

# 加筋地基承载特性与参数优化研究

张军, 申俊敏, 牛玺荣

(山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要:** 地基加筋可显著增强土体的抗拉和抗剪强度, 提高土体整体稳定性. 基于离散元法软件 PFC2D, 建立土工格栅加筋地基颗粒流数值模型. 对比分析了基础荷载作用下无筋和加筋 2 种工况下地基基础沉降和地基土位移的变化规律, 并系统分析了加筋长度、加筋深度和加筋层数等加筋地基中重要设计计算参数对地基承载特性的影响. 研究表明: 筋材可有效减小基础沉降, 增加地基承载力, 限制土体竖向和水平位移; 地基最佳加筋长度、加筋深度和加筋层数分别为  $3B$ 、 $0.25B$  和 2 层.

**关键词:** 加筋土; 土工格栅; 承载特性; 参数优化

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2013.05.003

## 0 引言

自上个世纪 80 年代以来, 加筋土技术在我国公路、铁路、水利、城建等领域得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 加筋土技术是针对土体抗拉和抗剪强度较差的缺陷, 在填土过程中铺设土工格栅、土工布、土工格室等加筋材料, 以增强土体的抗拉和抗剪强度, 提高土体稳定性, 具有工期短、施工方便、造价低廉、性能优越等优点, 逐渐成为工程技术人员的首选<sup>[4-5]</sup>.

自 Henri Vidal<sup>[6]</sup> 提出了现代加筋土技术以来, 国内外许多学者对加筋材料进行了相关研究<sup>[7-9]</sup>. 研究表明, 不同筋材布置形式对地基沉降和承载力有决定性影响<sup>[9]</sup>. 同时, 土体属于散体材料, 而传统有限元分析方法<sup>[7-8]</sup> 将土体假设为宏观连续体, 忽视了土体的离散特性, 对加筋土微观机理的分析难以深入. 离散元法充分考虑了材料的散体特性, 允许各单元体间相互分离, 可模拟土颗粒的离散特性, 从而实现对加筋路堤承载特性微观机理进行深入分析.

笔者基于离散元法软件 PFC2D, 建立加筋地基颗粒流数值模型, 对加筋地基中基础荷载—沉降变化规律、地基水平位移和竖向位移等承载特性进行了深入研究. 最后, 对加筋地基设计计算过程中加筋长度、加筋深度以及加筋层数等重要参

数进行了系统分析.

## 1 数值建模与参数选取

### 1.1 模型建立

基于文献[10]室内模型试验, 建立无筋和加筋地基 2 种工况下的颗粒流数值模型, 如图 1 所示. 数值模型尺寸为  $1\ 300\ \text{mm} \times 800\ \text{mm}$ , 格栅长  $400\ \text{mm}$ , 基础宽  $200\ \text{mm}$ . 地基颗粒采用半径为  $3 \sim 9\ \text{mm}$  的圆盘 (Disc) 模拟, 并在自重作用下平衡; 加筋地基工况下建模时将铺设格栅位置处的颗粒删除, 重新生成格栅后再计算至平衡.

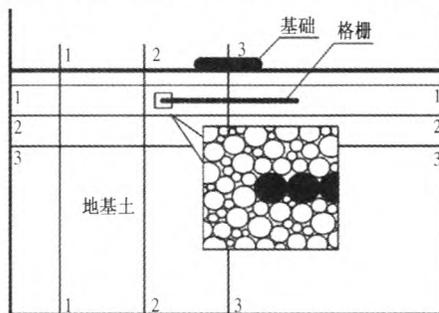


图 1 加筋地基颗粒流数值模型

Fig.1 Numerical model of reinforced soil by PFC2D

### 1.2 材料细观参数的确定

地基土颗粒采用线性接触模型, 通过建立颗粒双轴试验模型确定其细观参数, 使模型土颗粒表现出的宏观性质与表 1 中砂土宏观性质相吻

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-06-20

基金项目: 山西省交通建设科技计划资助项目 (11-2-05)

作者简介: 张军 (1986-), 男, 湖北鄂州人, 山西省交通科学研究院工程师, 博士, 主要从事路基工程及特殊土地基处理的研究, Email: zj\_sxjt@hotmail.com.

