

生态袋护坡结构的 设计与施工技术

程龙飞 / 著

SHENGTAIDAI HUPO
JIEGOU DE
SHEJI YU SHIGONG JISHU



西南交通大学出版社
www.xnjdcbs.com

生态袋护坡结构的 设计与施工技术

SHENGTAIDAI HUPO
JIEGOU DE
SHEJI YU SHIGONG JISHU

程龙飞 / 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

生态袋护坡结构的设计与施工技术 / 程龙飞著. —
成都: 西南交通大学出版社, 2014.6
ISBN 978-7-5643-3168-9

I. ①生… II. ①程… III. ①护坡—生物工程—研究
IV. ①U417.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 143132 号

生态袋护坡结构的设计与施工技术

程龙飞 著

责任编辑	牛 君
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	8.5
字 数	152 千字
版 次	2014 年 6 月第 1 版
印 次	2014 年 6 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3168-9
定 价	29.50 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

党的十八届三中全会进一步阐述了生态文明的内涵，明确提出要紧紧围绕“建设美丽中国”深化生态文明体制改革，加快建立生态文明制度，划定生态保护红线；中央经济工作会议更是明确提出了 2014 年生态建设的工作任务：加大环境治理和保护生态的工作力度、投资力度、政策力度。国务院总理李克强 2013 年 12 月 18 日主持召开国务院常务会议，会议指出，守护绿水青山，留住蓝天白云，是全体人民福祉所系，也是对子孙后代义不容辞的责任。必须贯彻落实党的十八大和十八届三中全会精神，始终把建设生态文明、保护生态环境放在突出位置，强化科学治理，推广适用技术。

生态袋护坡技术，是集柔性结构、生态、环保、节能四位一体的建筑工程领域的一种新型生物工程技术。由于生态袋材料轻，填料可以就地取材，可在短时间内完成工程结构，所以也常运用于堤防工程、交通工程以及军事领域。所以，研究生态袋的设计和施工技术，不仅具有巨大的经济价值，还具有不可估量的社会价值。本书主要通过生态袋压缩试验、结构拉拔试验、结构渗透试验，分别研究了生态袋袋体受压时的变形规律、生态袋间接触面抗剪性能、生态袋结构的渗透性能；详细地阐述了生态袋结构设计和施工方法。旨在为生态袋结构设计与施工人员提供良好的参考，希望能够为土木工程、水利工程、交通工程、环境工程、农业工程等相关领域科研工作者提供方便。

本书涉及面广，内容主要为重庆市科委项目（CSTC2010BB1315）、重庆市教委项目（KJ131106）、重庆三峡学院人才引进项目（12RC13）的阶段性和成果。

由于作者水平有限，书中难免存有不足，望读者批评指正。

作 者

2014 年 3 月

目 录

1	绪 论	1
1.1	几种常见的植被护坡技术	1
1.2	生态袋护坡结构构成元素	5
1.3	生态袋护坡结构研究现状	7
1.4	本书的主要研究工作及实际意义	12
2	生态袋压缩试验研究	17
2.1	生态袋压缩试验目的	17
2.2	土工编织袋单轴压缩试验	17
2.3	生态袋破坏机理分析	21
2.4	压缩预测模型建立与运用分析	23
2.5	生态袋护岸结构沉降变形计算方法	30
2.6	本章结论	33
3	生态袋结构抗拉力试验研究	34
3.1	生态袋结构抗拉力试验目的及意义	34
3.2	试验概况	35
3.3	生态袋抗拉力试验数据分析	36
3.4	联结扣对结构加固作用数值模拟	40
3.5	本章结论	47
4	生态袋结构渗透性试验研究	48
4.1	生态袋结构渗透性试验理论背景	48
4.2	试验概况	49
4.3	试验数据的分析与整理	51
4.4	透水孔隙生态袋材料与水界面摩擦系数的测定	52
4.5	本章结论	58
5	挡土型生态袋结构的设计方法	59
5.1	生态袋挡土结构设计说明	59

