

文章编号:1671-6833(2016)01-0049-05

基于离散-连续耦合方法的土工格室加筋碎石 承载能力数值模拟

汪海年^{1,2},张 然¹,周 俊¹,刘 玉¹,尤占平^{1,3}

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交通力建设股份有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 密歇根理工大学 土木工程与环境学院, 美国 霍顿 49931)

摘 要: 土工格室加筋碎石基层材料具有较强的适应路基变形能力,然而其承载能力与变形机理并不明确.通过采用离散-连续耦合的算法分别对格室高度为100、150、200 mm;格室焊矩为400、600、800 mm的9种土工格室加筋碎石基层复合结构与无格室碎石基层复合结构在加载过程中的力学性能进行数值计算,并对土工格室结构弹性模量进行对比分析.研究表明:对碎石采用土工格室加筋处理后,路基承载能力得到了较大的提高,土工格室结构层弹性模量提高比例最大为38.61%;格室高度一定的情况下,土工格室结构层的承载能力随着格室焊距的减小而增强;在格室焊距一定的情况下,土工格室结构层的承载能力随着格室高度的增大相应提高;型号为400~200 mm的土工格室结构层,竖向变形大的区域占整个下承层顶面面积的17.36%,且分布较均匀,加筋效果最好.

关键词: 道路工程;土工格室;加筋结构;承载能力;数值模拟

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.201410012

0 引言

川藏公路南线路基受水分和季节性冻融等因素的影响比较显著,易使道路发生结构性的破坏^[1].目前土工格室的加固对象多为土体颗粒^[2-4],对级配碎石层进行加固,构成的复合整体直接作为路面结构层使用的相关应用鲜见报道.柔性基层(级配碎石)能够适应路基产生的大变形,但柔性基层的路面结构使面层层底产生较大的拉应力^[5].采用土工格室对级配碎石层进行加固,可以抵消一部分拉应力,起到侧向约束作用^[6-7].因此,在路面结构中设置级配碎石层,并采用土工格室对碎石进行加筋处理,对于土工格室的工程应用有很大的实际意义.在以上研究基础上,本研究提出在路面结构中应用土工格室来降低路基不均匀变形对路面结构产生的影响.

离散元方法在对散体材料进行研究时存在明显的优势^[8].但是需要数目庞大的颗粒单元,且受制于目前计算机的发展水平,研究无法实

现^[9].而能够发挥离散元与有限差分法各自优势的离散-连续耦合的方法,已成为目前工程界研究的热点课题^[9-10].

目前,国内研究者采用的离散元方法多运用二维程序,不能真实地反映土工合成材料与填料间的力学行为^[11-13].因此,采用三维颗粒程序PFC3D结合有限差分软件FLAC3D,对土工格室加固碎石的作用机理进行分析,既能与实际更加吻合,又可节约计算资源.

1 离散-连续耦合的分析方法

1.1 土工格室加筋碎石基层复合结构模型

采用PFC3D建立土工格室结构层和保护层的模型,同时采用FLAC3D建立下承层的模型,其模型示意如图1所示^[14].

1.2 离散-连续耦合计算思路

本文中的离散-连续耦合算法通过考虑交界面处PFC3D中的墙体单元与FLAC3D中的连续有限单元的相互接触位移作用实现.在计

收稿日期:2014-10-10;修订日期:2014-12-01

基金项目:交通运输部科技资助项目(201231879210);国家科技支撑计划课题资助项目(2014BAG05B04);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2012ZD013)

作者简介:汪海年(1977—),男,江苏涟水人,长安大学教授,博士,主要从事路面结构与材料性能及道路工程数值仿真研究,E-mail: wanghainian@aliyun.com.

引用本文:汪海年,张然,周俊,等.基于离散-连续耦合方法的土工格室加筋碎石承载能力数值模拟[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(1):49-53.

算过程中交界面处的信息,在 FLAC3D 和 PFC3D 模型中来回交互,通过多次耦合完成数值模型的计算.数据按照二进制方式传递,以保证数据传输的准确性.

