa 和 60 kPa 动应力作用下残余应变随振次的变化关系、拟合结



(a) 50 kPa



(b) 60 kPa

图 2 50 kPa 及 60 kPa 动应力下试样残余应变与振次关系曲线

Fig.2 Relationship between residual strain of specimen and cyclic number under dynamic stress of 50 kPa and 60 kPa

果以及95%的置信区间。可以看出:动应力对残余应变的影响较大,随着动应力的增大残余应变也明显增大。不同埋深处土的残余应变随振次变化的曲线不相同,即使是同一土类反应也不尽相同。在动应力的作用下,除了受动应力大小的影响外,试样的残余应变随振次的发展受土质的影响也较大:(1)第一类土在各级动应力下残余应变量明显大于其他两类土。(2)埋深为7.0 m的土层为第二类土,但因为粉质夹层的含量相对较多,因此其在各级动应力下的

残余应变量均小于其他试样。(3)第三类土的残余应变量与大多数一、二类土相比相对较小。(4)当土质类似时,试样的残余应变大多处于同一水平。

由表1可以看出,绝大多数拟合结果的相关系数 $R^2$ 都在0.99以上,因此指数模型可以较好地反映出等压固结情况下试样残余应变与振次之间的关系,用这种简单的模型来进行残余应变与振次关系试验结果的整理分析是可行的。由于软土具有较强的结构性,在振次较少时试样以弹性变形为主,在

表1 不同动应力下各组拟合成果

Table 1 Fitting results of residual strain under different dynamic stress

试样深度 /m	50 kPa			试样深度 /m	60 kPa		
	A	b	相关系数 $R^2$		A	b	相关系数 $R^2$
6.5	0.001 4 (0.000 873 7, 0.001 922)	1.72 (1.644, 1.793)	0.994	6.0	0.004 (0.000 243, 0.000 616 8)	2.28 (2.178, 2.378)	0.998
7.0	0.000 18 (6.758e-005, 0.000 284 7)	1.95 (1.827, 2.068)	0.987	7.0	0.000 4 (0.000 250 2, 0.000 600 4)	1.96 (1.881, 2.047)	0.995
7.5	0.000 035 (2.142e-005, 4.909e-005)	2.469 (2.393, 2.546)	0.997	7.5	0.004 (0.002 691, 0.004 382)	1.772 (1.718, 1.826)	0.998
9.5	0.000 1 (7.433e-005, 0.000 157 1)	2.53 (2.449, 2.611)	0.999	11.5	0.000 1 (5.602e-005, 0.000 189 2)	2.52 (2.197, 2.426)	0.995
11.5	0.000 1 (5.602e-005, 0.000 189 2)	2.31 (2.197, 2.426)	0.995	12.5	0.000 6 (0.000 406 9, 0.000 693)	2.142 (2.084, 2.2)	0.999
				13.5	0.002 (0.000 967 4, 0.003 481)	2.14 (1.992, 2.285)	0.997

达到一定振次之后会有残余应变的突变,而该模型对于突变点的反应不太明显。随着振次的逐渐增多,残余应变的发展十分符合指数增长的规律。

### 2.3 软化指数与振次的关系

Idriss等<sup>[11]</sup>提出了软化指数的概念,具体形式为:

$$\delta = \frac{G_{Sn}}{G_{S1}} \quad (2)$$

式中: $\delta$ 为软化指数; $G_{Sn}$ 、 $G_{S1}$ 分别为第n周及第1周的割线剪切模量。

从实验结果可以看出,随着振次的增加,软化指数减小,土体呈现明显的软化现象并表现出非线性。本文采用王军等<sup>[12]</sup>提出的模型来拟合软化指数与振次之间的关系,公式为:

$$\delta = 1 - A \lg N - B (\lg N)^2 \quad (3)$$

式中: $\delta$ 为软化指数; $N$ 为振次; $A$ 、 $B$ 为拟合参数。

图3给出了不同埋深的试样在50 kPa和60 kPa动应力作用下软化指数随振次的变化关系、拟合曲线。由图3可以发现:(1)软化指数随振次的变化比较明显,大部分试样在振次达到10~20次后

