

土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度 与抗剪强度的试验研究^①

杨亚川^② 莫永京 王芝芳 廖植樨 邓健 张心平
(水利与土木工程学院)

摘要 分析了草本植被根系保持水土效能的机理,提出将根茎连接处形成的微型“拦土栅”及“滤水土体”抵抗径流推移破坏的极限能力,作为土壤-草本植被根系复合体的抗水蚀强度,并研究了它与含根量的相关性。通过复合体原型结构试样的直剪试验,证明复合体的抗剪强度 τ_f 与法向压力 σ 的关系符合库伦定律,即 $\tau_f = \sigma \tan \varphi + C$,但式中 φ 是土粒与土粒、土粒与根系之间的综合内摩擦角($13^\circ \sim 25^\circ$); C 是土粒与土粒、土粒与根系之间的凝聚力,以及由土的剪应力传递给根系而引起的根系抗拔力之和($16 \sim 60$ kPa)。由试验结果知,复合体抗剪强度随含根量增加而增大,随含水量增多而减小; C 值与含根量呈正相关,而 φ 值与含根量关系不大。

关键词 土壤-根系复合体; 抗剪强度; 抗水蚀强度; 水土保持

中图分类号 S157.1

Experimental Study on Anti-Water Erosion and Shear Strength of Soil-Root Composite

Yang Yachuan Mo Yongjing Wang Zhifang Liao Zhixi
Deng Jian Zhang Xinping

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU)

Abstract Based on the analysis of the mechanism of water conservation for soil-root composite (SRC), a new concept, anti-water erosion strength is proposed, which can be defined as the maximum stress of the micro-filter that can resist to the surface runoff. The relationship between the anti-water erosion strength and the amount of roots is derived. According to the modelling tests, the direct shear strength can be described by Coulomb equation, i. e., $\tau_f = \sigma \tan \varphi + C$, where φ is the angle of the internal friction between soil particles, soil and roots; C is the sum of the soil, soil-root cohesion and the roots anchorage stress. The value of φ and C is in the range of $13^\circ \sim 25^\circ$ and $16 \sim 60$ kPa respectively. It is found that the shear strength of SRC increasing with the amount increasing of the roots, but decreasing with the increasing in moisture content.

收稿日期:1995-09-15

①国家自然科学基金资助项目

②杨亚川,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)189信箱,100083

The value of C is directly portional to the amount of roots. However, value of ϕ seems independent to roots.

Key words soil-root composite; shear strength; anti-water erosion strength; water conservation

近半个世纪以来,国内外学者对林木草本植被根系固土固坡的土力学机理进行了大量的试验研究,但主要是在田间和实验室进行直接剪切或拉拔根系的试验。如80年代末,解明曙博士通过单棵全根系拉拔试验,建立了我国黄土地区深根性树种——白榆全根系固坡力学机制的数学模型^[1]。笔者以草本植被为研究对象,提出了“土壤-根系复合体”的新概念,即将根系与土壤视为一体,简称复合体。根系的固土作用,通过复合体的力学指标随含根量的变化来展示。本文中采用的研究方法是,以工程力学基本理论为依据,应用土力学的试验方法,研究土壤-根系复合体的主要力学特性,剖析草本植被根系在保持水土中所起的固土力学作用,目的是揭示土壤-根系复合体的抗水蚀与抗剪强度特性,为建立草本植被根系水土保持效能的土壤力学方程及研究根系固土固坡土力学机理提供必要的力学指标。

1 草本植被根系增强土壤抗水蚀能力的机理

在一个坡度为 30° 的土槽内,分别在裸土和带有草本植被2种条件下进行5种降雨强度及5个不同生物量的人工降雨试验。结果表明,在裸土条件下,土壤表层发生严重的沟蚀;在有草本植被的条件下,当生物量达到一定值时,土表不出现沟蚀,而在沿坡面根茎连接处形成许多微型土堆,并出现泥沙模数(指单位时间、单位土表面积的平均产沙量)显著减少,渗水量明显增大的现象(见图1和表1)。



