

加筋粘土的抗剪强度特性

赵爱根

(水利电力部华东勘测设计院, 杭州)

一、前言

加筋土由填料和筋材组成。筋材侧限土体、承受拉伸变形的能力是通过土与筋材界面的应力传递效应来实现的。为保证有足够的界面剪应力, 工程界对填料作了限制, 一是小于 0.015mm 粒径的土重少于15%, 二是内摩擦角在 25° 以上^[1], 这就排除了使用粘土作填料的可能。一些学者试图打破这种限制, 李(K.L. Lee)对最优含水量时的压实粘土试样, 用聚脂薄膜加筋后进行压缩试验^[2], 结果发现设置筋材仅增大韧性, 不增加强度, 并推断加筋粘土在完全固结后再承受剪荷时, 加筋效果将是显著的, 与加筋砂类似。英戈尔德(T.S. Ingold)和米勒(K.S. Miller)用多种筋材(多孔塑料、纤维毡、非编织纤维及铝片)加筋粘土, 进行三轴不排水剪切试验^[3, 4], 结果同样发现加筋粘土的不排水抗剪强度低于未加筋时的值, 而他们热粘织物加筋的高岭土试样进行排水三轴剪切试验^[5], 则发现其强度高于未加筋时的值。因而使用粘土作填料的关键是搞清加筋粘土不排水抗剪强度下降的机理。

笔者认为用于加筋粘土的筋材应具有良好的透水性和较高的拉伸模量, 使其承担加筋和排水的双重任务。本文采用土工织物作为筋材, 对加筋粘土的强度特性作进一步研究, 主要研究加筋粘土应力应变关系, 加筋粘土不排水抗剪强度下降机理。并对土工织物和砂层复合加筋粘土作了初步探讨。

二、加筋粘土不排水剪切试验

加筋粘土实际工作状况既非完全不排水, 也非完全饱和, 为模拟不利工作情况, 本文用饱和加筋粘土试样进行无侧限抗压强度试验和三轴固结不排水剪切试验。

(一)试验材料及制样方法

1. 试验材料

粘土选用均匀性较好的苏州产高岭土, 其物理性指标见表1。重塑高岭土有效应力抗剪

表1

颗 粒 组 成 (%)			液 限	塑 限	塑性指数	比 重
>0.05mm	0.05~0.005mm	<0.005mm	w_L (%)	w_P (%)	I_P	—
3	20	77	69.5	31.5	38.0	2.62

强度指标 $c' = 0$, $\phi = 29^\circ$

土工织物选用上海工业用呢厂生产的针刺型无纺布, 该织物为有基型, 故拉伸模量较高。其特性指标见表 2, 织物的平面拉伸应力应变曲线见图 1。

2. 制样方法

将高岭土研成粉末状通过 0.6mm 筛子, 煮沸去除气泡后, 在磅秤式固结仪中加压固结一

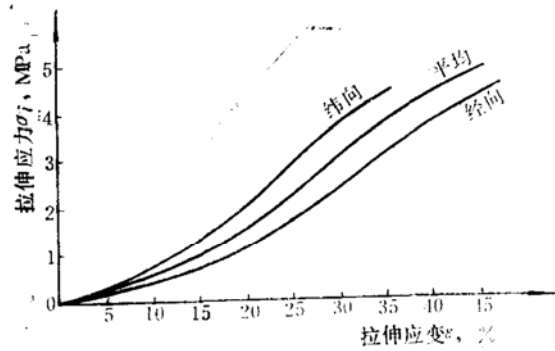


图 1 土工织物平面拉伸应力-应变曲线

表 2

厚 度 (mm)	面 积 密 度 (kg/m ²)	条 拉 法				抓 拉 法				梯形撕裂 极限强度 (kN)		顶 破 极限强度 (kN)	渗 透 系 数 (cm/s)
		极限强度 (kN)		延 伸 率 (%)		极限强度 (kN)		延 伸 率 (%)		经向 纬向			
		经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向		
4.8	0.581	1.32	0.92	48	81	1.71	1.55	49	40	1.13	1.88	4.6	2.9×10 ⁻²