5.2	地基整体稳定和沉降计算	59
5.3	生态袋挡土结构外部稳定分析	60
5.4	生态袋挡土结构内部稳定分析	62
5.5	生态袋结构的局部稳定分析	65
5.6	其他部分设计	67
5.7	本章结论	69
6	护岸型生态袋结构的设计方法	71
6.1	生态袋单体重度和面层厚度计算	71
6.2	护岸型生态袋结构范围及基本构造	84
6.3	生态袋结构面层整体抗滑稳定性设计	87
6.4	胸墙的抗滑、抗倾稳定性设计	88
6.5	生态袋护岸结构设计的耐久性考虑	90
6.6	本章结论	92
7	植被根系对生态袋护坡结构安全稳定性的影响分析	93
7.1	植被根系对土体岩土力学性能的影响研究	93
7.2	栽植根系与填土作用机理	97
7.3	栽植根系对生态袋结构的加固作用	101
7.4	本章结论	107
8	生态袋护坡结构施工方法	108
8.1	清理场地	108
8.2	基础施工	109
8.3	生态袋结构施工	110
8.4	生态袋结构绿化施工	115
8.5	本章结论	116
9	生态袋护坡结构在三峡库区的设计与施工	118
9.1	生态袋结构在三峡库岸使用的可能性分析	119
9.2	消落带生态袋护岸技术的设计	121
9.3	消落带生态袋护岸结构的施工	122
9.4	生态袋结构试验段施工实例	124
9.5	本章结论	126
	参考文献	127

1 绪 论

环境污染和生态环境破坏是人类面临的重大社会问题之一。项目建设与环境保护兼顾是经济可持续发展的重大课题之一,世界各国都很重视,我国也不例外。在铁路、公路、水利建设中,经常需要开挖大量的边坡,边坡的开挖破坏了原有的植被覆盖层,造成了严重的水土流失,加剧了生态系统的退化。如何在建设开发中兼顾保护自然环境,如何快速恢复工程创面的生态环境并实现坡面的植被保护,都是亟待解决的问题。因而,河堤加固、荒山治理、滑坡治理等工程项目中,采用资源消耗低、环境影响小的生物护坡工程技术已经是社会发展的必然趋势。

生物护坡工程技术兴起于欧美国家,其形成一门科学,还是近十几年的事,直至今日甚至连一个很贴切的术语都还没有形成。在国际上专门以生物护坡为主题的首次国际会议于1994年9月在英国牛津举行。国外一般把生物护坡定义为“使用活的植物或者其与土木工程和非生命的植物材料相结合,以减轻坡面的不稳定性 and 侵蚀”,其途径与手段是利用植被进行坡面保护和侵蚀控制。

1.1 几种常见的植被护坡技术

1.1.1 铺草皮护坡技术

铺草皮是较常用的一种护坡绿化技术,是将培育的生长优良健壮的草坪,用平板铲或起草皮机铲起,运至需绿化的坡面,按照一定的大小规格重新铺植,使坡面迅速形成草坪的护坡绿化技术,如图1.1所示。

铺草皮护坡具有以下特点:

(1) 成坪时间短。草种从播种到成坪所需要的时间较长,一般需要1~2个月,采用铺草皮的方法,可实现“瞬间成坪”,因此,对于急需绿化或植物护坡的边坡,采用铺草皮是首选办法。



图 1.1 铺草皮护坡技术

(2) 护坡功能见效快。植物的护坡作用主要通过它的地表植被覆盖和地下根系的力学加筋来实现, 草坪在未成坪前对边坡基本起不到防护作用。铺草皮由于即时实现草坪覆盖, 因此依靠其地表覆盖, 在一定程度上可减弱雨水的溅蚀及坡面径流, 降低水土流失, 迅速发挥护坡功能。

