

DOI: 10.11779/CJGE201408014

地震荷载特征及其对砂土震陷影响试验研究

陈青生¹, 熊浩², 高广运^{3*}

(1. Faculty of Engineering, University of Wollongong, NSW 2500; 2. 台州学院, 浙江 台州 318000; 3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 介绍美国最新一代动循环单剪系统的组成及其特点, 分析原始真实地震荷载的输入方法, 并对真实地震荷载的输入有效性进行验证。以美国 Filter 净砂为对象, 选择冲击型与振动型地震波作为试验输入荷载, 考虑砂土相对密度、上覆荷载, 设计不同试验工况研究地震荷载特征及其对砂土震陷的影响, 共计试验组数 202 组。试验结果表明: 在同一砂土相对密度和上覆荷载条件下, 振幅相同的振动型地震波引起的砂土震陷比冲击型地震波引起的砂土震陷大; 砂土震陷主要由最大地震荷载峰值之前的各个较大峰值的地震波引起, 其中最大峰值对应的地震波引起的砂土竖向应变最大; 对于最大峰值之后的地震波, 其峰值应达到该地震波最大峰值的 80% 左右才对砂土变形具有较明显的贡献作用; 冲击型地震波最大峰值之后的各地震波对砂土变形影响不明显; 对于振动型地震波, 其最大峰值之前及最大峰值之后一定范围内的地震波作用共同决定着砂土变形的大小。

关键词: 动循环单剪试验; 砂土震陷; 振动型地震波; 冲击型地震波

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)08-1483-07

作者简介: 陈青生(1982-), 男, 福建龙岩人, 博士, 主要从事岩土动力本构模型与岩土地震工程研究。E-mail: chqsh2006@163.com。

Experimental study on properties of seismic loading and their influence on seismic compression in sands

CHEN Qing-sheng¹, XIONG Hao², GAO Guang-yun³

(1. Faculty of Engineering, University of Wollongong, NSW 2500, Australia; 2. Taizhou University, Taizhou 318000, China; 3. Key

Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The structure of a dynamic simple shear strain test system which is the latest generation of GCTS made in USA as well as its features is presented. The input method for primarily real seismic loading is analyzed. And the validity of the method is verified. Based on the US Filter clean sand, the preparation process of the sand samples is explained. Two shock types of seismic waves and two vibration types of seismic waves are selected for input loading in tests. Considering the relative density and overlying loading, the test conditions are planned, and 202 dynamic simple shear tests controlled by strain are carried out. The test results show that the seismic compression in sands due to the vibration-type seismic waves is larger than that induced by the shock-type seismic waves under the same relative density of sands and the same overlying loading. The seismic compression is mainly caused by several seismic waves with relatively high peak prior to the maximum peak. And the maximum vertical shear strains in sands are corresponding to the maximum peak seismic waves. For the seismic waves after the maximum peak, the waves whose peak reaches 80% of the maximum peak approximately in the seismic waves have more significant effectiveness on deformations of sands. For the shock-type seismic waves, various waves after the maximum peak have no obvious effect on deformations of sands. However, for the vibration-type seismic waves, the seismic compressions in sands are determined by the waves both prior to the maximum peak and that in a certain range after the maximum peak together.

Key words: dynamic simple shear strain test; seismic compression in sands; shock-type wave; vibration-type wave

0 引言

随着性能抗震设计思想的出现和发展, 地基和土工构筑物在地震荷载作用下单纯的强度判别已不能满足工程需要, 以变形为主要控制参数的危害性分析方法和技

术将被广泛应用, 这对现有土动力学理论提出

了新的课题和挑战^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372271); 浙江省自然科学基金项目(Y1110950); 上海市重点学科建设项目(B308)

收稿日期: 2013-10-15

*通讯作者

砂土震陷是涉及地震作用下土体变形的典型震害,常引起建筑物沉降或因差异沉陷而倾斜甚至倒塌,地下埋置管线毁坏等,造成巨大的经济损失和人员伤亡^[2-3],如1960年发生20世纪震级最高的9.5级智利地震,Valdivia城市发生大面积沉陷,局部沉陷高达2.6 m,造成该城市毁灭性破坏;1994年美国加利福尼亚州发生Northridge地震,多数学者认为震陷是造成灾害的主要原因之一,大量房屋、地下管线、道路及其它设施均遭受巨大的破坏,2000多个场地需要修复,每个场地的修复费用高达50000~100000美元。California地震安全委员会在总结报告中指出^[4],“在填土及冲击土地基上的建筑设计必须考虑地震作用下土层压实造成的地层下陷”。近年来,California地质勘探局又规定学校、医院等重要建筑设计必须进行震陷评估分析。

