

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.022

HS模型在基坑工程数值模拟中的适用性分析

黄鑫¹, 樊秀峰^{1,2}, 安亚洲¹

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福州 350108;

2. 国土资源部 丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福州 350108)

摘要: 在基坑开挖数值模拟计算中选择合适的土体本构模型非常重要。土体硬化模型(HS模型)凭借其考虑土体剪胀性与基坑开挖过程中土体的加卸载特性等优点,在基坑工程数值分析中得到广泛的应用。结合参考算例,通过PLAXIS 2D数值模拟软件模拟了基坑开挖的过程,其中土体本构模型分别采用土体硬化模型和摩尔-库仑模型来进行计算分析。结果表明:MC模型未考虑土体加卸载特性,模拟出土体的地表沉降和地下连续墙的弯矩偏小,而地下连续墙体水平位移偏大;而HS模型考虑土体加卸载特性,模拟得到的地表沉降,地下连续墙的弯矩和水平位移均较为合理。所以在基坑开挖,尤其是在敏感环境下进行开挖时,数值模拟计算中建议采用土体硬化模型。

关键词: 基坑开挖; PLAXIS 2D数值模拟; MC模型; HS模型

中图分类号: TU470+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0115-06

Applicability Analysis of HS Model in Numerical Simulation of Foundation Pit

HUANG Xin¹, FAN Xiufeng^{1,2}, AN Yazhou¹

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: It is very important to select the appropriate soil constitutive model in the numerical simulation of excavation. The main features of the Hardening Soil model are the dilatancy of soil and the loading and unloading characteristics of soil in the process of foundation pit excavation, which can simulate different types of soil behavior including soft soil and hard soil. The hardening soil model has become one of the most commonly used models in the numerical analysis of foundation pit engineering. Combining with the engineering example, the whole process of excavation in soft soil excavation was simulated by PLAXIS 2D finite element software, which are analyzed by using the hardening soil model and Mohr - Column model (MC model). The MC model does not take the soil loading and unloading characteristics into consideration, therefore the simulation result of the surface settlement of the soil and the bending moment of the diaphragm wall are smaller, while the horizontal displacement of the underground continuous wall is larger. The hardening soil model is suggested in numerical simulation calculation in excavation of foundation pit, especially in sensitive environment.

Keywords: excavation of foundation pit; PLAXIS 2D numerical simulation; MC model; HS model

随着我国经济与科技的发展和建筑密度的不断增加,越来越多的深大基坑工程开始出现,且深基坑工程大都位于城市繁荣地区,紧邻建(构)筑物、交通干道、市政地下管线和地铁车站等,建筑密集、人口密集、场地狭小,而且施工条件较为复杂,工程建设的安全形势越来越严峻^[1]。如果基坑开挖不

当,将会引起周围建(构)筑物的不均匀沉降与墙体位移,带来重大的经济损失与人员的伤亡^[2],尤其在建筑物较密集的市区,该区域基坑周围的地下管线较多,且周围均是高耸且人口集聚的建筑物,基坑开挖过程中一旦出现问题,后果将非常严重^[3-5]。所以作为保持基坑安全稳定的基坑支护结构,不仅要

满足强度要求,还要满足变形要求。但由于基坑开挖问题较为复杂,基坑开挖受到变形控制,传统的数学解析法难以准确计算基坑支护结构的性状和分析基坑开挖对周边环境的影响^[6-7]。而有限元分析方法^[8-9]凭借其可以利用基坑开挖土体的性状与应力路径的相关性、考虑土体加卸载特性对土压力和支持结构内力的影响以及周边建(构)筑物存在的影响因素等优点,现已成为分析深基坑工程最有效的方法^[10]。而采用合适的土体本构模型和合理的计算参数则是利用数值分析方法解决基坑开挖问题中至关重要的步骤。HS 模型可以模拟多种不同类型的土体行为,可区分加荷与卸荷的区别,数值模拟的结果较为准确,即模拟所得的围护结构变形和围护结构后土体位移都较为合理。因此,HS 模型已成为基坑工程数值分析中常用的模型^[11-13]。

本文将结合某工程算例,通过采用 PLAXIS 2D 有限元软件,土体的本构模型分别采用土体硬化(HS)模型和摩尔-库仑(MC)模型,来对基坑的降水开挖进行数值模拟,分析这两种本构模型对基坑降水开挖的适应性,并对比分析这两种模型模拟基坑降水开挖时产生的土体沉降变形、基坑围护结构的位移及其对基坑围护结构内力的影响,进而验证土体硬化模型(HS 模型)在基坑工程数值分析中的适用性。

