

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.06.010

云南红土加筋效应研究

黄 英,符必昌,王海军,金克盛,张祖莲

(昆明理工大学电力工程学院,云南 昆明 650500)

摘要 针对云南加筋红土的三轴试验结果,研究排水条件、筋材种类、加筋层数等因素对云南红土加筋效果的影响。加筋效果采用加筋效果系数、归一化加筋效果系数和加权加筋效果系数来衡量。结果表明 红土的加筋效果系数随围压的变化规律不显著,但归一化加筋效果系数的绝对值随围压的增大逐渐减小并趋向于零,强度和变形加权加筋效果系数随加筋层数的增加而增大,孔压加权加筋效果系数随加筋层数的增加而减小 红土在完全排水条件下加筋,强度加筋效果系数大于 1,并随加筋层数的增加而增大 在固结不排水条件下加筋,强度和变形加筋效果系数都随加筋层数的增加逐渐增大,孔压加筋效果系数则随之逐渐减小 在完全不排水条件下加筋,强度和变形加筋效果系数都小于或等于 1。认为红土的加筋机理可以从筋材在土体中所具有的隔离效应、阻力效应、拱效应、压密效应、孔压效应等几个方面的综合作用来解释。

关键词 加筋红土 排水条件 加筋效果 加筋机理

中图分类号 :TU432 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)06-0035-06

Reinforcement mechanism of Yunnan laterite//HUANG Ying, FU Bi-chang, WANG Hai-jun, JIN Ke-sheng, ZHANG Zu-lian (Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract :Based on the results of triaxial tests on reinforced Yunnan laterite, the effects of drainage conditions, reinforcing materials and geogrid layers on the reinforcement of Yunnan laterite were studied. The reinforcement effects were measured by means of the coefficients of reinforcement effects, normalized reinforcement effects and weighted reinforcement effects. The results shows that the coefficient of the reinforcement effects doesn't change evidently with the change of confining pressure, but the coefficient of the normalized reinforcement effects decreases and tends to zero when the confining pressure increases. The coefficients of the weighted reinforcement effects of strength and deformation increase but those of pore pressure decrease with the increase of the geogrid layers. For the completely drained reinforced laterite samples, the coefficient of the strength reinforcement effects is larger than 1 and increases with the increase of the layers. For the consolidated and undrained reinforced laterite samples, the coefficients of both the strength and deformation reinforcement effects increase but those of the pore pressure decrease with the increase of the geogrid layers. For the completely undrained reinforced samples, the coefficients of both the strength and deformation reinforcement effects are not larger than 1. The reinforcement mechanism of laterite can be interpreted from the aspects of isolation effects, resistance effects, arching effects, compaction effects and pore pressure effects of the reinforcing materials.

Key words :reinforced laterite ; drainage condition ; reinforcement effect ; reinforcement mechanism

一般认为,在砂土等粗颗粒的土中加入各种土工合成材料可以显著改善土体性能,提高强度,减小变形,其加筋效果随不同土质、不同筋材而异。目前国内外学者主要研究不同加筋材料对砂土、碎石土抗剪强度特性的影响,如 Moroto^[1]、吴景海^[2]、保华富等^[3]、顾培等^[4]利用三轴压缩试验研究了砂土、碎石土的加筋特性,试验结果表明,加筋提高了砂土和碎石土的抗剪强度,减小了变形,筋材对土体具有侧向约束作用。而对黏性土的加筋问题研究较少,黏

性土由于颗粒细小,与筋材作用的界面摩擦力小,不符合早先工程界提出的,粒径小于 0.015 mm 的颗粒质量分数应在 15% 以下且内摩擦角应在 25°以上的土体才能加筋的要求^[5],这实际上排除了黏性土的加筋问题。但 Ingold^[6]通过用多孔塑料、纤维毡、非编织纤维及铝片等多种材料加筋黏土进行三轴不排水剪切试验,发现加筋黏土的不排水强度低于未加筋时的值,而用热黏织物加筋的高岭土试样进行排水三轴剪切试验,则发现其强度高于未加筋时的值。

赵爱根^[7]研究表明,加筋黏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。为了提高加筋黏土的不排水强度,采用在织物两侧各铺1层密砂的复合加筋黏土方法,效果显著。梁波等^[8]、魏红卫等^[9]、唐朝生等^[10]都研究了黏性土的加筋问题。对加筋机理的解释,一种是由 Yang^[11]提出来的等效围压原理,另一种是准黏聚力原理^[3],这2种原理实质上等价。目前许多人通过模型试验和有限元计算来分析加筋机理。喻泽红等^[12]研究了土工网加筋土结构在工作时的应力变化;张兴强等^[13]研究了交通荷载作用下加筋路基的应力变化;周志刚等^[14]基于 Biot 固结理论和邓肯-张模型的有限元法研究了土工格栅加固碎石桩复合地基抵抗变形破坏的能力;王伟等^[15]从加筋的内聚力效应、波纹效应、隔离效应以及拱效应等几个方面解释了土与机织土工织物相互作用的机理。