合. 双轴试验莫尔圆如图 2 所示,最终砂土细观参数见表 2.

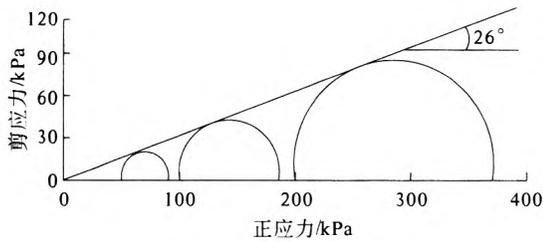


图 2 双轴试验莫尔圆

Fig. 2 Mohr's circle of biaxial test

表 1 地基土基本性能参数

Tab. 1 Performance parameter of ground soil

$G_s$	$d_{50}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$w/\%$
2.7	1.22	5.824	1.094	9.6	28	13

表 2 地基土细观参数

Tab. 2 Mesomechanical parameter of ground soil

颗粒 比重/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	最小 粒径 /mm	最大 粒径 /mm	颗粒 数目	摩擦 系数	法向 刚度 /Pa	切向 刚度 /Pa
2 650	3	9	14 000	0.7	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$

土工格栅的细观参数通过建立土工格栅拉伸试验颗粒流模型模拟确定. 格栅颗粒采用平行连接模型模拟, 根据《公路工程土工合成材料试验规程 (JTG E50—2006)》建立格栅拉伸颗粒流试验模型, 格栅长度为 100 mm, 固定格栅一端, 对另一端第一个颗粒施加 50 mm/min 的恒定向左的速率, 并记录第一个颗粒位移与拉拔力变化规律 (图 3), 得到土工格栅细观参数见表 3.

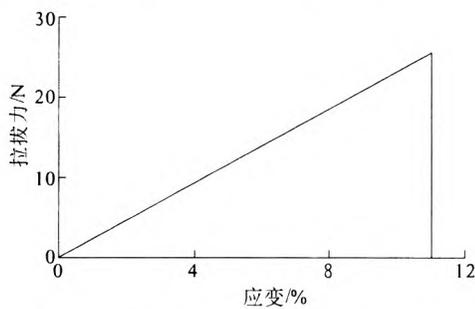


图 3 土工格栅拉伸试验

Fig. 3 Tension test of geogrid

表 3 土工格栅细观参数

Tab. 3 Mesomechanical parameter of geogrid

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	法向粘 结刚度 /MPa	切向粘 结刚度 /MPa	法向粘 结强度 /MPa	切向粘 结强度 /MPa	粘结 半径 /m
1 000	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	900	900	1.0

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 荷载—竖向位移曲线

图 4 为无筋与加筋 2 种工况下基础  $p-s$  曲线. 加载初期, 无筋和加筋两种工况基础  $p-s$  曲线基本一致, 当基础荷载超过 100 kPa 后, 无筋工况下曲线斜率逐渐增大, 而加筋工况下曲线斜率变化相对平稳, 且两工况下沉降差值随着荷载的增加逐渐增大; 当基础荷载增加至 200 kPa 时, 加筋工况下基础沉降比无筋工况减小了 53.4%. 承载力方面, 在沉降量同为 50 mm 情况下, 加筋工况承载力比无筋工况提高了 47.1%. 可以看出加筋地基能够明显减小基础沉降, 提高地基承载力, 基础荷载越大, 加筋效果越明显.

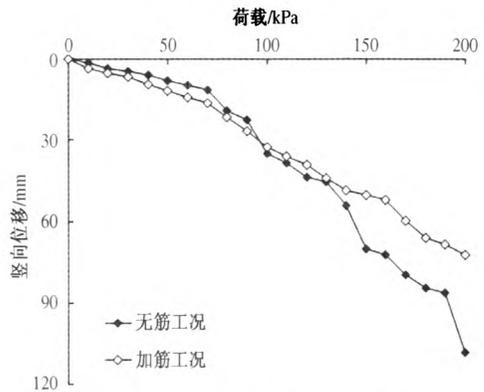


图 4 PFC2D 模拟基础  $p-s$  曲线

Fig. 4  $p-s$  curve of foundation in numerical modeling

### 2.2 地基水平位移

图 5 为 150 kPa 荷载作用下无筋和加筋 2 种工况下不同竖直断面水平位移曲线. 总体而言, 随着深度的增加, 2 种工况下水平位移逐渐减小; 随着距基础中心 (3-3 断面) 距离的增大, 2 种工况下水平位移呈先增大后减小的趋势; 加筋工况下水平位移量均比无筋工况要小, 以 2-2 断面为例, 加筋工况下地基浅层水平位移量比无筋工况减小了 61.3%, 可以看出加筋可有效减小地基的水平位移.

