

棕榈纤维加筋对上海软粘土强度特性的影响

璩继立, 李贝贝, 魏天乐, 江海洋, 俞汉宁

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要:通过直剪慢剪实验,改变筋材棕榈的加筋率及尺寸,研究棕榈作为加筋材料对上海粘土强度特性的影响。试验表明:①同素土相比,加筋土的抗剪强度和粘聚力明显提高,但内摩擦角的变化较小。②棕榈尺寸为4 mm × 12 mm的抗剪强度高于4 mm × 4 mm、4 mm × 8 mm和4 mm × 16 mm的抗剪强度,且加筋土的最优加筋率为0.5%。③垂直压力较小时,应力应变曲线呈应变软化型,随着垂直压力的增加,应力应变曲线呈应变硬化型。④同素土相比,加筋土残余强度降低,使得土体的抗变形能力提高。因此,棕榈不失为一种加固上海粘土强度的优良筋材。

关键词: 棕榈纤维; 加筋; 软粘土; 剪切试验; 强度特性

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0160-05

Influence of palm fiber reinforced on strength characteristics of soft clay in Shanghai

QU Jili, LI Beibei, Wei Tianle, Jiang Haiyang, Yu Hanning

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Adopting palm as a reinforcement material which was added into shanghai clay, the paper carried out direct slow shear test so as to study the effect of palm on the strength characteristics of Shanghai clay by changing the reinforcement ratio and palm size of reinforcing material. The results show that ① Compared with the pure soil, the reinforced soil shear strength and cohesion are improved significantly, but angle change of internal friction is smaller. ② The shear strength of size of 4mm × 12mm is bigger than that of the size of 4mm × 4mm, 4mm × 8mm and 4mm × 16mm, and the optimal rate of reinforcement is 0.5%. ③ When the vertical load is small, the stress-strain curve possesses strain softening. But with the increase of vertical load, the stress-strain curve is strain hardening. ④ Compared with pure soil, the residual strength of reinforced soil is reduced, and its capacity of resistance deformation is enhanced. Therefore, the palm can be used as an effective material for reinforcing Shanghai clay.

Key words: palm fiber; reinforce; clay; direct shear test; strength characteristics

1 研究背景

上海地区浅部软土普遍发育,属于较为典型的天然软土地基区,主要包括淤泥质粉质粘土及淤泥质粘土,其主要特性是高含水量、大孔隙比、高压缩性、低强度等,在工程建设中表现出一系列不良工程地质现象,从而影响建筑物的使用^[1]。因此,在实际工程中常需对粘土进行固化处理,以满足基础工程要求。

植物对护坡具有加筋作用、降低坡体孔隙水压力、降雨截流、控制土粒流失等作用^[2]。不同的人

对植物研究的各个方面不同。璩继立^[3]等人指出麦秸秆可以提高上海粘土的强度。吴景海^[4]等人指出土工织物和土工格栅等合成材料均能有效提高土体的强度和稳定性;闫宁霞^[5]等人指出聚丙烯等合成纤维能提高土体的强度。J. Prabakar^[6]和 G. Khosrow^[7]等人研究了剑麻、椰子纤维等天然纤维的物理性质和对土体的加筋效果。通过加强筋土的摩擦作用和空间约束作用,可改善土的工程性质^[8]。把天然纤维材料运用于软土的加固,利用天然纤维加固软土。具有一定的价值。

棕榈是我国历史发展悠久的天然纤维,产量高、

收稿日期:2013-12-21; 修回日期:2014-01-03

基金项目:诺华上海实验室科研经费(3A-11-307-110)

