

基坑支护土钉力的简化增量算法

杨光华^{1,2}, 黄宏伟²

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 针对目前基坑土钉支护中土钉力的计算提出一个增量算法, 结果表明, 该方法计算的土钉力较符合工程实际。

关 键 词: 基坑支护; 土钉力; 增量计算方法

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Simplified incremental calculation method of soil nail forces for retaining and protection of foundation pits

YANG Guang-hua^{1,2}, HUANG Hong-wei²

(1. Guangdong Provincial Research Institute of Water Conservancy & Hydropower, Guangzhou 510610, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For foundation pits retaining with soil nails, an incremental calculation method of soil nail forces is presented. The results indicate that the soil nail forces calculated by this method can fit the engineering practice better.

Key words: retaining and protection of foundation pits; soil nail force; incremental calculation method

1 前 言

深基坑支护中土钉支护由于其经济性已成为目前较主要的一种支护形式。但土钉支护的理论研究远落后于工程应用, 土钉的长度设计, 土钉力的计算目前还缺乏充分的理论依据, 以致目前土钉长度沿深度的分布形式也是五花八门, 有上短下长、上长下短及等长度分布的形式, 如图 1 所示。

对土钉力的计算, 各种不同的规范采用的方法也有所不同, 故计算得到的土钉力自然也不同。一些基坑规程计算土钉力时仍采用传统的三角形土压力分布模式^[1], 如图 2(a)所示, 土钉规程则采用一种经验土压力^[2], 如图 2(b)所示。两种规程计算的土钉力是不同的。显然, 以上的一些不一致之处, 关键在于对土钉支护的设计理论还缺乏深入地研究, 缺乏一个合理的计算模型。

2 土钉力的增量算法

作用于土钉上的土压力分布, 许多工程实践证明, 图 2(b)的分布形式较图 2(a)的形式合理, 而图

2(b)的形式其实并不是真正的土压力, 真正的土压力应是图 2(a)的分布形式。图 3 为一些实测土钉力的分布^[3, 4], 它并不是像理论土压力那样按三角形分布的。作为土钉力的分布形式图 2(b), 主要是根据一些多支撑基坑支护的 Terzaghi-Peck 来表观土压力类似的经验土压力, 而这种表观土压力实质上是由于施工过程的影响而形成的, 并不是真正作用于支挡结构的土压力, 笔者在文献[5]中用增量法对此给出了理论解释。目前, 在用于计算基坑土钉力的土压力模式中, 按图 2(a)的模式固然是不合理的, 以图 4 为例, 如最后一根土钉(虚线所示)是在基坑挖到底并在变形完成后再加上去的, 不考虑流变情况, 则理论上最后一根土钉是不受力的, 但若按图 2(a)的土压力形式计算, 最底层一根土钉力可能是最大的, 这显然不符合实际, 由此只能会得到土钉力会沿深度分布越来越大的形式, 而土钉的锚固长度也会越往下越长。

