

第一章 绪 论

第一节 土工合成材料及其发展简史

一、土工合成材料

土工合成材料 (Geosynthetics) 是 20 世纪 50 年代末兴起的一种新型的岩土工程材料。它是以人工合成的聚合物 (如塑料、合成纤维、合成橡胶等) 为原料制成各种类型的产品 (如土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料等), 将其置于土体内部、表面或各层土体之间, 可发挥加强或保护土体的作用。

土工合成材料只是到了近 20 年才广泛应用于世界各地。然而从人们利用土工合成材料的方式, 即纤维与土体联合作用来看, 却有着悠久的历史。

远在新石器时代 (距今约 6000 年前) 我们的祖先就利用茅草作为土的加筋材料。约公元前 130 年, 黄河在今河南濮阳县的瓠子口决口 历时 20 余年未能堵闭。后来汉武帝“自临决河……令群臣自将军以下, 皆负薪填决河……下棋园之竹为榦”, 终于把决口堵闭。经过逐代改进 利用梢料、柳枝、秸料、竹苇、结合绳、木桩等“以土压之 杂以碎石”形成我国所特有的“埽工”。埽工在黄河大堤上应用广泛, 沉放于坡面及水底, 抗御冲刷, 护坡护底。我国战国时期 (公元前 475 ~ 前 221 年) 都江堰工程中使用的“竹笼”就是纤维材料与土石材料相结合的又一范例, 这种竹笼技术一直沿用了 2000 多年。

在国外, 荷兰与海洋进行了长期的斗争, 曾大量利用柳枝、梢

料加固堤坝，防止冲刷。20 世纪初叶，美国曾利用金属构件作为土的加筋材料，为岩土工程材料开辟了一个新的领域。

虽然天然植物或金属构件用作岩土工程材料有着悠久的历史，但金属容易锈蚀，抵御化学腐蚀的能力较弱；而天然植物作为岩土工程材料也有致命的缺点，就是易于腐烂，不能经久耐用，因而限制了使用的范围。由于土工合成材料具有强度较高、用途多样、施工方便和造价便宜等优点，因而受到工程界的普遍重视和欢迎，整个岩土工程也因此发生了一次重大的革命，其广阔的发展前景是毋庸置疑的。

二、土工合成材料应用简史

约在 20 世纪 30 年代末至 40 年代初，大量合成材料防渗薄膜开始应用于灌溉工程。1953 年美国垦务局在渠道上开始应用聚乙烯薄膜。1959 年意大利的 Contrada Sobeta 堆石坝使用聚异丁烯合成橡胶薄膜。1960 年捷克的 Dobsina 堆石坝使用聚氯乙烯薄膜。1984 年西班牙的 Pozade Los Romos 砌石坝在上游坝面铺放聚氯乙烯薄膜防渗。这些都是在土石坝中使用合成材料防渗薄膜的一些先例。

土工织物在岩土工程中的应用始于 20 世纪 50 年代。在 1957 年以前，以合成纤维织物作为砂袋已在荷兰、德国和日本等国家应用了。在 60 年代，合成纤维土工织物在美国、欧洲和日本逐渐推广。所用的土工织物主要是机织型织物（俗称有纺织物），大部分用于护岸防冲等工程中。由于机织型土工织物的强度具有很大的方向性，限制了它的应用。非织造型织物（俗称无纺布或无纺纤维织物）的特点是将纤维作多方向或任意性的排列，故其强度没有显著的方向性。厚的非织造型织物不仅可用作滤层，还可用作导水体，也可用于加筋土体。1968~1970 年这种土工织物相继用于德国的护岸工程、法国 Valcros 土坝的下游坝趾排水体周围和上游块石护

