

# Stability Analysis of Honeycomb Confined Subgrade Slope Based on ANSYS

Yong Sun<sup>1</sup>, Weigang Sun<sup>2</sup>, Jun Li<sup>3</sup>, Haiquan Liu<sup>4</sup>, Xianwei Cai<sup>1</sup>, Chuanhe Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

<sup>2</sup>Bada Road & Bridge, Ltd., Harbin Heilongjiang

<sup>3</sup>Zhongjian Silk Road Construction Investment Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>CCCC Highway Consultants, Beijing

Email: 222499876@qq.com

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 27<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

The slope stability of subgrade has an important influence on the road performance and safety. In order to study the effect of honeycomb constraint system of subgrade slope stability, the paper established the numerical model of slope stability analysis based on ANSYS, additional beehive constraint system before and after the contrast analysis of slope stability, and found when slope  $i = 1.5$ , after additional beehive constraints, the stability of the slope coefficient increased by 4.7% - 5.9%; when slope  $i = 1.0$ , the stability coefficient of slope increased by 15.8% - 20% after honeycomb constraint was added. Therefore, when the slope angle is small, that is, when the slope is steep, the stability of the slope can be significantly improved by adding honeycomb system. At the same time, the influence of rainfall and honeycomb structure size on slope stability was also studied. It was found that rainfall had a negative impact on slope stability, and the stability was improved after adding honeycomb. The height of the honeycomb system is positively correlated with the slope stability.

## Keywords

ANSYS, Honeycomb Constraints, Subgrade Slope, Slope, Honeycomb Height

# 基于ANSYS蜂巢约束路基边坡稳定性分析

孙 勇<sup>1</sup>, 孙维刚<sup>2</sup>, 李 俊<sup>3</sup>, 刘海权<sup>4</sup>, 蔡显威<sup>1</sup>, 王川和<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

<sup>2</sup>黑龙江省八达路桥建设有限公司, 黑龙江 哈尔滨

<sup>3</sup>中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安

<sup>4</sup>中交公路规划设计院有限公司, 北京

Email: 222499876@qq.com

收稿日期: 2019年3月5日; 录用日期: 2019年3月20日; 发布日期: 2019年3月27日

## 摘要

路基的边坡稳定性对道路的使用性能及安全性有着重要的影响。为了研究蜂巢约束系统对路基边坡稳定性的影响作用, 本文基于ANSYS建立了边坡稳定性分析的数值模型, 对比分析了边坡附加蜂巢约束系统前后稳定性差异, 发现在边坡坡度 $i = 1.5$ 时, 附加了蜂巢约束之后, 边坡的稳定性系数提升了4.7%~5.9%。在边坡坡度 $i = 1.0$ 时, 附加了蜂巢约束之后, 边坡的稳定性系数增加了15.8%~20%。由此可见, 在边坡角度较小, 即边坡较陡时, 附加蜂巢系统之后, 可以更为明显地提高边坡的稳定性; 同时还研究了降雨以及蜂巢结构尺寸对边坡稳定性的影响, 研究发现降雨对于边坡稳定性有不利影响, 附加蜂巢后稳定性提高; 蜂巢系统的高度与边坡稳定性正相关, 在控制成本的前提下应选用较高的蜂巢约束系统。

## 关键词

ANSYS, 蜂巢约束, 路基边坡, 坡度, 蜂巢高度

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

目前关于路基边坡稳定性分析的方法有很多, 例如由瑞典人彼得森(K.E. Petterson)提出的以极限平衡理论为基础的条分法和以弹塑性理论为基础的数值计算方法[1] [2] [3]。但土中应力 - 应变关系十分复杂, 随着有限元法的提出和发展, 越来越多的研究都基于有限元分析, 取得了不错的成果[4] [5] [6] [7] [8]。但是, 边坡稳定性的影响仍然是研究的重点, 而对于蜂巢约束系统对路基边坡稳定性的分析仍然不足。为了更好地研究蜂巢约束系统对路基边坡的稳定性影响, 本文基于 Drucker-Prager 弹塑性模型[9] [10] [11] [12] [13], 利用 ANSYS 建立路基边坡有限元模型, 对比附加蜂巢约束系统前后边坡滑动面以及稳定性的差别, 分析了蜂巢约束的高度与边坡稳定性关系。基于此研究, 能帮助我们更好地了解蜂巢约束在路基边坡中的作用, 这为附加约束系统的路基边坡施工提供了技术指导。

## 2. Drucker-Prager 弹塑性模型建立

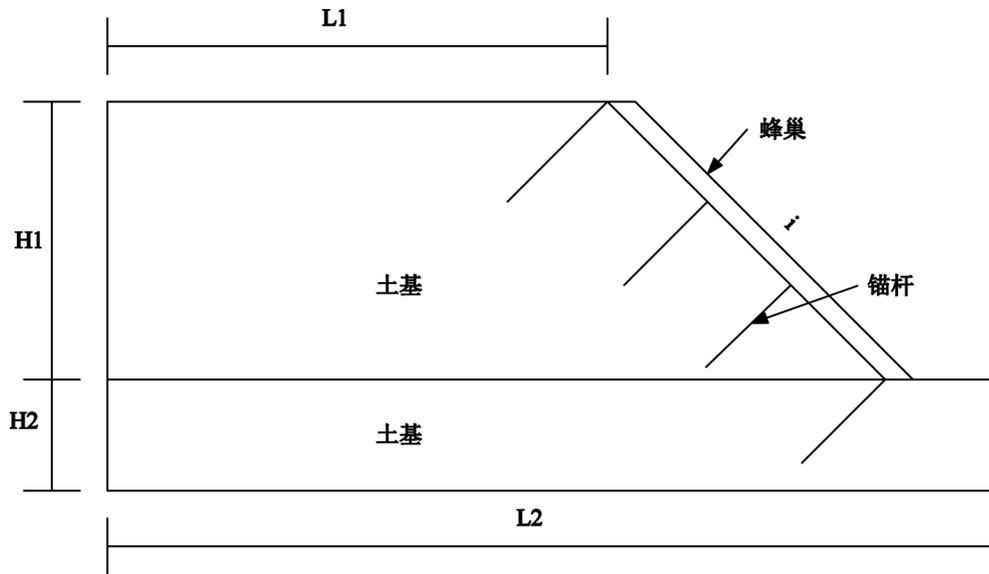
考虑路基的对称性, 取半幅路基结构进行分析。建立 ANSYS 数值计算模型如图 1 所示。在边坡上附加蜂巢约束系统, 蜂巢通过特定锚杆在边坡上固定。考虑到不同的路基高度及边坡角度, 建立了不同尺寸的分析模型, 并对比分析边坡附加蜂巢系统前后对路基稳定性及变形的影响。路基计算结构尺寸如表 1 所示。边坡坡度分别取  $i = 1.5$  及  $i = 1.0$ 。

