

DOI: 10.11779/CJGE202003001

高地地震烈度区深厚覆盖砂层液化研究

蔡正银¹, 吴诗阳¹, 武颖利¹, 张世殊²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 成都勘察设计院有限公司, 四川 成都 610027)

摘要: 砂土的振动液化受很多因素的影响, 埋深(应力状态)就是一个非常重要的影响因素。为了研究深埋砂层地基的动力反应和液化规律, 进行了离心机振动台试验。针对离心机振动台无法模拟深厚土层的问题, 设计了模拟上覆土层荷载的加载气囊, 通过控制气囊压力, 可以模拟不同埋深砂层地基的地震反应情况, 从而满足了深埋地基应力相似条件。试验共设置了4种工况, 分别对应两种埋深和两种振动频率。研究揭示了不同埋深条件下砂土地基中的加速度反应规律和超静孔隙水压力反应规律, 探讨了振动频率对深埋砂土地基振动特性的影响, 为深埋砂土地基地震液化判别提供了较好的研究手段。

关键词: 深厚覆盖层; 离心振动台试验; 砂土地基; 加速度; 超静孔压

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)03-0405-08

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、构筑物与地基基础离心模拟技术方面的研究工作。E-mail: zycail@nhri.com。

Liquefaction of deep overburden layers in zones with high earthquake intensity

CAI Zheng-yin¹, WU Shi-yang¹, WU Ying-li¹, ZHANG Shi-shu²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610027, China)

Abstract: The vibrating liquefaction of sandy soils is subjected to various factors, among which, the embedment depth (stress state) is a very important factor. The centrifugal shaking table tests are carried out to investigate the dynamic response and liquefaction rules of deep sand layers. For the problem that the deep soil layers cannot be simulated by the centrifugal shaking table, a loading air bag to simulate loads of overburden layers is designed. By controlling the pressure in the air bag, the seismic response situations of sandy layers with different embedment depths can be simulated. Accordingly, the stress similarity conditions of deep foundations are satisfied. Four kinds of test conditions are arranged, which respectively correspond two kinds of embedment depths and two kinds of vibrating frequencies. The response rules of acceleration and excess pore water pressure in the sand foundation with various embedment depths are released, and the influences of the vibrating frequency on the vibrating characteristics of deep sand foundations are discussed. It may provide a satisfactory way for judging the seismic liquefaction of deep sand foundations.

Key words: deep overburden layer; centrifugal shaking table test; sand foundation; acceleration; excess pore water pressure

0 引言

砂土液化是指在外荷载(特别是地震动荷载)作用下, 地基土层内的孔隙水压力急剧增加, 有效应力相应地减小, 当孔隙水压力等于上覆土压力时, 砂土不再具有抗剪强度, 从而引起土体破坏。地震液化严重影响水工建筑物的安全, 特别是在我国西南部地震高发区, 地质条件复杂, 地震烈度高, 对于存在深厚覆盖层的砂土地基, 其地震液化的认识还很模糊。从现有的规范来看, 上覆土层超过一定的厚度就无法使用, 因此开展高地地震烈度区深厚覆盖砂层地震液化评判方法研究具有非常重要的工程应用前景和理论价

值。

对于砂土动力特性和振动液化的研究, 往往采用动三轴仪、空心圆柱扭剪仪、共振柱仪等进行室内试验。但这些试验只能研究土体单元特性, 不能反映地基的整体情况。振动台的发展, 让大尺寸试验成为可能, 但常规振动台无法模拟深厚土层的应力状态, 很难反应真实的情况。

离心机振动台模型试验能克服地面振动台试验的缺点, 在 n 倍重力加速度下, 可以真实地再现与原

收稿日期: 2018-09-20

修改稿返回日期: 2019-10-30

型相等或相近的应力水平,并可使模型与原型的应变相等、变形相似、破坏机制相同,是研究地震问题较为有效的方法。早在20世纪40年代,前苏联就率先在离心机上开展了动力离心模型试验。之后,美国、英国、日本也进行了类似的动力离心模型试验研究。到20世纪80年代,用离心机模拟地震问题开始在世界范围内逐渐开展起来^[1]。Victor等^[2]通过11组动力离心模型试验,研究了水平砂土地基和极缓砂土边坡的液化和水平流滑问题,研究指出峰值加速度与频率决定了土层的液化深度和侧向位移,低频率比高频率更易导致变形。Ahmed等^[3]利用层状模型箱研究了饱和密实砂层的地震反应,指出当剪应变低于0.2%时,土层割线模量减少而阻尼增加。当剪应变超过0.2%时,土层出现剪胀趋势,割线模量和阻尼都大幅度减小。Brennan等^[4]通过动力离心模型试验研究了多种土层在循环往复荷载下的动力特性和应力应变关系,深刻剖析了离心模型试验得到的剪切模量和阻尼比的影响因素,发现在动力离心模型试验得到的剪切模量比阻尼比更可靠。Riccardo等^[5]同样通过动力离心模型试验研究了土体的动力特性,并提出了通过非线性模拟来得到剪切模量和阻尼比的方法。还有一些学者将本构模型和动力离心模型试验结合,预测土层液化和沉降等^[6]。

