

植被护坡抗冲模型试验方法与装置研究

钟春欣,张 玮

(河海大学交通学院,江苏 南京 210098)

摘要 基于模型和原体草皮冲刷破坏时床面切应力和摩阻流速应该相等原理,研制了一套可用于模拟实际河道中的大流速冲刷水流,并测定冲刷过程中植被水力学参数的试验装置.理论分析表明,水槽设计高度对植被区的床面切应力值不存在主导性影响.试验测得的有机玻璃水槽和草皮表面曼宁糙率系数值,以及试验土壤起动流速结果证明所设计的试验装置和方法是合理可行的.在此基础上进行了植被护坡抗冲模型试验,得出了草皮护坡破坏的临界水流条件.

关键词 草皮护坡 模型试验 冲刷 试验装置 曼宁糙率系数 床面切应力 摩阻流速

中图分类号 TV143 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)02-0170-05

近年来,以土工合成材料中的三维植被网垫作为加筋材料,对边坡和堤坝进行植草防护的三维植被网加筋草皮护坡技术在边坡防护工程中得到了广泛应用^[1-2].国外20世纪90年代末开始将该技术应用于河道迎水面护坡.较之坡面径流,河道径流具有流速大、作用历时长等特点,而当前对于植被护坡的抗冲性能及可能承受的极限水流条件等尚缺乏深入研究,急需开展相关的理论及试验研究.

植被水力模型试验中多采用聚乙烯、聚丙烯丝等人工材料制备植被模型,模型具有密度小于水、浮力大、能随水流起伏且易于制备的特点^[3].但自然生长的植被有其天然的柔韧性、植株密度、茎叶排列状态等自然特性,尤其是植被与水流的相互作用机理目前仍是水利工程界研究的课题^[4-6].因此在植被水力模型试验中,用人工水草模拟天然植被所带来的模型相似律问题极其复杂,很难给出明确且合理的解答^[7-8].此外,根据有关资料显示,三维植被网加筋草皮可以承受6.0 m/s的短期流速,而现有的用于模拟平原河流的室内试验装置一般为明渠均匀流缓坡水槽^[9],其流速一般不超过1.5~2.0 m/s,很难满足试验流速的要求.为此,本文就草皮护坡抗冲问题,研制了一套可模拟河道径流流速条件冲刷草皮护坡的室内模型试验装置,通过测定有机玻璃和植被的曼宁糙率系数,以及裸土的起动流速范围来检验试验装置的可靠性和试验原理的正确性,并在此基础上研究河道径流作用下植被护坡的破坏临界水流条件.

1 植被护坡抗冲模型试验设计

1.1 试验原理

在采用植被护坡的河道中,处于淹没状态植被的破坏主要是由于水流对植物茎干的曳引力和水流对植物根部土壤的冲刷.显然,不论是在试验水槽还是在实际的明渠河道中,床面切应力对植被的曳引作用是造成草皮护坡破坏的直接原因.实际上,对于同种坡面条件及植被条件的草皮护坡来说,在相同水流条件作用下,其发生破坏时的床面切应力值应当是相同的.基于上述认识,试验拟选用人工培育的天然草本植被作为试验对象,在室内水槽中近似模拟实际河道中的流速条件,在草皮护坡冲刷过程中测量计算草皮护坡破坏时的床面切应力值和摩阻流速

$$U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$$

式中: τ_0 ——床面切应力; ρ ——水的密度.以该模型描述实际河道中草皮护坡破坏时的临界水流条件,实现在室内水槽模拟河道径流对草皮护坡的冲刷,模型成果可用于条件相同(土质、植被)的实际河流.

1.2 试验方案论证

在试验过程中保持流量恒定,试验段内水流近似认为是均匀流,试验段水平设置. 为确定矩形断面有压水槽高度(即试验水深)对试验结果(即床面切应力)的影响,进行 2 种试验方案的比选:方案 1,水槽高度等于植被高度,即 $H = H_v$; 方案 2,水槽高度大于植被高度,即 $H > H_v$,如图 1 所示.