震陷导致的严重灾害日益受到人们的重视,建筑物震陷的研究已经成为当今岩土工程抗震问题中引人注目的前沿课题^[5]。Seed等^[6]、Silver等^[7]根据净砂试验建立了砂剪应变与竖向应变的体积材料模型;Youd^[8]、Shahnazari等^[9]、Whang等^[10]、Stamatopoulous等^[11]、Duku等^[12-13]、Stewart等^[14]学者通过一系列试验研究砂土组成成分及环境因素对砂土变形的影响,取得了许多有价值的成果。然而,这些试验大多采用简谐荷载激励,试验成果未能考虑地震荷载特性对砂土变形特征的影响。因此,采用真实地震荷载输入研究砂土震陷问题显得十分必要。

动单剪试验是研究地震动特性与砂土动力响应关系的有效方法。当前,国内外能真实有效地模拟地震荷载作用的动单剪试验设备数量非常有限,研究成果尚属少见。

地震荷载是一种随机的、不规则作用的动荷载脉冲波,其不规则特性对砂土液化和砂土变形等都具有十分重要的影响。为此,许多学者对不规则波展开研究。Ishihara等^[15]通过对不规则波分类对砂土液化问题展开研究。他们将不规则波分别定义成冲击波(shock type)和振动波(vibration type)两种类型。以不规则波时程曲线峰值的60%为分界值,在不规则波峰值之前的各个波幅中,大于分界值的波幅数最多只有2个或者2个以下,对应的不规则波属于冲击波;相反地,在不规则波峰值之前的各个波幅中,大于分界值的波幅数至少有3个或3个以上,对应的不规则波属于振动波。谢定义等^[16]根据该划分标准,对不规则波对砂土液化的影响进一步研究,指出Ishihara等提出的波型划分方法能够在相当程度上反映波序主要特征的作用。然而,上述有关地震荷载的不规则特性的试验研究主要针对砂土液化问题,虽然笔者在文献[17~19]中通过数值方法对地震动特性及其对砂土变形展开研究,但采用真实地震荷载输入进行地震动特

性对砂土震陷影响的试验研究还很少见。本文研究的砂土震陷主要指的是非饱和砂土受地震荷载作用,由于震中距较大、震级较小或排水条件较好等原因,地震作用尚不能引起砂土液化,但砂土在循环震动作用下,土颗粒重新排列,孔隙减小,砂土逐渐密实,从而引起的地面沉陷。这是地震作用引起地面沉降的其中一种类型,区别于受到广泛研究的“液化后沉降”。

本文利用美国弗吉尼亚理工大学岩土工程实验室GCTS测试系统(geotechnical consulting and testing system)对美国Filter净砂震陷问题展开研究,采用真实地震荷载输入进行应变控制动循环单剪试验,选择冲击型与振动型地震波作为试验输入荷载,考虑砂土相对密度、上覆荷载,设计不同试验工况研究地震荷载特征及其对砂土震陷的影响,共计试验组数202组。通过对试验结果的分析,得到一些相关结论。

1 动循环单剪试验

1.1 GCTS动循环单剪测试系统

本次试验采用美国生产的最新一代的GCTS动循环单剪测试系统(geotechnical consulting and testing system)(型号:SSH-100)进行试验,如图1所示。



图1 GCTS循环单剪系统

Fig. 1 GCTS cyclic simple shear testing system

GCTS系统主要由4个部分组成:信号调节转换器(signal conditioning)、伺服放大器(servo amplifier)、计算机接口(computer interface)和数据采集器(acquisition units)。该系统具有固定的试样顶盖和能沿着剪切方向直线滑动的底座,该底座安装在压力室底部的特制滑动块上。另外该系统具有侧向方形围护架,可有效固定试样顶盖,防止土样发生摇摆。

该测试系统具有以下4方面的特点:

(1)测试系统的一个主要优点是可通过压力室对土样直接施加围压,并通过伺服系统控制围压对试样进行侧向加载,而不需要使用通过加固的橡胶膜对试样进行侧向约束。为此,可进行任何 K_0 值的土体固结模拟试验,而不局限于 K_0 固结模拟试验。其中,压力室能承受的围压可达2000 kPa。

(2)测试系统通过全自动伺服控制剪切荷载激

振、轴向荷载激振、试样围压和反压。循环单剪系统具有常规静动试验功能,并能准确进行任意波输入激振,动力剪切试验的激振荷载频率可达 50 Hz;另外,系统中的任意传感器均能提供反馈信息,并通过系统软件实时显示各参量的变化与图表。

(3) 系统施加指定频率的荷载或位移时,加载系统相对刚性且有足够液压流量,可提供指定的荷载和位移幅值。与气压加载系统相比,由于液体的不可压缩性,本设备提供的轴向和剪切向液压加载系统能提供和保持稳定的刚性荷载。

