

DOI: 10.11779/CJGE2016S1016

软基加固中排水板滤膜性能的试验研究

崔士平

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 排水板外起过滤作用的滤膜种类多, 性能差别大, 为探究不同排水板滤膜在真空加固软基过程中的性能差别, 设计室内单井模型试验, 对3种排水板滤膜进行研究, 研究表明: ①等效孔径较大的排水板滤膜抗淤堵能力强, 加固效果好; ②纤维强度较高的排水板滤膜抵抗受力变形能力强, 抗淤堵性能好; ③加固过程中, 坚向排水体附近土粒发生流失, 滤膜孔径越大、距离滤膜越近土粒流失越多; ④实际工程中, 在满足保土性要求前提下, 建议优先考虑纤维力学强度高、等效孔径较大的滤膜。

关键词: 排水板; 滤膜; 防淤堵; 保土性; 模型试验

中图分类号: TU471.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)S1-0087-07

作者简介: 崔士平(1989-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事岩土工程勘察设计和科研等方面工作。E-mail: cuishiping0117@126.com

Model test on filtration fabrics of drainage board in reinforcement of soft soil foundation

CUI Shi-ping

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China)

Abstract: Filter fabrics are not unified. To explore the influence of different filter fabrics on vacuum preloading, model tests on single well are performed to study three kind of filter fabrics. The results show: (1) The filter fabrics with large aperture have strong ability to resist siltation, so the effect of disposing soft soil is better. (2) The filter fabrics with strong fibers can resist mechanical deformation, and soft foundation is improved well. (3) During the tests, the soil next to the vertical drainage channel runs away, and the larger the aperture and the shorter, the distance the greater the loss of soil. (4) In practical engineering, under the premise that the soil requirements are satisfied, it is suggested, that the membrane filter with fiber with high mechanical strength and large equivalent aperture should be used.

Key words: drainage board; filtration fabric; siltation prevent in; soil retention; model test

0 引言

随着围海吹填造陆工程的增加, 真空预压法常用来处理超软土地基^[1-3]。以土工合成材料中具有良好透水性和过滤性的土工织物作为外包滤膜的塑料排水板在真空预压中作为较理想的竖向排水体以其施工方便、质量稳定、加固效果好等优点被广泛采用^[4-5]。然而塑料排水板外包滤膜根据原材料及生产方式的不同可分为多种类型, 不同类型的排水板滤膜性能差别较大^[6]。

目前, 国内外关于塑料排水板滤膜的研究主要针对其自身抗淤堵性、渗透性能等特性展开, 关于排水板滤膜在真空预压处理软基过程中的性能研究开展较少^[7-9]。基于上述情况, 设计室内真空预压单井模型试验, 在天津大学土工实验室对3种不同类型的排水板滤膜进行试验研究, 分析其在真空预压加固软基过程中的性能。

1 研究思路

用等效孔径、纤维力学强度具有明显差异的3种排水板滤膜做成竖向排水体, 进行真空预压模型试验, 通过分析试验中各监测及检测数据, 研究真空预压中, 各类排水板滤膜的性能差别。塑料排水板横断面常为长方形而试验用模型桶是圆柱形, 为避免该差异对试验结果的影响, 且为保证竖向排水体可随土体沉降而压缩, 采取用圆柱形铁丝弹簧做内撑外包排水板滤膜的办法制竖向排水体, 见图1。3种排水板滤膜的等效孔径见表1, 为便于叙述分别称作防淤堵膜、增强膜和普通膜, 对滤膜的纤维力学强度进行定性描述。

试验只考察土体径向加固效果差异, 所以, 模型桶中不设水平排水层。

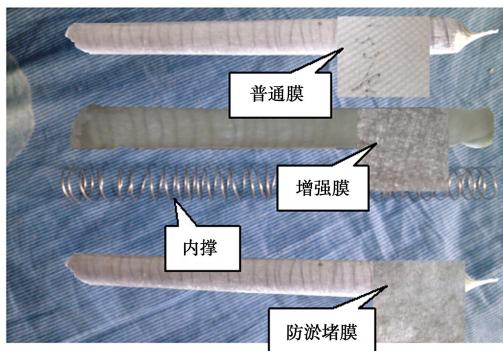


图 1 竖向排水体实物图

Fig. 1 Vertical drainage channel

表 1 各类型排水板滤膜基本特征

Table 1 Equivalent aperture of filtration fabrics

滤膜类型	防淤堵膜	增强膜	普通膜
等效孔径 O_{95}	101	85	45
纤维强度	中	高	低

2 室内试验的实施

2.1 模型试验设计

为达试验目的, 对同一种滤膜同时用 3 个尺寸为直径 \times 高 = 38 cm \times 28 cm 的圆柱形模型桶进行平行试验, 排水体置于模型桶中间, 周围填筑土样, 泥面与排水体等高, 为 25 cm。取井径比 $n=15$, 确定竖向排水体直径为 2.5 cm。

