

文章编号:1005-0523(2015)03-0001-05

交通和施工超载对软土基坑地下连续墙槽壁整体稳定的影响

徐永刚, 季 昌, 许 恺, 孙玉永

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:依托宁波地区某主干道周边基坑地下连续墙施工工点,通过现场取样测试土体动三轴下强度指标;采用三维有限元数值模拟判别交通和施工超载作用下槽壁整体失稳模式;并以槽壁外侧土体达到剪切塑性极限为临界条件,采用极限平衡法,推导单一土层内一字型地下连续墙槽壁整体失稳的判定公式。研究结果表明:地下连续墙槽壁呈现类似四棱锥形整体失稳形态;护壁泥浆出现补充不及时或漏浆时,槽壁将发生整体失稳破坏。

关键词:软土基坑;地下连续墙;交通和施工超载;极限平衡;整体失稳

中图分类号:U417.1;TU745.3

文献标志码:A

因地下连续墙具有刚度大、整体性好、防水性能等优点,软土地区基坑多采用该型式^[1]。但地下连续墙施工需严格控制槽壁坍塌,特别在主城区,槽壁坍塌可能引起周边环境破坏和引发安全事故^[2-6],地下连续墙槽壁有整体和局部失稳两种模式,其中整体失稳更具破坏性。Mogrensten^[7], Washbourn^[8], OBLOZ-INSKY^[9], POWRIE^[10]定义整体失稳的概念为地下连续墙槽壁由于土层性质、地下水、泥浆性能、地面超载等因素共同作用下,浅部土体发生的整体破坏。极限平衡法是目前地下连续墙槽壁的整体稳定分析的最常用方法,FOX^[11],张厚美^[12]通过研究假定滑裂面形状会出现不同的形式,如三棱柱形(楔形)、半圆柱形、斜截半圆柱形、贝壳形、抛物线形等,Oblozinsky^[13], Ishii^[14], Tsai^[15], Lyamin^[16]分别研究了整体稳定性受导墙、地下水位、泥浆液面高度、地下连续墙槽段的形状和长度的影响程度大小。

国内外针对软土基坑地下连续墙槽壁整体稳定问题的现有研究多集中于周边建筑超载、槽幅泥浆参数等因素,对城市主干道交通影响和施工机械自身的影响考虑较少,故以宁波地区某主干道周边基坑地下连续墙施工工点为背景,考虑宁波浅层地层主要为深厚的②层淤泥质软土、槽幅形式主要以一字型为主两个特点,首先通过现场对②层淤泥质软土取样,分析不同应力路径下其指标特征;并进一步采用ANSYS三维数值计算判断交通和施工超载作用下浅层槽壁整体失稳的大致形状;基于数值计算所判断出的整体失稳大致形状,假定其塑形区空间上呈现类四棱锥形,并引入极限平衡理论,推导出槽壁稳定安全系数计算公式。

1 工程背景介绍

软土地区典型城市宁波某主干道旁修筑地铁基坑,围护结构采用软土层惯用的地下连续墙结构形式。该地铁基坑地下连续墙结构紧临繁忙道路,如图1所示。且该主干道交通流量较为突出,经交通调查,2012年第一季度高峰小时交通量及车型组成如图2所示。宁波历经3次全新世海侵淹没,万余年淤积,形成厚重软土,浅层主要以②层淤泥质软土为主,其物理力学指标如表1所示。

收稿日期:2015-04-03

作者简介:徐永刚(1979—),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为道路与铁道工程。



图1 主干道与基坑空间位置关系
Fig.1 The relationship between the
mainroad and foundation pit

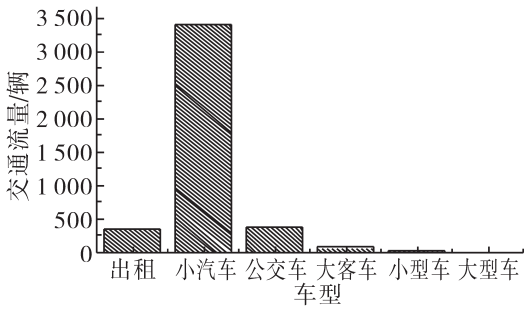


图2 某季度高峰小时交通量及车型组成
Fig.2 Peak hourly volume in a given
quarter and the vehicle type

表1 ②层淤泥质软土物理力学指标
Tab.1 The physical and mechanical indexes of soft soil

物理力学指标	含水率/%	密度/g·cm ⁻³	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	渗透系数/cm·s ⁻¹
②层淤泥质软土	38~58	17.3	3.6~33	0.9~9	1.7~5	10 ⁻⁷ 级