(4) 系统可提供 10 马力每升每分钟 (5GPM) 的稳定压力,同时具有 2000 cm³ 的液压蓄能器装置。该液压系统足以满足在频率 1 Hz 条件下实现大小为 ±5% 的应变循环速度要求。

1.2 地震荷载的输入

GCTS 动循环剪切测试系统通过系统软件 CATS 对系统进行数字化闭合控制。用户在系统软件 CATS 界面定义荷载输入波,在试验过程中,系统可即时反馈输入波信号 (command) 和输出波信号 (feedback)。

地震荷载波的设置首先需要导入原始真实的地震荷载输入数据。数据文件第一行为地震荷载数据点总数,其后各行分别为各点数据值 (point value),每行只写一个数据。地震数据导入后,需要定义持续时间 (duration)、峰峰振幅 (peak to peak amplitude) 和时间间隔 (time interval)。

真实地震波的幅值不是恒定值,其幅值随着时间不断变化,具有很强的随机性和不确定性,这也是以往设备难以实现地震荷载加载的重要原因。GCTS 测试系统通过数字化闭合控制地震荷载输入,地震波幅值 (waveform value) 定义式如下:

$$\text{地震波值} = \text{平均控制值} + \left[\frac{\text{点数据值} - \text{最小值}}{\text{值域}} - 0.5 \right] \times \text{峰峰振幅值} \quad (1)$$

式中 峰峰振幅值是整个地震数据曲线中最大值与最小值之差;最小值、点数据值将在 GCTS 测试系统读取地震数据时确定;平均控制值则按下式确定:

$$\text{平均控制值} = \text{最大值} - \frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{2} \quad (2)$$

地震荷载波输入定义时除了定义剪切荷载外,尚需定义竖向激振 (normal actuator)、孔隙水压 (cell pressure/pore pressure) 和反压 (back pressure),由于本文试验模拟地震荷载作用下砂土竖向变形问题,竖向荷载采用静态恒载 (static and constant) 模拟砂土单元在某一深度的上覆压力。另外,本次试验是对烘干砂土进行试验,不存在反压和孔隙水压,为此,本试验将围压和反压均设置为恒定零,此时,上覆压力即为有效竖向荷载。

地震荷载数据采集设置还包括采集持时 (duration)、采集方式 (data saving)、采集点时间间隔 (data acquisition) 和采集循环数 (cycle recording) 等 4 项。地震荷载和数据采集设置完成后,可进行地震荷载输入与输出波信号调试,图 2 是在某个地震波输入时输入的地震荷载剪应变与输出信号的对比,由图可见,输入与输出信号曲线相互吻合,这表明测试系统可以真实有效地再现地震荷载输入。

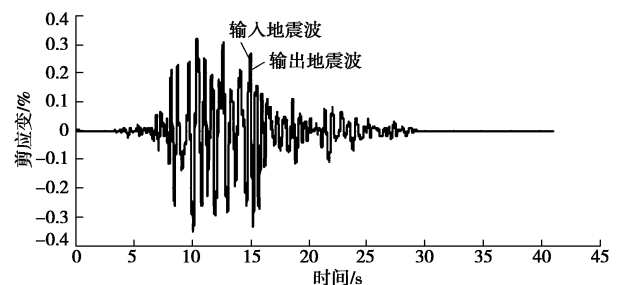


图 2 某地震波输入与输出信号的对比

Fig. 2 Comparison between input and output signals for an earthquake motion

1.3 砂土试样的制备与安装

对于砂土,通常难以取得不扰动原位土样,因此,在室内试验过程中,需要人工制备砂土试样。在同一应力应变状态下对各向同性的砂土试样进行试验是研究砂土特性的基本方法,这就需要反复制备性质相同的砂土试样。由于试样制备方法对砂土周期强度具有显著的影响,为此,砂土试样制备方法的确定对试验结果的准确性具有十分重要的意义。目前,撒砂法、水中沉淀法和湿捣法是 3 种常用的方法。本文试验砂土试样制备采用类似湿捣法进行砂土试样制备。

制备时采用烘干的美国 Filter 净砂,经测定,其最大孔隙比 e_{\max} 和最小孔隙比 e_{\min} 分别为 0.90 和 0.68,砂土粒比重 G_s 为 2.65。

根据土体三相指标换算关系,可以得出:

$$\rho = \frac{G_s}{1 + [e_{\max} - D_r(e_{\max} - e_{\min})]} \quad (3)$$

式中, ρ 是土体的天然密度, D_r 是砂土相对密度。拟制备砂土试样的相对密度分别取为 30%, 45%, 65%, 80%。由式 (3) 即可计算得出不同密实度的砂土对应的天然密度。测试中,砂土装于体积一定 (200 cm³) 的试样模中。显然,根据砂土天然密度与模体积可以计算出一定相对密度所对应的砂土质量。