坡底层。此后，土工织物很快由欧洲传播到美洲、西非洲、澳洲和亚洲。

在土工织物的应用不断发展的同时，用于防渗的土工膜和一些特种土工材料（如土工格栅、土工网、土工席垫、土工模袋和土工格室等）以及复合型土工材料（由土工织物、土工膜和某些特种土工材料中的两种或两种以上的材料组合而成）相继应用，发展也很快。由于这些材料已经超出了“土工织物”的范畴，所以 1983 年 J. E. Fluet 建议使用“土工合成材料”（Geosynthetics）一词来概括各种各样合成材料的产品（Giroud, 1986）。

合成材料在我国的应用始于 20 世纪 60 年代中期，首先是塑料薄膜在渠道防渗方面的应用，较早的工程有河南人民胜利渠、陕西人民引渭渠、北京东北旺灌区等，继而推广应用到水库、水闸和蓄水池等工程。1965 年河北省子牙新河献县水利枢纽曾利用粘土夹塑料薄膜作为进洪闸上游护坦的防渗措施。1976 年在江苏省长江嘶马护岸工程中，首先使用了由聚丙烯扁丝织成的编织布，结合聚氯乙烯绳网和混凝土块压重组成软体排，防止河岸冲刷。类似的软体沉排相继应用于江苏省江都西闸和湖北省长江堤防工程。1983 年在深厚的超软土地基上，采用土工织物与砂垫层复合加固的方法成功地修筑了深圳赤湾港西防波堤。这种土工织物与砂垫层复合加固的方法又相继在青岛前湾港防波堤、宁波北仑港电厂灰坝、福建过桥山围堤工程中得到了应用。1984 ~ 1985 年间，云南的麦子河水库、内蒙古的翰嘎利水库、天津的鸭淀水库、河北的庙官水库等都用无纺型织物作为反滤层。

还有几种土工合成材料的研究与应用在我国发展也很快。一种是用软土地基加固的塑料排水板（带）系河海大学于 1979 年开发研制的。1981 ~ 1983 年在天津新港试用以后，现已广泛用于港口码头、高速公路、电厂厂房、飞机场、铁路等工程地基加固。一种是灌注混凝土的土工模袋，自 1983 年 5 月从国外引进后，开始

试用于江苏的泰州船闸引航道、通沙汽渡停泊区和南官河航道上，现已在十几个省市数十项工程中推广应用。我国东北地区在水利护坡工程中还自行研制了一种简易土工模袋，比较经济合理，并有许多成功的经验。

土工合成材料在国外的发展方兴未艾，在我国起步虽晚，但近十多年来发展极快，进口了上百套生产土工合成材料的设备，产品和品种有着大幅度的增长。截至 1998 年，我国已有上万个工程使用了各种土工合成材料。

第二节 土工合成材料的功能与应用

土工合成材料用于岩土工程的功能，可以概括为反滤、排水、防渗、加筋、隔离和防护等作用。

一、反滤作用

在水工建筑物中，为了防止流土、管涌破坏，常设置由砂石料所组成的反滤层。而土工合成材料完全可以取代这种常规的砂石料反滤层，起到防止渗流破坏的反滤作用。编织的、机织的及无纺的土工织物都可以起到这种反滤作用。例如，土石坝粘土心墙或粘土斜墙的反滤层，块石护坡下面的反滤层，土坝下游堆石棱体上游侧的反滤层以及水闸下游护坦、海漫或护坡下部的反滤层等，如图 1-1 所示。

二、排水作用

有些土工合成材料可以在土体中形成排水通道，把土体中的渗水汇集起来，并将渗水沿垂直于织物平面或平行于织物平面的方向排出土体外。较厚的针刺型无纺布和某些具有较多孔的复合土工织物均可起排水作用。此外，它还可以与其他材料（如粗

