

加筋土高边坡的有限元分析

介玉新¹, 秦晓艳², 金鑫¹, 徐文杰¹, 王恩志¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京国电龙源环保工程有限公司, 北京 100039)

摘要 : 针对某土工格栅加筋土高边坡的初步设计断面进行有限元计算分析, 改变回填土变形模量、泊松比以及土工格栅的变形模量进行计算。计算结果表明 : 土工格栅最大轴力的大小在每级边坡内部沿竖向的分布近似成三角形或梯形, 在整体上的分布则呈锯齿形, 轴力突变主要发生在两级边坡相邻的位置。回填土变形模量的变化对填筑体竖向位移的影响较大, 而对水平位移的影响相对较小, 较小的回填土变形模量会导致边坡位移增大以及格栅轴力增加, 但对其分布基本没有影响; 格栅变形模量的变化主要影响格栅轴力的大小, 格栅变形模量降低时轴力会相应降低, 变形模量增加时轴力也会相应增大。在实际工程中适当降低筋材的变形模量, 有利于减小筋材受力, 降低筋材破坏的风险。

关键词 : 加筋土边坡; 土工合成材料; 土工格栅; 变形模量; 有限单元法

中图分类号 : TU457 **文献标志码** : A **文章编号** : 1006-7647(2012)01-0083-04

FEM analysis of high reinforced soil slopes // JIE Yu-xin¹, QIN Xiao-yan², JIN Xin¹, XU Wen-jie¹, WANG En-zhi¹ (1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Guodian Longyuan Environmental Engineering Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract : A geogrid-reinforced soil slope is calculated and analyzed by use of the finite element method (FEM). In the calculation, the deformation modulus and Poisson's ratio of the backfill as well as the deformation modulus of the geogrid are altered. The results show that the vertical distribution of the maximum axial force of the geogrid in each step of the slope is approximately in a shape of triangle or trapezoid, while the overall distribution is in a shape of zigzag. The abrupt change of the axial force occurs at the adjacent position of two steps of the slope. The variation of the deformation modulus of the backfill has greater influence on the vertical displacement of the slope than on the horizontal displacement. Much lower deformation modulus of the back fill may induce the increase of the slope displacement and the axial force of the geogrid, and it has little influence on their distribution patterns. The variation of the deformation modulus of the geogrid mainly affects the magnitude of its axial force. The decrease of the deformation modulus leads to the decrease of the axial force in the geogrid, and vice versa. Therefore, appropriate reduction of the deformation modulus of the geogrid in practice is helpful in reducing the forces acting on the geogrid and its failure risks.

Key words : reinforced soil slope; geosynthetics; geogrid; deformation modulus; FEM

汶川地震在我国西南地区引发了大量地质灾害, 同时对安全避难场所的需求也提出了新的要求。削山填沟工程既能在一定程度上消除地质灾害的危害, 又能提供安全避难平台, 在西南山区具有较大的应用前景。随着经济建设的发展, 也可以用削山填沟的方法来增加建设用地或修建机场、道路等, 因此西南地区的高填方工程屡见不鲜^[1-3]。高填方工程往往采用加筋的方法修建较陡的边坡, 以尽量减少土地占用。加筋材料一般采用土工合成材料, 其中土工格栅的应用最为普遍。目前加筋土坡的高度已

达 60 m 以上, 加筋土高边坡对填方和土工合成材料本身都提出了挑战^[4]。

对一般的边坡工程来说, 可以只进行稳定分析。常用的稳定分析方法有极限平衡法、极限分析法和强度折减法^[5-11]。但是对于加筋土高边坡来说, 由于填方高度较大, 土和筋材的变形也会比较大, 除了用常规的极限平衡法进行稳定分析外, 也有必要进行应力应变分析, 以估算填方施工中的受力变形情况, 为设计和施工监测服务。本文以西南某地区削山填沟工程为背景, 用有限元方法分析加筋土高边

坡的受力变形情况,改变回填土和筋材的变形模量,以及回填土的泊松比,研究参数变化对边坡和筋材本身受力变形的影响。

1 工程概况和有限元计算结果

图 1 为某削山填沟工程中涉及的两个加筋土边坡的初步设计断面。填方工程下部为堆石混凝土挡土坝,坡度 1:0.8;上部为土工格栅加筋土边坡。两断面边坡总高度分别为 150 m(断面 A)和 90 m(断面 B)。其中下部堆石混凝土坝高分别为 90 m(断面 A)和 50 m(断面 B),上部加筋土边坡高度分别为 60 m(断面 A)和 40 m(断面 B)。加筋土边坡每 20 m 高度分一级,各级加筋土边坡坡度为 1:0.6,相邻两级边坡之间的平台宽度为 10 m。

