

网络出版时间:2012-05-22 16:32

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120522.1632.015.html>

软弱地基上齿坎式挡土结构物抗滑特征分析

刘金龙¹, 陈陆望², 王吉利³

(1 合肥学院 建筑工程系, 安徽 合肥 230022; 2 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;

3 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

【摘要】 **【目的】**探讨齿坎式挡土结构物与墙后填土共同作用下的抗滑特征, 为齿坎式挡土结构物的计算与设计提供参考。**【方法】**基于强度折减有限元法, 通过变换参数与改变挡土墙构型, 分析齿坎的作用机理与影响因素。**【结果】**软弱地基上齿坎式挡土结构物的滑裂面为一通过底板及齿坎后缘的近似圆弧面; 齿坎的设置具有最小长度的限制, 其长度应能够穿越原有的滑裂面, 从而可影响或改变原有滑裂面的形状并发挥作用; 相同齿坎长度时, 后齿布置方式的安全系数最大, 而前齿布置方式的安全系数最小; 随着齿坎长度的增加, 挡土结构物的安全系数增大。**【结论】**合理设置齿坎的长度与位置, 有助于提高挡土结构物的稳定性。

【关键词】 软弱地基; 齿坎; 挡土结构物; 强度折减有限元; 安全系数

【中图分类号】 TU452

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)06-0224-06

Character of retaining structure with tenon on weak foundation

LIU Jin-long¹, CHEN Lu-wang², WANG Ji-li³

(1 Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui 230022, China;

2 School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

3 Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: **【Objective】** In order to make some references for calculating and designing the retaining structure with tenon, the character and stability of retaining structure with tenon and filling are studied. **【Method】** Based on shear strength reduction FEM, the mechanism and influencing factor of tenon has been discussed by changing the parameters and format of tenon comparatively. **【Result】** It is shown that the slip surface of retaining structure with tenon on weak foundation is an approximate arc surface below soleplate. The effect of tenon depends on its length which should be long enough to go through the original location of slip surface. With the same length of tenon, the stability of retaining structure would be enhanced maximally when tenon is located at the rear of soleplate, and which would be enhanced minimally when tenon is located at the front of soleplate. The stability of retaining structure would be enhanced as the length of tenon increases. **【Conclusion】** The stability of retaining wall can be improved by using tenon with reasonable length and location.

Key words: weak foundation; tenon; retaining structure; strength reduction FEM; safety factor

抗滑稳定性与抗倾覆稳定性计算是挡土结构物设计过程中的主要内容。一般情况下, 对重力挡土结构物而言, 由于其墙身自重较大, 结构的抗倾覆稳定

性容易满足, 因而抗滑稳定性设计成为其控制条件^[1-2]。

齿坎式挡土结构物就是为了提高挡土结构抗滑

* [收稿日期] 2011-11-23

[基金项目] 安徽省自然科学基金项目(1208085QE89); 住房和城乡建设部研究开发项目(2010-K3-7)

[作者简介] 刘金龙(1979—), 男, 江西宜丰人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: alnile@163.com

能力而发展出的一种合理结构形式,其在底板上加设了抵抗滑动的齿坎,以改善接触面的抗剪特性,提高基底的抗滑稳定性,达到减小结构断面尺寸、降低工程造价的目的。如在杭申线崇福市河道改线工程中,采用齿坎式护岸优化结构后,不仅保证使护岸的顶部位移与沉降量满足了规范要求,而且为整个工程节约了大量资金^[3]。