国内在动力离心模型试验上起步较晚,但已取得不少的成果。刘晶波等^[7-8]采用叠环式模型箱进行离心机振动台试验,研究砂土地基自由场地和黏土地基的地震反应特性,发现不同类型的地基中加速度反应存在差异,在低频部分加速度峰值放大系数从模型底部到顶部逐渐增大。李京爽等^[9]进行了砂土自由场地水平和垂直振动离心模型试验,发现水平和竖向同时激振与单向分别激振两种情况下,砂土地基有不同的动力反应,建议要考虑耦合振动对砂土地基动力特性的影响。张雪东等^[10]进行了饱和砂土地基液化离心机振动台试验,研究了振动液化过程中砂土地基的动力响应沿深度的变化规律,发现土层在经历液化过程后其抗液化能力显著提高,此外液化土层与非液化土层之间形成反射界面,对下部土层的动力响应有显著影响。梁孟根等^[11]对饱和中细砂地基液化进行离心机振动台试验,得到土体不同深度范围内加速度、超静孔隙水压力随时间的发展规律。李博等^[12]通过离心机振动台试验研究地震作用下各向异性地基的动力特性,指出砂土的内在各向异性对砂土的动力特性影响很大。周燕国等^[13]利用振动台离心模型试验研究了含黏粒砂土地基液化灾变特性,指出含黏粒砂土地基比纯砂地基孔压消散时间更长、沉降量更大。苏栋等^[14-15]通过离心机振动台试验研究了地震历史对砂土抗液化

性能的影响,发现土体的运动变形与孔隙水压力的发展密切相关,且较小地震更有利于增强砂土颗粒之间的咬合及结构的稳定性,极大地提高了其抗液化能力。

上述研究基本都是针对水平自由地基,目前鲜有学者研究深厚覆盖层的砂土动力特性和液化规律,主要是由于离心机振动台本身的能力不足以模拟深厚土层。本文采用浙江大学离心机及其振动台系统,并设计了一套离心模型气囊加载装置,来模拟上覆土层荷载,以保证研究土层的应力相似。以硬梁包水电工程坝基深厚覆盖砂层为研究对象,进行了模拟不同覆盖层厚度的离心模型试验,揭示了深厚覆盖砂层的加速度反应与孔压变化规律,探讨了地基的液化可能性。

1 研究背景与试验条件

1.1 硬梁包梯级水电站工程概况

硬梁包梯级水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县冷碛镇境内,为《四川省大渡河干流水电规划调整报告》推荐22级方案中的第13个梯级电站,坝(闸)址距上游泸定县城约25 km,距下游石棉县城约100 km,距成都市约300 km。坝(闸)址处控制流域面积59450 km²,多年平均流量893 m³/s。设计正常蓄水位1246 m,装机容量1200 MW。

坝(闸)址50 a超越概率10%的基岩水平地震动峰值加速度为260g,相应的地震基本烈度为Ⅷ度,100年超越概率2%的基岩水平地震动峰值加速度为573g。汶川“5·12”地震后,原地震安全性评价单位又提供了100 a超越概率1%的基岩水平地震动峰值加速度为680g。

鉴于硬梁包水电工程处于高地震烈度区,坝基深厚覆盖层的地震安全评价成为一个重要的工程问题。由坝址地质勘察发现,坝址深厚覆盖层中有一层砂土层,平均厚度18.79 m,平均埋深30~60 m。该层砂土天然干密度为1.45~1.74 g/cm³,平均1.58 g/cm³。孔隙比为0.547~0.841,平均0.709,相对密度为0.54~0.80,其粒径分布曲线如图1所示。该砂土层主要为细砂,按规范初步判断具有潜在的液化可能性。

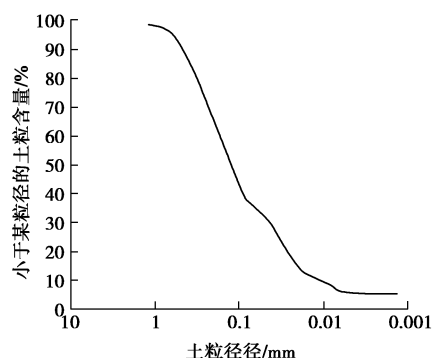


图1 砂土粒径分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of test sand

为了深入探讨地震荷载作用下该层土的动力响应和液化可能性, 进行了离心机振动台模型试验。

1.2 试验条件

考虑原型坝基土体的特性及埋深特点, 结合离心机振动台的能力, 对现场工程条件进行了适当的简化和假设。共设计了 2 种有效上覆压力, 分别模拟 10 m 埋深和 30 m 埋深, 砂土层的厚度均为 20 m。模拟的峰值加速度为 0.4g, 相当于震级 7.5 级。采用两种振动频率, 分别为 2 Hz 和 3 Hz, 以此研究地震频率对地基动力特性的影响。

试验用土均是按图 1 的粒径分布曲线配制, $D_{50}=0.14\text{ mm}$, $C_u=14.2$, 孔隙比控制在 0.7 左右, 土层的干密度为 1.64 g/cm^3 (根据室内固结试验, 模拟现场应力状态确定)。模型制备前, 先将土样制成饱和泥浆, 然后进行分层固结。

