

真空预压处理高含水率疏浚泥 室内足尺大模型试验研究

王 山¹, 梁广雪¹, 陈先勇², 宋苗苗³, 姚 达⁴

(1. 江苏禹衡工程质量检测有限公司, 江苏 盐城 224000; 2. 江苏省盐城水利建设有限公司, 江苏 盐城 224014;
3. 盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 4. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:采用真空预压法处理高含水率疏浚泥时,处理过程中疏浚泥将产生大幅度沉降,不可避免地将引起塑料排水板的弯曲,从而影响疏浚泥加固效果。为进一步明确塑料排水板弯曲对真空预压处理疏浚泥加固效果的影响,对塑料排水板联合真空预压处理高含水率疏浚泥开展了室内足尺大模型试验。结果表明:真空预压过程中塑料排水板将产生弯折型弯曲和非弯折型弯曲,且弯折型弯曲出现的位置随真空预压时间的增加逐渐向塑料排水板下部移动。弯折型弯曲的出现将引起排水板不同深度处真空度的较大幅度降低,且深度的真空度降低幅度大于浅部,可达到30%。同时,排水板中第一个弯折型弯曲的出现还将引起疏浚泥泥面沉降量增加幅度的降低,和处理后疏浚泥含水率随深度增加幅度的增大。

关键词:疏浚泥; 真空预压; 高含水率; 塑料排水板; 足尺大模型试验

中图分类号:TV851 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2022)12-0001-0006

Full-scale model test on dredged clay at high water content treated by vacuum preloading

WANG Shan¹, LIANG Guangxue¹, CHEN Xianyong², SONG Miaomiao³, YAO Da⁴

(1. Jiangsu Yuheng Engineering Quality Testing Co., Ltd., Yancheng 224000, China;

2. Jiangsu Yancheng Water Conservancy Construction Co., Ltd., Yancheng 224014, China;

3. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

4. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: For dredged clay treated by the vacuum preloading at high water content, the bending deformation is observed in the plastic drainage board due to the large consolidation settlement of dredged clay, which would weaken the reinforcement effect. In order to further clarify the influence of plastic drainage board bending on the reinforcement effect of vacuum preloading treatment of dredged clay, an indoor full-scale large model test was conducted on plastic drainage board combined with vacuum preloading treatment of dredged clay with high water content. The results show that there are bending curve and non-bending curve in the plastic board during the process of vacuum preloading, and the bending curve would appear gradually to the lower part of plastic drainage board as the vacuum preloading continues. The appearance of bending type bending will cause a greater reduction

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008363);江苏省产学研合作项目(BY2021499);江苏省水利科技项目(2020018)

作者简介: 王山(1973—),男,高级工程师,本科,主要从事疏浚泥处置及资源化利用等方面的研究。E-mail:1340973716@qq.com

通信作者: 宋苗苗(1987—),女,讲师,博士研究生,主要从事疏浚泥处置及资源化利用等方面的研究。E-mail:songmiaomiao12@126.com

of vacuum at different depths of the drainage board, and the reduction of vacuum at depth is greater than that at shallow parts, which can reach 30%. Meanwhile, when the first bending curve appeared, the increase in the surface settlement of dredged clay with preloading time begin to decrease, and the increase in the water content with depth for treated dredged clay appears to increase.

Key words: dredged clay; vacuum preload; high water content; plastic drainage board; full-scale model test

为保证水质及通航能力,港口、河道等每年都要进行疏浚清淤,从而产生数亿方的高含水率疏浚泥^[1]。和天然沉积土不同,疏浚泥通常呈流动状态,其含水率可高达300%,工程性质极差,基本无承载力,故难以直接利用而需进行处理^[2]。