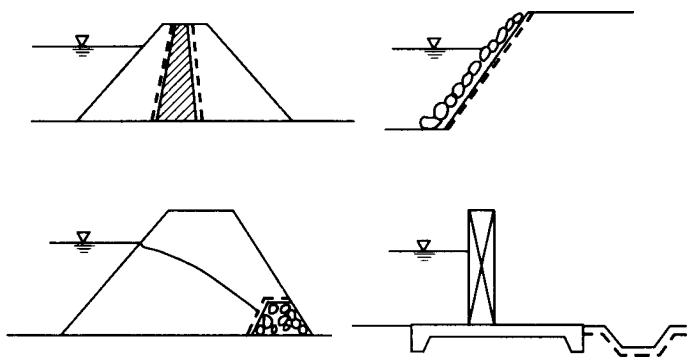


图 1-1 反滤作用示意图

粒料、排水管、塑料排水板等)一起构成排水系统或深层排水井。例如,土坝内部的垂直或水平排水、隧洞周边的排水、碎石暗沟周边的排水、堤坝软土地基处理中的垂直排水等,如图 1-2 所示。

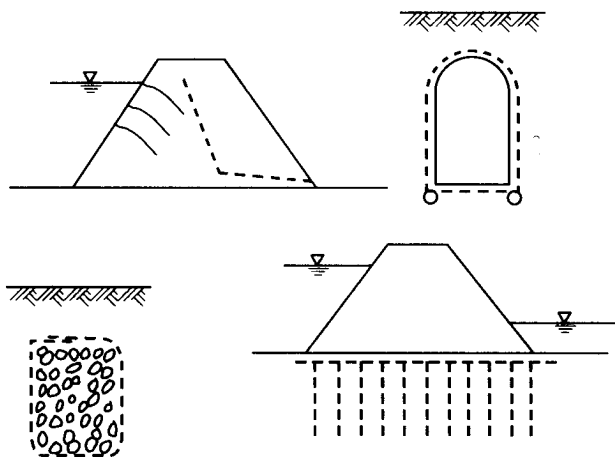


图 1-2 排水作用示意图

三、防渗作用

土工膜和复合型土工合成材料可以防止液体的渗漏、气体的挥发，保护环境或建筑物的安全。例如，土坝或水闸地基的垂直防渗墙、渠道防渗、水闸上游护坦及护坡防渗等 如图 1-3 所示。

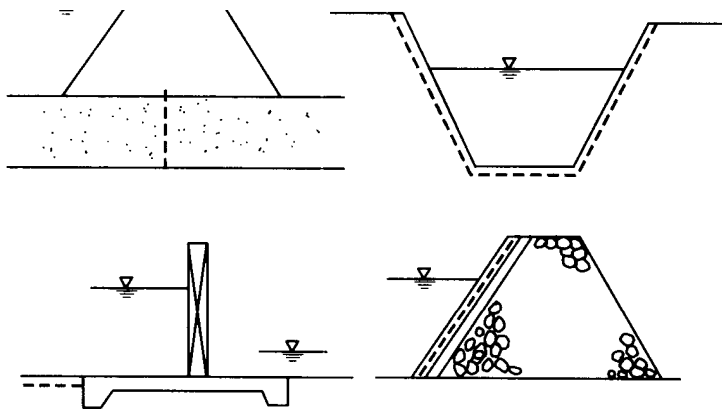


图 1-3 防渗作用示意图

四、加筋作用

由于土工合成材料具有较高的抗拉强度，又有较好的柔性，容许一定的变形而不破坏，当以适当的方式铺设在土中时，可以约束土的拉伸应变，减小土的变形，从而增加土的模量，改善土的受力状况，增加土的稳定性。例如，软土地基上堤坝的加筋垫层、加强堤坝边坡稳定性、加筋土挡墙、加固柔性路面等 如图 1-4 所示。

