

# 基于重塑饱和砂土模型的现场液化试验方法<sup>①</sup>

付海清<sup>1,2</sup>, 袁晓铭<sup>1</sup>, 陈龙伟<sup>1</sup>

(1.中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080; 2.山东省地震局 工程地震研究中心,山东 济南 250021)

**摘要:**基于现场开展土体液化问题研究势必成为今后土动力学中的一个重要发展方向。目前人工激振下的现场液化试验方法还不够成熟,尚需进一步探索和发展。本文从试验设备组成、场地地震动激励、试坑布置、饱和砂土模型制备、数据测量与采集等 5 个方面论述该方法中的主要技术问题。研究表明:动力加载系统激励产生的地震动在  $0\sim 7\text{ m/s}^2$ ;系统工作频率  $13\sim 15\text{ Hz}$ ,饱和砂土模型与基础边缘的距离在  $0.5\sim 2.5\text{ m}$  范围内,更适合进行液化试验;应用水沉法现场制备饱和砂土模型,要重点注意试坑防水和尺寸定位的问题;数据测量与采集中要充分考虑对现场液化问题认识不够这一因素的影响,需对数据测量与采集提出附加要求;试验实例初步表明,该方法可行,适合开展液化问题研究。

**关键词:**砂土液化;人工激振;现场试验;方法

**中图分类号:** TU41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2015)01-0016-05

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0016

## A Method for In-situ Liquefaction Test Based on Reconstituted Saturated Sand Model

FU Hai-qing<sup>1,2</sup>, YUAN Xiao-ming<sup>1</sup>, CHEN Long-wei<sup>1</sup>

(1. *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China;*

2. *Engineering Seismic Research Center, Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan, Shandong 250021, China*)

**Abstract:** Research on soil liquefaction under in-situ conditions will be an important branch in soil dynamics. At present, in-situ liquefaction test under artificial dynamic loading remains at the research stage; there have been only a few studies. This paper presents a method for in-situ liquefaction test based on a remolded saturated sand model. Many technological problems related to this method are discussed, which include five parts: (1) test apparatus, (2) ground motion stimulation, (3) test pit arrangement, (4) saturated soil model preparation, and (5) data measurement and acquisition. An in-situ liquefaction test using this method was performed in this study. The surface soil acceleration and pore water pressure data indicate that soil liquefaction occurs under artificial dynamic loading. The main points are: (1) A dynamic loading system can simulate strong ground motion with an acceleration from 0 to  $7\text{ m/s}^2$ . (2) Under a loading frequency of 13 Hz to 15 Hz, the soil liquefaction test can be performed relatively easily when the distance between the soil model and loading base is 0.5 m to 2.5 m. (3) Measurement positioning and water-proofing are key factors during the preparation of the saturated soil model. (4) More request in data measurement and acquisition should be raised because of little acknowledges for soil liquefaction at site. (5) Ex-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 中央级公益性研究所基本科研业务费专项(2013B03); 山东省地震局重点科研基金项目(JJ1208Y); 国家自然科学基金项目(51278472, 41272357)

作者简介: 付海清(1985—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土地震工程的研究工作. E-mail: haiqing85@163.com

perimental results indicate that this technology is practically feasible. Studies on special liquefaction problems can be performed using this method. It also paves the path for further studies on geotechnical in-situ testing techniques under artificial dynamic loading.

**Key words:** soil liquefaction; artificial dynamic loading; in-situ test; method

## 0 引言

砂土液化是造成地震灾害的主要原因之一,历来受到岩土工程界与学术界的关注,并进行了广泛探讨。对于液化问题,国内外已有大量有益的研究成果,丰富了对土动力学的认识。但由于其复杂性,至今还在不断探索之中,未来仍是岩土工程中研究的重要和难点问题之一。

