

Numerical Analysis of Slope Stability under Flexible Protection of Reinforced 3D-Geomat and Anchor Bolt

Ze Liu¹, Li Chen¹, Fan He¹, Huafeng Lou²

¹College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Zhejiang Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Email: csuzeliu@163.com

Received: Sep. 8th, 2019; accepted: Sep. 22nd, 2019; published: Sep. 29th, 2019

Abstract

In order to study the structural characteristics of slope under the flexible protection of reinforced three-dimensional mesh-anchor, a numerical model was established by FLAC3D on the basis of indoor model test. The stress-strain distribution law of slope was obtained by step loading, and the effects of anchor length, slope rate and soil strength index on slope stability were discussed. The results show that the deformation of slope increases with the increase of load, the horizontal displacement of slope surface is "bulging" shape with large middle and small upper and lower, and the vertical displacement of slope surface decreases gradually from top to bottom; the axial force of the bolt was a parabolic distribution along the axis direction, the maximum value and location of the axial force of the bolt decrease with the decrease of the height of the bolt and gradually approach the slope; the stability coefficient of slope increases with the increase of anchor length and soil strength index, but it decreases with the increase of slope inclination angle.

Keywords

FLAC^{3D} Numerical Simulation, Three Dimensional Mesh Slope Protection, Stability Analysis

加筋三维网 - 锚杆柔性防护下边坡的稳定性数值分析

刘 泽¹, 陈 丽¹, 何 砚¹, 楼华锋²

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州

Email: csuzeliu@163.com

摘要

为了探讨加筋三维网-锚杆柔性防护下边坡的结构特性，在室内模型试验的基础上，采用FLAC^{3D}建立分析模型，通过分级加载，获得了边坡应力应变分布规律，并讨论了锚杆长度、边坡坡率、土体强度指标等对边坡稳定性的影响。结果表明：坡顶超载作用下边坡的变形随荷载增加而增大，坡面水平位移为中部大、上下小的“臃胀”形，坡面竖向位移自坡顶向下逐渐减小；锚杆轴力在轴线方向上呈“抛物线”型分布，锚杆轴力的最大值和所在位置随锚杆布设高度的降低而减少，并逐渐靠近坡面；边坡的稳定性系数随锚杆长度和土体强度指标的增加而增大，但随边坡倾角的增大而减小。

关键词

FLAC^{3D}，数值模拟，筋锚三维网护坡，稳定性分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

边坡柔性生态防护一般采用锚杆、土工合成材料与生态基材构成边坡防护体系，通过锚杆与土工合成材料对岩土体进行约束，提高其稳定性和抗冲刷能力，通过生态基材料与土工合成材料为坡面植物生长提供稳定的营养体，促植物快速生长，具有施工简单、生态效果好、工程造价低等优势。随着生态文明建设的发展，工程建设中柔性生态护坡技术越来越受到工程技术人员与研究者的青睐。肖成志[1] [2]等人通过试验研究了三维网植草护坡性能的主要影响因素，并建立有限元模型分析了边坡浅层和整体在降雨渗流条件下的稳定性。隋明昊[3]利用FLAC^{3D}通过对岩质高陡生态边坡的稳定性分析，得到了植被根系对浅层稳定性加固机理的影响因素。嵇晓雷[4]通过将数值模拟与试验研究相结合的方法，研究了植物根系与边坡土体位移场的关系，揭示了植物根系对土体强度的影响规律。时伟[5]、卢涛[6]等人基于数值模拟进行了锚杆-土工网垫喷播固坡植生技术加固岩质高陡边坡的稳定性分析。王广月[7]等人利用ABAQUS分析了铆钉分布方式和降雨条件下对土工格室防护边坡稳定性影响。肖衡林[8]探讨了边坡柔性防护时三维网的设计指标取值问题。

为了进一步探讨柔性防护下边坡的变形与失稳机理，笔者在室内完成了加筋三维网-锚杆防护下的边坡模型试验，获得了一些有益的结论。在此基础上，本文利用FLAC^{3D}建立数值分析模型，以期进一步探讨柔性防护下边坡的应力应变分布规律及其稳定性影响因素。

