

DOI: 10.11779/CJGE2014S2005

基于 M-C 弹塑性本构模型的岩土体开挖回弹效应研究

袁海平^{1, 2}, 韩治勇¹, 林杭^{2, 3*}, 王斌¹, 陈水梅¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221000;
3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对数值模拟开挖计算通常出现岩土体回弹现象, 基于 M-C 弹塑性本构模型对基坑开挖过程中回弹效应进行了研究, 分析了开挖回弹过程的力学机制和岩土体本构模型回弹力学参数的敏感性, 并探讨了数值计算开挖回弹解决办法, 研究结果表明: M-C 本构模型参数中, 岩土重度对一般岩土体开挖回弹的影响较为敏感, 且坑底较地表影响更为显著; 泊松比对岩土开挖回弹影响也较为明显; 折减比例较小时, 弹性模量和黏结力的敏感性较为突出, 对地表回弹位移和基坑底部回弹位移影响较大; 而内摩擦角对基坑底部回弹位移与地表回弹位移基本没有影响。研究结果可为岩土体基坑开挖的设计和回弹预测提供参考。

关键词: Mohr-Coulomb; 本构模型; 弹塑性; 基坑; 回弹

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0024-06

作者简介: 袁海平(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下工程结构与岩土体共同作用理论、工程动力灾变演化与灾害评价的教学与研究工作。E-mail: seapie@hfut.edu.cn。

Rebound effect of rock & soil excavation based on M-C elastic-plastic constitutive model

YUAN Hai-ping^{1, 2}, HAN Zhi-yong¹, LIN Hang^{2, 3}, WANG Bin¹, CHEN Shui-mei¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. The State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, CUMT, Xuzhou 221000, China; 3. School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In view of the rebound phenomenon in numerical simulation calculation of rock & soil excavation, based on the M-C elastic-plastic constitutive model, the rebound effect is studied during the excavation process of a foundation pit. The mechanical mechanism and the sensitivity of the mechanical parameters for the rebound effect in rock mass constitutive model are analyzed. Besides, the solution to the rebound in numerical simulation of excavation is explored. The research results show that the effect of parameters in the M-C constitutive model on the rebound is as follows: (1) The impact of geotechnical gravity density on rebound of general rock mass excavation is relatively sensitive, and the effect on the bottom is far more significant than that on the surface. (2) The effect of Poisson's ratio on rebound displacement of excavating rock & soil is also obvious. (3) When the ratio of reduction is small, the sensitivity of elastic modulus and cohesive force is prominent. The effect on the bottom and the surface is significant on the whole. (4) However, the internal friction angle of rock and soil basically has no effect on the bound deformation. This study may provide reference for the design of excavation of foundation pits and rebound prediction.

Key words: Mohr-Coulomb; constitutive model; elastic-plasticity; foundation pit; rebound

0 引言

Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型(以下简称 M-C 模型)作为岩土体破坏的强度准则, 由于其能较好反映岩土材料的塑性变形特性, 且土体参数易通过常规试验测得, 因而在岩土工程实践中有着广泛的应用。但 M-C 屈服准则由于对加载和卸载采用同一模量, 因而在得到合理围护结构侧向变形的同时, 往往导致

不合理的坑底及地表隆起变形^[1]。

基坑开挖回弹隆起变形对基坑稳定性具有重大影响, 一直是岩土工程界研究的热点。国内外学者对

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004007, 51304240); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金项目(12KF06)