图1 坡度为 30° 时的坡面侵蚀情况(除去茶叶后)

从表1可知,在有草本植被的条件下,当生物量达到 1.16 kgm^{-2} 或含根量达到 1.62 mgcm^{-1} ,雨强为 $94.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,泥沙模数仅为裸土的1.3%,即泥沙模数比裸土减小了98.7%;复合体中渗水量与降雨量之比比裸土中的大33.3%,而且随着生物量增多及坡度减小,泥沙模数减小,而渗水量与降雨量的比值越来越大^[2]。可见在有草本植被的条件下,土壤抗

表 1 “土壤-草本植被根系复合体”抗水蚀效能试验结果

土壤表面坡度 $\theta/(\circ)$	土质	植被(以节节草为主)		人工降雨		泥沙模数 $W/\text{kg}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$	渗水量 /L	渗水量与 降雨量之 比/%	水蚀特征
		地表生物量 /kgm ⁻²	含根量 m_r/mgcm^{-3}	雨强 /mm·h ⁻¹	降雨量 /L				
30	砾质轻壤土	0	0	79.9	103.6	2.361	6.14	5.9	沟蚀较严重
		0.72	0.95	87.7	114.0	0.224	24.25	21.3	无明显沟蚀,有许多微型土堆
		1.16	1.62	94.3	122.6	0.0297	48.38	39.5	无沟蚀,有许多微型土堆

水蚀能力将随生物量增多及坡度减小而增强。这是因为草本植被生长较茂密,根茎连接处形成一个天然的微型“拦土栅”,当径流夹带的土粒大于拦土栅的孔隙时土粒被挡住而沉积在拦土栅前,形成一个薄薄的粗粒层;后来的土粒,若大于该粗粒层土的孔隙,又被挡住而沉积在该粗粒层的前面,从而形成另一个土粒较细的细粒层。依此类推,就在根茎连接处形成了微型土堆,其实它是一种微型滤水土体,即微型反滤层;因此,坡面上出现了许许多多的微型滤水土体(见图 1)。位于同一等高线附近的微型滤水土体,即可连成一条弯曲的、锯齿形的微型土埂,这些微型土埂沿坡面呈梯级分布,并与径流方向近似垂直,就像一个个微型土坝一样,拦阻径流,减缓流速,使土粒搬运力减小,同时使地面滞水量及土壤含水量增加。由于雨水在复合体中的渗透规律符合达西定律^[3],即水的渗流速度 $v=Ki$ (i 为水力坡降),因此在土壤排水较通畅的条件下,当渗透系数 K 增大时,水的渗透速度也增大,渗水量也随之增加;同时,径流因受滤水土体的阻挡而从它的孔隙中流过,即受滤水土体的过滤,水质变清,亦即阻止了土粒搬运。这就是草本植被根系增强土壤抗水蚀能力的机理。换句话说,草本植被根系保持水土效能的机理,是土粒在沿坡面根茎连接处沉积构成微型滤水土体,对径流产生阻截与过滤作用。

2 土壤-草本植被根系复合体的抗水蚀强度

2.1 抗水蚀强度的概念

由前面讨论可知,根系增强土壤抗水蚀能力的型式,是一种以阻止土粒搬运为主要特征的抗水蚀类型,故增强土壤抗水蚀能力的程度,取决于滤水土体抵抗径流冲击破坏的能力的大小。又因微型拦土栅及滤水土体位于土表,是土壤-草本植被根系复合体的表层部分,因而提出将根茎连接处的微型拦土栅及滤水土体抵抗径流推移破坏的极限能力,作为该复合体的抗水蚀强度,符号 p_t ,单位 kNm^{-2} 。 p_t 值越大,土壤抗水蚀能力越强。它是表征草本植被根系保持水土效能的一个重要力学指标。由于根茎连接处的微型滤水土体位于土表,背靠拦土栅,而拦土栅又靠其下面扎入土中的根系来固定,因此,茎茬下面复合体的含根量或地上生物量、体积密度、含水量以及根系与土壤之间的锚固力、根系及茎的强度等,是影响复合体抗水蚀强度 p_t 的主要因素。

