文章编号: 1673-9469(2019)03-0033-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.007

良渚水利系统中草裹泥的强度变形试验研究

梁帅威1,2,袁俊平1,2,韩翔宇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 江苏省岩土工程技术工程 研究中心, 江苏 南京 210098, 3. 中国葛洲坝集团国际工程有限公司, 北京 100020)

摘要: 为了论证良渚时期广泛采用的草裹泥工艺的科学性和合理性,对单个草裹泥、草裹泥堆砌体开展了无侧限抗压强度试验及大型固结试验。通过试验结果表明: 草裹泥的受力变形可分为三个阶段,篾条在草裹泥应变达到 20% 附近时会发生断裂破坏; 草裹泥可有效提升淤泥的强度,单个草裹泥的无侧限抗压强度与通缝堆砌相差不大,但错缝堆砌能明显提高无侧限抗压强度。草裹泥之间的排水层会加速淤泥固结,苇荻草与篾条的挤密及嵌入会导致坚向变形增加;苇荻草与篾条的变形对坚向变形的贡献主要发生在3h前,随着荷载的增加,大部分变形愈趋近于在前期完成,固结完的草裹泥中淤泥密度要比原状淤泥大 2.50%, 其粘聚力比原状淤泥大 38.7%, 摩擦角比原状淤泥大 20.5%。

关键词:草裹泥工艺;草裹泥堆砌体;堆砌方式;无侧限抗压强度试验;大型固结试验中图分类号:TV64 文献标识码:A

Study on Strength and Deformation of Grass-Wrapped Silt in Liangzhu Water Conservancy System

LIANG Shuaiwei^{1, 2}, YUAN Junping^{1, 2}, HAN Xiangyu³

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Jiangsu Research Centre for Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 3.CGGC International Ltd., Beijing, 100020, China)

Abstract: In order to demonstrate the scientificity and rationality of grass-wrapped silt technology widely used in Liangzhu period, unconfined compressive strength test and large-scale consolidation test were carried out on single grass-wrapped silt and grass-wrapped silt stack block. The experimental results show that the deformation of grass-wrapped silt can be divided into three stages, and the strip will be broken when the strain of grass-wrapped silt reaches 20%. The unconfined compressive strength of single grass-wrapped silt is not significantly different from that of open-joint stacking, but the unconfined compressive strength of single grass-wrapped mud can be improved obviously by staggered joint stacking. The drainage layer between grass-wrapped silt will accelerate the consolidation of silt, and the compaction and embedding of reed grass and strip will lead to the increasing of vertical deformation. The contribution of the deformation of reed grass and strip to the vertical deformation mainly occurred 3 hours ago. With the increasing of load, most of the deformation tended to be completed in the early stage, and the density of silt in the consolidated grass-wrapped silt was 2.50% higher than the undisturbed silt. Its cohesion and friction angle are 38.7% and 20.5% higher than the undisturbed silt respectively.

Key words: grass-wrapped silt technology; grass-wrapped silt stack block; stacking mode; unconfined compressive strength test; large-scale consolidation test

良渚古城及外围水利系统位于今浙江杭州余杭 区良渚镇与瓶窑镇之间,良渚古城是目前所发现同 时代规模最大、水平最高的古城址, 堪称"中华第 一城"[1-3]。浙江省文物考古研究所在外围水利系统、 古城内古尚顶西南坡等地共发现了37处草裹泥堆砌 区域,勘探结果表明草裹泥在良渚时期已被广泛应 用于大小工程之中[46]。草裹泥材料内部为淤泥,外 部包裹苇荻草,并用篾条(当地的芦苇杆表皮)绑 扎而成[7]。草裹泥在制作形式及力学性质上比较类 似于现代工程中的土工袋。刘斯宏教授与日本学者 松岗元等[8-11],研究了土工袋加固地基的力学原理, 层间摩擦特性, 以及土工袋充填淤泥土的强度变形 特性,提出了土工袋著名的"似粘聚力"理论。在 二维理论的基础上,白福清[12]等运用三维应力状态 分析了土工袋的加固原理,并给出土工袋内土体在 三维复杂应力状态下的极限抗压强度。高军军等[13-14] 利用有限元方法研究了土工袋在竖向应力作用下 的强度变形特征。高军军等[15-17]对于不同填料的土 工袋进行了强度变形、袋间摩擦、动力特性试验研究。

