DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.08.026 2013,30(08):122-126

土石坝背坡植被抗冲蚀能力试验研究

郭 辉[1a],沈育民[1b],李 飞[2a],唐文坚[2b]
(1.长江科学院 a.水力学研究所;b.武汉长江科创科技发展有限公司,武汉 430010;
2.长江水利委员会 a.规划计划局;b.国际合作与科技局,武汉 430010;)

摘要:基于水槽试验,探求不同种类、高度、密度植被防护条件下,土石坝背坡的抗冲蚀能力。研究发现,植被主要从茎叶护土和根系固土两方面增强土石坝背坡的抗冲蚀能力。不同种类植被的物理性状差别较大,植被株高越高,土石坝背坡形成毯状保护层越厚实,根系也越发达,护土和固土能力都更好,其抗冲能力亦越强;植被密度越高,土石坝背坡的覆盖度越高,根系密度也越高,护土和固土能力同样会增强,其抗冲能力亦越强。通过多组试验成果的对比分析,采自浙江瑞安八十亩码头附近的狗牙根抗冲蚀能力最好。

关 键 词:土石坝背坡;植被;抗冲蚀;水槽试验
中图分类号:S157.1; S157.433 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)08-0122-05

1 研究前景

土石坝背坡漫顶历来为工程大忌,特别是小型土石坝防洪标准较低,易漫顶溃坝。目前,国内外对土石坝溢流问题的研究多采用工程材料,对植物护坡措施的研究尚属少见。在道路、河流护岸工程建设中,为防止降雨径流造成的水土流失和恢复原有的生态环境,常利用植被进行生态坡面防护[1-3],具有较好的抗冲蚀效果[4]。然而,土石坝漫顶过程具有流量大、流速急的特点,专门针对土石坝遭遇超标准洪水漫顶时护坡植被对土石坝坝体抗冲蚀能力影响的系统研究很少。20世纪80年代末期,山西相关科研人员进行了土坝植被防护现场试验,试验成果表明土石坝背坡植被对提高坝体抗冲蚀能力有益[5-6],然而试验植被不适合南方地区生长。

寻求经济有效易于推广的植物防护措施,避免或减轻洪水漫顶时的坝体破坏损失,已成为土石坝工程建设中亟待解决的重要问题之一。本文采用水槽概化试验,探求南方地区不同种类、株高和密度的土石坝背坡防护植被的抗冲蚀能力,以期为建立经济有效的土石坝背坡植被防护技术提供支撑。

2 试验设计

2.1 试验对象

委托中国科学院武汉植物园在1 m×0.3 m×0.25 m规格的试验箱内专业培植试验植被,种植了9种(编号1#—9#)不同株高和密度的植被,另有一个裸土试验箱(编号10#),同步进行浇水施肥等养护流程,供试验对比参照。其中狗牙根4种,结缕草1种,均为南方地区常见的多年生草本植被,分别采取自江苏、浙江和安徽等地,具有广泛的代表性,如表1所示。

表1 试验植被培植情况

Table 1 Vegetation coverage for the test

编号	种类	来源地	种植密度
1#	狗牙根	江苏东台	高密度
2#	狗牙根	江苏东台	低密度
3#	狗牙根	浙江瑞安码头	高密度
4#	狗牙根	浙江瑞安码头	低密度
5#	狗牙根	浙江瑞安市郊	低密度
6#	狗牙根	浙江瑞安市郊	高密度
7#	狗牙根	浙江瑞安八十亩码头	高密度
8#	狗牙根	浙江瑞安八十亩码头	低密度
9#	结缕草	安徽池州	中密度

2.2 试验装置与设备

试验在顺直的平坡矩形水槽中进行,通过高水

收稿日期:2012-07-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202037);"十二五"国家科技支撑计划课题(2012BAK10B04);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2012026SL和CKSF2011013/SL);水利行业专项(201001033)
作者简介:郭 辉(1982-),男,安徽霍邱人,工程师,主要从事环境与生态水力学研究,(电话)027-82829761(电子信箱)huigcky@gmail.com。