尽管齿坎对提高挡土结构物的抗滑稳定性有一定的帮助,但相关设计理论还很不成熟^[4],对齿坎的作用尚不能合理计算,故经常将其视为构造措施,仅作为安全储备附加使用。

俞亚南等^[5]和屠毓敏等^[6]通过试验研究了带齿坎结构物的抗滑性能,结果表明尽管齿坎较短,但其对挡土结构物的抗滑作用较大。在此基础上,有学者进一步基于有限元方法分析了带齿坎结构物的抗滑稳定性特征^[7-10],但由于受试验条件的限制,其通过千斤顶施加水平推力来模拟挡土结构物的滑动趋势,这与实际情况下挡土结构物的滑裂破坏有较大区别。随着数值模拟计算方法的广泛使用,用数值计算方法模拟复杂情况下齿坎式挡土结构物的稳定性特征,可以弥补试验的不足。但若在数值计算中仍以等效集中荷载来模拟挡土结构物与土体的滑动破坏,其计算结果可能具有一定的局限性。为此,本研究基于强度折减有限元法,考察了齿坎式挡土结构物与墙后填土共同作用下的抗滑特征,分析了齿坎的作用机理与影响因素,以期对齿坎式挡土结构物的设计与计算提供参考。

1 强度折减有限元法的基本原理

利用强度折减有限元法来考察齿坎式挡土结构物的极限平衡状态,其基本原理是将填土与地基土的强度参数 c 、 φ 值同时除以 1 个强度折减系数而得到 1 组参数 c_r 、 φ_r 值,然后将其作为新的材料参数输入有限元进行计算^[11-12]。如果根据某种失稳判据确定土体达到极限平衡状态^[13-14],则与此相对应的强度折减系数就是总体安全系数,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。 c_r 、 φ_r 计算表达式为:

$$c_r = \frac{c}{F_{\text{trial}}}, \varphi_r = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_{\text{trial}}}\right). \tag{1}$$

式中: c_r 、 φ_r 分别为折减后的黏聚力和内摩擦角, F_{trial} 为强度折减系数, c 、 φ 分别为土层的实际黏聚力和内摩擦角。

在土体(坡体)的极限平衡稳定性分析中,整体

安全系数的定义为:在外部荷载保持不变的情况下,土体所能提供的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比,即:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\tau}. \tag{2}$$

式中: F_s 为安全系数, τ_f 为土体的抗剪强度, τ 为破裂面上的实际剪应力, σ 为破裂面上的正压力。

据此可以得到土体实际所发挥的抗剪强度为:

$$\tau = \frac{\tau_f}{F_s} = \left(\frac{c}{F_s}\right) + \sigma \left(\frac{\tan \varphi}{F_s}\right) = c_m + \sigma \tan \varphi_m. \tag{3}$$

式中: c_m 、 φ_m 分别为等效黏聚力与等效内摩擦角。有:

$$c_m = \frac{c}{F_s}, \tan \varphi_m = \frac{\tan \varphi}{F_s}. \tag{4}$$

式(2)所定义的安全系数具有一般性,同时根据式(3)可将安全系数理解为抗剪强度储备系数。

因此,当假定各点处的强度发挥程度相同时,对比式(1)与式(4)可以发现:由上述强度折减弹性有限元数值方法所确定的强度折减系数,实质上就是极限平衡法中所定义的强度储备系数,因此可作为土体(坡体)的整体稳定安全系数。

2 有限元计算模型的建立

现针对某一齿坎式挡土结构物的典型断面进行分析。该齿坎式挡土结构物顶面宽 1.0 m,底部宽 2.0 m,高 3.0 m,置于厚度为 0.5 m 的钢筋混凝土底板上,底板前端设有长度为 h 的齿坎,如图 1 所示。

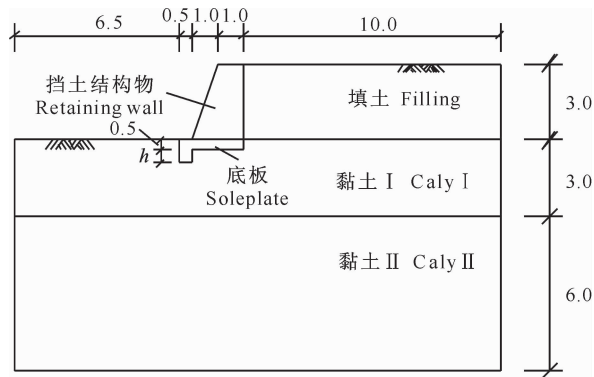


图 1 齿坎式挡土结构物计算简图(单位:m)

