

陈俊成, 宿文姬. 不同土压力模式下土钉受力特征探讨[J]. 华南地震, 2019, 39 (3): 121-127. [CHEN Juncheng, SU Wenji. Discussion on the Characteristics of Soil Nails under Different Earth Pressure Modes[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 121-127]

不同土压力模式下土钉受力特征探讨

陈俊成^{1,2}, 宿文姬^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院土木工程系, 广州 510640, 2. 华南理工大学 华南岩土工程研究院, 广州 510640)

摘要: 土钉支护体系作为一种经济、有效的支护方式而得到广泛的应用。但关于土钉力计算的理论依然相对缺乏, 远远落后于工程实践, 严重制约了土钉技术的发展。基于杨光华提出的土钉力简化计算方法^[1], 以4种不同的土压力模式为背景进行简化, 并对比分析不同土压力模式下的土钉力分布, 结果表明: 采用根据侧壁主动土压力与总土钉力相等并考虑施工过程的影响和增量法的土钉力简化计算方法简便, 且采用三角形土压力分布模式与梯形土压力分布模式(二)较采用其他两种土压力分布模式简化计算得到的结果与监测结果更接近。

关键词: 土钉支护; 土钉力; 简化计算方法; 增量法

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0121-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.018

Discussion on the Characteristics of Soil Nails under Different Earth Pressure Modes

CHEN Juncheng^{1,2}, SU Wenji^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation, South China University of Technology, Department of Civil Engineering, Guangzhou 510640, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China University of Technology, Department of Civil Engineering, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The soil nail support system has been widely used as an economical and effective support method. However, the theory of soil nailing calculation is still relatively lacking, far behind engineering practice, which seriously restricts the development of soil nailing technology. Based on the simplified method of soil nailing calculation proposed by Yang Guanghua^[1], this paper simplifies the background of four different soil pressure models and compares the soil nail force distribution under different soil pressure modes. The results show that the

收稿日期: 2019-03-19

项目资助: 广东省国土资源厅科技项目(编号 GDGTKJ2018004)

作者简介: 陈俊成(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事基坑设计和边坡稳定性研究。

E-mail: juncheng0328@163.com.

通讯作者: 宿文姬(1969-), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程研究。

E-mail: wjsu@scut.edu.cn.

active earth pressure and total force according to the side wall are adopted. The soil nailing force is equal and considering the influence of the construction process and the simplified calculation method of the soil nailing force is simple, and the triangular soil pressure distribution mode and the trapezoidal (2) earth pressure distribution mode are simplified by using the other two soil pressure distribution modes. The results obtained are closer to the monitoring results.

Keywords: Soil nailing support; Soil nail force; Simplified calculation method; Incremental method

0 引言

土钉支护因其不占独立工期、施工快捷、材料用量和工程用量小、经济效果好等优点已成为了广泛采用的支护形式。但目前关于土钉力计算的理论相对缺乏,远远落后于工程实践,加上理论计算值与实测值差异较大,严重制约了土钉技术的发展。

现有土钉力计算方法主要有极限平衡法、有限元法、工程简化分析法和经验设计法,并且以工程简化分析法和经验设计法居多。杨光华提出采用经典的三角形土压力分布模式^[1,2]来计算土钉力,但与工程实践的结果相差甚远;《基坑土钉支护技术规程》采用的是梯形分布的土压力模式计算土钉力^[3],工程实践证明这种土压力分布用于计算土钉力较合理;此外一些学者如王步云、莫暖娇分别提出了梯形土压力分布^[4]、四边形土压力分布^[5],这些土压力分布用于计算土钉力与工程实践结果较为接近。但真实的土压力是按三角形分布的,其他的土压力分布均为经验土压力,杨光华^[6]为了能让计算结果更加接近工程实践结果,根据侧壁主动土压力与总土钉力相等的原则,考虑施工过程的影响和增量法的思想,提出了基于经验和理论相结合的土钉力计算简化公式,其得出的计算结果较符合实际。

