

# ABAQUS 在计算基坑开挖变形中的应用研究

秦会来<sup>1</sup>, 张甲峰<sup>2,3</sup>, 郭院成<sup>4</sup>, 李 峰<sup>5</sup>

(1. 中国建筑股份有限公司技术中心, 北京 101300; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 中国民航机场建设集团公司, 北京 100101; 4. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 5. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100054)

**摘要:** 探讨了商业有限元软件 ABAQUS 中多孔介质弹性模型与黏土临界状态塑性模型中有关参数的物理含义和基于常规三轴试验及压缩试验成果确定模型中参数值的方法。基于  $e - \ln p'$  平面上各向等压固结线、回弹线、 $K_0$  状态压缩线及临界状态线间的关系以及修正剑桥模型, 推导了  $K_0$  状态下初始孔隙比与平均主应力的关系, 并通过子程序嵌入 ABAQUS 的计算中。采用 ABAQUS 中多孔弹性模型和临界状态塑性模型相结合的弹塑性本构关系, 针对某土钉支护案例的变形进行了计算。分析了支护水平位移以及地面沉降的计算结果的合理性, 验证了 ABAQUS 数值模拟在分析计算基坑开挖变形问题的可行性。

**关键词:** 土钉支护; 数值模拟; 临界状态模型; 支护变形

**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0082-05

**作者简介:** 秦会来(1979-), 男, 河南辉县人, 博士, 主要从事基坑支护及地基处理方面的研究。E-mail: huilaiqin@163.com.

## Application of ABAQUS in calculating deformation of excavations

QIN Hui-lai<sup>1</sup>, ZHANG Jia-feng<sup>2,3</sup>, GUO Yuan-cheng<sup>4</sup>, LI Feng<sup>5</sup>

(1. Technical Center, China State Construction Engineering Corporation, Beijing 101300, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Airport Construction Group Corporation of CAAC, Beijing 100101, China; 4. Civil Engineering School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 5. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100054, China)

**Abstract:** The physical meanings of the parameters for the porous elasticity model and the critical state plasticity model in ABAQUS, a popular commercial finite element software, are discussed, and the methods to decide the parametric values from triaxial compression tests or oedometer tests are presented. Based on the relationship among the normal consolidation line, unloading-reloading line,  $K_0$  consolidation line and the critical state line of  $e - \ln p'$  curves and the modified Cam-clay model, the correlation between the initial void ratio and the mean effective stress in the field is deduced and used in the simulation by ABAQUS. A soil-nailing case is simulated in ABAQUS by means of the porous elasticity model and the critical state plasticity model. The deformation results of this soil nailing case are analyzed, and the rationality is verified by the monitoring data in practice.

**Key words:** soil nailing; numerical simulation; critical state soil model; retaining deformation

## 0 引言

有限元数值方法可以反映土体复杂的应力应变关系、结构与土体的相互作用以及模拟实际的施工过程, 是研究解决土工问题受力和变形的有力工具。当前商业有限元软件如 ABAQUS、PLAXIS、ZSOIL 等的不断成熟和发展也为有限元数值分析方法在岩土工程中的广泛应用奠定了坚实的基础。多年的岩土工程有限元分析经验表明, 对于强度和稳定性问题, 数值模拟多可以给出合理的计算结果, 这主要是由于 Mohr-Coulomb 破坏准则可以较好地反映土体剪切破

坏的特点。而对于变形问题, 特别是卸载, 如基坑开挖等的变形问题, 往往不容易给出合理的计算结果。由于土性的复杂, 如应力应变非线性, 应力路径、应力水平相关性, 加卸载模量差异性等<sup>[1]</sup>, 要由数值模拟给出合理的土工问题变形结果, 有赖于正确本构模型的选择、正确本构参数的确定以及实际施工过程的合理再现等。

土钉支护是当前基坑工程中备受青睐的支护形式。当前国内土钉支护设计的依据主要有《建筑基坑支护技术规程》<sup>[2]</sup>和《基坑土钉支护技术规程》<sup>[3]</sup>以及各地方标准中的相关规定, 最近杨光华等<sup>[4-5]</sup>提出了土钉支护的“增量法”计算模式。这些设计方法主要针对土钉支护的受力或稳定, 而对变形却很少涉及。

