

长春市粘性土建筑基坑悬臂桩 支护设计计算方法探讨

王庆华, 郑毅

(吉林大学 环境与建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:长春市建筑基坑支护一层地下室多采用悬臂桩支护体系,结合长春市粘性土为超固结土的特征,选用静力平衡法、Blum法、极限平衡法、试算法等4种常用的悬臂桩支护设计计算方法进行探讨,并在计算时对相应的计算参数进行适当调整,通过对比分析得出极限平衡法及其相应的参数值适合于长春市粘性土的悬臂桩支护设计计算。

关键词:建筑基坑;悬臂桩;粘性土;计算方法;支护设计

中图分类号: P642.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5589(2001)02-0188-07

基坑是建筑工程的一部分,其发展与建筑业的发展密切相关。90年代以来,随着长春市经济的迅速发展,基坑工程越来越多,基坑开挖规模不断加大,深度也不断增加,各种建筑基坑支护方法随之产生。目前,长春市基坑支护的主要型式有:放坡开挖、土钉墙支护、悬臂桩支护体系以及桩锚支护体系等。对于土质较好、基坑深度不大、拟建建筑物周围有足够放坡场地且无高大建筑物及地下管线时,常采用放坡开挖;若基坑开挖深度小于6m且无放坡条件时,一般采用悬臂桩支护体系;若基础埋深较大时,可采用桩锚支护体系以提高支护结构的刚度和承载力。目前,长春市高层建筑多数设一层地下室,基坑开挖深度相对较浅,选择悬臂桩支护的较多,因此,悬臂桩的设计计算方法尤为重要,而且,设计计算方法选取是否得当将直接影响到支护工程的安全性及经济性。

1 长春市粘性土工程地质特征

1.1 长春市台地区粘性土地质特征

长春市的地层根据岩性特征可划分为:上层为粉质粘土,其粉粒含量高,具有大量空洞,为潜水含水层,潜水位埋深2~3m,有的达5m;下层为粘土层夹薄层粉质粘土层,坚硬、性脆遇水崩解呈碎裂状;局部在台地低洼处有红色砂砾石层和灰白色砂砾石层^[1]。

从工程需要出发按稠度状态和力学属性可进一步由上向下细分为:

层:杂填土,厚1~2m; 层:黄色粉质粘土,分布在地下水位以上,呈可塑或可塑偏硬状态,厚2m左右; 层:黄色粉质粘土,在地下水位变动带和毛细上升高度范围内,呈偏软或软塑状态,厚4~5m; 层:黄色粉质粘土,呈可塑状态,厚1~2m; 层:黄褐色粘土层,呈硬塑状态,厚度2~3m; 层:棕黄色粉质粘土,呈可塑或可塑偏硬状态,厚1m左右; 层:棕红色粘土层,呈坚硬状态,厚2~3m。 ~ 层为粉质粘土,含水,降水可使其强度

收稿日期:2000-11-24

作者简介:王庆华(1972-),女,吉林省白山市人,讲师,主要从事土木工程研究。

提高,但遇水变软; ~ 层为粘土遇水崩解问题; 层是上下两层的过渡层。长春粘性土是一种超固结土,前期固结压力一般 150 ~ 300 kPa,而下部高达 600 kPa 以上。一般上层粉粒含量高, 值较下层大些,而 c 值则下层较上层大些。

