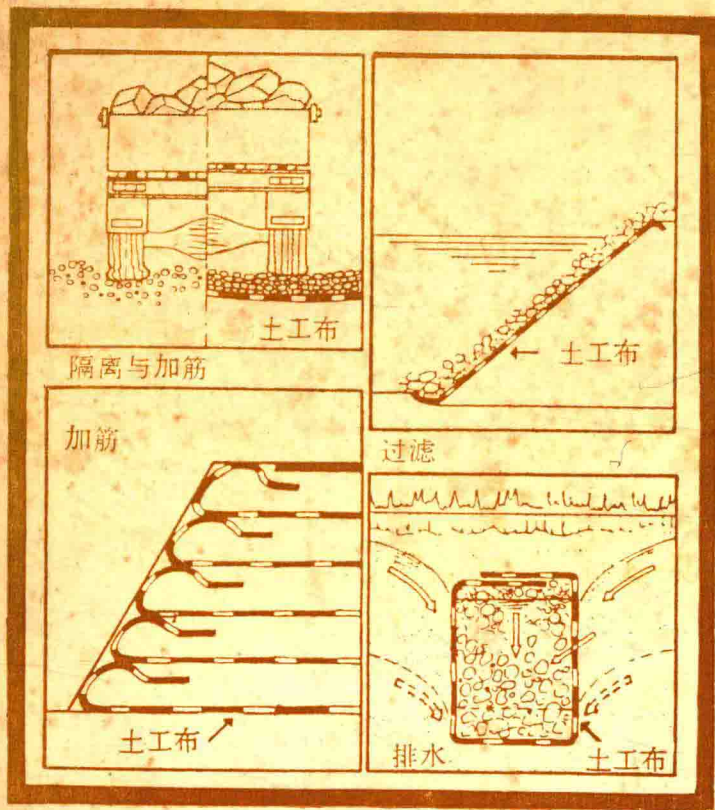


土工合成材料



译文集

YI WEN JI

交通部第三航务工程局科研所
土工合成材料技术协作网

土工合成材料译文集

审 定 伍荣官 叶柏荣

编 辑 蔡武强 郑 瑜

交通部第三航务工程局科研所
土工合成材料技术协作网

编辑说明

土工合成材料是一种新型的工程材料。国外在工程上应用已将近 30 年历史。最近十多年以来,土工合成材料的应用范围日趋扩大,且品种与数量不断增长,已为许多设计、施工部门和专家、学者所重视。为促进“土工合成材料”这门学科在我国的传播、应用与发展,我们特编辑这本《土工合成材料译文集》。

本译文集由二大部分共 36 篇论文组成。第一部分选自 1988 年 10 月在日本福冈召开的《加筋土理论与实践国际岩土工程讨论会》(The International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement 1988)会议论文集中有关土工合成材料加筋技术的论文 22 篇;第二部分选自国外期刊和样本近期刊登的主要关于土工网格、格片的设计施工和港工方面等应用文章 14 篇。论文涉及的内容广泛,具有一定深度,反映了国外目前在该领域的水平。可供水利、道路、土建、港口等工程设计、科研、施工人员、有关大专院校的师生和土工合成材料生产单位从事新产品开发的科技人员借鉴与参考。

本译文由交通部第三航务工程局科研所编辑出版。在编辑过程中得到了土工合成材料技术协作网的支持,网长刘宗耀同志亲自作了《序言》,还得到了杨孙胜、程哲安、王育人和洪曼华高级工程师及刘光明工程师的帮助。在此一并表示感谢。鉴于编、译者水平有限,错误或不妥之处,恳望读者批评指正。

一九八九年六月

交通部第三航务工程局科研所
土工合成材料技术协作网

序 言

加筋土的应用已经有几千年的历史。在我国的《史记》和《汉书》中，都有关于利用薪、柴、竹等物料，与土石结合，修造堤防和堵口工程的记载。使用柴、薪、草、麻等材料修造土坯和土墙在我国也有悠久的历史。在巴比伦，三千多年以前就曾把植物纤维掺在土中修建庙宇。在欧洲，十七世纪曾利用稍捆加固软弱地基，利用树枝和泥土围海造田。古代加筋土的特点，主要是以植物纤维作为加筋材料。二十世纪初叶，在美国的一座土坝中，利用金属构件分层加固下游坝坡，开始越出了植物纤维加筋土的范畴。近代加筋土的理论，始于六十年代初期。法国人Henri Vidal曾做了一个简单的试验，把少量木钎花放入砂样中，利用三轴仪进行测试。试验结果证明，掺有钎花的砂土比纯砂土的强度大了很多倍。1963年他发表了研究成果并提出设计理论。1965年按照他的理论在法国的Praegeres建成了一座加筋土公路挡土墙。1969年F. Schlosser和Vidal发表了一篇题为“加筋土”的论文，奠定了加筋土的理论基础。到了七、八十年代，加筋土的应用取得了迅速的发展。

植物纤维加筋土的最大缺点是易于腐烂，易于虫蚀，不能耐久。虽然目前仍在沿用，但使用范围多限于简陋的房屋以及河防堵口等比较次要或临时性的工程。近代加筋土发展起来以后，加筋材料则以金属为多，如镀锌钢带，铝合金带，不锈钢带，以及钢筋混凝土构件等等。使用的范围也扩大到房屋建筑、土石坝、护坡、挡土墙、软弱地基等各个方面。金属加筋的主要缺点是容易锈蚀，抗御化学侵蚀的能力较弱，需要埋设较厚的金属带，以防止由于锈蚀造成的强度降低，从而提高了造价。

进入七十年代，土工合成材料取得了很快的发展。实践证明，以合成材料作为土的加筋材料，具有很多优越性。例如造价低廉、不易腐烂、重量轻、易于运输和操作、抗御化学和生物侵蚀的能力较高；与植物纤维相比，具有较高的强度且易于连接。七十年代初期，已开始利用合成纤维织物来加强道路的软弱路基，以后又逐步发展到加固铁路路基，其它建筑物地基、挡土墙、土堤、土坝等较为大型的和永久性的工程。进入八十年代，很多新型的土工合成材料如土工网，土工格栅等相继问世。进一步加快了合成材料加筋土的发展速度。虽然合成材料也具有某些缺点，如老化，弹模较小，延伸率较大，有蠕变现象等，但这些问题目前正在研究改进。从总的发展趋势来看，作为土的加筋材料，合成材料具有极广阔的前途。

自从“加筋土”这一门新的学科建立以后，在国际上和国内曾经召开过多次专业性会议。1988年10月在日本福冈召开的“加筋土理论和实践国际岩土工程讨论会”(The International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement)是一次水平较高的国际性学术讨论会。会期三天，共有260多位代表参加。其中除日本代表以外，还有24个其它国家的60多位代表。共提出论文96篇。国际土力学与基础工程学会主席B. Broms和国际土工织物学会日本分会主席福冈分别作了“织物加筋挡土墙”和“加筋土—东方和西方”两篇重要报告。另外还有“试验与材料”方面的论文21篇；“浅层与深层基础”论文14篇；“斜坡与挖方”论文18篇；“填土”论文21篇；“墙结构”论文20篇。在这些

