

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221130004

冲击荷载下层状饱和和无粘性土动孔压发展模式研究*

金丹丹^{1,2}, 施展², 王炳辉³, 张雷³

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 3. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 为揭示饱和和无黏性土层在冲击荷载作用下动孔压发展模式及其受土层条件的影响, 基于自主研发的冲击荷载加载台装置, 开展了不同土层条件层状饱和土冲击试验, 对动孔压发展特征及土体沉降等进行了分析。结果表明: 冲击荷载作用下, 无粘性饱和土体动孔压发展呈明显两阶段, 即瞬态响应和稳态响应阶段, 其中稳态响应阶段动孔压发展又经历缓慢下降及快速下降两过程。单层土情形下, 饱和砂土在冲击荷载后动孔压发生骤增, 随着粒径的增大, 动孔压峰值越大, 但其消散用时则随粒径的增大而减小; 双层土情形下, 动孔压稳态响应阶段因上下土层渗透系数变化, 在其下层土动孔压下降过程产生明显变化; 当含有相对弱透水夹层时, 受弱透水层影响, 各测点动孔压下降段几乎在同一时刻均出现明显转折平台, 使其下降的速率明显变小, 且该现象弱透水层以上土体较其下部土体更为显著; 含夹层时, 试验过程出现明显非均匀分布的“水膜”, 最大厚度可达2 cm左右。同时, 每次冲击荷载下均伴随明显的土体沉降, 随着冲击次数增加, 土层沉降变化量逐渐减小。

关键词: 冲击荷载; 饱和层状砂土; 弱透水夹层; 动孔压; 土体沉降

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0442-08

Study on the Development Mode of Dynamic Pore Pressure in Layered Saturated Non-Cohesive Soil Under Impact Loading

JIN Dandan^{1,2}, SHI Zhan², WANG Binghui³, ZHANG Lei³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Heilongjiang, Harbin 150080; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China)

Abstract: This study aims to uncover the development modes of dynamic pore pressure in saturated non-cohesive soil layers under impact loading and its variation due to soil layer conditions. Impact tests were conducted on layered saturated soil under different soil layer conditions using a self-developed impact load testing device, and the characteristics of dynamic pore pressure development and soil settlement were analyzed. The results showed that under impact loading, the development of dynamic pore pressure in soil underwent two distinct stages: a transient response stage and a steady-state response

* 收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2023-02-01

基金项目: 中国地震局工程力学研究所实验室开放基金项目(2021D19)、国家自然科学基金面上项目(51978317)资助

作者简介: 金丹丹(1987—), 女, 副教授, 博士。主要从事土动力学方面的研究。E-mail: jindd@ujs.edu.cn

通讯作者: 王炳辉(1980—), 男, 副教授, 博士研究生。主要从事土动力学方面的研究。E-mail: wbhchina@126.com

stage, with the latter characterized by a slow followed by a rapid decline. In single-layer soil, the dynamic pore pressure in saturated sand soil increased sharply after impact loading. With the increase of particle size, the peak pressure rose and the dissipation time shortened. In dual-layer soil, the steady-state dynamic pore pressure stage changed significantly due to permeability coefficient variations between the upper and lower soil layers, markedly altering the reduction process in the lower soil layer. Presence of a relatively impermeable interlayer caused a noticeable plateau across all measuring points in the pressure reduction phase, significantly slowing the decrease rate, particularly in the soil above the impermeable layer compared to below it. With interlayers, experiments showed significant "water film" formation with non-uniform distribution, reaching up to 2cm in thickness. At the same time, each impact load resulted in noticeable soil settlement, and the extent of settlement gradually diminished with subsequent impacts.

Keywords: impact loading; layered saturated soil; weak permeable interlayer; dynamic pore water pressure; soil settlement

0 引言

震动、循环动荷载或冲击荷载、脉冲等作用会使饱和无粘性土动孔压升高,有效应力降低,从而发生液化,使得土体承载力部分或全部丧失。动孔压的累积及消散是土体中渗流与颗粒沉降的主要原因之一,也是导致液化后各基础设施和生命线工程破坏的主要原因。1964年日本新泻地震中,Shinano河两岸土体大面积液化,土体承载力下降及沉降,导致大量建筑物、桥梁、挡墙及生命线工程遭到严重破坏。其中动孔压的变化是砂土液化过程以及土体结构破坏过程的核心内在影响因素。因此,动孔压作为研究饱和砂土液化特性的一个重要参数,受到广泛关注^[1-5]。