作者简介:璩继立(1964-),男,河南孟州人,博士后,副教授,硕士生导师。主要从事岩土工程、水文地质等方面的研究与教学工作。

易获得。其断裂强度、杨氏模量和断裂伸长率范围分别为 89 ~ 222 MPa、0.44 ~ 1.09 GPa 和 14.68% ~ 23.45%,属于中强高伸纤维。棕榈纤维具有牢固、耐磨、耐盐、透气、质轻、富有弹性、耐腐蚀等特性^[9]。但目前对于棕榈纤维作为加筋材料的研究还很少,因此本文采用棕榈作为加筋材料,通过直剪慢剪试验,分别研究加筋率、筋材尺寸对加筋土强度的影响,同时探讨了棕榈加筋土的作用机理,可为工程应用提供指导。

2 试验方法

2.1 试验材料

试验用土取自上海浦东张江工业园区某大型基坑项目施工现场,首先将土放在自然条件下风干,再将风干的土放在橡皮板上用橡胶锤碾碎,并过 2mm 土工筛。测定其物理指标,结果见表 1,按《公路土工试验规程》JTG E40-2007^[10]制备土样。

表 1 土的物理性质指标					% , g/cm ³
最佳	液限	塑限	塑性	最大	
含水率	含水率	含水率	指数	干密度	
20.72	42.34	20.56	21.78	1.62	

棕榈片在自然条件下风干,以作备用。

2.2 试件材料及试验方法

选用的加筋材料以质量加筋率和加筋长度为影响因素。棕榈片在自然条件下风干,制样前将棕榈片分别剪成 4 mm × 4 mm、4 mm × 8 mm、4 mm × 12 mm 和 4 mm × 16 mm 的片状,加筋率为 0.25%、

0.5%、1.0%、2.0%。试验每种尺寸下每种质量加筋率制备 3 个试样。

将称好的棕榈片与土混合均匀,倒入相应质量的水进行搅拌,然后将混合均匀的土样用保鲜膜封闭起来放入养护缸,养护 24h 以确保试样的含水率稳定。最后制备试样时,每个试件统一称取土样 120g,采取统一的击实锤进行锤击,利用三层法进行击实。

试验采用南京 DJY-4L 四联等应变直剪仪。采取应变控制式直接剪切。应变速率为每分钟应变 0.02 mm/min,使粘土能够充分排水,测得的剪切强度比较稳定,当剪应变达到 10.001 mm 时,停止剪切。

3 试验成果及分析

3.1 对抗剪强度的影响

图 1、2、3 和 4 分别为 4 mm × 4 mm、4 mm × 8 mm、4 mm × 12 mm 和 4 mm × 16 mm 棕榈片的应力-应变关系图,可以看出,当剪切位移较小时,各应力-应变曲线很接近,甚至各种含量的曲线交织在一起;随着剪切位移的增大,应力-应变关系曲线逐渐分离。图中应力-应变曲线显示,加筋土的抗剪强度均大于素土的抗剪强度,说明加入棕榈片后,可以提高上海粘土的剪切强度。图 1(a)、图 2(a)、图 3(a)、图 4(a)可以看出应力有明显的峰值点,抗剪强度达到峰值后降低,故 100kPa 时应力应变曲线呈现应力-应变软化型;其余图形随着剪应变的增大,剪应力逐渐增大,没有明显的峰值强度,其应力-应变曲线呈应变硬化型。