试验结果表明,黏性土的加筋效果取决于排水条件,只要结合实际工程条件对黏性土进行加筋,可以保证黏性土的加筋效果。作为一大特殊土类的红土,在云南的基础设施工程中广泛应用,其加筋效果及加筋机理值得探讨。为此,笔者结合云南典型红土在不同排水条件、不同筋材种类、不同加筋层数工况下的三轴试验结果^[16],对比研究排水条件、筋材种类、加筋层数等因素对云南红土加筋效果的影响,进而阐明云南红土的加筋机理,以作为黏性土加筋问题研究的补充,为红土加筋问题的深入研究奠定基础。

1 云南红土加筋效果分析

1.1 红土加筋试验结果

以云南典型红土作为填料,选用2种不同的玻璃纤维(1号、2号)和1种土工布(3号)作为加筋材料,分别进行不同排水条件下红土不加筋(试样编号0-0)、加1层筋(试样编号1-1,2-1,3-1)和加3层筋(试样编号1-3,2-3)的三轴剪切试验。试样编号的第1个数据表示加筋材料代号,第2个数据表示加筋层数。试样尺寸为 $\varnothing 61.8\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 。其中,1号玻璃纤维厚0.25 mm,网格较大、较粗糙;2号玻璃纤维厚0.15 mm,网格较小、较平滑;3号土工布厚0.25 mm,较紧密、较粗糙。

试验结果表明^[16]:在完全排水(CD)试验条件下,加筋红土的破坏主应力差 q_f 增大,破坏轴向应变 ϵ_{1f} 、破坏体应变 ϵ_{vf} 、破坏侧向应变 ϵ_{3f} 减小,上述各应力-应变参数随加筋层数的增加而增大,加筋提高了红土的抗剪强度,减小了变形。在固结不排水(CU)试验条件下,加筋红土的 q_f 和 ϵ_{1f} 减小,但随着

加筋层数的增加而增大,加筋后破坏孔压 u_f 和破坏孔压系数 A_f 增大,但随着加筋层数的增加而减小,说明红土在不排水条件下剪切,当加筋层数较少时,加筋反而会降低红土的抗剪强度,只有增加加筋层数,红土的抗剪强度才会提高,在这种情况下应慎重考虑红土加筋问题。

1.2 红土加筋效果

引入加筋效果系数来衡量红土的加筋效果,加筋效果系数是指加筋后红土各项应力参数、应变参数与加筋前各项应力参数、应变参数之比。由于加筋前后红土各应力参数、应变参数、围压的变化以及排水条件的影响,红土的加筋效果系数可大于1,也可小于1,相应地也就决定了加筋对红土强度和变形的影响。表1给出了不同筋材、不同加筋层数以及不同排水条件下红土强度及变形加筋效果的比较,表2给出了红土的抗剪强度指标加筋效果系数。

表1表明,红土的强度加筋效果系数 R_{q_f} ,变形加筋效果系数 $R_{\epsilon_{1f}}$, $R_{\epsilon_{3f}}$, $R_{\epsilon_{vf}}$ 以及孔压加筋效果系数 R_{u_f} 和 R_{A_f} 随围压 σ_3 变化而变化。总体来说,在CD条件下, R_{q_f} 大于1,且随加筋层数的增加而增大;但 $R_{\epsilon_{1f}}$, $R_{\epsilon_{3f}}$, $R_{\epsilon_{vf}}$ 有时大于1,有时小于1,规律性不明显。在CU条件下,加1层筋时 R_{q_f} 和 $R_{\epsilon_{1f}}$ 都小于1,且均随加筋层数的增加而增大,而 R_{u_f} , R_{A_f} 随加筋层数的增加而减小。在不完全排水(UU)条件下, R_{q_f} 和 $R_{\epsilon_{1f}}$ 都小于或等于1。

表2表明,加筋引起红土的黏结力加筋效果系数 R_c 和内摩擦角加筋效果系数 R_ϕ 发生变化。红土在CD条件和CU条件下加筋, R_c 均随加筋层数的增加逐渐增大,1号筋材的 R_ϕ 随加筋层数的增加而增大,2号筋材的 R_ϕ 随加筋层数的增加而减小,这是由于1号筋材比2号筋材粗糙;在UU条件下加筋, R_c , R_ϕ 均小于1。表明红土在不同排水条件下加筋,加筋效果不同,黏聚力和内摩擦角二者综合作用的结果改变了加筋红土的抗剪强度特性。

