

复合土钉墙中垂直支护桩临界桩长的研究

屠毓敏¹, 鲁美霞²

(1. 浙江大学土木工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市钱江新城建设指挥部, 浙江 杭州 310016)

摘要: 复合土钉墙是由土钉墙和垂直支护桩所组成, 设计时应验算其整体稳定性, 而垂直支护桩的桩长直接影响到复合土钉墙的整体稳定性, 垂直支护桩存在着临界桩长问题。本文从垂直支护桩对复合土钉墙的整体稳定性的抗滑作用出发, 分析了垂直支护桩的桩长对复合土钉墙整体稳定性的影响, 并研究了临界桩长的主要影响因素。在工程设计中, 应根据临界桩长设计垂直支护桩。

关键词: 基坑; 复合土钉墙; 垂直支护桩; 临界深度; 整体稳定性

中图分类号: TU463

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-2023-04

作者简介: 屠毓敏(1965-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。

Research on critical pile length of perpendicular protecting piles in compound soil-nailing wall

TU Yu-min¹, LU Mei-xia²

(1. Civil Engineering Department of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Construction Headquarters of Hangzhou Qianjiang New City, Hangzhou 310016, China)

Abstract: The compound soil-nailing wall was made of the soil-nailing wall and perpendicular protecting piles. The whole stability was checked in the design, while the pile length of perpendicular protecting piles affected directly the whole stability of the compound soil-nailing wall. There was a problem of a critical pile length in the perpendicular protecting piles. Setting out from an anti-sliding function of perpendicular protecting piles on the whole stability of the compound soil-nailing wall, the influence of the perpendicular protecting piles on the whole stability of the compound soil-nailing wall was analyzed, and some main factors of influence for the critical pile length were studied. In the engineering design, the perpendicular protecting piles should be designed according to the critical pile length.

Key word: excavation; compound soil-nailing wall; perpendicular protecting piles; critical depth; whole stability

0 问题的提出

复合土钉墙是在土钉墙的基础上发展起来的一种新型的基坑支护结构型式, 它是由土钉墙和搅拌桩、旋喷桩、微型桩等垂直支护桩组合而成, 由于垂直支护桩的存在, 可大大提高基坑开挖面的承载能力, 从而降低基坑的变形, 减小对周边环境的影响, 提高基坑侧壁支护结构的安全等级。与土钉墙相比, 复合土钉墙所适用的土质条件更广、基坑的支护深度更深。

在复合土钉墙设计时, 一般运用土钉墙的设计理论, 对复合土钉墙进行土钉极限抗拔承载力及整体稳定性验算, 其中整体稳定性验算是复合土钉墙设计的关键, 而垂直支护桩在复合土钉墙中的抗滑作用大小, 直接关系到复合土钉墙的经济、安全。在复合土钉墙整体稳定性验算时, 通常将垂直支护桩的抗滑作用以其剪切力的形式计入^[1-2], 然而笔者在复合土钉墙的工程实践中发现: 垂直支护桩的入土深度对复合土钉墙

的整体稳定性的影响颇大, 若垂直支护桩过短, 其未能穿越最危险滑动面, 对其整体稳定性不起作用; 若垂直支护桩过长, 最危险滑动面完全切割垂直支护桩, 则垂直支护桩对其整体稳定性作用不大, 则复合土钉墙中的垂直支护桩存在着临界深度, 在设计中应准确选取。

鉴于目前对垂直支护桩临界深度的研究较少, 为提高复合土钉墙的设计水准, 合理选取垂直支护桩的桩长, 降低工程造价, 本文进行了这方面的研究, 供广大工程设计人员参考。

1 复合土钉墙整体稳定性分析

若基坑开挖边坡、土钉墙基坑支护结构及复合土钉墙基坑支护结构的整体稳定性分析均采用《建筑基

坑支护技术规程》^[3]中的方法进行分析验算, 则土钉墙的整体稳定性分析的计算式为

$$\sum_{i=1}^n c_{ik} L_i s + s \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik} + \sum_{j=1}^m T_{nj} [\cos(\alpha_j + \theta_j) + \frac{1}{2} \sin(\alpha_j + \theta_j) \tan \varphi_{ik}] - s \gamma_k \gamma_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \sin \theta_i \geq 0 \quad (1)$$

