

DOI: 10.11779/CJGE201710022

土工格栅控制液化土体流动变形的试验研究

陈育民^{1, 2}, 周晓智^{1, 2}, 徐 君³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

3. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘 要: 液化导致的土体大变形以及侧向流动是地震引起建筑物破坏的主要原因。采用土工格栅作为主要加固材料, 开展建筑物荷载作用下液化场地流动变形的振动台试验研究, 考虑水平层状土工格栅、包裹状土工格栅和土工格栅+无纺布联合处理等 3 种加固方案对结果的影响, 从超孔隙水压力发展、建筑物沉降量以及格栅应变特性等分析加固方案对液化变形的处理效果。试验表明: 采用上述 3 种加固方案所得的相同埋深处超孔隙水压力峰值基本相等, 表明土工格栅的加入基本不能改变地基的液化状态, 而后期超孔隙水压力在土工格栅+无纺布联合加固方案下消散速度最快。与其它两种加固方案相比, 土工格栅+无纺布联合加固方案下建筑物沉降量最小, 相比未加固工况沉降量减少 24%, 土工格栅中间位置的应变峰值小于边缘位置的应变峰值。采用土工格栅+无纺布联合加固时, 具有较大表面积的无纺布对该覆盖区域液化土体有较好的约束作用, 限制了砂土颗粒的竖向移动。此外, 砂土颗粒对无纺布的作用力将由土工格栅承担, 这种作用力将有利于土工格栅与砂土之间的摩擦效应, 进一步限制液化砂土的流动变形。

关键词: 土工格栅; 液化变形; 流动变形; 控制; 振动台试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)10-1922-08

作者简介: 陈育民(1981-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学与土工抗震领域的教学与科研工作。E-mail: ymchenhhu@163.com。

Experimental investigation on flow deformation of liquefiable soil reinforced with geogrids

CHEN Yu-min^{1, 2}, ZHOU Xiao-zhi^{1, 2}, XU Jun³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Shen Yuan Geotechnical

Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: The main causes for damage of buildings during earthquake are large deformation and lateral displacement of the soil induced by liquefaction. Using the geogrids as the main reinforcement materials, a series of shaking table tests are conducted on the liquefiable soil under the load of buildings in order to study the effects of different reinforcement schemes on the flow deformation of the soil. Three different reinforcement schemes are considered, including horizontal layered geogrids, package of geogrids, geogrids together with non-woven fabrics. The development of excess pore water pressure, the settlement of buildings and the strain properties of geogrids are obtained from the shaking table tests. The results show that the liquefaction behaviors of foundation soil can not be changed by the geogrids since the peaks of excess pore water pressure are equal at the same depth, but the excess pore water pressure dissipates more quickly for the reinforcement scheme with geogrids + non-woven fabrics. Compared with that of the other two kinds of reinforcement schemes, the settlement of buildings of the reinforcement scheme with geogrids together with non-woven fabrics is the smallest, which decreases by 24% of the settlement without reinforcement. Besides, the strain crest at the central position of the geogrids is less than that at their edge position. Using the geogrids + non-woven fabrics reinforcement scheme, the non-woven fabrics has better restriction on the liquefiable soil in coverage area because of its large surface, which limits the vertical movement of sand particles. In addition, the force between sand particles and non-woven fabrics will transfer to the geogrids, which will be beneficial to the friction between soil and geogrids. Finally, the friction can further restrict the flow deformation of liquefiable soil.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51379067, 51679072); 重点国际合作研究项目 (5141001028); 教育部创新团队发展计划 (IRT_15R17); 河海大学中央高校基本科研业务费项目 (2015B17314)

收稿日期: 2016-06-22

Key words: geogrid; liquefied deformation; flow deformation; control; shaking table test

0 引 言

中国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间, 是一个地震多发国家。地震所引起的砂土液化是土体由固体变为液体的行为, 集中表现为地面喷水冒砂、地基不均匀沉降和地裂滑坡等^[1]。其中, 土体大变形和侧向流动是使建筑物倾斜破坏、地下管线与水槽上浮、河岸侧移和堤坝码头等设施损坏的主要原因。目前处理可液化地基主要有两种研究思路: 一种是提高前期土体的抗液化能力^[2-6], 另一种是改善土体液化时的应力条件^[7]。其中土工格栅在处理大面积易液化场地时, 能有效控制砂土液化变形, 提高砂土的抗液化能力。

目前, 土工格栅在静力方面已开展了大量研究^[8-10]。Vercueil 等^[11]和 Krishnaswamy 等^[12]研究结果表明加固材料的弯曲刚度和压缩性在接触面之间的剪切中起主导作用, 可以在一定程度上起到抗液化的效果。Maheshwari 等^[13]研究了在易液化砂中采用不同的加筋材料(土工格栅网、土工合成纤维、天然椰壳纤维)的抗液化振动台试验, 结果表明加入天然椰壳纤维碎片抵抗液化效果最好, 其次是土工合成纤维。同时随着土工格栅加筋层数的增加, 其最大孔压比出现降低。Mittal 等^[14]采用土工格栅加固, 进行多组振动台模型试验研究, 结果也表明加筋格栅可以有效抑制超孔压的发展, 但对于相对密实度较大的场地效果不是很明显。

