

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.007

地下连续墙黏性土夹砂层槽壁稳定性分析*

欧明喜^{1,2}, 戴志峰¹, 陈颖辉^{1,2}, 桂跃^{1,2}

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500; 2. 云南省土木工程防灾重点实验室, 云南昆明 650500)

摘要: 为了探讨地下连续墙黏性土夹砂层泥浆槽壁局部稳定性问题, 建立稳定性分析力学模型, 对槽壁夹砂层土体单元应力状态进行分析。基于朗肯极限平衡原理, 提出泥浆槽壁局部稳定性系数计算方法。通过算例分析可知: (1) 开挖将导致槽壁夹砂层土体单元产生负孔隙水压力, 局部稳定性系数将会随负孔隙水压力的消散逐渐降低。(2) 局部稳定性系数随相关因素的变化规律: 地面超载每增大 10 kPa, 稳定性系数降低 7% 左右; 泥浆重度每增大 0.5 kN/m³, 稳定性系数提高 13% 左右; 有效内摩擦角每增大 3°, 稳定性系数提高 11.5% 左右; 局部稳定性系数随地下水埋深的增大而增大, 但增幅逐渐减小; 随泥浆液面深度的增大而减小, 且降幅逐渐增大。

关键词: 地下连续墙; 泥浆槽壁; 局部稳定性; 极限平衡法; 稳定性系数

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0537-06

Trench Stability Analysis of Diaphragm Wall in Cohesive Soil Sand-wiched Sand

OU Mingxi^{1,2}, DAI Zhifeng¹, CHEN Yinghui^{1,2}, GUI Yue^{1,2}

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the local stability of slurry trench of diaphragm wall in cohesive soil sand-wiched sand, mechanical model was established to analyze the stress state of the sand layer. Based on Rankine limit equilibrium principle, calculating method for local stability coefficient of slurry trench was proposed. The main conclusions through the analysis of example are as follows: (1) excavation will lead to negative pore water pressure in the soil element with sand layer, and the local stability coefficient will gradually decrease with the dissipation of negative pore water pressure. (2) the variation of local stability coefficient with relevant factors was obtained; the stability coefficient decreases about 7% for each 10 kPa increase of ground overload and increases about 13% for each 0.5 kN/m³ increase of mud gravity. It increases about 11.5% for every 3 degree increase of effective internal friction angle. Local stability coefficient increases with the depth of the groundwater level at a decelerated growth rate, while decreases with the increase of slurry liquid level depth at an accelerated growth rate.

Keywords: diaphragm wall; slurry trench; part stability; limit equilibrium method; stability coefficient

* 收稿日期: 2019-06-06; 修回日期: 2019-11-04

基金项目: 云南省应用基础研究计划项目(2017FB088)、国家自然科学基金项目(51568030)资助

作者简介: 欧明喜(1983-), 男, 讲师, 博士。主要从事边坡与基坑工程研究。Email: 19590927@163.com

引言

地下连续墙具有结构整体刚度大、防渗水性好、适应能力强等特点,在基坑支护工程中被广泛应用。地下连续墙施工过程中采用泥浆护壁技术,它是依靠泥浆作用在泥皮上的压力来平衡槽壁水土压力,当泥浆压力不足以抵抗水土压力时就会造成槽壁失稳破坏。槽壁失稳主要有两种形式:一种是槽壁局部失稳,如软硬夹层中的软弱层和黏性土中的夹砂层;另一种是槽壁整体失稳,如发生在上软下硬地基中的整体失稳和局部失稳后引发的整体失稳。泥浆槽壁的稳定性受泥浆性质、地质条件、地下水位、地面超载、施工扰动、槽段长度等^[1]因素的影响。