箱提高水头的方式在水槽试验段产生较大流速,以满足试验要求。水槽长4.25 m,宽0.31 m,高 1 m,水槽进水口宽0.31 m,高0.15 m。水槽上游与高水箱连接,通过地下水库及水泵供水,给试验段提供足够高的水头。水流由高水箱经管道进入水槽,经过调整后进入试验段。试验段长 1 m,底部设有凹槽,用于放置植被培养箱,植被培养箱土壤表面与水槽底部齐平。模型布置见图 1。

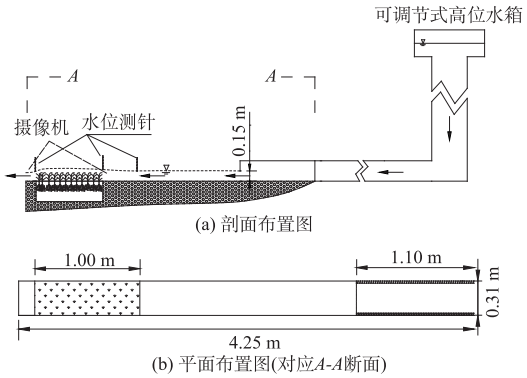


图 1　试验模型布置图

Fig. 1　Profile and plan view of the test model

采用钢尺和游标卡尺测量植被物理尺寸参数,利用万分之一天平称取根系鲜重;采用高清摄像机拍摄植被抗冲过程,利用数码相机拍摄冲刷前后植被状态,使用钢尺测量冲蚀后土壤地形变化并计算冲刷土壤体积;采用水位测针测量试验段前后水位变化,利用毕托管测量冲刷流速。

2.3　试验观测

植被物理参数观测内容包括:株高、叶长、叶宽、茎长、茎粗、茎节长、根系长、根系鲜重、密度、覆盖度等。

冲刷过程观测内容包括:水位变化、流态变化、植被破坏特性、土壤冲蚀特性等。

抗冲参数观测内容包括:各冲刷阶段历时、总抗冲历时等。另外,土壤抗冲强度可由单位体积水量所冲刷的土壤质量[7]或单位面积单位时间内所冲刷的土壤质量[4]等多种参数来表征,考虑到本试验的具体特点及相关条件制约,参照土壤抗冲强度的概念,引入时间尺度上的无量纲冲蚀模数 K,亦可实现植被抗冲能力的表征,

$$K = \frac{V_{冲}}{V}/T$$

式中:K 为冲蚀模数(h^{-1});$V_{冲}$ 为土壤冲刷量(m^3);V 为试验段总土壤量(m^3);T 为冲刷历时(h)。

3　植被特性分析

不同种类植被的物理性状差别较大,如表 2 所示,从株高方面看,7#,8# > 3#,4# > 5#,6# > 9# > 1#,2#;其他茎叶生物量与株高关系密切,较高的株高的植被其茎叶生物量亦较大;植被根系发达程度与株高关系亦较密切,株高较高的植被,其根系生物量亦较多,根系更加发达。

4　试验成果

4.1　冲蚀过程

2#植被和 4#植被因在2.9 m/s 来流条件下进行了预试验,因此其冲刷过程和其他各组植被有明显区别。以下成果不对 2#和 4#植被的试验结果进行分析。其他各组植被均在 5 m/s 来流条件下进行试验研究,其冲蚀过程均可划分为植被倒伏、冲刷平衡和冲蚀破坏 3 个阶段。①植被倒伏阶段:该阶段起始时刻植被直立,由于草皮阻水效应,试验段前部水面不断雍高,在水流剪切力的作用下,草皮逐渐伏倒。②冲刷平衡阶段:由于伏倒植被在试验段前部的挑流作用,试验段前部水深迅速下降,试验段中后部水深逐渐雍高。除试验段前部土壤存在一定淘蚀现象外,该阶段在植被仍能抵抗水流的冲刷,基本处于相对平衡状态。③冲蚀破坏阶段:由于水流的持续冲刷和浸泡,植被的固土能力开始下降,试验段前部植被被破坏,土壤开始被卷入水体,水土平衡状态被打破。随后冲刷破坏程度逐渐增强,试验段表层

