文章编号：1001-4888(2021)01-0133-10

加筋土地基模型试验边界效应与承载性能分析*

王家全，柏蕾，林志南，唐毅
（广西科技大学 土木建筑工程学院，广西 柳州 545006）

摘要： 为进一步探讨边界效应对加筋土地基的影响，基于室内方形基础下加筋土地基大模型试验，采用 ABAQUS 有限元软件建立加筋土地基数值模型，主要分析了模型宽度 L 和加载板宽度 B 对加筋土地基承载性能、地基内部土体应力应变及筋材变形的影响。结果表明：无筋地基与加筋土地基极限承载力均随 L/B 的减小而增大，当 $L/B>5$ 时，可忽略边界效应对加筋土地基的影响；当 $L/B<2.67$ 时，边界效应对加筋土地基的影响最大；当 $L/B>4$ 时，边界效应对无筋地基的影响可忽略不计；加筋能够显著改善地基土体的不均匀沉降和减小基础两侧土体隆起高度；竖向应力分布区域随着 B 的增大而增大，加筋土地基受竖向荷载的影响宽度为 $5B$，影响深度为 $2.57B\sim4B$；当 $L/B>5$ 时，不同 L/B 工况下土体变形、应力分布及格栅变形曲线基本重合，此时加筋土地基受边界效应的影响可忽略不计。

关键词： 加筋土地基；边界效应；有限元；极限承载力；影响范围
中图分类号： TU443 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-20-024

0 引言

土工格栅具有强度高、抗拉剪性能好等优点，土体中的土工格栅与土体之间产生的摩擦嵌固作用，不仅可以显著提高软弱土体的稳定性，还在减小地基的变形、改善不均匀沉降及约束地基侧向变形等方面有良好的效果，目前已被广泛应用于地基、路堤、边坡等实际工程中。

现阶段，国内外众多学者对加筋土地基承载性能的影响因素进行了大量研究，罗正东[1]、杨庆[2]、周健[3]、徐超[4]、Infante[5]、Kazi[6]、Prasad[7]、王家全[8,9]等通过室内试验或数值分析研究了布筋参数对加筋土地基的影响，得出最优加筋层数为 3 层，加筋长度的最优值为 $3B$（B 为加载板宽度），筋材最佳首层埋深为 $0.6B$，最优加筋间距为 $0.4B$ 等。除以上影响因素外，研究还发现加载板尺寸对地基平板荷载试验的影响也十分显著，Abu-Farsakh[10]、Tafreshi[11]等研究发现，随着基础尺寸的增大，地基的极限承载力随之增大；蒋明镜等[12]通过颗粒流模拟试验从细观角度分析了基础宽度对地基极限承载力的影响，得出地基承载力系数随基础宽度的增加而减小；刘鹏等[13]通过室内试验研究了基础尺寸对单桩与多桩复合地基的影响，得出复合地基的沉降随基础宽度的增大而增大；李胜伟等[14]通过 ABAQUS 建立双层地基数值模型，分析得出双层地基随着基础尺寸增大，其沉降随之增大，但增幅会逐渐减小；杨光华等[15]通过数值模拟与切线模量法得出在加载板尺寸变化时规范方法给定的承载力是偏危险的。以上学者对各种类别地基中尺寸效应的影响进行了大量研究，但目前对加筋土地基尺寸效应及边界效应的

* **收稿日期：** 2020-02-14；**修回日期：** 2020-03-26
基金项目： 国家自然科学基金项目(41962017)；广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人才[2020]6 号)；广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198170)；广西研究生教育创新计划项目(YCSW2020222)；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY08023)；广西大学生创新创业训练计划资助项目(202010594035)
通信作者： 王家全(1981－)，男，博士，教授，主要从事加筋结构、地基基础工程等方面的教学与研究工作。Email：wjquan1999@163.com

研究较少。

目前加载板尺寸对加筋土地基承载性能的影响还有待深入研究,因此本文开展了室内平板荷载大模型地基试验,并采用 ABAQUS 有限元软件建立无筋与加筋土地基数值模型,对比分析竖向荷载作用下方形加载板宽度 B 和地基模型宽度 L 对无筋与加筋土地基极限承载力和沉降的变化规律,研究加载板宽度 B 对地基内部土体应力分布和土工格栅变形特性的影响,所得结果可为模型试验中减小边界效应对加筋土地基平板载荷试验的影响提供一定的参考依据。

1 模型试验

1.1 加筋土地基室内模型试验介绍

试验采用长、宽、高分别为 3000mm、1600mm、2000mm 的大尺寸模型箱,模型箱的三侧为 6mm 厚的钢板,一侧为钢化玻璃,并焊接角钢用以加固,模型箱图片见图 1(a);图 1(b)为加筋土地基模型示意图。砂土为柳州本地级配良好的河砂,采用分层填筑压实来保证其密实度,物理参数见表 1;加筋材料为山东联谊公司生产的双向土工格栅,表 2 为具体参数。在模型正上方采用边长为 300mm 的方形加载板来模拟基础对地基模型施加荷载,依据《建筑地基基础设计规范》[16]采用分级加载方式开展无筋砂土地基与土工格栅加筋土地基平板荷载试验,室内大模型试验为加筋土地基数值模拟提供了验证依据。