论文中，有我国代表的论文五篇，香港代表的论文一篇，我国代表与澳大利亚代表共同提出的论文一篇。这次会议的论文，内容丰富，水平较高，反映了当前加筋土的发展趋势。

我国交通部三航局科研所的叶柏荣同志曾参加了这次会议。回国后，立即组织该所情报室，进行论文的翻译工作。根据论文的内容，水平及我国工程界的需要，共选译了22篇有关土工织物加筋技术的论文；此外还选译了国外期刊近期发表的主要关于土工网格的设计与施工和港工方面应用的论文14篇。他们的这项工作是非常及时的，对于迅速传播信息，介绍先进技术，促进“土工织物”这一门科学在我国的发展，作出了卓越的贡献。除了对他们表示衷心的感谢以外，还希望今后参加国际学术会议的同志们，向他们这种“只争朝夕”的精神学习。最后向三航局科研所对我们事业的支持表示敬意。

刘宗耀

1989年4月27日

目 录

第一部分

布筋土挡土墙	(1)
施工对加筋土中土工格片特性影响的评价	(24)
土工布测试方法标准化在荷兰的进展	(30)
工程法拉伸试验中土和织物的互相作用	(36)
目前对加筋土筋材长期工作性能的认识	(42)
ISO 对土工织物机械特性试验标准化的进展情况	(49)
用拉伸试验测定土体与加筋体的相互作用	(54)
孔洞上土工合成材料支承的土层的承载力	(59)
铺在管道下层状土中的土工合成材料	(65)
桩网法设计准则的一些要点	(70)
滑动线场评估路堤基底上用格型基垫加强后软土地基承载力的改善	(76)
土工布和土工格片加筋的未铺面道路的设计	(83)
加固围海造陆表层的实验研究	(90)
在重复荷载作用下的软粘土上采用土工格片柴排基础	(96)
两段埋设仪表的加筋土边坡现场特性	(102)
土工织物加筋土码头岸壁的设计与施工	(107)
一种超轻型填料——聚苯乙烯泡沫塑料	(113)
RBSM 分析法在加筋土中的应用	(119)
通过模型振动台试验测定加筋路堤抗震性能	(125)
用竹横梁与聚合物网加固超软地基	(132)
护面对无纺布加固粘土陡坡的作用	(138)
英国对聚合物加筋体长期性能的要求	(144)

第二部分

坦塞格片在加筋土中应用与设计原理	(149)
泥炭地路堤中土工织物的实测性能	(160)
对土工织物加固泥炭地路基的分析	(173)
用土工织物作反滤层	(187)
一座用合成纤维织物锚固的码头填土墙	(204)
土工布加强路堤的分析与计算	(217)
用土工织物加固船厂地基	(228)
印尼勿拉湾港用模壳垫作码头岸坡的护坡	(230)
码头板桩墙后连续排水过滤层的设计	(234)
威尔明顿港南排泥区围堤工程	(244)
用土工织物加强的建筑物设计	(250)
采用土工织物对土补强的方法	(254)
聚合物格栅工法	(267)
利用土工织物建筑防波堤的经济性	(274)

布筋土挡土墙

[新加坡] 布鲁姆斯 新加坡 南洋工学院 著

蔡武强 译 叶柏荣 校

提 要

本文评述了布筋土挡土墙的设计,提出了计算作用在直立墙或倾斜墙上水平土压力的方法以及估算土工布所受的力,铺设层距与长度的方法。研究了土工布铺设长度逐层增长或逐层减少时墙的稳定性的。

1. 引 言

为了提高路堤与基础的承载力,或者为了减少作用在板桩上或挡土墙上的水平土压力,约在二十五年前就开始了土中铺设高强度纤维的研究。在图1中描出了用土工布加强的用L形混凝土构件建造的挡土墙与路堤。此时土工布有两个作用,即减少引起破坏的力与提高墙的稳定性的。L形构件的主要作用就是保护土工织物,使其不受人为破坏或日光照射。如本文所述,作用在墙上的水平土压力很低,故L形构件可以做得很轻。而且在墙面上还可喷射混凝土。

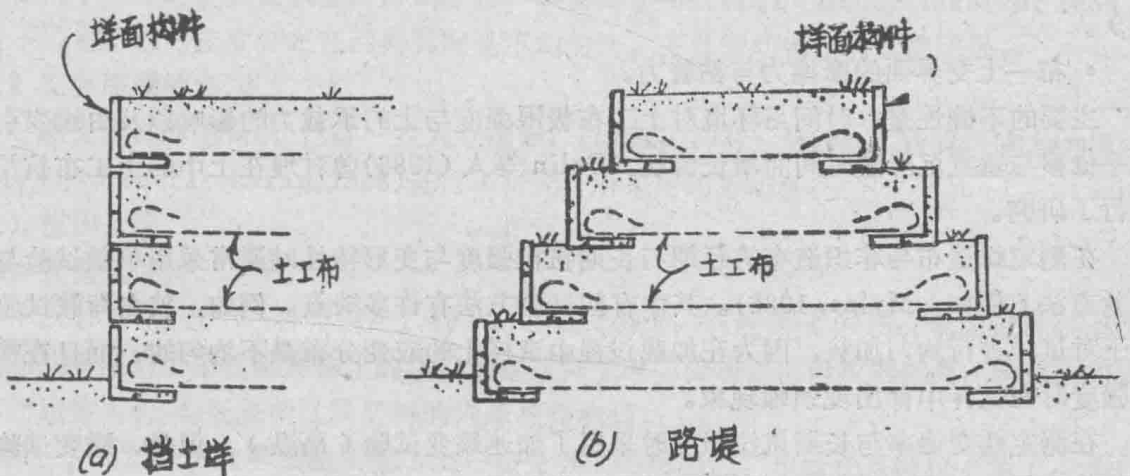


图 1 土工织物作为土中加筋材的应用

在土中作筋材使用的合成材料有好几种,例如,聚丙烯、聚酯、聚乙烯、聚酰胺与玻璃纤维。市场上出售的土工布,不论是织造的还是非织造的,品种很多。而且还有耐环境侵蚀的复合材料。

土工布在土中作筋材时与钢条或铝条相比,有这样几个优点:抗拉强度高,柔软,因

此,在沉降很大时不会受到影响。现有土工布抗拉强度已达到 400KN/m,甚至更大。如土工布不直接暴晒在太阳下,其耐用性是很高的。土工布表面面积很大,大得足以把力有效地传到土中。因此,所需的锚固长度很短。土工布作为土中的筋材使用时,由于不需要笨重的设备或熟练工人,因此,地基的加固费用要比用其他方法低。降低的费用,在某些情况下是很大的,可达40%甚至更高。

土工布作为土中筋材使用时的主要缺点与局限性是:为了发挥土工布抗拉强度所需变形很大;缺乏经验,尤其是对后面要讨论的长期工作性能;应防止受太阳暴晒,对聚丙烯来说,这点尤为重要。关于变形可以通过预拉方法减少。还有一些耐久性的问题(Van Zanten, 1986),而且当碎石作为回填材料时,土工布易受损坏。岩石棱角易刺穿土工布,从而降低布的抗拉强度。刺破应变也可以降低,但刚度实际上是不变的。因此,使土工布免受机械性损坏与化学损坏,也是很重要的。土工布也难于拼接,拼接缝的抗拉强度只有未拼接布的一半。