周。进行无侧限抗压强度试验的土样垂直固结压力采用 30kPa, 其余为 50kPa。将固结后的土块削成圆柱体, 并用细钢丝在预定高度处截开, 其间敷以浸水饱和的圆片状织物, 加筋后试样高度 12.5cm, 直径 6.18cm, 最后将试样装入饱和器进行抽气饱和, 在真空度大于 740mm 汞柱下持续抽气 90min, 再静置 12h。

(二) 试验结果及分析

用 S_k 表示未加筋粘土试样, $S_{k/g}$ 表示织物加筋粘土试样, S_{k+g} 表示本文第四节中的织物和砂层复合加筋粘土试样, N 表示加筋层数。

1. 加筋粘土应力应变曲线特点

加筋粘土无侧限抗压强度试验应力应变曲线的一个显著特点是具有多峰性, 见图 2。两峰值应力相差不大, 而应变相差较大, 出现第一个峰值应力时, 土体开始有纵向裂缝, 于是出现软化现象, 以后应力值有所回升可能与土-土工织物的界面剪应力逐渐增大有关。

图 3 是固结不排水剪切试验结果, 试验固结压力为 200kPa。当轴向应变较大时, 加筋粘土的曲线出现波折状, 而未加筋粘土无此现象。用主应力差和轴向应变表示的加筋粘土应力应变曲线因不能体现其孔隙水压力特殊性, 亦无此现象。建议以 $(\sigma_1'/\sigma_3') - e_a$ 曲线出现波折状时的应变值作为加筋粘土的破坏应变, 有些学者仅用主应力差和轴向应变曲线来反映加筋粘土的应力应变性状, 对加筋粘土和未加筋粘土取同一应变作为破坏应变, 这种做法是欠妥的。

2. 加筋粘土试样破坏特征

图 4 是加筋试样无侧限抗压强度试验的破坏过程照片。当轴向应变达 5~8% 时, 邻近织物的土体出现逐渐扩展的纵向裂缝。在未加筋试样的对照试验中, 试样破坏时, 中部鼓出, 并可观察到 45° 左右破坏面, 此现象与前人结论一致, 由于轴向应力近似于大主应力, 最

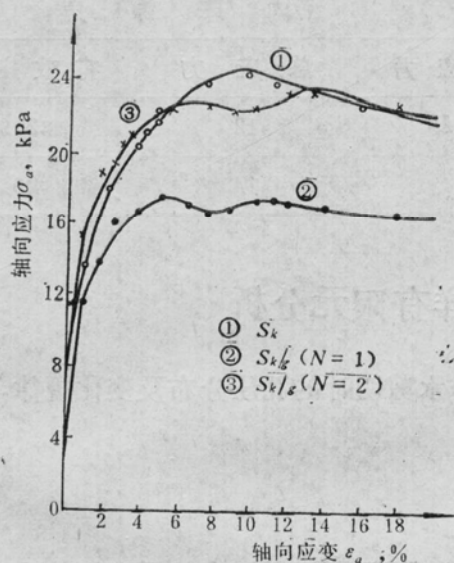


图2 加筋粘土无侧限抗压强度试验曲线

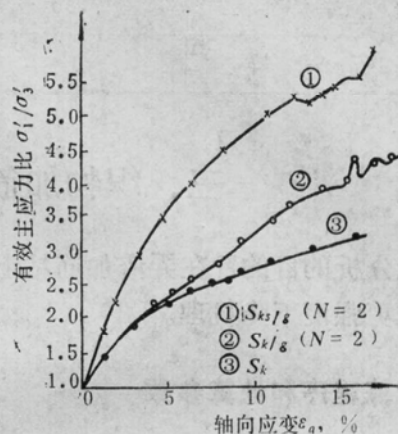


图3 加筋粘土 \$CU\$ 试验 \$\sigma'_1/\sigma'_3 - \epsilon_a\$ 曲线

大剪应力与轴线约呈 45° , 因而试样沿此面破坏; 而在加筋试样情况, 作用于土体的界面应力使土体最大剪应力方向发生旋转, 轴线两侧最大剪应力旋转方向相反, 土体环向拉应力先超出土的抗拉强度, 于是出现纵向裂缝。