模型材料参数见表 2, 包括土体材料参数、蜂巢及锚杆的材料参数。所建立的有限元模型如图 2 所示。边界条件为左侧对称约束, 底边全部约束, 右侧边全部约束。分析时采用缩减土体的粘聚力及内摩擦角, 来计算边坡的稳定性系数。

## 3. 蜂巢约束路基对边坡稳定性影响分析

### 3.1. 无蜂巢约束系统时的边坡稳定性分析

对于表 1 所示的 10 种工况, 在边坡没有蜂巢约束系统时进行了边坡稳定性分析。不同工况情况下的



**Figure 1.** Numerical calculation of model size  
**图 1.** 数值计算模型尺寸

**Table 1.** The model size  
**表 1.** 模型尺寸

工况	模型尺寸(i = 1.5)	工况	模型尺寸(i = 1.0)
GK-1	H1 = 2 m, H2 = 2 m	GK-6	H1 = 2 m, H2 = 2 m
	L1 = 10 m, L2 = 15.15 m		L1 = 10 m, L2 = 14.15 m
GK-2	H1 = 4 m, H2 = 2 m	GK-7	H1 = 4 m, H2 = 2 m
	L1 = 10 m, L2 = 18.15 m		L1 = 10 m, L2 = 16.15 m
GK-3	H1 = 6 m, H2 = 2 m	GK-8	H1 = 6 m, H2 = 2 m
	L1 = 10 m, L2 = 21.15 m		L1 = 10 m, L2 = 18.15 m
GK-4	H1 = 8 m, H2 = 2 m	GK-9	H1 = 8 m, H2 = 2 m
	L1 = 10 m, L2 = 24.15 m		L1 = 10 m, L2 = 20.15 m
GK-5	H1 = 10 m, H2 = 2 m	GK-10	H1 = 10 m, H2 = 2 m
	L1 = 10 m, L2 = 27.15 m		L1 = 10 m, L2 = 22.15 m

**Table 2.** Material parameters  
**表 2.** 材料参数

	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(MPa)	泊松比	粘聚力(KPa)	内摩擦角
土基	1800	40	0.35	30	28
蜂巢	高度(mm)	弹性模量(MPa)	泊松比		
	150	750	0.3		
锚杆	长度(mm)	直径(mm)	弹性模量(GPa)	泊松比	
	800	14	210	0.34	

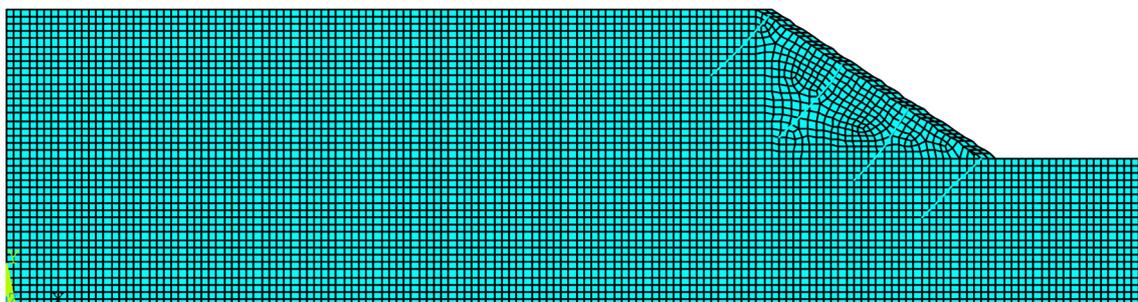


Figure 2. Finite element model

图 2. 有限元模型

边坡破坏滑动面如图 3 所示。从图中可以看出，在不同的边坡角度情况下，在路基高度较低时，边坡失稳的滑动面起自路基顶面而终于坡角处；而当路基较高时，边坡失稳的滑动面起自路肩至坡角处所构成的三角形区域，出现了三角形的滑移区。

不同边坡角度情况下，边坡稳定性系数与路基高度的关系见图 4 所示。可以看出，在边坡角度一定的情况下，路基边坡的稳定性系数与边坡的高度成正比，随着边坡高度的增加，边坡的稳定性系数降低；在路基高度一定的情况下，随着边坡角度的减小，边坡的稳定性增加。

### 3.2. 有蜂巢约束系统时边坡稳定性分析

对于表 1 所示的 10 种工况，在边坡附加了蜂巢约束系统时进行了边坡稳定性分析。不同工况情况下的边坡破坏滑动面如图 5 所示。从图中可以看出，在不同的边坡角度情况下，在附加了蜂巢系统之后，不同高度及不同角度情况下的边坡失稳滑动面与没有蜂巢系统的情况下相比发生了变化，滑动面的下缘一般出现在坡角下方，与没有蜂巢的情况相比，边坡的稳定性由于蜂巢的存在得到了提高。并且滑动面均通过路基顶面，没有出现三角形的滑移区。

不同边坡角度情况下，边坡稳定性系数与路基高度的关系见图 3~9 所示。在边坡附加蜂巢系统之后，在边坡角度一定的情况下，路基边坡的稳定性系数与边坡的高度成正比，随着边坡高度的增加，边坡的稳定性系数降低；在路基高度一定的情况下，随着边坡角度的减小，边坡的稳定性增加。

### 3.3. 蜂巢约束系统对边坡稳定性的影响分析

不同边坡坡度情况下，边坡附加蜂巢之后，边坡的稳定性系统如图 7 所示。在边坡坡度  $i = 1.5$  时，在附加了蜂巢之后，边坡的稳定性系数分别增加了 4.7%~5.9%。在边坡坡度  $i = 1.0$  时，在附加了蜂巢之后，边坡的稳定性系数分别增加了 15.8%~20%。由此可见，在边坡角度较小，即边坡较陡时，附加蜂巢系统之后，可以更为明显的提高边坡的稳定性。

不同的边坡坡度情况下，附加蜂巢约束系统(格栅)前后，路基顶面及边坡顶面的竖向变形如图 8~图 17 所示。从图中可以看出，在附加了蜂巢系统(格栅)之后，在路基顶面的竖向变形方面，蜂巢系统可以减小路基失稳滑动面区域内的路基顶面变形，而对滑动区域以外的路基顶面的竖向变形没有影响；在边坡顶面的竖向变形方面，蜂巢系统可以减小边坡顶部的竖向变形，尤其对边坡较陡的情况更为明显。在边坡坡度  $i = 1.0$  时，附加了蜂巢系统之后最大可以减小 14.8%的坡顶竖向变形。因此，在边坡较陡的情况下，附加蜂巢可以提高边坡的稳定性。