但是,草裹泥与土工袋整体性能仍存在差异。 第一是土工袋的包裹材料各向同性,而草裹泥表现 为各向异性。第二,土工袋拉伸强度虽略低于植物 纤维,但是其延展性要远远优于后者,这也是人工 纤维相较于植物纤维的优势所在。除此草裹泥的包 裹形式、界面关系、尺寸等方面与土工袋也存在明 显差异。基于二者存在的性能差异,本文对草裹泥 的强度、变形特性展开了试验研究,以便于更加深入 地认识草裹泥的工程特性,更好地认识良渚当时的工 程技术水平。

1 无侧限抗压强度试验

1.1 草裹泥组成材料的物理力学性质

草裹泥的组成材料包括淤泥、苇荻草及篾条。淤泥取样地点位于良渚遗址区的湿地,对其中取土制作草裹泥的点进行分散随机环刀取样,以尽量确保试验结果对该片地区土体性质有较好的代表性。将取好的淤泥土样在实验室开展土力学实验,测其基本的物理力学指标(表1)。苇荻草与篾条样品均取自良渚遗址区的湿地旁,割取后带回实验室简单清洗,剔除明显枯黄损伤的单根,掐头去尾后制成统一长度450 mm的草样,为了消除过大的个体差异,苇荻草10 根为一组,篾条单根为一组,统一编号,进行试验。苇荻草与篾条的拉伸试验在 WDS-30L型微机控制式万能试验机,最高可以提供30 kN的轴向拉、压力,并且能通过传感器导出应力-变形、变形-时间等曲线,二者的力学指标如表2。

1.2 草裹泥的无侧限抗压强度试验

草裹泥无侧限抗压强度试验包括单个草裹泥无侧限抗压强度试验、草裹泥堆砌体无侧限抗压强度试验。因发现良渚水利系统中坝体的草裹泥普遍采用错缝堆砌,故草裹泥堆砌体的试验中采取 3×3 通缝和错缝两种对照堆砌方式。试验所用的草裹泥都采用统一的尺寸: 450 mm×150 mm×150 mm。试验在 WDS-30L 型微机控制式万能试验机进行,上下承压板尺寸为 500 mm×500 mm×10 mm。试验前先对草裹泥施加一个 0.5 kN 的预压力,预压时长2 min,保证草裹泥表面平整且内部淤泥受力均匀。试验时,固定万能试验机的下加载板,控制上承压板的加载速率2 mm/min,Smart-test 测试程序实时采集应力和变形的数据。当竖向力数值基本稳定后,表明草裹泥已达到极限抗压强度,此时停止加载。

图 1(a) 为单个草裹泥应力与应变的关系,根据试验现象,将草裹泥的破坏分为三个阶段:第一阶段为篾条受力阶段,篾条随着袋内淤泥变形开始发

表 1 淤泥的物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical indexes of silt

天然密度 /(g·cm ⁻³)	天然含水率 /%	孔隙比	液、塑限/%	压缩系数 /MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/°
1.49	63.1	1.95	38.7/25.3	0.21	10.4	14.8

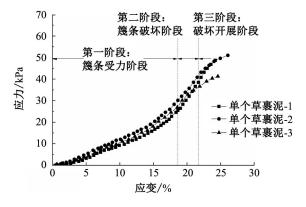
表 2 苇荻草与篾条的力学指标

Tab.2 Mechanical index of reed grass and strip

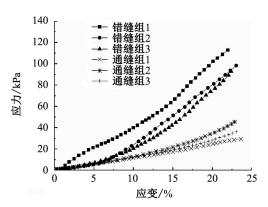
	拉伸强度 /(kN·m ⁻¹)	伸长率 /%	断裂荷载 /kN	横截面面积 /cm²
苇荻草	141.76	0.83	0.53	0.019
篾条	218.29	1.38	1.34	0.143

