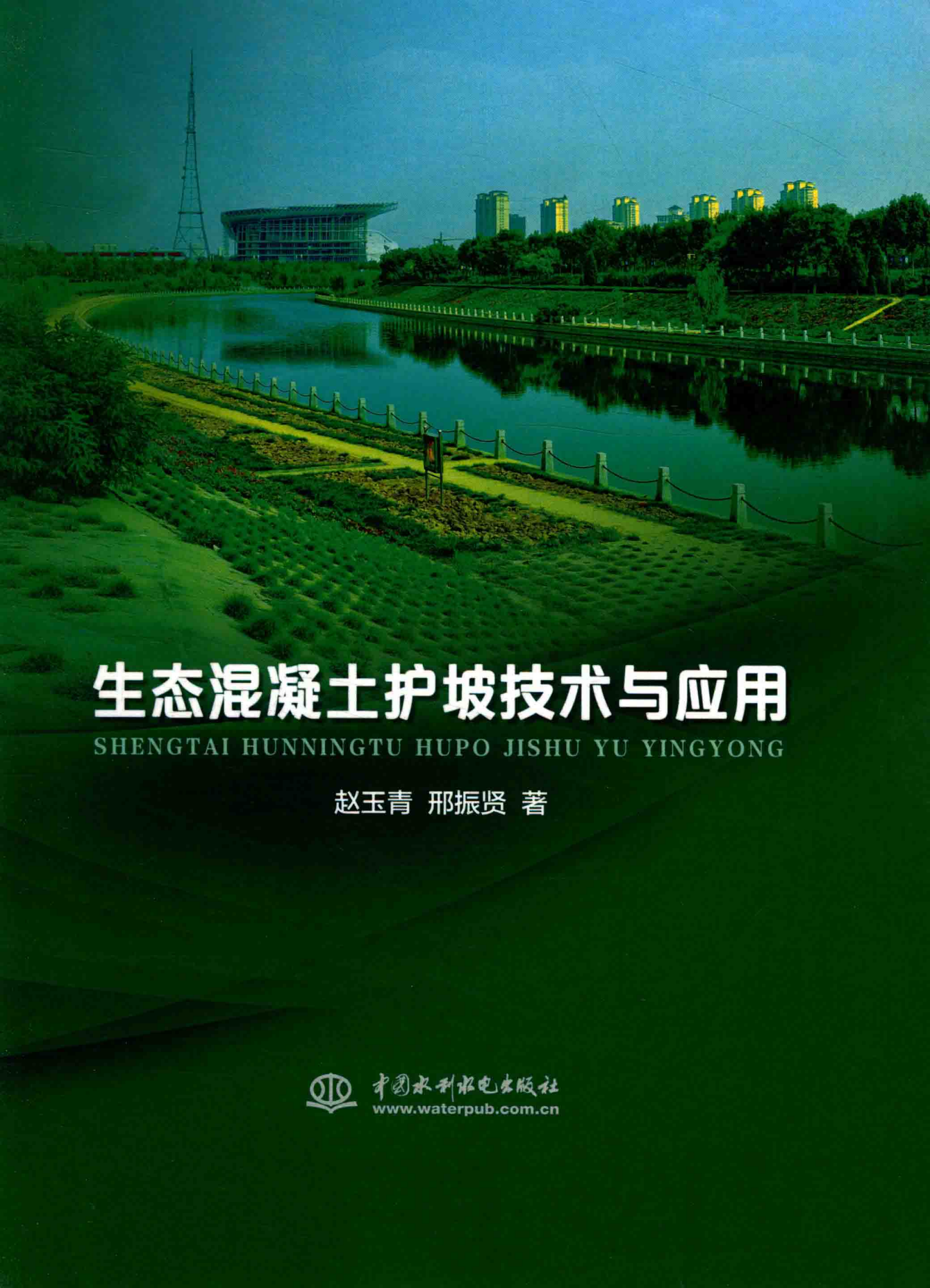




生态混凝土护坡技术与应用

SHENGTAI HUNNINGTU HUPO JISHU YU YINGYONG

赵玉青 邢振贤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

生态混凝土护坡技术与应用

赵玉青 邢振贤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

为了进一步完善和发展生态混凝土的理论研究,为实际工程的应用提供依据,本书分析了生态混凝土的国内外研究现状,对护坡原理及安全稳定性进行分析,通过试验分析骨料种类与粒径、水泥品种与掺量、水灰比等因素对生态混凝土性能的影响,研究了配合比设计技术,并进行了生态混凝土基本力学性能试验抗冻性和抗冲刷耐久性以及应用性能实验。开展了生态混凝土在堤防护坡工程应用的中间试验,进行种植、栽种植被草皮试验,为该材料在堤防工程建设中应用,提供了施工操作规程。

