

土钉墙计算方法的适用性

杨育文

(武汉市勘测设计研究院, 武汉 430022)

摘 要: 目前有很多针对土钉墙的计算方法, 在实际工程中技术人员往往忽略它们的适用条件而得到不合理的计算结果。介绍了目前国内外的一些土钉墙计算方法, 阐述了它们建立数学物理模型过程中的假设条件以及各自的适用条件, 提出了土钉墙挡土计算方法在实际工程应用中值得注意的一些问题, 如合理选择计算模型、确定滑裂面形状、进一步理解安全系数定义等, 以利于提出安全、经济、优化的设计方案。

关 键 词: 土钉墙; 安全系数; 技术规范

中图分类号: TU 470 **文献标识码:** A

Applicability of computational methods for soil-nailing walls

YANG Yu-wen

(Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Institute, Wuhan 430022, China)

Abstract: Many calculation methods for soil nailing walls have been developed. Having ignored applicable preconditions sometimes results in the incorrect conclusions. This paper presents in detail the typical methods widely-used in practice, and particularly the suppositions in deducing them. The preconditions are highlighted to evaluate the specific stability of soil nailing walls. Some noticeable issues to use these methods, such as reasonably selecting a computational model and specifying a slip surface in shape and further appreciating the definition of factor of safety, are presented aiming to provide some insight into the safety, economical and optimal design of soil nailing walls to propose.

Key words: soil-nailing walls; factor of safety; technical code

1 引 言

1986 年法国交通部启动了 400 万美元用于确定土钉墙技术规程的项目 CLOUTERRE^[1], 标志着这一技术从研究走向了应用。由于它具有工作可靠性、造价经济性、施工工序简单、施工时间较短等优点, 已广泛应用于城市建设、高速公路、水利工程等各个方面。我国工程界应用这一技术不过十几年的时间, 但发展速度尤其迅速。武汉地区 2004 年所完成的 200 多个基坑工程中, 采用土钉墙支护(或与其他支护方式结合组成复合、组合支护)的基坑占 80% 以上, 取得了良好的社会和经济效益。到目前为止, 土钉墙分析计算方法已发展不下几十种, 给这一技术的广泛应用提供了非常便利的条件, 但同时也不得不注意到由于方法众多而带来的一些问

题, 如技术人员在选择计算方法时不太注意方法的适用性等, 特别是忽视假设前提条件的存在。大部分的极限平衡法中, 都有一些假定的前提条件或是针对某类特定的工作状况而提出的。因此, 这就要求技术人员在应用这些方法时, 除了适当地选用土性设计参数值外, 对选用的计算方法也须充分了解。本文介绍了国内外应用较广泛的土钉墙计算方法、假设条件、应用范围等。同时, 根据笔者在实际工程中的一些体会, 提出技术人员容易忽略或引起误解的一些问题, 以期引起同行的关注和重视。

2 土钉墙现有计算方法

尽管可用于土钉墙的计算方法较多, 但它们的分析结果无非是稳定安全系数 F_s 、位移、应力等。据此, 可将土钉墙计算方法分为两大类, 即极限法

和数值分析法, 极限方法主要计算结果为 F_s , 而数值分析法可预测变形大小。

极限法包括极限平衡法、基于上限理论的能量法。目前应用最为广泛的是极限平衡法, 发展的计算方法也最多。工程技术人员在使用这些方法时, 往往不太注重它们的假设条件、原理等, 似乎只要使用某一计算软件得到计算结果就可以了。实践证明, 这种不加分析的使用往往得不到合理的计算结果。以下对这些容易忽视的问题作较详细的介绍。

2.1 极限计算方法

2.1.1 Stoker 方法^[2]

Stoker 等在 1979 年根据试验结果提出了一种方法。其基本假定有: ①滑裂面为通过坡脚的折线; ②土钉、土-土钉界面破坏符合摩尔-库仑准则; ③土钉只提供拉力; ④不考虑地下水作用。

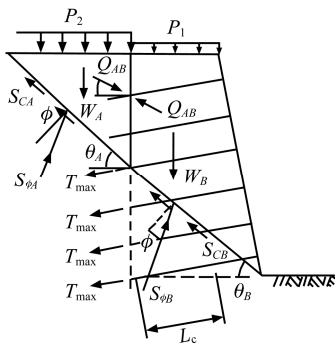


图1 Stoker 方法计算简图

Fig.1 Calculation diagram in Stoker's method

基本原理如下: 根据滑裂面以外土钉可能提供的反力 F_N 与所需要的反力 F_R 之比确定土钉墙内部稳定安全系数 F_s 。 F_s 值大小与滑裂面位置有关, 它的确定需反复试算, 找出某一滑裂面, 使 F_s 达到最小值, 即为土钉墙安全系数。