1.2 长春市台地区粘性土 C、 值特征

通过对长春市台地区几十个建筑基坑资料的收集、整理和分析,选取其中资料完整的 18 个建筑基坑进行统计,其结果见表 1。

表 1 长春市粘性土地层 C、 、 值统计表
Table 1 Statistics of C、 、 value of clay, Changchun city

| 层序 | 地 层 名 称 | 平均层 顶埋深 / m | 直剪 | | 三轴 | | 重度 / (kN · m ⁻³) |
|----|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| | | | C/ kPa | / (°) | C/ kPa | / (°) | |
| | | | 变异系数 | 变异系数 | 变异系数 | 变异系数 | |
| | 可塑粉质粘土 | 1 | 50.84,0.284 | 15.41,0.186 | 86.03,0.210 | 12.03,0.126 | 19.43 |
| | 可塑软塑粉质粘土 | 3 | 36.2,0.20 | 19.07,0.087 | 55.3,0.215 | 10.13,0.188 | 19.27 |
| | 可塑粉质粘土 | 8 | 46.42,0.245 | 15.69,0.089 | 67.96,0.126 | 13.42,0.125 | 19.6 |
| | 粘土(硬塑) | 12 | 69.9,0.175 | 14.4,0.087 | 85.05,0.1 | 15.7,0.088 | 19.79 |
| | 可塑粉质粘土 | 14 | 49.88,0.121 | 15.93,0.028 | 58.38,0.149 | 13.97,0.068 | 19.77 |
| | 坚硬粘土 | 15.5 | 130.6,0.123 | 15.84,0.066 | 120.2,0.137 | 12.36,0.157 | 19.97 |

目前,长春市的建筑物只设一层地下室的居多,基坑开挖深度一般是 5.5 ~ 6 m,深基坑支护设计计算深度约 12 m。从表 1 可知,基坑支护遇到的土层为 ~ 层, 层以上的 C、 值,对于正常的沉积土,用直接剪切试验中的固结快剪得到的 C 值偏大,用三轴剪切试验测得的 C、 都偏大,特别是 C 值偏大很多。若按照此实验结果计算,土压力为零点的位置距离地面可达几十米,显然,对于一层地下室的基坑开挖都不用支护,而实际上这是不可行的。在实际工程中,除放坡开挖外,一般都需要进行支护。

2 悬臂桩设计计算方法

悬臂桩的主要设计内容包括桩长、桩径及截面配筋等,采用的计算方法有:静力平衡法、BLUM 法、试算法、极限平衡法、有限元法、“m”法、图表法及图解法等。本文主要探讨悬臂桩设计常采用的前四种方法,并分析这几种方法的实践应用价值。

2.1 静力平衡法

桩嵌入基坑底面的部分,当开挖到设计深度时,由于受力而将发生挠曲变形,使土压力分布发生变化,从而在结构上产生如图 1 所示的主动土压力 E_a 及被动土压力 E_p 及 E_p 。静力平衡法的计算原理是假定结构底部不承受弯矩及剪力,由静力平衡条件求出插入深度和内力^[2]。

利用 $b = \frac{k_p \cdot t^2 - k_a (H + t)^2}{(k_p - k_a) \cdot (H + 2t)}$ 及 $k_a (H + t)^3 - k_p t^3 + b^2 (k_p - k_a) (H + 2t) = 0$ 联立^[3]求出桩插入深度;然后求出剪力为零的截面,进而求出最大弯矩。
式中: k_p ——被动土压力系数; k_a ——主动土压力系数。

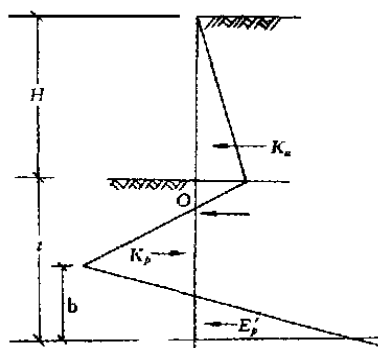


图1 静力平衡法的计算简图

Fig. 1 Numerical diagrammatic sketch of static balance method

H. 基坑开挖深度; t. 插入深度

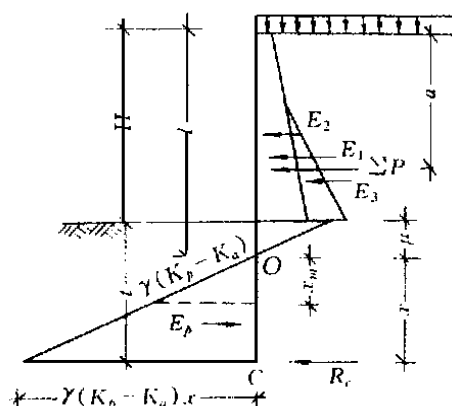


图2 Blum法的计算简图

Fig. 2 Numerical diagrammatic sketch of Blum method

2.2 Blum 法

Blum 法是一种假想支点法,它不考虑板桩本身的刚度,在计算插入深度时偏于安全(图2)^[4]。Blum 理论采用简化方法,将反弯点以下的被动土压力近似地以一个作用于桩脚的集中力 R_c 代替,但必须满足绕桩脚 c 的力及力矩平衡条件 $H=0$, $M_c=0$ 。由于土体阻力是逐渐向桩脚下增加的,在采用 $M_c=0$ 时会有有一个较小的深度差,因此,计算出的插入深度要增加 20%,即 $t=1.2x+u$ 。