震害调查和室内试验是目前人们认识和研究液化问题的重要手段。震害调查往往受限于大震发生的频率,而且不是每次破坏性强震中都有突出的液化问题。比如国内液化资料库,自 1976 年唐山 7.8 级地震发生至今,除去 2008 年汶川 8.0 级地震中出现了大量的液化实例<sup>[1]</sup>,在近 40 年的时间内鲜有补充更新。室内试验也不可能同时、全面地对土体所处的天然应力、应变状态、初始结构、水文地质及地形等条件进行模拟。而在真实地震中这些因素显然会影响砂土液化的发生、发展过程,液化现象也会表现出复杂的变异。室内试验难以复现真实自由场地的砂土液化过程,若考虑实际工程场地的因素,模拟条件更难实现。而实际工程应用中,恰恰对考虑工程因素的土体液化问题的解答需求较为迫切。

随着砂土液化问题研究的深入,更倾向于在现场条件下直接开展试验,了解真实液化的发生发展过程和土体响应规律,使现有认识更能客观描述其物理本质和发生过程,进一步探讨和研究土体的液化机理、改进现有液化判别方法、提出经济合理的工程抗液化措施等。因此,基于现场开展土体液化问题研究,势必成为今后土动力学中的一个重要发展方向。

通过现场监测实地研究地震中液化问题的方法在上世纪 70 年代得到了发展,至今未曾中断。由于地震短临预报技术尚不成熟,加之在某一地区发生破坏性强震的罕遇性,使得这种被动“等地震”方法的研究效果大打折扣。迄今,仅有 Holzer 等<sup>[2]</sup>在 1987 年 Superstition Hills 地震中同时获得了完全液化场地的加速度和孔压时程记录。显然从研究成果的数量上不能满足人们对液化问题深入研究的需求。

采用人工震源激励产生的地震动来替代天然地震动,在可液化天然土层或在现场的人工饱和砂土模型中直接研究液化问题的方法,在上世纪 90 年代

得到了发展。这通常称之为人工激振下的现场液化试验方法。目前此方面取得的研究成果不多,国内尚处于起步阶段。而且已开展的现场液化试验往往因人工震源、试验场地条件等因素的不同,导致试验技术差异较大。在国际范围内尚没有一种相对成熟、普遍适用的现场液化试验方法。总之人工激振下的现场液化试验方法还处在探索和发展阶段。

作者所在课题组自行发展的人工激振下的现场液化试验方法已经在文献<sup>[3]</sup>中得到了初步实现,通过模型箱的方式成功进行了液化试验,取得了良好效果。在此基础上又进一步发展了基于重塑饱和砂土模型的现场液化试验方法,即在场地内直接开挖试坑,通过体积为  $1 \text{ m}^3$  的重塑饱和砂土模型,以人工激振方式进行现场液化试验。此试验条件下,砂土模型可看作 1-g 条件下的足尺模型,应力边界条件更接近天然地层的真实边界,土体遭受的应力波类型包含 P 波、S 波和面波。而且根据不同的研究目的,可以改变砂土模型的物理性质、上覆压力、上覆非液化土层厚度,布设足尺结构模型等,改善以往室内常规试验和振动台液化试验不能或难以实现的模拟条件,更真实地研究场地中的砂土液化问题。

本文介绍基于重塑饱和砂土模型的现场液化试验方法。对于一般性的土工试验技术与方法,在相关教程、文献和技术规范<sup>[4]</sup>中有较系统、详细的论述,现在国内发展迅速且相对成熟的振动台液化试验技术也可为本试验方法提供较多借鉴,因此从略。本文内容围绕试验设备组成、场地震动激励、试坑布置、饱和砂土模型制备、数据测试与采集、试验实例浅析等 6 个方面展开论述。此研究成果可为开展类似的人工激振下现场液化试验提供技术参考,也为进一步开展天然土层的原位液化试验和其他土动力特性原位试验奠定技术基础。

## 1 试验设备组成

试验设备主要由动力加载系统、数据测量与采集系统和试验辅助系统等三大系统组成。简述如下:(1)动力加载系统由激振器、刚性块体基础、变频控制器、电动机及配套设备组成;(2)数据测量与采集系统由传感器、信号调理器、数据采集仪(系统)、

