

DOI: 10.11779/CJGE2015S1006

单个高强土工格室作用机理的有限元分析

侯娟¹, 张孟喜², 韩晓², 李荣¹

(1. 上海大学理学院, 上海 200444; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 建立了方形基础下单个高强土工格室加筋地基和未加筋地基的有限元模型, 通过对比分析未加筋地基和单个高强土工格室加筋地基中的水平位移分布、水平压力分布、格室-土界面的相互作用以及格室壁上的压力和摩擦力分布等, 研究了单个高强土工格室对土体的作用机理。发现高强土工格室中除了对土体有侧壁的摩擦作用外, 还对其内部的砂土有较大环箍作用, 在这两个主要作用之下, 高强土工格室能有效地限制其内砂土的水平向运动, 阻隔砂土间内力的传递, 进而提高地基的承载力。

关键词: 高强土工格室; 地基; 加固机理; 有限元法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0026-05

作者简介: 侯娟(1975-), 女, 讲师、硕士生导师, 从事土工合成材料和加筋土方面的教学和科研工作。E-mail: juanhou@staff.shu.edu.cn。

Mechanism of a high-strength geocell using FEM

HOU Juan¹, ZHANG Meng-xi², HAN Xiao², LI Rong¹

(1. College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The comprehensive results from FEM on square footings supported on high-strength geocell and unreinforced sand beds are introduced. The stress distribution, displacement distribution and friction on the surface of a high-strength geocell-reinforced foundation are studied. The results show that the high-strength geocell reinforcement system behaves much stiffer and carries greater loading than the equivalent unreinforced system does. Beside the friction of geocell, the height of geocell keeps the sand from being displaced under the applied load and redistributes the surcharge over a wider area, thereby it increases the shear strength of the composite system, which in turn substantially improves the bearing capacity of a sand bed.

Key words: high-strength geocell; foundation; reinforcement mechanism; FEM

0 引言

土工格室在国内外使用广泛^[1], 其最大的优点是可以处理岩土工程中常规方法难以处理的多种疑难问题, 如桥头跳车、软基沉陷、翻浆等^[2]。郑刚等人^[3]尤其提出, 土工格室在均化动应力峰值、减小动应力沿深度的传递、降低基床下部承受的动应力水平等方面效果明显。国内外学者对土工格室展开了深入而广泛的研究^[4-6]。Sireesh等^[7]通过一系列的模型试验研究表明, 土工格室能明显地提高地基承载力并减小沉降。Tafreshi等^[8]比较研究了较小沉降量下二维土工材料和三维格室的受力性能, 结果显示同等条件下, 格室加筋地基刚度更大, 承载性能更好。边学成等人^[9]建立了可以考虑路基填料和地基土体剪切相互作用的土工格室加筋体简化分析模型。赵明华等人^[10]的研究表明, 土工格室的加入使得碎石基层具有半刚性基层的作用与功能。

高强土工格室是近年来我国自主研发的一种新型土工材料。是在普通格室的基础上, 保留其结构优势, 针对普通格室抗拉强度低、延伸率大、过于柔软、施工不方便等缺点, 提高了抗拉强度, 降低了延伸率, 增强了格室刚度。在工程应用中, 利用高强格室的刚性特征, 可以实现机械化施工, 改变普通格室施工现场铺筑时人工填筑格室的被动做法, 能有效解决施工单位工期紧、填筑人力缺等的矛盾。因此目前在交通部行业标准中已将土工格室分为塑料土工格室和增强土工格室两大类处理。

李广信^[11]提出, 加筋土工程设计的本质问题是对加筋土机理的认识问题。遗憾的是, 由于高强土工格室是一种新型的土工合成材料, 其三维作用机理比较

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202215, 41372280)

