

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220997

中原地区生态湖若干水生植物弹性模量实测及分析

李占松, 刘颖, 孙艳鹏, 赵顺, 路恒, 陈冰倩

(郑州大学水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 水生植物作为湖泊生态环境中的重要因子,对湖泊的修复治理具有关键作用。水生植物的阻水作用对湖泊蓄泄洪过程影响显著,从而水生植物对糙率的影响成为生态湖泊水力学研究的重要内容。水生植物高度与湖泊糙率密切相关,因而水生植物弹性模量是计算其变形量的重要力学性能参数。将水生植物茎秆简化为变截面悬臂梁,通过对8种水生植物弯曲变形试验,测得拉力、位移等参数,计算其弹性模量值,得到实测的8种水生植物弹性模量变化的基本范围。对比可知,这些水生植物的弹性模量均随生长龄期或总长的增长而增长。

关键词: 水生植物;弹性模量;等效惯性矩;变截面悬臂梁

中图分类号: TV41

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0073-03

1 引言

近年来,湖泊的开发程度不断加大,湖泊的生态修复问题日益成为焦点。为了实现湖泊生态修复,常在湖泊中因地制宜种植不同类型水生植物,以此改善水体水质^[1]。由于水生植物的阻水程度与其在水流中的变形量密切相关,确定水生植物的力学性能,能够为湖泊生态修复等实际工程研究提供科学依据。目前,对水生植物阻水作用的研究主要集中在水生植物对河道糙率或阻力系数、表面流速的影响等方面,并取得丰硕成果^[2-5]。但若从水力学理论出发,深入分析这些影响的规律,生态湖泊水生植物的力学性能参数是必备资料。但这方面的研究非常欠缺,除了水生植物对护坡作用的抗拉强度等基本参数外,影响水生植物变形的弹性模量参数鲜有涉及。鉴此,本文通过简化植物的茎秆模型,测量水生植物破坏前所受集中荷载与对应的变形挠度值,计算出反映水生植物力学性能的基本参数弹性模量值,最终得出中原地区8种水生植物弹性模量值的大致范围,以及不同龄期的变化区间和规律。

2 生态湖水生植物弹性模量的实测

2.1 地点和时间

研究区位于河南省郑州市高新技术开发区的

郑州大学主校区眉湖。郑州市属北温带大陆性季风气候,年平均降雨量640.9 mm。眉湖是人工构筑的小型景观湖泊,南北长约500 m,东西宽30~70 m,水域面积约20 000 m²,平均深度约0.8 m。

芦苇和梭鱼草的采样时间为2021年11月,其他试验植物采样时间均为2022年3月。芦苇生长在水中并且成片生长,其他种类的试验植物均生长在湖边,单株生长。

2.2 实测器材、方法和步骤

2.2.1 实测器材

实测器材包括钳子1把,卷尺1把,游标卡尺1把,弹簧测力计1个,小皮筋若干个(用于固定弹簧测力计挂钩),剪刀1把,水准尺1把。

2.2.2 实测方法

实测可采用胡克定律法和悬臂梁法2种。张莲洁等^[6]研究得出对于植物叶片弹性模量的测量,悬臂梁法具有较好的准确性,建议工程试验尽量采用该方法;而胡克定律法尽管理论可行,但对于生物质这样的特殊材料,由于试件几何尺寸无法达到要求的规范程度,从而导致较大测量误差。因此,本次水生植物茎秆弹性模量的测量选用悬臂梁法。

2.2.3 实测步骤

选取1种水生植物开始试验。记录选取植物所在区域环境条件,如温度、风向、湿度,植物生长阶段(以总长为特征)等。首先使用卷尺量取茎秆长度,据此考虑将植物茎秆长度平均分为4段或

收稿日期: 2022-05-12, 修回日期: 2022-07-07

作者简介: 李占松(1965-),男,博士、副教授,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: polb_cn@sina.com

6 段^[7]。将植物横截面形状视为圆形、植物茎秆简化为变截面杆件,使用游标卡尺测量每一横截面的直径。用钳子固定植物茎秆的形态学下端,并在另一端施加一个水平方向的集中力,测量此端挠度,通过改变力的大小和钩挂位置进行若干组合试验,使力的数值呈现梯度变化,记录弹簧测力计读数、水平位移、竖直位移和直线位移。

