

# 悬臂式挡土墙抗滑稳定性分析

施小平

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 基于强度折减有限元方法,对悬臂式挡土墙的抗滑稳定性进行了探讨。对比计算表明,悬臂式挡土墙的结构特征导致墙后填土内会出现第二滑裂面,其与坦墙的第二滑裂面有着本质的不同。悬臂式挡土墙的抗滑稳定性随着墙踵板、墙趾板宽度的增加而增加。当填土面倾斜时,土体主应力发生偏转,使挡土墙受到了更多土体的推挤作用,从而降低了挡土墙的稳定性。相同凸榫长度时,凸榫布置在越靠近墙踵板后下方的位置得到的安全系数最大,而布置在墙趾板前下方的安全系数较小。随着凸榫高度的增加,挡土结构物的安全系数也增大。实际工程中应尽量选择重度较小、黏聚力与内摩擦角较大的土体作为填料。

**关键词:** 悬臂式挡土墙; 稳定性; 滑裂面; 有限元

**中图分类号:** TU452    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0108-05

## Stability analysis of cantilever retaining wall

SHI Xiaoping

(School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The shear strength reduction finite element method was used to analyze the stability of cantilever retaining wall. Due to the structural characteristics of cantilever retaining wall, a second slide surface can be found in the filling behind the retaining wall, which is essentially different from the second slide surface of the planar retaining wall. The stability of cantilever retaining wall increases with the increasing width of heelplate and toe board. When the filling surface is inclined, the principal stress deflects and the retaining wall receives more compression from the soil body, which can decrease the stability of the retaining wall. With the same length of tenon, the stability of the retaining wall is the highest when the tenon is located at the below and back of heelplate, and the lowest when the tenon is located at the below and back of toe board. The stability of the retaining wall increases with the increasing height of tenon. In practice, it is suggested to fill the retaining wall using the soil with low weight, high cohesive strength, and high internal friction angle.

**Key words:** cantilever retaining wall; stability; slide surface; finite element method

悬臂式挡土墙是由立臂式面板、墙趾板、墙踵板三部分组成的。采用钢筋混凝土材料建造的支挡结构。它依靠墙身自重和墙底板以上填筑土体(包括荷载)的重力维持挡土墙的稳定,具有厚度小、自重轻、高度较大、投资经济等特点,适用于石料缺乏和地基承载力较低的填方路段<sup>[1-4]</sup>。

一般地,悬臂式挡土墙设计中需验算抗滑稳定性、抗倾覆稳定性、墙身截面强度、地基承载力等内容<sup>[5-9]</sup>。在此过程中,通常采用郎肯理论或库伦理论进行土压力计算。郎肯土压力理论假定挡土墙背光滑、直立、填土面水平,库伦土压力理论假定墙后填土是理想的散粒体、滑动破坏面为一平面、滑动土体为刚体。但是这些假定与实际情况不尽相同,

因此有时给计算结果带来较大的误差。特别是对于挡土墙构型多变、地质条件复杂的情况,采用传统方法对挡土墙进行稳定性分析困难更大。随着有限元技术的发展,利用有限元数值模型分析挡土墙结构的稳定性成为一种有效的途径。

为此,本文基于强度折减有限元方法,对悬臂式挡土墙的稳定进行了系统性研究,考察了墙踵板与墙趾板长度、凸榫长度与位置、填土面倾角、填土参数等对稳定性的影响,为悬臂式挡土墙的设计与应用提供参考。

## 1 有限元计算模型

悬臂式挡土墙高度不宜大于6 m,当墙高大于4 m时,

收稿日期: 2014-06-17    修回日期: 2014-11-17    网络出版时间: 2014-12-03  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1140.008.html>  
基金项目: 国家自然科学基金项目(41306088)  
作者简介: 施小平(1971-),男,安徽枞阳人,讲师,博士研究生,主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: 165638797@qq.com

宜在墙面板前加肋,其基础埋置深度不应小于 1.0 m。为提高挡土墙抗滑稳定性,可在底板设置凸榫。

现针对某一典型悬臂式挡土墙断面进行分析。

其立臂、墙踵板、墙趾板厚度均为 0.5 m,墙趾板宽度为  $B_1$ ,墙踵板宽度为  $B_2$ ,填土高度 4.0 m,填土面与水平面夹角为  $\beta$ ,基础埋置深度 1.0 m,凸榫宽度为 0.5 m、高度为  $H$ ,凸榫边缘距墙踵板边缘为  $B_3$ ,挡土墙的几何构型见图 1。

