

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1345-07

H-V 加筋饱和砂土性状的三轴试验研究

张孟喜, 陈高峰, 朱 引, 李晋杰

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 进行了 H-V (水平-竖向) 加筋饱和砂土固结不排水三轴试验。加筋材料采用镀锌铁皮和有机玻璃两种不同材料, 在不同竖筋高度、不同围压下共进行了 44 组试验, 研究了加筋饱和砂土的应力-应变关系、孔压-应变关系、强度特性及破坏形态, 探讨了不同加筋高度、不同围压及不同筋材对加筋饱和砂土强度的影响, 同时比较了立体加筋与土工格室加筋的异同, 对饱和紧砂的空化现象及其影响进行了分析。试验结果表明, 相对于无筋土及传统的水平加筋土而言, 其抗剪强度均有大幅度提高; 尤其是镀锌铁皮加筋, 不仅提高了饱和砂土的有效黏聚力, 也提高了有效内摩擦角, 同时改善了砂土的延性。

关 键 词: H-V (水平-竖向) 加筋; 饱和砂土; 三轴试验; 强度; 变形; 空化

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

Triaxial tests on saturated sands reinforced with horizontal-vertical inclusions

ZHANG Meng-xi, CHEN Gao-feng, ZHU Yin, LI Jin-jie

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A series of consolidated undrained triaxial tests were carried out on saturated sand reinforced with horizontal-vertical(H-V) inclusions of galvanized iron and perspex. The behavior of reinforced saturated sand was studied in terms of stress-strain relationship, pore pressures, shear strength of the soil and the failure situation of specimen. The influences of different vertical configurations of H-V reinforcing elements, confining pressures and reinforcing materials on the strength of reinforced saturated sand were discussed. The relationship between 3 dimensional reinforcing and geocell reinforcing was presented; and cavitation occurred in dilatant soils was discussed. It is shown that the peak deviator stress and shear strength at failure increase greatly for saturated sand reinforced with H-V elements as compared with unreinforced sand and sand reinforced with conventional horizontal inclusions, especially for those reinforced with galvanized iron sheet reinforcements. Meanwhile, reinforcements made of galvanized iron can improve the ductility of saturated sand.

Key words: horizontal-vertical (H-V) inclusion; saturated sand; triaxial test; strength; deformation; cavitation

1 引 言

自从法国工程师 Henri Vidal 提出加筋土的理论, 并按其理论成功设计第一座加筋土公路挡墙后, 加筋土结构的应用与研究在世界各地迅速开展。加筋土的试验研究主要有筋材物理力学性质测定、土筋界面相互作用试验、三轴剪切试验、模型试验、离心试验和原位试验。在三轴试验方面, Schlosser 和 Long 最先进行了金属条加筋砂土的研究。其后, 国内外许多学者研究了土工合成材料加筋砂土和加筋碎石土的三轴试验性状。近年来, 加筋土三轴试验研究有各个方面的进展。有学者^[1-3]

进行了特殊土的加筋试验, 包括黄土、红土、膨胀土等。对于加筋饱和土的试验研究, Ingold^[4-5]采用多孔塑料作为加筋材料, 进行了加筋饱和黏性土不排水试验指出, 当 $d/\Delta H \geq 4$ (d 为试样直径, ΔH 为筋层间距) 时, 加筋效果系数将大于 1, 即加筋黏性土的抗剪强度大于无筋土的抗剪强度。Lee^[6]推断加筋黏土在完全固结后再承受剪荷时, 加筋效果与加筋砂类似。赵爱根^[7]进行了针刺无纺布加筋饱和黏土的固结不排水试验发现, 加筋土的强度有所降低。孙遇祺等^[8]推导了加筋土在拉力破坏和黏着破坏条件下的强度参数表达式。杜运兴等^[9]通过对比饱和黏土加筋试件和非饱和土加筋试件,

收稿日期: 2008-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50678100, No. 40972192)。

第一作者简介: 张孟喜, 男, 1963 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事新型土工加筋技术及地下结构方面的研究。E-mail: mxzhang@shu.edu.cn