电源及相关配套设备组成,目前该系统中使用的传感器包括加速度传感器、孔压传感器、位移传感器等;(3)试验辅助系统是指为保障现场液化试验的顺利实施,独立于上述两个系统的其他硬件部分,根据现场环境和试验需求确定。

试验设备的技术要求、技术参数和工作性能等具体内容可参考文献[3]。

## 2 场地地震动激励

场地地震动由动力加载系统激励产生。进行液化试验时,将激振装置的输出荷载方向设置为水平向,通过变化工作频率来控制谐振力的大小。谐振力通过埋置在土体中的刚性块体基础(以下简称基础)传递,并激励周围一定范围内的土体震动。理论推断,地震动大小与工作频率正相关;激励地震动的应力波类型包含P波、S波和面波,随着与基础两侧边缘距离的增大而土体地震动呈衰减趋势。为较客观地了解激励土体地震动的效果和合理设计现场液化试验,进行了场地地震动测试。

传感器布置方案如下:在基础中轴线延伸方向,距离基础边缘4.0 m范围内,间隔0.5 m布设单向加速度传感器。传感器埋设在地表下3~5 cm处,其主轴方向要与振动波传播方向一致,并夯实上覆土。尽管这种测试获取的是土体的地表加速度,可以侧面反映激励地震动的水平大小和衰减情况,操作也简单易行。

地表加速度大小与频率正相关,设定工作频率在3、5、8、10、11、12、13、14、15、17和20 Hz下进行场地地震动测试,各频率工况下激振持时约10 s,数据采集频率为100 Hz。按上述方案,某一特定频率工况下可以得到9个加速度时程记录,整个测试过程可得到99个加速度时程记录。

图1(a)是8 Hz时基础边缘处(0 m测点)土体的加速度时程,为图示清晰任意截取1 s片段;图1(b)是该时程的Fourier谱。由图可知,激励产生的土体加速度几乎为8 Hz正弦波。其他不同频率、不同测点的地表加速度规律类似,限于篇幅不再列举。根据99个加速度时程,计算得到不同工作频率不同测点的土体地表加速度幅值,并绘于图2中。可得到以下认识:(1)动力加载系统安全工作频率范围(3~22 Hz)内,激励产生的土体地震动的加速度幅值在0~7 m/s<sup>2</sup>之间,能够满足现场液化试验的要求;(2)地表加速度幅值的衰减较快,特别是在0~0.5 m范围内。产生这种现象的原因至少与地震动频

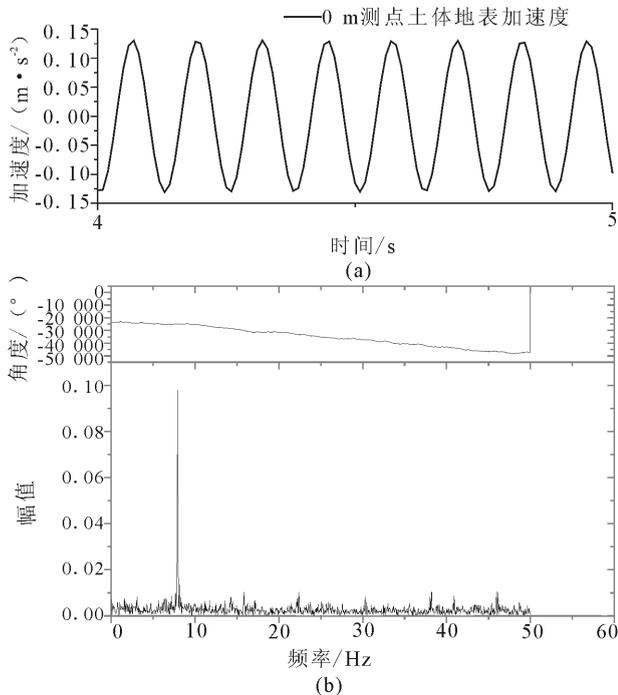


图1 土体地表加速度时程及其Fourier谱(8 Hz,0 m测点)

Fig.1 Soil surface acceleration time history and its Fourier spectrum (measuring point at 8 Hz,0 m)