取图 1 中过水断面 1-1 和 2-2 进行分析,由连续方程 $Q_1 = Q_2$ 可知,两过水断面的断面平均流速相等,即 $V_1 = V_2$. 取过水断面 1-1 和 2-2 之间长度为 l 的流体作为控制体(图 2),作用在流束上的外力包括:两端断面上的动水压力 p_1A_1, p_2A_2 ,侧面上垂直于流束的动水压力 P ,侧面上的切力 $T = \tau\chi l$,重力 $G = \rho gAl$.

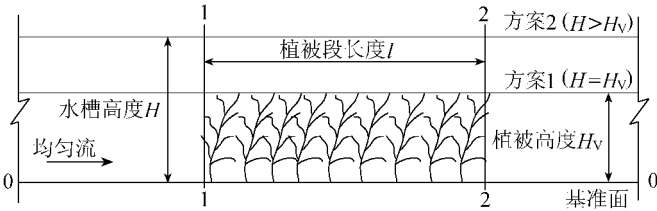


图 1 试验水深与植被高度的关系
Fig.1 Relationship between water depth and vegetation height

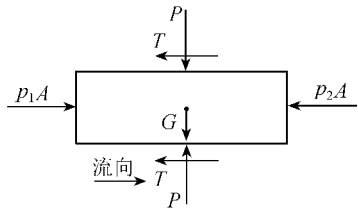


图 2 控制体受力分析
Fig.2 Stress analysis of the control body

根据动量方程,在水平方向上有(假设试验段水平设置)

$$\sum F_S = \rho Q\beta(V_2 - V_1) = 0$$
 (1)

或者

$$\sum F_S = p_1A - \tau\chi l - p_2A = 0$$
 (2)

联立式(1)和式(2),两边同除以 ρgAl ,整理后得

$$\tau = \rho gR \frac{\Delta h_w}{l}$$
 (3)

其中
$$R = A/\chi = \frac{BH}{2(B + H)}$$

式中 Δh_w ——1-1,2-2 断面间的水头差; R ——试验水槽水力半径; H, B ——水槽的断面高度和宽度. 由式(3)可见,床面切应力 τ 与水头损失及水力半径有关. 将水槽高度(试验水深)对草皮护坡最终破坏时床面的切应力值的影响略去,方案 1,2 均可行,取水槽高度等于植被高度.

1.3 试验装置设计

矩形断面有机玻璃有压水槽(内壁)的尺寸为 $3.7\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.1\text{ m}$,可产生的最大断面平均流速达 6.75 m/s ,进出口端分别布设圆管变方管和方管变圆管的过渡段(图 3). 草皮试件种植在 PVC 板模型箱内进行室外养护,模型箱尺寸为 $0.7\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.4\text{ m}$. 在有压水槽的居中位置处设有活动底板,拆卸后可装入植被模型箱,其顶面与水槽底面齐平. 在水槽上安装有空气压差计测量试验段的水头差,其测点布设在距离植被区较远处的 1,4 点(图 4),以避免因植被对水流结构的扰动作用而引起测点处读数发生剧烈脉动. 其他配

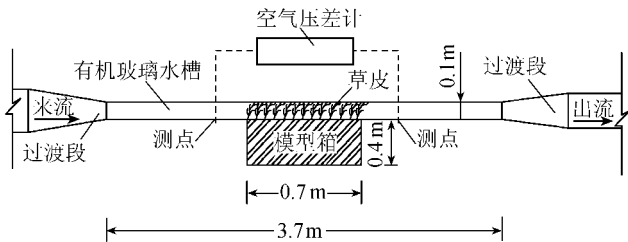


图 3 有机玻璃有压水槽及植被模型箱
Fig.3 The plexiglass-flume and the vegetation model box

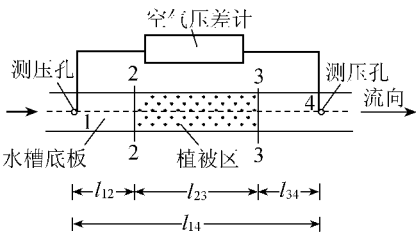


图 4 水槽底板上的测压管孔口布置
Fig.4 Position of piezometer orifices inside the flume

套试验设备包括离心式清水泵($Q = 486 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 14 m)、配水管路及地下回水廊道、LDZ-4B 型电磁流量计、阀门、空气压差计等. 试验进行时启动水泵, 通过调节设置在进水管线上的电磁流量计控制断面平均流速.