本文将评述土工布在挡土墙后填土或路堤填土中用作筋材以降低水平土压力与提高稳定性的应用。根据土工布的强度与变形特性与布土间界面的摩擦力与粘着力,提出了挡土墙与高路堤的若干设计方法。

2: 土工布的强度与变形特性

2.1 应力——应变关系

对用作加筋土中筋材的土工布的强度与应力应变特性的测试方法进行了研究。特别重要的一些因素是:

- * 土工布在土约束条件下的短期与长期的抗拉强度;
- * 土工布在工作荷载,破坏荷载作用下的轴向应变,以及它是怎样受时间影响的(蠕变)。
- * 布—土交界面的摩擦力与粘着力。

主要的不确性是:时间与对土工布极限强度与土的承载力的影响以及由蠕变引起的水平位移与垂直沉降随时间而增长情况。Colin 等人(1986)曾对埋在土中的土工布抗拉强度进行了研究。

在测定织造布与非织造布的短期与长期抗拉强度与变形特性时通常采用单轴试验与双轴试验方法(例如, Myles, 1986)。其中有些试验方法有许多缺点。例如,狭条荷载试验法,难于对试样进行均匀加载,因为在加载过程中试样上的应变分布是不均匀的。而且在接近极限强度时在试样中部出现颈缩现象。

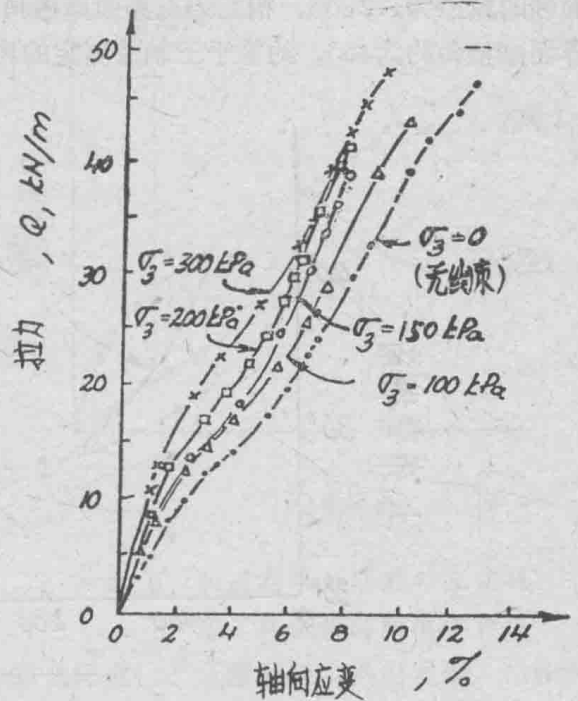
在测定蠕变速率与长期抗拉强度时采用了加速蠕变试验(高温)。但是,蠕变试验结果的外推不得超过两个对数循环时间,见Jewell与Greenwood(1988)的报告。

大家还知道,布放在土中时,其力学性能有所提高。例如,布的轴向应变随着土约束力的增大将大大下降。所以, McGown 等人(1981), El—Fermoui 与 Nowatzki 等人(1982), Andraws 等人(1984), Chandarsekaran(1988)都曾进行了约束抗拉试验。

El—Fermoui 与 Nowatzki(1982)曾采用了一种特别的盒子(63.5×63.5mm),使得在试验过程中法向压力作用在土工布上。在 McGown 等人(1981)与 Andrawes 等人(1984)所作

试验中, 是利用橡皮老虎使法向压力作用在埋在土中的布两侧。试验结果表明, 非织造布的刚度与抗拉强度随着约束压力的增大而增大。织造布的抗拉强度在约束条件下与无压约束条件下基本相同。约束能略为降低破坏时的应变, 同时增加刚度。约束的主要效应是在试验时减少试样横向收缩, 从而使应力在试样中的分布变得均匀得多。

Chandrasekaran (1988) 曾进行了无约束的与有约束的两种抗拉强度试验。试验结果表明, 织造布的抗拉强度稍低于单线的抗拉强度。这种差别一部分是由于试验时试样中应变分布不均匀引起的。有约束抗拉试验是放在一只直径为 300mm 的钢筒中进行的, 筒的内壁衬有橡皮, 使约束压力作用在沙上, 从而作用在埋在砂中的土工布上。布中应变分布状况用贴在布上的应变仪测定。图 2 表示织造聚脂布在不同约束压力 (100, 150, 200 与 300KPa) 作用下的应力应变特性。从图中可以看到, 布的轴向应变在约束压力增大时下降。在布的极限强度 30% 到 50%, 即工作荷载作用下, 布的轴向应变, 在约束压力为 300KPa 时, 仅为试样在无约束压力时应变的 40%~60%。试验数据表明, 土工布的极限强度未受约束压力的影响。



Christopher 等人(1986)研究了零跨度抗拉试验时的约束影响, 零跨度是指两夹具间的距离很小。零跨度抗拉试验所得试验结果非常不稳定, 因为应变分布在两夹具间是不均匀的。夹具滑动也影响试验结果。

图 2 聚脂织造布在不同约束压力时的拉力与轴向应变曲线(摘自 Chandrasekaran, 1988)

2.2 交界面摩擦角, ϕ_a'

土—布交界面摩擦角 ϕ_a' 已有一些人 (例如, Holtz, 1977; Myles, 1982; Miyamori et al, 1986; Chandrasekaran, 1988) 进行了研究, 所采用的方法有:

- (1) 拔出试验;
- (2) 直剪盒试验。

Holtz (1977) 设计了一种特制的 $1.10 \times 0.25\text{m}$ 直剪盒, 它能测试 0.15m 宽的试样。用压力袋施加法向压力, 用粘贴在布上的磁铁测定试样上应力分布。试验数据表明, 研究过的砂的交界面摩擦角 ϕ_a' 与用直剪试验所得的内摩擦角相同。

Myles (1982) 应用直剪试验研究了土—布交界面的摩擦力。布放在直剪仪下架上, 而砂放在上架上。研究表明, 交界面摩擦角随着布 (不论是织造的还是非织造的) 的类型不同而不同。

Miyamori 等人 (1986) 也用直剪试验研究了非织造布的土布交界面的摩擦力。他们使用了一个相当大的剪力盒 ($316 \times 316\text{mm}$)。据发现, 他们所得的交界面磨阻力 ϕ_a' 低于用三轴法与直剪法测定的值。如为密实砂土, 其交界面磨阻力仅为最高抗剪强度的 72% 到 87%。由于研究时所用非织造布厚度较大, 故为了发挥沿布面最大摩阻力, 所需相对位移相当大。

Chandrasekaran (1988) 也作了直剪试验以测定土—布交界面摩阻力。直剪盒的尺寸是 $100 \times 100 \text{mm}$ 。据发现, 所研究的棱角形砂的交界面摩擦角也随着法向压力的增大而减小, 即从法向压力较低(50KPa)时的 41° 增加到法向压力为 500KPa 时的 32° , 见图3。用排水三轴法测定的砂的内摩擦角为 39° 。因此, 交界面摩擦角随着约束压力的增大而下降是很显著的。还发现, 交界面摩擦角受布的孔径的影响。所研究的聚脂织造布的孔径约为 0.1mm , 而砂的粒径为 1.2mm , 相应的交界面摩擦角为 34.3° 。而棉的纱布的孔径为 1.0mm , 平均交界面摩擦角约为 40° , 约等于三轴法测定的内摩擦角(39°)。