Fig.1 Model of retaining structure with tenon (Unit:m)

挡土结构物及其后、下方各土层的物理力学参数见表 1。采用 Mohr-Coulomb 破坏准则模拟各土层的应力应变关系,用弹性准则模拟挡土结构物与底板的应力应变关系。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约束

条件,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 给出了齿坎 $h=0.5\text{ m}$ 时有限元网格的划分情况。

表 1 齿坎式挡土结构物及其后、下方各土层的物理力学参数

Table 1 Parameters of each layer behind and under the retaining structure

土层 Soil layer	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) Gravity	黏聚力/ kPa Cohesive strength	内摩擦角/($^{\circ}$) Internal friction angle	弹性模量/ kPa Young's modulus	泊松比 Poisson's ratio
填土 Filling	19.0	10.0	8.0	2 100	0.33
黏土 I Clay I	18.0	12.0	9.0	2 500	0.30
黏土 II Clay II	19.5	15.0	12.0	3 400	0.28
挡土结构 Retaining wall	24.0			1.0×10^7	0.25
底板 Soleplate	24.5			2.0×10^7	0.20

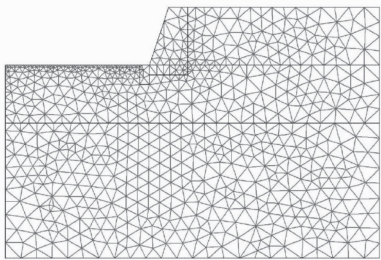


图 2 齿坎式挡土结构物计算时有限元网格的划分情况(单元:1 488 个)

Fig. 2 Mesh of FEM of retaining structure with tenon(Elements:1 488)

底板(及挡土结构物)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,当底板与土之间没有

相对滑动时, $R_{\text{inter}}=1.0$ 。实际情况下,底板与土之间的摩擦作用比较复杂,若要测得非常精确的摩擦系数,则需花费大量资金进行现场观测试验。对比计算表明,采用摩擦系数 $R_{\text{inter}}=[0,1.0]$ 的任何数值进行有限元计算,其对各参量的具体数值均有一定的影响,但并不影响各参量的规律性分布。因此,本研究计算中均假定底板与土之间没有相对位移,即在有限元计算中采用的摩擦系数 $R_{\text{inter}}=1.0$ 。

3 计算结果及分析

3.1 不设齿坎时的滑裂特征

不设齿坎情况下,基于强度折减有限元法,计算得到挡土结构物的抗滑稳定系数为 $F_s=1.435$,其破坏时的位移矢量分布图与滑裂面位置分别见图 3 与图 4。

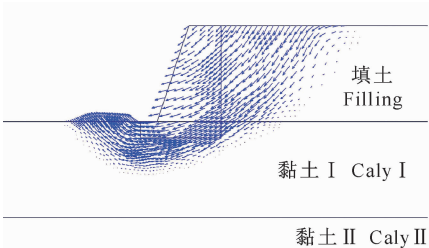


图 3 不设齿坎时挡土结构物滑裂破坏的位移矢量分布图

Fig. 3 Incremental displacement vectors of retaining structure without tenon at failure

可见,挡土结构物的滑裂面为一通过底板后缘的近似圆弧面,这与用集中荷载代替填土做法的数值模拟结果^[7-8]完全不同。事实上,黏土 I 的强度较低,属于软弱土地基,按照“建筑边坡工程技术规范”^[15],应采用圆弧滑动法验算土地基与挡土结构物的稳定性,即软弱地基上的重力式挡土结构物抗滑移稳定性,应由地基、挡土结构物与填土组成的系统来共同确定,而非仅指挡土结构物本身的稳定性。