2 试验设备与模型的量测

2.1 试验设备与模型比尺

为了模拟超强地震条件, 采用浙江大学 ZJU-400 离心机及其配套的振动台系统。该机最大离心加速度为 150g, 容量 400 g·t, 吊篮有效容积为 1.5 m×1.2 m×1.5 m。离心机专用振动台采用电液伺服控制方式, 可在 100g 下正常工作。振动台最大加速度为 40g, 频率范围为 10~200 Hz, 最大负载为 500 kg。该系统配有 80 通道的动态测试系统和 40 通道的静态数据采集系统, 完全满足模型测量的需要。本次试验采用刚性模型箱, 尺寸为 77 cm×40 cm×53 cm, 一侧采用有机玻璃板, 作为模型的观测窗口。

综合考虑各方面因素, 本次试验选用的离心机加速度为 50g, 因此试验中的模型率 $n=50$, 模型与原型的相似关系见表 1。

表 1 离心模拟相似率

Table 1 Scaling factors of centrifuge modelling		
物理量	模型	原型
质量密度	1	1
振动时间	1	50
振动频率	1	1/50
加速度	1	1/50
速度	1	1
力	1	50 ²
位移	1	1/50
质量	1	50 ³
应力	1	1
应变	1	1
做功	1	1/50 ³

2.2 模型的测量与仪器布置

试验过程中需要测量砂土层振动过程中的加速度与超静孔隙水压力, 分别埋设了加速度计和孔隙水压力计, 其布置如图 2 所示。为了验证离心机振动台控制加速度, 在模型箱底板布置了一只三向加速度传感器 (A0)。为了测量砂土层中不同深度处的加速度, 在距模型箱左侧 385 mm 处沿高度自下而上布置 4 只加速度计 A1~A4, 距离顶部高度分别为 420, 320, 220, 120 mm。为了测量砂土层中不同深度处的孔隙水压力, 在距模型箱右侧 285 mm 处的土层中沿高度自下而上布置一系列孔压计 P1~P4, 各孔压计距离顶部高度分别为 420, 320, 220, 120 mm。

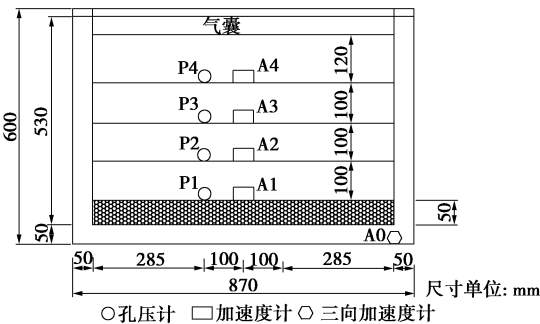


图 2 传感器布置图

Fig. 2 Arrangement diagram of sensors

本次试验选用的孔压计为 PDCR 81 型半导体应变感应膜微型孔隙水压力传感器, 该传感器由英国德鲁克公司生产, 各孔压计的参数如表 2 所示。必须说明本次离心机振动台试验主要是研究深厚覆盖层砂土地基在地震荷载作用下的液化特性, 即地基中超静孔压的发生与发展过程。超静孔压的产生与消散既与土层的排水条件有关, 也与渗透特性相关, 这就要求试验过程中要正确模拟土层的渗透特性考虑到模型土层的特性与原型土层一样, 因此模型与原型土层中流体的特性也必须一样。根据离心模型试验的相似准则, 对于渗流问题, 模型与原型的黏滞系数之比为 n 。因此本试验过程中, 选用黏度为 50 cst 的甲基硅油来模拟水, 其密度为 0.96 g/cm^3 , 无色透明。

试验选用的加速度计均为微型加速度传感器, 其中台面选用三向加速度计, 其它都为单向加速度计。各加速度传感器的率定参数如表 3 所示。

表 2 孔压计参数

Table 2 Parameters of pore water pressure transducers				
类型	编号	通道	标定系数 ($\text{mv}\cdot\text{v}\cdot\text{MPa}^{-1}$)	量程 /MPa
P1	德鲁克 229	CH8	11.819	1.5
P2	德鲁克 226	CH9	11.751	1.5
P3	德鲁克 703	CH10	23	0.7
P4	德鲁克 698	CH11	23	0.7

表 3 加速度计参数

Table 3 Parameters of acceleration transducers

类型	编号	通道	标定系数 $/(m \cdot s^{-2} \cdot 5 \mu v \cdot 5 v^{-1})$
A1	FW4520021	CH1	0.9558
A2	FW4520020	CH2	0.9642
A3	FZ0370029	CH3	1.027
A4	FZ0370023	CH4	1.01

