

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201903050

## 条形荷载下三明治形加筋土挡墙的变形特性分析\*

刘飞禹<sup>1</sup>, 颜思琪<sup>1</sup>, 陈江<sup>2</sup>, 陈加亮<sup>3</sup>

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 浙江省交通投资集团有限公司, 浙江 杭州 310014; 3. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 为了研究条形荷载作用下三明治形混合填土方式对加筋土挡墙变形特性的影响, 采用FLAC<sup>3D</sup>建立了数值计算模型, 分析了三明治形加筋土挡墙的黏土弹性模量 $E_1$ 、砂土弹性模量 $E_2$ 、砂土厚度 $d$ 、筋材长度 $L$ 以及荷载距面板距离 $D$ 对挡墙变形特性的影响。结果表明: 相对于加筋黏土挡墙, 三明治形加筋土挡墙变形大幅减小, 减少其墙顶沉降约32%, 减少面板位移约44%; 其土压力分布规律为墙后水平土压力大体上随填土深度的增加而增大; 适当增大黏土弹性模量有利于减小挡墙顶部差异沉降; 砂土存在一个最优弹性模量, 使得面板水平位移最小; 三明治形加筋土挡墙存在一个最优砂土厚度, 使得三明治加筋土挡墙工作性能最佳; 当 $L/H \geq 0.7$ 时, 继续增加筋材长度或当 $D/H \geq 0.3$ 时, 继续增大荷载距面板距离对挡墙影响相对较小。

**关键词:** 加筋土挡墙; 条形荷载; 数值模拟; 最优砂土厚度

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1080-07

## Analysis of Deforming Behaviors of Sandwich Reinforced Soil Retaining Wall under Strip Load

LIU Feiyu<sup>1</sup>, YAN Siqi<sup>1</sup>, CHEN Jiang<sup>2</sup>, CHEN Jialiang<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Zhejiang Communications Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. Ningbo Communications Planning Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

**Abstract:** FLAC<sup>3D</sup> was used to establish a numerical model to study the influence of clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand on the deformation behaviors of reinforced soil retaining wall. The influence of elastic modulus of clay  $E_1$ , elastic modulus of sand  $E_2$ , thickness of sand  $d$ , length of reinforcement  $L$ , and distance between the load and the panel  $D$  on the deformation behaviors of sandwich reinforced soil retaining wall were analyzed. The results showed that the deformation behaviors of sandwich reinforced soil retaining wall were greatly improved. The overhead settlement of the retaining wall was reduced by 32%, and the horizontal displacement of the panel was reduced by 44%. The distribution of earth pressure was that the horizontal earth pressure behind the wall increases with the increase of the filling depth. A proper increase in the elastic modulus of clay was beneficial to reduce the differential settlement of the top surface of the retaining wall. There was an optimum elastic modulus of sand to minimize the horizontal displacement of the panel. There was an opti-

\* 收稿日期: 2019-03-16; 修回日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352, 52078285)资助

作者简介: 刘飞禹(1976—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事加筋土方面的研究。E-mail: lfyju@shu.edu.cn



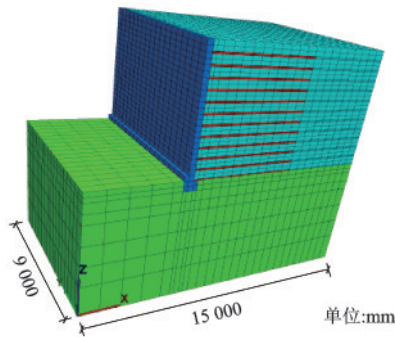


图2 FLAC<sup>3D</sup>网格划分

Fig.2 FLAC<sup>3D</sup> mesh generation

算宽度为5 m,墙后填土长度为10 m。铺设土工格栅,筋材竖向间距为0.5 m,长度为5.4 m,即 $L/H=0.9$ ,总共铺设12层筋材。挡墙采用分层填筑,土工格栅上下两侧均匀铺设0.08 m厚的砂土,外侧均匀铺设重塑黏土。条形荷载宽 $B_i$ 为2 m,即 $B_i/H=0.33$ ,大小为100 kPa,荷载边缘距面板距离 $D=2.4$  m,即 $D/H=0.4$ 。计算时,将模型底面3个方向全部固定,模型四周均为水平约束,墙面以及加筋挡墙顶面为自由边界。