对疏浚泥进行处理和资源化利用前,通常需先采取一定的工程措施以降低其含水率。其中,真空预压处理法具有造价低、快捷、加固效果良好等特点,是目前常用的疏浚泥加固措施^[3-5]。采用真空预压法处理高含水率疏浚泥时,塑料排水板常被作为竖向排水通道,以加快疏浚泥中水分的快速排出,达到工程所需的性能要求。真空预压法处理高含水率疏浚泥后,疏浚泥固结沉降量可达到甚至超过1 m,使得排水板多呈弯曲状态,这一现象已被实际工程所证实^[6]。国内外学者基于理论分析、室内小模型试验和现场观测,探讨了排水板弯曲对真空预压处理效果的影响,并取得了一些有价值的研究成果^[6-11]。如王婧等^[7]通过人为将塑料排水板弯曲,分析了排水板弯曲对通水量的影响,指出排水板芯板、滤膜及弯折形式是影响排水板通水量的主要因素;孙立强等^[8]通过室内试验发现,塑料排水板的裙曲和折断变形将使其失去排水通道。需要注意的是,由于室内试验模型的尺寸远小于实际工程规模,故较难全面反映实际工程中塑料排水板弯曲对真空预压加固疏浚泥效果的影响。而现场实测中,由于场地环境复杂、施工等因素的影响,较难对排水板的弯曲进行详细的观测。

室内足尺大模型试验,不仅可避免因模型尺寸缩小引起的偏差,同时,和现场测试相比,可更好控制试验条件,减少外界环境因素对试验结果的干扰。为了明确塑料排水板弯曲对真空预压处理高含水率疏浚泥效果的影响,本文对真空预压法处理高含水率疏浚泥开展了室内足尺大模型试验。基于试验结果,首先研究了真空预压过程中塑料排水板的弯曲形态,并对塑料排水板产生弯曲的原因进行了分析;之后,结合塑料排水板中真空度分布、疏浚泥泥面沉降量以及处理后疏浚泥中的含水率分布,探讨了塑料排水板弯曲对真空预压处理高含水率疏浚泥效果的影响,以期为实际工程中高含水率疏浚泥的加固处理提供借鉴。

1 室内大模型试验

1.1 试验材料

本试验采用的液限为58.3%的疏浚泥,与宋苗苗等^[12]研究中所用疏浚泥的基本物理性质相同,故在此不再一一详述。

试验所用塑料排水板为SPB-B型排水板,其基本性质如表1所示。由表1可知,塑料排水板性能满足国家标准的相应要求。

1.2 试验方案

实际工程中塑料排水板联合真空预压处理高含水率疏浚泥,其地基承载力与工后沉降主要受地表下3~4 m土层力学性质的影响^[8]。已有实际工程的研究表明,采用真空预压法加固疏浚泥时常用的塑料排水板间距为0.7~1.2 m^[13-17],故本文研究将采

表1 塑料排水板基本特性

类别	复合体					滤膜				
	厚度/ mm	宽度/ mm	抗拉强度(伸 长率10%时)/ (kN·cm ⁻¹)	伸长率/ %	纵向通水量 (侧压力 350 kPa)/ (cm ³ ·s ⁻¹)	厚度/ mm	纵向干态抗拉 强度(伸长率 10%时)/ (N·cm ⁻¹)	横向湿态 抗拉强度 (伸长率15% 时)/(N·cm ⁻¹)	垂直渗透 系数/ (cm·s ⁻¹)	等效孔 径 O ₉₅ / mm
实测值	4.3	100.3	3.52	10.4	49.7	0.38	27.3	31.6	8.79×10 ⁻³	<0.074
国家标准	≥4.0	100±2	≥1.3	≥4.0	≥25	/	≥25	≥20	≥5×10 ⁻⁴	<0.075

用高度和直径分别为300 cm和120 cm的自制模型槽开展试验,以尽量与实际工程工况相符。试验时将塑料排水板底端固定在装置上,从而可保证泥浆加入过程中塑料排水板始终位于模型槽的中心位置。其中,塑料排水板的长度为295 cm。为了了解处理过程中,排水体中真空度的变化规律,在排水体内部沿排水体深度方向5 cm、50 cm、100 cm、150 cm、200 cm、250 cm共布置了6个真空度测试探头。为了了解处理过程中泥面的沉降规律,在疏浚泥表面中心位置及距中心30 cm的对称位置分别布置位移传感器。