五、隔离作用

将土工合成材料设置在两种不同的土（材料）之间，或者设置

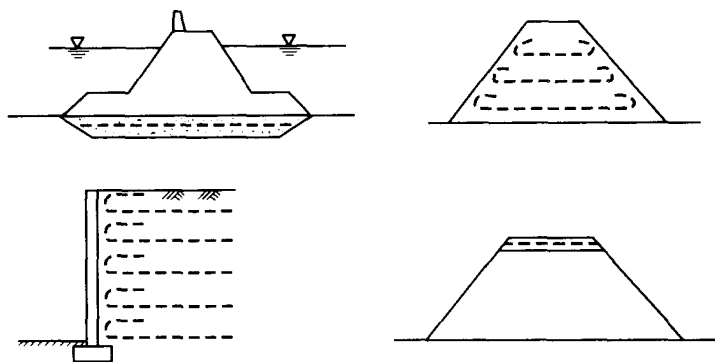


图 1-4 加筋作用示意图

在土与其他材料之间予以隔开，以免相互混杂失去各种材料和结构的完整性，或发生土粒流失现象。土工织物和土工膜都可以起隔离作用。例如，土石混合坝体中隔离不同的筑坝材料，公路基层碎石与路基或地基之间的隔离，铁路道渣与路基之间的隔离，石笼、砂袋、堆石或材料堆物与软土地基的隔离层等 如图 1-5 所示。

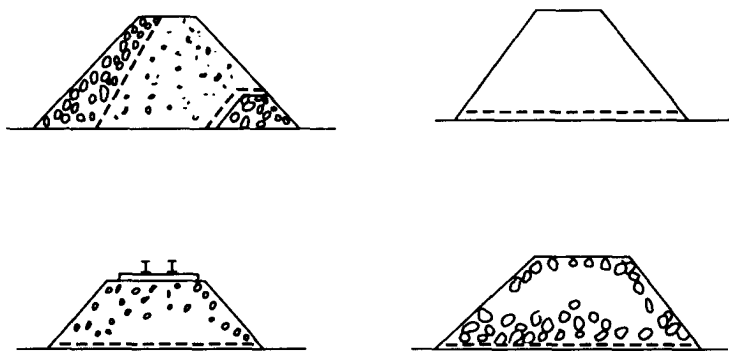


图 1-5 隔离作用示意图

六、防护作用

土工合成材料对土体或水面可以起防护作用。例如，防止河岸或海岸被冲刷，防止土体的冻害，防止路面裂缝，防止水面蒸发或空气中的灰尘污染水面，防止垃圾、废料或废液污染地下水或散发臭味等 如图 1-6 所示。

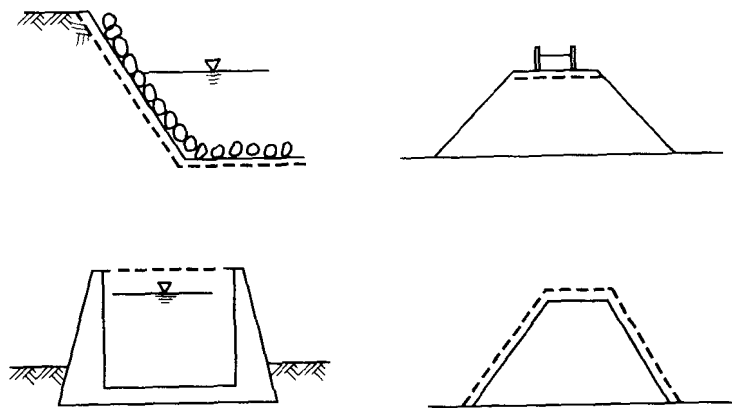


图 1-6 防护作用示意图

必须指出，在工程实际中运用土工合成材料往往是几种作用的综合 其中有的是主要的 有的是次要的。例如 在水中(江、河、湖、海)抛填土石方筑堤坝 将土工织物铺放在水下 主要起隔离作用 但也起反滤、加固作用 又如 在软土地基上的公路、铁路、土石坝、防波堤等工程中 用于加固软土地基 则加筋作用是主要的 隔离和反滤作用是次要的。