2.1.2 Davis 方法

美国加州大学 Davis 分校 C.K. Shen 等^[3]根据有限元计算得到土钉墙安全系数轮廓线位置及室内试验结果而提出一种方法。其基本假定有: ①滑裂面为抛物线型 $y = \frac{1}{H} \left(\frac{x}{a} \right)^2$, 通过坡脚 (H 、 a 如图 2 所示); ②土钉墙坡面垂直, 匀质土, 土钉长度相等; ③土体破坏、土-土钉界面滑移符合摩尔-库仑准则; ④土钉只提供拉力; ⑤不考虑地下水作用。它分两种情况: 滑裂面超过加筋体范围 ($a \geq a_T$) 和加筋体位于滑裂面范围内 ($a < a_T$)。计算简图如图 2 所示 ($a \geq a_T$):

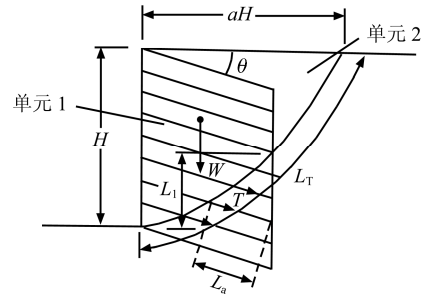


图2 Davis 法计算简图

Fig.2 Calculation diagram in Davis' method

计算过程中, 土钉墙分类加筋元和非加筋元两部分。假定 N_1 为静止土压力, 求出各力分量的大小, 同时认为 c 、 ϕ 安全系数取值与整体安全系数大小一致, 建立静力平衡方程, 叠代求 F_s 大小。

2.1.3 Bridle 方法

Bridle^[4]在总结了他人一些研究成果的基础上, 于 1989 年提出了分析土钉墙内部稳定极限平衡方法。其基本假定有: ①滑裂面为螺旋型 $r = ae^{k\theta}$, 通过坡脚; ②土钉承受拉力和剪力作用; ③土体破坏符合摩尔-库仑准则; ④不考虑土条间力作用; ⑤不考虑地下水作用。

在计算过程中, 考虑滑裂面处土条、土钉作用, 对土钉墙主动区绕极点建立力矩平衡方程, 以确定土钉轴力和剪力。计算简图如图 3 所示。

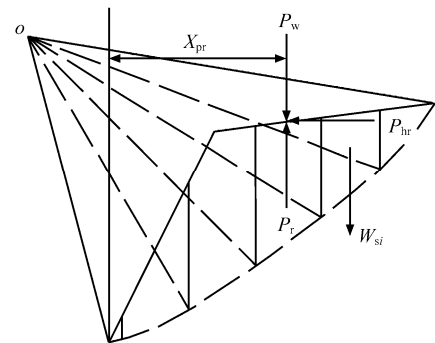


图3 Bridle 方法计算简图

Fig.3 Calculation diagram in Bridle's method

首先, 计算出滑动土体不平衡力矩 $\Delta M = M_T - M_R$, 该力矩须由土钉提供的拉力和剪力所得到的力矩来平衡, 据此求出土钉轴力 T_i 和剪力 S_i 具体表达式:

$$T_i = 2S_i \tan(2\rho_i) \quad (1)$$

式中: ρ_i 为土钉 i 与滑裂面处土条法线夹角。

建立力矩平衡方程, 可求得 T_i 、 S_i 大小。

2.1.4 王步云方法

王步云^[5]根据土钉墙原位试验和理论分析, 在 1990 年提出了内部稳定计算方法。其基本假定有: ①滑裂面为折线型; ②面层主动土压力全部由土钉承担; ③土钉只受拉力作用; ④不考虑地下水作用。

计算分两方面: ①土钉体抗拉断裂验算; ②土钉锚固力极限状态验算。前者安全系数大于 1.5, 后者须大于 1.3~2.0。计算简图如图 4 所示。

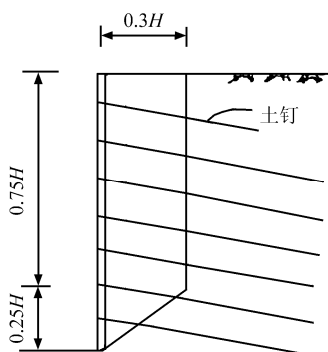


图 4 王步云法中假定的滑裂面

Fig.4 Supposed slippage surface in Wang's method

2.1.5 抛物线滑裂面法及能量法

根据分析土钉墙变形观测资料及受力情况, 笔者^[6]提出了土钉墙内部稳定计算方法, 其基本假定为: ①滑裂面为抛物线型, 通过坡脚; ②土条间合力是水平的; ③土钉只承受拉力; ④土体、土-土钉界面破坏符合摩尔-库仑准则; ⑤不考虑地下水作用。