### 2.3 地基竖向位移

图 6 为 150 kPa 荷载作用下无筋和加筋 2 种工况下不同水平断面竖向位移曲线. 2 种工况下竖向位移均随着深度的增加而减小, 在相同位置加筋工况下竖向位移比无筋工况要小, 以 1-1 断面为例, 加筋工况下最大位移量比无筋工况减小了 48.3%; 在同一水平断面, 随着距基础中心距离增大, 地基竖向位移逐渐减小. 同时, 无筋工况下 1-1 断面的竖向位移出现正值, 即在 1-1 断

面部分土体颗粒发生向上的位移,在宏观上表现为地表隆起现象,而加筋工况下未出现该现象.可以看出地基加筋可有效增强受荷下方地基与周围地基的整体性,有效约束了基础周围地基的隆起现象.

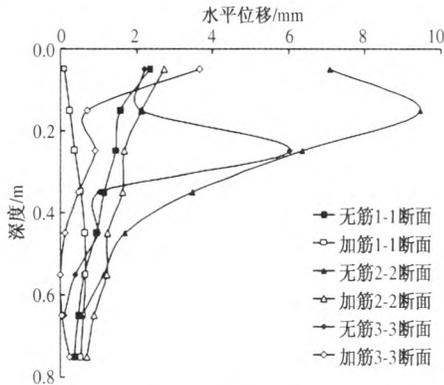


图5 不同竖直断面水平位移曲线  
Fig. 5 Lateral displacement under different vertical sections

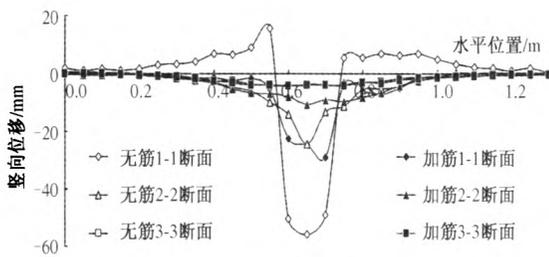


图6 不同水平断面竖向位移曲线  
Fig. 6 Vertical displacement under different horizontal sections

### 3 参数分析

基于上述颗粒流数值模型,通过改变影响加筋地基设计计算中加筋长度、加筋深度和加筋层数等重要设计参数(表4),模拟不同加筋工况条件,探讨加筋地基作用机理与各重要设计参数之间的相互关系.为使计算分析过程具有可比性,当对某一重要参数进行分析时,数值模型中其他参数保持不变.

表4 数值模型中参数选取

Tab. 4 Selected parameters in numerical model

设计参数	参数取值
加筋长度/m	1B, 2B*, 3B, 4B
加筋深度/m	0.25B, 0.5B*, 0.75B, 1B, 2B
加筋层数/N	1*, 2, 3, 4, 5

注: \* 基本模型中参数取值; B 为基础宽度.

#### 3.1 加筋长度的影响

不同加筋长度工况下 1-1 竖直断面水平位移曲线如图 7 所示. 总体而言在同一深度处地基水平位移均随着加筋长度的增加而减小,但减幅逐渐减小;加筋长度超过 2B 后,加筋长度继续增加,地基浅层水平位移的变化不明显,而深层水平位移变化仍然较大. 加筋长度超过 3B 后,加筋长度对地基浅层和深层水平位移的影响较小.