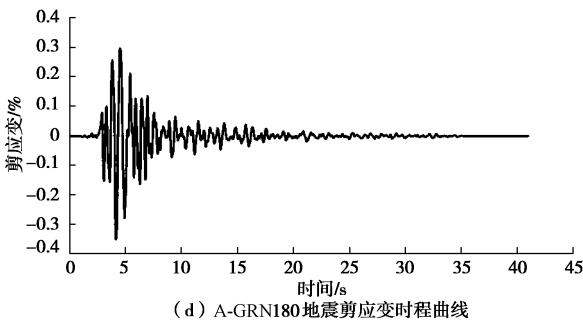
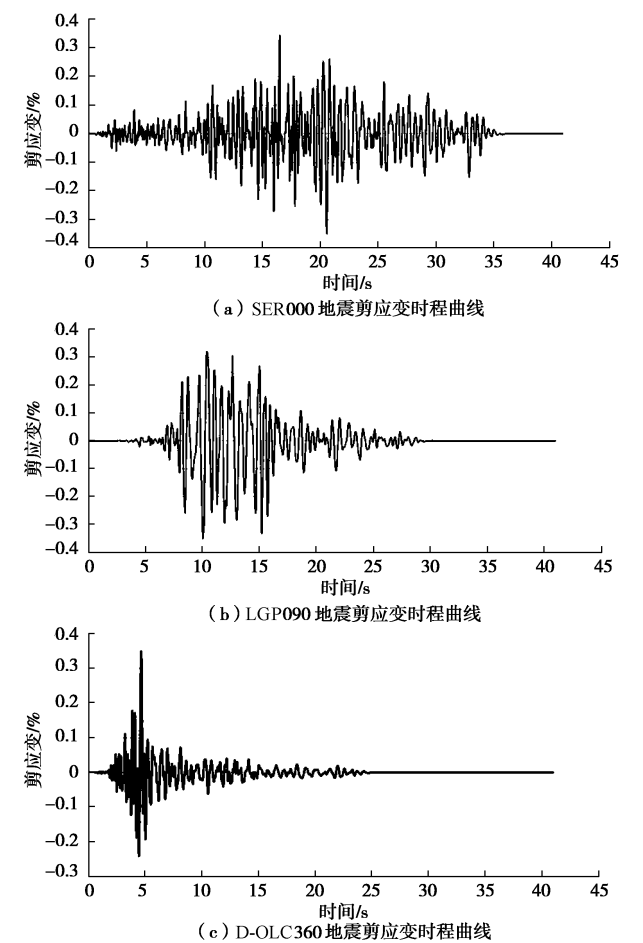
首先进行 GCTS 测试系统中的试验槽清理工作,然后,在试验槽内安装滑动条底座和滑动条装置,注意确保其方向与剪力加载方向一致。滑动条装置安装后,进行砂土试样滑动板安装。选用直径为 100 mm 的底座,并通过螺丝将砂土试样底座与滑动板连接。试样底座安装完成后,通过橡胶环将与底座直径一致的橡胶膜定在底座外侧凹槽处。在橡胶膜外侧套入一

铜环，铜环上圆环面与试样底座表面齐平，然后，在铜环上方套入薄层状 O-型层叠圆环，层叠圆环高度近 24 mm。最后在环外侧套上外加试样模，在试样模与橡胶膜之间抽真空，保持橡胶膜能平整、无褶皱。

砂土试样模安装完毕后，根据前述计算结果称量一定质量的砂土。然后，在安装好的砂土试样模内按顺时针方向均匀慢速倒入砂土，为尽量减少砂土试样在制作过程中引起的不均一性，尽量使砂土试样在进行捣实之前试样表面保持水平。接着，用设定好的捣实锤对砂土进行捣实。为避免各次捣实锤下落高度的差异引起砂土试样密实度平面分布差异，试验中使用了零落距压实的方法，捣实锤底部至砂土试样底座顶面距离为 24 mm。捣实后的砂土试样即为直径为 103 mm，高度为 24 mm 砂土试样。

1.4 剪应变输入波

Lee^[20]以相关学者建立的地震记录数据库中的加速度时程曲线为输入曲线，通过场地地震反应分析获得剪应变地震时程曲线。本文从其地震剪应变数据库中选取 2 组剪应变地震时程曲线，即冲击型与振动型的地震波各 2 条，共计 4 条地震波曲线。其中振动型剪应变地震时程曲线为 SER000 和 LGP090；冲击型剪应变地震时程曲线为 D-OLC360 和 A-GRN180，分别如图 3 (a) ~ (d) 所示。