2.3 实测结果

对 8 类水生植物共计 10 个试样进行实测。每个试样实测参数值见表 1。

表 1 水生植物在不同参数设置下的位移测定

Tab. 1 Displacement measurement of aquatic plants under different parameter settings

植物种类 (/总长/cm)	钩挂 位置/cm	水平 位移/cm	竖直 位移/cm	直线 位移/cm	弹簧秤 读数/g	施加 拉力/N	
珍珠绣球菌(90.00)	75.0	20.8	46.2	50.7	235	2.303	
		12.9	39.5	41.7	180	1.764	
		9.9	34.5	35.8	145	1.421	
	60.0	13.5	34.4	37.0	320	3.136	
		10.1	30.7	32.3	275	2.695	
		6.3	24.1	25.1	220	2.156	
	45.0	9.0	24.8	26.4	495	4.851	
		6.2	20.9	21.9	405	3.969	
		4.2	17.8	18.4	360	3.528	
	金丝桃(79.00)	62.5	10.0	30.7	32.0	150	1.470
			7.5	27.8	28.4	125	1.225
			3.0	17.1	17.3	85	0.833
50.0		12.2	32.1	34.5	205	2.009	
		10.9	29.5	31.3	180	1.764	
		6.0	22.1	23.0	110	1.078	
刺蔷薇(40.00)	38.0	17.5	25.9	31.7	65	0.637	
		10.4	22.1	24.3	50	0.490	
		4.1	13.1	14.2	30	0.294	
	30.0	10.2	17.6	20.5	80	0.784	
		2.6	10.0	10.2	50	0.490	
		1.2	6.2	6.3	20	0.196	
枫杨(64.00)	48.0	21.5	35.1	41.1	505	4.949	
		14.9	30.6	34.3	445	4.361	
		6.9	22.4	23.6	400	3.920	
	32.0	10.1	22.1	24.4	690	6.762	
		4.8	16.1	17.1	650	6.370	
		3.3	14.1	14.3	585	5.733	
女贞(78.00)	58.5	23.7	42.0	48.3	410	4.018	
		19.2	39.4	43.9	395	3.871	
		13.5	34.6	37.3	310	3.038	
	39.0	12.9	26.5	29.6	645	6.321	
		7.9	22.6	24.1	520	5.096	
		6.0	19.4	20.5	435	4.263	
无刺蔷薇(87.90)	66.0	49.9	57.2	75.5	175	1.715	
		29.6	51.5	59.2	140	1.372	
		16.7	41.4	44.8	125	1.225	
	44.0	25.1	35.4	43.4	265	2.597	
		18.9	33.4	38.1	240	2.352	
		7.5	22.9	24.0	150	1.470	
芦苇(205.00)	133.0	8.2	36.4	37.2	45	0.441	
		4.5	29.7	30.1	40	0.392	
		1.9	23.0	23.1	30	0.294	
	99.0	11.4	33.6	35.7	70	0.686	
		3.4	26.6	26.9	55	0.539	
		2.1	21.1	21.2	40	0.392	
65.0	5.7	21.5	22.3	160	1.568		
	1.3	13.6	13.7	100	0.980		
	芦苇(100.00)	50.0	14.8	38.2	41.0	45	0.441
4.9			20.5	21.1	25	0.245	
4.6			15.0	15.7	80	0.784	
25.0	2.2	9.1	9.4	50	0.490		
	梭鱼草(81.30)	81.3	22.9	55.2	59.8	25	0.245
			18.8	45.1	49.0	40	0.392
14.0			38.0	40.5	30	0.294	
41.0	5.4	14.6	15.6	40	0.392		
	2.1	11.3	11.5	30	0.294		
	梭鱼草(40.00)	40.0	5.4	20.3	21.0	20	0.196
30.0			4.0	14.8	15.5	20	0.196
20.0			4.4	13.0	13.7	40	0.392

3 实测结果分析

3.1 生态湖水生植物弹性模量的推算公式

3.1.1 变截面悬臂构件的等效惯性矩

大多数植物茎秆的横截面是圆形,实测对象均为茎秆横截面为圆形的挺水植物。沿着生长方向,横截面的直径逐渐缩小,故将植物茎秆的力学模型简化为变截面悬臂构件。为简化问题,设有一等截面构件,当受到与变截面构件相同的荷载作用,呈现出与变截面构件相同的顶端位移,则称等截面构件为变截面构件的等效构件,而等效构件的截面惯性矩为 I_{eq} ,故变截面构件的挠度计算问题就转变为等截面构件的挠度计算问题。