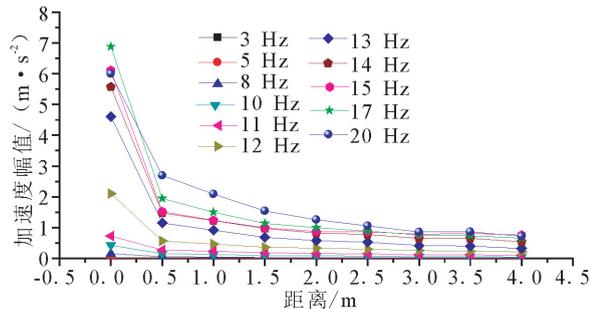


图2 不同频率不同测点的地表加速度幅值

Fig.2 Soil surface acceleration amplitudes at different measuring points and frequencies

率较高有关;(3)不同工作频率下土体地表加速度衰减趋势基本一致;(4)距离基础边缘4.0 m外的最大土体加速度幅值已经衰减到1.0 m/s<sup>2</sup>以下,较难满足液化试验的要求;(5)工作频率在12 Hz以下时,激励产生的周围土体地震动水平较低,不适合进行液化试验。

选取频率范围为12~20 Hz的加速度幅值作进一步分析,并把不同测点的数据(精确到小数点后2位)列于表1中。为便于观察地震动衰减规律,假定1.0 m测点土体地表加速度幅值的初始值为3.00 m/s<sup>2</sup>,按照体波、瑞利面波的理论衰减关系(分别为

$1/R^2$  和  $1/(R)^{0.5}$ ,  $R$  代表距离) 计算得出 4 m 范围内加速度值(表 1), 在表 1 中分别以英文字母缩写命名为 BW 值和 SW 值。12~20 Hz 频率范围内的土体地表加速度衰减趋势如图 3 所示。

表 1 地表加速度幅值(12~20 Hz)与假定计算值

Table 1 Soil surface acceleration amplitudes (12~20 Hz) and assumed values

测点位置/m	加速度幅值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )						BW 值	SW 值
	12 Hz	13 Hz	14 Hz	15 Hz	17 Hz	20 Hz		
0	2.10	4.61	5.57	6.11	6.88	6.00		
0.5	0.56	1.14	1.47	1.52	1.94	2.69	12.00	4.24
1.0	0.46	0.92	1.26	1.23	1.50	2.09	3.00	3.00
1.5	0.36	0.68	0.97	0.99	1.13	1.54	1.33	2.45
2.0	0.33	0.58	0.82	0.87	1.00	1.25	0.75	2.12
2.5	0.29	0.52	0.78	0.81	0.88	1.05	0.48	1.90
3.0	0.25	0.42	0.65	0.73	0.76	0.96	0.33	1.73
3.5	0.23	0.40	0.61	0.66	0.74	0.86	0.25	1.60
4.0	0.21	0.32	0.54	0.61	0.66	0.72	0.19	1.50

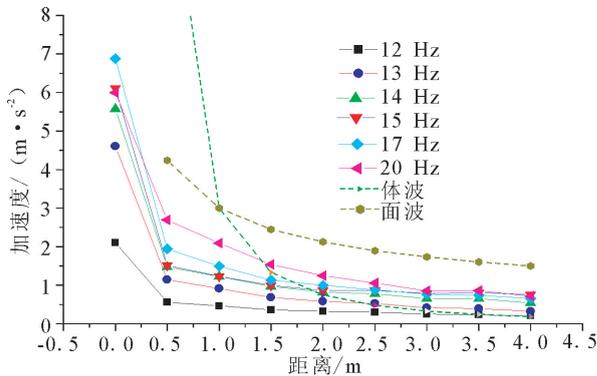


图 3 土体地表加速度衰减趋势(12~20 Hz)

Fig.3 Attenuation of soil surface accelerations (12~20 Hz)