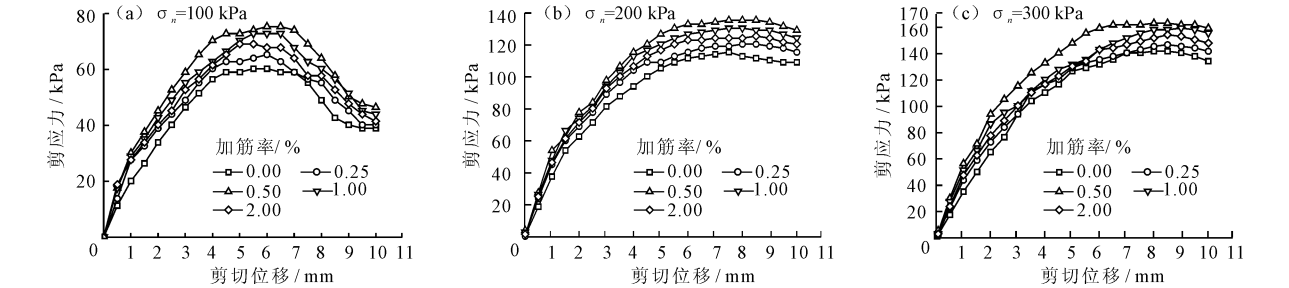


图 1 4 mm × 4 mm 的棕榈加筋土剪切位移 - 剪应力关系曲线

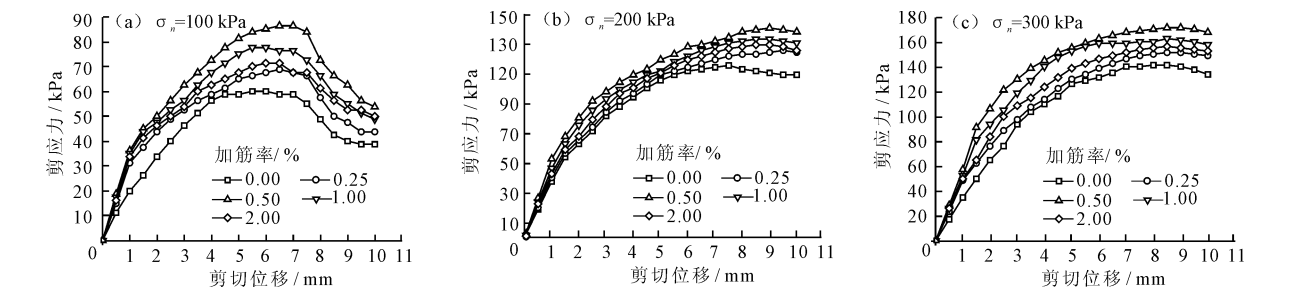


图 2 4 mm × 8 mm 的棕榈加筋土剪切位移 - 剪应力关系曲线

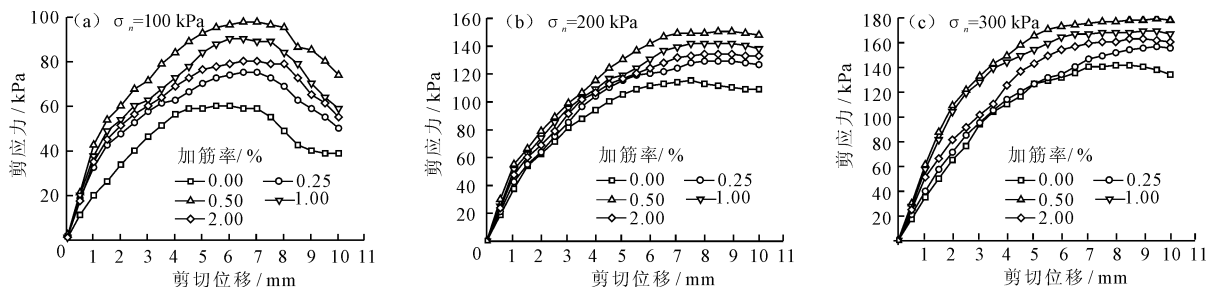


图3 4 mm×12 mm 的棕榈加筋土剪切位移-剪应力关系曲线

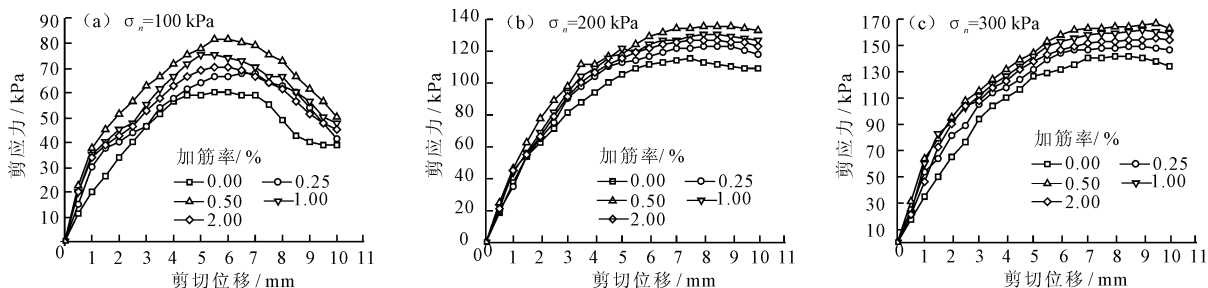


图4 4 mm×16 mm 的棕榈加筋土剪切位移-剪应力关系曲线

各图形显示,加筋土的抗剪强度随加筋率的增加呈现先增大后减小的趋势。加筋土的最大剪切强度出现拐点,加筋率为0.5%时,剪切强度达到了最大值。与素土相比,4 mm×4 mm、4 mm×8 mm、4 mm×12 mm 和 4 mm×16 mm 加筋棕榈峰值强度 100 kPa 时分别提高了 22.5%、40.8%、59.2% 和 32.7%。200kPa 时提高了 19.6%、22.8%、30.4% 和 17.4%。300kPa 时提高了 15.0%、20.4%、26.6% 和 17.7%;相应棕榈尺寸下,残余强度 100 kPa 时提高了 19.4%、51.6%、90.3% 和 45.2%,200 kPa 时残余强度提高了 18.4%、26.4%、35.6% 和 21.8%,300kPa 时残余强度提高了 18.7%、25.2%、32.7% 和 21.5%。并且与素土相比,在较大应变处剪切强度仍然保持较大值,这无疑对土体延性的提高起到了一定的积极作用。