计算简图如图 5 所示。

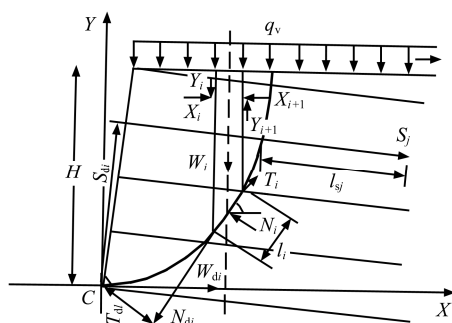


图 5 计算简图

Fig.5 Calculation diagram

以坡脚点转动为中心, 建立极限力矩平衡方程, 经叠代求解安全系数。 F_s 的确定须经搜索多个滑裂面, 取其中最小值。

将土层 c 、 ϕ 、土钉与土体之间极限摩阻力 τ 作为随机变量, 假设条件类似, 根据力的平衡条件建立方程, 采用 JC 法, 笔者提出了可靠度分析方法^[7]。该方法既可以计算安全系数 F_s , 又可以得到土钉墙稳定可靠度指标 ρ 大小。

2.1.6 极限平衡法的特点

以上介绍的方法是建立在力、力矩平衡条件基础上的极限平衡法, 为了将超静定问题转化为可求解的静定问题, 建模过程中不得不引入一些假设条件。在实际工程中, 须特别注意这些假定条件。若选择的计算模型中假设条件与实际的土钉墙工作状态相符, 就有可能得到较合理的计算结果; 否则, 得到计算结果就很有可能不正确。

极限平衡法中最大的优点是概念明确、方法简单、人们容易接受; 最大的缺点是假设的前提条件过多, 适用性上存在一定的局限性。为了避免这方面的不足, 笔者将上限理论引入到土钉墙稳定分析之中^[8-9]。对所研究的土钉墙, 认为主动区、滑动面转换薄层土体达到塑性阶段。若作用在滑裂体上的外力有: 土钉抗拔力 T_i 、地面超载 P 、土体自重 W , 则根据上限理论可建立下面的方程式:

$$\sum_{i=1}^n T_i V_{ti} + \int_A P V_p dA + \int_{\Omega} W V_w d\Omega = \int_{\Omega} D d\Omega \quad (2)$$

式中: V_{ti} 、 V_p 、 V_w 分别为土钉 i 位于滑裂单元面处、外力 P 处、自重 W 处的速度向量; D 为单位面积能量耗散; Ω 为滑动体范围; A 为外力 P 作用面积; n 为土钉总数。离散主动滑动区域, 叠代求解 F_s 大小。将土层 γ 、 c 、 ϕ 、土钉与土体之间极限摩阻力 τ 作为随机变量, 假定安全系数 F_s 符合对数正态分布, 利用台劳级数公式近似求得安全系数 F_s 的方差, 求得土钉墙失效概率 P_f ^[10]

所有极限法最终计算结果是 F_s (或可靠度指标等) 或土钉轴力等, 无法计算土钉墙变形大小, 而数值模拟可以预测基坑开挖过程中的变形值。

2.2 数值分析方法

数值分析法最大的优点是能预测土钉墙变形大小, 对这样的柔性支护是非常重要的。目前, 应用最多的是有限元法。由于各种商用软件的普及, 除了有限元以外, 人们现在似乎很热衷将其他方法 (如边界元、离散元、差分等方法) 应用于实际工程中, 已积累了不少的经验。

2.2.1 有限元法

沈智刚等^[3]、宋二祥等^[11]分别于 1981 年和 1996 年针对土钉墙的力学性状开发了有限元法程序, 都

假定为平面应变问题。前者将土钉作为复合单元,后者将土钉作为杆单元,土钉与土交界采用 10 节点界面单元连结。土的本构关系前者采用 Duncan-Chang 模型,后者采用 Mohr-Coulomb 模型,都采用初应力法叠代求解方程组。杨林德等^[12]采用带转动自由度的 Goodman 单元,对复合土钉墙进行了有限元分析,得到了与实测值相近的一些结果。土钉墙内部与外部破坏机制也采用这种方法进行了分析^[13]。

