

基于透明土技术的加筋地基模型试验

陈建峰^{1,2}, 许强², 郭鹏辉^{1,3}, 蒋松¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 采用透明土技术, 开展了 5 组不同筋材长度和加筋深度(层数)的加筋地基平面应变模型试验, 以及 1 组无筋地基对比试验, 以研究在条形基础荷载下加筋地基内部位移场演化及滑移破坏过程, 并探讨其荷载—沉降特性。结果表明, 加筋地基中的土体在基础沉降过程中, 首先在加筋区的两侧底部非加筋区位置累积水平位移, 并自下而上向加筋层扩展, 致使筋材自下而上依次断裂, 最终形成宏观剪切破坏面; 加筋地基在基础沉降过程中形成两个应力扩散区, 分别沿筋材弯折段和基础边缘向下扩展, 前者扩散角是后者的 2.5 倍左右; 加筋地基和无筋地基均表现为普朗特滑动破坏模式, 加筋地基滑动面深度和宽度基本随加筋深度和加筋长度的增大而增大; 当筋材强度不足时, 加长筋材长度对加筋地基承载力的提高不起作用, 而增大加筋层数对承载力影响显著。

关键词: 加筋地基; 透明土; 承载力; 位移场; 破坏模式

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

the settlement of strip footing, horizontal displacement accumulates first in the unreinforced zone near the lower right and the left corner of the reinforced zone, and then extends upward to reinforcement layers, which causes the tensile failure of the reinforcements successively from bottom to top and at last forms micro shear failure surface. Two stress diffusion zones are formed during the settlement of the strip footing. The two zones extend downward along the bend section of each reinforcement layers and the strip footing edges, respectively. The stress diffusion angle along the bend section is 2.5 times of that along the strip footing edges. Both of reinforced and unreinforced foundations fail in Prandtl slide mode. The depth and width of the slip surfaces increase with an increase of reinforced depth and reinforcement length. When the strength of reinforcements is deficient, extending reinforcements has little effect on the bearing capacity of the reinforced foundation, whereas the increasing reinforcement layers can significantly affect the bearing capacity.

Key words: reinforced foundation; transparent soil; bearing capacity; displacement field; failure mode

Model Tests of Reinforced Foundation Based on Transparent Soil Technique

CHEN Jianfeng^{1,2}, XU Qiang², GUO Penghui^{1,3}, JIANG Song¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Five groups of model tests of reinforced foundation with different reinforcement lengths and depths (layer numbers) as well as 1 group of model test of unreinforced foundation were carried out by transparent technique. The evolution of displacement field in the reinforced foundation and procedure of slide failure under strip loading were investigated. The load-settlement characteristic of reinforced foundation was also discussed. The results show that during

加筋地基是地基处理的一种方法, 它是指将基础下一定范围内的软弱土层置换为加筋垫层以作为持力层的地基。这种地基处理技术造价低、施工简便且取材广泛, 在公路、铁路和建筑等领域中得到了广泛应用^[1-2]。

目前对加筋地基的研究主要集中在筋材布置参数对地基承载力的影响, 但对机理的解释却缺乏实验和理论依据^[3-4], 这是由于目前的加筋地基试验无法直接观察到地基内部位移场的演化以及内部筋材的变形破坏特征。Michalowski^[4]、Yamamoto^[5]等对加筋地基的位移演化过程进行了初步的模型实验研究, 对模型箱箱壁一侧的土体进行了观察, 但这部分

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家重点实验室开放基金(SKLG2015K005); 上海市浦江人才计划(14PJD032)

第一作者: 陈建峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地质工程。E-mail: jf_chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 郭鹏辉(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为地质工程。E-mail: guopenghui8@163.com