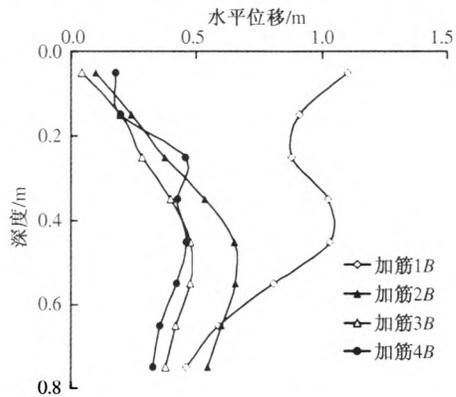


图7 不同加筋长度工况下 1-1 竖直断面水平位移曲线

Fig. 7 Lateral displacement of 1-1 vertical section under different reinforced lengths

图 8 为不同加筋长度工况下 1-1 水平断面的竖向位移变化曲线. 在相同水平位置处,竖向位移均随着加筋长度的增加而减小,但减幅逐渐减小;加筋长度超过 2B 后,加筋长度继续增加,竖向位移改变量不明显. 综上所述,可以看出当筋材长度为基础宽度的 3 倍时加筋效果最好.

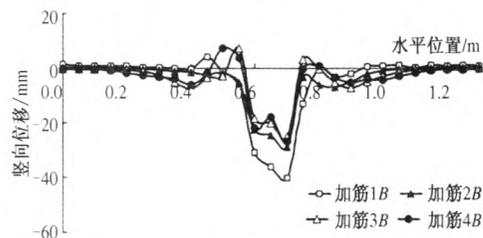


图8 不同加筋长度工况下 1-1 水平断面竖向位移曲线

Fig. 8 Vertical displacement of 1-1 horizontal section under different reinforced lengths

#### 3.2 加筋深度的影响

不同加筋深度工况下 1-1 竖直断面水平位移变化曲线如图 9 所示. 总体而言,随着加筋深度的增加,同一深度处地基颗粒的水平位移量逐渐增大;加筋深度越深,地基浅层水平位移越大,而加筋深度对地基深层水平位移影响不大.

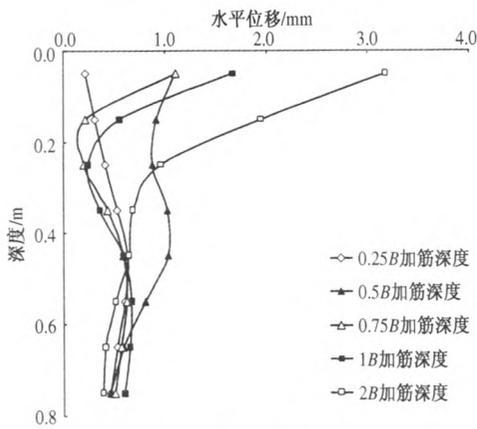


图 9 不同加筋深度工况下 1-1 竖直断面水平位移曲线

Fig.9 Lateral displacement of 1-1 vertical section under different reinforced depths

图 10 为不同加筋长度工况下 1-1 水平断面的竖向位移曲线. 总体而言,随着加筋深度的增加,相同水平位置处竖向位移逐渐增大,加筋深度  $0.25B$  工况下加筋效果最显著,当加筋深度超过  $0.75B$  后,地基加筋效果不明显.

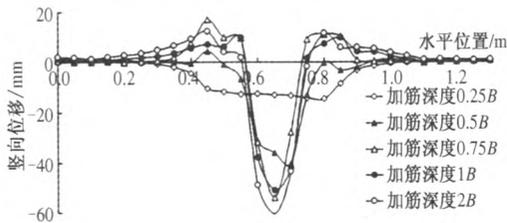


图 10 不同加筋深度工况下 1-1 水平断面竖向位移曲线

Fig.10 Vertical displacement of 1-1 horizontal section under different reinforced depths

### 3.3 加筋层数的影响

不同加筋层数工况下 1-1 竖直断面水平位移曲线如图 11 所示. 总体而言,随着加筋层数的增加,同一深度处地基颗粒水平位移逐渐减小,且减幅逐渐减小;加筋层数超过 2 层后,加筋长度继续增加,地基各深度处水平位移变化不大.

图 12 为不同加筋层数工况下 1-1 水平断面竖向位移曲线. 总体而言,随着加筋层数的增加,相同水平位置处地基颗粒竖向位移逐渐减小,且减幅呈递减趋势;加筋层数超过 2 层后,加筋层数继续增加,竖向位移的改变量不明显.

