doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503011

桑条秸秆拱加固河道护岸的模型试验研究

孙　昊[1],周康健[2],刘　超[1],李永彬[1],于小娟[1]
(1.盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城　224051;
2.江苏省工程勘测研究院有限责任公司,江苏 扬州　225000)

摘要:为了进一步拓展秸秆在河道护岸工程中的应用,通过将农业废弃物桑条秸秆加工成拱形结构,探索性提出秸秆拱护岸的新型结构形式。基于室内模型箱试验,研究了不同矢跨比的桑条秸秆拱在分级荷载作用下的受力与变形特性。研究结果表明:在相同荷载作用下,秸秆拱的矢高变化呈现出先急剧增加、后逐渐平缓并最终趋于稳定的趋势,且随着矢跨比的增大,秸秆拱的矢高变化量减少,表现出更优越的抵抗土压力特性。

关键词:秸秆拱;河道护岸;矢跨比;模型试验
中图分类号:TU43　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)03-0067-11

据统计,江苏省流域面积超过100 km²的河流数量有714条[1]。由于大量降雨和人类活动的影响,河道岸线常面临侵蚀风险,工程护岸是保障河道岸线稳定性的重要手段。传统护岸工程多采用钢筋混凝土或预制混凝土板等材料构建,形成直立或近直立的护岸结构。这些护岸形式虽然在维护河道稳定性和提升防洪能力方面发挥重要作用,但也存在影响河道生态环境和景观效果的问题。随着"绿水青山就是金山银山"理念的深入推广,河流的功能不再局限于传统的防洪、排涝和蓄水,而是扩展至包括景观美化、旅游开发和生态保护等多重目的[2]。常见的生态型护岸形式包括三维植被网护岸、土工格栅固土种植护岸和生态混凝土砖护岸等。马鑫等[3]在天津市某河道工程中应用三维土工网植草护岸,明确了该技术能有效防止自然水土流失并发挥固土作用;周易等[4]发现使用生态混凝土砖护坡的边坡安全系数相比传统土质边坡提高了5%以上。尽管如此,目前生态型河道护岸的结构形式仍未实现完全生态化。

我国拥有庞大的农业生产规模和丰富的秸秆资源[5]。传统的秸秆处理方式主要依赖焚烧,但这一过程会释放大量的气态和颗粒污染物,成为大气污染的主要来源之一[6]。在"双碳"目标大背景下,秸秆资源的综合利用越来越多开展,包括应用在河道护岸工程中。Jin等[7]指出稻草垫护坡可有效减少土体地表径流潜力并降低土体侵蚀力。储根法[8]明确了秸秆毯在公路边坡防护工程中的应用具有施工简便且经济效益显著的优势。Won等[9]表明了稻草垫在改善径流和控制流沙量方面效果显著。蒋科伟[10]将秸秆编织物应用于河道护岸,指出该技术能够显著提升河流堤坝的防护效能,同时保持河岸的自然状态。倪栋等[11]提出植物编织毯具备边坡防护作用,能有效减小地表径流量。Richet等[12]通过灌木树篱用于河岸护岸表明该结构可有效增强土体对径流侵蚀的抵抗特性。

为进一步拓展秸秆在河道护岸工程中的应用,本文探索性提出了新型秸秆拱护岸结构。该结构以农业废弃物桑条秸秆为原料,通过加工形成拱形结构,并将其用于河道护岸工程中。通过室内模型箱试验,分析了桑条秸秆拱在不同矢跨比条件下的受力变形特性,系统分析了该结构在荷载作用下的性能表现,评估了其在河道护岸工

收稿日期:2024-10-23
基金项目:国家自然科学基金项目(51778556)。
作者简介:孙昊(2002—),男,江苏盐城人,硕士生,主要研究方向为环境岩土工程。
通信作者:刘超(1992—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要研究方向为环境岩土工程。

程中的可行性。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

本试验采用农业废弃物——桑条秸秆进行模型试验。将取自盐城市东台桑园的桑条秸秆运回实验室后,选取直径为 10~12 mm 的秸秆 500 根,并统一裁剪成长度为 500 mm 的秸秆,如图 1 所示。

对裁剪后的桑条秸秆分成 4 组,按照《木材横纹抗压试验方法:GB/T 1939—2009》[13]规定的方法分别进行含水率、抗压强度、抗剪强度和抗弯强度测试;每组测试 5 次后取平均值作为最终测试结果,如表 1 所示。