复合土钉墙的整体稳定性验算也可用类似的方法进行, 此时应考虑搅拌桩、旋喷桩等垂直支护桩的抗滑作用, 其抗滑作用一般计入桩体的剪切作用, 其计算式为

$$\sum_{i=1}^n c_{ik} L_i s + s \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik} + \sum_{j=1}^m T_{nj} [\cos(\alpha_j + \theta_j) + \frac{1}{2} \sin(\alpha_j + \theta_j) \tan \varphi_{ik}] + \tau_s A_s - s \gamma_k \gamma_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \sin \theta_i \geq 0 \quad (2)$$

式中 γ_k 、 γ_0 分别为整体滑动分项系数和基坑侧壁重要性系数; c_{ik} 、 φ_{ik} 为地基土强度指标的标准值; L_i 为土条滑弧面长度; w_i 为土条重量; q_0 为地面均布超载; T_{nj} 为土钉极限抗拔力; s 为土钉的水平间距; α_j 为土钉与水平面的夹角; θ_j 为滑动面某处切线与水平面之间的夹角; τ_s 、 A_s 为垂直支护桩的抗剪强度和截面积。

根据式 (1) 和 (2) 可进行土钉墙及复合土钉墙的整体稳定性分析, 图 1 为某一开挖深度为 5.0 m 的基坑放坡开挖时其最危险滑动面的情况; 当采用土钉墙基坑支护时, 其圆弧滑动面如图 2 所示; 图 3 为采用复合土钉墙时的最危险滑动面。

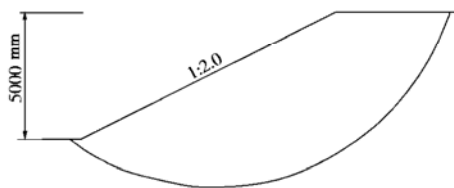


图 1 放坡开挖的最危险滑动面

Fig. 1 The most dangerous silding surface of slope

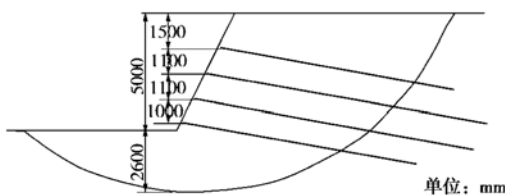


图 2 土钉墙最危险滑动面

Fig. 2 The most dangerous sliding surface of the soil-nailing wall

由图可知, 当基坑采用放坡开挖时, 其最危险圆弧滑动面的逸出点位于坡脚附近, 最危险滑动面的切

土深度较浅, 而当设置土钉墙时, 其最危险滑动面会远离坡脚, 最危险滑动面的切土深度加深, 当设置垂直支护桩时 (如土钉支护中常用的超前支护桩^[4]), 则其最危险滑动面的切土深度会进一步加深。

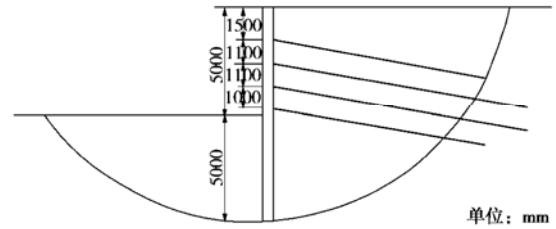


图 3 复合土钉墙最危险滑动面

Fig. 3 The most dangerous sliding surface of the compound soil-nailing wall

2 垂直支护桩的临界桩长的研究

分析图 3 可得, 若垂直支护桩没有足够的入土深度, 即垂直支护桩始终位于最危险滑动面之内, 则最危险滑动面未能切割垂直支护桩, 此时在进行复合土钉墙整体稳定性分析时, 仍按式 (1) 土钉墙整体稳定性计算式进行验算; 当垂直支护桩达到一定深度时, 由于垂直支护桩具有较高的剪切强度, 此时最小安全系数随着垂直支护桩的加深而提高, 同时滑动面的切土深度也进一步加深; 当垂直支护桩的深度加深至一定深度时, 此时最危险滑动面不会随着垂直支护桩深度的增加而发生变化, 垂直支护桩的抗滑能力也不再发生变化, 则复合土钉墙的整体稳定性不会随着垂直支护桩的加深而提高。由此看来, 垂直支护桩在复合土钉墙的整体稳定性作用中存在着临界桩长问题。