表 2　植被地上物理参数统计

Table 2　Statistics of vegetation's physical parameters on the ground

编号	株高/cm	根长/cm	密度/(株/m^2)	叶长/cm	叶宽/cm	茎长/cm	茎粗/cm	茎节长/cm	覆盖度/%	分值
1#	12.19	18	5418	3.39	0.18	8.28	0.08	2.85	100	10
2#	12.57	17	5418	3.42	0.20	8.52	0.09	2.61	100	10
3#	29.24	43	833	12.74	0.40	21.67	0.21	5.63	60	6
4#	25.33	34	533	11.78	0.36	18.98	0.20	4.98	40	4
5#	22.51	36	800	7.58	0.25	18.89	0.15	5.34	40	4
6#	25.92	39	1167	8.25	0.28	21.23	0.16	5.64	70	7
7#	32.19	41	2067	11.29	0.41	25.52	0.25	6.85	90	9
8#	32.79	42	1733	11.43	0.41	25.00	0.24	7.26	85	8.5
9#	19.17	26	967	6.60	0.41	14.84	0.16	5.04	60	6

土壤不断从植被根系间被剥离。各组试验每个冲蚀阶段的水流特性、植被冲蚀特性均有一定差别,受篇幅所限不再一一描述。而裸土试验过程在经历短暂的雍水阶段后,随即转入剧烈的冲蚀破坏阶段,抗冲能力很弱。

各组试验对象在各个冲蚀阶段的抗冲历时如图 2所示。各组试验对象的综合抗冲能力由图 3 所示的冲蚀模数表征。

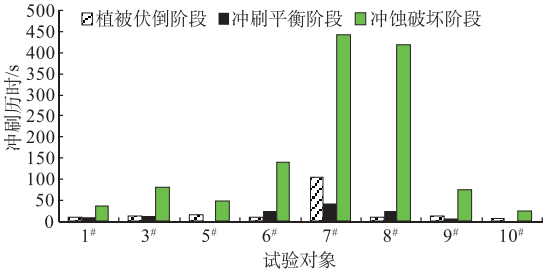


图 2 各组植被各冲刷阶段历时对比

Fig. 2 Comparison of the scouring periods at different stages

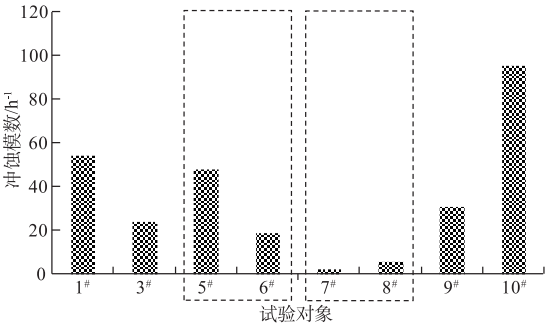


图 3 各组植被冲蚀模数对比

Fig. 3 Comparison of the scouring moduli of different vegetation

4.2 不同种类植被抗冲特性

灌木类和乔木类植被茎叶在枝干顶部,由于其枝干是刚性的,不能形成覆盖土石坝背坡表层的植被保护层;另外刚性的枝干在水流的作用下会增强局部冲蚀能力,造成局部冲蚀破坏,形成冲槽或冲坑的突破口,加速坝体破坏[6];因此灌木类和乔木类植被一般不能增强土石坝背坡的抗冲能力。

草本类植被密度高,茎叶是柔性的,可在土石坝背坡形成毯状保护层,另外其根系密度高,相互交错,有较强的固土能力。草本植被抗冲特性主要由植被的茎叶及根系物理特性决定,不同种类草本植被具有不同的株高、密度、根系分布以及茎叶特性,一般而言,株高较高的植被,及根系亦比较发达(表 2),茎叶尺寸也较大(表 2)。因此不同种类草本植被的抗冲特性最终还是通过分析密度、高度、根系特性等参数,并结合抗冲试验结果来表征。