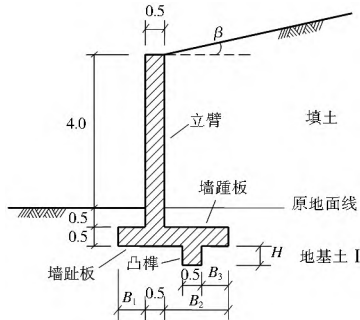


图 1 挡土墙几何构型断面(单位:m)

Fig. 1 Geometry section of the retaining wall

将挡土墙按平面应变问题考虑,地基土与填土材料的本构模型采用莫尔-库仑理想弹塑性模型,挡土墙为钢筋混凝土结构,其强度较高,可按线弹性材料考虑,土层及结构物的计算参数见表 1。

挡土墙与土体之间的摩擦通过设置接触面单元来实现。接触面单元采用参数  $R_{inter}$  来反映两者相互作用的程度,  $R_{inter} = [0, 1, 0]$ 。参考文献[7]的实验数据<sup>[7]</sup>,并结合墙后土体的物理力学参数,本次计算中取  $R_{inter} = 0.65$ 。

表 1 各土层的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	变形模量 $E_0 / \text{MPa}$	泊松比 $\nu$
填土	17.5	6.0	21.4	6.0	0.33
地基土 I	19.0	12.0	22.0	9.0	0.28
地基土 II	19.5	31.0	25.0	9.5	0.30
挡土墙	23.5			2.47E4	0.21

为了消除边界条件的影响,有限元计算域应足够大。计算中取地基土厚 7 m,右侧填土方向宽度 14 m,挡土墙墙趾处土体宽度 6 m。有限元计算的边界条件为:底部采用固定边界条件,即水平和竖向的位移均约束,两侧为水平方向位移约束条件。采用 15 节点的三角形单元对计算模型进行网格划分,图 2 给出了  $B_1 = 0.5 \text{ m}$ 、 $B_2 = 1.5 \text{ m}$ 、 $H = 0 \text{ m}$ 、 $\beta = 0^\circ$  情况下的有限元网格的划分情况。

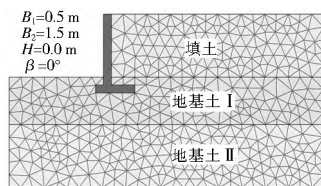


图 2 有限元网格划分(单元:856个)

Fig. 2 Finite element mesh discretization(number of elements: 856)

一般地,挡土墙常先于填土施工,故可认为在填土施工时,地基土及挡土墙的重应力固结沉降和变形已完成,通

过激活填土计算单元的方法来模拟填土的填筑。

采用强度折减有限元方法<sup>[8-10]</sup>来计算挡土墙的抗滑稳定性。其操作步骤为:在弹塑性有限元数值计算中,首先对于某一假定的强度折减系数  $F_{trial}$ ,将各土层的实际强度参数  $c$ 、 $\varphi$  按照式(1)同时进行折减。

$$c_r = \frac{c}{F_{trial}} \quad \varphi_r = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_{trial}}\right) \quad (1)$$

式中: $c_r$ 、 $\varphi_r$  分别为折减后黏聚力和内摩擦角。以此对挡土墙进行弹塑性有限元计算,如果根据一定的失稳判据<sup>[7]</sup>确定挡土墙达到极限平衡状态,则与此相对应的强度折减系数  $F_{trial}$  就是总体安全系数  $F_a$ ,否则对于新假定的折减系数重复进行计算,直至土体达到临界极限平衡状态。本次计算中联合采用特征部位位移的突变性和塑性区的贯通性作为挡土墙的失稳判据<sup>[11]</sup>。大量研究表明<sup>[12-13]</sup>,采用强度折减有限元方法分析挡土墙稳定性是可行的。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 墙踵板宽度对稳定性的影响

由于剪应变较大的位置往往是滑裂面经过的位置,因此可用剪应变等值线最大值的连线来表示滑裂面的位置。图 3 给出了墙踵板长度变化时墙后填土的滑裂面位置情况。可见,墙后填土中明显存在第一、第二滑裂面,其紧贴板底并穿过墙趾板前方的土体贯穿原地面。

