

深基坑中相邻护坡桩净距的设计研究*

杨雪强 何世秀 刘祖德
(湖北工学院土木系, 武汉, 430068) (武汉水利电力大学, 430072)

1 前言

由于城市用地紧张及其周围环境条件的约束, 深基坑支护问题变得越来越突出。深基坑支护体系主要涉及到三个方面: 其一是保证基坑开挖及基础施工期间的安全; 其二是保证基坑四周已有建筑物的安全; 其三是经济问题。由于深基坑支护体系的复杂性, 支护体系的参数设计明显滞后于工程实践, 因此深基坑支护的许多问题有待于深入研究。本文在坑壁土体的纯剪切破坏和拉裂-剪切复合破坏的两种模式下, 以塑性极限分析理论为基础, 结合建议的安全系数, 对深基坑中相邻护坡桩净距及其支护机理进行了探讨。

应越强, 越有利于坑壁稳定; 反之, 桩间距增大, 桩间土拱效应减弱, 不利于坑壁稳定。因此, 当存在拱效应时, 如何在一定的安全系数下确定合适的护坡桩净距是解决该问题的有效途径。

2.1 坑壁土体的纯剪切破坏型

设 H 为基坑深度, B 为相邻护坡桩净距, 当 H/B 值较小时, 相邻护坡桩间土体的破坏模式如图 1 所示。据摩尔-库伦准则, 土体的屈服函数为 $F = \tau - c - \sigma_n \tan \varphi$ 。假定土体服从相关联的流动法则, 则整个破裂体的滑动速度如图 1(b) 所示, 与破裂面 $E'CDF'$ 的滑动切线 $E'E$

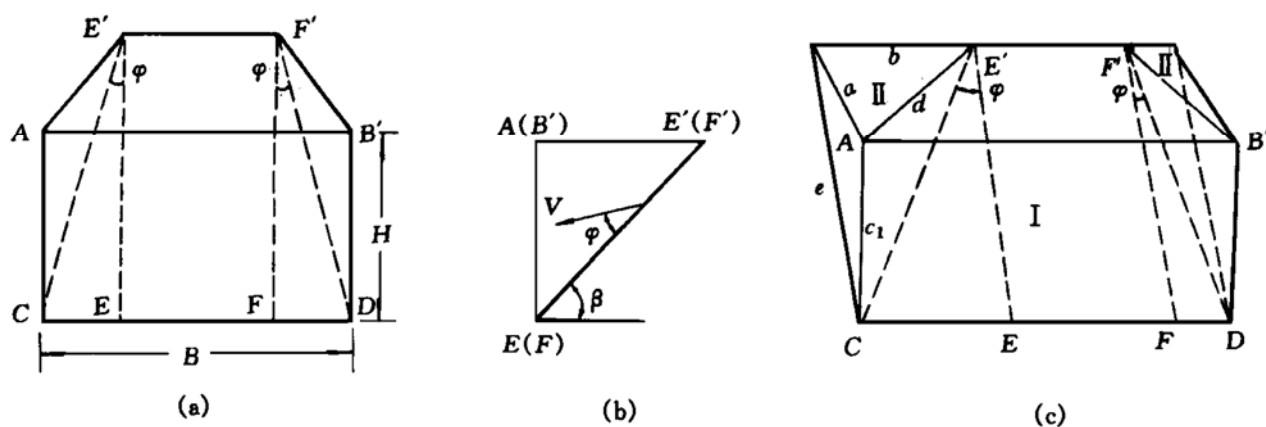


图 1 相邻护坡桩间坑壁土体的纯剪切破坏型

* 到稿日期: 1995-12-29.