然而, 目前振动台模型试验主要研究挡土墙的加筋效果^[15-19], 对于土工格栅抗液化加固效果的研究却为数不多。而且现有振动台试验研究的重点集中在自由场地情况下的液化分析以及液化发生时超孔压的变化上, 没有针对建筑物荷载作用下可液化场地液化过程中超孔隙水压力发展、土工格栅的受力、变形以及土工格栅对液化变形的控制情况进行分析。因此, 本文采用土工格栅作为主要加固材料, 开展建筑物荷载作用下可液化场地流动变形的振动台试验研究, 考虑水平层状土工格栅、包裹状土工格栅和土工格栅+无纺布联合处理等 3 种加固方案对结果的影响, 从超孔隙水压力发展、建筑物沉降量以及土工格栅应变特性等分析加固方案对液化变形的处理效果, 研究土工格栅的抗液化流动变形机理。

1 试验情况

1.1 试验设备介绍

本试验采用 DCS-600-6-05 电动振动试验系统, 主要包括苏州苏轼试验仪器有限公司生产的 DC-600 电

动振动台台体、进口 SA-6 功率放大器和 SC-0505 型液体静压式水平滑台。试验所用模型箱为刚性容器, 模型箱尺寸 50 cm×30 cm×40 cm (长×宽×高)。沿长度方向上的两个侧面面板材料均为 5 mm 厚的有机玻璃, 以便观察试验制样高度和试验过程中液化土层的变化情况。试验时在宽度方向布置了 2 cm 厚度的海绵以吸收边界入射波对试验结果的影响。

1.2 试验材料

(1) 试验用砂

本试验所用砂为南京地区砂, 该砂的级配参数如表 1 所示, 而砂的颗粒级配曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 砂样的不均匀系数为 2.25, 曲率系数为 1.17, 粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量为 77%, 属于级配不良的中砂, 易于发生液化现象。

表 1 试验用砂的主要物理参数

Table 1 Main physical parameters of test sand					
名称	比重	干密度/(g·cm ⁻³)		孔隙比	
		$\rho_{d,max}$	$\rho_{d,min}$	e_{max}	e_{min}
砂样	2.65	1.652	1.397	0.897	0.604

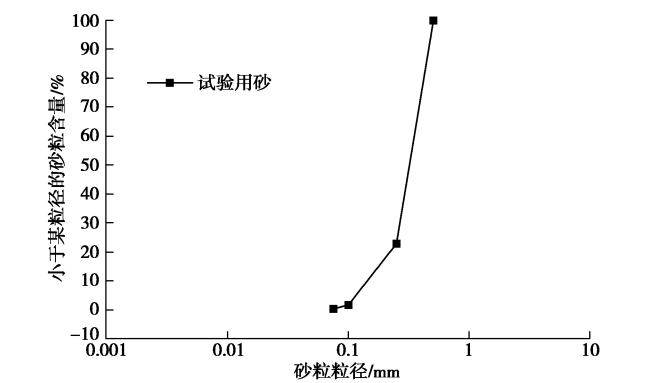


图 1 试验用砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution for test sand

(2) 土工格栅与无纺布

本文试验的模型尺寸较小, 考虑边界效应的影响, 试验选取进口 PE 材料制成的土工格栅。其截面尺寸为 24 cm×44 cm, 具有与实际工程土工格栅类似的性能, 其具体参数见表 2。同时考虑到工程上所用的土工布较厚, 难以应用于模型试验中, 因此选用具有与土工布相似功能的无纺布。无纺布透水性好且砂土颗粒无法穿过, 可以达到限制砂土流动的效果。

表 2 土工格栅几何参数

Table 2 Geometric parameters of geogrids			
名称	网格尺寸/(mm×mm)	厚度/mm	肋宽/mm
土工格栅	18×18	1~2	3

1.3 试验方案

本试验控制试样高度为 30 cm，试样制备前使用尼龙扎带将孔压传感器固定在有机玻璃棒上，分别距模型箱底部 7 cm 和 14 cm 位置处。之后，将有机玻璃棒上端固定于模型箱上部的钢丝上，以防止振动过程中孔压计上下移动引起试验误差。采用水中砂雨法制备饱和砂土样并控制其相对密度为 35%，先往模型箱里倒入一定高度的水，按相对密度计算出每 5 cm 厚度所需要的干砂质量。然后装入模型箱中并将土层表层刮毛，再继续装样直至预定高度，吸去砂样表面多余的水，使水面略高于砂样高度。最后，让砂样在自重作用下固结一段时间，静置时间约 12 h。

