

土钉墙稳定性的一种简化分析方法

冯志焱^{1, 2}, 唐 竞³

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西北综合勘察设计院, 陕西 西安 710003)

摘要: 根据土钉墙的实测结果和理论分析, 提出一种土钉墙稳定性分析的简化方法, 可用于土钉墙的初步分析。对两个实际工程的计算表明, 该方法具有一定的实用价值。

关键词: 土木工程; 基坑支护; 土钉墙; 稳定性; 简化分析方法

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5267 - 04

A SIMPLIFIED METHOD FOR THE STABILITY ANALYSIS OF SOIL-NAILED WALL

FENG Zhi-yan^{1, 2}, TANG Jing³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
3. Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, China)

Abstract: Based on the in-situ tests and theoretical analysis, a simplified method, which can be used to analyze the stability of soil-nailed wall, is proposed. The simplified method assumes that the fixed circular potential failure surface passes through the toe of the wall and intersect the top at about $0.36 H$, and trapeziform earth pressure along the depth of the wall. This method has the advantage of avoiding the tedious processes of trial and error to search the potential failure surface. The calculation results of two engineering projects show that the proposed method has its practical value.

Key words: civil engineering; foundation pit; soil-nailed wall; stability; simplified method

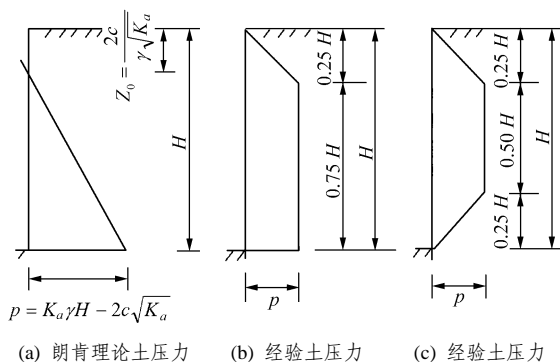
1 引言

土钉墙由于其经济、施工简单, 已成为目前深基坑工程中的一种主要支护形式。用于土钉墙分析计算的方法很多^[1~3], 全国和地方的相应规范、规程^[4, 5]也不少, 但其中有些方法对土钉墙的具体情况考虑不够。比如, 在确定破裂面时, 通常按朗肯土压力理论或圆弧试算确定, 而工程实测表明^[6~8],

其不同于这两种方法计算的结果; 土钉轴力的实测结果也不同于朗肯土压力的计算结果, 而更接近于梯形分布, 如图 1 所示。目前市场上有许多深基坑土钉墙支护的计算软件, 使用(特别是计算)较为方便, 但其计算结果往往不是很理想, 经常需要根据不同情况进行经验性的调整。本文根据已有的研究和工程实测结果, 提出一种简化分析方法, 可用于土钉墙的初步分析, 特别适合于工程技术人员使用。

收稿日期: 2004 - 03 - 30; **修回日期:** 2004 - 05 - 12

作者简介: 冯志焱(1964 -), 男, 1986 年毕业于武汉工业大学工业与民用建筑专业, 现为博士研究生、副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: zyfeng5769@163.com。



说明：(b), (c)中的 p : (1) 对于砂土和粉土, $p = 0.55K_a\gamma H$; (2) 对于一般粘性土, $p = K_a\gamma H - 2c\sqrt{K_a} \leq 0.55K_a\gamma H$, 且 $\geq 0.2K_a\gamma H$

图1 土压力分布的不同形式

Fig.1 Earth pressure distribution on soil-nailed walls

2 简化分析方法

2.1 土钉轴力的计算

进行土钉墙稳定性分析, 首先要知道土钉所受轴力(拉力)的大小。土钉轴力在其长度方向并不是一定值, 而是从面板开始由小到大, 又由大到小, 这里所指土钉轴力是指最大值。在土钉轴力的计算中, 各规范采用了不同的方法, 如文[4]采用传统的朗肯土压力理论, 并考虑基坑坡角折减系数的方法进行计算, 它是沿深度的三角形分布, 如图 1(a)所示(该图以直立基坑为例说明, 即折减系数取为 1)。按这种土压力分布计算时, 最下层土钉受力最大, 故下部土钉的锚固长度最长, 但下部滑裂区较小, 因此, 仅考虑单根土钉的抗拔稳定时, 各层土钉的长度较为均匀。