## 4 结论

采用 PFC2D 离散元法软件,通过双轴试验和格栅拉伸试验确定了土颗粒和土工格栅参数,建立

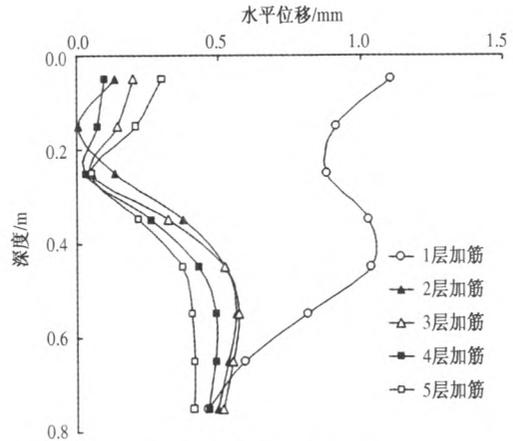


图 11 不同加筋深度工况下 1-1 水平断面竖向位移曲线

Fig.11 Lateral displacement of 1-1 vertical section under different reinforced layers

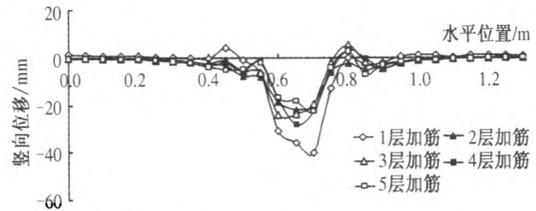


图 12 不同加筋层数工况下 1-1 水平断面竖向位移曲线

Fig.12 Vertical displacement of 1-1 horizontal section under different reinforced layers

了加筋地基颗粒流数值模型. 对比分析了无筋和加筋两种工况下基础  $p-s$  曲线,地基水平位移和竖向位移等重要指标,并对加筋长度、加筋深度和加筋层数等重要设计参数进行了参数分析,得出了以下结论:

- (1) 地基加筋可有效减小基础沉降,提高地基承载力,且基础荷载越大,加筋效果越明显;
- (2) 地基加筋对地基土体颗粒竖向和水平位移,特别是对地基浅层竖向和水平向位移约束作用明显;
- (3) 地基最佳加筋长度、加筋深度和加筋层数分别为  $3B$ 、 $0.25B$  和 2 层.

### 参考文献:

[1] 李广信. 从息壤到土工合成材料[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 144-149.  
 [2] 张桂荣, 赵波, 饶志刚, 等. 土质岸坡生态防治技术研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2012, 33(5): 87-91.  
 [3] 孙向前. 土工格栅在道路拓宽改造工程中的应用[J]. 山西交通科技, 2000, 132(2): 20-21, 25.

- [4] LIU H B, WANG X, SONG E X. Long-term behavior of GRS retaining walls with marginal backfill soils [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(4): 295 - 307.
- [5] 黄仙芝. 加筋地基土压力测试与机理分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1691 - 1694.
- [6] 刘柱, 潘发安, 朱湘, 等. 土工格栅与土工室格加筋机理比较[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27(5): 567 - 569.
- [7] YETIMOGLU T, WU J T H, SAGLAMER A. Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2083 - 2099.
- [8] LIU H B. Long-term lateral displacement of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012(32): 18 - 27.
- [9] 周健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] 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.

### Study on Bearing Characteristics and Parameter Optimization of Reinforced Ground Soil

ZHANG Jun, SHEN Jun-min, NIU Xi-rong

(Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Geogrid can improve the tensile strength, shear strength and overall stability significantly when it is used as reinforcement for ground. Based on the discrete element method software PFC2D, a numerical model is established to study the geogrid reinforced soil. Compared with unreinforced soil, the following studies are performed: the settlement of foundation and the lateral and vertical displacement distribution of soil with depth. Then, a parametric study is carried out to investigate the bearing capacity of foundation and the selected influencing factors consist of the reinforced length, reinforced depth and the number of reinforced layers. The results show that the geogrid can reduce the foundation settlement and improve the bearing capacity. It can restrict the ground horizontal and vertical displacement effectively. The optimal parameters of reinforced length, reinforced depth and reinforced layers are  $3B$ ,  $0.25B$  and 2 layers respectively.

**Key words:** reinforced soil; geogrid; bearing characteristics; parameter optimization