2. 加筋三维网-锚杆防护边坡模型试验

边坡加筋三维网-锚杆柔性防护是以加筋麦克垫、植生基材构成坡面防护层，以锚钉加固潜在失稳岩土体并对柔性面层进行锚固。这种防护结构与传统圬工防护结构相比，具有抗侵蚀能力强、结构强度大、耐久性好、施工便捷、环保效果佳，绿化见效快等优点。近年来在公路、市政、水利边坡防护得到

成功应用。

为了探讨这种结构的受力变形特点，笔者在室内完成了坡顶超载作用下加筋三维网-锚杆防护边坡的模型试验，获得了边坡坡面侧向变形、竖向变形、锚杆轴力、坡内竖向和侧应力的发展规律(另有论文进行分析，这里不再赘述)。试验结果表明，边坡的极限承载力约为 113 kPa，图 1 为边坡最大水平位移随荷载增加的发展曲线。水平位移随荷载变化曲线近似于抛物线，随荷载增大而增大。

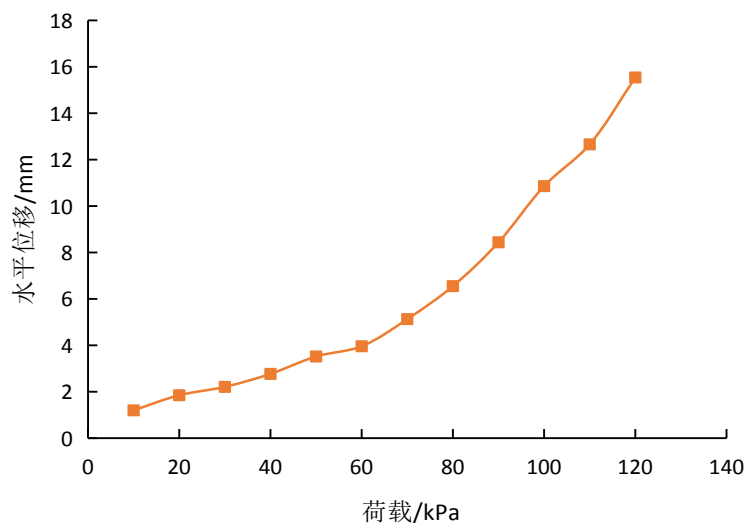


Figure 1. Development curve of max horizon displacement of slope
图 1. 边坡最大水平位移发展曲线

3. 筋锚三维网防护下边坡的结构特性分析

3.1. 模型建立

为了进一步分析边坡在加筋三维网-锚杆柔性防护下的结构特性，这里以模型试验设计方案为依据，采用 FLAC^{3D} 建立如图 2 所示的分析模型。加筋三维网和锚杆分别采用土工格栅单元(geogrid)和锚索单元(cable)模拟并通过节点将两者连接；土体采用实体单元建立，其本构关系为莫尔-库伦模型，表 1~表 3 为填土、加筋三维网和锚杆的力学参数。模型计算前，固定模型底部和四周相应法线方向的位移，坡面和模型顶部为自由界面。分析时按模型试验同样的方案进行加载。