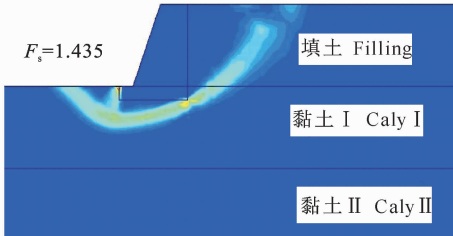


图 4 不设齿坎时挡土结构物滑裂破坏面的位置

Fig. 4 Failure surface of retaining structure without tenon

鉴于试验条件的限制,采用千斤顶施加水平推力来模拟挡土结构物的滑动趋势^[5-6]是一种简化做法。但若数值计算中仍以集中荷载来等效填土效应,其得到的破裂面为挡土结构物基底与土体接触面区域内近似水平的剪切带^[7-8],可能与实际情况并不吻合。

3.2 齿坎长度对滑裂稳定性的影响

齿坎长度 h 分别取 $0.5, 1.0, 1.5\text{ m}$ 时,挡土结构物的滑裂面位置如图 5 所示,相应的安全系数分

别为 1.437,1.484,1.575。可见,随着齿坎长度的增加,挡土结构物的抗滑稳定性逐步提高。

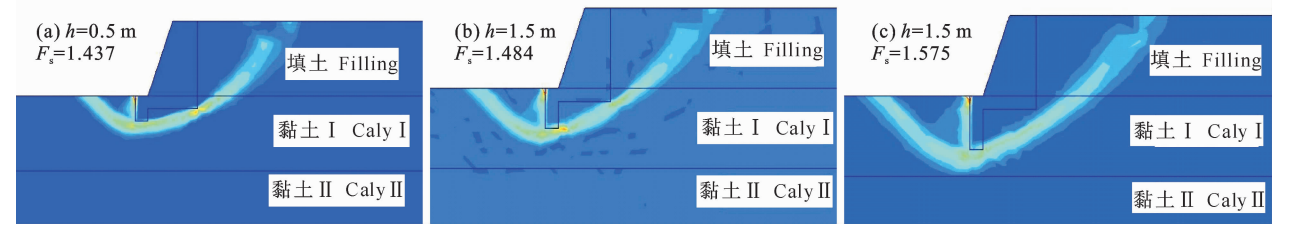


图 5 挡土结构物齿坎长度对滑裂面的影响

Fig. 5 Influence of tenon length on failure surface of retaining structure

值得注意的是,齿坎长度 $h=0.5\text{ m}$ 时的安全系数为 1.437,其与不设齿坎情况下的安全系数 1.435 相当,说明齿坎长度 $h=0.5\text{ m}$ 对提高挡土结构物的稳定性帮助较小。进一步分析图 5(a)与图 4 所示的滑裂面位置可知,两种情况下的滑裂面位置基本相同,而长度 h 为 0.5 m 的齿坎没有穿过滑裂面,因此其对阻止滑裂破坏没有贡献。

可见,齿坎的设置有限制,其长度应能够穿越原有滑裂面的位置,以影响或改变原有滑裂面的形状,才能发挥作用。图 5(b)、(c)中的齿坎使得原有滑裂面的长度增加,从而使滑裂面向更深的位置发展,因而提高了挡土结构物的稳定性。

3.3 齿坎布置位置对滑裂稳定性的影响

挡土结构物的底板由钢筋混凝土浇筑而成,齿坎是底板中设置的突出物,如图 6 所示,其布置方式

有前齿、中齿、后齿 3 种情况。

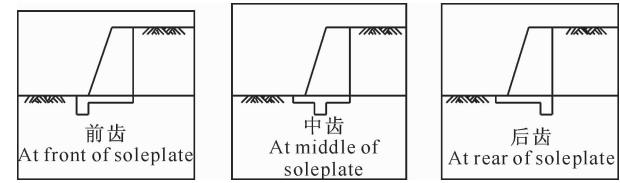


图 6 挡土结构物齿坎的布置方式

Fig. 6 Location of tenon of retaining structure

齿坎为中齿、后齿方式布置,不同齿坎高度时挡土结构物相应滑裂面的位置分布分别见图 7 与图 8。由图 7,8 可见,此时滑裂破坏面为一通过齿坎下方的下凹近似圆弧面。有研究表明,当采用集中荷载等效填土的方式作用于挡土结构物时,底板下的部分滑裂面形状为上凸形^[7-8],该结果不同于本研究的圆弧面形状。