收稿日期: 2014-07-28

*通讯作者

此做了相关研究, 取得了一些有意义的成果。李建民等^[2]通过室内模型试验对土体回弹变形与再压缩变形规律进行了研究, 得出基底以下同一深度处土体的回弹变形沿基坑宽度分布形状类似倒扣的锅底形。Teng 等^[3]研究了深、大基坑设计回弹再压缩变形计算方法。张建新等^[4]以天津站交通枢纽深基坑工程为背景, 基于开挖实测资料和数值模拟计算结果对比, 对超深逆作基坑开挖卸荷引起的立柱桩隆沉、地下连续墙变形和层板变形进行了分析。宋林辉等^[5]考虑土体在开挖过程中的固结影响, 分析了固结对坑底土体回弹的影响程度。刘国彬等^[6]针对软土基坑开挖时坑底土体的隆起存在明显时间效应这一问题, 利用三轴流变试验仪, 模拟基坑开挖时坑底土体的应力路径。WU 等^[7-8]对拱坝基础开挖回弹力学行为进行了研究, 提出了确定坝体合理浇筑时间的方法。笔者等^[9]基于 M-C 准则, 提出了一种新的塑性元件, 并假定材料屈服后完全服从 M-C 塑性流动规律, 推导了相应的黏弹性本构关系。田振等^[10]认为密集的工程桩可以显著地减少基坑的回弹。陆培毅等^[11]定量分析了基坑形状、基坑开挖面积以及开挖深度等因素对基坑开挖回弹量的影响。郑刚等^[12]应用三轴试验对基坑工程开挖与降水交替作用下开挖区土体的强度与变形性状进行模拟, 得出大深度降水能显著减小坑底土体回弹总量。杨敏等^[13]不考虑桩身自重的情况, 以残余应力法和明德林解为基础, 提出了深基坑开挖卸载坑底土回弹对立柱桩受力和位移的计算方法。孔令荣^[14]在分析应力路径原理的基础上, 基于“残余应力方法建立基坑隆起变形计算模型”, 通过对实际工程案例进行计算, 预测了基坑土体的最终变形。李德宁等^[15]根据坑底土残余应力为开挖卸荷坑底土层回弹影响范围内有效自重应力原理的方法并配合常规压缩试验, 给出了一种新型实用基坑回弹变形的计算方法。

基坑开挖过程中, 基坑回弹量的大小是决定基坑稳定性的重要因素, 当回弹变形量超过一定值时, 可能造成基坑失稳。当前对于开挖回弹的研究取得了一定成果, 但由于岩土体本身的复杂性及施工等因素的多样性, 岩土体开挖回弹有待进一步研究, 特别是开挖回弹机理与回弹效应方面, 更需深入研究。为此, 本文结合 M-C 弹塑性本构模型的基本原理, 拟开展工程开挖引起岩土体回弹的力学机制及回弹效应的分析, 综合探讨岩土体参数敏感性, 在此基础上得出影响岩土体开挖回弹敏感性的主要力学指标, 以进一步指导岩土工程开挖设计。

1 M-C 准则基本原理

Mohr-Coulomb 准则表示材料在复杂应力状态下沿某一斜截面上的剪应力达到了某一极限值而发生屈

服, 破坏包络线在应力空间 (σ_1, σ_3) 如图 1 所示, M-C 准则对应从点 A 到点 B 的破坏包络线表达式为

$$f_s = \sigma_3 - \sigma_1 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} = 0. \quad (1)$$

式中 $N_\varphi = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}$; σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; c 为土的黏聚力; φ 为内摩擦角。

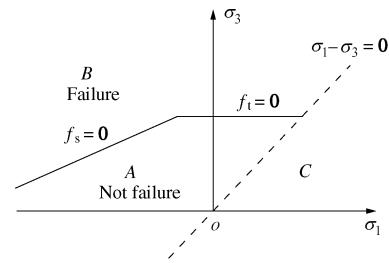


图 1 破坏包络线

Fig. 1 Failure envelope

由于岩土体压缩状态与伸长状态下洛德参数不同, M-C 弹塑性本构模型屈服条件的屈服面是一个如图 2 所示的不规则的六角形截面的角锥体表面。

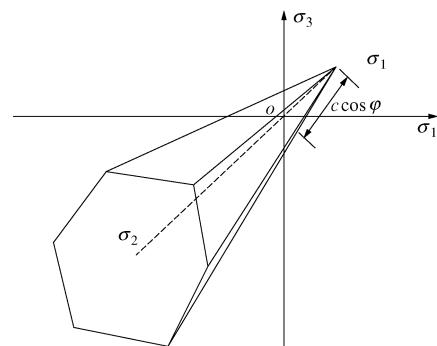


图 2 Mohr-Coulomb 屈服面

Fig. 2 Mohr-Coulomb yield surface

M-C 准则在平面应力状态下的形式为

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + (\cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0. \quad (2)$$