## 4. 降雨对蜂巢约束路基边坡稳定性的影响分析

水渗透路基中之后，会增加土的容重，减小土的粘聚力及内摩擦角，因而会影响到边坡的稳定性。

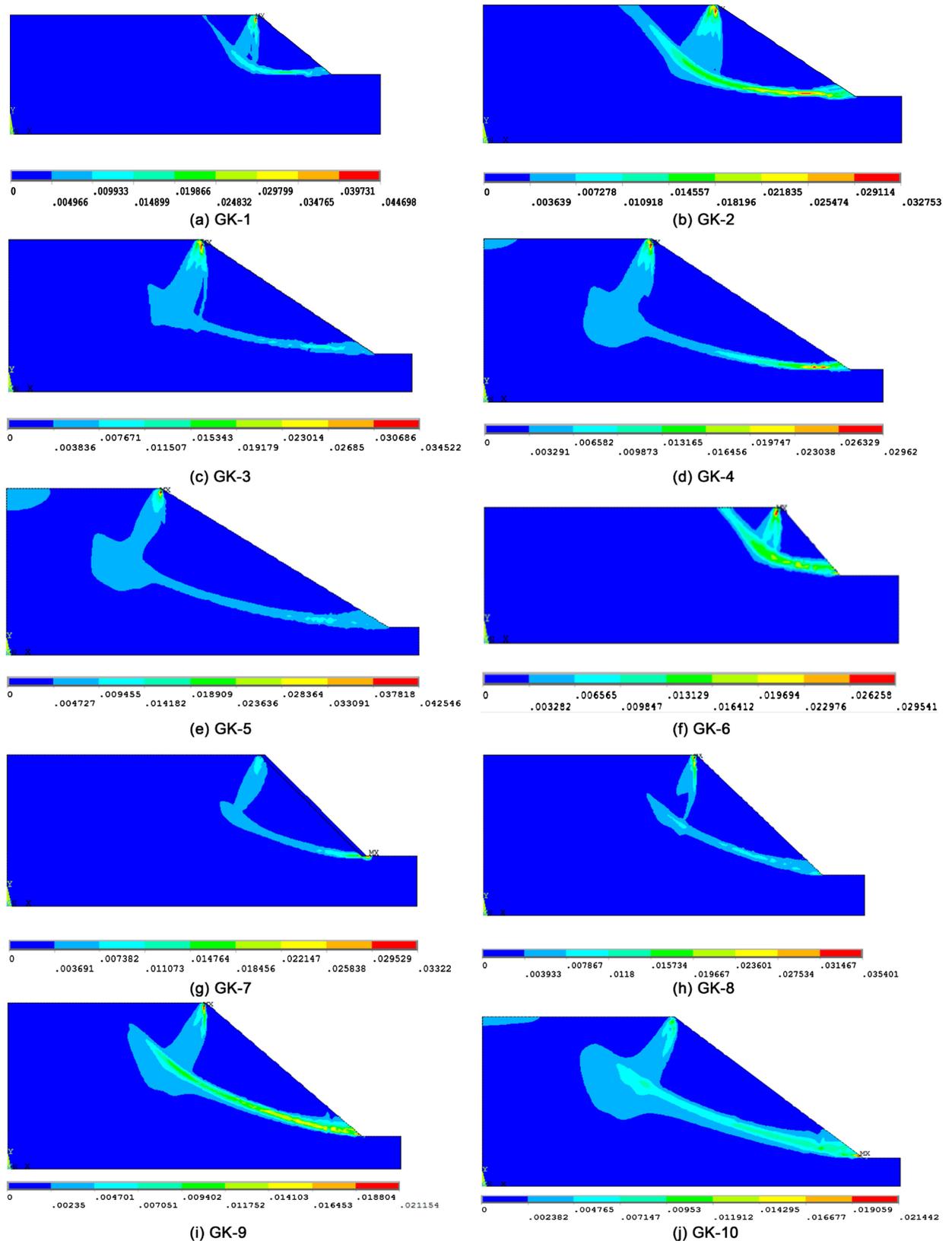


Figure 3. The sliding surface of a slope when it becomes unstable  
图 3. 边坡失稳时的滑动面

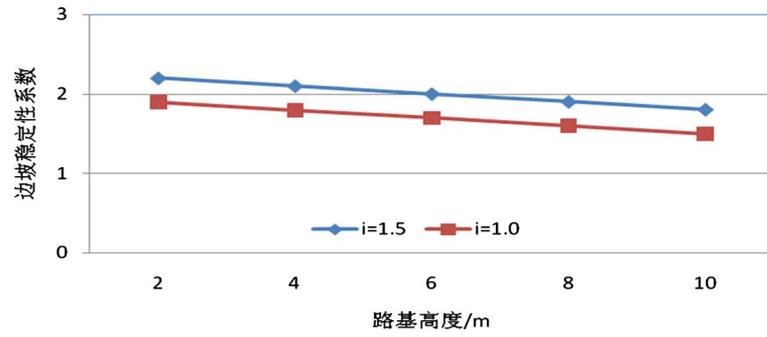


Figure 4. Relationship between subgrade slope stability and subgrade height  
 图 4. 路基边坡稳定性与路基高度的关系