指出 CFRP 材料不适合饱和度较大的黏土。崔堂灿等^[10]进行了饱和砂土的固结排水剪切试验,指出打包带和有纺编织布两种材料对砂土的加筋机制服从准黏聚力原理。魏红卫等^[11]研究了不同排水条件下加筋黏性土的加筋效果,指出排水条件与不排水条件下加筋效果大不相同。对立体加筋的试验研究,马卓军等^[12]以镀锌铁皮圆箍作为加筋材料,进行了土工格室加筋黏性土的强度研究,并简单分析了其加筋原理。张孟喜等^[13-14]提出立体加筋土概念,采用镀锌铁皮和橡胶板两种筋材进行了加筋砂土三轴试验发现,立体加筋砂土的强度随竖向筋的高度增加而增大,并对此进行了初步的理论分析。张孟喜和张贤波^[15]研究了 H-V (水平-竖向) 加筋黏性土的强度特性,指出 H-V 加筋存在着一个最优加筋率。这些研究成果对加筋土的发展起着积极推动作用。

本次以有机玻璃和镀锌铁皮两种材料制作 H-V 筋材,进行饱和砂土的固结不排水试验,分析不同竖向加筋高度、不同围压作用下应力-应变特点和强度变化规律,对不同竖向加筋高度的强度进行对比,寻找合理的竖向加筋率,分析了两种不同加筋材料对加筋土强度的影响,同时探讨了 H-V 加筋饱和砂土的破坏机制。

2 试验方案

2.1 试验材料

试验选用土样为福建砂,该砂土经过几年试验,颗粒有不同程度磨细,经测定,其粒径主要集中在 0.5~2.0 mm,颗粒级配曲线如图 1 所示。不均匀系数 $C_u = 5.6$, 曲率系数 $C_c = 2.0$, 属于级配良好砂。其颗粒相对密度 $G_s = 2.643$, 饱和砂制样孔隙比 e 介于 0.372~0.396 之间,含水率约为 15%。试验使用有机玻璃和镀锌铁皮两种材料制作筋材,厚度分别为 2.6 mm 和 0.25 mm。

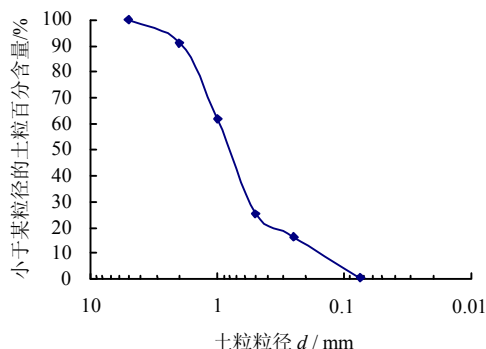


图 1 试验所用砂土颗粒的级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of sand used in tests

2.2 饱和试样制样

三轴试件直径为 100mm, 高 200 mm。试验采用水平、竖向复合立体筋片, 如图 2 所示, 水平和竖向方向均为非满布布筋; 竖向加筋高度 ΔH 变化, 有 5、10、15、20 mm 共 4 种高度。筋材分 3 层等间距放入土体。有机玻璃的竖筋使用三氯甲烷粘结, 镀锌铁皮竖筋采用焊接。另外还进行了无筋土和水平加筋土的对比实验, 其中水平加筋可视为 $\Delta H = 0$ 的 H-V 加筋。

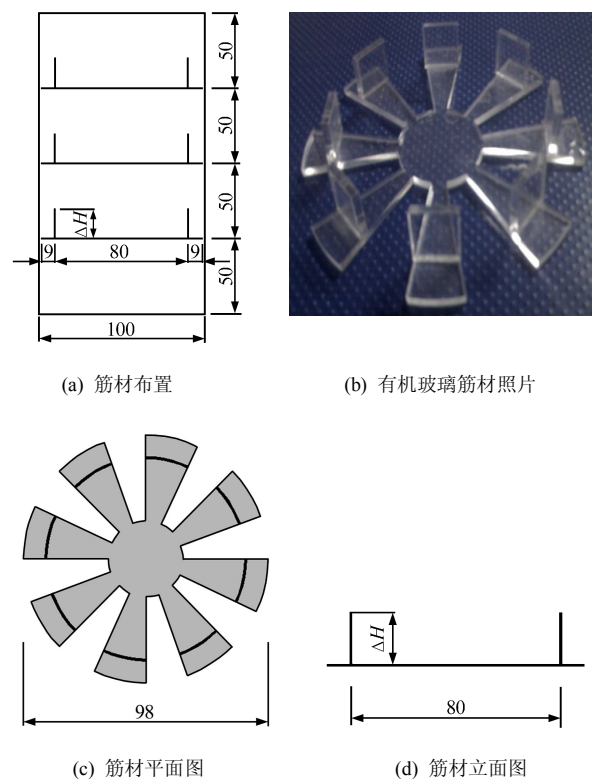


图 2 H-V 加筋试验方案(单位: mm)