以下用一复合土钉墙基坑支护结构来说明垂直支护桩的临界桩长问题。某一基坑位于淤泥土软土地层中, 开挖深度为 5.0 m, 场地土的物理力学性指标为: 粘聚力 $c = 10 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi = 8^\circ$ 、天然重度 $\gamma = 17.0 \text{ kN/m}^3$ 。复合土钉墙中垂直支护桩为水泥土搅拌桩, 搅拌桩按单轴单排设计, 单桩直径为 500 mm, 相互搭接 100 mm, 设计水泥土的无侧限抗压强度为 1 MPa, 抗剪强度为 150 kPa。土钉由 4 层组成, 长度均为 9.0 m, 水平间距为 1.0 m, 垂直布置如图 4 所示, 土钉锚固体的极限摩阻力为 16 kPa。根据式 (1) 和 (2) 进行其整体稳定性分析。

2.1 临界桩长上限值的确定

当设计搅拌桩桩长依次为 6.0、7.0 和 8.0 m 时, 其整体稳定性安全系数均为 1.192, 图 4 为搅拌桩入土深度小于 8.0 m 时的最危险滑动面, 最危险滑动面的切土深度位于基坑基底 3.3 m 处, 即当搅拌桩桩长小于 8.3 m 时, 搅拌桩对复合土钉墙不提供抗滑作用,

此时的桩长称为临界桩长的上限。

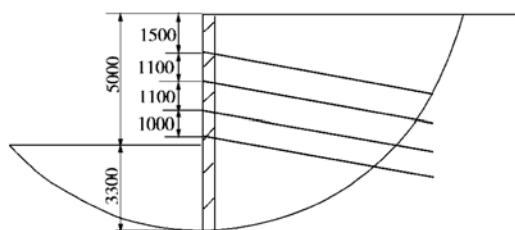


图 4 临界桩长上限的确定

Fig. 4 The determination of the upper limit value of critical pile length

根据计算可得, 当垂直支护桩小于临界桩长的上限值时, 复合土钉墙的整体稳定性仍按式 (1) 进行验算, 式 (2) 仅作为约束条件。

2.2 临界桩长下限值的确定

当搅拌桩的桩长增长至 9.0 m 时, 复合土钉墙的整体稳定性安全系数增大至 1.209, 搅拌桩桩长依次为 10.0、11.0、12.0 和 13.0 m 时, 复合土钉墙的整体稳定性安全系数分别为 1.250、1.308、1.371 和 1.371。图 5 为桩长分别为 9.0、10.0、11.0 和 12.0 m 时的最危险滑动面。

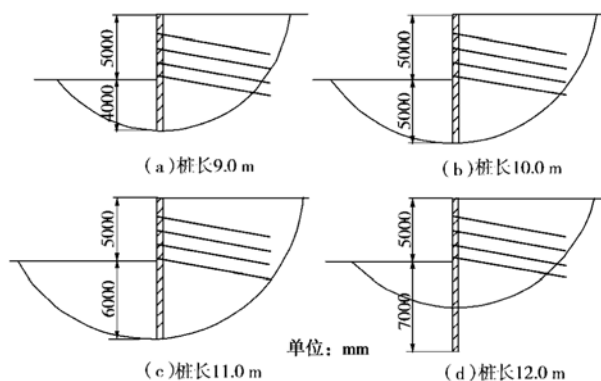


图 5 临界桩长下限的确定

Fig. 5 The determination of the lower limit

由图 5 可得, 随着桩长的加深, 最危险滑动面的入土深度也随之加深, 当桩长为 9.0、10.0 和 11.0 m 时, 最危险滑动面正好穿过搅拌桩的底端, 而当桩长增大至 12.0 m 时, 最危险滑动面完全切割搅拌桩。进一步研究发现, 当桩长为 11.8 和 11.90 m 时, 其安全系数分别为 1.363 和 1.371, 而桩长为 11.8 m 的最危险滑动面也正好穿过搅拌桩的底端, 当桩长为 11.9 m 时的最危险滑动面也与桩长为 12.0 和 13.0 m 时的最危险滑动面相同。由此可得该复合土钉墙中的搅拌桩的临界桩长的下限值为 11.9 m, 此时的最危险滑动面也不会随着桩长的增大而发生变化。