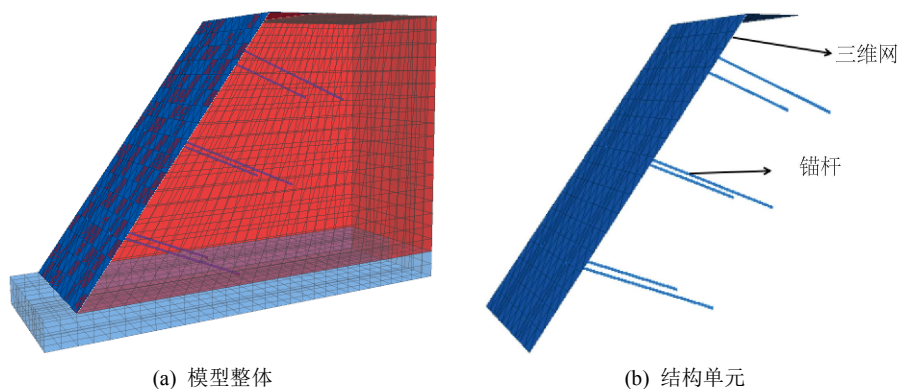


Figure 2. The analysis model of slope
图 2. 边坡分析模型

Table 1. Mechanical parameters of soil model
表 1. 土体模型的力学参数

粘聚力(kPa)	10
摩擦角(°)	25
密度(kg/m ³)	2000
切变模量(Pa)	3.0×10^8
体积模量(Pa)	6.67×10^8

Table 2. Mechanical parameters of bolt
表 2. 锚杆的力学参数

弹性模量(N/m)	2×10^{11}
抗拉强度(N)	1.0×10^{10}
横截面积(m ²)	7.85×10^{-5}
粘结力(N/m)	100
水泥浆刚度(N/m ²)	5×10^6
水泥浆外圈周长(m)	1.25×10^{-3}
水泥浆摩擦角(°)	25

Table 3. Mechanical parameters of geogrid
表 3. 加筋三维网的力学参数

弹性模量(N/m)	6×10^{11}
泊松比	0.42
耦合弹簧的粘聚力(N/m)	1.5×10^6
耦合弹簧的摩擦角(°)	27
厚度(mm)	3

3.2. 计算结果分析

图 3 为由数值分析获得的边坡最大水平位移发展曲线。与图 1 对比可知, 由于材料参数间存在一定的差异, 由数值分析获得的边坡水平最大水平位移值较实测值稍大, 但两者的发展规律相同。可见, 数值模型符合实际, 可用于进一步研究。

图 4 为各级荷载下边坡的位移变化曲线。由水平位移曲线(图 4(a))可知, 当荷载较小时, 边坡临空面上部向内缩进, 而中下部向外臃出; 随荷载增大, 边坡中上部也开始向外鼓胀变形, 边坡最大水平位移始终发生在边坡中部。从竖向位移曲线(图 4(b))看, 竖向位移随荷载增加而增大, 且自坡顶向下逐渐减小。当荷载小于 100 kPa 时, 水平位移和竖向位移增长均较平稳, 当荷载大于 100 kPa 后, 位移出现急剧增大现象, 当加至 120 kPa 时边坡达到极限承载力状态。

图 5 为边坡在坡顶超载 110 kPa 作用下的水平和竖向应力分布云图(压应力为负, 拉应力为正)。分析可知, 尽管边坡较陡, 坡顶荷载达到了边坡极限承载力, 但坡体内并没有出现拉应力, 应力的分布与增长仍然比较平缓, 没有明显的应力集中区, 这主要是由于柔性防护结构有较好的变形适应性, 能够随着边坡岩土体的变形逐渐发挥作用, 保持边坡处于良好的应力状态。