图 1　桑条秸秆

Fig. 1　Mulberry straw

表 1　桑条秸秆物理力学性质

Table 1　Physical and mechanical properties of mulberry straw

指标	含量
直径/mm	10~12
含水率/%	87.40
抗压强度/MPa	2.32
抗弯强度/MPa	20.13
抗剪强度/MPa	3.01

1.2　桑条秸秆拱制作方法

为确保秸秆拱制作的标准化和便捷化,采用自主研发的桑条秸秆拱模具[14]进行加工。该模具由上拱片、下拱片及支座组成,如图 2 所示。图 2 中的上、下拱片均由弧形铁片焊接而成,并通过铰链连接;下拱片与支座焊接,以确保模具的安全稳定。

桑条秸秆拱制作方法如下:首先,将长度为 500 mm 的桑条秸秆均匀铺设于模具的下拱片内;其次,将上拱片向下压实,模具闭合,使秸秆在模具内形成拱形;随后使用塑料扎带将桑条秸秆捆绑固定,形成稳定的拱形结构;最后,将固定好的秸秆拱从模具中取出,即可得到完整的桑条秸秆拱,如图 3 所示。

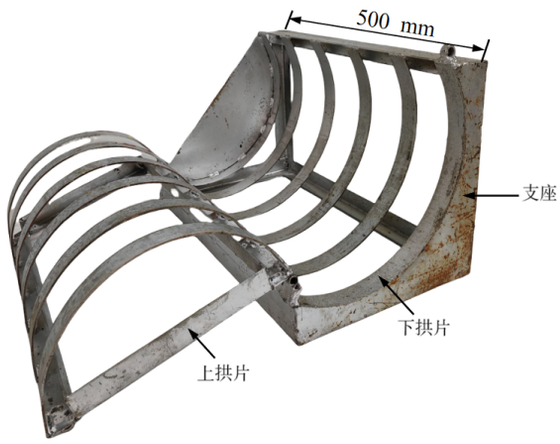


图 2　桑条秸秆拱模具

Fig. 2　Mulberry straw arch mould

1.3　桑条秸秆拱模型试验方案

为研究不同矢跨比的桑条秸秆拱在土压力荷载作用下的受力和变形特性,开展了桑条秸秆拱模型试验。根据李永彬[15]的研究,当桑条秸秆拱密度为 0.476 g/cm^3、跨径为 300 mm 时,桑条秸秆拱表现出良好的受力特性。因此,本试验选择密度为 0.476 g/cm^3,跨径为 300 mm,矢跨比分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 的秸秆拱通过分级加载的方式进行试验,试验方案见表 2。为减少试验偶然性,每组试验重复进行 3 次,并取平均值作为最终的试验结果。

试验在模型箱中进行,模型箱的尺寸为 800 mm × 600 mm × 500 mm,由透明亚克力板制成。为了确保模型箱的结构稳定,模型箱四周采用钢板和螺杆进行加固。试验步骤如下:

1) 在模型箱内安装木桩作为桑条秸秆拱的支座,并将秸秆拱固定在木桩上(图 3);

2) 将标准砂缓慢倒入模型箱中,直至砂面高度与桑条秸秆拱的顶面齐平;

3) 采用分级加载的方法,研究桑条秸秆拱在土压力作用下的变形情况。分级荷载按 6.12、12.25、18.37、24.50、30.62、36.75 kPa 的顺序由小到大依次施加荷载,每一级荷载持续施加 24 h;

4) 使用全站仪(TS-02 型)对桑条秸秆拱表面预设的 4 个不同深度的观测点进行位移测量,观测点分别位于秸秆拱底部上方 150、300、450、500 mm 处,如图 4 所示。每次加载完成后进行位移测试,并在随后每隔 6 h 测试一次,直至位移值

