

砂土震陷室内试验研究综述

高广运^{1,2}, 聂春晓^{1,2}, 顾晓强^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:室内试验是研究砂土震陷的重要方法,综述了国内外砂土震陷室内试验研究现状和进展,介绍了砂土震陷试验原理,分类简述了试验仪器的适用范围和特点,对各种试验方法的优缺点和适用性进行了比较和评述。分析了室内试验的内在因素(砂土特性)和外在因素(荷载特性)对砂土震陷的影响。最后指出场地震陷预测、荷载多维性、荷载方向性、砂土组成特性等方面研究存在的不足,为以后的研究提供参考。

关键词:砂土震陷;室内试验;试验方法;砂土特性;荷载特性

中图分类号:TU47 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0001-07

A review of recent research in laboratory test of seismic compression of sands//GAO Guangyun^{1,2}, NIE Chunxiao^{1,2}, GU Xiaoliang^{1,2} (1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Laboratory tests are commonly used to investigate seismic compression of sands. Research status and recent advances in laboratory tests of seismic compression of sands are reviewed. After a brief introduction to principles of seismic compression of sands, the applicable scope and characteristic of instruments are sketched in detail. And the advantages and disadvantages of each experimental method are discussed and compared. Furthermore, this paper analyzes the effects of internal factors (soil properties) and external factors (load characteristics) on seismic compression. Finally, the shortcomings of recent research are proposed, including compression prediction of field, multidimensional loads, directionality of loads and soil properties, which provides reference for further issues.

Key words: sand seismic compression; laboratory test; experimental method; soil properties; load characteristics

地震引起的土体变形一般包括土体液化后大变形和尚未液化时产生的永久变形,其中水平变形在土体存在初始剪应力时较为明显。对于土体结构(如边坡、大坝等)的地震失稳问题,往往关注水平变形,若土体结构在地震荷载下未发生水平变形破坏,竖向变形成为关注的重点。目前国内外对土体液化研究较多,对液化变形的机理认识和预测方法有了较大的进展,但少有关注尚未液化的土体变形,包括黏土在循环荷载作用下的软化及砂土震陷。砂土震陷(seismic compression)主要指非饱和砂土受地震荷载作用,尚未引起液化,但砂土在循环震动下土颗粒重新排列,孔隙减小,砂土逐步密实,从而引起地面的沉陷。它是地震作用引起地面沉降的一种类型,区别于受到广泛研究的“液化后沉降”(post-liquefaction settlement)。

震害调查表明砂土震陷是造成建筑结构和设施

破坏的关键因素之一^[1]。当前,工程实践对震陷的评估与计算提出了越来越高的要求,如加州地质调查局指出在学校、医院等一些重要建筑设计前必须进行场地的震陷分析与评估^[2]。

目前砂土震陷计算方法包括数值方法及经验模型方法,其中数值方法主要基于弹塑性模型,利用动力 Biot 固结方程求解,但目前描述土体动力特性的本构模型尚不成熟;经验模型方法通过室内试验得到循环荷载引起的残余变形,建立残余变形与应力、振动周数等之间的经验公式,成为应用较为广泛的方法。

综上所述,进行砂土震陷的室内研究具有重要意义。本文对砂土震陷的试验原理、试验方法和仪器、影响震陷的试验因素进行总结,指出砂土震陷室内试验的研究进展、存在的不足及可能的发展方向。

基金项目:国家自然科学基金(41372271)

作者简介:高广运(1961—),男,教授,博士,主要从事土动力学和桩基方面研究。E-mail:gaoguangyun@263.net

1 试验原理

砂土震陷室内试验包括土体单元试验和模型试验,常用的仪器有动单剪仪、动三轴仪及振动台等。

土体单元在尚未受到地震作用时,通常假定其处于静止土压力状态,地震发生后,向上传播的剪切波在土体中产生的不规则或循环动应力作用于土体单元。据此原理,在动单剪试验中,在试样上部施加竖向压力,水平向施加剪切力,模拟土体受到地震荷载或其他循环荷载的作用。砂土震陷振动台试验的应力条件和动单剪试验类似,水平荷载是以剪切波的形式向上传播,在竖向施加恒定静载或动载。

双向激振动三轴试验的土样除受围压 σ_0 ,在水平向和竖向还交替受到大小为 $\sigma_d/2$ (σ_d 为竖向动应力) 的动荷载,土样的 45° 斜面上产生的正应力始终维持 σ_0 不变,而动剪应力值为正负交替的 $\sigma_d/2$ 。单向激振三轴原理和双向激振类似,在土样竖向施加动应力 σ_d ,此时在土样 45° 斜面上产生的正应力为 $\sigma_0 \pm \sigma_d/2$,动剪应力为正负交替的 $\sigma_d/2$ 。