(或 $F'F$) 的夹角为 φ 。又端部破裂面 ACE' 和 $B'DF'$ 的滑动切线分别为 $E'C$ 和 $F'D$, 且破裂体在端部的滑动速度也必与 $E'C$ 和 $F'D$ 成 φ 角。据滑动速度连续、相容条件, 则知 $E'C$ 与 $E'E$ 间的夹角为 φ , $F'D$ 与 $F'F$ 间的夹角也为 φ 。下面用塑性极限分析理论^[1]来研究该问题。

如图 1(c) 所示, 破裂体的自重 $W = W_I - 2W_{II}$, 其中 $W_I = \sqrt{3}BH^2\text{ctg}\beta/2$, $W_{II} = \sqrt{3}abc_1/6$, $a = H\text{ctg}\beta$, $b = H\text{tg}\varphi/\sin\beta$, $c_1 = H$, $d = H(\text{ctg}^2\beta + \text{tg}^2\varphi/\sin^2\beta)^{\frac{1}{2}}$, $e = H/\sin\beta$ 。整理得

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{3}BH^2\text{ctg}\beta - \sqrt{3}H^3 \frac{\text{ctg}\beta}{3\sin\beta} \text{tg}\varphi \quad (1)$$

则破裂体自重产生的外力功率为

$$W_{\text{外}} = WV\sin(\beta - \varphi) = \sqrt{3}BH^2f_wV \quad (2)$$

$$f_w = \sin(\beta - \varphi) \left| \frac{1}{2}\text{ctg}\beta - \frac{H}{3B} \frac{\text{ctg}\beta}{\sin\beta} \text{tg}\varphi \right| \quad (3)$$

又因滑动面 $E'CDF'$ 的面积 $S_1 = e(B - b)$, 端部滑动面 ACE' 或 $B'DF'$ 的面积 $S_2 = c_1d/2$, 所以在滑动面 $E'CDF'$, ACE' 和 $B'DF'$ 上消散的内力功率为

$$W_{\text{内}} = c(S_1 + 2S_2)V\cos\varphi = cBhf_cV \quad (4)$$

$$f_c = \cos\varphi \left| \frac{\sin\beta - \frac{H}{B}\text{tg}\varphi}{\sin^2\beta} + \frac{H}{B} \left| \frac{1}{\sin^2\beta\cos^2\varphi} - 1 \right|^{\frac{1}{2}} \right| \quad (5)$$

在上限解下, 如使护坡桩间坑壁土体不滑出, 则必有 $W_{\text{内}}$ 大于 $W_{\text{外}}$ 。这里定义两者的比值为桩间土体的能量安全系数 K , 即

$$K = \frac{W_{\text{内}}}{W_{\text{外}}} = \frac{f_c}{\frac{\sqrt{3}H}{c}f_w} \quad (6)$$

当 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 时, 图 1(c) 中的 $W_{II} = 0$, 则式 (6) 简化为

$$K = 2 \left| \frac{1}{\sin\beta} + \frac{H}{B}\text{ctg}\beta \right| \left| \frac{\sqrt{3}H}{c}\cos\beta \right| \quad (7)$$

式 (6) 或式 (7) 中 β 的取值应大于 $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 。对不同的 β 代入式 (6) 或式 (7) 中试算, 求出的 $K_{\min}$ 为桩间坑壁土体的安全系数, 与 $K_{\min}$ 对应的 β 称为桩间坑壁土体的临界破裂角 β_{cr} 。

当 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 时, Wen L. Wang^[2] 在图 2 所示的破坏模式下导出的安全系数为

$$K = \frac{\frac{(\frac{\theta\pi}{60})}{\sin^2\theta}(\frac{B}{H}) + \frac{(\frac{\theta\pi}{90})}{\sin^3\theta} - \text{ctg}\theta - 2\text{ctg}^3\theta\log\cos\theta}{\frac{\sqrt{3}H}{c} \cdot \frac{B}{H}} \quad (8)$$

式中 θ 为圆弧中心夹角; B 为相邻桩净距。在式 (8) 中代入不同的 θ 进行试算, 求出的 $K_{\min}$ 才是坑壁土体的真正安全系数。计算结果如图 2 所示。