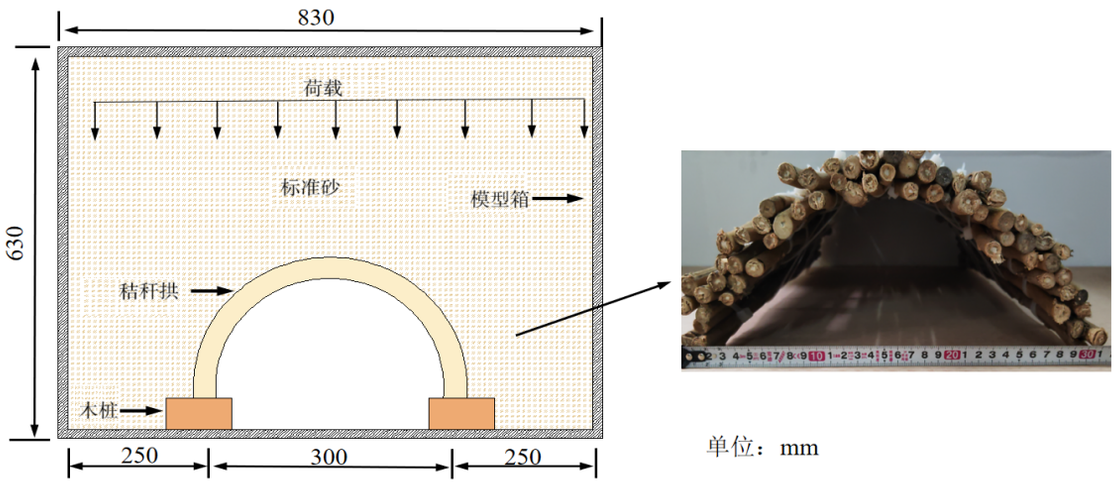


图 3　桑条秸秆拱模型试验

Fig. 3　Model test of mulberry straw arch

表 2　桑条秸秆拱模型试验方案

Table 2　Model test scheme for mulberry straw arch

方案	矢跨比	跨径/mm	分级荷载/kPa
A	0. 2	300	6. 12、12. 25、18. 37、24. 50、30. 62、36. 75
B	0. 3	300	6. 12、12. 25、18. 37、24. 50、30. 62、36. 75
C	0. 4	300	6. 12、12. 25、18. 37、24. 50、30. 62、36. 75
D	0. 5	300	6. 12、12. 25、18. 37、24. 50、30. 62、36. 75

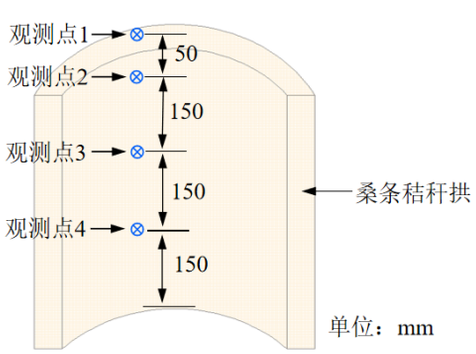


图 4　观测点位置布置图

Fig. 4　Layout diagram of observation points

趋于稳定。

2　试验结果

2. 1　分级荷载对桑条秸秆拱矢高的影响

以矢跨比为 0. 2 的桑条秸秆拱为研究对象,研究分级荷载对矢高的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,在未施加外部荷载的情况下,土压力传递至秸秆拱结构,导致矢高发生变化,观测点 4 的矢高变化量为 7. 51 mm;当施加 6. 12 kPa 荷载时,秸秆拱的矢高变形量呈现出先急剧增加后缓慢增加,并最终趋于稳定的趋势,观测点 4 的变形量达 14. 24 mm;当荷载分别增加至 12. 25、18. 37、24. 50、30. 62、36. 75 kPa时,秸秆拱矢高变形量均表现为先迅速增加,后逐渐趋稳的趋势,并且观测点 4 的变形量分别为 22. 86、31. 25、38. 57、43. 56、48. 12 mm。因此,桑条秸秆拱的矢高累计变化量随着侧向荷载的增加呈现出明显的阶梯式增长趋势。