饱和砂土在动荷载作用下的动孔压发展规律研究较为丰富,如循环动荷载、冲击荷载作用下饱和土体的液化微观机制和液化特性等。在循环荷载作用方面,V.A.Florin等^[6]较早地开展了饱和砂土液化振动台试验,其研究认为在震动后孔压先增长,至某一时刻,土体开始液化并在其下层土中形成固化层,此时动孔压开始逐渐消散,且上层液化土与下层固化土之间存在明显的分界面。随后,不少学者从砂土性质、级配等方面出发,开展了相关研究。马维嘉等^[7]通过动三轴试验研究了珊瑚砂的孔压发展模式、变形特征以及应力路径特征。B.Ye等^[8]对不同粒径砂土进行了液化试验,得出震动后饱和中粗砂的动孔压增长速度要明显快于细砂,且随着震动荷载次数的增加,土体发生“再液化”后的

动孔压增长比初次液化时更为迅速。王艳丽等^[9]和王海波等^[10]均研究了细粒含量对液化进程中动孔压演化特性的影响,并得出一致的结论:细粒含量对砂土孔压发展影响较大,其影响主要体现在孔压发展模式参数的不同。

上述循环荷载作用下,超孔压的增长是逐步累积的结果,但实际工程中常遇如打桩、隧道开挖、爆炸防护、建筑物拆除坍塌触地等冲击类荷载作用等。冲击荷载强度高、时间短、具有较强的应力波效应,作用于土体时会造成孔隙水压力在极短的时间内瞬间激增。因此,很多学者对冲击荷载作用下砂土液化过程也做了研究。孟祥跃等^[11]设计了一种可以自由下落的冲击试验装置,实测了饱和砂柱受到冲击荷载作用后孔隙水压力变化的快过程与慢过程,给出了冲击压力波形的传播及其与落高、测点位置等的关系,进一步探讨了后期超孔隙水压力与落高、砂样、测点位置以及饱和砂土的液化、密实之间的关系。利用同样的冲击荷载装置,张均锋等^[12-13]对饱和砂土进行液化试验,得到了液化前后又重新固结的饱和砂土相对密度变化规律,以及相对密度增量与初始相对密度的关系。类似的研究还有K.Takeji等^[14]对含粉土夹层的一维砂柱进行撞击试验,主要研究了撞击作用下夹层对饱和砂土动孔压发展及其对土体液化侧向变形产生的影响。乔莹莹等^[15]对冲击荷载作用下饱和粉土孔压发展规律及液化特性进行研究,得出粉土孔压随动荷载的增大呈现出逐渐降低的趋势。

已往诸多相关研究中,绝大多数着眼于纯砂或单一粒径组土体,对成层饱和无粘性土在瞬态

冲击荷载作用下的动孔压响应研究成果十分有限。实际场地土层又往往是以分层、夹层等形式存在,因此对层状土体液化后动孔压的分布及发展规律做进一步研究具有较好的理论意义和工程应用价值。本文基于课题组自行研制的冲击液化试验装置对均匀饱和层状砂土进行一维不排水冲击液化试验,重点围绕不同土层条件土体液化后的动孔压发展规律,尤其是动孔压消散过程进行了深入研究,为揭示多层砂土液化变形破坏机理提供理论基础。

1 试验仪器及方案

1.1 试验装置及加载时程

本试验采用的是课题组自行研制的冲击试验系统,该测试系统主要由模型测试箱、冲击装置、数据采集设备组成,如图1所示。冲击装置包括:支撑钢架、铁球、轨道、电磁抓取器、缓冲垫、限位器,其中铁球质量14 kg,有效提升高度为0.1~0.2 m。模型测试箱材质为有机透明玻璃,箱体截面尺寸为200×350 mm,壁厚25 mm,高度为1 000 mm。箱体内设有孔隙水压力传感器、加速度传感器、排水通道。模型测试箱放置于厚度为25 mm的承台上,承台尺寸为450×300 mm,承台与箱体间采用高强度螺栓连接并涂有绝缘防水胶,承台底部设有四个对称分布的滑块,使得测试模型箱在冲击荷载作用下可以沿着水平导轨自由滑动。

图2为土箱装满土时受到冲击荷载作用后的加速度时程曲线,限于篇幅,以模型1加载时程为例。冲击荷载作用下土箱加速度瞬时峰值可达122 m/s²,随后加速度幅值随时间衰减较快。