2 理论计算

2.1 有机玻璃水槽壁面糙率

根据文献[10], 对于非圆形管, 当其断面形状比(宽度/高度)在 0.5 ~ 2.0 之间时, 非圆形管道形状对阻力的影响可以忽略不计. 本次试验中矩形有压水槽的断面形状比等于 2.0, 所以可以忽略管道形状对阻力的影响, 直接通过水力半径求解床面阻力.

进行水流试验时, 在某一稳定流量下, 根据式(3)可求得有机玻璃水槽的壁面切应力 $\tau_{\text{壁}}$:

$$\tau_{\text{壁}} = \rho g R \frac{\Delta h'_{1,4}}{l_{1,4}} \quad (4)$$

式中 $\Delta h'_{1,4}$ ——1,4 测点间水头差; $l_{1,4}$ ——测点间距. 根据曼宁公式 $C = R^{1/6}/n$ 及谢才公式 $C = \sqrt{8g/f}$, 可得到曼宁糙率与床面切应力的关系式

$$n = R^{1/6} v^{-1} \left(\frac{\tau}{\rho g} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中 f ——阻力系数; v ——水槽断面平均流速. 将壁面切应力 $\tau_{\text{壁}}$ 代入式(6)中即可求得有机玻璃水槽壁面的曼宁糙率.

2.2 植被区床面切应力 τ_v

在水槽中装入植被模型箱进行草皮冲刷试验植被区的上下游边界所在过水断面分别为 2-2, 3-3 断面, $l_{1,2}, l_{2,3}, l_{1,4}, l_{3,4}$ 分别为各测点及断面间距(图 4). 首先求出在某一稳定流量下 1 ~ 4 段的平均壁面切应力

$$\tau_{1,4} = \rho g R \frac{\Delta h_{1,4}}{l_{1,4}} \quad (6)$$

式中 $\Delta h_{1,4}$ 为此时 1 ~ 4 段的测压管水头差. 再通过对 1 ~ 4 段流体进行受力平衡分析推导出植被所在 2-3 段的坡面等效切应力

$$\tau_v = \frac{2(B + H)(l_{1,4}\tau_{1,4} - \tau_{\text{壁}}l_{1,2} - \tau_{\text{壁}}l_{3,4}) - (2H + B)l_{2,3}\tau_{\text{壁}}}{Bl_{2,3}} \quad (7)$$

式中 τ_v 为作用在植被坡面的等效切应力.

2.3 植被表面曼宁糙率系数 n_b

首先求出草皮冲刷试验过程中植被段的平均壁面切应力

$$\tau_{2,3} = \frac{l_{1,4}\tau_{1,4} - l_{1,2}\tau_{\text{壁}} - l_{3,4}\tau_{\text{壁}}}{l_{2,3}}$$

代入式(5)计算得到该段的综合糙率

$$n = R^{1/6} v^{-1} \left(\frac{\tau_{2,3}}{\rho g} \right)^{1/2}$$

再引进爱因斯坦综合糙率公式整理得

$$n_b = \left(n^{3/2} \frac{\chi}{\chi_b} - n_w^{3/2} \frac{\chi_w}{\chi_b} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

其中 $\chi_b = B$ $\chi_w = 2H + B$

式中 n_b ——植被曼宁糙率; n ——植被段的综合糙率; n_w ——有机玻璃壁面曼宁糙率; χ_b ——槽底草皮湿周; χ_w ——槽壁湿周.

3 试验设计合理性验证

为检验试验装置可信度和试验原理的正确性, 首先测定有机玻璃管壁和草皮的曼宁糙率系数, 以及裸土的起动流速范围.

3.1 试验材料

试验种植土为红壤(黏土类轻黏土)和水稻土(壤土类重壤土),物理性质指标见表 1.试验草皮为 75% 的狗芽根和 25% 的高羊茅混播草皮,设置 3 组生长期:1.5 个月,2.5 个月,4 个月.草皮高度修剪至与有压水槽高度相等(0.10 m).加筋材料为 EM3 型绿色三维土工网垫,埋设在覆土层(厚度 0.01 m)下.试验从较小流速开始,根据需要逐级增加,最大流速可至 6 m/s 以上.