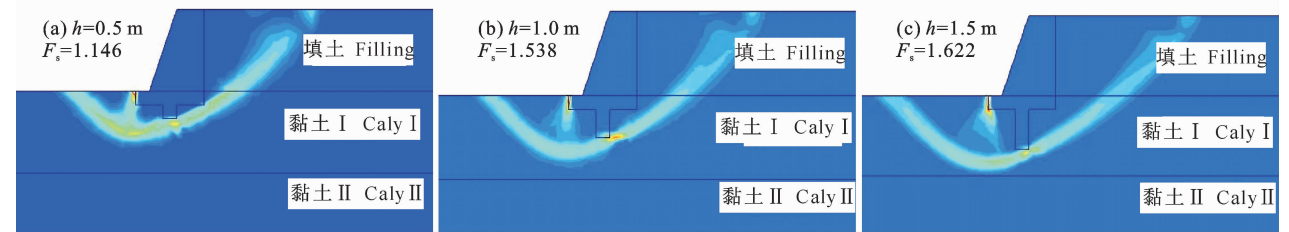


图 7 中齿布置时滑裂面的分布情况

Fig. 7 Failure surface of retaining structure with tenon located at middle of soleplate

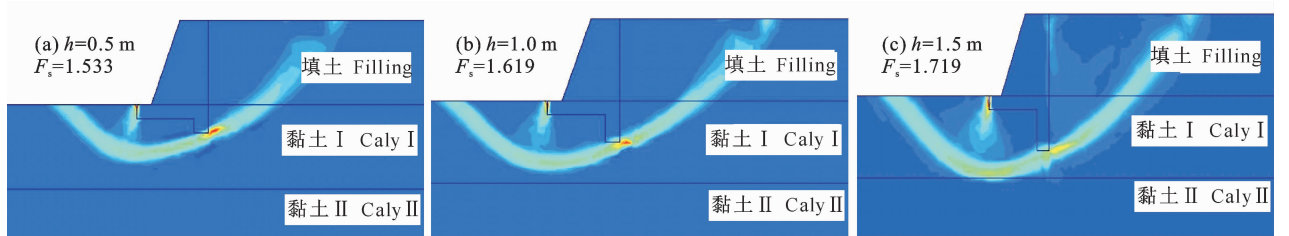


图 8 后齿布置时滑裂面的分布情况

Fig. 8 Failure surface of retaining structure with tenon located at rear of soleplate

前齿、中齿与后齿布置方式下挡土结构物的抗滑稳定性情况见图 9。由图 9 可知,相同齿坎长度

时,后齿布置方式的安全系数最大,而前齿布置方式的安全系数最小。随着齿坎长度的增加,挡土结构

物的安全系数增大,其中后齿布置方式的增幅(斜率)最大。因此,实际设计中应尽量采用齿坎的后齿布置方式,而不要采用前齿布置方式。

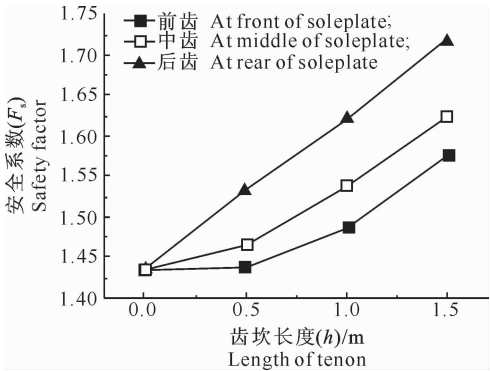


图 9 齿坎位置及长度对挡土结构安全系数的影响

Fig. 9 Influence of tenon location and length on stability of retaining structure