(d) A-GRN180地震剪应变时程曲线

图 3 地震荷载剪应变时程曲线

Fig. 3 History curves of shear strain for seismic loadings

1.5 试验工况设计

本文所进行的试验考虑了砂土相对密度和上覆荷载的影响。试验时，分别对 4 种不同相对密度的砂土试样进行剪切，相对密度 D_r 分别为 30%，45%，65%，80%。在给定的砂土相对密度 D_r 和地震剪切输入波条件下，分别对 3 种不同上覆荷载作用下的砂土进行单剪试验，上覆荷载分别为 50，100，250 kPa。试验对每一试验工况下的砂土试样分别进行 4 次试验，然后进行回归分析，获得试验结果代表值。试验工况设计如表 1 所示。其中，少数试验工况下的砂土试样进行 5 次试验，地震荷载输入试验组数共计 202 组。

表 1 地震剪应变输入波单剪试验工况

Table 1 Cases of simple shear tests using input shear strain

seismic waves		
上覆荷载 /kPa	相对密度 D_r /%	输入地震波
50	30	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	45	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	65	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	80	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
100	30	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	45	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	65	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	80	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
150	30	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	45	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	65	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180
	80	SER000, LGP090, D-OLC360, A-GRN180

1.6 动循环单剪试验的操作

首先应完成荷载波的输入与输出信号的调试工作，主要包括导入原始的地震波数据，并设置好数据采集参数，并按前文中的介绍完成调试工作。然后，根据拟定的试验工况制备并安装某一相对密度的砂土试样。接着即可开动测试系统进行单剪试验工作，系统自动记录试验结果。最后，针对试验结果进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 地震波类型对砂土震陷的影响

图4给出了不同地震波荷载作用所引起的竖向应变。从图中可以看出,在同一工况下,同一波型的地震波作用引起的砂土竖向应变相近,不同波型的地震波作用引起的砂土竖向应变差异明显。振动型地震波引起的竖向应变均比冲击型地震波引起的竖向应变大。

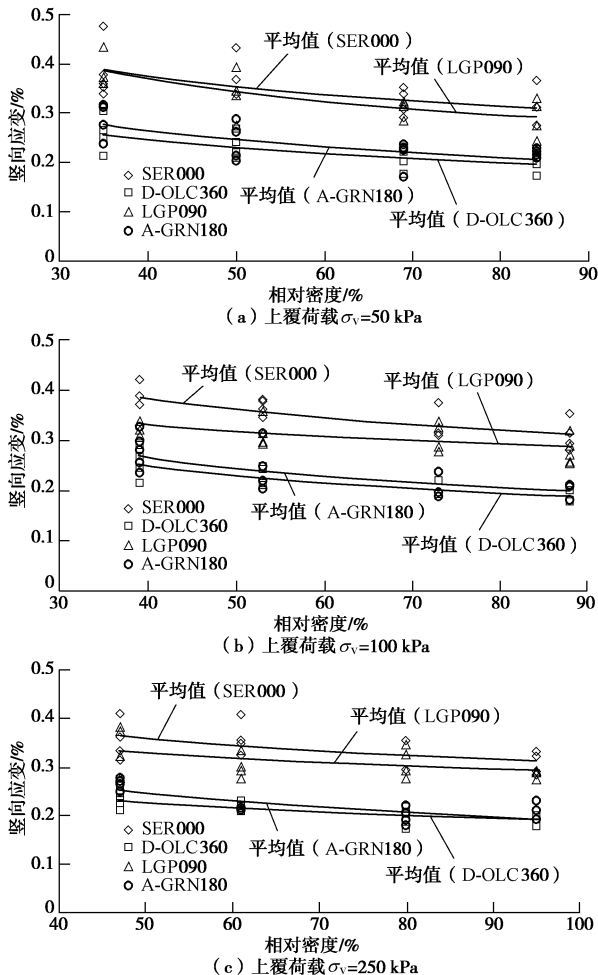


图4 不同工况不同类型地震波作用引起的砂土竖向应变
Fig. 4 Shear vertical strains in sands due to different types of seismic waves under different work conditions

2.2 地震波类型对砂土震陷过程的影响

图5~8分别是上覆荷载为50 kPa,砂土相对密度为30%工况下的各地震荷载曲线作用下的试验结果,主要包括:①剪应变和及其引起的竖向应变时程曲线;②向应变与剪应变关系曲线。

从图5(a)、6(a)剪应变地震波输入时程及其引起的砂土竖向应变时程曲线可知,当砂土受到冲击型地震荷载作用时,最大峰值之前的地震波对砂土竖向应变起主要控制作用,其引起的竖向应变占总竖向应变的90%以上,最大峰值之后的地震波对砂土竖向应变的贡献很小;同样,从图5(b)、6(b)中地震荷载作用引起的砂土剪应变和竖向应变的关系曲线也可以看出,砂土的竖向应变主要是由最大峰值之前的各个较大峰值的地震波引起的,其中最大峰值对应的