对实际工程中所采用的真空预压系统进行简化,获得大模型试验所用的真空预压系统。其中,真空泵用来施加真空压力,最大可施加98 kPa的真空压力;真空饱和缸用来分离土中水和气。该装置不仅可防止孔隙水进入真空泵,同时还可通过真空压力表实时获得施加的真空压力值。

采用水力疏浚产生的泥浆其含水率一般在1.5~3倍液限^[2],故本文大模型试验中采用的疏浚泥含水率为147%(2.5倍液限)。试验前将现场取回的疏浚泥搅拌均匀,测定其初始含水率,并根据目标含水率、初始含水率以及模型试验所需泥浆质量,计算需外加的蒸馏水质量,并在加入蒸馏水后再次将泥浆搅拌均匀;之后,将满足质量要求的双层密封袋放入模型桶内,并将塑料排水板、测试元器件以及固定装置一起放入模型桶内;最后,使用真空泵将搅拌均匀的泥浆抽入室内大模型槽中,并取不同泵送时刻的泥浆测定其含水率,即为试验泥浆的实际含水率。待泥浆达到设定高度后,将密封袋扎紧并用玻璃胶密封,以保证真空预压试验过程中疏浚泥处于密封状态。

此外,试验过程中对疏浚泥泥面沉降量和真空度分布进行监测,待泥面沉降量小于1 mm/d时停止试验。试验结束后,对处理后不同位置的疏浚泥含水率进行取样测试。具体取样位置为深度方向10 cm、30 cm、50 cm、100 cm、150 cm,水平方向距排水体5 cm、10 cm、30 cm、40 cm,共20个位置。

2 试验结果与分析

2.1 塑料排水板形态

图1为真空预压试验前后塑料排水板的形态。和试验前相比,真空预压试验后塑料排水板自上而下发生了明显的弯曲变形。根据弯曲程度的不同,将试验后塑料排水板的弯曲分为弯折型弯曲和非

弯折型弯曲。其中,发生弯折型弯曲时塑料排水板在折角位置出现小面积的滤膜破损和排水通道破坏,但整体并未完全折断;对于非弯折型弯曲,塑料排水板主要发生可恢复的弯曲变形,从外表未发现明显的滤膜和排水通道损坏。

同时,图1(b)中自上而下排水板的第一个弯折型弯曲出现在约80 cm处。这主要是由于浅层的疏浚泥排水路径相对较短,在真空预压处理前期将产生更大的固结沉降,和塑料排水板间产生较大的相对变形。此时塑料排水板露出疏浚泥表面,在摩阻力、密封膜密封等的作用下发生弯折型弯曲。随着真空预压处理的持续进行,深层疏浚泥的固结沉降量继续增加,同时真空预压固结将引起土体向内的变形,对塑料排水板施加侧向的土压力。二者共同作用下使塑料排水板在约150 cm和250 cm处又出现了第二个和第三个弯折型弯曲,且二者之间还出现多处的非弯折型弯曲(图1(e))。其中,第三个弯折型弯曲的出现可能还与塑料排水板底端在试验过程中始终固定在模型槽中心位置有关。此外,由图1(c)~(d)还可以发现,排水板在真空预压处理过程发生了一定程度的水平向偏移。造成这一现象的原因可能是真空负压作用下疏浚泥的表面沉降并不完全是均匀的,且疏浚泥在真空负压作用下在一定深度范围内还将产生一定量的水平位移。但整体而言,塑料排水板的弯曲变形沿疏浚泥在全深度都有分布,具体出现的弯曲变形类型则受疏浚泥固结沉降量、真空预压处理时间等因素的影响。

2.2 真空度

真空预压处理过程中,真空度的分布对疏浚泥的加固效果具有重要的影响。图2为真空预压处理过程中排水板不同深度处的真空度。由图2可知,抽真空开始后排水板不同深度处的真空度很快上升到70 kPa以上,并保持一段时间的稳定,但沿深度发生了一定程度的衰减,即由5 cm处的86 kPa降低为250 cm处的约73 kPa。这主要是由于真空预压过程中排水板的弯折、井阻效应及堵塞等均会影响真空负压沿排水板深度的传递,这一现象已被室内试验、现场试验等所证实^[8,17,19]。但整体上真空度的降低幅度约为5 kPa/m,这和刘志中等^[19]通过理论分析建议的设计计算值相一致。由此可见,本研究的大模型试验结果可较好地反映实际工程。