朱皓明等^[7]通过辛普生数值积分公式计算挠度,依次将变截面柱等分为 4 段与 6 段,各分段处的截面惯性矩依次为 I_0, I_1, \dots, I_n ($n=4$ 或 6)。其中第 i 分段处的截面惯性矩 I_i 为:

$$I_i = \pi d_i^4 / 64 \tag{1}$$

式中, d_i 为第 i 分段处的直径, m。

等分为 4 段时:

$$I_{eq} = 16 / (1/I_1 + 2/I_2 + 9/I_3 + 4/I_4) \tag{2}$$

等分为 6 段时:

$$I_{eq} = \frac{54}{1/I_1 + 2/I_2 + 9/I_3 + 8/I_4 + 25/I_5 + 9/I_6} \tag{3}$$

经计算分析,一般将变截面构件等分为 4 段就可以得到足够的精度,并且公式的适用条件是仅需截面惯性矩按照光滑曲线变化。植物杆茎的直径变化具有连续性,无突变处,适用于此类公式。

3.1.2 等截面柱弯曲变形的弹性模量计算公式

图 1 为梁在任意一处 C 承受的集中荷载 P , 此处将产生挠度 ω_c 。

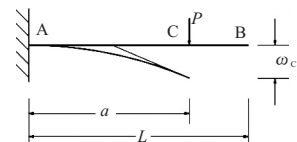


图 1 梁承受集中荷载作用与产生的挠度

Fig. 1 Deflection of beam under concentrated load

挠度 ω_c 的计算公式^[8]为:

$$\omega_c = Pa^3 / (3EI_z) \tag{4}$$

式中, P 为集中荷载, N; a 为 C 点与等截面柱刚节点 A 之间的距离, m; E 为弹性模量, Pa; I_z 为等截面柱的截面惯性矩, m^4 。

已知变截面构件的等效惯性矩为 I_{eq} , 弹性模量 E 的计算公式为:

$$E = Pa^3 / (3\omega_c I_{eq}) \tag{5}$$

3.2 生态湖水生植物弹性模量推算结果

3.2.1 水生植物不同区间长度的弹性模量

对实测数据进行计算, 水生植物不同区间长度的弹性模量值见表 2。

表 2 水生植物不同区间长度的弹性模量

Tab. 2 Elastic modulus of aquatic plants in different interval lengths

植物种类	植物总长/cm	等效惯性矩/m ⁴	挂钩位置/cm	弹性模量/MPa
珍珠绣球菌	90.00	7.551×10 ⁻¹¹	75.0	8.42×10 ³
			60.0	8.53×10 ³
			45.0	7.83×10 ³
			62.5	4.65×10 ³
金丝桃	79.00	8.203×10 ⁻¹¹	50.0	2.90×10 ³
			38.0	2.00×10 ³
刺蔷薇	40.00	2.105×10 ⁻¹¹	30.0	1.78×10 ³
			48.0	2.01×10 ³
枫杨	64.00	2.805×10 ⁻¹⁰	32.0	1.44×10 ³
			58.5	4.69×10 ³
女贞	78.00	1.337×10 ⁻¹⁰	39.0	3.37×10 ³
			66.0	2.69×10 ³
无刺蔷薇	87.90	1.023×10 ⁻¹⁰	44.0	1.92×10 ³
			133.0	8.85×10 ³
芦苇	205.00	1.126×10 ⁻¹⁰	99.0	5.68×10 ³
			65.0	5.90×10 ³
芦苇	100.00	7.918×10 ⁻¹²	50.0	6.18×10 ³
			25.0	3.49×10 ³
梭鱼草	81.30	7.740×10 ⁻¹⁰	81.3	1.03×10 ²
			60.0	7.64×10
梭鱼草	40.00	4.239×10 ⁻¹⁰	41.0	7.85×10
			40.0	4.86×10
			30.0	2.81×10
			20.0	1.90×10