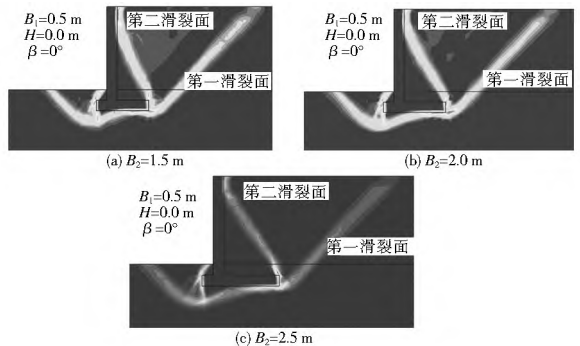


图 3 墙踵板宽度对滑裂面位置的影响

Fig. 3 Effects of the width of retaining wall heelplate on the position of slide surface

工程中把出现第二滑裂面的挡土墙定义为坦墙。产生第二滑裂面的条件与墙背倾角  $\alpha$ 、墙背与土摩擦角  $\delta$ 、土体的内摩擦角  $\varphi$ 、填土的坡角  $\beta$  等因素有关,一般可用临界倾角  $\alpha_r$  来判别:当墙背倾角  $\alpha > \alpha_r$  时,可产生第二滑裂面。临界倾角  $\alpha_r$  可用下式表达<sup>[13]</sup>:

$$\alpha_r = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} + \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \beta}{\sin \varphi} \quad (2)$$

若填土面水平( $\beta = 0^\circ$ )时,可求得  $\alpha_r = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ ,此时坦墙的滑裂面分布见图 4。

那么图 3 所示的第二滑裂面是否就是图 4 坦墙的第二滑裂面?文献[13]认为有限元求得的悬臂式挡土墙的第二滑裂面就是坦墙的第二滑裂面。事实上,由于悬臂式挡土墙的结构特征,使得立臂与墙踵板之间三角地带的填土受到“保护”,免遭剪切破坏,即滑裂面无法通过立臂与墙踵板之

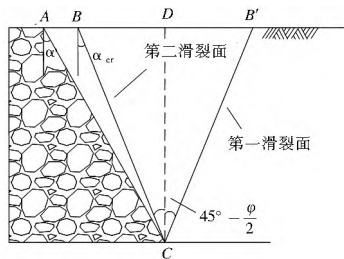


图 4 坦墙的滑裂面分布

Fig. 4 Position of the slide surface in the planar retaining wall

间位置较低的区域(图 5)。而图 6 所示的重力式挡土墙的典型滑裂面形状中,土体沿挡土墙墙背发生滑动,与图 3 所示的悬臂式挡土墙破裂形态明显不同。

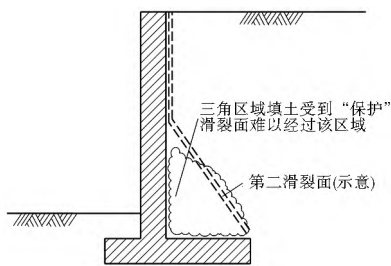


图 5 悬臂式挡土墙中远离破裂面的土体

Fig. 5 Soil body apart from the slide surface in the cantilever retaining wall

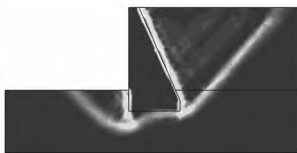


图 6 重力式挡土墙的典型滑裂面形状

Fig. 6 Typical slide surface in the gravity retaining wall

有限元计算表明,即使墙踵板宽度取小值,如  $B_2 = 0.5$  m 时的墙背倾角  $\alpha = 7.13^\circ \leq \alpha_{cr} = 34.3^\circ$ , 仍会出现第二滑裂面。可见,出现第二滑裂面是悬臂式挡土墙的固有特征,其与坦墙的第二滑裂面是不相同的,不受  $\alpha > \alpha_{cr}$  控制条件的约束。

进一步计算,得到了  $\beta = 0^\circ$ 、 $H = 0.0$  m、 $B_1 = 0.5$  m 条件下墙踵板宽度变化对挡土墙稳定性的影响,结果见图 7。可见,墙踵板宽度越大,挡土墙的安全系数越高。当然,墙踵板宽度越大施工难度越大,实际工程中需根据稳定性的具体需求选择墙踵板的合适宽度值。

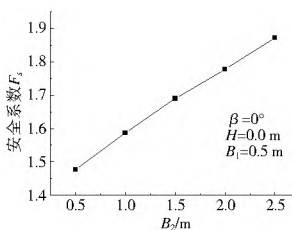


图 7 挡土墙安全系数与墙踵板宽度之间的关系

Fig. 7 Relationship between the safety factor of retaining wall and width of heelplate