1.2 试验材料

试验所采用的材料为GB/T17671—1999规格

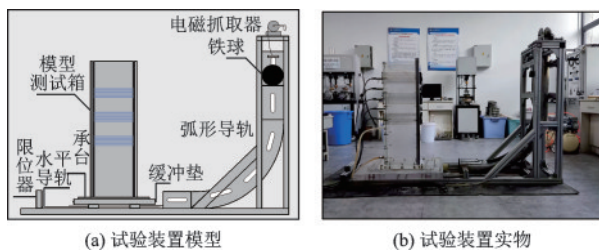


图1 冲击试验装置
Fig.1 Impact test device

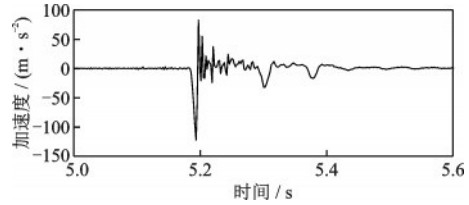


图2 土箱加速度时程(模型1)
Fig.2 Acceleration time history of soil box (model 1)

福建标准砂,其基本参数如下:不均匀系数 $C_u=5.94$,曲率系数 $C_c=1.673$;制备试样前对砂粒预先行筛分,选取粒径小于0.04 mm的颗粒作为夹层用砂如图3(a),粒径在0.1~0.25 mm内的颗粒为细砂,如图3(b),粒径在0.5~1.0 mm内的颗粒为粗砂如图3(c)。细砂组颗粒比重 $G_s=2.69$,最小孔隙比 $e_{min}=0.762$,最大孔隙比 $e_{max}=1.063$,最小干密度 $\rho_{dmin}=1.304 \text{ g/m}^3$,最大干密度 $\rho_{dmax}=1.609 \text{ g/m}^3$;粗砂组颗粒比重 $G_s=2.65$,最小孔隙比 $e_{min}=0.589$,最大孔隙比 $e_{max}=0.854$,最小干密度 $\rho_{dmin}=1.429 \text{ g/m}^3$,最大干密度 $\rho_{dmax}=1.668 \text{ g/m}^3$ 。

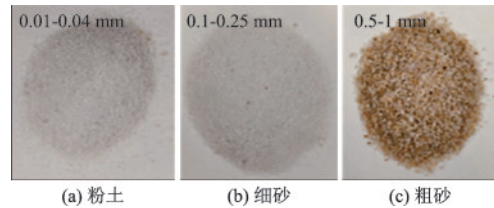


图3 各粒径组砂
Fig.3 Sands of each particle size group

1.3 层状砂模型及试样制备

本次试验开展五种土层条件(单层粗砂、单层细砂、双层土体、三层土体含粉土、粉砂)的饱和砂土一维冲击液化试验,对五种土层条件模型分别进行了六次冲击试验。采用的土柱模型如图4所示。模型1和模型2为单层土,试样高度均为93 cm,相对密度分别为33%和37%。模型3由两层土组成,上层为渗透性较小的细砂层,厚度为39 cm,下层为透水能力较好粗砂层,厚度为54 cm,上、下土层相对密度分别为38%和37%。模型4和模型5为三层土,上层和下层为粗砂层,中间夹层分别为粉土(弱透水层)和粉砂,上、下土层厚度分别为36 cm和54 cm,夹层厚度为3 cm,模型4上、下层相对密度分别为33%和37%,模型5上、下层相对密度分别为35%和37%。制样过程采用水中沉砂法,可保证砂

粒层和粉粒层的相对密度基本保持在同一水平,从而使得试验结果具有可比性。

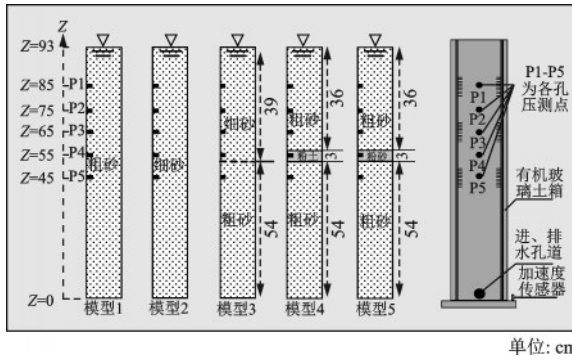


图4 土体模型及传感器布置
Fig.4 Soil models and sensor layout

本次试验量测的数据为饱和土体动孔压值,箱体加速度值。动孔压传感器型号为PCM300Y潜水式压力变送器,量程0~50 kPa,传感器输出电压为0~5 V,精度为0.5%FS。动孔压传感器接口位于模型测试箱侧面,传感器布置如图4所示。本次试验所用的动孔压传感器测得的直接数据为电压信号,需要先将电压信号按照传感器的标定结果换算成为孔压,5个动孔压传感器标定系数见表1。