表 1 砂土物理特性

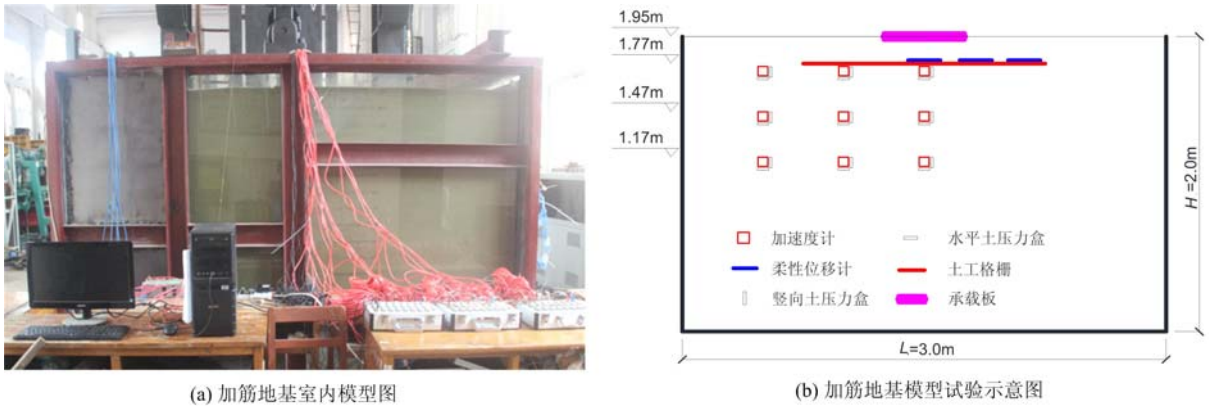
Tab. 1 Basic characteristics of tested sand

填土名称	土粒比重	容重 /kN·m^{-3}	含水率/%	内摩擦角 φ/°	黏聚力 c/kPa
砂土	2.65	18.10	6.9	39	1.28

表 2 土工格栅材料参数

Tab. 2 Material parameters of geogrid

型号	屈服抗拉强度 /kN·m^{-1}	屈服伸长率 /%	2%拉伸力 /kN·m^{-1}	5%拉伸力 /kN·m^{-1}	网孔尺寸 /mm×mm
TGSG-30	31.4	13.4	13.7	24.3	40×40



(a) 加筋地基室内模型图 (b) 加筋地基模型试验示意图

图 1 加筋土地基室内模型照片

Fig. 1 Model photo of reinforced foundation

1.2 加筋土地基数值模型建立

采用 ABAQUS 软件建立无筋地基与加筋土地基数值模型,加筋土地基数值模型如图 2 所示。模型边界条件设置为侧面限制法向位移,下底面限制法向及切向位移,以此来模拟模型箱的刚性边界,砂土材料的屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则,剪胀角取 0°,土工格栅采用弹塑性模型,以材料实际物理参数为依据,并参考文献[17－19]中土体及格栅参数的选取,来确定本文试验中砂土与格栅的参数,如表 3 所示。首先施加重力场,计算出模型的初始应力,然后按照计算结果设置初始应力,最后模拟室内试验中的加载方式,在模型正上方模拟方形加载板来分级施加均布荷载。

为分析边界效应对地基承载力的影响,在其他条件一致的情况下对表 4 所列工况进行数值模拟,主要探讨静载作用下加载板宽度及模型尺寸变化对无筋砂土地基和加筋砂土地基承载性能的影响,其中

A 组和 B 组工况均为地基模型尺寸不变，改变加载板（基础宽度 B）尺寸，分别探讨 A 组无筋地基和 B 组加筋土地基边界效应的影响；C 组为加载板尺寸不变，改变模型宽度 L，L 从 2100mm 依次减小为 600mm，从而分析模型边界效应对试验结果的影响。此外，通过模型宽度 L 与加载板宽度 B 的相对关系 L/B 来分析地基受力特性，进一步研究地基中土体的应力分布及土工格栅的变形规律。

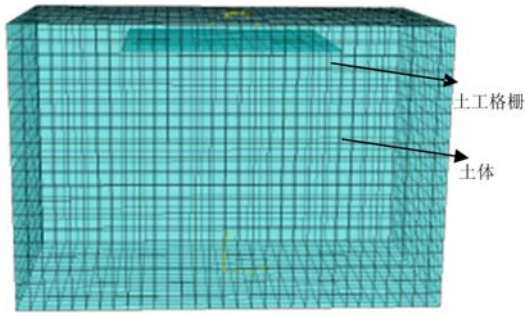


图 2　加筋土地基数值模型

Fig. 2　The numerical simulation mode of reinforced foundation

表 3　砂土及土工格栅模型参数

Tab. 3　Sand and geogrid model parameters

材料	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /kg·m^{-3}	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/°
砂土	4.5	0.27	1850	1.0	34.5
土工格栅	98	0.3	1180	—	—

表 4　试验工况列表

Tab. 4　List of test conditions

工况	模型尺寸 /mm	加载板宽度 B/mm	加筋长度 l/mm	加筋层数 N	筋材埋深 u/mm
A-1	3000×1600×2000	200	0	0	—
A-2		300			
A-3		400			
A-4		500			
A-5		600			
A-6		700			
B-1	3000×1600×2000	200	1500	1	180
B-2		300			
B-3		400			
B-4		500			
B-5		600			
B-6		700			
C-1	2100×2100×2000	300	2100	1	180
C-2	1800×1800×2000	300	1800		
C-3	1500×1500×2000	300	1500		
C-4	1200×1200×2000	300	1200		
C-5	900×900×2000	300	900		
C-6	600×600×2000	300	600		