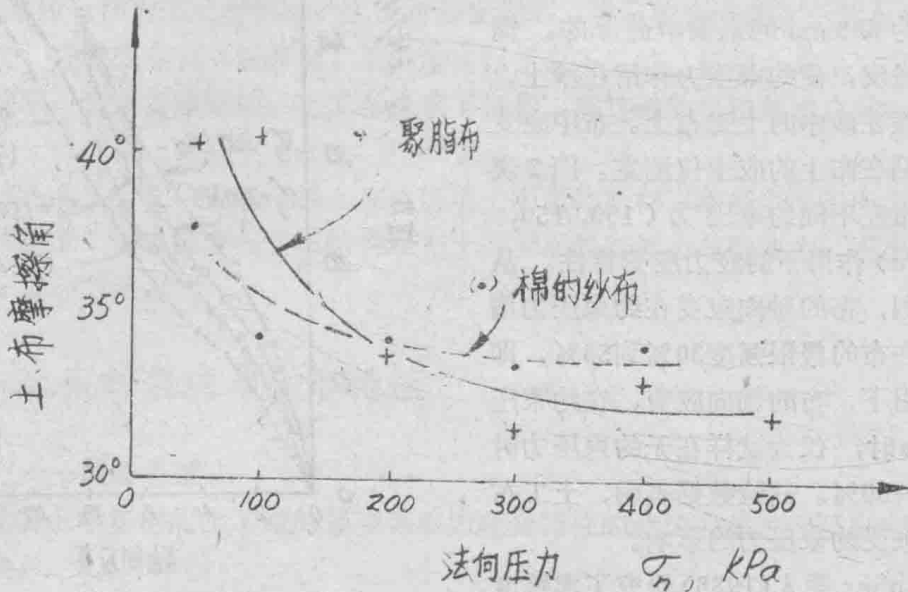


图3 交界面摩擦角随着法向压力增大而下降情况, 聚脂织造布与棉的纱布

3. 布筋土

布筋土工作性能可用三轴试验法测定, 见图4。在该试验中, 布在土中是按一层层水平铺放的, 见 Broms(1977)报告。这种试验方法最初是由 Schlosser 与 Long(1974)用来研究铝箔对砂强度与变形特性的影响。在试验时, 铝园片采用不同的层距, 砂采用不同的相对密度。试验结果表明, 砂的强度与变形特性都有明显的改善。观察到的破坏方式有两种: 一种是在低约束压力时, 在交界面摩擦力充分发挥后沿布面发生滑动破坏(图5)。在此情况下, 极限强度受内摩擦角所控制。加筋土抗剪强度可用显摩擦角来表征, 它大于土的摩擦角 ϕ_a' 。另一种破坏方式是, 在高压束压力下, 试样极限强度受铝园片抗拉强度所控制。在此情况下, 加筋土的极限强度可用表观有效粘聚力 C_r 来表征, 即

$$C_r = \frac{T}{D} \sqrt{K_p} \quad (1)$$

式中 T 代表筋材的抗拉强度(KN/m), D 代表筋材的垂直间距, K_p 代表被动土压力系数。摩擦角相当于有效内摩擦角 ϕ_a' , 见图5。

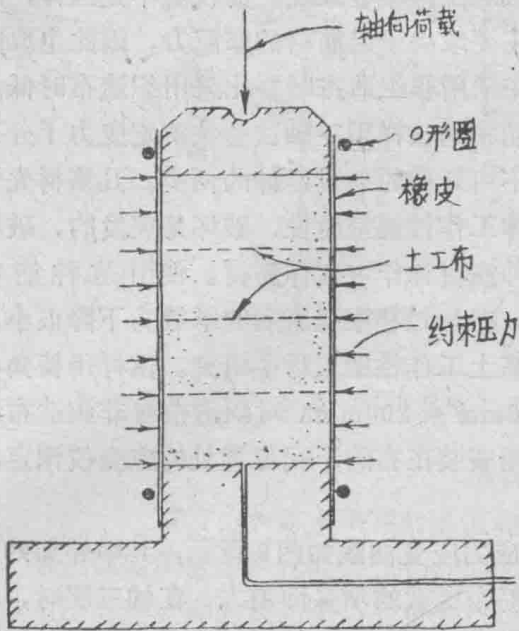


图 4 三轴试验，筋材为土工布

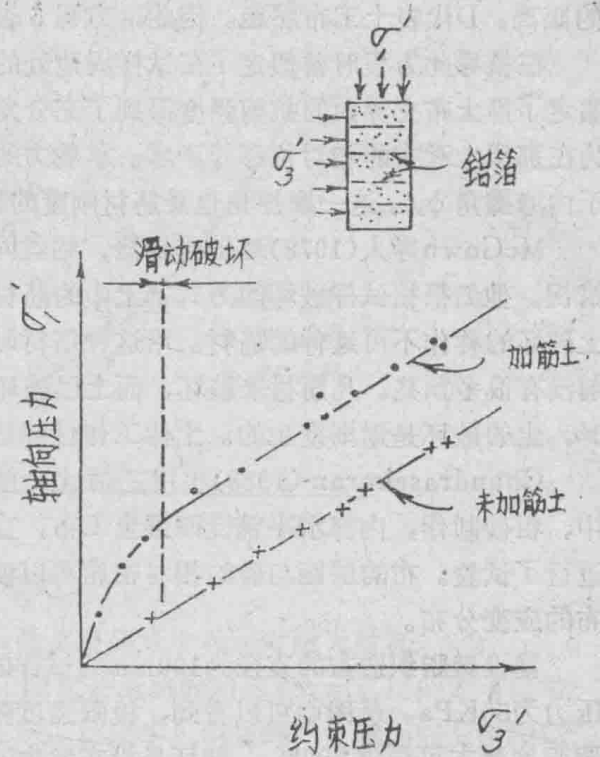


图 5 加筋与未加筋的砂土试样在三轴试验时的破坏曲线

Long 等人 (1983) 对铺有一层层水平圆铜片的试样进行了三轴试验。他们发现，沿铜圆片的应力分布是不均匀的。在靠近圆铜片边缘处的交界面摩阻力最大。在试样周边处的剪应力要比最高阻力低得多。中心处的阻力为零，因为对称，布与土间的相对位移为零。

Broms (1977) 对铺有土工布的试样进行了三轴试验以测定应力应度特性。在试验中，砂采用了不同的相对密度，土工布采用了不同层距。试验表明，圆柱形试样抗压强度随着铺设层距的减小而增大，也随着约束压力的增大而增大。可以看到，加筋提供的约束作用相当于约束压力提供的约束作用。接近土工布的土压力系数可用下式计算：

$$K_b = \frac{1}{1 + 2 \tan^2 \phi'_a} \quad (2)$$

式中 ϕ'_a 代表交界面有效摩擦角。

在两层土工布中间，沿试样水平面的剪应力因对称缘故等于零，故主动土压力系数 K_a 为

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (3)$$

在计算等效约束压力时，对水平土压力系数建议采用均值 K_{av}

$$K_{av} = 1/2(K_a + K_b) \quad (4)$$

于是沿土工布的垂直应力分布可用下式求出：

$$\sigma'_v = \sigma'_{vo} e^{-\frac{2 \tan \phi'_a}{DK_{av}} (r_0 - r)} \quad (5)$$