2.2.2 边界元法

通过对线弹性静力边界元法进行耦合、弹塑性处理后,边界元法可以应用到土钉墙分析中^[14]。以由极限平衡法得到的滑裂面位置为界,将土钉墙分成两个区域,区域内土体作为弹性体考虑,滑裂面转换薄层土体为弹塑性体。考虑该处土体存在能量耗散及土钉的抗滑作用,将影响系数矩阵进行“叠加”,形成了弹塑性边界方程。该法计算得到的结果,可用来计算土钉墙安全系数,并且使得土钉墙位移和应力等数据具有安全系数上的意义。

2.2.3 离散元法

Kim 等^[15]提出了土钉墙散元法。将土钉墙分为主动区和被动区,并将主动区离散为有限个单元,单元间用 Winkler 弹簧连接。界面只涉及土体,用土弹簧;若有土钉穿过,还须考虑土钉弹簧的作用和考虑土钉抗剪、抗拉作用,然后形成平面应变离散元法方程组,叠代求解。

3 关于土钉墙计算方法的讨论

由前面提到的计算方法可以看出,极限平衡法假设条件较多,得到的主要结果是 F_s ,当然有的可以得到土钉轴力大小。能量法几乎没有假设条件,得到的计算结果也是 F_s 。在实际工程中,广泛采用的是极限平衡法。由前面的介绍可知,它们都有假设的前提条件,因此,有各自的适用范围,本文将详细介绍这部分内容。数值方法除了可以预测变形外,还可以知道土钉轴力大小、土体应力甚至 F_s 大小等等。为了更全面地了解土钉墙的变形、挡土机制以及稳定性状态等,人们也开始采用一些数值分析方法,使计算结果与极限法进行互补。

3.1 极限法

土钉墙内部稳定极限方法,一般是先假定某种形式的滑裂面,以该面为界将土钉墙分成主动区和被动区,考虑被动区土钉的抗滑作用,假定主动区内条块为刚性体,建立力和(或)力矩平衡方程,叠代求解,计算结果以安全系数 F_s 的形式表示出来,

评估土钉墙的稳定。它们具有概念明确、方法简单的优点,易于被工程技术人员接受。由于极限方法(特别是极限平衡法)有不同的假定或不同的前提条件。很显然,它们的适用条件也存在差异,这尤其值得技术人员的关注。根据笔者在实践中的一些经验,现对它们的适用性一一加以说明。

(1) Stocker 方法假定滑裂面为折线,因此,适用于非黏性土情况。例如:砂性土、废石料边坡加固等,对于黏性土边坡等就须慎用。另外,若地面有较大超载情况则更加适用,因为该方法是根据超载较大的几个试验结果的基础上提出来的。

(2) Davis 方法提出 5 个假定前提条件,其中坡面垂直、匀质土、土钉长度相等,这也是该方法的适用条件。通过分析可知,该法所得到的安全系数偏小,一般当 $F_s \geq 1$,即可认为土钉墙内部是稳定的。

(3) Bridle 方法假定的滑裂面形状是介于折线和圆弧滑裂面之间的,可适用于黏性土及有地面超载情况。该法直接求出土钉在滑裂面处轴力和剪力,通过与土钉材料抗拉、抗剪强度进行比较,即可得土钉墙稳定情况。但须注意的是,土钉墙失稳有时是由于土钉周围土体无法提供足够的摩阻力而使得土钉从被动区中拔出。

(4) 王步云方法是根据土钉墙原形观测资料整理出来的,适用于黄土类粉土或粉质黏土土坡加固分析计算,对于土质条件较好的非黏性土土钉墙内部稳定分析也是适用的。

(5) 抛物线型滑裂法适用于土质条件较好的均质土或土层力学性能相差不大的土钉墙稳定分析。另外,土钉与水平方向倾角不宜过大。

(6) 基于上限理论的极限分析方法,建模过程得到了简化。由于该方法建立在严格的理论基础上,极限平衡分析方法中的大量假设条件已不存在,使得计算结果更为精确合理。该方法可广泛应用于均质土、非均质土情况,特别适用于土钉墙平滑破坏稳定分析^[16]。

3.2 数值分析方法

土钉墙是一种主动支护的柔性结构,只有在被加固土体一定量的变形发生之后,位于被动区土钉才能获得一定的抗拔力,限制进一步的变形发生。很多工程位于地上建筑、地下管线密集的旧城区,过大变形会破坏周边环境,反过来也影响土钉墙本身的稳定。例如,一个计算得到 $F_s > 1.65$ 的土钉墙,稳定性符合规范要求,但由于产生了 42 mm 的水平位移,使得紧邻的地下排水管道破裂,大量的地下水

