

扩展基础加筋风积砂地基室内模型试验研究

Study of indoor model test of spread foundation on the reinforced aeolian sand subgrade

李 驰, 刘 霖

(内蒙古工业大学 建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010062)

摘 要: 对扩展基础加筋风积砂地基进行室内模型试验研究, 分析了不同布筋方式下加筋风积砂土体在下压荷载作用下的应力场、变形、破坏模式及承载力变化规律, 提出加筋风积砂土体在下压荷载作用下的强度机理, 并比较各种布筋方式的适用性。

关键词: 加筋; 风积砂地基; 模型试验; 布筋方式

中图分类号: TU 472. 34

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2003) 04- 0441- 04

作者简介: 李 驰(1973-), 女, 1995 年毕业于内蒙古工业大学建筑工程学院, 2002 年毕业于内蒙古工业大学固体力学专业, 获硕士学位, 现任职内蒙古工业大学。主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。

LI Chi, LIU Lin

(Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot 010062, China)

Abstract: Based on the indoor model test of spread foundation on reinforced aeolian sand subgrade, the variation of the bearing capacity, the displacement, the surface of fracture and the internal stress of soil under push-down load have been analyzed. Then the respective applications of different design have been compared.

Key words: reinforced; aeolian sands subgrade; model test; design plans

0 前 言^{*}

我国西北地区沙漠广泛分布, 其地貌多为风积砂构成的固定半固定及活动性沙丘。风积砂不同于一般砂土, 其含水率低, 流动性大, 颗粒表面活性低, 无粘聚力, 作为地基土, 整体性差, 易发生剪切破坏, 地基承载力较低。如果不经处理, 会影响建筑物的正常使用。土工合成材料作为一种新型的岩土工程材料, 近年来被广泛用于加固软基, 加筋土挡墙桥台等工程实践中^[1], 但用土工合成材料加筋风积砂地基, 国内外尚无可靠的设计依据。本文通过室内模型试验, 采用土工格栅作为加筋材料, 分析研究不同布筋方式下, 扩展基础加筋风积砂土体在下压荷载作用下的应力场、变形、破坏模式及承载力变化规律, 提出加筋风积砂土体在下压荷载作用下的强度机理, 以及各种布筋方式的适用性, 为沙漠地区工程建设提供了重要的试验依据。

1 试验概况

1.1 试验用土样及加筋材料

室内模型试验所用土样取自伊克昭盟达拉特境内的库布其沙漠边缘, 经野外观察和室内试验, 定名为细砂^[2]。风积砂颗粒级配均匀, 粒径单一, 大多集中在 0.25~ 0.1 mm 之间, 密实度呈松散状态, 其主要物理力学指标如表 1 所示。

试验中地基土采用人工夯实, 使含水率和密实度按表 1 中序号 1 控制, 基础范围内回填土的含水率及密实度按表 1 中序号 2 控制。序号 1 为原状土样, 序号 2 为按原状土干重度的 90% 作为控制指标制备土样。

加筋材料为经编土工格栅, 其技术性能见表 2。

1.2 试验装置

模型试验箱为正六面体, 长×宽×高为 500 mm×500 mm×600 mm。用角钢焊成边框, 正面镶嵌厚度为 1 cm 的玻璃, 其余三面为高密板。模型基础分两种, 一种是全模基础, 底面为 60 mm×60 mm 的正方形钢板; 另一种为半模基础, 底面为 60 mm×30 mm 的矩形钢板。室内模型试验采用 1:1 杠杆加荷, 位移采用百分表量测。

1.3 试验内容

半模试验, 确定风积砂土体在一定的重度、含水率下的破坏形式。

全模试验, 测试加筋风积砂土体在下压荷载作用下土中应力、位移、土表破坏形态及极限承载力, 并与素土作比较。

埋设土压力传感器, 测试加筋土在各级荷载作用下土中产生的应力。并与素土作比较。

1.4 试验方案

通过半模试验, 控制风积砂土(素土)容重 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, 含水率 $w = 4.8\%$, 埋深 $d = 0$ 。试验结果发现