1.3 红土归一化加筋效果

加筋效果系数只考虑了加筋前后红土各项应力、应变参数的变化,没有考虑围压对这些参数变化的影响,引入归一化加筋效果系数来反映这一影响。归一化加筋效果系数就是指在各级围压下加筋前后的参数变化与加筋前的参数及相应围压之比。归一化加筋效果系数可大于零,也可小于零。考虑围压的影响后,破坏主应力差、破坏轴向应变、破坏孔压、破坏体应变归一化加筋效果系数 B_{q_f} , $B_{\epsilon_{1f}}$, B_{u_f} , $B_{\epsilon_{vf}}$ 的绝对值随围压 σ_3 的增大逐渐减小。图1~4是红

表 1 不同筋材、不同加筋间距以及不同排水条件下红土强度及变形加筋效果比较

试验条件	围压 σ_3/kPa	R_{q_f}					$R_{\epsilon_{1f}}$				
		1-1	1-3	2-1	2-3	3-1	1-1	1-3	2-1	2-3	3-1
CD	100	0.901	1.204	0.812	1.200		0.410	0.820	0.341	0.924	
	200	1.024	1.474	1.128	1.301		1.378	0.997	1.122	1.117	
	300	1.009	1.242	1.012	1.059		0.767	1.120	0.878	1.232	
	400	1.021	1.196	1.079	1.097		0.767	0.859	0.859	0.719	
CU	100	0.646	1.066	0.555	1.056	0.852	0.741	1.191	0.315	0.920	0.556
	200	0.769	1.039	0.673	0.940	0.917	0.809	1.705	0.491	1.166	0.900
	300	0.848	1.024	0.828	0.949	0.930	0.829	1.702	0.783	1.143	0.969
	400	0.817	1.026	0.823	0.929	0.897	0.813	1.803	0.820	1.026	0.967
UU	100	0.906		0.995		0.910	0.475		0.642		0.942
	200	0.873		0.957		0.805	0.500		0.586		1.000
	300	0.749		0.899		0.762	0.512		0.637		0.925
	400	0.784		0.905		0.797	0.496		0.614		0.821

试验条件	围压 σ_3/kPa	$R_{\epsilon_{vf}}$					$R_{\epsilon_{3f}}$				
		1-1	1-3	2-1	2-3	3-1	1-1	1-3	2-1	2-3	3-1
CD	100	0.435	1.251	0.638	1.919		0.406	0.743	0.288	0.628	
	200	1.128	0.655	0.671	1.060		1.513	1.183	1.370	1.146	
	300	0.909	1.058	0.924	1.112		0.690	1.148	0.852	1.294	
	400	0.891	0.829	0.739	0.934		0.708	0.874	0.917	0.617	

试验条件	围压 σ_3/kPa	R_{u_f}					R_{A_f}				
		1-1	1-3	2-1	2-3	3-1	1-1	1-3	2-1	2-3	3-1
CU	100	0.793	0.648	0.759	0.672	0.966	1.227	0.909	1.364	0.636	1.136
	200	1.033	0.945	1.055	0.703	1.066	1.318	1.000	1.545	0.727	1.136
	300	1.021	0.806	1.007	0.583	1.056	1.172	0.759	1.172	0.552	1.103
	400	1.068	0.637	1.026	0.447	1.028	1.300	0.600	1.100	0.467	1.133

注： R_{q_f} 、 $R_{\epsilon_{1f}}$ 分别表示破坏主应力差和破坏轴向应变的加筋效果系数； $R_{\epsilon_{vf}}$ 、 $R_{\epsilon_{3f}}$ 分别表示 CD 试验条件下破坏体应变和破坏侧向应变的加筋效果系数； R_{u_f} 、 R_{A_f} 分别表示 CU 试验条件下破坏孔压和破坏孔压系数的加筋效果系数。

表 2 红土的强度加筋效果系数和加权加筋效果系数

试样编号	CD 试验条件 加筋效果系数		CD 试验条件 加权加筋效果系数			
	R_c	R_φ	P_{q_f}	$P_{\epsilon_{1f}}$	$P_{\epsilon_{vf}}$	$P_{\epsilon_{3f}}$
1-1	1.013	1.013	1.006	0.854	0.898	0.833
1-3	1.571	1.061	1.266	0.961	0.905	1.005
2-1	0.864	1.052	1.042	0.867	0.771	0.925
2-3	1.556	1.039	1.137	0.973	1.111	0.927