(3) 施工季节限制少。植物发芽都需要适宜的温度条件: 冷季型草种的适宜播种季节是早季和夏末秋初, 最适宜的气温为 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$; 暖季型草种最适宜的播种季节是春末秋初, 适宜的气温为 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。在适宜季节外施工, 草种的发芽率、生长都会受到影响。

(4) 后期管理难度大。新铺的草皮, 容易遭受各种灾害, 如病虫害、缺水、缺肥等, 因此在新铺草皮养护期间, 必须加强管理。

1.1.2 三维植被网

三维植被网护坡是在铺草皮护坡存在诸如易遭受强降雨或者常年坡面径流形成冲沟、引起边坡浅层失稳和坍塌等缺陷的基础上发展起来的。三维植被网的基础层和网包层网格间的经纬线交错排布黏结, 形成立体拱形隆起的三维结构, 质地疏松、柔韧, 使网具有合适的高度和空间, 可以充填储存泥土和砂粒, 因而具有抗水冲刷、固土蓄水、阻风滞水等功能, 如图 1.2 所示。

三维植被网具有以下特点:

(1) 固土性能优良。三维植被网表面有波浪起伏的网包, 对覆盖于网上的客土、草种有良好的固定作用, 可减少雨水的冲蚀。

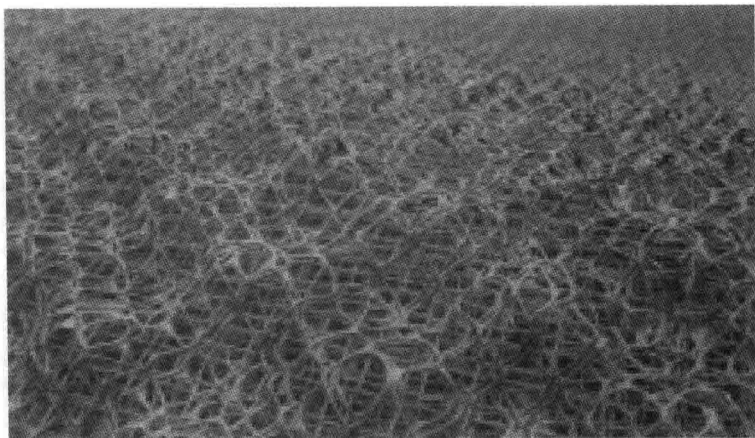


图 1.2 三维植被网

(2) 消能作用。由于网包层的存在,缓冲了雨滴的冲击能量,减弱了雨滴的溅蚀。网包层的起伏不平,使风、水流等在网表面产生无数小涡流,减缓风蚀及水流引起的冲蚀。

(3) 网络加筋突出。三维网络对回填土起着加筋作用,且随着草种根系生长发达,三维植被网、客土及草种根系相互缠绕,形成网络覆盖,增加边坡表面的抗冲能力。

(4) 保温效果良好。三维植被网垫具有良好的保温作用,在夏季可使植被根部的微观环境温度比外部环境温度低 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$,因此,三维植被网在一定程度上解决了逆季节施工难题,促进植被均匀生长。

1.1.3 生态毯护坡技术

生态毯是由复合纤维织物、反滤土工布与多样化草种、草皮等配套的一体化新型生态护坡材料,在防止河道堤岸水力侵蚀、土壤流失的同时,可达到边坡生态修复、景观绿化的功效。生态毯护坡技术给草坪建植方式带来了一场根本性的变革,使得快速、高质量地建植草坪成为可能,使用时如同铺地毯一样,将生态毯覆盖于山坡、路基或坪床上,若干天后,即形成优质草坪。生态毯形成的坡面美观自然,后期极少维护;施工完毕就可以起到很好的固沙、护坡和水土保持作用,如图 1.3 所示。

生态毯具有如下特点:

(1) 施工方便快捷。产品由工厂预制,运输方便;新型一体化结构,可直接施工,且无需使用特殊工具,完全可以人力施工;免去多重中间环节。



图 1.3 生态毯

(2) 抗风蚀能力强。生态毯紧贴坡面，即便是气候条件比较恶劣的环境下，只要设计合理，抗风速可达到 15~20 m/s。

(3) 抗冲刷能力强。生态毯能够为 25° 以上的河道边岸提供绿化条件，长期抵抗流速 1.2~2 m/s，短期抗流速可达 3~4 m/s。

1.1.4 生态袋护坡技术

水流所搬运土粒的直径与流速的二次方成正比，对于松散的土颗粒，水流可以轻易地将其搬离原地；在生态袋中装入密实的土体，袋与袋之间通过联结扣组成一个牢固的护坡系统，即使再大的水流，也绝无将土颗粒搬走的可能。生态袋填充的土壤是植物生长发育的基地，袋体与填土对植被具有涵养作用和支撑作用，并在稳定和缓冲环境变化方面起着重要作用。生态袋通常被用于水利、交通、市政等行业需要快速生态修复的永久工程结构中。

生态袋是一种含有种子夹层的、有一定强度、一定规格的、一端开口的袋子，袋子内可以装入土壤和肥料。生态袋技术是集客土、种子直播、幼苗移栽、水土保持等原理为一体的坡面植被建植技术，如图 1.4 所示。

生态袋具有如下特点：

(1) 柔性永久结构。生态袋结构为柔性结构，对不均匀沉降有很好的适应性，能承受一定的位移和沉降，而不产生明显的应力集中；结构对冲击力有很

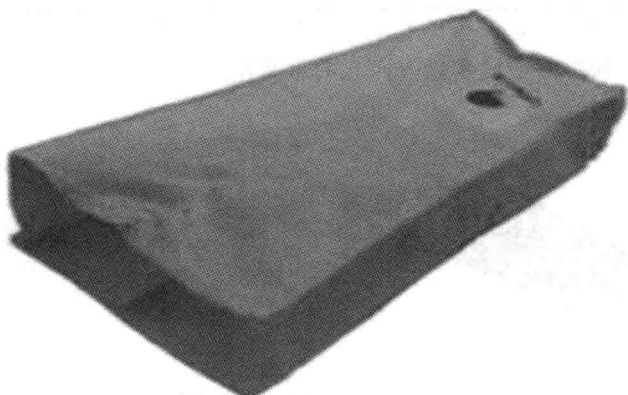


图 1.4 生态袋

好的缓冲作用，抗震性好。结构面层通过植被的根系同自然坡面结构形成一个有机的整体，不会产生分离和崩塌等现象；随着时间的延续，植被根系进一步发达，结构的稳定性和牢固性还会进一步加强。

(2) 友好的生态效应。不用水泥、钢筋、混凝土等传统建材，不产生建筑垃圾，没有施工噪声污染，能与生态环境很好地融合。植物种子选择多样化，能乔、灌、藤、草结合，充分发挥植物的水土保持、生态修复功能。

(3) 施工快捷。生态袋由工厂定制而成，材料轻便，易运易存；填料大多可以就地取材。施工人员专业技术要求低，一个由 3~4 人组成的熟练施工队伍每天可施工 40 m³生态袋结构。

1.2 生态袋护坡结构构成元素

生态袋护坡技术是一种生物护坡工程技术，其主要由生态袋、联结扣、土工格栅、编制土工布等几种元素构成。

1.2.1 生态袋

生态袋是由质量轻、环境协调性好的纤维材料加工缝制或者胶结而成，具有透水不透土的过滤功能，既能防止填充物流失，又能实现水分在土壤中的保持和交流，是生态袋护坡结构的面层。抗冲生态袋面层共有四层：第一层加强纤维织物，材质为聚酯纤维；第二层反滤层，材质为聚酯系无纺布；第三层草种、肥料层；第四层复合纤维织物，材质为木浆纤维，如图 1.5 所示。生态袋中