1.3　加筋土地基数值模型验证与分析

为验证数值模拟的可靠性，基于室内大模型试验的结果，对无筋地基和单层加筋土地基进行数值模型验证，图 3 为数值模拟 A-2 和 B-2 工况与室内试验 $P-s$（试验荷载－沉降）曲线对比图。从图 3 中可

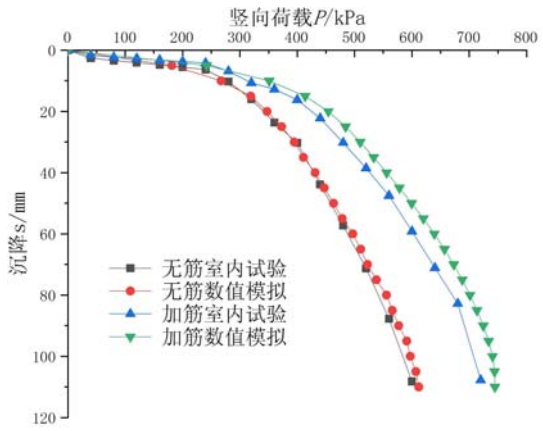


图 3 无筋地基与加筋土地基 $P-s$ 曲线验证

Fig. 3 Verification of $P-s$ curves for reinforced foundation and unreinforced foundation

以看出,首先无筋砂土地基室内试验与数值模拟的 $P-s$ 曲线基本一致,从而验证了砂土参数选取的合理性;其次加筋土地基数值模拟所得的 $P-s$ 曲线与室内试验所得结论相吻合,表明土工格栅所选参数是可行的。因此,本文所建立的数值模型能够较好地模拟地基平板载荷试验。

对比图 3 中加筋土地基与无筋地基的 $P-s$ 曲线可知,地基中加入土工格栅能够明显地减小地基竖向变形,提高地基的极限承载力。这是由于竖向荷载作用下,土体产生剪切变形,土工格栅也随之产生形变,但由于土工格栅与土体界面间存在一定的摩擦力与咬合力,对土体有一定的侧向约束作用,能够提高土体的剪切刚度,且筋材刚度远大于土体,能够传递一部分应力,起到应力扩散作用,从而减小基础下方的附加应力,使其沉降减小。因此,土工格栅加筋能够减小地基的沉降和提高地基承载力。

2 数值模拟结果分析

2.1 加筋土地基承载变形的边界效应分析

图 4 和图 5 分别为 A 组无筋砂土地基和 B 组加筋砂土地基极限承载时的竖向位移云图。以加载板宽度 B=300mm、500mm、700mm 为例,纯砂地基与加筋土地基中土体的竖向位移分布区域均随加载

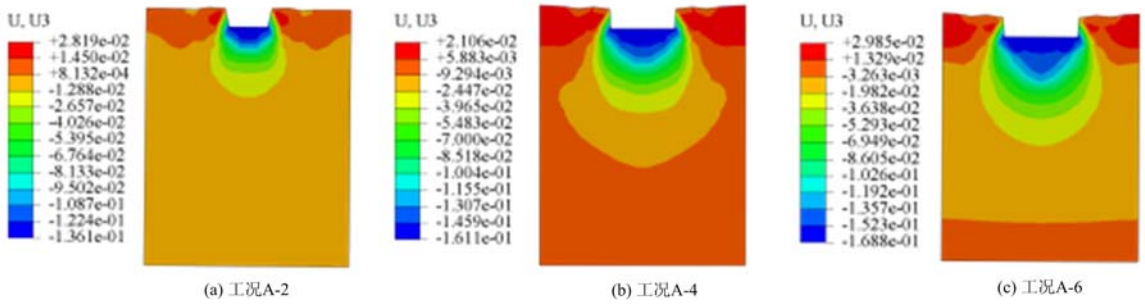


图 4 A 组无筋地基竖向位移分布云图

Fig. 4 The vertical displacement distribution cloud picture of unreinforced foundationof group A

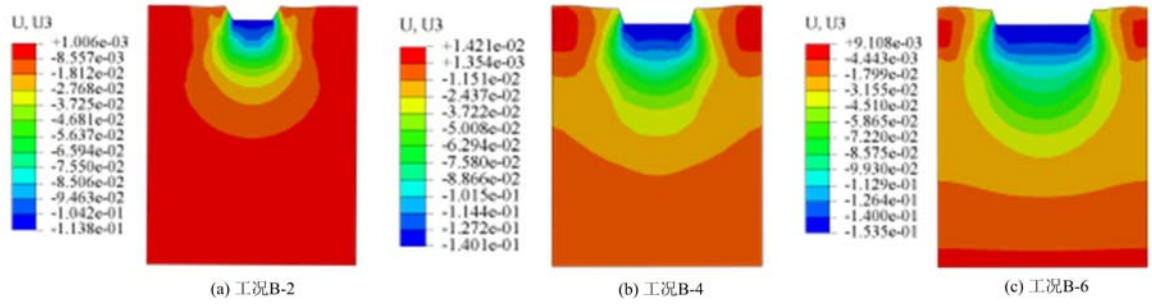


图 5 B 组加筋土地基竖向位移分布云图

Fig. 5 The vertical displacement distribution cloud picture of reinforced foundation of group B

板宽度的增大而增大,对比分析有无加筋工况的竖向位移分布云图可得:(1)加筋与无筋地基在竖向荷载作用下,基础两侧土体均出现隆起,但无筋地基的隆起高度远大于加筋土地基,其中加载板宽度为 300mm 时,无筋地基隆起高度约为 20mm,一层加筋土地基约为 10mm,这是由于土工格栅加筋层的存