利用棕榈作为一种新型的加筋材料,不仅能够提高粘土的抗剪强度,还能提高土的延性,增强土的抗变形能力。实验表明 100 kPa 时,素土残余强度的降低幅度分别为 36.7%,加筋率为 0.5% 的残余强度的降低幅度为 33.3%、29.0%、24.0% 和 30%。同素土相比,加筋土提高了土的延性和抗变形能力。在垂直压力为 200 和 300 kPa 作用下,残余强度与峰值强度相比几乎没变化,土的延性得到了进一步的提高,其抗变形能力增强了。

通过分析可知道,棕榈纤维加筋土的抗剪强度高于素土,究其原因棕榈纤维呈“圆柱形”,表面凹凸明显、粗糙、有短绒,且具有一定的“沟槽”。这

些沟槽能大大提高纤维与基体间的机械锚定作用,改善复合材料界面性能,从而提高复合材料整体性能^[11],增大棕榈纤维与土之间的摩擦力。同时,棕榈纤维具有一定的韧度及硬度,使其在土中不容易被破坏,单根纤维在土中类似“钢筋”,能够加固土体。文中所用的棕榈片是由数百根棕榈纤维组成,每根纤维以一定的角度穿插交织而成,使得纤维间交织紧密^[7],剪切阻力大大加大,提高了土体的抗剪强度。

当垂直荷载增大时,荷载越大,其抗剪强度也随之增加。这有可能是较小的垂直荷载对土的约束较小,当土的抗剪强度达到峰值时,土与土、土与筋材、筋材与筋材之间会出现裂缝,由于约束较小,裂缝会随着应变的增加迅速发展并扩大继而贯通起来,导致土的抗剪强度急速下降。反之,施加较大的垂直荷载,当土与土、土与筋材、筋材与筋材之间出现裂缝时,由于约束力较大,一方面会限制裂缝的发展速度,减缓裂缝的贯通,抑制抗剪强度的降低;另一方面约束力可能会使土或筋材将裂缝填充起来,保证土的完整性,使得随应变增加的抗剪强度增大。