试样编号	CU 试验条件 加筋效果系数		CU 试验条件 加权加筋效果系数			
	R_c	R_φ	P_{q_f}	$P_{\epsilon_{1f}}$	P_{u_f}	P_{A_f}
1-1	0.482	0.995	0.800	0.810	1.019	1.258
1-3	0.941	1.037	1.032	1.692	0.802	0.759
2-1	0.250	0.947	0.768	0.693	0.999	1.237
2-3	1.032	0.931	0.950	1.079	0.562	0.561
3-1	1.073	0.899	0.909	0.913	1.038	1.125

试样编号	UU 试验条件 加筋效果系数		UU 试验条件 加权加筋效果系数	
	R_c	R_φ	P_{q_f}	$P_{\epsilon_{1f}}$
1-1	0.953	0.644	0.804	0.500
2-1	0.967	0.467	0.923	0.618
3-1	0.908	0.956	0.799	0.900

土在不同排水条件下典型的归一化加筋效果系数随围压的变化关系。

图 1~4 表明：当围压较低时，各归一化加筋效果曲线较分散，说明低围压的影响较大；围压较高时，各归一化加筋效果曲线逐渐靠拢，趋向于零，说

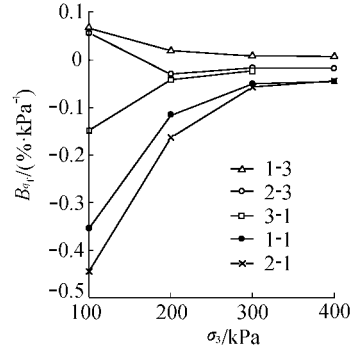


图 1 围压对红土 CU 试验 B_{q_i} 的影响

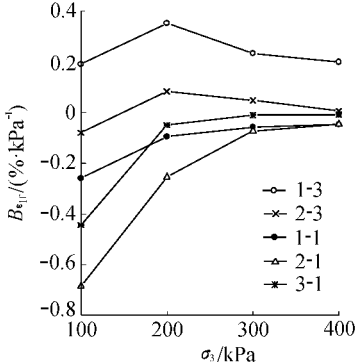


图 2 围压对红土 CU 试验 $B_{\epsilon_{1f}}$ 的影响

明围压越大影响越小，归一性越好。图 1、图 2、图 4

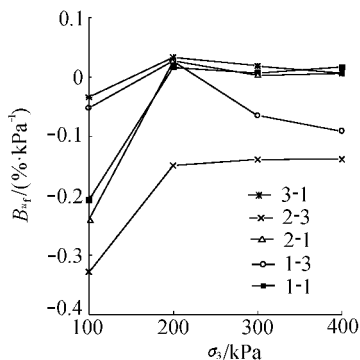


图3 围压对红土 CU 试验 B_{u_f} 的影响

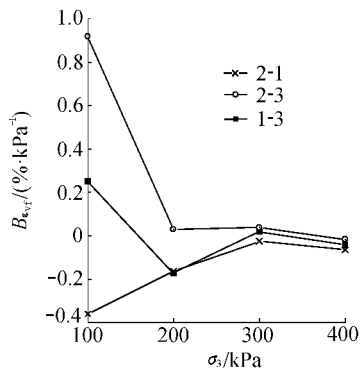


图4 围压对红土 CD 试验 $B_{\epsilon_{vf}}$ 的影响

中1-3,2-3 曲线分别在 1-1,2-1 曲线的上方,说明随着加筋层数的增加, B_{q_f} , $B_{\epsilon_{lf}}$, $B_{\epsilon_{vf}}$ 增大;图3 中 1-3,2-3 曲线分别在 1-1,2-1 曲线的下方,说明随着加筋层数的增加, B_{u_f} 减小。

1.4 红土加权加筋效果

红土加筋前后的应力、应变参数随围压的不同而变化。红土的加筋效果系数反映了红土加筋前后各应力、应变参数的变化,红土归一化加筋效果系数则反映了红土的加筋效果随围压的变化,相应地,加筋效果系数以及归一化加筋效果系数也随围压变化而变化。为排除围压的影响,引入加权加筋效果系数 P ,它是考虑各级围压的影响后得到的加筋效果系数的加权平均值:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 \sigma_{3i} R_i}{\sum_{i=1}^4 \sigma_{3i}}$$