在固结不排水剪切试验中, 由于侧向压力及橡皮膜的影响, 不出现纵向裂缝, 但中部鼓出现象改善, 破坏应变增大。

3. 粘土加筋后的强度变化

图5是固结不排水剪切试验确定的加筋效益系数(加筋粘土与未加筋粘土强度之比)与加筋层数的关系, 在筋层数大于5时, 加筋效益系数才稍大于1, 可见加筋粘土在粘土完全固结后再进行不排水剪切时, 筋材也不能提高抗剪强度, 这与加筋砂相反。此结果表明李的推论不成立。

表3是含有二层织物的加筋粘土抗剪强度参数。

加筋粘土凝聚力大于零, 总应力内摩擦角由未加筋粘土的 14° 降至 12° , 而有效应力内摩擦角由未加筋时的 29° 增至 32.9° 。与加筋粘土在不排水条件下抗剪强度下降, 而在完全排水条件下抗剪强度提高的结论一致。

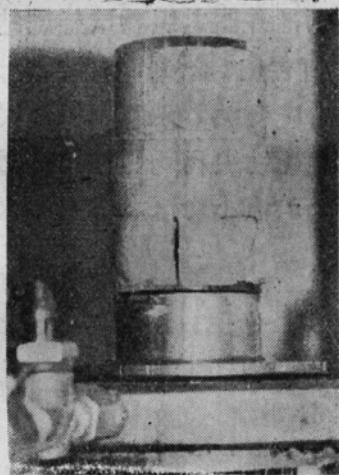


图4 加筋粘土试样纵向裂缝

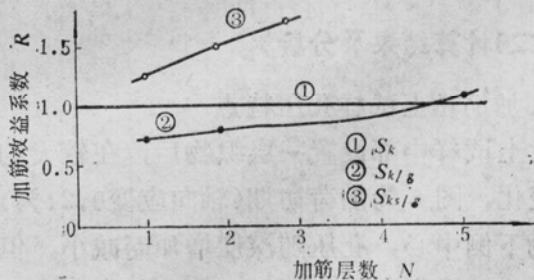


图5 加筋效益系数与加筋层数关系

表3

试 样	强 度 参 数	凝 聚 力 (kPa)		内 摩 擦 角 (°)	
		总 应 力	有 效 应 力	总 应 力	有 效 应 力
加 筋 试 样		7.35	10.29	12	32.9
未 加 筋 试 样		0	0	14	29

三、织物加筋粘土试样有限元分析

有限元分析的目的旨在弄清加筋粘土试样在不排水剪切时的孔压分布及变化规律,探讨其不排水抗剪强度下降机理。

(一)计算程序和计算参数

在南京水科院软基弹塑性固结变形程序基础上,用FORTRAN语言编写了固结变形计算程序^①,因该程序不能求解完全不排水条件下因变形不均引起的孔压流动问题,故允许试样端部排水。在快速加荷初期,排水面主要影响邻近的土体单元,而较远处土体单元的孔压特性是能够反映不排水加载特性的,同时在加荷初期,土与织物相对滑动不显著,故假定土与织物无相对滑动,并假定织物试样固结完成后为刚性体,固结压力200kPa,计算采用加筋试样高12.5cm,直径6.18cm。

土体应力应变关系采用剑桥模式,其计算参数由三轴剪切、各向等压固结及一维压缩试验确定。针刺无纺布物受压后其渗透系数将显著下降^②,取垂直向渗透系数 2.9×10^{-8} cm/s,比表2中给出的值小10倍,该织物水平向和垂直向渗透系数基本相同,取比值为1,计算参数见表4。