### 1.2 模型参数选取

用莫尔-库伦模型模拟地基和土体,用弹性模型模拟模块式面板,填料、地基以及面板的参数具体见表1,剪切模量和体积模量根据弹性模量和泊松比进行换算。土工格栅采用FLAC<sup>3D</sup>自带的Geogrid结构单元进行模拟,筋材参数见表2。面板模块与模块以及面板与填土间的接触特性通过FLAC<sup>3D</sup>中的Interface单元进行模拟,接触面参数见表3。

表1 材料模型参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
地基	50	0.3	22	20	1 700
砂土	40	0.3	0	35	1 800
黏土	25	0.3	30	5	1 900
面板模块	$23 \times 10^3$	0.15	—	—	2 400

为了研究三明治形加筋土挡墙变形受各种因素影响的程度,以基本模型为基础,每次计算只改变一个参数的设置,其它参数均不变。影响因素变化设置见表4。

表2 加筋材料技术参数

Table 2 Technical parameters of the geogrid

单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	筋-土黏聚力/kPa	筋-土摩擦角/(°)	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
Geogrid	800	0.33	10.3	32	1 300

表3 接触面模型参数

Table 3 Mechanical parameters of interfaces

位置	法向刚度/(MPa·m <sup>-1</sup> )	切向刚度/(MPa·m <sup>-1</sup> )	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
模块-砂土	100	1	0	48
模块-黏土	88	0.8	25	33
模块-模块	1 000	40	45.7	57

表4 影响因素变化设置

Table 4 Change of influencing factors

参数	变化值
黏土弹性模量 $E_1$ /MPa	15、20、25、30、35
砂土弹性模量 $E_2$ /MPa	30、35、40、45、50
砂土厚度 $d$ /cm	0、2、4、6、8、10、12、14
筋材长度( $L/H$ )	0.5、0.7、0.9、1.1、1.3
荷载距面板距离( $D/H$ )	0.1、0.2、0.3、0.4、0.6

### 1.3 模型验证

为了验证三明治形加筋土挡墙数值模拟的正确性,对文献[7]的模型试验进行了数值模拟计算,并且将试验结果的实测值与模拟值进行了对比。由于目前研究中暂无三明治形加筋土挡墙的相关研究,因此只能退化到传统单一填料加筋土挡墙与现有的资料进行对比验证。验证模型中的模型尺寸以及相关参数均采用文献[7]的试验参数,模型 $L/H=2$ , $D/H=0.3$ , $B_i/H=0.42$ ,面板采用混凝土模块,筋材采用聚丙烯土工格栅,挡墙填料采用砂土。

图3为FLAC<sup>3D</sup>模拟与模型试验关于顶部条形

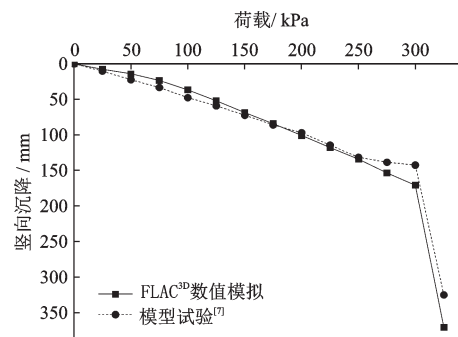


图3 数值模拟和试验关于压力-累积竖向沉降的对比  
Fig.3 Comparison between numerical and experimental results of pressure-settlement curves

荷载作用下加筋土挡墙的压力-累积竖向沉降曲线的对比。文献[7]选取荷载增量为25 kPa,本文模拟选取荷载增量同为25 kPa,逐级施加荷载直至沉降骤增为止。由图可知,本文模型的数值模拟结果与文献[7]的试验结果相吻合,随着荷载增加沉降逐渐增大,当荷载达到300 kPa时,沉降增速明显增大。