3.2 试验曼宁糙率系数范围

测定有机玻璃管壁糙率系数时,在某一稳定流量条件下,通过测量测点间的水头损失,运用式(4),(5)计算得到有机玻璃水槽内壁的糙率为 0.008 5.由文献[11]可知,有机玻璃管的糙率范围通常为 0.008 ~ 0.010,则本次试验所得到的有机玻璃壁面糙率值在正常范围之内.进行草皮试件植被曼宁糙率系数测定试验时,记录各级流速情况下各测点间的水头差,根据式(4)~(8)的计算步骤得到植被的曼宁糙率系数变化范围为 0.020 ~ 0.090,亦属于正常值范围[12].

3.3 裸土起动流速范围

根据黏土的起动标准[13],测得红壤和水稻土的起动流速范围分别为 0.55 ~ 0.65 m/s 和 1.0 ~ 1.1 m/s.参照文献[13],明渠水力半径为 1 m 时轻黏壤土的起动流速为 0.55 ~ 0.80 m/s,重黏壤土的起动流速为 0.7 ~ 1.0 m/s,可见 2 种试验土壤裸土起动流速取值范围均在正常范围之内.

由此可以认为,试验有压管流对草皮护坡的抗冲性能不存在本质影响,上述试验装置、试验原理以及试验方法是合理可行的.

4 加筋草皮护坡抗冲模型试验成果

在验证试验装置可信度和试验原理正确性的基础上,进行加筋草皮护坡抗冲模型试验[14].试验过程中以红壤种植的草皮试件冲刷流速控制为 2.0 m/s,2.5 m/s,3.0 m/s,以水稻土种植的草皮试件冲刷流速控制为 4.0 m/s,4.5 m/s,5.0 m/s.试验得到各组草皮破坏时的床面切应力值和相应的摩阻流速,见表 2.

由于草皮破坏时根部所受到的水流切应力是绝对的,因此试验得到的破坏点处的床面切应力值和相应的摩阻流速可以直接用于评价实际河道中草皮护坡破坏的临界水流条件.以表 2 中生长期 2.5 个月、水稻土加筋草皮为例,当试验水流以 4.0 m/s 流速持续冲刷 4.5 h 后,该草皮护坡将发生冲蚀破坏,此时的床面切应力值为 309.6 Pa,摩阻流速为 0.56 m/s.该组试验数据表明,当在实际河道中采用了该种形式的草皮护坡时,在生长状况和淹没条件都相同的情况下:当河道的摩阻流速低于 0.56 m/s 时,该草皮护坡可抵挡 4.5 h 以上时间的水流冲刷;当河道的摩阻流速恰等于 0.56 m/s 时,该草皮护坡在 4.5 h 后将发生冲蚀破坏;当河道的摩阻流速大于 0.56 m/s 时,该草皮护坡将发生瞬间破坏.

5 结 论

为研究河道护坡中三维植被网加筋草皮的抗冲性能和极限水流条件,解决模型试验中遇到的水槽冲刷流速过小、植被模型相似律较为复杂的问题,研制了一套可模拟实际河道中的大流速冲刷水流,测定冲刷过程中植被水力学参数的试验装置,得出以下主要结论:

表 1 试验土壤土粒质量分数
Table 1 Percentage of soil particles

粒级/mm	质量分数/%	
	红壤	水稻土
> 0.25	12.8	0.517
0.25 ~ 0.05	3.5	7.330
0.05 ~ 0.01	19.7	35.300
0.01 ~ 0.005	11.3	12.400
0.005 ~ 0.001	12.4	18.700
< 0.001	40.3	25.700
物理性砂粒 > 0.005	55.6	47.300
物理性黏粒 < 0.005	44.4	52.700

表 2 三维植被网加筋草皮护坡破坏点的床面切应力及摩阻流速
Table 2 Critical bed shear stress and friction velocity at the destruction position of 3D vegetation-reinforced revetment