在，使得基底附加应力得到了更好的扩散，约束了基础两侧土体的隆起。(2)加筋土地基发生沉降变形的区域明显大于无筋地基，表明土工格栅在土体中有很好的应力扩散作用，能够显著改善地基土体的不均匀沉降及减缓基础两侧的隆起。这与室内试验中土体的变形及隆起现象一致。

图 6 为 A 组无筋地基在静载作用下不同加载板宽度时 $P-s$ 曲线。当加载板宽度 $B\leqslant 400$mm 时，$P-s$ 曲线几乎重合，表明此时加载板宽度的变化对无筋地基的沉降影响较小，即当 $L/B>4$ 时，边界效应对无筋地基中土体沉降的影响较小；当加载板宽 $B>400$mm 时，地基土体的沉降随加载板宽度的增大而增大，与文献[13]所得规律相一致；同时，无筋地基的极限承载力随着加载板宽度的增大，整体呈增大趋势，由表 5 知，$L/B=6$、5、4、3、2 的极限承载力较 $L/B=7$ 的分别增大 1.010、1.047、1.121、1.206、1.212 倍，呈逐渐递增的非线性变化趋势。综合考虑加载板宽度对无筋地基沉降及极限承载力的影响得出，$L/B>4$ 时，加载板宽度对地基的沉降和极限承载力影响均较小，因此在 $L/B>4$ 时边界效应对无筋地基的影响可忽略不计。

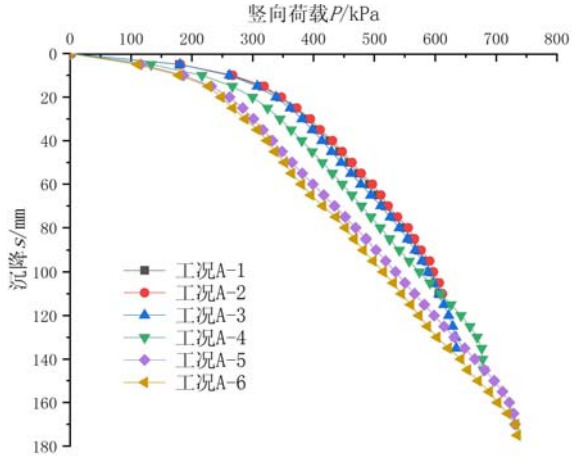


图 6　加载板宽度不同时无筋地基的 $P-s$ 曲线图

Fig. 6　$P-s$ curves for different loading plate width in unreinforced foundation

表 5　A 组工况无筋地基极限承载力

Tab. 5　Ultimate bearing capacity of group A

工况	L/B	极限承载力/kPa	极限承载力比
A-1	8	605.86	1
A-2	5.33	611.98	1.010
A-3	4	634.60	1.047
A-4	3.2	679.17	1.121
A-5	2.67	731.02	1.206
A-6	2.29	734.81	1.212

图 7 为 B 组加筋土地基在静载作用下加载板宽度不同时的 $P-s$ 曲线。相同竖向荷载下，加载板宽度为 200mm 和 300mm 时土体沉降几近相同，此时模型宽度 $L>5B$，说明 $L/B>5$ 时，可忽略边界效应对加筋土地基的影响；当 $B>300$mm 时，随着加载板宽度 B 的增加，地基土体的沉降也随之增大，但加载板宽度达到 600mm 时，沉降几乎保持不变。地基的极限承载力随加载板宽度的增大而增大，但当加载板宽度达到一定值时，其承载力几乎没有变化，由表 6 可以明确得出，$B=300$mm、400mm、500mm、600mm、700mm 的极限承载力较 $B=200$mm 时，分别增大 1.005、1.045、1.118、1.203、1.196 倍，其增长趋势呈非线性。

对比分析边界效应对无筋地基与加筋土地基的影响，在 $L/B>4$ 时边界效应对无筋地基的影响较小，在 $L/B>5$ 时对加筋土地基的影响较小，这是由于土工格栅在土体中有很好的应力扩散作用，扩散了基底应力，由于筋材的加筋作用，加筋层的整体性增强，加筋土地基土的竖向刚度随基础尺寸增大而略有增大。

图 8 为 C 组加筋土地基加载板宽度不变，改变地基模型宽度所得的加筋土地基的 $P-s$ 曲线，相同竖向荷载下，地基土体的沉降随着模型宽度 L 的减小而减小，这是由于模型较小时，加载板距离模型边界较近，模型边界对土体的约束作用较强，约束了地基土体的侧向变形，从而减小了地基土体的沉降。由表 7可知，随着 L/B 的减小，$L/B=6$、5、4、3、2 的极限承载力较 $L/B=7$ 分别增大 1.020、1.010、1.060、1.151、1.303 倍，加筋土地基的承载力在 $L/B>5$ 时变化不明显，$L/B<5$ 时变化较为显著，且随着 L/B 的减小，地基极限承载力随之增大，其增幅也逐渐变大。当 $L/B>5$ 时，地基的极限承载力不变，说明此时边界效应对加筋土地基的影响可忽略不计。