表4

体 积 压 缩 指 数 C_c	体 积 回 弹 指 数 C_s	内 摩 擦 角 ϕ'	弹性剪切 模量与体 积回弹模 量 之 比	垂直向渗透系数 与 水 容 重 之 比		水平向与垂直向渗 透 系 数 之 比	
				土 体	织 物	土 体	织 物
0.071	0.014	29°	0.5	1.33×10^{-4}	2.9	1.2	1.0

(二)计算结果及分析

1.加筋粘土试样孔压特点

粘土试样中部设置一层织物后,在较大的剪切速率(0.16%/min)下加荷时,试样内孔压发生变化,图6为加荷初期(轴向应变0.21%)试样内部孔压等值线图,可见最大孔压区集中在织物下侧中心,孔压随深度增加而减小,但邻近织物处的孔压较均匀。而在同样条件下算得的未加筋试样内部孔压分布很均匀。在0.21%轴向应变时,加筋粘土试样内孔压比未加筋时的值高23~33%。

图7为加筋粘土试样底部孔压随轴向应变而变化的计算曲线和实测曲线。计算曲线和实

①赵爱根,含有水平筋层粘性土的强度特性,南京水科院研究生毕业论文,1986年6月。

测曲线相差较大, 原因有二: 一是剑桥模式计算应变偏小, 二是在轴向应变较大时, 假定土与织物无相对滑动与事实不符。

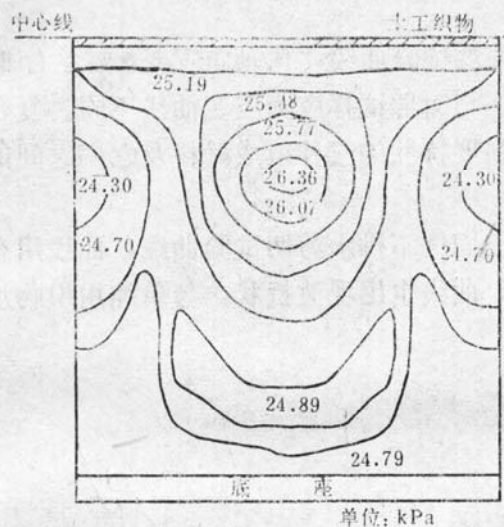


图6 加筋粘土试样孔压等值线分布

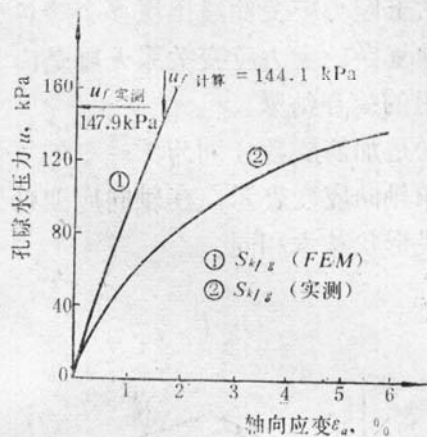


图7 底部孔压与轴向应变关系曲线

2. 加筋粘土不排水抗剪强度下降机理

计算表明, 具有端部排水面的加筋粘土试样在快速加荷时, 孔压分布很不均匀, 加荷初期最大孔压区发生在织物下侧中心处, 随荷载增大, 排水面影响范围也逐渐增大, 最大孔压区向底座移动; 而对于完全不排水情况, 可以推断, 由于织物的透水性比粘土高 4 个数量级, 在快速加荷下, 最大孔压区将发生在织物上下两侧中心处, 并随荷载增大而增大; 同时由于针刺织物的水平透水能力, 使试样中心产生的高孔压迅速径向流动, 并趋于均匀, 织物附近的土体单元都处于较高孔压状态, 使得土与织物界面包上一层水膜, 引起界面抗剪强度减小, 织物对土体的侧限作用减弱, 土体沿界面发生塑性滑动, 导致加筋粘土试样抗剪强度下降。

