

文章编号:1673-2049(2008)01-0049-06

# 基于 MINDLIN 解的边坡变形计算方法

魏焕卫<sup>1,2</sup>, 贾强<sup>2</sup>, 陈建峰<sup>1</sup>, 孙剑平<sup>2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 山东建筑工程学院 工程鉴定加固研究所, 山东 济南 250014)

**摘要:**通过对开挖荷载的模拟,使得开挖后土体的受力和变形满足弹性半无限体的要求。基于弹性半无限体的 MINDLIN 应变解,首次推导出基坑边坡变形的理论解,并利用该解研究了不同施工步数条件下基坑边坡侧向变形和竖向变形的规律,并据此提出了边坡加固方法和施工措施。研究表明:不同的施工开挖步数条件不但影响边坡的最大侧向变形及其分布,而且还影响边坡的破坏形式;与有关实测数据比较,该方法在计算边坡变形方面合理、实用。

**关键词:**开挖荷载;应力状态;MINDLIN 解;侧向变形;竖向变形;边坡加固

**中图分类号:**TU443

**文献标志码:**A

## Calculation Method of Slope Deformation Based on MINDLIN Solution

WEI Huan-wei<sup>1,2</sup>, JIA Qiang<sup>2</sup>, CHEN Jian-feng<sup>1</sup>, SUN Jian-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Engineering Accreditation and Reinforcement, Shandong Institute of Architecture and Engineering, Jinan 250014, Shandong, China)

**Abstract:** Through analysis of simulation for excavation load, the force and deformation would meet the demands of elasticity semi-infinite solid. And the theory solution of soil slope deformation was deduced on the basis of MINDLIN strain solution. Authors made a study of the regularity by considering construction steps. Meanwhile some measures are put forward for the reinforcement and construction of slope. The results show that the different construction steps affect not only the value of the maximum deformation of slope and its distribution but also its failure model. The rationality of the results is proved after comparing with the field measurements and FEM calculation.

**Key words:** excavating load; state of stress; MINDLIN solution; lateral deformation; vertical deformation; slope reinforcement

## 0 引言

基坑边坡的破坏首先表现为变形的增大,进而出现倒塌或滑移现象。为了保证基坑的安全,往往需要对基坑侧壁进行支护,减小基坑边坡的变形。

但目前对于基坑边坡的研究绝大部分集中在边坡的稳定性方面,而对基坑变形的研究则主要集中在假定土压力模式情况下的支挡结构的变形,各国对边坡土体自身的变形理论研究很少,少量的研究主要集中在工程数值方法,如有限单元法<sup>[1-3]</sup>、根据实测

收稿日期:2007-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(50508030);教育部高等学校博士学科点专项科研项目(20020247003);

上海市科委重点基础研究项目(02DJ14026)

作者简介:魏焕卫(1974-),男,山东聊城人,山东建筑工程学院讲师,同济大学工学博士研究生,E-mail:wei-huanwei@sdaie.edu.cn。

进行的经验估算。工程实践表明:不同的施工工况也会影响基坑边坡土体的变形。如何提出边坡土体变形的理论方法则是笔者研究的主要内容,基于 MINDLIN 理论<sup>[4]</sup>的边坡变形解析解研究了考虑施工工况条件下边坡土体变形的规律,并提出了合理的加固设计方法和工程措施以保证边坡和周围建筑物的安全。

## 1 边坡侧向和竖向变形计算

### 1.1 边坡初始应力状态的模拟

对土体中任一断面 n-n, 由于受到土体自重产生的 2 个大小相等、方向相反的平衡力(内力  $P_1$  和  $P_2$ )作用, 该平衡的力即为静止土压力, 如图 1 所示。在静止土压力作用下, 土体中没有除自重应力场之外的其他应力场存在。平衡力取值为

$$P_1 = P_2 = K_0 \gamma z \quad (1)$$

式中:  $K_0$  为土体的静止土压力系数;  $\gamma$  为土体重度;  $z$  为土体深度。

如果在断面 n-n 的左侧施加一与  $P_1$  大小相等、方向相同的外力  $P'_2$  (图 1)。按应力叠加原理, 由于力的抵消使得断面 n-n 只受到  $P_1$  的作用, 而其右侧不受力, 这种状态可以用来模拟基坑边坡刚开挖时的工况。