W. Powrie等^[2]通过开展系列离心模型试验,研究了泥浆槽开挖过程中的地表变形发展规律,重点分析了初始地下水位和沟槽几何尺寸比值的影响。P. Oblozinsky等^[3]基于弹塑性有限元分析,采用强度折减法计算安全系数来评价泥浆槽壁的整体稳定性,提出了泥浆液面高度和泥浆重度的实用设计方法。韩长玉等^[4]采用极限分析上限解理论分析了地下连续墙阳角处的整体稳定性问题。J. S. Tsai等^[5]基于极限平衡理论,考虑竖向及水平向土拱效应,提出了无粘性土地层泥浆槽壁贝壳形滑体整体稳定性分析模型。P. J. Fox^[6]则提出了Coulomb滑动体模型,分别推导有效应力和总应力条件下的安全系数和临界破坏角的解析解,并与粉砂层地下连续墙泥浆槽壁破坏的现场足尺试验结果进行了对比分析。张厚美等^[7]假设滑动体为抛物线柱体,对泥浆槽壁整体稳定性进行三维分析,并采用算例与其它两种计算模型进行对比,验证了模型的优越性。夏元友等^[8]考虑土体分层性质,假定开挖槽段附近各土层厚度分布均匀且土层分界面垂直于槽面,以经典二维楔形滑块体模型为研究对象,提出了地下连续墙泥浆槽壁整体稳定性评价的水平条分法。黄锋^[9]采用极限分析上限解理论,考虑地下水静水压力做功,根据能量守恒原理分析了泥浆槽壁的整体、局部稳定性。丁勇春等^[10]对地下连续墙槽壁稳定影响因素、槽壁整体及局部失稳机制、不同施工阶段槽壁土体应力路径等进行了分析。Ch. Y. Han等^[11]采用极限分析上限解理论,建立槽壁局部稳定性分析的二维和三维破坏模型,得出了

泥浆槽壁局部稳定性系数计算方法,分析了浆土密度比、液面深度比、软弱夹层厚度、粘聚力、沟槽宽深比等因素的影响。M. F. George等^[12]对泥皮形成前槽壁局部稳定性进行了研究,认为增大泥浆比重对槽壁稳定性具有三方面的有益作用。J. S. Tsai等^[13-14]基于塑性极限理论对泥浆槽壁软弱夹层的侧向挤压进行研究,在考虑土拱效应的基础上计算作用于软弱夹层上的竖向压力,采用泥浆压力与侧向挤压力比值定义稳定性系数,并用工程实例验证了该方法的可靠性。

综上所述,目前对槽壁稳定性的研究主要集中在整体稳定性方面,仅有的局部稳定性研究主要针对软硬夹层中的软弱层侧向挤出问题,而针对黏性土夹砂层这种地质条件下的局部稳定性研究尚鲜见报道。因此,本文考虑黏性土夹砂层的地质条件,对夹砂层土体单元在开挖前后应力状态的变化进行分析,基于朗肯极限平衡原理,建立槽壁局部稳定性系数计算方法。采用算例分析槽壁稳定性的动态变化过程,探讨稳定性系数随相关影响因素变化的发展规律。

1 稳定性系数推导

1.1 黏性土夹砂层局部稳定性分析模型

考虑工程中黏性土夹砂层的地质情况,建立如图1所示的槽壁稳定性分析模型。后述分析土体单元位于夹砂层中间位置,模型基本假定有:①按平面应变问题考虑;②地面超载为连续均布荷载;③地下水位以下黏性土层处于可塑或硬塑状态。

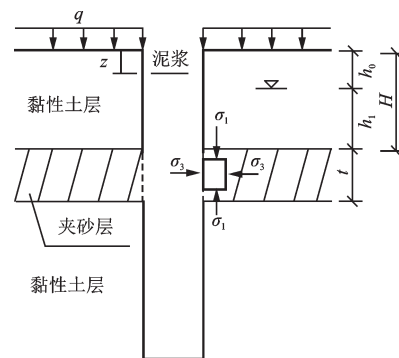


图1 稳定性分析模型

Fig.1 Model for stability analysis

注: q 为地面超载; z 为泥浆液面深度; h_0 为地下水埋深; h_1 为夹砂层以上、地下水位以下黏性土层厚度; t 为夹砂层厚度

1.2 夹砂层土体单元应力状态分析

地下连续墙成槽是一个动态施工过程,对于槽壁土体单元而言,其所受的应力状态也在发生动态变化,夹砂层土体单元开挖前的有效应力为:

$$\sigma'_1 = q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2} \quad (1)$$

$$\sigma'_3 = K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2}) \quad (2)$$