的土体受到模型箱壁摩擦作用,并不能反映真实情况,并且也无法观察到内部筋材的变形及破坏过程。

透明土是一种可以模拟自然界土的新型模型材料,其是一种无定形二氧化硅材料,与相同折射率的液体混合后,可实现其内部透明效果。目前比较成熟的透明土技术是采用无定形的熔融石英砂或粉,与相同折射率的矿物油混合,其透明度可达到50mm左右^[6]。已有学者在实验室利用透明土研究了一些岩土工程中土体内部位移场的演化规律。Ni等^[7]利用透明粘土研究了桩在贯入土体时桩周土体的位移规律;Ahmed和Iskander^[8]利用透明土研究了隧道开挖对周围土体变形的影响;Ezzein和Bathurst^[9]利用透明土研究了土工格栅拉拔过程中筋土相互作用机理;曹兆虎等^[10]利用透明土研究了管桩贯入土体时桩周土体的位移演化。

目前还未有采用透明土进行加筋地基模型试验的报道。本文采用一种光学镀膜用玻璃砂(一种高纯度熔融石英砂)制备成透明土,其透明度较一般的熔融石英砂更好。采用该透明土,并利用图像分析技术,开展了不同筋材长度和加筋深度的加筋地基平面应变模型试验,以研究在条形基础荷载下加筋地基内部位移场演化及滑移破坏过程,并探讨其荷载—沉降特性。

1 模型试验概况

1.1 试验装置

试验装置主要包括模型箱、加载系统、激光发射器和数码相机,如图1所示。模型箱内径尺寸为500mm(长)×85mm(宽)×500mm(高),箱壁采用19mm厚度钢化玻璃,四周用角钢固定,相邻箱壁的连接处用硅胶密封。刚性条形基础采用钢锭制作,截面尺寸为83mm(长)×40mm(宽),并在条形基础底面用胶水粘贴相同尺寸的砂纸,以模拟基础底面的粗糙度。

加载系统为WDW-600KN伺服控制电子万能试验机,刚性基础上端与试验机压力轴下端连接,并用夹子固定。试验时需调整刚性基础使其位于地基土中部位置,并保证基础底面水平。试验采用位移控制方式进行加载,加载速率 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

所采用的激光发射器功率为150mW,波长650nm,发射激光形状为一扇面。激光扇面从地基土一侧射入,并照亮位于地基土中部且平行于模型箱长轴方向的剖面,从而获得该剖面的激光散斑图。试验

所采用的数码相机型号为佳能500D,分辨率 $2\,592\times 1\,728$,放置位置与激光剖面垂直。试验前调整相机的焦距及其与激光剖面的垂直距离,使得所分析的区域全部位于相机拍摄范围。为了避免其他光源对激光散斑图的影响,保证激光为试验的唯一光源,故本试验在黑暗环境下进行。相机通过数据线与电脑相连,并通过电脑控制相机的拍照时间间隔,试验设定连续两张照片的时间间隔为10s。

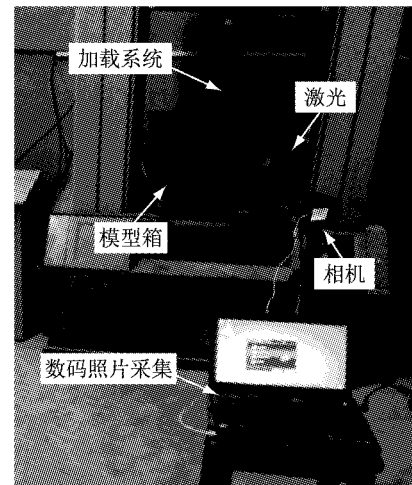


图1 试验装置

Fig.1 Experimental installation

1.2 试验材料

采用光学镀膜用玻璃砂,其 SiO_2 含量为99.99%,折射率为1.4585,颗粒比重2.24。图2为玻璃砂级配曲线,其粒径范围为0.075~1mm,平均粒径 $D_{50}=0.42\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=2.0$,曲率系数 $C_c=0.77$,最大干密度为 $1.48\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最小干密度为 $1.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,为一种粒径较均匀的中砂。