表1 孔压传感器标定系数

Table 1 Pore pressure sensor calibration coefficients

编号	P1	P2	P3	P4	P5
系数	96.88	96.57	97.24	97.31	97.16

2 试验结果分析与讨论

图5为冲击荷载作用下动孔压时程曲线。如图所示,动孔压时程呈现明显的两个阶段,即瞬态响应阶段和稳态响应阶段。首先,在冲击荷载作用后短时间内产生明显的瞬态反应,出现较大的峰值,这些峰值与加速度峰值出现的时刻(图2)基本同步,总体峰值呈波浪形,并持续约0.5 s。瞬态响应之后,动孔压出现一段相对较长时间的稳态响应。为便于分析动孔压发展的稳态规律,对动孔压的时程数据进行低通滤波处理,采用Butterworth低通滤波器。为了最大程度消除冲击荷载产生的高频波动影响,滤波器的低通截止频率为1 Hz。下文分析的动孔压均为采用该滤波后的结果。

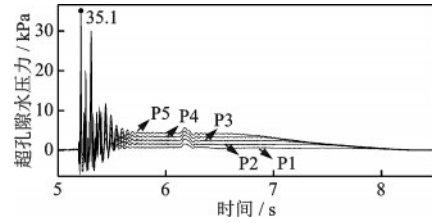


图5 未滤波动孔压时程
Fig.5 Time history of unfiltered pore pressure fluctuation

2.1 单层土情况动孔压发展分析

图6为 Butterworth 低通滤波处理后单层土(粗砂、细砂)动孔压时程变化曲线,由图可知:(1)冲击荷载作用后,单层土中的动孔压瞬时(约1~2 s)达到峰值,随后动孔压快速减小至平缓发展阶段(此时近似等于土层各测点初始上覆有效应力),土体处于液化状态,持续平稳一段时间后动孔压发生快速下降直至零;(2)单层粗砂(模型1)各测点位置动孔压峰值均高于单层细砂(模型2),如图7所示。动孔压的峰值及发展会受粒径分布影响(孔隙的影响);(3)单层细砂动孔压消散用时远大于单层粗砂,且随土层深度减小动孔压消散历时逐渐变长,如细砂层测点P1处动孔压完全消散用时60 s,粗砂层相应深度用时仅5 s,整个过程细砂层用时约为粗砂层的10倍以上,这是因为粗砂的渗透系数明显高于细砂。冲击荷载作用时间短,对动孔压消散过程的影响不大,主要影响动孔压发展的初期;(4)动孔压快速下降阶段,深度较大处动孔压快速消散至浅处的动孔压值,即相邻深度的两条动孔压时程曲线