式中 σ'_{vo} 代表试样周边 ($r = r_0$) 处的垂直应力， ϕ'_a 代表有效内摩擦角， r 代表从试样中心起

的距离， D 代表土工布层距。因此，方程 5 表示垂直法向应力向试样中心迅速增大。

在推导此方程时曾假定了在试样周边处的土工布总拉力相当于均匀分布的约束压力，还假定了沿土布交界面的抗剪强度得到了充分发挥。但对试样中心来说，情况就不是这样，因为在那里土对布的相对位移等于零。承载力的增大主要取决于沿筋材的摩阻力，因此也取决于内摩擦角 ϕ_a' 。这一摩擦角也受筋材刚度的影响，在采用非织造布时要比采用织造布时低。

McGown 等人(1978)对铺有铝箔，铝丝网与无纺布的试样用三轴试验法测定应力了分布情况。他们根据试样破坏的方式把土中的筋材分成不可延伸的与可延伸的两类。凡筋材先于土破坏的称作不可延伸的筋材。用这种筋材时，土体工作性能呈脆性，破坏是突发的，破坏前没有很多预兆。凡筋材未破坏，而土已破坏，这种筋材称作可延伸筋材。使用这种筋材时，土的破坏是逐渐发生的。土体工作性能呈延性，在超过极限强度后的承载力下降很小。

Chandrasekaran (1988)也用三轴试验法对布筋土工作性能进行了研究。试样用棱角状中、粗砂制作，内部水平铺设园形土工布，直径 100mm 或 200mm。对织造布与非织造布都进行了试验。布的层距与砂的相对密席可以调节。用安装在布的不同位置处的应变仪测定沿布的应变分布。

铺设聚脂织造布的直径为 100mm 的试样的典型应力应变曲线如图 6 所示，其中外加约束压力为 50KPa。从图中可以看到，极限强度随着加筋布层数的增多而增大，在铺三层时，极限强度最大可超过 200%。破坏是沿布发生的滑动破坏。据发现，试样刚度受布以及发挥峰值强度所需的变形而增大。

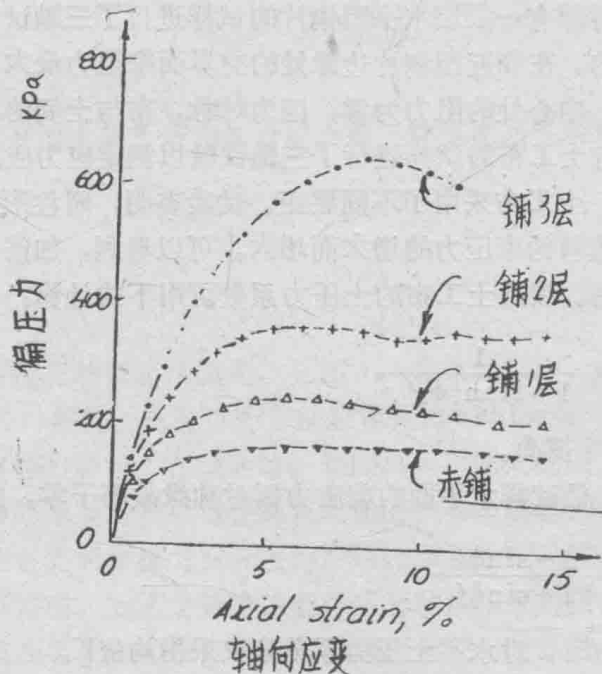


图 6 未铺的和铺有聚脂布的试样的应力—应变曲线，
约束压力 = 50KPa (摘自 Chandrasekaran, 1988)

加筋土强度在不同约束压力作用下随着层距的缩小而相对增大的情况下如图 7 所示。从图中可以看到，承载力也将随约束力的增大而增大。

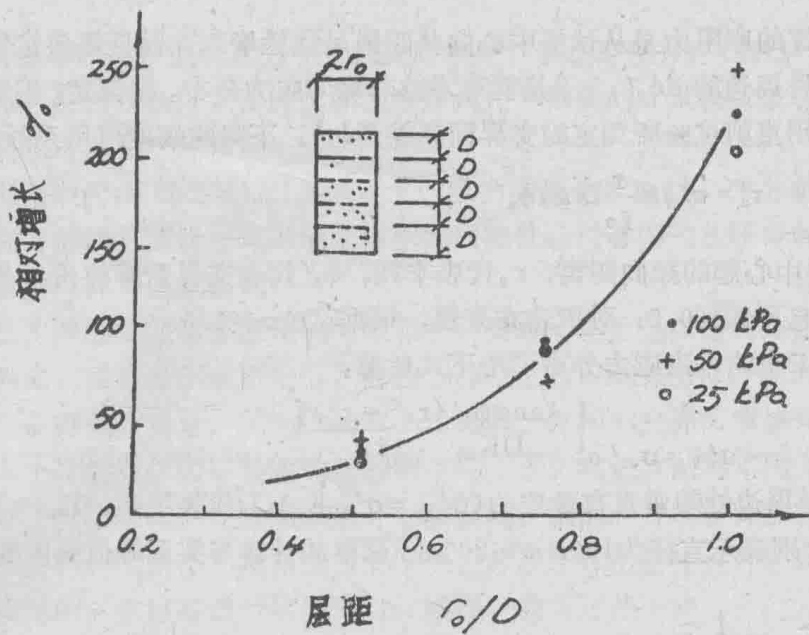


图 7 加筋土试样的最大轴向荷载随着层距减小而相对增大情况

铺设聚脂织造布的直径为 200mm 的试样应力应变关系曲线如图 8 所示。层间距可调节。铺设三层布的试样的最高强度受布的抗拉强度控制，从图中可以看到，当轴向应变超过 12% 时，承载力急剧下降。铺设一层布的试样的极限强度，与其说是受布的抗拉强度所控制，不如说是受内摩擦角 ϕ_1' 所控制。在超过最大阻力后，阻力下降很小。