2 试验仪器

2.1 动单剪仪

动单剪仪的土体试验盒是由多张光滑金属圆形薄片叠加而成,金属薄片之间可以自由滑动,因此试样盒中土体受到水平剪切作用时,可以确保土体各点所受的剪切应变基本均匀,接近于纯剪作用。动单剪仪适用于模拟天然土层在剪应力下的各种变形,可较好地模拟地震作用,此外它还可以研究振幅、循环周数、荷载类型等因素对震陷的影响^[3]。动单剪仪可分为单向动单剪仪、双向动单剪仪以及三向动单剪仪,分别表示该仪器可以单向、双向、三向激振。双向动单剪仪构造见图 1^[4],试样放置在仪器中央,多片圆环叠加组成试样盒。试样盒上部与两个马达相连,两马达施加荷载方向垂直。试样盒下部与第三个加载装置相连。单向、三向动单剪仪构造和工作原理与双向动单剪仪类似。

2.2 动三轴仪

动三轴仪可较好地控制轴向压力及监测试样孔压变化,因此多用于液化特性研究或孔压变化引起的震陷研究^[5]。动三轴仪(图 2^[6])可以分为单向激振式和双向激振式两种。单向激振式动三轴仪是将试样所受的水平轴向应力保持静态恒定,通过周期性改变竖向轴压的大小,使土样在轴向经受循环变化的大主应力,从而使土样产生相应的循环变化的正应力和剪应力。双向激振式动三轴仪通过同时控制竖向轴应力和水平轴应力施加动荷载,但二者施

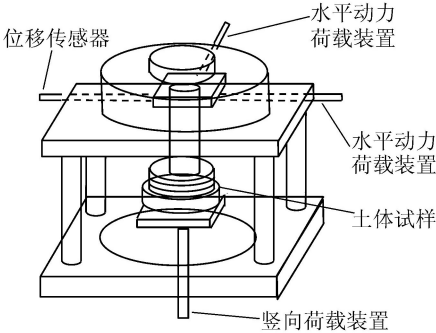


图 1 双向动单剪仪构造

加动荷载的相位差为 180° 。在三轴试验中,可以改变竖向偏应力和循环围压的同相位及异相位的耦合方式,实现不同的应力路径。

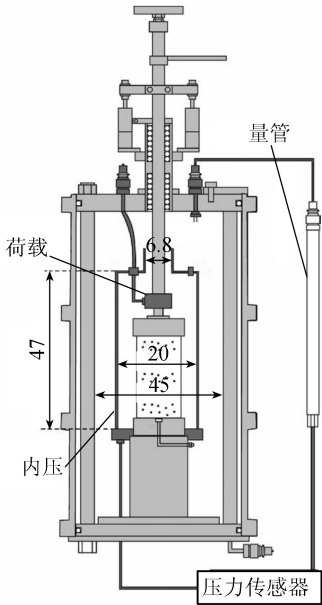


图 2 动三轴仪(单位:cm)

2.3 振动台

振动台模型试验的难点之一是保证模型与原型的相似性。砂土震陷的振动台试验需要借助振动台上的试样模型箱完成,因此模型箱的设计也是试验的重要环节之一。借助振动台可以完成多维荷载和不同类型荷载的砂土震陷模型试验,如 Pyke 等^[7]完成了多向振动下砂土的变形研究。目前振动台可以独立完成三维振动,但由于试验模型箱的限制,试验通常在一个水平向和一个竖直向施加动荷载,限定另一水平向位移。图 3 是 Chang^[8]进行双向不排水剪切试验的模型装置,下部为振动台,上部是层状土体模型盒,模型盒用一定厚度的方形中空的金属结构叠加而成,叠层间光滑,可以水平自由滑动。试验发现随着高度的增加,位移时程曲线幅值基本保持不变,剪应变时程曲线幅值减小。袁晓铭等^[9]在大型振动台上采用缩尺比为 1:4 的模型研究软弱地基上建筑物的不均匀沉降,以砂箱代表地基土,上面