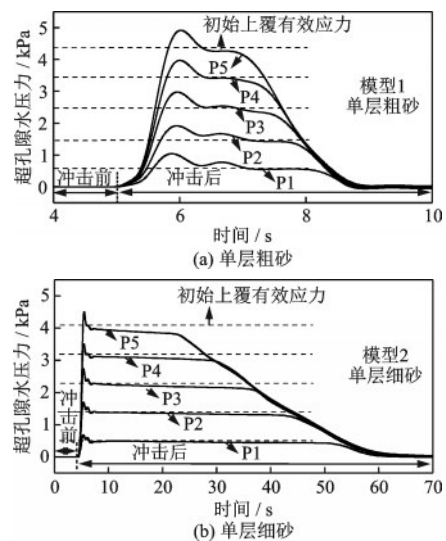


图6 单层土动孔压时程曲线
Fig.6 Time history of dynamic pore pressure in single-layer soil

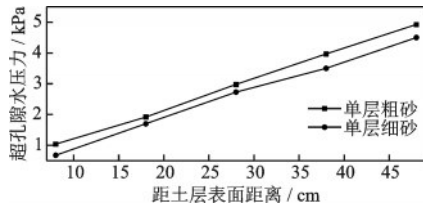


图7 一次冲击后动孔压峰值

Fig.7 Peak dynamic pore pressure after one impact

逐渐趋向于一条曲线,直至动孔压均趋于零。

2.2 双层土(不含夹层)对动孔压发展的影响分析

图8为双层土(模型3)动孔压时程曲线。如图所示,冲击作用后动孔压发展的整体趋势与单层土基本一致,即动孔压迅速增长并达到峰值,然后是缓慢下降阶段和快速下降阶段,直至动孔压消散至零值。但因分层土,动孔压的缓慢下降阶段和快速下降阶段所有差异。本工况下层土为渗透系数大的粗砂,其中测点P4/P5测得的动孔压的缓慢下降阶段历时短,约2s后即迅速进入快速下降阶段,之后又因受上层细砂土渗透系数小的影响,迅速下降阶段的曲线出现转折,降低了迅速下降的速率。上层土(测点P1~P3)动孔压消散趋势同单层细砂(模型2)类似。各测点位置动孔压消散总用时与单层细砂情形接近。总体而言,下层为粗砂上层为细砂的双层土对动孔压发展的影响主要体现在下层土的动孔压迅速下降阶段的变化。

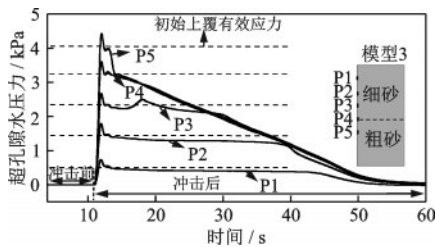


图8 双层土动孔压时程曲线

Fig.8 Time history of dynamic pore pressure in dual-layer soil

2.3 含夹层对动孔压发展的影响分析

图9分别给出了粗砂层中含粉土夹层和含细砂夹层的这两种模型(模型4、5)在冲击荷载下产生的动孔压时程曲线。由图可知:(1)冲击后动孔压瞬态响应特征为:各测点动孔压都出现快速增长至动孔压峰值,随后峰值下降至上覆有效应力附近左右,出现较双层土情形下更为明显的缓慢下降平

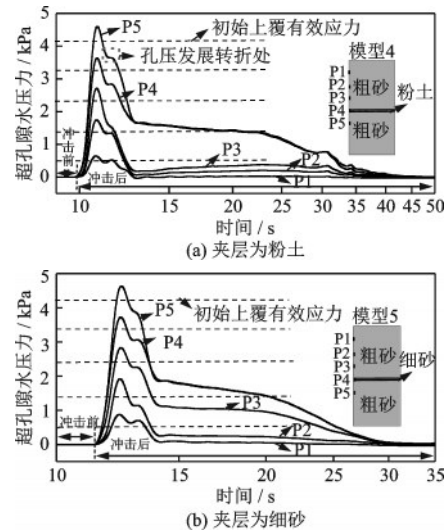


图9 三层土动孔压时程曲线

Fig.9 Time history of dynamic pore pressure in triple-layer soil

台,之后再进入快速下降阶段;(2)各测点处动孔压的转折平台几乎出现在同一时刻,出现的时刻约是冲击后3s左右,与下文讨论的夹层处水膜开始出现的时接近。即快速降低历时1s左右后,动孔压下降的速率减缓,这是动孔压受到弱透水层的影响降低的速率使其下降的速率明显变小;(3)平台阶段后动孔压又快速下降,然后至动孔压稳态发展过程:缓慢下降阶段和快速下降阶段,直至消散至零值。这一阶段弱透水层以深土体动孔压值几乎不随夹层性质及埋深变化,如模型4、5中测点P4和P5的动孔压都在1.6 kPa左右;而弱透水层以上土体中的动孔压值,明显受到弱透水层渗透系数的影响。如模型4中测点P3的动孔压降低至0.2 kPa左右,模型5中测点P3的动孔压有1.1 kPa左右。显然,细砂相比粉土具有更高的渗透系数,因此模型5中测点P3的动孔压受到下部渗流孔隙水向上渗流的影响更为明显;(4)模型4中动孔压在最后的快速下降阶段出现了波动,可能是3 cm粉土层两端受边界效应影响,扰动十分明显,且在粉土层两端形成较厚的水膜,极有可能是透明土箱侧壁处形成了贯穿粉土的渗流通道,并使动孔压产生了波动。

2.4 土层交界处水膜现象分析

含夹层饱和砂土模型进行冲击液化试验过程中,发现在夹层中下部出现了“水膜”现象,如图10所示。文献[14]中也记录了类似的现象,文献中采用机械锤撞击砂柱进行加载,土层采用的形