ABAQUS 中提供的临界状态模型(扩展剑桥模型)可以合理地反映单调受载正常固结黏土的应力应变行为, 是模拟开挖问题的较佳选择。本文将首先探讨 ABAQUS 软件中多孔介质弹性模型与临界状态塑性模型中有关参数的物理含义以及参数值根据常规三轴试验和固结仪试验确定的方法, 并根据需要推导  $K_0$  状态下土体初始孔隙比的计算公式。而后采用商业有限元软件 ABAQUS 对土钉支护开挖过程进行模拟, 分析研究土钉支护的变形特点, 并以此检验 ABAQUS 数值模拟应用于基坑变形问题中的可行性、合理性。

## 1 ABAQUS 中多孔弹性与临界塑性模型相关参数

ABAQUS 中的临界状态塑性模型是对修正剑桥模型<sup>[6]</sup>的拓展, 相关参数介绍可以参考 ABAQUS 的帮助文档或文献[6]。ABAQUS 中该模型可以与线弹性或多孔介质弹性模型联合使用。本文考虑多孔弹性模型(Porous elasticity)与临界状态塑性模型(Clay plasticity)的联合使用。以下将介绍和推导计算所需的参数。

多孔弹性模型中, 需要输入参数“Log bulk modulus”, 即  $\kappa$ , 该参数为  $e - \ln p'$  平面上卸载—再加载曲线(Unloading-reloading lines)的斜率, 可参见图 1, 该模型中需要定义的初始孔隙比在本节最后推导给出。临界状态塑性模型中, 参数“Log plas bulk modulus”即参数  $\lambda$ , 为  $e - \ln p'$  平面上, 正常固结曲线 NCL (Normal consolidation line) 的斜率, 可参见图 1 所示。其中  $e$  为土体孔隙比,  $p'$  为土体有效平均主应力。 $\lambda$  和  $\kappa$  与压缩试验中得出的压缩指数  $C_c$  与回弹指数  $C_e$  之间的关系如下<sup>[7]</sup>:

$$\lambda \approx C_c / 2.3 , \quad (1)$$

$$\kappa \approx C_e / 2.3 . \quad (2)$$

ABAQUS 临界状态模型中参数  $\beta$ , 也即“Wet yld surf size”, 是用于变化临界状态线下方, 或说正常固结一侧塑性屈服面的形状。对于临界状态线上方超固结一侧的塑性屈服面, 可取  $\beta = 1.0$ ; 对于正常固结侧的大多数情况下可取  $\beta < 1.0$ , 默认为 1.0。

ABAQUS 临界状态模型中参数  $K$ , 即“Flow stress ratio”控制了屈服面在主应力空间中  $\pi$  平面上的形状,

反映了屈服面对第三应力不变量的依赖。默认为  $K=1.0$ 。

对于基坑开挖问题, 主动区土体的应力路径接近于减压的压缩试验, 因此对于有效内摩擦角为  $\varphi'$  的正常固结黏土, 参数  $M$ , 即“Stress ratio”可由下式计算:

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} . \quad (3)$$

ABAQUS 中多孔弹性模型, 采用输入泊松比的方式可以考虑土体刚度对应力水平的依赖性。该弹性模型中需要用子程序给出土体的初始孔隙比, 以下将根据图 1 所示的  $e - \ln p'$  平面上, 各向等压固结线(NCL)、回弹线(SL 或 Unloading-reloading lines)、 $K_0$  状态压缩线及临界状态线(CSL)间的关系, 以及剑桥模型中  $p' - q$  关系式, 导出正常固结黏土  $K_0$  状态下初始孔隙比  $e_k$  与有效平均主应力  $p'$  的关系式, 供编写土体初始孔隙比子程序使用。