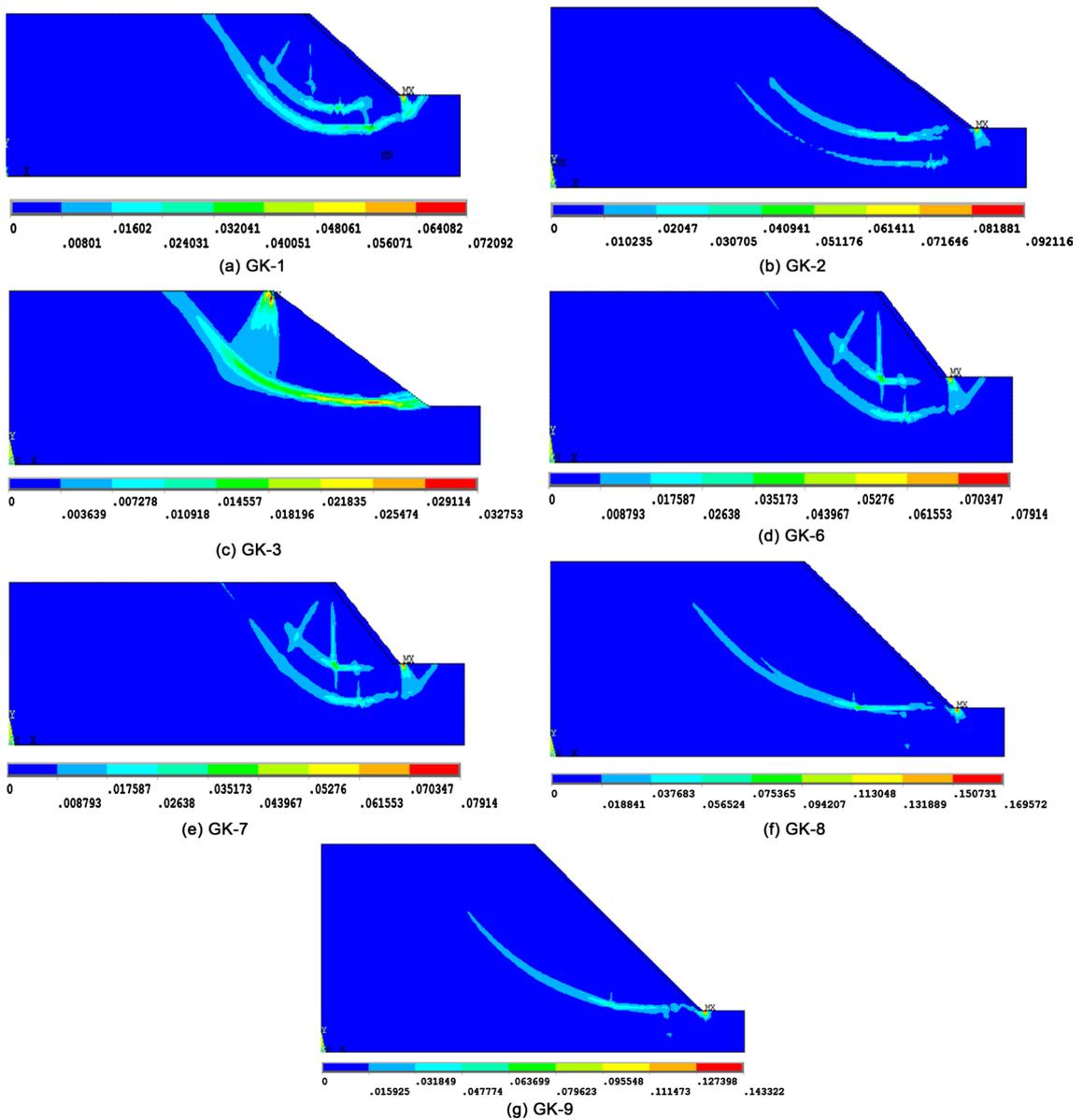


Figure 5. Slope instability sliding surface with honeycomb system  
 图 5. 有蜂巢系统时的边坡失稳滑动面

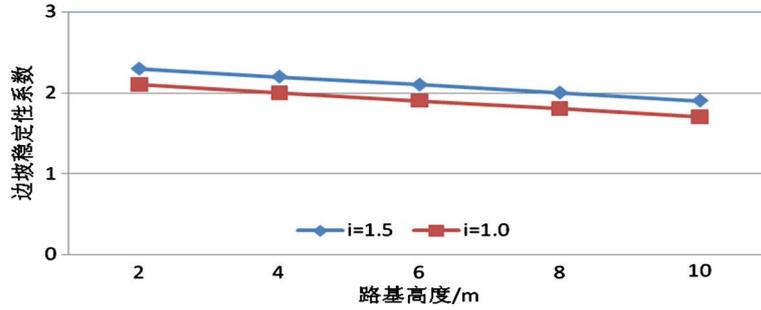


Figure 6. The relationship between subgrade slope stability and subgrade height with honeycomb system  
 图 6. 有蜂巢系统时路基边坡稳定性与路基高度的关系

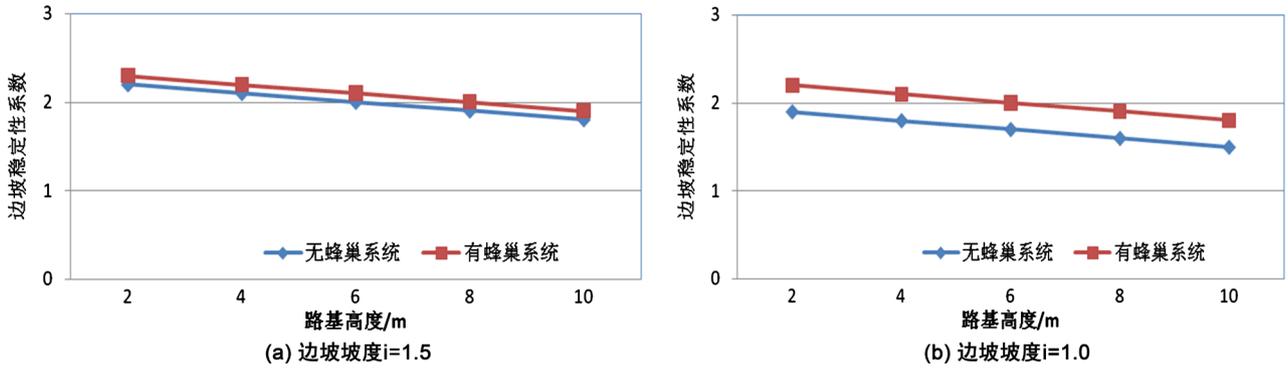


Figure 7. Influence of honeycomb restraint system on slope stability  
 图 7. 蜂巢约束系统对边坡稳定性的影响

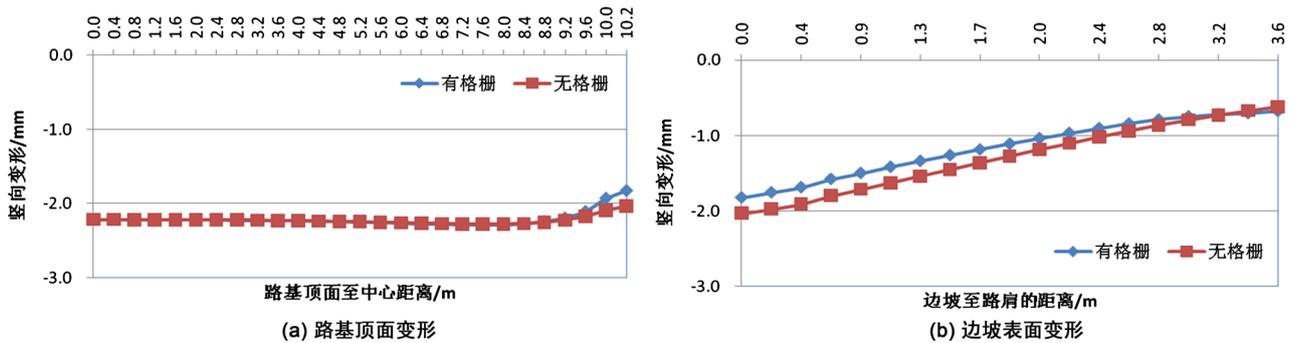


Figure 8. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-1)  
 图 8. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-1)