## 2.2 墙趾板宽度对稳定性的影响

墙趾板主要提高挡土墙的抗倾覆稳定性。经计算, $\beta = 0^\circ$ 、 $H = 0.0$  m、 $B_2 = 1.5$  m 条件下墙趾板宽度变化对挡土墙

稳定性的影响结果见图 8。可见,挡土墙的安全系数随着墙趾板宽度的增加而变大。

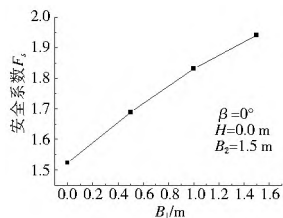


图 8 挡土墙安全系数与墙趾板宽度之间的关系

Fig. 8 Relationship between the safety factor of retaining wall and width of toe board

可从图 9 所示的滑裂面情况可以看出,墙趾板不仅能提高挡土墙的抗倾覆稳定性,而且也能提高挡土墙的抗滑移稳定性。对比图 9 与图 3(a) 可知,墙趾板宽度为 1.5 m,填土内的第一、第二滑裂面位置及长度基本相同,但图 9 中墙趾板更宽度越大时在填土内的滑裂面更,即更多土体的抗剪强度被用来抵抗挡土墙的滑动,当然其稳定性更高。实际工程中需根据基底应力、偏心距、施工条件等因素来确定合理的墙趾板宽度。

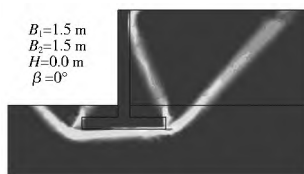


图 9 墙趾板宽度 1.5 m 时的滑裂面位置

Fig. 9 Position of the slide surface in the cantilever retaining wall with the 1.5 m wide toe board

## 2.3 填土面倾角对稳定性的影响

经计算, $B_1 = 0.5$  m、 $B_2 = 1.5$  m、 $H = 0.0$  m 条件下填土的面倾角变化与挡土墙稳定性的关系见图 10。可见,挡土墙的安全系数随着填土面倾角的增加而变小。

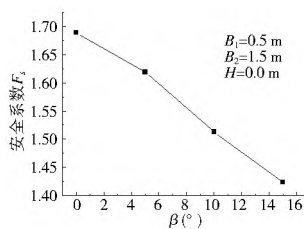


图 10 挡土墙安全系数与填土面倾角对挡土墙安全系数的影响之间的关系

Fig. 10 Relationship between the safety factor of retaining wall and inclination of filling

填土面倾角变化情况下挡土墙的滑裂面位置见图 11。可知,填土面不同倾角对第二滑裂面及墙趾板底部、墙趾板四周的滑裂面基本没有影响,而对第一滑裂面影响较大。填土面倾角越大,参与滑裂破坏的土体越多,第一滑裂面长度越大,挡土墙的安全系数越低,相当于“顺层滑坡”。这一点也可从图 12 所示的总位移增量分布图中得到佐证。挡土墙后填土的位移增量方向大致平行于第一滑裂面指向挡土墙,当填土面倾斜时,其主应力发生偏转,使得更多填土的位移方向非常容易的平行于第一滑裂面指向挡土墙,即挡土墙受

到了更多土体的推挤作用,从而降低了挡土墙的安全性。为了保证挡土墙的安全性,工程中应尽量选择填土面水平的填筑方式。

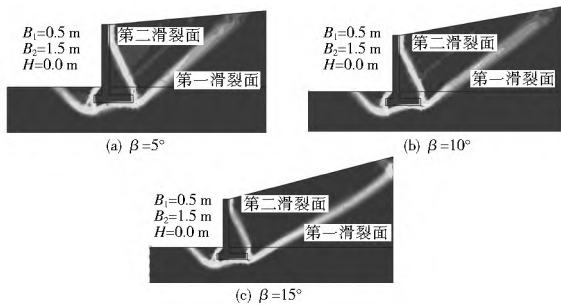


图 11 填土面倾角对滑裂面位置的影响

Fig. 11 Effects of the inclination of filling on the position of slide surface in the retaining wall