另外一种计算方法是采用经验土压力, 即如图 1(b), (c)所示的土压力分布。根据工程实测研究^[6~8], 基于计算土钉力的土压力分布大多为这两种形式或接近于这两种形式。由于基坑坑底对坑壁侧向位移的限制, 下部土钉所受轴力应减小, 即以图 1(c)的分布更为合理一些, 但基于安全的考虑, 本文采用图 1(b)的分布形式。当挡土墙后地面存在超重 q 时, 可按朗肯土压力理论进行处理, 即增加一项 qK_a 。

2.2 土钉墙潜在滑裂面

进行土钉墙的稳定分析时, 还需要知道土钉墙潜在在破裂面的位置和形状, 以便确定土钉在稳定区的长度, 继而确定土钉的抗滑作用力的大小。在滑裂面处, 土钉轴力达到最大值, 在此处两侧, 土钉界面的摩阻力方向相反。由实测土钉轴力确定滑裂面时, 即以此特点为依据。在工程实际中, 对土

钉墙的潜在破裂面有不同的假设, 主要有通过坡脚的朗肯理论破裂面、圆弧破裂面和对数螺旋线破裂面等形式。许多工程实测表明, 土钉墙的潜在破裂面更接近对数螺旋线或圆弧形式, 对于均质土层或土层性质接近的情况更是如此。对于对数螺旋线形式的滑裂面, 一般可由文[9]建议的方程确定:

$$r = \alpha e^{k\theta} \tag{1}$$

式中: r 为滑弧半径; α, k 为常数; θ 单位为弧度。

图 2 中, 对于非粘性土取 $\omega = 3^\circ$, 其余土取 $\omega = 0^\circ$ 。由于圆弧形式与对数螺旋线形式的破裂面很接近, 因此, 可用方便计算的圆弧形作为潜在破裂面的形状。又由以上分析, 可近似取 $\omega = 0^\circ$, 即破裂面在坡顶处的切线是竖直线; 实测与理论分析表明^[1, 7, 8], 土钉墙潜在破裂面在顶面处距面板约 $0.36H$ (H 为墙高), 且通过坡脚。根据以上条件, 可确定圆弧形破裂面的圆心及圆弧位置, 如图 3 所示。一般地, 由此得到的破裂体较由朗肯土压力理论和条分法试算所得结果要小。

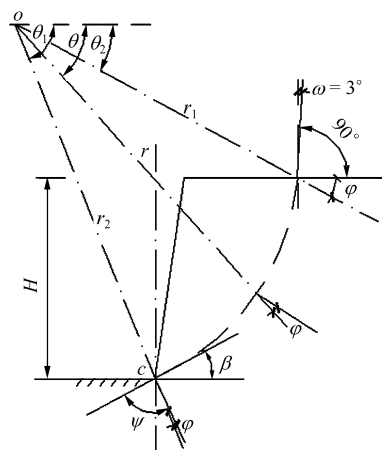


图2 土钉墙破裂面的对数螺旋线形式

Fig.2 Log-spiral shape of failure surface for soil-nailed wall

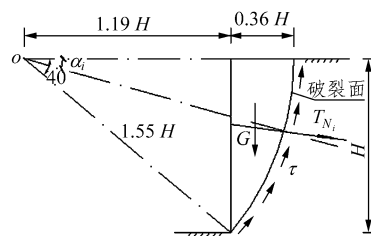


图3 计算简图

Fig.3 Sketch map used in this simplified method

2.3 简化计算方法

2.3.1 基本假定

(1) 土钉墙为垂直开挖, 或接近于垂直开挖;

墙后土体为均质土, 对非均质土, 计算所用参数 γ , c , φ 可取各层土的厚度加权平均值;

(2) 土钉受力仅考虑其受拉作用, 其分布按图 1(b)形式, 土钉墙破裂面按图 3 的形式;