挥作用,限制草裹泥在短轴向的变形,第二阶段为 篾条破坏阶段,篾条由于达到了极限抗拉强度在应 变达到 20% 附近时会发生断裂,第三阶段为破坏开 展阶段,草裹泥失去篾条的约束后,苇荻草在变形 中变得松散,土体被挤出并从边缘开始发生破坏。 试验结束后,草裹泥被压成扁平状,其中部为中心 受压区,边缘为破坏区,部分捆扎草裹泥的篾条在 边缘被折断,打开破坏后的草裹泥发现其中心受压 区的淤泥十分密实,而边缘的淤泥则发生破坏(图 2)。草裹泥堆砌体在无侧限抗压强度试验后,取出 其中的草裹泥发现,其破坏形式与单个草裹泥无侧 限抗压试验一致。

图 1(b) 为草裹泥堆砌体的应力与应变的关系曲线。为了便于进行横向比较,我们将单个草裹泥、通缝组和错缝组以应变达到 20% 为破坏标准。如表 3 所示,统计原状淤泥样、各组试样的无侧限抗压强度发现草裹泥可有效提升淤泥的强度,单个草裹泥的无侧限抗压强度是淤泥的 2.80 倍,单个草裹泥的无侧限抗压强度与通缝堆砌相差不大,但错缝堆砌能明显提高无侧限抗压强度,是单个草裹泥的



(a) 单个草裹泥应力与应变的关系



(b) 草裹泥堆砌体的应力与应变的关系

图 1 单个草裹泥和草裹泥堆砌体的应力应变关系

Fig.1 Stress-strain relationship of single grass-wrapped silt and stack block



(a) 试验中的草裹泥堆砌体



(b) 草裹泥的破坏形式

图 2 试验中的草裹泥堆砌体及草裹泥的破坏形式

Fig.2 Grass-wrapped silt stack block in the test and the destruction form of grass-wrapped silt

表 3 原状淤泥样与不同试样组草裹泥无侧限抗压强度 Tab.3 Unconfined compressive strength of the four specimens

组别	20% 应变对应强度 /kPa				
	淤泥原状样	单个草裹泥	通缝组	错缝组	
第一组	11.10	34.75	34.57	102.48	
第二组	12.10	32.51	28.36	79.49	
第三组	11.70	30.33	24.61	74.53	
平均值	11.63	32.53	29.18	85.50	

2.63 倍,这是因为错缝堆砌草裹泥之间的纵横咬合作用可以明显提高无侧限抗压强度,这也与良渚水利系统中坝体的草裹泥普遍采取错缝堆砌的现象相一致。

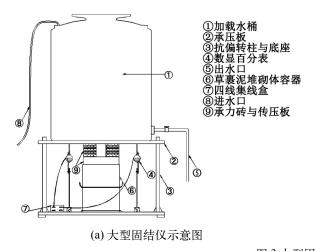
2 草裹泥的固结试验

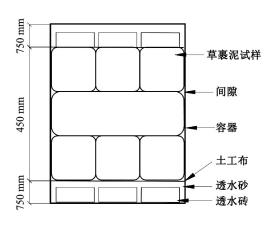
为了研究草裹泥的固结特性,自主设计了大型固结仪如图 3(a) 所示。大型固结仪大致分为四个部分:加载水桶、承力传压系统、试样容器、测量系统。为了反映草裹泥在坝体内的真实固结特性,堆砌体选择错缝 3×3 的堆砌方式,试样整体尺寸为450 mm×450 mm×450 mm,如图 3(b)。试验采用双面排水,上下透水层采用透水砖加透水砂,并用土工布完整覆盖防止试验时淤泥堵塞透水层。在堆

砌草裹泥时,用原状淤泥填充间隙,保证每层试样 平整。堆砌好草裹泥并且处理好透水层后,用不透 水胶带堵住下出水口,从上排水层进行灌水直至四 周有水溢出后,盖上传压板静置 12 h 进行饱和处理。