利用 $x^3 - \frac{6}{(k_p - k_a)} p x - \frac{6}{(k_p - k_a)} \frac{p(x-a)}{6} = 0$ 及 $u = \frac{e}{(k_p - k_a)}$, $t=1.2x+u$ 求出插入深度 t 。

利用 $M_{\max} = p(l+x_m-a) - \frac{(k_p - k_a)x_m^3}{6}$ 求出 M_{\max} 。

式中: x 为土压力为零点至桩脚的距离(m); a 为合力距地面距离(m); l 为地表面到土压力为零点距离(m); H 为基坑开挖深度(m); u 为土压力为零点距坑底距离(m); x_m 为土压力为零点至最大弯矩点处距离(m); P 为基坑开挖面以上土压力与地面超载等合力(kN); γ 为土的重度(kN/m³)。

2.3 极限平衡法

极限平衡法是我国深基坑支护发展初期被广泛应用的一种方法^[5]。由于它计算方法简单,可以确定应用弹性支点法计算多支点支护结构的嵌固深度,同时,它也可用于悬臂及单支点结构的内力计算,因此,在今后一段时期内极限平衡法还将会得到一定范围内的应用。利用此法计算时,假定在填土侧开挖面以上受主动土压力。在主动土压力影响下,桩趋于旋转,从而在桩的前面发生被动压力及桩后为主动压力,同时,由于粘性土的粘结力作用,在挡墙后可能产生拉应力区,开挖临空面的主动土压力作用零点从地面下移。其受力分布如图3所示。然后根据静力平衡条件求出埋置深度和最大弯矩。

利用 $M_{\max} = \frac{1}{6} H^3 k_a [(n_0 + n_2)^3 - n_2^3 - 3n_2^2(1 - n_0)\sqrt{\quad}]$ 求出最大弯矩值。

利用 $(1 -) n_l^3 + 3[(n_0 - (1 - n_0) \sqrt{] n_l^2 + 3 n_0^2 n_l + n_0^3 = 0$ 求出 n_l , 进而求出桩的预估埋置深度。对安全等级为一、二、三级的基坑, 求出 $n_l H$ 后分别乘以 1.20、1.15、1.10 的放大系数。

式中: 为被动土压力系数与主动土压力系数之比, 即 $= k_p / k_a$ 。

2.4 试算法

悬臂桩在主动土压力作用下将发生挠曲变形^[6], 在桩下部出现反弯点 O , 反弯点以上桩后及反弯点以下桩前将出现主动土压力 E_1 及 E_3 , 反弯点以上桩前及反弯点以下桩后将出现大于静止土压力而小于被动土压力的 E_2 及 E_4 (图 4)。桩在受力过程中, 产生被动土压力所需要的位移量较大, 而设计时一般不允许桩产生太大的变形, 并且需要保证桩有足够的稳定安全系数, 因此, 设计时要满足 $E_2 (1/2 \sim 1/3) E_{p2}$, $E_4 (1/2 \sim 1/3) E_{p4}$ 。试算法时, 先分别假设 $y = (1 \sim 1.3)$

H , $t = (1.1 \sim 1.2) y$ 进行计算, 然后根据力及力矩平衡条件求出 E_2 和 E_4 , 若 E_2 和 E_4 满足要求, 则可求出桩长。然后通过剪力为零的截面, 求出最大弯矩值。

利用 $L = H + t$ 求出桩长。

利用 $M_{\max} = \frac{1}{2} k_a (H + d)^2 \cdot \frac{H+d}{3} - \frac{1}{2} k_p \cdot \frac{E_2}{E_{p2}} \cdot d^2 \cdot \frac{d}{3}$, 求出最大弯矩值。

式中: t 为桩插入深度 (m); d 为最大弯矩截面距基坑底面的距离 (m)。

2.5 应用等值内摩擦角 φ_d 计算主动土压力

目前, 长春市所有的基坑开挖都是在人工降水后进行, 降水使土体强度提高, 若仍使用降水前土的抗剪强度参数进行降水后的开挖支护设计, 其结果具有一定的保守性, 施工中造成一定的浪费, 因此, 将粘聚力 C 折成等值内摩擦角 φ_d 计算。