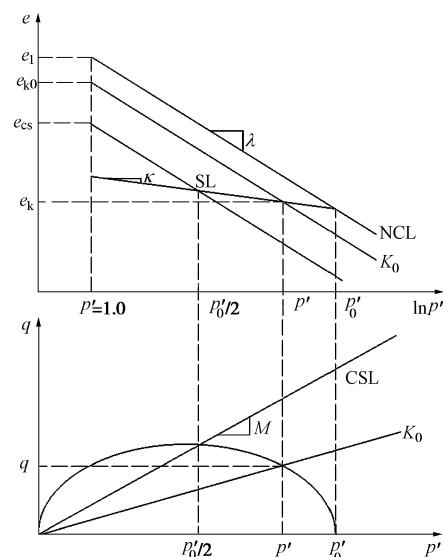


图 1  $K_0$  状态下土体初始孔隙比确定

Fig. 1 Calculation of initial void ratio for clay under  $K_0$  state

试验结果表明,  $e - \ln p'$  平面上, 正常固结状态线(NCL)、 $K_0$  状态线以及临界状态线(CSL)的斜率是相同的, 可表示为  $\lambda$ 。卸载再加载线或回弹线(SL)的斜率可表示为  $\kappa$ 。ABAQUS 临界状态塑性模型中需要输入图 1 中的参数  $e_1$ , 即  $e - \ln p'$  平面上正常固结线在  $p'=1.0$  时的孔隙比, 可由常规三轴试验求得。 $e - \ln p'$  平面上,  $K_0$  状态线方程可写为

$$e_k = e_{k0} - \lambda \ln p' , \quad (4)$$

式中  $e_{k0}$  为  $e - \ln p'$  平面上  $K_0$  线上  $p'=1.0$  时的孔隙比。由图 1 可知,  $e_{k0}$  与  $e_1$  存在如下关系:

$$e_{k0} = e_1 + (\kappa - \lambda) \ln \frac{p_0'}{p'} . \quad (5)$$

根据修正剑桥模型  $p' - q$  空间中的屈服面方程<sup>[6-7]</sup>, 即

$$(q/p')^2 + M^2(1-p_0'/p') = 0 \quad (6)$$

可得  $e - \ln p'$  平面内  $K_0$  状态固结方程式

$$e_k = e_1 + (\kappa - \lambda) \ln \left[ \frac{9(1-k_0)^2}{M^2(1+2k_0)^2} + 1 \right] - \lambda \ln p' \quad (7)$$

式中,  $k_0$  为  $K_0$  状态下正常固结黏土的侧压力系数, 本文中取  $k_0 = \mu/(1-\mu)$ , 其中  $\mu$  为土体泊松比。

以上参数中,  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $M$ ,  $e_1$  均可由常规三轴试验或固结仪试验确定, 参数  $K$  则需要由真三轴试验确定, 为方便应用可取默认值。

## 2 土钉支护案例变形分析

### 2.1 计算案例概况

数值模拟结果表明, 以 Mohr-Coulomb 为屈服准则的理想弹塑性模型在模拟基坑开挖时往往给出不合理的变形结果, 这主要是理想弹塑性模型不能正确反映土体的压硬性及加卸载刚度的差异所致。采用临界状态模型模拟土钉支护工程时, 由于正常固结黏土没有自立高度而使得计算无法进行下去, 为解决这一问题, 本文将考虑采用微型桩进行超前支护。

所考虑土钉支护案例的计算参数如下: 土体有效内摩擦角  $\varphi' = 30^\circ$ , 土体重度  $18 \text{ kN/m}^3$ , 其它参数分别为:  $e_1 = 1.8$ ,  $M = 1.2$ ,  $\lambda = 0.0869$  ( $C_c = 0.2$ ),  $\kappa = 0.00869$  ( $C_s = C_c/10$ ),  $\beta = 1.0$ ,  $K = 1.0$ ,  $\mu = 0.3$ 。如图 2 所示, 考虑土钉支护基坑开挖深度  $5 \text{ m}$ , 共设置 5 排土钉, 竖向及水平向间距均取  $1 \text{ m}$ , 基坑宽度  $10 \text{ m}$ , 土层分层开挖深度为  $1 \text{ m}$ , 每层开挖后随即增设相应土钉及面层, 不考虑坑边超载及地下水的影响; 土钉直径均为  $0.1 \text{ m}$ , 土钉长度均为  $3.0 \text{ m}$ , 倾角均为  $10^\circ$ , 面层厚为  $0.1 \text{ m}$ ; 超前支护桩直径  $0.2 \text{ m}$ , 水平向间距设置为  $1 \text{ m}$ , 本文设置微型桩的主要目的是解决正常固结黏土不能无支护开挖问题, 为尽量减少对土钉支护最终变形的影响, 假定微型桩在坑底以下无埋置深度。土钉及面层的设置已满足规程 JGJ120—99<sup>[2]</sup> 的要求。