地震波引起的砂土竖向应变最大,而最大峰值之后的各地震波对砂土竖向应变影响不明显。这一因素在砂土竖向应变时程曲线上表现为:在地震波最大峰值作用之前,竖向应变迅速增长,形状较陡;而在地震波最大峰值作用之后,竖向应变增长缓慢,形状平缓。

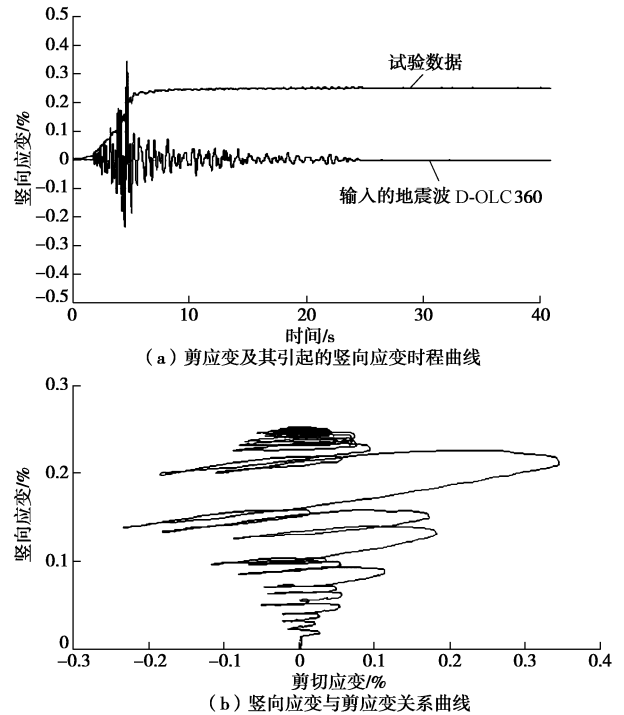


图5 D-OLC360 剪应变地震荷载输入试验结果曲线
Fig. 5 Test results for inputting of seismic shear strain loading titled D-OLC360

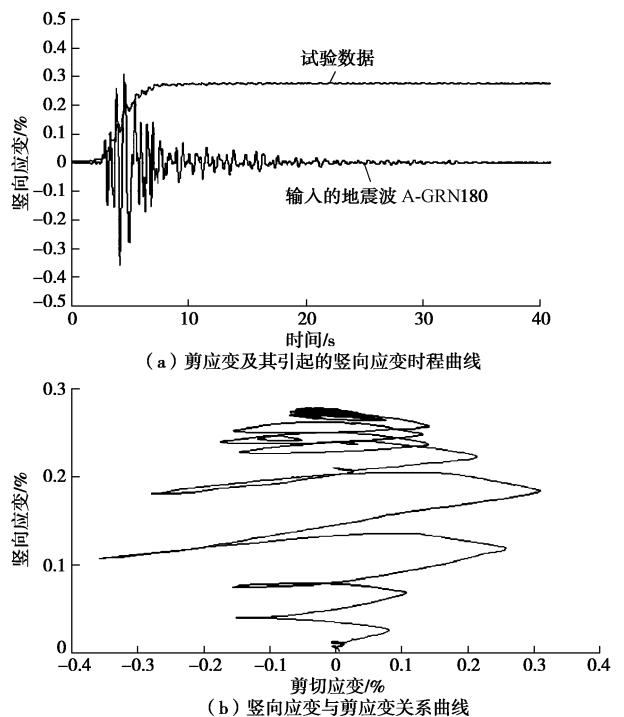


图6 A-GRN180 剪应变地震荷载输入试验结果曲线
Fig. 6 Test results for inputting of seismic shear strain loading titled A-GRN180

从图 7 (a)、8 (a) 剪应变地震波输入时程及其引起的砂土竖向应变时程曲线可知, 当砂土受到振动型地震荷载作用时, 最大峰值之前的各地震波对砂土竖向应变同样起着控制作用; 而对于最大峰值之后的地震波, 当峰值等于最大峰值 80% 左右时, 这些地震波对砂土竖向应变仍具有显著的影响, 当峰值更小时, 地震波对砂土竖向应变几乎无影响。为此, 最大峰值之前及最大峰值之后一定范围内的地震波对砂土的竖向应变起到控制作用, 其对应的砂土竖向应变增长较快, 竖向应变时程曲线较陡; 此后的地震波对砂土竖向应变影响不明显, 其对应的砂土竖向应变增长缓慢, 竖向应变时程曲线形状平缓, 如图 7 (a)、8 (a) 所示。同样, 图 7 (b)、8 (b) 地震荷载作用引起的砂土剪应变和竖向应变的关系曲线也可以看出, 砂土受到振动型地震荷载作用时, 最大峰值之前及最大峰值之后一定范围内的地震波作用共同决定着砂土竖向应变的大小, 其中, 对于最大峰值之后的地震波, 其峰值应达到该地震波最大峰值的 80% 左右才对砂土竖向应变具有贡献作用。