为了更清晰地分析分级荷载对秸秆拱矢高的影响,对各级荷载作用下秸秆拱的最终矢高进行了统计,如图 6 所示。在未施加外部荷载的情

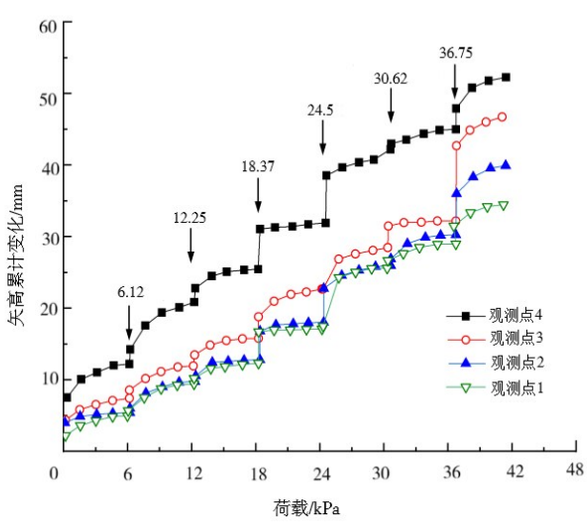


图 5　分级荷载对秸秆拱矢高的影响

Fig. 5　Influence of graded loads on the rise of straw arch

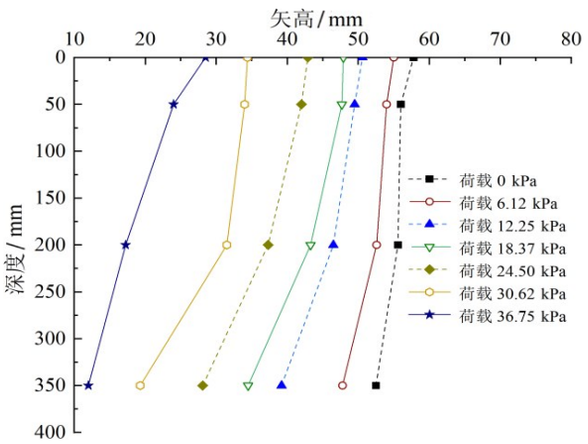


图6　每级荷载作用下的秸秆拱最终矢高量

Fig. 6　The final rise of the straw arch under each level of load

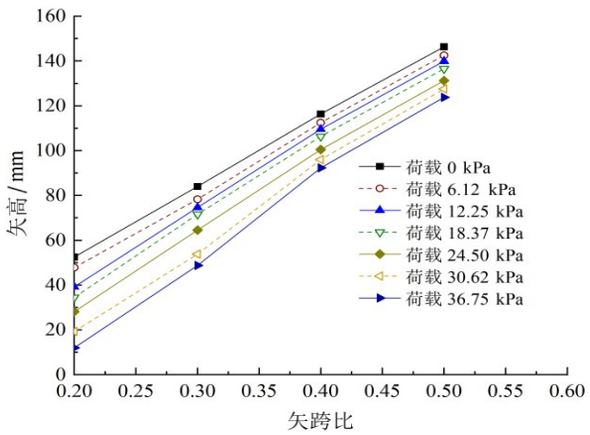


图7　不同矢跨比秸秆拱的矢高变化

Fig. 7　Rise variation of straw arches with different rise-span ratio

况下，观测点4、3、2和1处的矢高分别为52.49、55.64、56.11、57.82 mm；在6.12 kPa荷载作用时，观测点4、3、2和1处的矢高分别为45.76、52.64、54.37、55.13 mm。由此可见，在相同荷载下，秸秆拱不同深度位置的矢高变化存在差异，且随着深度的增加，矢高变化量增大。当荷载增加至12.25、18.37、24.50、30.62、36.75 kPa时，矢高变形量的变化趋势与前述情况一致。这是由于秸秆拱深处位置所承受的外部压力较大，导致矢高变化量相应增大。因此，在实际工程应用中，应重视秸秆拱底部厚度的设计，以确保结构的稳定性和安全性。

2.2　矢跨比对桑条秸秆拱矢高的影响

图7为不同矢跨比下秸秆拱在观测点4处的矢高变化。矢跨比为0.2、0.3、0.4、0.5的桑条秸秆拱初始矢高分别为60、90、120、150 mm，在未施加外部荷载的情况下，矢跨比为0.2、0.3、0.4、0.5的秸秆拱矢高分别为52.49、84.35、116.35、146.31 mm，相较于初始矢高，分别下降了12.52%、6.28%、3.04%和2.46%。这表明，随着矢跨比的增大，秸秆拱的矢高变化量逐渐减小。在其他荷载条件下，秸秆拱的矢高变化率也遵循相同的规律。具体而言，在相同荷载下，秸秆拱的矢高变化率由大到小对应的矢跨比依次为0.2、0.3、0.4、0.5。其中，矢跨比为0.2的秸秆拱矢高变化率最为显著。这表明，秸秆拱的矢跨比与矢高变化之间存在密切的联系，且随着矢跨比的增大，矢高的变化量逐渐减小。因此，在实际工程应用中，较大的矢跨比可以更有效地抵抗由土压力引起的变形，符合工程需求。