式中: R_i 为对应于各级围压下的加筋效果系数; σ_{3i} 为各级围压。

引入加权加筋效果系数后可以不受围压影响,直接比较加筋前后红土应力应变特性的变化。破坏主应力差、破坏轴应变、破坏体应变、破坏侧应变、破坏孔压、破坏孔压系数的加权加筋效果系数 P_{q_f} , $P_{\epsilon_{lf}}$, $P_{\epsilon_{3f}}$, P_{u_f} , P_{A_f} 计算结果见表2。

由表2 可见:在 CD 条件下,红土的强度加权加

筋效果系数 P_{q_f} 与变形加权加筋效果系数 $P_{\epsilon_{lf}}$, $P_{\epsilon_{3f}}$, $P_{\epsilon_{vf}}$ 成反比, P_{q_f} 大于1, $P_{\epsilon_{lf}}$, $P_{\epsilon_{3f}}$, $P_{\epsilon_{vf}}$ 总体上小于1,且都随加筋层数的增加而增大,表明加筋提高了强度,减小了变形。在 CU 条件下,相同加筋层数时的 P_{q_f} , $P_{\epsilon_{lf}}$ 分别与 P_{u_f} , P_{A_f} 成反比,加筋层数较少时, P_{q_f} , $P_{\epsilon_{lf}}$ 小于1,而 P_{u_f} , P_{A_f} 大于1 随着加筋层数的增加, P_{q_f} , $P_{\epsilon_{lf}}$ 逐渐增大, P_{u_f} , P_{A_f} 逐渐减小。这表明只有加入较多筋材时,才有可能提高强度。在 UU 条件下, P_{q_f} , $P_{\epsilon_{lf}}$ 小于1,表明加筋降低了红土的强度。说明筋材与红土的相互作用改变了加筋红土的抗剪强度特性。

2 云南红土加筋机理分析

加筋改变了红土的抗剪强度特性,红土的加筋机理可以根据筋材与红土的相互作用来解释,具体可以归结为加筋红土所具有的隔离效应、阻力效应、拱效应、压密效应、孔压效应等几个方面综合作用的结果。

2.1 加筋红土的隔离效应

加筋红土的隔离效应也称为不均匀效应,指在红土体中加入筋材,破坏了原有红土体的整体性、连续性和不均匀性,把红土体分成几个相对独立的部分,筋材起到把各部分红土体隔离开来的作用。由于筋材的隔离作用,在红土体中构成了分界面,在分界面处是筋材与红土作用,而不是红土之间相互作用,从而导致加筋红土的不均匀性增强。一方面,筋材的存在,人为地破坏了原有红土体内部颗粒之间的黏结力和摩擦力;另一方面,由于外荷载的作用,在筋材与红土体分界面处又形成了新的黏结力和摩擦力,这些力的大小取决于筋材的粗糙度、厚度、透水性、网格大小以及土样的含水情况等因素的综合影响。不论排水条件如何,土体中加筋层数越多,分界面多,筋材的隔离作用越强,加筋红土体越不均匀。就本试验的筋材种类而言,3 号土工布的隔离效应最强,导致加筋红土的不均匀性最差;1 号玻璃纤维的隔离效应最弱,导致加筋红土的不均匀性相对较好;2 号玻璃纤维的隔离效应居中,导致加筋红土的不均匀性介于前两者之间。

2.2 加筋红土的阻力效应

加筋红土的阻力效应也称为嵌固效应,包括内摩擦效应和黏结力效应。加筋红土的内摩擦效应是指加筋红土在剪切过程中红土颗粒与筋材发生相互摩擦作用的特性;黏结力效应是指由于外荷载的作用,红土颗粒与筋材之间发生相互咬合的特性。

土体在剪切过程中沿着其剪切面发生破坏。对于不加筋红土,在整个试验过程中只需克服红土体

内部颗粒之间的黏结力和摩擦力,而对加筋红土,由于筋材的存在,它不仅要克服红土体内部颗粒之间的黏结力和摩擦力,还要克服筋材的阻力。对每一部分红土体而言,需克服的是红土体内部颗粒之间的黏结力和摩擦力;当剪切面到达分层处,由于筋材的弹性模量大于红土的弹性模量,筋材在分层面处起着阻挡的作用,剪切面要到达下一部分红土就必须克服筋材的阻力,而筋材的阻力取决于外荷载作用下红土颗粒与筋材之间相互咬合、相互摩擦的能力,筋材与红土特性的差异又决定了筋材的破坏形式(筋材是被拉断还是被拔出),这一界面作用特性与试验的排水条件密切相关,由此决定了新产生的黏结力和内摩擦力的大小。在排水条件下,红土颗粒与筋材之间相互咬合、相互摩擦的能力强,筋材阻力大,克服筋材阻力就需要较大的外荷载,加筋新产生的黏结力和内摩擦力的综合效果比不加筋时强,因而加筋提高了强度;在不排水条件下,红土颗粒与筋材之间由于含水较多,相互咬合、相互摩擦的能力较弱,筋材阻力相对较小,克服筋材阻力只需要较小的外荷载,这时加筋引起的黏结力和内摩擦力的综合效果比不加筋时弱,因而加筋降低了强度。就筋材而言,1号玻璃纤维的阻力效应最强,2号玻璃纤维的阻力效应居中,3号土工布的阻力效应最弱。