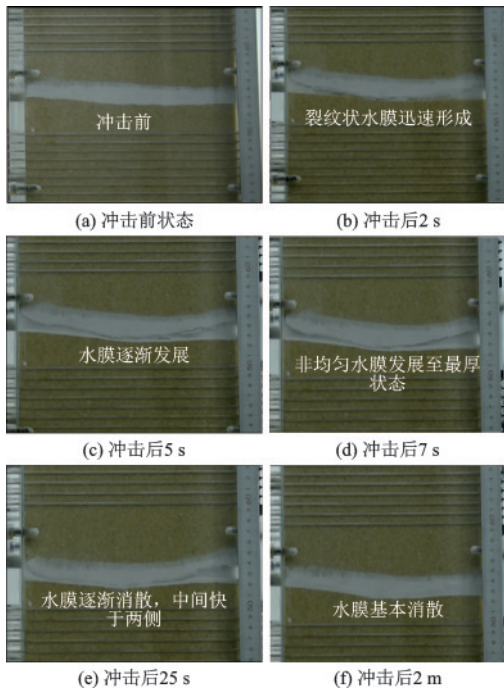


图10 水膜发展过程

Fig.10 Development process of water film

式与本文模型4类似,为含弱透水夹层情形,水膜现象如图11所示。本文结果与文献中出现水膜现象的发展过程一致。通过观察,发现水膜的形成过程主要经历三个阶段:(1)水膜迅速形成阶段。在冲击荷载作用后较短时间内(约2s),即迅速形成裂纹状水膜。该阶段是由于脉冲型冲击荷载作用下,饱和砂土中动孔压短时间内快速增加,初形成一条“细长”水膜,呈裂纹状,如图10(b)所示;(2)水膜逐渐发展阶段。该阶段下层砂土动孔压开始消散,孔隙水继续向上渗流,弱透水层下界面流入的孔隙水仍大于其上界面流出的孔隙水量,“水膜”的规模发展增大(持续时间约5s),最大厚度可达2cm左右,如图10(d)所示。本次试验,“水膜”厚度呈现两边厚中间薄的非线性分布,这是由于摩阻力更小的土箱壁两侧产生的边界效应所致,且“水膜”中部持时最短,两侧持时最久;(3)水膜缓慢消散阶段。该阶段对应下层砂土动孔压继续消散直至零,动孔压梯度缓慢减小,弱透水层下界面流入的孔隙水小于其上界面流出的孔隙水量,水膜逐渐消散减小,但该过程经历时间较长,可达数分钟。孔隙水在冲击荷载作用下产生至下而上的定向渗流,并在中下层土体交界处出现积聚的现象,即出现了“水膜”现象。

2.5 冲击次数对含夹层土动孔压发展的影响及沉

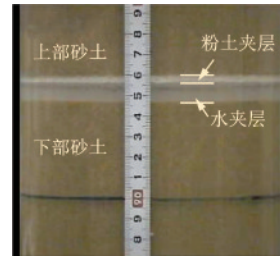


图11 Takeji Kokusho^[14]试验“水膜”现象

Fig.11 Water film phenomenon in the experiment by Takeji Kokusho^[14]

降分析

图12为模型4在多次冲击后动孔压时程曲线。每次冲击荷载作用瞬时动孔压均出现急剧增长,但增长幅度随冲击次数增加呈明显减小趋势。图13给出了单层土(模型2)、双层土(模型3)、三层土(模型4)动孔压峰值随冲击次数的变化图(对应的相对密度见表2),限于篇幅,给出了代表性测点P1和P2的结果。如图所示,动孔压峰值随冲击次数增大明显减小,对应的相对密度随着冲击次数的增加而变大,即随着冲击次数的增加,土体趋于密实,土颗粒骨架结构越来越稳定,饱和砂土内部产生的动孔压峰值逐渐减小。但模型3在第二次冲击时,动孔压峰值反而出现小幅上升,分析认为这可能是由于试验过程中土体受到限位挡板的轻微碰撞而产生的影响。

冲击荷载作用后,土体发生较为明显的沉降(图14),整个沉降过程分为非线性增长阶段及平稳阶段,如图15所示,土体表面位置较夹层位置而言更快地进入沉降平稳阶段。随着冲击次数的增加,每次冲击后的总沉降量逐渐减小。其中夹层位置处呈现非均匀沉降,这是由于夹层界面处,少部分粉粒充填到下层砂粒层原有的孔隙中,使得下层砂粒层进一步密实,加之土箱存在边界效应,共同所致。同时,该非均匀沉降与粉粒层和砂粒层的颗粒级配相关。