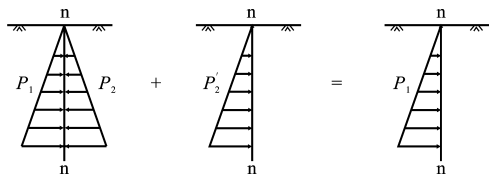


图 1 边坡应力状态模拟分析

Fig. 1 Simulation Analysis of Stress State of Slope

### 1.2 边坡侧壁侧向变形理论

由图 1 可以看出: 边坡刚开挖(变形未发生前)的应力状态可以模拟为 2 个应力状态的叠加, 即内平衡力  $P_1$ 、 $P_2$  和外力  $P'_2$ 。由于内平衡力  $P_1$ 、 $P_2$  本身并不能使土体产生变形, 开挖后使土体产生变形的只有外力  $P'_2$ 。按照 MINDLIN 理论: 弹性半无限体内深度  $c$  处作用水平向集中力  $P$  (图 2), 则离地面深度  $z$

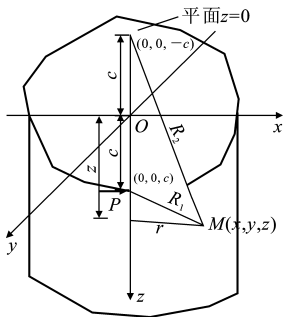


图 2 水平向集中力下的 MINDLIN 应变解

Fig. 2 MINDLIN Strain Solution Under Horizontal Concentrated Load

处任一点  $M$  的侧向、竖向变形分别为

$$u_{hh} = P I_{hh} \quad (2)$$

$$u_{vh} = P I_{vh} \quad (3)$$

式中:  $I_{hh}$ 、 $I_{vh}$  分别为单位水平向集中荷载在点  $M$  处产生的侧向、竖向变形, 又称侧向、竖向变形影响系数, 并且  $I_{hh}$ 、 $I_{vh}$  分别为

$$I_{hh} = \frac{1}{16\pi G(1-\nu)} \left\{ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{1}{R_2} + \frac{(3-4\nu)x^2}{R_2^3} + \frac{2cz}{R_2^3} \left(1 - \frac{3x^2}{R_2^2}\right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} \left[1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)}\right] \right\} \quad (4)$$

$$I_{vh} = \frac{x}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{z-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z-c)}{R_2^3} - \frac{6cz(z+c)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+c)} \right] \quad (5)$$

式中:  $G$  为剪切模量;  $\nu$  为泊松比;  $c$  为集中力作用点深度。

对式(2)、(3)在区域  $A$  上进行二维积分, 即可得到边坡坡壁及边坡土体内任一点  $N(x_0, y_0, z_0)$  的侧向、竖向变形, 即

$$U_h(x_0, y_0, z_0) = \iint_A u_{hh} dA \quad (6)$$

$$U_v(x_0, y_0, z_0) = \iint_A u_{vh} dA \quad (7)$$

积分区域  $A$  与边坡尺寸和边坡侧壁高度有关, 其取值范围为

$$\left. \begin{aligned} -\frac{L}{2} \leq y \leq \frac{L}{2} \\ 0 \leq z \leq H \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

外力  $P$  作用区域的应力变化特点为

$$\left. \begin{aligned} P(x, y, z) = K_0 \gamma z \\ -\frac{L}{2} \leq y_P \leq \frac{L}{2} \\ 0 \leq z_P \leq H \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $L$  为边坡平面开挖宽度;  $H$  为边坡开挖深度。

### 1.3 数值计算方法

由于式(6)、(7)比较复杂, 很难给出积分后的原函数, 笔者采用数值积分的方法得到边坡坡壁计算点的侧向位移, 如图 3 所示。

计算任一节点  $(i, j)$  的侧向变形  $s_{hhij}$ 、竖向变形  $s_{vhij}$ , 首先把作用在边坡上的分布荷载等效为水平向集中荷载  $P_{ij}$ , 然后按照式(10)、(11)计算  $s_{hhij}$ 、 $s_{vhij}$