(3) 土体抗剪强度沿破裂面全部发挥, 并遵守库伦破坏准则。

2.3.2 稳定性计算

(1) 整体力矩平衡: 土钉墙的不稳定区绕圆心 o 点的抗滑力矩 M_r 和滑动力矩 M_s 的比值定义为安全系数 K_1 , 即

$$K_1 = M_r / M_s$$

滑动力矩 M_s 由不稳定区土的自重产生, 由图 3 可得

$$M_s = \left[\pi(1.55H)^2 \times \frac{40}{360} - \frac{1}{2} \times H \times 1.19H \right] \cdot$$

$$\gamma S_H (1.19H + 0.13H) = 0.32\gamma H^3 S_H \quad (2)$$

式中: H 为基坑深度(m), γ 为土的重度(kN/m^3), S_H 为土钉水平间距(m)。

(2) 抗滑力矩 M_r 由 2 部分产生: 一是沿破裂面土的抗剪强度 τ , 记为 M_1 (其中 $\tau = c + 1.55\gamma H \sin^2 \alpha \tan \varphi$) 即

$$M_1 = \int_0^{40^\circ} \tau 1.55 H S_H 1.55 H d\alpha =$$

$$1.55cH^2 S_H + 0.37\gamma H^3 S_H \tan \varphi \quad (3)$$

二是破裂面处土钉极限抗拔力, 记为 M_2 。土钉极限抗拔力的抗滑作用有两个, 一是其沿破裂面的切向分量直接产生的抵抗力矩, 二是其法向分量增加了土体抗剪强度。由图 3 可知, 第 i 根土钉力产生力矩为

$$M_{2N_i} = 1.55HT_{N_i} [\sin(\alpha_i - \theta) + \cos(\alpha_i - \theta)] \tan \varphi \quad (4)$$

式中: θ 为土钉与水平面的夹角。

因此有

$$K_1 = \frac{M_r}{M_s} = \frac{M_1 + \sum_{i=1}^n M_{2N_i}}{M_s} =$$

$$\left\{ 1.68cHS_H + 0.37\gamma H^2 S_H \tan \varphi + \right.$$

$$\left. 1.55 \sum_{i=1}^n \{ T_{N_i} [\sin(\alpha_i - \theta) + \cos(\alpha_i - \theta) \tan \varphi] \} \right\} /$$

$$(0.32\gamma H^2 S_H) \quad (5)$$

2.3.3 抗拔验算

抗拔稳定性可按每层土钉进行计算, 单根土钉所受拉拔力可按上述方法计算, 抗拔力为稳定土体内的极限摩阻力值。抗拔安全系数 K_b 为抗拔力与土钉所受力的比值。

由以上可看出, 该方法的特点是避免了条分法试算和最危险滑弧的寻找, 使问题简化。

3 算 例

在实际工程中, 先由工程经验初步确定土钉设计的主要参数, 包括水平向和竖向间距、土钉的长度和倾角、成孔直径等, 再由基坑深度确定破裂面的位置, 据此可验算土钉的抗拔稳定性是否满足要求; 然后再验算抗滑稳定性是否满足要求。

3.1 算例 1

该算例为石家庄市公安交通指挥中心基坑支护工程^[10], 土钉墙、土层剖面及相关参数见图 4。土

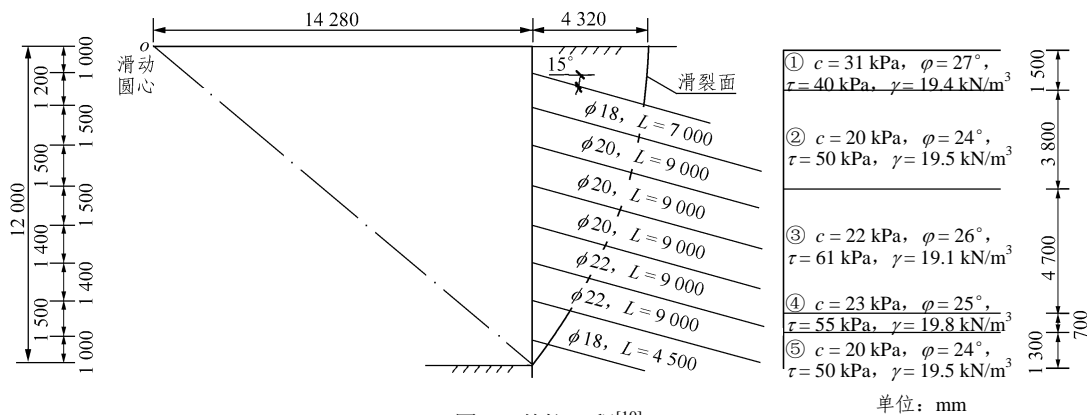


图 4 基坑工程^[10]

Fig.4 Pit engineering^[10]

钉水平间距 1.5 m，成孔直径 ϕ 100 mm。根据本文方法的计算结果为：各层土钉的抗拔稳定系数： $K_b = 2.07(1.44)$ ；抗滑稳定安全系数： $K_1 = 1.56(1.14)$ 。