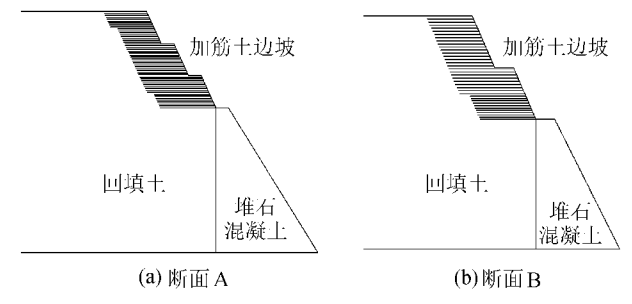


图 1 边坡初步设计断面

土工格栅考虑采用青岛旭域公司的 HDPE 单向土工格栅。断面 A 拟采用 EG170R 格栅,下部 10 m 竖向间距 30 cm,其余间距 40 cm,一共 158 层。断面 B 采用 EG170R 和 EG130R 两种规格,土工格栅竖向间距 40 cm,一共 100 层,由下到上依次为 EG170R (25 层)和 EG130R (75 层)。

对边坡的有限元计算采用 Abaqus 商业软件。回填土和堆石混凝土采用 Drucker-Prager 模型,其中回填土采用附近山体开挖的土石,密度 2.1 g/cm^3 ,变形模量 100 MPa,泊松比 0.30,黏聚力 0 kPa,内摩擦角 35° ;堆石混凝土密度 2.4 g/cm^3 ,变形模量 20 GPa,泊松比 0.20,黏聚力 1 MPa,内摩擦角 45° 。在回填土与堆石混凝土之间用变形模量较低的实体单元(变形模量取为 10 MPa)近似模拟接触问题,其他参数与回填土相同。由于接触问题只对局部有影响,这种简化处理不会影响上部加筋土边坡的计算结果。填土下面的基岩变形模量 10 GPa,泊松比 0.22。

土工格栅采用线弹性模型,变形模量 1000 MPa,泊松比 0.2。计算中用 Truss 单元(即桁架单元,也就是杆单元)模拟土工格栅。土工格栅与填土之间的相互关系用软件中的嵌入功能实现,这种处理方法相当于钢筋混凝土计算中的组合式方法,也相当于应变比例系数为 1 的等效附加应力法^[12-13],即认

为筋土之间变形协调。这种处理方法没有考虑格栅与土之间的滑移,可能会高估格栅对土的约束作用,但它减少了筋材与土之间的接触面单元,使得计算大为简化。两个断面的位移计算结果见图 2 和图 3(负值表示位移方向向下,下同)。格栅轴力的计算结果见图 4。断面 A 从上到下 3 级边坡坡底的最大轴力分别为 15.10 kN/m、26.14 kN/m、51.18 kN/m,断面 B 从上到下两级边坡坡底的最大轴力分别为 13.76 kN/m 和 43.06 kN/m。

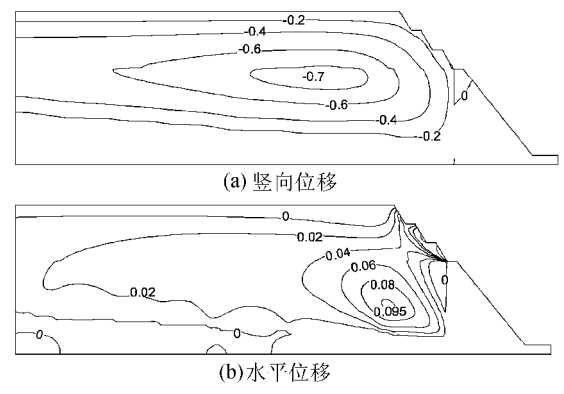


图 2 断面 A 位移分布等值线(单位:m)