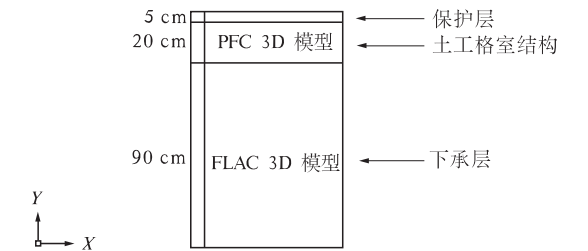


图 1 数值模型结构

Fig. 1 Numerical model structure

2 土工格室加筋碎石复合结构数值计算模型的建立

2.1 土工格室加筋碎石复合结构数值计算模型

土工格室模型采用规则排列的球体单元建立,如图 2 所示.下承层三维计算模型下承层采用 FLAC3D 建立,计算模型高为 0.9 m,长和宽都为 0.6 m,三维计算模型如图 3 所示.

2.2 材料模型参数

土工格室 PFC3D 模型中颗粒单元的微观参数以及下承层模型物理力学参数取值如表 1 所示.

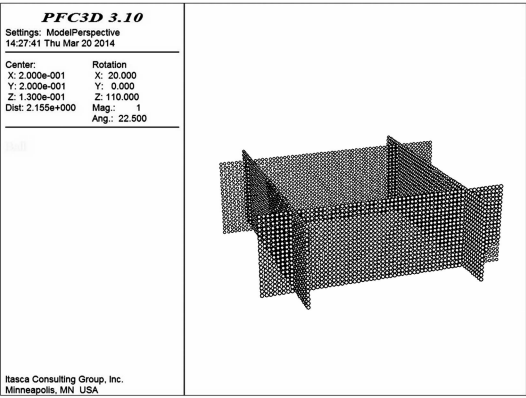


图 2 土工格室模型

Fig. 2 The model of the geocell

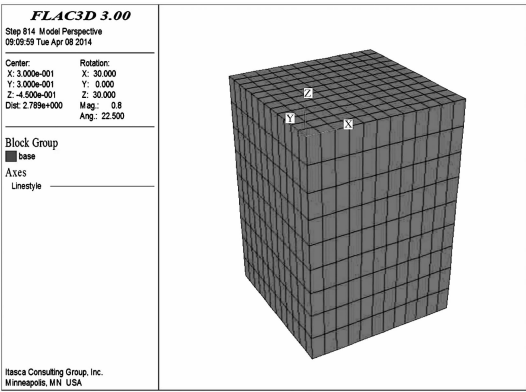


图 3 下承层土基模型

Fig. 3 The model of soil base on the bearing layer

表 1 材料模型参数

Tab. 1 Material model parameters

PFC3D 模型参数					FLAC3D 模型参数				
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	颗粒半径 r/cm	刚度比	黏结刚 度比	摩擦系 数 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$	体积模量 K/Pa	剪切模量 G/Pa
1 600	0.5	1	10	0.5	2 100	25.4	15	$3.3\text{E}+07$	$1.1\text{E}+07$

3 土工格室加筋碎石结构的耦合分析

3.1 格室焊距对加筋效果的影响

土工格室焊距有 400、600、800 mm3 种,格室高度为 100、150、200 mm.加载位置为格室中孔正上方,逐级加载,最大荷载为 1.1 MPa.当达到最大荷载时,继续对土工格室保护层模型进行加载.虚拟加载过程中不同土工格室加筋碎石结构层的应力-应变曲线如图 4 所示.由图 4 可以看出,在加载前期由于荷载逐级增大,土工格室结构层的应力与应变同时增大,此时的结构层处于弹性变形阶段.在加载后期,荷载维持在 1.1 MPa 的水平,此时应力不再增加,应变缓慢的增长,结构层表现出塑性变形的特性.为了更精确地分析不同

焊矩对土工格室承载能力的影响,从图 4 中统一选取弹性区间内应变为 2‰,计算得到结构层的弹性模量,利用这一指标来表征各结构层的承载能力.