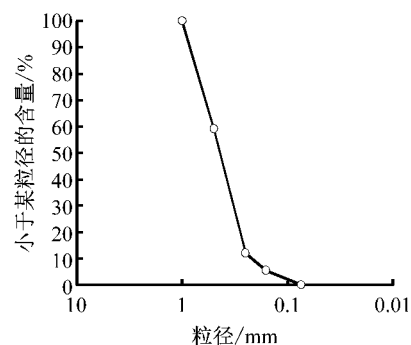


图2 玻璃砂级配曲线

Fig.2 Grading curve of glass sand

采用化妆品级15#白油和工业级3#白油。这两种矿物油均为无色、透明液体,化学性质稳定,无毒性,20℃室温下的折射率分别为1.4644和1.4499,按体积比3:1混合,其混合液折射率为

1.458 7,与玻璃砂折射率基本一致.图 3 为采用上述材料所配制的透明土地基,其透明度较好,透过 2 层 16 mm 厚的钢化玻璃板与 85 mm 厚的透明土试样,可以很清晰地看到后面的文字.

所采用筋材为一种聚酰胺网,网格间距 1.2 mm,抗拉强度 $13.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,2%和 5%伸长率的拉伸力分别为 $0.875 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.92 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,轴向刚度 $J=38.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$.



图 3 透明土试样

Fig.3 Sample of transparent soil

1.3 模型试验方案

图 4 为加筋地基平面应变模型试验示意图.模型加筋地基宽度为 500 mm,高度为 240 mm,刚性基础宽度 $B=40 \text{ mm}$,模型加筋地基宽度和高度分别为基础宽度的 12.5 倍和 6 倍.已有文献^[11]表明,当地基宽度和高度分别超过基础宽度的 10 倍和 6 倍时,可忽略其边界效应.

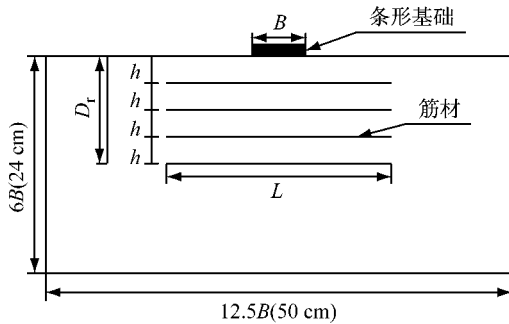


图 4 加筋地基模型试验示意图

Fig.4 Diagram of model reinforced foundation

影响加筋地基变形和承载力的主要因素有筋材层间距 h/B 、加筋深度 D_r/B 和加筋长度 L/B ,其中 B 为基础宽度^[3-5].Sharma^[3]通过模型试验得出加筋地基筋材间距 h 的最优值为 $0.2 \sim 0.5B$.模型试验固定筋材间距为 $0.25B$,而选取 2 种不同的筋材长度($L=3B,7B$)和 3 种不同的加筋深度($D_r=0.5B,1B,1.5B$),组合设计了 5 组加筋地基模型试验,如表 1 所示;并同时进行了 1 组无筋地基对比试验.对

于筋材间距 $h=0.25B$,加筋深度 $D_r=0.5B,1B$ 和 $1.5B$ 分别对应 2,4 和 6 层加筋层数.

试验中每组模型地基土相对密实度都控制到 0.85,即其压实度达到 95%,满足工程上加筋地基压实度的要求^[12].试验方案同已开展的加筋土模型试验方案^[3-5],均采用量纲为一参量.根据相似原理^[13],采用量纲为一参量的模型试验跟原型具有相似性.

表 1 加筋地基试验方案

Tab.1 Testing program of model reinforced foundation

序号	加筋长度(L/B)	加筋深度(D _r /B)	加筋层数
1	3	0.5	2
2	3	1.0	4
3	3	1.5	6
4	7	1.0	4
5	7	1.5	6

1.4 模型地基的制备

将配制好的与玻璃砂折射率一致的 3# 和 15# 白油混合液倒入模型箱中,称取 14.2 kg 的玻璃砂,逐勺将其缓慢浸入混合液中,并用玻璃棒对其进行搅拌,以排出其中气泡.