式中, σ'_1 为竖向有效应力 (kPa); σ'_3 为水平向有效应力 (kPa); γ 为黏性土层天然重度 (kN/m³); γ' 为黏性土层有效重度 (kN/m³); γ'_1 为夹砂层有效重度 (kN/m³); K_0 为侧压力系数。

开挖后的有效应力为:

$$\sigma'_1 = q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2} \quad (3)$$

$$\sigma'_3 = \gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \gamma_w (h_1 + \frac{t}{2}) \quad (4)$$

式中, γ_s 为泥浆重度 (kN/m³); γ_w 为水的重度 (kN/m³)。

为了得到开挖瞬间的有效应力状态,需要求得开挖前后的有效应力变化,而有效应力的变化应该是总应力的变化与孔隙水压力变化的差值,因此接下来分别求出总应力变化值和孔隙水压力变化值。

开挖前的总应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= q + \gamma h_0 + \gamma_{\text{sat}} h_1 + \gamma_{1\text{sat}} \cdot \frac{t}{2} \\ \sigma_3 &= K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2}) + \gamma_w (h_1 + \frac{t}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, σ_1 为竖向总应力 (kPa); σ_3 为水平向总应力 (kPa); γ_{sat} 为黏性土层饱和重度 (kN/m³); $\gamma_{1\text{sat}}$ 为夹砂层饱和重度 (kN/m³)。

开挖后的总应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= q + \gamma h_0 + \gamma_{\text{sat}} h_1 + \gamma_{1\text{sat}} \cdot \frac{t}{2} \\ \sigma_3 &= \gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可以得出总应力的变化值为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= 0 \\ \Delta\sigma_3 &= \gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \gamma_w (h_1 + \frac{t}{2}) - \\ &K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $\Delta\sigma_1$ 为竖向总应力变化值 (kPa); $\Delta\sigma_3$ 为水平向总应力变化值 (kPa)。

由 Skempton 公式,孔隙水压力变化可表示为:

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (8)$$

式中, Δu 为孔隙水压力变化值 (kPa); A 、 B 为孔隙水压力系数,对于饱和土,可取 $B=1$ 。

将式(7)代入式(8)可得孔隙水压力变化值:

$$\Delta u = (1-A) [\gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \gamma_w (h_1 + \frac{t}{2}) - K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2})] \quad (9)$$

联立式(7)、(9)可得出有效应力的变化值:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma'_1 &= (A-1) [\gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \\ &\gamma_w (h_1 + \frac{t}{2}) - K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2})] \\ \Delta\sigma'_3 &= A [\gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \\ &\gamma_w (h_1 + \frac{t}{2}) - K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2})] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, $\Delta\sigma'_1$ 为竖向有效应力变化值 (kPa); $\Delta\sigma'_3$ 为水平向有效应力变化值 (kPa)。

从而根据式(1)、(2)、(10)可以得出开挖瞬间的有效应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_1 &= (A-1) [\gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \gamma_w (h_1 + \frac{t}{2})] + \\ &[(1-A)K_0 + 1] (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_3 &= A [\gamma_s (h_0 + h_1 + \frac{t}{2} - z) - \gamma_w (h_1 + \frac{t}{2})] + \\ &(1-A)K_0 (q + \gamma h_0 + \gamma' h_1 + \gamma'_1 \cdot \frac{t}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

1.3 局部稳定性系数定义

朗肯极限平衡原理提出半无限土体单元处于极限平衡状态时的应力关系为:

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \tan^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) - 2c' \tan(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) \quad (13)$$

式中, c' 为有效黏聚力 (kPa); ϕ' 为有效内摩擦角 (°)。

由于夹砂层的有效黏聚力 $c'=0$,据此提出黏性土夹砂层槽壁局部稳定性系数计算公式:

$$F = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1 \tan^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2})} \quad (14)$$