2.2 抗水蚀强度的测定

2.2.1 试验场地

共有 2 处,一处在原北京农业工程大学校内(记为 1),为人工降雨模拟试验用土槽,槽内

为砾质轻壤土,植被以节节草为主。共5个土槽,坡度分别为 0° 、 7.5° 、 15.0° 、 22.5° 和 30.0° 。另一处在北京市密云县石匣小流域经济沟水土保持试验区内(记为Ⅰ)。该区为上石浅山区。试验地为荒坡地,以自然生长的野燕麦、狗尾草为主,试验期内草长势良好。

2.2.2 试验方法

假设径流方向与坡面方向平行,径流作用于微型拦土栅及滤水土体上推移力的方向与径流方向一致。

用钢环沿垂直坡面方向套住拦土栅及滤水土体,并将钢环压入土中,至环内土柱与环顶恰好平齐为止(见图2);挖去钢环外壁附近的土,使钢环与其四周土体隔开;再从环壁沿坡面方向挖一土槽,槽宽略大于钢环外径,槽深与环高相等,槽底与坡面平行;然后安装好弹簧测力仪,沿平行坡面方向拉伸弹簧测力仪,所测得的拉力即为径流作用于拦土栅及滤水土体上的推移力,极限拉力的反力即为拦土栅及滤水土体抵抗径流推移破坏的极限能力。将它除以钢环面积,即得复合体抗水蚀强度值。测记极限拉力后,将盛满土样的钢环铲出,测复合体的体积密度、含水量以及含根量。



图2 抗水蚀强度的现场测试

2.2.3 钢环尺寸的确定

1)钢环内径 d 。考虑仪器尺寸对试验结果的影响,参照水利部土工试验规程要求,仪器直径以等于试样最大粒径的20倍为宜^[4]。本试验土质为砾质轻壤土,最大颗粒粒径为7mm左右,故确定钢环最小内径为15cm。

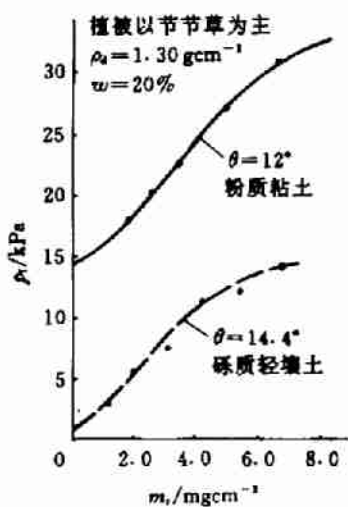


图3 复合体抗水蚀强度 ρ_i 与含根量 m_i 的关系

2)钢环高度。由于本试验目的是测定根茎连接处的微型拦土栅及滤水土体抵抗径流推移破坏的极限能力,因此试样高度不宜过大或过小。试验结果表明,滤水土体的最大高度为4cm左右。考虑到滤水土体底面与坡面之间的摩擦阻力及拦土栅下面根系的抗剪、抗拔力对所测极限拉力的影响,钢环需压入滤水土体底面2cm左右,故取钢环高度为6cm。

2.2.4 试验结果

当复合体的体积密度、含水量一定时,抗水蚀强度 ρ_i 随含根量 m_i 的增加而增大,在 $m_i \leq 5 \text{ mg cm}^{-3}$ 的范围内,变化近似呈线性(图3)。这是因为含根量增加,地表生物量也相应增大,根茎连接处阻挡土粒搬运的能力增强,所形成的滤水土体稳定性增强,抗水蚀强度也增大。