四、复合加筋粘土不排水剪切试验

为提高加筋粘土不排水抗剪强度, 本文提出在织物两侧各铺一层密砂的复合加筋粘土方法, 并用试验初步加以论证。

(一) 复合加筋粘土试样制备

根据加筋层数将土膏用细钢丝切成规定高度, 装入饱和容器中, 再在上面填入粒径 0.25~0.5mm 的标准中砂, 中砂比重 2.64, 将砂层轻轻压密, 控制干容重 17kN/m³, 饱和含水量 21.4%, 砂层高度 0.5cm。形成砂层的原则是尽可能不扰动下面的土样并使砂层厚度均匀。然后垫上圆片状织物, 其上再填一层中砂, 方法同上, 见图 8。

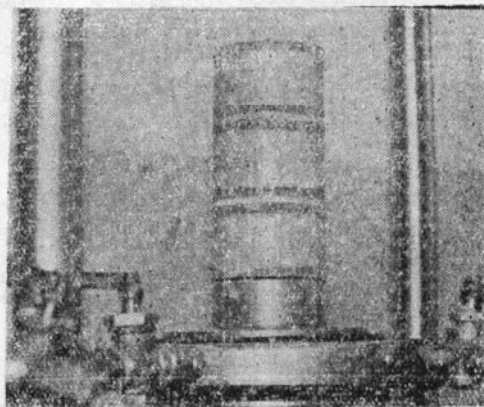


图8 复合加筋粘土试样

(二)试验结果及分析

1. 复合加筋粘土应力应变曲线特点

图9是复合加筋试样和对照试样无侧限抗压强度试验曲线,在轴向应变8%左右时,复合加筋粘土应力应变曲线出现多个峰谷交替形状,与对照试样应力应变曲线不同。复合加筋粘土这种复杂的应力应变关系无疑是由具有不同强度特性的三种组成材料及它们之间的界面相互作用的综合结果。

图10是加筋层数分别为1~3的复合加筋粘土固结不排水剪切试验曲线,曲线用有效主应力比和轴向应变表示,在轴向应变10%左右时,曲线也出现波折状,与单纯用织物加筋粘土的曲线形状基本相同。

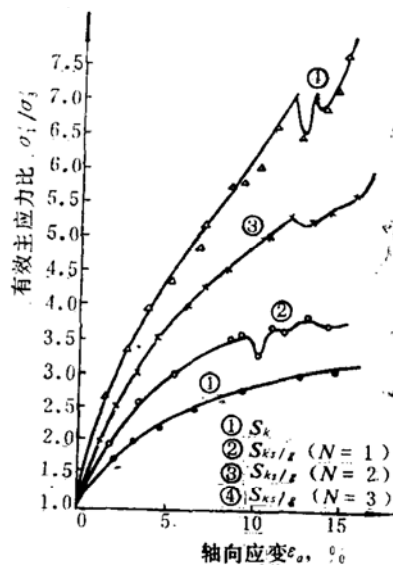
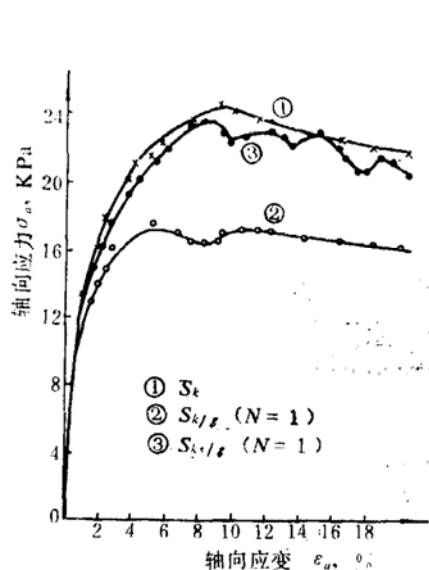