在砂样制备过程中分别加入水平层状土工格栅、包裹状土工格栅（如图 2）、土工格栅+无纺布（如图 3），与不进行任何加固的砂样组成 4 组试样。土工格栅+无纺布制作时，将无纺布裁剪成略大于土工格栅大小的尺寸，反面包裹土工格栅并采用订书机将其固定于土工格栅表面。土工格栅上应变片的布置如图 4 所示，模型箱中孔压传感器的埋设如图 5 所示。

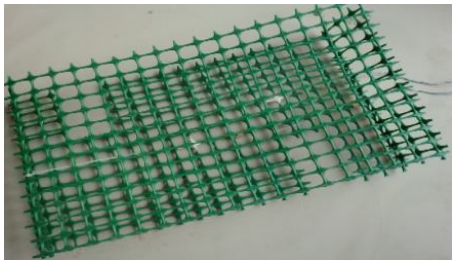


图 2 包裹状土工格栅加固材料

Fig. 2 Reinforcement materials of package of geogrids

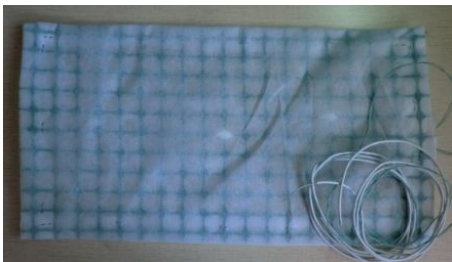


图 3 土工格栅+无纺布加固材料

Fig. 3 Reinforcement materials of geogrids + non-woven fabrics

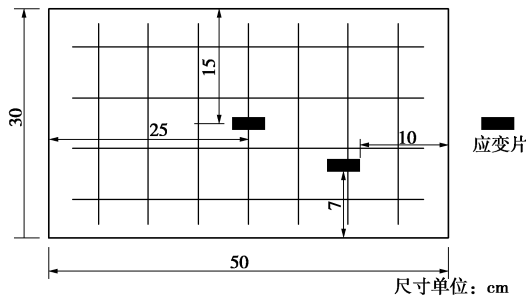


图 4 应变片的布置示意图

Fig. 4 Diagram of arrangement of strain gauges

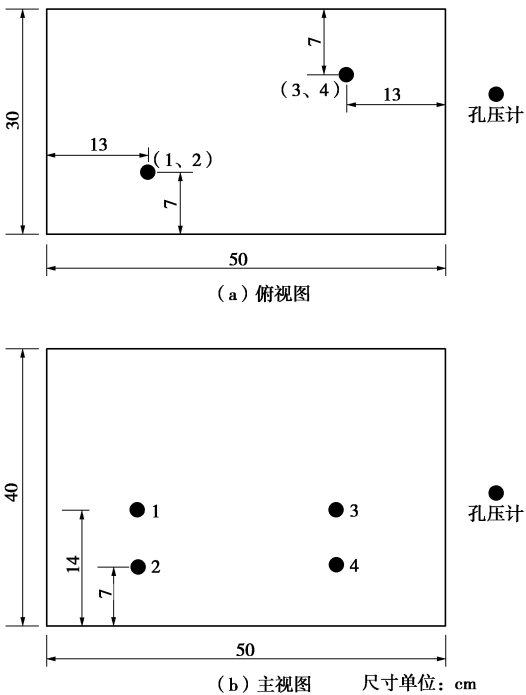


图 5 孔压传感器的布置示意图

Fig. 5 Diagram of arrangement of pore pressure sensors

试验前，在试样表面施加一定的荷载用于模拟建筑荷载，如图 6 中所示。对于荷载的选择，经过多次尝试选取的建筑物模型参数如表 3 所示。在该荷载作用下，建筑物发生的沉降较为均匀，为了方便而准确地观测自制建筑物模型的沉降，在模型的 4 个侧面上都贴有刻度尺，且将每个面进行编号为①、②、③、④，最终取各面的算术平均值作为建筑物整体的沉降值。

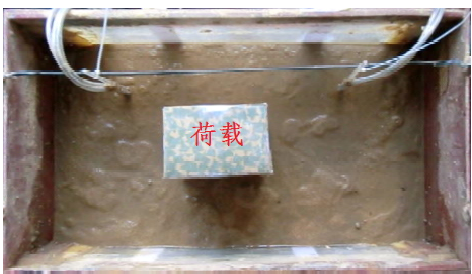


图 6 振动前模型试样

Fig. 6 Model of sample before shaking

表 3 建筑物模型的主要参数

Table 3 Main parameters of the building model

名称	尺寸 /(cm×cm)	质量 /g	底面压强 /Pa	填充 方式	现象
建筑物 (模型)	12×8×13	1723	1795	砂+铁块+ 泡沫	荷载均 匀沉降