试验中, 模型桶用塑料布进行密封并与其前端起水气分离和储存真空作用的小型储气罐连接, 通过小型储气罐视窗可监测各模型桶出水量。3 个小型储气罐与连有两台真空泵的大型储气罐连接。整套试验装置见图 2, 原理示意见图 3。此外, 对储气罐和模型桶内真空度的变化进行监测; 在距桶底 12 cm 平面内布四个微型孔压计, 记录土体内孔压变化, 4 个孔压计距离竖向排水体分别为 0, 5, 10, 15 cm, 具体情况见图 4; 通过测深游标卡尺对与竖向排水体距离分别为 1, 8, 15 cm 的 3 个区域进行沉降监测, 为便于阐述 3 个区域分别称作中心、过渡段和边缘, 每个区域选 3 个点, 具体情况见图 5。



图 2 模型试验装置实物图

Fig. 2 Test model installation

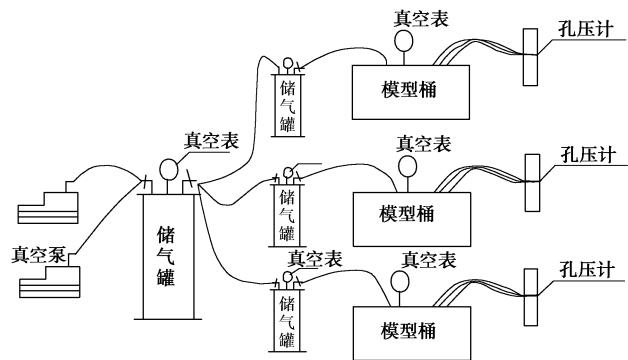


图 3 原理示意图

Fig. 3 Principle diagram

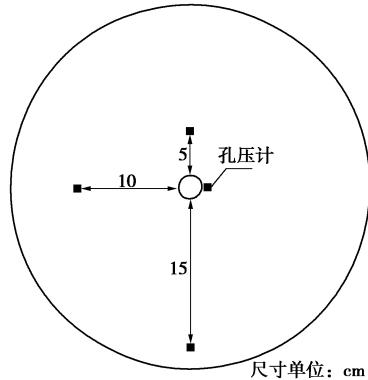


图 4 孔压计布设位置

Fig. 4 Positions of pore water pressure sensors

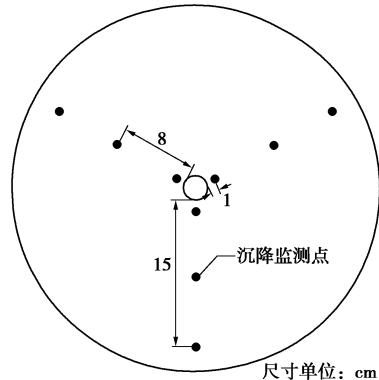


图 5 沉降监测点位置

Fig. 5 Positions of settlement point measuring

试验用土为天津港和温州两地淤泥拌合而成, 含量水率为 55%, 黏粒含量为 45.3%, C_u 为 6.477。

2.2 模型试验方案

为对比不同类型排水板滤膜的加固效果分别对试验前后距离竖向排水体 0~5, 5~10, 10~15 cm 三个区域土体的含水率和微型十字板剪切强度进行测试; 为比较各类型排水板滤膜的保土性能, 对试验后距离排水体 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~2.0 cm 三个区域的土体进行颗粒分析。对各类排水板滤膜的试验数据进行对比分析, 探究其在真空加固软基过程中的性能差别。