底板及齿坎由钢筋混凝土浇筑而成,其强度较高,滑裂面无法穿过底板,只能绕开底板及齿坎而发生滑动。若底板及齿坎迫使滑裂面绕开墙踵的距离增加,整个滑裂面的长度变大,挡土结构物破坏时要使滑裂面上土体达到临界极限状态的难度增加,因而其安全系数更高。也就是说,齿坎的作用实际上是使土体的破裂面向更深更远的地方发展,类似于锚杆、抗滑桩的作用。对比分析图 5、图 7 与图 8 可知,后齿布置方式更容易影响与改变滑裂面的位置,从而使挡土结构物的稳定性得以提高。

3.4 土体强度对挡土结构物安全系数的影响

底板及齿坎位于第一层黏土中,其作用的发挥依赖于其与第一层黏土的相互挤压与摩擦作用,即第一层黏土的强度对齿坎作用的发挥影响较大。图 10 反映了第一层黏土粘聚力与内摩擦角变化对挡土结构物安全系数的影响。

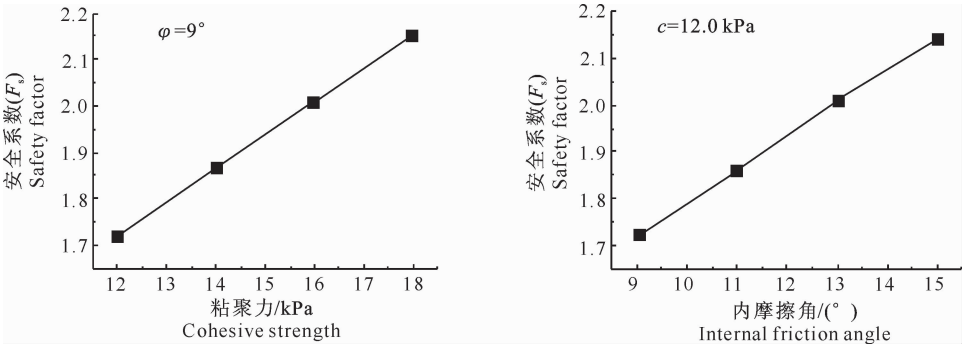


图 10 土层粘聚力和内摩擦角对挡土结构物安全系数的影响

Fig. 10 Influence of cohesive strength and internal friction angle on stability of retaining structure

由图 10 可见,挡土结构物的安全系数随着土体粘聚力或内摩擦角的增大而增大。因此,实际工程中应尽量将底板置于强度较高的土层中,并减小施工对土层的扰动、降低挡土结构物附近地下水水位

的影响等,以提高挡土结构物的稳定性。

另外,底板齿坎处的应力分布见图 11,了解这些应力分布特征,有助于指导底板中钢筋的合理布置与摆放。

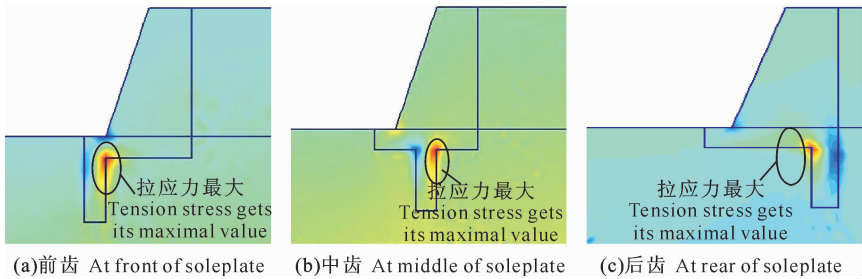


图 11 齿坎不同布置方式时挡土结构物底板最大拉应力的分布

Fig. 11 Maximal tensile stress of soleplate with different location of tenon

4 结 论

1) 在软弱地基上,挡土结构物的抗滑移稳定性由地基、挡土结构物与填土组成的系统共同确定,其

滑裂面为一通过底板及齿坎后缘的近似圆弧面。
2) 齿坎的设置有限制,应使其长度能够穿越原有滑裂面,从而才能影响或改变原有滑裂面的形状并发挥作用。

3) 相同齿坎长度时,后齿布置方式的安全系数最大,前齿布置方式的安全系数最小;随着齿坎长度的增加,挡土结构物的安全系数增大。因此,实际工作中应尽量采用齿坎的后齿布置方式。