第三节 土工合成材料的分类

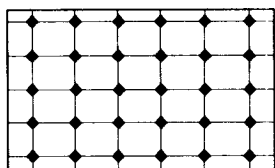
土工合成材料的分类随着新材料和新技术的发展还将有所变化从现状和分类趋向出发,暂将土工合成材料分为四大类,即土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料。特种土工合成材料包括土工垫(一种类似丝瓜瓢网络的网垫)、土工网(由合成材料条带、粗股条编织或合成树脂压制的具有较大孔眼、刚度较大的平面结构或三维结构的网状土工合成材料)、土工格栅(如图 1-7 所示)、土工格室(如图 1-8 所示)、土工模袋(如图 1-9 所示)和土工泡沫塑料等。复合型土工合成材料是由上述各种材料复合而成的,如复合土工膜和复合土工排水材料等。

各种类型的土工合成材料,如土工垫、土工网、土工格栅、土工格室、土工模袋以及各种规格的土工织物、土工膜等,在国内均能生产,并已在许多工程中应用,但我国目前在工程实际中使用最多的还是土工织物和土工膜。

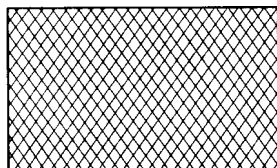
土工合成材料由合成纤维制成。合成纤维是以煤、石油、天然气和石灰石等为原料,经过化学加工而成为聚合物(高分子化合物)再经过机械加工制成纤维、条带、网格和薄膜等。纤维又分短丝、连续长丝(直径一般为 $0.02 \sim 0.04 \text{ mm}$)、条丝、单丝、多股丝、纺纤和各种纱线等。

合成纤维的品种主要有锦纶、涤纶、腈纶、丙纶和氯纶等。目前国内用于生产的土工纤维以丙纶(聚丙烯)、涤纶(聚酯)为主要原料。

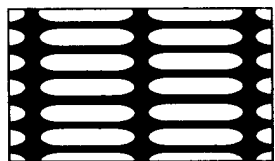
各种类型土工合成物的原材料、制作方法和主要用途,见表 1-1。



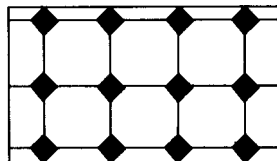
(a) “坦沙” SS₂₁



(b) “奈特龙” CE₁₂(网状)