4.3 不同高度植被抗冲特性

从冲刷过程看,7# 和 8# 植被株高最大,平均达 32.49 cm,经过植被伏倒阶段后,柔性的茎叶覆盖在土层之上,形成毯状保护层,大大降低水流对土壤的直接冲蚀作用;由于株高和根系具有正比关系,因此 7# 和 8# 植被根系也最发达,平均根长达41.5 cm,固土能力较强,冲刷过程比较均匀稳定,植被没有明显局部破坏。其他高度较低植被,一方面若植被密度较低,其植被茎叶护土能力有限;另一方面,其根系较短,生物量大多分布在 10cm 以内的表层土壤中,固土能力有限,植被很容易发生局部破坏,从而导致整个试验段的迅速破坏。

从冲刷历时看(图 2),7# 和 8# 植被株高最高,总冲刷历时最长;各组植被在植被伏倒阶段和冲刷平衡阶段的历史均较短;植被高度越高,冲蚀破坏阶段历时越长,说明其抗冲能力越强。

从冲蚀模数看(图 3),7# 和 8# 植被冲蚀模数(2.44/h和5.49/h)显著低于其他各组植被,裸土的冲蚀模数最高(95.26/h)。如图 4 所示,各组植被的冲蚀模数基本与植被株高呈反序,这说明土石坝背坡种植植被可明显增强其抗冲性能,植被其他物理特性差别不大的条件下,植被株高越高,抗冲性能也越强。

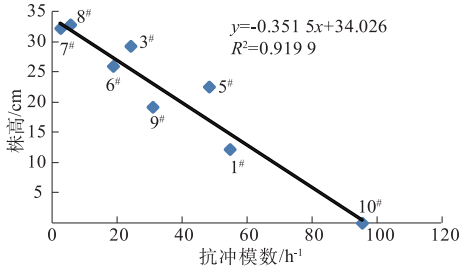


图 4 植被株高与抗冲模数关系

Fig. 4 Curve of vegetation height vs. scouring modulus

4.4 不同密度植被抗冲特性

5# 和 6# 植被、7# 和 8# 植被分别为同一种类不同种植密度的植被。在同一种类植被条件下,对比分析其抗冲特性。其中 5# 和 8# 是低密度植被,6# 和 7# 是高密度植被。

从冲刷过程看,密度较高的植被,冲蚀平衡阶段和冲蚀破坏阶段持续时间较长,且破坏过程较均匀。密度低的植被,水土平衡可轻易被打破,很容易发生局部冲蚀破坏现象,从而导致整个试验段的迅速破坏。例如植被 5# 密度较低,局部冲刷破坏迅速产生,冲刷过程直接从植被伏倒阶段过渡到冲刷破坏阶段,而 6# 植被密度相对较高,经历了完整的植被伏、冲刷平衡和冲刷破坏 3 个阶段,其抗冲能力要强于 5# 植被。

从冲刷历时看(图 2),密度高的植被,各冲刷阶

段的冲刷历时均较高。7#植被密度最高，各阶段及总冲刷历时均最长，8#植被密度稍低于7#植被，各阶段冲刷历时均低于7#植被。5#和6#植被之间显示出同样的规律。从冲蚀模数看（图3），7#植被密度最高，冲蚀模数最小，8#植被密度稍低于7#植被，因此其冲蚀模数也要高于7#植被；5#和6#植被之间显示出同样的规律。如图5所示，除1#植被外，各组植被的冲蚀模数与植被密度呈较好的反序关系，这说明土石坝背坡种植植被可明显增强其抗冲性能，植被其他物理特性差别不大的条件下，植被密度越高，抗冲性能也越强。