1 HS 模型与 MC 模型介绍

(1) HS 模型,即土体硬化模型,是 PLAXIS 有限元软件中的一种本构模型。该模型是等向硬化弹塑性模型,其在主应力空间中的整个屈服面如图 1 所示。HS 模型的一个基本特点是土体刚度对应力状态存在依赖性。在三轴排水情况下,轴向应变与偏差应力之间是双曲线关系,可以表述为^[14-15]:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} = \frac{q}{1 - q/q_a} \quad (1)$$

式中:参数 E_{50} 是围压相关的刚度模量; q_a 是抗剪强度的渐进值^[15]; ϵ_1 是主加载下的轴向应变。

在 HS 模型中,岩土刚度采用三轴试验刚度(E_{ur})、三轴卸载/再加载刚度(E_{ur}^{ref})和固结仪荷载强度(E_{oed})来描述,公式如下:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (4)$$

式中: E_{50}^{ref} 是参考应力 p^{ref} (100 kPa) 50% 强度下的割线模量; E_{ur}^{ref} 是卸载/再加载模量; E_{oed}^{ref} 是主固结加载中的切线刚度; m 是模量应力相关幂指数^[16]。

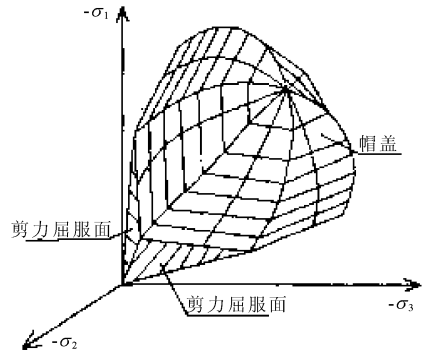


图 1 主应力空间中的土体硬化模型屈服面

(2) MC 模型,莫尔-库仑模型的屈服准则是一个理想弹塑性模型,破坏判定准则采用莫尔-库仑破坏准则,MC 模型可以在一定程度上描述岩土材料的一些特性,其在主应力空间中的屈服面是一个不规则的六棱锥,如图 2 所示。

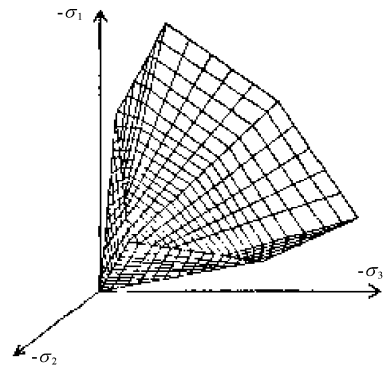


图 2 MC 模型在主应力空间的屈服面

2 PLAXIS 2D 有限元模型

2.1 几何模型概况

PLAXIS 2D 采用的算例模型是在拉锚地下连续墙支护下基坑降水开挖模型。基坑开挖宽度为 20 m,深度为 10 m,用两个 15 m 深,0.35 m 厚的混凝土地下连续墙来支挡周围的土体,地下连续墙由锚杆与注浆体(土工格栅)共同支撑。上部锚杆长 15 m,倾斜度为 34°,下部锚杆长 9 m,倾斜度为 45°。施加于基坑开挖区左侧和右侧的地面荷载分别为 10 kN/m²和 5 kN/m²。如图 3 所示^[17]。

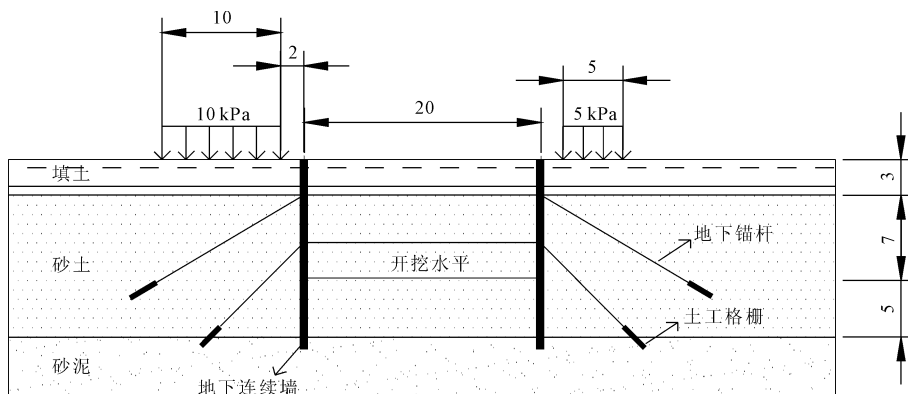


图 3 基坑剖面示意图(尺寸单位:m)