式中 I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为偏应力张量第二不变量; θ_σ 为洛德角; c 为土的黏聚力; φ 为土的内摩擦角。

2 开挖回弹力学机制分析

在计算过程中, 常应变六面体单元将以其角点为顶点被程序自动分解成若干常应变四面体单元, 变量均在四面体单元上进行计算, 六面体单元的应变、应力取值为其四面体的体积加权平均。

以图 3 节点 l 为研究对象, 将力和质量均集中在节点上。各时步的应力增量叠加可得到总应力, 然后

由虚功原理求出下一时步的节点不平衡力。四面体单元 a 对其节点 l 的不平衡力的贡献可如下计算:

$$P_a^{<l>} = \frac{1}{4} \rho b_a V + \frac{1}{3} \sigma_{ij} n_j^{<l>} S^{<l>} , \quad (3)$$

式中, ρ 为材料密度, b_a 为单元 a 单位质量体积力, S 为四面体的外表面, l 为节点编号, n_j 为外表面的单位法向向量分量。

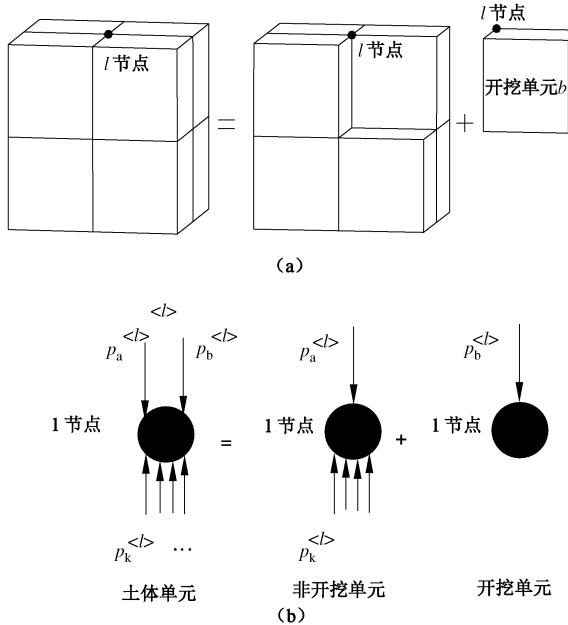


图 3 单元节点力计算原理

Fig. 3 Computational principle of nodal force

任一节点的节点不平衡力为包含该节点的所有单元中非开挖体和开挖体对该节点的贡献之和, 如图 3 (b) 所示, 则节点 l 不平衡力为

$$F^{<l>} = \sum_{i=1}^n P_i^{<l>} + P_b^{<l>} , \quad (4)$$

式中, $P_b^{<l>}$ 为开挖体施加在节点 l 上的力, n 为除开挖单元以外的单元数。

每级开挖面上各节点的等效节点不平衡力求出后, 将其反作用在下一开挖面上, 则对于下一开挖面上的每个节点, 由运动方程:

$$\frac{dv^{<l>}}{dt} = \frac{1}{M^{(l)}} F^{<l>} . \quad (5)$$

根据中心差分格式得新节点的速度为

$$v^{<l>} (t + \frac{\Delta t}{2}) = v^{<l>} (t - \frac{\Delta t}{2}) + \frac{\Delta t}{M^{<l>}} F^{<l>} . \quad (6)$$

则节点位移为

$$u^{<l>} (t + \Delta t) = u^{<l>} (t) + \Delta v^{<l>} (t + \frac{\Delta t}{2}) . \quad (7)$$