Fig.2 Experimental schemes for H-V reinforcement (unit: mm)

砂样通过煮沸法进行饱和。煮砂时不断搅动, 使气体完全排出, 煮沸时间约 2 h。装样时, 先在模筒内通入纯水至将要满, 冷却后的砂料用勺子仔细填装, 确保勺子内砂料完全浸在水里, 移入模筒后, 待勺子完全浸入纯水里方可让砂料脱落。装入筋材时, 注意使其保持平整, 并使上中下 3 层筋材位置统一, 上下对齐。砂料填装完毕后, 先用橡皮筋把橡皮膜箍紧在顶帽上, 降低下排水管, 使试样底部的微小气泡进入排水管, 旋转 3 通阀使孔压传感器和下排水管连通, 抬高下排水管, 旋转孔压传感器堵头, 排净气泡。旋转 3 通阀使下排水管和试样连通, 通过水头差法排出最后残留在顶帽下的气泡。拆模前, 降低下排水管约 50 cm 使试样保持直立。

计算孔隙水压力系数 B , 并据此判断砂样是否饱和, 若 $B > 0.95$ 则视为饱和, 否则重做。本次试验的 B 值都大于 0.95, 试验结束后测得的饱和度范围为 0.96~1.00。试验采用固结不排水试验 (CU) 方法, 试验中应变速率为 0.828 mm/min, 即 0.414 %/min。

2.3 试验工况

试验采用南京电力自动化总厂生产的 SJ-1A 型应变控制式三轴仪, 选用 $\phi 101$ mm 压力室, 采用配套的 TSW-3 数据采集系统进行数据采集。为取得完整的强度包络线, 试验选取 50、100、150、200 kPa 共 4 种围压。试验破坏取值标准为最大有效主应力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 标准。

根据加筋方式的不同, 设计了 11 种试验工况, 见表 1。每种工况的试样分别在上述 4 种围压下进行试验, 得到其应力-应变曲线及强度规律。为了降低试验结果的离散性, 对于相同围压相同加筋形式的试样做 3 个平行试验, 最后汇总整理共取得 44 组有效数据。

表 1 水平竖向加筋试验工况

Table 1 Experimental cases of H-V reinforced sand

工况	水平筋层数	竖筋高度 $\Delta H / \text{mm}$	备注
0			无筋土
1	3	0	镀锌铁皮水平加筋
2	3	5	镀锌铁皮 H-V 加筋
3	3	10	镀锌铁皮 H-V 加筋
4	3	15	镀锌铁皮 H-V 加筋
5	3	20	镀锌铁皮 H-V 加筋
6	3	0	有机玻璃水平加筋
7	3	5	有机玻璃 H-V 加筋
8	3	10	有机玻璃 H-V 加筋
9	3	15	有机玻璃 H-V 加筋
10	3	20	有机玻璃 H-V 加筋

3 CU 试验和 CD 试验

对饱和砂土一般只研究 CU 和 CD 试验情况。本次原计划进行 CD 试验, 但考虑到实验工况多, 密实度要基本保持一致以及试样要到达饱和都有一定难度, 而每个工况要进行 3 次平行试验, 总试验次数比较多, 另外, CD 试验剪切速率较慢, 试验时间长, 只进行了 CU 试验。

本次试验砂料为级配良好砂, 容易密实, 且含有极少量细类土 (粒径小于 0.075 mm 的土粒约占总重的 0.3%)。为了控制密实度基本统一, 各次试验分层填装时进行了相同次数的敲击。CU 试验结果显示, 试样表现出紧砂的剪胀特性, 在剪切中出

现的负孔隙水压力会达到极值而产生空化现象, 原溶于孔隙水中的气体逸出, 致使砂样体积产生一定膨胀。空化后孔隙水压力不再变化, 有效小主应力保持常数, 试验基本上和 CD 试验一样, 峰值强度主要取决于剪前周围压力^[16-17]。另外, 空化现象只产生在低围压情况下, 当试验围压大于某值时, 空化不再发生。饱和砂将在不排水剪切中保持常体积, 而试样将表现为 0 摩擦角的纯黏聚性材料^[16]。本次试验中最高围压为 200 kPa, 试验表明此时仍有明显的空化现象发生, 也就有明显的表观抗剪强度角, 也就是砂土的真实内摩擦角^[16]。