上述括号中数值为文[10]的计算结果。按文[4]计算的抗滑稳定安全系数为 1.03。

3.2 算例 2

该算例为深圳某基坑工程^[7]。土钉墙剖面见图 5，场地土为粉质粘土，其天然含水量 $w = 20\%$ ，天然重度 $\gamma = 18.3 \text{ kN/m}^3$ ，粘聚力 $c = 50 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\phi = 22^\circ$ ，土 - 钉界面极限摩阻力 $\tau_u = 70 \text{ kPa}$ ，土钉水平间距 1.3 m，成孔直径 ϕ 110 mm。根据本文方法的计算结果为：总抗拔安全系数 $K_b = 3.55$ ；抗滑稳定安全系数 $K_1 = 3.08$ 。

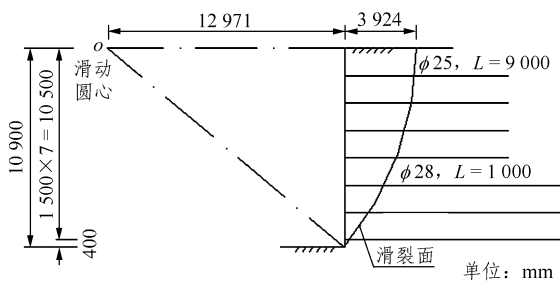


图 5 基坑工程^[7]

Fig.5 Pit engineering^[7]

同样，按文[4]计算，则抗滑稳定安全系数为 2.33。该工程在基坑施工结束后一个月时基坑顶部的水平位移不到 10 mm，说明其安全系数较大。

以上计算中，按本文方法计算结果偏大，这是由于其破裂体较小，即滑裂面靠近墙面一侧所致。

4 结 论

土钉墙破裂体较朗肯土压力理论和条分法试算的结果小，破裂面可按通过坡脚、与坡顶相交于距墙面约 $0.36 H$ 的圆弧形考虑，土钉轴力沿深度的分布可按梯形考虑，据此，土钉墙稳定性的分析可进行简化。

参考文献(References):

[1] Ilan J, George B, Khalid F, et al. Design of soil nailed retaining

structures[J]. Geotech. Special Publication, 1988, (25): 644 - 659.

[2] Yuan J X, Yang Y W, Leslie G T, et al. New approach to limit equilibrium and reliability analysis of soil nailed walls[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2003, 3(2): 145 - 151.

[3] 杨光华, 曾进群, 李思平, 等. 基坑支护土钉轴力的简化计算法[A]. 见: 第九届全国土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 891 - 895.(Yang Guanghua, Zeng Jinqun, Li Siping, et al. A simplified method of calculating the axial forces of soil nailing[A]. In: The Proceedings in 9th Conference of Chinese Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 891 - 895.(in Chinese))

[4] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑基坑支护技术规程(JGJ120 - 99)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavation(JGJ120 - 99)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[5] 中国工程建设标准化协会. 基坑土钉支护技术规程(CECS96: 97)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(The Chinese Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Soil Nailing for Retaining of Building Foundation Excavation(CECS96: 97)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))

[6] 王步云. 土钉墙设计[J]. 岩土工程技术, 1997, 4: 30 - 41.(Wang Buyun. The designing of soil-nailed wall[J]. Geotechnical Engineering Technology, 1997, 4: 30 - 41.(in Chinese))

[7] 冯志焱. 土钉墙的工程试验研究[A]. 见: 第八届全国土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京: 万国学术出版社, 1999. 659 - 662.(Feng Zhiyan. Analysis of the results of in-situ soil nailing test projects[A]. In: The Proceedings in 8th Conference of Chinese Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. Beijing: International Academic Publisher, 1999. 659 - 662.(in Chinese))

[8] Plumelle C, Schlosser F, Delage P, et al. French national research project on soil nailing[J]. Clouterre Geotech, 1988, 25: 660 - 675.

[9] Bridle R J. Soil nailing analysis and design[J]. Ground Eng., 1989, 22(6): 52 - 56.

[10] 王长科, 陈小锋, 苗现国. 石家庄土钉支护设计分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 64 - 68.(Wang Changke, Chen Xiaofeng, Miao Xianguo. Analysis for soil nailing in Shijiazhuang[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 64 - 68.(in Chinese))