## 2 数值计算结果分析

### 2.1 黏土弹性模量 $E_1$ 的影响

图4为当黏土弹性模量  $E_1$  变化时,挡墙顶部沉降随距面板距离的变化曲线。由图可知,当  $E_1$  从15 MPa增大至20 MPa,墙顶最大沉降从30 mm减小至26 mm;当  $E_1$  从30 MPa增大至35 MPa,墙顶最大沉降从22 mm减小至21 mm。条形荷载作用下墙顶沉降量和差异沉降随着黏土弹性模量  $E_1$  的增加而减小,且减小的幅度越来越小。这表明适当增大  $E_1$  有利于减小挡墙顶面沉降量和差异沉降的坡度。

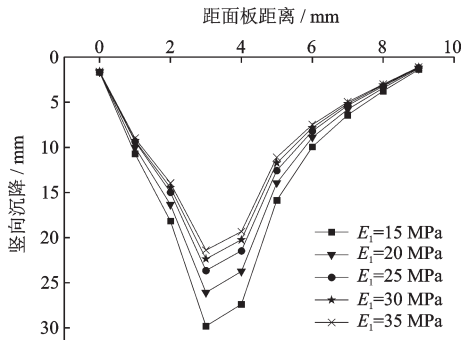


图4 不同黏土弹性模量下挡墙顶面竖向沉降曲线  
Fig.4 Settlement curves of top surface of the retaining wall under various elastic modulus of clay

图5为当黏土弹性模量  $E_1$  变化时,面板水平位移随墙高的变化曲线。由图可知,挡墙面板水平位移总体随着黏土弹性模量  $E_1$  的增加而略微增大,且增加的幅度越来越小。当  $E_1$  为30 MPa时,面板位移与  $E_1$  为35 MPa时大小几乎一致,均约为19 mm。挡墙的水平变形沿着墙高增加而增大,在墙高的中上部大底部小,整体呈外倾式,最大值出现在墙顶端。这与传统柔性加筋土挡墙的面板水平位移沿墙高方向呈鼓胀式的变化特点不同。究其原因,可能是由于越靠近挡墙顶端自重力越小,摩擦力不足,而刚性模块式挡墙面板上部主要靠模块之间的摩擦力来承担土体压力。

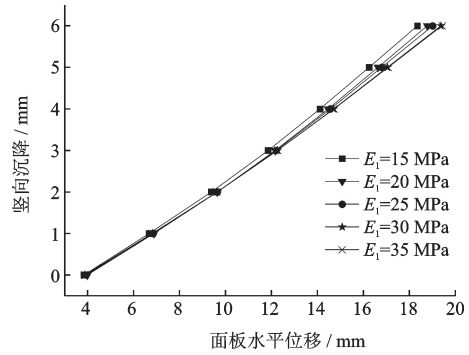


图5 不同黏土弹性模量下面板水平位移随墙高的变化曲线  
Fig.5 Horizontal displacement curves of the panel under various elastic modulus of clay

### 2.2 砂土弹性模量 $E_2$ 的影响

图6为当砂土弹性模量  $E_2$  变化时,挡墙顶部沉降随距面板距离的变化曲线。由图可知,不同砂土弹性模量的墙顶差异沉降曲线几乎重合。究其原因,可能是由于砂土含量相对较少,其主要作用为增大筋土界面摩阻力从而改善界面性能,而其弹性模量对挡墙顶部差异沉降的影响可以忽略不计。

图7为当砂土弹性模量  $E_2$  变化时,面板水平位

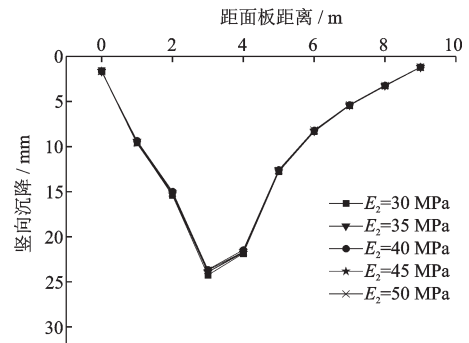


图6 不同砂土弹性模量下挡墙顶面竖向沉降曲线  
Fig.6 Settlement curves of top surface of the retaining wall under various elastic modulus of sand