同时,还可以发现,随着真空预压时间的增加,排水板不同深度的真空度出现了两次较大幅度的

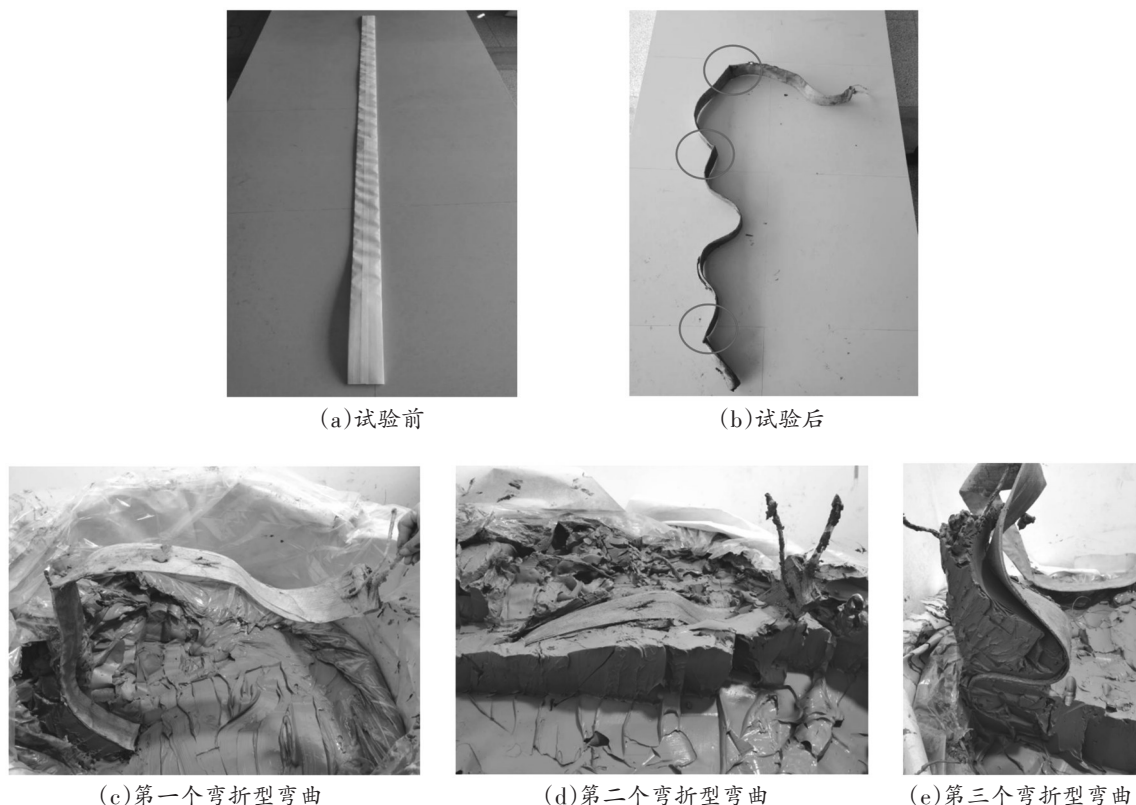


图1 排水板形态

降低。在真空预压处理30 d时,不同深度处的真空度开始出现了降低,并在真空预压50~60 d重新稳定。其中,150 cm、200 cm和250 cm处的真空度下降幅度大于浅部(5 cm,50 cm,100 cm)。结合图4中排水板的形态,可推知造成这一现象的原因可能是由于真空预压早期浅层土体的固结较快,相应的固结沉降量也较大。随着浅层土体不断沉降和发生向内的水平位移,使排水板在约80 cm处产生弯折型弯曲(图1(b)),真空度向土层深处的传递受阻。由于位于浅层土体内的排水板主要发生非弯折型弯曲(图1(c)和(d)),故浅层排水板中的真空度降低幅度较小。之后,随着土体真空预压固结的继续发展,在100 d左右排水板深处(100 cm,200 cm)的真空度发生了第二次降低,下降了约6 kPa。这可能是由于在真空预压后期,疏浚泥产生大量的固结沉降,从而使排水板发生了严重的弯曲变形,进而导致真空传递不畅。此外,在排水板200 cm和250 cm深度处真空度降低到约50 kPa,降低幅度达到30%。这与夏玉斌和陈允进^[18]等通过现场试验测定的结果相一致。由此可见,采用真空预压处理高含水率疏浚泥时,排水板弯曲引起的真空度衰减不可忽略。