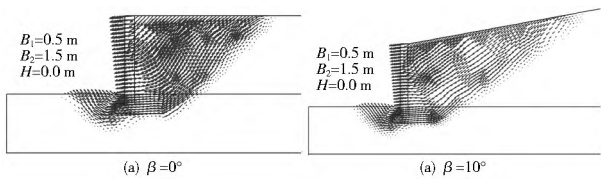


图 12 填土总位移增量分布

Fig. 12 Total incremental displacement of filling

## 2.4 凸榫的作用分析

底板设置凸榫,有助于提高挡土墙的抗滑稳定性。但凸榫的布置方式有多种,见图 13。基于强度折减有限元法计算得到了凸榫的不同布置方式和不同高度对挡土墙稳定性的影响,结果见表 2、图 14。

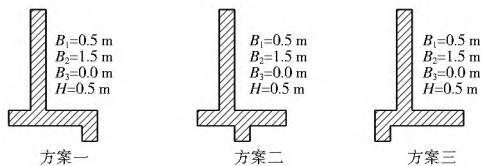


图 13 凸榫的布置方式

Fig. 13 Layout of tenon

表 2 凸榫布置方式对挡土墙稳定性的影响

Tab.2 Effects of layout of tenon on the stability of the retaining wall

方案	方案一	方案二	方案三	无凸榫
$F_s$	1.845	1.815	1.735	1.689

由表 2 可见,相同凸榫长度时,凸榫布置在越靠近墙踵板下方的位置得到的安全系数最大,而布置在墙趾板下方的安全系数较小。由图 14 可知,随着凸榫高度的增加,挡土结构物的安全系数也增大。因此,实际设计中应尽量采用方案一所示的布置方式。

## 2.5 填土土性参数的影响分析

挡土墙的填土一般就地取材,如靠近山体的挡土墙可用开挖山体产生的块石、碎石等,而有的地区可能填筑土体为黏性土、砂性土等。可见,填土的性质差别较大,有必要对土体不同参数的影响进行分析。

图 15- 图 17 分别给出了挡土墙填土重度、黏聚力、内摩擦角对悬臂式挡土墙稳定性的影响,可见填土重度  $\gamma$  取值越

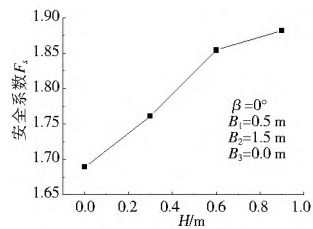


图 14 挡土墙安全系数与凸榫的高度对挡土墙安全系数的影响之间的关系

Fig. 14 Relationship between the stability of the retaining wall and height of tenon

大,挡土墙的安全性越小;随着填土土体的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  分别增大时,挡土墙的安全性有较大提高。因此,实际工程中应尽大的土体作为填料<sup>[15-16]</sup>。

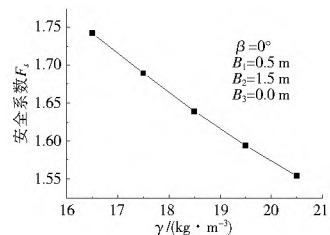


图 15 挡土墙稳定性与填土重度之间的关系

Fig. 15 Relationship between the stability of the retaining wall and weight of filling

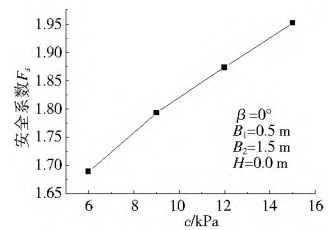


图 16 挡土墙稳定性与填土黏聚力对挡土墙稳定性的影响之间的关系

Fig. 16 Relationship between the stability of the retaining wall and cohesive strength of filling

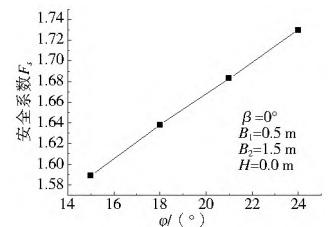


图 17 挡土墙稳定性与填土内摩擦角对挡土墙稳定性的影响之间的关系

Fig. 17 Relationship between the stability of the retaining wall and internal friction angle of filling

## 3 结论

(1) 悬臂式挡土墙的结构特征使得滑裂面无法通过立臂与墙踵板之间位置较低的区域,滑裂面必然从墙后填土内部穿过,形成第二滑裂面。出现第二滑裂面是悬臂式挡土墙的固有特征,其与坦墙的第二滑裂面有着本质区别。