本文在前人研究的基础上,采用杨光华提出的土钉力计算简化方法,对4种不同的土压力分布模式进行简化,并对比分析不同土压力分布模式下的土钉力。其结果对于掌握增量法的思想及了解优缺点并完善增量法具有重要的意义,同时可供实际工程的设计及施工参考。

1 土压力的几种分布模式

以下列举了4种常见的土压力分布模式。如无特别说明,公式中各个字母代表的含义如下:
 p : 土压力; c : 土的粘聚力; γ : 土体重度; k_a :

主动土压力系数; k_0 : 静止土压力系数; H : 开挖深度; h : 计算位置深度。

1.1 三角形土压力分布模式

《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)采用经典的三角形土压力分布模式来计算土钉力^[2],如图1所示。

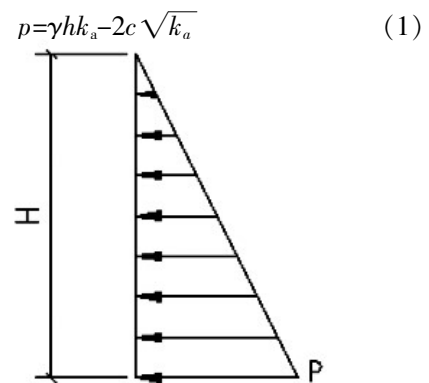


图1 三角形土压力分布模式

Fig.1 Triangle earth pressure distribution pattern

1.2 梯形土压力分布模式(一)

《基坑土钉支护技术规程》(CECS96: 97)采用梯形土压力分布模式计算土钉力^[2],如图2(a)、(b)所示。

P_1 为基坑坑底土压力强度; P_2 为基坑深度0.25~0.75 倍范围内土压力强度。

式(2)适用于 $\frac{c}{\gamma H} \leq 0.05$ 的砂土和黏土。

$$P_1 = 0.55 k_a \gamma H \quad (2)$$

式(3)适用于 $\frac{c}{\gamma H} > 0.05$ 的一般黏性土。

$$0.2 \gamma H \leq P_1 = k_a \gamma H - 2c \sqrt{k_a} \leq 0.55 k_a \gamma H \quad (3)$$

式(4)适用于 $\frac{\gamma H}{c} > 4$ 的软黏土,采用图2(a)所示的梯形土压力分布模式。

$$P_1 = \gamma H \left\{ 1 - \frac{4c}{\gamma H} \right\} = \gamma H - 4c \quad (4)$$

式(5)适用于 $\frac{\gamma H}{c} \leq 4$ 的硬黏土, 采用图 2(b) 所示的梯形土压力分布模式。

$$P_2 = 0.2\gamma H \sim 0.4\gamma H \quad (5)$$

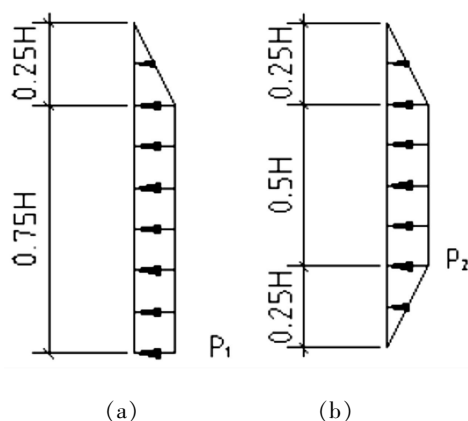


图2 梯形土压力分布模式(一)

Fig.2 Trapezoidal soil pressure distribution mode(1)

1.3 梯形土压力分布模式(二)

王步云对山西 TL-2 黄土边坡土钉墙工程的现场观测结果进行分析^[4], 建议将作用于土钉面层上的土压力简化为图 3 所示的梯形土压力分布模式。

$$p = m_a k \gamma h \quad (6)$$

式中: 当 $h \leq 0.5$ 倍的基坑深度时, h 取实际值;

当 $h > 0.5$ 倍的基坑深度时, h 取 0.5 倍的基坑深度;

m_a : 工作条件系数, 对临时性土钉支挡, 即使用期不超过 2a 的工程 $m_a = 1.10$; 对永久性土钉工程, 即使用期 2a 以上, $m_a = 1.20$;

k : 土压力系数 $k = 1/2 (k_a + k_0)$;