本书适合于从事再生混凝土的施工科研人员及生产人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

生态混凝土护坡技术与应用 / 赵玉青, 邢振贤著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5170-4516-8

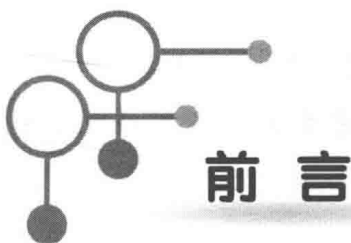
I. ①生… II. ①赵… ②邢… III. ①混凝土工程—
护坡—研究 IV. ①U417.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第151348号

书 名	生态混凝土护坡技术与应用
作 者	赵玉青 邢振贤 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8印张 190千字
版 次	2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



前言

混凝土材料及其制品，在给人类带来文明和进步的同时，也给生态环境和人居环境带来了诸多负面影响。

在水利工程建设中，用混凝土或混凝土板块进行江河堤防护砌，是一种硬化岸坡、保护堤防安全行之有效的方法。然而，这种方式却是以自然环境的破坏和恶化为代价的。因为在河道两岸用混凝土砌成的大面积刚性护砌面上，寸草不生，一片荒芜，自然生态环境恶化。除此之外，混凝土质地脆硬，表面粗糙，颜色灰暗，视觉效果缺乏生机。因而，由混凝土材料构筑的生活空间，总是给人一种粗、硬、冷、暗的感觉。

20 世纪 80 年代后期，世界各国对生态环境日益重视，我国政府也在“十五”生态建设与环境保护专项规划中提出：坚持以人为本，把改善生态、保护环境作为经济发展和提高人民生活质量的重要内容。国家“十一五”规划提出：重点发展特种功能材料、高性能结构材料、纳米材料、复合材料、环保节能材料等产业群，建立和完善新材料创新体系。2010 年 10 月 18 日，中国共产党第十七届中央委员会第五次全体会议通过了《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十二个五年规划的建议》，其中提出：加快建设资源节约型、环境友好型社会，提高生态文明水平。再一次告诫全党，面对日趋强化的资源环境约束，必须增强危机意识，树立绿色、低碳发展理念，以节能减排为重点，健全激励和约束机制，加快构建资源节约、环境友好的生产方式和消费模式，增强可持续发展能力。加强生态保护和防灾减灾体系建设，加强水利基础设施建设，推进大江大河支流、湖泊和中小河流治理，增强城乡防洪能力。

由此可见，突破传统混凝土材料的范围，发展可植被混凝土，寻求与自

然的和谐发展,已经成为当前混凝土科学发展的主要方向之一。生态混凝土研究课题,就是在这种背景下提出来的。

如果用生态混凝土做堤防护岸、护坡材料,在混凝土表面人工种植植被,加上后期在混凝土表面自然生长的野生植被,就可以使岸坡硬化与绿化有机地结合起来,为堤防护岸工程建设开创一个新领域。

为了进一步完善和发展生态混凝土的理论研究,为实际工程的应用提供依据,本书对生态混凝土护岸机理、配合比技术、基本力学性能、抗冻性、透水性和抗冲刷性、模型试验及应用性能等七方面进行了试验研究。本书的主要研究成果如下:

(1) 阐述了生态混凝土生态护岸稳定性影响因素,并对护岸的机理进行了研究,对安全稳定性进行了分析。

(2) 研究了生态混凝土的配合比技术,其中骨料种类与粒径、水泥品种与掺量、水灰比是生态混凝土配合比技术中的控制因素。通过试验分析各种因素对生态混凝土的抗压强度、孔隙率以及沉浆面积三方面性能的影响,确定适用于实际工程应用的最佳配合比。

在水泥用量和骨料粒径相同的条件下,水灰比越大,沉浆厚度越大,沉浆面积也越大。在水灰比和骨料粒径相同的条件下,水泥用量越大,沉浆厚度越大,沉浆面积也越大。水泥强度等级对混凝土沉浆厚度和沉浆面积的影响没有规律性。在水灰比和水泥用量相同的条件下,骨料粒径越大,沉浆厚度越大,沉浆面积也越大。

另外,对生态混凝土试件的成型方法、施工措施提出了建议。

(3) 研究了生态混凝土基本力学性能,通过对生态混凝土与基准混凝土进行基本力学性能对比试验,分析二者在抗压强度、劈拉强度和抗折强度三方面力学性能的异同点,分析生态混凝土在配合比设计、各种基本力学性能方面的特点和规律。