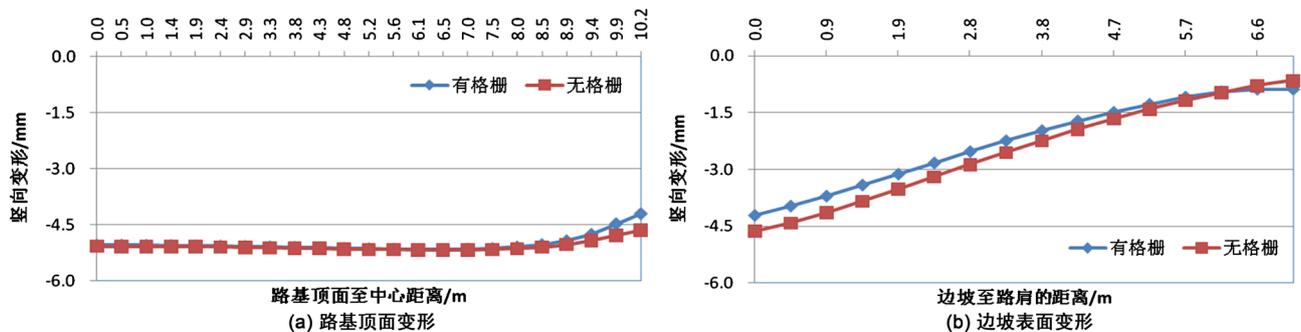


Figure 9. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-2)  
 图 9. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-2)

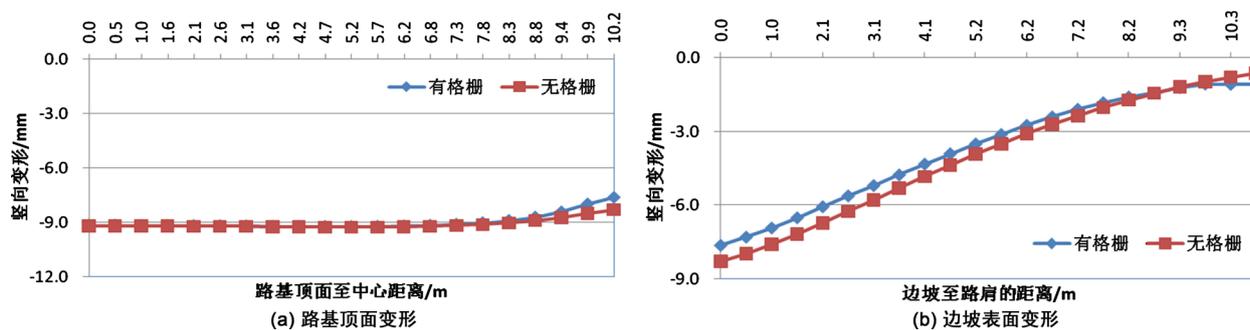


Figure 10. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-3)

图 10. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-3)

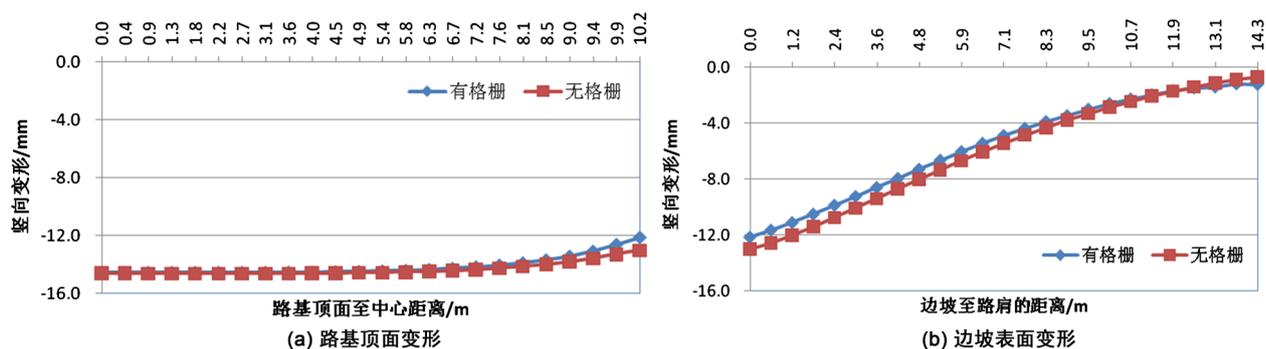


Figure 11. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-4)

图 11. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-4)

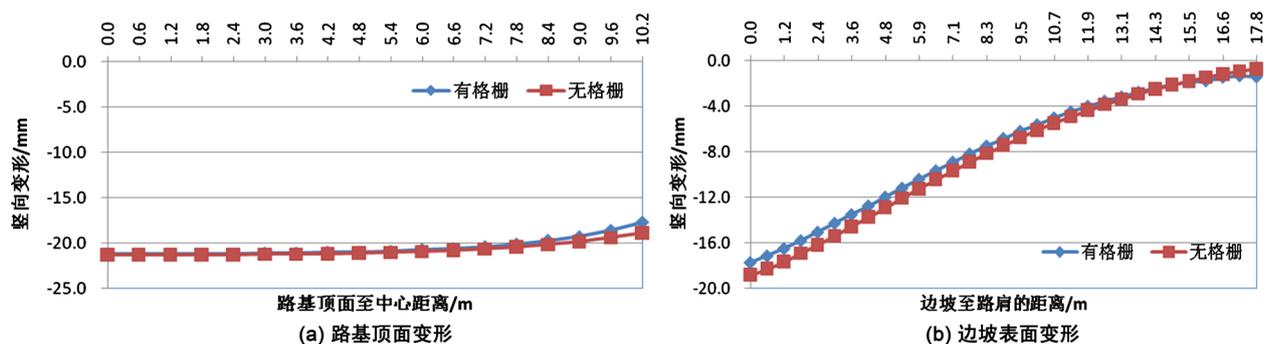


Figure 12. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-5)

图 12. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-5)