土壤类型	试验流速/(m·s ⁻¹)	生长期/月	床面切应力/Pa	摩阻流速 U _* /(m·s ⁻¹)	抗冲历时/h
红壤	2.0	1.5	33.3	0.18	> 13
	2.0	2.5	100.5	0.32	> 13
	2.0	4.0	108.9	0.33	> 13
	2.5	2.5	68.6	0.26	> 13
	3.0	2.5	94.4	0.31	> 13
水稻土	4.0	1.5	160.5	0.40	0.75
	4.0	2.5	309.6	0.56	4.5
	4.0	4.0	227.6	0.48	> 13
	4.5	4.0	548.3	0.74	3
	5.0	4.0	652.6	0.81	1.25

- a. 试验设计所依据的主要原理为模型和原体草皮冲刷破坏时相应的床面切应力和摩阻流速应该相等. 理论分析证明水槽设计高度对植被区的床面切应力值不存在主导性影响.
- b. 试验植被为天然生长的自然植被,同时试验水流条件近似模拟的实际河道中的流速,避免了复杂的植被模型相似律问题.所设计的矩形断面有机玻璃有压水槽装置产生的最大断面平均流速可以达到 6.75 m/s ,很好地克服了室内明渠均匀流缓坡水槽难以产生大流速水流的难题.
- c. 试验得到的有机玻璃水槽和草皮表面的曼宁糙率值,以及试验土壤的起动流速值均在正常值范围内,验证了试验装置的可靠性和试验原理的正确性.
- d. 利用本试验方法和装置进行了植被护坡抗冲模型试验,得出了草皮护坡破坏的临界水流条件,模型成果可用于条件相同(土质、植被)的实际河流.

参考文献:

- [1] 钟春欣,张玮.基于河道治理的河流生态修复[J].水利水电科技进展,2004,24(3):12-14.
- [2] 肖衡林,王钊.三维土工网垫设计指标的研究[J].岩土力学,2004,25(11):1800-1804.
- [3] 陈德春,周家苞.人工水草缓流和消波研究[J].河海大学学报,1998,26(5):99-103.
- [4] 虞邦义,吕列民.河工模型时间变态问题试验研究[J].泥沙研究,2006(2):22-28.
- [5] JORDANOVA A A, JAMES C S. Experimental study of bed load transport through emergent vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(6): 474-478.
- [6] 潘泓.相似律在动力基础试验中的应用[J].工业建筑,2005,35(4):60-61.
- [7] 李远发,陈俊杰.河工模型试验模拟技术探讨[J].人民黄河,2005,27(12):18-19.
- [8] JAMES C S, BIRKHEAD A L. Flow resistance of emergent vegetation[J]. Journal of Hydraulic Research, 2004, 42(4): 390-398.
- [9] 褚克坚,华祖林.明渠剪切分层流垂向扩散特性试验研究[J].水科学进展,2005,16(1):13-17.
- [10] 美国陆军工程兵团.水力设计准则[M].王诤昭,张元禧,译.北京:水利出版社,1982:184-200.
- [11] 吴持恭.水力学[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:118-153.
- [12] OGUNLELA A O, MAKANJULA M B. Hydraulic roughness of some African grasses[J]. J Agric Engng Res, 2000, 75: 221-224.
- [13] 韩其为.泥沙起动规律及起动流速[M].北京:科学出版社,1999:46-70.
- [14] 钟春欣,张玮,王树仁.三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(3):258-261.

Method and equipment of model test for scouring resistance of riverbank with grass cover

ZHONG Chun-xin, ZHANG Wei

(College of Traffic, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the principle that the bed shear stress and friction velocity of the grass cover in the model should equal those of actual condition in which grass cover is destroyed due to scouring, an experimental equipment was designed to simulate the scouring flow with high velocity in actual rivers and to measure the hydraulic parameters during the scouring process. Theoretic analysis proves that the design depth of the flume has no dominant effects on the shear stress on the vegetative bed. The hydraulic roughness of the plexiglass-flume and vegetation and the incipient velocities of soils indicate that the experimental equipment and method are reasonable and reliable. A model experiment on scouring resistance of a riverbank with grass cover was carried out, and the critical flow condition of destruction was obtained.

Key words: riverbank revetment with grass cover; model test; scour; experimental equipment; Manning roughness factor; bed shear stress; friction velocity