结合表 1 和图 3 分析, 还可以得到以下认识: (1) 地表加速度的衰减与瑞利面波的衰减关系基本吻合, 符合现有理论认识, 也说明试验数据可靠; (2) 13~20 Hz, 0.5~3.0 m 范围内, 相同测点的土体地表加速度幅值随着频率的增大也相应增大, 表明该频率和区域范围内激励产生的地震动状况相对稳定, 土体也未发生显著性震动破坏, 更适合进行液化试验; (3) 20 Hz 工况下, 基础边缘附近土体加速度反而偏小, 推断为剧烈的地震动使土体发生破坏导致测量数据失真, 因此工作频率不宜超过 20 Hz。

根据场地地震动测试结果可知: 在现有试验设备和试验场地条件下进行基于重塑饱和砂土模型的现场液化试验, 设备工作频率应选定在 13~15 Hz, 砂土模型与基础边缘的距离在 0.5~2.5 m 之间, 有望取得预期试验效果。

### 3 试坑布置

试坑是在选定的试验场地上直接开挖。试坑与基础的相对位置是否合理直接关系到液化试验的效果。根据场地地震动测试结果, 并结合试验运行实际需求, 确定了两者相对位置, 试坑设计尺寸为 1 m × 1 m × 1 m。试坑与基础的相对空间位置如图 4 所示。

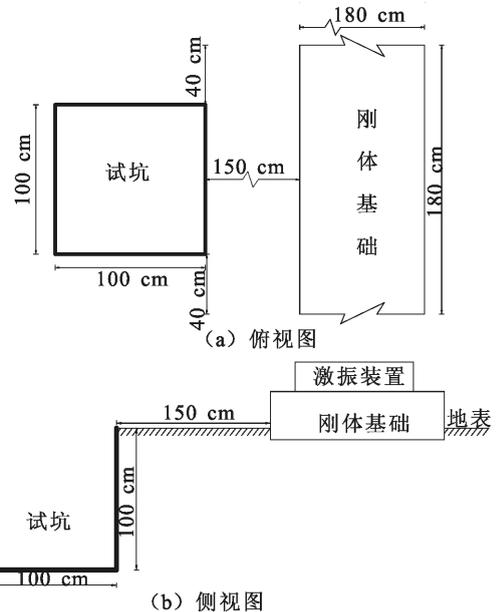


图 4 试坑与基础相对空间位置示意图

Fig.4 Sketch of relative location between test pit and base

试坑布置中需注意: (1) 试坑开挖时, 尽可能使坑壁齐整, 与设计尺寸相符, 必要时可以通过注水方式校核试坑实际体积; (2) 试坑周边至少 2 m 范围内场地平整, 无杂物; (3) 开挖坑土及试验用砂不能在试坑周围堆积, 以免试坑产生较大变形; (4) 试坑周围要有相对稳定的基准点, 以便在试验中进行尺寸定位; (5) 试验停止期间, 试坑宜用干砂填平, 以免坑壁局部坍塌或产生较大变形而影响后期试验。

### 4 饱和砂土模型制备

室内试验的饱和砂土模型往往采用水沉法制备, 其操作方法、优势及特点已有较多文献论述, 试验技术相对成熟。对现场液化试验而言, 不确定因素多, 同时涉及试坑防水、操作空间狭小、定位不便等问题, 制作难度相对大。因此制作工艺上也与室内制作饱和砂土模型有所差别。Chang<sup>[5]</sup>曾利用水沉法在现场液化试验中成功制备了体积为 1.8 m<sup>3</sup> 的饱和砂土模型, 并通过 P 波波速测试证明了该饱和砂土模型是接近完全饱和的。可见水沉法也适用

于该试验中的饱和砂土模型制作。

要制备符合现场试验特定要求的砂土模型,要重点注意以下两个问题:(1)试坑防水:坑底宜先铺设厚度约1 cm的细砂垫层找平,然后在试坑内铺设一层较薄、柔韧性好、强度高的完整防水材料,防水材料应尽可能紧贴坑壁。试坑是否防水是制备饱和砂土模型成败的关键,必须足够重视。(2)尺寸定位:防水材料固定后,应沿坑壁自上而下均匀标记尺寸,坑壁两侧可放置刻度尺。由于制备土体模型过程中,坑内刻度位置会发生小幅度变化,且砂土在水面以下,因此需利用坑外固定基准点,必要时可用钓鱼线或细铁丝等进一步精确定位。这样,可以按照试验设计规定尺寸(深度)布置传感器,并制备出不同相对密度的饱和砂土模型。