ABAQUS 中利用对称约束, 取开挖宽度一半进行建模。模型水平方向  $50 \text{ m}$ , 竖向  $20 \text{ m}$ , 足以避免边界条件的干扰。土体单元采用 CPE4 实体单元, 多孔弹性模型结合临界状态塑性模型 (Clay plasticity) 模型; 土钉采用 T2D2 桁架单元, 考虑为线弹性, 弹性模量为  $200000 \text{ MPa}$ , 泊松比为  $0.15$ ; 面层及微型桩采用 B21 梁单元, 考虑为线弹性, 弹性模量为  $25500 \text{ MPa}$ , 泊松比为  $0.15$ 。土钉与土体之间、超前桩及面层与土体之间采用 Tie 约束, 土钉与面层之间采用 Coupling (Kinematic) 约束。模型的有限元网格见图

3 所示。采用 ABAQUS 中的单元生死功能 (Model change) 对土钉支护基坑开挖的实际过程进行模拟。

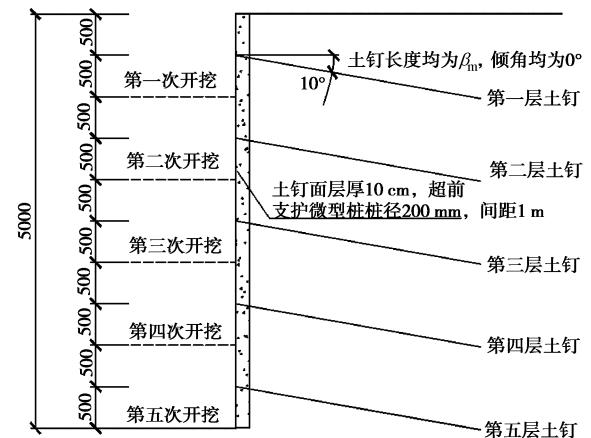


图 2 土钉支护基坑案例概况

Fig. 2 Sketch of soil-nailing excavation case

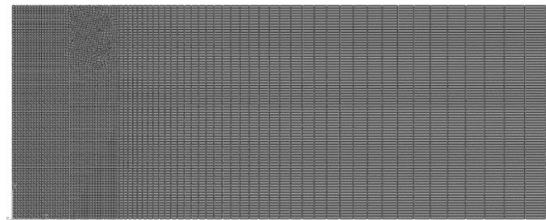


图 3 模型在 ABAQUS 中有限元网格

Fig. 3 Finite element mesh for soil nailing in ABAQUS

### 2.2 正常固结黏土初始孔隙比

本文推导的计算  $K_0$  状态下初始孔隙比的计算式 (7), 需要通过编写子程序 VOIDRI 接入 ABAQUS 中供计算使用。图 4 给出了初始地应力生成后, 由 ABAQUS 根据式 (7) 获得模型深度范围内, 初始孔隙比的变化。显然, 与室内压缩试验结果规律相一致。证明了公式 (7) 的合理性。

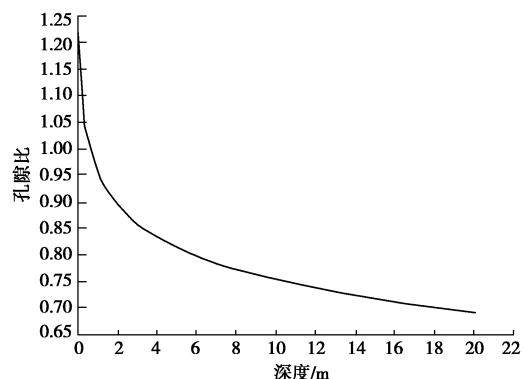


图 4 初始孔隙比随深度的变化

Fig. 4 Variation of initial void ratio with depth

### 2.3 变形计算结果分析

图 5 给出了由 ABAQUS 计算的最终变形矢量图,

为清晰期间, 图 5 中只给出了开挖主要影响范围的位移矢量图, 图 6 给出了开挖完成后土体内的塑性区。由图 6 可见, 土钉坡脚处出现了明显的塑性区域, 并向土体内有一段延伸带, 也是潜在的滑移面, 对比图 5 可以发现, 塑性带以外的主动区发生了较大的土体位移。