(4) 分析了生态混凝土的冻融机理,并进行抗冻性试验,相对于不带边框的生态混凝土板,带有边框的试件整体表现出的抗冻性能很好,达到了预期效果。证明边框的约束和保护作用有利于生态混凝土提高抗冻性能。

(5) 进行了生态混凝土透水性和抗冲性试验,利用PVC管材制成生态混

凝土透水性试验装置,进行透水系数测定试验,分析不同配比因素下生态混凝土的透水性。对生态混凝土透水性试验的研究,首次采用PVC管材充当生态混凝土试件的成型模具,既实用又廉价。在成型透水性试件时,先在试模内填充砂石料形成容水空间,再浇筑混凝土,使试验更便捷。用生态混凝土作水利工程护坡护岸材料,完全可以满足工程抗冲刷要求。

(6)开展了生态混凝土在堤防护岸工程中的应用的中间试验,做一块植被试验模型,并在其表面进行种植、栽种植被草皮试验,为该材料在堤防工程建设中应用,提供施工操作规程。

本书的研究过程中,得到了众多人士的帮助,首先本书凝结了作者的硕士生导师华北水利水电大学邢振贤教授的大量心血,在此向他致以深切的谢意和崇高的敬意。研究期间,还得到了华北水利水电大学王静以及牛克纳、王亚楠,张艳鸽、宗秋果等的支持和帮助,在此表示衷心的感谢!最后,向所有帮助我的人表示诚挚的感谢!

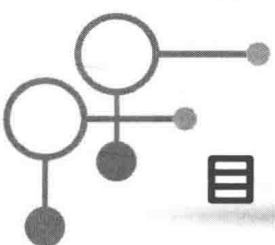
由于材料的性能受多方面的因素控制约束,本书的研究难免有一定的局限性,受理论水平及操作条件的制约,本书的研究方法及结构安排会存在一定的问题,敬请各位同行专家本着爱护的态度,给予批评指正。

赵玉青

2016年4月

个人简介:

赵玉青,女,1979年9月生,高校讲师。长期从事混凝土方面的教学及研究工作,先后参与科研项目8项,发表论文20余篇,其中sci收录2篇,ei收录3篇,国家中文核心期刊7篇。参加了2部著作《土木工程材料》的编写工作。



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义和背景	1
1.2 国内外生态护坡的研究现状	2
1.2.1 国外生态护坡的研究现状	2
1.2.2 国内生态护坡的研究现状	3
1.3 常见的护坡型式、特点及性能	4
1.3.1 自然生长草、木护坡	4
1.3.2 竹桩、木桩护坡	4
1.3.3 干砌块石护坡	5
1.3.4 浆砌块石整体护坡	6
1.3.5 抛石护坡	7
1.3.6 石笼护坡	7
1.3.7 普通现浇混凝土护坡	8
1.3.8 新型生态混凝土护坡	8
1.4 生态混凝土的特点	10
1.5 主要研究内容	11
第 2 章 植生型混凝土护坡理论及稳定性分析	12
2.1 生态学方面的理论基础	12
2.1.1 生态因子及其限制性作用	12
2.1.2 空间分布与生物生态位原理	13
2.1.3 生物自生与自我维持原理	14
2.2 植物的水土保持原理	14
2.2.1 植被对水力侵蚀的影响	14
2.2.2 植被对土壤抗蚀力的影响	15

2.2.3	植被控制水土流失的效果	15
2.2.4	植物的稳定坡体功能	15
2.3	无砂大孔混凝土砌体稳定性分析	16
2.3.1	无砂大孔混凝土的破坏形式及稳定性分析	17
2.3.2	岸坡生态混凝土极限铺筑高度的确定	18
第3章 生态混凝土配合比技术		22
3.1	试验方法	22
3.2	原材料	23
3.2.1	水泥	23
3.2.2	粗骨料和水	25
3.3	试验结果	26
3.3.1	混凝土配合比及拌和物性能	26
3.3.2	混凝土抗压强度和孔隙率	31
3.4	试验结果分析	35
3.4.1	水灰比对混凝土性能的影响	35
3.4.2	水泥用量和强度等级对混凝土性能的影响	38
3.4.3	骨料品种和粒径对混凝土性能的影响	39
3.4.4	拌和方法对混凝土性能的影响	43
3.5	本章小结	44
3.5.1	试验结果分析的初步成果	44
3.5.2	优化混凝土配合比设计	45
3.5.3	对施工方法的建议	46
第4章 生态混凝土基本力学性能研究		47
4.1	试验方案	47
4.1.1	原材料	47
4.1.2	试验设计	47
4.2	试验方法	49
4.2.1	抗压强度试验	50
4.2.2	劈裂抗拉强度试验	52
4.2.3	抗折强度试验	53
4.3	试验结果与分析	55
4.3.1	抗压强度	56
4.3.2	劈裂抗拉强度	58