(2) 悬臂式挡土墙的抗滑稳定性随着墙踵板、墙趾板宽

度的增加而增加。当填土面倾斜时,土体主应力发生偏转,使挡土墙受到更多土体的推挤作用,从而降低了挡土墙的稳定。为提高挡土墙的稳定,应尽量选择填土面水平的填筑方式。

(3) 相同凸榫长度时,凸榫布置在越靠近墙踵板后下方的位置得到的安全系数最大,而布置在墙趾板前下方的安全系数较小。随着凸榫高度的增加,挡土结构物的安全系数也增大。

#### 参考文献(References):

- [1] 梁波,王家东,葛建军,等. 青藏铁路 L 型挡土墙的土压力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 627-631. (LIANG Bo, WANG Jia dong, GE Jian jun, et al. Testing and analysis of earth pressure about L type retaining wall in Qinghai Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 627 - 631. (in Chinese))
- [2] RUI Da hu, SUZUKI Teruyuki. Protection against Frost Heave of L-type Retaining Walls in Cold Regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 612-618.
- [3] 尹子峰,金祥武. 某工程 3 号挡土墙局部滑移事故处理[J]. 工业建筑, 2004, 34(2): 88-90. (YIN Zi feng, JIN Xiang wu. Analysis and treatment of a local sliding accident of No. 3 retaining wall of project[J]. Industrial Construction, 2004, 34(2): 88-90. (in Chinese))
- [4] 陈静. 地下室挡土墙的防排水构造与侧压力计算[J]. 工业建筑, 2010, 40(增刊): 699-701. (CHEN Jing. Retaining wall and calculation of lateral pressure [J]. Industrial Construction, 2010, 40(Supp.): 699-701. (in Chinese))
- [5] TB 10025-2006. 铁路路基支挡结构设计规范[S]. (TB 10025-2006. Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade[S]. (in Chinese))
- [6] 吕凤梧. 深基坑施工过程多支撑挡土墙动态可靠度计算[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 1-5. (LV Feng wu. Dynamic Reliability Analysis on Retaining Diaphragm with Struts of Deep Excavation During Construction[J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 1-5. (in Chinese))
- [7] 冯忠居,任文峰,谢富贵,等. 公路路基特长箱涵顶进模拟试验[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 74-78. (FENG Zhong ju, REN Wen feng, XIE Fu gui, et al. Simulation experiment about oversize box culvert jacked into highway subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 74-78. (in Chinese))
- [8] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835-840.
- [9] Manzari M T, Nour M A. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(1): 75-80.
- [10] 万少石,年廷凯,蒋景彩,等. 边坡稳定强度折减有限元分析中的若干问题讨论[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2283-2288. (WAN Shao shi, NIAN Ting kai, JIANG Jing cai, et al. Discussion on several Issues in slope stability analysis based on shear strength reduction finite element methods(SSR-FEM) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2283-2288. (in Chinese))
- [11] 刘金龙,栾茂田,赵少飞,等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345-1348. (LIU Jin long, LU AN Mao tian, ZHAO Shao fei, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1345-1348. (in Chinese))
- [12] 梁学文,刘倩. 悬臂式挡土墙的有限元分析[J]. 华中科技大学学报, 2003, 20(2): 99-102. (LIANG Xue wen, LIU Qian. Finite element analysis of the cantilever retaining wall[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2003, 20(2): 99-102. (in Chinese))
- [13] 戴自航,林智勇,郑也平,等. L 型挡土墙主动土压力计算的基底摩擦系数折减有限元法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 508-514. (DAI Zi hang, LIN Zhi yong, ZHENG Ye ping, et al. Finite element method for computations of active earth pressures acting on L-shaped retaining walls with reduced friction coefficients of base bottoms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 508-514. (in Chinese))
- [14] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 219-221. (CHEN Zhong yi, ZHOU Jing xing, WANG Hong jin. Soil Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994, 219-221. (in Chinese))
- [15] 李晶,缪林昌,钟建驰,等. EPS 颗粒混合轻质土反复荷载下变形和阻尼特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1769-1775. (LI Jing, MIAO Lin chang, ZHONG Jian chi, et al. Deformation and Damping Characteristics of EPS Beads mixed Lightweight Soil under Repeated Load unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1769-1775. (in Chinese))
- [16] 顾安全,吕镇锋,姜峰林,等. 高填土盖板涵 EPS 板减荷试验及设计方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1481-1486. (GU An quan, LV Zhen feng, JIANG Feng lin, et al. Load reduction tests and design methods for culverts with high fill soil using EPS slabs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1481-1486. (in Chinese))