2.3 上覆土层荷载的模拟

本次试验需模拟的最大覆盖层厚度为 30 m，加上砂土层自身的厚度 20 m，总的土层厚度为 50 m。按设置的模型比尺 1：50，模型土层的厚度为 1 m，而模型箱的高度只有 53 cm，根本无法实现。此外，对于常规离心机振动台试验，由于振动台的载重及激振能力的限制，很难模拟这样深厚的覆盖层。为了解决这个问题，设计了一套离心模型试验气囊加载装置，如图 3 所示，利用气囊来模拟上覆土层的荷载作用，从而实现模型和原型的应力相似。该加载装置主要由气囊、反力结构和气源组成，气源安放在离心机室外部，通过气压旋转接头和管线与模型箱连接。利用这种装置不仅可以很方便地将气囊压力施加在研究土体的表面，并且不增加额外的重量，还可以根据模拟土层的厚度随时调节气囊的压力，更重要的是土体表面的受力非常均匀。

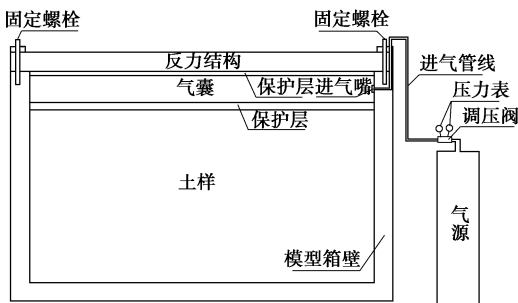


图 3 气囊加载装置示意图

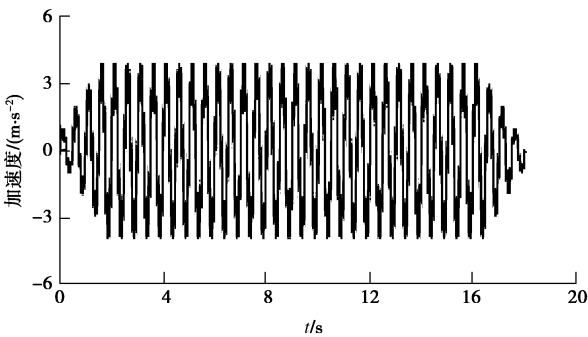
Fig. 3 Sketch of airbag loading devices

本次试验过程中为了实现两种不同的土层埋深条件(10 m 埋深和 30 m 埋深)，分别控制两种气囊压力。当气囊气压 70 kPa 时，50g 条件下模拟的覆盖层厚度约为 10 m。当气囊气压 200 kPa 时，50g 条件下模拟的覆盖层厚度约为 30 m。

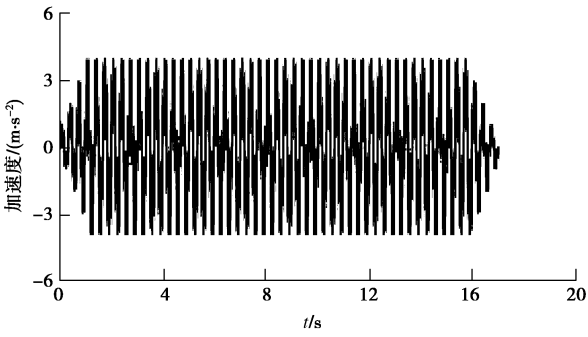
3 地震荷载的模拟

试验中选用正弦波作为振动台试验的地震动输入，对应原型峰值加速度 $PGA=0.4g$ ，震级 $M_w=7.5$ 级。为了研究地震频率对砂土层振动液化的影响，选取 2 Hz 和 3 Hz 两种频率，输入波形时程如图 4 所示。其中，2 Hz 波型振动 30 次，3 Hz 波型振动 45 次，对应

的有效振动历时均为 15 s。必须指出，上述均为原型参数，对于离心模型，按模型比尺 1：50，相应的模型峰值加速度为 20g，频率为 100 Hz 和 150 Hz，振动历时均为 0.3 s。



(a) 2 Hz



(b) 3 Hz

图 4 振动波形示意图

Fig. 4 Waveform of vibration

4 覆盖层砂土地基振动加速度反应

4.1 覆盖层砂土地基加速度反应

地震波加速度值是评价地震反应的首要依据，也是评价地震危害的指标之一。地基在遭受地震荷载作用下，不同深度处加速度反应是研究地震波对土层影响的重点。限于篇幅仅给出频率 2 Hz 下 10 m 埋深和 30 m 埋深处的加速度反应情况，如图 5 和图 6 所示，试验结果显示频率 3 Hz 下的地震反应特性与 2 Hz 条件下基本一致。

由图 5 可知，10 m 埋深下，不同埋深处的振动加速度反应差异很大。在底部加速度计 A1 处，加速度与台面加速度相差不大，没有出现很大的波动。越往上，加速度变化越来越大，总体表现为先增大，后衰减的趋势。在最上部加速度计 A4 处，一开始加速度有所增加，后来急剧减小。很显然，从下到上土体的振动加速度整体表现为逐步率减。

由图 6 可知，30 m 埋深下的加速度时程曲线整体上没有出现很大的波动，加速度计 A1、A2、A3 处土体的振动加速度整体出现缓慢增大的趋势，而加速度

计 A4 处的振动加速度则有所减小。通过比较图 5 和图 6 可以看出, 对于不同埋深, 土体加速度的变化趋势是不同的, 甚至是相反的: 在较浅的埋深下, 加速度短暂增加达到峰值后逐渐减小; 在较深的埋深下, 加速度呈现一直增加的趋势, 直至达到峰值。