按朗肯土压力理论计算有粘聚力 C 的主动土压力 e_{a1} , 按库伦土压力分布计算折成等值内摩擦角 φ_d 时的无粘性土主动土压力 e_{a2} , 利用 $e_{a1} = e_{a2}$ 即可求出 φ_d 。 φ_d 的计算公式为

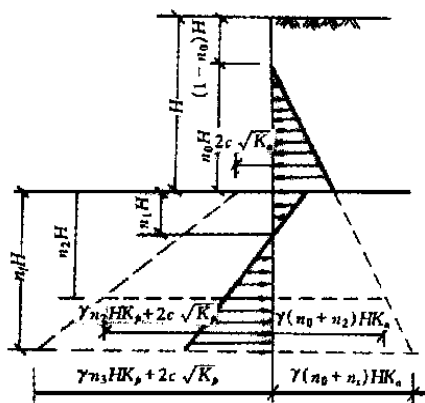


图 3 极限平衡法的计算简图

Fig. 3 Numerical diagrammatic sketch of limit equilibrium method

$n_0 H$. 粘性土主动土压力为零点的距离 (m); $n_1 H$. 土压力为零点的距离 (m); $n_2 H$. 剪力为零点深度 (m); $n_1 H$. 埋置深度 (m)

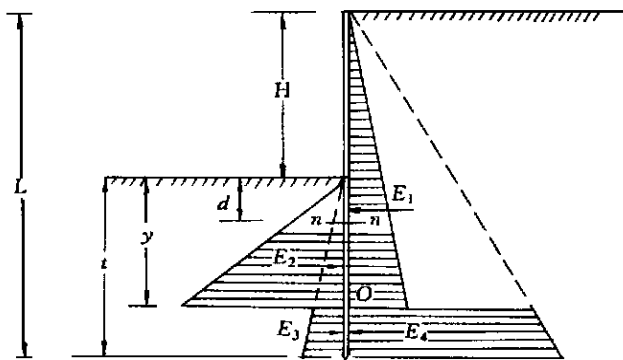


图 4 试算法的计算简图

Fig. 4 Numerical diagrammatic sketch of trial and error method

$$\tan(45^\circ - \frac{D}{2}) = \sqrt{\frac{H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{D}{2}) - 4cH \tan(45^\circ - \frac{D}{2}) + 4c^2}{H^2}}$$

式中：——土内摩擦角(°)；C——粘聚力(kN)。

3 几种主要设计计算方法计算结果的对比分析

计算结果对比分析的依据 从目前长春市建筑基坑支护设计的情况来看,判断某种计算方法的优劣,是以实际工程中基坑稳定为依据,可归纳为以下两条原则:(1)基坑开挖深度一般为 5.5~6.0 m;桩的插入深度一般为 3.5~4.5 m;总桩长 9.0~11.0 m。(2)桩径一般为 550~600 mm;桩距 1.0~1.2 m;最大弯矩 400~600 kN·m。若设计结果超出以上范围,会使工程造价提高造成浪费,若低于各值则将降低工程安全性。

计算结果对比分析 将几种主要设计方法的计算过程用 FORTRAN 语言编制成程序,分别计算,其结果列入表 2。在此需要指出,研究设计计算方法时,由于长春市台地区是超固结土,其计算参数还必须结合工程实践选取。