P_3 : 基坑坑底土压力强度。

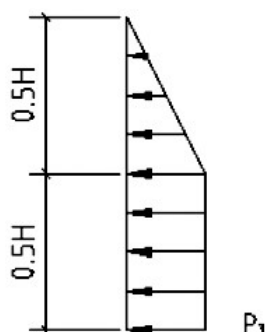


图3 梯形土压力分布模式(二)

Fig.3 Trapezoidal soil pressure distribution mode(2)

1.4 四边形土压力分布模式

莫暖娇根据实测测试土压力结果提出了一种土压力简化模式^[9]。这种模式为四边形土压力分布

模式, 如图 4 所示。

P_4 为 0.5 倍基坑深度处土压力强度, 其取值同土钉墙主动土压力强度; P_5 为基坑坑底的土压力强度, 其取值为 1/4 的土钉墙基底主动土压力强度。

当 $h \leq 0.5$ 倍的基坑深度时

$$\text{黏性土: } p = \gamma h k_a - 2c \sqrt{k_a} \quad (7)$$

$$\text{无黏性土: } p = \gamma h k_a \quad (8)$$

当 $h > 0.5$ 倍的基坑深度时

黏性土:

$$p = 3\gamma H k_a / 4 - (\gamma k_a / 2 - 3c \sqrt{k_a} / H) h - 3.5c \sqrt{k_a} \quad (9)$$

无粘性土:

$$p = 3\gamma H k_a / 4 - \gamma h k_a / 2 \quad (10)$$

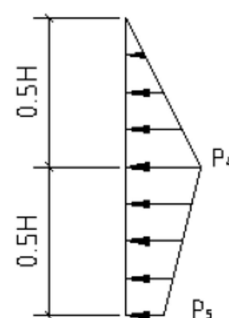


图4 四边形土压力分布模式

Fig.4 Quadrilateral earth pressure distribution pattern

2 土压力简化

目前实测土钉力的分布形状呈现上下小、中间大的特点。杨光华认为作用在土钉上的土压力实际上是朗肯土压力, 土钉的施工过程影响着土钉力的分布形式^[6]。土钉力的合理计算要采用增量法并考虑土钉的施工过程, 但增量法实施较繁琐, 为此杨光华提出了假设朗肯土压力合力等于所有土钉受力的总和, 并采用经验土压力分布模式来计算各深度处土钉力的简化方法, 用该种简化方法不仅方便使用, 并且计算结果也较符合实际, 值得推广。以下对三种经验土压力应用用这种简化方法得出相应的计算公式。

坑底处主动土压力强度为 P_a ($P_a = \gamma H k_a - 2c \sqrt{k_a}$), 并认为土压力在全部坑深范围内分布(实际土压力包含了粘聚力 c , 分布不到坑顶)。

2.1 简化一

经验土压力分布模式取梯形土压力分布模式(一)。此次的简化杨光华^[6]已完成, 如下:

对于软黏土,有

$$\frac{1}{2}P_1 \cdot \frac{1}{4}H + P_1 \cdot \frac{3}{4}H = \frac{1}{2}P_a H \quad (11)$$

$$\text{解得: } P_1 = 4P_a/7 = 0.57P_a \quad (12)$$

对于硬黏土,有

$$\frac{1}{2}P_2 \cdot \frac{1}{4}H \cdot 2 + P_2 \cdot \frac{1}{2}H = \frac{1}{2}P_a H \quad (13)$$

$$\text{解得: } P_2 = 2P_a/3 = 0.67P_a \quad (14)$$

2.2 简化二

经验土压力分布模式取梯形土压力分布模式(二)。简化过程如下:

$$\frac{1}{2}P_3 \cdot \frac{1}{2}H + P_3 \cdot \frac{1}{2}H = \frac{1}{2}P_a H \quad (15)$$

$$\text{解得: } P_3 = 2P_a/3 = 0.67P_a \quad (16)$$

2.3 简化三

经验土压力分布模式取四边形土压力分布模式。简化过程如下:

$$\frac{1}{2}P_4 \cdot \frac{1}{2}H + \frac{1}{2}(P_4 + P_5) \cdot \frac{1}{2}H = \frac{1}{2}P_a H \quad (17)$$