沿布的应力分布如图 9 所示。从图中可以看到，布的轴向应变向试样中心逐渐增大。其

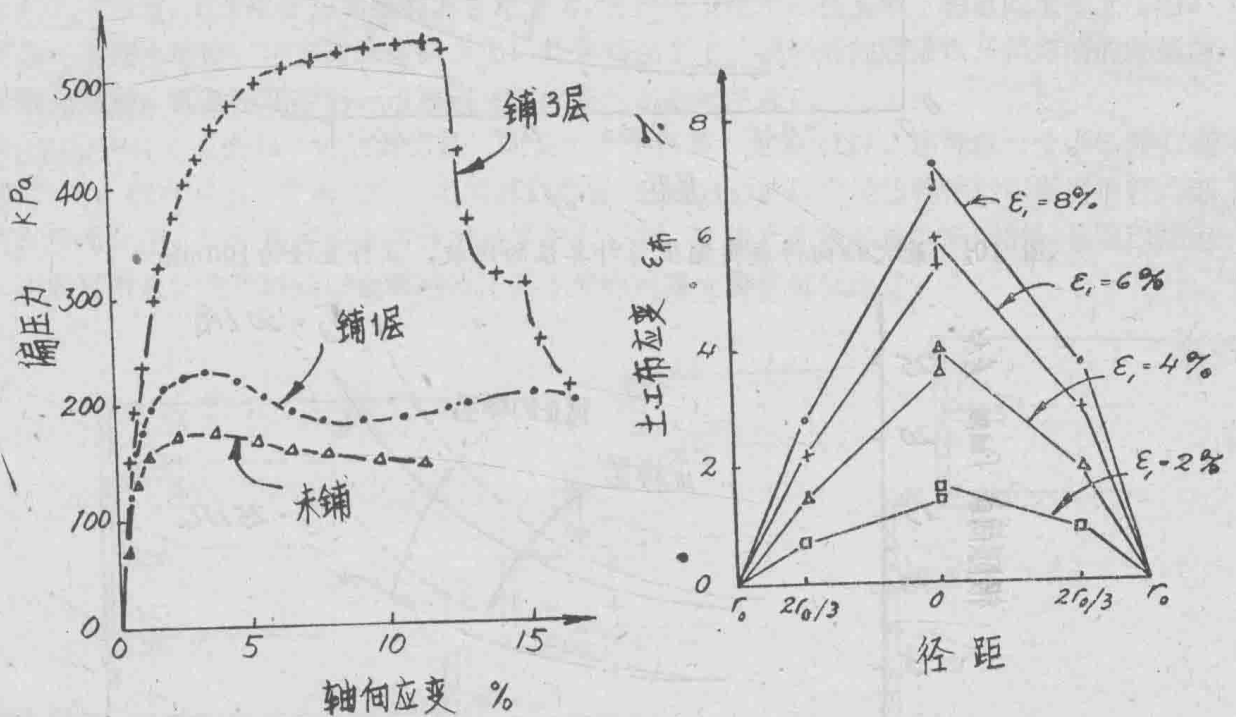


图 8 直径为 200mm 的三轴试样的应力应变关系

图 9 布中沿其半径的应变梯度典型曲线，试样中铺土工布三层

梯度相当于沿布的剪应力分布。最大剪应力与最大梯度出现在试样周边，因为在该处布土间相对位移很大。在试样中心，剪应力等于零，因为在该处布土间相对位移很小。

假定沿布发挥的摩阻力是从试样中心向其四周呈线性增大，而且还假定发挥的最大界面摩擦角是在试样周边的 $\alpha\phi_a'$ ，于是就可考虑非均匀应力分布。据测定，织造布的已发挥的摩擦角 $\alpha\phi_a'$ 小于用直剪试验所测定的界面摩擦角 ϕ_a' 。下降的幅度可用系数 α 表示。因此，

$$\tau_a = \sigma'_v = \frac{r}{r_0} \tan \alpha \phi_a' \quad (6)$$

式中 r 代表从试样中心起的径向距离， r_0 代表半径， ϕ_a' 代表界面摩擦角， α 代表下降系数，对无纺布来说，它可低到 0.5；对织造布来说，根据试验 $\alpha = 1.0$ 。

于是，沿土工布的垂直应力分布可用下式估算：

$$\sigma'_v = \sigma'_{vc} e^{\left[\frac{\tan \alpha \phi_a' (r_0^2 - r^2)}{DK_{av} r_0} \right]} \quad (7)$$

式中 σ'_{vc} 代表试样周边处的垂直有效应力 ($\sigma'_{vc} = \sigma'_{h0} K_a$)， D 代表层距， $K_{av} = Y_z (K_a + K_b)$ 。

图 10_a 与 10_b 分别表示直径为 100mm 与 200mm 试样的计算与实测峰值强度的比较，计算采

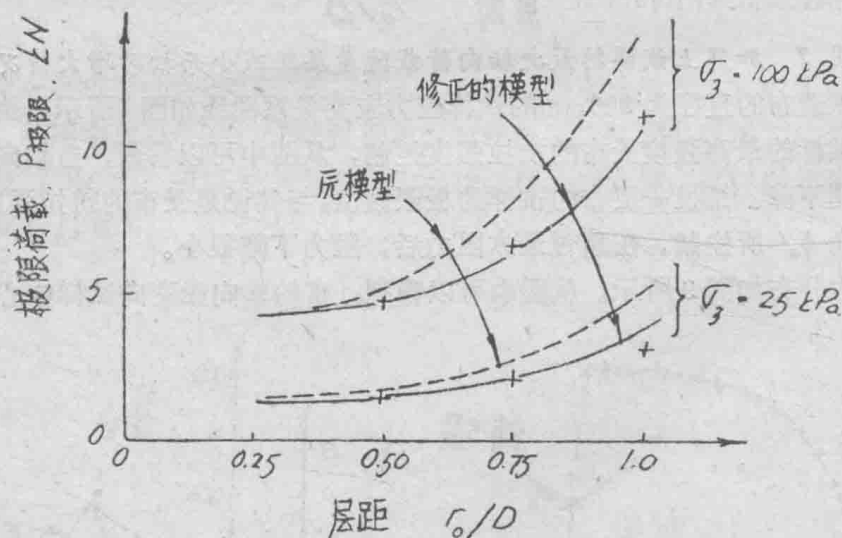


图 10_a 最大轴向荷载实测值与计算值的比较，试样直径为 100mm。

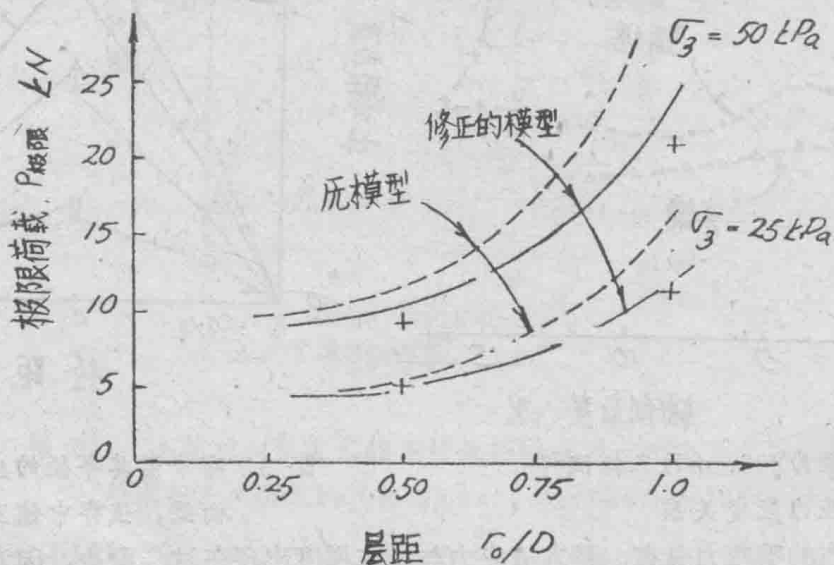


图 10_b 最大轴向荷载实测值与计算值的比较，试样直径 500mm

用方程 7。实测值与修正模型计算值吻合性比原模型计算值好得多。因此，可从试验数据看出，布与土的相对位移以及已发挥的交界面摩擦角是很重要的。试验成果表明，在布筋土挡土墙的设计中必须考虑相对位移。