对于静态问题, 由于在不平衡力中非黏性阻尼 $f^{<l>}$ 的作用使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态 (即不平衡力接近零), 此时, 节点不平衡力为

$$F^{<l>} = \sum_{i=1}^n P_i^{<l>} + P_b^{<l>} + f^{<l>} ,$$

$$f^{<l>} = -a |F^{<l>}| \text{sign}(v^{<l>}) , \quad (8)$$

其中, a 为阻尼常数,

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} 1, \dots & (y > 0) \\ -1, \dots & (y < 0) \\ 0, \dots & (y = 0) \end{cases} .$$

土体经过逐层开挖后, 应力释放, 每一节点的不平衡力反作用在下一开挖面上, 经过重新平衡分配后, 使土体产生运动, 从而引起坑底和基坑周围地表土体产生位移, 即出现了回弹变形。由于在不平衡力中非黏性阻尼的作用使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态, 从而地表回弹沿基坑边缘向四周逐渐减小直至在一定范围内趋向于零。

岩土体经过工程开挖扰动, 产生应力释放, 引起地表和基坑底面土体回弹现象, 如图 4 所示。

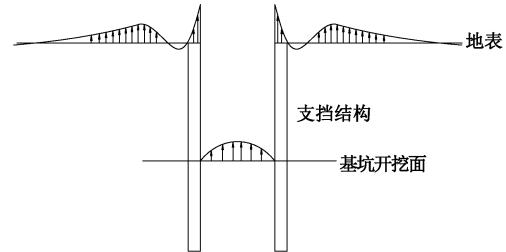


图 4 开挖回弹示意图

Fig. 4 Sketch of excavation rebound

3 回弹力学参数敏感性分析

基坑开挖过程中, 随着坑底土体的自重力释放, 坑底土体向上回弹, 引起坑内土体和基坑周围地层出现回弹变形, 主要包括周围地表回弹位移和基坑底部回弹位移, 图 5 给出了其计算模型。

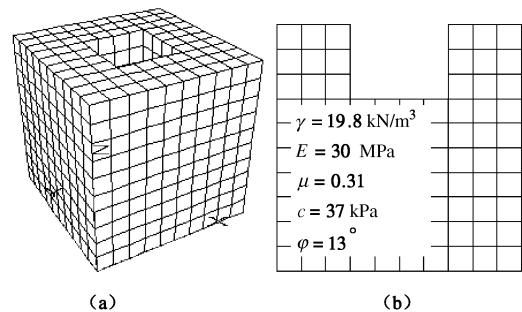


图 5 计算模型

Fig. 5 Computational model

应用强度折减法, 分别对重度 γ , 弹性模量 E , 泊松比 ν , 黏结力 c , 内摩擦角 φ 等各单因素变化条件下对应的岩土体开挖回弹变形量及开挖回弹参数敏感性进行了分析, 图 6, 7 所示为地表回弹位移和基坑

底部回弹位移与各因素折减比例(相对于初始值的比值)的关系曲线。

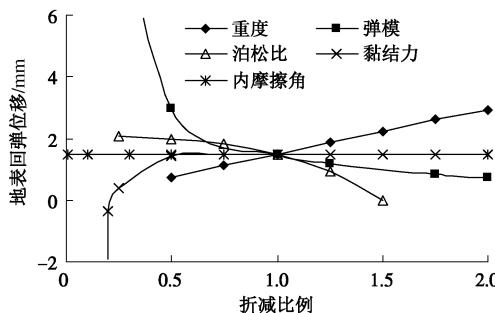


图 6 地表回弹位移与折减比例关系曲线

Fig. 6 Relationship between surface rebound displacement and reduction ratio

由图 6, 7 可以看出, 开挖回弹量与岩土体的重度基本呈线性关系, 岩土体开挖回弹量随着土的重度的增加而逐渐增大。随着折减比例的增大, 基坑底部回弹位移较地表回弹位移增大较快, 斜率较陡。折减比例增大 1 倍时, 基坑底部回弹位移和地表回弹位移分别较原来增加 100%; 折减比例增大 3 倍时, 基坑底部回弹位移和地表回弹位移较原来增加 3 倍, 分别达到 10.802 mm 和 2.9098 mm, 说明岩土重度 γ 对一般开挖回弹量影响较大, 且坑底较地表影响更为显著。