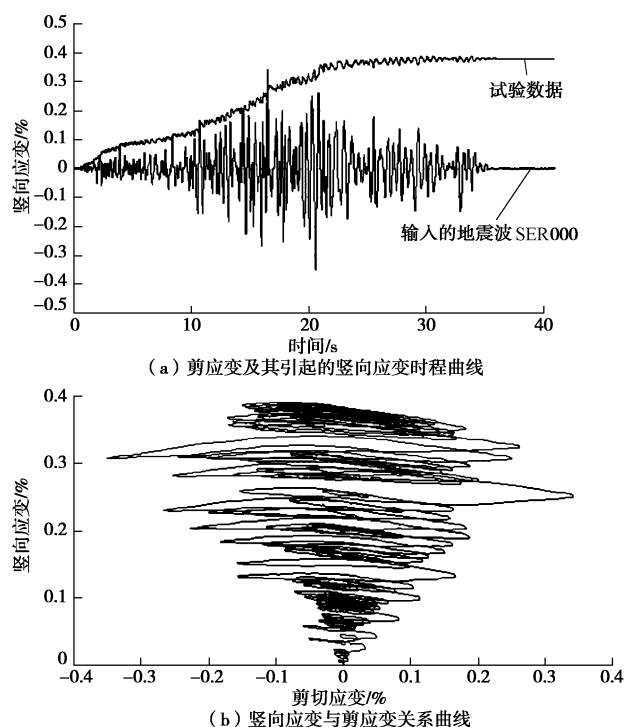


图 7 SER000 剪应变地震荷载输入试验结果曲线

Fig. 7 Test results for inputting of seismic shear strain loading titled SER000

由于砂土震陷主要是由砂土颗粒的重排引起孔隙减小所引起的, 故而当地震波出现最大峰值应变之前, 颗粒的运动始终在增强, 达到最大峰值后, 重排运动也即将达到顶点, 由此所引的应变也是最为显著。因此, 无论是冲击型地震波还是振动型地震波, 最大峰值之前的各地震波对砂土竖向应变均起控制作用。但由于冲击型地震波最大峰值后的剪应变均较小, 继续

引发颗粒重排的能量很小, 故其后的地震动对砂土竖向应变贡献甚微。但对于振动型地震波而言, 最大峰值后仍有较大的剪应变峰值出现, 仍能影响到颗粒的空间排列, 故而其最大峰值之后一定范围内的地震波作用也能影响到砂土竖向应变。

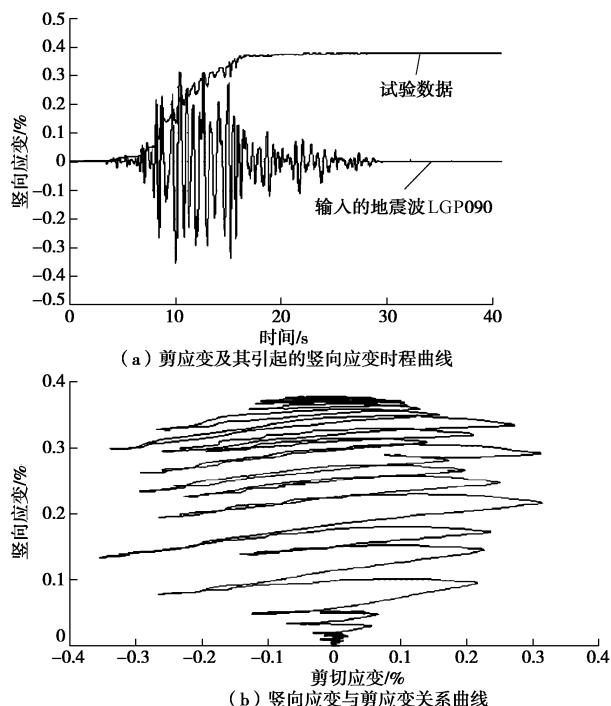


图 8 LGP090 剪应变地震荷载输入试验结果曲线

Fig. 8 Test results for inputting of seismic shear strain loading titled LGP090

3 结 论

(1) 采用真实地震荷载输入进行一系列动循环单剪试验模拟砂土在地震荷载作用下引起的砂土震陷。试验设备采用最新一代 GCTS 单剪测试系统, 并选取美国 Filter 净砂制作砂土试样。试验中分别选取振动型和冲击型的真实地震波进行剪切荷载输入, 考虑了砂土相对密度和上覆荷载的影响, 共计试验组数 202 组。

(2) 在同一砂土相对密度和上覆荷载条件下, 波形相同峰值的振动型与冲击型地震波对砂土进行剪切作用, 振动型地震波引起的砂土震陷比冲击型地震波引起的砂土震陷大。

(3) 砂土震陷主要是由最大峰值之前的各个较大峰值的地震波引起的, 其中最大峰值对应的地震波引起的砂土竖向应变最大, 对于最大峰值之后的地震波, 其峰值应达到该地震波最大峰值的 80% 左右才对砂土变形具有较明显的贡献作用。