式中, F 为槽壁局部稳定性系数。

将公式(3)、(4)和(11)、(12)计算结果代入上

式即可分别计算出夹砂层土体单元在地下连续墙开挖后及开挖瞬间的局部稳定性系数。

2 稳定性算例及影响因素分析

2.1 稳定性算例分析

假设地连墙夹砂层上黏性土层厚度 $H=6.0\text{ m}$, 超载 $q=0\text{ kPa}$, 地下水位埋深 $h_0=1.0\text{ m}$, 夹砂层以上、地下水位以下黏性土层厚度 $h_1=H-h_0=5.0\text{ m}$, 夹砂层厚度 $t=2\text{ m}$, 黏性土有效重度 $\gamma'=9.5\text{ kN/m}^3$ 、天然重度 $\gamma=18.0\text{ kN/m}^3$, 砂土有效重度 $\gamma'_1=10.0\text{ kN/m}^3$ 、砂土有效内摩擦角 $\phi'=34^\circ$, 泥浆液面深度 $z=0\text{ m}$, 泥浆重度 $\gamma_s=12.0\text{ kN/m}^3$ 。经计算, 侧压力系数 $K_0=0.441$, 取孔压系数 $A=0.75$ 。

分别采用公式(3)、(4)和(11)、(12)计算开挖后和开挖瞬间的有效应力状态, 应力莫尔圆示意图如图2所示。由图可知, 算例槽段开挖将导致槽壁土体产生负孔隙水压力, 随着负孔压的消散, 应力莫尔圆逐渐向左移动, 即开挖完成后, 随着时间的推移, 槽壁夹砂层局部稳定性越来越差, 经计算, 局部稳定性系数由1.19下降到1.12。

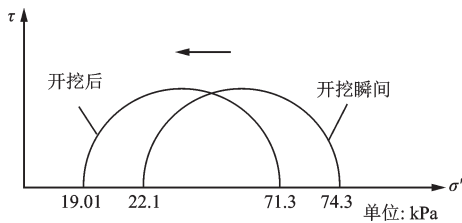


图2 槽壁土体应力莫尔圆

Fig.2 Mohr circle of groove wall soil

2.2 稳定性影响因素分析

为了分析地面超载、泥浆重度、地下水位、泥浆液面、内摩擦角对槽壁局部稳定性系数的影响, 在上述基础模型的基础上, 分别取超载 $0\sim 50\text{ kPa}$, 泥浆重度 $10.5\sim 13.0\text{ kN/m}^3$, 地下水埋深 $0\sim 5\text{ m}$, 泥浆液面深度 $0\sim 2.5\text{ m}$, 有效内摩擦角 $28^\circ\sim 43^\circ$ 进行分析。槽壁稳定性从开挖瞬间到孔隙水压力消散完成是一个动态变化的过程, 稳定性系数可能减小也可能增大, 下述分析采用的是开挖瞬间的稳定性系数。

2.2.1 超载的影响分析

图3为局部稳定性系数随超载的变化规律, 由

图可知, 随着超载的增大, 局部稳定性系数逐渐减小。经计算, 稳定性系数由 0 kPa 时的1.19降低到 50 kPa 时的0.84, 降幅达29.4%。地面超载每增大 10 kPa , 槽壁局部稳定性系数降低7%左右。因此, 在地下连续墙施工过程中, 要严格控制机械的行走和材料、半成品的堆放, 确保槽壁附近不产生较大的地面超载。

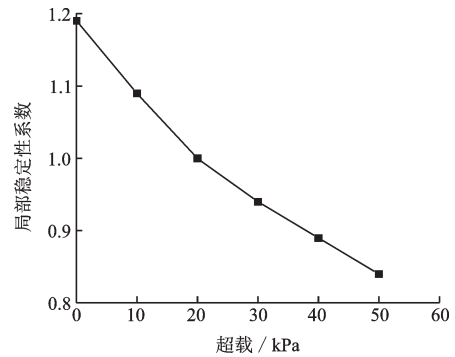


图3 稳定性系数随超载的变化

Fig.3 Relationship between stability coefficient and overload

2.2.2 泥浆重度的影响分析

图4为局部稳定性系数随泥浆重度的变化规律, 由图可知, 随着泥浆重度的增大, 稳定性系数逐渐增大。经计算, 稳定性系数由 10.5 kN/m^3 时的0.81提高到 13.0 kN/m^3 时的1.47, 增幅达81.5%。泥浆重度每增大 0.5 kN/m^3 , 槽壁局部稳定性系数提高13%左右。因此, 在地下连续墙施工过程中, 为了保证槽壁的稳定, 可适当提高泥浆重度, 但要综合考虑沉渣厚度和混凝土浇筑难易程度等因素。