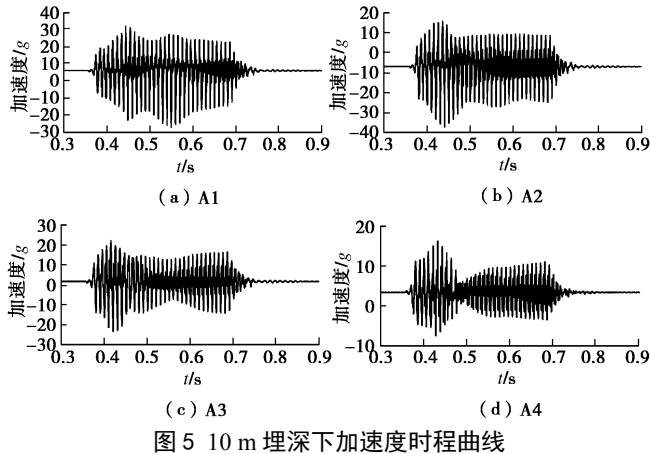


图 5 10 m 埋深下加速度时程曲线

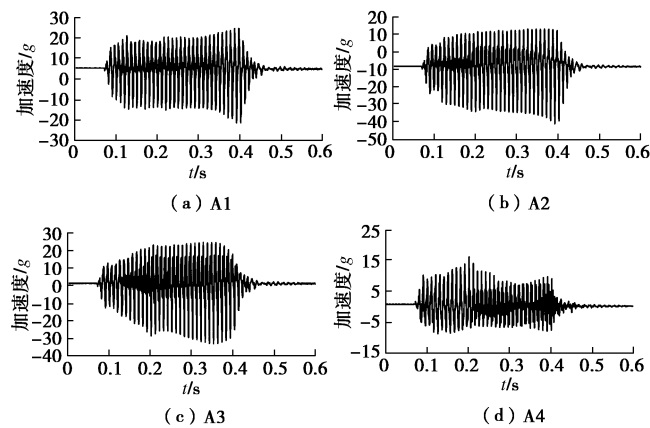


图 6 30 m 埋深下加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration curve under embedment depth of 30 m

4.2 不同频率对土层振动加速度的影响

Victor 等^[2]认为频率对孔压、液化层厚度、加速度、侧向变形、剪应变、沉降都有影响, 可见频率在液化分析中的重要性。选取加速度计 A2、A3 作为研究对象, 给出不同频率不同埋深下的加速度时程曲线, 如图 7 和图 8 所示。

从图 7 中可以看出, 在 10 m 埋深下, 不同频率对应的加速度随时间变化规律是相似的。但在振动的开始, 3 Hz 比 2 Hz 的加速度幅值要大, 随后加速度出现衰减, 并且 3 Hz 衰减的程度比 2 Hz 要大, 这与 Youd 等^[16]认为高频率的运动在土层传播中会更快衰减是一致的。从图 8 中可以看出, 在 30 m 埋深下, 加速度时程变化规律与 10 m 埋深截然相反。在 2 Hz 振动下, 从开始到振动结束, 加速度都在缓慢增长, 而在 3 Hz 下, 加速度则在慢慢衰减。因此, 在埋深较