在同一高度下,对不同焊矩的土工格室结构层的弹性模量进行比较,如图 5 所示.由图 5 可以看出,碎石结构层采用土工格室进行加筋之后,构成的复合结构的弹性模量均有显著提高.土工格室结构层弹性模量的提高比例最小为 15.91%,最大为 38.61%.在同一高度条件下,随着格室焊距的减小,其弹性模量逐渐提高,结构层的承载能力也随之提高.焊矩为 400 mm 时,弹性模量提高百分比最大,分别为 23.12%、30.54%、38.61%.

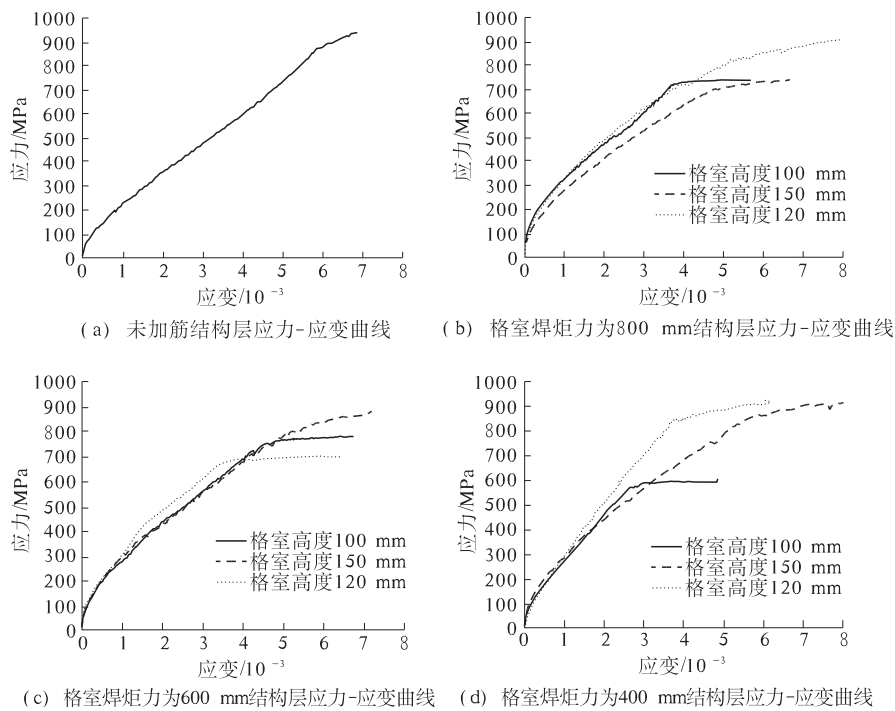


图 4 不同焊炬结构层应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curve of structure layer in different welding torch

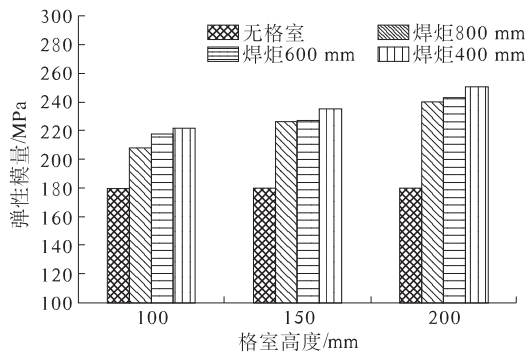


图 5 相同高度结构层的弹性模量

Fig. 5 The elasticity modulus of structure layer with the same height

数值模拟验证:室内采用承载板试验,取土工格室高度为 150 mm 时的室内试验数据与数值模拟计算数据进行对比,如表 2 所示.由表 2 可知,室内试验、数值模拟两者采用土工格室进行加筋后,碎石结构层的弹性模量均有显著的提高,结构层的弹性模量都是随着焊距的增大逐渐降低,弹性模量误差分别为 4.90%、5.29%、4.24%,误差较小.因此该数值模拟计算的结果是可靠的.