4 试验成果及其分析

4.1 H-V 加筋土破坏特点

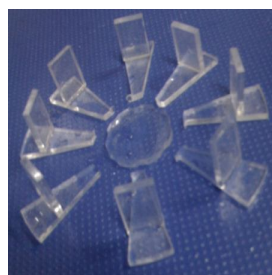
无筋土试样多出现塑性破坏, 破坏后呈腰鼓状, 外形匀称。H-V 加筋试样破坏与筋材破坏形态如图 3 所示, 其中有机玻璃加筋试样出现明显的破裂面, 呈脆性破坏, 筋片的水平筋被拉断, 大部分竖筋粘结完好, 为拉力破坏形式。镀锌铁皮加筋土绝大部分呈塑性破坏, 在试样中部表现为多级鼓形, 破坏后筋材的水平筋完好, 竖筋倾倒, 为粘着破坏形式。一般筋片的断裂与倾倒多发生在中间层, 从图中可以看出, 试样两端受边界约束影响明显。另外, 从图 3(b)可以看出, 有竖筋的地方鼓胀较小, 说明竖筋发挥了明显的约束作用。



(a) 有机玻璃加筋破坏后



(b) 镀锌铁皮加筋破坏后



(c) 水平筋断裂



(d) 竖筋倾倒

图 3 试样破坏后形态

Fig.3 Failure situation of specimens

4.2 同一围压下应力-应变曲线特性

H-V 加筋饱和砂土试验典型的应力-应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知,有机玻璃 H-V 加筋应力-应变曲线形状与变化趋势与无筋土、水平加筋砂土类似,呈应变软化;而镀锌铁皮加筋的则接近于应变硬化。在同一围压下, H-V 加筋砂土的主应力差较无筋土有近一倍的提高,相对于传统水平加筋也有明显提高。另外,从图 4 可以看出,相同围压下镀锌铁皮加筋的偏应力峰值远大于有机玻璃加筋的偏应力峰值。有机玻璃加筋的应力-应变曲线具有多峰性质,每一个峰值都意味着筋材的一次断裂;镀锌铁皮加筋的应力-应变曲线则较为平缓,试样表现为塑性破坏。

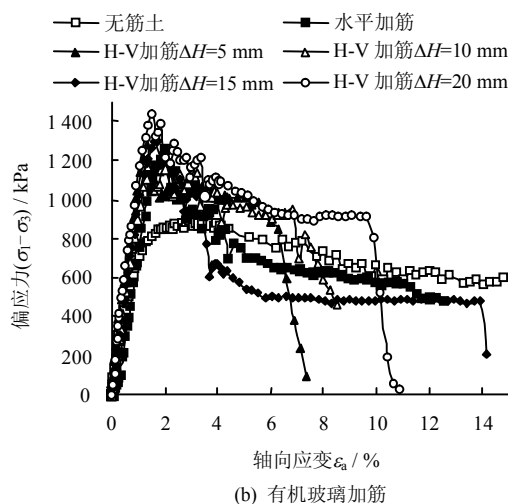
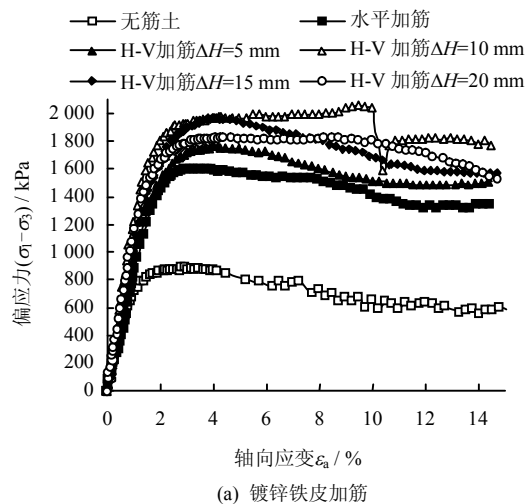


图 4 围压 $\sigma_3 = 150$ kPa 不同 H-V 加筋应力-应变曲线
Fig.4 Deviator stress versus axial strain under the same confining pressure

4.3 不同围压下应力-应变曲线特性

图 5 为竖筋高度 20 mm 的镀锌铁皮 H-V 加筋

试样在不同围压下的应力-应变曲线。由图可知,随着围压的增大,加筋土的主应力差都有明显的增大。镀锌铁皮加筋的偏应力峰值发生在轴向应变 3%~4.5%之间。对比图 4(b),有机玻璃加筋的偏应力峰值发生在轴向应变 1.3%~3%之间,先于无筋饱和砂。其他工况与此类同。