从分析中还可以看出。棕榈这种筋材可以提高峰值强度和残余强度,且棕榈这种筋材对残余强度的影响比较大。这是因为未加筋时,土体变形迅速,土体达到峰值后抗剪强度迅速降低,其残余强度很小。加筋后,筋材形成的空间约束作用会抑制抗剪强度减小的速度,使得土的残余强度相对于素土明显增大。因此,加筋土的筋材与土体的相互作用阻

碍了土体的变形,抗剪强度降低很慢,从而提高了土体的残余强度。同时使土强度提高的同时,也减缓了土体的变形速率,改善了土的应变软化。

3.2 对抗剪强度指标的影响

图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d) 分别为 4 mm×4 mm、4 mm×8 mm、4 mm×12 mm、4 mm×16 mm 的棕榈加筋土垂直荷载与峰值剪切强度的关系。从图 5 中可以看出,各尺寸的棕榈加筋土的变化趋势大致相同。随着垂直压力的增大,土的抗剪强度提高;随着加筋率的增大,土的峰值强度也呈现出先增大

后减小的趋势。而各直线的斜率变化不大。从各条直线间距来看,4 mm×8 mm 的棕榈片对土抗剪强度的提高比 4 mm×4 mm 提高的幅度要大,4 mm×12 mm 的棕榈片对土抗剪强度的提高比 4 mm×8 mm 提高的幅度要大,而 4 mm×16 mm 的棕榈片对土抗剪强度的提高比 4 mm×12 mm 提高的幅度降低,因而 4 mm×12 mm 的棕榈片对土的抗剪强度提高最大。从与纵轴的交点来看,棕榈加筋土与素土相比,粘聚力均有提高。而各条直线都接近平行,这说明加筋土的内摩擦角变化不大。

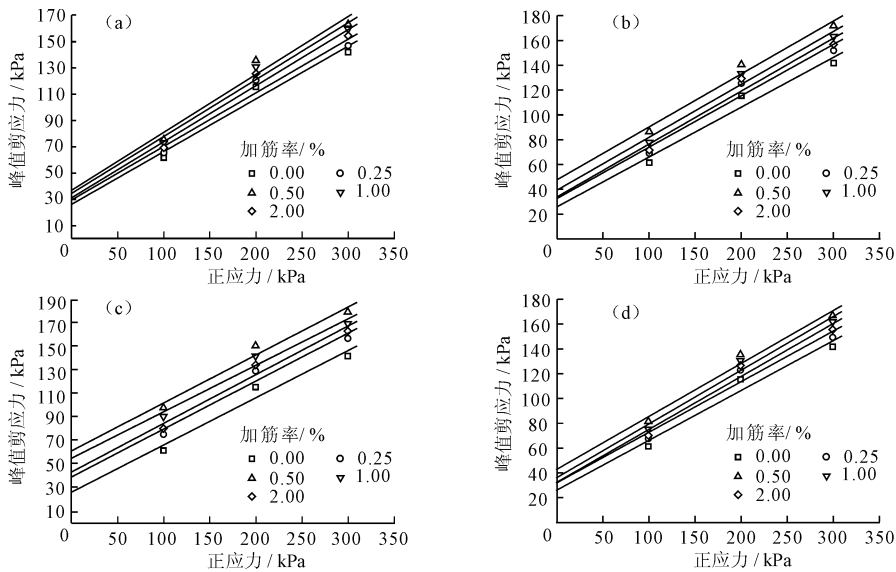


图 5 棕榈加筋土垂直荷载与峰值剪切强度的关系

表 2 为土体粘聚力和内摩擦角随加筋率和尺寸变化的数值,与素土相比,各棕榈加筋土的粘聚力均有提高,内摩擦角几乎没变化。同时 4 mm×4 mm 的棕榈片粘聚力最大提高了 41.9%,内摩擦角仅提高了 8.2%;4 mm×8 mm 的棕榈片粘聚力最大提高了 82.4%,内摩擦角仅增加了 5.6%;4 mm×12 mm 的棕榈片粘聚力提高了 135.4%,内摩擦角仅增加了 2.7%;4 mm×16 mm 的棕榈片粘聚力提高了约 64%,内摩擦角仅增加了 6.8%。从数值上可以看出,4 mm×12 mm 粘聚力提高幅度最大,内摩擦角几乎没变化。因此,粘聚力对上海粘土抗剪强度的影响较大。