4) 齿坎式挡土结构物的安全系数随土体粘聚力或内摩擦角的增大而增大。实际工程中应尽量使底板置于强度较高的土层中,并注意应减小施工对土层的扰动,降低挡土结构物附近的地下水水位,以提高挡土结构物的稳定性。

参考文献

- [1] 邓国华,邵生俊,程新星. 膨胀土加筋挡土墙现场试验研究与分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(2):220-224.
Deng G H, Shao S J, Cheng X X. Field study and analysis of reinforced earth wall for expansive soils [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(2): 220-224. (in Chinese)
- [2] 胡晓军,吴延枝. 基于对数螺旋组合面的黏性土被动土压力数值解[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(5):223-227.
Hu X J, Wu Y Z. Numerical solution of the clay passive earth pressure based on combination of surface analysis on the logarithmic spiral [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(5): 223-227. (in Chinese)
- [3] 陈妙福,褚明生. 内河航道齿坎式护岸结构分析及应用[J]. 水道港口,2006,27(6):368-372.
Chen M F, Chu M S. Analysis and application of riverbank protection structure with notched sill in inland waterway [J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(6): 368-372. (in Chinese)
- [4] 葛娟. 齿坎式挡墙的极限平衡理论分析[J]. 苏州大学学报:自然科学版,2001,17(2):58-61.
Ge J. Analysis of retaining wall with notched sill with limit equilibrium theory [J]. Journal of Suzhou University: Natural Science Edition, 2001, 17(2): 58-61. (in Chinese)
- [5] 俞亚南,屠毓敏. 齿坎式路基挡土墙抗滑稳定性的现场试验研究[J]. 中国公路学报,2000,13(2):27-30.
Yu Y N, Tu Y M. Stability research on retaining wall notched sill by site testing [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 27-30. (in Chinese)
- [6] 屠毓敏,俞亚南. 齿坎抗滑作用的模型试验研究[J]. 水利学报,2000(12):68-71.
Tu Y M, Yu Y N. Model test for sling resistance of tenon [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(12): 68-71. (in Chinese)
- [7] 屠毓敏,俞亚南. 齿坎式挡土结构物极限抗滑力研究[J]. 岩土力学,2009,30(1):105-108.
Tu Y M, Yu Y N. Research on limit sliding resistance force of retaining structure with tenon [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 105-108. (in Chinese)
- [8] 阮长青,屠毓敏,俞亚南. 齿坎式挡土结构物极限抗滑力研究[J]. 岩土力学,2010,31(8):2514-2518.
Ruan C Q, Tu Y M, Yu Y N. Study of limit sliding resistance force on retaining structure with tenon [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2514-2518. (in Chinese)
- [9] 俞亚南,高庆丰. 齿坎式挡土结构抗滑稳定性分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(6):652-656.
Yu Y N, Gao Q F. Numerical analysis for stability against sliding of retaining wall with notched sill [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2003, 37(6): 652-656. (in Chinese)
- [10] 屠毓敏,俞亚南. 齿坎式护岸结构抗滑稳定性分析[J]. 土木工程学报,2000,33(5):97-99.
Yu Y M, Yu Y N. Analysis of sliding resistance stability of bank revetment with key-wall [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 97-99. (in Chinese)
- [11] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835-840.
- [12] 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.
- [13] 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 J L, Luan M T, Zhao S F, 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)
- [14] 刘金龙,王吉利,夏勇. 基于不同破坏准则的边坡稳定性有限元数值分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(10):1357-1360.
Liu J L, Wang J L, Xia Y. Comparative analysis of slope stability by the strength reduction FEM based on different yield criteria [J]. Journal of Heifei University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 30(10): 1357-1360. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50330—2002 Technical code for building slope engineering [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)