砂土模型制备完毕后,宜在自然状态下固结24小时以上。固结期间需在砂土表面覆盖一层塑料布以防土体模型上部水分自然蒸发。水位应略高于砂土表面,以便检查土体固结过程中试坑是否发生漏水。若需在砂土表面上覆一定厚度的非液化土层,宜在饱和砂土模型制作成功后进行。

## 5 数据测量与采集

获取高质量的试验数据,一方面取决于数据量测与采集系统硬件本身,另一方面取决于采集数据应遵循的一般原则。有关硬件选取及数据测量采集原则等具体内容可参考文献[6]。

现场的试验条件远不如室内理想,受场地及外界因素影响大,相互协调复杂,试验控制条件难以把握,不确定性因素多,这会给数据测量与采集带来一定困难。另外目前对场地液化问题的研究不够,特别是液化发生、发展的动态响应过程,加之现场液化试验技术尚不成熟。因此难以利用已有的认识对数据的合理性和数据质量进行判断和求证。鉴于此,在数据测量与采集过程中还应注意:(1)关键测点传感器的布置宜有“备份”,以便试验数据的校核和分析对比。(2)某一工况试验结束,应在现场对数据进行初步处理,做到数据结果及时反馈试验状况。

总之,要充分考虑对现场液化问题认识不够这一因素的影响,从而对数据测量与采集提出附加要求,以确认试验数据真实、可靠地反映物理实际发生过程。

## 6 试验实例浅析

基于文中所述的现场液化试验方法,进行了一

次砂土液化试验。试验中,饱和砂土表面出现冒水现象,并伴随地表沉降。埋设在土体内的孔压传感器和加速度传感器均采集到了较高质量的数据。该次试验土地表加速度时程和土体中部的孔压时程(以累积孔压表示)如图5所示。可知,加载期间,砂土内孔压明显增高,地表加速度随着土体液化的发展出现了大幅度的衰减。试验现象和数据均符合现有对砂土液化的认识,表明此次试验取得了成功,现有发展的现场液化试验方法可行。有关此次试验的详细数据结果,将另作分析讨论。

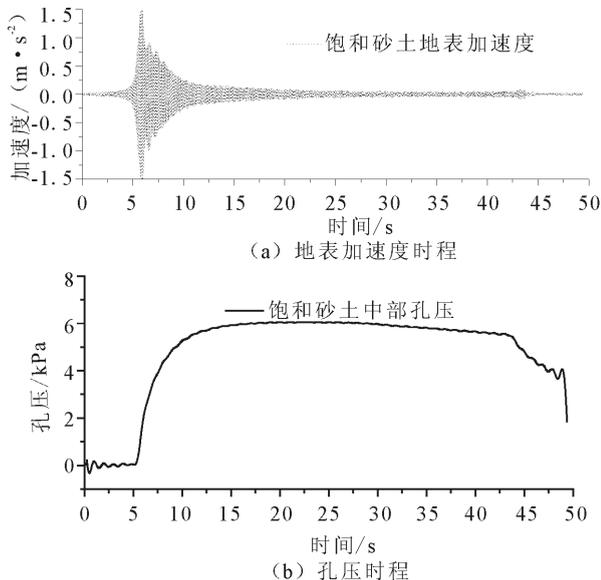


图5 地表加速度时程与孔压时程

Fig.5 Soil surface acceleration time history and pore water pressure time history

## 7 结论与认识

随着砂土液化问题的研究深入和发展需求,人工激振下的现场液化试验方法得到了一定发展,但总体上取得的研究成果不多,国内尚处在起步阶段。本文介绍了作者所在课题组自行发展的基于重塑饱和砂土模型的现场液化试验方法,论述了该方法中涉及的主要技术问题。主要结论与认识如下:

(1) 基于现场开展土体液化问题研究,势必成为今后土动力学中的一个重要发展方向。

(2) 人工激振下的现场液化试验方法,还不够成熟,尚需进一步探索和发展。

(下转 33 页)

China Ocean Engineering, 2010, 24(3): 523-538.