表 1 风积砂的基本性质

Table 1 Basic properties of aeolian sand

序号	天然含水率/%	天然容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	干容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩系数/(MPa^{-1})	抗剪强度		颗粒级配/%				
					c/kPa	$\varphi/(\circ)$	2~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.1 mm	0.1~ 0.075 mm	< 0.075 mm
1	4.85	17.04	16.23	0.07	0	34.8	1.2	5.2	78.8	5.6	9.2
2	4.15	14.80	14.21	0.09	0	29.6	—	—	—	—	—

表 2 土工格栅技术性能

Table 2 The technological properties of geogrid

单位面积重/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	网格尺寸/mm	抗拉强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		延伸率/(%)		应变 15% 的抗拉强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
900	9×9	60.0	57.6	16.5	16.6	52.4	50.4

注: 材料为高强涤纶丝。

素土破坏形式为整体剪切破坏。由于土工格栅加筋作用以控制变形为主, 为使其尽可能包住素土破裂面^[3], 根据太沙基理论同时考虑实际工程的经济合理性^[4], 拟定 15 种布筋方案作全模试验。按埋深不同分为 $d = 0$ 和 $d = b$ (b 为模型基础宽度, 单位 cm , 44 cm 为模型试验箱里边尺寸) 两种。同一埋深下又分为加筋试验和无筋(素土) 试验。加筋试验按布筋方式不同分为片式布筋和箱式布筋, 片式布筋又分为单层和双层两种, 箱式布筋分为矩形闭口箱和长条形闭口箱两种。片式单层格栅尺寸为 $7b \times 7b$, 片式双层格栅尺寸上层为 $7b \times 7b$, 下层为 $6b \times 6b$, 矩形闭口箱格栅尺寸为 $7b \times 7b \times 0.6b$, 长条形闭口箱格栅尺寸为 $4b \times 44 \times 0.6b$ 。试验中通过改变不同上覆土厚度 c 和格栅间距 e (如图 1 所示), 对片式布筋和箱式布筋作了方案比选, 最后选定片式单层 ($7b \times 7b, c = 0.4b$)、片式双层 ($7b \times 7b, 6b \times 6b, c = 0.4b, e = 0.25b$)、矩形闭口箱 ($7b \times 7b \times 0.6b, c = 0.25b$) 和长条形闭口箱 ($4b \times 44 \times 0.6b, c = 0.25b$) 4 种有代表性的布筋方案, 并与素土作比较。

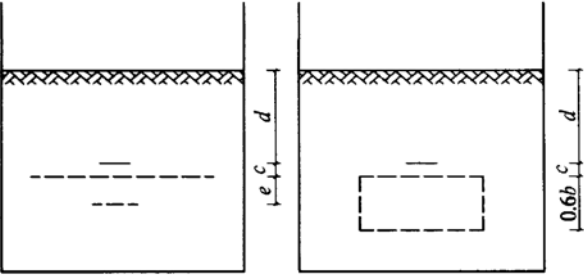


图 1 模型试验方案示意图

Fig. 1 Sketch of mode test

2 试验结果与分析

2.1 极限破坏荷载和破坏时的位移

(1) $P-S$ 曲线特征

图 2 为加筋土与素土的 $P-S$ 曲线, 从图中可以

看出, 加筋土在加荷初期, 曲线接近直线段, 加筋土中各点剪应力均小于加筋土的抗剪强度, 土体处于弹性平衡状态, 这一阶段基础沉降主要由基底土体压密变形引起的。此时曲线走势与素土很相近, 随着荷载增大, 土中各点相继进入塑性阶段, 局部点达到抗剪强度, 发生剪切破坏, 土表出现裂缝, 伴随有土表隆起, 图线呈曲线状。在这一阶段, 加筋土与素土变形出现明显不同, 加筋土在塑性阶段曲线较素土平缓, 且这一阶段比素土长。说明加筋土延缓破裂面出现, 提高承载力。当荷载超过极限荷载后, 基础沉降急剧增加, 土从基础两侧挤出并隆起, 地基土失稳破坏, 曲线出现陡降段。并且从曲线中看出箱式布筋与片层式布筋的 $P-S$ 曲线走势不同。箱式布筋曲线的直线段、曲线段都比片层式布筋长, 且图线更平缓, 陡降比较明显。说明箱式布筋的加筋土延缓破裂面出现效果较好。且加筋土 $P-S$ 曲线特征在 $d = b$ 时也得到验证。