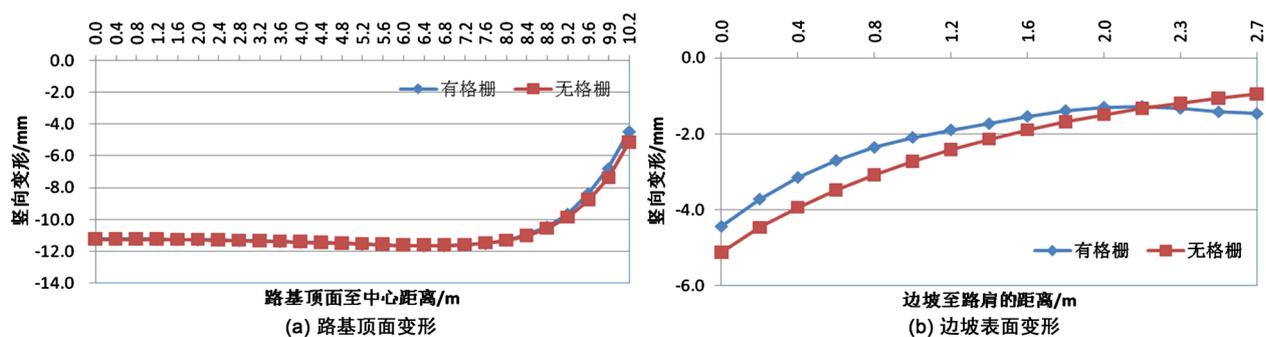


Figure 13. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-6)

图 13. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-6)

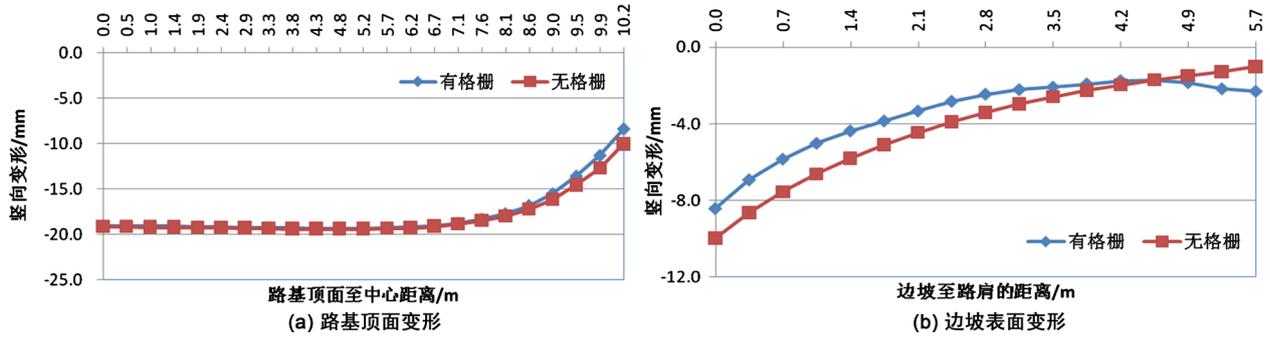


Figure 14. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-7)  
图 14. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-7)

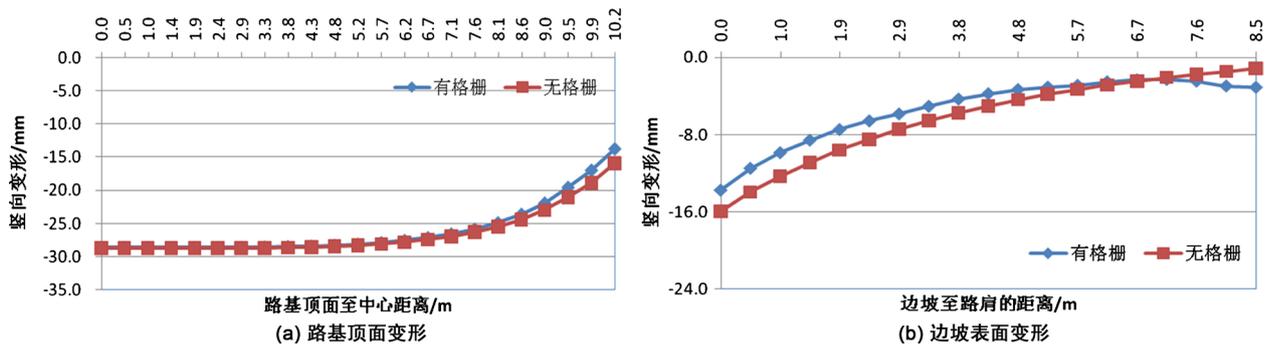


Figure 15. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-8)  
图 15. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-8)

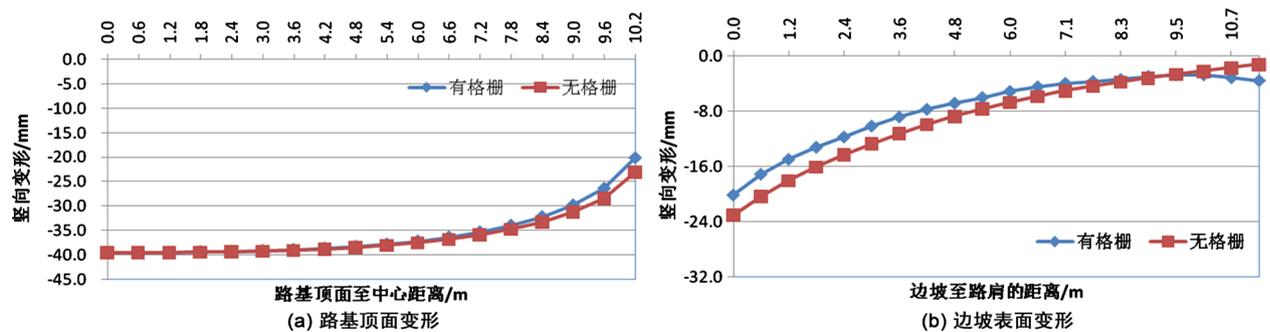


Figure 16. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-9)  
图 16. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-9)

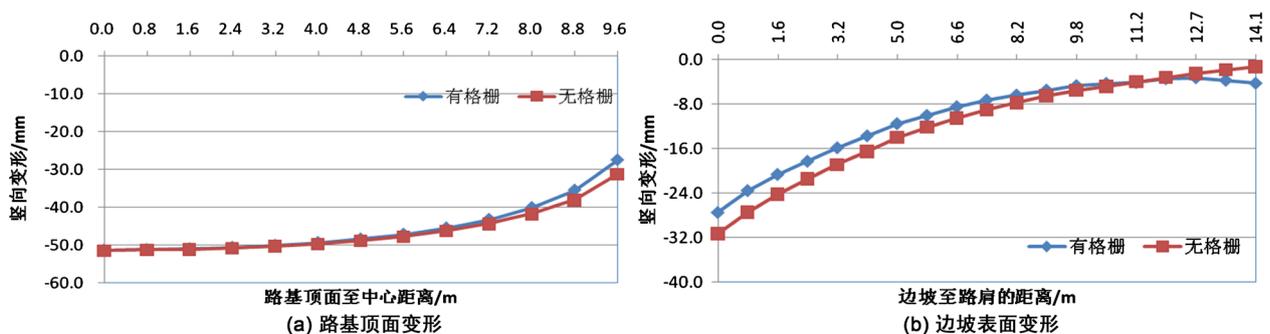


Figure 17. Influence of honeycomb restraint system on slope deformation (GK-10)  
图 17. 蜂巢约束系统对边坡变形的影响(GK-10)