棕榈加筋土只有粘聚力增大,其摩擦角几乎不变。这是由于剪切土时,随剪切位移的增大,土将改变原土组构单元的排列方向,使土颗粒具有沿剪切面定向排列的趋势,加筋后,筋材与土相互作用,阻碍了土颗粒向剪切方向的运动^[12];土与筋材的相互作用也使得筋材直接承担一部分剪应力,土的抗压

表 2 不同加筋率上海粘土强度指标 mm, %, kPa, (°)			
筋材尺寸	加筋率	剪应力强度指标	
		c	φ
4×4	0.00	25.94	21.90
	0.25	29.28	22.19
	0.50	36.81	23.70
	1.00	34.30	23.36
	2.00	30.96	23.12
4×8	0.25	32.63	22.49
	0.50	47.32	23.12
	1.00	39.32	23.11
	2.00	33.89	23.13
4×12	0.25	38.91	22.20
	0.50	61.07	22.20
	1.00	54.80	21.55
4×16	2.00	43.18	22.50
	0.25	31.79	22.18
	0.50	42.64	23.07
	1.00	35.97	23.40
	2.00	32.21	23.10

能力与筋材的抗拉能力共同使得加筋土的摩擦面增大。随着剪切位移方向的阻碍及摩擦面的增大,筋材与土共同发挥作用,不仅使得剪切强度增大,也使得土体在较大应变时仍有较大的强度。但加筋未改变颗粒级配和土颗粒的表面性质,因此加筋对于土的内摩擦角影响较小^[11]。

3.3 最优掺量分析

比较图 1、2、3 和 4 可知,棕榈加筋土在加筋率为 0.5% 时,其抗剪强度曲线均在各加筋率曲线之上,无论是峰值强度还是残余强度都增加很大。由表 2 中各数据可知,各种尺寸中加筋率为 0.5% 时,粘聚力的值都高于同种尺寸下其它加筋率的粘聚力,因此棕榈加筋土的最优加筋率为 0.5%。

试验时,棕榈在土体中是杂乱均匀分布的。当在剪切面上的棕榈受到力的作用产生相对位移时,与之交错叠加的棕榈会阻止这种位移,任何一段棕榈的位移都会牵动与之相互交织的棕榈,形成空间约束作用^[13],进而提高粘聚力,约束土体变形,增强抗剪强度。棕榈加筋后,加筋土体的抗剪强度相对于素土提高了,提高的幅度因加筋率的不同而不同。分析可知,随着加筋率的增大,土体里面的筋材与土的作用愈加明显,但当加筋率超过了某一值时,过多的筋材就会重叠,重叠的棕榈不能保证筋材与土体充分接触,破坏了土体的整体性^[14],从而表现出抗剪强度增幅降低的现象。

棕榈片尺寸的变化也影响着峰值强度的变化,图 1、2、3 和 4 中显示加筋率为 0.5% 时峰值强度增加最大,100 kPa 时增加幅度最大,其中 4 mm × 4 mm 峰值强度比素土提高了 22.5%,4 mm × 8 mm 比素土提高了 40.8%,4 mm × 12 mm 比素土提高了 59.2%,4 mm × 16 mm 比素土提高了 32.6%,可以看出,4 mm × 12 mm 的棕榈片使上海粘土的剪切强度增加最大。对于相应的残余强度,4 mm × 4 mm 比素土提高 29.0%,4 mm × 8 mm 比素土提高了 51.6%,4 mm × 12 mm 比素土提高了 90.3%,4 mm × 16 mm 比素土提高了 45.2%,可以看出 4 mm × 12 mm 对上海粘土的残余强度的影响效果也最好。因此在几组试验中,当棕榈尺寸为 4 mm × 12 mm 时,对提高峰值强度和残余强度效果均比较明显。