大的土层中, 加速度会因振动频率的不同产生不同的变化规律, 或增大或减小。

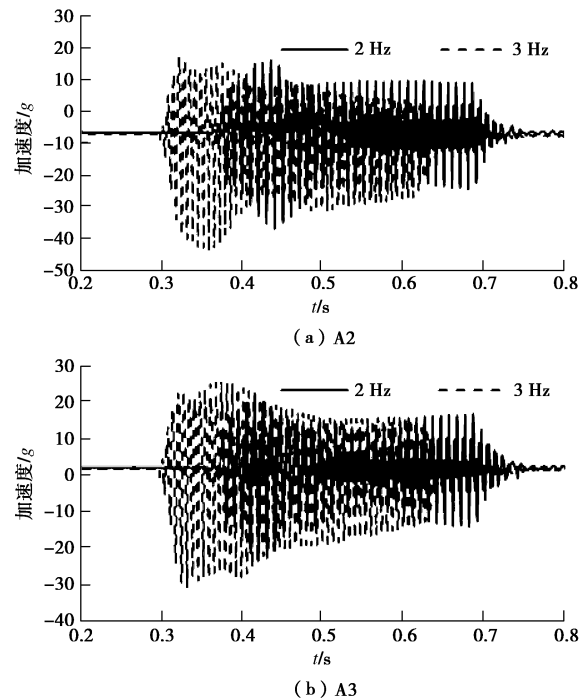


图 7 10 m 埋深下加速度曲线

Fig. 7 The acceleration curve embedment depth of 10 m

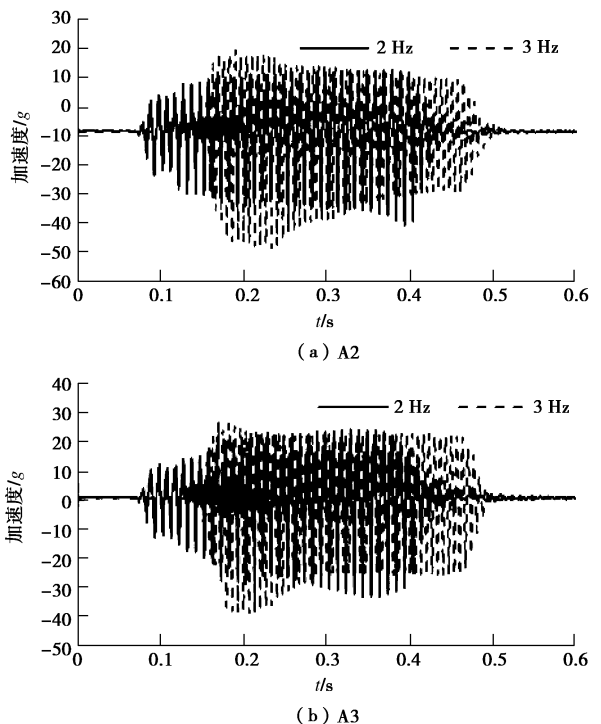


图 8 30 m 埋深下加速度曲线

Fig. 8 Acceleration curve under embedment depth of 30 m

4.3 加速度峰值衰减系数

试验得到的 10 m 埋深和 30 m 埋深沿纵向加速度峰值衰减系数分别如图 9 和图 10 所示。加速度峰值衰减系数取为土层中各测量传感器与台面传感器加速度

绝对值的比值。

从图9和图10中可以看出在较浅的埋深处,不同频率下,加速度峰值衰减系数变化规律相似,而在较深的埋深处,不同频率下加速度峰值衰减系数变化出现一定差异,2 Hz振动时是先显著增加后逐渐减小,3 Hz振动时基本上都呈衰减的规律。一些学者指出,地震强度越大,地表加速度衰减越明显,可能是由于地震强度增加使土层剪应变水平增加,剪切模量降低更加迅速,阻尼比增加导致^[17-19],这和本试验结果是相一致的。

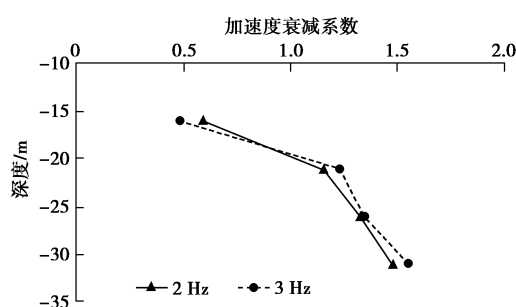


图9 10 m埋深下土层加速度峰值衰减系数

Fig. 9 Attenuation coefficient of acceleration peak in 10 m-embedded layer vs. depth

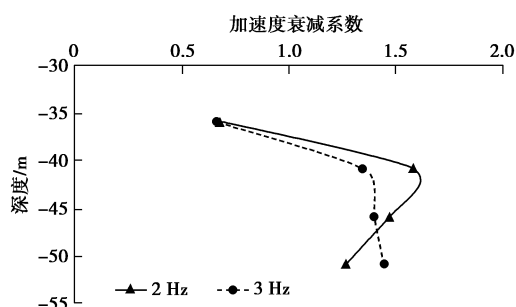


图10 30 m埋深下土层加速度峰值衰减系数

Fig. 10 Attenuation coefficient of acceleration peak in 30 m-embedded layer vs. depth

5 覆盖层砂土地基振动超静孔压反应

5.1 覆盖层砂土地基超静孔压反应曲线

图11和图12是试验得到的10 m埋深和30 m埋深下砂土地基土体的超静孔压时程曲线。必须指出试验过程中由于孔压计P2损坏,未能列出。从图11和图12可以发现,各种情况下地基土层中的超静孔压随着时间快速增长,短时间内就达到峰值,在振动结束后依然保持一个稳定的超孔静压值,但在较大的埋深下,超静孔压在振动结束后还会出现缓慢增长的趋势。不同频率下,超静孔压增长的规律是一致的,但在相同的埋深处,较低频率的振动会产生较大的超静孔压,也即较低频率更利于超静孔压积累,更容易导致土体

液化,这与Victor^[2]研究结果相似。因此,在地基遭受地震荷载时,并不是频率越高更容易导致地基土液化,反而是较低的频率或者是最优频率会产生更大的危害,这个最危险的频率范围还需通过大量试验进行论证。通过比较图11和图12发现,从单一频率超静孔压随深度增长过程发现,不同埋深下的超静孔压增长情况不同,在较浅的埋深条件下,超静孔压随着深度的增加是先减小后又逐渐增加;在较深的埋深条件下,超静孔压是先增大后又稍微减小,在更深处则认为超静孔压基本保持一致,因为土层越深,土体受到的应力越大,土体越密实,越不利于孔压积累。