图9 复合加筋试样无侧限抗压强度试验曲线 图10 复合加筋试样CU试验 σ_1'/σ_3' - ϵ_a 曲线

2. 复合加筋粘土强度、变形比较

对图10的试验条件,复合加筋粘土不排水抗剪强度比未加筋时的值高27~73%,见图5曲线③,复合加筋粘土的加筋效益系数皆大于1,并随筋层数增加而增大。强度提高的原因一是砂层受剪膨胀吸水,使孔压降低,二是砂与织物界面抗剪强度较高,并且在较小相对位移时就能发挥强度。从图9可看到复合加筋粘土的无侧限抗压强度峰值仍略低于未加筋时的值,这是由于无侧限压力作用,砂层在剪切过程中有松动剥落现象之故。

复合加筋粘土的初始变形模量比未加筋时的值有所提高,对含有两层筋层的情形,可提高67%,而单纯用织物加筋粘土,几乎不改变变形模量,表明复合加筋方法对减少变形也有一定效果。

五、结论和建议

1. 土工织物加筋粘土的应力应变曲线具有多峰性。破坏点选取宜根据破坏过程结合应力应变曲线确定。对加筋粘土和未加筋粘土取同一应变值作为破坏点是不妥的。

2. 加筋粘土试样的破坏特征与未加筋粘土试样破坏特征不同,前者破坏时土体沿土与织

物界面滑动, 在无侧限抗压强度试验时, 试样破坏时出现纵向裂缝。

3. 粘土中设置土工织物, 使复合体凝聚力增大, 但总应力内摩擦角减小, 而有效应力内摩擦角增大, 与加筋粘土不排水抗剪强度下降, 排水剪抗剪强度提高的试验结论一致。

4. 加筋粘土完全固结后进行不排水剪时, 其性状不与加筋砂类似。李的推论不成立。

5. 有限元计算表明加筋粘土在快速加荷时, 试样内孔压比非加筋粘土大, 且分布不均匀, 最大孔压区集中在织物上下附近土体内, 使界面抗剪强度减小, 织物侧限土体能力减弱, 引起加筋粘土抗剪强度下降。

6. 土工织物和砂层复合加筋粘土无侧限抗压强度下降不明显, 粘土固结后再进行不排水剪时, 强度显著提高, 此外, 复合加筋方法对改善变形也有一定效果。

加筋土历来采用金属筋材和砂质填料, 采用土工织物和粘性土填料将促进加筋土技术的发展。加筋效果除取决于筋层和填料的性质外, 还和筋层布置(筋层层数、筋层垂直间距、筋层尺寸等)密切相关, 全面了解加筋机理和加筋效果, 应综合考虑这些因素进行研究, 尤其应结合实际工程进行现场试验研究。

本文是在南京水科院盛崇文高级工程师指导下完成的, 在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Bartos, M. J., 101 Uses of Earth Reinforcement, J. Civil. Engng. Div. ASCE, Vol. 49, No.1, 1979, pp. 51-57.
- [2] Lee, K. L., Reinforced Earth—An Old Idea in A New Setting, New Horizons in Construction Material, Vol. 1, Envo Publishing co. 1976, pp. 655-682.
- [3] Ingold, T. S. and Miller, K. S., The Behavior of Geotextile Reinforced Clay Subjected to Undrained Loading, Proc. of II ICG, Vol. 3, Las, Vegas, U. S.A. 1982, pp. 593-597.
- [4] Ingold, T. S., Reinforced Clay Subjected Undrained Triaxial Loading, J. Geot. Engng. Div., ASCE, Vol. 109, No. GT5, 1983, pp. 738-743.
- [5] Ingold, T. S. and Miller, K. S., Drained Axisymmetric Loading of Reinforced Clay, J. Geot. Engng. Div. ASCE, Vol. 109, No. GT7, 1983, pp. 883-897.
- [6] Giroud, J. P., Designing with Geotextile, Matériaux et Constructions, Vol. 14, No. 82, Juillet-Aout, 1981.