由复合土钉墙的整体稳定性分析可得, 垂直支护桩的桩长在临界桩长之间时, 随着桩长的增加, 其整

体稳定性也随之增大。而此时由于垂直支护桩具有足够大的抗剪强度, 致使当最危险滑动面切割垂直支护桩时, 其整体稳定性安全系数明显增大, 则此时的最危险滑动面只有穿越垂直支护桩的底端时, 才能获得最小安全系数。而当垂直支护桩桩长大于临界桩长的下限值时, 由于桩长的增长, 通过支护桩底端的整体稳定性安全系数总是大于切割支护桩时的整体稳定性安全系数, 即此时的最危险滑动面总是切割垂直支护桩, 且其最危险滑动面不会随着垂直支护桩的加深而发生变化。

由以上分析可知, 当垂直支护桩的桩长在临界桩长的上、下限值之间时, 式 (1) 与 (2) 所求得的最小安全系数相等, 最危险滑动面始终通过垂直支护桩的底端。

3 临界桩长的影响因素分析

研究可得, 复合土钉墙中的垂直支护桩存在着临界桩长问题, 以下对影响临界桩长的主要因素进行分析。复合土钉墙及地基土的物理力学性指标与文中 2 相同。

3.1 土钉长度的影响

为研究土钉长度对垂直支护桩临界桩长的影响, 设计 4 层土钉的长度均相同, 分别研究土钉长度为 6.0 和 12.0 m 时的临界桩长, 见图 6。

经分析可得, 土钉长度为 6.0、12.0 m 时的临界桩长的上限值依次为 6.9 和 9.0 m; 临界桩长的下限值分别为 11.0 和 13.1 m。分析表明在复合土钉墙中的垂直支护桩的临界桩长的上、下限值均随着土钉长度的增长而增大, 这主要由于随着土钉的加长, 破坏面有向深方向发展的趋势所致。

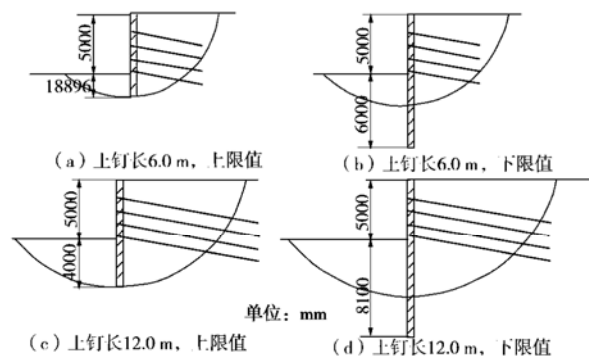


图 6 土钉长度对临界桩长的影响

Fig. 6 The influence of the soil-nailing length on critical pile length

3.2 土钉布置形式的影响

假设 4 层土钉的总长度保持不变, 土钉自上而下的长度依次为 6.0、6.0、9.0、9.0, 6.0、9.0、9.0、6.0

和 9.0、9.0、6.0、6.0 m。图 7 为这 3 种土钉布置时的临界桩长的上、下限值。由图可知,土钉的布置对临界桩长有一定的影响,但影响不明显,随着长土钉的下移,临界桩长的下限值随之增大;而当中间布置长土钉时,临界桩长的上限值最大。依据临界桩长的概念,在复合土钉墙设计中,土钉的布置应按上长下短的原则进行。