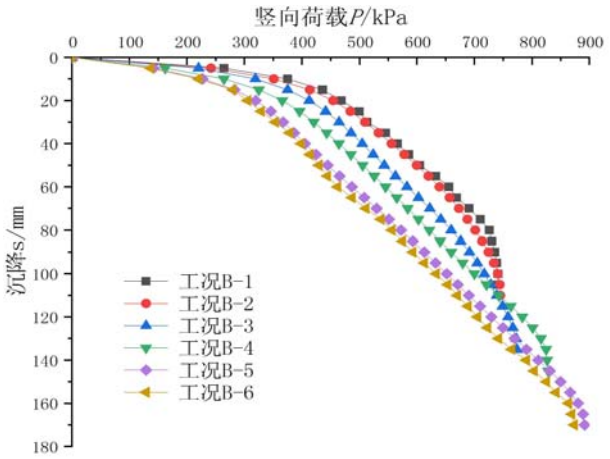


图 7 加载板宽度不同时加筋土地基的 $P-s$ 曲线图

Fig. 7 $P-s$ curve of reinforced foundation when the width of loading board is different

表 6 B 组工况极限承载力

Tab. 6 Ultimate bearing capacity of group B

工况	L/B	极限承载力/kPa	极限承载力比
B-1	8	740.92	1
B-2	5.33	744.77	1.005
B-3	4	773.90	1.045
B-4	3.2	828.25	1.118
B-5	2.67	891.49	1.203
B-6	2.29	886.26	1.196

综上可知，随着地基模型宽度 L 与加载板宽度 B 的比值增大，其极限承载力随之减小，土体沉降增大。这是因为 L/B 的值越小，表明加载板距离模型箱的边界越近，模型箱的边界为固定约束，加载板距离模型箱的边界越近，固定边界对土体的侧向约束作用就会越强，从而提高地基的极限承载力。综合分析加载板宽度 B 和地基模型宽度 L 对加筋土地基极限承载力的影响得出：当模型宽度 $L>5B$ 时，其极限承载力几乎保持不变，故在室内平板荷载试验中，应保证 $L/B>5$，以此来控制边界效应对加筋土地基平板荷载试验结果的影响；当模型宽度 $L<2.67B$ 时，加筋土地基的极限承载力与沉降几乎不随加载板宽的改变而变化，说明此时的边界效应对加筋土地基的影响程度达到最大。

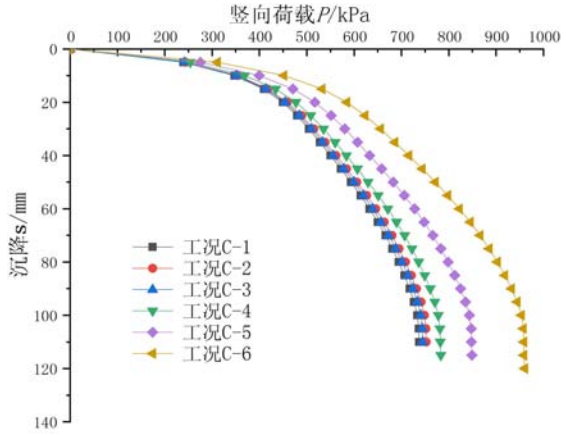


图 8 模型宽度不同时加筋土地基的 $P-s$ 曲线图

Fig. 8 $P-s$ curve of reinforced foundation with different model widths

表 7 C 组工况极限承载力

Tab. 7 Ultimate bearing capacity of group C

工况	L/B	极限承载力/kPa	极限承载力比
C-1		737.32	1
C-2	6	752.21	1.020
C-3	5	744.77	1.010
C-4	4	783.24	1.060
C-5	3	848.72	1.151
C-6	2	960.52	1.303

2.2 加筋土地基土体竖向应力分布

图 9 为 B 组加筋土地基极限状态时不同加载板宽度下的土体竖向应力分布云图，由图可以发现，土体主要呈现出拱形受压状态，竖向应力由上向下传递中，随着深度增加，土体中竖向应力逐渐减小；土工格栅下方的竖向应力较上方有明显的减小，且格栅下方应力分布区域变大。这是由于土工格栅的刚度远大于土体刚度，能够承担部分应力，且格栅与土体间摩擦力和咬合力能够改变格栅两侧土体的应力分布，更好地将竖向应力扩散给周围更大范围的土体，使更多的土体共同承担竖向荷载所产生的应力，进而增强地基的刚度与稳定性。

加载板宽度 B 不同，其应力分布区域不同，随着加载板宽度的增加，其应力分布区域随之增大。当加载板宽度 $B<300$mm 时，应力分布区域未扩散到边界处，即边界没有帮助土体承担部分竖向应力，这与 2.1 中 $L/B>5$ 时，边界效应对加筋土地基平板荷载试验的影响较小的结论相一致，故地基平板荷载室内试验时，应控制 $L/B>5$，从而减小边界效应对试验结果的影响。