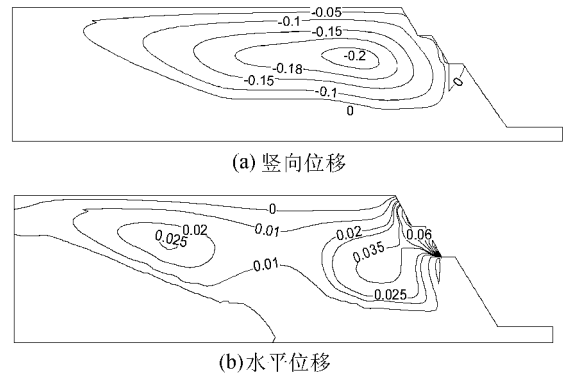


图 3 断面 B 位移分布等值线(单位:m)

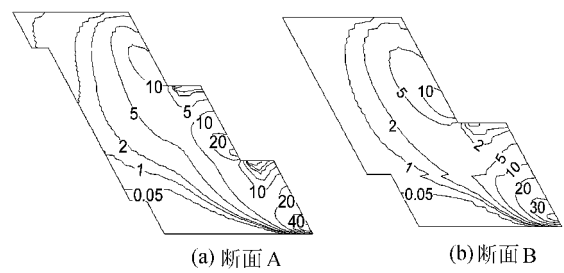


图 4 格栅轴力分布等值线(单位:kN/m)

从图 2 和图 3 可以看出填筑体的最大竖向位移大约在一半坡高处,符合边坡和土石坝变形的一般规律。土工格栅最大轴力的大小在竖向的分布呈锯齿形,突变位置主要发生在两级边坡相邻的位置。就每一级边坡来说,格栅最大轴力则大致成三角形或梯形分布,也符合筋材轴力的分布规律。每层筋材中最大轴力的位置分布在坡面附近,主要原因是坡面处边坡的水平应变较大,使得相应位置格栅的

变形和轴力都比较大。

2 回填土变形模量对边坡受力变形的影响

改变第 1 节计算中回填土的变形模量 ,从 100 MPa 分别变为 80 MPa ,50 MPa ,30 MPa ,其他条件不变 ,研究回填土变形模量对边坡和格栅受力变形的影响。计算结果见表 1 和图 5。不失一般性 ,这里及后面的分析均以断面 A 为代表。

表 1 不同回填土变形模量下边坡整体的计算结果

回填土变形模量/MPa	竖直方向最大应力/MPa	水平方向最大应力/MPa	竖直方向最大位移/m	水平方向最大位移/m
100	3.35	1.19	-0.73	0.20
80	3.36	1.19	-0.92	0.22
50	3.38	1.20	-1.48	0.26
30	3.41	1.21	-2.49	0.31

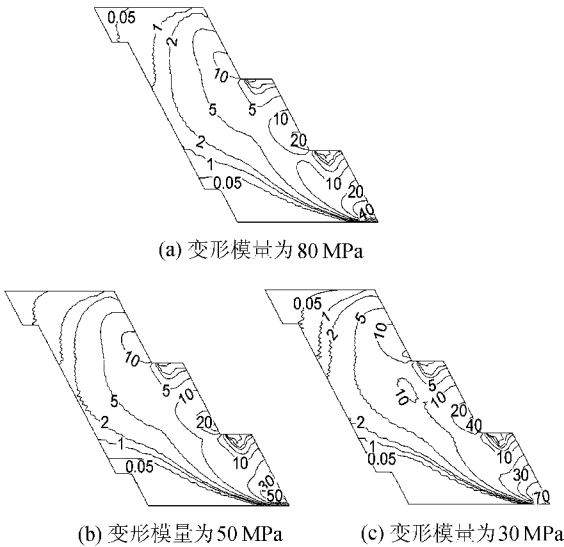


图 5 不同回填土变形模量下断面 A 的格栅轴力分布等值线(单位 kN/m)

从计算结果可以看出 ,回填土变形模量的变化对填筑体整体应力的影响不大 ,主要影响填筑体的位移。其中对竖向位移的影响较大 ,而对水平位移的影响相对较小。回填土变形模量的变化对格栅轴力分布基本没有影响 ,主要影响轴力的大小。回填土变形模量为 80 MPa ,50 MPa ,30 MPa 时格栅轴力相对 100 MPa 时的变化率分别为 11% ,36% ,60% ,与水平位移的变化率基本一致 ,表明较小的回填土变形模量会导致筋材轴向应力的增加。