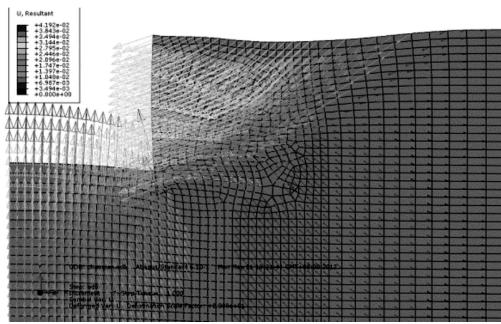


图 5 由临界状态模型计算的开挖完成后的位移矢量

Fig. 5 Displacement vectors after excavation obtained by critical state clay model

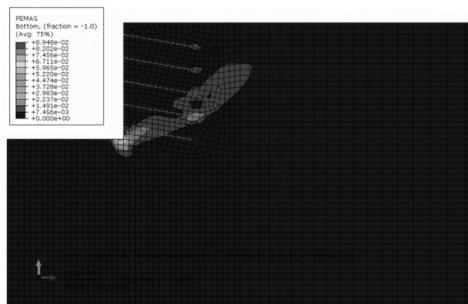


图 6 开挖完成后的塑性区

Fig. 6 Magnitude of plastic strain after excavation

图 7 给出了超前桩体位置水平位移随开挖进行的水平位移变化情况。由图 7 可见, 对于前四步开挖, 由于超前支护桩的存在, 支护水平位移较小, 第四步开挖完成后最大水平位移为 8.47 mm, 为开挖深度的 2.1%。最后一步开挖由于超前桩已没有嵌固深度, 发生了较大的位移增量, 最大位移量达到 29.48 mm, 达到开挖深度的 5.9%, 由此可见, 超前支护桩的嵌固对限制支护的变形作用很明显。同时, 由于超前支护桩体的存在, 土钉支护的水平位移最大值下移, 发生在坑顶以下 2 m 位置, 这与现有复合土钉支护现场监测结果规律相一致<sup>[8-9]</sup>。图 8 中给出了开挖完成后的地面沉降计算值。由图可见, 由于超前支护桩体的存在, 地面最大沉降后移, 最大沉降值为 20 mm, 发生在距开挖面 3.75 m 的位置, 靠近土钉端部位置, 这与现有复合土钉支护现场监测结果规律相一致<sup>[8-9]</sup>。

以 Mohr-Coulomb 为屈服或破坏准则的理想弹塑性本构模型, 在计算强度和稳定性问题, 如地基承载力、挡土墙土压力及边坡稳定等时, 往往可以给出合

理的计算结果, 但对于基坑开挖问题, 多给出不合理的计算结果。图 9 是由 Mohr-Coulomb 模型计算的本案例开挖完成后的变形图, 计算参数中, 取土体弹性模量为  $E=40$  MPa, 其他参数均与临界状态塑性模型中的相关参数一致。由图 9 可见, 基坑顶面在开挖后出现上拔位移, 显然不合理, 这主要是由于该模型不能反映加卸载模量的差异以及土体的压硬性。