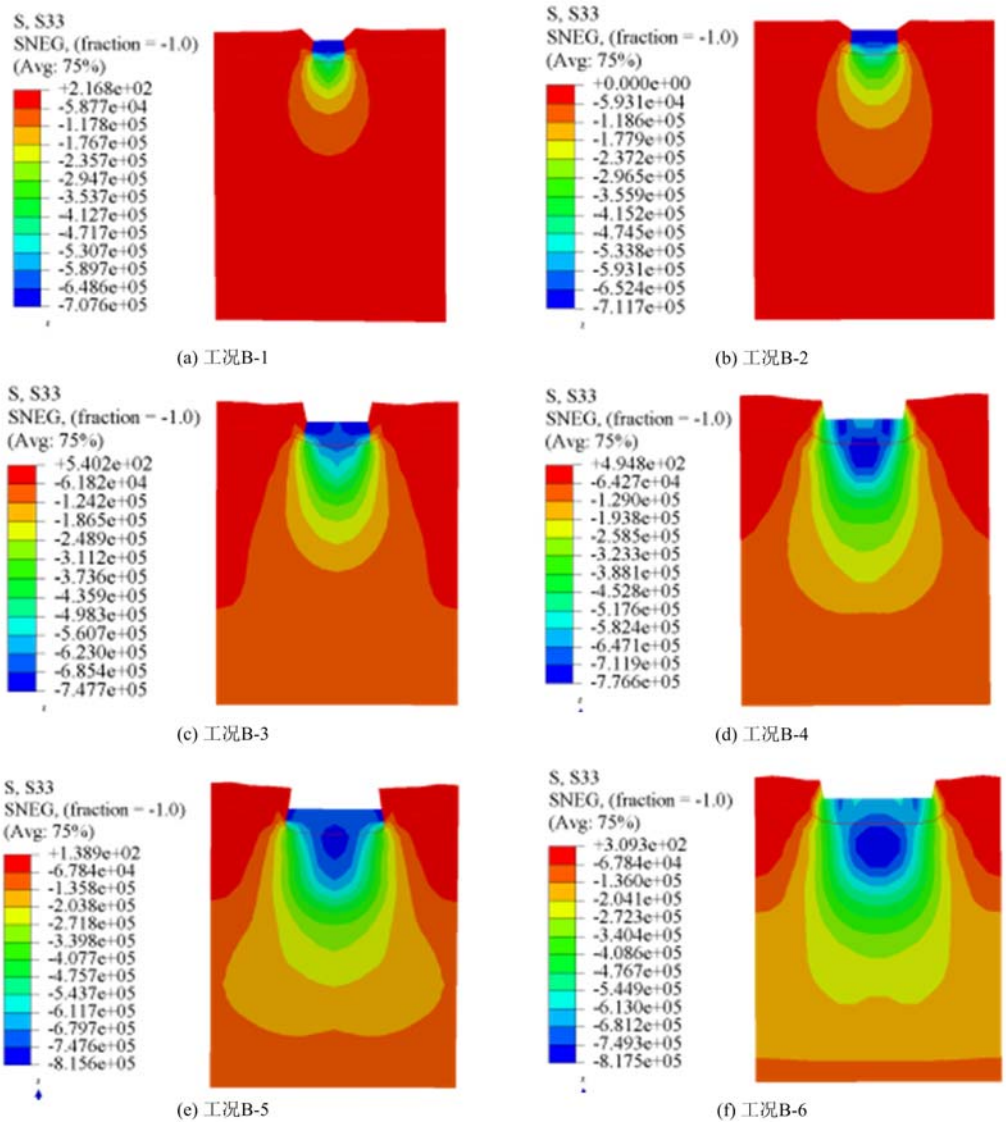


图 9　加筋土地基极限状态时土体竖向应力分布云图

Fig. 9　The vertical stress distribution cloud picture of reinforced foundation under ultimate load

图 10 为 B 组加筋土地基极限状态时不同深度处的土体竖向应力。将竖向附加应力为自重应力的 0.1倍处作为土体竖向应力影响深度极限，竖向应力影响深度随着加载板宽度的增大而增大，$B=200$mm、300mm、400mm、500mm、600mm、700mm 时影响深度分别为 800mm($4B$)、1100mm($3.67B$)、1400mm($3.5B$)、1600mm($3.2B$)、1800mm($3B$)、1800mm($2.57B$)，说明室内模型试验中加载板宽度 $B=200$mm～700mm 时，加筋土地基的影响深度约为 $2.57B$～$4B$，故应控制模型箱高度为 $2.57B$～$4B$，进而减小模型下边界对试验结果的影响。

2.3　加筋土地基土工格栅变形

图 11(a)为 B 组加筋土地基在加载板宽度为 300mm 时的土工格栅应变曲线分布图。由图 11(a)可知，同一位置处，随着竖向荷载的增大，土工格栅的变形也随之增大，竖向荷载不超过 400kPa 时，格栅变形较小，此时格栅变形最大不超过 5%；当竖向荷载大于 400kPa 时，随着竖向荷载的增大，格栅变形显著变大，变形增幅也随之变大，这与 2.1 中土体的变形趋势一致。且模拟所得的格栅变形与室内试验

中柔性位移计所测得的格栅变形趋势相符,进一步验证了数值模拟的可靠性。

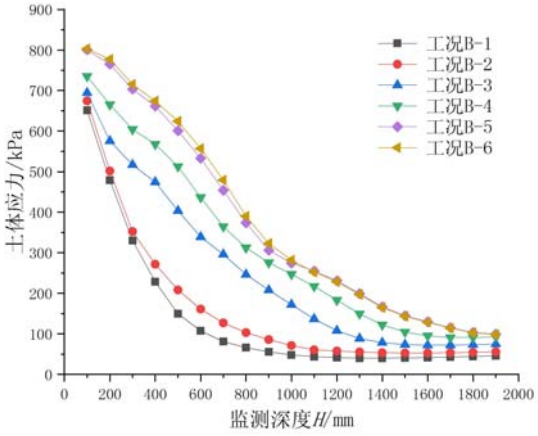


图 10 极限状态时不同深度处的土体竖向应力

Fig. 10 Vertical stress of soil at different depths under ultimate load

表 8 B 组工况筋材变形长度

Tab. 8 Deformation length of geogrid of group B

工况	B/mm	L/B	筋材变形长度/mm
B-1	200	8	800
B-2	300	5.33	800
B-3	400	4	900
B-4	500	3.2	1000
B-5	600	2.67	1100
B-6	700	2.29	1100