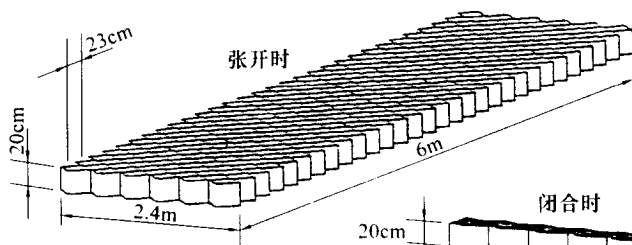


(c) “坦沙” SR₂₁

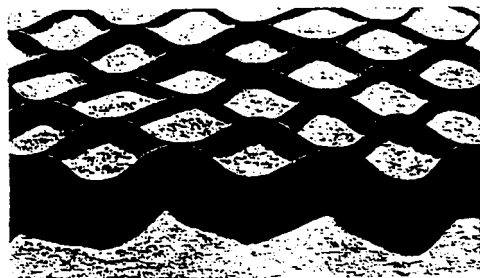


(d) “坦沙” GM

图 1-7 土工格栅



(a) 规格



(b) 铺设后

图 1-8 土工格室

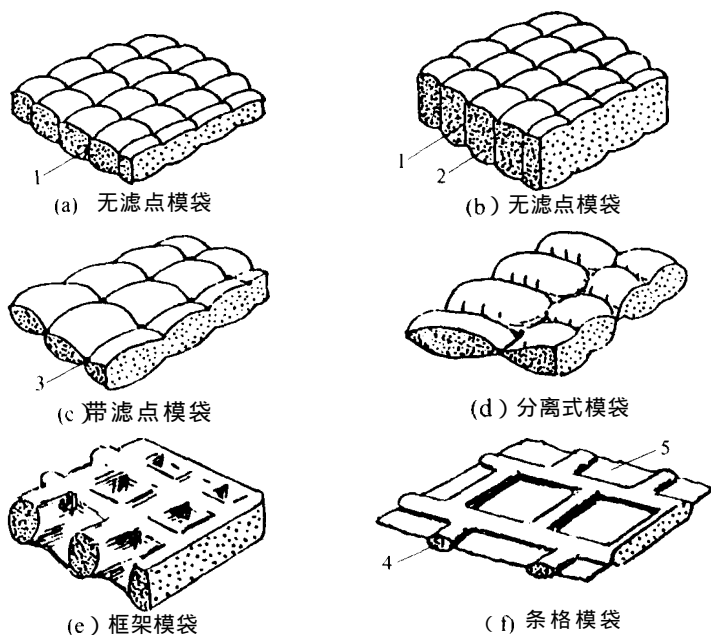


图 1-9 土工模袋

1—尼龙线；2—混凝土；3—滤点；4—砂浆；5—种草

表 1-1 土工合成材料的分类（根据 Giroud 和 Carroll 的资料改编）

序号	分类	原材料	制作方法	主要用途
1	编织物	单股丝、多股丝、纱	缠绕、扎结	排水、反滤、防护、加筋、隔离
2	机织物（有纺型织物）	单股丝、多股丝	经纬线交织而成，有平纹、斜纹和缎纹	排水、反滤、防护、加筋、隔离
3	无纺型织物	纤维	针刺法厚 1~5 mm；热粘法厚 0.5~1.0 mm；化学粘合法	排水、反滤、防护、加筋、隔离（主要用针刺法织物）
4	复合织物	以上 1~3 的原材料组合	缝制或针刺	排水、反滤、防护、加筋、隔离

续表 1-1

序号	分类	原材料	制作方法	主要用途
5	土工(薄)膜	聚合物加防水涂料	溶质喷涂	防渗、防水、封闭
6	土工膜 加筋土工膜	聚合物膜内加筋(锦纶丝布、锦纶帆布、丙纶针刺织物等)	可以一层、二层、三层加筋,成一布二胶、二布三胶、三布四胶的土工膜	防渗、防水、封闭
7	复合土工膜	针刺无纺布型织物、土工膜	加垫层或用胶粘剂粘合	防渗、防水、封闭
8	土工垫	粗硬纤维丝	交点处粘接,厚 1~2 mm,孔径 5~10 mm	排水、反滤、防浸蚀
9	土工网	塑料纤维、丝股为 1~5 mm	挤压机,网眼 5~100 mm	加筋、护坡、隔离
10	特种土工合成材料 栅	聚乙烯(PE)或聚丙烯(PP)	单向或双向拉伸扩孔,孔径 10~100 mm	加筋、做成板式结构物、筐笼
11	土工格室(土工固格网)	高密度 PE 宽带	强力焊接而成(在格室内可充填砂、石或其他填料)	沙漠或泥沼沼泽地区筑路、护坡、地基处理
12	土工模袋	双层聚合化纤织物	以聚合物绳将两层织物连接成袋状,用高压泵灌注混凝土或砂浆	护坡、护岸
13	土工泡沫塑料板	多孔泡沫塑料	挤压机挤压或模型挤成型	水平排水
14	塑料排水板(带)	塑料芯板和无纺型织物	缝合或粘接而成	垂直排水
15	复合型土工合成材料	土工织物与特种土工合成材料	缝合或粘接而成	加筋、排水、反滤等

第四节 土工合成材料用于防汛抢险的优点

土工合成材料的类型很多，可分为土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料等类型。在防汛抢险中，主要利用其排水反滤和防渗等作用。通常采用的有有纺型土工织物、无纺型土工织物，两者均系排水反滤材料。此外，还有不透水的土工膜或其他复合材料等。