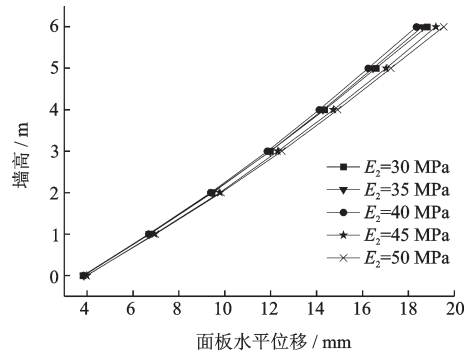


图7 不同砂土弹性模量下面板水平位移随墙高的变化曲线  
Fig.7 Horizontal displacement curves of the panel under various elastic modulus of sand

移随墙高的变化曲线。由图可知,面板顶部位移并不是随着砂土弹性模量的增加单调减小,而是呈现出先减小后增大的趋势。图8为砂土弹性模量 $E_2$ 与面板最大水平位移关系曲线。由图可知,在该工况中存在一个最优弹性模量,即砂土弹性模量 $E_2$ 为40 MPa时,挡墙面板位移最小。

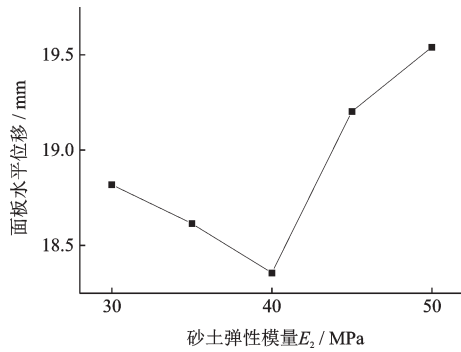


图8 砂土弹性模量 $E_2$ 与面板最大水平位移关系

Fig.8 Relationship between elastic modulus of sand  $E_2$  and maximum horizontal displacement of the panel

### 2.3 砂土厚度 $d$ 的影响

图9为砂土厚度 $d$ 变化时,挡墙顶部沉降随距面板距离的变化曲线。由图可知,砂土厚度 $d$ 为6 cm时,墙顶最大沉降约为23 mm; $d$ 为0 cm,即为加筋黏土挡墙时,墙顶沉降为34 mm,两者相差约32%。由此可知,三明治加筋土可以大大减少挡墙的墙顶沉降。此外,墙顶差异沉降不是随着砂土厚度增加单调减小,而是呈现出先减小后增大的趋势。图10为砂土厚度 $d$ 与墙顶最大竖向沉降关系曲线。由图可知,当 $d$ 为6 cm时,墙顶沉降达到最小值。这表明在4~8 cm存在一个最优砂土厚度,这与文献[16]结论相吻合。

图11为砂土厚度 $d$ 变化时,面板水平位移随墙高的变化曲线。由图可知,砂土厚度 $d$ 为6 cm时,

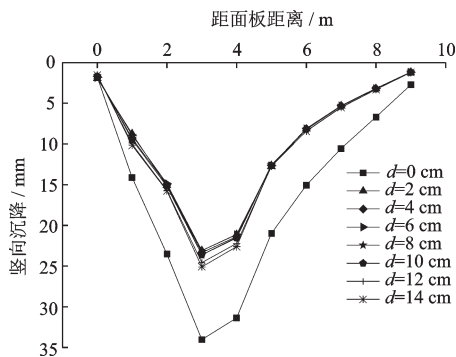


图9 不同砂土厚度下挡墙顶面竖向沉降曲线

Fig.9 Settlement curves of top surface of the retaining wall under various thickness of sand