4.3.3	抗折强度	61
4.4	抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度三者之间关系比较	62
4.5	本章小结	64
第5章	生态混凝土抗冻性研究	66
5.1	混凝土渗透性与冻融破坏的关系	66
5.2	混凝土冻融破坏机理分析及抗冻性试验	67
5.2.1	混凝土冻融破坏机理分析	67
5.2.2	生态混凝土立方体试件冻融（慢冻法）试验	68
5.2.3	生态混凝土板和带边框的生态混凝土板冻融（快冻法）试验	72
5.3	提高混凝土耐久性的措施	75
第6章	生态混凝土透水性及抗冲性试验	77
6.1	透水性试验	77
6.1.1	试验方法	77
6.1.2	试验结果与分析	79
6.2	抗冲性试验	80
6.2.1	试验方法	80
6.2.2	试验结果分析	82
第7章	生态混凝土应用研究	83
7.1	生态护坡设计原则	83
7.2	生态混凝土护坡的技术路线	84
7.3	影响生态混凝土护坡效果的因素	84
7.3.1	强度	84
7.3.2	孔隙率	85
7.3.3	pH 值	85
7.3.4	养料土壤的填充方法	85
7.3.5	原料以及配比预设的影响	85
7.4	生态混凝土制作	86
7.4.1	原材料及其主要技术指标	86
7.4.2	预制框格混凝土与生态混凝土配合比设计	86
7.4.3	生态混凝土板的成型工艺	89
7.4.4	生态混凝土板厚度的计算	89
7.4.5	维持混凝土构件稳定的最小坡度的试验方案	90

7.4.6 生态混凝土护坡构件的固土防冲试验方案	91
7.5 试验过程	91
7.5.1 维持混凝土构件稳定的最小坡率的测定	91
7.5.2 生态混凝土护坡构件的固土防冲	100
7.6 试验结论	104
7.7 生态混凝土护坡施工	105
7.7.1 施工图设计	105
7.7.2 砌筑挡墙和铺设土工布	107
7.7.3 坡面六边形网格和矩形框格铺筑	107
7.7.4 生态混凝土护坡现场施工流程	108
7.7.5 生态混凝土护坡现场管护规程	111
7.7.6 六边形营养土草皮块拼装	111
7.8 生态混凝土护坡工程后期观测	113
7.9 施工中存在的问题及分析	114
参考文献	115

1.1 研究意义和背景

水泥混凝土是人类社会使用量最大的建筑材料，也是世界上目前最大宗的人工制备材料^[1]。自 1824 年硅酸盐水泥发明以来，水泥混凝土在给人类带来文明和进步的同时，也给生态环境和人居环境带来了诸多负面影响。长期以来，从事混凝土理论科学与实际工程应用研究的人员，只注意到混凝土为人类所用、给人类带来方便和财富的一面，却忽略了混凝土给人居环境和地球生态带来负面影响的另一面。

目前，我国混凝土年用量已超过 20 亿 t，其中约需水泥 4 亿 t，细骨料 6 亿 t，粗骨料 10 亿 t，资源、能源的消耗量巨大，环境问题日益突出^[2]。水泥混凝土的大量使用所产生的“白色污染”，大量地侵占了绿化面积，损坏了原有的环境景观，引发了基础设施建设与生态环境的矛盾，扰乱了人与自然生态之间的和谐关系。另外，传统混凝土材料质地脆硬，表面粗糙且呈强碱性，多数情况下给人一种坚硬、冰冷、灰暗的冷漠感，视觉效果缺乏生机，构筑的生活空间缺乏艺术美感^[3]。

随着可持续发展战略的实施，国家加大了水利、公路、铁路等基础工程建设的投入。伴随着这些基础工程的建设，出现了大量的施工开挖，造成了大量的裸露土坡和岩质边坡，使原有的生态系统遭到破坏。在水利工程建设中，用混凝土或混凝土板块进行江河堤防护砌，是一种硬化岸坡、保护堤防安全行之有效的方法。然而，这种方式却是以自然环境的破坏和恶化为代价的。在河道两岸由混凝土砌成的大面积刚性护砌面，由于缺乏透气性、透水性，对温度、湿度的调节性能差，因而在这种边坡上寸草不生，一片荒芜；在环境方面，夏季太阳的直接暴晒，在边坡周边所形成的“热岛效应”，导致了局部气候的恶化；同时这种边坡忽略了河道与岸上生态系统的有机联系，使得岸上植物难以生长，鱼类及两栖类动物失去了栖息和繁殖的条件，水体因脱离了生物群落，自净能力降低，使原有的生态系统遭到破坏，导致了严重的水土流失和生态环境失衡。