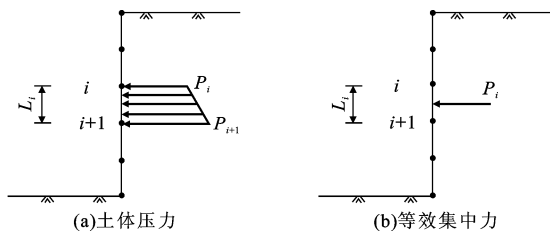


图 3 等效水平分布力

Fig. 3 Equivalent Horizontal Distribution Forces

$$s_{hhij} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I_{hhij} P_{ij} \quad (10)$$

$$s_{vhij} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I_{vhij} P_{ij} \quad (11)$$

式中:  $I_{hhij}$ 、 $I_{vhij}$  分别为水平向集中荷载  $P_{ij}$  对节点  $(i, j)$  的侧向、竖向变形影响系数。

#### 1.4 边坡开挖工况的模拟分析

对于任何边坡其土方开挖往往分几步完成, 中国《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2002)<sup>[5]</sup> 也对此做了明确规定, 但对于每步的开挖深度取值并没有给出, 祝启坤等<sup>[6]</sup> 通过对土体稳定性的分析, 提出了基坑边坡分步开挖的深度要求。杨光华等<sup>[7]</sup> 则基于增量法原理提出了分布开挖情况下土钉受力的计算方法。笔者从力学的角度模拟施工开挖工况, 假定基坑边坡分 3 步先后开挖 AB 段、BC 段、CD 段, 如图 4 所示。

##### 1.4.1 AB 段开挖

在基坑刚开挖未发生变形前, 侧壁仍然保持原有的侧向静止土压力  $\Delta P_1$ , 在此压力下土体发生侧向变形, 从而引起应力的释放使得基坑侧壁压力变为 0, 如图 5 所示。在该静止土压力作用下边坡侧壁各段的侧向变形为

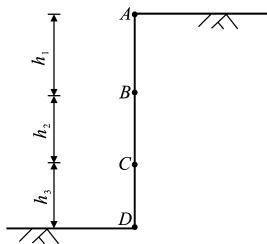


图 4 基坑边坡施工工况  
Fig. 4 Working Condition  
of Construction of Slope  
Foundation Pit

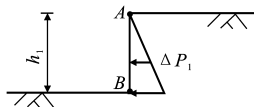


图 5 边坡开挖第 1 工况  
Fig. 5 The First  
Working Conditon of  
Slope Excavation

的侧向变形。

##### 1.4.2 BC 段开挖

AB 段的土压力在 BC 段开挖前已经释放, 在 BC 段开挖时增加新的不平衡土压力  $\Delta P_2$ , 此不平衡力引起 AB 段和 BC 段的侧向变形, 经应力释放后 BC 段边坡侧壁压力变为 0, 如图 6 所示。从而使经过该阶段后边坡侧壁各段的侧向变形为

$$s_{AB}(z) = s_{11}(z) + s_{12}(z) \quad 0 \leq z < h_1$$

$$s_{BC}(z) = s_{22}(z) \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2$$

$$s_{CD}(z) = 0 \quad h_1 + h_2 < z \leq h_1 + h_2 + h_3$$

式中:  $s_{12}(z)$  为由于 BC 段不平衡土压力  $\Delta P_2$  在 AB 段引起的侧向变形;  $s_{22}(z)$  为由于 BC 段不平衡土压力  $\Delta P_2$  在 BC 段引起的侧向变形。

##### 1.4.3 CD 段开挖

同样 AB 段和 BC 段的土压力在 CD 段开挖前已经释放, 在 CD 段开挖时增加新的不平衡土压力  $\Delta P_3$ , 此不平衡力引起 AB 段、BC 段和 CD 段的侧向变形, 经应力释放后 CD 段边坡侧壁压力变为 0, 如图 7 所示。从而使经过该阶段后边坡侧壁各段的侧向变形为