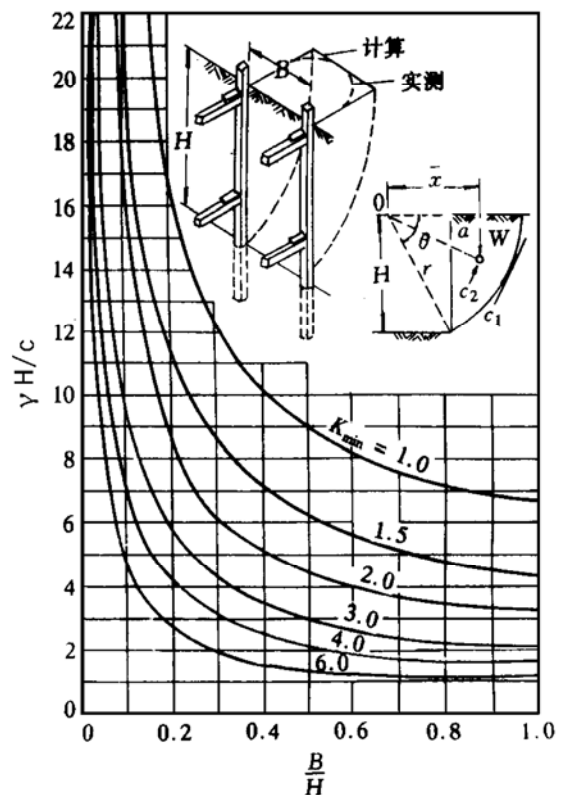


图 2 Wen L. Wang 提出的破坏模式及图表

2.2 坑壁土体的拉裂-剪切复合破坏型

图1所示的破坏模式是坑壁土体沿破裂角 β 发生沿基坑全高的整体剪切破坏。产生该模式的条件是 $(B-2b) \geq 0$, 将 $b = H \tan \varphi / \sin \varphi$ 代入则得出 $(H/B) \leq \sin \beta / (2 \tan \varphi)$; 当 $(B-2b) < 0$ 即 $(H/B) > \sin \beta / (2 \tan \varphi)$ 时, 如坑壁土体再发生沿基坑全高的整体剪切破坏, 就违背了土体相关联的流动法则和运动的相容-连续条件, 是不可能的。为便于计算, 这里定义

$$H_{cr} = \frac{\sin \beta}{2 \tan \varphi} B \quad (9)$$

所以, 当 $(H/B) > \sin \beta / (2 \tan \varphi)$ 时, 相邻护坡桩间土体的破坏模式发生了质的变化, 如图3所示。这时沿基坑全高的破裂体以 H_{cr} 为界, 被分成二部分, 其下部分因符合土体运动的相容-连续条件, 因而该段的破坏机制是剪切破坏; 其上破裂体是竖直的三棱柱段, 是因下部剪切破裂土体的滑移而诱发的上部土体在竖直界面的破坏, 因而上部土体的破坏机制是沿竖直面的受拉破坏, 其运动速度和方向与下部剪切破裂土体的运动速度和方向相同。这种上部拉裂下部剪切的破坏模式被文献^[3]所证实。下面仍用塑性极限分析理论^[1]来求解。