已知条件: $P_5 = P_a/4$

$$\text{解得: } P_4 = 7P_a/8 = 0.875P_a \quad (18)$$

当土层为分层土时,应分层计算总的主动土压力($P_a H/2$),如此,经过简化后的土压力分布较经验土压力分布较合理且有较好的理论依据。

同时为了能让简化公式应用于非垂直的土钉坡面,可引入《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)的系数 ζ ,其土钉力的计算公式为

$$T_{jk} = \zeta P_{mj} S_{ij} S_{sj} / \cos \alpha_j \quad (19)$$

式中: P_{mj} : 第 j 个土钉所在处的简化土压力强度值。

各种土钉力计算比较如图 5 所示。

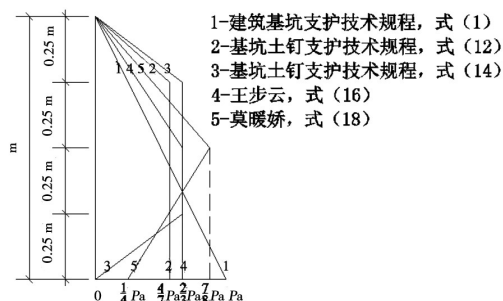


图 5 5 种方法土钉力计算比较

Fig.5 Comparison of five methods of soil nail force calculation

3 土钉力分配的增量法

杨光华提出的基于增量法的土钉力简化方法

考虑了土钉的施工过程,其中包含了两个重要的思想为:(一)已施工土钉分担新增的不平衡土压力;(二)采用就近分配的原则分配各土钉承担的不平衡土压力增量^[6]。

杨光华提出的土钉力简化增量计算法是基于假设不平衡土压力增量 ΔE_i 作用的中心位于第 $i+1$ 根土钉的实际位置处且土钉的施工间距相等^[6]。但实际工程中施工第 i 根土钉前会超挖 0.5 m 以便于施工土钉,因此本人认为简化计算,土钉力的分配应该根据各层土钉距离当前基坑坑底的距离就近分配,亦即不平衡土压力增量 ΔE_i 作用的中心位于第 $i+1$ 步开挖的基坑坑底处。对于土钉力的简化增量计算法用图 6 来说明其机理。

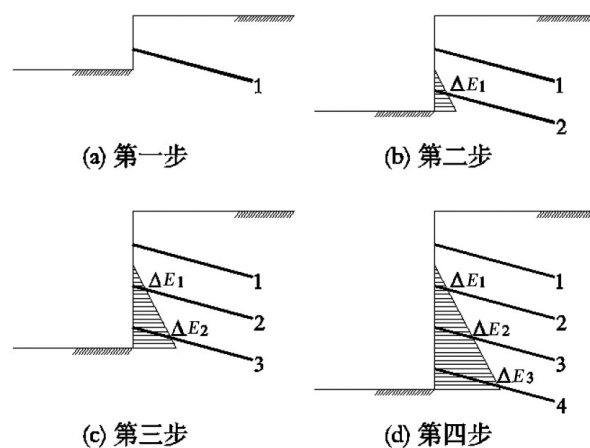


图 6 土钉力增量法计算步骤图

Fig.6 Calculation steps of soil nail force increment method

土钉力增量的计算方法用以下步骤和三角形土压力分布模式来说明其机理。

(1)第一步先开挖基坑后施作土钉 1,土钉 1 不受力。

(2)第二步先开挖基坑后施作土钉 2,土钉 2 不受力,新增的不平衡土压力 ΔE_1 由土钉 1 承担。

(3)第三步先开挖基坑后施作土钉 3,土钉 3 不受力,新增的不平衡土压力 ΔE_2 由土钉 1 和 2 一起承担;依此规律直到开挖到基坑底。

分配不平衡土压力增量到各土钉上可根据不平衡土压力增量的中心位置与各土钉之间的距离就近分配^[7]。本文假设 ΔE_i 作用的中心位于第 $i+1$ 步开挖的基坑坑底处且土钉的施工间距相等。借助图 6 详细介绍不平衡土压力增量的就近分配过程。