注:筋材变形长度指格栅受力变形区段的长度。

图 11(b)为 B 组工况在极限荷载下不同位置处的格栅变形量,各曲线变化均为水平→下降→水平趋势,第一段水平段为加载板正下方,与 2.1 地基土体位移云图分析一致:加载板正下方土体的沉降均匀一致,表明竖向荷载作用下,土工格栅与周围土体共同受力,一起下沉,且加载板越大,土体的沉降越大,导致筋材的变形越大。究其原因,加载板宽度越大,相同位置处土工格栅的应力越大,从而导致格栅变形增大。由第二段下降段可知,距离加载板越远,格栅的变形越小,且加载板宽度不同,影响格栅受力变形的长度也不同,由表 8 可知,筋材变形长度随加载板宽度的增大而增大。第三段为水平段格栅变形几乎为零,即此处格栅不再受力发挥作用。

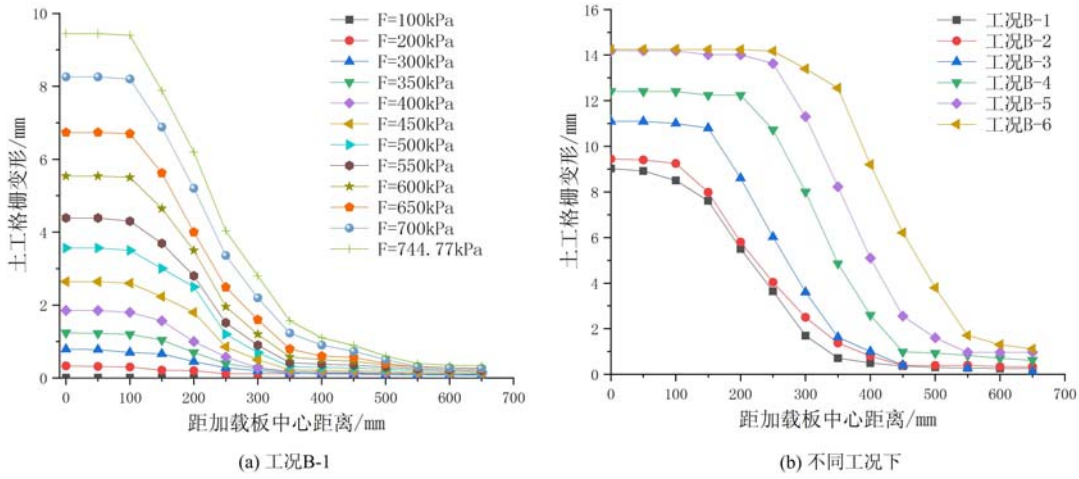


图 11 距加载板中心不同距离处的土工格栅变形

Fig. 11 Geogrid deformation at different distances from the center of the loading plate

此外,从图 11(b)可看出工况 B-1 和 B-2 的格栅应变曲线几乎重合,表明 $L/B>5$ 时,加筋土地基中边界效应可以忽略不计,这与土体变形及应力分布所得规律一致。对比工况 B-5 和 B-6 可知,加载板下方的筋材变形大致相同,可说明当 $L/B<2.67$ 时,边界效应对加筋土地基影响程度最大,这与 2.1 中加载板宽度对加筋土地基极限承载力与沉降的影响规律相同。

3 结论

(1) 随着地基模型宽度 L 与加载板宽度 B 的比值减小,无筋地基与加筋土地基极限承载力均随之

增大，当 $L/B>5$ 时，加筋土地基极限承载力趋于稳定，此时可忽略边界效应对加筋土地基的影响；当 $L/B<2.67$时，边界效应对加筋土地基的影响最大；当 $L/B>4$ 时，无筋地基极限承载力趋于稳定，此时可忽略边界效应对无筋地基的影响。

(2) 与无筋地基相比，加筋土地基发生沉降变形的区域显著增大，且土体隆起高度减小，表明加筋能够显著改善地基土体不均匀沉降及减少基础两侧土体隆起。

(3) 加载板宽度不同，其应力分布区域不同，随着加载板宽度的增加，其应力分布区域随之增大；加筋土地基受竖向荷载的影响宽度为 $5B$，影响深度为 $2.57B\sim4B$。

(4) $L/B<5$ 时，地基中土体变形、应力分布及格栅变形曲线差异较为明显；但当 $L/B>5$ 时，不同 L/B 工况下土体变形、应力分布及格栅变形曲线基本重合，说明此时加筋土地基受边界效应的影响可忽略不计。

参考文献：

[1] 罗正东，谌灿，董辉，等. 竹筋格栅加筋山区挖填路基承载变形机理研究[J]. 实验力学，2019，34(5)：824－832 (LUO Zhengdong，CHEN Can，DONG Changzi，et al. Study of the bearing deformation mechanism of bamboo tendon grating strengthened subgrade excavation and filling in mountain area[J]. Journal of Experimental Mechanics，2019，34(5)：824－832 (in Chinese))

[2] 杨庆，张克，栾茂田，等. 土工格栅加筋砂土地基性能模型试验研究[J]. 大连理工大学学报，2006，46(3)：390－394 (YANG Qing，ZHANG Ke，LUAN Maotian，et al. Experimental study on performance of geogrid-reinforced sand foundations[J]. Journal of Dalian University of Technology，2006，46(3)：390－394 (in Chinese))

[3] 周健，孔祥利，王孝存. 加筋地基承载力特性及破坏模式的试验研究[J]. 岩土工程学报，2008，30(9)：1265－1269 (ZHOU Jian，KONG Xiangli，WANG Xiaocun. Experimental study on bearing capacity characteristics and failure mode of reinforced foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2008，30(9)：1265－1269 (in Chinese))

[4] 徐超，沈盼盼，胡荣. 土工格栅加筋土地基载荷试验的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报，2014，10(6)：1330－1336 (XU Chao，SHEN Panpan，HU Rong. Numerical simulation of geogrid reinforced soil foundation load test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2014，10(6)：1330－1336 (in Chinese))

[5] Infante D U，Martinez G A，Arrua P，et al. Behavior of rigid circular shallow foundations on geogrid-reinforced sand[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering，2015，20(23)：11647－11664.