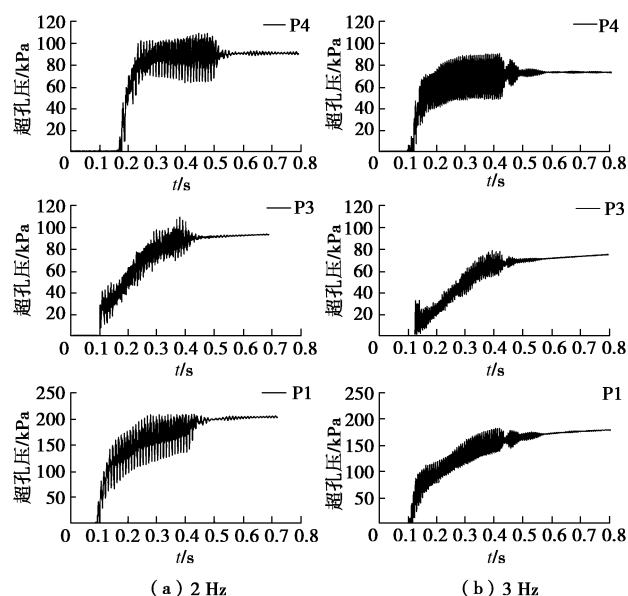


图11 10 m埋深下的超静孔压时程曲线

Fig. 11 Excess pore pressure curve under embedment depth of 10 m

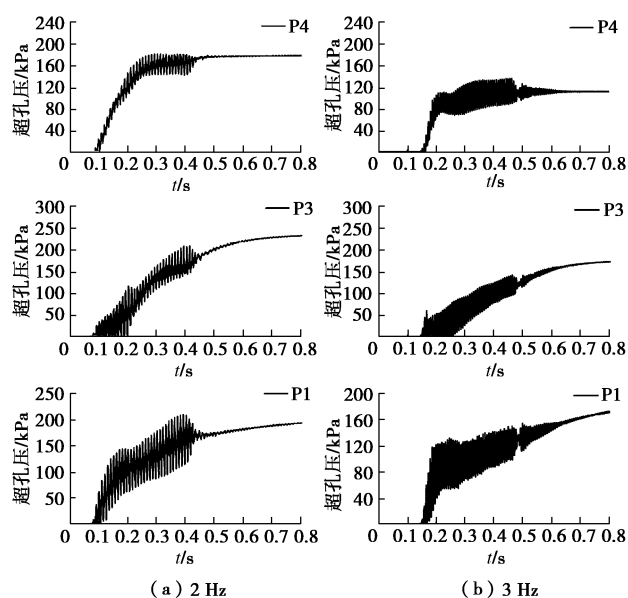


图12 30 m埋深下的超静孔压时程曲线

Fig. 12 Excess pore pressure curve under embedment depth of 30 m

5.2 超静孔压比随深度变化

图 13 是试验得到的不同埋深下超静孔压比随深度的变化规律, 此处的超静孔压比是指试验得到的超静孔压与上覆土层竖向有效应力的比值。从图中可以发现超静孔压比随深度的增加变化较为复杂, 在 10~30 m 范围内, 自下而上超静孔压比先逐渐减小后又逐渐增大, 在 16 m 深度处超静孔压比达到 0.84 (对应 2 Hz), 接近液化。因此认为浅层土 0~16 m 范围内发生液化的可能性较大。但在 30~50 m 范围内, 超静孔压比自下而上先会出现小幅度的增长, 然后逐渐减小, 土层越深, 超静孔压比越小, 土层越不容易液化, 这是因为高围压下, 土体发生剪缩, 变得更加致密, 不容易积累超静孔压。从图 13 还可以看出, 不同频率下, 超静孔压比随深度变化的规律是相似的, 但低频率比高频率的超静孔压比大, 土体更容易液化, 这和加速度反应结论一致。

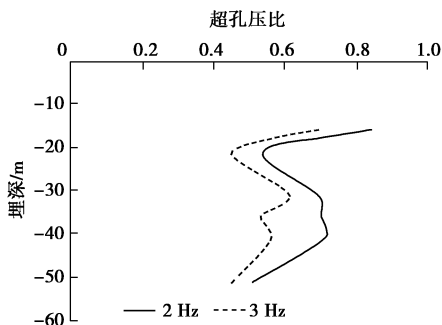


图 13 不同埋深下的超静孔压比

Fig. 13 Excess pore pressure ratio vs. depth

6 结 论

本文通过振动台离心模型试验, 研究了上覆深厚砂层的动力与液化特性。初步结论如下:

(1) 离心模型试验中可以通过气囊加载装置来模拟上覆土层的荷载, 从而实现深埋土层应力状态的相似模拟, 为深埋土层振动试验提供了较好的模拟手段。

(2) 在较浅的埋深下, 土体振动加速度在达到峰值后出现一定程度的衰减, 不同频率下加速度变化规律一致, 但高频率会导致加速度峰值增大, 同时衰减程度也随之增大; 在较深的埋深下, 各位置处土体的加速度主要呈现增长趋势。