填充的土壤是植物生长发育的基地，袋体与填土对植被具有涵养作用和支撑作用，并在稳定和缓冲环境变化方面起着重要作用。

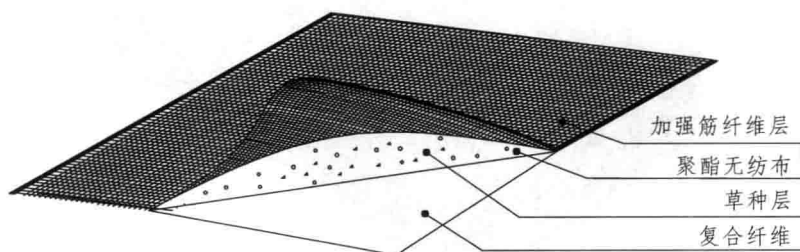


图 1.5 抗冲生态袋面层

1.2.2 联结扣

联结扣是由聚丙烯材料挤压成型的高强度构件，主要由主板、扣齿组成。将联结扣放在上下层两个生态袋接触面内，在上部生态袋竖向压力的作用下，联结扣齿将刺入与其接触的生态袋中，防止生态袋之间的相对滑动，以增加生态袋护坡结构面层整体性，充分发挥生态袋柔性结构的特点，如图 1.6 所示。部分联结扣还带有锁口，用于固定填土中的拉筋，以增加面层与填土层的整体性。

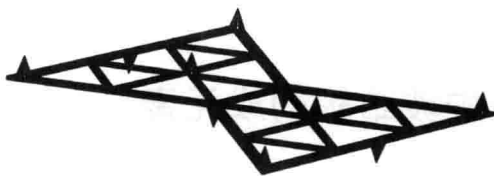


图 1.6 联结扣

1.2.3 土工格栅

土工格栅是用聚丙烯、聚氯乙烯等高分子聚合物经热塑或模压而成的二维网格状或具有一定高度的三维立体网格屏栅。常水平铺设在生态袋挡土结构回填土区，可以提高地基承载力，减少沉降，增加填土稳定性；可以增加回填土的整体性及连续性，有效控制不均匀沉降。在施工时将土工格栅伸入并固定在结构面层中，可增加生态袋结构的整体性，如图 1.7 所示。

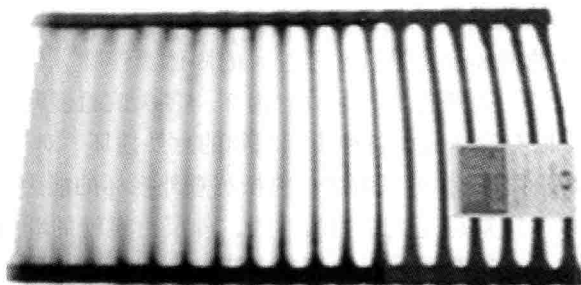


图 1.7 土工格栅

1.2.4 反滤土工布

通常采用短纤针刺土工布，因其具有抗老化、耐酸碱、耐磨损、柔韧性好、施工简便的特点，具有良好的透气性和透水性。将土工布铺设在生态袋面层后，可减少来自填土区的水压力；防止填土渗入面层，影响填土区的稳定性。

1.3 生态袋护坡结构研究现状

关于生态袋护坡技术的研究，欧美国家主要是围绕着防止坡地受雨水侵蚀的目的而进行，日本则更注重实用技术开发和应用，研发了大量新型的种植基材。欧美、日本等在 20 世纪 80 年代就开始使用纸质植生袋，继而在 90 年代初开发出无纺布植生袋和纤维棉植生袋；韩国在 90 年代从日本引进植生袋技术并广泛应用于坡面植被恢复工程。我国在 20 世纪 90 年代末期开始从日本和韩国引进植生袋技术，并在公路、水利、林业等领域进行了应用。如甘肃刘白、湖南临长等高速公路，湖北宜昌页岩山区、浙江杭州白云山等边坡护坡，江苏镇江北固山长江沿岸护坡工程，都取得了良好的植被恢复效果。关于生态袋及其结构岩土力学方面的研究成果极少。近几年关于土工编织袋的研究成果，主要有以下几个方面。