2.3 加筋红土的拱效应

加筋红土的拱效应也称为侧约束效应,指加筋红土在外荷载的作用下侧向产生的变形沿轴向呈拱形分布,由于筋材的隔离作用,导致相同条件下加筋红土的侧向变形比不加筋前有所减小。隔离作用越强,拱效应越弱,所以,1号玻璃纤维的拱效应最强,2号玻璃纤维的拱效应居中,3号土工布的拱效应最弱。不加筋时,试样沿轴向只有1个拱形;加筋后,筋材将完整试样沿轴向分成几个相对独立的部分,各部分的试样高度比不加筋时的小,轴向荷载作用产生的拱形多,侧向约束作用加强,各拱形侧向产生的变形明显小于加筋前的侧向变形;加筋层数越多,分成的独立部分越多,各部分的试样高度越小,拱形数越多,侧向约束作用越强,各拱形产生的侧向变形越小,加筋红土的完整性越差。相同条件下加筋红土达到与不加筋红土相同强度时的侧向变形减小。筋材的存在削弱了试样侧向变形的能力,约束了试样的侧向变形。但由于在排水条件下加筋提高了红土的抗剪强度,实际达到破坏时加筋红土的侧向变形比不加筋时的大。

2.4 加筋红土的压密效应

加筋红土的压密效应也称为排水排气效应,指加筋红土在整个试验过程中由于水和气的排出,引

起各部分试样体积减小、整个试样密实程度提高的性能。对三轴试验而言,由于试样饱和,压密效应也就是排水效应。

不加筋红土中水的排出主要依靠水沿试样纵向向下和横向的渗透,由于不加筋红土的完整性好,水的排出速度慢。对加筋红土而言,由于筋材与红土是异种介质的分界面,试样中的水可沿试样纵向向上和向下以及横向进行渗透,是一个人为软弱面,水分聚集在分层处,沿层面水平径向流动,有利于水分沿试样侧面排出,水的排出速度较快。随着试样中水分不断排出,试样的体积减小,试样的密实程度越来越大。加筋层数越多,各部分的径高比越小,越有利于水的排出,试样的密实程度增大。如果排水,试样内部、分层处以及试样侧面的水较少;如果不排水,水分主要集中在分层处以及试样的侧面。

在完全排水条件下,不论是围压阶段或剪切阶段,加筋红土排出的水量比不加筋红土多,加筋试样的含水比不加筋时少,导致加筋红土的密实程度比不加筋红土的密实程度高,各部分承受外荷载的能力增大,因而整个加筋红土的承载力增大,强度提高。加筋层数越多,排出的水量越多,加筋红土的密实程度越高,承受外荷载的能力越大,强度越高。

对于固结不排水试验,在围压阶段,加筋红土比不加筋红土排出的水量多,加筋红土的密实程度高;在剪切阶段,由于不排水,不加筋试样的含水较均匀,而加筋土体各部分的水向筋材处聚集,虽然各部分试样中的密实程度相对提高,但造成筋材处的软弱面承受外荷载的能力减弱,强度减小。随着加筋层数的增多,在围压阶段排出的水量更多,试样中含水量比不加筋或加筋层数较少时低,加筋土体的密实程度提高。在不排水条件下剪切,试样的加筋层数越多,分层处集聚的水越少,分层的软弱面特性减弱,试样的含水越接近均匀,承受外荷载的能力增大,强度提高。