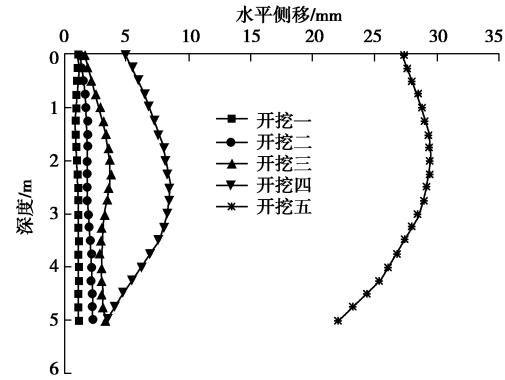


图 7 支护水平位移随开挖的变化

Fig. 7 Variation of horizontal displacement with excavation

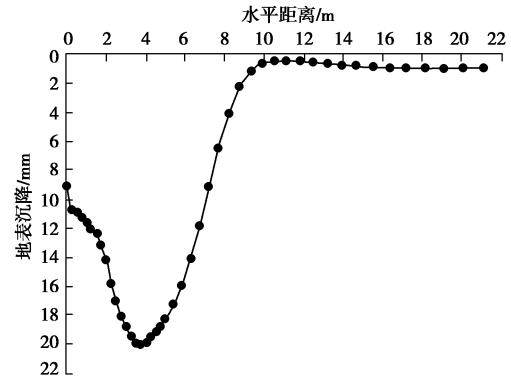


图 8 地表最终沉降

Fig. 8 Ground subsidence after excavation

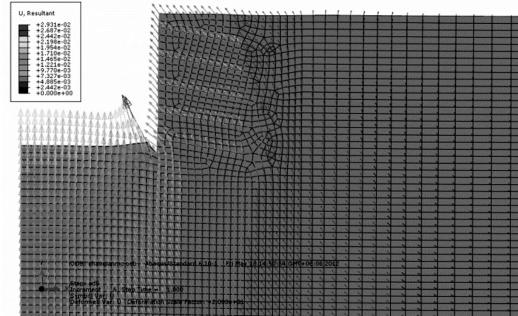


图 9 由 Mohr-Coulomb 模型计算的开挖完成后的位移矢量图

Fig. 9 Displacement vectors after excavation obtained by elasto-plastic Mohr-Coulomb model

### 3 结语

数值模拟是解决工程问题的一有力工具, 如何利

用数值模拟给出合理的计算结果，是对工程技术人员的一大挑战。由于土体材料的复杂性，在对土工问题进行数值模拟时，必须选择合理的本构模型、采用正确的模型参数，并对施工过程进行合理的再现，才能给出合理的计算结果。例如，以 Mohr-Coulomb 为屈服或破坏准则的理想弹塑性本构模型，由于不能反映加卸载模量的差异以及土体的压硬性，不适合用于开挖问题的模拟，而对土工强度或稳定性问题或许可以给出合理的计算结果。

临界状态模型可以反映正常固结黏土单调受荷条件下的应力 - 应变关系特点。本文推导了  $K_0$  状态下初始孔隙比与平均主应力的相关关系，并将其嵌入 ABAQUS 多孔弹性模型的计算中，采用 ABAQUS 中的临界状态模型分析了超前支护土钉工程的变形情况。计算结果表明，ABAQUS 中多孔弹性模型结合临界状态塑性模型可以给出较为合理的土钉支护变形结果，对于超前支护土钉工程，由于超前支护桩的影响，支护最大水平位移下移，地面最大沉降后移，超前桩设置一定的嵌固深度对控制变形较为有效。

## 参考文献：

- [1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [2] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [3] CECS96: 97 基坑土钉支护技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 1997. (CECS96: 97 Specification for soil nailing in foundation excavations[S]. Beijing: Standard Association of Engineering Construction, 1997. (in Chinese))
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 杨光华. 土钉支护中土钉力和位移的计算问题[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 137 - 146. (YANG Guang-hua. Calculation of soil nail forces and displacement in soil nailing retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 137 - 146. (in Chinese))
- [6] HELWANY S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [7] WOOD D V. Soil behaviour and critical state soil mechanics[M]. London: Cambridge University Press, 1990.
- [8] 段建立, 谭跃虎, 樊有维, 等. 复合土钉支护的现场测试研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(12): 2128 - 2132. (DUAN Jian-li, TAN Yue-hu, FAN You-wei, et al. Field testing study on composite soil nailing Chinese[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2128 - 2132. (in Chinese))
- [9] 杨育文. 复合土钉墙实例分析和变形评估[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 734 - 741. (YANG Yu-wen. Case studies of composite soil-nailing walls and movement estimate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 734 - 741. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)