- [14] 曹勇,孔令伟,杨爱武.海积结构性软土动力性状的循环荷载波形效应与刚度软化特征[J].岩土工程学报, 2013, 35(3): 583-589.

CAO Yong, KONG Ling-wei, YANG Ai-wu. Waveform Effect of Cyclic Loading of Dynamic Character and Stiffness Degradation Characteristics of Marine Deposited Natural Soft Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 583-589. (in Chinese)

- [15] Rao Narasimha S, Panda A P. Non-linear Analysis of Undrained Cyclic Strength of Soft Marine Clay [J]. Ocean Engineering, 1999, 26: 241-253.

- [16] 蔡袁强,柳伟,徐长节,等.基于修正 Iwan 模型的软黏土动应力-应变关系研究[J].岩土工程学报, 2007, 29(9): 1314-1319. CAI Yuan-qiang, LIU Wei, XU Chang-jie, et al. Study on Dynamic Stress-strain Relationship of Soft Clay Based on Modified Iwan's Model under Undrained Cyclic Loading [J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1314-1319. (in Chinese)

- [17] 张勇,孔令伟,李雄威.循环荷载下饱和软黏土的动骨干曲线模型研究[J].岩土力学, 2010, 31(6): 1699-1708.

ZHANG Yong, KONG Ling-wei, LI Xiong-wei. Dynamic Backbone Curve Model of Saturated Soft Clay Under Cyclic Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1699-1708. (in Chinese)

- [18] Hardin B O, Drnevich V P. Shear Modulus and Damping in Soils Design Equations and Curves [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation, ASCE, 1972, 98(7): 603-642.

- [19] 聂影.复杂应力条件下饱和和重塑黏土动力特性试验研究[D].大连:大连理工大学, 2008.

NIE Ying. Experimental Study on Shear Behavior of Saturated Clay under Complex Stress Condition [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)

\*\*\*\*\*  
(上接 20 页)

(3) 动力加载系统激励产生的地震动在  $0 \sim 7 \text{ m/s}^2$ , 系统工作频率  $13 \sim 15 \text{ Hz}$ , 饱和砂土模型与基础边缘的距离在  $0.5 \sim 2.5 \text{ m}$  范围内, 更适合进行液化试验。

(4) 采用水沉法现场制备饱和砂土模型, 重点注意试坑防水和尺寸定位的问题。

(5) 数据测量与采集中, 要充分考虑对现场液化问题认识不够这一因素的影响, 需对数据测量与采集提出附加要求。

(6) 试验实例初步表明, 基于重塑饱和砂土模型的现场液化试验方法可行, 适合以此开展具体液化问题的研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 袁晓铭,曹振中,孙锐,等.汶川 8.0 级地震液化特征初步研究 [J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288-1296.

YUNA Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, SUN Rui, et al. Preliminary Research on Liquefaction Characteristics of Wenchuan 8.0 Earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engi-

neering, 2009, 28(6): 1288-1296. (in Chinese)

- [2] Holzer T L, Hanks T C, Youd T L. Dynamics of Liquefaction During the 1987 Superstition Hills, California, Earthquake [J]. Science, 1989, 244(4900): 56-59.

- [3] 付海清,陈龙伟,李雨润,等.人工激振下现场液化试验初步研究 [J].世界地震工程, 2010, 26(增刊): 235-240.

FU Hai-qing, CHEN Long-wei, LI Yu-run, et al. Preliminary Study on in-situ Liquefaction Tests Under Artificial Dynamic Loading [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26 (Supp): 235-240. (in Chinese)

- [4] 中华人民共和国国家标准. GB/T50123-1999 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

National Standard of the People's Republic of China. GB/T50123-1999 Standard for Soil Test Method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)

- [5] Chang W J, Rathje E M, Stokoe II KH, et al. In Situ Pore-pressure Generation Behavior of Liquefiable Sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 921-931.

- [6] Dunclicliff J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988. (in Chinese)