渗出，土体发生了渗透破坏，结果使得该土钉墙发生失稳破坏。如果能够预测到最大的位移，采取一定的预防措施，这样的事故就有可能避免。因此，计算施工过程中变形大小的数值分析就显得很重要，有时是必需的。另外，计算机的性能大大提高，各种商用软件的普及，为土钉墙数值分析提供了良好的条件。

工程中目前应用最广泛的数值分析是有限元法。应用有限元法分析时，应注意两个方面的问题：①土的本构关系的选择，②本构关系中参数取值。例如，土的本构关系中广泛应用的邓肯-张非线性模型，较适合于黏土，它涉及到 8 个土性指标，其中有 3~4 个是一般室内试验不易确定的。

通过相关资料分析和笔者的一些数值分析经验，表 1 总结出了常用本构关系的适用条件。有些本构关系中部分参数在实际工程中是不常用到的，如 Mohr-Coulomb 模型中的土体弹性模量、泊松比的大小，表 2 给出了它们取值参考值。

表 1 常用塑性模型的适用条件

Table 1 Applicable conditions for commonly-used models

塑性模型	适用条件
Druck-Prager 模型	内摩擦角较小的软土
Mohr-Coulomb 模型	砂、砂性土
双屈服模型	回填土、粗粒砂
剑桥模型	软土

表 2 弹性模量与泊松比取值

Table 2 The range of selected values of elastic modulus and Poisson's ratio

土名称	E/MPa	ν
松砂	10.3~25	0.2~0.4
密砂	34.5~55	0.3~0.45
一般黏性土	3.1~10.3	0.15~0.35
硬土	10.3~22.5	0.2~0.5
软土	2~4	0.15~0.25

土钉墙边界元法具有有限元法的主要优点。该法在计算过程中所需参数少且易获得，计算结果可与土钉墙安全系数直接联系起来。该法还需在实际工程中进一步应用，积累一些经验。

土钉墙离散元法还处于理论研究阶段，有些问题还有待进一步探讨，如单元为非刚性及单元间联系模式的合理确定等。该法也具有有一些很重要的优点，例如所需参数较少等。

4 土钉墙计算方法的应用

土钉技术在国外的历史有 30 多年的历史，而我

国应用这一技术加固边坡仅十几年，但应用范围很广。人们开始只应用于硬土层加固及无地下水的情况。随着工程技术人员经验的积累，它的应用范围逐步延伸到软土或较软土的加固。如果土层强度高、性质均一，在这种简单的土质条件下，土钉墙的稳定变形机制是比较清楚的，但在软土、地下水位较高、或土层强度变化较大、或工况发生变化的复杂情况下，就变得非常复杂了。尽管我们已积累了大量的工程经验，这种复杂情况下土钉墙的稳定机制还远远没有被人们所了解，武汉、北京、广州等地近几年土钉墙滑塌事故的被多次报道就说明了这一点。当然，事故的发生涉及到工程勘察、设计、施工等多方面的问题。就基坑工程来说，据统计，由于基坑设计、施工质量方面存在问题而引发的事故占 80.4%^[17]。由此可见，目前土钉墙设计上存在不容忽视的一些问题，而分析计算是设计中非常关键的内容之一。因此，应在设计上、计算分析方面把住第一道关口，确保土钉墙工作的可靠性。根据多年的工程实践经验，笔者认为，有关土钉墙分析计算的以下几个方面的问题尤其值得同行的关注。

4.1 选择适当的计算模型

目前，应用最广泛的方法还是极限平衡法。据统计，国内外有不下 20 种不同的极限平衡法计算模型。由前面介绍可以看出，每种计算方法都有特定的假设条件，有不同的应用范围。这就要求设计人员在设计方案验算之前，须对计算方法进行取舍，做到“对症下药”，才有可能得到正确的计算结果。

举一均质土中的土钉墙实例说明^[18]。开挖深为 5 m，锚杆长为 5 m， $S_V \times S_H = 1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ ，材料为 $\phi 22 \text{ mm}$ 钢筋，土钉与水平方向成 15° 倾角，孔径 $D=0.12 \text{ m}$ ，灌注水泥砂浆。面层采用钢筋网 C20 喷射混凝土组成。不考虑地下水的影响，被加固土体为老黏土，参数 $\gamma=18.5 \text{ kN/m}^3$ ， $c'=20 \text{ kPa}$ ， $\phi'=12^\circ$ ，土钉与周围土体间极限摩阻力 $\tau=20 \text{ kPa}$ 。采用 Davis 法计算， $F_s=1.45$ ；采用抛物线滑裂面法， $F_s=1.63$ ，安全系数相差 0.18。因 Davis 法主动区未进行土条划分，计算值偏小。抛物线滑裂面法得到的 $F_s=1.63$ 结果更为合理。用上限理论分析^[8-9]，得到 $F_s=1.92$ ，计算值偏大，这主要原因是 1.92 为上限解，同时又考虑了基坑的空间效应。用差分数值分析，计算得到 $F_s=1.80$ ，该值与极限平衡法结果比较偏大，是考虑了三维基坑的空间效应的原因。