1.3.1 关于土工编织袋结构耐久性研究

1.3.1.1 抵抗损坏的能力

土工编织袋作为结构的面层，暴露在外面的土工材料，被损坏是不可避免



的,这极大地影响土工编织袋结构的耐久性。Hornsey、Carley、Kunt Oberhagemann 认为,土工编织袋的损坏主要是洪水经过时的固体漂浮物、竹竿等坚硬物体导致的意外损坏,以及小刀割裂等人为故意损坏。多次试验证明,提高土工材料的抗冲击能力,可以有效地减少各种土工织物的意外损坏。对于土工织物来讲,提高 CBR 强度以及伸长量,可以增加材料抵抗意外损坏的能力。对于那些故意损坏的行为,可以采用双层土工织物的形式,外层由粗糙的纤维构成,不易损坏;外层粗糙的土工纤维会网住水中泥沙,增加面积重度,进一步提高抗损坏的能力,即使外层被损坏,内层还能起到维持结构稳定的作用。

1.3.1.2 抵抗紫外线作用强度退化问题

通常土工织物都被埋在地下,起加筋、排水或者分隔作用。Faure、Farkouh 通过对建设 21 年后 Valcros 水坝结构中的土工织物进行各项测试,结论认为:埋设在地下对土工织物的强度参数并没有明显的影响。一般的工程结构,土工织物材料暴露在空气中的时间也就是施工期间的 1~2 个月,按照 ASTM D4355 设计土工织物的抗紫外线强度退化是合理。澳大利亚进行了土工织物袋材料长期的抗紫外线强度退化试验,最长超过 6 000 小时。由于土工织物袋结构会长期暴露于空气中,对于濒水的生态袋结构,考虑到丰水期和枯水期水位的影响,生态袋表面俘获的泥沙保护,以及生态袋表层植被的覆盖,考虑 2 年后强度退化是很必要的。Hornsey、Carley 认为暴露在野外 1 年后强度保持率在 80%以上的土工材料,用于河道边岸防护是合理的。

1.3.1.3 土工编织材料的耐磨性

水流中的泥沙不可避免地对土工编织袋材料进行磨蚀,长期的磨蚀作用对生态袋结构安全性造成重大的影响。按照水流速度 1 m/s、泥沙主要集中在 6~9 月,生态袋结构设计寿命为 50 年计算,生态袋材料输沙距离超过 50 万千米。目前最好的办法是针对生态袋材料用于沿海和航道设计转筒磨蚀试验。Kunt Oberhagemann 认为:根据工程实际流速、泥沙含量等的使用条件,8 万次循环后强度保持率在 70%以上的可以用于河道边岸防护。在没有试验条件的情况下,采用粗糙纤维缝制的土工编织袋,也有较强的抵抗磨蚀能力,粗糙的土工纤维除了会网住水中泥沙以外,还因为凹凸不平的表面纤维有一定的削弱波浪能的功能。

1.3.1.4 土工编织袋填料的长期保留量

不同类型的实际工程填料最佳填充度略有不同,通常采用极限填充程度的 80%~85%作为最佳填充程度。土工编织袋中填料的长期保留量,对于土工编织

袋结构的长期稳定性具有重要的意义。由于生态袋结构长期受到水流的拍打和冲击,水会渗入袋体,改变填土的性质,带走部分黏粒;水流的长期作用,可能会改变生态袋材料的渗水保土性能。Hornsey、Carley 认为选择生态袋材料和填料时,应以能填料重量长期保持在 95%以上为佳,水流不能在生态袋中形成稳定的渗流路径。一般生态袋材料等效孔径 O95 在 0.1~1 mm,而不少种类填土的有效粒径 d_{10} 甚至限制粒径 d_{60} 均小于 0.1 mm,所以选择合适的土工编织物和对应的充填物比较关键。对于流速小,季节性淹没入水中的生态袋结构,选择合理的施工时间,植被根系固土作用可以阻止土壤流失。对于流速大,长期淹没入水中,植被恢复困难的生态袋结构,可以选用碎石砂土填充;对于流速大,水位波动大,植被可能恢复的区域,生态袋可以采用双腔设计,在外腔中填砂土防止填料流失,在内腔体里面填充植被生长的基质。