收稿日期: 2015-03-26

复杂, 因此目前的研究还远远滞后于工程实践, 比较常见的主要是高强土工格室的施工技术^[12], 相关作用机理及计算理论的文献比较鲜见。因此, 非常有必要展开对高强土工格室作用机理的研究。而对于材料复杂力学性能的研究, 需要理论和实验相结合, 并辅以数值方法进行模拟^[13]。本文在前期模型试验对高强土工格室研究的基础上^[14], 利用有限元模拟静力作用下单个高强土工格室加筋地基的问题, 分析了加筋前后砂土在格室处水平应力的变化规律、水平位移的变化规律、格室与填料之间的相互作用以及格室侧壁上的应力分布等, 揭示了高强土工格室的环箍及摩擦等作用机理。

1 模型试验简介

已完成的模型试验模拟了正方形基础在静载加压条件下直接作用在砂土地基表面的情况。试验所用模型箱尺寸为 $140\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 110\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)。所用正方形基础尺寸为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ (边长 \times 边长)。试验所用高强土工格室为仪征市佳和土工材料有限公司生产的钢钉插接整体式土工格室。格室的网带材质为聚丙烯, 网带纵向抗拉强度 $\geq 244\text{ MPa}$, 比普通的土工格室高 10 倍左右, 网带厚度为 0.045 cm , 格室高度为 5 cm , 格室边长为 20 cm , 布置于离地基表面 $0.33B$ (B 为地基宽度) 处。试验所用填料为砂土。经过筛分试验、比重试验、含水率试验、三轴试验等室内土工试验测得的颗粒级配及物理性质指标分别见表 1 和表 2。试验工况和详细结果参见文献[14]。

表 1 砂土的颗粒级配

Table 1 Grain-size distribution of sand

粒径 /mm	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
组成/%	2.42	9.68	20.43	26.47	31.12	9.88

表 2 砂土的物理特性参数

Table 2 Physical parameters of sand

比重 G_s	含水率 $w/\%$	内摩擦角 $(^\circ)$
2.63	0.13	35.43

2 单个高强土工格室加筋机理分析

2.1 土工格室本构模型及模拟

将格室片材在 CTM8050 微机控制电子万能材料试验机上进行拉伸试验, 得到高强土工格室片材的应力应变曲线如图 1 所示。从图中可以看出: 在应变较小情况下 ($<8\%$), 高强土工格室片材的应力-应变曲线呈直线状态。而在土工格室加筋地基模型的试验中发现, 极限荷载作用下格室所产生的最大拉应变只有

5% ^[14]。因此, 在有限元模拟中, 可以将土工格室片材视为正交各向同性的线弹性材料。即可以通过胡克定律利用两个材料常数 E (弹性模量) 和 ν (泊松比) 来描述其应力应变关系。有限元模拟中, 格室采用线弹性的基于连续体的实体壳单元 SC8R 模拟。

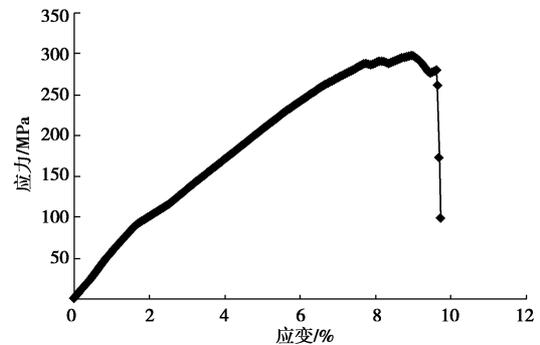


图 1 高强土工格室应力-应变曲线

Fig. 1 Strain-stress curve of a high-strength geocell

2.2 土体模拟

土体视为宏观均匀的各向同性材料, 只能受压, 不能受拉, 采用八节点三维等参单元 C3D8R 模拟, 并遵从扩展的 Drucker-Prager 准则。

2.3 格室-砂土接触面

模型试验表明, 高强格室材料性质与砂土材料性质相差很大, 在一定受力条件下两种材料在接触面上产生滑移错动。因此, 高强土工格室与土体之间的相互作用利用 ABAQUS 程序提供的 Goodman 接触面单元模拟。由于格室刚度远大于土体, 因此选格室表面为主面, 砂土表面为从面。在格室-土界面上采用库仑摩擦模型。假定筋材与砂土接触后不再分离, 但允许相对滑移。通过拉拔试验确定筋土界面摩擦系数为 0.8。砂土和格室模拟采用的系数汇总如表 3 和 4 所示。