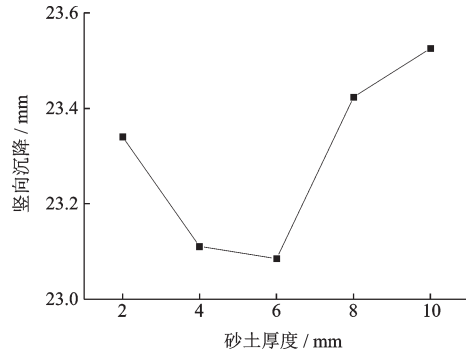


图10 砂土厚度 $d$ 与墙顶最大竖向沉降关系

Fig.10 Relationship between thickness of sand  $d$  and maximum settlement of top surface

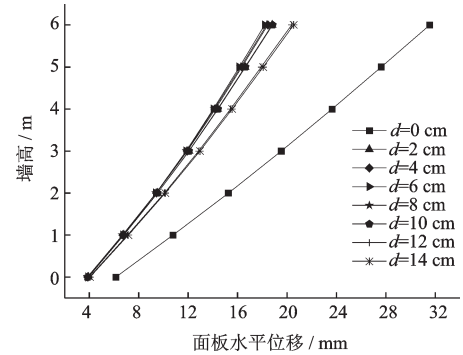


图11 不同砂土厚度下面板水平位移随墙高的变化曲线

Fig.11 Horizontal displacement curves of the panel under various thickness of sand

面板最大位移约为18 mm; $d$ 为0 cm,即为加筋黏土挡墙时,墙面位移约为32 mm,两者相差约44%。此外,面板水平位移随着砂土厚度增加呈现出先减小后增大的趋势。当 $d$ 为6 cm时,面板位移达到最小值, $d$ 由10 cm增大至12 cm时,面板位移增幅较大。表明在4~8 cm存在一个最优砂土厚度。

### 2.4 筋材长度 $L$ 的影响

图12为筋材长度 $L$ 变化时,挡墙顶部沉降随距

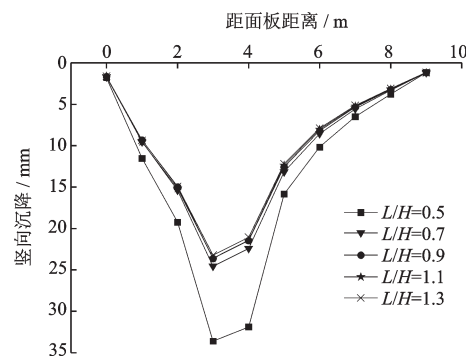


图12 不同 $L/H$ 下挡墙顶面竖向沉降曲线

Fig.12 Settlement curves of top surface of the retaining wall under various  $L/H$

面板距离的变化曲线。由图可知,随着筋材长度逐渐增长,墙顶沉降逐渐减小,变化幅度也逐渐减小。当 $L/H=0.5$ 时,墙顶最大沉降约为34 mm;当 $L/H=0.7$ 时,墙顶沉降最大值约为24 mm,两者差值为10 mm;当 $L/H=1.3$ 时,墙顶最大沉降值约为23 mm,与 $L/H=0.7$ 时最大沉降值的差值仅为1 mm。这说明筋材长度达到一定值之后,即当 $L/H \geq 0.7$ 时,筋材长度的变化对沉降的影响相对较小。

图13为筋材长度 $L$ 变化时,面板水平位移随墙高的变化曲线。由图可知,随着筋材长度增长,墙面水平位移减小,筋材对挡墙变形起到很好的限制作用。当 $L/H=0.5$ 时,增加筋材长度,墙面水平位移变化比较大;而当 $L/H \geq 0.7$ 时,继续增加筋材长度,墙面水平位移的变化很小。究其原因,是由于当筋材长度 $L$ 较短时,筋材不能满足锚固长度需求,挡墙将发生较大变形;而当 $L/H \geq 0.7$ 时,筋材的锚固长度已能提供足够的抗力,继续增加筋材长度影响不大。这说明对于三明治形加筋土挡墙,应满足筋材长度 $L/H \geq 0.7$ ,以保证挡墙的变形性能。