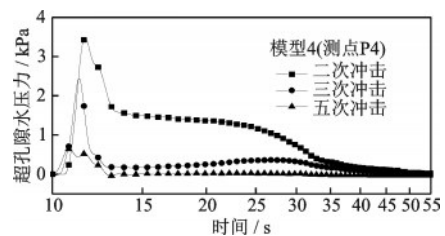


图12 模型4多次冲击动孔压水压力时程曲线

Fig.12 Time history of dynamic hole pressure of Model 4 under multiple impacts

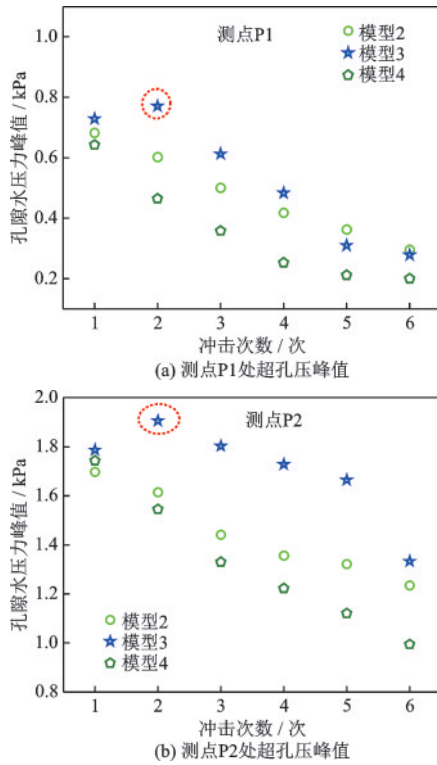


图 13 超孔压峰值随冲击次数变化

Fig.13 Variations of excess pore pressure peaks with the number of impacts

表 2 多次冲击相对密度变化

土层	相对密度/%					
	一次冲击	二次冲击	三次冲击	四次冲击	五次冲击	六次冲击
模型 2	37	45	49	53	55	56
模型 3 (上/下)	38/37	44/46	48/50	50/52	51/53	51/54
模型 4 (上/下)	33/37	39/45	45/51	49/55	52/56	53/56

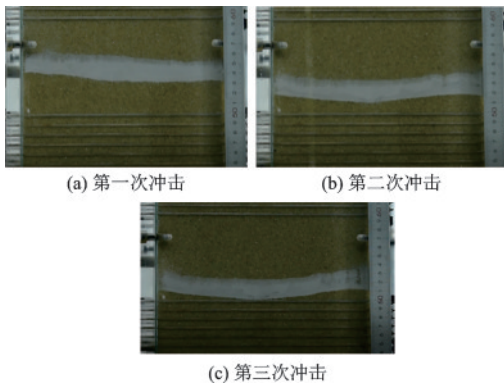


图 14 模型 4 多次冲击沉降

Fig.14 Settlement diagram of Model 4 under multiple impacts

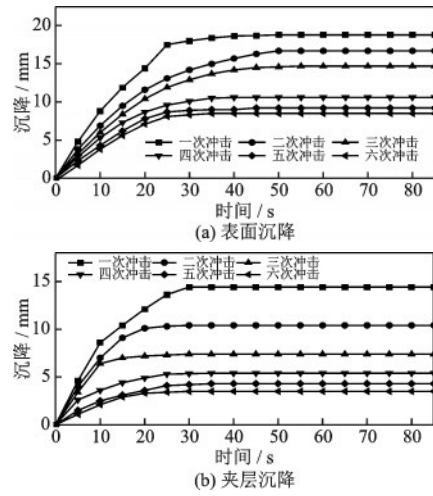


图 15 模型 4 沉降时程曲线

Fig.15 Settlement time history of Model 4

3 结 论

为研究冲击荷载下层状饱和无粘性土动孔压发展模式,考虑了不同土层条件对动孔压发展规律的影响,开展了饱和砂土一维不排水冲击液化试验,得到以下结论:

(1)冲击荷载作用下,无粘性饱和土体动孔压发展呈明显两阶段,即瞬态响应和稳态响应阶段,其中稳态响应阶段动孔压发展又经历缓慢下降及快速下降两过程。单层饱和砂土在冲击荷载后动孔压发生骤增,且随着粒径的增大,产生动孔压峰值越大,而其消散用时随着粒径的增大而减小,整个冲击过程细砂层用时约为粗砂层的 10 倍以上。

(2)双层土情形下动孔压发展整体趋势与单层土类似,但因上下土层渗透系数变化,在动孔压瞬态响应阶段,下降过程出现轻微波动;稳态响应阶段,下层土动孔压缓慢下降过程较单层土明显缩短。