表 3 砂土模型参数

Table 3 Parameters of sand model

密度 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/kPa	ν	内摩擦角 $(^\circ)$	黏聚力 $/\text{kPa}$	力学模型
1810	3×10^3	0.42	35	0	D-P 模型

表 4 筋材模型参数

Table 4 Parameters of reinforcement model

密度 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $/\text{kPa}$	泊松比	格室厚度 $/\text{mm}$	力学模型
1800	3×10^6	0.30	0.45 ± 0.1	线弹性

2.4 数值模拟过程

(1) 分级施加荷载: 为了模拟方形基础作用, 在地基表面中心施加面积 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的均布荷载, 从 100 kPa 到 600 kPa , 按每级 100 kPa 分级加载。

(2) 设置模型的边界条件: 三维建模时, y 轴为沉降方向, x 、 z 轴为水平位移方向, 底部边界设置为全约束, 既同时约束 x 、 y 、 z 方向的变形; 四个侧面边界设置只约束 x 、 z 方向的变形, y 方向变形自由。

(3) 初始应力平衡: 因初始应力场(由自重产生)对法向应力有较大的影响, 所以在分析附加荷载对地基的作用之前, 首先考虑自重应力场作用, 即将其作为分析附加荷载作用时的初始条件。在对加筋地基进行力学计算前, 首先模拟完成原始地基的固结沉降, 生成初始的应力状态, 在初始应力达到平衡时, 进行位移归零, 即代表地基土体在自重作用下发生的沉降已经完成。然后就可以计算只考虑荷载作用下加筋地基受力。在地基应力平衡后, 加上荷载所得沉降即为工后沉降。

3 模拟结果及分析

3.1 水平位移

图 2 所示为未加筋地基和单个土工格室加筋地基在 300 kPa 作用下的水平位移云图。可以看出, 在相同荷载作用下, 未加筋地基产生的总体水平位移与单个土工格室加筋地基的比较接近。但比较发现, 在布置格室的位置(如图中加粗方框所示), 未加筋地基的砂土最大水平位移达到 3.274 mm, 而加筋地基的砂土最大水平位移仅为 2.492 mm, 减小了 30%。表明格室内砂土的水平位移受到了明显的限制。

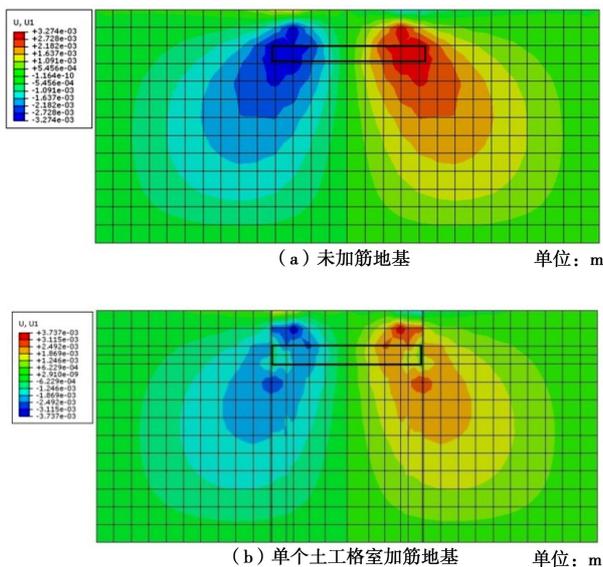


图 2 地基的水平位移云图比较 ($p=300$ kPa)

Fig. 2 Contours of lateral displacement ($p=300$ kPa)

3.2 水平压力

未加筋地基和单个土工格室加筋地基的水平应力云图如图 3 所示。可以看出, 由于格室的侧向限制, 加筋地基所能承受的水平应力要明显大于未加筋地

基。尤其在布置格室位置处(如图中加粗方框所示), 其最大水平应力为未加筋地基相同位置处的 2.5 倍, 说明土工格室对水平应力有明显的限制作用。此外, 可以看出格室内外侧水平应力有一个突变, 说明格室对砂土起到了明显地阻隔作用。