每组试验采用正弦波，加速度为 0.3g，振动频率为 5 Hz，振动持续时间为 60 s（第 20 秒～第 80 秒），

每次试验施加相同的建筑荷载, 分析不同加固方案下的抗液化变形效果, 试验方案如图 7 所示

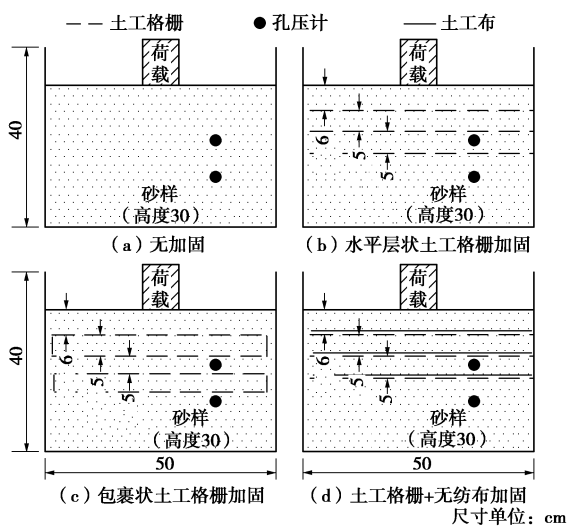


图 7 不同加固方案示意图
Fig. 7 Diagram of different reinforcement schemes

2 试验结果与分析

2.1 超孔压分析

对不同加固方案下的超孔压时程曲线 (如图 8) 进行对比分析, 发现 3 种不同加固方案下相同埋深处超孔压的峰值基本相等, 距试样表面埋深为 13 cm 处的超孔压峰值为 0.91 kPa, 埋深为 20 cm 处的超孔压峰值为 1.53 kPa, 可见土工格栅并不能改变地基的液化状态。Maheshwari 等^[13]和 Mittal 等^[14]研究得出土工格栅能够降低超孔压峰值的结论, 主要是因为采用的小型振动台试验或动三轴试验中土工格栅的尺寸相对于试样尺寸来说较大, 在振动过程中, 这种比尺较大的土工格栅相当于在试样中增设了排水通道, 因此导致了孔压峰值的降低。而实际工程中, 土工格栅的尺寸相对于液化土体来说很小, 这也是本文选用进口 PE 材料制成的土工格栅的主要原因。

从图 8 可知, 当采用土工格栅+无纺布联合加固方案时, 孔压随时间的变化曲线在第 50 秒后位于其他两种加固方案下孔压变化曲线的下方, 可见其消散速度比另外两种加固方案快。主要是因为孔隙水在超孔隙水压力下自下而上运动, 由于无纺布的过滤作用, 下部颗粒无法往上部移动, 上部土体一定厚度范围内的土颗粒含量较其他两种加固方案少, 且无纺布本身具有较好的排水特性, 因此产生的超孔压更易于消散。

2.2 建筑物沉降分析

在每组试验结束后, 当建筑物沉降稳定时, 记录建筑物 4 个侧面的沉降值, 并取算术平均值作为建筑

物的最终稳定沉降值。从表 4 可以看出: 采取水平层

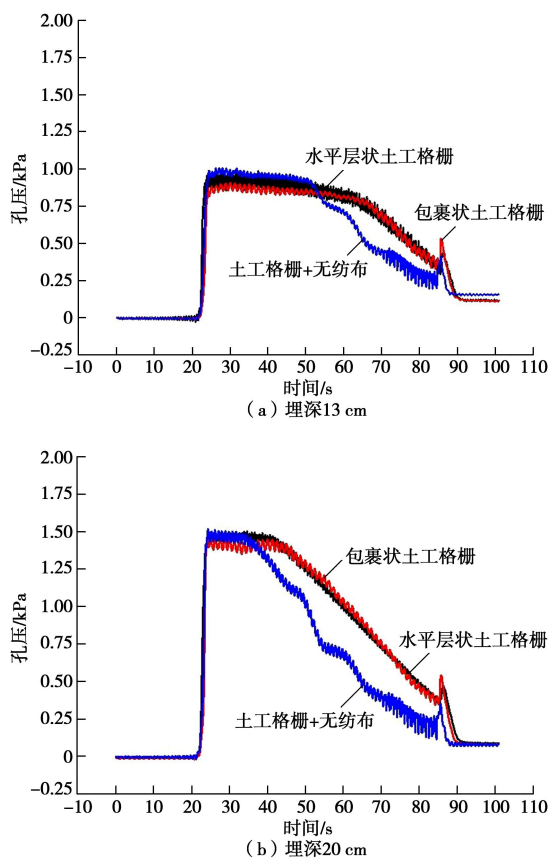


图 8 不同加固方案下超孔压时程曲线
Fig. 8 Time-history curves of excess pore water pressure under different reinforcement schemes

表 4 不同加固方案下建筑物的沉降

Table 4 Settlements of buildings under different reinforcement schemes							
建筑物 侧面编号	方案	建筑物沉降				算术平均值	
		/cm				/cm	
①	无加筋	7.9	7.7	7.9	7.8	7.8	
②	水平层状土工格栅	7.7	7.6	7.7	7.6	7.6	
③	包裹状土工格栅	6.9	6.8	6.9	7.2	7.0	
④	土工格栅+无纺布	6.0	6.3	5.6	6.0	6.0	