3 试验结果及滤膜性能评价

对每组试验中 3 个平行模型桶的数据取平均值, 得到相应类型排水板滤膜的试验结果。

3.1 滤膜保土性能评价

为对比各类排水板滤膜真空加固过程的保土性, 对试验后排水板附近区域土体进行颗粒分析, 结果如图 6~8。

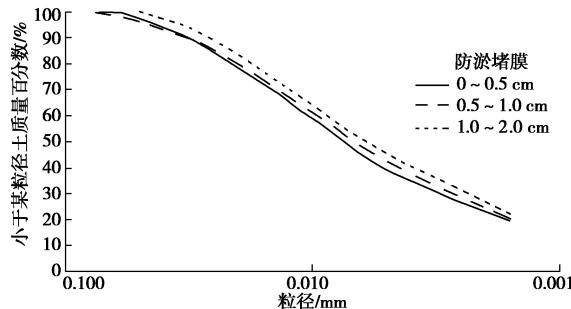


图 6 防淤堵膜外土体颗粒曲线

Fig. 6 Grading curves of soil particle size of siltation prevention membrane

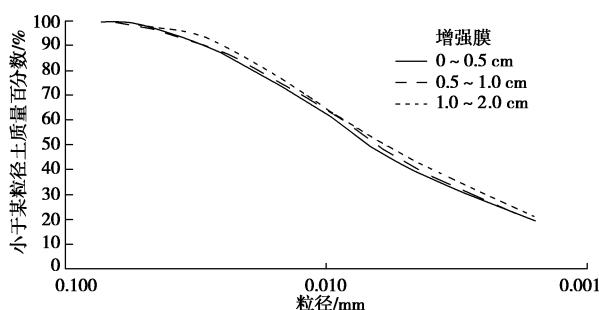


图 7 增强膜外土体颗粒曲线

Fig. 7 Grading curves of soil particle size of high-strength membrane

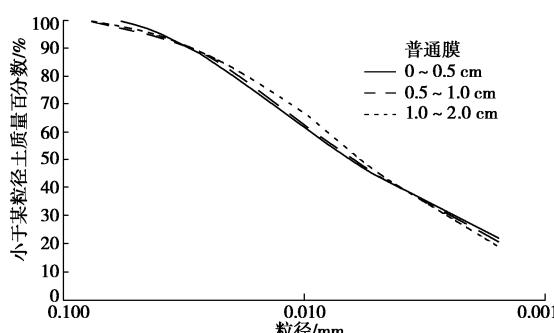


图 8 普通膜外土体颗粒曲线

Fig. 8 Grading curves of soil particle size of ordinary membrane

图 6~8 为同种滤膜外不同区域颗粒曲线。由图可知, 防淤堵膜和增强膜外颗粒曲线规律明显, 基本上呈 0~0.5 cm 颗粒曲线最低, 0.5~1.0 cm 颗粒曲线位于中间, 1.0~2.0 cm 颗粒曲线最高。曲线低表明小于该粒径土粒流失多。防淤堵膜外相邻的两个区域粒

径小于 0.005 mm 土颗粒流失量差值大于 3%; 增强膜外相邻的两个区域粒径小于 0.005 mm 土颗粒流失量差值在 2% 左右; 普通膜外相邻的两个区域粒径小于 0.005 mm 土颗粒流失量差值小于 1%。

通过对比同一滤膜不同位置颗粒曲线, 可发现, 距离滤膜越近区域土颗粒流失越多, 这与“反滤层理论”相吻合, 即滤膜附近细小土颗粒流失后, 形成土骨架, 对后面上体起过滤作用, 阻碍后面上体的流失。

图 9~11 为膜外相同区域不同种排水板滤膜颗粒曲线对比, 由图可知, 3 种滤膜在膜外 0~0.5 cm 范围内颗粒曲线差别最明显, 0.5~1.0 cm 区域次之, 1.0~2.0 cm 区域差别最小。0~0.5 cm 区域防淤堵膜曲线位置最低, 说明该种滤膜外土体流失最严重, 比较粒径小于 0.005 mm 土粒流失量, 防淤堵膜比增强膜多流失 2.07%, 比普通膜多 5.36%; 增强膜与普通膜颗粒曲线左侧相交, 右侧增强膜较低, 说明 0~0.5 cm 区域增强膜外较小颗粒流失量比普通膜多, 而较大颗粒含量相近。0.5~1.0 cm 区域颗粒曲线分布规律与前一区域相似, 只是土粒流失差值变小, 比较粒径小于 0.005 mm 颗粒流失量, 防淤堵膜比增强膜多流失 1%, 比普通膜多流失 2.98%; 1.0~2.0 cm 区域颗粒曲线无明显差别, 各粒径颗粒含量相近。