土钉墙稳定验算相关规范^[19]上选用了类似于瑞典圆弧滑动条分法的极限平衡法。对于均质、强度较高土层土钉墙来说是合理的，但对于土层抗剪

强度存在较大差异的多层土(可能出现层间平滑滑动或复合滑动破坏),这一方法能否得到合理的 F_s 值,还须工程的进一步的验证。

在实际工程中,建议针对本地土层、土钉墙的特点,采用不同的计算方法多开发几套软件,特别要强调计算方法的多样性,有选择地进行分析计算。如在武汉地区,针对武昌老黏土、残积土以及汉口黏土、砂层土,至少采用两种不同的的极限平衡法分别进行稳定验算则较合理,而不要只采用一种计算方法验算所有不同土层情况下的土钉墙稳定。

4.2 注重滑裂面的形状

除了注重计算方法的选择外,类似的问题是确定滑裂面的形状。前面几种极限平衡法模型,大多是在均质土中土钉墙的试验得到的,滑裂面一般假定为类似圆弧形形状。在土层强度变化较大的情况下,特别是基坑底处存在软硬土层分界,破坏面往往是折线的,如图6所示。图中左侧为圆弧滑动,右侧为平滑折线滑裂面,这种情况在多层土中经常遇到。

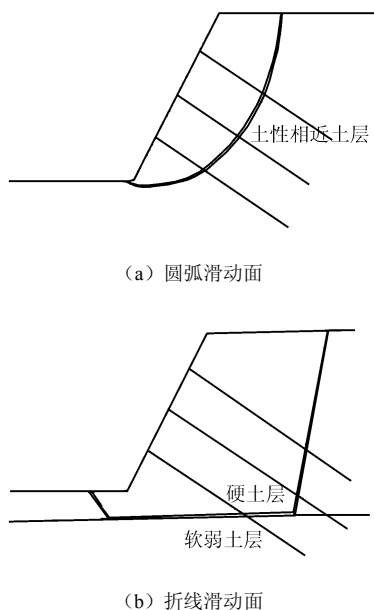


图6 旋转破坏与平滑破坏模式的比较^[8]

Fig.6 The comparison of circular and translational failures^[6]

要得到较高精度的 F_s , 所有假定滑裂面为圆弧或类似圆弧滑动的极限平衡法模型都不能采用, 这就要考虑有相应新的平滑破坏模式的计算方法。用能量法对一平滑破坏基坑实例进行了计算(图7为主动区单元的离散情况), 得到的结论与实际情况是相符合的^[16]。

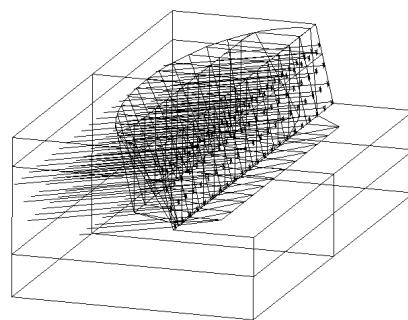


图7 土钉墙主动区域离散

Fig.7 Discretizing the active region within soil nailing wall

4.3 安全系数 F_s 的进一步认识

在非均质土中, 沿着滑裂面土层强度往往有一定差异, 大部分由极限平衡法得出的 F_s 值只是一个平均值, 并不能反映位于不同土层上滑裂段上的真实的安全系数大小。这样, 容易产生一个问题, 即使沿着滑裂面某一段实际 F_s 值非常小, 但由于其余段的值较大, 使得平均值较大, 甚至满足设计要求, 这就留下了安全隐患。因为较软土层, 由于应力集中, 首先进入屈服阶段, 然后随着开挖的进行, 屈服区域向好土层延伸, 就有可能引起较大变形, 甚至破坏。

举一土钉、土层参数与本文第4.1节实例相同的例子来说明。为了描述方便, 用数值方法计算, 土体本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型, 体积模量 $K=600$ MPa, 剪切模量 $G=200$ MPa, 计算得到老黏土中土钉墙安全系数 $F_{s,1}=1.8$ 。