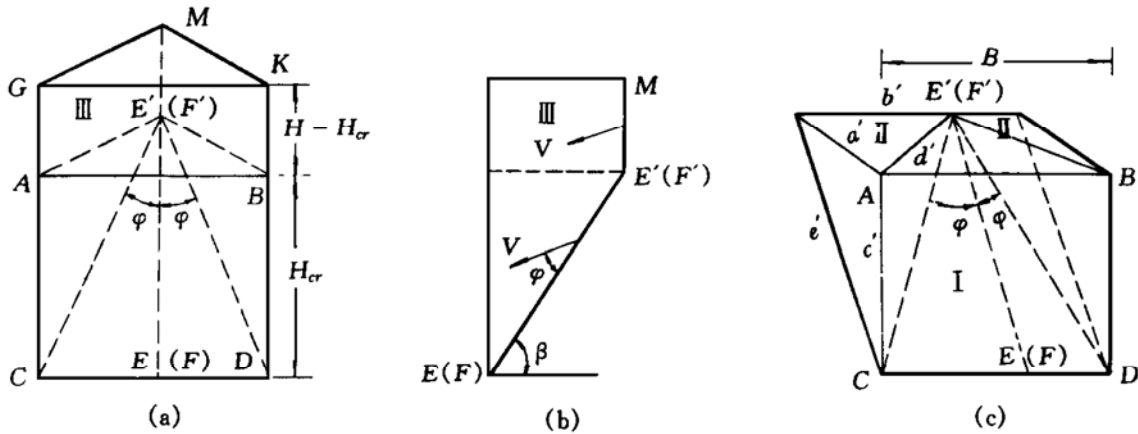


图3 相邻护坡桩间土体的拉裂-剪切复合破坏型

如图3所示, 破裂体的自重 $W' = W'_I - 2W'_{II} + W'_{III}$ 其中 $W'_I = \sqrt{3}BH_{cr}^2 \tan \beta / 2$, $W'_{II} = \sqrt{3}a'b'c'/6$, $W'_{III} = Ba'a'(H-H_{cr})/2$, $a' = H_{cr} \tan \beta$, $b' = H_{cr} \tan \varphi / \sin \beta$, $c' = H_{cr}$, $e' = H_{cr} / \sin \beta$, $d' = H_{cr}(\tan^2 \beta + \tan^2 \varphi / \sin^2 \beta)^{1/2}$ 。整理得

$$W' = \sqrt{3}B^3 \frac{\sin^2 \beta \tan \beta}{12 \tan^2 \varphi} + \sqrt{3}B^2 \frac{\cos \beta}{4 \tan \varphi} \left| H - B \frac{\sin \beta}{2 \tan \varphi} \right| \quad (10)$$

相应破裂体自重产生的外力功率为

$$W'_{外} = W' V \sin(\beta - \varphi) = \sqrt{3}BH^2 f'_w V \quad (11)$$

$$f'_w = \sin(\beta - \varphi) \left| \frac{B^2 \sin^2 \beta \tan \beta}{H^2 12 \tan^2 \varphi} + \frac{\cos \beta}{4 \tan \varphi} \left| \frac{B}{H} - \frac{B^2 \sin \beta}{H^2 2 \tan \varphi} \right| \right| \quad (12)$$

剪切面 $E'CDF'$ 的面积 $S'_1 = \frac{1}{2}Be'$, 端部剪切面 ACE' 或 BDF' 的面积 $S'_2 = c'd'/2$, 相应的竖直拉裂面 $GAE'M$ 或 $KBF'M$ 的面积 $S'_3 = d'(H-H_{cr})$ 。如图3(b)所示, 假设拉裂面处的拉应力是水平的, 据文献^[4], 土体的拉应力可保守地由 $\sigma_t = c/2$ 估算。考虑拉裂和剪切消散功率, 则破裂体总的内力消散功率可表示为

$$W'_{内} = c(S'_1 + 2S'_2) V \cos \varphi + 2S'_3 \sigma_t V \cos(\beta - \varphi) = cBHf'_c V \quad (13)$$

$$f'_c = \frac{B}{H} \left| \frac{1}{4 \tan \varphi} + \frac{\sin^2 \beta}{4 \tan^2 \varphi} \frac{1}{\sin^2 \beta \cos^2 \varphi} - 1 \right|^{1/2} \cos \varphi + \frac{\sin \beta}{2 \tan \varphi} \left| \tan^2 \beta + \frac{\tan^2 \varphi}{\sin^2 \beta} \right|^{1/2} \left| 1 - \frac{B}{H} \frac{\sin \beta}{2 \tan \varphi} \right| \cos(\beta - \varphi) \quad (14)$$

同理, 在拉裂-剪切复合破坏下, 相邻护坡桩间坑壁土体的能量安全系数 K 为

$$K = \frac{W_{\text{内}}}{W_{\text{外}}} = \frac{f'_c}{\frac{\gamma H}{c} f'_w} \quad (15)$$

式(15)中的 β 取值应大于 $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 。通过试算, 求出的 $K_{\min}$ 为土体的真正安全系数, 与 $K_{\min}$ 对应的 β 称为坑壁土体的临界破裂角 β_{cr} 。