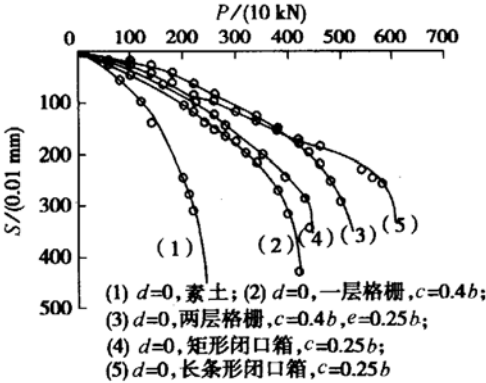


图 2 $P-S$ 曲线

Fig. 2 The $P-S$ curve

表 3 $d = 0$ 时, 各种布筋方式下模型试验结果

Table 3 The results of model test in the case of $d = 0$

布筋方式	P_u /(10 kN)	A	S_u /(0.01 mm)	B	P /(10 kN)	C
素土	240	1.0	360	1.0	120	0.50
一层格栅	430	1.8	422	1.2	220	0.52
二层格栅	520	2.2	286	0.8	300	0.58
矩形闭口箱	460	1.9	339	0.9	400	0.87
长条闭口箱	600	2.5	253	0.7	580	0.96

(2) 极限破坏荷载和破坏时位移

表 3 为 $d = 0$ 时各种布筋方式下模型试验结果。表 3 中 P_u 为极限破坏荷载; P 为破裂面出现荷载; A 为承载力提高系数, 即某种布筋下极限破坏荷载与素

土极限破坏荷载之比; S_u 为极限破坏时的位移; B 为位移改变系数, 即某种布筋下破坏时位移与素土破坏时位移之比; C 为延缓破裂面出现程度系数, 即破裂面出现时荷载与极限破坏荷载之比。

2.2 基础埋深的影响

在室内模型试验中, 分别作了无埋深 ($d = 0$) 和一倍埋深 ($d = b$) 两种试验, 试验结果见表 4。从表 4 可看出, 当基础埋深从 0 增加到 b 时, 一层格栅与素土的承载力提高系数接近, 两层格栅和长条形闭口箱的承载力提高较大, 长条形闭口箱提高承载力的效果最好。

表 4 $d = 0$ 和 $d = b$ 的模型试验结果

Table 4 The results of model test in case of $d = 0$ and $d = b$

布筋方式	$P_u/(10\text{ kN})$		承载力提高系数 E
	$d = 0$	$d = b (= P_u(d = b)/P_0(d = 0))$	
素土	240	360	1.5
一层格栅	430	611	1.4
两层格栅	520	1082	2.2
长条形闭口箱	600	1350	2.5

2.3 破裂面的出现及形式

试验中观察到, 素土的破裂面以从基础四周发出的发射型裂缝为主, 裂缝开展范围为 8 倍的基宽。片层式布筋的加筋土有环状裂缝和发射状裂缝, 裂缝开展范围: 一层格栅为 6 倍的基宽, 二层格栅为 5 倍的基宽。箱形布筋下加筋土以不规则发射状裂缝为主, 裂缝开展范围为 6 倍的基宽, 没有发现环形裂缝。

2.4 土中应力测试

在室内模型试验中对 $d = 0$ 素土以及 $d = 0$ 一层格栅 ($c = 0.4b$) 两种情况进行应力测试。素土主要在 $z = 0$ $z = b$ $z = 2b$ 的平面上, 在基础板中心点、角点、边中点, 以及基础板外点埋设土压力盒, 另外在压力扩散面上及扩散面以外埋设土压力盒。测试结果如图 3。