采用小型混凝土振动台分层振动密实地基土至 0.85 相对密实度.在地基土高度达到筋材铺设的位置时,将所需尺寸的筋材铺设在砂面上,然后继续分层添加玻璃砂,并振动密实,直至加筋地基制作完毕,地基土的最终高度为 240 mm.

1.5 试验及图像分析

将制备好的模型地基放至试验机上,按 1.1 节试验装置控制参数进行加载试验,直至地基滑移破坏.

所摄数码照片采用 Photoinfor 软件^[14]进行图像分析,获得不同基础沉降时的地基垂直位移、水平位移和总位移云图.

2 试验结果与分析

2.1 加筋地基变形演化过程

通过对各组加筋地基位移场变化的分析发现,不同筋材长度 L 和加筋深度 D_r 的加筋地基均具有相似的变形演化规律.以 $L=3B, D_r=1.5B$ 加筋地基为例阐述其变形演化过程.

图 5 为该加筋地基水平位移随基础沉降的演化过程.由图可见,地基中的土体在基础沉降过程中,首先在加筋区两侧底部非加筋区位置产生明显的水平位移,并不断累积;在基础沉降达到 $s=26 \text{ mm}$ 时,

土体水平位移开始自下而上向加筋层扩展,此时从照片中观察到底部 3 根筋材自下而上依次断裂,如图 6a 所示;而后土体水平位移继续向上、向外扩展,至基础沉降达到 $s=37\text{ mm}$ 时,筋材全部剪断,并形成宏观破坏面,如图 6b 所示。

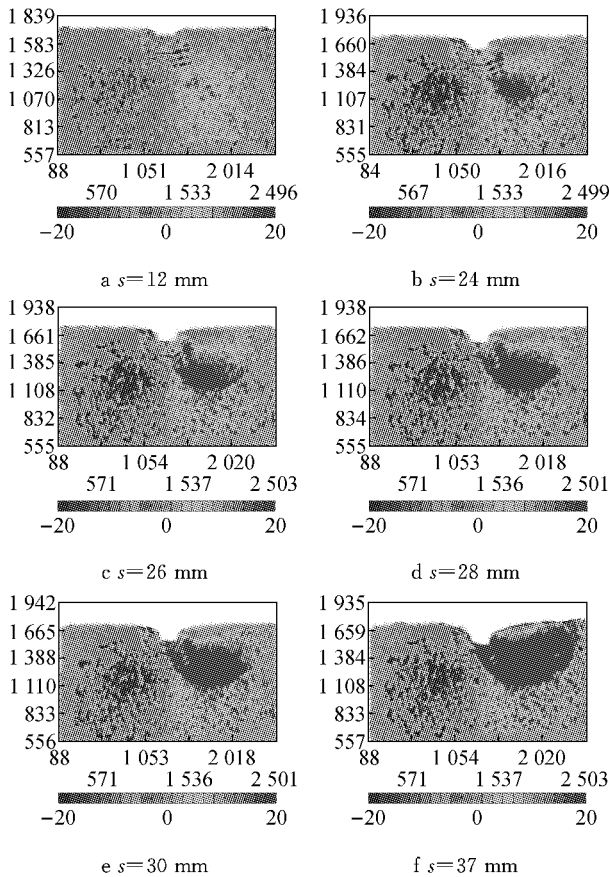


图 5 不同基础沉降下地基中水平位移云图

Fig.5 Contour of horizontal displacement in the foundation under different slab settlements