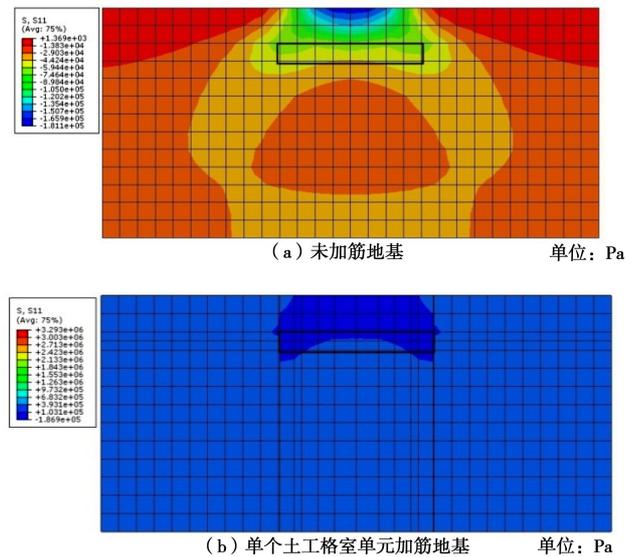


图 3 地基的水平应力云图 ($p=300$ kPa)

Fig. 3 Contours of lateral stress ($p=300$ kPa)

3.3 格室作用机理

(1) 接触面上摩擦力

沿格室建立坐标系如图 4 所示, 其中阴影部分表示单个土工格室某一个边长的片材。

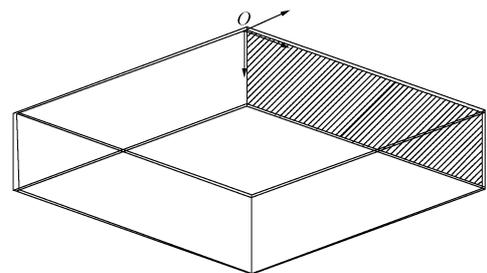


图 4 土工格室单元示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a high-strength geocell

图 5 所示为筋土接触面摩擦力分布云图, 图中摩擦力在格室外侧向上为正, 向下为负, 内侧则正好相反。由图可见筋土界面上的摩擦力向上, 说明格室在地基中起到了减小竖向应力的作用。其值沿侧壁高度成上小下大的趋势, 说明随着格室深度的增加, 筋土的摩擦作用趋于明显。

(2) 接触面上法向压力

图 6 所示为筋土接触面压力分布云图。从图中可以看出, 格室内侧的接触压力要大于格室外侧的接触压力。格室内侧, 节点处的接触压力要大于节点之间

片材的接触压力; 格室外侧, 节点处的接触压力要小于节点间片材的接触压力。

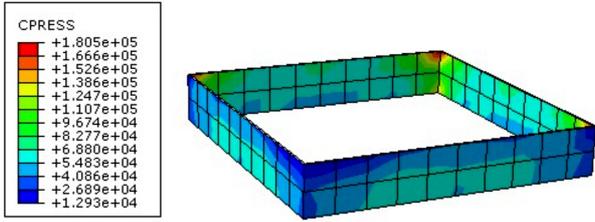


图 5 筋土接触面摩擦力分布云图(单位: Pa)