3 能量安全系数 K 值的正确评估

前面 2.1 节和 2.2 节求出了能量安全系数 K 的表达式, 关键问题是 K 的合理取值。图 4 所示的竖直粘土坡, W. F. Chen^[1] 指出其坡高的下限解 $H_{cr} = 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2) / \gamma$ 。当 $H = H_{cr}$ 时, 仅在 B 点出现塑性, 该情况相当于浅基础工程中的临塑荷载 P_{cr} , 因而是稳定的。因 P_{cr} 可保守地被用于浅基础设计, 所以坡高 H_{cr} 也可直接用于设计。

对图 4 所示的二维平面问题, 现用前述能量安全系数的定义方法求该稳定状态下的 $K_{\min}$ 。对任一破裂角 β , 有

$$W_{\text{外}} = \frac{1}{2} \gamma H_{cr}^2 V \text{ctg} \beta \sin(\beta - \varphi) \quad (16)$$

$$W_{\text{内}} = c H_{cr} V \frac{\cos \varphi}{\sin \beta} \quad (17)$$

$$K = \frac{W_{\text{内}}}{W_{\text{外}}} = \frac{2 \cos \varphi}{\frac{\gamma H_{cr}}{c}} \cdot \frac{1}{\cos \beta \sin(\beta - \varphi)} \quad (18)$$

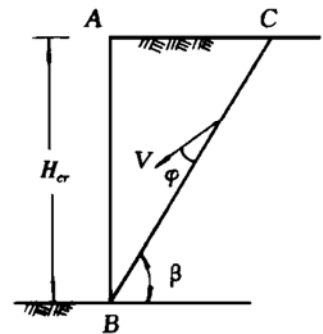


图 4 竖直粘土坡的下限坡高

由 $dK/d\beta = 0$, 求出 $\beta_{cr} = (45^\circ + \varphi/2)$ 。将 β_{cr} 和 $H_{cr} = 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2) / \gamma$ 代入式(18), 有

$$K_{\min} = 2 \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \frac{1}{\text{tg}(45^\circ + \frac{\varphi}{2})} = 2 \quad (19)$$

式(19)是从能量功率角度推出的, 其 $K_{\min} = 2$ 等效于 $H_{cr} = 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2) / \gamma$, 物理意义是竖直粘土坡处于临塑稳定状态。从式(19)推导知, $K_{\min}$ 恒等于 2, 它与竖直边坡的 c , φ 值无关, 这就为下面的研究提供了方便。本文提出的两种破坏模式, 把相邻护坡桩间三维破裂土体的端部约束转化为对内力消散功率的补充, 从能量功率角度, 只要由式(6)或式(15)求出 $K_{\min} \geq 2.0$, 就可以说桩间坑壁土体是稳定的。所以本文推荐 $K_{\min} = 2.0$ 来设计护坡桩间的净距 B 。

4 算例研究

(1) 关于 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 的坑壁土体: 对式(7)令 $dK/d\beta = 0$, 得出

$$\frac{H}{B} \cos^3 \beta_{cr} + 2 \cos^2 \beta_{cr} - 1 = 0 \quad (20)$$

由式(20)算出 β_{cr} 反代入式(7)中可求出 $K_{\min}$ 。

[例 1] 已知 $H = 7.93\text{m}$, $B = 3.97\text{m}$; $c = 21.7\text{kPa}$, $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ 。由式(20)求出 $\beta_{cr} = 55.5^\circ$ 。将 β_{cr} 代入式(7)算出 $K_{\min} = 1.43$ 。而按 Wen L. Wang 式(8)算出的 $K_{\min} = 1.44$ 。

[例2] 已知 $H = 7.93\text{m}$, $B = 1.83\text{m}$; $c = 21.7\text{kPa}$, $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ 。由式(20)求出 $\beta_{cr} = 60.5^\circ$, 将 β_{cr} 代入式(7)算出 $K_{\min} = 2.27$ 。而由 Wen L. Wang 式(8)算出的 $K_{\min} = 2.2$ 。