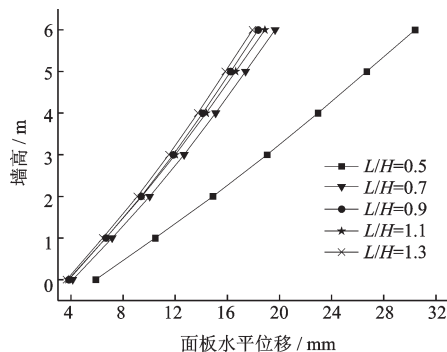


图13 不同 $L/H$ 下面板水平位移随墙高的变化曲线  
Fig.13 Variation curves of horizontal displacement of the panel with respect to wall height under various  $L/H$

### 2.5 荷载距面板距离 $D$ 的影响

图14为荷载距面板距离 $D$ 变化时,挡墙顶部沉降随距面板距离的变化曲线。由图可知,随着荷载距面板距离 $D$ 的增加,墙顶沉降总体逐渐减小,且在荷载作用位置处出现墙顶最大沉降。随着荷载作用位置距墙面距离的增加,最大沉降出现的位置也距墙面越来越远。当 $D/H$ 由0.2增至0.3时,沉降变化最大,从32 mm减小至26 mm,减小约6 mm;当 $D/H$ 由0.3增至0.4时,墙顶最大沉降从26 mm减小至24 mm。当 $D/H \geq 0.3$ 时,荷载距面板距离 $D$ 的增加对墙顶沉降影响相对较小。

图15为荷载距面板距离 $D$ 变化时,面板水平位

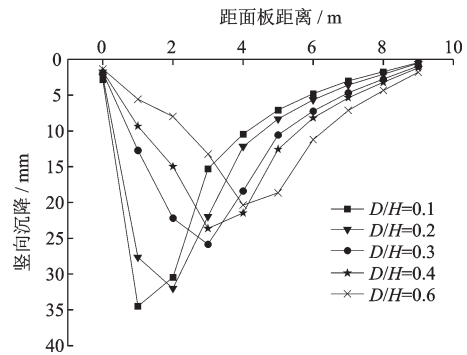


图14 不同 $D/H$ 下挡墙顶部竖向沉降曲线

Fig.14 Settlement curves of top surface of the retaining wall under various  $D/H$

移随墙高的变化曲线。由图可知,随着荷载距面板距离 $D$ 的增加,墙面水平位移总体逐渐减小,且倾角也逐渐减小。当 $D/H$ 由0.2增大至0.3时,面板顶部位移大幅减小;而后继续增大荷载距面板距离 $D$ ,变化相对较小。究其原因,是由于荷载作用位置离墙面距离增大以及附加应力衰减,导致荷载对墙面的影响逐渐减小。

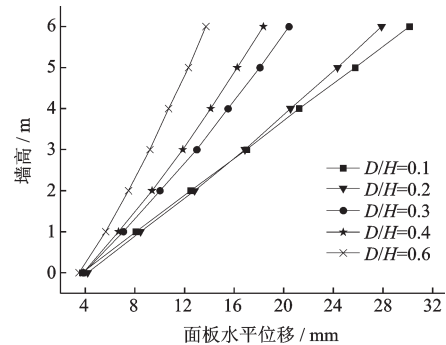


图15 不同 $D/H$ 面板水平位移随墙高的变化曲线

Fig.15 Variation curves of horizontal displacement of the panel with respect to wall height under various  $D/H$

## 3 结论

对墙顶条形荷载作用下的三明治形加筋土挡墙进行了模拟,对比分析了黏土弹性模量、砂土弹性模量、砂土厚度、筋材长度以及荷载距面板距离对挡墙变形及受力的影响,得到以下结论:

(1)挡墙面板水平位移随着砂土弹性模量增大先减小后增大,存在一个最优砂土弹性模量,使得条形荷载作用下面板水平位移最小。

(2)在砂土厚度0~14 cm中,存在一个最优砂土厚度,使得条形荷载作用下三明治加筋土挡墙墙顶沉降以及面板水平位移最小。

(3) 三明治加筋土挡墙的墙后水平土压力随着墙高的增加,水平土压力基本呈线性减小。

### 参考文献:

- [1] 吴景海,王德群,陈环.土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(2):199-204.  
Wu J H, Wang D Q, Chen H. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 199-204. (in Chinese)
- [2] Vangla P, Madhavi L G. Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 44(3): 254-268.
- [3] 刘飞禹,王攀,王军,等.颗粒粒径对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J].岩土力学,2017,38(1):150-156.  
Liu F Y, Wang P, Wang J, et al. Influence of soil particle on monotonic and cyclic direct shear behaviors of geogrid-soil interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 150-156. (in Chinese)
- [4] Wang Z, Jacobs F, Ziegler M. Visualization of load transfer behaviour between geogrid and sand using PFC<sup>2D</sup> [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(2):83-90.
- [5] Huang B Q, Bathurst R J, Hatami K. Influence of toe restraint on reinforced soil segmental walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(8): 885-904.
- [6] 张垭,汪磊,刘华北.面板倾角对模块式面板加筋土挡墙筋材内力的影响[J].岩土工程学报,2017,39(9):1-9.  
Zhang Y, Wang L, Liu H B. Influence of facing batter angle on reinforcement load of reinforced soil retaining wall with modular block facing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1-9. (in Chinese)
- [7] Xiao C Z, Han J, Zhang Z. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(1): 81-94.
- [8] 张孟喜,张贤波,段晶晶.H-V加筋黏性土的强度与变形特性[J].岩土力学,2009,30(6):1563-1568.  
Zhang M X, Zhang X B, Duan J J. Strength and deformation properties of H-V reinforced clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1563-1568. (in Chinese)
- [9] 王德银,唐朝生,李建,等.纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J].岩土工程学报,2013,35(10):1933-1939.  
Wang D Y, Tang Ch Sh, Li J, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1933-1939. (in Chinese)
- [10] 刘毓胤,陈志福.考虑吸力变化的非饱和高液限黏土-土工织物界面剪切特性研究[J].岩土力学,2014,35(6):1585-1592.  
Liu Y Ch, Chen Zh F. Study of interface shear characteristic between unsaturated high liquid limit clay and geotextiles considering suction change [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1585-1592. (in Chinese)
- [11] Noorzad R, Mirmoradi S H. Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 386-392.
- [12] Yang G Q, Liu H B, Lyu P, et al. Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 35(39):112-118.
- [13] 张波,石名磊,白世伟.新庄黏土加筋挡墙失稳破坏研究[J].岩土力学,2007,28(11):2348-2352.  
Zhang B, Shi M L, Bai Sh W. Research on failure of Xinzhuang clay-reinforced soil wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2348-2352. (in Chinese)
- [14] 王协群,张俊峰,邹维列,等.格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J].土木工程学报,2013,46(4):133-141.  
Wang X Q, Zhang J F, Zou W L, et al. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 133-141. (in Chinese)
- [15] Abdi M R, Sadmejad S A, Arjomand M A. Clay Reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand [J]. International Journal of Civil Engineering, 2009, 7(4): 224-235.
- [16] Abdi M R, Zandieh A R. Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(5): 495-504.
- [17] 刘飞禹,张涛,施静. Sandwich形加筋土筋土界面的循环剪切特性[J].中国公路学报,2017,30(5):38-43.  
Liu F Y, Zhang T, Shi J. Cyclic shear behavior on soil-geogrid interface of sandwich reinforced soil [J]. China Journal of Highway Transportation, 2017, 30(5): 38-43. (in Chinese)
- [18] 刘飞禹,施静,王军,等.三明治形加筋土筋-土界面动力剪切特性[J].岩土力学,2018,39(6):1991-1998.  
Liu F Y, Shi J, Wang J, et al. Dynamic shear behavior of interface for clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 1991-1998. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)