

中国农业大学

硕士学位论文

土工织物的功能分析及其在永定河防洪工程中的应用技术研究

姓名：李延

申请学位级别：硕士

专业：农业水土工程

指导教师：任树梅

2002. 5. 1

附件：

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我同一工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：李延

时间：2002年5月25日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅；学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

研究生签名：李延

时间：2002年5月25日

导师签名：任树梅

时间：2002年5月25日

摘要

土工织物作为一种新型合成材料已经在水利水电工程、建筑和道桥等工程的建设中被广泛应用，然而，目前对土工织物功能特点、应用技术与使用要点无论在理论或实践上都缺乏系统的分析归纳和总结。本文在实验研究的基础上，对水利工程中土工织物反滤作用的机理和功能进行了分析，提出了针对不同应用目的的土工织物应用特点和技术。并根据北京市永定河防洪工程试验段采用土工织物合成材料进行护砌试验的实际情况，对这一新材料、新技术加以开发利用。研究表明：对 $d_{85} < 0.074\text{mm}$ 的土料，不宜采用土工织物作滤层；对级配极不均匀的土壤（不均匀系数 $C_u < 2$ 或 $C_u > 6$ ），在渗流作用下，很容易发生管涌，对土工织物的选用要慎重；一般大江大河的护坡工程至少应采用 $300\text{g}/\text{m}^2$ 以上的短纤无纺土工布，其抗拉强度为 $600\text{N}/5\text{cm}$ 左右。在交通荷载下，土工织物的孔隙率如为 90% ，则需聚丙烯织物的最小厚度为 8mm ，聚酯的最小厚度为 5mm 。

本文对土工合成材料在永定河防洪护岸工程使用的前期进行了试验和分析并得出结论，从而为后期推广提供了可靠依据。

关键词：土工织物；反滤机理；功能分析；永定河；防洪工程

Abstract

Through the tests and experiences on the Yongding river, the paper infers following conclusions:

The National Standards and Design Code issued by the Ministry of Water Resources are widely used under the condition of static load and mono-direction flow. However, followings should be paid more attention:

First, while clay grains is more than 50%, O_{95} or $O_e < 0.21$ mm; while $d_{85} < 0.074$ mm, geotechnical fabric is not appropriate for filter.

Second, while infiltration, the piping is normally happened in non-clay or less-clay soil when $C_u < 2$ or $C_u > 6$, esp. uniformed fine sand. If appropriate geotechnical fabric is difficult to be used, a layer of sand may be laid between the fabric and protected soil in order to solve the uneven soil and to improve the filtration effects. Sometimes, sand is laid on the geotechnical fabric from the moving of stone blocks and puncturing of the fabric. The above measurements must be adopted on the real situations.

Third according to the practice, over 300 g/m^2 of the staple nonwoven geotechnical fabric is used in the bank project of the large rivers, its tensile strength is 600 N/5cm .

Forth the filtration under the traffic load, normally, the traffic load is repeated load and fast movement. In this case, thick filtration is applied, such as sand and/or thick fabric, of which weight is over 700 g/m^2 . If porosity of the geotechnical fabric is 90%, the thickness of PP must over 8 mm, of polyester must 5 mm..

The paper has analysed the function of geotechnical fabric.

Key words: geotechnical fabric, filter, analysis of function, Yongding river, flood control

第一章 绪论

1.1 研究的目的和意义

我国地域辽阔、河流众多，虽然建国 50 年来的大规模防洪建设取得了巨大的成就，但目前我国大江大河防洪排涝标准仍不高，洪涝灾害仍是我们国家范围较广、损失较大的自然灾害之一。

我国目前江河防洪主要仍依靠约 16 万公里的堤防，由于堤防工程是历史上经长期修筑形成，解放后虽经国家和群众花了大量人力、财力、物力用来加高加固，但防洪标准仍然较低，而且堤基、堤身还存在许多薄弱环节，当遭遇较大洪水时，江河水位抬高，险情也随着加剧，防汛的投入就要成倍的增加，每年全国各地都要耗费大量防汛经费和防汛物资进行堤防加固，对国家和群众都是一个沉重的负担。

永定河洪水危害严重，历史上是北京地区有名的害河。据历史资料统计，从金代至 1949 年的 834 年间，永定河共决口 81 次，洪水漫溢 59 次，改道 9 次。中下游地区洪水严重，北京首当其冲。北京城址的变迁和永定河迁徙的方向相反。就是为了躲避洪水的威胁。辽金时期北京城在今广安门一带，常受永定河洪水侵扰。元代修建大都城时，就将城址北移，以今北海为中心进行城区布置。从防洪角度看，元代大都城址处于永定河冲积扇脊背上的最优位置，此后几百年，北京城区避开了永定河洪水之冲，可见大都城设计者的匠心独运。不过，历史上永定河洪水仍曾多次淹至北京城区和近郊。每当洪水逼城时，自当封闭城门，但由于洪水壅门，城内沥水难以排泄，形成渍涝浸泡。永定河洪水也曾冲进过北京城，据史料记载，明代天启元年（1626 年）洪水“穿城，经五闸至通州，民多溺死”。清代康熙七年（1668 年）、浑河（即永定河）水决，直入正阳、崇文、宣武、齐化诸门，午门侵崩一角”。1949 年以来，上游修建了官厅水库，中游加固了堤防，下游开辟了永定新河，北京城防洪条件大为改善。

永定河洪水的特点是暴涨暴落，破坏力强，河道上陡，中缓，下平；中下游河道摆动，尾间泄水不畅。几千年来，永定河中下游大体上是由东向南，再向西摆动。商代以前，永定河出山后经八宝山、昆明湖入清河，经北运河一线出海。此后逐渐南移，唐代以后，永定河最西摆至今小清河和白沟河一线。至清代康熙年间，自卢沟桥以下两岸筑堤，永定河才基本稳定在今天的河线上。

为达到保护岸坡的目的，从前人们经常采用粘、梢料、打桩厢埽、抛（石）砖、砌筑混凝土块体、浆（干）砌块石、打钢（木）板桩等天然材料以及一些金属材料进行岸坡防护。但它们都有一些固有的缺陷，例如性能单一，质量大，寿命不长，价格昂贵，工程周期长，施工难度大，劳动强度大，不利运输等，故不能全面满足工程的特定需要。同时天然材料毕竟数量有限，而且不少天然植物材料如过分利用还会影响自然界的生态平衡，破坏人们赖以生存的环境空间，例如大规模地砍伐森林树木，破坏地表植被，会造成水土流失和荒漠化。有些金属材料虽然性能良好，但容易锈蚀，且成本较高，从而限制了其应用范围。

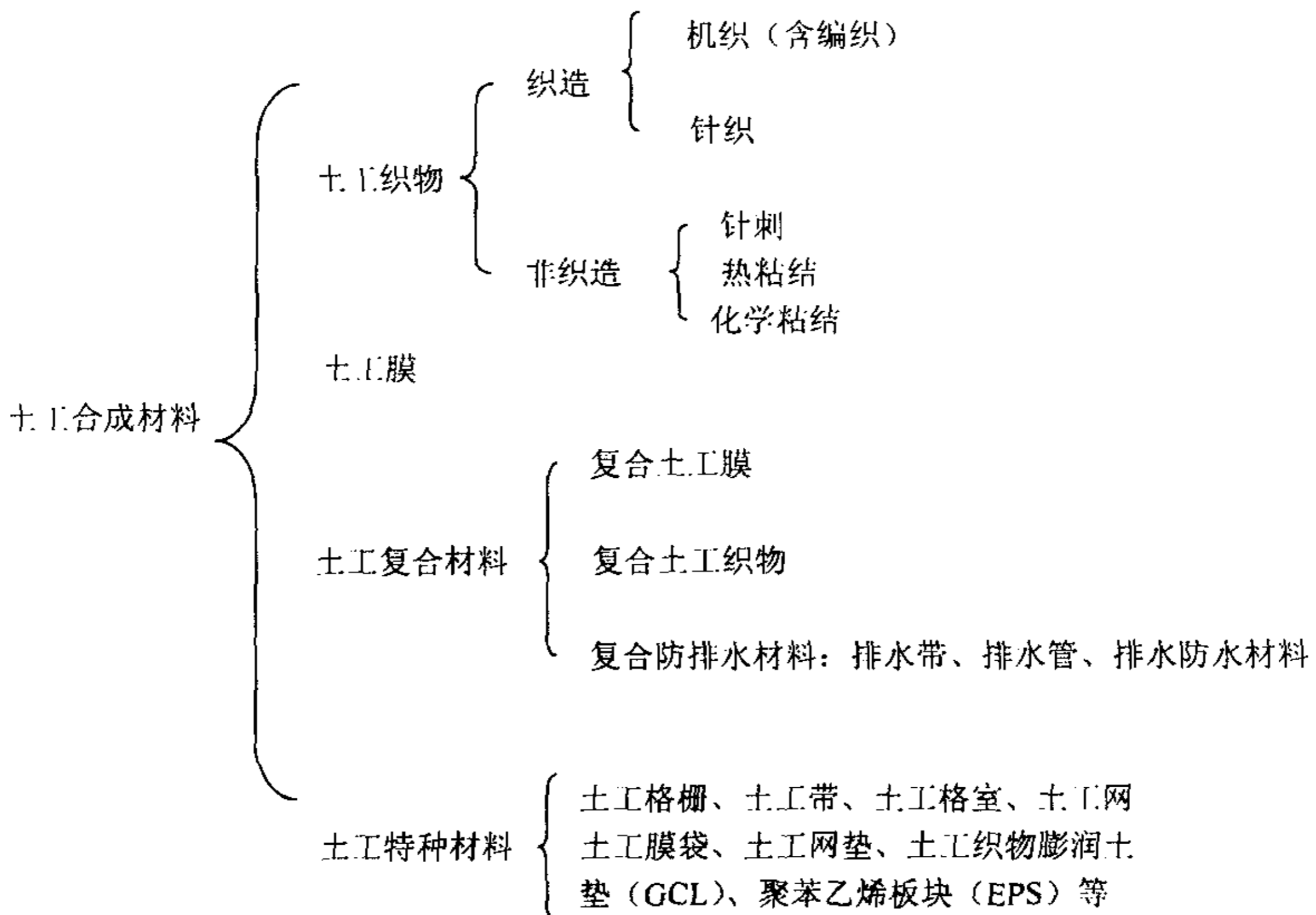
随着近代化学工业的迅速发展，品种繁多的人工合成材料陆续问世，它们具有多种能满足工程需要的性能，可制成各种符合实用目的的产品，用来做混凝土连锁板护、模袋护坡、混凝土块体粘贴护坡、混凝土格板合成材料护坡、土工格栅护坡等，而且由于其质量轻、施工简易、运输方便、价格低廉、料源丰富等优点，为岩土工程提供了一种崭新的较为理想的材料。鉴于这种人工合成材料的强大生命力，因此近二三十年来在全世界范围内得到迅速的发展和广泛的使用。据不完全统计，它们已在数十万项工程中得到成功的应用，

取得了良好的经济、社会和环境效益，在一些抗御自然灾害的斗争中，更显出其快捷、有效、简便的特点。所以这一项新材料和新技术被人们誉为 20 世纪岩土工程的一项技术革命。

土工合成材料 (geosynthetics) 是应用于岩土工程的、以合成材料为原材料制成的各种产品的统称。因为它们主要用于岩土工程，故冠以“土工”(geo-) 两字，称为“土工合成材料”，以区别于天然材料。土工合成材料可分为土工织物、土工膜、复合型土工合成材料和特种土工合成材料等类型，具有排水和反滤、防渗、加筋与加固、防护、隔离与封闭，以及包裹等多种功能，它具有重量轻、施工简易、运输方便、价格低廉、料源丰富等优点。

土工合成材料的原材料是高分子聚合物 (polymer)。它们是由煤、石油、天然气或石灰石中提炼出来的化学物质制成，再进一步加工成纤维或合成材料片材，最后制成各种产品。制造土工合成材料的聚合物主要有聚乙烯 (PE)、聚酯 (PER)、聚酰胺 (PA)、聚丙烯 (PP) 和聚氯乙烯 (PVC) 等。

土工织物是一种透水性材料，按制造方法不同，可进一步划分为以下各种类型：



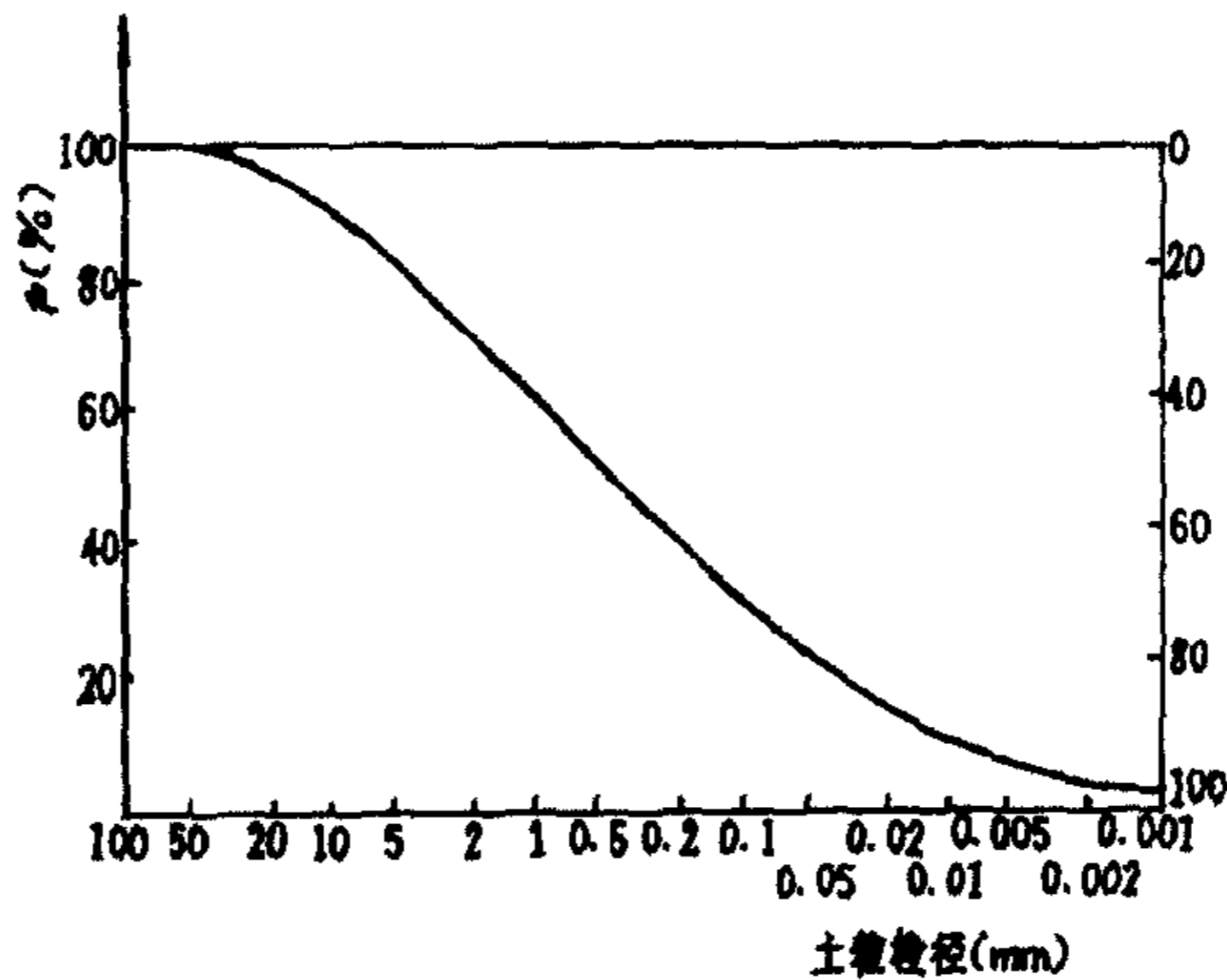
根据北京市永定河的实际情况，工程采用了大量的土工合成材料进行护砌，并对这一新材料、新技术加以开发利用。本文对土工合成材料在永定河防洪护岸工程使用的前期进行了试验和分析并得出结论，从而为后期推广提供了可靠依据。土工合成材料应根据实际情况适当采用，不能盲目使用。

1.2 国内外开发、研究和应用的现状

1.2.1 国外土工合成材料应用与发展

从50年代后期至60年代末，织造型和非织造型土工织物在岩土工程中，特别是在水利工程、道路建筑工程中应用最为广泛。像英国、法国、荷兰、德国等欧洲国家以及美国、日本等相继开发生产、应用土工织物。1958年 R. J. Barrett 在美国佛罗里达州利用聚氯乙烯织物作为海岸块石护坡的垫层，可以认为这是土工织物应用于工程的开始。50年代末至60年代初，荷兰的三角洲工程开始正规的、大规模的使用土工合成材料，并被认为是岩土工程的一个里程碑。1998年3月在美国亚特兰大市召开了“第六届国际土工合成材料学术会和展览会”，1999年4月在德国法兰克福召开了“国际产业用布与非织造布展览会”，2000年5月在日本大阪召开了“国际非织造布展览会”。这些展览会都是世界上规模较大的、有代表性的会议，基本上反映了当前国际水平，展示了当前的发展前景。总体来讲，国外以美国，尤以北美发展较快，欧洲则以德国、法国、意大利等西欧国家发展较快，亚洲主要是日本、马来西亚、韩国发展较快。国外产品类型、品种较多，规格齐全，而且国外的理论研究、测试技术、设计准则、施工方法等都比较完善，因而工程应用较为广泛普及。

如法国的瓦尔克罗斯 (Valcros) 坝：是一座高 18 m 的均质土坝，坝体土料为砂壤



1—1 Valcros 坝土料级配曲线

土，其颗粒级配曲线如图 1—1 所示。该坝建于 1970 年，是世界上第一座应用针刺土工织物滤层的土坝实例。织物分别铺设在坝的上游块石护坡下以及下游坝址排水体周边作反滤层，其用量为 1650 m² 和 1450m²。上游坝坡为 1:3，织物铺设在顶部高为 6m 的区域内。该坝所用土工织物的有效孔径 $O_{90}=0.11\text{mm}$ (O_{90} —土工织物的等效孔径，单位 mm)，织物的渗透系数 $k_s=1\times 10^{-2}\text{cm/s}$ (k_s —土工织物的渗透系数，单位为 cm/s)。该坝土料的特征粒径，

由颗粒级配曲线上查得： $d_{85}=7.0\text{mm}$ （ d_{85} —被保护土的特征粒径，单位为mm）， $d_{50}=0.47\text{mm}$ ， $d_{15}=0.02\text{mm}$ ， $C_u=49$ （ C_u —土的不均匀系数， $C_u=d_{85}/d_{15}$ ）。30余年来，该土工织物反滤层运行良好，起到了反滤层应有的作用。

1.2.2 国内土工合成材料应用与发展

土工合成材料在我国的发展，与一些先进国家相比，大致落后了十几年。早在50年代初期，在我国灌溉渠道和铁路路基上，利用沥青作为防渗材料。塑料薄膜的应用，约在60年代中期。到70年代末，有纺织物（编织布）开始应用于河道及闸涵工程；80年代初，无纺布开始在铁路工程上试用；直到80年代中期，土工合成材料才在我国的水利、铁路、公路、军工、海港、建筑、矿冶、电力等各个领域逐渐推广。土工合成材料的应用在我国起步虽然较晚，但最近几年发展很快。根据资料报到，在1988年上半年的时候，使用土工合成材料的工程已经有5000多项（不包括水井滤层，低压管道及一些小型或临时性的工程）。在这些工程中，以使用无纺布的最多，约占50%以上，其次是土工膜和有纺织物，约各占20%，其余的约占10%，主要是塑料排水板和化纤模袋，另外还有少量其它类型的材料。北京市永定河应用土工合成材料始于1990年，并且得到了迅速发展。目前已使用无纺布140万 m^2 ，模袋2.2万 m^2 ，聚乙烯片材40万 m^2 ，实践证明，效果良好。下面将简单介绍各种材料在我国的应用概况。