3　结论

本文通过模型箱试验研究了桑条秸秆拱在分级加载条件下的受力变形特性，重点分析了不同矢跨比及观测点位置对秸秆拱矢高变化的影响。主要结论如下：

1）在各级荷载作用下，桑条秸秆拱的矢高累计变化量呈现出先急剧增加、后缓慢变化并最终趋于稳定的趋势。同时，受土压力影响，秸秆拱的变形量沿深度方向逐渐增大。在工程应用时，应关注秸秆拱底部厚度的设计，以确保结构的稳定性。

2）在相同荷载条件下，秸秆拱的矢高变化量随着矢跨比的增大而逐渐减小，在试验中矢跨比为0.5的秸秆拱表现出优越的抵抗土体变形的能力，建议工程可采用矢跨比为0.5的秸秆拱。

参考文献：

[1] 朱小飞，董敏，张瑜洪. 江苏在推进中小河流治理中打造幸福河[J]. 中国水利，2022(8)：8-13.

[2] 姜成堃，李璐珊，高雪. 生态护岸技术在河道堤防治理工程中的应用[J]. 长江技术经济，2022，6(1)：41-44.

[3] 马鑫，王阳. 城市内河水生态修复工程实践与探讨[J]. 海河水利，2023(12)：13-15.

[4] 周易，秦兴锋. 河道生态治理理念下新型生态砖护坡的稳定性研究[J]. 水利科技与经济，2024，30(5)：24-29.

[5] 凌建菊，李雅婕，陈果，等. 农村秸秆资源化利用研究进展[J]. 广东化工，2024，51(16)：98-101，97.

[6] 张恒, 王柏杰, 王飞. 内蒙古主要农作物秸秆燃烧释放烟气污染物研究[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1015-1021.
[7] JIN G, ENGLANDE A J Jr. A field study on cost-effectiveness of five erosion control measures[J]. Management of Environmental Quality, 2009, 20(1): 6-20.
[8] 储根法. 农作物秸秆草毯在公路边坡防护工程中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 116-117.
[9] WON C H, SHIN M H, CHOI Y H, et al. Simulations of runoff using rice straw mats and soil amendments[J]. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 2012, 54(2): 95-102.
[10] 蒋科伟. 利用秸秆编织物进行河流护岸的探索研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(8): 166-168.
[11] 倪栋,王健,王笑,等. 道路边坡植物碎屑材料与植生毯水土保持效果对比[J]. 公路交通科技,2022,39(S2): 396-402.
[12] RICHET J B, OUVRY J F, SAUNIER M. The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects: Experimental evidence of efficiency, and conditions of use[J]. Ecological Engineering, 2017, 103: 455-469.
[13] 全国木材标准化技术委员会. 木材横纹抗压试验方法:GB/T1939—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
[14] 江苏省盐城市航道管理处,盐城工学院. 棉花秸秆拱疏排桩航道护岸系统及其施工方法:201810466008.5 [P]. 2024-02-20.
[15] 李永彬. 桑条秸秆拱疏排桩河道护岸试验及工程应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.

A Model Test Study of Riverbank Protection Reinforced by Mulberry Straw Arch

SUN Hao[1], ZHOU Kangjian[2], LIU Chao[1], LI Yongbin[1], YU Xiaojuan[1]
(1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu, 224051, China;
2. Jiangsu Province Engineering Investigation and Rese arch institute Co. Ltd., Yangzhou Jiangsu, 225000, China)

Abstract:To further expand the application of straw in riverbank protection engineering, agricultural waste mulberry straw is processed into an arched structure, and a new structural form of straw arch for riverbank protection is exploratorily proposed. Based on the indoor model box test, the mechanical and deformation characteristics of mulberry straw arches with different rise-span ratios under graded loads are studied. The results show that, under the same load, the change in the rise of the straw arch increases sharply at first, then gradually flattens and finally tends to be stable, and with the increase of the rise-span ratio, the variation of the rise of the straw arch decreases, showing better resistance to earth pressure.

Keywords:straw arch;riverbank protection;rise-span ratio;model test

(责任编辑:陈　虹)