Fig. 5 Contour of friction

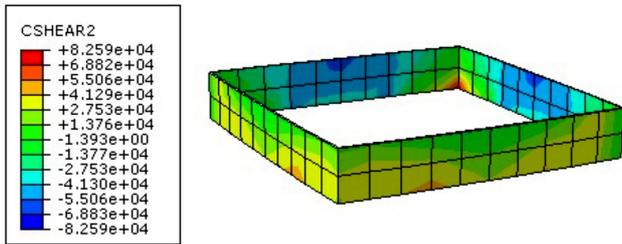
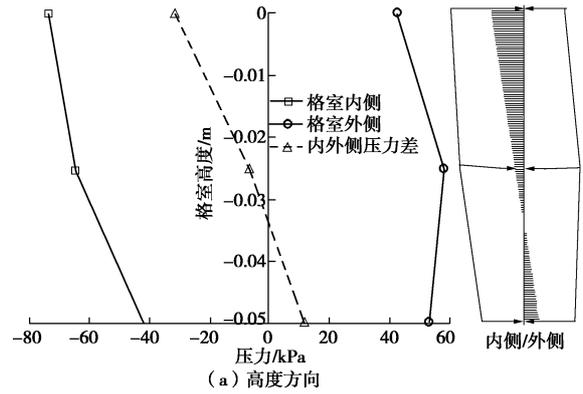


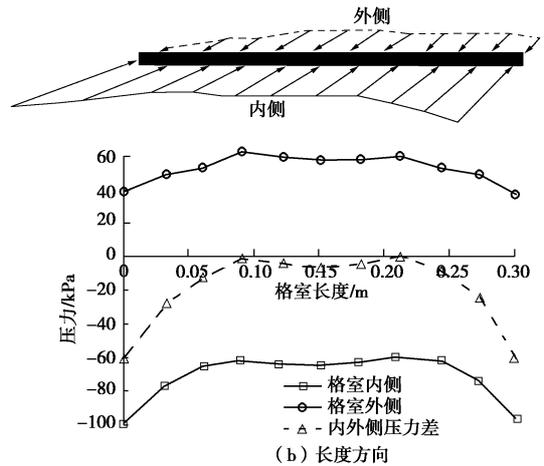
图 6 筋土接触面压力分布云图(单位: Pa)

Fig. 6 Contours of contact stress

图 7 所示为格室内外两侧接触压力沿格室高度方向和沿格室长度方向的分布。其中实线表示高强格室内外侧接触面上所受的压力值, 虚线表示高强格室内侧与外侧所受压力差。从图 7 (a) 可以看出, 沿格室高度方向, 格室内侧接触压力分布呈上大下小的趋势, 即格室顶部接触压力最大, 底部接触压力最小, 而外侧则呈上小下大的趋势。比较内外侧压力差发现, 内外侧压力差在沿格室高度方向中部较小, 在格室顶部和底部较大。分析原因可能是格室对土体起到了环箍和应力扩散的双重作用。当基础下的土体在上部荷载作用下向两侧移动时, 和格室顶部一定范围内接触的土体, 受到了格室侧壁较大的环箍约束力, 即表现为格室侧壁上内侧压力大于外侧压力。随着格室高度的加深, 格室的环箍作用趋于明显, 当接近格室高度中部时, 格室几乎完全限制了其内的砂土, 表现为格室内外侧压力差趋于零。随着格室深度的继续加大, 高强格室由于侧壁的刚度表现出类似于抗弯构件的力学性能。顶部向格室外侧而底部向格室内侧变形, 即可能出现如图 8 (a) 所示的“倒喇叭口”形式的变形。格室底部主要起到均化和扩散应力的作用。从图 7 (b) 可以看出, 沿格室长度方向, 格室内侧的接触压力呈两边节点处大、中间片材处小的特点, 格室外侧则相反。而对比内外侧压力差发现, 节点处受到的压力差远远大于片材部分, 这可能是格室在整个受载荷过程中, 节点处比较容易破坏的原因之一。



(a) 高度方向



(b) 长度方向

图 7 格室内外侧接触面压力分布

Fig. 7 Contours of contact stress

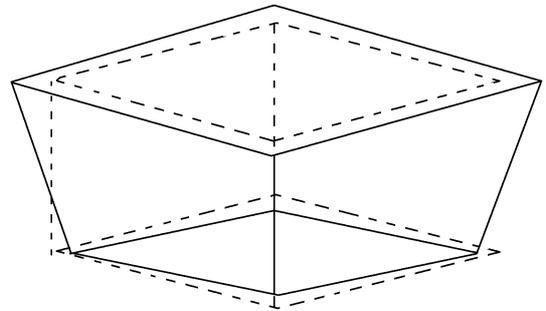


图 8 格室变形示意图

Fig. 8 Deformation behavior of geocell

4 结论与建议

本文利用有限元软件 ABAQUS 对单个高强土工格室加筋地基进行了三维模拟, 分析了单个高强土工格室加筋地基中水平向应力及位移的分布, 研究了高强格室 - 土界面的相互作用。主要结论有:

- (1) 与未加筋地基相比, 高强格室能明显地限制地基的水平向位移和应力, 进而提高了地基承载力。
- (2) 地基中高强格室的侧壁在水平向表现出类似于环形抗弯构件的力学性能。其上半部分对土体起到

环箍作用,下半部分对土体起到均化和应力扩散作用。而在竖向的加固机理主要是侧壁与土体的摩擦力。

(3)格室节点处受到的法向压力比节点间的片材大,说明格室的节点处最容易破坏。

参考文献:

- [1] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008. (BAO Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [2] JENNERC G, BASSET RH, BUSHDI. The use of slip line fields to assess the improvement in bearing capacity of soft ground given by cellular foundation mattress installed at the base of an embankment[C]// Proceedings of International Geotechnical Symposium on the Oryand Practice of Earth Reinforcement. Rotterdam: Balkema, 1988: 209 - 214.
- [3] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(2): 127 - 146. (ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State of the art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(2): 127 - 146. (in Chinese))
- [4] DASH SK, KRISHNASWAMY NR, RAJAGOPAL K. Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, **19**(4): 235 - 256.
- [5] MADHAVI L G, DASH S K, RAJAGOPAL K. Numerical simulation of the behavior of geocell reinforced sand in foundations[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, **9**(4): 143 - 152.
- [6] 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.
- [7] SIREESH S, SITHARAM T G, DASH S K. Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, **27**(1): 89 - 98.
- [8] TAFRESHI MOGHADDAS S N, DAWSON A R. Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(1): 72 - 84.
- [9] 边学成, 宋广, 陈云敏. Pasternak地基中土工格室加筋体的受力变形分析[J]. 工程力学, 2012, **29**(5): 147 - 155. (BIAN Xue-cheng, SONG Guang, CHEN Yun-min. Deformation behaviors of geocell reinforcement in Pasternak ground engineering mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2012, **29**(5): 147 - 155. (in Chinese))
- [10] 赵明华, 陈炳初, 尹平保, 等. 土工格室碎石基层+刚性路面承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 577 - 581. (ZHAO Ming-hua, CHEN Bing-chu, YIN Ping-bao, et al. Model tests on bearing capacity characteristics of geocell gravelbase and rigid pavement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 577 - 581. (in Chinese))
- [11] 李广信. 关于土工合成材料加筋设计的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 605 - 610. (LI Guang-xin. Some problems in design of geosynthetic-reinforced soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 605 - 610. (in Chinese))
- [12] 郭庆淀, 顾跃强, 张立杰. 高强土工格室在高速公路路基施工中的应用[J]. 山西建筑, 2009, **35**(4): 298 - 299. (GUO Qing-dian, GU Yue-qiang, ZHANG Li-jie. The high intensity geogrid application in express highway foundation construction[J]. Shanxi Architecture, 2009, **35**(4): 298 - 299.)
- [13] 陈建峰, 汪嘉嘉, 徐超. 加筋土挡墙动力特性研究进展[J]. 灾害学, 2011, **26**(3): 52 - 55. (CHEN Jian-feng, WANG Jia-jia, XU Chao. Research status of dynamic properties of reinforced soil retaining walls[J]. Journal of Catastrophology, 2011, **26**(3): 52 - 55. (in Chinese))
- [14] 韩晓, 张孟喜, 李嘉洋, 等. 高强土工格室加筋砂土地基模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, **31**(03): 27 - 33. (HAN Xiao, ZHANG Men-xi, LI Jia-yang, et al. Model test of sand foundation reinforced with high-strength geocell[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, **31**(03): 27 - 33. (in Chinese))

(本文责编 明经平)