状土工格栅加固时, 建筑物最终沉降量为 7.6 cm, 与未进行任何加固工况下沉降量对比只减小 0.2 cm; 当采用包裹状土工格栅加固时, 建筑物沉降量为 7.0 cm, 相比未加固工况沉降量减少 12%; 当采用土工格栅+无纺布联合加固时, 建筑物沉降量减小为 6.0 cm, 相比未加固工况沉降量减少 24%。结果表明: 水平层状土工格栅加固对控制液化变形的效果不明显; 当采用包裹状土工格栅时, 土工格栅限制了砂土的侧向流

动变形,同时侧面的土工格栅对上层土工格栅有一定的约束作用,但由于土工格栅中孔洞的存在,在砂土发生流动变形时仍然可以通过土工格栅的孔洞继续流动,因此对建筑物沉降控制作用有限;当采用土工格栅+无纺布联合作用时,无纺布阻挡了砂土颗粒在土工格栅孔洞中的流动,同时砂土颗粒对无纺布的作用力将由土工格栅承担,这种作用力将有利于土工格栅与砂土之间的摩擦效应,提高土工格栅控制周围土体的能力,进一步限制液化砂土的流动变形,所以控制沉降效果更加明显。

2.3 土工格栅应变分析

(1) 不同工况下土工格栅中间位置应变分析

根据土工格栅中间位置的应变曲线(图9)可以发现:3种不同加固方案下,相同埋深处土工格栅中间位置的应变变化规律基本一致。随着激振的进行,砂土开始发生液化,建筑物出现下沉并将周围的砂土往四周挤压,埋深较浅的土工格栅最先受到砂土流动的影响,应变迅速增大。随着试验的进行,上层土工格栅将随着建筑物模型一起发生下沉,土工格栅的应变随着液化砂土的变形继续变大。当应变达到峰值后,随着砂土中孔隙水的排出,土体发生固结并承担荷载,土工格栅的应变逐渐减小并达到稳定。此外,随着埋置深度的增加,土工格栅的应变峰值逐渐降低。

在6, 11 cm埋深处,包裹状土工格栅方案下的应变峰值最大,水平层状土工格栅加固方案次之,土工格栅+无纺布联合加固方案最小;而在16 cm埋深处,土工格栅的应变峰值以及沉降稳定后土工格栅的残余应变都比较接近。结果表明:当采用包裹状土工格栅加固时,包裹的土工格栅对其包裹范围内的砂土具有一定的约束作用,尤其是在建筑物荷载作用下包裹范围内的土体向两侧运动并达到聚集,当土体进入液化状态后,部分砂土颗粒穿过孔洞而继续产生流动变形,但是由于之前包裹区域两侧聚集的砂土颗粒对土工格栅仍具有一定的约束作用,使得土工格栅中间位置在建筑物荷载作用下承受较大的弯矩,因此包裹状土工格栅加固方案下土工格栅中间位置产生的应变最大。

由于浅层土工格栅对砂土流动变形的减缓作用,当采用水平层状土工格栅加固时,11 cm埋深处土工格栅的应变峰值为上层土工格栅峰值的70%;当采用包裹状土工格栅加固时,11 cm埋深处土工格栅的应变峰值为上层土工格栅峰值的80%;当采用土工格栅+无纺布联合加固时,11 cm埋深处土工格栅的应变峰值为上层土工格栅峰值的40%,小于其他两种加固方案下所占的比率,说明浅层土工格栅+无纺布的联合加固对砂土的流动变形具有很好的限制作用。

(2) 不同工况下土工格栅边缘位置应变分析

根据土工格栅边缘位置的应变曲线(图10)可以发现:土工格栅边缘位置的应变变化规律与中间位置的应变变化规律(图9)相似。随着激振的进行,土工格栅边缘位置的应变不断增大并达到峰值,之后随着孔压的消散,土工格栅的应变开始减小并趋于稳定。此外,随着埋置深度的增加,土工格栅的应变峰值逐渐降低。