3 回填土泊松比对边坡受力变形的影响

改变第 1 节计算中回填土的泊松比 ,从 0.30 分别变为 0.25 和 0.35 ,其他条件不变 ,研究回填土泊松比对边坡和格栅受力变形的影响。计算结果表明 ,泊松比的变化同样对边坡的应力影响不大 ,而对竖向位移和水平位移都有一定程度的影响。泊松比为 0.25 时 ,最大竖向位移为 -0.83 m ,最大水平位移

为 0.18 m ;泊松比为 0.35 时 ,最大竖向和水平向位移分别为 -0.62 m 和 0.27 m。泊松比增大使得体积模量增加 ,从而也能减小竖向变形。但泊松比增大同时也使得水平位移相应增加。

不同泊松比得到的格栅轴力分布见图 6。泊松比为 0.25 时断面 A 从上到下 3 级边坡坡底的最大轴力分别为 15.39 kN/m ,26.63 kN/m 和 54.50 kN/m ;泊松比为 0.35 时分别为 14.59 kN/m ,26.05 kN/m 和 49.23 kN/m。泊松比在局部范围的变化对筋材轴力大小和分布的影响并不显著。

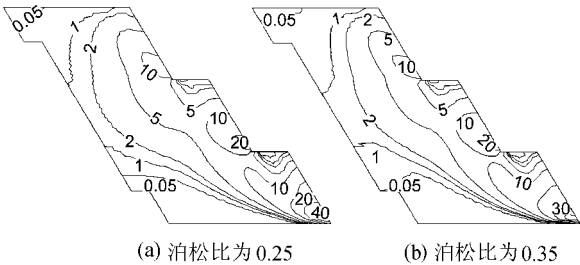


图 6 不同回填土泊松比下断面 A 的格栅轴力分布等值线(单位 kN/m)

4 土工格栅变形模量对边坡受力变形的影响

改变第 1 节计算中土工格栅的变形模量 ,从 1 000 MPa 分别变为 500 MPa ,1 500 MPa ,2 000 MPa ,其他条件不变 ,研究土工格栅变形模量对边坡和格栅受力变形的影响。计算结果见表 2 和图 7。可以看出

表 2 不同土工格栅变形模量下边坡整体的计算结果

土工格栅变形模量/MPa	竖直方向最大应力/MPa	水平方向最大应力/MPa	竖直方向最大位移/m	水平方向最大位移/m
500	3.35	1.19	-0.73	0.29
1 000	3.35	1.19	-0.73	0.20
1 500	3.35	1.19	-0.73	0.16
2 000	3.35	1.19	-0.73	0.13

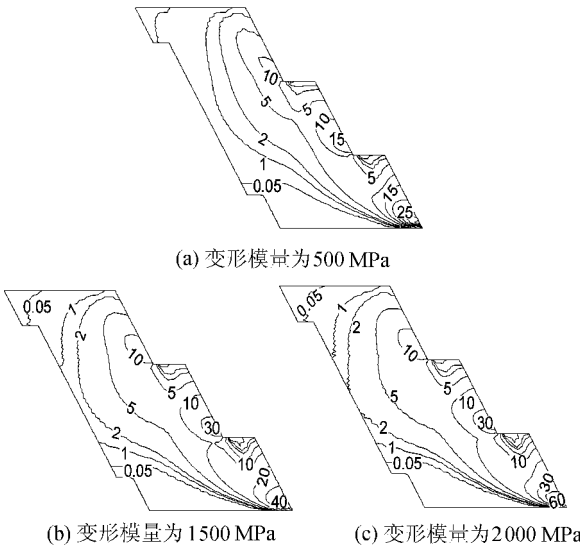


图 7 不同土工格栅变形模量下断面 A 的格栅轴力分布等值线(单位 kN/m)

出格栅变形模量的变化对填筑体整体的应力和竖向位移基本没有影响,主要影响水平位移的大小。对筋材轴力来说,格栅变形模量从 1 000 MPa 变为 500 MPa,1 500 MPa,2 000 MPa 时最大轴力的变化率分别为 - 27% ,17% ,30% ,即格栅变形模量降低时其中的轴力会相应降低,格栅变形模量增加时轴力也相应增大。