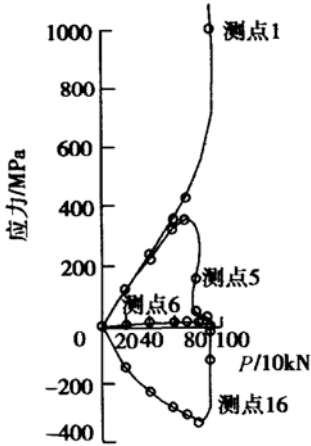


图 3 素土在各级荷载作用下的应力分布

Fig. 3 The stress of aeolian sands under different loads

从图 3 可以看出, 测点 1(0, 0, - 6) 位于中心点处, 在下压荷载作用下始终压应力增加。测点 5(6, 0, - 6) 开始加荷时压应力增加, 在破坏时, 伴随地表隆起, 土中压应力减少。而测点 16(15, 0, - 6) 在开始加荷时拉应力增加, 破坏时, 土中压应力增加。这说明在下压荷载作用下土中压应力传递在一定范围内, 超过这个范围, 随着基础下沉, 周围土体受拉应力增加, 在破坏时, 伴随地表隆起, 土向两侧挤压, 使得基础板周围土体受到压应力。测点 6(- 12, 0, - 6) 在下压荷载增加时, 土中压应力 $\Delta\sigma_z \approx 0$, 测点 16(15, 0, - 6) 在下压荷载增加时, 土中受到拉应力, 说明测点 6 是压应力传递边界。

加筋土主要在 $z = 0$ 基础板中心点、角点、板外点以及 $z = 0.4b$ 的格栅上角点、中心点、边中点及对应的格栅下的点, $z = b$ $z = 2b$ 的基础中点、角点、边点, 格栅中点、角点、边点、上点以及格栅外点共埋设 30 个土压力盒进行测试。测试结果见图 4。

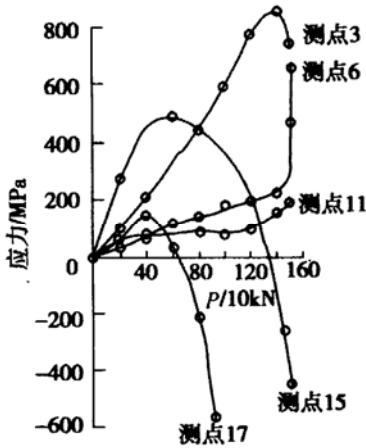


图 4 加筋土在各级荷载作用下的应力分布

Fig. 4 The stress of reinforced aeolian sands under different loads

从图 4 中可以看出, 测点 3(0, 0, - 6) 位于基础板下方, 加荷过程中始终受到压应力, 且在加荷初期, 荷载主要加在基础板下方。随着荷载增加, 压应力在基础板范围内进行传递, 测点 3 压应力逐渐减小而测点 6(5.8, 0, 0) 压应力逐渐增加。

测点 15(- 3, - 3, - 2.4) 和测点 17(- 4.8, 0, - 2.4) 位于格栅上, 随着荷载的增加, 压应力增加至最大值后, 伴随土拱形成格栅产生弯沉, 同时格栅被张拉, 格栅抗拉强度得以发挥, 使得格栅上压应力减小拉应力增加。同时使得部分荷载传到弯沉区以外, 土中应力被扩散。

加筋土测点 11(- 12, 0, - 6) 与同一位置的素土比较, 素土在此处是压应力面边界, 而测点 11 并不是加筋土应力边界。测点 11 处应力只是压区范围内一点,

因此加筋土增大压力扩散角。

图 5 为顶面荷载为 800 kN 时地表下深度为 $Z=B$ 平面上的应力分布, 从图中可以看出, 加筋土与素土相比, 扩散了土中的应力, 减少基础板附近的应力集中, 从而延缓了破裂面的出现, 提高了地基承载力。