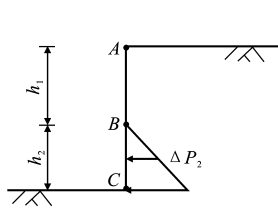


图 6 边坡开挖第 2 工况  
Fig. 6 The Second  
Working Condition of  
Slope Excavation

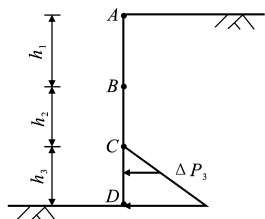


图 7 边坡开挖第 3 工况  
Fig. 7 The Third  
Working Condition of  
Slope Excavation

$$s_{AB}(z) = s_{11}(z) + s_{12}(z) + s_{13}(z) \quad 0 \leq z < h_1$$

$$s_{BC}(z) = s_{22}(z) + s_{23}(z) \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2$$

$$s_{CD}(z) = s_{33}(z) \quad h_1 + h_2 < z \leq h_1 + h_2 + h_3$$

式中:  $s_{13}(z)$ 、 $s_{23}(z)$ 、 $s_{33}(z)$  分别为由于 CD 段不平衡土压力  $\Delta P_3$  在 AB 段、BC 段、CD 段引起的侧向变形, 按式(10)、(11)可以计算得到。

按同样的方法可以计算得到不同施工阶段(开挖步数)条件下的边坡土体的竖向、侧向变形。

## 2 算例分析

根据第 1.3 节的公式, 编写程序计算边坡坡壁及其土体的侧向、竖向变形, 通过分析研究了边坡土体侧向变形的规律。本文中笔者以简单均质边坡为例进行分析, 土体的各项计算参数取值为: 重度  $\gamma =$

式中:  $s_{11}(z)$  为由于 AB 段静止土压力在 AB 段引起

20.0 kN·m<sup>-3</sup>; 静止土压力系数  $K_0=0.65$ ; 剪切模量  $G=20$  MPa; 泊松比  $\nu=0.4$ ; 基坑边坡开挖深度  $H=10$  m。

2.1 不同工况下的边坡坡壁侧向变形

图 8~10 分别为边坡坡壁侧向变形  $s$  随深度  $z$  的变化曲线、边坡坡壁最大侧向变形与开挖步数的关系曲线、边坡坡壁最大侧向变形位置与开挖步数的关系曲线。由图 8 可以看出: 边坡侧壁侧向变形随深度逐渐变化, 但最大变形点并不在边坡底部或顶部, 而是靠近顶部或者顶部一定距离的位置。由图 9 可以看出: 边坡侧壁最大变形随开挖步数的增加而减小, 最后稳定在一定的数值上, 因此在保证工期的情况下应尽量增加分步开挖的步数。由图 10 可以看出: 当基坑边坡第 1 步开挖时, 其最大变形位置约在距离坡顶  $0.7H$  的位置, 这时如果边坡土体发生破坏, 其破坏形式主要为滑移式破坏, 即发生整体圆弧滑动破坏, 此位置为滑动圆弧与坡壁的交点。当增加开挖步数, 其最大变形位置逐渐稳定在距离坡顶  $0.2H$  处, 这时如果边坡土体发生破坏, 其破坏形式主要为坍塌式破坏, 即由于局部土体达

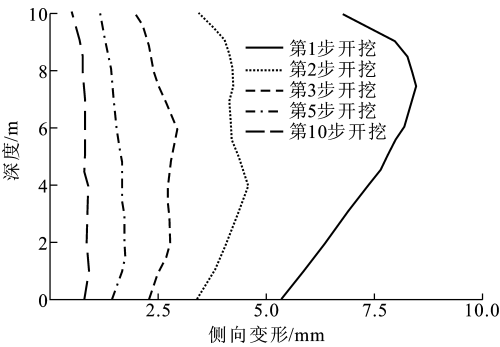


图 8 边坡坡壁侧向变形随深度的变化  
Fig. 8 Variations of Lateral Deformations of Slope Lateral Surface vs Depth