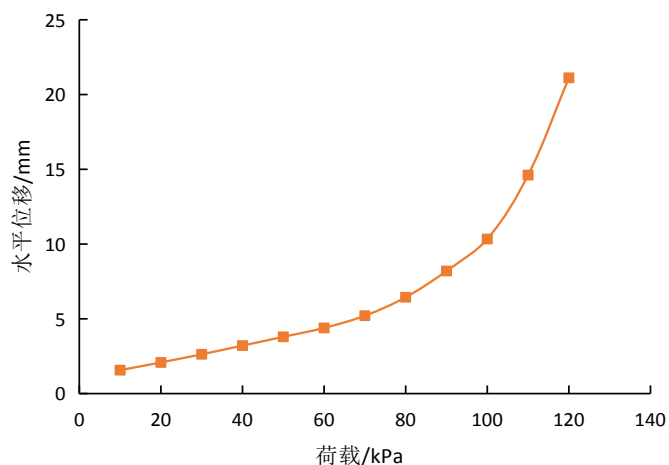


Figure 3. Maximum horizontal displacement development curve of slope

图 3. 边坡的最大水平位移发展曲线

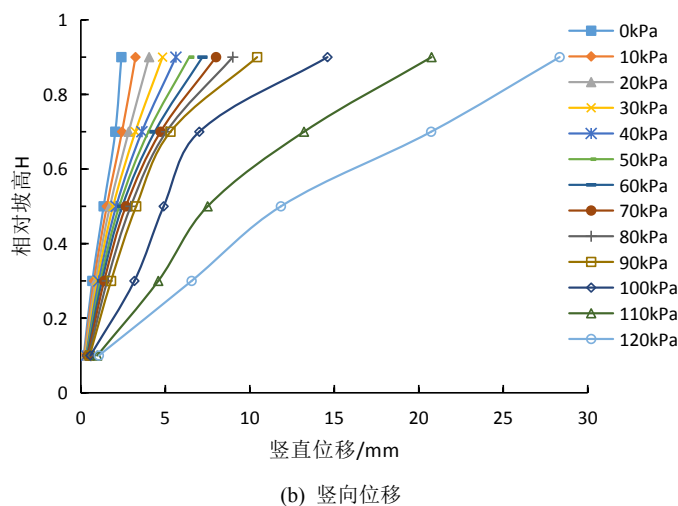
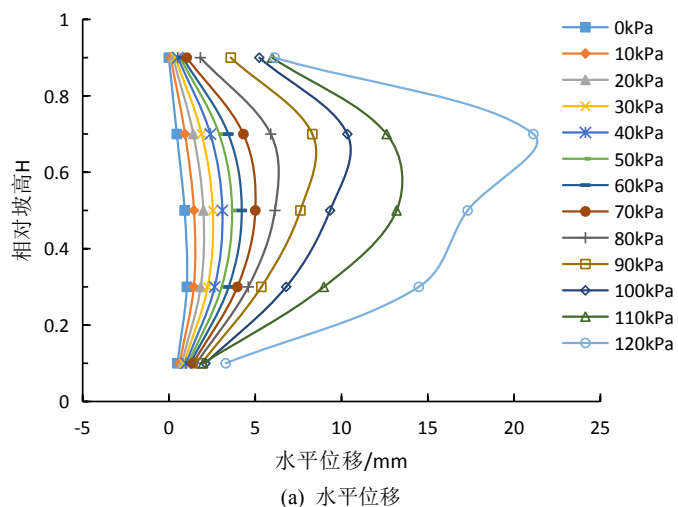