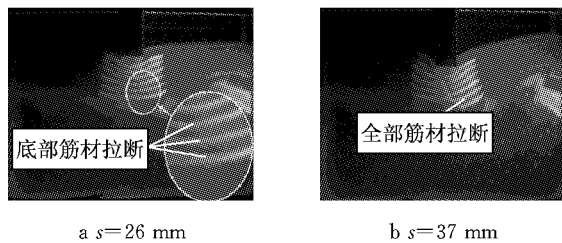


图 6 地基中筋材断裂过程

Fig.6 Procedure of model geogrid rupture in the foundation

图 7 为对应的加筋地基垂直位移随基础沉降的演化过程. 由图可见,基础下地基中的等沉降面向两侧扩散,并随着基础沉降的增大,基本形成如图 7b 所示的三个区域:①区为沿基础边缘向下扩展的直线所包围的区域,该区域土体垂直位移直接受基础

沉降影响;②区为两侧筋材弯折段,受①区中连同基础一起沉降的筋材向下拉拔的影响;③区土体垂直位移很小,基本不受基础沉降和筋材拉拔影响. 当基础沉降达到 26 mm 及以上时,①区右下侧土体沉降开始持续增大,对应于土体水平位移自下而上持续扩展。

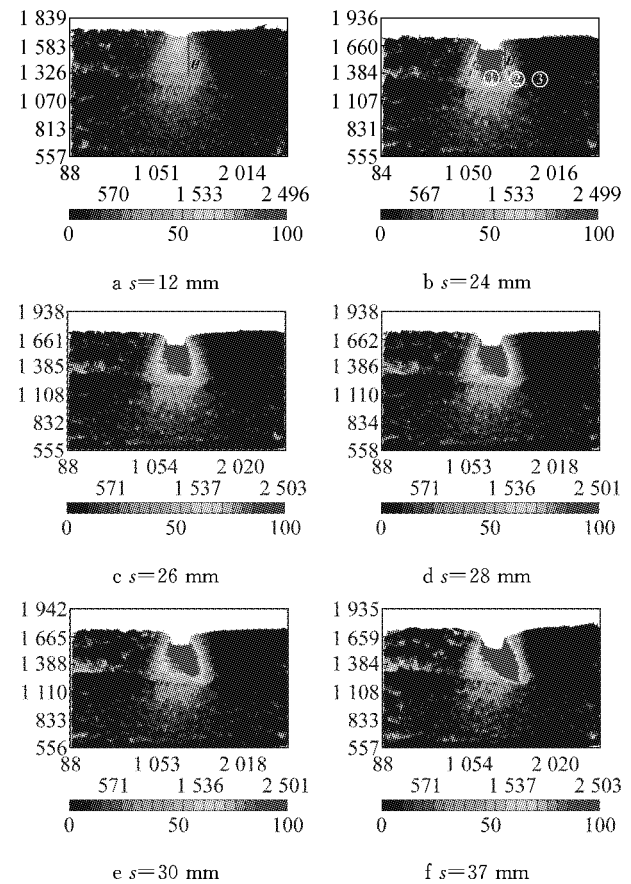


图 7 不同基础沉降下地基中垂直位移云图

Fig.7 Contour of vertical displacement in the foundation under different slab settlements

加筋地基可看作双层地基,加筋区模量较下部非加筋区模量高,基础附加应力按扩散角 θ 向下扩散. ①区的扩散角约为 12° ,②区扩散角约为 30° ,是前者的 2.5 倍. 一般将②区扩散角作为加筋垫层的应力扩散角^[3],也即如图 7a 所示基础荷载施加初期时的扩散角 θ . 实际工程加筋地基测试的扩散角在 $28^\circ\sim 38^\circ$ 之间^[12],试验所得出的扩散角在实际工程实测值范围内。

本文对加筋地基筋材断裂及滑移破坏过程的发现很有意义. 产生此过程的原因应该是:加筋区土体受筋材侧限作用,并受粗糙底面的基础底部压应力区作用,不易产生水平位移,导致加筋区两侧底部非加筋区土体首先产生明显的水平位移并不断累积,其对底部筋材产生拉拔作用. 当拉拔力超过筋材强