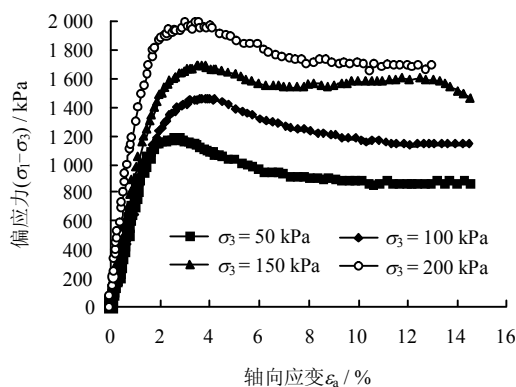


图 5 不同围压下应力-应变曲线
Fig.5 Deviator stress versus axial strain under different confining pressures

4.4 孔压-应变曲线特性

图 6 为镀锌铁皮 H-V 加筋在围压 150 kPa 下的孔压-应变曲线。由图可知,随着轴向应变的增大,首先产生正孔压,然后很快降为负孔压,且达到负的极限值,本次试验中这一极限值约为 100 kPa,试样表现出明显的紧砂剪胀特性。其他工况与此类同。

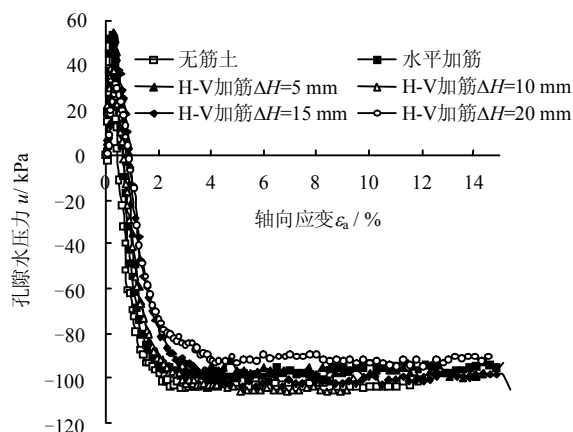


图 6 孔压应变曲线
Fig.6 Pore pressure versus axial strain

4.5 H-V 加筋饱和砂土的强度特性

使用应力路径法,将试验结果整理在 p' - q' 坐标系下,可求得强度参数 c' , φ' , 见表 2。

表2 H-V 加筋砂的强度参数
Table 2 Strength parameters of H-V reinforced sand

工况	加筋材料	加筋类型	竖筋高度 $\Delta H / \text{mm}$	c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$
0	无筋			2.75	41.35
1	镀锌铁皮	水平加筋	0	99.79	43.95
2	镀锌铁皮	H-V 加筋	5	93.84	48.04
3	镀锌铁皮	H-V 加筋	10	48.09	50.34
4	镀锌铁皮	H-V 加筋	15	68.79	48.75
5	镀锌铁皮	H-V 加筋	20	60.88	48.13
6	有机玻璃	水平加筋	0	93.43	41.47
7	有机玻璃	H-V 加筋	5	98.38	40.47
8	有机玻璃	H-V 加筋	10	104.14	40.66
9	有机玻璃	H-V 加筋	15	100.54	41.17
10	有机玻璃	H-V 加筋	20	159.11	41.30

比较表2中H-V加筋饱和砂与水平加筋饱和砂及无筋饱和砂的各组试验数据可得:

(1) 相对于无筋饱和砂, 镀锌铁皮加筋同时提高了有效黏聚力和有效内摩擦角, 而有机玻璃加筋主要提高了有效黏聚力。考虑到镀锌铁皮加筋的破坏属于黏着破坏, 而有机玻璃加筋的破坏为拉力破坏, 可得结论: 在拉力破坏条件下只提高有效黏聚力, 在黏着破坏条件下既提高有效内摩擦角, 也提高有效黏聚力。

(2) 镀锌铁皮加筋对有效内摩擦角的提高呈现出一定规律性, 即随着竖筋高度增加, 有效内摩擦角的增加存在一个最大值, 而不是单调增加。这表明镀锌铁皮加筋存在一个最佳竖筋高度, 本次试验中最佳竖筋高度为 10 mm, 此时有效内摩擦角 φ' 相对于无筋饱和砂提高了 8.99° , 相对于水平加筋提高了 6.39° 。