一、无纺布

无纺布（也称非制造布）在我国土木工程中的应用，比土工膜和有纺织物更晚一些，但发展的速度很快。我们所用的无纺布绝大部分是针刺型的。在我国，无纺布首先应用于铁路部门。长期以来，铁路基床的“翻浆冒泥”现象，严重地影响运输的安全和运输能力的提高。当路线通过软弱路基时，路基中的细粒土或泥浆常常侵入道碴，或道碴中的石料陷入基床，发生了所谓的“翻浆冒泥”现象。从70年代末至80年代初，我国的铁路部门就开始研究并试验用无纺布作为道碴与路基之间的反滤隔离层。从1981年到1985年，共布置了几十个试验路段，铺设土工织物26万 m^2 ，其中大部分为无纺布。通过观测，防治翻浆冒泥的成功率达90%以上。

无纺布应用于公路路基上，其作用与在铁路上基本相同。把无纺布放在基层与软弱土基之间，对加速土基固结，提高土基强度解决路基沉陷及翻浆冒泥等问题，取得显著的效果。最近几年，在我国各省市的公路上，使用土工织物的数量逐渐增多，并且使用范围从普通的公路发展到少数高速公路。尤其在军用公路及沿海沼泽地带，更显示出它的优越性。土工织物在公路上的另一个重要用途，是防止沥青路面的反射裂缝即把土工织物放在新、旧路面之间或放在新路面与较弱路基之间，可以防止下部的裂缝反射到路面上来。最近几年，已经有六、七个省市，曾用土工织物或其它合成材料防止反射裂缝的发展均取得了显著的效果。

在我国的水利工程中，利用无纺布作为滤层已经十分广泛。像土石坝的排水系统，护坡垫层、减压井；闸涵及挡土墙；各种堤岸的护坡垫层；地下排水管道或盲沟；水井，海港填筑，软弱地基加固等工程，均要设置反滤层。如云南的麦子河水库加固工程。麦子河水库位于云南省陆良县城西南8km的麦子河上。主坝为一拱形均质土坝，长660m，最大坝高21.15m，库容1350万 m^3 。由于主坝坐落在透水性较强的第三纪砂土及砂壤土基础上，因此从建成后的第三年开始，库区内多次发现溶洞漏水，坝后多次发现涌砂漏水和坝坡塌陷，以及沼泽化现象。虽经三次处理，未能根除病害。1984年，采用 $O_{90}=0.10\text{mm}$ 的涤、丙

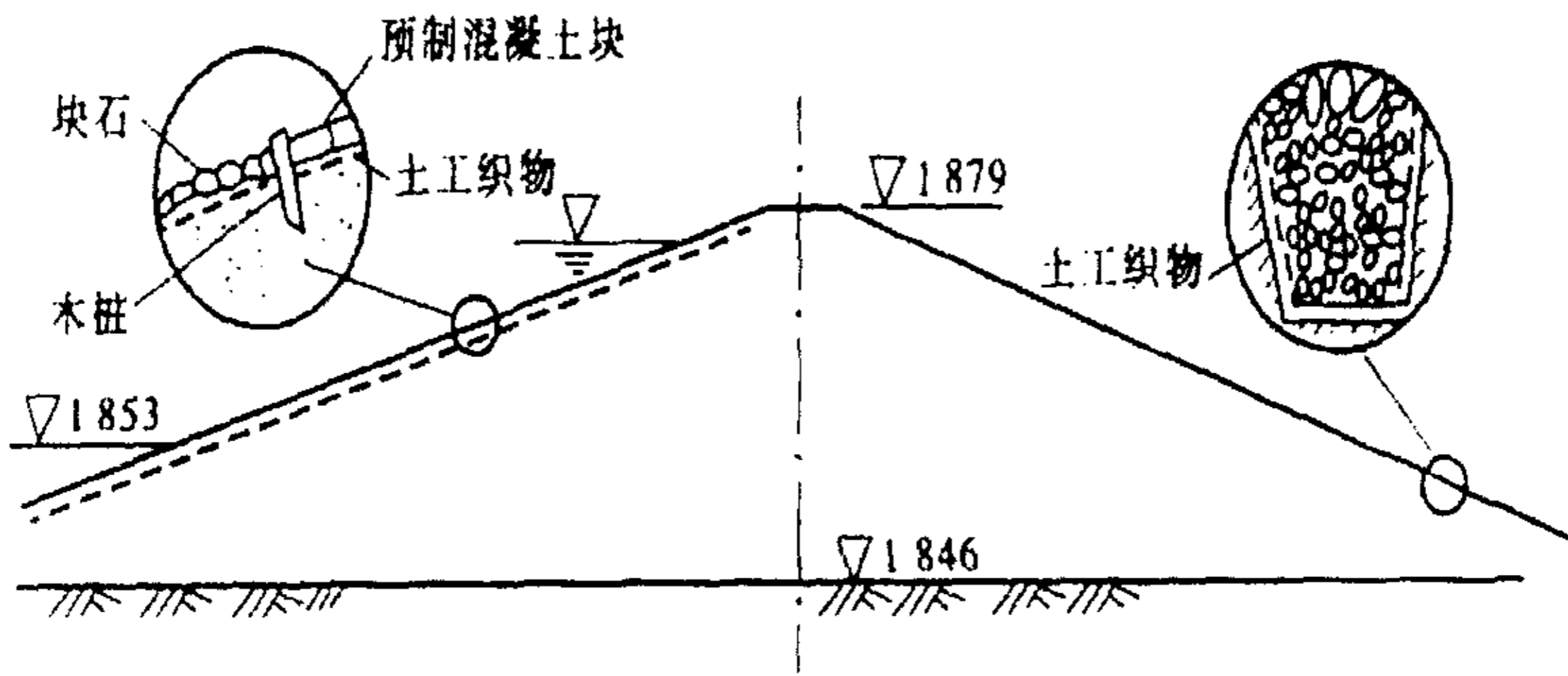
纶针刺土工织物作上游坝面护坡反滤层，其上覆盖预制混凝土块或干砌块石。在坝的下游做反滤排水沟，反滤层用的是同一型号的土工织物，如图 1—2 所示。经过对土工织物与被保护土（包括坝土和地基土）进行系统的反滤试验，结果表明，在试验 7~8 天后，渗透系数和渗透流量均保持不变，这说明既不发生淤堵，也不产生管涌，完全满足反滤要求。土工织物在该工程上应用，经 7 年运行，效果良好。

其它如江苏的昆山暗管排水工程，内蒙古的翰嘎利水库、天津的鸭淀水库、黑龙江的引嫩工程、河北的庙宫水库等一些工程都经历了 5 年左右的考验，大多数没有发生问题。

无纺织物在我国的港口建设中，应用也日益广泛。例如用作码头后方抛石棱体上的滤层；海岸护坡的垫层；地基处理中排水盲沟的滤层。海堤或围埝工程中坝体与地基的反滤隔离层等等。

在长江护岸工程中，重庆钢铁公司使用无纺织物代替砂砾料作为护坡垫层。利用一部分废弃的钢渣和块石作为护坡，一改传统的老方法，节约投资 2000 多万元，当年施工完毕就经受了较大洪水的考验，岸坡稳定，成为省市典型的优秀工程项目。

除上面列举的几类工程以外，无纺织物目前我国还应用于飞机场、运动场、扬水站、核电站、房屋建筑、城市排水、堆货场等工程。有些工程还利用无纺织物作为土加筋材料。在这些领域，使用的数量还不太多，尚处于发展阶段。



二、有纺织物

有纺织物也称机织物。我们所用的有纺织物，大多数是习惯上所谓的编织袋布，或称编织布 (slit flim)，目前编织布在我国的应用以制造土袋为最多。在水利工程中，编织布土袋的用途很广。如防汛抢险、土坡或地基加固、谷坊工程、导流坝或丁坝、软体排的盖重以及各种防冲工程。布袋的尺寸一般宽 0.5~0.6m，长 0.9~1.0m，袋内装土，重 40~60kg，一两个人可以搬运。也可以装砂、砂卵石或碎石。有的编织袋内面衬一层塑料薄膜，以防止袋内的土被水冲淘。

我国每年汛期，需要准备大量草袋。每逢洪水河道中发生险情，临时向草袋中装土，

进行抢护。草袋的缺点很多：如需要占用很大的仓库存放，容易霉烂，即使当年没有使用，过两三年就要废弃了。因此水利部门每年用于储存和更新草袋的经费很大。编织布袋的价格，接近或略高于草袋，但其重量轻，体积小，容易运输和存放，如果不暴露在阳光之下，可以存放多年，有时还能重复使用。目前已有很多防汛单位，以编织布袋代替草袋节省了大量资金。

编织布袋还应用于修建谷坊和低坝等工程上。吉林省中西部丘陵地区缺少石料。为了治理冲沟，从1984年开始，先后利用编织布土袋修筑谷坊54座。经过1985年暴雨洪水的冲击，只冲毁了3座，取得了较好的水土保持的效果。河北省张家口地区曾在某些中型灌区的渠道上，用编织布装土修建导流引水低坝，以代替每年临时修筑的导流工程，经过中小洪水的考验，工程安然无恙。

编织布袋还可以应用于地基加固工程。1984年和1988年，在杭州和南京先后利用编织布袋加筋垫层结合天然地基或排水砂井处理软基，曾建造了一座 1000m^3 的贮气柜和3座 20000m^3 贮原油罐。编织布袋加筋垫层采用编织布袋内装碎石交错而成。垫层的作用是调整和控制不均匀沉陷。通过砂井及天然地基的排水固结，对提高地基的强度，起到显著的效果。编织布袋在其它工程的用途很广，实例也很多，此处不再一一列举。

在我国长江、黄河、永定河等人的河道的整治工程中，还利用编织布制成土枕，以代替柳石枕，用以加固岸坡、保护河底防止冲刷。

由编织布制成的软体排，对于保护堤岸、河床和一些水工建筑物的基础，效果更为显著。早在1974年，在江苏省长江嘶马护岸工程中，就开始使用由聚丙烯编织布，聚氯乙烯绳网和混凝土块组成的软体排，铺于丁坝上下两侧和窝棚地段的坝窝内，作为防止冲刷的措施，效果良好。1998年长江洪水中就采用了 $130\text{g}/\text{m}^2$ 以上的单层或双层编织布制成的软体排，单层排周边系混凝土预制板或块石压重，双层排在底部缝制直径约40cm木枕作为压重横枕，横枕为长土袋，直径0.4—1.0m，长3—10m，内填细砂或土料。长江田家口、后洲、天星阁等将其抛投在横枕上或河床上，从而有效地阻止堤岸冲刷崩退。

编织布还可以用作各种低坝的坝体。在河北省张家口地区，把单层或多层的编织布，固定在钢筋混凝土立柱上，作为导流坝及丁坝的坝体。坝高由几十cm至1.5m。在河北省兰泉河的一个节制闸上，把一层编织布和一层土工膜，固定在木桩上，后面加以斜撑，建成一座高3.5m的施工围墙，墙前水深达2.98m。这种型式的围墙，不但节约投资，而且拆除也很方便。

此外，编织布还可用于堤坝的软基处理及坝体加筋。深圳市于1986年修建的赤湾西防波堤，是一座抛石建筑物，高7~8.5m，地基为软弱的淤泥质粘土，曾选用了几种加固措施。其中，清除4m深的淤泥层，回填1.5m厚的砂垫层。上面铺一层编织布，再抛石筑堤。与其它措施对比，建筑物的沉降量和位移量最小，处理地基的效果最佳。

三、土工膜和其它新型防渗材料

这里所说的土工膜和新型防渗材料，是指用于土建工程中的塑料薄膜、合成橡胶、沥青材料等新型材料，用以代替粘土、灰土、砌石、砌砖或混凝土等传统的防渗材料。在渠道上利用沥青材料防渗，我国已有近40年的历史。早在50年代初期，就开始试用于甘肃省，以后相继推广到新疆、山东、河南、山西、陕西等省。沥青可以在现场喷洒，可以涂刷在玻璃丝布、石棉毡、苇席、麻布或土工织物上面，也可以制成油毡。进入80年代后，逐渐推广到中小型土石坝工程。青海省东湾寺水库最大蓄水深度21.5m，1981年曾利用玻璃丝布油毡防止库区渗漏。北京市半城子水库，坝高38m，是一座沥青混凝土斜墙坝，曾利用沥青玻璃丝布油毡处理斜墙的裂缝。

塑料防渗薄膜的应用, 约在 60 年代中期, 也是在渠道上开始的, 以后逐渐推广到中小型水库、水闸、蓄水池、人工湖等工程。使用塑料薄膜较早的工程有河南引黄人民胜利渠、山东大渔张灌区、陕西人民引渭渠、北京东北旺灌区和山西的几个灌区。原料大部分是聚氯乙烯和聚乙烯, 厚度由 0.12~0.38mm, 薄膜上面用草泥、素土、块石或混凝土板保护。塑料薄膜不仅投资远远低于浆砌石、混凝土、灰土等防渗材料, 而且防渗效果可靠, 没有裂缝等弊病。到 70 年代中期, 有关单位对上述工程进行了检查, 绝大部分薄膜完整无缺, 防渗效果良好。从 1983 年开始, 北京市为了处理十几处中小型工程的渗漏问题, 曾采用了各种不同的防渗措施。如永定河卢沟晓月湖工程, 因河底为砂、砾卵石透水材料, 为减少渗漏, 在河底铺设 38 万 m² 的聚乙烯 (PE) 和复合土工膜 (一布一膜), 2000 年在卢沟桥以下就形成了约 40 万 m² 的水面, 蓄水 80 万 m³ 左右。经过大量的试验研究和现场对比得出结论: 编织布与塑料薄膜配合使用, 对于中小型工程的渗漏问题, 是所选几种措施中比较好的。北京市曾在中小型水库、蓄水池、园林湖、渠道、游泳池等十几项工程中, 采用了这种组合型的防渗措施, 效果良好, 造价也很便宜。编织布复膜的使用最近已推广到北部高寒的黑龙江和南部的云南省。山西、辽宁、河北和其它几个省市, 还把土工膜推广应用到水闸、人工湖、蓄水池、垃圾处理等工程。吉林省还把土工膜应用到胡家沟水库的溢洪道上, 山西忻州地区用在过水坝上, 效果都不错。

四、土工织物防汛抢险的新材料

土工织物在防汛抢险中发挥了巨大作用。现将永定河上的几种主要抢险物料介绍如下:

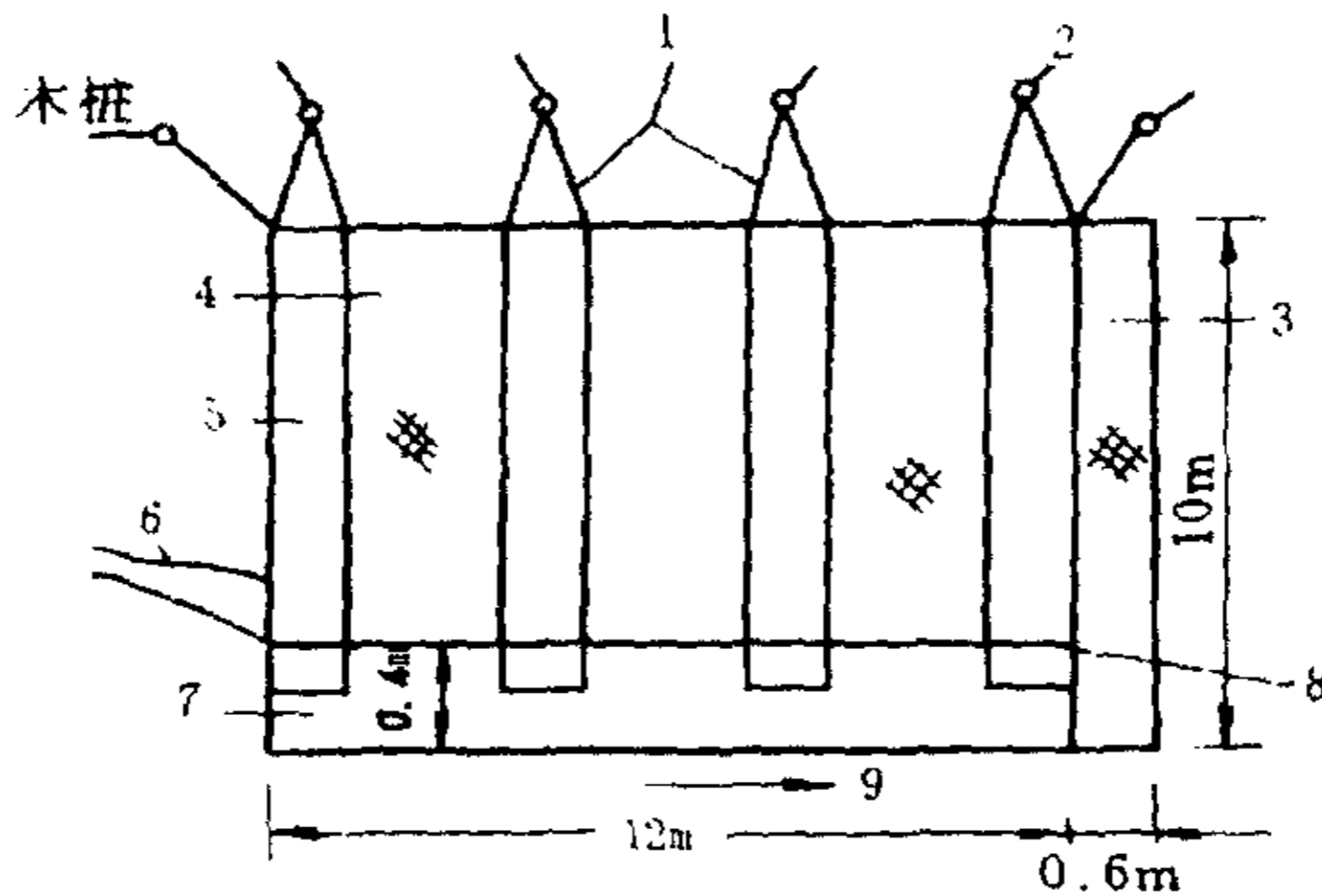


图 1—3 抢险用软体排结构

- 1—— ϕ 5mm 纵向拉筋绳; 2—— ϕ 10mm 缆绳
- 3——编织布条; 4——抢险排体;
- 5—— ϕ 40cm 纵向土枕; 6—— ϕ 5mm 定位引绳;
- 7——横枕; 8—— ϕ 2mm 间距 20mm; 9——水流方向

(一) 堤防临水坡坍塌、滑坡、渗漏的防护

当堤防临水坡发生坍塌、渗漏或滑坡等险情时, 可用土工布做成排体进行抢护。选择土工布的原则有三条, 一是密度要求, 二是强度要求, 三是透水性要求。密度要求就是不使枕内土冲走, 不让排体下边的土漏掉, 不透水的土工布更好。对于排体尺寸, 往往根据

堤坡长度, 险情的种类及大小而定。结合永定河的具体情况, 每块排体一般长 8—10m, 宽 12—15m, 横枕直径 0.4m, 竖袋直径 0.6m (见图 1—3)。

(二)、背水坡渗漏防护

当堤防发生渗漏, 迎水坡有障碍物无法抢险时, 或者在迎水坡找不到进水口的情况时, 可以利用土工织物排体在背水坡进行抢护。背水坡堵漏排体必须选择透水的聚丙烯编织布, 塑料绳和编织袋应具有一定的抗滑性。排体的尺寸一般为长 5m, 宽 5m。为固定排体, 防止排体下滑, 还要在排体的上端缝上直径为 1cm 的纲绳, 在纲绳上栓上直径为 0.4cm 的挂排绳 (具体尺寸见图 1—4)