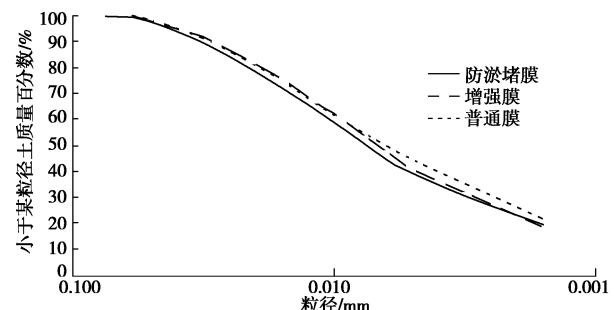


图 9 膜外 0~0.5 cm 范围内不同滤膜颗粒曲线

Fig. 9 Grading curves of soil particle size at area 0~0.5 cm away from membranes

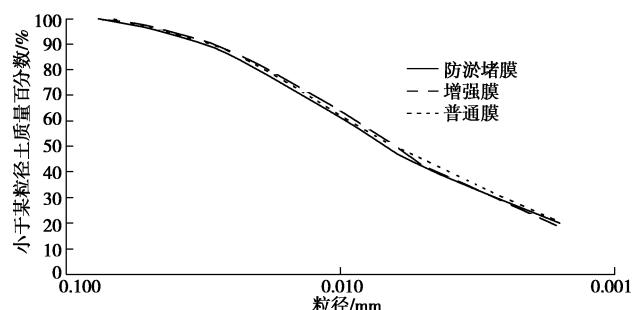


图 10 膜外 0.5~1.0 cm 范围内不同滤膜颗粒曲线

Fig. 10 Grading curves of soil particle size at area 0.5~1.0 cm away from membranes

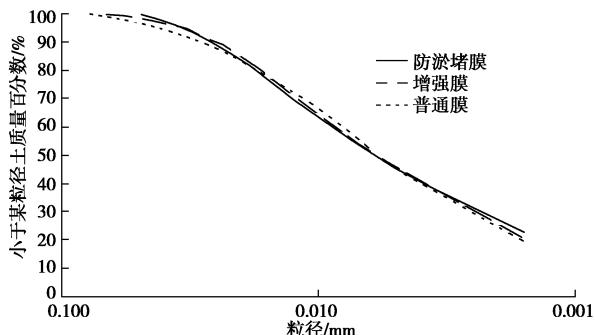


图 11 膜外 1.0~2.0 cm 范围内不同滤膜颗粒分曲线

Fig. 11 Grading curves of soil particle size at area 1~2 cm away from membrane

对比 3 种滤膜外同一位置处的颗粒分曲线,发现随着滤膜孔径的增大,滤膜保土性能逐渐降低,但是上述 3 种滤膜土颗粒流失量差值并不大。

3.2 滤膜防淤堵性能评价

(1) 沉降量分析

试验时,每组试验 3 个区域的沉降曲线如图 12 所示,由图可知,随着加固时间的延续沉降量不断增加,但沉降速度逐渐变慢。试验开始 300 min 内各模型桶中已完成总沉降量的 30%~50%,而试验最后的 480 min 内各组土体沉降量仅为总沉降量的 7%~11%;每组试验沉降量沿径向向外呈递减趋势,各测点最终沉降量见表 2。

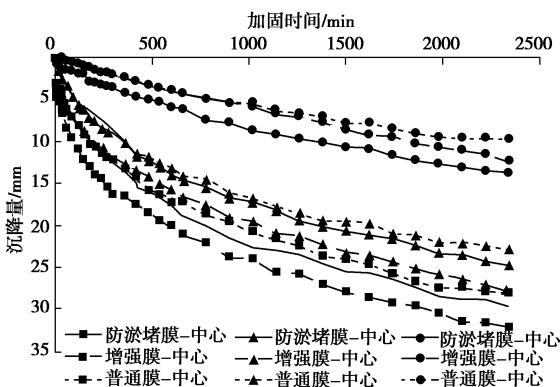


图 12 沉降量-加固时间关系曲线

Fig. 12 Settlement curves over time

表 2 各组试验土体最终沉降量

Table 2 Settlement values of various points (mm)

滤膜类型	中心	过渡段	边缘
防淤堵膜	29.63	24.65	13.75
增强膜	32.22	28.03	12.40
普通膜	28.16	22.83	9.72

试验开始阶段,排水板滤膜渗透性能好,且土颗粒间孔隙较大,孔隙水渗流通道畅通,土体易于排水固结,因此试验初期沉降发展较快;随加固时间延长,排水板滤膜经过一段时间的渗流后,其孔隙通道被细