若土钉墙其他参数保持不变, 只将土层变成软弱土层, 参数取值 $c'=5$ kPa, $\phi'=5^\circ$, 计算得到 $F_{s,2}=0.7$ 。

现假设该软弱土层是老黏土中的一个夹层, 位于地表以下2 m深, 厚度为2 m, 计算得到 $F_{s,3}=1.57$ 。由此可知, $F_{s,3}$ 只是 $F_{s,1}$ 、 $F_{s,2}$ 的一个平均值, 真实的安全系数是老黏土中取值 $F_{s,1}=1.8$, 软土中 $F_{s,2}=0.7$ 。由于滑动面位于软弱土层中的范围很小, 使得 $F_{s,3}$ 大小更接近于 $F_{s,1}$ 。

当该软弱土层移至坑底附近时, 计算得到 $F_{s,4}=1.0$, 更接近于软弱土层中的土钉墙安全系数 $F_{s,2}$, 因为滑动面位于软弱土层中的范围较大。土钉墙中形成的剪切带如图8所示。图中剪切带的范围扩大了, 它不只位于软土层中, 软弱土层上面的老黏土中也出现了大范围剪切带, 发生了210 mm最大变形。

当然, 软弱土层位于基坑底部, 还将产生另外一个问题, 即由于软弱土层承载力不足引起大变形,

甚至滑塌。

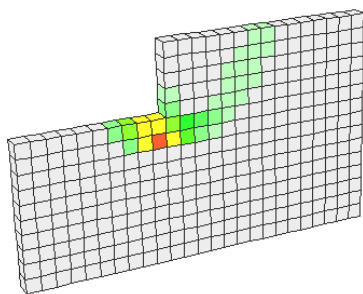


图 8 形成的剪切带

Fig.8 The formed shear band

4.4 土钉轴力的分布

在确定土钉墙挡土方案时,土钉一般尽可能布置在强度较高土层,以获得较高的摩阻力。土钉的长度一般由保持土钉墙稳定所需要的锚固力确定。从上到下,在确定哪一排土钉所受的轴力最大时,似乎有完全不同的看法。在分析了近 100 个土钉墙设计方案后,发现有的认为上排土钉受到的轴力较大,对位移有较好的控制,因此,上排土钉设计较长,下排较短。通过数值分析,对于均质土,中间的土钉受的轴力较大,上下排土钉受的轴力较小。图 9 表示了第 4.1 节中介绍的实例中土钉中轴力情况,最大轴向拉力 53 kN 发生在中间两排土钉上,而不是位于顶层土钉。

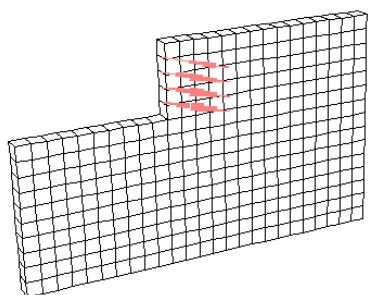


图 9 土钉轴力分布

Fig.9 Axial force distribution along soil nails

4.5 注重变形分析

在实际工程中应对周边环境实施保护的工程,单一的稳定验算越来越不能满足要求。正如前面所述,土钉墙是一种主动支护的柔性结构,它的经济性是以允许变形为代价的,一定量的变形是必需的。但是,如果过大的变形对周边环境带来危害,或影响了自身的稳定性,那么就要采取措施(如采用土

钉墙复合支护),控制过大的位移的发生。目前,进行数值分析预测土钉墙变形各方面的条件已经成熟,但遗憾的是,相关规范^[19]条款没有提及任何这方面的内容。

5 结 语

土钉技术在我国应用已有十几年的历史,在基坑工程、边坡加固等多个领域取得了很好的社会 and 经济效益。但由于应用范围迅速扩大、被加固土体的复杂性增强、土钉墙工作过程中随机性影响因素的增多等原因,使得应用大大超前于研究,挡土机制在很多方面还有待进一步更深入的研究^[20]。在这样一种情况下,本文介绍一些计算方法,特别强调了它们的假设条件和适用性。根据笔者在实践中的体会分析了现状,提出了目前土钉技术分析计算中值得同行重视的一些基本问题,意图抛砖引玉,使同行之间多进行这方面的一些探讨。需要说明的是,由于文章篇幅所限,文中没有涉及到复合、组合土钉墙支护方面的内容。