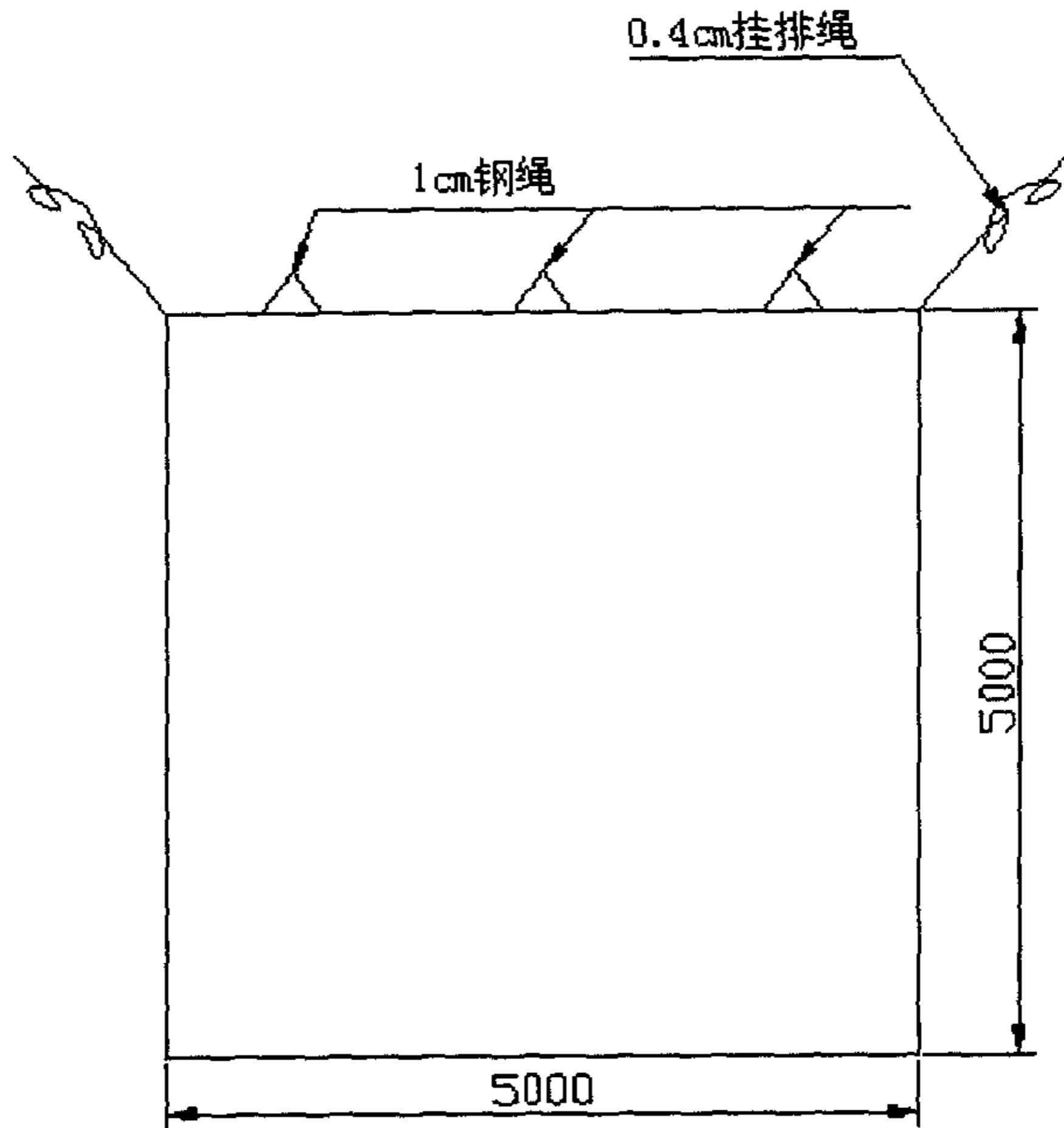


图 1—4 背水坡渗漏防护软体排示意图

(三) 编织布土袋

在各种防汛抢险中, 从前普遍采用麻袋、草袋、柳石枕等物资。随着社会生产结构的调整, 有些物料越来越少, 且不宜久存等原因。近几年逐渐用编织袋代替了从前的草袋、麻袋等物资。

利用土工织物进行防汛抢险比其它物料具有许多优越性:

1.整体性强。每块排体的保护面积约为 100—150m²，并且防护严密，不宜发生局部冲刷。

2.抢险速度快。一块 120 m²的排体从放排到压好载不足一小时，有时速度更快；而用其它方法抢护往往用数小时。

3.适应性强。排体可与不同情况的河岸较好的结合，并能随堤基（坡）的淘刷变化而自行贴紧堤岸，起到很好的保护作用。

4.储运方便，便于工厂化生产。例如抢险 300m 长的堤防坍岸，土工织物材料一辆卡车一次就可运到现场，避免动用大量的人力和物力。

5.抢险方法比较简便，易于掌握，省时省力。

6.造价低。例如防护 100 m²的堤防投资仅 500 元左右，比传统的抢险方法便宜的多。同时有些材料还可以重复利用，这样节省投资更多。

从长江下游的应用实践中，也可以看出土工织物抢险的优越性（见表 1—1）：

表 1—1 几种防洪材料的优缺点比较表

项目	抛块石	沉柴排	织物软体排
优点	1. 不受地形限制； 2. 耐久性强	1. 整体性强； 2. 一次覆盖面积大	1. 整体性强； 2. 运输量小； 3. 施工方便； 4. 需劳动力少
缺点	1. 整体性差易坍落； 2. 运输量大； 3. 需劳动力多	1. 耐久性强； 2. 沉排技术性强； 3. 边缘冲刷易散； 4. 运输量大	1. 沉放技术性强 2. 阳光暴晒易老化
经济指标	24 元/m ²	16.3 元/ m ²	5.24 元/ m ²
运输量	1.7t / m ³	1.2t / m ³	0.12t / m ³

用土工织物进行防汛抢险虽然具有很多优点，然而使用不当也会导致不良后果。所以，用土工织物抢险应注意以下问题：

1. 详细了解险情及地基、堤身等各种情况，因地制宜采取有效抢险方法。
2. 必须严格选料。应根据不同险情、不同位置 and 不同情况而采用不同的土工织物。
3. 排体应在汛前预制好，并根据将要出现的不同险情和情况而预制成不同规格的排体，以便及时进行抢护。

总之，自 1998 年长江、嫩江和松花江发生了历史上罕见的洪水，土工合成材料在防洪抢险中发挥了很大作用，引起了中央领导的重视，责成有关单位大力推广。一些职能部门纷纷组织力量，编写生产和应用的技术规范和规程，在全国掀起了应用土工合成材料的新高潮，使土工合成材料的生产、应用、研究等各个方面都发生了巨大的变化。工程应用范围不断扩大，测试技术、施工水平、理论研究、技术创新等方面的发展更为显著。但是，土工织物具体应用方面、设计方面还存在一些问题。本文结合具体工程实践，对土工织物用在堤防的各种土质进行了试验和研究，总结出一套比较完整的资料，供以后工程实践参考。

第二章 土工织物的反滤作用机理及过滤准则

要正确使用土工织物做反滤层，必须首先了解它的作用机理和过滤准则。我经过近几年的资料收集、整理和学习和在永定河上的实践验证，认为以下成果科学有效，值得借鉴和参考。

2.1 土工织物反滤作用机理

2.1.1 作用机理分析

反滤（filtration）又称过滤或倒滤。在工程上，是指在土中呈渗流状态的流体，当流入过滤材料时，流体可以通过，而把起骨架作用的固体颗粒截留下来的现象称为过滤。对任何过滤材料工程上都有两方面的要求，一方面要求能挡土；另一方面要求保持水流的畅通。

土工织物反滤作用机理有两方面的含义：一是土工织物的过滤作用等同于传统的天然粗粒材料（砂，石料）的过滤作用，在挡土方面是利用土工织物具有足够小的孔径来阻挡被保护土中骨架土料的通过（Schober, 1979）（Giroud, 1982）。另一种含义是土工织物本身并不起过滤中的挡土作用，而是在靠近土工织物处，诱发被保护土层形成一层天然滤层，该天然滤层起到过滤的作用，所以土工织物被认为只起到一个催化剂的作用（Hoare, 1982a, Lawson, 1982 等）。

在一般情况下，这两种过滤机理是同时存在的，仅仅在不同的场合和条件下只发挥某一种机理的作用，或以某一种机理为主的作用。以下将较详细地分析土工织物在不同土质条件下天然滤层的形成情况。

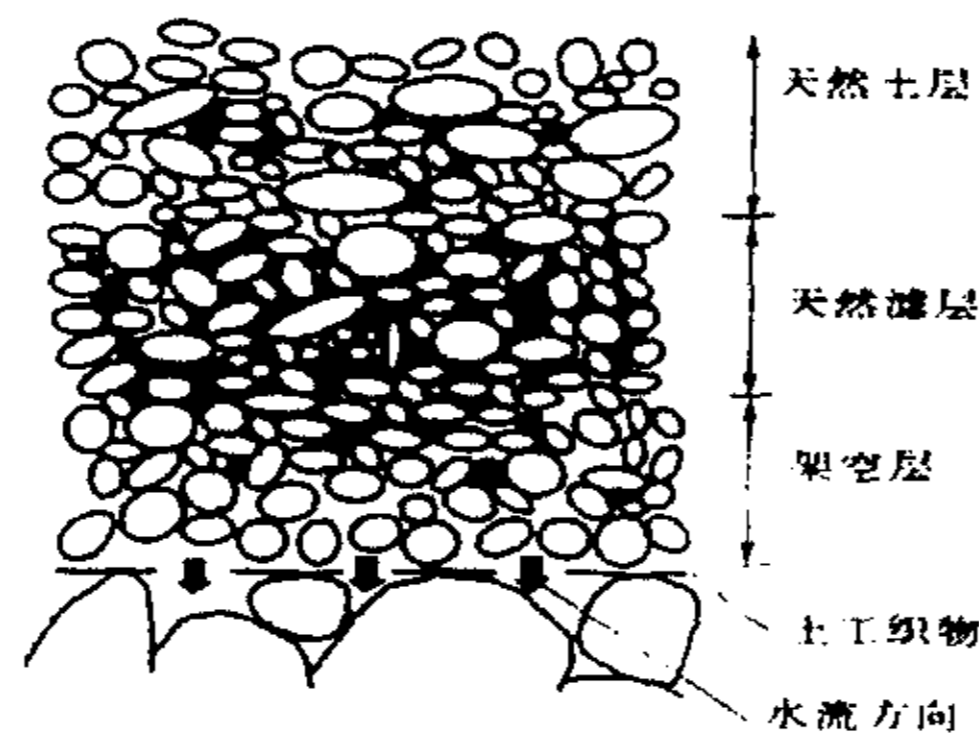


图 2—1 天然滤层示意图

一、无粘性土

1. 单向渗流

当渗流经过土层进入土工织物时，在渗透力的作用下，有可能把紧靠着土工织物而粒径又较小的土粒挟带入土工织物，这种情况逐步地向远离土工织物的方向发展，逐渐形成一定厚度的由较粗土粒形成的架空层 (bridging zone)，这一层的颗粒较粗，渗透系数较大，但它不能阻挡细土粒的移动。在土工织物的过滤作用充分发挥时，在架空层的上游一侧会形成一层天然滤层 (filter zone)，又称为滤饼，有时把架空层也作为天然滤层的一部分，见图 2-1。天然滤层的特点是该层的细粒土的含量比架空层多一些，透水性相对地低一些，从而阻挡了相邻的天然土层的细土粒的移动，因此起到了挡土的作用。表 2-1 中给出一个土工织物的过滤试验中，当土工织物起到了应有的过滤作用，并且在渗流稳定后，实测土工织物上方被保护砂层中细粒土的含量情况 (陆士强, 1986)。

粒组 (mm)	天然砂	织物上方 10mm	织物上方 70mm
<0.006	9.72	3.69	10.35

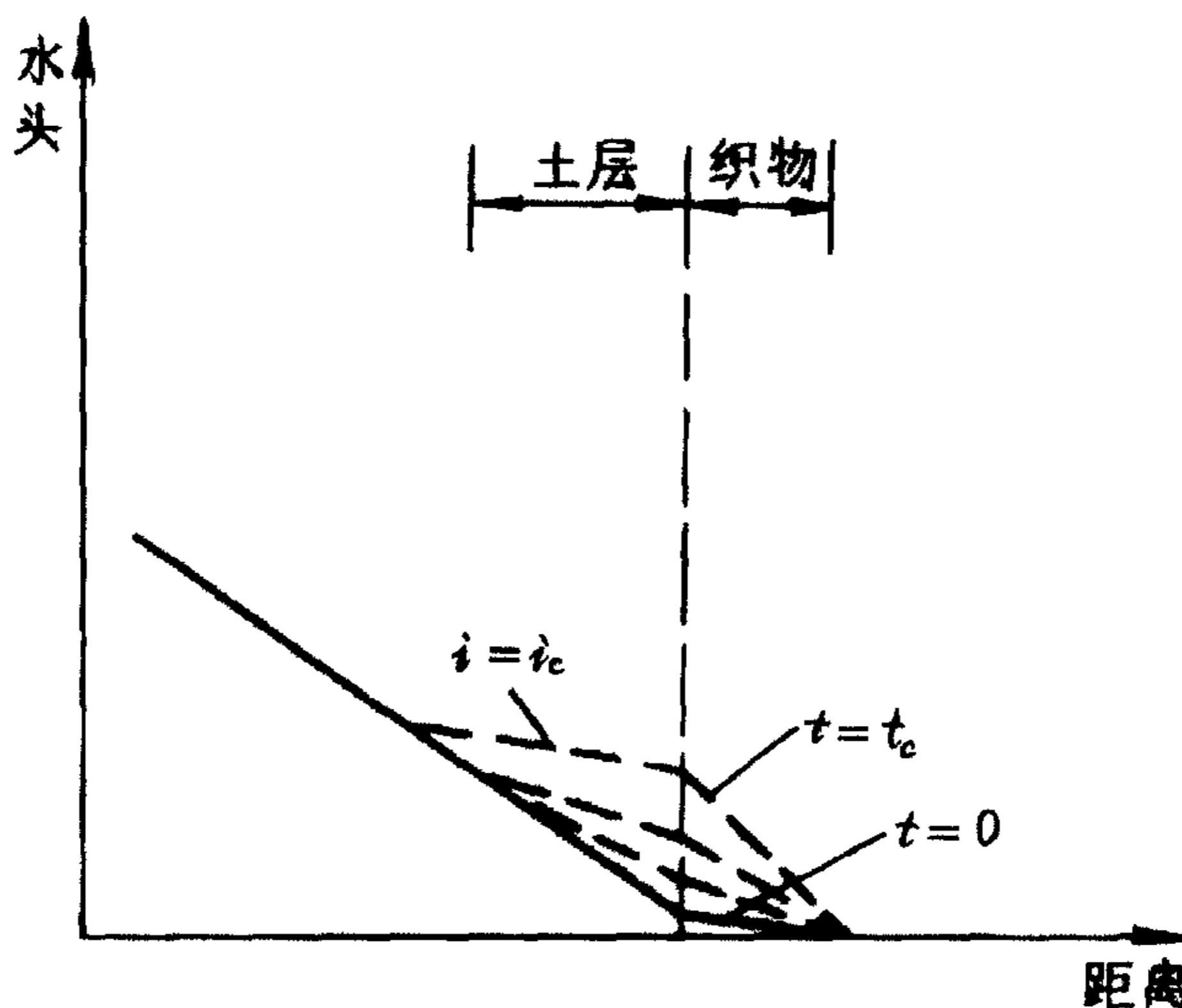


图 2-2 土工织物及相邻的土层水头随时间变化关系图
 i-----水力梯度 i_c -----某一时刻的水力梯度 t-----时间

从上述过程可以看出,虽然土工织物仅仅起到一个引发天然滤层的作用。但是天然滤层并不是总能够形成的,形成如图 2-1 中所表示的天然滤层要受到以下三个因素的影响,即土层的级配与结构,水流特性和荷载性质。

(1) 土层的级配与结构特性

根据资料表明,某些级配的非粘性土在渗流作用下具有潜蚀(suffusion)的现象,即在渗流作用下,其级配不是稳定的,其中某些细粒部分有被水流挟带移动的现象。因而非粘性土又可以分为在渗流作用下能够形成天然滤层和不能形成天然滤层两类,通过试验(Kenney, 1985)并藉助理论分析(Busch, 1974)认为,①对能形成天然滤层的非粘性土,土工织物的主要作用是保住架空层的颗粒不流失,作到这一点,就能起到有效的挡土作用。②对不能形成天然滤层的非粘性土,由于土粒之间的相互约束,土工织物的设计要点是保证控制其较大的土粒不产生移动,亦可稳住整个土层。

(2) 水流对天然滤层形成的影响

水流的情况对形成天然滤层是十分重要的,因为潜蚀是在渗流的作用下产生的。天然滤层的形成和水力梯度或水头的变化是密切相关的,图 2-2 中给出了土工织物及相邻的土层中水头随时间变化的关系。水头的变化亦即是水力梯度的变化,因而也是渗透力的变化。开始时假设土工织物处在理想状态,即土工织物没有被堵塞。这时土工织物的渗透系数比邻近土层的渗透系数大很多($k_g \gg k_s$),因而在土工织物中的水力梯度很小,而在土中水力梯度要大很多。设想土层中在这个水力梯度的作用下其渗透力足以把土中细粒部分推动,部分土粒将进入土工织物,并有一部分细粒被阻挡在土工织物内部。这样,由于孔径有些被堵塞,土工织物的渗透系数会有所下降,相应的水力梯度有所增加。由于总的水头损失是不变的,通过土工织物水头损失的增加,使相邻部位的土层的水头损失有所下降。这又和相邻部位土层中细粒土的流失以及渗透系数的增加相联系。随着 $t \rightarrow t_c$ 的继续发展,土工织物被淤堵的程度不断增加,水头损失继续加大。当 $t=t_c$ 时,土层的水力梯度下降到 i_c 值($i=i_c$),这时渗透力将不足以带动细土粒移动。在 i_c 范围内大部分土层中细粒土会有所减少,这一区域可以看作为天然滤层的一部分。在图 2-2 中 i_c 段的左端,原在移动的细粒土进入 i_c 段后由于动力不足将沉积下来,该处的细粒土含量会有所增加,可以自由移动的细土粒就会减少。在该处形成一层细粒土含量增加的较不透水的滤饼,它也是天然滤层一部分,直接以它的结构特点阻碍天然土层中细粒土的移动。如果土层中水力梯度 $i > i_c$ 的范围较大,则这种内部分层淤积的现象将反复出现,直到土层的水力梯度 $i=i_c$ 或 $i < i_c$ 时才会消失。

2. 双向水流及动荷载情况

以上是以水流为单一方向流动,即从土层流入土工织物而言的。如果水流方向不是固定的,而是反复地从两个相反方向流动,例如护岸下土工织物滤层的情况,水可以从坡面渗入,也可以从土层中流出,这时天然滤层则不容易形成。

当荷载是静荷载时,形成了的被保护土层中的天然滤层的稳定性是有保障的,但如果荷载是动荷载,则对非粘性土来说很难保持其结构的稳定性,因而也不容易稳定地起到应有的挡土作用。双向水流及动荷载情况对土工织物的要求更严,要求其阻止较细颗粒通过才能起到挡土作用。

二、粘性土

1. 单向水流

对粘性土来说难以形成如非粘性土中的天然滤层。如果粘性土中土粒之间充分地分散则细土粒很难被土工织物所阻挡。对不是分散性和塑性较大的粘性土,它的结构单元

是土团（团粒）而不是单粒，一般的机械扰动不足以破坏这些单元体。因而土工织物阻挡的是团粒而不是单个的土粒，所以对粘性土也可以起到过滤作用。当然，粘性土中土团之间有着粘聚力的联结，抗渗透变形的能力比无粘性土大得多，这也是使得土工织物能起到过滤作用的重要因素。