放置两层建筑模型,主要研究地震波的不规则性引起的不均匀沉降。

采用振动台试验研究震陷工作量大、繁杂,需要考虑模型相似性、边界条件等,试验过程相对复杂。

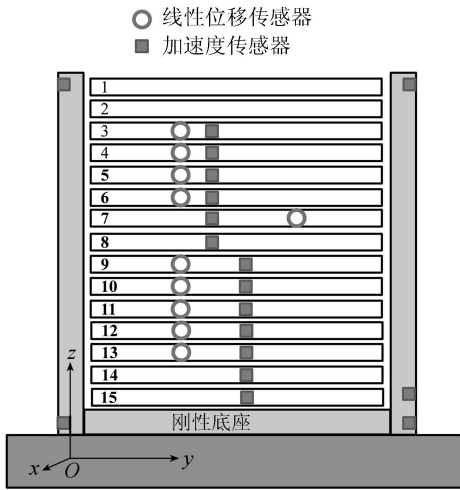


图3 振动台试验

3 试验方法

3.1 加载维数

目前震陷研究已从最初的一维加载拓展到二维和三维加载。在震陷研究的早期,由于理论知识不足和试验设备功能限制,主要研究单向荷载作用震陷,但因实际地震是多维震动,研究逐渐变为水平双向荷载作用下的震陷。如 Pyke 等^[7]通过振动台试验发现水平双向振动产生的震陷量大约是单一水平方向震陷量的 2 倍,因此采用水平一维震陷量的 2 倍来计算水平二维震陷量,该结论被众多学者采用^[10-12]。另有学者对水平震陷时产生的孔压、应力等进行研究,Seed 等^[13]通过振动台试验得到干砂震陷结果和干砂循环剪切试验数据,以此评估饱和砂土在多向振动下的液化特性,认为双向荷载下超孔隙水压力累积速度是单向荷载时的 2 倍。Ishihara 等^[4]研究发现,同等条件下产生 5% 的剪切应变,双向等幅荷载产生的应力比为单向加载的 70%。后续研究表明,产生 3% ~ 5% 的剪切应变,在砂土相对密度分别为 45%、75%、95% 时,多向振动的剪应力比是单向的 155%、145%、90%^[14]。即 2 倍的转化关系并非适用于所有情况,土质不同,荷载形式和大小不同,转化的关系也会不同。Matsuda 等^[15]研究发现,水平双向震陷量是水平单向震陷量的 1.5 ~ 2 倍,Wichtmann 等^[16]研究发现,双向加载累积变形速率大于单向的 2 倍。但到目前为止,尚没有较为准确的计算砂土多维震陷的方法。

目前对三维震陷的研究较少,主要是受试验设

备的限制,且以往研究认为竖向地震荷载对砂土震陷影响较小。Whitman 等^[17]研究发现在单独施加小于 $1g$ ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) 的竖向地震加速度,土体不会发生震陷,因此,认为在地震峰值加速度小于 $1g$ 时可以不考虑竖向振动。在试验仪器方面,对震陷的研究以单元试验为主,多采用动单剪仪进行试验,传统仪器仅可施加水平双向动荷载。而在借助振动台进行试验时,由于试样盒通常需要在一个方向上固定,试验时施加一个水平向和一个竖向的动荷载,所以三向振动的试验较少。但也有学者对此进行了探索,如 Pyke^[7]借助振动台完成了复杂三维振动试验,发现竖向震动和水平向震动叠加引起的震陷量远大于仅有水平向震动的情况。竖向和水平向震动叠加会发生耦合,但耦合的原理和不同耦合情况产生的震陷量目前尚不清楚。

3.2 荷载类型

荷载类型主要有三角波、正弦波、地震波 3 种。三角波形式较为简单,Silver 等^[3]在早年采用三角波进行了震陷研究。现常用的荷载形式为正弦波和地震波。正弦波的周期特性、振幅特性明显,适合基本性质的研究,研究者可以按照试验目的进行试验设计。此外,通过等效作用把地震波等效为正弦波后,通过设定正弦波周期、振幅和循环周数可以近似反映地震波的周期、振幅和持时特点。

地震波是最真实的荷载形式,具有独特的振幅、频率特性,因此许多学者对某些具有特点的地震波进行了分析。Ishihara 等^[5]采用动三轴仪研究地震荷载下饱和砂土的液化特性,试验时把地震波分成冲击型地震波和振动型地震波。分析发现,振动型地震波在任意荷载下产生的应力比小于冲击型地震波。袁晓铭等^[9]研究地震波序对土体应变的影响,在三轴试验中对地震波进行正向时程、反向时程、逆向时程加载,发现大的应力冲击产生的变形明显。陈青生等^[18]研究了振动型和冲击型地震波的特性以及其对干砂震陷产生的差异,认为在同一砂土相对密度和上覆荷载条件下,砂土震陷主要由最大地震荷载峰值之前的各个较大峰值地震波引起。孟凡超等^[19]借助动三轴试验发现真实地震荷载下土的变形发展与等幅正弦荷载明显不同,并不是所有的脉冲对变形发展都有贡献,土体变形增长对大脉冲荷载更敏感,峰值前脉冲对土体最终应变贡献显著,峰值后贡献明显减小。

因地震波的各向异性,对地震波的分类比较困难,很多分类方法都比较粗略,震陷的研究系统性较差。试验得出的研究成果受地震特性(地震峰值、地震冲击作用、地震类型、地震波形态、地震持时