小土颗粒填塞,发生不同程度的淤堵,渗透性下降,导致土体排水困难,沉降速度变缓;此外,随着土体固结,土颗粒间孔隙逐渐减小,孔隙水在土体内的渗流阻力增加。

对比 3 组沉降曲线可知,防淤堵膜、增强膜在 3 个区域的沉降量都比普通膜大;增强膜在中心及过渡段沉降量大于防淤堵膜,在边缘区域低于防淤堵膜。

试验土样粘粒含量高,土体排水固结过程中,细小颗粒随孔隙水运动,到达排水板滤膜处,部分颗粒可随水流穿过滤膜而排出,但仍有部分土颗粒滞留在滤膜孔隙内或者嵌入在滤膜表面,造成排水板滤膜淤堵,渗透性降低,影响土体排水固结。防淤堵膜和增强膜的等效孔径较普通膜大,细小土颗粒容易通过,不发生明显淤堵;增强膜纤维强度较防淤堵膜大,当受到周围压力作用时,纤维抵抗变形能力较强,而强度较低的防淤堵膜纤维容易在周围压力作用下纠缠抱合,改变了原来的孔隙特征,渗透性降低,因此,虽然防淤堵膜自然状态下等效孔径大于增强膜,但是在压力作用下,其渗透性降低较大,中心及过渡段固结沉降量小于增强膜;增强膜渗透性较大且稳定性好,其周围土体排水固结迅速,当该滤膜边缘区域土体排水固结时,由于其前方区域土体已经完成较大固结,孔隙通道大大减小,孔隙水排出困难,因此,边缘区域固结沉降较防淤堵膜小。

(2) 出水量分析

图 13 为试验过程中,各模型桶出水量随时间变化关系,由图可知,试验前期出水量较大,150 min 出水量达总出水量的 40% 左右,随固结进行,出水速度逐渐变缓,水量呈阶梯型增加,最后水量基本保持不变;试验过程中,防淤堵膜和增强膜出水量明显高于普通膜,最终出水量差值为 200 mL 左右;防淤堵膜与增强膜在 500 min 前曲线交叉,出水量接近,500 min 后,增强膜出水量明显高于防淤堵膜,最终出水量差值为 135 mL。

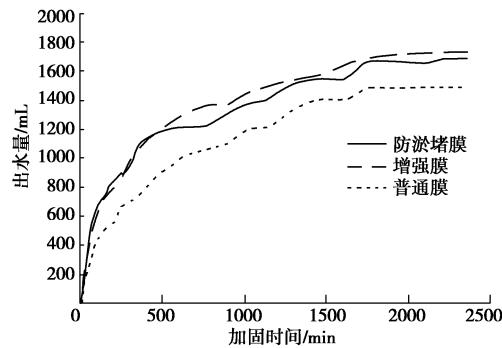


图 13 出水量-加固时间关系曲线

Fig. 13 Water yield curves over time

通过对各组试验出水量的分析, 同样可以发现, 随着试验的进行, 排水板滤膜渗透性逐渐降低, 土体空隙变小, 排水固结速度逐渐变慢; 防淤堵膜和增强膜孔径较大, 抗淤堵能力强, 孔隙水排出较快; 增强膜抵抗压力变形能力高于防淤堵膜, 因此在 500 min 后出水速度明显高于防淤堵膜, 试验后期, 两种膜出水量差值随呈减小趋势, 最终出水量差值仅有 135 mL, 这与上文阐述的增强膜边缘区域固结效果低于防淤堵膜有直接关系。

(3) 孔隙水压力分析

图 14~16 为试验过程中各类型排水板滤膜外距离其不同位置处土体孔隙水压力变化曲线, 由图可知, 试验开始后三种类型滤膜外 0 cm 位置处孔压迅速降低到较大负压, 稍后回升, 回升过程中有跳跃式下降点; 另外三个位置处孔压在试验初期下降较快, 500 min 内孔压降低值达最大降幅的 40%~60%, 孔压降低速度逐渐变慢, 最后孔压趋于稳定; 从中心到边缘孔压降低幅度沿径向逐渐变小。