现今，我国大多数城市内的河流的自我恢复的能力、自我净化的能力降低，水土流失、河流水体污染严重。我国河道护坡工程大多数仍然采用传统的设计思想和技术，即使是中小型河流，河道护坡仍然过分追求强度、耐久性等安全稳定问题，以混凝土护坡为



主,而忽视了工程建筑对河流环境、生态系统、微生物及动植物生存环境的影响^[4]。

河道是生态环境的主要载体,因此护坡工程是河道生态治理的重要措施之一,对于防止水土流失、保护堤防免受冲蚀具有重要作用。同时护坡工程应该考虑与周围环境的和谐,生物的多样性,为两栖、水生生物创造栖息繁衍环境,这样的设计既有利于提高水体的自净能力,避免水土流失,又有利于保护河岸的水生态环境^[4]。同时构筑具有亲水理念的景观河道,实现人水和谐共处的水利建设理念。

在目前河渠整治设计中,非渠化、回归自然已经逐渐被设计者所接受,正在成为河道整治理念设计的主体。基本设计思想是在确保有防洪功能的同时、河岸工程还具有防止河岸侵蚀结构、并能安全稳定运行的前提条件下,以恢复河岸生态环境及其景观为目的,转变以往水利工程设计思路,将生态工程学原理、自然美学原理有机的融于水利工程建设设计中,通过有针对性地对河渠护坡工程生态设计与干预,采用生态环境自我恢复为主、人工维护为辅的工程技术手段,让受损的河岸生态环境基本恢复到未受干扰的自然状态及其景观格局,河岸生态系统内部的关系变得协调,结构更加合理,系统运行更为高效^[5]。

20 世纪 80 年代后期,世界各国对生态环境日益重视,我国政府也在“十五”生态建设与环境保护专项规划中提出:坚持以人为本,把改善生态、保护环境作为经济发展和提高人民生活质量的重要内容。21 世纪的混凝土不仅要满足作为结构材料的要求,还有尽量减少给地球环境带来的负荷和不良影响。因此,突破传统混凝土材料的范围,发展可植被混凝土,寻求与自然的和谐,成为当前混凝土科学发展的主要方向之一。“生态混凝土研究”课题,就是在这种背景下提出来的。它不仅拥有传统混凝土材料的性能,更赋予其新的特性,是一种能保护环境,使人类与自然和谐发展的新型混凝土。它的出现,对实现建设活动的可持续发展有重要意义,是现代混凝土科学发展的必然趋势。

1.2 国内外生态护坡的研究现状

1.2.1 国外生态护坡的研究现状

生态护坡工程是能与自然融为一体,并体现人与自然和睦相处的一种河岸护坡技术。生态护坡以安全、经济为前提,以满足社会、资源、环境可持续发展和多功能利用为目的,逐步形成水草茂盛、河水清澈、具有多种多样生物物种相互依存并有自我恢复自我净化的护坡生态系统。

1933 年德国水利专家 Seifert 首次提出“亲河整治”概念;1982 年 Gray 和 Leiser 提出了生态岸坡工程的设计原则和技术方法;1936 美国 Kraebel 将生态护坡技术应用在洛杉矶 Crest 高速公路护坡工程中,德国采用柳树和芦苇在莱茵河两岸进行了生物护坡试验。

20 世纪 60 年代初 Schlueter 提出河流生态化治理首先要满足人们对河流利用的需



求,并且要保护河流生物多样性^[6]。1980年,德国的生物护坡法被瑞士州河川保护局建设部的 Christian GELdi 进一步发展、丰富为“自然型河流护坡生态修复技术”,将混凝土护坡改修成芦苇和自然石护坡,为鱼类、两栖类生物提供栖息的空间,将渠化的河道改为蛇形弯曲、深潭和浅滩相间的河道,让河流恢复到原来自然状态。1983年 Bidner 指出河道治理过程中首先要考虑河道的地质地貌特点、河流的自然特性和水力学特性,以减少河道整治与对生态系统之间的相互影响。1985年 Holzmann 把河岸植被视为一种包含多种小生态环境的复杂生态结构,强调维持生态多样性在生态恢复的重要性,注重工程建筑与自然景观的和谐性。Rossoll 认为,亲近自然的治河思想最先要考虑保持河流生态系统内部生物的生产力。到了1989年 Pabst 则强调小河流的自然特性不应该人为过多地去保护,应该靠它自身的恢复力。1999年9月美国东北部遭遇弗洛伊德飓风袭击,处在美国东北部的拉里丹河洪水位达到200年以来的最高限;1995年在此修筑的生态护坡经受一次严格的考验,结果表明生态护坡几乎完好无损,发挥了设计要求的功能。