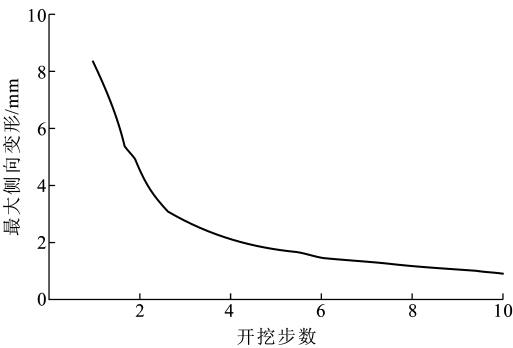


图 9 边坡坡壁最大侧向变形与开挖步数的关系  
Fig. 9 Relationship of Maximum Lateral Deformations of Slope Lateral Surface and Excavation Steps

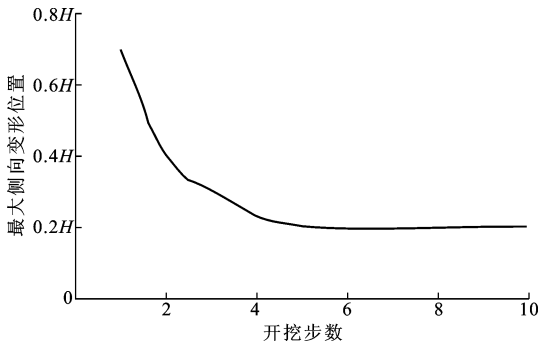


图 10 边坡坡壁最大侧向变形位置与开挖步数的关系  
Fig. 10 Relationship of Maximum Lateral Deformations Location of Slope Lateral Surface and Excavation Steps

到极限平衡而发生破坏, 此位置为滑动楔体边界线与坡壁的交点。分步开挖时边坡坡壁的侧向变形计算结果与文献[8]中关于边坡侧向位移的实测结果相一致, 并与文献[2]中关于边坡侧向位移的有限元分析结果一致, 分步开挖的情况下可以在此位置采用加固措施以减少基坑边坡的侧向变形。

2.2 不同工况下的边坡坡顶竖向变形

图 11~13 分别为边坡坡顶竖向变形与距边坡坡壁距离的变化曲线、边坡坡顶最大竖向变形与开挖步数的关系曲线、边坡坡顶最大竖向变形位置与开挖步数的关系曲线。由图 11 可以看出: 边坡坡顶竖向变形随距边坡坡壁距离的增加逐渐变化, 但最大竖向变形点并不在靠近边坡坡壁的位置, 而在距边坡坡壁一定距离的位置<sup>[9-18]</sup>。由图 12 可以看出: 边坡坡顶最大竖向变形随开挖步数的增加而减小, 最后稳定在一定的数值上, 因此在保证工期的情况下应尽量增加分步开挖的步数。由图 13 可见: 当基坑边坡第 1 步开挖时, 边坡坡顶土体的最大向竖变形位置约在距坡顶  $0.4H$  位置, 这时如果边坡土体发生破坏, 其破坏形式主要为滑移式破坏, 即发生整体圆弧滑动破坏, 此位置为滑动圆弧与坡顶的交点。

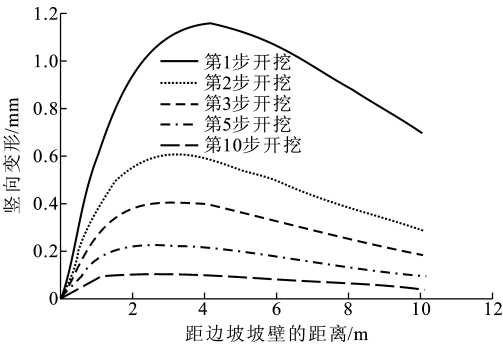


图 11 边坡坡顶竖向变形  
Fig. 11 Vertical Deformations of Slope Top

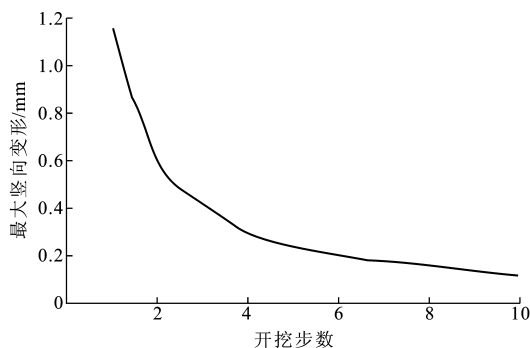


图 12 边坡坡顶最大竖向变形与开挖步数的关系

Fig. 12 Relationship of Maximum Vertical Deformations of Slope Top and Excavation Steps