2.2 真空度

真空预压处理过程中,真空度的分布对疏浚泥的加固效果具有重要的影响。图2为真空预压处理过程中排水板不同深度处的真空度。由图可知,抽真空开始后排水板不同深度处的真空度很快上升到70 kPa以上并保持一段时间的稳定,但沿深度发生了一定程度的衰减,即由5 cm处的86 kPa降低为250 cm处的约73 kPa。这主要是由于真空预压过程中排水板的弯折、井阻效应及堵塞等均

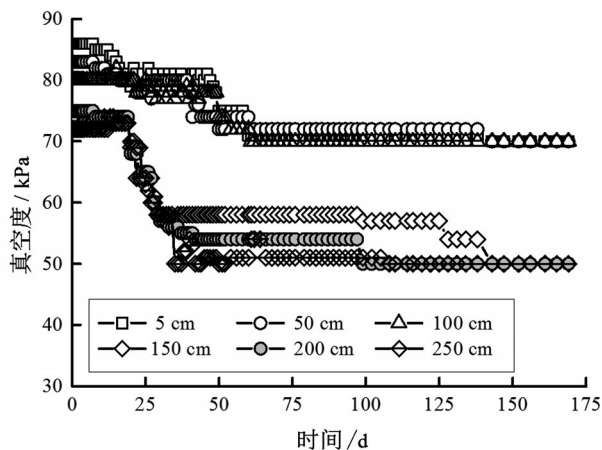


图2 排水板不同深度处真空度

会影响真空负压沿排水板深度的传递,这一现象已被室内试验、现场试验等所证实^[8,17,19]。但整体上真空度的降低幅度约为5 kPa/m,这和刘志中等^[19]通过理论分析建议的设计计算值相一致。由此可见,本研究的大模型试验结果可较好地反映实际工程。

同时,还可以发现随着真空预压时间的增加,排水板不同深度的真空度出现了两次较大幅度的降低。在真空预压处理30 d时,不同深度处的真空度开始出现了降低,并在真空预压50~60 d左右重新稳定。其中,150 cm、200 cm和250 cm处的真空度下降幅度大于浅部(5 cm, 50 cm, 100 cm)。结合图4中排水板的形态,可推知造成这一现象的原因可能是真空预压早期浅层土体的固结较快,相应的固结沉降量也较大。随着浅层土体不断沉降和发生向内的水平位移,使排水板在约80 cm处产生弯折型弯曲(图1(b)),真空度向土层深处的传递受阻。由于位于浅层土体内的排水板主要发生非弯折型弯曲(图1(c)和(d)),故浅层排水板中的真空度降低幅度较小。之后,随着土体真空预压固结的继续发展,在100 d左右排水板深处(100 cm, 200 cm)的真空度发生了第二次降低,下降了约6 kPa。这可能是由于在真空预压后期,疏浚泥产生大量的固结沉降,从而使排水板发生了严重的弯曲变形,进而导致真空传递不畅。此外,在排水板200 cm和250 cm深度处真空度降低到约50 kPa,降低幅度达到30%。这与夏玉斌等^[20]等通过现场试验测定的结果相一致。由此可见,采用真空预压处理高含水率疏浚泥时,排水板弯曲引起的真空度衰减不可忽略。

2.3 泥面沉降量

图3为泥面沉降量随真空预压时间的变化曲线。在真空预压初期,疏浚泥的渗透系数和疏浚泥中的真空压力相对都较大,且排水板中的真空度沿深度衰减幅度较小,故在这一阶段疏浚泥的泥面沉降量随真空预压时间快速发展。该阶段持续到真空预压约60 d,产生了约75 cm的固结沉降量。这与图1和图2中第一个弯折型弯曲出现的位置和真空预压时间基本一致,由此可见前述对第一个弯折型弯曲产生原因的分析是合理的。