3.2 格室高度对加筋效果的影响

对焊距相同条件下,格室高度不同的土工格室结构层的弹性模量进行比较分析,如图 6 所示.

表 2 室内试验与数值计算弹性模量对比

Tab.2 The contrast of elasticity modulus between lab testing and numerical calculation

格室焊炬/mm		弹性模量/MPa		提高百分比/%	
室内试验	数值模拟	室内试验	数值模拟	室内试验	数值模拟
无格室	无格室	205	180	—	—
400	400	247	234.9	20.5	30.54
600	600	240	227.3	17.1	26.3
800	800	236	226	15.1	25.84

从图 6 中可以看出,与未加筋结构层的弹性模量相比,对碎石进行土工格室加筋后,结构层的弹性模量明显提高,提高量最小为 15.91%,最大为 38.61%.在格室焊距相同时,随着格室高度的增加,且土工格室结构层的弹性模量值得到了显

著的提高,土工格室结构层的承载能力也随之提高.当格室高度为 200 mm 时,弹性模量提高最大,分别为 38.61%、31.67%、35.42%.这说明,在同一焊距条件下,土工格室的承载能力随着格室高度的增加而增强.

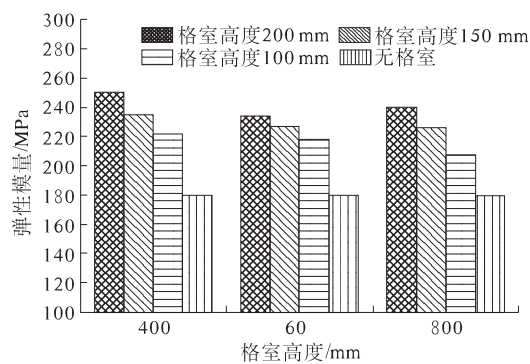


图 6 相同焊距结构层的弹性模量

Fig. 6 The elasticity modulus of structure layer with the same welding torch

3.3 下承层竖向变形分析

为了比较不同型号的加筋结构层对下承层竖向变形的影响,笔者选取了 400 ~ 200 mm、600 ~ 200 mm、800 ~ 200 mm 的加筋结构层与未加筋的结构层的 FLAC3D 的下承层模型的竖向位移进行了对比.将不同的变形范围的区域面积所占下承层顶面面积的比例进行统计,其结果如表 3 所示.

表 3 不同加筋结构下承层竖向变形统计表

Tab. 3 The statistics of the vertical deformation on the bearing layer with different reinforcement structure

土工格室结构层型号	不同变形范围的区域占下承层顶面面积的比例/%					
	>8 mm	8 ~ 7 mm	7 ~ 6 mm	6 ~ 5 mm	5 mm	以下
无格室	2.8	17.36	19.44	24.31	36.09	
800 ~ 200	—	20.14	25	24.31	30.55	
600 ~ 200	—	9.7	11.1	6.9	72.3	
400 ~ 200	—	—	17.36	10.4	72.24	

从表 3 中可以发现,对未加筋的结构层施加完荷载后,下承层竖向变形量大于 8 mm 的范围占整个下承层顶面面积的 2.8%,且变形大的区域主要集中在加载位置的正下方.对碎石采用土工格室加筋处理且加载完成后,下承层的竖向位移明显降低,其中采用型号为 400 ~ 200 mm 的土工格室结构层的加筋效果最好,竖向变形大的区域占整个下承层顶面面积的 17.36%,且分布较均匀.出现这种情况主要是因为:采用土工格室对碎石层进行加筋处理后,土工格室加筋结构的网兜效应与梁板效应的作用开始体现.

4 结论

1)对碎石采用土工格室加筋处理后,路基承载能力得到了很大的提高.土工格室结构层弹性模量提高比例最大为 38.61%.

2)在格室高度一定的情况下,随着格室焊距的减小,土工格室结构层的承载能力增强.