20世纪90年代日本在全国范围内推行“创造多自然河川计划”,并在1995年修改了《河川法》,将改善河流环境作为河流管理的目标之一。日本利用此生态护坡工程方法治理河道,取得了理想的生态效果。

目前,国外对河流生态系统修复研究的重点集中在河道形态修复、河岸植被选择及湿地群落恢复。针对受损河岸生态系统修复方面的试验研究基本集中在生态修复新材料的开发和新材料的适应性上。而对于修复机理这方面的研究比较少,对生态系统如何恢复也少有论述,缺少河岸生态系统自我调节的量化研究,河岸生态系统量化评价体系不够完善。

1.2.2 国内生态护坡的研究现状

我国开展生态护坡整治比较晚,但发展迅速。进行了很多生态工程技术的研究和实践工作。如北京凉水河人民渠段护坡生态治理,经过细致的规划和设计,生态恢复效果显著;1998年上海市对苏州河进行生态治理,逐渐完善水利环境生态建设,使河道焕然一新,河水清澈,河岸青青,景色宜人;成都市政府通过建设人工湿地、生态护坡、生态河床等,成功地重建了成都府南河生态系统;绍兴市环城河综合整治工程,通过清淤疏浚、生态护坡、控制污染、绿化建设,将河道治理成集防洪、航运、休闲娱乐多功能于一体的生态河流。

三峡大学对植被混凝土护坡绿化技术做了研究,并申请了专利,利用这项专利技术,成功进行了清江隔河岩电厂高陡混凝土边坡绿化。天津市水利科学研究所所以植被生物学特性、生长发育规律为指导,以生态混凝土理论为基础,为解决河道整治中传统片面地追求河岸的硬化覆盖、忽略河流的资源功能和生态功能、破坏自然河流生态链的矛盾,推动传统水利向环境水利和大都市水利的转变,于2001年2月开始进行“环保型绿色植被无砂混凝土”研究,通过对生态混凝土进行改性研究,在混凝土内部创造出适合植物生长的环境,解决混凝土色彩单调、污染环境的缺憾,并于2002年研制成功。



2004 上海市嘉定河生态治理工程中,进行了长 450m、宽 3m 的生态混凝土护建设,岸坡稳定性良好,坡面植物生长茂盛,河内水质改善;2010 年上海市在距离徐浦大桥 1km 处的黄浦江水厂备用水源地进行了生态护坡建设,采用生态混凝土作为护坡材料,按航运和防洪的需要进行设计,并根据沿江的建筑景观进行了生态景观设计,达到较为理想的效果。当前河流生态护坡建设的探索实践在全国范围广泛开展,收到了非常好的效果,为我国的生态河道治理提供了宝贵经验。

1.3 常见的护坡型式、特点及性能

1.3.1 自然生长草、木护坡

天然生长的草、木护坡(图 1.1),是依靠当地根系较发达的水中生长植物或有耐水性的树种来固土护坡,它可以防止土壤侵蚀、绿化边坡和改善生态环境,保护河流的自然属性和堤防安全。天然生长的草、木护坡技术常用于小河、小溪及水流流速度比较小的弯道冲蚀处。通常情况下植物在种植初期,抵抗冲刷能力弱,需要采取必要的辅助加固措施,待其随着树木水草生长壮大后,其对护坡的保护能力逐步加强保护坡坡的能力也会相应的提高。