在植被、含根量、含水量和体积密度相同的条件下,土质粘性越大,抗水蚀强度越大,反之,抗水蚀强度越小(图3)。因为土壤粘性越大,根系与土壤之间的锚固力越大,根茎连接

处的滤水土体稳定性越强,故抗水蚀强度增大。

3 土壤-根系复合体的抗剪强度

本文将土壤-根系复合体抵抗剪切破坏的极限能力,称为复合体的抗剪强度。

土体失去稳定而产生滑动的主要原因是土体的抗剪强度减弱,因此,研究土壤-根系复合体的抗剪强度,可以阐明根系固土固坡的力学作用,并进一步揭示林木草本植被根系固土固坡效能的土壤力学机理。

3.1 试验场地与试验方法

试验场地同 2.2.1 中的 II,地类土质见表 2。

表 2 试验地类(坡地)土壤颗粒组成表

试验地 序号	土粒组成 / %					液限 $W_L / \%$	塑限 $W_P / \%$	塑性 指数	土 质	备 注
	>2.0 mm	0.25~ 2.0 mm	0.05~ 0.25 mm	0.005~ 0.05 mm	<0.005 mm					
1	0	1.0	16.2	46.3	36.5	33.2	21.0	12.2	粉质 粘土	直剪取样与 抗水蚀强度试 验地
2	14.0	43.0	2.0	30.7	10.3				砾质 轻壤 土	抗水蚀强度 试验地

按土工试验规程^[4]进行常规直剪试验。用环刀直接在田间分层取样。取样前先将草剪掉,再将环刀压入土中,至环内土柱略高出环刀顶面为止,取出盛满土样的环刀,削平两端,擦净环刀外壁即成。试样直径为 64 mm,高 2 mm,其中根系的直径最大 0.6 mm,土质为粉质粘土。

法向压力分为 25,50,75,100,125 kPa 等 5 个级别。

试验前测试样含水量、体积密度,试验后取出试样,用清水将根洗净,并烘干测定含根量。

土壤-根系复合体的含根量用复合体单位体积的干根质量来表示,即

$$\text{复合体含根量 } m_r = \frac{\text{复合体内所含干根质量/mg}}{\text{复合体体积/cm}^3}$$

采用这种表示方式,便于分别考虑体积密度与含根量对复合体抗剪强度的影响。

3.2 试验结果分析

1)当土壤-根系复合体的含根量、体积密度和含水量一定时,其抗剪强度 τ_f 与剪切面上的法向压力 σ 成正比,即符合库伦定律(图 4),其表达式为

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C$$

但是式中 φ 和 C 与一般土的抗剪强度指标的物理意义有所不同。通过对根的抗拉试验得知,直径 0.6 mm 根的抗拉强度可高达 22.32 MPa,约为 I 级钢筋抗拉强度的 10%。当具有较大抗拉强度的根系,沿水平和垂直方向穿插在土壤的孔隙之中时,一方面将其周围的细土粒凝聚在一起,使土壤凝聚力增大,同时根系又被其周围细土粒层层包住,而被描固在土壤之中,如同在土壤中增设了许多微细钢筋,即根系将对土壤产生显著的“加筋”作用,使土壤整体强度增大,从