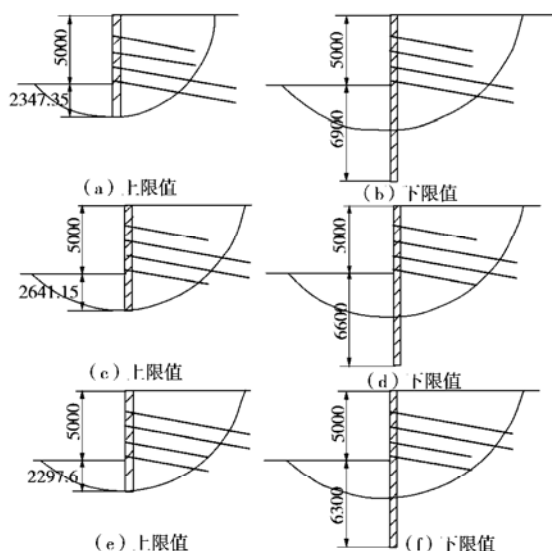


图 7 土钉布置对临界桩长的影响

Fig. 7 The influence of the soil-nailing arrangement on critical pile length

4.3 桩体强度的影响

以上分析中水泥土的抗剪强度为 150 kPa,现分析水泥土强度改变时,临界桩长的变化情况。设水泥土强度为 100 kPa 和 200 kPa。由计算可得,水泥土强度为 100、150 和 200 kPa 时的临界桩长的上限值均相同,均为 8.3 m,而其下限值依次为 11.0、11.8 和 12.8 m。

由于复合土钉墙的整体破坏滑动面存在一定的入土深度,显然根据临界桩长上限值的定义,其值与桩体强度无关;而当桩体强度提高时,由于圆弧滑动面切割桩体,其整体稳定性安全系数提高,临界桩长的下限值也提高。

4.4 地基土性质的影响

以上分析中场地土的物理力学性指标:粘聚力 $c = 10$ kPa、内摩擦角 $\varphi = 8^\circ$ 。若其他条件不变,改变地基土的强度指标。

首先改变地基土的内摩擦角,而地基土的粘聚力保持不变,当摩擦角为 8° 、 15° 、 30° 时,垂直支护桩的临界桩长的下限值依次为 11.9、11.0 和 8.9 m;其次改变地基土的粘聚力,而地基土的内摩擦角保持不变,当粘聚力分别为 10、15 和 20 kPa 时,垂直支护桩的临界桩长的下限值依次为 11.9、11.7 和 11.6 m。

由上分析可得,随着地基土的内摩擦角的增大,

垂直支护桩的临界桩长的下限值明显减小,而粘聚力对临界桩长的影响则较小。

4 结 论

在基坑(或边坡)支护中由于土钉的存在,改变了边坡的破坏形态,当土钉墙产生整体破坏时,其圆弧滑动面的切土深度有加深的趋势;而在复合土钉墙中,由于垂直支护桩的存在,且其抗剪能力远远大于原状土,则其圆弧破坏滑动面的切土深度进一步加深;垂直支护桩存在着临界桩长问题,且存在着临界桩长的上、下限。

临界桩长的影响因素较多,本文仅研究了工程中最常见的几种。研究发现,土钉的长度对临界桩长影响最大;土钉的布置形式影响较小;桩体的强度对临界桩长的上限值不产生影响,而随着桩体强度的提高,临界桩长的下限值也随之提高。

当复合土钉墙位于内摩擦角较大的地基土中(如粉质类土)时,设置较短的垂直支护桩也能产生很大的整体抗滑作用;而对于内摩擦角较小的淤泥类土,则需设置较长的垂直支护桩,才能对其整体稳定性产生作用。在工程设计中,垂直支护桩不能设计得过长或过短,而应根据临界桩长进行设计,应在临界桩长的上下限之间选择垂直支护桩的桩长。

在复合土钉墙设计中,土体强度指标的选取至关重要;复合土钉墙支护淤泥类地层的基坑时,其垂直支护桩对控制基坑的变位产生作用,而对其整体稳定性的作用并不显著。

参考文献:

- [1] 杨志银,等. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005,27(2):153 - 156.(YANG Zhi-yin,et al. Development of composite soil nailing walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(2):153 - 156.)
- [2] 程良奎,杨志银. 喷射混凝土与土钉墙[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1998.(CHENG Liang-kui, YANG Zhi-yin. Shotcrete and soil nailing wall[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.)
- [3] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.)
- [4] 屠毓敏. 土钉支护中超前锚杆的工作机理研究[J]. 岩土力学,2003(2):198 - 201,219.(TU Yu-min. Study on working mechanism of forepoling bolts in soil nailing protection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(2):198 - 201,219.)