Figure 4. Slope displacement versus load curve

图 4. 边坡位移随荷载变化曲线

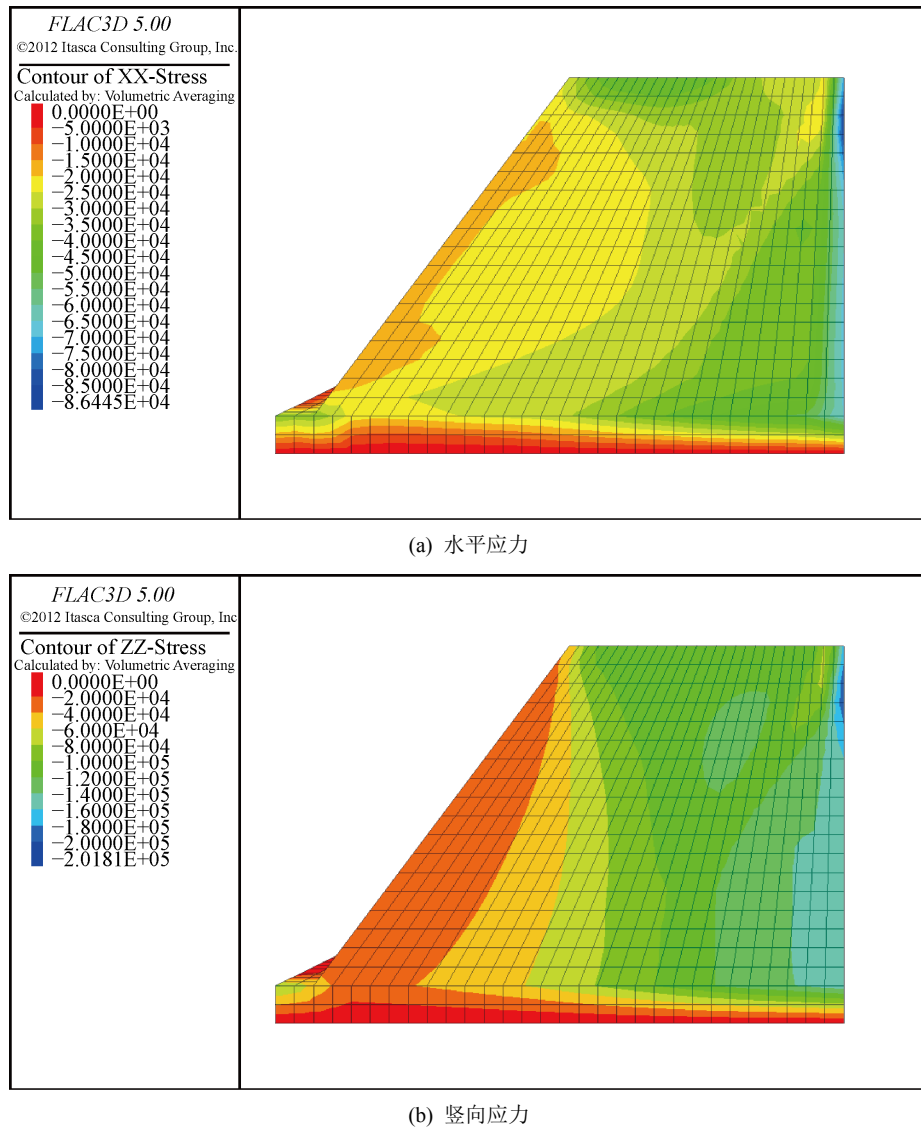


Figure 5. Stress distribution map of slope (110 kPa)
 图 5. 边坡应力分布图(110 kPa)

图 6 为坡顶极限荷载作用下(110 kPa)锚杆的轴力分布图。分析可知，锚杆轴力沿其轴线的分布为中间大两端小的“抛物线”型，且最大值自上向下逐渐减小；但各层锚杆的轴力峰值并未出现在同一位置，这主要是由于锚杆轴力受到潜在滑裂面位置的影响，在潜在滑裂面处岩土体发生剪切滑移而导致锚杆拉力达到最大，因此最底层锚杆轴力峰值会更接近锚杆锚头端。

3.3. 边坡的稳定性影响因素分析

为进一步研究不同条件下边坡采用加筋三维网 - 锚杆防护下的稳定性，采用 FLAC^{3D} 中内置强度折减法对边坡安全系数进行求解，分析锚杆长度、边坡坡率及土体强度对边坡稳定性的影响。

1) 锚杆长度的影响

取锚杆长度为 0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m。计算边坡的安全系数，计算结果见图 7。可见，边坡安全系数随锚杆长度的增大而增大，当锚杆长度小于 0.6 m 时，边坡安全系数

小于 1；当锚杆长度超过 1 m 后，安全系数增长幅度很小。这表明当锚杆长度达到 1 m 后继续增加锚杆长度对边坡的稳定性影响不大，即在边坡支护中锚杆存在一个合理的锚杆长度。

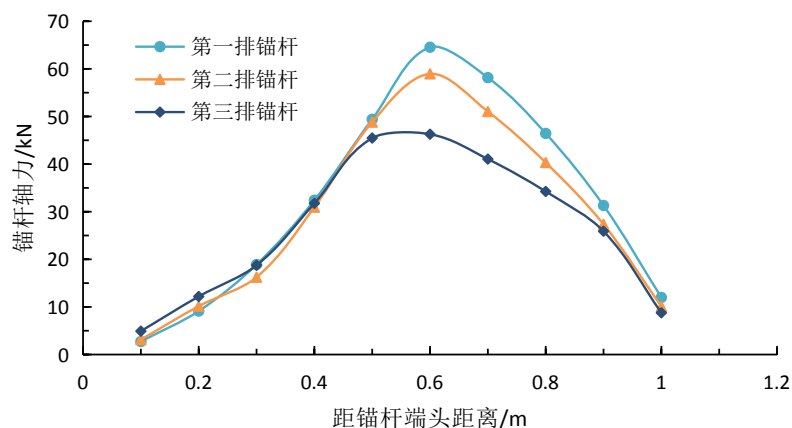


Figure 6. The axial force distribution diagram of anchor rod
图 6. 锚杆轴力分布图(110 kPa)