(1)图 6b 中不平衡力增量 ΔE_1 全部由土钉 1

承担,故土钉 1 此时的土钉力为 $N_1=\Delta E_1$;

(2)图 6c 新增加的不平衡土压力 ΔE_2 由土钉 1、2 承担,而基坑底到土钉 2 的距离为 l_2 ,到土钉 1 的距离为 l_1 。根据 l_1/l_2 的值确定土钉 1、2 的刚度比值,例如若 $l_1/l_2=5:3$,则土钉 1 与土钉 2 的比值为 3:5,故土钉 1 分担 3/8 的 ΔE_2 ,土钉 2 分担 5/8 的 ΔE_2 ;

(3)同理如图 6d,新增加的不平衡土压力 ΔE_3 由土钉 1、2、3 共同承担,基坑底到土钉 2 的距离为 l_3 ,设 $l_3=3$,则 $l_2=5$, $l_1=7$ 。按就近分配原则有: $\Delta N_1=3\Delta E_3/15$, $\Delta N_2=5\Delta E_3/15$, $\Delta N_3=7\Delta E_3/15$ 。

则按照以上的增量法,土钉力可以通过下列各式计算:

$$N_1=\Delta E_1+3\Delta E_2/8+3\Delta E_3/15 \quad (20)$$

$$N_2=5\Delta E_2/8+5\Delta E_3/15 \quad (21)$$

$$N_3=7\Delta E_3/15 \quad (22)$$

以上各式中的系数应根据具体的各土钉到某一施工阶段基坑底的距离比确定。此外对于经验土压力或简化后的经验土压力分布模式,也可采用上述的增量法去求土钉力。

4 工程实例

位于绍兴市镜湖新区的某生活小区基坑,其土层情况和土体力学参数如表 1,坑深 8.00 m。

表 1 各土层主要力学参数

Table 1 Main mechanical parameters of each soil layer

土体类型	平均层厚 m	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)
<1>杂填土	1	(18.0)	(10.0)	(12.0)
<2-1>粘质粉土	1.9	19.7	12.0	16.4
<2-2>粉质粘土	5.6	20.8	14.0	11.6
<3>淤泥质粘土	11.2	17.3	11.0	7.8

注:()内为经验值

对于性质相差不远的分层土体宜作为一层土考虑,则式(1)中的 φ 、 c 及 γ 值可取各层土的参数 φ_i 、 c_i 及 γ_i 按其厚度 h_i 加权平均值求出。本例前三层土层性质相差不远,故将三层土当成一层土考虑,其力学参数采用加权平均值法。

$$\gamma=\frac{(18.0\times 1+19.7\times 1.9+20.8\times 5.6)}{(1+1.9+5.6)}=20.2 \quad (23)$$

$$c=\frac{(10.0\times 1+12.0\times 1.9+14.0\times 5.6)}{(1+1.9+5.6)}=13.1 \quad (24)$$

$$\varphi=\frac{(12.0\times 1+16.4\times 1.9+11.6\times 5.6)}{(1+1.9+5.6)}=12.7 \quad (25)$$

第一次开挖自稳深度:

$$k_a=\tan^2(45^\circ-12.7^\circ/2)=0.64 \quad (26)$$

$$h_0=\frac{2c}{\gamma\sqrt{k_a}}=\frac{2\times 13.1}{20.2\times 0.8}=1.6 \quad (27)$$

在自稳深度处打入第一排土钉,然后往下每次开挖 1.7 m(土钉间距 1.2 m,超挖 0.5 m)便打入一排土钉,直至挖到基坑坑底,如图 7 所示。相应土压力问题按以下四种土压力分布模式计算。