等)影响,但因地震波的不规则性,这些地震特性很难通过标准化的方式描述。因此地震荷载作用的震陷研究是难点之一。

3.3 加载控制条件

目前采用室内试验进行震陷研究的控制条件一般有应力控制、应变控制、剪应力比控制、加速度控制。采用应力控制条件的试验多为三轴试验^[6,19-20],也有少量学者用应力作为动单剪仪试验的控制条件^[4],在采用动单剪仪进行试验时大多采用应变控制^[3,14-16,18,21-25]。研究表明,采用应力控制研究砂土在不排水条件下的特性时,试样的准备过程会极大地影响试验结果^[26-27];而采用应变控制研究砂土液化特性时引起的差异很小^[28]。此外对于松砂试样,因其相对密度小,刚度小,更易采用应变控制。剪应力比是循环剪应力与竖向压力的比值,常用来表示土体液化能力大小,采用剪应力比控制的优势是消除了试验过程中土体应力随试样高度变化产生的不均匀性^[29]。加速度控制在动三轴试验^[5]和振动台试验^[7-8]中都有使用,研究地震波对震陷影响的试验多采用加速度控制。振动台多用来模拟真实地震对土体的影响,试验时常采用加速度控制。

4 砂土震陷的室内试验影响因素

4.1 土体因素

4.1.1 相对密度

相对密度是影响砂土震陷的关键因素,砂土的相对密度越小,孔隙率越大,土体被压缩的潜力越大,在地震荷载作用下体应变越大,反之亦然。Tokimatsu等^[30]通过试验初步确定震陷量的计算方法,在确定砂土震陷量大小的过程中,相对密度是控制因素之一,对震陷的分析起关键作用。Duku等^[24]研究净砂在循环荷载作用下的体应变特性时,重点研究了净砂的组成因素和环境因素影响,在组成因素中影响砂土产生动力压缩的关键因素是相对密度。其他人的研究也证明了这一结论^[2,3,21]。

4.1.2 土体类型

土体类型对震陷影响的研究较少,现有的研究认为其对试验结果有影响,但不明显。Matsuda等^[15]研究了日本丰浦砂、日本玄海町砂和粒状高炉矿渣3种不同材料在地震后的竖向应力、应变和强度的变化。结果表明,两种天然砂土在荷载作用下产生的变形和应力特性相近;和天然砂土相比,粒状高炉矿渣在循环荷载下会有较小的竖向应力和竖向应变。Duku等^[24]研究了16种净砂在循环荷载下的体积变化特性,发现砂土的级配参数、颗粒棱角、

土体组织、矿物成分、孔隙比对震陷的影响较小。

4.1.3 上覆压力

有关上覆压力对震陷影响的认识是一个缓慢的过程,Silver等^[3]、Youd^[21]在试验中发现上覆压力对震陷的影响很小,可忽略。但Duku等^[24]研究循环荷载下净砂的体应变时(试验过程与Silver等^[3]、Youd^[21]相同),当上覆压力从50.65kPa逐级变化到405.20kPa净砂体应变迅速减小。Duku等^[24]认为上覆压力增大会使砂土的压缩模量变大,产生更小的体应变,Stewart等^[31]也在试验中证明了增大上覆压力会减小震陷的结论。

4.1.4 细颗粒含量

砂土的细颗粒含量对砂土震陷有较大影响,砂土中含有少量细颗粒会改变砂土的密实度和孔隙率,若砂土中细颗粒含量继续增大,砂土的可塑性和黏性增加。Pyke等^[7]对1971年San Fernando震陷进行分析,在限定剪切循环周数条件下对级配良好的黏质砂土进行循环剪切试验,发现同一条件下其体应变小于净砂的1/3。Whang等^[23]对取自2个场地的4种土体进行循环剪切试验,砂土试样的细颗粒含量较高(体积分数为40%~54%),塑性指数在2~15之间,对比净砂、细颗粒含量低和细颗粒含量高的试样,发现相同荷载下试样的细颗粒含量越高,土体变形越小。随后,Whang等^[32]通过对由黏性颗粒与净砂组成的合成土进行循环剪切试验,结果表明在同一相对压实度条件下随着细粒含量的增加,砂土竖向应变也增大,此结论与文献^[23]的试验结果相反。Stewart等^[2]以某种细颗粒含量的土体为基准,改变其他土体的细颗粒含量,试验发现当净砂中加入的细颗粒为黏性颗粒,增大细颗粒含量会使震陷量减小,但当净砂中加入非黏性细颗粒时会使震陷量增大。Stewart等^[31]认为对于砂土有一个最优细颗粒含量值,当细颗粒含量小于这个值时,增加细颗粒含量则震陷量增大,若超过这个值后继续增加砂土中细颗粒含量,震陷量减小。