1991 年全国性洪涝灾害时，仅江苏和安徽两省以土工织物缝制的土枕就有 6 000 万多条。1998 年在长江、嫩江和松花江流域发生特大洪水时，用于抗洪抢险的物料中，仅江苏支援武汉、长春等地的编织袋就有 30 万只 土工织物 161 万 m^2 防渗编织布 25 万 m^2 国家防办还调拨编织袋 80 万只 土工织物 24 万 m^2 还有各地区自备的大量土工织物及编织袋。1999 年浙江湖州市遭受了百年未遇的特大洪涝灾害，就用掉编织袋 2 754 万只 还有麻袋 41 万条、草袋 389 万条)。这说明土工合成材料在防汛抢险中的应用范围日益拓宽 土工合成材料已经成为防汛抢险中的“有力武器”。

土工合成材料用于防汛抢险的优点主要有：

(1) 整体性好。每块土工织物软体排的保护面积可达 100 ~ 150 m^2 且可根据险情拼接 不易发生局部冲刷。

(2) 抢险速度快。一块长 12 m、宽 10 m 的软体排 从放排到加好压载仅需 1 小时左右。

(3) 适应性强。土工织物软体排沉放后，能与不同地形的河岸、堤坡较好地贴合，并能随河床断面淘刷变化而自行调整，紧贴岸坡，发挥防冲护岸作用；同时它又可以作为背水坡出现的管涌、流土等险情的良好反滤层。

(4) 储运方便。由涤纶、聚丙烯、聚乙烯、聚氯乙烯等高分子材料加工而成的软体排、土枕等成品 既便于拼接 又可以折叠 体积

小，质量轻，运输与储存均很方便。例如：①一块长 12 m、宽 10 m 的软体排总重不足 30 kg 抢护长度 300 m 坍岸的全部材料 用一辆卡车就可以很快运送到抢险工地。②1 个草袋重约 1 kg 而一个编织袋仅 0.1 kg 若以 5 万个计 运草袋要用 10 辆 5 t 卡车 而运编织袋只需 1 辆 5 t 卡车。在抢险时 以 5 万个袋子装同样的土料，搬运时则要多搬运草袋自身的重量 45 t。而且编织袋不易腐烂，经久耐用，从而减少汛后堤段整复工程量。

(5) 可以废物利用。农村里有大量的农用化肥编织袋，只要未老化变质的均可在防汛抢险中予以利用。

(6) 造价低。铺一块长 12 m、宽 10 m 的软体排 保护面积 100 m^2 只需 500 元左右的投资，比传统的抢险方法便宜很多。

土工合成材料的主要缺点是容易老化，尤其是在阳光照射下老化速度更快。但在工程实际中，土工合成材料常被埋于土内或水下，即有覆盖保护下的土工合成材料，老化速度就缓慢得多，且随时间的增长，有明显减慢趋于稳定的趋势。

第二章 土工合成材料的工程特性与试验

为了选择和运用土工合成材料,必须了解其工程特性,以便合理地确定设计参数。同一类型的土工合成材料,由于加工工艺及制造过程不同,其工程特性有时差别甚大。因此,对厂家提供的数据应持慎重态度,使用单位应抽样试验来核实和确定。我国土工合成材料技术协作网于 1988 年组织编写了《土工织物测试方法参考标准》,1991 年南京水利科学研究院等 10 个单位合作编写出版了《土工合成材料测试手册》,1999 年中华人民共和国水利部颁布《土工合成材料测试规程》。具体测试方法、要求及步骤 请参阅上述资料。

第一节 物理特性

土工合成材料的物理特性主要是单位面积质量、厚度、等效孔径 EOS 及其与压力的关系等。

一、单位面积质量

土工合成材料单位面积的质量取决于原材料的密度,同时受厚度、外加剂和含水量的影响。它反映合成材料多方面的性能,如抗拉强度、顶破强度等力学性能以及孔隙率、渗透性等水力学性能。单位面积质量的单位通常以 g/m^2 表示。