(3) 相对于水平加筋饱和砂, 镀锌铁皮 H-V 加筋有效内摩擦角增加明显, 有机玻璃加筋的有效内摩擦角则基本没有变化, 这是因为有机玻璃水平筋片的断裂使得竖筋过早失去作用, 而镀锌铁皮竖筋即使在倾倒的过程中仍一直发挥着提供增量围压的作用。

4.6 不同工况下加筋效果对比

为了更好地评价加筋对饱和砂土强度和变形的影响, 引入 2 个加筋效果系数 R_σ 和 R_ε :

$$R_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}; R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{af}^R}{\varepsilon_{af}} \quad (1)$$

式中: R_σ 为强度加筋效果系数; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R$ 为加筋饱和砂破坏时的主应力差; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为无筋饱和砂破坏时的主应力差。 R_ε 为轴向应变加筋效果系数;

ε_{af}^R 为加筋饱和砂破坏时的轴向应变; ε_{af} 为无筋饱和砂破坏时的轴向应变。计算出各组试样的强度加筋效果系数和轴向应变加筋效果系数, 列于表 3。

表3 不同 H-V 加筋工况下的加筋效果系数
Table 3 Reinforcing effect ratio in different experimental cases

工况	加筋材料	系数	竖筋高度 $\Delta H / \text{mm}$	不同围压(kPa)下加筋效果系数			
				50	100	150	200
0	无筋	R_σ		1	1	1	1
		R_ε		1	1	1	1
1	镀锌铁皮	R_σ	0	1.92	1.75	1.65	1.43
		R_ε		0.91	1.19	1.23	1.25
2	镀锌铁皮	R_σ	5	2.33	2.09	1.92	1.82
		R_ε		1.16	1.07	1.40	1.30
3	镀锌铁皮	R_σ	10	2.02	2.03	2.10	1.78
		R_ε		1.25	1.00	1.36	0.78
4	镀锌铁皮	R_σ	15	1.95	2.08	2.04	1.78
		R_ε		1.16	1.30	1.69	1.06
5	镀锌铁皮	R_σ	20	1.92	1.80	1.88	1.62
		R_ε		0.88	1.20	1.44	0.91
6	有机玻璃	R_σ	0	1.62	1.32	1.31	1.01
		R_ε		1.04	0.62	0.85	0.41
7	有机玻璃	R_σ	5	1.66	1.17	1.33	1.16
		R_ε		0.66	0.46	0.56	0.58
8	有机玻璃	R_σ	10	1.85	1.36	1.21	1.20
		R_ε		0.66	0.47	0.60	0.40
9	有机玻璃	R_σ	15	1.90	1.50	1.35	1.14
		R_ε		0.58	0.42	0.73	0.47
10	有机玻璃	R_σ	20	2.09	1.76	1.50	1.15
		R_ε		0.56	0.53	0.64	1.12

对比表3中各组强度加筋效果系数和轴向应变加筋效果系数可知:

(1) 镀锌铁皮加筋效果系数基本上都大于有机玻璃的加筋效果系数。镀锌铁皮的 R_σ 分布范围为 1.43~2.33, R_ε 基本上都大于 1; 有机玻璃的 R_σ 分布范围为 1.01~2.09, R_ε 基本上都小于 1, 这表明镀锌铁皮加筋效果优于有机玻璃加筋。

(2) H-V 加筋的强度加筋效果系数基本都大于水平加筋的强度加筋效果系数, 其中镀锌铁皮 H-V 加筋表现更为明显; 镀锌铁皮 H-V 加筋的轴向应变加筋效果系数基本都大于水平加筋的轴向应变加筋效果系数, 有机玻璃 H-V 加筋表现相反。这说明 H-V 加筋优于水平加筋, 尤其是当采用镀锌铁皮作为加筋材料时。

(3) 镀锌铁皮加筋改善了砂土的延性, 有机玻璃加筋则强化了砂土的脆性。这是因为镀锌铁皮弹性模量远大于有机玻璃和砂土, 有机玻璃筋片一旦断裂, 试样就发生破坏; 铁皮筋片基本上不会发生