4.1.5 饱和度

饱和度 S_r 对净砂竖向应变的影响不大^[21,24],然而对含细颗粒砂土的震陷影响则不同,Whang等^[23]试验发现高 S_r 塑性土竖向应变值比低 S_r 塑性土竖向应变值小,但当塑性指数小于2时,低塑性土竖向应变值几乎不受 S_r 影响。 S_r 主要在含黏粒土中发挥作用,在非饱和土中,基质吸力对土体的结构有重要作用。Whang等^[32]通过对黏性颗粒与净砂的合成土进行循环剪切试验,发现其他条件相同时, S_r 取中值(30%左右)时的砂土竖向应变值比 S_r 为0%和60%时的小。基质吸力测试结果表明: S_r 为

30%时的吸力较高,这和竖向应变值的减小密切相关。Sawada 等^[6]认为部分饱和砂土震陷的主要原因是荷载压缩孔隙中气体,导致不排水土体体积发生变化。Ghayoomi 等^[33]在分析非饱和砂土的震陷原理时指出,由于水的存在非饱和砂土会产生基质吸力,基质吸力可以增大土体内部颗粒与颗粒之间的吸力,从而增大颗粒之间移动的抵抗力,所以非饱和砂土有更大的剪切强度。当 S_r 继续增加,基质吸力减小,因此有一个最优 S_r 使砂土震陷量最小。在此基础上 Ghayoomi 等^[34]总结出了一种计算非饱和砂土震陷的计算方法,该方法认为非饱和砂土震陷由砂土压缩、再固结两部分组成。该计算方法表明砂土在由干砂逐级变为饱和砂的过程中,砂土震陷量从大变小再变大。

4.2 荷载因素

4.2.1 地震荷载特性

地震荷载特征参数主要包括振幅、循环周数、频率。由于地震荷载具有随机性,较难研究其规律,常用等效简谐荷载代替,其振幅越大、循环周数越多,表示地震的震级越大,产生的震陷量也越大。

Ishihara 等^[4,6,15]在试验中发现在其他条件不变的情况下,砂土变形随试验加载幅值和循环周数的增大而增大。Silver 等^[3]采用动单剪仪研究发现循环荷载前几次循环的变形基本上决定了最终的竖向变形。Poblete 等^[20]使用 Niemunis 等^[35]建立的多周循环累积模型(HCA)预测残余应变,关注循环次数对变形的影响,发现循环累积应变速率随应变幅值增大而增大。

为了更加方便、具体地研究地震荷载,许多学者研究地震等效循环周数的确定方法,并提出了相关的经验公式^[36-39]。Seed 等^[39]提出以实际地震应力峰值的 65% 作为等效后的循环应力峰值,等效后的循环次数依据震级大小而定,该方法使用方便、广泛,此后被很多学者沿用。袁晓铭等^[9]通过动三轴试验结合震害现象,认为常用的 Seed 有效循环周数方法不适合大脉冲地震荷载下土体残余变形的分析,不能反映地震荷载本身不规则性和不对称性产生的地基震陷差异。建议以 20 周作为地震应力荷载向等幅荷载转化的标准作用次数。考虑到上述不足,陈青生等^[40]在 404 组动循环荷载和 202 组地震荷载试验的基础上提出了基于 R-N 非线性疲劳损伤累积的砂土震陷算法,该算法可以有效地考虑荷载幅值和加载次序对材料变形的影响。

也有学者^[3,10]把不同地震震级和等效循环周数之间的关系制作成表格。表 1 中将不同震级地震荷载等效为相应循环周数、体应变比和引起土体液化

所需循环应力比的简谐荷载。体应变比和循环应力比以 7.5 级地震为标准进行分析。

表 1 震级与等效循环周数、体应变比、引起液化所需的循环应力比关系

震级	等效循环周数	体应变比	应力比
8.50	26	1.25	0.89
7.50	15	1.00	1.00
6.75	10	0.85	1.13
6.00	5	0.60	1.32
5.25	2~3	0.40	1.50

殷宗泽等^[41]也研究了不同震级与等效循环周数间的关系,等效分析时考虑了震动持续时间因素,认为等效后循环荷载产生的剪应力幅值为地震最大荷载的 65%,并取 1~1.5 的安全系数,如表 2 所示。

表 2 等效循环周数与震级关系

震级	等效循环周数	震动持续时间/s
5.5~6.0	5	8
6.5	8	14
7.0	12	20
7.5	20	40
8.0	30	60

加载频率对砂土震陷的影响很小。Youd^[21]在对净砂的震陷分析中发现,变化加载频率对砂土竖向应变影响不大,Duku 等^[24]在试验中验证了加载频率对砂层沉降影响较小这一特性。