通过现场某幅一字型槽幅超声波测试,得到墙顶下3.25~7.41m呈现较明显的鼓出形态,为槽壁疑似塌孔区域,后期该区域基坑开挖后,呈现出鼓包的性态,该结果与超声波检测记录吻合程度较好,与此同时,鼓包问题在该基坑其他区域也有不同程度发生,为避免灾害性的浅层整体塌陷,结合该工点的实际特点,分析交通荷载和施宫超载对地下连续墙槽壁整体稳定性的影响。

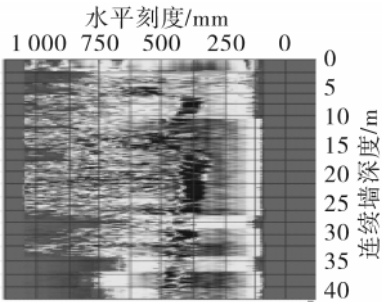


图3 浅层塌孔
Fig.3 Shallow collapse hole



图4 鼓包
Fig.4 Bump

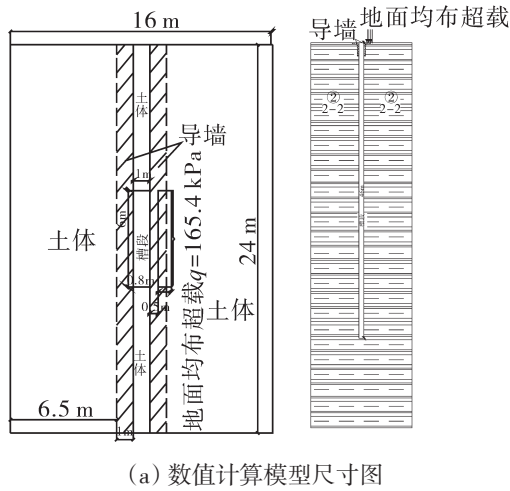
2 浅层整体塑形破坏形状数值计算

借助Plaxis 3D有限元分析软件,建立地面超载对地下连续墙槽壁稳定性影响的数值计算模型。为分析地面超载单一变量对槽壁失稳模式的影响,选取宁波地区典型的②2-2层土,土体采用符合侧向卸荷应力路径的MohR-Coulomb模型,抗剪强度指标考虑动荷载作用后土体的强度指标,即黏聚力0.75 kPa、内摩擦角18.6°,地下连续墙槽段尺寸为6 m(长)×1 m(厚)×46 m(深)。模型尺寸为24 m×16 m×60 m,导墙厚0.25 m,数值计算模型如图5所示,依照图示,考虑影响相对较大的首开幅地下连续墙成槽时槽壁整体稳定状态,充分考虑边界效应,槽段两侧土体分别长9 m。根据《公路水泥混凝土路面设计规范》^[16]的换算方法,将交通荷载简化为静载。

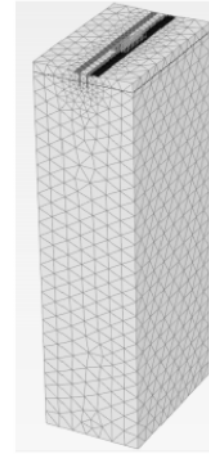
通过数值计算结果可知,地下连续墙槽壁在地面超载作用下,会发生浅层土体的坍塌失稳,失稳形式沿深度和平面上都类似为三角形,为简化计算以及理论推导,将槽壁整体失稳模式简化类四棱锥形,如图6所示。

3 地下连续墙槽壁整体失稳的判定公式

基于类四棱锥形的技术条件下,通过极限平衡理论推导地下连续墙槽壁整体失稳的判定公式。



(a) 数值计算模型尺寸图



(b) 有限元网格图

图5 数值计算模型

Fig.5 Numerical calculation model

3.1 基本假定

假设地下连续墙槽壁整体失稳形式为四棱锥体ABCDE,锥体沿着底面ADE滑动发生剪切破坏,根据整个滑块的受力特点假设。

- 1) 初始状态假定滑裂体完全没有变位;
- 2) 槽壁整体失稳破坏形状沿槽段中间呈对称性分布;
- 3) 滑块处于极限状态时,两个侧面ABE和CDE受静止土压力作用,底面ADE受主动土压力作用,滑裂面的破坏准则满足MohR-Coulomb准则;
- 4) 土体滑裂面ADE倾角 θ 与朗肯主动状态的破裂角相同, $\theta = 45^\circ + \varphi/2$;
- 5) 地面超载位于BCE的形心,即 $ME = 3 \times MO$,MO为超载距地下连续墙槽壁的水平距离 s ;
- 6) 泥浆护壁压力分布按静止水压力进行计算,液面高度取地面以下0.5 m。