(3)含弱透水夹层时,瞬态响应过程中各测点动孔压下降段几乎在同一时刻出现明显转折平台,使其下降的速率明显变小,该现象在弱透水层以上土体中表现得更显著;稳态响应过程,弱透水层以深土体动孔压值几乎不随夹层性质及埋深变化,弱透水层以上土体动孔压值,明显受到弱透水层渗透系数的影响。

(4)含夹层时,会在夹层处出现明显非均匀分布的“水膜”,其在冲击作用后经历了快速形成、逐渐发展,然后缓慢消散的过程,该过程与孔压发展阶段特征较一致。水膜的最大厚度约 2 cm。另外,

冲击荷载作用后,土体沉降过程呈现非线性增长阶段及平稳阶段。沉降量受冲击次数影响较大,随着冲击次数的增加,每次冲击后的总沉降量逐渐减小,初次冲击后最大沉降值可达约 1.8 cm。

参考文献:

- [1] 许成顺,王冰,杜修力,等.循环加载频率对砂土液化模式的影响试验研究[J].土木工程学报,2021,54(11):109-118.
Xu C S, Wang B, Du X L, et al. Experimental study on effect of cyclic loading frequency on liquefaction mode of sand [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 109-118. (in Chinese)
- [2] 陈国兴,吴琪,孙苏豫,等.土壤地震液化评价方法研究进展[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):677-709.
Chen G X, Wu Q, Sun S Y, et al. Advances in soil liquefaction triggering procedures during earth-quakes: retrospect and prospect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 677-709. (in Chinese)
- [3] Thevanayagam S, Martin G R, Shenthan T, et al. Post-liquefaction pore pressure dissipation and densification in silty soils[J]. In: proceedings of the fourth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, 2001. 4.28.
- [4] Toyota H, Takada S. Variation of liquefaction strength induced by monotonic and cyclic loading histories [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017: 143(4): 04016120.
- [5] 杨永香,周健,贾敏才,等.饱和砂土液化特性的可视化试验研究[J].岩土力学,2011,32(6):1643-1648.
Yang Y X, Zhou J, Jia M C, et al. Visualization testing on liquefaction properties of saturated sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1643-1648. (in Chinese)
- [6] Florin V A. Liquefaction of saturated sandy soils[C]// Proc. of the 5th international conference on soil mechanics and foundation engineering. 1961, 1: 107-111.
- [7] 马维嘉,陈国兴,李磊,等.循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(5):981-988.
Ma W J, Chen G X, Li L, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral sand in Nansha Islands under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 981-988. (in Chinese)
- [8] Ye B, Zhang L, Wang H H, et al. Centrifuge model testing on reliquefaction characteristics of sand [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(1): 141-157.
- [9] 王艳丽,饶锡保,潘家军,等.细粒含量对饱和砂土孔压演化特性的影响[J].土木建筑与环境工程,2011,33(3):52-56.
Wang Y L, Rao X B, Pan J J, et al. Effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3): 52-56. (in Chinese)
- [10] 王海波,吴琪,杨平.细粒含量对饱和砂土液化强度的影响[J].岩土力学,2018,39(8):2771-2779.
Wang H B, Wu Q, Yang P. Effect of fines content on liquefaction resistance of saturated sandy soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2771-2779. (in Chinese)
- [11] 孟祥跃,张均锋,俞善炳,等.冲击荷载下饱和砂土中孔隙水压力的变化及其与液化密实的关系[J].岩土工程学报,1999,21(3):7-11.
Meng X Y, Zhan J F, Yu S B, et al. The variation of porewater pressure and its relationship with liquefaction and densification in saturated sand under impact loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 7-11. (in Chinese)
- [12] 张均锋,孟祥跃.冲击荷载下饱和砂土中超孔隙水压力的建立与消散过程[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1463-1468.
Zhang J F, Meng X Y. Build-up and dissipation of excess pore water pressure in saturated sand under impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1463-1468. (in Chinese)
- [13] 张均锋,孟祥跃,谈庆明,等.冲击荷载下饱和砂土表面沉降的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(4):519-523.
Zhang J F, Meng X Y, Tan Q M, et al. Experimental study on sand surface settlement of saturated sand under impact load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 519-523. (in Chinese)
- [14] Takeji Kokusho, Tetsuro Kojima. Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(2): 129-137.
- [15] 乔莹莹,冯文凯,杨翔.冲击荷载作用下饱和粉土孔压发展规律及液化特性研究[J].成都大学学报(自然科学版),2016,35(4):419-421.
Qiao Y Y, Feng W K, Yang X. Development law of pore pressure of saturated silt and its liquefaction behavior under impact loading [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2016, 35(4): 419-421. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)