(3) 振动过程中超静孔压随着深度的增加不断增加, 但到达一定深度后, 超静孔压增长缓慢或已不明显; 超静孔压比随着深度的增加先逐渐减小后又逐渐增大, 然后到达一定深度后, 逐渐减小。2 Hz 频率下 0~16 m 范围内超静孔压比基本都在 0.84 以上, 很容易导致液化。而在 30~50 m 覆盖中, 其值基本维持在 0.4~0.6 中, 没有液化的可能性。

(4) 振动频率对超静孔压的发展规律影响不大, 但较低的频率更容易积累孔压, 也更容易导致液化。

参考文献:

- [1] 陈正发, 于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 4026 - 4032. (CHEN Zheng-fa, YU Yu-zhen. A review on development of geotechnical dynamic centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 4026 - 4032. (in Chinese))
- [2] VICTOR M T U, RICARDO D. Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(12): 1195 - 1206.
- [3] AHMED E, YANG Z H, LAI T, et al. Dynamic response of saturated dense sand in laminated centrifuge container[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(5): 598 - 609.
- [4] BRENNAN A J, THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G. Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(12): 1488 - 1497.
- [5] RICCARDO C, GIULIA M B V. Evaluation of soil dynamic properties in centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(7): 850 - 859.
- [6] PETER M B, SUNG S P, Michael Beaty, et al. Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**: 193 - 211.
- [7] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗刚, 等. 砂土地基自由场离心机振动台模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, **49**(9): 31 - 34. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, WANG Zong-gang, et al. Dynamic centrifuge model test of an unconfined sandy foundation[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 2009, **49**(9): 31 - 34. (in Chinese))
- [8] 刘晶波, 赵冬冬, 张小波, 等. 地基自由场离心机振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 980 - 987. (LIU Jing-bo, ZHANG Dong-dong, ZHANG Xiao-bo, et al. Dynamic centrifuge model tests on an unconfined soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 980 - 987. (in Chinese))
- [9] 李京爽, 侯瑜京, 徐泽平, 等. 砂土自由场地基水平垂直振动离心模拟试验[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 208 - 214. (LI Jing-shuang, HOU Yu-jing, XU Ze-ping, et al. Centrifugal modeling of seismic response of free-field sand ground under horizontal and vertical earthquakes[J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 208 - 214. (in Chinese))
- [10] 张雪东, 侯俞京, 梁建辉, 等. 饱和砂土地基液化离心机振动台模型试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(增刊 2): 105 - 111. (ZHANG Xue-dong, HOU Yu-jing, LIANG Jian-hui, et al. Dynamic centrifuge tests on liquefaction of saturated sand foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(S2): 105 - 111. (in Chinese))
- [11] 梁孟根, 梁 甜, 陈云敏. 自由场地液化响应特性的离心机振动台试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, **47**(10): 1805 - 1814. (LIANG Meng-gen, LIANG Tian, CHEN Yun-min. Centrifuge shaking table modeling of liquefaction characteristics of free field[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, **47**(10): 1805 - 1814. (in Chinese))
- [12] 李 博, 王艳茹, ZENG Xiang-wu. 地震作用下各向异性地基的动力响应[J]. 自然灾害学报, 2013, **22**(2): 205 - 212. (LI Bo, WANG Yan-ru, ZENG Xiang-wu. Dynamic response of anisotropic under earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, **22**(2): 205 - 212. (in Chinese))
- [13] 周燕国, 梁 甜, 李永刚, 等. 含黏粒砂土地基液化离心机振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1650 - 1658. (ZHOU Yan-guo, LIANG Tian, LI Yong-gang, et al. Dynamic centrifuge tests on liquefaction of clayey sand ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1650 - 1658. (in Chinese))
- [14] 苏 栋, 李相崧. 地震历史对砂土抗液化性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(10): 1815 - 1818. (SU Dong, LI Xiang-song. Centrifuge investigation on effects of seismic history on resistance of sand to liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(10): 1815 - 1818. (in Chinese))
- [15] 苏 栋, 李相崧. 砂土自由场地地震相应的离心机试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(2): 166 - 170. (SU Dong, LI Xiang-song. Centrifuge modeling of seismic response of free sand ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **26**(2): 166 - 170. (in Chinese))
- [16] YOU D T L, IDRIS I M, ANDRUS R D, et al. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(10): 817 - 833.
- [17] 曹 杰, 韩黎明, 冯昌明, 等. 软弱土层自由场动力离心模型试验[J]. 长江科学院院报, 2012, **29**(2): 78 - 82. (CAO Jie, HAN Li-ming, FENG Chang-ming, et al. Dynamic centrifuge tests on free-field response of soft soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, **29**(2): 78 - 82. (in Chinese))
- [18] 陈国兴, 庄海洋, 程绍革, 等. 土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验: 试验方案设计[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(6): 178 - 183. (CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, et al. A large scale shaking table test for dynamic soil-metro tunnel interaction: test scheme[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(6): 178 - 183. (in Chinese))
- [19] 陈继化, 陈国兴, 史国龙. 深厚软弱场地地震反应特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, **24**(2): 132 - 138. (CHEN Ji-hua, CHEN Guo-xing, SHI Guo-long. Research on seismic response characteristics of sites with deep and soft soils[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, **24**(2): 132 - 138. (in Chinese))