[6] Kazi M，Shukla S K，Habibi D. Behaviour of an embedded footing on geotextile-reinforced sand[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement，2015，169(2)：120－133.

[7] Prasad B D，Hariprasad C，Umashankar B. Load-settlement response of square footing on geogrid reinforced layered granular beds[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering，2016，2(4)：36.

[8] 王家全，张亮亮，刘政权，等. 土工格栅加筋砂土地基大模型动载试验研究[J]. 岩土力学，2018，39(10)：3539－3547 (WANG Jiaquan，ZHANG Liangliang，LIU Zhengquan，et al. Large model test on geogrid reinforced sand soil foundation under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(10)：3539－3547 (in Chinese))

[9] WANG J Q，ZHANG L L，XUE J F，et al. Load-settlement response of shallow square footings on geogrid-reinforced sand under cyclic loading[J]. Geotextiles and Geomembranes，2018，46(5)：586－596.

[10] Abu-Farsakh M Y，Gu J，Voyiadjis G，et al. Numerical parametric study of strip footing on reinforced embankment soils[J]. Transportation Research Record，2007，2004(1)：132－140.

[11] Tafreshi S N M，Mehrjardi G T，Ahmadi M. Experimental and numerical investigation on circular footing subjected to incremental cyclic loads[J]. International Journal of Civil Engineering，2011，9(4)：265－274.

[12] 蒋明镜，李磊，孙超. 地基承载力尺寸效应离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2015，43(5)：649－656 (JIANG Mingjing，LI Lei，SUN Chao. Discrete element analysis of size effect of foundation bearing capacity[J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2015，43(5)：649－656 (in Chinese))

[13] 刘鹏，杨光华，范泽，等. 刚性桩复合地基尺寸效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(1)：187－200 (LIU Peng，YANG Guanghua，FAN Ze，et al. Experimental study on size effect of rigid pile composite

foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1):187－200 (in Chinese))

[14] 李胜伟，王铁行，苏立君. 条形荷载下黄土地基沉降基础尺寸效应分析[J]. 地下空间与工程学报，2010，6(3)：636－639 (LI Shengwei, WANG Tiexing, SU Lijun. Analysis of the size effect of settlement foundation of loess foundation under strip load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3):636－639 (in Chinese))

[15] 杨光华，王恩麒. 基础宽度对地基承载力影响的数值分析[J]. 岩土力学，2013，34(S2):383－392 (YANG Guanghua, WANG Enzhen. Numerical analysis of influence of foundation width on bearing capacity of foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2):383－392 (in Chinese))

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50007－2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011 (Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. GB50007－2011 design code for building foundation [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011 (in Chinese))

[17] 张陶陶，张孟喜，侯娟. 基于有限元强度折减法的H-V加筋地基破坏机理[J]. 上海交通大学学报，2011，45(5):757－761 (ZHANG Taotao, ZHANG Mengxi, HOU Juan. Failure mechanism of H-V reinforced foundation based on finite element strength reduction method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5):757－761 (in Chinese))

[18] Ghazavi M, Lavasan A A. Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2008, 26(5):404－415.

[19] 王来贵，张红记，张春会，等. 含水率和围压对安家岭泥岩峰后力学特性影响的试验研究[J]. 实验力学，2016，31(5):683－693 (WANG Laigui, ZHANG Hongji, ZHANG Chunhui, et al. Experimental study on the influence of water content and confining pressure on post-peak mechanical properties of Anjialing mudstone [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016,31 (5):683－693 (in Chinese))

Analysis of boundary effect and bearing capacity for reinforced soil model test

WANG Jiaquan, BAI Lei, LIN Zhinan, TANG Yi

(College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Based on large-scale reinforced soil model tests under indoor square foundations, the ABAQUS finite element software is used to establish a numerical model of reinforced foundations, and the boundary effects on reinforced foundations are further explored. The effects of the model width L and the loading plate width B on the bearing capacity of the reinforced foundation, the internal soil stress and strain and the deformation of the reinforcement are analyzed. The results show that the geogrid reinforcement can significantly improve the uneven settlement and height of the foundation soil. As the distance from the loading plate to the model increases, the ultimate bearing capacity of both reinforced foundation and unreinforced foundation increases. When L/B is greater than 5, the boundary effect hardly influences the reinforced foundation; While when L/B is less than 2.67, it will influence the reinforced foundation significantly. When L/B is greater than 4, the boundary effect hardly influences the unreinforced foundation. The vertical stress distribution area increases with the increase of the loading plate width B. The affected width of the reinforced foundation under vertical load is $5B$, and the affected depth is $2.57B \sim 4B$. When L/B is greater than 5, the soil deformation, stress distribution and grid deformation curves are basically coincident, and the boundary effect on the reinforced foundation can be neglected.

Keywords: reinforced foundation; boundary effect; finite element; the ultimate bearing capacity; influence scope