还尝试了用有限元法 (FEM) 以及假定土的应力应变为双曲线，来分析布筋土试样中的应力分布。这种方法的主要缺点是不能考虑土的膨胀性。用有限元法所得的布筋土的强度的计算值太高，土刚度计算值也太高。

据发现，已发挥的交界面摩擦角 $\alpha\phi'_a$ 的系数，受布（不论是织造的还是非织造的）的品种的影响。据测定，由于非织造刚度低，故使用非织造布时的系数 $2(\nu = 0.45 \sim 0.55)$ 要比使用织造布的要低得多。而且，层距 D 的大小也影响已发挥的交界面摩擦角以及约束压力。

根据试样大小，约束压力以及布的抗拉强度的不同，破坏有两种不同方式。当约束压力低，层距大，则土沿布滑动而发生压缩破坏。据发现，轴向应变随着外加荷载的增大而逐渐增大。当约束压力高，层距小，则布撕裂而发生拉伸破坏。在发生这种破坏前没有任何破坏迹象，破坏是突发的。当试样进一步变形时，试样承载力迅速下降。

4. 挡土墙

4.1 设计原理

土工布可用作挡土墙后的筋材，以提高墙的稳定性和降低作用在墙上的水平土压力，见参考文献 Hausman(1976), Brom(1977), Ingold(1982) 与 Jones (1985)。布的层距主要取决于其长期强度，土布交界面的摩擦力或粘着力，也取决于作用在挡土墙上的总的水平土压力。在设计布筋土墙时，考虑布强度的变化，外加荷载变化，破坏时的后果以及损坏墙的补修与重建的费用，都是很重要的。这可通过部分安全系数来考虑。

L形构件（见图 11）的放置方法可以是一个个重叠（见图 11a），也可以一个个错开（见图 11b），也可以是二个或三个一组的混合放置（见图 11c）。L形墙体构件可以做得很轻，这将在后面介绍。L形构件的主要作用是保护土工布，免遭人为破坏或太阳照射。也可以把土工布向后折起，也可以铺以金属网再在其上喷以混凝土方法进行保护。

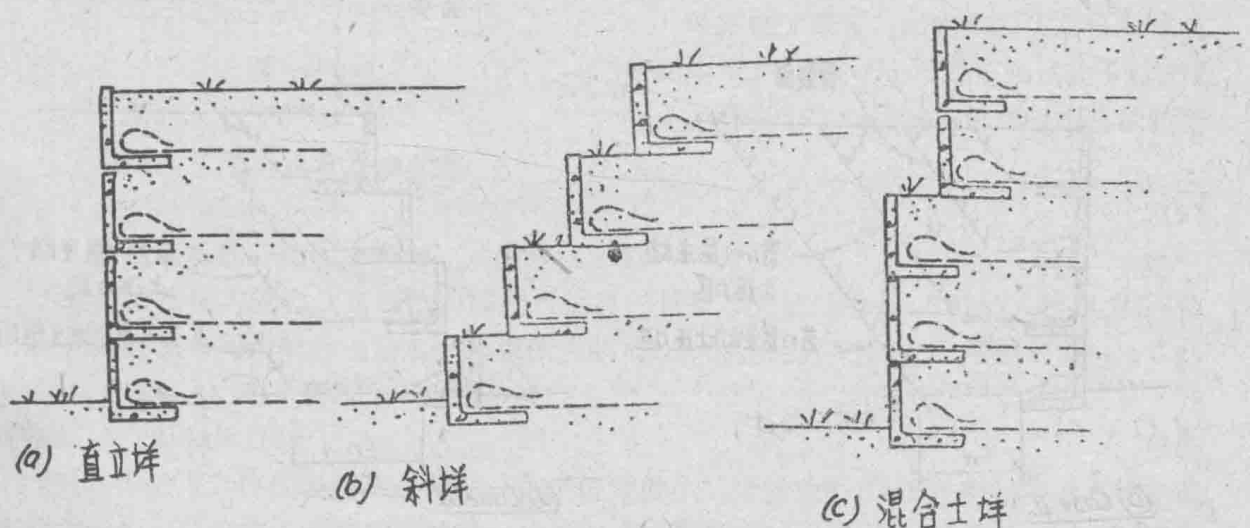


图 11 布筋土在挡土墙与边坡中的应用

回填材料通常采用颗粒土（砂、碎石或石块），因为交界面摩擦角大，它大致相当于土的残余内摩擦角。而且，也可采用粉砂、泥灰岩、硬粘土（见Tatsuoka等人，1986，Wichter等人，1986）。

土工布作为土中筋材的第一次应用可能是法国于1971年用这种方法建造高速公路。在美国第一次把土工布作为土的筋材是美国林业局于1274年在俄勒冈州的应用。Bell与Steward(1977)曾对布筋土挡土墙进行了模型试验与1:1试验。美国纽约州运输局曾建造过一座实验性布筋土墙，並进行了试验。美国科罗拉多州公路局也曾建造了一座布筋土墙(Bell et al, 1983)。澳大利亚的新南威尔士州市政府工程局在悉尼也曾建造过一座布筋土挡土墙，该墙长20米，最大高度为1.8米。在瑞典，Lindskog等人(1975)，Davidson与Ekroth(1975)，Holtz与Broms(1977)也曾对布筋土挡土墙进行了模型试验。在西德，Wichter等人(1986)曾对一座4.8米高的布筋土挡土墙进行了研究。在英国，例如John(1986)也对布筋土挡土墙进行了大量的研究。

根据土工布铺设长度与L形构件的位置，布筋土挡土墙基本上可分成四种类型，见图12。在图12a（类型I）中在挡土墙后土工布铺设长度从上到下一层比一层短。这种长度变化通常相当于布筋土挡土墙施工所需的挖掘形状。图中还描出当墙沿各层基底发生滑动破坏时所影响的土的体积，即主动区。当墙沿底层发生滑动破坏时，则将影响全部复盖层。在本类型中，破坏面呈阶梯形，而且沿着上层布底面滑动，见图。