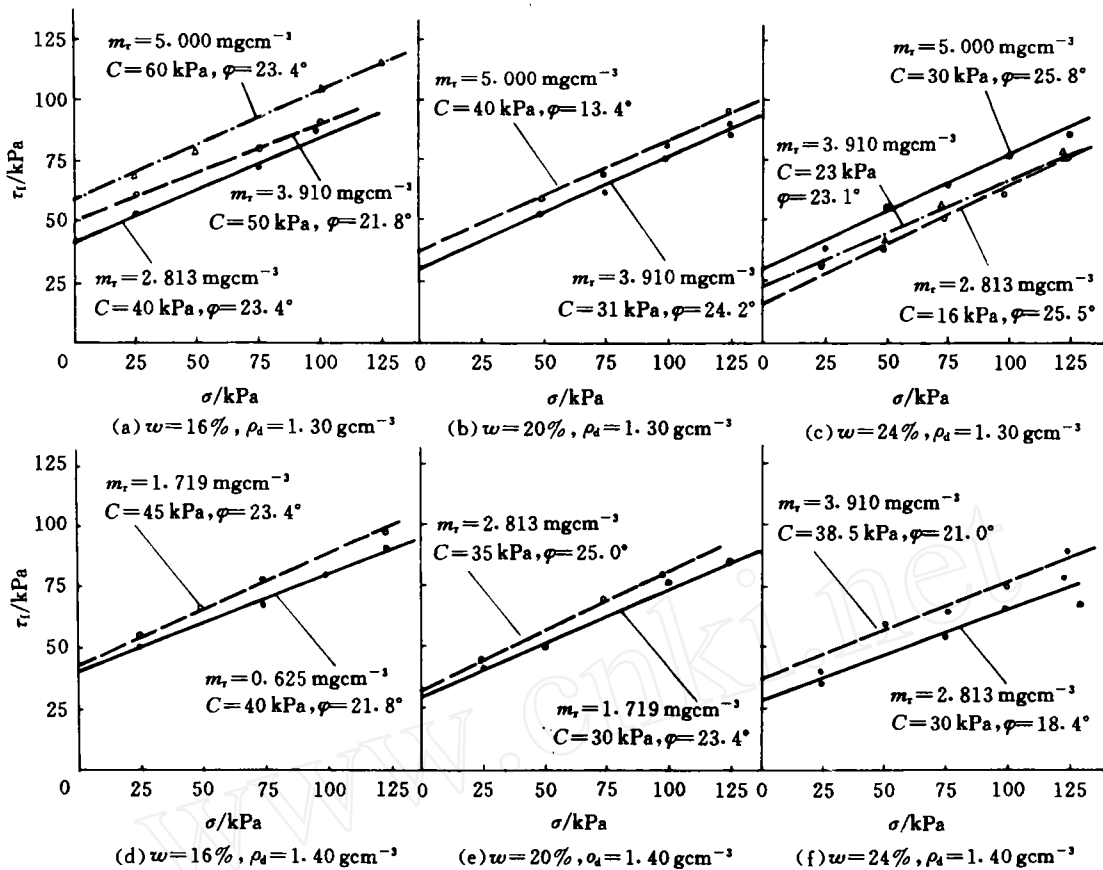


图4 抗剪强度 τ_f 与剪切面上法向压力 σ 的关系

而形成根系与土壤互相依存、共同工作的集合体，即土壤-根系复合体；因此当复合体受剪力作用时，不仅产生土粒与土粒之间的摩擦作用，同时还产生土粒与根系之间的摩擦作用，这对复合体来讲，都属于内摩擦，故 φ 值可理解为土壤-根系复合体的综合摩擦角。同样 C 值不仅包括土粒与土粒之间的凝聚力，同时还包括土粒与根系之间的凝聚力，以及由土粒的剪应力传递给根系而引起的根系抗剪力或锚固力。当锚固力大于根系抗剪力时以根系抗剪力为主，反之以锚固力为主，故 C 值可理解为土壤-根系复合体的凝聚力与根系的抗剪力或锚固力之和，其中根系的抗剪力或锚固力是 C 值的重要组成部分。

2) 当复合体的含水量、体积密度和法向压力一定时，抗剪强度 τ_f 随含根量 m_r 增加而增大，在 $m_r \leq 5\text{ mgcm}^{-3}$ 的范围内，近似呈线性关系(图5)。