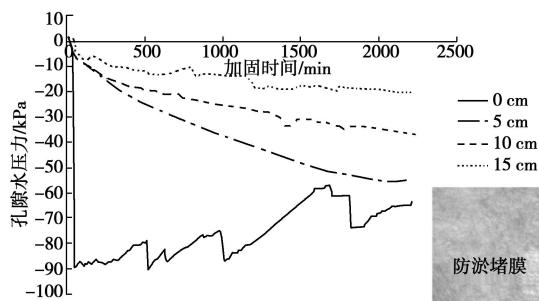


图 14 防淤堵膜外孔压 - 加固时间关系曲线

Fig. 14 Pore pressure curves of siltation prevention membrane

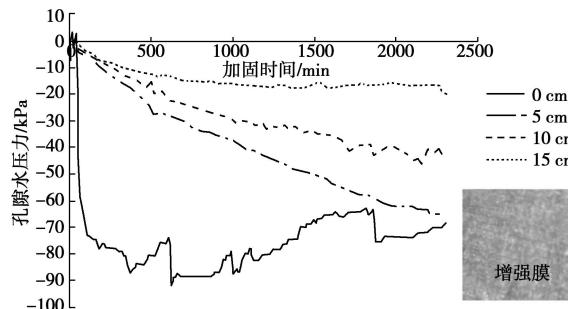


图 15 增强膜外孔压 - 加固时间关系曲线

Fig. 15 Pore pressure curves of high-strength membrane

试验前期, 排水板滤膜渗透性好, 渗透系数远高于土体, 真空迅速传递到 0 cm 处, 孔压计读数迅速下降, 随着试验进行, 排水板滤膜逐渐发生淤堵, 渗透性不断降低, 0 cm 位置孔压持续回升, 针对孔压在某些时刻点跳跃式下降的现象, 笔者认为细小土颗粒穿过滤膜或者滞留在滤膜内部都是动态发展的过程, 当孔压计所对应滤膜区域中细小颗粒流出滤膜或者运动

到滤膜其他区域, 真空度会突然传递到孔压计位置, 导致孔压跳跃式下降; 试验初期, 土体尚未发生真空固结, 孔隙较大, 真空在土体内传递阻力小, 其他 3 个位置处孔压下降较快, 随着真空固结的发生, 土体变得密实, 真空传递越来越困难, 孔压下降速度逐渐变慢; 距离真空源即竖向排水体越远位置, 真空度穿过来需要克服的土体阻力越大, 损失越多, 因此, 沿径向向外, 孔压降幅逐渐减下。

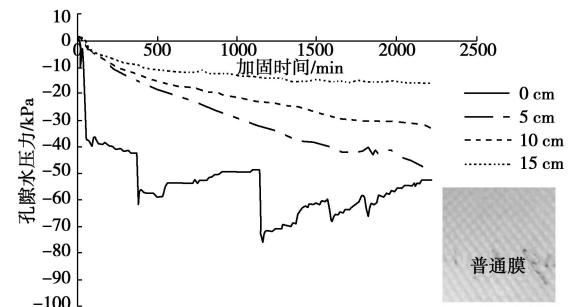


图 16 普通膜外孔压 - 加固时间关系曲线

Fig. 16 Pore pressure curves of ordinary membrane

图 17~20 为 3 种排水板滤膜外相同位置处孔压变化曲线, 由图可知, 0 cm 位置处, 防淤堵膜孔压极短时间内下降到 -88 kPa, 随后在该值附近波动, 340 min 左右孔压值开始回升, 且回升速度由慢变快; 增强膜孔压极短时间内降到 -72 kPa, 然后继续下降, 460 min 时达到最低值 -86 kPa, 后孔压值开始回升, 回升曲线相比防淤堵膜较平缓; 普通膜孔压在短时间内仅下降到 -37 kPa, 之后下降速度缓慢, 380 min 后孔压整体呈现回升趋势。5 cm 和 10 cm 处 3 种膜外孔压变化规律较明显, 防淤堵膜和增强膜外孔压明显低于普通膜, 500 min 前防淤堵膜孔压低于增强膜, 之后两膜外孔压接近, 后随时间发展, 增强膜孔压明显低于防淤堵膜, 从 5~10 cm 3 种膜孔压差值逐渐变下, 到 15 cm 位置 3 条孔压曲线相互交织, 已经没有明显规律。

防淤堵膜与增强膜等效孔径较普通膜大很多, 渗透性好, 因此试验开始短时间内 0 cm 位置处孔压即可下降到负值接近真空度值, 并且防淤堵膜渗透性优于增压膜, 孔压降低值较增强膜大; 随着加固的进行, 两种滤膜发生不同程度的淤堵, 渗透性开始降低, 孔压回升, 防淤堵膜孔压回升较快, 说明其淤堵发生程度较严重, 而增压膜纤维抵抗受力变形能力强, 抗淤堵能力优于防淤堵膜, 孔压回升相对缓慢。普通膜孔径小渗透性差, 短时间内已经发生淤堵, 孔压下降困难, 并且较早开始回升。由于滤膜的淤堵导致真空度在竖向排水体处已经发生局部损失, 滤膜淤堵程度的不同导致真空度损失也存在差异, 对于土体而言,

