

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。

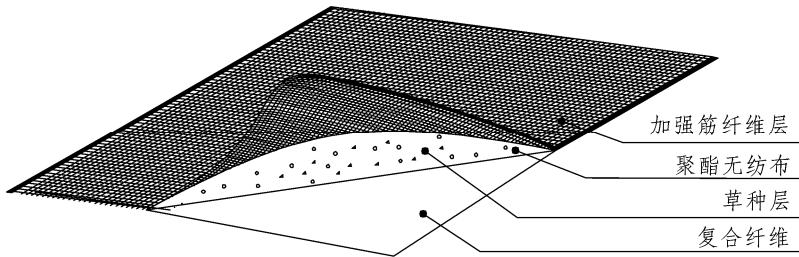


图 1.5 抗冲生态袋面层

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。

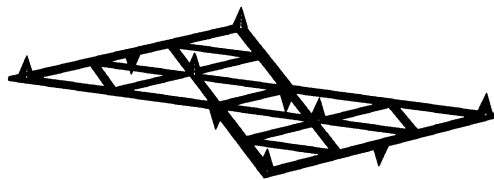


图 1.6 联结扣

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会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 O_{95} 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：

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

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 $N_s = \frac{H_s}{(\rho_b / \rho_w - 1)D} = \frac{n}{\sqrt{\xi_0}}$, $\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_0}}$	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。

1.4 本书的主要研究工作及实际意义

1.4.1 主要的研究工作

1.4.1.1 填充度对生态袋变形稳定性影响研究

尽管关于土工编织袋填充度的问题在有关文献中多次提及，在实际工程实践中，要快速地施工，控制填充度的有效方法却很少有人提及。本书主要通过控制生态袋重量的方法控制填充度。在生态袋的单轴压缩试验、抗拉拔试验、渗透性试验等多个试验中，都力求弄清楚生态袋填充度对生态袋各项岩土力学指标的影响，这些指标对于生态袋结构工程质量控制和检查验收都是必要。

1.4.1.2 压缩试验中生态袋变形破坏机理研究

关于土工编织压缩试验的有关学术论文及专著很多，提出了很多适用性较强的理论。尽管本书的规律及结论也仅针对生态袋的单轴压缩试验，但在试验过程中通过测量用的专用贴片测试了生态袋各个方面的应变，这样就能够确切地知道生态袋结构在受压后各向具体形态的变化。虽然仅对生态袋结构竖向压力-变形预测公式结合试验数据进行了简单的分析，实际上该方法同样可以用来预测受到侧压力时生态袋的受力-变形情况，且公式形式也比较简单。在实验过程中采用多次循环剪切实验方式，有意模拟水、浪循环作用对生态袋结构形状的影响。

1.4.1.3 生态袋结构面抗剪力研究

生态袋结构面层的抗剪性能对于结构的局部稳定非常重要。对生态袋结构

进行抗拉力测试，主要是分析设置联结扣、干湿条件对生态袋及其结构各项抗剪切指标以及墙面变形的影响；分析生态袋结构面层的连接性能的影响因素，评价生态袋结构使用的工程领域，为合理设计提供依据。一直以来，联结扣在工程中广泛运用却缺乏深入的研究；利用 GDEM 软件分析联结扣主板和扣齿受力情况，对联结扣的研究、开发有积极意义。

1.4.1.4 生态袋结构渗透性试验研究

生态袋结构与常规的土工编织袋结构在建造时有一定的差别。常规的编织袋用于军事、防洪、抗灾等领域，由于工程条件的需要，常多层堆叠；但生态袋结构通常的作用就是水土保持和植被恢复，通常作为面层单层堆叠。研究不同填充度以及不同类型的填充物对生态袋结构渗透性的影响，对于生态袋结构的设计和施工更有实际意义。本次试验过程中，对堆叠好的生态袋体，有意增加竖向挤压应力，渗透系数的测值基本上偏小，采用偏小的测值在实际设计中是偏于安全的。

1.4.1.5 挡土型生态袋结构设计方法的研究

生态袋挡土结构为柔性加筋挡土结构，生态袋作为挡土结构的面层，采用类似于加筋挡土结构的设计方法设计生态袋挡土结构；在设计时采用库仑土压力理论；没有考虑黏聚力的影响，这种做法使设计接近工程实际，使结果偏于保守。设计过程中利用到生态袋柔性结构几乎不传递力矩的性质，简化了生态