4.2.2 加载路径

加载路径对震陷的影响是学者们最近关注的问题,加载路径体现不同的荷载形式,在土体中产生的作用力也有差异。可以设定加载路径研究特定荷载形式下的震陷。目前研究比较多的加载路径是单向加载、双向椭圆型加载、双向十字型加载、水平双向加载、倾斜型加载。在椭圆型加载模式中,荷载方向相互垂直,相位相差 90°;在十字型荷载模式中,荷载方向相互垂直,相位差为 360°。

上述加载模式中土体在施加动荷载前水平方向未受到任何作用力,然而现实中则不完全相同,如斜坡上土体或受到某种预先水平作用的土体。Boulanger 等^[22]采用美国加州大学伯克利分校的双向动单剪仪(UCB-2D)研究斜坡上土体的剪切变形。斜坡上土体沿着斜面存在一定的剪力,地震发生时动荷载作用的方向和土体剪力的方向存在一定的夹角,夹角不同对震陷的影响不同。地震荷载作用力可分解为垂直与平行于斜坡土体剪力这两个方向上的分量。试验结果表明在相对密度分别为 35%、45%、55%,初始水平剪应力比 0.2~0.3 时,土体受到垂直于初始剪应力方向的地震水平荷载抵

抗力是平行于初始剪应力方向的 70% ~ 95%。因为垂直加载条件下发生剪应力反转和主应力旋转,所以土体在垂直震动方向上的抵抗力小于平行方向。

水平双向加载相位的差异会产生加载合力或合位移的差异,导致加载路径的变化,因此荷载相位差异对震陷的影响也是人们研究的重点。Wichtmann 等^[16]以小应变高振次的试验方法研究应变加载路径和应变环偏移对应变累积的影响,加载发现同相位时体应变累积速率和平面应变环的偏移无关,应变环偏移仅产生暂时的累积速率的增加;相位不同时,应变环的形状对残余应变有巨大的影响。对于固定幅值的单向加载,如果持续改变循环荷载偏移方向,产生残余应变是恒定偏移的 1.5 倍。此外,Matsuda 等^[25]采用循环剪切仪,施加均一和不规律循环剪切荷载,在相同剪应变幅值及循环周数下,多向荷载产生的超孔压、沉降要大于单向荷载,且多向荷载下孔压和沉降会随相位不同而变化。

4.3 其他因素

4.3.1 排水条件

室内砂土震陷试验主要模拟干砂、非饱和砂以及饱和砂在地震荷载作用下的变形沉陷,荷载施加的时间较短。干砂加载时一般打开排水阀,对于非饱和砂以及饱和砂一般采用不排水试验。

4.3.2 试样几何形状

Poblete 等^[20]研究了试样的几何形状对试验结果的影响,分别对比了直径 10 cm、高 10 cm 与直径 10 cm、高 20 cm 的圆柱状试样和 9 cm×9 cm×18 cm (长×宽×高)的长方体试样,结果发现试样的几何形状对试验结果几乎没有影响。

5 研究展望

本文综述了砂土震陷的原理、常用的室内试验方法以及影响震陷的各种因素等。由于砂土震陷的复杂性,还需深入了解砂土震陷规律及进行场地震陷预测,以下问题需进一步开展研究:

a. 目前研究多侧重于定性揭示砂土震陷规律,以土体单元试验为主,对实际场地震陷计算及预测方面的研究较少。今后应揭示实际场地震陷规律,尤其应对震陷计算和评估方法进行研究。

b. 砂土震陷应考虑不同地震荷载的应力路径及在地震过程中发生主应力旋转的影响。

c. 在进行砂土震陷计算时,现有的由一维震陷量转化为二维震陷量的方法是一种近似估算。对于不同类型的土体、不同荷载,用此方法计算砂土的震陷量产生的差异较大。应建立一种能考虑土体特性

和荷载特性的更为合理的转化方法。

d. 加载方式对震陷有极大的影响,如水平双向加载时,两荷载的大小、相位差异都对震陷产生影响,但目前还未得出定量结论,应进一步展开不同加载方式及应力路径下砂土震陷的研究。

e. 由于理论知识不足和试验设备功能限制,目前对砂土震陷的研究主要以水平二维加载为主,对三维加载引起的震陷研究较少。据少量研究发现三维震动会明显加大震陷量,因此需要进一步探究三维震陷规律并进行震陷预测。

f. 目前对净砂震陷特性的认识相对明确,但实际土体一般含有细颗粒,对含有细颗粒的砂土的震陷规律认识还不够,含细颗粒砂土震陷的计算方法有待完善。

参考文献:

- [1] STEWART J P. Documentation and analysis of field case histories of seismic compression during the 1994 Northridge, California earthquake [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2002.
- [2] STEWART J P, WHANG D H, MOYNEUR M, et al. Seismic compression of as-compacted fill soils with variable levels of fines content and fines plasticity [R]. Richmond: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, 2004.
- [3] SILVER M L, SEED H B. Volume changes in sands during cyclic loading [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1971, 97: 1171-1182.
- [4] ISHIHARA K, YAMAZAKI F. Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading [J]. Soils and Foundations, 1980, 20(1): 45-59.
- [5] ISHIHARA K, YASUDA S. Sand liquefaction under random earthquake loading condition [C] // Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome: ASCE, 1973: 329-338.
- [6] SAWADA S, TSUKAMOTO Y, ISHIHARA K. Residual deformation characteristics of partially saturated sandy soils subjected to seismic excitation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(2): 175-182.
- [7] PYKE R M, CHAN C K, SEED H B. Settlement of sands under multidirectional shaking [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(4): 379-398.
- [8] CHANG W. Evaluation of undrained shear strains in multi-directional horizontal shaking [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 906-920.
- [9] 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 Xiaoming, SUN Yue, MENG Shangjiu. 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))
- [10] TOKIMATSU K, SEED H B. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(8): 861-878.
- [11] PRADEL D. Procedure to evaluate earthquake-induced settlements in dry sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 364-368.
- [12] STEWART J P, WHANG D H. Simplified procedure to estimate ground settlement from seismic compression in compacted soils [C]//Proceedings 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering. Christchurch; New Zealand; [s. n.], 2003: 1-8.
- [13] SEED H B, MARTIN G R, PYKE R M. Effect of multidirectional shaking on pore pressure development in sands [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(1): 27-44.
- [14] ISHIHARA K, NAGASE H. Multi-directional irregular loading tests on sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1988, 7: 201-212.
- [15] MATSUDA H, SHINOZAKI H, OKADA N, et al. Effects of multi-directional cyclic shear on the post-earthquake settlement of ground [C]//13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver B. C. : [s. n.], 2004: 1-10.
- [16] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLIDIS T. On the influence of the polarization and the shape of the strain loop on strain accumulation in sand under high-cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(1): 14-28.
- [17] WHITMAN R V, de PABLO P O. Densification of sand by vertical vibrations [M]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology School of Engineering, 1968.
- [18] 陈青生, 熊浩, 高广运. 地震荷载特征及其对砂土震陷影响试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1483-1489. (CHEN Qingsheng, XIONG Hao, GAO Guangyun. Experimental study on properties of seismic compression in sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1483-1489. (in Chinese))
- [19] 孟凡超, 袁晓铭, 孙锐, 等. 土体永久变形中地震动有效荷载研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 170-178. (MENG Fanchao, YUAN Xiaoming, SUN Yue, et al. Study on effective loads of ground motion for permanent deformation of soils [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5): 170-178. (in Chinese))
- [20] POBLETE M, WICHTMANN T, NIEMUNIS A, et al. Accumulation of residual deformations due to cyclic loading with multidimensional strain loops [C]//5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Santiago; University of Californiasanta Cruz, 2011: 1-12.
- [21] YOUNG T L. Compaction of sands by repeated shear straining [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 709-725.
- [22] BOULANGER R W, SEED R B. Liquefaction of sand under bidirectional monotonic and cyclic loading [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(12): 870-878.
- [23] 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.
- [24] DUKU P M, STEWART J P, WHANG D H, et al. Volumetric strains of clean sands subject to cyclic loads [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 134(8): 1073-1085.
- [25] MATSUDA H, THANH N T, ISHIKURA R. Prediction of excess pore water pressure and post-cyclic settlement on soft clay induced by uni-directional and multi-directional cyclic shears as a function of strain path parameters [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 75-88.
- [26] MULILIS J P, ARULANANDAN K, MITCHELL J K, et al. Effects of sample preparation on sand liquefaction [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(2): 91-108.
- [27] CHANEY R C, DEMARS K R, VAID Y P, et al. Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand [J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(3): 187-195.
- [28] DOBRY R M A L. Discussion to "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquake" by H. B. Seed and "Liquefaction potential: science versus practice" by R. B. Peck [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1980, 106(6): 720-724.
- [29] KAMMERER A M, PESTANA J M, SEED R B. Behavior of monterey 0/30 sand under multidirectional loading conditions [C]//Geomechanics: Testing, Modeling and Simulation. Boston; ASCE, 2005: 154-173.
- [30] TOKIMATSU K, SEED H B. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(8): 861-878.
- [31] STEWART J P, YEE E, DUKU P M. Volume change in unsaturated soils from cyclic loading [R]. Reston: National Earthquake Hazards Reduction Program, External Research Program, 2009.
- [32] WHANG D H, MOYNEUR M S, DUKU P, et al. Seismic compression behavior of nonplastic silty sands [C]//Proceedings of An International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Trento; Balkema, 2005: 257-263.