测定单位面积质量大多采用称量法。试样面积为 100 cm^2 数量不得少于 10 块 天平称量读数应精确到 0.01 g 现场测试为 0.1 g , 测试前要求在标准大气压下恒温 ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) 恒湿 ($65\% \pm 2\%$) 放置 24 小时。常用的土工织物单位面积质量一般在 100

1 000 g/m²的范围内。

二、厚度

厚度主要通过直接量测求得。考虑到工程实际中，土工合成材料常在一定压力下工作，所以不同国家还规定了在一定标准压力下量测其厚度。我国参考标准和测试手册，规定此压力为 2 kPa。根据工程需要还应测试在 20 kPa、200 kPa 压力下的厚度。厚度变化对土工织物的孔隙率、透水性和过滤性等水力学特性有很大的影响。

一般要求加压面积为 25 cm²，试样面积应大于加压面积 2 倍，加压时间 30 s 试样不少于 10 块。

常用的各种土工合成材料厚度：土工织物一般为 0.1 ~ 5 mm，最厚的可达 10 mm 以上；土工膜一般为 0.25 ~ 0.75 mm 最厚的可达 2 ~ 4 mm；土工格栅的厚度随部位的不同而异，其肋厚一般为 0.5 ~ 10 mm。

三、等效孔径 EOS

土工合成材料具有各种形状和大小不同的孔径，其孔径大小的分布曲线类似于土的颗粒级配曲线。织物的孔径反映织物的透水性能与保持土颗粒的能力，是一个重要的特征指标。现已提出表示织物特征孔径的方法有有效孔径及等效孔径 EOS。目前普遍采用 EOS 其含义相当于织物的表观最大孔径，也即土颗粒能通过织物的最大粒径。不同的标准，对 EOS 的规定也不同，目前我国多取 O_{95} 作为织物的等效孔径， O_{95} 表示织物中 95% 的孔径低于该值。

土工织物孔径的测定方法有直接法和间接法两大类。

(1)直接法。对于孔隙较均匀的编织型土工织物，采用显微镜把孔隙放大在屏幕上直接量测，进而计算孔径的面积，并换算成等

效面积的直径作为孔径。

(2)间接法包括干筛法、湿筛法等。

干筛法：将土工织物固定在 2 mm 细筛网的底盘上作筛布，然后将已率定好粒径的颗粒材料放在筛布上振筛，测出留在土工织物上砂粒或玻璃珠的重量及占总重的百分数。所用玻璃珠的粒径不得小于 0.07 mm 标准砂的粒径不小于 0.06 mm。

湿筛法：湿筛法与干筛法基本相似，只是在筛动过程中，把水喷洒在织物试样和颗粒材料上，最后量测通过试样的颗粒材料的重量。

间接法除干筛法、湿筛法外，还有水动力法、水银压入法和吸引法等。有关织物孔径测试的操作步骤，可参阅《土工合成材料测试手册》。

土工合成材料的等效孔径：土工织物一般为 0.05 ~ 1.0 mm ;土工垫为 5 ~ 100 mm 土工网及土工格栅为 5 ~ 10 mm。

第二节 力学特性

土工合成材料的力学特性主要包括抗拉强度、撕裂强度、握持强度、顶破强度、刺破强度、合成材料与土相互作用时界面摩擦特性等。

一、抗拉强度

土工合成材料是柔性材料，大多通过其抗拉强度来承受荷载，以发挥工程作用。因此，抗拉强度及其应变是土工合成材料的主要特性指标。

由于土工合成材料在受力过程中厚度是变化的，不易精确测定 故其受力大小一般以单位宽度所承受的力来表示 单位为 kN/m 或 N/m，并非以习惯上所用的单位面积上的应力 kN/m^2 来表示。