对塑性低的粉粒含量较多的粘性土，由于粘聚力小，在水流作用下粉粒较易被带动，在过滤过程中也不容易形成天然滤层，这时土工织物就可以依靠本身足够小的孔径来阻挡土料的移动，同样可以起到很好的过滤作用。

2. 双向水流或动荷载下的水流

对于粘性土，在双向水流或动荷载情况下同样不容易形成天然滤层，也要靠土工织物足够小的孔径来阻挡土料的移动。

2.2 土工织物反滤准则

根据土工织物滤层的反滤作用机理，国外和国内均制定了一些反滤准则。可以为设计者合理选择土工织物提供参考。反滤准则包括三个方面，即保土性准则、渗透性准则和淤堵准则。

2.2.1 国外准则

2.2.1.1 保土性准则

一、美国准则（Calhoun 准则）：

美国陆军工程师团水道试验站（WES）的 Calhoun（1972），曾将工程界所熟知的太沙基粒料滤层的挡土准则，引伸到土工织物上，建立第一个土工织物的挡土准则，又称陆军工程师团准则。该准则为：

$$\text{粗粒土: } O_{95} \leq d_{85} \quad (2-1)$$

$$\text{粘粒土: } O_{95} \leq 210 \mu\text{m} \quad (2-2)$$

土工织物的 O_{95} 称为等效孔径，是由干筛法求得的，每次砂样为 150g，振动 20min，这种试验方法与我国《99 测试规程》和《土工合成材料测试手册》中规定的干筛法很近似，所测定的 O_{95} 可以互相通用。这种准则非常简单，物理概念明确，在我国工程界中得到广泛的使用。由于太沙基准则是基于滤层材料与被保护的无粘性土都是均质的 ($C_u < 2$) 没有考虑被保护土层可能形成天然滤层。因此 Calhoun 准则是偏于安全和保守的。开始时这个准则只适用于有纺织物，现已推广应用于无纺织物。

O_{95} —是干筛法用 50g 玻璃珠振动 10 分钟而求得筛余量 95% 时的织物孔径；

d_{85} —为被保护土小于该粒径的土粒重量占总重量的 85% 时的粒径；

0.074mm—为美国 200 号标准筛的孔径；

C_u —为不均匀系数。

二、荷兰准则（Giroud 准则）

被保护土层并不总是均质的，通常用不均匀系数 $C_u (d_{60}/d_{10})$ 来反映颗粒级配情况，土的颗粒级配也会影响到土工织物的挡土效能。Giroud（1977，1982）提出了考虑被保护

土层的 C_u 值及土层紧密程度的准则。具体规定见表 2-2。表中的 C_u' ，为取土的级配曲线中段线性段为基准，向外延伸为一直线级配曲线（参考图 2-3），该线性级配曲线的不均匀系数为 $C_u' = d_{60}' / d_{10}'$ 。

土工织物类型	土类	挡土准则
针刺无纺	松砂 ($1 < C_u' < 3$)	$O_{95} < C_u' \times d_{10}$
	松砂 ($C_u' > 3$)	$O_{95} < (9 / C_u') \times d_{10}$
	中密砂 ($1 < C_u' < 3$)	$O_{95} < 1.5 C_u' \times d_{10}$
	中密砂 ($C_u' > 3$)	$O_{95} < (13.5 / C_u') \times d_{10}$
有纺和热粘无纺	密砂 ($1 < C_u' < 3$)	$O_{95} < 2 \times C_u' \times d_{10}$
	密砂 ($C_u' > 3$)	$O_{95} < (18 / C_u') \times d_{10}$
有纺和热粘无纺	砂土 ($1 < C_u' < 3$)	$O_{95} < C_u' \times d_{10}$
	砂土 ($C_u' > 3$)	$O_{95} < (9 / C_u') \times d_{10}$

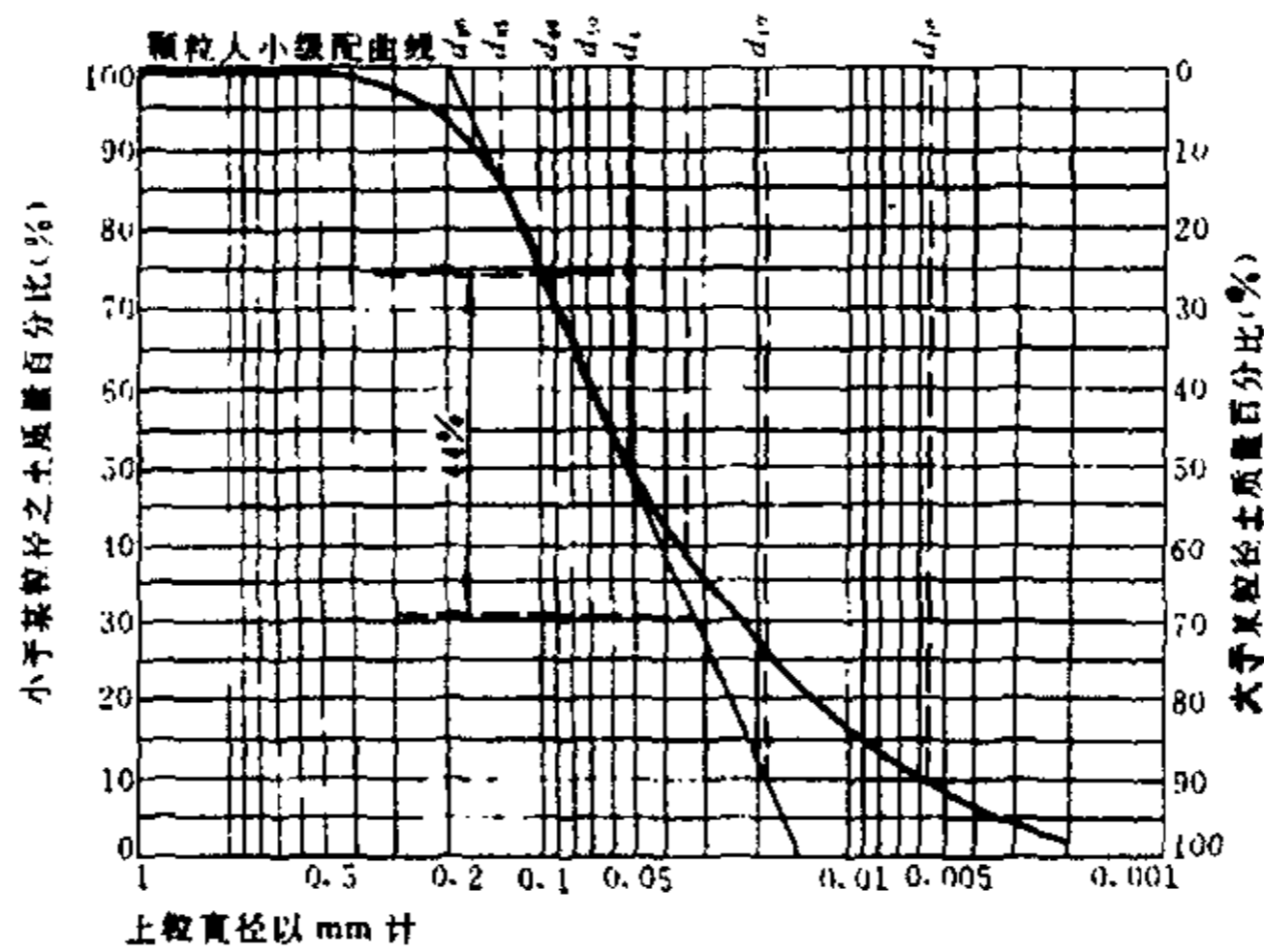


图 2-3 土的颗粒分析曲线

三、德国准则

德国 Franzius 研究所对土工织物的过滤准则做了大量研究工作，由 Heerten (1982, 1986) 多次公开报导。这个准则在我国工程实践中也得到了应用。此准则是以 Heerten 准则为基础，并经过德国土力学及基础工程学会第 14 工作组 (WG14, GSSMFE) 改进的准则。

该准则首先把土分为有问题的土和稳定的土两类。具有下列三种特征之一的土为有问题的土。

- ① 塑性指数小于 15，或粘粒含量 / 粉粒含量 < 0.5 ；
- ② 粒径介于 0.02mm 和 0.1mm 之间的土含量大于 50%；
- ③ 不均匀系数 C_u 小于 15 并含有粘粒和粉粒。

稳定土是指这三类土以外的土，其中包括纯砂及更粗的无粘性土和塑性高的粘土。具体准则列在表 2-3 中。由于国内通常使用干筛法，故使用本准则时应对干筛法成果换算为 D_w 。这个准则的突出优点是区分出有问题的土，并制定出相应的较为严格的准则。有问题的土主要是粉粒含量多，颗粒细，粘聚力小，所以土工织物的孔径要求小一些，才能满足

挡土的要求。

D_w ——湿筛法的测定结果，它是砂粒边振动过筛边洒水的方法。试验时对有纺织物用宽级配的干砂 100g，对无纺织物则用 300g，振动时间为 15min。再把通过织物的颗粒料进行筛分试验，定出的 O_{95} 则为 D_w ， $D_w=0.75 O_{95}$ （美国标准）。

表 2—3 德国土力学及基础工程学会准则

土类	土工织物准则	土类	土工织物准则
$d_{40}<0.06mm$, 稳定土	$D_w<10d_{50}$ 和 $D_w<2d_{90}$	$d_{40}>0.06mm$, 稳定土	$D_w<5d_{10}C_u^{1/2}$ 和 $D_w<2d_{90}$
$d_{40}<0.06mm$, 问题土	$D_w<10d_{10}$ 和 $D_w<d_{90}$	$d_{40}>0.06mm$, 问题土	$D_w<5d_{10}C_u^{1/2}$ 和 $D_w<d_{90}$

以上介绍的三种准则一种比一种考虑的因素更多，更为周到合理。从学术观点上看，后者比前者强；从工程应用上看，第一种准则最为安全，故一般可采用第一种准则。如果按照第一种准则选择土工织物遇到困难时，也可采用第二种或第三种准则。按照后两种准则计算出的孔径较大，有利于防止淤堵。

2.2.1.2 渗透准则

1. 土工织物作为滤层除了保土的功能外，还应该确保渗流能畅通地排出，因此土工织物应满足一定的要求或称为渗透准则。

2. 渗透准则有两种表达方式：一种是类似于挡土准则，以土工织物的特征孔径和被保护土的特征粒径建立一定的关系；另一种是以土工织物的渗透系数与土的渗透系数来建立关系。

以特征孔径和特征粒径表示的渗透准则，其判别方式如下：

$$O_{90}>d_{15}$$

3. 以渗透系数表示的准则，形式为

$$k_g \geq \lambda_p \cdot k_s$$

式中： k_g —土工织物的渗透系数；

k_s —被保护土的渗透系数；

λ_p —无因次系数。

美国联邦公路管理局对 λ_p 值提出较为合理，该建议为：

对小的水力梯度和稳定土 $\lambda_p=1$ ；

对大的水力梯度和不稳定土 $\lambda_p=10$ 。

2.2.1.3 淤堵准则

1972年由 Calhoun 提出梯度比试验，已为美国陆军工程师团所采纳。

防淤堵准则为： 梯度为 $GR<3$

此准则的优点是可以反映淤堵和阻塞以及部分的闭塞等现象，而且便于实施。

2.2.2 我国规范提出的反滤准则

2.2.2.1 国家标准反滤准则

一、保土性准则

反滤材料应具有以下功能：

保土性：防止被保护土土粒随水流流失。

透水性：保证渗透水通畅排走。

防堵性：保证材料被细土粒堵塞失效。

$$O_{95} \leq B d_{85}$$

式中 O_{95} —土工织物的等效孔径，mm；

d_{85} —土的特征粒径，mm，按土中小于该粒径的土粒质量占总土粒质量的 85% 确定；

B—系数，按工程经验确定，宜采用 1~2，当土中细粒含量大及为往复水流时取小值。

二、透水性准则

反滤材料的保土性应符合下式要求：

$$k_r \geq A \cdot k_s$$

式中 A—系数，按工程经验确定，不宜小于 10；

k_r —土工织物渗透系数，cm/s，应按其垂直渗透系数 k_v 确定；

k_s —土的渗透系数，cm/s。

三、防堵性准则

反滤材料的防堵性应符合下列要求：

- (1) 以现场土料制成的试样和拟选土工织物在进行淤堵试验后，所得梯度比 GR 应符合下式要求：

$$GR \leq 3$$

- (2) 当排水失效并损失巨大时，应以拟用的土工织物和现场土料进行室内淤堵试验。

2.2.2.2 水利部标准反滤准则 (SL/T225—98)

反滤材料应满足以下要求：

保土性：防止被保护土流失，引起渗透变形。

透水性：保证渗透水通畅排走。

防堵性：保证不致被细土粒淤堵失效。

一、保土性准则

土工织物保土性应以土工织物有效孔径与土的特征粒径之间关系表征。有效孔径应符合下式：

$$O_{95} \leq n d_{85}$$

式中 O_{95} —土工织物的等效孔径，mm；

d_{85} —被保护土的特征粒径，即土中小于该粒径的土质量占总质量的 85%，采用试样中

最小的 d_{85} , mm;

n —与被保护土的类型、级配、织物品种和状态有关的经验系数, 按表 3—4 的规定采用。

C_u —土的不均匀系数, $C_u = d_{60}/d_{10}$

式中 d_{60} 、 d_{10} —土中各该粒径的土质量分别占总土质量的 60% 和 10% 的特征粒径。

表 2—4 系数 n

被保护土细粒 ($d \leq 0.075\text{mm}$) 含量 (%)	土的不均匀系数 或土工织物品种	n 值
$\leq 50\%$	$2 \geq C_u \geq 8$	1
	$4 \geq C_u > 2$	$0.5 C_u$
	$8 > C_u > 4$	$8 / C_u$
$> 50\%$	有织物	$0_{95} \leq 0.3\text{mm}$
	无织物	
		1
		1.8

二、透水性准则

1. 被保护土级配良好, 水力梯度低和预计不致发生淤堵 (净砂、中粗砂等) 时

$$k_g \geq k_s;$$

2. 排水失效导致土结构破坏, 修复费用高, 水力梯度大, 流态复杂时 $k_g \geq 10k_s$;

式中 k_g 、 k_s —土工织物、被保护土的渗透系数, cm/s。

三、防堵性准则

1. 被保护土级配良好, 水力梯度低, 流态稳定, 修复费用小及不发生淤堵时

$$0_{95} \leq 3d_{15}$$

式中 d_{15} —被保护土的特征粒径, 即土中各该粒径的土质量占总质量的 15%, mm;

2. 被保护土易管涌, 具有分散性, 水力梯度高, 流态复杂, 修复费用大时:

(1) 被保护土的渗透系数 $k_s \geq 10^{-5}\text{cm/s}$ 时

$$GR \leq 3$$

式中 GR —梯度比, 试验方法见有关规程。

(2) 被保护土的渗透系数 $k_s < 10^{-5}\text{cm/s}$ 时, 应以现场土料进行长期淤堵试验, 观察其淤堵情况, 试验方法见有关规程。

第三章 土工织物在永定河堤防工程应用试验

土工织物于 1990 年先后在永定河前辛庄段、卢沟桥段和温榆河洒上段进行了开发和应
用试验。我有幸参加了有关工作，以下将有关情况 and 成果介绍如下：

3.1 温榆河洒上段

3.1.1 试验段基本情况

本段位于北京市朝阳区和顺义县交界处，温榆河鲁町与辛堡闸之间，洒上公路桥下
400m 至 1400m 弯曲河段上，全长约 1000m。原设计十年一遇洪水流量 $680\text{m}^3/\text{s}$ ，二十年一
遇洪水流量 $975\text{m}^3/\text{s}$ ，河底宽 70m，边坡 1:3.5，糙率 0.026，纵坡 0.00034，弯道曲率
半径 700m。河底高程 23.30m，水深约 5m，河滩地高程 28.00m 左右，当地基土的特征粒径
为 0.265。

3.1.2 护坡试验设计

一、基本资料的采集：试验设计前首先对该段地形描述、断面图、基土土质、合成材料进
行搜集取样，并对基土、土工合成材料的物理力学、水力学等进行必要的试验见表 3-1。

二、护坡设计

1. 坡角的确定：为确保试验工程的稳定经济，依据奥地利 LinZ 公司编写的《土工织物
设计与施工》(Polyfelt-Ts)手册进行设计计算，其稳定坡角为 20.9° ，取相当于 1:2.5
的边坡，坡角为 21.8° ，满足稳定要求。
2. 边坡的稳定计算：在坡角已经确定的情况下，按遭遇最高洪水时发生水位骤降的最不
利情况，用圆弧法进行试算，试算结果其最小稳定系数为 1.2，证明边坡是稳定的。还可
以参考表 3—2 (GB 50286-98《堤防工程设计规范》)取值。

表 3—2 土堤抗滑稳定安全系数

堤防工程的级别		1	2	3	4	5
安全 系数	正常运用条件	1.30	1.25	1.20	1.15	1.10
	非常运用条件	1.20	1.15	1.10	1.05	1.05

3. 合成材料的选用：选用北京合成纤维实验工厂生产的涤纶无纺布 $300\text{g}/\text{m}^2$ 的纵横向强度
及北京塑料制品厂的聚丙烯编织布 $100\text{g}/\text{m}^2$ 纵横向强度，均远远大于在边坡上所承受的拉
力。无纺布纵向拉强为 $7.94\text{Kgf}/\text{cm}$ ，横向拉强为 $10.34\text{Kgf}/\text{cm}$ ，聚丙烯编织布纵横向抗
拉强度均为 $13.0\text{Kgf}/\text{cm}$ 。以上各值均远远大于边坡上产生的拉力 $1.3\text{Kgf}/\text{cm}$ ，故强度也
是安全的。

4. 合成材料与基土的匹配：

表 3—1 泗上河段基本资料及有关数据表

序号	收集资料项目	物理力学方面的内容			水力学方面渗透系数 cm/s	备注
		名称	单位	数据		
1	基土	级配	mm		6.4×10^{-1}	$d_{95}=0.395$, $d_{90}=0.33$, $d_{85}=0.265$, $d_{60}=0.165$, $d_{30}=0.15$, $d_{15}=0.125$, $d_{10}=0.073$, $d_{10}=0.06$
			kN/m^3	14.30		合 1.46T/m^3
		内聚力 C	KN/m^2	3.92		合 0.4T/m^3
		饱和容重 X	T/m^3	1.912		
		浮容重 Y	T/m^3	0.912		
		摩擦系数 f		0.46		
		比重 Y		2.55		
		孔隙比 n		0.70		
2	无纺布	标准孔	mm	0.084	1.1×10^{-2}	300g/m ² 涤纶在压力 80Kpa 厚度 1.5mm (厚 3.89mm)
		纵向抗拉强度	Kgf/cm	7.94		
		横向抗拉强度	Kgf/cm	10.34		
		抗撕裂 (纵)	Kgf/cm	24.7		梯形撕裂
		抗撕裂 (横)	Kgf/cm	24.0		
		顶板强度	Kgf/cm	139.7		
		摩擦系数		0.6		混凝土与无纺布
3	编织布	标准孔径	mm	0.33	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	100g/m ² 聚丙烯
		抗拉强度	Kgf/cm	13		纵横一样
		摩擦系数		0.57		混凝土与编织布
4	打包带	抗拉强度	Kgf	120		14g/m

该基土的不均匀系数

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 0.165/0.06 = 2.75 \leq 3;$$

$$D_{95}/D_{85} = 0.395/0.265 = 1.49 \leq 3,$$

说明基土级配是均匀的。

采用的无纺布和编织布与基土的级配情况为:

$$O_{90}(\text{无}) = 0.084 \leq 2D_{85} = 0.53\text{mm}$$

$$O_{90}(\text{编}) = 0.33 \leq 2D_{85} = 0.53\text{mm}$$

渗透系数与基土的级配情况为:

$$k_g(\text{无}) = 1.1 \times 10^{-2} \text{cm/s} > k_s(\text{基}) = 6.4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$$

$$k_g(\text{编}) = 9 \times 10^{-2} \text{cm/s} > k_s(\text{基}) = 6.4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$$