断裂, 竖筋倾倒过程中仍一直在提供侧阻力, 水平筋整体也在发挥摩擦加筋作用, 因而明显改善砂土的延性。

(4) 有机玻璃强度加筋效果系数随竖筋高度增加而提高, 在低围压下尤其明显; 镀锌铁皮强度加筋效果系数随竖筋高度增加先增后减, 存在一个最佳竖筋高度。

(5) 镀锌铁皮和有机玻璃的强度加筋效果系数都随着围压的增大而减小, 表明在低围压下加筋效果更好。因为低围压下土体的侧向变形较大, 竖向加筋对土体的约束力也相对更大, 所以加筋效果更好。

5 几点讨论

5.1 立体加筋与土工格室加筋的关系

笔者提出立体加筋的概念后, 关于立体加筋与土工格室加筋的区别与联系成为大家关注的一个焦点, 在这里先做一个简单的介绍。首先, 土工格室属于立体加筋的一种。立体加筋是从一维加筋(如土工带)到二维加筋(如土工网、土工格栅)再到三维加筋这样一个思路发展起来的。文献[13-14]的作者分别介绍了3种立体加筋体系及典型的H-V加筋方案, 土工格室正是其中一种方案——直接布置立体加筋的特例。其次, 土工格室作为特殊的立体加筋形式, 在加筋层上将土体分割在一个个格室内, 破坏了土体的连续性, 而典型的立体加筋方式, 如H-V加筋, 土体本身仍然保持着连续性, 更有利于土体发挥自身的抵抗能力。

5.2 空化现象对试验强度的影响

本次试验大多发生了空化现象, 少数几个孔压没有达到负的极值, 但也非常接近。如果把试验结果用总应力法表示成摩尔圆, 原为摩擦性材料的砂土会出现一个表观黏聚力。对于砂土, 极限负孔压 u_1 为负的一个大气压, 即 -101.3 kPa 。如果一组试验都在峰值强度时产生了空化现象, 则相应的表观黏聚力就是 $-u_1 \tan \varphi$, φ 为总应力法表示的内摩擦角, 也就是砂土真实的内摩擦角。无筋饱和砂的表观黏聚力计算所得为 89.9 kPa , $-u_1 \tan \varphi$ 计算所得为 91.4 kPa , 非常接近。同时, 由有效应力摩尔圆可以发现, 有效内摩擦角 φ' 等于内摩擦角 φ , 而有效黏聚力大幅降低, 从表2可以看出, 无筋饱和砂的有效黏聚力为 2.75 kPa , 接近0值。

5.3 三轴试验破坏取值标准的选取

两种常用的取值标准, 即最大主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 标准和最大有效主应力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 标

准。本次试验中, 在达到 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 时, 负孔压大都已经稳定, 这时两种标准实际上是一样的, 少数负孔压还在继续减少, 此时, $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 较早发生。两种取值标准对于总应力强度参数将有明显影响, 但对于有效应力强度参数的影响则很小^[17]。本次试验最终采用最大有效主应力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 标准。

6 结 论

(1) H-V加筋能有效提高饱和砂土的强度, 尤其是筋材自身弹性模量较大的镀锌铁皮加筋, 不仅提高了饱和砂土的有效黏聚力, 也提高了有效内摩擦角。

(2) 镀锌铁皮H-V加筋在提高饱和砂土强度的同时, 改善了砂土的延性, 有机玻璃则强化了砂土的脆性。

(3) 镀锌铁皮H-V加筋存在着一个最佳竖筋高度。

(4) 与水平加筋类似, H-V加筋在低围压下的加筋效果更好。

(5) H-V加筋在拉力破坏条件下只提高有效黏聚力, 在着破坏条件下既提高有效内摩擦角, 也提高有效黏聚力。

参 考 文 献

- [1] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 1-5.
LEI Sheng-you. Study on reinforced loess by triaxial tests[J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 2000, 20(2): 1-5.
- [2] 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.
HUANG Ying, FU Bi-chang, JIN Ke-sheng, et al. Experimental tri-axial research of reinforced laterite in different drainage conditions[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 2006, 31(1): 56-60.
- [3] 丁万涛, 雷胜友. 含水率对加筋膨胀土强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 391-394.
DING Wan-tao, LEI Sheng-you. Influence of water contents on strength of reinforced expansive soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 391-394.
- [4] INGOLD T S. Reinforced clay subjected undrained triaxial loading[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1983, 109(5): 738-743.