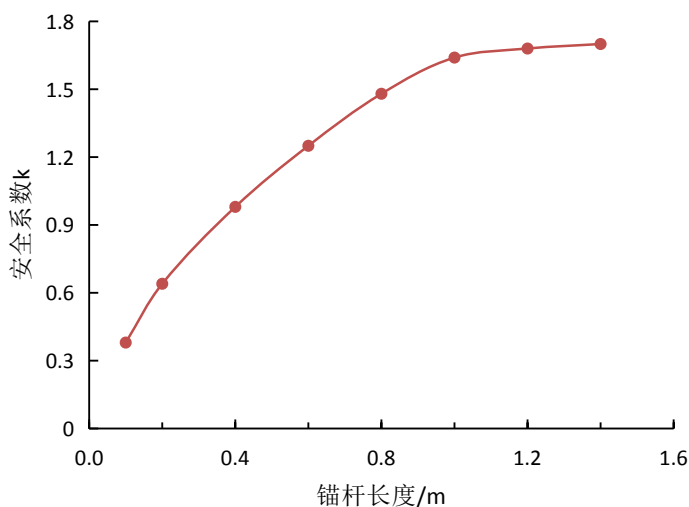


Figure 7. Curve of safety coefficient changing with bolt length
图 7. 安全系数随锚杆长度变化曲线

2) 边坡坡率的影响

取边坡坡率分别为 1:1.75、1:1.5、1:1.25、1:1、1:0.75 (对应的坡角为: 29.76°、45°、33.71°、38.68°、45°、53.16°), 控制锚杆长度为 1 m。图 8 为边坡安全系数随边坡坡率变化曲线。可见, 随边坡坡角的增大, 边坡安全系数近似直线减小, 但在常用坡率下, 边坡都处于稳定性状态。

3) 边坡土体强度的影响

再以控制变量法研究边坡土体强度的影响。分别取边坡土体的黏聚力为 5 kPa~25 kPa (控制坡率为 1:0.75、内摩擦角 20°、锚杆长 1 m)、内摩擦角为 20°~40° (控制坡率为 1:0.75、粘聚力 10 kPa、锚杆长 1 m) 计算边坡安全系数, 计算结果见图 9 和图 10。可以看到, 边坡安全系数随粘聚力增加而增大(图 9), 当粘聚力大于 20 kPa 时, 安全系数变化趋于平缓; 随内摩擦角的增大, 边坡安全系数逐渐增大, 两者间近似为线性关系(图 10)。