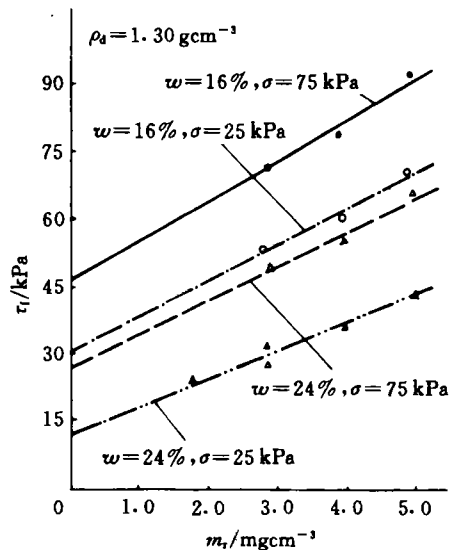


图5 复合体抗剪强度 τ_f 与含根量 m_r 的关系

3)当复合体的体积密度和含水量一定时,抗剪强度指标 C 亦与含根量呈正相关(图 6(a)),而 φ 与含根量关系不大。如含根量由 0.75 增大到 5 mgcm^{-3} 时, φ 仅在 $21.8^\circ \sim 23.4^\circ$ 内波动(图 6(b))。原因是,当复合体的含根量增加时,根的总数目增多,因此根系的锚固力显著增大,即 C 值明显增加;但对 φ 来讲,虽然根的总数目增多,可是根系与土粒间的接触面积增加并不多,故 φ 值变化不大。这一现象同时表明,根系锚固力是 C 值的重要组成部分。

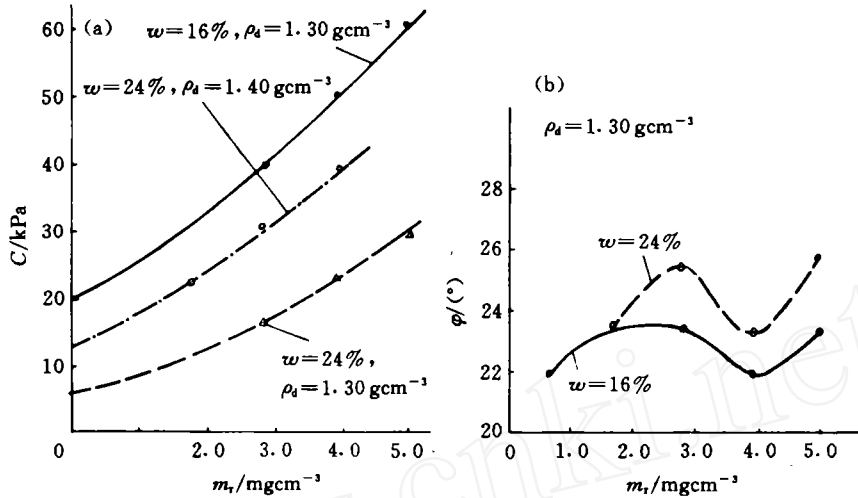


图 6 含根量对 C 值和 φ 角的影响

4)当复合体的含根量、体积密度和法向压力一定时,抗剪强度 τ_t 与含水量呈负相关(图 7(a)),强度指标 C 亦与含水量呈负相关(图 7(b)),因为含水量增多时,土粒与土粒、土粒与根系之间的凝聚力,以及根系与土壤之间的锚固力等都相应减小。