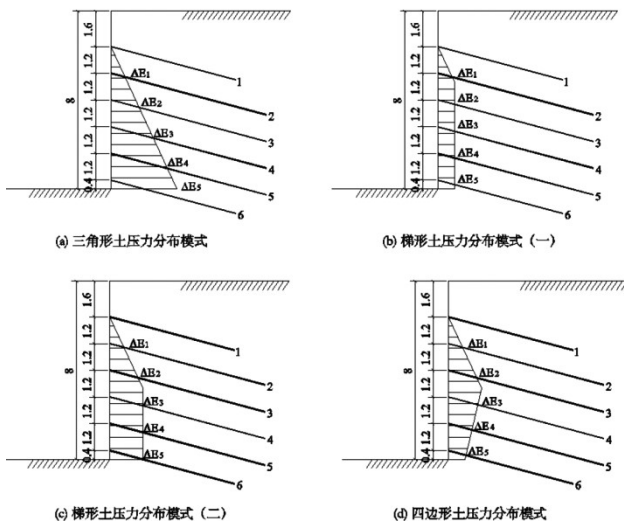


图 7 四种土压力分布模式计算简图

Fig.7 Schematic diagram of four soil pressure distribution patterns

根据上述简化增量法,各土钉力为:

$$N_1=\Delta E_1+17\Delta E_2/46+17\Delta E_3/87+17\Delta E_4/140+16\Delta E_5/200 \quad (28)$$

$$N_2=29\Delta E_2/46+29\Delta E_3/87+29\Delta E_4/140+28\Delta E_5/200 \quad (29)$$

$$N_3=41\Delta E_3/87+41\Delta E_4/140+40\Delta E_5/200 \quad (30)$$

$$N_4=53\Delta E_4/140+52\Delta E_5/200 \quad (31)$$

$$N_5=64\Delta E_5/200 \quad (32)$$

$$N_6=0 \quad (33)$$

各土压力分布模式的不平衡力增量如表 2。各土压力分布模式下采用简化增量法计算得到的各土钉力结果如表 3。计算土钉力与实测值对比见图 8。

表 2 各土压力分布模式下不平衡力增量表

Table 2 Unbalanced force increment table under various earth pressure distribution modes

	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE_4	ΔE_5
三角形	18.45	35.52	54.13	72.75	83.04
梯形(一)	42.41	56.55	56.55	56.55	51.83
梯形(二)	24.83	47.42	65.20	65.97	60.47
四边形	32.58	62.23	79.05	57.60	32.42

表3 土钉力简化计算结果

Table 3 Simplified calculation results of soil nail force

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
三角形	57.63	67.13	63.42	49.13	26.57	0.00
梯形(一)	85.37	73.47	53.58	34.88	16.59	0.00
梯形(二)	67.94	73.76	62.14	40.70	19.35	0.00
四边形	80.61	82.05	60.61	30.23	10.37	0.00

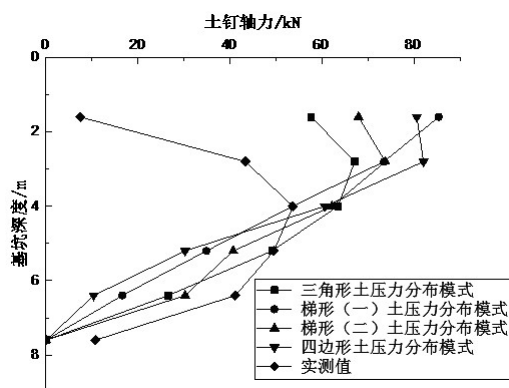


图8 计算土压力与实测值比较图

Fig.8 Comparison of calculated soil pressure and measured values

由图可知,除了梯形(一)土压力分布模式的计算结果呈现上大下小的线性规律外,其他简化增量法计算结果与实测结果的规律是一致的,都是上下小中间大的规律;而就接近程度而言,三角形土压力分布模式最接近,其次是梯形(二)土压力分布模式,四边形土压力分布模式差距较大。故在采用简化增量法计算土钉力时,优先选用三角形土压力分布模式,其次是梯形(二)土压力分布模式,不建议选用梯形(一)土压力分布模式和四边形土压力分布模式。从图中我们还可以看到,以简化增量法计算得到的土钉力呈现上部土钉力偏大,下部土钉力偏小的现象,为此在使用这种方法时我们应该采用修正系数进行修正以使结果更加准确,这还有待进一步去研究。

5 结语

本文基于杨光华^[4]提出的土钉力计算简化方法,以4种不同的土压力模式为背景进行简化,并对比分析不同土压力分布模式下的土钉力及实测值,可得如下结论:

(1)结果表明采用根据侧壁主动土压力与总土钉力相等并考虑施工过程的影响和增量法的土钉

力简化计算方法简便,得到的土钉力分布形状与实测形状较一致。

(2)土钉力的大致规律类似。三角形和梯形(二)土压力分布模式较另两种土压力分布模式更接近实测结果,故在采用简化增量算法时,建议使用这两种土压力分布模式。

(3)用简化增量算法得到的土钉力呈现上部土钉力偏大而下部土钉力偏小的现象,这说明对施工过程考虑是不够的,此外还需考虑诸如层状土、土层厚度及分布情况、坡脚和土钉的几何参数等多种因素的影响。

(4)本文的简化增量计算方法虽然能契合实测土钉力的分布形状,但土钉力计算值与实测值还存在差距,其原因在于不平衡土压力的就近分配比例与实际的分配比例不一,但这误差可以通过多次实验研究发现最佳的分配比例或采用一定的修正系数修正土钉力来减小。

参考文献:

- [1] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M]. 北京:地质出版社,2004.
- [2] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑技术规程 JGJ 120-2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3] 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.
- [4] 王步云. 土钉墙设计[J]. 岩土工程技术,1997,4(1):30-41.
- [5] 莫暖娇. 土钉墙侧向土压力分布研究[J]. 隧道建设,2006,26(3):1-4.
- [6] 杨光华,黄宏伟. 基坑支护土钉力的简化增量算法[J]. 岩土力学,2004,25(1):15-19.
- [7] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [8] 曹杰,肖明贵,徐小虎. 土钉墙支护结构土钉轴力计算方法分析[J]. 土工基础,2013,27(3):80-82.

何沛丰, 宿文姬, 牛富俊. 水平循环荷载作用下海上风电桩累积变形研究综述[J]. 华南地震, 2019, 39 (3): 127–132. [HE Peifeng, SU Wenji, NIU Fujun. Review of the Research on the Cumulative Deformation of the Offshore Wind Power Piles under Lateral Cyclic Loading[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 127–132]

水平循环荷载作用下海上风电桩累积变形研究综述

何沛丰^{1,2}, 宿文姬^{1,2}, 牛富俊^{1,2}

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 华南理工大学 华南岩土工程研究院, 广州 510640)

摘要: 综述了水平循环荷载作用下海上风力发电桩基础累积变形的特征及现状, 总结了国内外针对海上桩基累积变形的三种常用试验方法: 基于 $p-y$ 曲线的修正法、基于试验的经验拟合法与数值分析方法, 并且分析了各类方法的优势与值得商榷的地方, 探索实际环境的众多因素对理论的影响, 指出该领域的发展趋势是模型统一化、不饱和状态、桩-土等多因素耦合作用下的风电桩累积变形研究, 进而利用风电桩的累积变形理论来完善海洋能源工程的设计施工。

关键词: 水平循环荷载; 风电桩; 累积变形

中图分类号: TU473.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0127-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.019

Review of the Research on the Cumulative Deformation of the Offshore Wind Power Piles under Lateral Cyclic Loading

HE Peifeng^{1,2}, SU Wenji^{1,2}, NIU Fujun^{1,2}

(1. South China university of technology, Guangzhou 510640, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper presents a review of the characteristics and status of cumulative deformation of offshore wind power pile foundation under lateral cyclic load, and summarizes three commonly used test methods for cumulative deformation of offshore pile foundation at home and abroad: a correction method based on $p-y$ Curves, based on the empirical fitting method and numerical analysis method. This paper also analyzes the advantages and problems of such methods, explores the influence of many factors of the actual environment on the theory and points out that the trend of development in this field is the unification of models, unsaturated state and pile-soil coupling. Then the cumulative deformation theory of wind power pile is used to perfect the design and construction of ocean energy engineering.

Keywords: Lateral cyclic load; Wind-electric pile; Cumulative deformation

收稿日期: 2019-03-19

作者简介: 何沛丰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋岩土工程研究。

E-mail: he-peifeng@qq.com.