2.2.3 地下水位的影响分析

图5为局部稳定性系数随地下水位埋深的变化

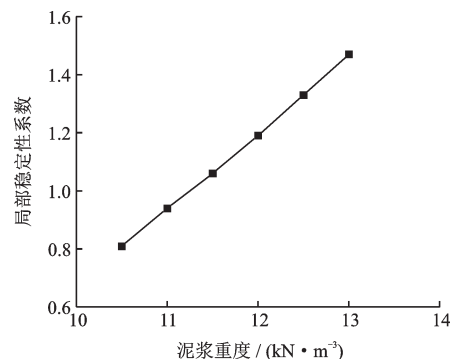


图4 稳定性系数随泥浆重度的变化

Fig.4 Relationship between stability coefficient and slurry gravity

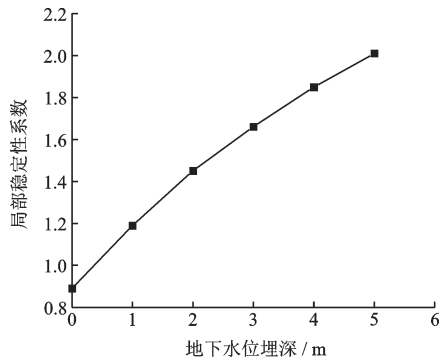


图5 稳定性系数随地下水位埋深的变化

Fig.5 Relationship between stability coefficient and ground-water level

规律,由图可知,随着地下水位埋深的增大,稳定性系数逐渐增大,但增幅逐渐降低。经计算,稳定性系数由0 m时的0.89提高到5 m时的2.01,增幅达125.8%,稳定性系数增幅由0~1 m时的33.7%降低到4~5 m时的8.6%。工程实践中应尽可能选择在地下水位较低的季节施工地下连续墙。

2.2.4 泥浆液面的影响分析

图6为局部稳定性系数随泥浆液面深度的变化规律,由图可知,随着泥浆液面深度的增大,稳定性系数逐渐减小,且降幅逐渐增大。经计算,稳定性系数由0 m时的1.19降低到2.5 m时的0.16,降幅达86.6%,局部稳定性系数降幅由0~0.5 m时的18.5%增大到2.0~2.5 m时的54.3%。因此,在地下连续墙施工过程中,必须严格监控泥浆液面的高度,当泥浆液面降低时,应及时补充泥浆来保证槽壁的稳定。

2.2.5 内摩擦角的影响分析

图7为局部稳定性系数随有效内摩擦角的变化规律,由图可知,随着有效内摩擦角的增大,稳定性

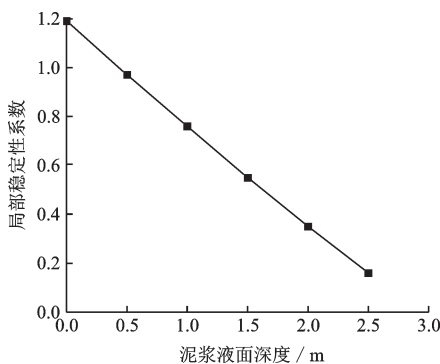


图6 稳定性系数随泥浆液面深度的变化

Fig.6 Relationship between stability coefficient and slurry liquid level

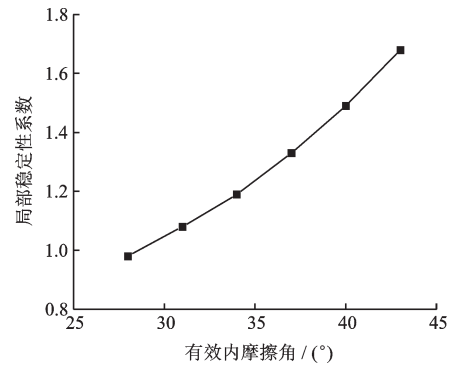


图7 稳定性系数随内摩擦角的变化

Fig.7 Relationship between stability coefficient and internal friction angle

系数逐渐增大。经计算,稳定性系数由28°时的0.98提高到43°时的1.68,增幅达71.4%。夹砂层有效内摩擦角每增大3°,槽壁局部稳定性系数提高11.5%左右。