根据以上假设,具体推导过程如下:

$$\text{底面法向压力: } N_1 = \int_0^b K_a \gamma z \frac{z}{b} adz \times \cot \theta = \frac{1}{3} K_a \gamma ab^2 \cot \theta \quad (1)$$

$$\text{底面ADE面积: } A_1 = \frac{ab}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

$$\text{底面切向力: } T_1 = cA_1 + N_1 \tan \phi \quad (3)$$

$$(1) \text{和}(2) \text{代入}(3) \text{式: } T_1 = \frac{abc}{2 \sin \theta} + \frac{1}{3} K_a \gamma ab^2 \cot \theta \tan \phi \quad (4)$$

$$\text{侧面法向压力: } N_2 = \frac{1}{6} K_0 \gamma b^2 \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\sin \theta}\right)^2} \quad (5)$$

$$\text{侧面CDE面积: } A_2 = \frac{1}{2} b \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\sin \theta}\right)^2} \quad (6)$$

$$\text{侧面切向力: } T_2 = cA_2 + N_2 \tan \phi \quad (7)$$

$$(5) \text{和}(6) \text{代入}(7) \text{式: } T_2 = \frac{1}{2} bc \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\sin \theta}\right)^2} + \frac{1}{6} K_0 \gamma b^2 \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\sin \theta}\right)^2} \tan \phi \quad (8)$$

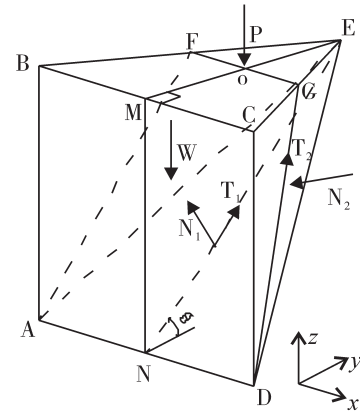


图6 槽壁整体失稳简化模式

Fig.6 Slurry trench instability of simplified model

泥浆护壁压力沿破裂面的分力:

$$T_3 = \frac{1}{2} \gamma_s (b - 0.5) a (b - 0.5) \cos \theta = \frac{1}{2} \gamma_s a (b - 0.5)^2 \cos \theta \quad (9)$$

槽壁稳定安全系数:

$$K = \frac{T_1 + 2T_2 \cos \alpha + T_3}{(W + P) \cos(\frac{\pi}{2} - \theta)} \quad (10)$$

(4)、(8)和(9)代入(10)可得:

$$K = \frac{1}{(W + P) \cos(\frac{\pi}{2} - \theta)} \left\{ \frac{abc}{2 \sin \theta} + \frac{1}{3} K_a \gamma a b^2 \cot \theta \tan \phi + \frac{1}{2} \gamma_s a (b - 0.5)^2 \cos \theta + \left[bc \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\sin \theta}\right)^2} + \frac{1}{3} K_0 \gamma b^3 \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\sin \theta}\right)^2} \right] \tan \phi \cos \alpha \right\} \quad (11)$$

式中: α 为槽段宽度 AD, m; b 为槽壁坍塌深度 AB, m; s 为超载距离地下连续墙槽壁的垂直距离; K_0 为静止土压力系数; K_a 为主动土压力系数; γ 为土体重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为土体粘聚力, kPa; φ 为土体内摩擦角($^\circ$); γ_s 为护壁泥浆的容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; A_1 为滑块底面面积, m^2 ; A_2 为滑块侧面面积, m^2 ; W 为滑裂块的重力, kN; P 为地面超载, kN; K 为槽壁稳定的安全系数。

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2002)^[17]规定:一级边坡的边坡稳定安全系数不应小于 1.3。若 K 大于等于 1.3, 则地下连续墙槽壁土体满足强度要求; 反之, 则发生失稳破坏。

4 算例

地下连续墙成槽施工的标准段长度为 6 m, 成槽机中心距离槽壁的间距为 4.0 m ~ 4.9 m (取 4.5 m), 成槽机满载时的总重量一般为 85 t, 宁波该工点②淤泥质黏土层的重度为 $17.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$:

1) 护壁泥浆充分

$K=2.5 > 1.3$ 满足安全要求

2) 护壁泥浆出现补充不及时或漏浆

$K=0.95 < 1.3$ 不满足安全要求(图 7 漏浆时浅层整体塌陷)