从表 2 中的抗剪强度指标也可以看出,4 mm × 12 mm 棕榈加筋土的粘聚力提高最大。充分说明当棕榈片尺寸为 4 mm × 12 mm 时,其加筋效果最好。综合比较数据,可看到合适的尺寸能最大程度地提高粘土的强度和延性。适当的棕榈尺寸和土颗粒能

够充分接触。尺寸太小不能充分发挥棕榈与土之间相互作用的摩擦力,尺寸太大会破坏土体的整体性,不能使筋材与土体充分接触,共同作用。

棕榈这种筋材对改善上海粘土的强度特性有一定的积极作用,且在改善强度特性的同时对土体的变形起到了抑制作用,从试验中可以得到,当尺寸为 4 mm × 12 mm,含筋率为 0.5% 时,对土体加筋效果最好。

4 结 语

棕榈加筋上海软粘土的研究不仅能够利用天然材料改善土的性能以降低成本,而且还能消除废弃棕榈对环境的污染。与以往的试验相比,试验结果与利用不同类型的废塑料或塑料纤维进行的试验结果一致^[15]。从实验中可得到以下结论:

(1) 棕榈加筋土使上海粘土的抗剪强度提高,其中粘聚力增加较大,内摩擦角几乎没有变化。尺寸为 4 mm × 12 mm 且加筋率为 0.5% 的棕榈加筋土的粘聚力最大,与素土相比,粘聚力提高了 135.4%。

(2) 棕榈加筋土的应力应变曲线随垂直压力的不同而不同。垂直压力较小时,应力应变曲线呈现应变-软化型;当垂直压力增大时,应力应变曲线呈应变-硬化型。剪切位移较小时,加筋作用微弱,随剪切位移的增大,加筋效果逐渐明显。

(3) 随筋材尺寸和质量加筋率增加。土的抗剪强度呈现先升高后降低的趋势。与素土相比,加筋土的抗剪强度提高,抗变形能力增强。适宜的加筋尺寸为 4 mm × 12 mm,适宜的加筋率为 0.5%。

(4) 利用棕榈加筋后,土体的残余强度相对于素土增大了,土体的抗变形能力增强了,且加筋对残余强度的影响要高于对峰值强度的影响。

参考文献:

- [1] 周学明,袁良英,蔡坚强,等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海地质,2005(4):6-9.
- [2] 周德陪,张峻云. 植物护坡工程技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003:5-7.
- [3] Jili Qu, Chencai Li, Baoshi Liu, etc. Effect of Random Inclusion of Wheat Straw Fibers on Shear Strength Characteristics of Shanghai Cohesive Soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013,31(2):511-518.
- [4] 吴景海,王德群,陈环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(2):199-204.

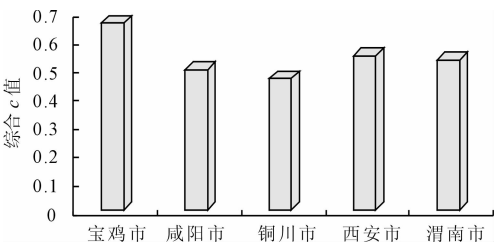


图2 2013 渭河干流水环境承载力综合评价计算结果

目前国内外对水环境承载力评价还没有一个统一的标准体系,本研究根据 C 值的大小将水环境承载力分为 3 级:承载性良好(Ⅰ级),可承载(Ⅱ级),不可承载(Ⅲ级)。本研究给定综合评价标准值是在参考全国平均水平以及国内部分经济、社会、环境协调发展,水环境开发利用实际水平的基础上确定的(见表 4)。

表 4 评价标准		
> 0.6	0.1~0.6	< 0.1
承载性良好(Ⅰ级)	可承载(Ⅱ级)	不可承载(Ⅲ级)