度时,底部筋材即首先断裂,并随着土体水平位移向上发展,接连拉断以上的筋材,最后形成宏观剪切破坏面。

图 8 为所有地基(包括无筋地基)在破坏阶段所对应的总位移云图。图 8c 所示的加筋地基为向左滑移,其他情况均为向右滑移。图 9 为所有地基滑动面形状对比图。由图 8 和图 9 可见,加筋地基和无筋地基均表现为普朗特滑动破坏模式;加筋地基滑动面均贯穿整个加筋层,筋材在滑动面上发生拉断破坏;加筋地基滑动面深度和宽度基本随加筋深度和

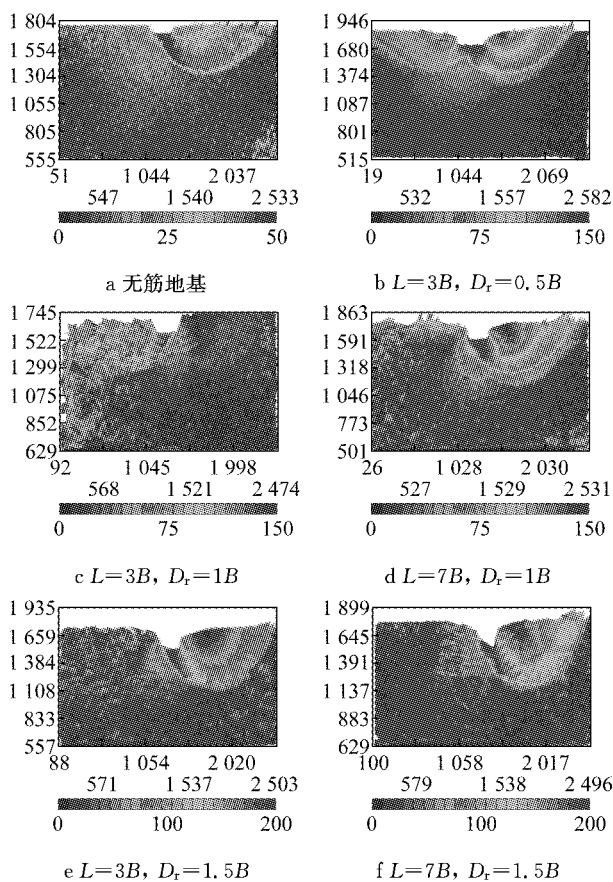


图 8 地基破坏时总位移云图

Fig.8 Contour of resultant displacement at foundation failure

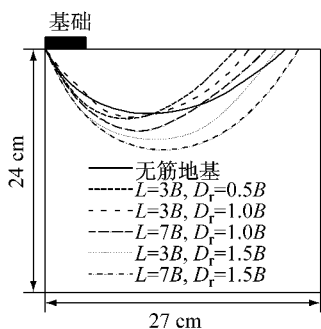


图 9 地基滑动面形状对比图

Fig.9 Contrast of slide planes of different foundations

加筋长度的增大而增大。

2.2 荷载—沉降特性

图 10 为所有地基荷载—沉降曲线($p-s$ 曲线)。由图可见,在荷载未超过极限承载力时,加筋地基和无筋地基 $p-s$ 曲线均基本呈线性关系,而后出现应变软化阶段,即荷载随沉降逐渐降低。需要在这里说明的是,加筋地基和无筋地基的极限荷载,是在地基潜在滑动面底部土体开始产生局部剪切破坏时即已达到,如图 5c 和图 7c 所示时刻的荷载,而不是如图 8 所示的宏观破坏阶段的荷载。

加筋地基中筋材的失效有拉断和拔出两种情况,加长筋材长度可以提高抗拔力,但当筋材强度不足时,加长筋材长度对承载力的提高不起作用。本文模型试验加筋地基中筋材均被拉断,而抗拔力均充足,故 3B 和 7B 筋材长度的地基承载力接近。一些学者^[5, 15-17]通过模型试验提出加筋地基承载力与加筋长度、加筋深度(层数)和加筋间距的关系,并提出这些参数的最优值,如 Das^[15]提出条形基础下加筋长度的最优值 $L/B=7\sim 8$,这显然忽略了筋材强度这一关键参数。因此,有必要在以后的加筋地基承载力研究中综合考虑这些参数的相互影响,并都能反映到加筋地基承载力计算中。