之后,随着疏浚泥固结度的增加,其渗透系数逐渐减低^[18,21]。同时疏浚泥浅层第一个弯折型弯曲的出现也使排水板中真空度的传递受阻,故疏浚泥的固结速率减慢,相应的泥面沉降量增加幅度减

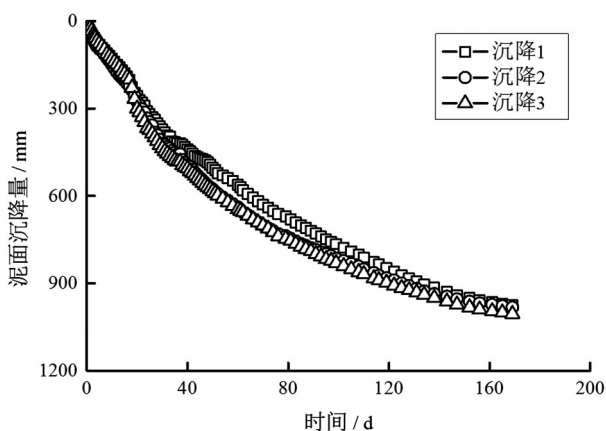


图3 泥面沉降量随真空预压时间的变化曲线

缓。但整体而言,第二和第三个弯折型弯曲的出现并未引起该阶段沉降速率的显著变化。且和快速沉降阶段相比,第二阶段土体的固结沉降量约为30 cm,为疏浚泥泥面总沉降量的30%左右。由此可见,当采用塑料排水板联合真空预压处理高含水率疏浚泥时,在快速沉降阶段抑制排水板弯折型弯曲的出现,将更有助于提升加固处理效果。

2.4 加固后疏浚泥含水率

含水率是评价土体固结程度的重要指标,为进一步明确排水板弯曲对疏浚泥真空预压加固效果的影响,在真空预压结束后测定疏浚泥不同位置处的含水率,结果如图4所示。相同深度处,处理后疏浚泥的含水率随着距排水板水平距离的增加而逐渐增大,且增加幅度逐渐减小。这主要是由于距排水板越远,疏浚泥的排水路径越长,相同真空预压时间下土中自由水排出量也越小。同时,真空度在水平方向传递过程中也存在一定程度损失,二者共同作用使得距排水板越远处疏浚泥的含水率越

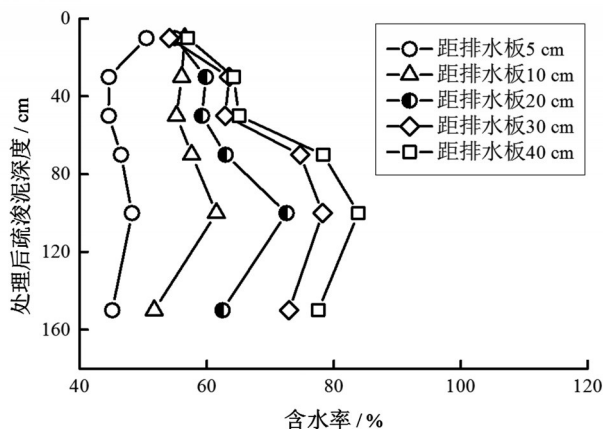


图4 真空预压处理后疏浚泥中的含水率分布

高,加固效果相对较差。

在距排水板相同水平距离处,疏浚泥含水率随深度增加整体表现出增大的变化趋势。由于塑料排水板在越150 cm处出现弯折型弯曲,从而阻碍了排水板中真空向土层深处的传递,故疏浚泥含水率在约50 cm处出现了明显的增加。且随着疏浚泥距排水板的距离增加到40 cm,不同深度处疏浚泥含水率的差值可达到了27%。即当疏浚泥深度越深,距排水板距离越远时,真空度沿深度损失对疏浚泥加固效果削弱越明显。由此可见,当采用塑料排水板联合真空预压加固高含水率疏浚泥时,减少排水板的弯曲有助于提高有效加固深度。