2.2 材料参数的设置

根据实际工程的需要,当选择 MC 模型作为土体的本构模型进行数值模拟时,需要输入的主要参数如表 1 所示。当选择 HS 模型作为土体的本构模

型进行数值模拟时,需要输入的主要参数如表 2 所示。地下连续墙的主要参数如表 3 所示。锚杆的主要参数如表 4 所示。土工格栅的主要参数轴向刚度为 $EA = 1.0 \times 10^5$ kN/m。

表 1 MC 模型的土层主要参数^[17]

土层名称	材料模型	材料用途	水位以上土体重度 γ_{unsat} / (kN·m ⁻³)	水位以下土体重度 γ_{sat} / (kN·m ⁻³)	水平渗透系数 k_x / (m·d ⁻¹)	竖向渗透系数 k_y / (m·d ⁻¹)	弹性模量 E_{ref} / kPa	泊松比 ν	黏聚力 c_{ref} / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	剪胀角 ψ / (°)	界面强度折减因子 R_{inter}
填土	摩尔-库仑	排水	16	20	1.0	1.0	8000	0.30	1	30	0	0.65
砂土	摩尔-库仑	排水	17	20	0.5	0.5	30000	0.30	1	34	4	0.70
砂泥	摩尔-库仑	排水	17	19	0.1	0.1	20000	0.33	8	29	0	1.00

表 2 HS 模型的土层主要参数^[17]

土层名称	材料模型	材料用途	水位以上土体重度 γ_{unsat} / (kN·m ⁻³)	水位以下土体重度 γ_{sat} / (kN·m ⁻³)	水平渗透系数 k_x / (m·d ⁻¹)	竖向渗透系数 k_y / (m·d ⁻¹)	三轴固结排水实验割线模量 E_{30}^{ref} / kPa	切线压缩模量 E_{ed}^{ref} / kPa	卸载-再加载模量 E_{ur}^{ref} / kPa	泊松比 ν	侧应力系数 K_0	黏聚力 c_{ref} / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	剪胀角 ψ / (°)	界面强度折减因子 R_{inter}	
填土	HS	排水	16	20	1.0	1.0	22000	22000	66000	0.5	0.2	0.50	1	30	0	0.65
砂土	HS	排水	17	20	0.5	0.5	43000	43000	12900	0.5	0.2	0.44	1	34	4	0.70
砂泥	HS	排水	17	19	0.1	0.1	20000	20000	60000	0.6	0.2	0.52	8	29	0	1.00

表 3 地下连续墙的主要参数^[17]

轴向刚度 EA / (kN·m ⁻¹)	抗弯刚度 EI / (kN·m ⁻¹)	等效厚度 d / m	重度 w / (kN·m ⁻³)	泊松比 ν
12×10^6	1.2×10^5	0.346	8.3	0.15

表 4 锚杆的主要参数^[17]

轴向刚度 EA / (kN·m ⁻¹)	水平间距 L_s / m	$F_{max comp}$ / kN	$F_{max tens}$ / kN
2.0×10^5	2.5	1.0×10^5	1.0×10^5