参 考 文 献

- [1] SCHLOSSER F, UNTERREINER P, PLUMELLE C. French research program CLOUTERRE on soil nailing[C]//Geotechnical Special Publication. No.30 New York: [s. n.], 1992: 739—750.
- [2] STOCKER M F, KORBER G W, GASSLER G, et al. Soil nailing[C]//International Conference on Soil Reinforcement. Paris: [s. n.], 1979: 469—474.
- [3] SHEN C K, HERRMANN L R, ROMSTAD K M, et al. An in site earth reinforcement lateral support system[D]. Davis: Department of Civil Engineering, University of California, 1991.
- [4] BRIDLE R J. Soil Nailing-analysis and design[J]. **Ground Engineering**, 1989, 22(6): 52—56.
- [5] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 长春: 辽宁科学技术出版社, 1993.
- [6] 杨育文, 袁建新. 深基坑开挖中土钉支护极限平衡分析[J]. **工程勘察**, 1998, (6): 9—15.
YANG Yu-wen, YUAN Jian-xin. Limit equilibrium analysis of soil-nailed walls in deep excavation[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 1998, (6): 9—15.
- [7] YUAN JIAN-XIN, YANG YUWEN, THAM L G, et al. A new approach of limit equilibrium and reliability analysis of soil nailed walls[J]. **International Journal of**

- Geomechanics**, ASCE, 2003, 3(4): 145—151.
- [8] 杨育文. 土钉墙空间效应和平滑破坏模式的三维分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 227—230.
YANG Yu-wen. Analysis and discussion on space effect and translational failure of 3D soil nailed walls[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 227—230.
- [9] 杨育文. 喷锚网支护(土钉墙)三维稳定极限分析[J]. 城市勘测, 2004, (5): 44—46.
YANG Yu-wen. Three dimensional limit analysis in soil nailed wall[J]. **Urban Geotechnical Investigation & Surveying**, 2004, (5): 44—46.
- [10] 杨育文. 土钉墙三维稳定极限分析的可靠度计算[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 1029—1031.
YANG Yu-wen. Reliability estimate on safety of soil-nailed wall in three dimensional limit analysis[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(6): 1029—1031.
- [11] 宋二祥, 陈肇元. 土钉支护及其有限元分析[J]. 工程勘察, 1996, (2): 1—5.
SONG Er-xiang, CHEN Zhao-yuan. Soil nailing and FEM analysis[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 1996, (2): 1—5.
- [12] 杨林德, 李象范, 钟正雄. 复合型土钉墙的非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 149—152.
YANG Lin-de, LI Xiang-fan, ZHONG Zheng-xiong. The nonlinear analysis of FEM on composite soil-nailed retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 149—152.
- [13] SMITH I M, SU N. Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1997, 21: 583—597.
- [14] 杨育文, 袁建新. 土钉墙的力学性状及其边界元分析[J]. 城市勘测, 2000, (1): 8—13.
YANG Yu-wen, YUAN Jian-xin. The behaviors of soil nailed walls and boundary element analysis[J]. **Urban Geotechnical Investigation & Surveying**, 2000, (1): 8—13.
- [15] KIM J S, KIM J Y, LEE S R. Analysis of soil nailed earth slope by discrete element method[J]. **Computers and Geotechnics**, 1997, 20(1): 1—14.
- [16] 杨育文, 吴先干, 林科, 等. 土钉墙施工监测与破坏机理探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 459—463.
YANG Yu-wen, WU Xian-gan, LIN Ke, et al. Field observations on soil-nailed wall and its failure behavior investigation[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(3): 459—463.
- [17] 王曙光. 深基坑支护事故处理经验录[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [18] 杨育文, 徐德馨, 唐传政. 武汉地区深基坑工程设计优化技术研究 (武汉市科技局 2006 年重点攻关项目)[R]. 武汉: 武汉市勘测设计研究院, 武汉市设计审查办公室, 2007.
- [19] 中国建筑科学研究院. JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [20] 龚晓南. 土钉和复合土钉支护若干问题[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 80—83.
GONG Xiao-nan. Some problems on soil nailing and composite soil nailing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(10): 80—83.

《建筑科学与工程学报》2010 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学与中国土木工程学会联合主办的学术性期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括建筑结构、地下建筑与基础工程、防灾减灾、桥梁工程、建筑材料、建筑学、市政工程、力学等专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为: 建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大 16 开本, 128 页, 每期定价 10.00 元 (含邮寄费), 全年共 40.00 元, 国内外公开发行, 邮发代号: 52—140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地 址: 西安市南二环路中段长安大学内

邮 编: 710064

电 话: 029—82334397

E-mail: jzxb@chd.edu.cn