图 7 漏浆时浅层整体塌陷

Fig.7 Shallow trench wall collapse with mortar leakage

5 结语

本研究以土体动三轴试验测试、数值模拟、理论推导、现场验证为研究手段, 通过现场取样测试土体动三轴下强度指标; 采用三维有限元数值模拟判别交通和施工超载作用下槽壁整体失稳模式; 并以槽壁外侧土体达到剪切塑性极限为临界条件, 采用极限平衡法, 推导出单一土层内一字型地下连续墙槽壁整体失稳的判定公式, 研究表明:

- 1) 交通和施工超载作用下软土基坑地下连续墙槽段浅层整体性失稳的破坏模式为类四棱锥形;
- 2) 基于塑形极限平衡理论及系列假定, 理论计算推导得到槽壁稳定的安全系数;
- 3) 现场漏浆时观测到浅层整体性坍塌现场与计算判定公式有较好的吻合性。

参考文献:

- [1] 武文永, 曹雪山. 南京地铁鸡鸣寺站地下连续墙深层水平位移特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(3): 115-119.
- [2] FARMER I W, ATTEWELL P B. Ground movements caused by a bentonite-supported excavation in London clay [J]. Geotechnique, 1973, 23(4): 577-581.
- [3] NG C W W, YAN R W M. Stress transfer and deformation mechanisms around a diaphragm wall panel [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, 124(7): 638-648.

- [4] TEDD P, CHARD B M, CHARLES J A, et al. Behavior of a propped embedded retaining wall in stiff clay at Bell Common Tunnel [J]. *Geotechnique*, 1984,34(4):513-532.
- [5] LINGS M L, NASH D F T, NG C W W, et al. Observed behaviour of a deep excavation in Gault clay: Apreliminary appraisal [C]// *Proceedings of 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, 1991:467-470.
- [6] 刘国彬, 鲁汉新. 地下连续墙成槽施工对房屋沉降影响的研究 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2): 287-289.
- [7] MOGRENSTEN R N, AMIR-TAHMASSEB I. The stability of a slurry trench in cohesionless soils [J]. *Geotechnique*, 1965,15(4): 387-395.
- [8] WASHBOUNRE J. The three-dimensional stability analysis of diaphragm wall excavations[J]. *Ground Engineering the Magazine of the British Geotechnical Association*, 1984,17(4):24-26,28-29.
- [9] 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.
- [10] POWRIE W, KANTARTZI C. Ground response during diaphragmwall installation in clay: centrifuge model test [J]. *Geotechnique*, 1996,46(4):725-739.
- [11] FOX P J. Analytical solutions for stability of slurry trench[J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, ASCE, 2004,130(7):749-758.
- [12] OBLOZINSKY P, UGAI K, KATAGIRI M, et al. A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elasto-plastic FEM [J]. *Computers and Geotechnics*, 2001,28(2):145-159.
- [13] OBLOZINSKY P, UGAI K, KATAGIRI M, et al. 3D FEM analysis on slurry trench stability and active earth pressure [C]//*Computer Method sand Advances in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, 2001,1527-1530.
- [14] ISHII T, KATAGIRI M, SAITOH K, et al. Modeling of sandy ground for the estability analysis of slurry trench [C]//*Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Rotterdam, 2001,1579-1582.
- [15] 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.
- [16] LYAMIN A V, SLOAN W. Stability analysis of circular and square excavations [C]//*Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Rotterdam, 2001,1583-1587.
- [17] 蒯行成, 吴朝辉, 李永红. 车辆振动瞬态分析及动荷载[J]. *中南公路工程*, 2004, 29(3): 41-44.
- [18] 重庆市建设委员会. GB50330-2002. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中华人民共和国建设部, 2002.

Influence of Overload Transportation and Construction on Overall Stability of Slurry Trench of Underground Diaphragm Wall in Soft Soil Foundation Pit

Xu Yonggang, Ji Chang, Xu Kai, Sun Yunyong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on an underground continuous wall construction worksite near the main road in Ningbo city, this study tested the soil dynamic strength index through field sampling and analyzed the integral buckling mode of trench wall under overload transportation and construction by 3D finite element numerical simulation. Assuming it would reach critical conditions when the tank wall of the lateral soil achieved the shear plastic limit, the study used the limit equilibrium method and deduced the overall decision formula of instability of the slurry trench of underground continuous wall on a single soil layer. The findings indicate that overall instability presents class-four sprayed failure pattern and overall instability would appear when the supporting slurry lagged behind or had leakage.

Key words: soft soil foundation pit; underground diaphragm wall; overload transportation and construction; ultimate equilibrium ; overall instability

(责任编辑 王建华)