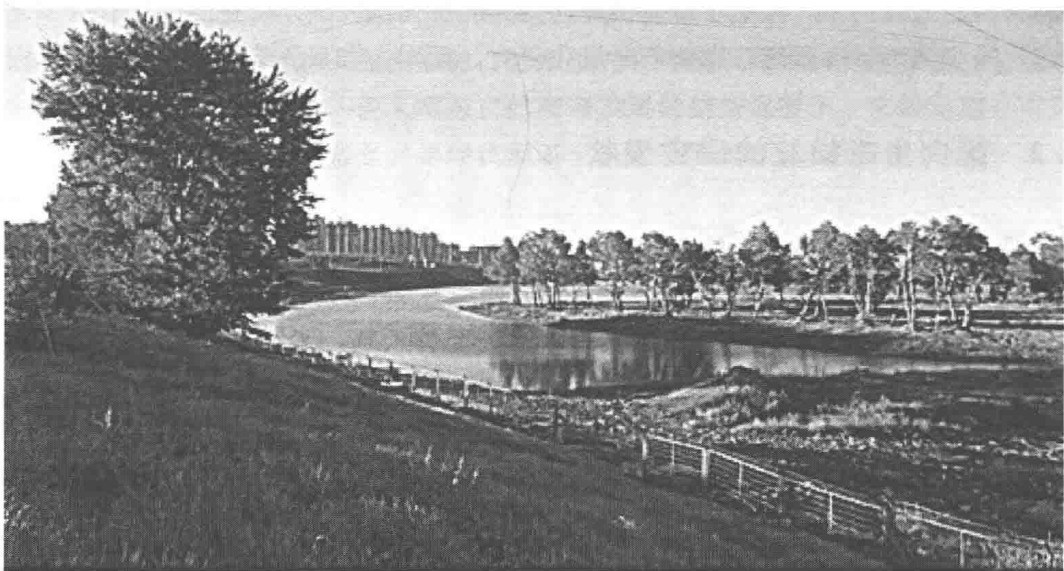


图 1.1 然生长草、木护坡

Fig. 1.1 Natural grass, wood revetment

1.3.2 竹桩、木桩护坡

竹桩、木桩护坡^[7]指的是将竹子、松木、柳木等制作成一定长度的木桩,倾斜或者垂



直进入地基，垂直于河岸，保护坡堤防不被水流冲刷，经常在河道水流速度较大，既需要保护坡坡又需增加岸坡稳定性时使用（图 1.2）。这部分竹木桩、树木桩能够存活和成长，具备优良的绿化性能。竹、木桩护坡使用土地非常少，适应地基变形的能力强，同时还具有很强的抵抗水流冲刷的能力。在自然生态性能方面，竹桩、木桩护坡可有效地确保地表以下水体与地表之上水流体系之间的正常交流，较为有利于水生动植物的孕育繁殖，并且能够使河道在洪水期抵抗冲刷的能力增加。由于其造价低廉、施工简单，在公园和景观河道中应用较为广泛。

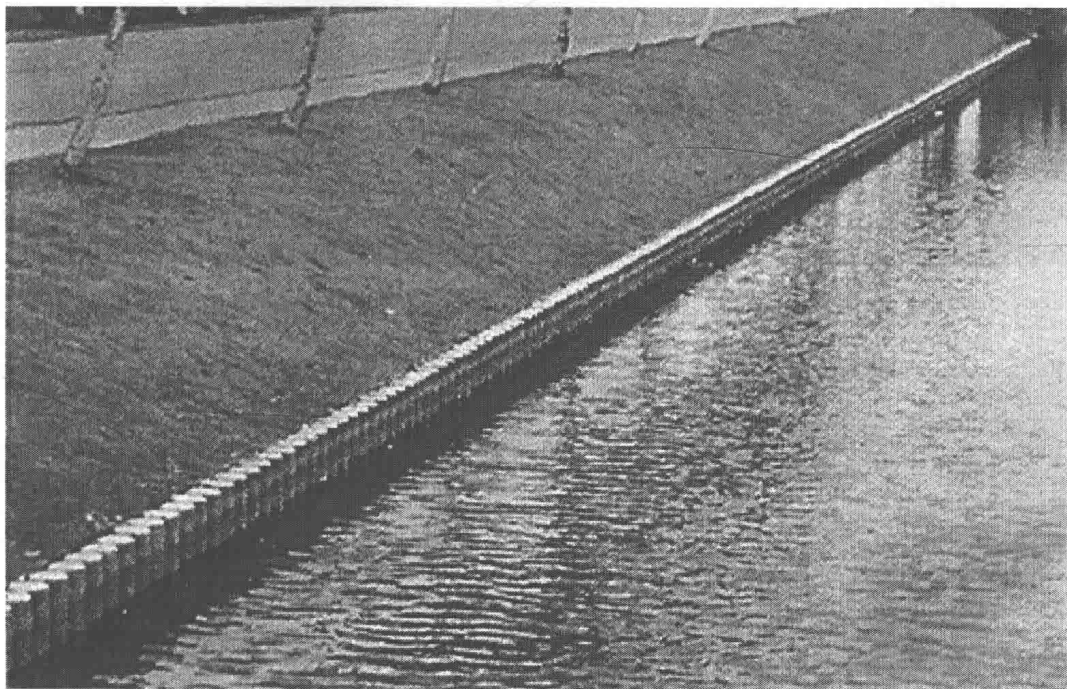


图 1.2 人工木桩护坡
Fig. 1.2 Artificial pile revetment

1.3.3 干砌块石护坡

使用干砌块石护坡历史悠久，通常是利用当地石料，由人工干砌造而成具备一定的坡度或者竖立的护坡（图 1.3）。这种护坡具有构造简单、施工简便、工程开支小、工程周期短的特征。除此之外，干砌石护坡还具备一定程度上的抵抗冲刷能力，在流量较大而流速不是很大的河道护坡工程中可以应用；当河道流速较大时，可在施工中填塞一些黏性土或水泥土到石料间的缝隙中，并种植上花草树木和其他植物，以用来美化堤岸。实际工程施工中，一般在正常水位下部干砌竖立的挡土墙，起阻挡土体和防止水流冲刷的效果，而在常年水位以上部分做成较为轻缓的土坡，并栽种一些当地喜水的草木植物。