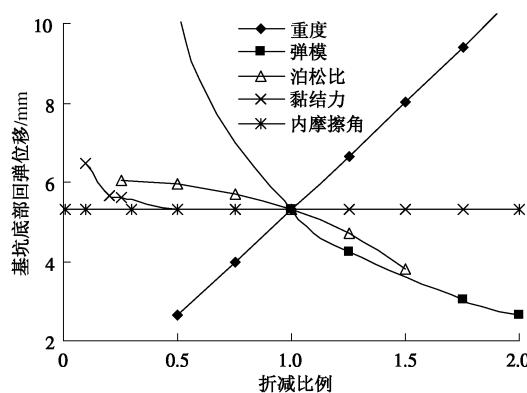


图 7 坑底回弹位移与折减比例关系曲线

Fig. 7 Relationship between bottom rebound displacement of foundation pit and reduction ratio

弹性模量 E 变化时, 由图 6, 7 可见, 地表回弹位移和基坑底部回弹位移在折减比例小于 0.5 时随着其增大而降低较快。折减比例由 0.1 提高到 0.5 时, 基坑底部回弹位移由 53.0491 mm 减小到 10.611 mm, 地表回弹位移由 14.913 mm 减小到 2.9827 mm。但由 0.5 增加到 10 时, 地表回弹位移和基坑底部回弹位移虽然有减小的趋势, 但坡度较缓, 说明弹性模量超过 15 MPa 时, 对地表回弹位移和基坑底部回弹位移影响总体上较小。在实际工程中由于开挖面以下的岩土体

在基坑开挖过程中起支撑作用, 因此对坑底土体采取适当的加固措施, 增大弹性模量, 可以防止因坑底土体回弹过大导致基坑失稳破坏。

随着泊松比 ν 的增加, 基坑底部回弹位移和地表回弹位移逐渐减小, 与弹性模量相比变化速度较小, 在其由 0.25 增大到 1.5 时, 基坑底部回弹位移由 6.055 mm 减小到 3.7934 mm, 而地表回弹位移由 2.0615 mm 减小到 -0.012057 mm, 此时不发生回弹, 说明泊松比的变化对岩土开挖回弹影响也较为显著。

由图 6 可见, 在黏结力折减比例小于 0.2 时, 地表回弹位移为负值, 即地表出现沉降, 没有发生回弹, 随着折减比例的增大, 地表沉降逐渐减小, 之后, 出现了回弹位移并开始增大。而由图 7 可见, 基坑底部回弹位移则一直减小, 当折减比例超过 0.75 时, 地表回弹位移和基坑底部回弹位移均为一定值, 分别为 1.4913 mm 和 5.3053 mm, 不随黏结力的变化而改变, 说明岩土体黏结力 c 超过 37 kPa 时, 对开挖回弹位移没有影响。

岩土内摩擦角 φ 变化时, 基坑底部回弹位移和地表回弹位移基本上分别维持在 5.3053 mm 和 1.4913 mm, 为一定值, 对地表回弹位移和基坑底部回弹位移基本没有影响。

4 讨 论

前文分析了岩土体开挖回弹力学机制和回弹力学参数的敏感性, 为进一步分析岩土体开挖引起的回弹现象, 并探讨数值计算开挖回弹解决办法, 本文对合肥地铁 1 号线大东门站基坑回弹进行了数值模拟。