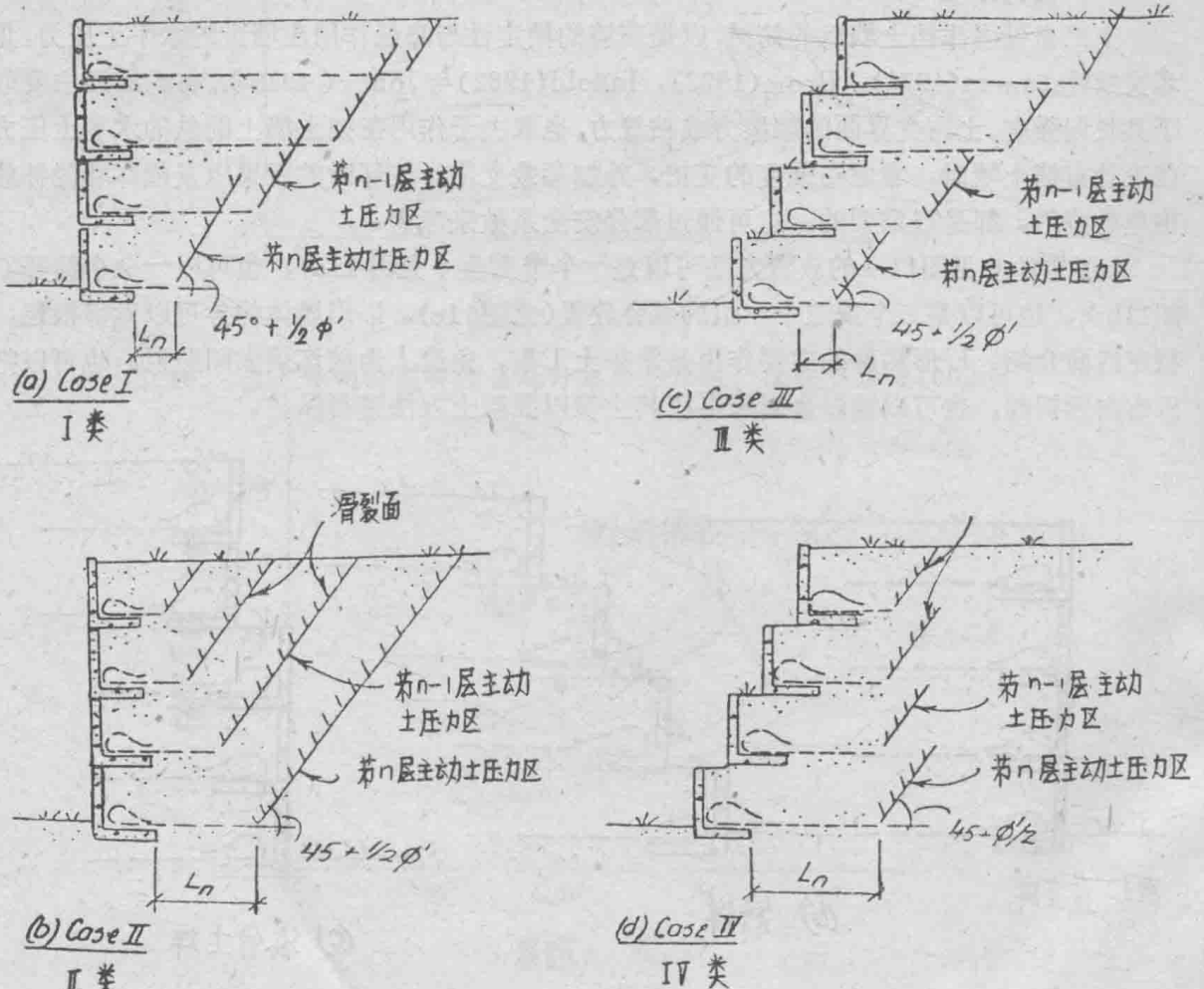


图 12 布筋土挡土墙（破坏机理）

在图12b(类型II)中,布的铺设长度从上到下一层比一层长。在本类型中滑动破坏所影响的土体积不受上复土工布的影响。在最低层处的滑裂面延伸至地面,其角度大致为 $(45^\circ + \phi'/2)$ 。应当指出的是,滑裂面的形状与角度也略受沿墙的摩阻力与墙的水平变形的影响。建议底层应设计得在墙筑到全高时能承受全部主动土压力,该时墙的摩擦力略而不计。

在图12c与12d(类型III与IV)所示斜墙中,L形构件是互相错开的。斜坡大大降低了作用在墙上的水平土压力。筋材铺设长度随着深度而递减,见图12c(类型III)。在本类型中分别考虑每排L形构件的稳定性是很重要的。在图12d(类型IV)中,各层布铺设长度随着深度增大而递增,所以各层所产生的滑裂面是重叠的。

4.2 应力分布

图13表示布筋土挡土墙的一个截面。由于所铺设布承受了部分水平土压力,故作用在墙构件上的水平土压力很小。铺土工布后所减少的水平土压力的大小与内摩擦角或沿布交界面的粘聚力有关,可通过作用在两层布间土体上的力平衡条件来估算,见图。对粘性土来说,回填土中水平土压力受孔隙水影响,所以是随时间而变化的。在施工期间,通常采用不排水抗剪强度,在使用期间则采用排水三轴试验或直剪试验测定的有效内摩擦角 ϕ' 。在暴雨期间,土中孔隙水增大,土工布的力也增大(见Tatsuoka等人,1986)。

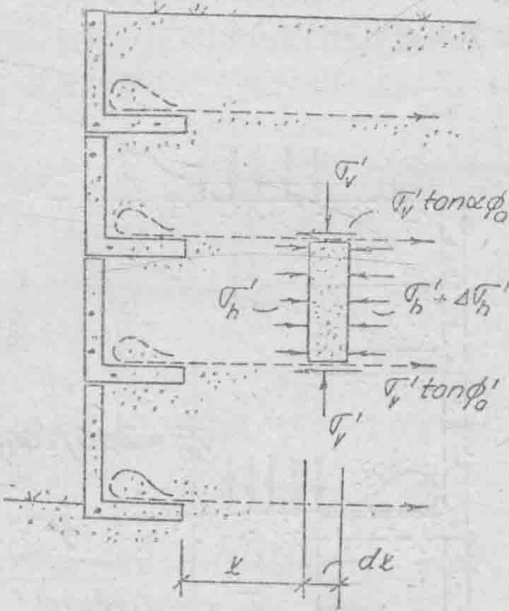


图13 布筋土中应力分布

$$f = \alpha C_u$$

(9)

式中 α 代表折减系数。对硬土来说,其值建议采用0.4到0.6。

于是,沿筋材的应力分布可按图13进行估算,见参考文献(Broms,1978)。摩阻力 f 与使作用在两层土工布间土单元上的水平约束压力从离L形构件距离 x 处的 σ'_h 增加到离 $(x + \Delta x)$ 处的 $(\sigma'_h + \Delta \sigma'_h)$ 。在平衡时

$$2fdx = Dd\sigma'_h$$

(10)

式中 f 代表摩阻力, D 代表层距。因此,这里假定发生的摩擦力 $(2fdx)$ 在两相邻层之间在高度 D 以内是均匀分布的。应当指出的是,作用在土中的垂直与水平土压力 σ'_v 与 σ'_h ,对颗粒土来说,其关系系数为 k_{av} ,即 $(\sigma'_h = k_{av}\sigma'_v)$,它比兰金主动土压力系数 k_a 稍高。在土工布

对粒状土来说,沿土工布的摩阻力 f 与有效法向压力 σ'_v 成正比:

$$f = \sigma'_v \tan \alpha \phi'_a$$

(8)

式中 $\tan 2\phi'_a$ 是土布交界面的摩擦系数。因此,在方程8中业已假定土与布间的相对位移足以充分发挥界面峰值摩擦阻力 $\alpha \phi'_a$ 。对织造布来说, $\alpha \phi'_a$ 相当于 ϕ'_a ,即土的有效界面内摩擦角(见Holtz,1977,1985)。对非织造布来说, $\alpha \phi'_a$ 可能小于 ϕ'_a ,这取决于需要发挥最大界面摩擦力所需的变形(Chandrasekaran,1988)。

对粘性土来说,沿布的阻力与不排水抗剪强度 C_u 有关, C_u 可用三轴试验(UU试验),现场十字板试验与无侧限压力试验测定。