其中 D_{95} 、 D_{90} 、 D_{85} 、 D_{60} 、 D_{50} 、 D_{35} 、 D_{15} 、 D_{10} —被保护土的特征粒径,即土中小于各该粒径的土质量分别占总质量的 95%、90%、85%、60%、50%、35%、15%和 10%的特征粒径;

C_u —不均匀系数, $C_u = D_{60}/D_{10}$;

O_{90} —土工织物的等效孔径, mm;

kg、 k_s —土工织物、被保护土的渗透系数, cm/s。

三、护坡方案的设计

自桩号 0+400—1+400, 铺 300g/m² 的无纺布做反滤层, 其上再铺 0.5m×0.5m×0.15m 重 60kg 连锁板。

3.1.3 土工织物的施工方法

一、基土削坡: 泗上护坡全长 970m, 设计边坡 1:3.5, 有一半为填方段, 其余为过渡段和挖方段。填方段配合河道清淤进行填筑, 用泥浆泵将清除的淤泥输入填方段, 至出水面再打梗放淤至水平护底高程。往上用推土机由挖方段或在高滩地上取土填筑, 每 0.3m 为一层, 用推土机边推边碾压, 土的干容重控制在 1.7 g/m³ 左右。

二、合成材料的铺设: 基土削坡后立即铺设无纺布, 其具体要求为:

1. 所用合成材料施工前, 一定要进行质量检验, 以控制其质量。
2. 合成材料搬运、施工均要求尽量避免日晒时间过长, 必要时要用草席遮盖。
3. 每捆合成材料不宜超过 50kg, 以利于搬运和施工。
4. 合成材料的连接用手提式打包机缝合, 打包带用电烙铁加热粘合。
5. 护坡基土坡面要削坡平整, 填方要夯实, 不得有树根、坚硬的易损害合成材料的物体。

6. 护坡合成材料的头尾要加以锚固, 以防位移和水土流失。

7. 合成材料施工后, 不应有外露或被日光照射的部分, 以防紫外线照射老化。

三、测压管的埋设: 埋设测压管 1#、2#、3#, 测压管为直径 0.05m 的塑料管, 顶部 1m 用钢管。目的是了解管内水位涨落或降雨渗透时用合成材料代替粒料反滤层的效果, 是否会发生因渗透而产生管涌破坏。

3.1.4 护坡试验观测及成果分析

一、渗透观测: 在预先埋设的直径为 5cm 的测压管内进行。当水位涨落时, 观测测压管内水位的变化。经用测压管水位观测仪观测, 测压管水位与河道水位, 它们之间呈指数曲线关系, 45° 线以上的点受河道水位变化影响较大, 45° 线以下的点受降雨影响较大。证明有渗透水在护坡内流动, 而渗出的水在无纺布反滤作用下只能是清水, 有资料表明泗上护坡冬季渗出水被冻成冰流的情况。所以两年来并未因有渗透水的活动而造成护坡位移沉降, 证明合成材料代替粒料反滤层的匹配设计是合理的, 成功的。

二、合成材料性能变化的观测: 既将事先预制好的试块, 埋于选好的固定点内, 经若干年各取一块进行物理力学、水力学等方面的检测。但因各种原因, 在本论文写出之前, 这项试验未做, 所以未得出结论。

三、连锁板空孔内做植草试验, 以观察其对合成材料的穿透作用。本试验段自 1989 年汛后竣工, 次年春即长了草, 其中对无纺布威胁最大的草种有, 野大麻籽、嵩草和一种当地称“水磨草”的草。它们的根均能长至 2—3cm 粗, 经拔根观察, 它们长至 0.15m 即自行拐弯呈水平状生长, 证明这些草根不能穿过合成材料, 但对合成材料的寿命造成影响。

3.2 永定河前辛庄段

3.2.1 工程概况

永定河位于北京市西南部,是海河流域最大的河流之一,担负着北京市西部山区的排洪任务,对北京市城区防洪安全起着重要的作用,被国务院列为全国四大重点防汛河道之一。永定河历史上素有“小黄河”之称,尤其是卢沟桥以下河道,河床均为宽浅多沙河道,多年泥沙淤积使其已经成为地上河,河床高出堤外地面3~6m。以埋深8~10m为界,地基上层为较松散的细砂至粉沙层,下层为卵砾石、中细砂与壤土、砂壤土互层,堤身均为砂土填筑,历史上曾多次决口。永定河卢沟桥以下北京段左右岸堤防总长92.177km,洪水行于两堤之间。河槽受洪水冲刷左右摇摆游荡不定,形成靠溜险工15处,险工总长41.136km,其中左岸险工9处,长28.214km,右岸险工6处,长12.922km。

永定河流域属大陆性气候,冬季较长,干燥寒冷,盛行西北风,春秋多风沙。流域内降雨量少,且多集中在汛期6~9月份,多以暴雨形式出现,且以局部暴雨为主。官厅以上多年平均降雨量400mm,官厅山峡地区为560mm。50年一遇洪水 $4330\text{m}^3/\text{s}$,100年一遇洪水 $6230\text{m}^3/\text{s}$,最大可能洪水 $16000\text{m}^3/\text{s}$ 。气温变化较大,据门头沟气象站资料,多年平均气温为 11.7°C ,冬季的1月份平均气温为 -4.3°C ,夏季7月份平均气温为 25.8°C 。绝对最低气温为 -22.9°C 。冬季河流结冰期较长,据三家店资料统计,初冰期大约在11月底,终冰期大约在下年的2月上旬。最大河心结冰厚度可达0.59m,最大冻土深在1m左右。

3.2.2 工程设计

一、永定河护岸形式的选择

永定河护岸工程历史悠久,早在金章宗明昌三年(公元1192年)就在卢沟桥以上修建了石墙护岸工程。以后,植柳护岸、柴埽护岸、丁坝护岸、砖护岸、干砌石护岸铅丝笼护底和浆砌石护岸、沥青铺垫护底和混凝土预制块用砂浆或沥青砂填缝护岸等都相继在永定河中进行过尝试。其中浆砌石护岸工程在70年代曾被大量采用,仅十几年的时间,就修了约2万 m^2 。但因其基础前加设的铅丝石笼有两大缺点,一是堤身隐患不易发现;二是铅丝石笼迎溜受顶冲时很容易搭头(即下垂),块石随之向前滚动,并且笼端形成大包,接着整个石笼钻进水里,往往达不到设计护底深度。而且镀锌铁丝长期处于水中或潮湿状态,耐久性差,一般使用10~15年既严重锈蚀或锈断,失去石笼的抗洪作用。所以从90年代开始,在永定河开始研究和试验塑料编织袋装土护底和混凝土连锁板护岸的形式。

二、土工织物的选择

1. 基本资料的收集

作反滤层的土工织物必须同时满足保土性、透水性和防淤堵性三个条件。在永定河第一期(1990年)险工护砌工程初次采用无纺土工织物代替天然粒料反滤层时,国内尚无完整系统的设计规范,为此,设计选用无纺土工织物时,委托中国水利水电科学研究院岩土所进行了有关试验,试验结果如表3-1~表3-3所示。通过比较优选出山东莱芜丙纶厂生产的针刺无纺土工织物,其等效孔径 $O_{95}=0.07$,单位面积质量为 $347.6\text{g}/\text{m}^2$,垂直渗透系数 $2.66\times 10^{-1}>10^{-3}\text{cm}/\text{s}$ 。

表 3—1 被保护土料基本性质

土样编号	取样地点	d_{60} (mm)	d_{10} (mm)	C_u (d_{60}/d_{10})	>0.1mm 含量	分类	试样干 密度 ρ_d (t/m^3)	渗透 系数 k_{10} (cm/s)
砂 1	前辛庄 河滩	0.23	0.125	1.84	96	细砂	1.41	6.76×10^{-1}
砂 2	十里铺 坡脚	0.094	0.042	2.24	34	极细砂	1.43	1.10×10^{-1}
砂 3	南章客	0.14	0.072	1.94	69	极细砂		
砂 4	麻各庄	0.056	0.029	1.93	4	粉砂		
砂 5	宰相庄	33.00	0.14	236.0	94	砂砾	2.08	2.34×10^{-1}

表 3—2 土工合成材料（无纺土工织物）技术指标

生产厂家		北京华表无纺 土工织物厂	山东莱芜 丙纶厂	湖南无纺 土工织物厂	常州
厚度 (mm)		2.97	3.2	4	3.8
单位面积重量 (g/m^2)		299	347.6	367	380
重量偏差率 (%)		$\pm < 7.9$	6.4		
密度 (t/m^3)		0.101	0.117	0.092	
比重		1.378	1.01	1.11	0.90
孔隙率 (%)		92.7	88.4	91.7	88.9
垂直渗透系数 (cm/s)		4.36×10^{-2}	2.66×10^{-1}	$(1.48 \sim 2.50) \times 10^{-1}$	$(1.10 \sim 2.26) \times 10^{-1}$
顶破强度 (N)		2260	1358		
等效孔径 (mm)	O_{95}	0.10	0.07	0.17	0.10
	O_{90}	0.09			
抗拉强度	经向	强度 (N/5cm)	816	798	
		伸长率 (%)	60	68.6	
	纬向	强度 (N/5cm)	467	872	
		伸长率 (%)	105	78.4	

3—3 滤层试验结果

试样编号		滤层试验						无纺布渗透系数 $k_{10}(\text{cm/s})$	
无纺布	土样	干密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$	水流方向	最终比降 J	破坏比降 J	渗透系数 $k_{10}(\text{cm/s})$	备注	试验前	试验后
A	砂 1	1.41	向下	19.3	>19.3	6.38×10^{-3}	渗水一直为清水	2.50×10^{-1}	1.91×10^{-1}
B	砂 1	1.41	向下	25.1	>25.1	6.46×10^{-3}	渗水一直为清水	1.10×10^{-1}	7.89×10^{-2}
A	砂 2	1.43	向下	30.8	>30.8	1.10×10^{-3}	渗水一直为清水	1.48×10^{-1}	1.45×10^{-1}
B	砂 2	1.43	向下	32.4	>32.4	1.22×10^{-3}	渗水一直为清水	2.26×10^{-1}	1.03×10^{-1}
C	砂 3	1.43	向下	20.6	>20.6	2.79×10^{-3}	渗水一直为清水	2.90×10^{-1}	1.79×10^{-1}
C	砂 4	1.40	向下	20.5	>20.5	3.30×10^{-4}	渗水一直为清水	2.90×10^{-1}	2.13×10^{-1}
E	砂 4	1.40	向下	20.3	>20.3	3.24×10^{-4}	渗水一直为清水	1.45×10^{-1}	8.7×10^{-2}

2. 坡角的确定

护坡的坡角稳定除大工程外，一般都参考已建成类似工程的资料来确定。为确保试验工程的稳定经济，采用了 Polyfelt—Ts 手册的方法进行设计计算。其稳定坡角为 20.9°，永定河堤防堤坡为 1:3 的边坡，坡角为 30.5°，是稳定的。

3. 边坡的稳定计算

在坡角已经确定的情况下，按遭遇最高洪水时发生水位骤降的最不利情况，用圆弧法进行试算，试算结果其最小稳定系数为 1.25。

永定河堤防堤坡为 1:3，抗滑稳定安全系数：

$F_s = \text{tg} \phi / \text{tg} \alpha = \text{tg} 30.5^\circ / (1/3) = 0.589 \times 3 = 20.7 > 1.25$ ，满足抗滑稳定系数要求。式中 ϕ 为土工织物与堤坡间的摩擦角； α 为堤坡坡角。

4. 土工织物的抗拉强度计算

土工织物的抗拉强度应满足施工期间铺设块石、混凝土连锁板或重物时的受力需要，在施工搬运或铺设中不受破坏，并能承受土、砂、石块的压力或冲击作用。经过多年的应用实践，永定河堤防护砌采用 300 g/m² 以上的短纤无纺土工织物，要求抗拉强度为 600N/5cm

左右。选用北京华表无纺土工织物厂和山东莱芜丙纶厂的涤纶无纺布 300g/m² 来做强度试验,从表 3—1 中可以看出,山东莱芜丙纶厂的纵横向强度,均远远大于 600N/5cm,满足抗拉强度,故本次护坡反滤层采用的无纺布为山东莱芜丙纶厂的涤纶无纺布。

5. 土工织物与基土的匹配

永定河堤防土为细砂、粉细砂土类,从表 3—2 中看出,基土的特征粒径为 0.056~0.23mm;渗透系数: $1.10 \times 10^{-3} \sim 6.76 \times 10^{-3}$ cm/s。土工织物的渗透系数为试验前 $k_g = 1.10 \times 10^{-1}$,试验后 $k_g = 8.7 \times 10^{-2} \sim 2.13 \times 10^{-1}$ 。根据《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T225—98)中反滤准则要求:

$O_{95} = 0.07 \sim 0.10 \text{mm} \leq (1 \sim 1.8) d_{85}$, 满足保土性要求。

$k_g \geq 10k_s$, 满足透水性要求。

式中 O_{95} 为土工织物的等效孔径; d_{85} 为被保护土的特征粒径; k_g 为土工织物的渗透系数; k_s 为被保护土的渗透系数。

6. 无纺土工织物的保护

无纺土工织物是化学聚合产品,阳光暴晒是加速其老化的重要因素,防止老化是保证工程质量的百年大计,因此施工时应随用随铺,及时掩埋或防护,减少阳光暴晒。在永定河护砌工程中,铺设无纺土工织物后先铺一层厚 10~15cm 砂料保护层,以免砌体直接挤压无纺土工织物和水泥砂浆封堵无纺土工织物孔隙,然后再铺预制混凝土连锁板。

3.2.3 工程施工

一、施工条件

20 世纪 90 年代初,永定河堤防护砌工程第一次采用混凝土连锁板、土工织物和编织袋等新型材料,替代了传统的浆砌石、天然反滤料和铅丝石笼。混凝土连锁板由北京市水利局引进、北京市水利设计院设计、北京市水利构件厂生产制造,为 50cm×50cm 的钢筋混凝土预制块,最厚处 15 cm,边缘最薄处 5 cm,对称两侧作成混凝土钩,另外两侧为带孔的混凝土耳,耳孔可挂住混凝土钩。混凝土连锁板每块重 64kg。

二、施工程序

1. 前期准备

前期准备的主要工作包括设计标高及必要的图纸,施工现场清障,水、电、料场的准备,深作护坡的井点降水,铅丝笼、块石、防冲墙的安排等。人员的食宿,施工机械及必要的工具等也应同时安排。

2. 连锁板护坡施工的主要材料及必备工具

连锁板块属于异性模板,故只能指定厂家,指定厂家为北京市水利构件厂并负责送到施工现场。涤纶透水无纺布和复合土工膜(目前水利工程多用的为 500g/m² 复合土工膜。灌眼用的砂砾料,处理弯道逢的直径 6.5mm 圆钢、碎石、粗砂、水泥、养护苫盖用的草帘,伸缩缝用的木板或沥青板,放线用的铅丝小线,行撮等。必备工具目前多用的有搅拌砂浆、混凝土的搅拌机,运灰浆车,手推车、拉板用的勾套、按板用的皮头橇、小撬棍、滑板用的木板、质控用的杠尺、勾缝用的大铲、抹子、压子、拖灰板、沙浆稠度仪等。

3. 施工组织

根据工程量大小、施工季节、工期要求等确定施工组织。一般每个施工队以 30~50 人为宜。指挥部设工程施工和监理人员并责成一名施工员具体负责一个施工队的施工、

质量、事务联络等。施工队内以每四人为一个作业施工组，按 15~20 延长米为一小单元组织施工。其四个人的安排优点是可以最大效能的发挥施工人员的作用，四个人铺布，可以适应并达到满负荷工作，砌板过程中可有两个人按板，一个人运板，另一人调缝、灌缝或机动打杂。每 15~20 延长 m 为一小单元可有效的控制大线少动，可保证坡面平整度、入直度。结合施工部位的地下水情况及板块供应，质量要求施工人员的有效利用等多种要素，施工总体安排应以土方开挖、降水、削坡铺布、砌板、灌缝、补缝、回填土、砌筑排水步道，防浪墙等作业或一条龙作业为好。

三、施工方法

1. 清基、削坡

永定河堤防均为砂土填筑，采用机械和人工按设计边坡 1:3 坡度修整堤坡。修整的堤坡面应比设计坡面线略高一些，以使运送连锁板时不影响坡面，余土随连锁板和土工织物铺砌进度随铺随削；坡面如遇沙砾石层，坡面要修平整，不能有坚硬砾石突出。清基、削坡完成后经验收合格后方可进行下一步工作。

2. 铺设土工织物

在平整好（坡面密实、无尖锐物）的 1:3 边坡上铺设土工织物，先从堤脚沿堤长纵向铺，一般沿堤长 50m 为一施工单元，再按照从堤脚向堤顶铺的顺序进行。土工织物的连接采取现场用手提式缝纫机及尼龙线将其缝合成整体（缝合边距不小于 5cm）。铺装连锁板之前，在铺好的土工织物上铺 3~5cm 厚的砂土保护层，其目的是保护土工织物不受阳光暴晒和坚硬物挤压，以延长使用寿命（无纺布、编制袋等暴露在阳光下的时间尽可能短）。再次平整后从护坡下端开始铺压混凝土连锁板块，铺筑至斜坡 3~4m 高度后，在继续铺筑上部混凝土连锁板块的同时，作护底工程。

3. 铺装连锁板

铺装连锁板同样按从堤脚向堤顶的顺序进行。为保证铺装连锁板坡面平整，沿堤长每隔 10~20m 从堤脚到堤顶用铅丝挂坡面线，铅丝之间拉水平线控制连锁板水平缝。连锁板铺筑后用沙砾石灌填连锁板孔隙。

4. 塑料编织砂袋群体护底

在堤脚沿斜坡铺砌 3m 长的连锁板后，即开始平铺编织砂袋护底。10m 长编织袋垂直堤防方向排列，其中自坡脚伸向河心的水平方向长 8m，上端 2m 长斜搭在已铺好的混凝土连锁板的边坡上。为使编织砂袋能形成群体，在编织砂袋之间采用打包带相互绑结成群体，同时将上端斜搭在连锁板上的编织砂袋也用打包带或尼龙绳将其与连锁板块上的孔眼绑牢，使两者联为整体。从袋两端向中间装砂，边装边捣实并用打包带将编织袋之间交错绑扎，编织袋装满砂后两端用缝包机将袋口缝为一体。编织砂袋护底铺装完成后，要及时回填埋土，防止阳光暴晒。

5. 护坡护底施工完成后，回填土，恢复河道原状。将护坡顶部设一排水平铺设的混凝土连锁板块，并将其砌入浆砌石防浪墙体内，以增加护坡体的抗滑稳定。

6. 砌筑浆砌石挡墙

土工织物和连锁板铺设到堤顶后，即可砌筑浆砌石挡墙，连锁板须嵌入浆砌石挡墙内，无纺土工织物则沿浆砌石挡墙基础平铺 1m。

3.2.4 应用土工织物的效益分析

一、从当地料源分析。永定河沿岸均为细砂，缺少能做反滤层的砂石料，堤防护砌施工周期短，若采用天然砂石料做反滤层，不但运输价格高，而且施工难度大，有些堤段地下水水位高，甚至无法铺设砂石反滤层。采用土工织物代替砂石料做反滤层，很好地解决了这些问题。

二、从造价分析。见表3—4。从表4中可以看出，原用浆砌块石一延米为1750.79元，而连锁板护坡一延米为1376.11元，每延米可节省投资374.68元。

三、砂砾料反滤层按25~30cm厚计算，每平方米造价22.5元左右，采用土工织物反滤层每平方米造价11元左右，无纺土工织物反滤层比砂砾料反滤层节省投资49%左右。