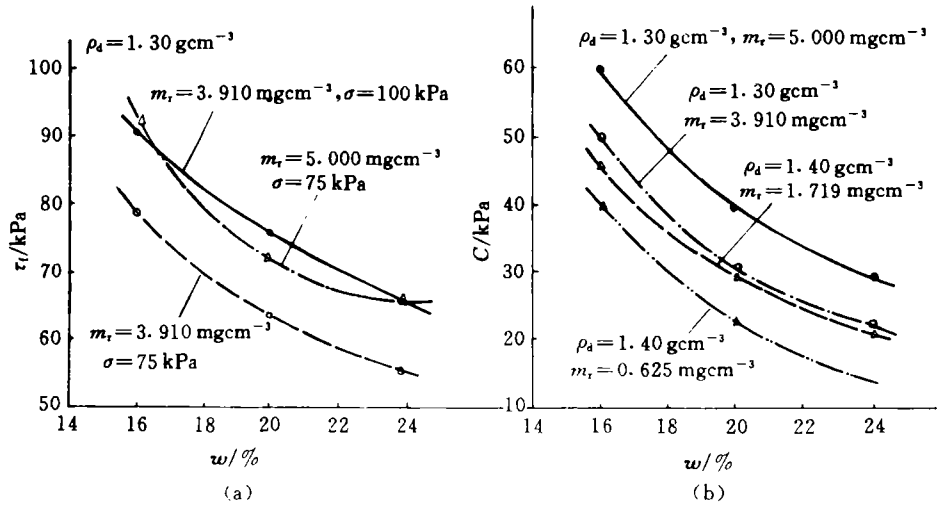


图 7 抗剪强度 τ_t 和强度指标 C 与含水量 w 的关系

5)当复合体受剪力作用时,剪应力与剪切变形的关系在开始段近似呈线性;接近剪破时,

为一较圆滑曲线;达到剪破后,近似为水平线(图8)。这说明只有在剪应力作用下复合体的抗剪效果方能发挥出来,而且随剪应力增加而逐渐发挥直到全部发挥出来为止。一旦全部发挥出来后,再也不能承受更大剪应力的作用,这时虽然剪切变形继续增大,但剪应力趋于某一定值。

4 结 论

1)在有草本植被的条件下,土壤抗水蚀能力随生物量增多及地面坡度减缓而增大。根系增强土壤抗水蚀能力的机理是,土粒在沿坡面根茎连接处沉积,形成微型滤水土体,对径流产生阻截与过滤作用。

2)在有草本植被的条件下,根茎连接处的微型拦土栅及滤水土体抵抗径流推移破坏的极限能力,可以作为表征草本植被根系保持水土效能的一个重要力学指标,称为该复合体的抗水蚀强度。

3)当体积密度和含水量一定时,抗水蚀强度 ρ_t 与含根量呈正相关;当含根量、体积密度和含水量一定时,抗水蚀强度随土质粘性增加而增大。

4)在有草本植被的条件下,复合体抗剪强度 τ_t 与正压力 σ 的关系符合库伦定律,表达式为 $\tau_t = \sigma \tan \varphi + C$,但式中 φ 为土及土粒与根系之间的综合内摩擦角($13^\circ \sim 25^\circ$); C 是土粒与土粒、土粒与根系之间的凝聚力,以及由土的剪应力传递给根系而引起的根系抗拔力之和(16~60 kPa),其中根系的抗拔力是 C 值的重要组成部分。

5)当法向压力、体积密度和含水量一定时,抗剪强度与含根量正相关;抗剪强度指标 C 亦与含根量呈正相关,但 φ 与含根量关系不大。

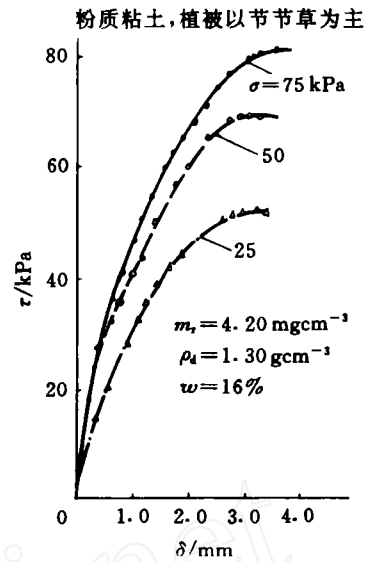


图8 剪应力 τ 与剪切变形 δ 的关系

参 考 文 献

- 1 解明曙. 黄土地区林木根系固坡的土力学机制研究:[学位论文]. 北京:北京林业大学,1988
- 2 王芝芳,杨亚川,赵作善,等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀能力的土壤力学模型. 中国农业大学学报, 1996,1(2):39~45
- 3 山西省水土保持科学研究所,中国科学院国家计划委员会地理研究所,加拿大多伦多大学地理系. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京:科学出版社,1992. 24
- 4 SDS 01-79 中华人民共和国水利电力部土工试验规程:下册. 北京:水利出版社,1979. 408