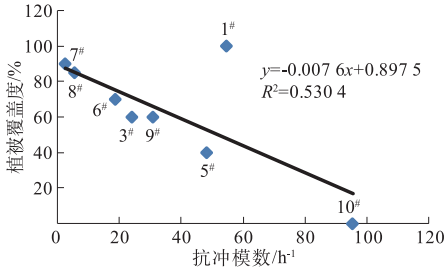


图5　覆盖度与抗冲模数关系

Fig. 5　Curve of vegetation coverage vs. scouring modulus

4.5　抗冲机理

植被主要从两方面增强土石坝背坡的抗冲能力：①植被的护土能力，主要表现为植被柔性茎叶直接覆盖土石坝背坡，阻扰水流，在土石坝背坡形成毯状保护层，减缓表层土壤的冲刷；②植被的固土能力，主要表现为植被根系相互交错，通过草根加固和约制土体，形成了一层土、根的复合护面层，同时草的深根亦可锚固基土，减缓坝体土壤的冲蚀。

植被被冲蚀破坏是因为植物根部的土壤被冲走，以及水流对植物的拖曳力所造成的，在水流的持续作用下，由于草根周围土壤的冲蚀而使草皮发生破坏，因此将削弱草的锚固作用，直至草被水流曳引力带走。决定土石坝背坡植被抗冲蚀的物理特性主要由植物的种类、高度和密度3个特征来表征。

株高较小的植被，其根系亦较短，护土与固土能力较弱，容易发生严重的局部破坏，床面出现大的冲刷坑，局部草皮全部冲走，并迅速波及整块草皮，水流异常紊乱，抗冲历时较短；株高较大的植被，其根系亦较长，护土与固土能力均较强，冲刷破坏比较均匀，床面泥沙冲刷可以达到相对平衡状态，抗冲历时较长。

另外在相同株高条件下，密度越高的植被，其对土石坝坝体的覆盖越完全，可以阻扰水流直接冲刷表层土壤，避免严重的局部破坏，因此其护土能力更强，相较于低密度土石坝抗冲植被抗冲历时更长。

5　结　论

（1）植被主要从两方面增强土石坝背坡的抗冲能力：第一，植被的护土能力，主要表现为植被柔性茎叶在土石坝背坡形成毯状保护层，减缓表层土壤的冲刷；第二，植被的固土能力，主要表现为植被根系相互交错，有较强的固土能力，减缓坝体土壤的冲蚀。

（2）草本类植被有较强的护土和固土能力，其抗冲特性主要由植被的茎叶及根系物理特性决定，不同种类草本植被具有不同的株高、密度、根系分布以及茎叶特性。

（3）植被高度越高，土石坝背坡形成毯状保护层越厚实，根系也约发达，护土和固土能力都更好，其抗冲能力亦越强。

（4）植被密度越高，土石坝背坡的覆盖度越高，根系密度也越高，护土和固土能力同样会增强，其抗冲能力亦越强。

（5）通过多种土石坝抗冲植被试验成果的对比分析，采自浙江瑞安八十亩码头附近的狗牙根抗冲蚀能力最强，可作为土石坝背坡防护植被选择之一。

致谢：长江科学院水力学研究所潘保柱、黄明海、张元良等同事全程参与了试验实施过程，并提供了有益的建议，特此致谢。

参考文献：

[1]　何　蘅，陈德春，魏文白. 生态护坡及其在城市河道整治中的应用[J]. 水资源保护，2005，21(6)：56－58.（HE Heng，CHEN De-chun，WEI Wen-bai. Ecological Bank and Its Application in Regulation of Urban Rivers[J]. Water Resources Protection，2005，21(6)：56－58.（in Chinese））

[2]　邱国锋，王孟霞. 三维植被网护坡在高速公路边坡中的试验[J]. 重庆交通学院学报，2002，21(1)：74－76.（QIU Guo-feng，WANG Meng-xia. Application of Three-Dimensional Vegetation Net Grass-Planting Revetment to the Banks of Expressway [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University，2002，21(1)：74－76.（in Chinese））

[3]　KORT J，COLLINS M，DITSCH D. A Review of Soil Erosion Potential Associated with Biomass Crops[J]. Biomass and Bioenergy，1998，14(4)：351－359.