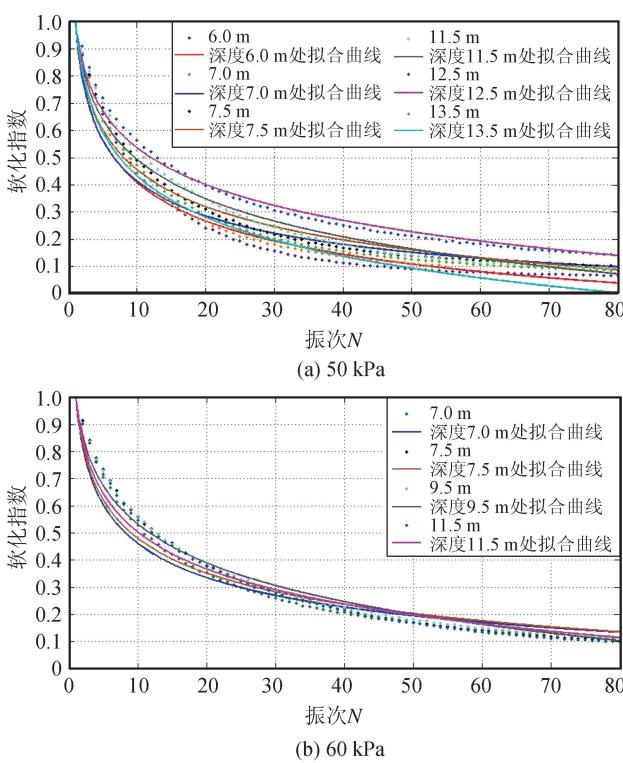


图3 不同动应力下试样软化指数与振次关系曲线

Fig.3 Relationship between degradation index of specimen and cyclic number under different dynamic stress

软化指数曲线逐渐趋于平缓。(2)两图对比可以看出,软化指数的变化受动应力的影响不明显,高应力与低应力的情况下软化指数随振次发展的趋势大致相同。(3)不同土类的试样在较低动应力的作用下软化指数变化差别不大,在动应力较高时,第一类土的软化指数随振次降低更快,第三类土的软化指数随振次的降低相对较慢。

由表2可以看出,拟合模型能很好地反映出软化指数的变化趋势,相关系数 $R^2$ 均大于0.95,有几组拟合结果的相关系数甚至可以达到0.99。这说明这种比较简单的模型对于描述软化指数随振次变化的规律是可行的。在动应力较低的情况下,模型曲线在小振次下略低于试验值,在大振次下略高于试验值。动应力较高的情况下两者符合较好。

表2 不同动应力下各组拟合成果

Table 2 Fitting results of degradation index under different dynamic stress

试样 编号	50 kPa			试样 编号	60 kPa		
	A	B	相关系数 $R^2$		A	B	相关系数 $R^2$
2-6-5	0.260 9 (0.2366, 0.2851)	0.0604 6 (0.0483 6, 0.0725 7)	0.955	2-6-0	0.689 (0.657 1, 0.720 9)	-0.048 06 (-0.064 48, -0.031 64)	0.991
2-7-0	0.631 6 (0.617, 0.646 3)	-0.092 91 (-0.100 1, -0.085 71)	0.972	2-7-0	0.711 7 (0.696 2, 0.727 2)	-0.125 (-0.132 9, -0.117 2)	0.974
2-7-5	0.592 6 (0.574 2, 0.610 9)	-0.072 69 (-0.081 7, -0.063 69)	0.962	2-7-5	0.619 1 (0.595 7, 0.642 5)	-0.073 74 (-0.087 07, -0.060 41)	0.978
2-9-5	0.463 4 (0.443 9, 0.482 9)	0.004 148 (-0.007 067, 0.015 36)	0.987	2-11-5	0.529 1 (0.506 2, 0.552)	-0.021 93 (-0.035 16, -0.008 692)	0.983
2-11-5	0.531 6 (0.512 7, 0.550 5)	-0.034 82 (-0.044 87, -0.024 77)	0.979	2-12-5	0.302 6 (0.3, 0.305 1)	0.022 71 (0.021 45, 0.0239 6)	0.999
				2-13-5	0.615 5 (0.590 7, 0.640 3)	-0.048 06 (-0.064 48, -0.031 64)	0.991