5 结 语

计算结果显示,渭河流域陕西段水资源承载力的综合评价值为 0.565,说明该流域整体在 2013 年属于可承载水平,有向可承载性良好方向发展的趋势。近些年来渭河流域在水环境、节水省水、实施分类供水方面取得初步成效。2013 年主要水污染物化学需氧量排放量控制在 4.99 万 t 以内,比 2010 年削减 8.2%;氨氮排放量控制在 0.51 万 t 以内,比

2010 年削减 11.2%。宝鸡市的综合 c 值最高,为 0.659,说明宝鸡市的水资源承载力在 5 个城市中最强。渭河流域今后应加强污染控制和生态治理,不断提高水资源对社会经济的支撑能力。

参考文献:

[1] 陕西省水利厅. 陕西省水利发展“十二五”规划[R]. 2011.

[2] 马英,石瑞杰. 基于模糊层次分析法的水环境承载力评价[J]. 安徽农业科学,2010,38(21):11405-11407.

[3] 李如忠. 基于指标体系的区域水环境动态承载力评价研究[J]. 中国农村水利水电,2006(9):42-46.

[4] 彭静,李翀,廖文根等. 水环境可持续承载评价方法及实证研究[J]. 中国人口. 资源与环境,2006(4):55-58.

[5] 傅鸿源,胡焱. 城市综合承载力研究综述[J];城市问题,2009(5):27-31.

[6] 冯兰刚,焦彦臣,都沁军. 基于 AHP 的河北省水资源承载能力分析[J]. 工业技术经济,2009(7):90-93.

[7] 杨秋林. 基于模糊综合评价的水资源承载力分析[J]. 国土与自然资源研究,2009(3):65-66.

[8] 李坤峰,谢世友. 基于主成分分析重庆水资源承载力影响因子评价[J]. 水科学与工程技术,2008(S2):38-41.

[9] 宋全香,左其亭. 水环境承载能力预测模型及其在郑州市的应用[J]. 水资源保护,2004,20(4):22-24.

[10] 崔树彬. 河流水环境承载力及其量化研究[J]. 水问题论坛,2003,38(1):28-32.

[11] 唐剑武,叶文虎. 环境承载力的本质及其量化初步研究[J]. 中国环境科学,1998,18(3):227-230.

[12] 陕西省水利厅. 渭河流域综合治理五年规划(2008-2012)[R]. 2008.

[13] 陕西省水利厅. 陕西省水资源综合规划[R]. 2009.

(上接第 164 页)

[5] 闫宁霞,姜宗科. 掺纤维固化土强度变化的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(8):146-148.

[6] Prabakar J, Sridhar R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. Construction and Building Materials,2002,16(2):123-131.

[7] Khosrow G, Romildo D, Toledof F, et al. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres[J]. Cement and Concrete Composites,1999,21(1):39-48.

[8] 唐朝生,施斌,高玮. 聚丙烯纤维和水泥对黏性土强度的影响及机理研究[J]. 工程地质学报,2007,15(1):108-113.

[9] 李晓华. 棕榈纤维的基本性能研究[D]. 重庆:资源纤维学,2012:20-24.

[10] JTG E40-2007. 中华人民共和国交通部. 公路土工试

验规程[S].

[11] 刘晓霞,茅深. 棕叶纤维性能研究[J]. 上海纺织科技,2006,34(9):20-21.

[12] 喻泽红,魏红卫,邹银生. 加筋红砂岩风化土强度和变形特性[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2770-2779.

[13] 魏丽,柴寿喜,蔡宏州,等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变[J]. 土木工程学报,2012,45(1):109-113.

[14] 包承纲,丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. 土工基础,2012,26(1):80-83.

[15] Benson CH, Khire MU. Reinforcing sand with strip with strips of reclaimed high high-density polyethylene[J]. Geotechnical Engineering,1994,120(5):835-855.