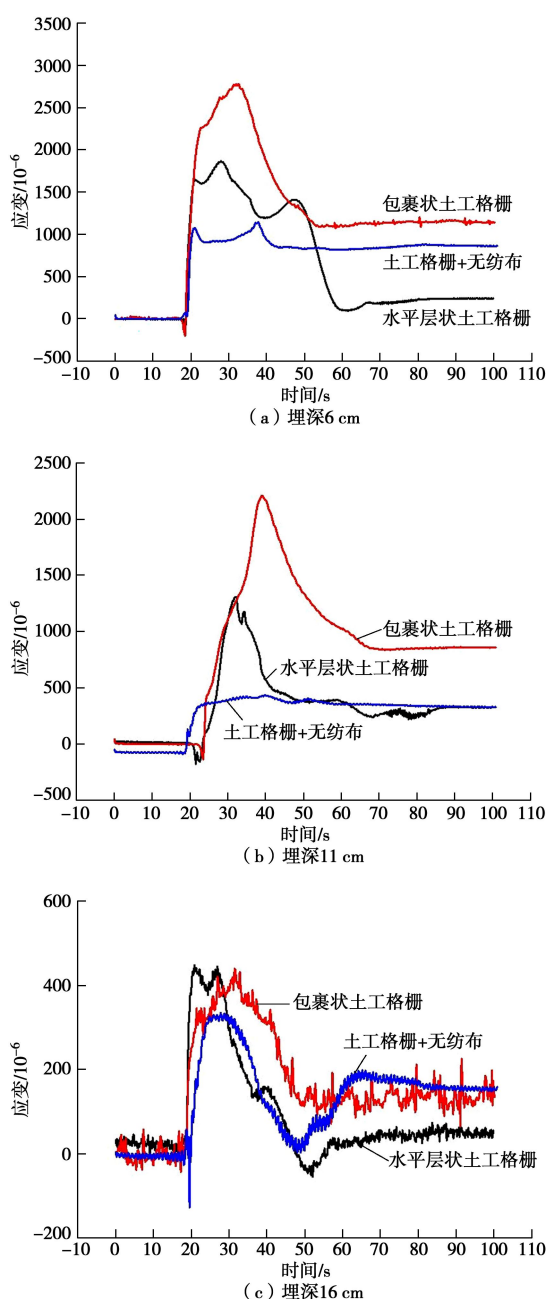


图9 不同加固方案下土工格栅中间位置应变时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of strain at centre of geogrids under different reinforcement schemes

在6 cm埋深处,土工格栅+无纺布联合加固方案下的应变峰值最大,水平层状土工格栅加固方案次之,包裹状土工格栅方案最小;而在11, 16 cm埋深处,

土工格栅+无纺布联合加固方案的应变峰值最大, 水平层状土工格栅加固与包裹状土工格栅加固方案的应变峰值基本相同, 约为土工格栅+无纺布联合加固方案的 45%。对比图 9, 10 可以发现, 当采用水平层状土工格栅、包裹状土工格栅加固时, 每层土工格栅边缘位置的应变峰值小于中间位置的应变峰值; 当采用土工格栅+无纺布联合加固时, 每层土工格栅边缘位置的应变峰值大于中间位置的应变峰值。结果表明: 当采用土工格栅+无纺布联合加固时, 随着激振的进行, 具有较大表面积的无纺布限制了该覆盖区域砂土颗粒的竖向移动, 在建筑物荷载作用下砂土颗粒只能向两侧移动, 使得土工格栅的两侧向上弯起并发生较大变形, 因此土工格栅边缘位置的应变峰值最大, 超过土工格栅中间位置的应变峰值。

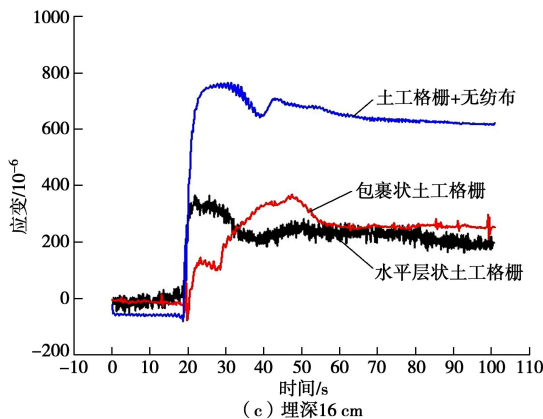
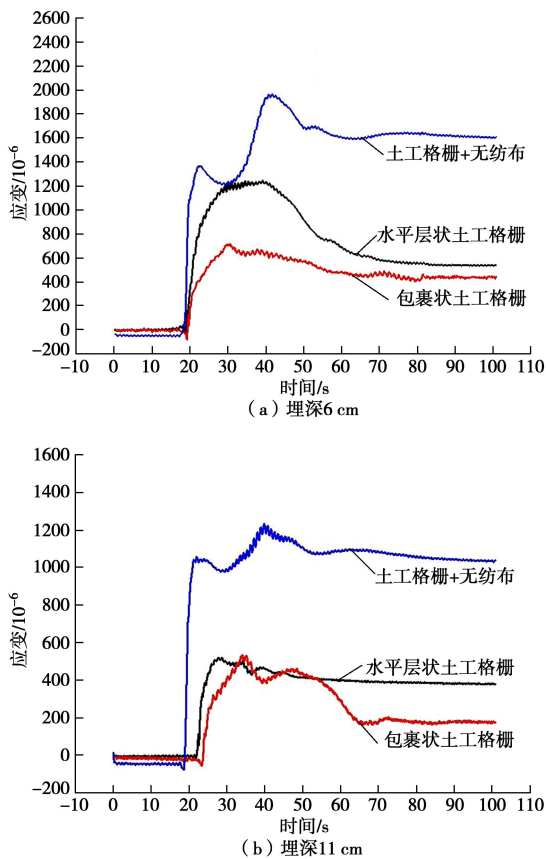