[4]　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.（ZHONG Chun-xin，ZHANG Wei，WANG Shu-ren. Experimental Research on Soil Erosion of Turf Slope Reinforced by 3D Vegetation Net[J]. Journal of Hohai University（Natural Sciences），2007，35(3)：258－261.（in Chinese））

[5]　土坝过水防护措施研究课题组. 植物护坡土坝过水试验研究[J]. 中国水土保持，1990，(3)：16－20.（Team

of Downstream Slope Protection Program for Overtopped Earth-rockfill Dam. Overtopping Experiment on Downstream Slope of Earth-Rockfill Dam with Vegetation Cover [J]. Soil and Water Conservation in China, 1990, (3): 16 - 20. (in Chinese))

[6] 土坝过水防护措施研究课题组. 植物护坡土坝过水试验研究(续)[J]. 中国水土保持,1990, (4):26 - 29. (Team of Downstream Slope Protection Program for Overtopped Earth-rockfill Dam. Overtopping Experiment on Downstream Slope of Earth-rockfill Dam with Vegetation Cover (Continued) [J]. Soil and Water Conservation in China, 1990, (4):26 - 29. (in Chinese))

[7] 曾 光, 杨勤科, 姚志宏. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型土壤抗侵蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1):6 - 9, 38. (ZENG Guang, YANG Qin-ke, YAO Zhi-hong. Soil Anti-erodibility Under Different Landuse Types in the Loess Hill and Gully Area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 6 - 9, 38. (in Chinese))

(编辑:曾小汉)

Experiment on the Scouring Resistance of Vegetation Cover on the Back Slope of Earth-Rockfill Dam

GUO Hui[1], SHEN Yu-min[2], LI Fei[3], TANG Wen-jian[4]

(1. Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2. Kechuang Science and Technology Development Co. Ltd., Wuhan 430010, China;
3. Planning Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;
4. International Corporation Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The scouring resistance of the back slope of earth-rockfill dam covered by vegetation of different type, height and density is investigated by using flume experiment. It is concluded that vegetation can enhance the scouring resistance from two aspects: retaining soil by stems and leaves, reinforcing soil by roots. Different types of vegetation have different physical properties. Higher vegetation stem means that the vegetation roots will be more developed, the protection layer on the back slope will be thicker, hence the capacity of retaining and reinforcing soil will be stronger. Similarly, higher vegetation density means that the vegetation roots will be denser, and the coverage on back slope will be wider, thus, the capacity of retaining and reinforcing soil will also be stronger. By analyzing the experiment results, it's found that Bermuda Grass collected from the area adjacent to Bashimu dock in Ruian, Zhejiang Province has strong scouring resistance.

Key words: back slope of earth-rockfill dam; vegetation; scouring resistance; flume experiment

长江科学院水力学研究所召开水利部行业专项项目中间成果技术讨论会

2013 年 4 月 24 日,长江科学院水力学研究所(简称"水力学所")召开了水利部行业专项项目"高坝泄洪雾化工程安全及环境影响评价与对策"专题一的中间成果技术讨论会,针对项目进展情况进行了技术讨论。会议由水力学所副所长韩继斌教授级高级工程师主持,水力学所副总陈端博士、王才欢教授级高级工程师,各室主任和项目相关研究人员参加了此次会议。

会上,项目主要研究人员王思莹博士汇报了泄洪雾化物理模型试验研究的中间成果,总结了相关研究现状和我院以前的工作基础,汇报了本项目执行过程中针对泄洪雾化雾源分布特性进行的试验研究成果。韩喜俊高工汇报了泄洪雾化原型观测和防护措施研究的调研成果和下一步工作计划。与会人员就泄洪雾化的研究现状和项目现有研究成果进行了认真讨论,进一步明确了项目完成目标,讨论确定了下一步的工作方向和进度安排。大家一致认为该项目现阶段研究成果值得肯定,按计划执行应该可以满足任务书的需求。

"高坝泄洪雾化工程安全及环境影响评价与对策"项目由长江科学院、武汉大学、南京水利科学研究院和中国科学院生态环境研究中心等单位联合承担。从 2011 年开始执行,将于 2013 年底结题。本次会议的召开全面推进了项目开展进度,将有力保障项目的顺利结题。

(摘自:长江水利科技网)