5 结 论

针对西南地区高填方工程的初步设计断面,采用有限元方法进行应力应变分析。计算结果表明填筑体的最大竖向位移大约在一半坡高处,符合边坡和土石坝变形的一般规律。土工格栅最大轴力的大小在每级边坡内部沿竖向的分布近似成三角形或梯形,在整体上的分布则呈锯齿形,轴力突变主要发生在两级边坡相邻的位置。

改变参数进行计算,表明回填土变形模量的变化对填筑体整体应力基本没有影响,主要影响位移的大小,其中对竖向位移的影响较大,而对水平位移的影响相对较小;对格栅轴力来说,较小的回填土变形模量会导致格栅轴力增加,但对轴力的分布基本没有影响。此外,格栅变形模量的变化对填筑体整体的应力和竖向位移基本没有影响,主要影响格栅轴力的大小。格栅变形模量降低时其中的轴力会相应降低,变形模量增加时轴力也相应增大,因此,实际工程中在不损失强度和导致边坡严重变形的情况下,适当降低筋材的变形模量,有利于减小筋材受力,降低筋材破坏的风险。

参考文献：

[1] 王会成. 广西河池机场高填方施工技术[J]. 建筑施工, 2010, 33(11) :1123-1125.

[2] 陈明非, 叶世泉, 鲁玉忠. 土工格栅加筋土高陡坡路堤应用实践[J]. 人民黄河, 2010, 33(9) :141-142.

[3] 张发春. 土工格栅加筋土高挡墙现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4) :1-7.

[4] 介玉新. 加筋土高边坡及计算方法[J]. 工程地质学报, 2010, 18(增刊 1) :263-267.

[5] 张宏涛, 赵宇飞, 纪洪广, 等. 节理岩体边坡稳定上限分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2) :38-42.

[6] 李德亮, 石崇, 聂卫平, 等. 基于土性相关蒙特卡罗法的争岗滑坡堆积体可靠性分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(3) :317-322.

[7] 狄圣杰, 李晓敏, 魏樯. GRNN 在边坡稳定预测分析中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3) :80-83.

[8] 李智慧, 贾苍琴, 王贵和, 等. 水位骤降对边坡稳定性影响研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(S1) :86-90.

[9] 张玉, 张方方. 变水位多工况下大型渠道土质边坡的稳定分析[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1) :56-60.

[10] 李凯, 陈国荣. 基于滑移线场理论的边坡稳定性有限元分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2010, 38(2) :191-195.

[11] 周桂云. 基于强度折减的边坡稳定安全系数有限元迭代解法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3) :58-61.

[12] 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5) :614-616.

[13] 介玉新, 王乃东, 李广信. 加筋土计算中等效附加应力法的改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1) :129-132.

(收稿日期 2011-10-10 编辑 熊水斌)

(上接第 33 页)

[4] BULLARD J W. A three-dimensional microstructural model of reactions and transport in aqueous mineral systems[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2007, 15(7) :711-738.

[5] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Material Science Engineering, 1984, 68(2) :239-248.

[6] BENTZ D P, GARBOCZI E J. Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model[J]. Cement and Concrete Research, 1991, 21(2) :325-344.

[7] BENTZ D P, COVENY P, GARBOCZI E J. Cellular automation simulations of cement hydration and microstructure development[J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 1994, 2(4) :783-808.

[8] van BREUGEL K. Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cementbased materials: (II) applications[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(3) :522-530.

[9] STROEVEN M, STROEVEN P. SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8) :1299-1304.

[10] ZHENG Jian-jun, LI Chun-qing, ZHOU Xin-zhu. Thickness of interfacial transition zone and cement content profiles around aggregate[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(7) :397-406.

[11] STROEVEN M. Discrete numerical modelling of composite material[M]. Delft :Melnema, 1999.

[12] 郑建军, 庞宪委, 熊芳芳. 水泥浆体初凝时间预测的数值方法及其影响因素评价[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(7) :927-933.

[13] TORQUATO S. Random heterogeneous materials :microstructure and macroscopic properties[M]. New York :Springer-Verlag, 2001.

[14] ZHENG Jian-jun, XIONG Fang-fang, WU Zhi-min, et al. A numerical algorithm for the ITZ area fraction in concrete with elliptical aggregate particles[J]. Magazine of Concrete Research, 2009, 61(2) :109-117.

(收稿日期 2011-02-08 编辑 骆超)