在完全不排水条件下,由于整个试验过程都不排水,聚集在加筋试样分层处的水明显多于不加筋试样的水,筋材处的软弱面特性更加显著,只能承受较低的外荷载,导致强度降低。

就筋材而言,1号玻璃纤维的排水效应最强,2号玻璃纤维的排水效应居中,3号土工布的排水效应最弱。

2.5 加筋红土的孔压效应

加筋红土的孔压效应也称为润滑效应,指加筋红土在不排水条件下由于水分聚集在分层处,导致分层处的孔压增大、红土体与筋材之间的润滑作用增强的效应。

红土在不排水条件下剪切时,不管加筋材料的透水性大小,由于筋材在红土体中起隔离作用,因而红土体中的水主要集中在加筋材料附近。如果加筋材料的透水性较大,则水主要集中在筋材处。如果加筋材料的透水性较小,则水主要集中在筋材的两侧。但都会使分层处的含水量增大,而距离分层处较远的红土体中含水较少,这样,就会使整个加筋红土体的含水不均匀,因而孔压分布也不均匀,在分层处的孔压较大,距离分层处较远的孔压较小。由于筋材水平铺设,在同一分层面上的含水较均匀,孔压也较均匀,使筋材与红土体的润滑作用增强,界面摩擦阻力减小,传递外荷载的能力减弱,相应的强度减小。实际上,分层面就是一个人造的应力薄弱面,由于不加筋红土的整体性好,含水较均匀,孔压分布也较均匀,不存在界面摩擦阻力问题,传递外荷载的能力取决于整个红土体的应力情况。

如果加筋层数增多,加筋间距减小,整个加筋红土体中的水就会集中在各个分层处,与分层较少时比较,各分层处的含水相应较少,孔压也较小,传递外荷载的能力有所增强,强度相应增大。如果加筋层数足够多,减小了加筋红土的拱效应,加筋红土体的含水趋于均匀,孔压较均匀,传递外荷载的能力增强,使加筋红土的抗剪强度增大。这是因为筋材的存在导致加筋红土的润滑作用和紧密程度改变。加1层筋材时,筋材位于试样的中部位置,破坏了试样的完整性,在外荷载作用下筋材两边试样中的水向筋材附近集聚,导致筋材处的水分增多,润滑作用增强,承受外荷载的能力减弱,因而加筋试样的破坏主应力差比不加筋时减小,试样产生的轴向变形也小,由于不排水,且水分多,则水承担的外荷载大,因而孔隙水压力增大。但随着加筋层数的增加,加筋间距减小,各部分试样中的水向各筋材处靠拢,由于层数多,试样中的排水比加1层筋时更充分、更彻底,导致加筋样的紧密程度提高,承受外荷载的能力增强,因而加筋时的破坏主应力差比不加筋时增大,试样产生的轴向变形也相应增大。由于各分层处的水比只加1层时筋材处的水少,水承担的外荷载小,因而孔隙水压力减小。

不同排水条件下,加筋红土各个加筋效应的内在表现体现了红土加筋的微观机理,而各个加筋效应综合作用的结果在宏观上体现出加筋改变了试样的侧向约束条件,相当于改变了作用于试样的周围压力,在本质上可以用广义等效围压^[17]的概念来具体描述。

3 结 论

a. 加筋改变了红土的抗剪强度特性,排水条件

和筋材种类不同,加筋效果也不同。云南红土的加筋效果可以用加筋效果系数、归一化加筋效果系数以及加权加筋效果系数来衡量。加筋效果系数反映不同围压下加筋对红土强度及变形的影响,归一化加筋效果系数反映围压对红土加筋效果的影响,加权加筋效果系数反映加筋前后红土强度及变形特性的变化。红土的加筋效果系数随围压的变化规律不显著,但归一化加筋效果系数的绝对值随围压的增大逐渐减小并趋向于零,强度和变形的加权加筋效果系数随加筋层数的增加而增大,孔压的加权加筋效果系数随加筋层数的增加而减小。

b. 红土的加筋效果随排水条件而变化。红土在完全排水条件下加筋,强度加筋效果系数大于1,并随加筋层数的增加而增大;变形加筋效果系数的规律性不明显。在固结不排水条件下,加1层筋时强度和变形加筋效果系数小于1,随着加筋层数的增加,强度和变形加筋效果系数逐渐增大。孔压加筋效果系数随加筋层数的增加而减小。在完全不排水条件下加筋,强度加筋效果系数和变形加筋效果系数都小于或等于1。说明实际工程应用红土加筋时,应考虑不同排水条件对红土加筋效果的影响。

c. 红土的加筋机理可以从筋材在土体中所具有的隔离效应、阻力效应、拱效应、压密效应以及孔压效应等几个方面的综合作用来解释。

参考文献:

- [1] MOROTO N. Triaxial compression test for reinforced sand with a flexible tension member [C]//Int Symposium on Earth Reinforcement Practice. Kyushu: Japan Soc Civil Engineers, 1992: 131-134.
- [2] 吴景海. 土工合成材料与土工合成材料加筋砂土的相关特性[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 538-541.
- [3] 保华富, 周亦唐, 赵川, 等. 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 217-221.
- [4] 顾培, 高长胜, 朱群峰, 等. 加筋土复合体应力应变特性及加筋机理[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(S1): 241-243.
- [5] 刘宗耀. 近代土工合成材料的发展[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(2): 87-95.
- [6] INGOLD T S. Reinforced clay subject to undrained triaxial loading [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1983, 109(5): 738-743.
- [7] 赵爱根. 加筋黏土的抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 69-75.
- [8] 梁波, 孙遇祺. 饱和黏性加筋土的强度特性研究[J]. 兰州铁道学院学报, 1992, 11(12): 49-59.