中心处真空压力的不同,直接影响周围土体孔压降低幅度,防淤堵膜及增强膜孔径大,抗淤堵能力始终高于普通膜,真空间度在滤膜处损失小,因此土体各位置处孔压下降幅度较普通膜大;防淤堵膜初始状态等效孔径大于增强膜,因此500 min前5,10 cm两个位置处孔压降低值大于增强膜,随加固时间延长,滤膜发生淤堵,增强膜纤维抵抗压力变形能力强,发生淤堵程度较防淤堵膜轻,因此500 min后5,10 cm处孔压降低幅度较大;土体某位置处孔压降低是由真空负压所引起,而真空间度的传递受滤膜处局部损失和土体内沿程损失两种因素影响,在土体内部传递距离越远沿程损失带来的影响就越大,3种滤膜外距离中心越远位置处土体孔压降低差异受真空间度在滤膜处局部损失的影响就越弱,因此3种滤膜在相同位置处孔压差值沿径向向外逐渐减小。

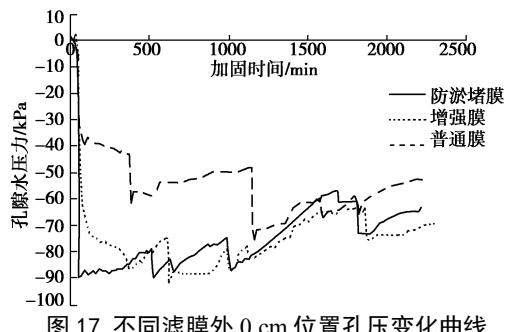


Fig. 17 Pore pressure curves at position 0 cm away from membranes

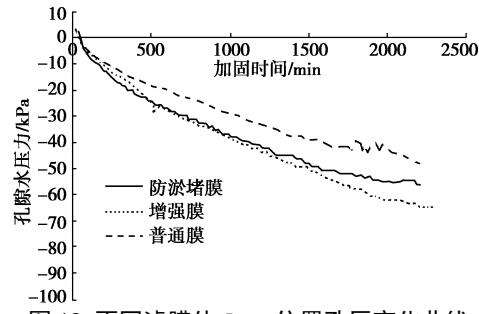


Fig. 18 Pore pressure curves at position 5 cm away from membranes

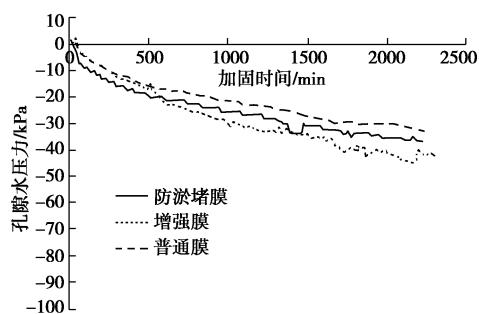


Fig. 19 Pore pressure curves at position 10 cm away from membranes

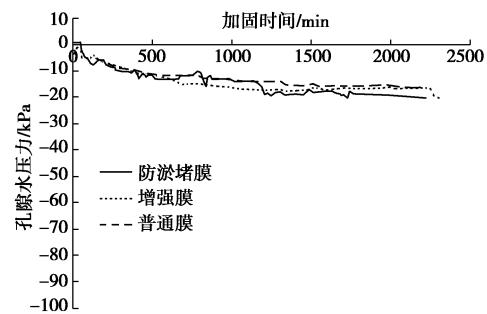


图20 不同滤膜外15 cm位置孔压变化曲线

Fig. 20 Pore pressure curves at position 15 cm away from membranes

3.3 加固效果评价

为评价不同类型排水板滤膜对土体真空加固效果的影响及同种滤膜外径向加固效果差异,对试验前后模型桶内距离竖向排水体不同区域土体的含水率及微型十字板剪切强度进行测试,结果汇总于表3。

表3 土体加固前后含水率及十字板剪切强度变化

Table 3 Water contents and vane strengths before and after tests

项目	滤膜 类型	加固前	加固后		
			0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm
含水率 /%	防淤 堵膜	55	36.21	38.32	40.43
	增强膜		35.34	37.27	41.67
	普通膜		38.10	41.30	42.40
十字板 强度/kPa	防淤 堵膜	0~2	22.96	11.28	9.65
	增强膜		24.74	13.09	8.98
	普通膜		17.56	9.21	6.60