表 2 主要设计计算方法的计算结果

Table 2 Reckoning of main numerical procedures of design

| 参数 | | | Blum 法 | | 试算法 | | 极限平衡法 | |
|------|----|----|--------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|
| C | | | t | M _{max} | t | M _{max} | n _L H | M _{max} |
| 18.5 | 12 | 10 | 15.16 | 1468.8 | 6.6 | 367.7 | 12.0 | 2110.23 |
| | 13 | 11 | 13.49 | 1228.7 | | | 9.96 | 1568.85 |
| | 14 | 12 | 12.07 | 1032.9 | | | 8.22 | 1177.04 |
| | 15 | 13 | 10.83 | 871.32 | | | 6.79 | 888.09 |
| | 16 | 14 | 9.76 | 736.6 | 9.36 | 472 | 5.57 | 677.71 |
| | 17 | 15 | 8.80 | 623.4 | | | 4.53 | 507.64 |
| | 18 | 16 | 7.95 | 527.5 | | | 3.65 | 382.0 |
| | 19 | 18 | 6.66 | 401.26 | | | 2.60 | 265.93 |
| 19.0 | 12 | 14 | 10.63 | 939.75 | 6.6 | 346.2 | 8.0 | 1503.7 |
| | 13 | 15 | 9.63 | 803.99 | | | 6.75 | 1179.7 |
| | 14 | 16 | 8.74 | 688.73 | | | 5.68 | 925.89 |
| | 15 | 18 | 7.37 | 533.55 | | | 4.37 | 682.69 |
| | 16 | 13 | 10.71 | 868.41 | 9.36 | 533.9 | 6.42 | 816.86 |
| | 17 | 12 | 11.46 | 930.75 | | | 6.57 | 743.0 |
| | 18 | 11 | 12.32 | 1003.1 | | | 6.69 | 677.63 |
| | 19 | 10 | 13.32 | 1088.2 | | | 6.89 | 619.90 |
| 19.5 | 15 | 10 | 15.54 | 1393.4 | 6.6 | 325.2 | 10.2 | 1500.94 |
| | 14 | 11 | 13.42 | 1277.8 | | | 9.72 | 1573.65 |
| | 13 | 12 | 12.46 | 1179.8 | | | 9.34 | 1662.66 |
| | 12 | 13 | 11.61 | 1095.4 | | | 9.01 | 1767.98 |
| | 19 | 14 | 9.33 | 963.78 | 9.36 | 444.7 | 4.53 | 467.99 |
| | 18 | 15 | 8.79 | 654.20 | | | 4.51 | 526.7 |
| | 17 | 16 | 8.29 | 618.97 | | | 4.50 | 592.85 |
| | 18 | 18 | 6.98 | 476.09 | | | 3.32 | 428.11 |

续表 2

| 参数 | | Blum 法 | | 试算法 | | 极限平衡法 | |
|------|------|--------|------------|------|------------|--------|------------|
| D | | t | M_{\max} | t | M_{\max} | n_1H | M_{\max} |
| 18.5 | 26 | 7.62 | 613.31 | 6.6 | 381.93 | 6.88 | 700 |
| | 29 | 6.66 | 500.22 | | | 5.85 | 542 |
| | 32 | 5.82 | 408.85 | | | 5.02 | 426 |
| | 35 | 5.09 | 334.45 | 9.36 | 697.15 | 4.32 | 340 |
| | 37.5 | 4.45 | 273.47 | | | 3.74 | 273 |
| | 40.5 | 3.88 | 223.22 | | | 3.24 | 220 |
| 19.0 | 31 | 6.15 | 455.74 | 6.6 | 285.32 | 5.28 | 474 |
| | 33 | 5.40 | 374.93 | | | 4.77 | 406 |
| | 36 | 4.81 | 315.50 | 9.36 | 601.17 | 4.12 | 513 |
| | 40.3 | 3.92 | 232.74 | | | 3.40 | 243 |
| 19.5 | 29 | 6.52 | 510.91 | 6.6 | 305.7 | 5.85 | 542 |
| | 30 | 6.46 | 503.59 | | | 5.56 | 513 |
| | 31 | 6.35 | 461.72 | | | 5.27 | 486.1 |
| | 35 | 5.56 | 356.87 | 9.36 | 653.85 | 4.32 | 358.0 |
| | 37 | 4.97 | 281.45 | | | 3.92 | 309 |
| | 40.3 | 3.92 | 238.22 | | | 2.68 | 176 |

从表中可以看出:(1)在用参数 C 、 D 值直接进行计算时,基本能满足长春市粘性土悬臂桩支护设计的计算方法是极限平衡法(表 3)。Blum 法计算的插入深度基本都大于 6 m,其相对应的弯矩也比较大。试算法计算的插入深度在 6.6~9.6 m 之间,6.6 m 对应的弯矩值偏小,9.36 m 对应的弯矩值基本满足。总体来说,Blum 法和试算法对长春市的基坑支护设计不太合适;(2)用等值内摩擦角 δ_D 进行计算的结果同样也是极限平衡法适合长春市粘性土悬臂桩的设计。其等值内摩擦角 δ_D 在 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ 时为 $32^\circ \sim 35^\circ$; $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ 时为 $31^\circ \sim 36^\circ$; $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$ 时为 $33^\circ \sim 36^\circ$ 。而试算法和 Blum 法的计算结果不是插入深度不合适就是最大弯矩不合适,因此这两种方法对长春市不适用。