3.2.2 水生植物的弹性模量变化范围

分析弹性模量计算结果, 8 种 10 个试样水生植物的弹性模量变化范围见表 3。

表 3 水生植物的弹性模量变化范围

Tab. 3 Variation range of elastic modulus of aquatic plants

名称	总长/cm	弹性模量的范围/MPa	均值/MPa	最大值与最小值之比
珍珠绣球菌	90.00	7.83×10 ³ ~8.53×10 ³	8.18×10 ³	1.09
金丝桃	79.00	2.90×10 ³ ~4.65×10 ³	3.78×10 ³	1.60
刺蔷薇	40.00	1.78×10 ³ ~2.00×10 ³	1.89×10 ³	1.12
枫杨	64.00	1.44×10 ³ ~2.01×10 ³	1.72×10 ³	1.40
女贞	78.00	3.37×10 ³ ~4.69×10 ³	4.03×10 ³	1.39
无刺蔷薇	87.90	1.92×10 ³ ~2.69×10 ³	2.30×10 ³	1.40
芦苇	205.00	5.68×10 ³ ~8.85×10 ³	7.26×10 ³	1.56
芦苇	100.00	3.49×10 ³ ~6.18×10 ³	4.84×10 ³	1.77
梭鱼草	81.30	7.64×10~1.03×10 ²	8.97×10	1.35
梭鱼草	40.00	1.90×10~4.86×10	3.38×10	2.56

3.2.3 水生植物弹性模量随龄期的变化规律

从芦苇、梭鱼草两种水生植物 4 个试样实测

数据的分析结果来看, 其弹性模量均值随龄期(以总长为特征)的增长而增大, 与随着龄期生长, 其密实度越来越大的规律相符。芦苇、梭鱼草两者弹性模量均值 E 随总长 L 的变化关系拟合公式分别为:

$$E_{\text{芦苇}} = 2\ 304.8L + 2\ 535.2 \quad (6)$$

$$E_{\text{梭鱼草}} = 135.35L - 20.34 \quad (7)$$

式中, E 为弹性模量, MPa; L 为总长, m。

4 结论

通过对中原地区生态湖 8 种水生植物实测数据的计算分析, 获得其弹性模量变化的基本范围。从 10 个试样实测结果可看出, 水生植物同一类同一龄期(以总长为特征)的弹性模量值整体上变化幅度不大。后 4 个试样 2 种水生植物的实测数据表明其弹性模量均随着生长龄期和总长的增长而增长。

参考文献:

- [1] 闫训海, 朱焱峰, 刘小梅, 等. 中国第十届花卉博览会区域生态水系修复设计综述[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 63-66.
- [2] 张钰, 张晨. 沉水植物对城市河道糙率的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 33-35, 32.
- [3] 李树慧, 张银华, 蔡怀森. 河岸刚性植被缓冲带对水流阻力的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 32-35.
- [4] 贾宝玲, 李阳. 明渠流条件下沉水植被缓冲带粗糙度及阻力特性研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(6): 112-115.
- [5] 贾凤聪, 王伟杰, 张晶, 等. 明渠水流淹没植被阻力系数计算公式研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 132-135.
- [6] 张莲洁, 李东升, 白帆. 植物叶片弹性模量的测量[J]. 林业机械与木工设备, 2004(5): 14-16.
- [7] 朱皓明, 高轩能, 沈剑波. 变截面悬臂构件挠度计算的等效柱法[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 71-75.
- [8] 杜云海. 材料力学(I)(第1版)[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2012.

Measurement and Analysis of Elastic Modulus of Aquatic Plants in Ecological Lakes in Central Plains

LI Zhan-song, LIU Ying, SUN Yan-peng, ZHAO Shun, LU Heng, CHEN Bing-qian
(College of Water Resources and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As an important factor in the ecological environment of lakes, aquatic plants play a key role in the restoration and management of lakes. The water blocking effect of aquatic plants has a significant impact on the flood storage and discharge process of lakes, so the impact of aquatic plants on the roughness has become an important part of the hydraulic research of ecological lakes. The height of aquatic plants is closely related to the roughness of lakes. The elastic modulus of aquatic plants is an important mechanical property parameter for calculating its deformation. The stem of aquatic plants is simplified as a cantilever beam with variable cross-section. Through the bending deformation test of eight aquatic plants, the tensile force, displacement and other parameters are measured, and the elastic modulus value is calculated. The basic range of the measured elastic modulus change of eight aquatic plants is obtained. The comparison shows that the elastic modulus of these aquatic plants increases with the growth age or total length.

Key words: aquatic plant; modulus of elasticity; equivalent moment of inertia; variable section cantilever beam