由表3可知,土体初始含水率为55%,试验前,微型十字板无读数,加固后含水率明显降低,十字板强度显著提高,且距离竖向排水体越近含水率降低越多,微型十字板强度提高越大,说明与竖向排水体距离越近的土体加固效果越好;加固后,防淤堵膜与增强膜在各区域含水率均比普通膜低,微型十字板强度都高于普通膜;在0~5 cm和5~10 cm两个区域,增强膜的含水率低于防淤堵膜,十字板剪切强度高于防淤堵膜,即增强膜加固效果优于防淤堵膜,而在最外围的10~15 cm区域,增强膜加固效果则低于防淤堵膜。

各类型排水板滤膜加固效果及膜外各区域变化规律与前文分析内容相符。距离竖向排水体近的土体固结时孔隙水排出渗径短,真空间度传递迅速,易于排水固结,加固效果好;防淤堵膜与增强膜等效孔径大,抗淤堵能力强,加固效果优于普通膜;增强膜纤维抵抗变形能力强,抗淤堵性能高于防淤堵膜,因此大部

分区域加固效果好, 但对于边缘区域土体而言, 由于其前方土体发生较大固结, 因此孔隙水排出困难, 加固效果低于防淤堵膜。

4 结 论

对比分析 3 种类型排水板滤膜真空预压模型试验数据, 得到以下 7 点结论。

(1) 在加固过程中, 竖向排水体附近土颗粒发生流失, 且距离排水体越近土粒流失量越大, 这与“天然反滤层”理论相符。

(2) 排水板滤膜等效孔径越大, 细小土颗粒越容易通过滤膜流失, 防淤堵膜土粒流失最严重, 增强膜次之, 普通膜保土性最好, 但是三者土颗粒流失量差值并不大。

(3) 真空加固软基过程中, 排水板滤膜孔隙会被细小颗粒占据发生淤堵, 滤膜的淤堵是动态发展的过程。

(4) 等效孔径较大的防淤堵膜和增强膜抗淤堵能力明显高于普通膜, 加固软基效果较好。

(5) 增强膜纤维力学强度高, 在周围压力作用下, 抵抗变形能力强, 滤膜孔隙不易收缩, 加固效果比孔径更大的防淤堵膜还好。

(6) 在真空加固软基过程中, 排水板滤膜的渗透性能是影响土体排水固结效果的关键因素。排水板滤膜渗透性良好, 有助于土体的排水固结。

(7) 建议实际工程中, 在满足保土性要求的前提下, 尽量选择外包滤膜孔径较大、纤维强度较高的塑料排水板。

参考文献:

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clay by mean of atmospheric pressure[C]// Conference on Soil Stabilization. MIT, 1952: 32 - 34.
- [2] 娄 炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (LOU Yan. The vacuum preloading method to reinforce soft soil drainage technique[M]. Beijing: Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 赵立致. 真空预压真空度传递规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. (ZHAO Li-zhi Study on vacuum transfer law of vacuum preloading[D]. Tianjin: University of Tianjin, 2011. (in Chinese))
- [4] GIROUD J P. Granular filters and geotextile filters[C]// Proceedings of Geofilters, 1996: 565 - 680.
- [5] 李富强, 王 钊, 刘华清. 塑料排水带地基处理研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2056 - 2060. (LI Fu-qiang, WANG Zhao, LIU Hua-qing. Study on foundation treatment with prefabricated strip drains[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2056 - 2060. (in Chinese))
- [6] JT/T521—2004 公路工程土工合成材料塑料排水板(带)规范[S]. 2008. (JT/T521—2004 Geosynthetics in highway engineering plastic drainboard[S]. 2008. (in Chinese))
- [7] 王景环, 陈志成, 周俊磊, 等. 影响塑料排水板加固效果因素的探讨[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(3): 14 - 17. (WANG Jing-huan, CHEN Zhi -cheng, ZHOU Jun -lei, et al. Research on factors affecting the consolidation by using prefabricated drains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(3): 14 - 17. (in Chinese))
- [8] 孙立强, 闫澍旺, 何洪娟, 等. 吹填土地基真空预压加固过程分析及有限元研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3878 - 3884. (SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, HE Hong-juan, et al. Consolidation process analysis of reclaimed soil foundation by vacuum preloading and finite elements study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3878 - 3884. (in Chinese))
- [9] DIERICKX W. Model research on geotextile blocking and clogging in hydraulic engineering[C]// Proceedings IIIrd Int Conf Geotex. Vienna, 1986: 775 - 777.

(本文责编 孙振远)