### 3 结论与讨论

本文通过对天津滨海新区进行场地勘察和钻探取样,并对所取土样进行了基本物理参数试验和等压固结下的不排水动三轴试验,利用相对简单的模型对土样的残余应变和软化指数随振次的关系进行拟合。通过对试验结果的分析,得到如下结论:

(1) 软土的密度能反映出其土质情况和动力特性,密度较小时土的动强度也相对较小。试验结果表明密度在 $1.7\sim1.8\text{ g/cm}^3$ 间的软土强度明显小于密度在 $1.8\sim1.9\text{ g/cm}^3$ 间的软土,且密度受取样条件等因素影响较小。因此在建立软土的基本物理参数与震陷参数之间的关系时,可以将密度作为主要的基本物理参数来使用。

(2) 即使同一土类,不同土颗粒成分对软土震陷特性的影响很大,从天津滨海新区软土试验结果可知软土地基中的粉质薄层和大量贝壳可以减小软土的震陷量,且粉质夹层的排水作用可以增大软土的压缩模量。因此在对某一场地进行软土动力分析时应仔细划分土层,从而进行分类试验研究。

(3) 指数模型可以很好地反映出等压固结情况下试样残余应变与振次之间的关系。由于在一定区域内相同土层软土的性质是类似的,且地震动

水平是一定的,可利用指数模型对软土进行区域性研究,分析模型参数静力学参数之间的相关性,为实际应用提供参考。

(4) 软化指数与振次之间的关系可用简单的非线性方程来拟合,并且由于其受动应力的影响相对较小,因此同样可以建立模型参数与基本物理参数之间的经验公式。

### 参考文献(References)

- [1] Seed H B, Chan C K. Clay Strength under Earthquake Loading Condition[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1966, 92: 53-78.
- [2] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading [J]. Transp Res Rec No. 537. Transportation Research Board, Washington D.C., 1975: 1-17.
- [3] Lee K L. Seismic Permanent Deformation in Earth Dams[R]. Los Angeles, California: School of Engineering and Applied Science, University of California, 1974.
- [4] 谢君斐,石兆吉,等.神头电厂地基震陷的初步分析[R].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,1981.  
XIE Jun-fei, SHI Zhao-ji, et al. Preliminary Analysis of Earthquake Induced Settlement of Shentou Power Station [R]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1981. (in Chinese)