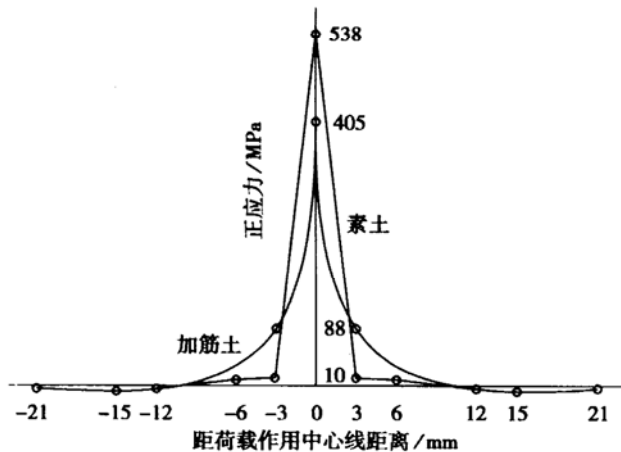


图 5 顶面荷载为 800 kN 时地表下深度为 $Z=B$ 平面上的应力分布

Fig. 5 The stress on the $Z=B$ plane under 800 kN load

3 加筋风积砂土体承压的强度机理

根据全模试验下压荷载与位移关系, 半模试验土体变化观测以及土中应力测试结果分析, 加筋风积砂土体的破坏是渐进性的, 其破坏形式为“压缩—塑性区出现并开展—整体剪切破坏”。

在加荷初期, 基础板下方土体处于压缩状态, 随着荷载增加, 格栅开始产生弯沉, 同时格栅被拉紧, 调动了它的抗拉强度起到抗拉膜的作用; 随之上覆土层也产生弯沉, 产生成拱作用, 使得部分荷载传到弯沉区以外, 使得土中应力被扩散, 延缓破裂面的出现。在荷载继续增加接近或到极限破坏荷载时, 基础板下方土体压应力达到极限破坏荷载, 基础板周边土体剪切面逐渐向地面延展, 基础板急剧下沉, 位移快速增长, 剪切面延展至土体表面, 伴随着土表隆起, 土体产生整体剪切破坏。

通过与素土比较可知, 加筋土由于格栅的抗拉膜作用结合上覆土的成拱作用, 使得加筋土承载力比素

土大, 并且高模量的格栅能抑制地基土沿着 Z 轴方向的压缩变形, 同时约束控制地基土的水平位移, 从而减少地基沉降。土中应力被扩散, 减小了基础板附近的应力集中, 从而延缓了破裂面的出现。由于土与格栅之间的摩擦作用, 加强了土体的整体性, 提高了土体的抗剪强度。

4 结 语

(1) 通过室内模型试验结果分析, 用土工格栅加筋风积砂地基能够提高地基承载力, 减小沉降, 扩散土中应力, 延缓破裂面出现, 试验证明这种地基的加固和处理方式是可行的。并且通过不同的布筋方式, 能够收到较好的效果。

(2) 通过一层格栅、二层格栅、矩形闭口箱、长条形闭口箱 4 种布筋方案的比较, 其中长条形闭口箱的整体性比片层布筋方式好, 由于 4 壁及上下面均与土发生摩擦, 使得承载力提高幅度较大。减小了沉降, 延缓破裂面的出现效果较好, 随埋深增加, 承载力增加幅度较大。且具有施工方便特点, 适用于加固软基、加固路堤、桥台等工程。但箱形格栅破裂面出现荷载与破坏荷载很接近, 使得箱形格栅安全储备较小, 在施工中要引起重视。二层格栅的情况在承载力的提高和减少沉降方面仅次于长条形闭口箱, 但安全储备比长条形闭口箱大, 在工程中有很好的应用前景。而一层格栅具有施工方便, 节省材料的特点, 常用来作为防止路面反射裂缝, 减少路基不均匀沉降等。

(3) 有关加筋土破裂面的试验研究笔者将另文专述。

参考文献:

- [1] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 刘文白, 等. 沙漠地区输电线路铁塔基础抗拔试验[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 564-568.
- [3] Tanabashi Y. In-situ investigation and numerical estimation for bearing capacity improvement of very soft ground reinforced with geotextiles[A]. Proc Int Symposium on Earth Reinforcement [C]. Fukuoka, Japan, 1996. 685-690.
- [4] 洪毓康, 等. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民出版社, 1999.