四、此外，采用土工合成材料还可以大大减少运输量，节省劳力，提高工效，缩短工期。如果永定河已完成护砌量86.48万m²全部采用砂砾料反滤层，其运输量达23.58万m³，总重量达35.8万t，而采用土工合成材料按400g/m²计算总重量仅382t，前者是后者的963倍。由此可见，采用土工合成材料代替传统堤防护砌形式，节省了运输台班、节省能源、减少路面磨损维修，大大减少料场占地材料损耗和管理，社会效益是十分可观的。

表3—4 两类护险工程各项投资比较表

工程类型	工程单 项或材 料	数量	单 位	单 价 (元)	合 价 (元)	其 中 人 工 费 (元)	工 程 总 价 (元)	其 中 护 坡	其 中 护 底	备 注
浆砌块石护坡结合铅丝石笼护底(1米堤段)	铅丝石笼8×2×0.6米	0.5	个	762.40	381.20	58.40	1750.79 其中人 工费 99.73	1369.59	381.20	1.本表工 程量由永 定河标准 断面计算 所得 2.单价为 目前市场 价
	级配石垫层厚0.3米	8.48	立米	18.00	152.64	6.78				
	浆砌块石厚0.4米	12.81	立米	95.00	1216.95	34.55				
连锁板护坡结合编织砂袋护底(1米长堤段)	编织袋3×10米	30.60	米	1.10	33.66		1376.11 其中人 工费 33.27	1326.85	49.26	1.本表依 据工 程 量，按永 定河所示 标准断面 尺寸一延 米长护岸 工程计 算。 2.本栏人 工费投资 为90年 施工 中实际 支出。
	编织砂袋装砂28.80	0.50	立米	14.40	14.40					
	打包带	15.00	米	0.08	1.20	0.30				
	无纺布	33.00	平米	5.10	168.30	0.10				
	回填砂垫层0.5米厚	14.13	立米	0.50	7.07	7.07				
	连锁板	114.0	块	10.10	1151.4	11.40				

注：1.表中依据工程量采用设计工程量，单价采用目前市场价。

2.表中工程总价仅指主要材料及人工，(不包括土方、防渗墙、排水沟等投资成本，不作为施工依据)。

3.3 永定河卢沟桥段

3.3.1 工程概况

永定河卢沟桥段位于北京市永定河的河道中。主要建筑物有拦河橡胶坝、东西横堤、湖底防渗和两岸加固工程等。

本工程是为恢复历史景观“卢沟晓月”而兴建的。整个工程都是按河道顺利通过 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 或以上的洪水流量进行设计的。由此确定河底高程为 $56.7\sim 59.0\text{m}$ 。橡胶坝长 300m ，分为5孔，每孔长 60m ，坝高 3.5m 上游回水长度 1274m ，可形成约 $40\text{万}\text{m}^2$ 水面供游览，可蓄水 $80\text{万}\text{m}^3$ 左右。由于河底为砂、卵砾石等透水材料，为减少渗漏，在河底铺了 $38\text{万}\text{m}^2$ 的聚乙烯(PE)和复合土工膜(一布一膜)。在右堤铺设了长 1020.2m 的澳大利亚土工模袋(填充砂浆)，在左堤铺设了 317.6m 的国产土工模袋(填充混凝土)。

模袋是由一种具有很高强度和稳定性的聚酯(涤纶)长纤维织成的双层织物结构，灌入砂浆或混凝土后固定成型，在国外被广泛用于河道、渠道、港口、海岸、水库、湖泊、道路等等的护岸或护底工程中，它具有以下特点：可有效地防止水土流失和水流冲刷；能耐酸、耐碱、耐有机溶剂和生物侵蚀以及动物撕咬；能适应各种形状的地面，可任意裁剪成所需要的形状；施工快捷，适应性强，水上水下、雨天晴天均可施工；抗辐射，抗老化，寿命可达 $30\sim 50$ 年以上。我国自八十年代初开始引进日本的土工模袋进行试验性施工以来，至今已应用到了全国各地的几十项工程中。但在北京使用尚属首次。

3.3.2 土工模袋的设计

河道右堤身为天然砂、卵石(局部为细粉)，抗冲刷能力差，决定采用土工模袋加以防护。为了减少渗漏，保持游览水面，在流量 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 水位以下模袋下面又铺设了厚 0.5mm 聚乙烯(PE)。

由于堤身为砂、砾透水料，水位变化速度很慢，所以可不设排水孔，采用无反滤点的土工模袋。土工模袋应能承受 5m/s 水流流速的冲刷。经核算，采用厚度 100mm 的模袋在 $1:2$ 边坡条件下，仍能保持稳定。

3.3.3 土工模袋的选用

一、澳大利亚土工模袋

本工程使用的土工模袋是由澳大利亚某公司生产的无反滤点模袋，模袋的28天强度均可达到 20Mpa 以上。

无反滤点模袋是由斜向拉线(筋)连接的双层织物(我国称为哑铃形)组成，这些拉线应能保证模袋充胀到一个均匀的厚度而不破坏。根据“水利水电工程土工合成材料应用技术规范”(SL/T225—98)的有关要求，模袋护坡工程设计应包括：厚度选定、稳定分析、排水和抗滑措施。求得安全系数 $F_s=1.61>1.50$ ，可满足要求。(1) 28天龄期的最小强度 20Mpa (2) 水泥最小用量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ (3) 密度 $\geq 2240\text{kg}/\text{m}^3$ (4) 每平方米重量 $\geq 150\text{kg}/\text{m}^2$ (5) 抗冻标号 $\geq 2240\text{D}100$ (6) 承受流速 $\geq 5\text{m/s}$ (7) 满宁系数 $n=0.016$ (8)

垂直渗透系数 $<1 \times 10^{-4}$ cm/s。

二、国产土工模袋的选用

这次在卢沟晓月湖左堤（老石桥~橡胶坝）使用了长317.6m面积为5288m²的国产土工模袋。它是由无锡市亿丰产业用布厂生产的WYFM-150型涤纶土工模袋，也是国内首次使用这种新材料，它的抗老化性能比过去常用的丙纶模袋要好的多。

模袋护坡的设计厚度为150mm，灌注混凝土。设计龄期采用90天，强度不小于20Mpa，抗渗>S4，抗冻>D50，其28天强度不小于16~18Mpa。

1999年8月，在北京市通惠河出口的北运河左岸进行了6690m²的水下土工模袋的施工，模袋布的规格仍为WYFM-150，回填水泥砂浆。

3.3.4 土工模袋的施工

一、施工准备和临建设施

卢沟晓月湖的主体工程——橡胶坝和两岸横堤的土方和混凝土工程已于98年6月完成。99年4~6月为湖区防渗和两岸土工模袋护坡工程的施工时间。

模袋施工所需要的砂浆或混凝土是利用已建成混凝土搅拌站进行的，用两台5m³罐车运送混凝土，现场使用1台30~60m³/h混凝土泵送澳大利亚公司的砂浆泵，通过2"橡胶软管送到灌注口。

现场施工用电是由1台120kw发电机提供的。所需要的水则利用98年已建成使用的深水井，用泵送往100~1200m远处。

二、施工方法

本工程采用了国内外两种土工模袋，由于两者的织物结构和充填材料不同，施工方法也是不一样的。

（一）澳大利亚土工模袋施工要点

1. 施工单元的划分

澳大利亚公司提出的施工方案是：沿水流方向每50m作为一个施工单元。将模袋沿水流方向分成5~6个小单元。每个小单元尺寸约为50×2.5~3.0（河底为50×5.0m）。灌注顺序是下游到上游、由堤顶向河底。

2. 模袋的收缩系数

以前该公司多是在水下环境下施工，所使用的模袋面积与实际完成的护坡面积之比（收缩系数）约为1.35~1.40。

3. 锚固槽和伸缩缝

本工程施工过程中将原设计的边坡1:2.0，约可节省模袋布5000m²。但是边坡变陡后，于抗滑稳定不利，尤其是底下铺了一层聚乙烯，更为不利。

为了保持模袋施工和运行过程中的稳定，我们在模袋护坡顶部挖了一道深约50~70cm锚固槽。施工时，先灌注顶部单元，可防止模袋下滑。施工后期将顶部模袋埋入土中或混凝土中。

按设计要求，每50m做一道伸缩缝，模袋断开并搭接30cm。在分缝处挖好宽70cm深15~20cm的槽，把搭接段卧在槽内。为使水流平顺，施工时要使上游段盖在下游段上。搭接段内涂上冷沥青。

4. 模袋的缝制和变形调整

土工模袋是一种由斜向拉线连接的双层开边织物，幅宽 3.2m，每卷长度 80m，运到现场后，根据护坡的实际尺寸，缝制成一定尺寸的模袋，运到现场铺设。

5. 砂浆配比

澳大利亚公司采用了如下砂浆配比：

普 525 号水泥： 500kg/m^3

粉砂： 1800kg/m^3

水： 450kg/m^3

其中，粉砂产自永定河下游，细度模数 1.20 左右。水灰比 0.9。由于土工模袋的滤水作用，可使水灰比由 0.9 降低到 0.5 左右，从而提高砂浆强度。

6. 特殊处理

①遇到树木、拉线时，可将模袋剪开，把树或拉线包在其中，然后再将模袋缝合，灌注砂浆。

②遇高压线杆时，应在周围保留一个土台，再用模袋将其围住，或用浆砌石和混凝土将其砌在中间。

7. 施工技术要求：

①铺设模袋时应确保其在整个工作面上均匀分布，进入锚固槽内的尺寸要满足要求；

②模袋表面不得有皱纹、折痕和重迭现象；

③当模袋护坡中设有搭接式伸缩缝时，模袋应由下游向上游灌注；

④灌注砂浆应有足够压力 ($3\sim 4\text{kg/cm}^2$)，应使织物充分鼓胀，达到设计所需要的厚度；

⑤在灌注过程中，边灌注边用人工脚踩，使砂浆均匀充满模袋；

⑥灌注过程中要加强观察，发现变形过大或鼓包时，应及时中止灌注，特别要防止灌注口被挤胀变形；

⑦不允许出现扁平的或灌注不充分的断面；

⑧在模袋充胀后 1 小时，禁止在上面行走或放上重物。

(二) 国产土工模袋施工要点

1. 施工单元划分

国产土工模袋都是在工厂内加工成一定尺寸规格的单元，运到现场铺放。本工程模袋单元为 12m (6 幅布)，长边为 17.55 m。用布分隔成三条浇注单元。

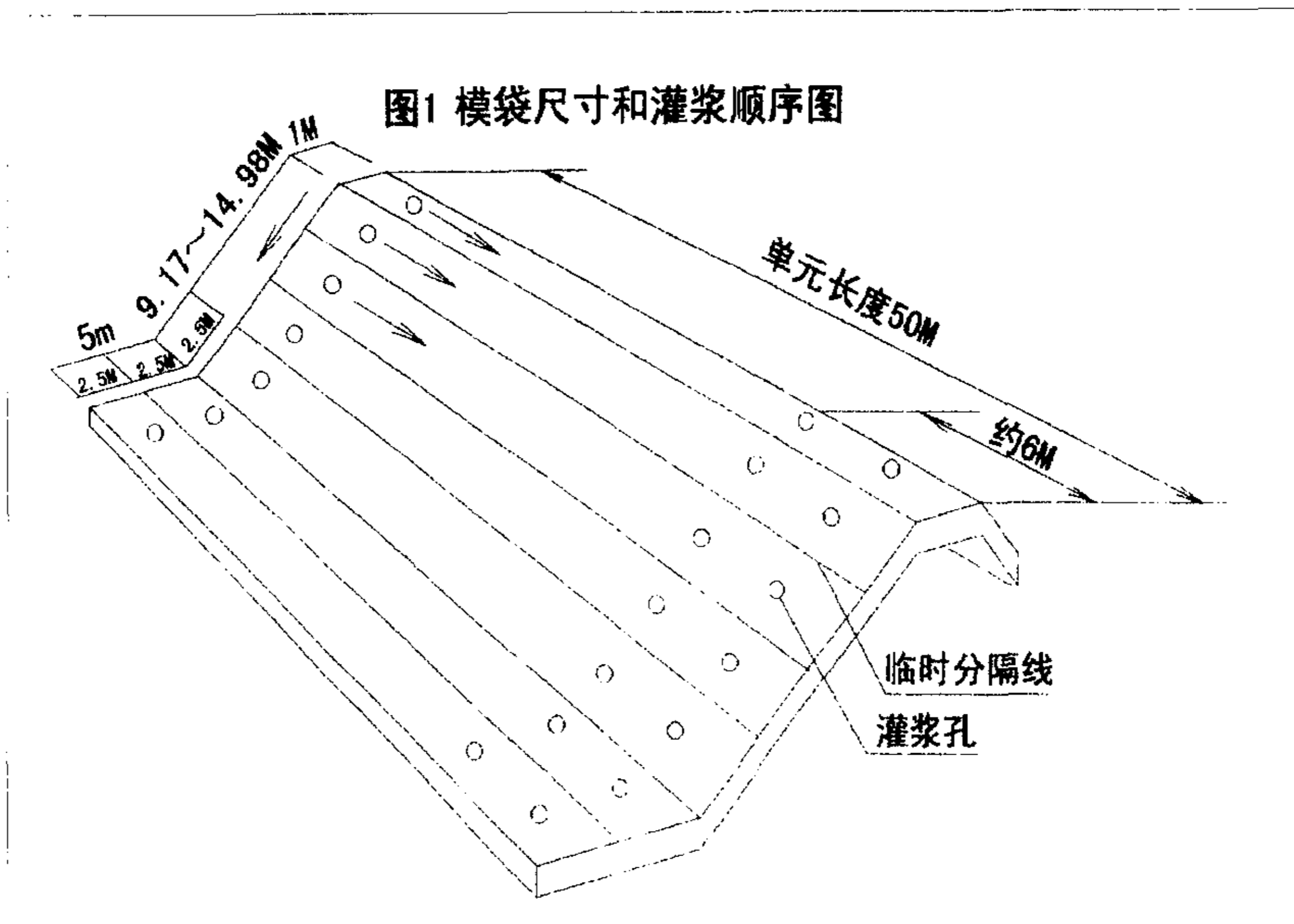
为降低工程成本，本段模袋的河底部分采用丙纶模袋，斜坡采用涤纶模袋。这是国内首次使用涤纶模袋。

2. 浇注方案

计划在每个施工单元中，按照从上游向下游方向，依次灌满 3 个条状模袋，也就是 1, 4, 7, 10; 2, 5, 8, 11; 3, 6, 9, 12。但是试验 3 个模袋单元后，发现坡底变形较大。于是改把每个施工单元分成 4 个水平段，自坡底向坡顶逐段灌注，即 1, 2, 3; 4, 5, 6; 7, 8, 9; 10, 11, 12 (见图 1—图 2)。这样做，可保持坡表面平整。

3. 模袋混凝土

采用豆石混凝土，最大粒径小于 15mm；砂为中砂，细度模数 2.5。水泥为矿渣 325 号水泥。水灰比 0.5~0.6，砂率 0.45~0.50。坍落度 $22\pm 1\text{cm}$ 。使用配比如下 (kg/m^3)：水泥 385，水 204，砂 905，石子 905，减水剂 (FX-128) 1.5%。



3.3.5 结论

一、永定河和通惠河四个工地用澳大利亚和国产土工模袋，在水下和水上条件下建造了约 3.5 万 m^2 的护岸工程，取得了较好的技术经济和社会效益。

二、土工模袋施工快捷方便，特别是在有水的条件下，不需要干地施工条件，可节省导流和围堰的费用，加快施工进度。在大江大河中，用模袋护坡更具有传统的方法所不具备的优点。

三、通过本工程两种模袋的对比试验，今后应深入研究利用砂浆充填模袋可行性问题，如果能够用砂浆来充填模袋的话，可充分利用当地资源，并可大大降低工程成本。

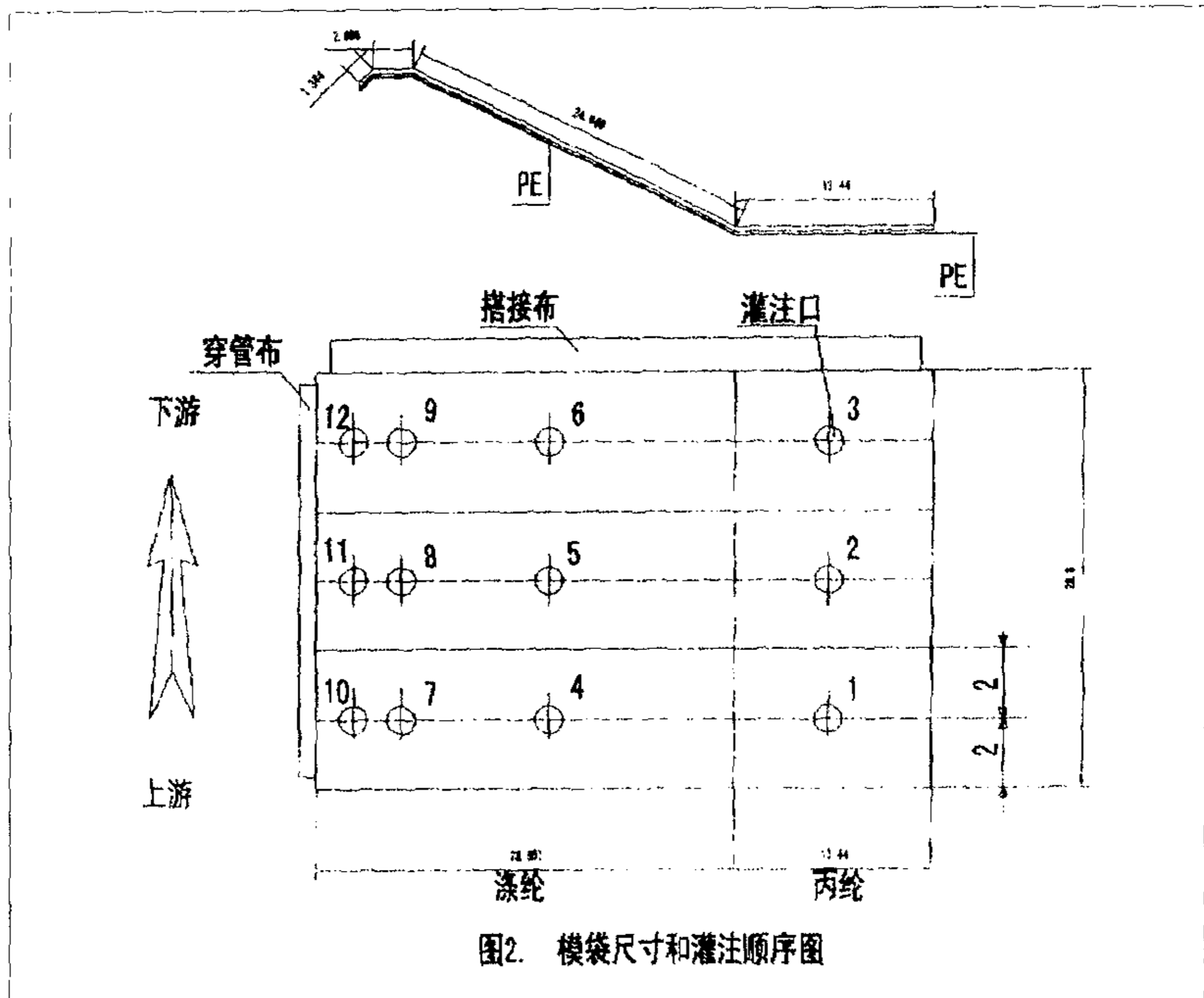


图2. 模袋尺寸和灌注顺序图

第四章 土工织物的功能分析及应用

4.1 概述

从前面所述土工织物的反滤作用机理、准则和已做工程可以证明,土工织物作为反滤层的应用是成功的,而且效果良好,施工方便,有利于环保,并节省了投资。但是因目前在土工织物滤层设计方面,我国常用的设计准则,是基于静荷载单向水流条件下,可以概括为以下形式:

保土准则: O_{90} 或 $O_{95} \leq (1 \sim 2) d_{85}$

透水性准则: O_{90} 或 $O_{95} \geq (1 \sim 3) d_{15}$

同时满足梯度比: $GR \leq 3$ (抗淤堵试验)

这些准则,大部分是70年代和80年代初期的一些专家提出来的。他们在太沙基粒状材料反滤准则的基础上通过室内模拟试验或已建工程的调查研究基础上提出来的。根据多年的实践经验,在一般情况下,土工织物起到了反滤排水的作用,但也有一些失败的例子。在这些例子中,有的是施工等原因造成的,也有的是设计上的失误,尤其是对一些特殊条件下,如双向水流(岸坡防护),土体结构疏松且结构不稳定的土体(如管涌类土或已发生管涌破坏的土体),以及应力环境等条件下设置土工织物滤层,往往因认识不足而导致反滤设计不当,或土工织物选择不合适,而发生淤堵和跑土等现象。为了合理选用土工织物,根据大量工程的实践经验和根据《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T225—98)总结了一套方法可供参考,但应结合本地实际情况进行应用。在应用过程中,首先要了解和掌握土工织物的性能指标和功能。

4.2 土工织物的性能指标和功能分析

近几年,土工织物材料发展迅速,大量应用于岩土工程。土工织物是土工合成材料之一。1998年11月由水利部发布的行业标准“水利水电工程土工合成材料应用技术规范 SL/T225-98”3.1.2中介绍了四大类:即土工织物、土工膜、土工特种材料和土工复合材料,各有其独特的用途。我们最常见的用于堤坝护坡工程的土工布,主要有各种厚度规格的模袋布、 $150 \sim 600 \text{ g/m}^2$ 短纤无纺土工布(分涤纶和丙纶二类)和 $120 \sim 400 \text{ g/m}^2$ 长丝纺粘土工布,其中比较适合堤防达标工程的护坡土工布,常见的是 $200 \sim 400 \text{ g/m}^2$ 涤纶短纤无纺土工布和 $150 \sim 350 \text{ g/m}^2$ 的涤纶长丝纺粘土工布,现作一简单介绍,供工程界技术人员合理选用。

4.2.1 堤防护坡材料的主要类型及技术指标

一、涤纶短纤无纺布土工布

表4—1 涤纶短纤无纺布土工布

规格 (g/m ²)	幅宽 (m)	厚度 (mm)	纵横向强度 (N/5cm)		有效孔径 (O ₉₅)	垂直渗透系数 (cm/s)
			纵向	横向		
200	4~6	2.7	330	380	0.13	(1~5) × 10 ⁻¹
250	4~6	2.9	430	500	0.10	(1~5) × 10 ⁻¹
300	4~6	3.1	580	650	0.08	
350	4~6	3.3	630	750	0.07~0.08	
400	4~6	3.5	750	800	0.07~0.08	

以上产品面积的重量偏差率±6%；

对产品纵横向强度指标，根据国家标准规定应以纵向或横向强度中较小的数据作为该产品所达到的强度指标。

二、长丝纺粘土工布（涤纶）

表4—2 长丝纺粘土工布（涤纶）

规格 (g/m ²)	幅宽 (m)	厚度 (mm)	纵横向强度 (N/5cm)		有效孔径O ₉₅ (mm)	垂直渗透系数 (cm/s)
			纵向	横向		
150	4~5	1.5	450	350	0.10	(1~5) × 10 ⁻¹
250	4~5	1.9	650	410	0.095	(1~5) × 10 ⁻¹¹
250	4~5	2.2	800	550	0.095	(1~5) × 10 ⁻¹
300	4~5	2.6	950	650	0.09	(1~5) × 10 ⁻¹
350	4~5	3.0	1100	750	0.08	(1~5) × 10 ⁻¹

根据国家标准规定，以纵横向强度中较小的数据，作为该产品所达到的强度指标。

三、土工模袋布

1. 目前常用的品种有：混凝土型、砂浆型；按其成型区分有：矩型、梅花型、哑铃型等，成块的拼接为柔性形式较多。
2. 成型厚度：10—100cm；
3. 单幅织物宽度：180—190cm，可拼缝；
4. 抗拉强度>1800N / 5cm；

四、机织无纺复合土工布

复合型式为机织230g / m²加无纺150g / m²；其主要指标为：

- 重量：380g / m²；
- 强度：纵横向均大于2500N / 5cm；
- 有效孔径：1 × 10⁻²mm；
- 垂直渗透系数：0.07—0.08 cm / s；

五、编织无纺复合土工布

复合型式为丙纶编织布230g / m²，无纺布150g / m²，其主要指标：

- 重量：380g / m²；
- 强度：纵横向均大于1500N / 5cm；
- 有效孔径：0.08—0.1m.m；
- 垂直渗透系数：1 × 10⁻²cm / s

六、机织土工布

以230g / m²为代表，其性能指标见表4—3。

表 4—3 江苏远大新纺织联合发展有限公司

测试项目	单位	试样数	平均值	测试标准	
质量	g/m ²	10	232	GB/T13762-92	
厚度	mm	10	0.52	GB/T13761-92	
抗拉强度	纵向	N/5cm	5	3873	测试手册
	横向	N/5cm	5	2940	
延伸率	纵向	%	5	36	
	横向	%	5	28	
梯形撕裂强度	纵向	N	5	1256	GB/T13763-92
	横向	N	5	1005	
顶破强度	N	5	5767	GB/T14800-93	
刺破强度	N	5	757	测试手册	
落锥穿透直径	mm	5	7	测试手册	
孔径O ₉₅	mm	3	0.065	GB/T14799-93	
垂直渗透系数	cm/s	3	3.43E-03	测试手册	

4.2.2 对堤坝护坡工程选用土工织物的建议

一、选择品种类别：

土工织物有五大基本功能：即防护、隔离、排水、过滤与加筋等，其中机织土工布作为加筋的功能更为突出，这是由于它的强度较大的原因。而无纺土工布过滤和排水功能较强，选择土工织物首先要从其所需功能去考虑，然后再选择合理的、合适的材料。

从北京的堤防工程来看：一般都是斜坡式的块石护岸和护坡工程，在各类块石护坡下面加铺土工布作为反滤或排水的情况是较多的，也有少量土工模袋布作为坡面防护，有采用复合土工布作为坡面防止渗漏的。由于大范围、大面积作为反滤和排水之用，因此应以选择无纺土工织物为主，对个别受力较大的场合，也可选用机织土工布，对要求强度较高的加筋作用，又要求有很好的渗透滤水性能时，也可选择机织无纺复合土工布。

土工织物的反滤作用应满足两个基本要求：

1. 防止发生管涌，其孔隙不能太大；
2. 保证水流畅通，其孔隙又不能太小。

两者要求是互相矛盾的，设计者就是要根据某项工程被保护土体的特性，选用一合适孔隙和渗透性，又有足够强度的土工织物。

由于反滤试验是一种相当复杂，且很费时间的试验；因而对中小型工程常以反滤设计准则(保土性、透水性、防堵性)进行反滤设计。但对大型工程，除了以反滤设计准则设计外，还应进行反滤试验加以检验。

具体、细致的设计方法，可参照前面提及的设计准则进行：一是美国陆军工程师团的准则；二是我国水利部标准“水利水电工程土工合成材料应用技术规范—SL / 225—98”

的反滤准则。请注意：对于粘粒含量 $>50\%$ 的土料，则 O_{95} （或称 O_e ） $<0.21\text{mm}$ ；对于 $d_{85}<0.074\text{mm}$ 的土料，不宜采用土工织物作滤层。此外，对于编织型土工织物保土性能可以采用以下规定：

1. 粘粒含量大于 10% 的粘土、壤土，若覆盖保护层块大 $(0.4\text{m}\times 0.6\text{m})$ ，缝隙小（如预制件）的条件下，可采用 $O_{90}\leq 10d_{90}$

2. 粘粒含量小于 10% 的砂性土，若覆盖保护层块大 $(0.4\text{m}\times 0.6\text{m})$ 、缝隙小（如预制件）的条件下，可采用 $O_{90}\leq (2-5)d_{90}$ ；浪高小于 0.6m 时，取大值，否则取小值。

（注： O_{90} —表示编织土工织物的等效孔径）。

所以，土工织物作为反滤材料，其有效孔径就是关键性的指标。

注意：被保护土料的粒径级配对选用土工织物孔径有很大影响。在《堤防工程设计规范》中，特别强调逐段逐项做土工试验，提出颗粒分析曲线。当级配过于均匀（不均匀系数 $C_u<2$ ）或过于不均匀（ $C_u>6$ ）的无粘性土或少粘性土，尤其是粒径均匀的粉砂，在渗流作用下，很容易发生管涌（故选用土工织物孔隙时要严格一些）。如果难以选用合适的土工织物时，可在土工织物与被保护土之间铺设一层砂料，既可解决被保护土高低不平（如粉砂加砂礅）的弊病，又可改善反滤效果。有时在土工织物上面也要铺些砂料，以防止覆盖块石（或预制件）的滑动及块石刺破土工织物。以上措施要视实际情况酌定。总之，使用土工织物要防止淤堵又不允许发生管涌。

表4—3 反滤用无纺土工织物的综合指标

指 标	针刺厚度	热粘簿型
质量(g/m^2)	200~500	80~100
厚度(m. m)	2.5~5.0	0.45±
窄条拉伸强度(N/5cm)	250~700	干态75~170 湿态50~130
撕裂强度(N)	200~600	
顶破强度(N)	500~1000	
有效孔径 O_{95} (m. m)	0.08~0.12	<0.06
垂直渗径系数(cm/s)	$5\times 10^{-2}\sim 5\times 10^{-1}$	$5\times 10^{-1}\sim 2.5\times 10^{-1}$
层面渗透系数(cm/s)	$5\times 10^{-2}\sim 3\times 10^{-1}$	
孔隙率(%)	>90	

二、确定土工织物性能指标的要求：

为了使土工织物真正起到反滤作用，设计时，一是符合反滤准则，二是具有足够强度。根据近几年实用的经验，这里简要提出一点建议，即：在确定和选择土工织物时主要应考虑抗拉强度、有效孔径和渗透系数三大指标，且应特别重视。其余指标可参见后面附表各项，由各工程单位视具体情况酌情考虑。

1. 对抗拉强度的选择：

主要是满足施工期间铺设块石或重物时受力的需要，土工织物所具备的强度应当至少达到和超过在施工搬运或铺设中不受破坏，并能相应承受土、砂、石块的压力或冲击作用。经过多年实践证实：一般大江大河的护坡工程至少应采用 $300\text{g}/\text{m}^2$ 以上的短纤无纺土工布，其对应的抗拉强度为 $600\text{N}/5\text{cm}$ 左右。或采用 $250\text{g}/\text{m}^2$ 以上的长丝纺粘土工布，其相应的抗拉强度为 $550\text{N}/5\text{cm}$ 。有关试验资料成果参阅附表。

2. 关于有效孔径的确定：

应按土工织物使用地点坡面表层土壤的砂粒（直径）大小来确定：参阅SL/T225—98规范来应用，反滤材料应满足保土性、透水性、防堵性的反滤准则。设计时可按2.2.2.2中的保土性准则、透水性准则、防堵性准则三条所列出的公式进行复核。

由于许多堤坝工程缺少详尽的土壤颗粒分析曲线, 或者对砂土粒子结构物理力学资料不全, 可是工程又急于上马。这时, 建议按细砂土质和粘性土两类情况选择应用“A”或“B”两类土工织物。

“A”类(砂性土): 对细砂土质反滤的要求较高, 一律可按小的有效孔径来考虑, 从严要求土工织物的厚度、重量和渗水性: 例如要求有效孔径 $O_{90} < 0.08\text{mm}$, 这个指标在一般情况下, 各种土壤结构都能适应。

“B”类(粘性土), 凡粘粒含量大于 35% 以上的粘性土质堤坝, 它的护坡反滤要求稍低一些, 采用土工织物的有效孔径可选在 $0.07 \sim 0.2\text{mm}$ 之间, 也就是说: 粘土质护坡土工布的渗透系数可适当放宽, 对它的要求可用厚度, 重量和强度三个指标来控制。

3. 关于渗透系数的选择:

为提高反滤要求和排水效果, 水利工程选用的土工布按高一些的标准提出指标, 目的是既达到反滤或排水要求, 又达到较高强度标准。按目前生产厂家的实际水平来说, 无纺土工布能够在控制有效孔径的同时, 使它具有较大的渗透系数, 能够真正做到“保土性、透水性、防堵性”三个要求。例如无纺土工布垂直渗透系数可控制在: $(1 \sim 8) \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 左右。

综上所述: 较为理想的、良好的无纺土工布应具有下列指标:

- I / 平方米克重 $300 \sim 400\text{g/m}^2$ (长丝可改为 $200 \sim 350\text{g/m}^2$)
- II / 抗拉强度 $> 600\text{N/5cm}$;
- III / 有效孔径 $O_{90} < 0.08\text{mm}$;
- IV / 垂直渗透系数 $> 1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$;

土工织物的幅宽, 为方便施工又减少搭接损失, 一般应大于 4m , 或最大达到 6m 。以上是遵照“水利水电工程土工合成材料应用技术规范 SL/T225—98”的要求, 以及近几年采用土工织物实践的经验而提出的一点建议, 供目前大量的堤坝护坡工程、水闸护底工程以及有关的岩土工程中最常遇到的反滤排水工程设计者参考。

4.3 几个特殊条件下的反滤问题

4.3.1 岸坡防护系统的反滤

岸坡防护系统中设置反滤层, 是用来保护岸坡, 以防止水的侵蚀破坏。水的侵蚀作用是由以下因素导致的: 雨水的冲击和径流作用; 波浪动力作用; 岸坡地下水排泄时的流动作用。

防止波浪直接作用需要较重的物体, 如石块。此外, 设置在石块和岸坡间的滤层可起到一定的作用, 如: 粒状滤层的粗砾部分可对石块起到补充作用, 并均化波浪对岸坡的冲击。但是, 滤层的主要功能是阻止土粒在水从岸坡流向水体的过程中通过石块之间的孔隙被冲刷带走。

如果岸坡防护系统中使用粒状滤层, 则应包含粒度渐增的若干层, 每一层都做为其下伏一层的反滤。由于土工织物具拉伸强度, 不会在石块上发生移动, 因此可利用单层土工织物来代替若干层粒状滤层。但是, 这种设计有一个严重的缺点: 石块间的土工织物不能保土, 在二相流作用下, 会前后移动。因此, 当水向外流动时, 土工织物会逐渐

脱离土体。在每一次土工织物脱离土体时，土受不到保护，因此向外水流会使滤层附近的土工结构物解体，其结果是，不能形成合适的土体骨架以控制细粒的移动。如果滤层并未被设计可允许更多的细粒通过，进入水体，则土粒会聚集在滤层内，使土~滤层系统的渗透性随时间而降低。然后，在水位迅速下降时（常发生于渠、塘、水库），整个岸坡防护系统就会由于岸坡内水压力来不及消散，无法与水体水压力保持平衡而失稳破坏。因此，维持土工织物与土紧密接触是非常重要的。这可以通过在土工织物上加铺一层骨料来实现。这种骨料粒径应足够小，以能为土工织物提供相对均匀的压力，同时又应足够大到使其通过石块之间孔隙的流失最少。如果有必要的话，可以在第一层之上再铺一层粗骨料，做为石块护面和第一层骨料之间的滤层（可考虑在石块和骨料之间用大网孔的土工格栅做为反滤层）。骨料层还有其它的好处：可保护土工织物不被石块损坏，还能防止土工织物因受到穿过石块孔隙之间的阳光的紫外线幅射作用而损坏。

4.3.2 有裂缝的粘土隔水层后的反滤

反滤常用于坝工中，包括砾石排水体与压实土之间，以及岸坡防护（如前所述）。另外，对于坝工来说还有一种情况较为特殊，而该情况也存在于将粘土用做水力隔水层的其它结构物。在分区式坝中，紧贴于粘土下游侧的滤层，其功能一般与那些位于压实土和粗粒粒状材料之间的滤层相似，但是，如果粘土发生裂缝（常见于坝内），就希望滤层能起到阻止粘土颗粒随水流穿过裂缝而使粘土受到冲刷的作用，它能够阻止粘土的进一步破坏，通常这种破坏会导致溃坝。

位于坝内粘土区下游侧的滤层实际上的作用与“常规滤层使用条件”相同，但是一旦粘土发生裂缝，滤层就处于液体悬浮土粒中。当然，裂缝区滤层的渗透性会由于粘土颗粒的聚集而明显下降。但是，这种渗透性的降低仅对滤层表面的一小部分有影响，因此，它对滤层的整体作用影响不大。

由于无法预测粘土裂缝的位置，因此在粘土隔水层上设置均匀滤层是很重要的。从这个观点来说，严格控制施工质量，并细心安装的土工织物一般要优于粒状滤层，后均匀性会受到铺设过程的影响。

4.3.3 交通荷载下的滤层

交通荷载的一般性质是“反复荷载”，且作用迅速。当荷载在饱和或近饱和土体（具高孔隙水压力）上运行时，会有两种有害影响：①明显降低土的剪切强度，使土及土颗粒趋向于移动；②形成高水力梯度，引起主体外部水突然流向或穿过滤层（如果有滤层的话）。因此，在每一次交通荷载运行时，水都趋向于将土颗粒带过滤层。一次荷载（如车轮移动）仅持续几分之一秒，在这样短的时间里，土粒移动距离不长。但是，经过数千次荷载运行后，土粒的移动就足以通过或进入到滤层内。一般认为，对于交通荷载作用的情况，厚层滤层（如砂或很厚土工织物）比薄层滤层更好。Raymond（1982）建议其最小单位面积质量应为 $700\text{g}/\text{m}^2$ 。如果土工织物的孔隙率为 90%，则需聚丙烯织物的最小厚度为 8mm，聚酯的最小厚度为 5mm。

4.3.4 有关土工织物滤层生产和施工及抗蚀性反滤的要求

生产和施工要求

在土工织物滤层生产和施工中，一般有以下四点要求：

1.一致性：这是至关重要的，一个滤层的属性必须与整个区域的滤层保持一致。如果滤层在某个区域内失效，可能会导致重大的破坏。尤其是用在大坝粘土心墙后的滤层，如果在某区域内存在有过大的开孔，且如果粘土心墙在此区域开裂，则滤层将不可能阻止大坝心墙的破坏。对于土工织物滤层，尤其是由合成纤维制成的，其大面积范围内的一致性能得到保持，因为它们的制造是按现代的质量控制程序进行的，然而，因为它们较薄，且有伸展性，土工织物滤层往往在某个位置或某个区域的开孔径大于其它区域的开孔径。如施工过程中，土工织物易被刺破或撕裂，从而导致开孔尺寸突变。

2.连续性：滤层在整个区域需保持连续性是至关重要的，滤层中单一的不连续，会造成重大的土体侵蚀（“管涌”）。由于制造过程中有现代的质量控制，当送到现场的土工织物存在有缺陷，如孔洞时，该土工织物将会被弃用。但在土工织物滤层的铺设过程中，由于不正确的搭接和施工设备的撕破均会造成不连续性。此外，土工织物滤层铺设完毕后，接下来的施工工序（如在土工织物滤层上铺放和压实粒状滤层材料）有可能破坏已安装的土工织物，且诸如此类的破坏是难以察觉的。

3.接合紧密：施工铺设中，如果土工织物与基土结合不紧密，则会给迁移的细粒留下了淤聚的空间。此外，土工织物滤层作为复合排水系统的一部分是比较容易的，但应注意保证滤层与土体之间结合紧密。

4.易于滤层安置：依据应用的形式，粒状滤层的安置要比土工织物滤层容易。但也有例外：在陡坡上，如渠道、填土边坡，放置粒状滤层较困难，放置土工织物滤层较容易。但在滑坡体修复中，如果在不稳定的主体内开挖沟槽，并在沟槽内放置土工织物滤层，且用砾石填充，是相当困难的，然而不用土工织物仅用砂去填充沟槽是较容易的，也可以起到过滤和排水的作用。