图 1.3 干砌块石护坡

Fig. 1.3 The dry block stone revetment

1.3.4 浆砌块石整体护坡

为了防止大流量河道受洪水过度冲刷就要采用相对坚固的浆砌石做护坡（图 1.4），

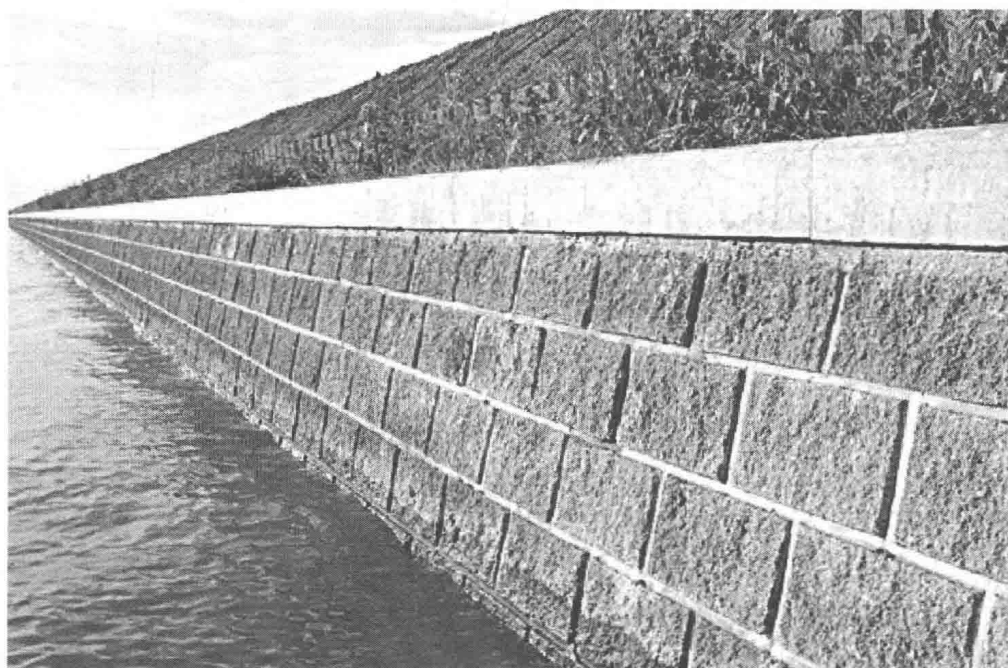


图 1.4 浆砌块石整体护坡

Fig. 1.4 The whole masonry revetment



浆砌块石整体护坡指的是使用石体材料、水泥砂浆砌筑成竖直的挡土防护墙，充分利用河道的过水断面，提高抗冲刷能力。选取砌石胶结原材料时，根据河道最大水流速度可选择白灰砂浆或水泥砂浆。浆砌石护坡结构的完整性、稳定性好，强度高，抗冲击能力强，施工方便，但成本太高，可以应用于长江、黄河和其他流速大的河流的堤防护坡工程。如果在墙背处部分墙身上使用干砌块石，构成竖立式的半浆砌块石护坡，可在减少水泥使用量的同时既能满足墙身稳定和强度的要求又有利于河流水与地下水的交流^[7]。

1.3.5 抛石护坡

在较大型河流急弯段或受河道水流直冲的深沟处，其堤脚容易被冲击成深坑，任其发展下去会出现乃至酿成决堤的严重事故。若此处石料丰裕可采用抛石型护坡（图 1.5），抛石一般放在水面以下，该护坡具有很容易产生形变、水力学糙率比较高、便于向水下抛投等特点。因为抛石护坡变形性大，护坡破坏是缓慢发生的，所以抛石体具有一定程度的自愈能力。抛石护坡是适用于高抗击要求、大流量的河流渠道，并且需要与砌体、干砌石和混凝土护坡结合应用^[8,9]。



图 1.5 抛石护坡

Fig. 1.5 The ripped - rock revetment

1.3.6 石笼护坡

石笼护坡指的是利用铅丝或竹条等编织成网笼将卵石、块石整合成大体积的块体，提