(下转第 14 页)

- 球科学(中国地质大学学报),1995,20(4):383-388.
(YAO Zujin. Paleoclimate record of geothermal water for last 0.03Ma in North China[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences),1995,20(4):383-388. (in Chinese))
- [61] 刘存富,王佩仪,周炼. 河北平原地下水氢、氧、碳、氯同位素组成的环境意义[J]. 地学前缘,1997,4(1/2):267-274. (LIU Cunfu, WANG Peiyi, ZHOU Lian. The environment significance of H, O, C and Cl isotopic composition in groundwater of Hebei Plain[J]. Earth Science Frontiers,1997,4(1/2):267-274. (in Chinese))
- [62] CHEN Z Y, QI J X, XU J M, et al. Paleoclimatic interpretation of the past 30 ka from isotopic studies of the deep confined aquifer of the North China Plain[J]. Applied Geochemistry,2003,18(7):997-1009.
- [63] 马金珠. 从民勤盆地地下水的惰性气体中提取晚更新世以来古气温变化信息[C]//中国地理学会2006年学术年会论文摘要集. 北京:中国地理学会,2006.
- [64] HEATON T H E, TALMA A S, VOGEL J C. Origin and history of nitrate in confined groundwater in the Western Kalahari[J]. Journal of Hydrology,1983,62(1/2/3/4):243-262.
- [65] AESCHBACH-HERTIG W, BEYERLE U, HOLOCHER J, et al. Excess air in groundwater as a potential indicator of past environmental changes[C]//Study of Environmental Change Using Isotope Techniques. Vienna: IAEA, 2002: 174-183.
- [66] KULONGOSKI J T. Noble gases dissolved in groundwater: techniques for exploring groundwater dynamics and paleoclimate variability [D]. San Diego: University of California,2003.
- [67] WILSON G B, MCNEILL G W. Noble gas recharge temperatures and the excess air component[J]. Applied Geochemistry,1997,12(6):747-762.
- [68] ZHU C, KIPFER R. Noble gas signatures of high recharge pulses and migrating jet stream in the late Pleistocene over Black Mesa, Arizona, United States[J]. Geology,2010,38(1):83-86.
- [69] ROZANSKI K, FLORKOWSKI T. Krypton-85 dating of groundwater[C]//Isotope Hydrology 1978 (II). Vienna: IAEA,1979:949-961.
- [70] LOOSLI H H. A dating method with ^{39}Ar [J]. Earth Planet Science Letters,1983,63(1):51-62.
- [71] LOOSLI H H, LEHMANN B E, BALDERER W. Argon-39, argon-37 and krypton-85 isotopes in stripa groundwaters [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989,53(8):1825-1829.
- [72] 廖小青,刘贯群,袁瑞强,等. 同位素测年新发展: ^{81}Kr 测定古老地下水年龄理论[J]. 工程勘察,2006(2):31-33. (LIAO Xiaoqing, LIU Guangqun, YUAN Ruiqiang, et al. Advance in isotope dating: principle of ^{81}Kr dating for old groundwaters [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2006(2):31-33. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-09-05 编辑:骆超)
- +++++
- (上接第7页)
- [33] GHAYOOMI M, KHOSRAVI A, MCCARTNEY J S, et al. Challenges in prediction earthquake-induced settlements of partially saturated sands [C]//Proceedings of GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling and Design. Orlando: ASCE,2010: 3052-3061.
- [34] GHAYOOMI M, MCCARTNEY J S, KO H. Empirical methodology to estimate seismically induced settlement of partially saturated sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(3):367-376.
- [35] NIEMUNIS A, WICHTMAN T, TRIANTAFYLIDIS T. A high-cycle accumulation model for sand [J]. Computers and Geotechnics,2005,32(4):245-263.
- [36] 吴世明. 土动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [37] 陈青生,高广运, GREEN R, 等. 砂土震陷分析中多维地震荷载等效循环分析周数计算[J]. 世界地震工程,2010,26(增刊1):6-12. (CHEN Qingsheng, GAO Guangyun, GREEN R, et al. Computation of equivalent number of uniform strain cycles seismic compression of sand subjected to multi-directional earthquake loading [J]. World Earthquake Engineering,2010,26(Sup1):6-12. (in Chinese))
- [38] SEED H B, IDRISS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1983,109(3):458-482.
- [39] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division,1971,97(9):1249-1273.
- [40] 陈青生,熊浩,高广运. 基于 R-N 非线性疲劳损伤累积模型的砂土震陷计算方法[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):2203-2211. (CHEN Qingsheng, XIONG Hao, GAO Guangyun. Procedure for evaluating seismic compression sands based on R-N cumulative damage fatigue nonlinear model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(12):2203-2211. (in Chinese))
- [41] 殷宗泽,钱家欢. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- (收稿日期:2015-10-28 编辑:骆超)