本部分考虑路基浸水之后的情况，浸水后路基土的材料参数见表 3。

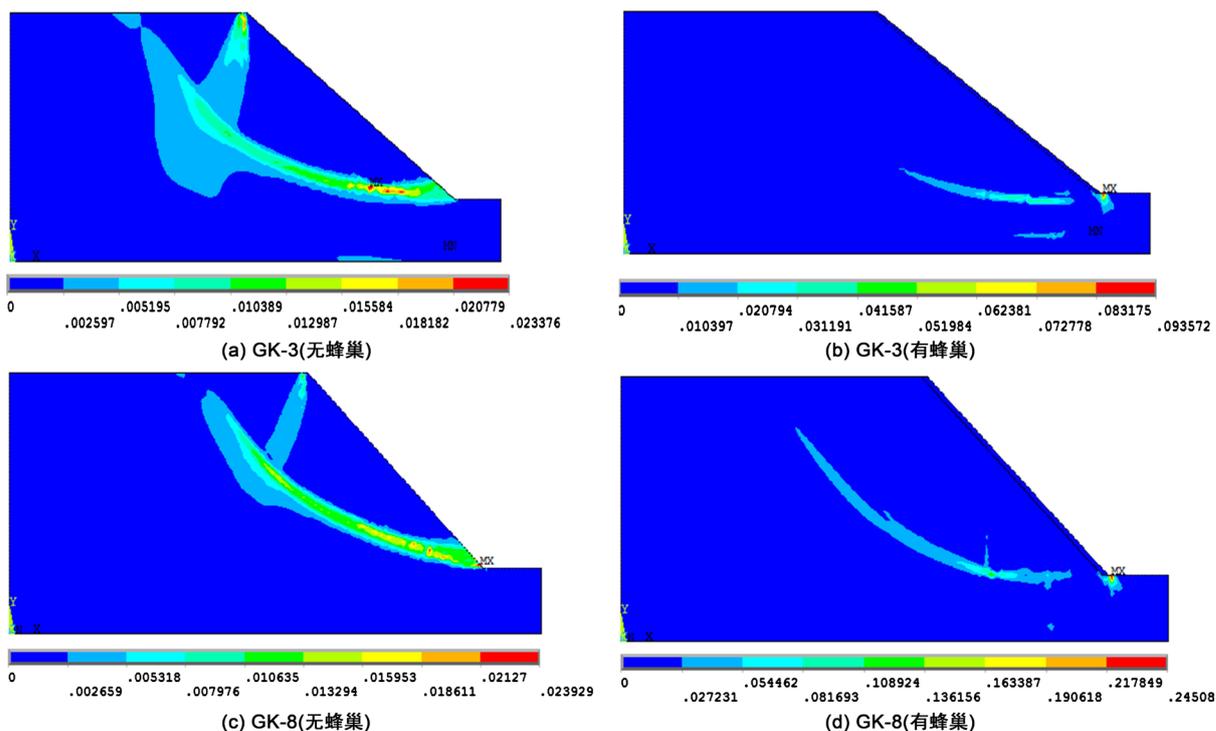
**Table 3.** Material parameters of subgrade soil soaked in water  
**表 3.** 浸水路基土的材料参数

密度(Kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(MPa)	泊松比	粘聚力(KPa)	内摩擦角
2300	40	0.35	20	19

对于高度 6 m 的路基进行了浸水路基的稳定性进行分析，分别分析了不同的边坡角度，即 GK-3 及 GK-8 两种工况。不同情况下的边坡滑动面如图 18 所示。浸水条件下边坡滑动面均为通过路基顶面及坡角的圆弧滑动面。浸水情况的路基的边坡稳定性系数见表 4。从表 4 中可以看出，路基浸水之后，路基土的容重增加，粘聚力及内摩擦角均减小，路基边坡的稳定性下降，发生路基失稳的可能性增加，这时通过在边坡附加蜂巢可以提高浸水路基的边坡稳定性。