(4) 对于冲击型地震波, 由于波峰达到最大值后, 幅值迅速衰减, 其后的地震波往往小于最大峰值的 80%, 通常地, 冲击型地震波最大峰值之后的各地震波对砂土变形影响不明显; 对于振动型地震波则相反, 砂土受到振动型地震荷载作用时, 最大峰值之前及最

大峰值之后一定范围内的地震波作用共同决定着砂土变形的大小。

参考文献:

- [1] 袁晓铭, 孙 锐, 孟上九. 土体地震大变形分析中 Seed 有效循环次数方法的局限性[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 207 - 211. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, MENG Shang-jiu. Limitation of the Seed's method of significant cyclic number in analyzing large deformation of soils during earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 207 - 211. (in Chinese))
- [2] NAGASE H, ISHIHARA K. Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes[J]. Soils and Foundations, 1988, **28**(1): 65 - 76.
- [3] WHANG D, REMIER M F, BRAY J D, et al. Characterization of seismic compression of some compacted fills[J]. Advances in Unsaturated Geotechnics, 2000: 180 - 194.
- [4] STEWART J P, SMITH P M, WHANG D H. Documentation and analysis of field case histories of seismic compression during the 1994 Northridge, California, Earthquake[R]. Berkeley: University of California, 2002.
- [5] 孟凡超. 液化地基上建筑物不均匀震陷机理初步研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2006. (MENG Fan-chao. Primary study on mechanism of earthquake-induced differential settlement of buildings on liquefiable subsoil[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2006. (in Chinese))
- [6] SEED H B, SILVER M L. Settlement of dry sands during earthquake[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, **98**(4): 381 - 397.
- [7] SILVER M L, SEED H B. Volume changes in sands due to cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, **97**(9): 1071 - 1082.
- [8] YOU D T L. Compaction of sands by repeated shear straining[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, **98**(7): 709 - 725.
- [9] SHAHNAZARI H, TOWHATA I. Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationship of sand[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society: Soils and Foundation, 2002, **42**(1): 105 - 119.
- [10] WHANG D H, STEWART J P, BRAY J D. Effect of Compaction conditions on the seismic compression of compacted fill soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, **27**(4): 371 - 379.
- [11] STAMATOPOULOS C A, BALLA L N, STAMATOPOULOS A C, et al. Earthquake-induced settlement as a result of densification, measured in laboratory tests[C]// Proc 13th World Conf on Earthquake Engineering. Vancouver, 2004.
- [12] DUKU P M, STEWART J P, WHANG D H. Effect of post-compaction ageing on seismic compression of fine-grained soils[C]// Ground Modification and Seismic Mitigation. Shanghai, 2006.
- [13] DUKU P M, STEWART J P, WHANG D H, et al. Volumetric strains of clean sands subject to cyclic loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, **134**(8): 1073 - 1085.
- [14] STEWART J P, YEE E, DUKU P. Volume change in unsaturated soils from cyclic loading[R]. Los Angeles: University of California, 2009.
- [15] ISHIHARA K, YASUDA S. Sand liquefaction under random earthquake loading condition[C]// Proceedings of 5th WCEE. Roman, 1973: 329 - 338.
- [16] 谢定义, 巫志辉. 不规则动脉冲波对砂土液化特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1987, **9**(4): 1 - 12. (XIE Ding-yi, WU Zhi-hui. Effect of irregular dynamic impulse history on liquefaction characteristics of saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **9**(4): 1 - 12. (in Chinese))
- [17] 陈青生, 高广运, 何俊锋. 地震荷载不规则性对砂土震陷的影响[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12): 3713 - 3720. (CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, HE Jun-feng. Effect of irregularity of earthquake loading on seismic compression of sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12): 3713 - 3720. (in Chinese))
- [18] 陈青生, 高广运, 何俊锋, 等. 多向地震荷载对砂土震陷的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(7): 1022 - 1027. (CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, HE Jun-feng, et al. Effect of multidirectional earthquake loading on seismic compression of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(7): 1022 - 1027. (in Chinese))
- [19] 陈青生, 高广运, RUSSELL A G 等. 砂土震陷分析中多维地震荷载等效循环周数计算[J]. 世界地震工程, 2012, **26**(增刊): 6 - 12. (CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, RUSSELL A G. Computation of equivalent number of uniform strain cycles for seismic compression of sand subjected to multi d irectional earthquake loading[J]. World Earthquake Engineering, 2012, **26**(S0): 6 - 12. (in Chinese))
- [20] LEE J. Engineering characterization of earthquake ground motions[D]. Michigan: The University of Michigan, 2009.