(下转第 73 页)

- 1992 968-982.
- [19] GULER M, TUNCER B E, BOSSCHER P J. Measurement of particle movements in granular soils using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 1999, 13(2): 116-122.
- [20] GILL D R, LEHANE B M. An optical technique for investigating soil displacement patterns [J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24(3): 324-329.
- [21] 朱维新. 土工离心模型试验研究综述[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 82-95.
- [22] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 92-97.
- [23] 董龙雷, 闫桂荣, 廖红建. 岩土工程中动态离心模型试验技术的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 789-793.
- [24] 孙锐, 袁晓铭, 王永志, 等. NEES 系统中振动离心机最新进展及国内振动离心机发展设想[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 31-39.
- [25] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199-202.
- [26] 周健, 刘宁. 离心模型试验技术应用的新进展[J]. 上海地质, 2002(1): 52-56.
- [27] 胡黎明. 离心模型试验技术在环境岩土工程中的应用与展望[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 327-330.
- [28] 陈正发, 于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 4026-4033.
- [29] 于玉贞, 邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1320-1323.
- [30] 章为民, 日下部治. 岩性地层地震反应离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 28-31.
- [31] 邢建营, 邢义川, 梁建辉. 土工离心模型试验研究的进展与思考[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(1): 27-31.
- [32] 徐福卫, 陈海玉. 数字网格摄影测量法及其在滑坡模型试验中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(2): 216-220.
- [33] 任伟中, 寇新建, 凌浩美. 数字化近景摄影测量在模型试验变形测量中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 436-440.
- [34] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1684-1690.
- [35] 汪敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的图像相关方法[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5135-5139.
- [36] 邵龙潭, 王助贫, 刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 159-163.
- [37] 邵龙潭, 孙益振, 王助贫, 等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 29-34.
- [38] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 170-175.

(收稿日期 2011-01-24 编辑 骆超)

(上接第 40 页)

- [9] 魏红卫, 喻泽红, 邹银生. 排水条件对土工合成材料加筋黏性土特性的影响[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 838-845.
- [10] 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 含砂量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2968-2973.
- [11] YANG Z. Strength and deformation characteristic of reinforced sand[D]. Los Angeles: University of California, 1972.
- [12] 喻泽红, 张起森. 土工网与土相互作用机理的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 76-82.
- [13] 张兴强, 闫澍旺, 邓卫东. 交通荷载作用下加筋道路机理分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 94-98.
- [14] 周志刚, 郑健龙, 高燕希. 土工格栅加固土抗压强度的极限平衡分析[J]. 长沙交通学院学报, 1998, 14(1): 39-43.
- [15] 王伟, 杨尧志. 土工织物与土相互作用的机理[J]. 无锡轻工大学学报, 1999, 18(3): 107-112.
- [16] 黄英, 符必昌, 金克盛, 等. 不同排水条件加筋红土三轴试验研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2006, 31(1): 56-60.
- [17] 黄英, 符必昌, 金克盛, 等. 加筋红土的广义等效围压和极限平衡条件[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 533-539.

(收稿日期 2011-05-04 编辑 骆超)

(上接第 65 页)

- [9] CHENG Zhu-hua, ZHANG Jia-bao. Introducing fractal dimension to estimation of soil sensitivity to preferential flow [J]. Pedosphere, 2002, 12(3): 201-206.
- [10] 吴海毓, 王桥. 遥感在大型工程生态环境影响评价中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2009(1): 48-49.
- [11] MO Deng-kui, LIN Hui, LI Ji-ping, et al. Design and implementation of a high spatial resolution remote sensing image intelligent interpretation system [J]. Data Science Journal, 2007, 6(S): 445-452.
- [12] LIU Yu, SUN Wen-bang. Design and implementation of remote sensing mage coordinated interpretation system under web environment [C]//Proceedings of 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Beijing: IEEE Industrial Electronics Society, 2010: 248-250.
- [13] HAN Lin, LIU Xue-gong, ZHANG Yan-ning. Interpretation of river main-flow from remote sensing images: studying on dynamic transmission cross-correlation method [C]//Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Los Angeles: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008: 2281-2289.

(收稿日期 2010-02-22 编辑 骆超)