表 3 极限平衡法的计算结果

Table 3 Reckoning of limiting equality

| 参数 | | | | 参数 | | | |
|----------------|----|----|-------------|----------------|----|----|-------------|
| 极限平衡法 | | | | 极限平衡法 | | | |
| C | | | | C | | | |
| t M_{\max} | | | | t M_{\max} | | | |
| 18.5 | 17 | 15 | 4.53 507.64 | 19.5 | 19 | 14 | 4.53 467.99 |
| | 18 | 16 | 3.65 382.0 | | 18 | 15 | 4.51 526.7 |
| 19.0 | 14 | 16 | 5.68 925.89 | | 17 | 16 | 4.50 592.85 |
| | 15 | 18 | 4.37 682.69 | | 18 | 18 | 3.32 428.11 |

对于静力平衡法用等值内摩擦角 δ_D 进行计算时,当 $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ 时, $\delta_D = 20^\circ \sim 42^\circ$,插入深度为 15.175~3.260 m。其中较适合的插入深度为 3.260~4.495 m,对应的 δ_D

为 $42^{\circ} \sim 38^{\circ}$, 显然这种 φ 的取值偏大, 不适合长春市基坑支护实际。

4 结 论

(1) 长春市台地区粘性土为超固结土, 其 C 值较正常固结土偏大, 而 φ 值又相对偏小, 所以进行悬臂桩支护设计计算不管用那种方法, 试验得出的 C 、 φ 值都不能直接用于计算。

(2) 从计算结果可以看出, 参数选择 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$, $C = 17 \sim 18 \text{ kN}$, $\varphi = 15^{\circ} \sim 16^{\circ}$; $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$, $C = 14 \sim 15 \text{ kN}$, $\varphi = 16^{\circ} \sim 18^{\circ}$; $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$, $C = 17 \sim 19$, $\varphi = 14^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 等范围时, 用极限平衡法进行设计计算结果是合适的, 可行的; 若采用等值内摩擦角进行计算, 参数在 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 32^{\circ} \sim 35^{\circ}$; $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 31^{\circ} \sim 36^{\circ}$, $\gamma = 19.50 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 33^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 范围内选择时, 也是极限平衡法计算的结果符合长春市粘性土悬臂桩的支护设计要求。

参考文献:

- [1] 于清杨, 郑毅, 金开鑫. 长春市粘性土 C 、 φ 值对建筑基坑支护设计影响的探讨[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(研究生论文集): 59 - 63.
- [2] 秦四清, 万林海, 汤天鹏, 等. 深基坑工程优化设计[M]. 北京: 地震出版社, 1998. 79 - 100.
- [3] 黄运飞. 深基坑工程实用技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996. 115 - 120.
- [4] 余志成, 施文华. 深基坑支护设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 62 - 68.
- [5] 黄强. 深基坑支护工程设计技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995. 5, 9 - 20, 24 - 30.
- [6] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 沈阳: 辽宁科技技术出版社, 1993. 9, 611 - 614.

Research on the Numerical Procedures of the Cantilever Piles ' Design of Supporting While Used in the Architectural Foundation Dell of Changchun ' s Cohesive Soil

WANG Qing-hua, ZHENG Yi

(College of Environment and Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract : Supporting technique of cantilever piles are wide - ranging supplied to supporting of foundation dell of one - store basement in Changchun City. In view of existing situation, the paper combines with the cohesive soil ' s properties of the city use four main numerical procedures of the cantilever pile ' s of supporting design, namely static balance method, blum method, limiting equality method, trial and error method. By means of comparison and analysis, limiting equality technique and corresponding parametric value are more suitable for use to the special technique of design of cantilever piles in Changchun City.

Key words architectural foundation dell; cantilever piles; cohesive soil; numerical procedures; design of supporting