试验分四级加载,加荷过程为 25 kPa—50 kPa—75 kPa—100 kPa。承压板、承力板与传压板总重 50 kg,再加入 456.25 kg的水作为第一级荷载,第二、三、四级荷载依次在水桶中加入 506.25 kg的水。考虑到草裹泥在坝体中的埋深以及试验客观条件,以 24 h 后试样每小时变形不超过轴向应变的 0.25% 作为稳定标准,再进行下一级加载。测量系统包括四个数显百分表,通过四线集线盒连入计算机,可实时读取草裹泥堆砌体的竖向变形量。

原状淤泥样在固结仪内进行试验,为了把草裹 泥堆砌体与原状淤泥固结特性进行比较,二者的竖

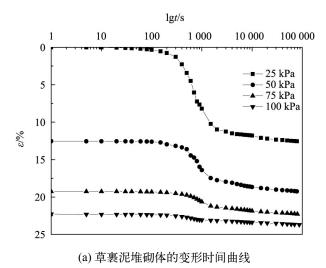


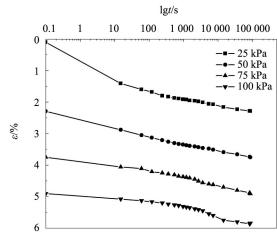


(b) 容器内部摆放示意图

图 3 大型固结试验示意图

Fig.3 Instrument diagram of large-scale consolidation test





(b) 原状淤泥的变形时间曲线

图 4 草裹泥堆砌体及原状淤泥的变形时间曲线

Fig.4 Strain-time curves of two kinds of grass-wrapped silt stack block and undisturbed silt

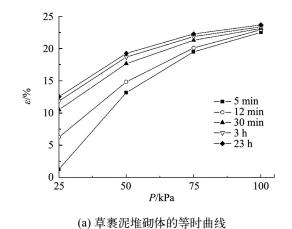
向变形用累计竖向应变进行表示。图 4 分别给出了草裹泥堆砌体和原状淤泥在 K₀ 侧限固结试验下的变形时间曲线。从两种试样的最终累计应变来看,草裹泥堆砌体要远远大于原状淤泥。草裹泥试样变形时间曲线在各级荷载下均呈现 "S"型,有明显的反弯点出现,在荷载增加后曲线呈 "S"型特征的趋势变弱,反弯点提前。原状淤泥的变形时间曲线在前三级荷载作用下类似于线性,只在最后一级荷载下呈现 "S"型特征。究其原因为三点:一是竖向变形的组成不同,原状淤泥的竖向变形主要由固结引起的,而草裹泥试样中不仅是淤泥会固结,苇荻草与篾条也会产生挤密变形。二是草裹泥之间排水层的加速固结作用。三是苇荻草与篾条的嵌入导致整体变形增加。

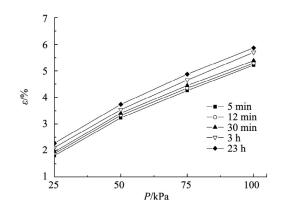
从图 5 中两种试样的等时曲线可以看出,两组试验曲线的发展趋势基本一致,变形均呈现出非线性增长。二者的大部分变形均在 3 h 之前完成,然而草裹泥试样在 5 min 到 3 h 这段时间的变形相对于原状淤泥较大,以 50 kPa 组为例,草裹泥试样在这段时间变形占最终变形量的 28%,而原状淤泥只有8.2%,这些说明苇荻草及篾条的变形对整体变形的贡献主要发生在 3 h 前,而且随着荷载的增加,大部分变形愈来愈趋近于在前期完成,这和变形时间曲线上反弯点随着荷载增加会发生提前的现象一致。

为了从其他角度验证草裹泥中淤泥样与原状淤泥样固结程度,将在100 kPa下固结完的草裹泥中的淤泥样与原状淤泥样分别用环刀取样,测算密度与直剪强度指标,结果如表4所示。草裹泥试样中淤泥密度要比原状淤泥大2.50%;其粘聚力比原状淤泥大38.7%,摩擦角比原状淤泥大20.5%。