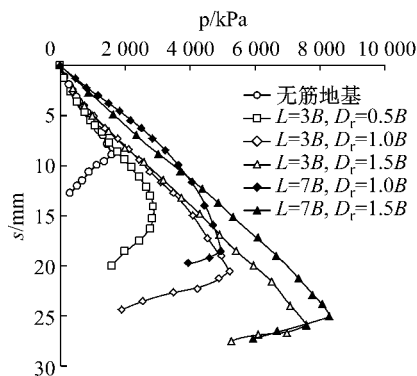


图 10 荷载—沉降曲线

Fig.10 Load-settlement curves

3 结论

采用透明土技术,并结合图像分析技术,开展了 5 组不同筋材长度和加筋深度(层数)的加筋地基平面应变模型试验,以及 1 组无筋地基对比试验,以研究在条形基础荷载下加筋地基内部位移场演化及滑动破坏过程,并探讨其荷载—沉降特性。主要得出以下主要结论:

(1)加筋地基中的土体在基础沉降过程中,首先

在加筋区的两侧底部非加筋区位置累积水平位移,并自下而上向加筋层扩展,对筋材产生拉拔作用,致使筋材自下而上依次断裂,最终形成宏观剪切破坏面。

(2)加筋地基在基础沉降过程中形成两个应力扩散区,分别沿筋材弯折段和基础边缘向下扩展,前者扩散角是后者的2.5倍左右。

(3)加筋地基和无筋地基均表现为普朗特滑动破坏模式,加筋地基滑动面均贯穿整个加筋层,加筋地基滑动面深度和宽度基本随加筋深度和加筋长度的增大而增大。

(4)当筋材强度不足时,加长筋材长度对加筋地基承载力的提高不起作用,而加筋层数对承载力影响显著。

参考文献:

- [1] Abdrabbo F M, Gaaver K E, Elwakil A Z. Behavior of square footings on single reinforced soil [C] // Proceedings of Geosupport 2004. Reston: ASCE, 2004; 1015-1026.
- [2] Dash S K, Rajagopal K, Krishnaswamy N R. Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(1): 35.
- [3] Sharma R, Chen Q, Murad ABU-FARSAKH, *et al.* Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 63.
- [4] Michalowski R L, SHI L. Deformation Patterns of Reinforced Foundation Sand at Failure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(5): 439.
- [5] Yamamoto K, Kusuda K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(3): 127.
- [6] Guzman I L, Iskander M, Eduardo Suescun-Florez, *et al.* A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 187.
- [7] Ni Q, Hird C C, Guymer I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. *Geotechnique*, 2010, 60(2): 121.
- [8] Ahmed M, Iskander M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(5): 525.
- [9] Ezzein F M, Bathurst R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(3): 246.
- [10] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(8): 1564. CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, *et al.* Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(8): 1564.
- [11] Michalowski R L. Limit loads on reinforced foundation soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 381.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. JGJ 79-2012 Technical code for ground treatment of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [13] 谢多夫. 力学中的相似方法与量纲理论[M]. 北京: 科学出版社, 1982. Sedov. Similarity method and dimension in theoretical mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [14] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土模型试验变形场量测[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 36. LI Yuanhai, ZHU Hehua, UENO Katsutoshi, *et al.* Deformation field measurement for granular soil model using image analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 36.
- [15] Das B M., Shin E C, Omar M T. The bearing capacity of surface strip foundations on geogrid-reinforced sand and clay-a comparative study [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1994, 12(1): 1.
- [16] Khing K H, Das B M, Puri V K, *et al.* The bearing-capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1993, 12(4): 351.
- [17] Huang C C, Tatsuoka F. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, 9(1): 51.