4.4 抗蚀性要求

象所有的岩土结构或系统一样，滤层暴露在外部活动条件下，这些外部活动因素将会逐渐使滤层发生改变，并可能损害滤层的完整性。所以在设计使用期内，一般要求滤层对这些外部活动必须具有充分的抗蚀性，这些外部活动包括：侵蚀、应力、地震、化学物、野外爆破和时间。

4.4.1 侵蚀

对于土工织物滤层，其抗侵蚀能力是不容怀疑的，但它们对磨损较敏感。例如，在堤岸防护系统中，土工织物滤层与粗粒土相接合，或在铁路轨道上，土工织物与碎石相接触，这些地方都要求土工织物具有抗磨损性。

4.4.2 应力

滤层在施工和使用期间,将承受一定的应力。如在施工时,土工织物可能被刺穿和撕裂。设计中应考虑到这种风险,除了对土工织物的抗抓强度、抗拉强度、抗刺穿强度(顶破强度)和抗爆强度提出要求以外,还应考虑到使用期间所受的应力对土工织物的影响:

一、在高压应力下,对于无纺土工织物(尤其是针刺类的)则是很容易被压缩,这将造成三个方面的影响:①当无纺土工织物被压缩时,其过滤环开孔尺寸降低;②其水力传导性将会随着土工织物厚度的减少而降低;③在压应力作用下,针刺无纺土工织物会被深深压入土工网格内的隧道,从而损害土工网格的排水能力。

二、在岩土结构中产生的拉应力会改变土工织物滤层的开孔尺寸,目前尚无一些数据可以用来定量此影响程度。

三、剪应力对土工织物本身影响不是太敏感,但会导致边坡上土工织物与其它接触材料之间存在一个低的界面摩擦角,这可能会造成不稳定问题。因此在使用土工织物滤层和其它土工合成材料的充填边坡衬砌系统设计中,应考虑到这个问题。

四、抗震性:从直观上看来,土工织物的抗震性较好,因为它们不可能液化。但地震对土工织物滤层会造成拉伸破坏。

五、化学性:土工织物的纤维对一些化学物质较敏感,如合成纤维中的聚合物能够吸收且易被某些溶剂(出现于特殊废物的贮埋处)所破坏;聚丙烯对柴油较敏感。此外由于与新鲜混凝土相接触,也可能会造成聚脂分解。

六、抗露天暴晒能力:土工织物的抗露天暴晒能力有限,从有关土工织物在野外暴露条件下降解分析的文章中可以看出,土工织物在野外暴晒的时间不能超过几个星期,在这段时间之后,土工织物内的纤维开始变质,这将会严重地降低其力学性能,且改变其过滤特性。利用天然聚合物和安定剂所组成的聚合材料制作纤维,这种纤维所织成的土工织物在6~18个月后,将近乎完全变质。大多数天然纤维的变质过程比合成材料更快。

七、耐久性:粒状滤层的耐久性要远长于岩土工程结构物的设计使用期是毫无疑问的。对于土工织物的耐久性,一直还在研究。从1958年,土工织物已经在永久性的工程中被用作滤层,已超过40年。土工织物滤层用在土坝中是1970年,也就是30年多以前,用于法国的Valcros大坝。最近的调查表明,自从被设置后,该土工织物还处于较好的状态,且它们作为滤层的性能仍令人满意。

第五章 结论与展望

5.1 结论

综前所述, 本论文通过试验及多年的实践经验分析, 得到如下结论:

1. 国标和水利部的设计准则, 适用于静荷载单向水流条件, 应用此反滤准则时应注意:

(1) 对于粘粒含量 $>50\%$ 的土料, 则 O_{95} (或称 O_e) $<0.21\text{mm}$; 对于 $d_{95}<0.074\text{mm}$ 的土料, 不宜采用土工织物作滤层。

(2) 对于编织型土工织物保土性能可以采用以下规定:

粘粒含量大于 10% 的粘土、壤土, 若覆盖保护层块大 $(0.4\text{m}\times 0.6\text{m})$, 缝隙小(如预制件)的条件下, 可采用 $O_{90}\leq 10d_{90}$

粘粒含量小于 10% 的砂性土, 若覆盖保护层块大 $(0.4\text{m}\times 0.6\text{m})$ 、缝隙小(如预制件)的条件下, 可采用 $O_{90}\leq (2-5)d_{90}$; 浪高小于 0.6m 时, 取大值, 否则取小值。

2. 当级配过于均匀(不均匀系数 $C_u<2$)或过于不均匀($C_u>6$)的无粘性土或少粘性土, 尤其是粒径均匀的粉砂, 在渗流作用下, 很容易发生管涌, 对土工织物的选用要慎重。如果难以选用合适的土工织物时, 可在土工织物与被保护土之间铺设一层砂料, 既可解决被保护土高低不平(如粉砂加砂礅)的弊病, 又可改善反滤效果。有时在土工织物上面也要铺些砂料, 以防止覆盖块石(或预制件)的滑动及块石刺破土工织物。

3. 基于多年应用实践的总结和分析, 得出一般大江大河的护坡工程至少应采用 $300\text{g}/\text{m}^2$ 以上的短纤无纺土工布, 其对应的抗拉强度为 $600\text{N}/5\text{cm}$ 左右。或采用 $250\text{g}/\text{m}^2$ 以上的长丝纺粘土工布, 其相应的抗拉强度为 $550\text{N}/5\text{cm}$ 。

4. 在缺少土壤颗粒分析或者砂粒物理力学参数指标时, 建议按砂性土和粘性土两类情况选择应用“A”或“B”类土工织物。

“A”类(砂性土): 对细砂土质反滤的要求较高, 一律可按小的有效孔径来考虑, 从严要求土工织物的厚度、重量和渗水性。在一般情况下, 有效孔径 $O_{90}<0.08\text{mm}$, 这个指标各种土壤结构都能适应。

“B”类(粘性土), 凡粘粒含量大于 35% 以上的粘性土质堤坝, 它的护坡反滤要求稍低一些, 采用土工织物的有效孔径可选在 $0.07\sim 0.2\text{mm}$ 之间, 也就是说: 粘土质护坡土工布的渗透系数可适当放宽, 对它的要求可采用用厚度、重量和强度三个指标来控制。5. 水利工程一般选用无纺土工布垂直渗透系数可控制在: $(1\sim 8)\times 10^{-1}\text{cm}/\text{s}$ 左右。

6. 岸坡防护系统的反滤

岸坡防护系统中设置的反滤层可利用单层土工织物来代替若干层粒状滤层。石块间的土工织物不能保土, 在二相流作用下, 会前后移动。这可以通过在土工织物上加铺一层骨料来实现。这种骨料粒径应足够小, 以能为土工织物提供相对均匀的压力, 同时又应足够大到使其通过石块之间孔隙的流失最少。如果有必要的话, 可以在第一层之上再铺一层粗骨料, 做为石块护面和第一层骨料之间的滤层(可考虑在石块和骨料之间用大网孔的土工格栅做为反滤层)。骨料层还具有保护土工织物不被石块损坏, 防止土工织物因受到穿过石块孔隙之间的阳光的紫外线辐射作用而损坏等优点。

7. 对于有裂缝的粘土隔水层后的反滤

位于坝内粘土区下游侧的滤层实际上的作用与“常规滤层”使用条件相同, 但是一旦

粘土发生裂缝，滤层就处于液体悬浮土粒中，此时应在粘土隔水层上设置均匀滤层，并严格控制施工质量，细心安装土工织物。

8. 交通荷载下的滤层

交通荷载的一般性质是“反复荷载”，且作用迅速。所以对于交通荷载作用的情况，要选用厚层滤层（如砂或很厚土工织物），建议采用的最小单位面积质量应为 $700\text{g}/\text{m}^2$ 。如果土工织物的孔隙率为 90%，则需聚丙烯织物的最小厚度为 8mm，聚酯的最小厚度为 5mm。

9. 在实际生产和施工过程中，土工织物的使用要做到：一致性、连续性、接合紧密易于滤层安置。

10. 在设计使用期内，一般要求滤层对这些外部活动必须具有充分的抗蚀性、抗磨损性及使用期间所受的应力对土工织物的影响（高压应力、拉应力、剪应力、抗震性、化学性、抗露天暴晒能力及耐久性）最小。

5.2 发展前景

国外对土工织物的各方面都进行了深入研究，并取得了重大成果，尤其在土工织物滤层的性状、反滤机理和反滤准则、性能要求等方面也作了精辟的理论和试验上的分析和比较。我国在这方面还是个空白。我相信，随着科学技术的发展，在不久的将来一定能够填补这项空白。今后还必须进一步加强科技创新、科学地、合理地、有效地应用土工合成材料，防止低水平重复，并且不断加强科学研究提高设计水平，严格施工质量，重视已建工程管理和观测，将我国的土工织物研究和应用工作提高到一个新水平，以在工程建设和防汛抢险中发挥更大的作用。

附表一

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

产品名称及规格: 机织土工布 (230g/m²)

生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

样品编号: 4#

报告编号: TG98-359

测试项目	单位	试样数	平均值	测试标准	
质量	g/m ²	10	232	GB/T13762-92	
厚度	mm	10	0.52	GB/T13761-92	
抗拉强度	纵向	N/5cm	5	3873	测试手册
	横向	N/5cm	5	2940	
延伸率	纵向	%	5	36	
	横向	%	5	28	
梯形撕裂强度	纵向	N	5	1256	GB/T13763-92
	横向	N	5	1005	
顶破强度	N	5	5767	GB/T14800-93	
刺破强度	N	5	757	测试手册	
落锥穿透直径	mm	5	7	测试手册	
孔径O ₉₅	mm	3	0.065	GB/T14799-93	
垂直渗透系数	cm/s	3	3.43E-03	测试手册	

附表二

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

产品名称及规格: 无纺土工布 (250g/m²)

生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

样品编号:

测试项目	单位	最大值	最小值	试样数	平均值	标准差	变异系数	
质量	g/m ²	287	261	10	277	9	3.2%	
厚度	mm	3.13	2.97	10	3.06	0.03	1.0%	
抗拉强度	纵向	N/5cm	485	465	5	479	9	1.9%
	横向	N/5cm	615	570	5	593	21	3.5%
延伸率	纵向	%	74	70	5	73	18.0	24.8%
	横向	%	87	83	5	85	31.6	37.2%
梯形撕裂强度	纵向	N	271	237	5	255	18	7.1%
	横向	N	314	240	5	277	32	11.4%
顶破强度	N	1840	1580	5	1717	131	7.6%	
刺破强度	N	504	466	5	483	19	4.0%	
落锥穿透直径	mm	6	4	5	5	0.8	17.4%	
孔径0.075	mm	0.1	0.07	3	0.08	0.015	18.3%	
垂直渗透系数	cm/s	7.30E-01	6.16E-01	3	6.88E-01	0.063	9.1%	

附表三

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

产品名称及规格: 无纺土工布 (300g/m²)

生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

样品编号:

报告编号:

测试项目	单位	最大值	最小值	试样数	平均值	标准差	变异系数	
质量	g/m ²	320	298	10	306	8	2.7%	
厚度	mm	3.43	3.03	10	3.21	0.09	2.7%	
抗拉强度	纵向	N/5cm	626	590	5	607	13	2.2%
	横向	N/5cm	758	695	5	722	26	3.5%
延伸率	纵向	%	83	80	5	81	1.1	1.1%
	横向	%	90	86	5	88	1.6	1.8%
梯形撕裂强度	纵向	N	330	271	5	302	22	7.1%
	横向	N	311	299	5	305	6	1.8%
顶破强度	N	2175	1785	5	1978	147	7.4%	
刺破强度	N	566	536	5	555	12	2.2%	
落锥穿透直径	mm	8	5	5	7	1.1	17.3%	
孔径0 ₉₅	mm	0.1	0.08	3	0.09	0.010	11.1%	
垂直渗透系数	cm/s	3.84E-01	3.78E-01	3	3.82E-101	0.003	0.9%	

附表四

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

产品名称及规格: 机织复合布 (350~390g/m²)

生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

样品编号: 1#

报告编号: TG98-356

测试项目	单位	试样数	平均值	测试标准	
质量	g/m ²	10	393	GB/T13762-92	
厚度	mm	10	2.36	GB/T13761-92	
抗拉强度	纵向	N/5cm	5	3261	测试手册
	横向	N/5cm	5	2772	
延伸率	纵向	%	5	39	
	横向	%	5	30	
梯形撕裂强度	纵向	N	5	1271	GB/T13763-92
	横向	N	5	1715	
顶破强度	N	5	6803	GB/T14800-93	
刺破强度	N	5	911	测试手册	
落锥穿透直径	mm	5	3	测试手册	
孔径O ₉₅	mm	3	0.065	GB/T14799-93	
垂直渗透系数	cm/s	3	4.03E-02	测试手册	

附表五

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

产品名称及规格: 无纺土工布 (350g/m²)

生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

样品编号:

报告编号:

测试项目	单位	最大值	最小值	试样数	平均值	标准差	变异系数	
质量	g/m ²	360	320	10	345	14	3.9%	
厚度	mm	3.32	2.91	10	3.07	0.16	5.1%	
抗拉强度	纵向	N/5cm	712	620	5	663	44	6.7%
	横向	N/5cm	802	637	5	718	63	8.8%
延伸率	纵向	%	83	70	5	74	5.3	7.1%
	横向	%	94	80	5	88	5.5	6.3%
梯形撕裂强度	纵向	N	358	290	5	325	26	7.9%
	横向	N	313	291	5	301	9	3.1%
顶破强度	N	2105	1790	5	1990	122	6.1%	
刺破强度	N	565	489	5	513	30	5.9%	
落锥穿透直径	mm	7	5	5	6	0.8	14.4%	
孔径0.075	mm	0.09	0.07	3	0.08	0.010	12.5%	
垂直渗透系数	cm/s	9.90E-01	9.53E-01	3	9.71E-01	0.019	1.9%	

附表六

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 长江口航道建设有限公司
产品名称及规格: 编织复合土工布 (400g/m²)
生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司
样品编号: BC-0501

报告编号: TG98-356

测试项目		单位	最大值	最小值	试样数	平均值
质量		g/m ²	440	417	10	428
厚度		mm	2.23	2.00	10	2.15
抗拉强度	纵向	N/5cm	2523	2348	5	2379
	横向	N/5cm	1903	1735	5	1810
延伸率	纵向	%	19	15	5	17
	横向	%	15	14	5	15
梯形撕裂强度	纵向	N	729	451	5	639
	横向	N	624	488	5	544
顶破强度		N	7250	6960	5	7127
刺破强度		N	1074	763	5	885
落锥穿透直径		mm	8	7	5	8
孔径O ₉₅		mm	0.080	0.070	3	0.080
垂直渗透系数		cm/s	5.05 × 10 ⁻²	3.41 × 10 ⁻²	3	4.23 × 10 ⁻²

附表七

上海勘测设计研究院科研所
土工合成材料测试报告 (抄件)

委托单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

产品名称及规格: 无纺土工布 (400g/m²)

生产单位: 江苏远大新纺织联合发展有限公司

样品编号:

测试项目	单位	最大值	最小值	试样数	平均值	标准差	变异系数	
质量	g/m ²	463	422	10	436	18	4.2%	
厚度	mm	3.43	3.3	10	3.34	0.05	1.5%	
抗拉强度	纵向	N/5cm	925	758	5	832	66	7.9%
	横向	N/5cm	925	776	5	836	55	6.5%
延伸率	纵向	%	78	68	5	71	3.9	5.5%
	横向	%	84	76	5	79	3.1	4.0%
梯形撕裂强度	纵向	N	365	327	5	347	15	4.4%
	横向	N	397	376	5	385	8	2.2%
顶破强度	N	2665	2535	5	2599	47	1.8%	
刺破强度	N	743	650	5	687	38	5.6%	
落锥穿透直径	mm	3	2	5	2	0.45	20.3%	
孔径 _{0.075}	mm	0.08	0.06	3	0.07	0.010	14.3%	
垂直渗透系数	cm/s	3.53E-01	3.23E-01	3	3.39E-01	0.015	4.5%	

参考文献

1. 朱诗鳌.1986, (3), 水利水电技术, 土工织物在国外水利工程中的应用。
2. 刘宗耀.1993, (1), 水利管理技术, 土工合成材料近期发展概况。
3. 徐又建.1897, (2), 山东水利科技, 土工织物在水利工程中的应用。
4. 徐又建.2000, 黄河水利出版社, 水利工程土工合成材料应用技术。
5. 1990, 中国水利学会岩土力学专业委员会/水利部长江水利委员会, 全国土工织物在防洪抢险中的应用经验交流会文集。
6. 陶同康.1999, 中国水利水电出版社, 土工合成材料与堤坝渗流控制。
7. 1994, 中国建筑工业出版社, 土工合成材料应用手册。
8. 1993, 水利电力出版社, 水利工程土工织物设计指南。
9. 陆士强, 王钊, 刘祖得.1994, 水利水电出版社, 土工合成材料应用原理。
10. 陶同康.1984, 水利水电技术, 用化纤布作排水滤层的初步研究。
11. 刘宗耀.1987, 水利水电技术, 土工织物滤层的设计。
12. 王钊, 陆士强.1991, 水利发电学报, 土工织物滤层淤堵标准的探讨。
13. 速宝玉等, 1990, 河海大学学报, 无纺土工织物在不同压力下孔径分布与透水性的研究。
14. 陈星柏, 1990, 水利学报, 关于土工织物反滤层的渗透准则。
15. 1998, 中华人民共和国水利部, 水利水电土工合成材料应用技术规范。
16. 2000, 中国建筑工业出版社, 土工合成材料工程应用手册。
17. 1991, 混凝土连锁板开发应用课题组, 混凝土连锁板开发应用试验。
18. 刘宗耀, 2001, 全国第五届土工合成材料学术会议后续论文集。
19. J. P Giroud, 2001, Lesson Learned from failures Associated with Geosynthetics, The proceeding of the Fifth Conference On Geosynthetics (Selected papers from foreign countries)。
20. 吴昌瑜等, 2001, 粒状滤层与土工织物滤层, 全国第五届土工合成材料学术会议后续论文集。
21. 2000, 土工合成材料工程应用手册 (第二版), 中国建筑工业出版社。
22. 潘贤德, 朱知辉, 朱德伦, 1996, 土工织物在堤坝护坡上的合理选用。
23. 1985, Geotechnical Fabrics Report。
24. 1981, Giroud JP. Designing with Geotextiles. Matériaux et Constructions。
25. 1982, Heerten G. modern technique in Bank Protection. International Symposium "Polders of the world"。
26. 1987, John NWM. Geotextiles. Chapman and Hall. New York。
27. 陶同康, 鄢俊等, 2001, 土工合成材料抢护堤防管涌破坏的应用研究, 南京水利科学研究院、国家防汛抗旱总指挥部办公室。
28. 丛蔼森, 2000, 土工膜袋在北京河道堤防中的应用, 全国第五届土工合成材料学术会议论文集, 现代知识出版社。

致 谢

首先衷心感谢我的导师任树梅副教授。回顾三年来的研究生生活，任老师不仅在学业上予以悉心地指导，在生活上也给了我无微不至的关怀，可以说，我之所以取得今天的成果，是离不开任老师的帮助的，在此谨向她致以深深的谢意。从她那里，我不仅学到了许多科学知识，也学到了许多人生的道理。任老师对工作认真负责、精益求精的精神将是我永远学习的榜样！杨培岭教授、冯绍元教授，也对我的学习和生活给予了很大的帮助。在此一并向他们致以衷心的感谢！

我在论文编写过程中，还得到了马德昌、孟庆义、吴文勇、樊霞、肖娟、顾涛等同志的大力支持和帮助，在此，特向他们表示致谢！感谢农水教研室和研究生部的老师和研究生们给予我无私的帮助。

值此，对于在过去近 3 年的学习和生活中关心和支持过我的所有老师、同学和朋友表示诚挚的谢意！

签 名：

2002 年 5 月