3 结 论

本文通过室内足尺大模型试验,通过测定真空预压过程中排水板中的真空度分布、泥面沉降量,以及试验后排水板形态和疏浚泥的不排水抗剪强度,研究了塑料排水板联合真空预压处理高含水率疏浚泥的加固效果,并分析了塑料排水板弯曲对真空预压法处理疏浚泥效果的影响,得到结论如下:

(1)真空预压处理高含水率疏浚泥时,塑料排水板将产生弯折型弯曲和非弯折型弯曲,且弯折型弯曲出现的位置随真空预压时间的增加逐渐向塑料排水板下部移动。其中,弯折型弯曲处排水板的滤膜和排水通道将出现一定程度的损坏;非弯折型弯曲沿疏浚泥在全深度都有分布,具体出现的弯曲变形类型则受疏浚泥固结沉降量、真空预压处理时间等因素的影响。

(2)真空预压初期,排水板中的真空度沿疏浚泥深度发生了一定程度的衰减,其降低幅度约为5 kPa/m。随着真空预压时间的进一步增加,排水板中弯折型弯曲的出现将引起排水板不同深度处真空度的较大幅度降低,且150 cm、200 cm和250 cm处的真空度下降幅度大于浅部(5 cm, 50 cm, 100 cm)。其中,排水板弯曲引起排水板在200 cm和250 cm深度处真空度的降低幅度可达30%。此外,排水板中第一个弯折型弯曲的出现还将引起疏浚泥泥面沉降速率和泥面沉降量增加幅度的降低。

(3)相同深度处,真空预压处理后疏浚泥的含水率随距排水板水平距离的增加而逐渐增大,且增加幅度逐渐减小。同时,在距排水板相同水平距离

处,疏浚泥含水率随深度增加整体表现出增大的变化趋势,且增加幅度在排水板第一个弯折型弯曲附近开始出现增大。

参考文献:

- [1] 李明东,潘耀森,郎鈔棚,等. 真空预压法处理吹填超软地基10 a进展及展望[J]. 科学技术与工程,2020,20(1): 15-22.
- [2] XU G Z, GAO Y F, HONG Z S, et al. Sedimentation behavior of four dredged slurries in China [J]. Marine Georesources & Geotechnology,2012,30(2):143-156.
- [3] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):201-225.
- [4] 刘金龙,栾茂田,汪东林,等. 土工织物与塑料排水板联合处理软基的效果分析[J]. 岩土力学,2009,30(6): 1726-1730.
- [5] YAN S W, CHU J. Soil improved for a storage yard using the combined vacuum and fill preloading method [J]. Canadian Geotechnical Journal,2005,42(4):1094-1104.
- [6] 郑爱荣,尹自强,王世宁. 软基加固后塑料排水板性能研究[J]. 中国港湾建设,2019,39(4):33-36.
- [7] 王婧,苏林王,李涛. 塑料排水板弯曲通水量对比试验研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(2):17-22,40.
- [8] 孙立强,闫澎旺,李伟,等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(4):984-990.
- [9] 朱群峰,高长胜,占鑫杰,等. 考虑板土相互作用的排水板通水特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(12): 2158-2164.
- [10] 俞炯奇,孙伯永. 长期在地下工作后的塑料排水板的性能研究[J]. 水利学报,2017(S1):711-715.
- [11] 应舒,陈平山. 真空预压法中塑料排水板弯曲对固结的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3633-3640.
- [12] 宋苗苗,王正宏,徐桂中,等. 钙质絮凝剂对高含水率吹填淤泥自重沉积特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2021,41(5):22-27.
- [13] 朱建才. 真空联合堆载预压加固软基机理及工艺研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [14] 朱群峰,高长胜,杨守华,等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1429-1433.
- [15] 李波,程文亮,项存平,等. 大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2): 162-165.
- [16] 唐彤芝,董江平,黄家青,等. 薄砂层长短板结合真空预压法处理吹填淤泥土试验研究[J]. 岩土工程学报,2012, 34(5):899-905.
- [17] 张崇旗,丁建文,万星,等. 真空联合堆载预压加固长江