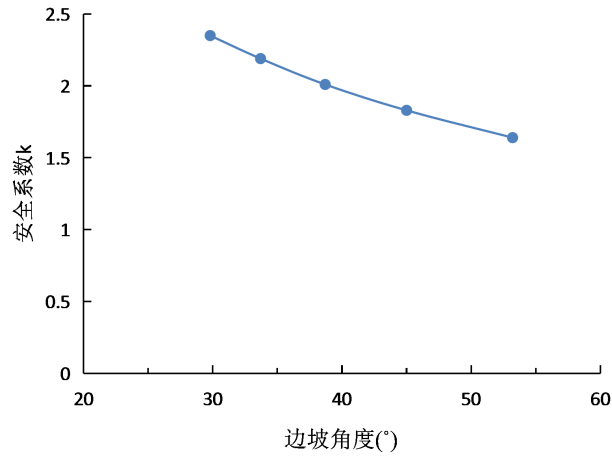


Figure 8. Variation curve of safety factor with slope

图 8. 安全系数随边坡斜率变化曲线

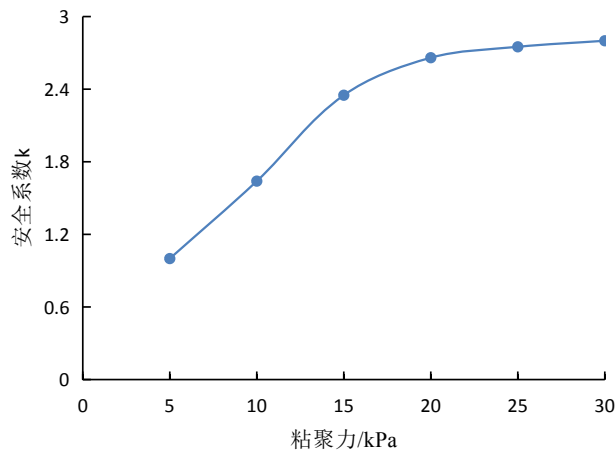


Figure 9. Development curve of safety coefficient with the increase of cohesion

图 9. 安全系数随粘聚力增大发展曲线

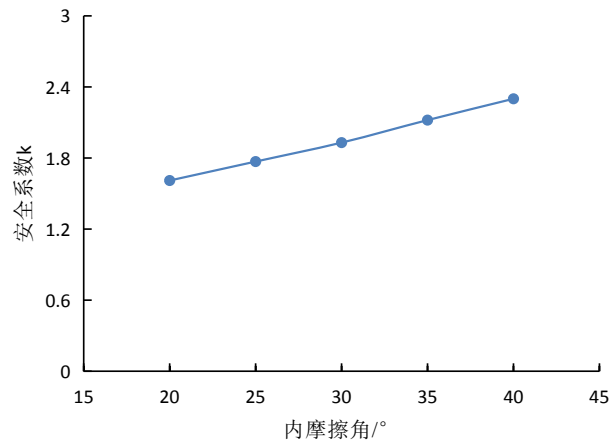


Figure 10. Development curve of safety coefficient with the increase of internal friction Angle of soil

图 10. 安全系数随土体内摩擦角增大发展曲线

4. 结论

本文在室内模型试验的基础上,建立了加筋三维网-锚杆防护下的边坡数值模型,通过分级加载,获得了边坡应力应变分布规律,并讨论了锚杆长度、边坡坡率、土体强度指标等对边坡稳定性影响。主要结论如下:

1) 在坡顶超载作用下,加筋三维网-锚杆防护下边坡的坡面水平位移为中部大、上下小的“膨胀”形,坡面竖向位移自坡顶向下逐渐减小。

2) 加筋三维网-锚杆防护结构具有良好的变形适应性,使边坡内保持良好的压应力状态。在坡顶超载作用下,锚杆轴力在轴线方向上呈“抛物线”型分布,锚杆轴力的最大值和所在位置随锚杆布设高度的降低而减少,并逐渐靠近坡面。

3) 边坡安全系数随锚杆长度增加而增大,但达到一定长度时,边坡安全系数增长很小;边坡安全系数随边坡角度增大而减小,随土体强度增加而增大。

基金项目

湖南省自然科学基金项目(2017JJ2087),浙江省交通科技项目(2017028, 2017033)浙江省交工集团科研项目(JGYF-2017-024),浙江建筑业技术创新项目(2018A03),浙江省建设科技项目(2018K050)。

参考文献

- [1] 肖成志,李雨润,王朋,等. 三维网垫植草护坡坡体稳定性数值分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 76-80.
- [2] 肖成志,孙建诚,刘熙媛,等. 三维土工网垫植草护坡性能试验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 96-102.
- [3] 隋明昊. 岩质高陡边坡锚杆-土工网垫喷播植草生态护坡结构稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [4] 嵇晓雷. 基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [5] 时伟,刘通,戚铎钟,等. 岩质生态边坡稳定性影响因素权重分析[J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36(2): 14-18.
- [6] 卢涛. 岩质边坡锚杆-土工网垫喷播植草生态护坡植生层稳定性试验及数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [7] 王广月,王云. 土工格室生态边坡稳定性数值模拟分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(5): 924-933.
- [8] 肖衡林,王钊,张晋锋,等. 三维土工网垫设计指标的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1800-1804.