对于图 2(b)的经验土压力也有不合理的地方: 一是不能考虑层状土的情况; 二是土钉支护的坡度

是变化的，从垂直到有一定的坡度，显然，坡度越缓，其侧压力应是越小的，显然，图 2(b)的图式不能反映这两种情况。

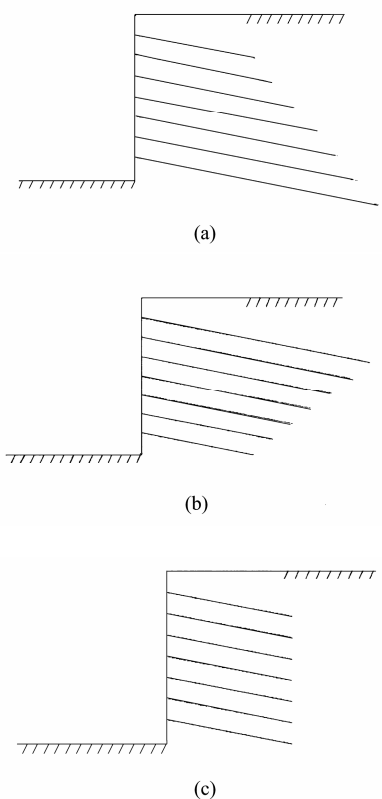


图 1 土钉长度沿深度的分布图
Fig.1 Distributions of soil nail lengths along depths

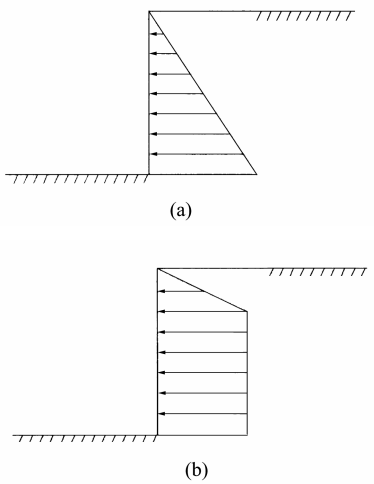
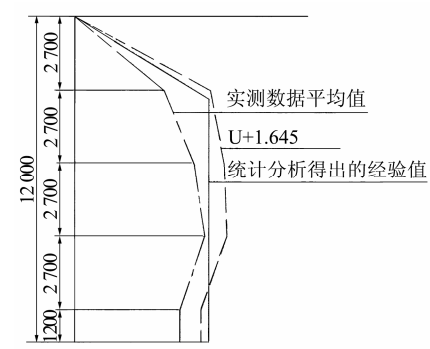
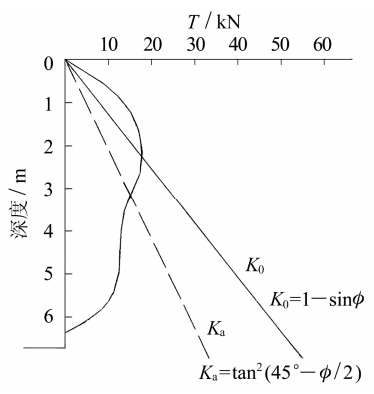


图 2 土压力分布形式
Fig.2 The distributing shapes of earth pressures

其实，由文献[5]的研究成果可知，所谓的经验土压力是由于施工过程与支撑顺序的影响而造成的，土体产生的侧向土压力实际上仍应是传统的三



(a) 金田工地锚杆最大拉力曲线图^[4]



(b) 法国 Clouterre 研究项目 1 号墙试验结果^[4]

图 3 实测土钉力分布图
Fig.3 Distributions of soil nail forces by field test

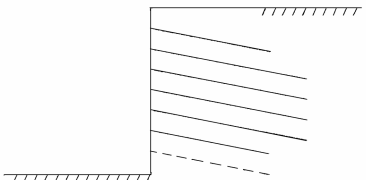


图 4 实例简图
Fig.4 The example sketch

角形分布，要合理地计算支护结构的支撑力或土钉力，可以采用增量法^[6]来计算。对于基坑支护结构的增量算法可以参考文献[6]。而对于土钉力的增量法以图 5 来说明其机理。

图 5(a)开挖第一层土方，此时边坡是会产生土压力的，否则边坡将会失稳，第一层土方开挖后，施工第一层土钉 1。接着，开挖第二层土方，如图 5(b)所示，此时，产生了不平衡的侧向土压力增量 ΔP_1 ，显然，要保持边坡稳定，此不平衡侧压力 ΔP_1 必须由土钉 1 来平衡，因此，第二层土方开挖产生的侧向土压力 ΔP_1 是由土钉 1 承担的。在图 5(b)第二层土方开挖后，进行第二层土钉 2 的施工，接着再往下进行第三层的土方开挖，如图

5(c)所示, 第三层的土方开挖产生了新的侧向不平衡土压力增量 ΔP_2 , ΔP_2 应由土钉 1 和土钉 2 共同分担。第三层土方开挖完后施工土钉 3, 在图 5(c)时土钉 3 是不受力的。然后, 进行第 4 层土方开挖, 此时增加的侧向土压力增量为 ΔP_3 , 显然 ΔP_3 是由已经存在的土钉 1, 2, 3 共同分担的, 第四层土方开挖完后施工第四层土钉 4, 由于土钉 4 是在变形完成后再加上去的, 因此, 理论上土钉 4 此时是不受力的, 只有进一步往下开挖时, 土钉 4 才参与受力, 这也是符合实际的。