图 10 不同加固方案下土工格栅边缘位置应变时程曲线
Fig. 10 Time-history curves of strain at edge of geogrids under different reinforcement schemes

3 土工格栅工作机理分析

由上述土工格栅的应变变化分析可以得知土工格栅在液化流动变形中的变形受力情况。在试验开始时, 建筑物发生下沉, 使其下方的土体受挤压向四周流动。建筑物底面压力向下传递, 距离建筑物底面较近的位置产生较大的附加应力, 因此试验中发现最上层土工格栅发生了较大的变形。

当采用水平层状土工格栅加固时, 随着激振的进行, 当土体还未进入液化状态时, 砂土颗粒与土工格栅之间具有一定摩擦作用, 一定程度上抑制了土工格栅周围土体颗粒的运动。但是随着孔压的积累, 当土体达到完全液化(接近零有效应力状态)时, 液化土体将穿过水平层状布置的土工格栅孔洞, 持续发生液化流动变形, 而此时土工格栅对于液化土体将不具有抑制作用, 如图 11(a)所示, 因此最后得到的建筑物沉降值与未铺设土工格栅的工况接近。

当采用包裹状土工格栅加固时, 当土体还未达到液化时, 包裹的土工格栅对其包裹范围内的砂土具有一定的约束作用, 尤其是在建筑物荷载作用下包裹范围内的土体向两侧运动并达到聚集, 从而使土工格栅

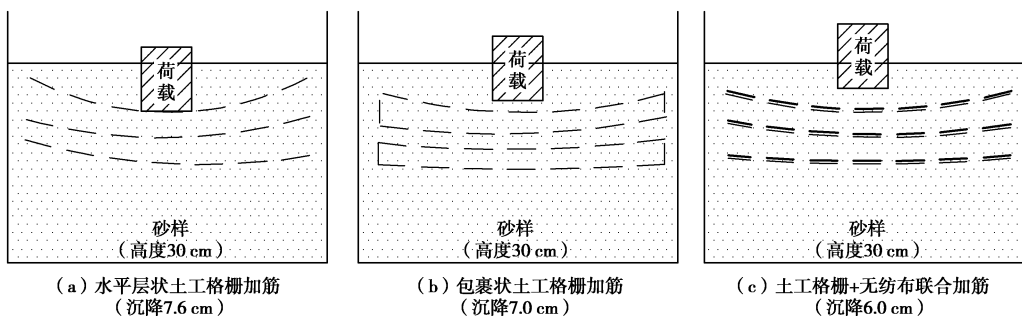


图 11 不同加固方案下土工格栅的最终变形
Fig. 11 Final deformations of geogrids under different reinforcement schemes

边缘处产生拉伸应变。当土体进入液化状态后,仍然存在部分颗粒穿过孔洞而继续产生流动变形,但是由于之前包裹区域两侧的砂土颗粒聚集,一定程度上对液化流动变形具有一定的抑制作用,因此其控制变形的效果相对于水平层状土工格栅加固方案的效果更好,如图11(b)所示。

当采用土工格栅+无纺布联合加固时,随着激振的进行,具有较大表面积的无纺布限制了该覆盖区域砂土颗粒的竖向移动,使砂土颗粒在加固体周围聚集。当土体进入液化状态时,孔隙水携带砂土颗粒运动,但由于无纺布的存在,砂土颗粒无法穿过土工格栅的孔洞而继续流动,限制了砂土颗粒的竖向移动。砂土颗粒对无纺布的作用力将由土工格栅承担,这种作用力将有利于土工格栅与砂土之间的摩擦效应,进一步抑制了土体的流动变形,如图11(c)所示。因此,在3种加固方案下,采用土工格栅+无纺布联合加固对液化流动变形的控制效果最好。

4 结 论

本文主要开展建筑物荷载作用下可液化场地流动变形的振动台试验研究,首先进行了一组天然地基液化时对上建筑物震害模拟,然后分别考虑水平层状土工格栅、包裹状土工格栅和土工格栅+无纺布联合处理等3种加固方案对结果的影响,从超孔隙水压力发展、建筑物沉降量以及土工格栅应变特性等分析加固方案对液化变形的处理效果,得到以下4点结论。

(1)不同加固方案下相同埋深处超孔压峰值基本相等,即格栅不会影响孔压的积累,不会改变地基的液化状态;而在孔压消散方面,采用土工格栅+无纺布联合加固方案的孔压消散速度比另外两种加固方案快,有利于液化场地的加固。

(2)不同加固方案对液化变形的控制效果存在明显差异。试验结果表明水平层状土工格栅加固方案对控制液化流动变形效果不明显,包裹状土工格栅加固效果较水平层状土工格栅加固方案有一定提高,土工格栅+无纺布联合加固的效果最明显,相比未加固工况沉降量减少24%。