TOMITA、TAJIMA 通过在海岸附近设置实体的模型,肯定了土工编织沙袋具有消能沉砂作用。Zheng Duo、Zhou Jiyuan、Yang Jinliang 等通过对临时冻土区的生态袋护坡结构的研究认为,由于生态袋表面俘获的泥沙保护、植被的作用,生态袋材料的厚度反而增大,抗拉强度反而有所增加。目前生态袋结构已经成功用于多个护岸工程实践。河道防护工程通常设计寿命 30~50 年,在此期间可能会要求维修。要准确估算土工材料的使用期限是很困难的,应根据不同的加载条件和现场条件确定,一般认为土工编织袋材料 50 年使用期限是有保障的。

1.3.2 关于土工编织袋结构变形稳定性研究

1.3.2.1 土工编织袋压缩变形试验研究

刘斯宏、徐永福等学者,都对生态袋结构压缩变形规律进行过深入的研究。他们认为生态袋受到外力时,其形状会发生变化。假定生态袋是长袋,当周长伸长时,短轴方向缩短,长轴方向伸长,生态袋中就会产生张力 T 。该张力 T 反过来产生一附加力作用于内部的土体上。因此作用在内部土体上总的应力为外部施加的应力与生态袋张力引起的附加应力之和。在假设土体处于被动极限应力状态时,推导生态袋张力与附近黏聚力的关系:

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + \frac{2T}{B} \left(\frac{B}{H} K_p - 1 \right) \quad (1.1)$$

式中 K_p ——生态袋内部土体的被动土压力系数; $K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$;
 B 、 H ——生态袋截面的高或者宽。



式(1.1)在二维空间将生态袋受压时变形特征与受力状态建立了联系,已用于生态袋结构变形与受力的理论和竖直模型分析中。Yousef Ansari、Richard Merifield 认为压平后生态袋横截面两侧近似为半圆形。而闫玥、闫澍旺等在假定生态袋尺寸较大,按平面应变问题处理;将填料视为液体,不考虑黏滞效应;忽略填充物和生态袋之间剪切力的基础上,推导了土工编织袋横截面两侧曲线的解析表达式。在实际应用中,两者得到的差值较小。刘斯宏等将生态袋受压时变形特征与受力状态的联系机理推广到了三维空间。如果能准确地测试出生态袋在受力时各个方向发生的变形,按照 Yousef Ansari、闫玥等类似的方法,可以推导生态袋纵截面两侧的曲线形态。

1.3.2.2 土工编织袋结构渗透试验研究

应强等学者研究认为,生态袋的渗透性与生态袋的填充度有关,将沙袋填得尽量多,各沙袋间空隙很小的填充度定义为最佳填充度,并给出了实用公式。孙东坡、王二平等通过对矩形断面明渠流速的研究,认为明渠道流速沿水深(垂向)变化符合二次抛物线函数形式,分布系数主要受水流强度因子 Froude 数控制。Recio、Oumeraci 通过试验研究了填充度在 80%左右,各种堆叠方式的生态袋结构的渗透性,认为生态袋结构的渗透性主要取决于生态袋之间间隙的大小及连通性,生态袋内的渗流相对较小,可忽略不计。Recio、Oumeraci 给出了不同流态,即层流、过度流、紊流等流态下,求解生态袋材料与水之间摩擦系数、生态袋孔隙摩擦水头的渗流分析概念模型。如果有实测流速数值,按照孙东坡等求解流速沿水深的分布的基本方法,结合能量方程,可以求解流入生态袋结构孔隙的流速;结合到生态袋结构两边的水头差,可以求解流出生态袋孔隙的流速。