3)在格室焊距一定的情况下,随着格室高度的增大,土工格室结构层的承载能力相应提高.

4)型号为 400 ~ 200mm 的土工格室结构层竖向变形大的区域占整个下承层顶面面积的 17.36%,且分布较均匀,加筋效果最好.

笔者所模拟的级配碎石为单一级配,下一步将对不同级配、不同公称最大粒径碎石的加筋效果进行分析计算,同时采用定量方法分析加筋结构层力链分布,考虑加筋结构与路面结构的耦合受力分析,对加筋碎石结构层施工性能与长期性能也有待进一步验证.

参考文献:

[1] 钟勇强,黄晓明,廖公云,等.融沉变形对柔性路面应力应变影响试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(1):181-185.

[2] 赵明华,刘猛,龙军,等.双向增强复合地基土工格室加筋体变形分析[J].中国公路学报,2014,27(5):97-105.

[3] 王广月,王杏花,魏金祥.土工格室坡面侵蚀特性[J].应用基础与工程学报,2013,21(2):249-257.

[4] 王广月,韩燕,王杏花.降雨条件下土工格室柔性护坡的稳定性分析[J].岩土力学,2012,33(10):3020-3024.

[5] 陈静云,任瑞波,李玉华,等.沥青路面柔性基层和半刚性基层模量理论研究[J].大连理工大学学报,2004,44(4):536-538.

[6] BIAN X C, SONG G, CHEN Y M. Deformation behaviors of geocell reinforcement in pasternak ground[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(5):147-155.

[7] DASH S K. Effect of geocell type on load-carrying mechanisms of geocell-reinforced sand foundations[J]. International journal of geomechanics, 2012, 12(5):537-548.

[8] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modeling of deep penetration in granular soils[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2006, 30(4):335-361.

[9] 周健,黄金,张姣,等.基于三维离散-连续耦合方法的分层介质中桩端刺入数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012(12):2564-2571.

[10] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2004, 41(8):1329-1364.

[11] 周健,王家全,孔详利,等. 砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J]. 岩土工程学报,2010(1):61-67.

[12] 郭书魁. 竖向加筋砂土直剪试验的颗粒流数值分析[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院,2013.

[13] 陈建峰,李辉利,柳军修,等. 土工格栅与砂土的细观界面特性研究[J]. 岩土力学,2011,32(S):66-71.

[14] 马晋. 土工格室加固碎石基层承载能力试验研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2013.

Numerical Simulation of the Bearing Capacity for Geocell Reinforced Gravel
Based on Discrete-Continuous Coupling Calculation

WANG Hainian^{1,2}, ZHANG Ran¹, ZHOU Jun¹, LIU Yu¹, YOU Zhanping^{1,3}

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Traffic in The Power Construction Co., LTD, Xi'an 710064, China; 3. School of Civil Engineering and Environment, Polytechnic University of Michigan, Horton 49931, America)

Abstract: The base material of geocell reinforced gravel has strong ability to adapt to the deformation of the subgrade, but its bearing capacity and deformation mechanism not clear. The discrete-continuous coupling calculation was used to calculate the mechanical properties of different geocell reinforced gravel composite structure and the composite structure in which the geocell was not set up in the process of loading. The geocells include 9 kinds whose height is 100mm, 150mm and 200mm, whose welding torch is 400 mm, 600 mm and 800 mm. Then the elasticity modulus of the bearing layer is analyzed. The results indicated that the bearing capacity of the subgrade got an obvious improvement after gravel was enforced by the geocell. Elasticity modulus of structure layer increased by 38.61%. When the height of the geocell is fixed, with the decreasing of the geocell welding torch, the loading capacity of geocell structural layer is increasing. When the geocell welding torch is fixed, with the increasing of the geocell height, the loading capacity of geocell structural layer is accordingly increasing. The geocell model of 400-200mm, which big vertical displacement accounted for 17.36% of whole bearing layer area, evenly distributed, and the best reinforced.

Key words: road engineering; geocell; reinforced structure; bearing capacity; numerical modeling