3 结论

(1)基于平面应变假定,建立黏性土夹砂层地质条件下局部稳定性分析模型,探讨了地下连续墙施工过程中槽壁土体单元的应力状态变化。

(2)基于朗肯极限平衡原理,提出了地连墙黏性土夹砂层槽壁局部稳定性系数计算方法。

(3)地面超载每增大10 kPa,槽壁局部稳定性系数降低7%左右,泥浆重度每增大0.5 kN/m³,稳定性系数提高13%左右,夹砂层有效内摩擦角每增大3°,稳定性系数提高11.5%左右。

(4)槽壁夹砂层局部稳定性系数随地下水位埋深的增大而增大,但增幅逐渐减小。随泥浆液面深度的增大而减小,且降幅逐渐增大。

参考文献:

- [1] Tsai J.S. Stability of weak sublayers in a slurry supported trench[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2): 189-196.
- [2] Powrie W, Kantartzi C. Ground response during diaphragm wall installation in clay: centrifuge model test [J]. Géotechnique, 1996, 46(4): 725-739.
- [3] Oblozinsky P, Ugai K, Katagiri M, et al. A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elastoplastic FEM [J]. Computers and

- Geotechnics, 2001, 28(2): 145-159.
- [4] 韩长玉, 陈锦剑, 王建华, 等. 地下连续墙成槽过程中阳角处槽壁的稳定性分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1 409-1 412, 1 418.
Han Ch Y, Chen J J, Wang J H, et al. Convex corner stability analysis of slurry trench [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(9): 1 409-1 412, 1 418. (in Chinese)
- [5] Tsai J S, Chang J C. Three-dimensional stability analysis for slurry-filled trench wall in cohesionless soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(5): 798-808.
- [6] Fox P J. Analytical solutions for stability of slurry trench [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, 130(7): 749-758.
- [7] 张厚美, 夏明耀. 地下连续墙泥浆槽壁稳定的三维分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 73-76.
Zhang H M, Xia M Y. 3-D stability analysis of slurry trenches [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 73-76. (in chinese)
- [8] 夏元友, 裴尧尧, 王智德, 等. 地下连续墙泥浆槽壁稳定性评价的水平条分法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1 128-1 133.
Xia Y Y, Pei Y Y, Wang Zh D, et al. Horizontal slice method for stability of slurry trench [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1 128-1 133. (in chinese)
- [9] 黄 锋. 考虑地下水作用的连续墙开挖稳定分析[J]. 公路工程, 2013, 38(5): 230-232, 242.
Huang F. Local and overall stability analysis for slurry trench [J]. Highway Engineering, 2013, 38(5): 230-232, 242. (in Chinese)
- [10] 丁勇春, 李光辉, 程泽坤, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2 704-2 709.
Ding Y Ch, Li G H, Cheng Z K, et al. Analysis of trench face stability of diaphragm wall panel during slurry trenching [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 1): 2 704-2 709. (in Chinese)
- [11] Han Ch Y, Wang J H, Xia X H, et al. Limit analysis for local and overall stability of a slurry trench in cohesive soil [J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 15(5): 06014026-9.
- [12] George M F, Tiffany A, Richard R D. Stability of long trenches in sand supported by bentonite-water slurry [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 915-921.
- [13] Tsai J S, Chang C C, Jou L D. Lateral extrusion analysis of sandwiched weak soil in slurry trench [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(11): 1 082-1 090.
- [14] Tsai J S. Stability of weak sublayers in a slurry supported trench [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2): 189-196.

(本文责编:周小潭)