2.3 模拟工况

基坑开挖宽度为 20 m,开挖深度为 10 m。开挖过程由下列工序组成。

工序 1:进行地下连续墙的施工。

工序 2:激活基坑左侧与右侧的地面荷载。

工序 3:开挖土体至地表以下 3 m。

工序 4:设置第一层锚杆并对其施加 150 kN 的预应力。

工序 5:开挖第二层土体,即开挖至地表以下 7 m,同时将地下水位降低至地表以下 7 m,并进行地下水渗流的计算^[18]。

工序 6:设置第二层锚杆并对其施加 150 kN 的预应力。

工序 7:继续开挖至地表以下 10 m,同时降水至开挖深度以下。

2.4 计算结果分析

选用 MC 模型作为土体本构模型时,数值模拟计算得到的最终网格变形如图 4 所示。

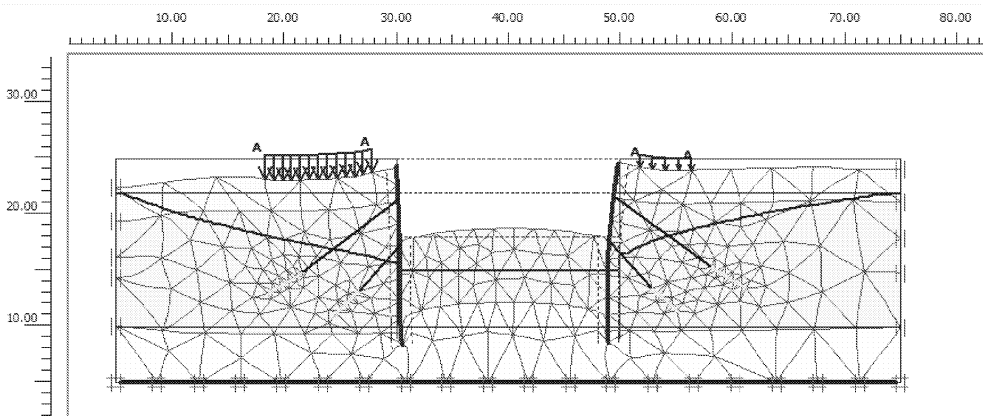


图 4 基坑降水开挖后的网格变形图(MC 模型)(坐标单位:m)

从图 4 可以看出,基坑开挖底部拱起约为 30 cm,坑外的地表沉降约为 10 cm 左右,且基坑左侧地面的沉降总体大于基坑右侧地面的沉降。

选用 HS 模型作为土体本构模型时,数值模拟计算得到的最终网格变形图如图 5 所示,左侧地下连续墙的位移如图 6 所示。

从图 5 可以看出,基坑开挖底部拱起约为 26 cm,坑外的地表沉降达到了 30 cm 左右,同样可以看出基坑左侧地面的沉降总体大于基坑右侧地面的沉降。

接着将选用两种土体本构模型所得的结果进行对比分析:

(1) 地下连续墙的弯矩对比。图 7 为土体本构模型分别选用 HS 模型和 MC 模型来进行模拟所得的左侧地下连续墙的弯矩变化对比图,由图 7 可以看出,选用两种不同土体本构模型所得的地下连续墙的弯矩随墙体深度的变化趋势大体相同,均呈先增大,后减小,再增大的变化趋势;不同之处在于当土体本构选用 MC 模型时,地下连续墙的墙体最大

弯矩位于基坑开挖地表以下约 8.5 m 处,其值为 24.2 kN·m;当土体本构模型选用 HS 模型时,地下连续墙的墙体最大弯矩位于基坑开挖地表以下约 8.5 m 处,其值为 28.11 kN·m。可见考虑土体在基坑开挖过程中的加卸载特性与否对地下连续墙的弯矩的影响较大,需要选用合理的土体本构模型,否则所得的地下连续墙的弯矩较小,从而影响地下连续墙的结构设计与配筋量的计算^[19]。

(2) 坑外地表沉降的对比。由图 4 和图 5 可以看出,选用 HS 模型和 MC 模型作为土体本构模型进行计算,所得的坑外地表沉降模式大致相同,即荷载大的基坑左侧区域沉降较大,且荷载作用的地表沉降基本最大;当土体本构模型选用 MC 模型时,其坑外地表的最大沉降约为 10 cm;当土体本构模型选用 HS 模型时,其坑外地表的最大沉降为约为 30 cm。而在实际工程中,基坑开挖导致的地表沉降量往往会较大,所以选用 HS 模型模拟出来的坑外地表沉降相对 MC 模型而言更贴合实际。

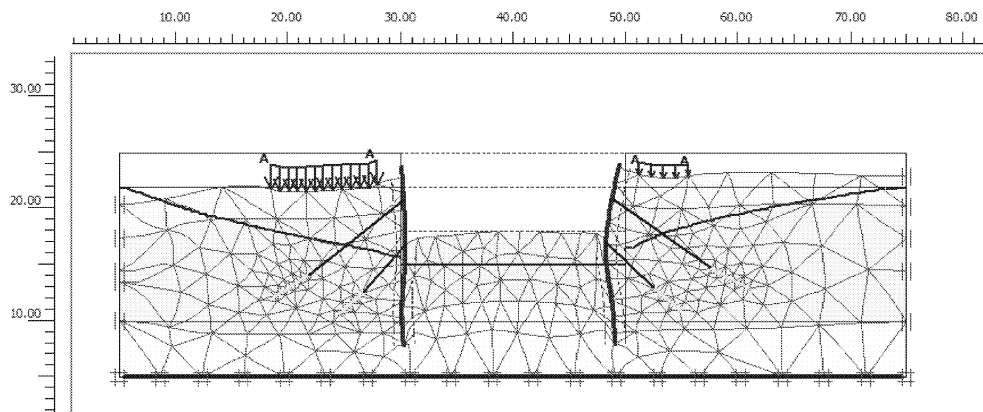


图 5 基坑降水开挖后的网格变形图(HS 模型)(坐标单位:m)