(下转第12页)

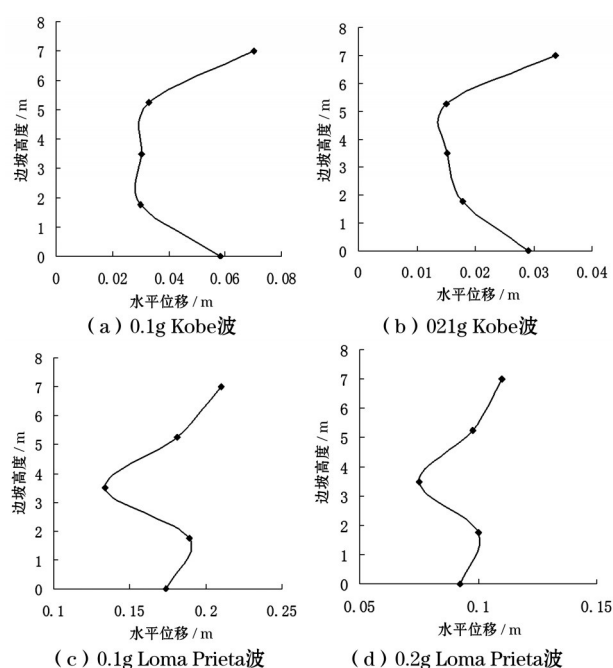


图12 不同地震动作用下土坡不同高度的水平位移变化

土坡在不同地震动作用下的地聚物改良土坡地震反应特性进行了数值模拟,得出了动剪应力、加速度和水平位移反应,得到以下结论:

(1)偏高岭土基地聚物改良粗粒土的最大动剪切模量与块石含量存在近似线性增长关系,与围压呈现幂函数增长关系;在不同围压、块石含量下地

聚物改良粗粒土最小和最大阻尼比都随着剪应变幅值的增加而增加。

(2)在相同强度和频谱的地震动作用下,地聚物改良土坡中上部和底部的最大动应力幅值较大,护坡顶部和底部的加速度和水平位移较大;注浆后,土坡的强度明显增大,更有利于抗震。

(3)在不同强度和频谱的地震动作用下,在Loma Prieta波作用下地聚物改良土坡的动力反应比Kobe波作用下护坡的动力反应大。

(4)地聚物改良土坡坡顶部和底部是地震动作用下的薄弱区域,在抗震设计中应引起重视;另外对于护坡的中部和中上部也应引起相应的重视。

参考文献:

- [1] 高昊鹏,朱苦竹. 地聚物砂浆在道路加固中的应用与研究[J]. 粉煤灰综合利用,2019(6): 89-92.
- [2] 白蕾. 地聚合物注浆材料的开发及性能研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(7):11-15.
- [3] 胡杰,吴居涛. 地聚物注浆加固技术在广州机场高速公路的应用[J]. 广东公路交通,2020,46(1):16-19.
- [4] 狄升贯,问鹏辉. 地聚物注浆在道路基层加固补强工程中的应用与评价[J]. 北方交通,2019(2):52-56.
- [5] 王志兵,黄亚琴,冒娟. 地聚物压密注浆在道路基层补强中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018,14(5):97-99.

(上接第6页)

- 漫滩相软基孔压测试分析[J]. 防治减灾工程学报, 2019, 39(6): 954-960.
- [18] 孙宏磊,陆逸,潘晓东,等. 真空预压作用下初始含水率对疏浚淤泥固结应用研究[J]. 岩土力学,2021,42(11): 3029-3040.
- [19] 刘志中,丁建文,王刚,等. 考虑真空度衰减的真空预压沉降计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,

- 46(1):191-195.
- [20] 夏玉斌,陈允进. 直排式真空预压法加固软土地基的试验与研究[J]. 工程地质学报,2010,18(3):376-384.
- [21] 曹玉鹏,孙宗军,丁建文,等. 高含水率疏浚泥轴对称大应变固结模型[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1904-1910.