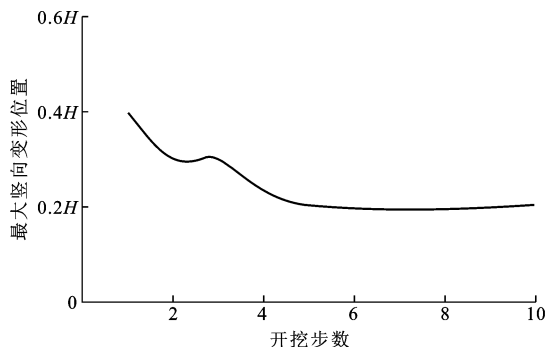


图 13 边坡坡顶最大竖向变形位置与开挖步数的关系

Fig. 13 Relationship of Maximam Vertical Deformation Places of Slope Top and Excavation Steps

当增加开挖步数,其最大变形位置逐渐稳定在距离坡顶 $0.2H$ 处,这时如果边坡土体发生破坏,其破坏形式主要为坍塌式破坏,即由于局部土体达到极限平衡而发生破坏,此位置为滑动楔体边界线与坡顶的交点。对处于该位置范围内的建筑物,可以通过事先的基础防沉加固措施来减少基坑边坡对开挖的影响。

### 3 结 语

(1)基于 MINDLIN 解的边坡位移计算方法与文献[8]中关于边坡侧向位移的实测结果趋势相一致,也与文献[2]中关于边坡侧向位移的有限元分析结果趋势相一致,说明该方法在计算边坡土体变形和模拟施工步数方面具有很强的合理性和实用性。

(2)边坡施工步数不但影响边坡的最大变形及其位置,而且还影响边坡的破坏方式。基坑边坡开挖步数越多,其坡壁侧向变形和坡顶竖向变形越小,因此在保证工程工期和较少工程造价的前提条件下,尽量增加分步开挖的步数。

(3)边坡坡壁的最大侧向变形位于距离坡顶

$0.2H \sim 0.7H$ 处,若单独的素边坡无法保证边坡的稳定,可以在最大侧向变形出现的范围内,采取加固措施以减少基坑边坡的侧向变形,保证基坑边坡的稳定。

(4)边坡坡顶最大竖向变形位于距坡顶 $0.2H \sim 0.4H$ 处,为了保证周围建筑物或构筑物的安全,可以在最大竖向变形出现的范围内,通过事先基础防沉加固来减小基坑边坡开挖的影响。

(5)根据笔者所述基于 MINDLIN 解的边坡位移计算方法得到的各项指标可以用来指导设计和提供边坡位移监测标准,从而为基坑工程的变形控制设计和施工提供理论指导,这方面内容的研究将在以后的工作中逐步展开。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 黄 铭,刘 俊,葛修润. 边坡开挖期实测位移的分解与合成预测[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8): 1 320-1 323.  
HUANG Ming, LIU Jun, GE Xiu-run. Prediction of Resolution and Composition of Measured Displacement During Slope Excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 320-1 323.
- [2] 张钦喜,孙家乐. 插筋补强边坡变形与稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报,1992,14(9):63-71.  
ZHANG Qin-xi, SUN Jia-le. Principle and Application of Deformation Control Design for Retaining Structure in Deep Excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(9): 63-71.
- [3] 周翠英,刘祚秋,董立国,等. 边坡变形破坏过程的大变形有限元分析[J]. 岩土力学,2003,24(8):644-652.  
ZHOU Cui-ying, LIU Zuo-qiu, DONG Li-guo, et al. Large Deformation FEM Analysis of Slopes Failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(8): 644-652.
- [4] MINDLIN R D. Force at a Point in the Interior of a Semilinfinit Solid [J]. Physics, 1936, 131 (7): 195-210.
- [5] GB 50330—2002,建筑边坡工程技术规范[S].  
GB 50330—2002, Code for Architectural Slope Engineering Technology[S].
- [6] 祝启坤,张小敏. 深基坑土钉支护分层开挖高度的确定[J]. 武汉化工学院学报,2003,25(3):35-38.  
ZHU Qi-kun, ZHANG Xiao-min. Determination on Each Excavation Height of Soil Nailing Support for Foundation Pit [J]. Journal of Wuhan Institute of