- [5] INGOLD T S, MILLER K S. The Behavior of geo-textile reinforced clay subjected to undrained loading[C]//Proc. of II ICG Las, Vegas, U. S.A: [s. n.], 1982: 593—597.
- [6] LEE K L. Reinforced earth—An old idea is a new setting[C]//New Horizons in Construction Material, [S. l.]: Envo Publishing Co., 1976: 655—682.
- [7] 赵爱根. 加筋土的抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 69—75.
- ZHAO Ai-gen. Strength property of reinforced clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 10(1): 69—75.
- [8] 孙遇祺, 熊正洪, 邓荣基. 黏性加筋土若干问题的研究[J]. 兰州铁道学院学报, 1986, 5(2): 1—6.
- SUN Yu-qi, XIONG Zheng-hong, DENG Rong-ji. Study on several problems of reinforced clay[J]. **Journal of Lanzhou Railway College**, 1986, 5(2): 1—6.
- [9] 杜运兴, 尚守平, 周芬. CFRP 材料加筋黏土的试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2004, 19(1): 20—23.
- DU Yun-xing, SHANG Shou-ping, ZHOU Fen. Experimental study of clay reinforced by CFRP material[J]. **Journal of Xiangtan Mining Institute**, 2004, 19(1): 20—23.
- [10] 崔堂灿, 刘垂远, 何昌荣, 等. 加筋砂土三轴试验研究[J]. 四川水利, 2004, (6): 43—45.
- CUI Tang-can, LIU Chui-yuan, HE Chang-rong, et al. Study on reinforced sand by triaxial tests[J]. **Sichuang Water Conservancy**, 2004, (6): 43—45.
- [11] 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.
- WEI Hong-wei, YU Ze-hong, ZOU Yin-sheng. Effect of drainage conditions on performance of clayey soil reinforced with geosynthetics[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(7): 838—845.
- [12] 马卓军, 张兴彦, 贾振功. 土工格室加筋黏性土的强度特性研究[J]. 公路, 2000, (10): 34—35.
- MA Zhuo-jun, ZHANG Xing-yan, JIA Zhen-gong. Strength properties of clay reinforced with geocell[J]. **Highway**, 2000, (10): 34—35.
- [13] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 931—936.
- ZHANG Meng-xi, MIN Xing. Behavior of sand reinforced with one-layer 3D reinforcement by triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 931—936.
- [14] ZHANG M X, ZHOU H, JAVADI A A, et al. Experimental and theoretical investigation of strength of soil reinforced with multi-layer horizontal-vertical orthogonal elements[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2008, 26(1): 1—13.
- [15] 张孟喜, 张贤波, 段晶晶. H-V 加筋黏性土的强度与变形特性[J]. 岩土力学, 2008, 30(6): 1563—1568.
- ZHANG Meng-xi, ZHANG Xian-bo, DUAN Jing-jing. Strength and deformation properties of clay reinforced with horizontal-vertical inclusions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 30(6): 1563—1568.
- [16] BISHOP A W, ELDIN G. Undrained triaxial tests on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength[J]. **Geotechnique**, 1950, 2(1): 13—32.
- [17] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

桩基工程质量的诊断技术——方法、原理及应用实例

李德庆等著 中国建筑工业出版社出版 16开 494页 平装 定价: 68.00 2009年8月出版

ISBN: 9787-112-10912-8

本书全面介绍了世界各国在20世纪80年代以来桩基工程检测技术的成就和进展, 重点总结了我国的具体实践经验。在此基础上, 作者提出只要合理地综合运用目前已经趋于成熟的多种检测技术, 就可以大大提高对桩基工程质量的判断能力, 以更低的成本和代价, 建立更加有效的桩基工程的质量诊断体系。本书第2章~第7章为读者提供了必要的理论知识, 内容浅显易懂; 在其余的10章中, 详细说明了各种检测方法的原理和应用要领, 并提供了世界各国大量的应用实例。此外, 作者还对目前我国桩基质量检测中存在的若干问题, 进行了较为深入的探讨。本书体系完整, 内容充实严谨, 行文深入浅出, 实用性强。

第1章 概论; 第2章 关于波动的基础知识; 第3章 检测桩基质量的传统方法——静载试验; 第4章 新方法之一——透射波法; 第5章 新方法之二——低应变反射波法; 第6章 新方法之三——采用CASE法分析数据的高应变动力试验法; 第7章 新方法之四——采用拟合法分析数据的高应变动力试验法; 第8章 桩基工程的质量诊断技术; 第9章 在桩基质量诊断中应用波动技术的若干问题的探讨。术语。符号。参考文献。

读者对象: 本书可供桩基工程设计、施工、检测、监理人员以及科研院所、高等院校相关研究人员学习和参考。