1.3.2.3 土工编织袋结构变形稳定性研究

Recio、Oumeraci、Oberhagemann 等学者认为生态袋结构为柔性结构,生态袋的变形和位移对生态袋结构的安全稳定性起着决定性的作用。Recio、Oumeraci 通过水槽模型实验研究认为:在波浪作用下,生态袋护岸结构最关键的位置是略低于静水面(still water level)的位置,不管是在波浪上冲还是下泻阶段,此位置的生态袋将承受最大的水荷载;最危险的阶段是在水流下泻的时候,水流会沿着生态袋面层的后侧和生态袋之间的接触处,推动生态袋向墙前移动;当波浪来回作用时,生态袋前侧会随着波浪发生向上向下来回的转动,从而减少生态袋之间的有效接触面;生态袋中的砂子也会发生向前的移动,引起生态袋变形,从而影响整个护岸结构的稳定性。Darshana、Dassanayake、Oumeraci 等

通过不同波浪要素的多次水槽模型试验,分析了各种因素对生态袋结构的稳定性的影响,认为生态袋填充率、生态袋间的摩擦系数、材料参数、墙面倾角、堆叠方式、水力条件等各种条件都会影响生态袋结构的稳定性。尽管生态袋结构与波浪作用相关理论较为复杂,但多次室内试验、现场试验、工程实践表明,单个生态袋的重量以及生态袋结构面层的有效厚度对生态袋护岸结构变形稳定性起到至关重要的作用。目前常用的土工编织袋护岸结构设计公式如表 1.1 所示。

表 1.1 防浪生态袋护岸结构设计常用公式

设计方法	公式形式	考虑因素
Hudson (1953)	① $W = \frac{\gamma_b H^3}{K_D (S_b - 1)^3 \cot \alpha}$	单体重量 有效厚度
Bouyze、Schram (1998)	② $\frac{u_{ar}}{(g\Delta D)^{0.5}} = 1.0$	有效厚度
Wouters (1998) Hinx Oumeraci (2002)	③ $N_s = \frac{H_s}{(\rho_b / \rho_w - 1)D} = \frac{n}{\sqrt{\xi_0}}, \quad \xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_0}}$	有效厚度
Naue (2003)	④ $l_a \geq u^2 \frac{(0.5C_D + 2.5C_L\mu)}{(1.6\mu\Delta g - C_M \frac{\partial u}{\partial t})}$	单体重量 有效厚度
Oumerac (2009)	⑤ $l_a \geq u^2 \frac{(0.5KS_{CD}C_D + 2.5KS_{CL}C_L\mu)}{(\mu KS_R \Delta g - KS_{CM}C_M \frac{\partial u}{\partial t})}$	单体重量 有效厚度

1.3.2.4 土工编织袋结构稳定性研究数值模拟

Yousef Ansari、Richard Merifield、Haruyuki Yamamoto 提出了一种有限元三维模型,模型设定土体与袋体之间的摩擦系数、设置水平和竖向位移控制函数来模拟袋体之间的接触与滑动,模拟生态袋在竖向压缩和循环剪切下的力学行为;该三维模型能够分析材料屈服应力和袋体厚度对袋体竖向变形和极限承载力的影响。Recio、Oumeraci 用 COBRAS 模型模拟不同时刻、不同位置波浪力以及波浪力对生态袋结构的作用,该模型是二维模型。采用 UDEC 模型模拟生态袋袋体的大变形以及生态袋之间接触摩擦作用,该模型是三维模型。通过流体与固体的分部耦合:主要两个模型分开运行,首先由 COBRAS 模型写入某时刻各节点的波浪力的 ASCII 文件;再由 UDEC 模型读入该文件,通过计算写入该时刻各节点的坐标的 ASCII 文件;然后由 COBRAS 模型读入该文件,更新下一时刻各节点的波浪力,直到达到设定的有关界限值。在计算中,不考虑袋内土体的渗流,仅考虑水流在生态袋间歇中流动。该数值模型计算结果与水槽试验模型结果基本一致。