**Table 4.** Slope stability coefficient of soil-soaked subgrade  
**表 4.** 浸水路基土的边坡稳定系数

	$i = 1.5$	$i = 1.0$
无蜂巢	1.2	1.1
有蜂巢	1.4	1.3



**Figure 18.** Slope instability sliding surface under different conditions

**图 18.** 不同情况下的边坡失稳滑动面

## 5. 蜂巢结构尺寸对边坡稳定性的影响分析

本部分分析蜂巢约束系统的高度对边坡稳定性的影响，选取蜂巢的高度分别为 5 cm、10 cm、15 cm、

20 cm 进行仿真分析。选取前述的工况 8 进行计算。不同蜂巢高度时得到的边坡失稳滑动面如图 19 所示。不同高度的蜂巢系统情况下，边坡失稳的滑动状态相同。

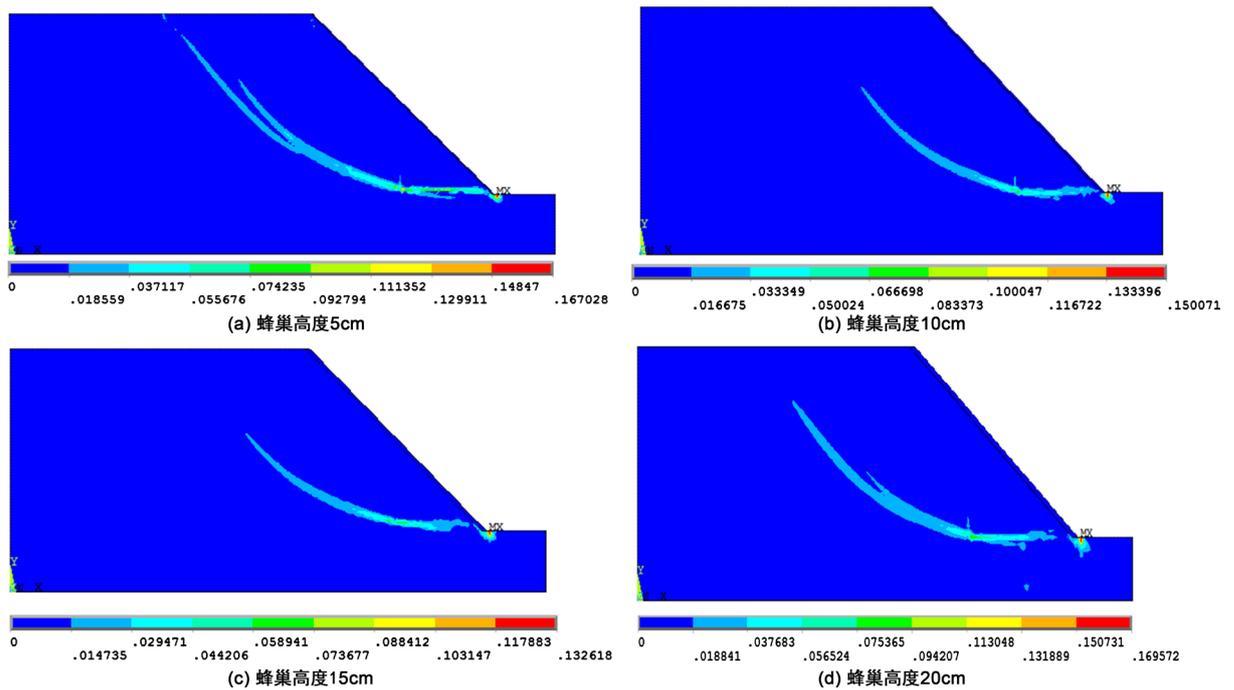


Figure 19. Slope instability sliding surface at different honeycomb heights  
图 19. 不同蜂巢高度时的边坡失稳滑动面

边坡稳定性系数与蜂巢系统高度的关系如图 20 所示。从图中可以看出，在蜂巢高度为 5 cm 时，蜂巢对边坡的稳定性没有加强作用，这时与没有蜂巢系统时的边坡稳定性系数相同，随着蜂巢高度的增加，边坡的稳定性系数呈现线性的增加趋势，因此在考虑边坡稳定的情况下，在参照蜂巢系统材料成本的前提下，应尽量选用较高的蜂巢约束系统，这样可以取得较好的边坡稳定效果。

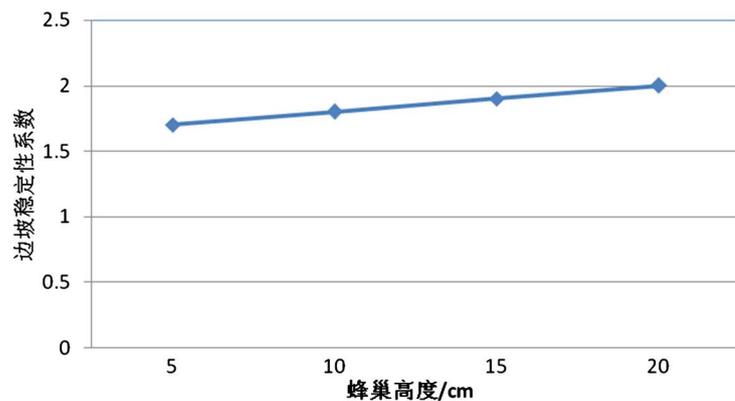


Figure 20. Relationship between slope stability coefficient and honeycomb height  
图 20. 边坡稳定性系数与蜂巢高度的关系

## 6. 结论

本文建立了边坡稳定性分析的数值模型，对比分析了边坡附加蜂巢约束系统对于边坡稳定性的影响。

分析了不同路基高度、不同边坡角度及浸水情况对路基稳定性的影响规律。对比分析了边坡失稳滑动面的变化及路基竖向变形的变化规律。

1) 对比无约束的边坡, 边坡附加蜂巢约束系统后, 边坡失稳滑动面由坡脚处移动到坡脚前, 并且滑动面均通过路基顶面, 没有出现三角形的滑移区。同时, 边坡坡度  $i = 1.5$  时, 边坡的稳定性系数分别增加了 4.7%~5.9%; 在边坡坡度  $i = 1.0$  时, 边坡的稳定性系数分别增 15.8%~20%, 边坡的稳定性有明显提高。

2) 其次, 研究发现, 蜂巢系统可以减小路基失稳滑动面区域内的路基顶面变形, 而对滑动区域以外的路基顶面的竖向变形没有影响, 尤其对边坡较陡的情况更为明显。在边坡坡度  $i = 1.0$  时, 附加了蜂巢系统之后最大可以减小 14.8%的坡顶竖向变形。

3) 最后, 在研究蜂巢高度对边坡稳定性影响时发现, 在蜂巢高度为 5 cm 时, 蜂巢对边坡的稳定性没有加强作用, 这时与没有蜂巢系统时的边坡稳定性系数相同, 随着蜂巢高度的增加, 边坡的稳定性系数呈现线性的增加趋势, 因此在考虑边坡稳定的情况下, 在参照蜂巢系统材料成本的前提下, 应尽量选用较高的蜂巢约束系统。

## 参考文献

- [1] 土工材料行业发展趋势[J]. 水利水电技术, 2010, 41(6): 86.
- [2] 袁启旺. 复杂工况边坡稳定分析的 LEM 法与 FEM 法对比[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 44-49.
- [3] 王刚. 基于有限元应力积分剩余推力等安全系数法的岩体边坡稳定分析研究[D]: [硕士学位论文]. 太原市: 太原理工大学, 2015.
- [4] 王亮. 高陡边坡有限元强度折减法分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(10): 70-73.
- [5] 罗光财, 陈淼权, 危春华, 雍邦, 杨勇. 强降雨下软弱高陡边坡安全性评估方法研究[J]. 土工基础, 2018, 32(5): 532-535+558.
- [6] 奚新定. 强度折减法在山区高速公路边坡稳定性分析中应用研究[J]. 北方交通, 2018(9): 63-66.
- [7] 蒋水华, 姚池, 杨建华, 姜清辉, 黄劲松. 基于模型修正的空间变异边坡可靠度分析方法[J]. 工程力学, 2018, 35(8): 154-161.
- [8] 王新. 基于二维随机场理论的非均质边坡稳定分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [9] 刘晓冬, 韩俐伟. 蜂巢约束系统——新型生态土工合成材料在工程中的应用[J]. 化学工程师, 2018, 32(2): 60-63+71.
- [10] 邓帮, 李旋. 基于弹塑性扩展有限元的裂隙边坡稳定性分析[J]. 山西建筑, 2018, 44(6): 74-76.
- [11] 梁竞, 郑盛业. 有限元法在膨胀土边坡支护设计中的应用[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(02):16-20.
- [12] 龚峻松, 程轶康, 吴小文, 廖泽平. 基于有限元法与极限平衡法的山区深挖路堑边坡施工安全性分析[J]. 中外公路, 2016, 36(4): 51-55.
- [13] 吴祥. 基于三维有限元法的边坡抗滑桩设计优化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)