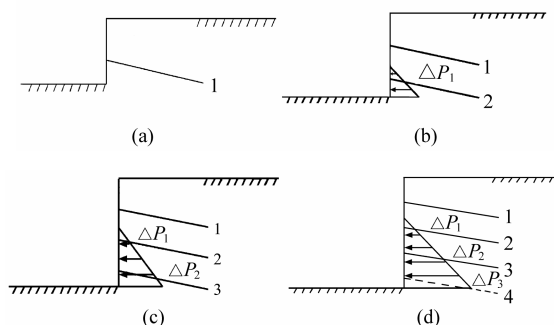


图 5 土钉力增量法计算简图

Fig.5 Sketches for incremental calculation method of soil nail forces

从以上土方开挖和土钉施工顺序及其受力过程可见, 土钉的受力是与施工过程有关的, 最底层的土钉并不是受力最大的, 许多的土钉实测结果也表明这一点^[3, 4], 如图 3 所示。为了研究土钉力的计算方法, 根据以上土钉的受力过程机理分析有以下假设:

(1) 土钉的作用是承担由于开挖而产生的全部侧向不平衡土压力, 以保持边坡的稳定, 因此, 边坡产生的侧向不平衡土压力由土钉承担。

(2) 土钉施工后才产生作用, 亦即土钉分担其施工后新增的不平衡土压力。

(3) 不平衡土压力增量的分配原则: 不平衡土压力是随着开挖而不断变化的, 总的不平衡土压力是由土钉全部承担, 关键在于各土钉该分担多少, 如何分配才更符合实际。理论上应根据施工过程按刚度分配, 为简化, 这里假设一个就近分配的原则: 仍以图 5 为例来说明:

图 5(b): 此时 ΔP_1 由土钉 1 承担, 故土钉 1 此时的土钉水平力 $N_1 = \Delta P_1$ 。

图 5(c): 新增加 ΔP_2 , 分配刚度根据荷载中心位置与土钉位置的距离来确定, 为简化, 假设土钉

垂直间距是等距离的, ΔP_2 中心到土钉 2 的距离为 I_2 , 到土钉 1 的距离为 I_1 , 为方便计算, 设 ΔP_2 的中心在此时的基坑底面处, 下同。则 $I_1/I_2 = 2$, 土钉 2 的刚度是土钉 1 的刚度的 2 倍, 土钉 2 分担 ΔP_2 的 $2/3$, 土钉 1 分担 ΔP_2 的 $1/3$ 。

这样, 由于 ΔP_2 使土钉 1 和土钉 2 分担的土钉力增量为:

$$\Delta N_1 = \frac{1}{3} \Delta P_1, \quad \Delta N_2 = \frac{1}{3} \Delta P_2$$

图 5(d): 新增加 ΔP_3 , 设 $I_3 = 1$, 则 $I_2 = 2$, $I_1 = 3$, 按刚度分配则:

$$\Delta N_3 = \frac{6}{11} \Delta P_3, \quad \Delta N_2 = \frac{3}{11} \Delta P_3, \quad \Delta N_1 = \frac{2}{11} \Delta P_3$$

这样, 各土钉力应为:

$$N_1 = \Delta P_1 + \frac{1}{3} \Delta P_2 + \frac{2}{11} \Delta P_3$$

$$N_2 = \frac{2}{3} \Delta P_2 + \frac{3}{11} \Delta P_3$$

$$N_3 = \frac{6}{11} \Delta P_3$$

3 简单算例

为说明问题, 以一均质土体垂直开挖的土坡支护结构为例进行简单的计算分析。

设土体参数为 $c = 10 \text{ kPa}$, $\phi = 19^\circ$, 设 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, 则临界高度 $Z_0 = 1.4 \text{ m}$, 为方便计算, 设第一次开挖到 $Z_0 = 1.4 \text{ m}$ 处, 然后, 在该处加第一层锚杆, 再往下则每次开挖 1 m , 在开挖底部处施工锚杆, 如图 6 所示, 取单位宽度计算, 相应的侧向土压力按朗肯土压力公式计算, 分布如图 7 所示。

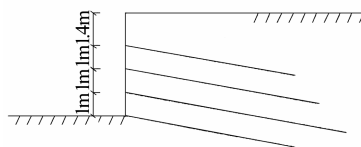


图 6 计算简图

Fig.6 The calculation sketch

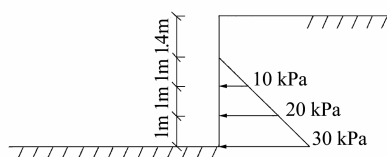


图 7 土压力分布

Fig.7 Earth pressure distribution

假设 ΔP_i 作用的中心位于每次开挖高度的中间处,则按以上的简化增量法,各土钉力可计算为:

$$N_1 = \Delta P_1 + \frac{1}{4} \Delta P_2 + \frac{3}{23} \Delta P_3$$

$$N_2 = \frac{3}{4} \Delta P_2 + \frac{5}{23} \Delta P_3$$

$$N_3 = \frac{15}{23} \Delta P_3$$

将 $\Delta P_1 = 5 \text{ kN}$, $\Delta P_2 = 15 \text{ kN}$, $\Delta P_3 = 25 \text{ kN}$ 代入以上公式可计算得: $N_1 = 12 \text{ kN}$; $N_2 = 16.7 \text{ kN}$; $N_3 = 16.3 \text{ kN}$; $N_4 = 0 \text{ kN}$; $\Sigma N_i = 45 \text{ kN}$; $\Sigma \Delta P_i = 45 \text{ kN}$; $\Sigma N_i = \Delta P_i$ 。

可见两者是平衡的,另外,第4层土钉是挖到底后再加上的,故 $N_4=0$ 是合理的。

如果按通常的把侧向土压力按土钉位置按其上下1/2面积分配,则得到的土钉力为:

$$N_1 = 1.25 \text{ kN}; N_2 = 10 \text{ kN};$$

$$N_3 = 20 \text{ kN}; N_4 = 13.75 \text{ kN}。$$

显然, $N_4 \neq 0$, 是不合理的,这种计算方法是相当于认为土钉是一次施工同时起作用而分担全部侧向压力的,这种方法未考虑施工过程的影响,其结果显然是上层土钉力计算值偏小,下层土钉力计算值偏大,是不符合实际的。而增量计算法则考虑了施工过程的影响,因而,是较符合实际的。图8所示为增量法计算的土钉力与朗肯土压力分布的比较示意图,由图可见,增量法计算的土钉力分布形状是与以上通常实测到的土钉力分布形状图相似的,说明增量法是一种能反映实际情况的较合理的方法。而采用增量法可以一步考虑层状土产生的土压力以及不同坡角对土压力或土钉力的影响,这可以通过层状土及不同坡角时 ΔP_i 的不同而考虑到,这是目前所谓的表观土压力所不能考虑到的,因此,增量法是计算土钉力较合理的方法。

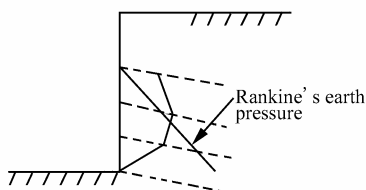


图8 增量法计算土钉力分布与朗肯土压力比较
Fig.8 Comparison between computed earth pressure distribution and Rankine's earth pressure distribution

4 工程实例

为了进一步对计算方法进行验证,将广州金田广场地下室的监测结果与计算结果进行了比较。该工程位于广州市天河区,其地质概况为:从地面向下分为:人工填土层,厚0.8~3.5 m;第四纪冲积洪积层,厚1.4~9.5 m,其中粘性土厚0.6~5.4 m,呈塑~硬可塑状态,砂性土厚0.8~4.1 m,呈松散~稍密状;残积层土,厚5.1~14.4 m,土性均以粉质粘土为主,呈可塑~硬可塑状态,大部分呈硬可塑状态。典型地质断面及设计剖面如图9所示。

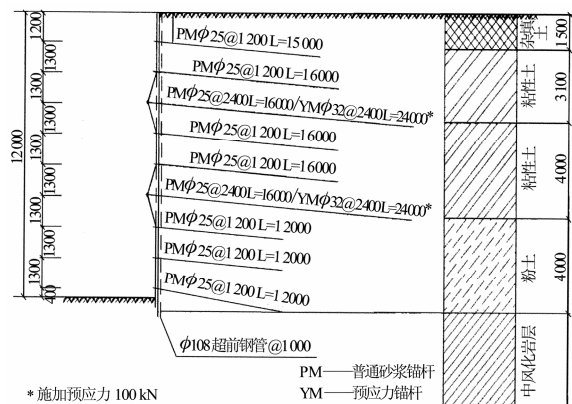


图9 典型地质断面及设计剖面图
Fig.9 The typical geological section and design computed one

监测结果与按增量法和规范法计算的轴力比较如图10所示,由图可知,增量计算方法更能反映实际情况。

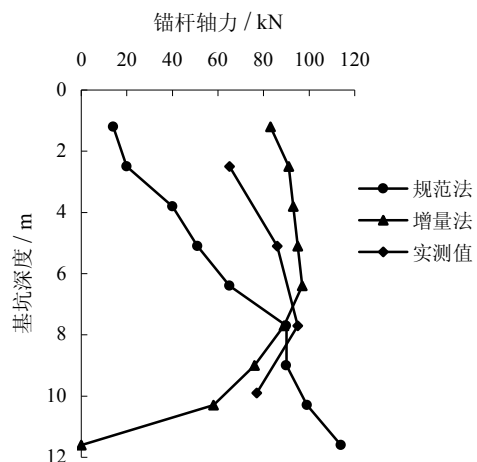


图10 计算轴力与监测轴力比较图
Fig.10 Comparison between calculated axial forces and measured ones