(3)振动台试验中,6,11 cm埋深处土工格栅中间位置的应变峰值在包裹状土工格栅加固方案下最大,水平层状土工格栅加固方案次之,土工格栅+无纺布联合加固方案最小;而在16 cm埋深处土工格栅的应变峰值以及沉降稳定后土工格栅的残余应变都比较接近。6 cm埋深处土工格栅边缘位置的应变峰值在土工格栅+无纺布联合加固方案下最大,水平层状土工格栅加固方案次之,包裹状土工格栅方案最小;而

在11,16 cm埋深处土工格栅的应变峰值在土工格栅+无纺布联合加固方案下最大,水平层状土工格栅加固与包裹状土工格栅加固方案下基本相同,约为土工格栅+无纺布联合加固方案的45%。

(4)在采用土工格栅+无纺布联合加固的工况下,具有较大表面积的无纺布对该覆盖区域液化土体有较好的约束作用,限制砂土颗粒的竖向移动,土体液化时砂土颗粒对无纺布的作用力将由土工格栅承担。土工格栅和无纺布共同作用,会进一步限制液化砂土的流动变形,是一种有效的液化地基处置方案。

参考文献:

- [1] MARCUSON W F. Definition of terms related to liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, **104**(9): 1197 - 1200.
- [2] CLOUGH G W, IWABUCHI J, RAD N S, et al. Influence of cementation on liquefaction of sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(8): 1102 - 1117.
- [3] ONOUE A, MORI N, TAKANO J. In-situ experiment and analysis on well resistance of gravel drains[J]. Soils and Foundations, 1987, **27**(2): 42 - 60.
- [4] 孔祥国. 砂土密实度的成因分析及其评价方法的探讨[J]. 岩土工程技术, 2009, **22**(6): 289 - 291. (KONG Xiang-guo. Formation reasons for sand density and study of evaluation methods[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **22**(6): 289 - 291. (in Chinese))
- [5] 程远, 刘松玉, 蔡国军, 等. 基于CPTU测试的共振密实法加固可液化地基效果评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, **41**(5): 1075 - 1080. (CHENG Yuan, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Assessment of resonance compaction method on soil liquefaction treatment through CPTU test[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, **41**(5): 1075 - 1080. (in Chinese))
- [6] ADALIER K, SHARP M K. Embankment dam on liquefiable foundation-dynamic behavior and densification remediation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(11): 1214 - 1224.
- [7] JUANG C H, YANG S H, YUAN H, et al. Liquefaction in the Chi-Chi earthquake-effect of fines and capping non-liquefiable layers[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(6): 89 - 101.
- [8] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1735 - 1744. (BAO Cheng-gang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2006, **25**(9): 1735 - 1744. (in Chinese))
- [9] 赵 川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, **22**(4): 419 - 422. (ZHAO Chuan, ZHOU Yi-tang. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(4): 419 - 422. (in Chinese))
- [10] 徐 超, 胡 荣, 贾 斌. 土工格栅加筋土地基平板载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2515 - 2520. (XU Chao, HU Rong, JIA Bin. Experimental study of geogrid-reinforced soil foundation by plate load test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2515 - 2520. (in Chinese))
- [11] VERCUEIL D, BILLET P, CORDARY D. Study of the liquefaction resistance of a saturated sand reinforced with geosynthetics[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1997, **16**(7): 417 - 425.
- [12] KRISHNASWAMY N, THOMAS ISAAC N. Liquefaction analysis of saturated reinforced granular soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(9): 645 - 651.
- [13] MAHESHWARI B, SINGH H, SARAN S. Effects of reinforcement on liquefaction resistance of Solanisand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(7): 831 - 840.
- [14] MITTAL S, CHAUHAN R. Liquefaction behavior of reinforced saturated sand under dynamic conditions[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **7**(1): 109 - 114.
- [15] 王丽艳, 陈国兴, 高 鹏, 等. 可液化土中格栅加筋土挡墙地震变形特性大型振动台试验[J]. 中国公路学报, 2014, **27**(9): 25 - 31. (WANG Li-yan, CHEN Guo-xing, GAO Peng, et al. Large-scale shaking table tests on seismic deformation of geogrid reinforced soil retaining walls in liquefiable soils[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, **27**(9): 25 - 31. (in Chinese))
- [16] 王丽艳, 孙 田, 陈 苏. 近远场地震中土工格栅加筋土挡墙抗震特性的振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2015(2): 103 - 110. (WANG Li-yan, SUN Tian, CHEN Su. Large scale shaking table test on seismic behaviors of geogrid reinforced retaining walls under near-fault and far-field ground motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(2): 103 - 110. (in Chinese))
- [17] KRISHNA A M, BHATTACHARJEE A. Behavior of rigid-faced reinforced soil-retaining walls subjected to different earthquake ground motions[J]. International Journal of Geomechanics, 2016: 06016007.
- [18] WANG L Y, DU X L, ZHANG F X. Seismic response of a geogrid reinforced retaining wall by shaking table test[C]// Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering. ASCE, Shanghai, 2014: 517 - 524.
- [19] GULER E, SELEK O. Reduced-scale shaking table tests on geosynthetic-reinforced soil walls with modular facing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(6): 04014015.