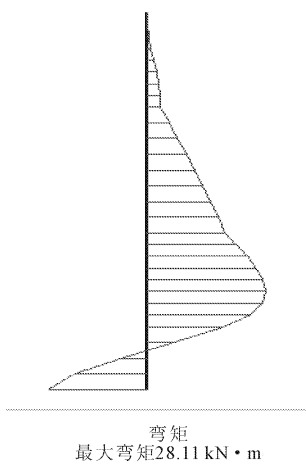


图 6 左侧地下连续墙的位移

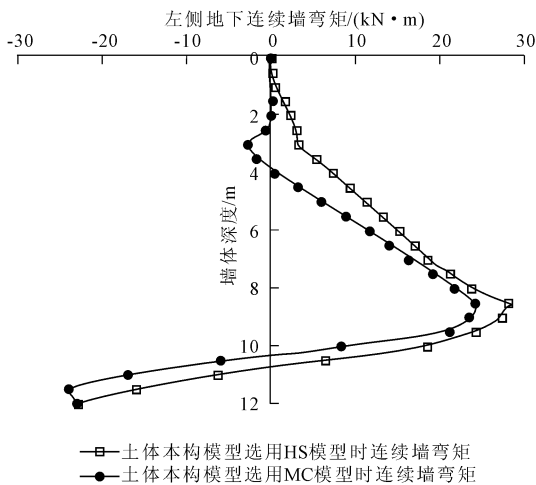


图 7 左侧地下连续墙弯矩对比

(3) 墙体水平位移对比。图 8 为土体本构选用 HS 模型和 MC 模型两种情况下基坑降水开挖后的左侧墙体水平位移对比图。由图 8 可知,墙体的水平位移随着墙体深度的增加大体呈增大的趋势。当土体本构选用 HS 模型时,在地表以下 8.5 m 处,墙体的水平位移达到最大,为 3.5 mm;当土体本构模型选用 MC 模型时,在地表以下 8.5 m~9.0 m 处,墙体的水平位移达到最大,为 4.1 mm。可见,若选用 MC 模型,则会使得到的墙体水平位移较大,造成误差。

详细比较 MC 模型和 HS 模型的 PLAXIS 2D 有限元模拟结果,可以发现如下的区别:

① 选用 HS 模型作为土体本构模型得到的坑底隆起比选用 MC 模型所得结果小,这是因为 HS 模型具有考虑土体加卸载的特性,可以体现出初次加载和卸载-再加载之间的刚度区别,然而 MC 模型只有一个单一的刚度。在基坑开挖模拟中,坑槽底部的土处于卸荷状态,所以 HS 模型所得结果更为贴切。

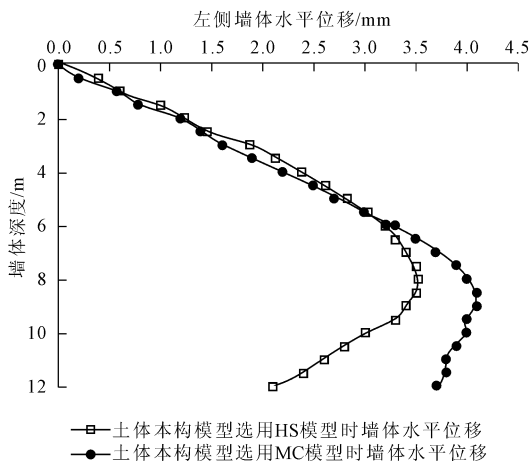


图 8 左侧地下连续墙的墙体水平位移对比

② 地下连续墙向基坑内的水平位移在 HS 模型中比在 MC 模型中略小。因为 HS 模型与 MC 模型的应力应变曲线不同(HS 模型的应力应变曲线是双曲线型的二次线性函数,而 MC 模型的应力应变曲线是二次线性函数),同时 HS 模型控制了土体刚度对应力水平的依赖性^[15,20],所以 HS 模型所得的地连墙位移更为合理。