5 结论

土钉支护中土钉力是与施工过程有关的,以往土钉力的计算中对施工过程的影响的考虑是不够的,本文提出的简化增量法计算的土钉力其分布形式与实测形状较符合,且通过土压力的变化可以考虑层状土及坡角等多种因素的影响。由于目前对土钉支护的研究还很不充分,本文方法也是一种近似方法,还不够完善,还有待于今后进一步深入地研究,以形成一套像支护结构那样的系统和实用计算方法^[7],更好地推动土钉支护的工程应用。

参考文献

[1] JGJ120—99, 中华人民共和国行业标准建筑基坑技

术规程[S].

[2] CECS96—97, 中国工程建设标准化协会标准基坑土钉支护技术规程[S].

[3] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M], 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[4] 毕孝全, 赵明伦. 复合土钉墙支护位移控制及预估方法[A]. 岩土锚固技术的新进展[C]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 27—35.

[5] 杨光华. 深基坑多支撑支护结构的土压力问题[J]. 岩土工程学报, 1998(6): 113—115.

[6] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中多撑或多锚式地下连续墙的增量算法[J]. 建筑结构, 1994(8): 28—31.

[7] 杨光华. 深基坑支护结构中几个问题的实用计算方法[A]. 第五届全国地基处理学术会议论文集[C]. 武夷山: 浙江大学出版社, 1997: 537—546.

中国土木工程学会第九届 土力学及岩土工程学术会议在北京隆重召开

中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议于 2003 年 10 月 25 至 28 日在北京隆重召开。这次会议由中国土木工程学会土力学与岩土工程分会主办, 清华大学土木水利学院承办, 中国水利水电科学研究院、中国建筑科学研究院、北京市勘察设计研究院和铁道部科学研究院协办。第九届土力学及岩土工程学术会议是继前八届系列会议之后我国土力学与岩土工程界的又一次学术盛会。来自全国各系统从事岩土工程科研、教学、设计、管理及施工等工作的专家学者和代表共 500 多人出席了大会。出席会议代表的人数是历届会议中最多的。经过 3 天的学术交流, 与会代表彼此增进了了解, 加深了友谊, 达到了互相启发、共同提高的预期效果。

九届会议组织了 21 个大会报告(其中包括 9 个专题综述报告、12 个特邀报告)和 96 个分会报告。大会报告的数量是历届会议中最多的。李广信、滕延京、郑刚、侯学渊、栾茂田、刘汉龙、陈云敏、汪稔和沈小克等九位专家应邀就上述的 9 个专题作了高水平的综述报告。12 个特邀报告中, 沈珠江院士讲述了“科学抽象在岩土力学研究中的意义”, 包承纲、陈祖煜、叶阳升、陈湘生、马魏和张丙印等专家分别介绍了我国南水北调、西电东送、青藏铁路、地铁工程、高原冻土和高土石坝工程的岩土问题。会议还邀请了国际土力学与岩土工程学会副主席、日本东京大学的龙冈文夫教授、日本九州大学的落合英俊教授、新加坡南洋理工大学楚剑教授、美国 Case Western Reserve 大学曾向武教授 4 人做了特邀学术报告。香港工程师学会岩土分部主席麦立明先生和香港科技大学吴宏伟教授分别作了题为“香港所面临的岩土工程挑战”和“非饱和土坡的本构模拟”的特邀报告。九届会议的大会报告, 场面隆重, 高潮迭起, 内容丰富, 耐人寻味, 不仅数量多, 而且质量高; 各分会组织有序, 自始至终代表们发言踊跃, 讨论热烈, 为历届会议所少见, 得到了与会代表的好评。本次会议给从事土力学与岩土工程的科技工作者提供了一个交流新思想、新理论、新技术和新经验的好机会, 讨论学科发展的新理论、新进展、新方向和新领域的好舞台。