- Chemical Technology, 2003, 25(3): 35-38.
- [7] 杨光华, 黄宏伟. 基坑支护土钉力的简化增量计算法[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 15-19.
- YANG Guang-hua, HUANG Hong-wei. Simplified Incremental Calculation Method of Soil Nail Forces for Retaining and Protection of Foundation Pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 15-19.
- [8] 张建龙, 何家柱. 基坑土钉支护结构受力及变形分析[J]. 工程勘察, 2003, 20(2): 39-41.
- ZHANG Jian-long, HE Jia-zhu. Analysis on Field Measurement for Soil Nail Reinforcement in Foundation Pit[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2003, 20(2): 39-41.
- [9] 崔新壮, 姚占勇, 商庆森, 等. 加筋土坡临界高度的极限分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 1-6.
- CUI Xin-zhuang, YAO Zhan-yong, SHANG Qing-sen, et al. Limit Analysis of Critical Heights of Reinforced Soil Slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 1-6.
- [10] 柳厚祥, 廖雪, 李宁, 等. 公路边坡稳定性分析的二维变分方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 7-11.
- LIU Hou-xiang, LIAO Xue, LI Ning, et al. Variational Method of Highway Slope Stability Analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 7-11.
- [11] 汪益敏, 王秉纲. 公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 24-29.
- WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy Evaluation Method of Scouring Stability on Soil Subgrade Slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 24-29.
- [12] 刘大鹏, 周建中, 杨俊杰. 土钉支护结构优化设计中的混合粒子群优化算法[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 32-36.
- LIU Da-peng, ZHOU Jian-zhong, YANG Jun-jie. Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm in Optimization Design of Soil-nail Bracing[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 32-36.
- [13] 康亚明, 杨明成, 胡艳香, 等. 基于重度增加法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 49-53.
- KANG Ya-ming, YANG Ming-cheng, HU Yan-xiang, et al. 3-D FEM Analysis of Slope Stability Based on Gravity Increase Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 49-53.
- [14] 李亮, 迟世春, 郑榕明, 等. 土坡非圆临界滑动面求解的混合搜索方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 1-6.
- LI Liang, CHI Shi-chun, ZHENG Rong-ming, et al. Mixed Search Algorithm of Non-circular Critical Slip Surface of Soil Slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 1-6.
- [15] 苗英豪, 胡长顺. 土工格栅加筋陡边坡路堤位移特性的试验研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 47-52.
- MIAO Ying-hao, HU Chang-shun. Research on Displacement Characteristics of Geogrid Reinforced Embankment with Steep Slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 47-52.
- [16] 易伟建, 杨随新. 软土地基上的土-结构动力相互作用[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 61-65.
- YI Wei-jian, YANG Sui-xin. Soil-structure Dynamic Interaction Based on Soft Soil Foundation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 61-65.
- [17] 尉学勇, 王晓谋, 贺培峰. 斜坡地基极限承载力下限解计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 77-82.
- YU Xue-yong, WANG Xiao-mou, HE Pei-feng. Calculation of Low Limit Solution of Sloping Ground Ultimate Load Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 77-82.
- [18] 贺广零, 李倩妹, 洪芳, 等. 山区变电站高填方地基工后沉降分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 45-49.
- HE Guang-ling, LI Qian-mei, HONG Fang, et al. Analysis of Post-construction Settlement of Transformation Substation High Fill Foundation in Mountainous Areas[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 45-49.