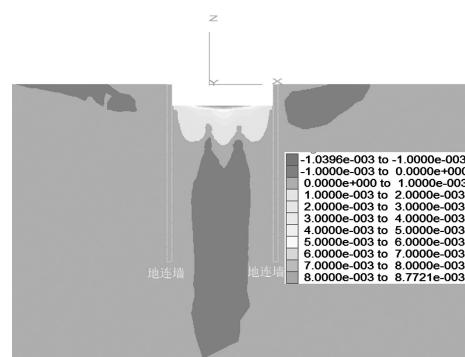


图 8 基坑开挖竖向位移等值云图

Fig. 8 Contours of vertical displacement during excavation of foundation pit

从图 8, 9 可知, 坑底回弹量达到最大值, 并且向两侧地连墙方向基坑回弹量逐渐减小, 地表回弹同样是基坑边缘较大, 向外侧逐渐减小, 显然, 验证了开挖回弹的力学机制能较好地分析基坑开挖过程的回弹现象。

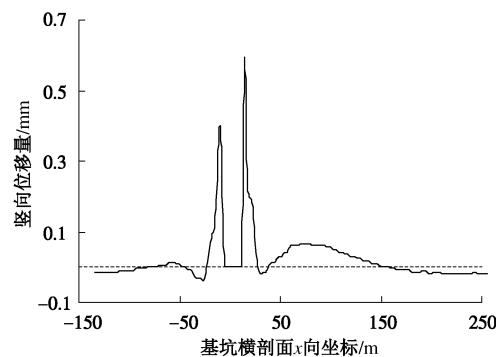


图 9 不同位置地表回弹关系曲线图

Fig. 9 Relationship curve of surface rebound at different positions

岩土体开挖回弹的根本原因在于支挡结构与被开挖土体刚度相差过大,从而引起位移不连续。可以考虑在支挡结构与岩土体接触位置用 interface 接触面单元来模拟接触面问题,即如图 10 所示,在接触面的两侧各取一点组成一个单元,两点之间用相互正交的两个弹簧进行连接,模拟单元的切向和法向刚度矩阵,建立力与相对位移之间的线性关系,节点上计算出的法向力分布在目标面上,节点上的剪切力加权平均分布在与节点相连的反方向面的节点上,接触面接触性体现在接触面节点上,并且接触力仅在节点上传递。为了保持数值计算的稳定性,接触面刚度加到接触面两边节点的计算刚度上。这样,由于刚度的增加,可以减小岩土体在竖直方向的回弹位移,同时,也能很好地反映接触面上支挡结构与土体间的错动变形。

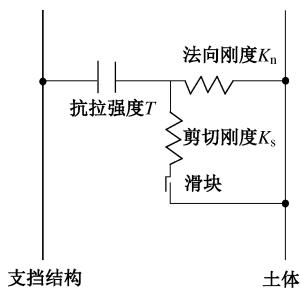


图 10 接触面单元基本原理示意图

Fig. 10 Sketch of basic principle of interface elements

5 结 论

针对数值模拟开挖计算通常出现岩土体回弹现象,本文对岩土体开挖回弹过程的力学机制和本构模型回弹力学参数的敏感性进行了分析,并探讨了岩土体开挖回弹的解决办法,研究表明:

(1) 基坑开挖过程中,随着开挖土体的卸除,土体自重力释放,地表和基坑底部将出现不同程度的回弹。

(2) 岩土重度 γ 和弹性模量 E 等对一般岩土体开挖回弹的影响较为敏感,且坑底较地表影响更加显

著;黏结力 c 在折减比例较小时,对基坑底部回弹位移和地表回弹位移影响较大,当超过 0.5 时,基本没有影响;内摩擦角 φ 对基坑底部回弹位移和地表回弹位移影响不明显。

(3) 接触面单元的建立,接触面两边节点的计算刚度的增加,可以减小岩土体在竖直方向的回弹位移,很好地反映接触面上支挡结构与土体间的错动变形。

(4) 加强对岩土体开挖回弹的观测,可以更好地预测岩土体回弹变形,从而便于采取合理的措施控制基底回弹,保证开挖过程中基坑的稳定性

参 考 文 献:

- [1] 丁勇春,王建华,徐斌.基于 FLAC3D 的基坑开挖与支护三维数值分析[J].上海交通大学学报,2009, 43(6): 976 - 980. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua, XU Bin. Three-dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC3D[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(6): 976 - 980. (in Chinese))
- [2] 李建民,滕延京.基坑开挖回弹再压缩变形试验研究[J].岩土工程学报,2010, 32(增刊 2): 81 - 84. (LI Jian-min, TENG Yan-jing. Model test on rebound deformation in foundation pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 81 - 84. (in Chinese))
- [3] TENG Y, LI J, WANG S. Experimental study on the method of rebound and recompression deformation calculation in deep and large foundation design[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, 2013: 2873 - 2876.
- [4] 张建新,刘双菊,周嘉宾.逆作基坑开挖卸荷对工程结构的影响分析[J].岩土力学,2010, 31(增刊 2): 81 - 84. (ZHANG Jian-xin, LIU Shuang-ju, ZHOU Jia-bin. Analysis of influence of foundation pits excavation unloading by top-down method on engineering structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 81 - 84. (in Chinese))
- [5] 宋林辉,梅国雄,宰金珉.考虑固结的基坑开挖回弹问题有限层求解[J].计算力学学报,2009, 26(6): 942 - 946. (SONG Lin-hui, MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Finite layer analysis for excavation rebound considering consolidation[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6): 942 - 946. (in Chinese))
- [6] 刘国彬,贾付波.基坑回弹时间效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007, 26(增刊 1): 3040 - 3044. (LIU Guo-bin, JIA Fu-bo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(增刊 1): 3040 - 3044. (in Chinese))

- Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3040 - 3044. (in Chinese))
- [7] WU Z R, GU Y C, SU H Z, et al. Mechanical effects of excavation rebound of arch dam bedrock and better concreting time of dam body[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(2): 513 - 517.
- [8] WU Z R, GU Y C, GU C S. Establishing time-dependent model of deformation modulus caused by bedrock excavation rebound by inverse analysis method[J]. Technological Sciences, 2008, **51** (2): 1 - 7.
- [9] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石黏弹塑性本构关系及改进的 Burgers 蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6): 796 - 799. (YUAN Hai-ping, CAO Ping, XU Wan-zhong, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(6): 796 - 799. (in Chinese))
- [10] 田振, 顾倩燕. 大直径圆形深基坑基底回弹问题研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1360 - 1364. (TIAN Zhen, GU Qian-yan. Researches on heave of circular deep foundation pits with super diameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1360 - 1364. (in Chinese))
- [11] 陆培毅, 余建星, 肖健. 深基坑回弹的空间性状研究[J]. 天津大学学报, 2006, **39**(3): 301 - 305. (LU Pei-yi, YU Jian-xing, XIAO Jian. Three-dimensional properties of foundation pit resilience under unloading[J]. Journal of Tianjin University, 2006, **39**(3): 301 - 305. (in Chinese))
- [12] 郑刚, 魏少伟, 徐舜华, 等. 基坑降水对坑底土体回弹影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(5): 663 - 668. (ZHENG Gang, WEI Shao-wei, XU Shun-hua, et al. Effect of dewatering of foundation pits on soil heave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(5): 663 - 668. (in Chinese))
- [13] 杨敏, 逯建栋. 深开挖基坑回弹引起的坑中桩受力与位移计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(12): 1730 - 1735. (YANG Min, LU Jian-dong. A Calculation of behavior of underpinning pile subject to excavation of deep foundation pit[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, **38**(12): 1730 - 1735. (in Chinese))
- [14] 孔令荣. 考虑残余应力的基坑回弹变形分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 79 - 82. (KONG Ling-rong. Rebound deformation of foundation pits considering residual stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 79 - 82. (in Chinese))
- [15] 李德宁, 楼晓明, 杨敏. 基坑回弹变形计算方法研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(9): 1921 - 1927. (LI De-ning, LOU Xiao-ming, YANG Min. Research and application of calculation methods for rebound deformation of foundation pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1921 - 1927. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)