3 结论

- 1) 草裹泥的破坏分为三个阶段: 篾条受力阶段、篾条破坏阶段、破坏开展阶段。篾条在应变达到 20% 附近时会发生断裂破坏。
- 2) 草裹泥可有效提升淤泥土的强度,单个草裹泥的无侧限抗压强度是淤泥的 2.80 倍,单个草裹泥的无侧限抗压强度与通缝堆砌相差不大,但错缝堆砌能明显提高无侧限抗压强度,是单个草裹泥的 2.63 倍。
- 3) 草裹泥堆砌体与原状淤泥竖向变形的组成不同,原状淤泥的竖向变形主要是由固结引起的,而草裹泥试样中不仅是淤泥会固结,苇荻草与篾条也会产生挤密变形。草裹泥之间排水层会加速淤泥固结,苇荻草与篾条的嵌入会导致竖向变形增加。
- 4) 苇荻草与篾条的变形对竖向变形的贡献主要 发生在 3 h 前,随着荷载的增加,大部分变形愈趋 近于在前期完成。固结完的草裹泥中淤泥密度要比





(b) 原状淤泥的等时曲线

图 5 草裹泥堆砌体及原状淤泥的等时曲线

Fig.5 Isochronous curves of grass-wrapped silt stack block and undisturbed silt

表 4 固结试验结束后淤泥的物理力学指标 Tab.4 Physical and mechanical indexes of silt after consolidation

土样类别	密度 /(g·cm ⁻³)	粘聚力/kPa	摩擦角/。
原状淤泥	1.61	35.4	11.2
草裹泥中的淤泥	1.65	49.1	13.5

原状淤泥大 2.5%, 其粘聚力比原状淤泥大 38.7%, 摩擦角比原状淤泥大 20.5%。

参考文献:

- [1]LIU B, WANG N, CHEN M, et al. Earliest hydraulic enterprise in China, 5, 100 years ago[C]//Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(52): 13637-13642.
- [2] 科林·伦福儒, 刘斌, 陈明辉, 等. 中国复杂社会的出现: 以良渚为例[J]. 南方文物, 2018(1): 63-68.
- [3] 赵 辉 . 良渚的国家形态 [J]. 中国文化遗产, 2017(3): 22-28.
- [4] 刘 斌, 陈明辉, 闫凯凯. 良渚古城考古的实践、收获与思考 [J]. 杭州文博, 2018(2): 10-17.
- [5] 王宁远 . 良渚古城及外围水利系统的遗址调查与发掘 [J]. 遗产与保护研究, 2016, 1(5): 102-110.
- [6] 邱志荣,张卫东,茹静文.良渚文化遗址水利工程的考证与研究[J].浙江水利水电学院学报,2016,28(3): 1-9.
- [7] 刘 斌, 王宁远, 郑云飞, 等 .2006-2013 年良渚古城考古的主要收获 [J]. 东南文化, 2014(2): 31-38.
- [8]MATSUOKA H, LIU S H, SHIMAO R, et al.An environment-friendly Earth Reinforcement Method by Soilbags("Donow") [A].Proc.of 12th Asia Regional Conf.on Soil Mechanic and Geotechnical Engineering, 2003: 501-504.

- [9]MATSUOKA H, SI-HONG L.A New Earth Reinforcement Method Using Soilbags[M].A.A.Balkema Publishers-Taylor& Francis The Netherlands, 2005.
- [10] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学, 2007(8): 1665-1670.
- [11] 刘斯宏, 樊科伟, 陈笑林, 等. 土工袋层间摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1874-1880
- [12] 白福青, 刘斯宏, 王艳巧. 土工袋加固原理与极限强度的分析研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 172-176.
- [13] 高军军,刘斯宏,王柳江.竖向荷载下土工袋的有限元数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(6):524-528.
- [14] 李 栋,鲁 洋,樊科伟,等. 土工袋无侧限压缩试验 有限元数值模拟 [J]. 水电能源科学,2016,34(6):135-139.
- [15] 高军军,刘斯宏,白福清.袋装淤泥土土工袋的强度变形研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2014,36(1);33-36.
- [16] 文 华, 曹 兴, 邹娇丽, 等 . 建渣土工袋力学特性试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(2): 217-222
- [17] 陈巨龙 . 土工袋加筋橡胶砂动力特性的大型循环单剪试验研究 [D]. 株洲:湖南工业大学,2017.

(责任编辑 王利君)