③ HS 模型模拟得到的坑外地表沉降明显比 MC 模型所得到的坑外地表沉降来得大,这是由于两种情况下地下连续墙的竖向位移不同。对于 MC 模型来说,由于土体卸载模量较小,开挖底部拱起较多,进而影响了沉降沟的形成^[21],与实际情况有所出入;而 HS 模型的卸载模量更符合实际基坑开挖时土体的应力应变状态,所以底部隆起较为合理,形成的沉降沟深度也符合工程实际。

④ HS 模型由于考虑了土体的卸荷特性,计算所得墙体最大弯矩比 MC 模型略大,在实际工程中,应根据 HS 模型计算所得内力来进行地连墙截面设计和配筋设计,保证基坑开挖过程的安全。

综上所述,由于土体的加卸载特性对敏感地区基坑开挖有很大的影响,所以 HS 模型所得的基坑开挖数值模拟结果更加准确。

3 结 论

本文对一深度为 10 m 的基坑开挖的施工过程进行 PLAXIS 2D 数值模拟,土体本构模型分别选用 MC 模型和 HS 模型,分析此两种模型用于基坑降水开挖模拟的适用性,并对比其在基坑降水开挖过程中产生的土体变形、墙体位移及对基坑围护结构内力的影响。

参考文献:

- [1] 王利文. 土木工程施工技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 周晋. 基坑开挖对邻近建筑物影响的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 162-166.
- [3] 李进军, 王卫东, 邸国恩, 等. 基坑工程对邻近建筑物附加变形影响的分析[J]. 建筑结构, 2007, 28(S1): 623-629.
- [4] 刘国彬, 刘登攀. 基坑施工对周围建筑物沉降的影响分析[J]. 建筑结构, 2008, 37(11): 79-83.
- [5] 李志伟, 郑刚. 基坑开挖对邻近不同刚度建筑物影响的三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1807-1814.
- [6] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—99[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [7] 陈晓平, 闫军. 深基坑支护结构的三维杆系有限元分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 258-261.
- [8] 徐中华, 王建华, 王卫东. 主体地下结构与支护结构相结合的复杂深基坑分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1355-1359.
- [9] 应宏伟, 郭跃. 某梁板支撑体系的深大基础三维全过程分析[J]. 岩土学报, 2007, 29(11): 1670-1675.
- [10] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [11] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264.
- [12] Schweiger H F, Vermeer P A, Wehnertm. On the design of deep excavations based on finite element analysis zur bemessung tiefer baugruben mit der finite-element-methode[J]. Geomechanics and Tunneling, 2009, 2: 333-344.
- [13] Blackburn J T. Automated Remote Sensing and Three Dimensional Analysis of Internally Braced Excavations[D]. Evanston: Northwestern University, 2005.
- [14] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS - Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [15] 江建红, 崔江余. 不同土体本构模型对基坑开挖数值模拟计算结果的影响分析[C]//建筑物改造和病害处理学术研讨会, 第九届建筑物改造和病害处理学术研讨会论文集. 济南, 2011: 258-261.
- [16] 张飞, 李镜培, 唐耀. 考虑土体硬化的基坑开挖性状及隆起稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 79-84.
- [17] PLAXIS 版本 8 示范手册[EB/OL]. [2018-01]. <http://www.docin.com/p-110212570.html>.
- [18] 董诚, 郑颖人, 唐晓松. 利用有限元强度折减法进行渗流条件下的基坑整体稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2009(3): 105-110.
- [19] 邵羽, 江杰, 陈俊羽, 等. 基于 HSS 模型与 MCC 模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 231-235.
- [20] 赵文超. 考虑渗流影响的基坑工程三维有限元模拟与分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [21] 江建红. 基于桩锚支护结构的基坑周围地表沉降变形分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

(上接第 94 页)

- [7] Wartman J, Seed R B, Bray J D. Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 610-622.
- [8] 门玉明, 彭建斌, 李寻昌, 等. 层状结构岩质边坡动力稳定性试验研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 131-136.
- [9] 梁庆国, 韩文峰, 马润勇, 等. 强地震动作用下层状岩体破坏的物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1307-1311.
- [10] 冯文凯, 黄润秋, 许强, 等. 震裂斜坡形成机理及变形破坏模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 42-48.
- [11] 史石荣, 陈林杰, 余超. 基于强度折减法的高烈度地震区边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报, 2011, 30(2): 273-276.
- [12] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319-327.
- [13] 段建, 言志信, 郭锐剑, 等. 地震边坡岩土体破坏特征探讨[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1642-1646.
- [14] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977-2982.
- [15] 杨国香, 叶林海, 伍法权, 等. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2214-2221.
- [16] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 15-40.
- [17] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1-8.