[例3] 邻近 Nelson 的 Atlantic Richfield Plaza 深基坑^[2], $H = 30\text{m}$, $B = 1.8\text{m}$; $\gamma = 20.8\text{kN/m}^3$ 。文献[2]仅给出土的单轴抗压强度最小值为 240kPa , 本文推算出 $c = 120\text{kPa}$ 。由式(20)算出 $\beta_{cr} = 69.2^\circ$, 将 β_{cr} 代入式(7)中求出 $K_{\min} = 8.02$ 。文献[2]没给出 $K_{\min}$ 的具体值, 按 Wen L. Wang 法仅预估 $K_{\min}$ 超过 6.5。

同理可验算其它方案, 由式(7)求出的 $K_{\min}$ 与按 Wen L. Wang 法算出的 $K_{\min}$ 相当吻合。这说明当 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 时本文提出的相邻护坡桩间坑壁土体的剪切平动破坏模式是合理的。由于简化计算和基坑土体的不确定性, Wen L. Wang^[2] 建议桩间坑壁土体的安全系数不应小于 2.5。

(2) 关于 $c \neq 0$, $\varphi \neq 0$ 的坑壁土体: 验证了当 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 时本文提出的剪切平动破坏模式的合理性, 为讨论 $c \neq 0$, $\varphi \neq 0$ 时, 按剪切平动破坏模式或拉裂-剪切平动复合破坏模式下导出 K 值表达式的合理性提供了理论基础。下面以实例验证。

[例4] 已知 $H = 8.0\text{m}$, $c = 10\text{kPa}$, $\varphi = 15^\circ$, $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ 。按 $K_{\min} = 2.0$, 试设计护坡桩净距 B 。因护坡桩净距 B 较小, 所以一般 $H/B > \sin \beta / (2 \tan \varphi)$, 由 2.2 节得知桩间土破坏模式为拉裂-剪切复合破坏型。对式(15), 取 $K_{\min} = 2.0$ 时试算出 $\beta_{cr} = 72^\circ$, 对应的净距 $B = 0.65\text{m}$ 。

5 结 论

(1) 因深基坑支护中的护坡桩间净距 B 较小, 其 H/B 值较大, 当 $c \neq 0$, $\varphi \neq 0$ 时, 桩间土体的破坏模式一般属拉裂-剪切复合型, 这时应用式(15)计算 β_{cr} 和 $K_{\min}$ 。只有当 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 时, 桩间土体的破坏模式才属纯剪切型, 这时用式(7)计算 β_{cr} 和 $K_{\min}$ 。

(2) 一般 $c \neq 0$, $\varphi \neq 0$ 的拉裂-剪切复合破坏型用于深基坑护坡桩间土体的长期稳定验算; 而 $c \neq 0$, $\varphi = 0$ 的纯剪切型用于深基坑刚开挖结束时桩间土体的稳定验算。

(3) 本文从能量角度求出 $K_{\min} \geq 2.0$, 该结论与 Wen L. Wang 建议的“安全系数不小于 2.5”相吻合。如图 2 所示, 式(8)是由对 0 点的抵抗力矩除以转动动力矩导出的, 实质上它可理解为抵抗力矩的功率与转动动力矩的功率之比, 所以式(8)也是能量功率安全系数的另一表达式。

(4) 当基坑深度 H 一定时, 如 c 越大或 φ 越大或 B 越小, 则计算的 β_{cr} 越大, $K_{\min}$ 也越大, 这说明护坡桩间土体的滑动破坏越趋近于浅层破坏。该结论与工程实践相吻合。

(5) 本文的计算理论也适用于深基坑锚杆(或土钉)支护的横向排距的确定。

参 考 文 献

- 1 Wai Fah Chen. Limit Analysis and Soil Plasticity. New York: Elsevier Scientific Company, 1975.
- 2 Wen L Wang, Khorin Salmassian. Unsheathed Excavation In Cohesive Soils. J Geotechnical Eng Div, ASCE, 1978, **104**(4): 493~ 496.
- 3 顾慰慈. 挡土墙主动土压力作为空间问题的一种计算方法. 土木工程学报, 1985, **18**(2): 66~ 75.
- 4 Gunnar Bagge. Tension Cracks in Saturated Clay Cuttings. Pub Committee of 11 ICSMFE. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanis and Foundation Engineering (II). Rotterdam: A A Balkema, 1985. 393~ 395.