- ZHU Lu-pei, ZENG Rong-sheng, WU Da-ming, et al. Preliminary Study of Crust-upper Mantle Structure of the Tibetan Plateau by using Broadband Teleseismic Body Waveforms[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1992, 14(Suppl.): 580-591. (in Chinese)
- [17] 陈亚红, 王鹏, 张军, 等. 濮阳小震集中区震源机制解与应力场跟踪分析与研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(增刊2): 157-163.
- CHEN Ya-hong, WANG Peng, ZHANG Jun, et al. Tracking Analysis of Focal Mechanisms and Stress Field of Small Earthquake Concentrating Area in Puyang, Henan Province [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(Suppl 2): 157-163. (in Chinese)
- [18] 王有学, 钱辉. 青海东部地壳速度结构特征研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 568-579.
- WANG You-xue, QIAN Hui. Study of Crustal Velocity Structure in East Qinghai[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 568-579. (in Chinese)
- [19] 刘巧霞, 杨卓欣, 莘海亮, 等. 玉树  $M_S 7.1$  地震部分余震重新定位及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 146-154.
- LIU Qiao-xia, YANG Zhuo-xin, XIN Hai-liang, et al. Relocation of Yushu  $M_S 7.1$  Earthquake Aftershocks and Discussion on Seismogenic Structure[J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(1): 146-154. (in Chinese)
- [20] 马寅生, 张永双, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂与宏观震中[J]. 地质力学学报, 2010, 16(2): 115-128.
- MA Yan-sheng, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, et al. The Surface Ruptures and the Macroscopic Epicenter of Yushu  $M_S 7.1$  Earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16(2): 115-128. (in Chinese)
- [21] 王阁昭, 王敏, 沈正康, 等. 2010 年玉树地震震前甘孜—玉树断裂形变场分析[J]. 地震地质, 2011, 33(3): 525-532.
- WANG Yan-zhao, WANG Min, SHEN Zheng-kang, et al. Inter-seismic Deformation Field of the Ganzi—Yushu Fault before the 2010 Yushu Earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2011, 33(3): 525-532. (in Chinese)
- [22] 高朝军, 张志鹏, 夏爱国. 2012 年新疆新源、和静交界  $M_S 6.6$  地震前后震源机制解一致性参数变化特征[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 19-25.
- GAO Chao-jun, ZHANG Zhi-peng, XIA Ai-guo. Variation Characteristics of Consistency Parameter of Focal Mechanisms before and after the 2012 Xinyuan—Hejing  $M_S 6.6$  Earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(1): 19-25. (in Chinese)

\*\*\*\*\*  
(上接 99 页)

- [5] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 35-44.
- YU Shou-song, SHI Zhao-ji. Soil Seismic Subsidence Research [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 11(4): 35-44. (in Chinese)
- [6] 周健, 蔡宏英, 许朝阳. 软粘土地基震陷分析[J]. 工程抗震, 2000(1): 40-43.
- ZHOU Jian, CAI Hong-ying, XU Zhao-yang. Prediction of Settlements of Soft Clay Caused by Earthquakes[J]. *Earthquake Resistant Engineering*, 2000(1): 40-43. (in Chinese)
- [7] 王建华, 要明伦. 饱和软粘土振动弱化特性的研究[J]. 水力学报, 1993(12): 37-43.
- WANG Jian-hua, YAO Min-lun. Degradation of Saturated Soft Clay under Cyclic Loading[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993(12): 37-43. (in Chinese)
- [8] 孟上九, 袁晓明, 孙锐. 建筑物不均匀震陷机理的振动台实验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 747-751.
- MENG Shang-jiu, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Study on Mechanism of Earthquake-induced Differential Settlement of Building by Shaking Table Test [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 747-751. (in Chinese)
- [9] 全玉丁, 杨贵, 刘汉龙. 原状和重塑海洋粉土动力特性对比试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 952-957.
- TONG Yu-ding, YANG Gui, LIU Han-long. Comparative Test Study on Dynamic Characteristics of Undisturbed and Remolded Marine Silt [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(4): 952-957. (in Chinese)
- [10] 杨正权, 刘启旺, 刘小生, 等. 超深厚覆盖层中深埋细粒土动力变形和强度特性三轴试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 824-831.
- YANG Zheng-quan, LIU Qi-wang, LIU Xiao-sheng, et al. Triaxial Tests on Dynamic Deformation and Strength Characteristics of Fine-grained Soil in Super-deep Overburden Layer [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(4): 824-831. (in Chinese)
- [11] Idriss I M, Singh R D, Dobry R. Nonlinear Behavior of Soft Clays During Cyclic Loading [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1978, 104(12): 1427-1447.
- [12] 王军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1713-1719.
- WANG Jun, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Study on Strain Softening Model of Saturated Soft Clay under Cyclic Loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1713-1719. (in Chinese)