

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3759-06

相邻基坑土条土压力计算方法探讨

金亚兵, 刘吉波

(深圳市地质局, 深圳 518023)

摘 要: 基坑工程实践中, 经常遇到相邻基坑土条土压力如何计算的问题, 现行基坑规范尚没有计算方法。通过理论探索和工程实践, 对前、后期的基坑支护型式进行了归类和组合, 提出了相临基坑宽度的确定原则; 提出了建立在库仑土压力理论基础之上的简化计算方法——叠加法, 推导并给出了非黏性土和黏性土在不同坡率和地面分布有荷载条件下主动土压力系数和土压力的计算公式, 并提出了临界宽度的概念和土条土压力折减系数的计算公式。利用所提出的叠加法、临界宽度的概念和土条土压力折减系数的计算公式, 可以简捷地计算不同土层、不同坡率和地面荷载条件下的土条土压力合力及土压力强度。工程实践表明, 该方法概念清晰、理论依据充分、计算公式简便, 以此设计的基坑支护结构安全合理, 可供类似基坑支护工程设计参考。

关 键 词: 相邻基坑; 土条土压力; 叠加法; 临界宽度; 折减系数

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Discussion on calculation method of earth pressure of earth-strip between neighbouring excavations

JIN Ya-bing, LIU Ji-bo

(Shenzhen Geology Bureau, Shenzhen 518023, China)

Abstract: The Problem of how to calculate the earth pressure for the earth-strip neighbouring excavations is run against frequently in excavation engineering practice; but there is no calculation method in the existing criterion of excavation for the moment. First, the retaining and protection forms between neighbouring excavations are classified and put together, the affirming principle of the width between two excavations is put forward; then, the superposition method on Coulomb's earth pressure theory is presented; and the calculation formulas of the active earth pressure coefficient and earth pressure are derived and presented for clay and non-clay under different gradients and ground load, and the idea of the critical width and the calculation formula of reducing coefficient of the earth pressure of the earth-strip are also presented. The total and distributing earth pressure of earth-strip for different soils, different gradients and ground load can be calculated simply by the superposition method, the idea of the critical width and the calculation formula of reducing coefficient of the earth pressure of the earth-strip. Finally, two engineering examples are given to show that the retaining and protection structures generated by the method and the formulas are safe and rational; the method and the formulas can be for reference by similar excavation engineering.

Key words: neighbouring excavations; earth pressure of earth-strip; superposition method; critical width; reducing coefficient

1 引 言

基坑工程经过 20 多年工程实践和理论研究的相互推动, 其设计计算理论得到了长足的发展, 国家和地方基坑支护技术规程(规范)第二版已进入修编尾声。建立在朗肯、库仑极限平衡土压力理论基础上的经典土压力理论应用于各种复杂工况时, 只要根据边界条件作适当的简化和假定, 就可以解

决很多复杂的工程问题。本文要探讨的就是, 当相邻两基坑之间的距离有限时, 就存在相邻基坑土条土压力的计算问题。一般情况下, 当相邻两基坑同时施工, 间距又比较小时, 可采取挖除土条、降低土条高度等方法处理土条问题。但当相邻基坑不同时施工时, 问题就变得复杂起来, 特别是先期施工的基坑坡体埋有重要管线时, 后期相临基坑计算土条土压力 and 支护结构选型就相当棘手。文献[3]中介

收稿日期: 2009-02-18

第一作者简介: 金亚兵, 男, 1965 年生, 博士, 教授级高级工程师, 总工程师, 主要从事岩土工程设计和研究。E-mail:jinyabing25@sina.com

绍了一些深圳地区的相邻基坑支护型式实例, 笔者也完成了十几项类似工程, 如: 深圳华强花园 D 座基坑深 9 m, 悬臂式挖孔桩支护, 在其北侧 6 m 处为后期施工的 A、B、C 座基坑, 深 9.6 m, 采用直立式土钉墙支护, 坡顶位移为 4 mm; 深圳益田假日广场基坑深 17.8 m, 采用桩锚支护, 在其西侧 12 m 处为后期施工的深圳假日广场基坑深 18.6 m, 采用挖孔桩加扩大头锚杆支护, 坡顶位移为 25 mm; 深圳汝南大厦基坑深 14.1 m, 桩锚支护, 施工完成后放置了 5 年直到其南侧 8 m 处深圳边防住宅楼基坑施工, 该基坑深为 12 m, 采用挖孔桩支护, 因距离过近要切割汝南大厦基坑的锚索, 只好在土条顶面下 2 m 处设水平对拉钢筋形成门架式支护结构, 两基坑坡顶位移均未超过 20 mm; 深圳盐田地税住宅楼基坑深 7.0 m, 近似直立, 土钉墙支护, 在其南侧 5 m 处为地税大厦基坑, 深 9.0 m, 在 7 m 以上采用北侧的土钉形成对拉土钉墙, 在 7 m 以下打入两排土钉, 坡顶位移为 11 mm, 等等。这些工程实例存在共性特点: 相邻基坑深度不相等, 一般后期施工的基坑深度大于 (少数也有小于的) 先期施工的基坑, 土条宽度大多都未超过基坑深度, 土条土层有填土、砂土、淤泥质土、黏性土或其组合成的较复杂的地层结构, 先、后期基坑在土条处的支护型式有相同的, 也有不同的。为便于分析, 笔者把先期施工的基坑支护型式归纳为: 重力式、桩 (墙) 锚 (撑) 式和土钉墙 (含大放坡) 式等 3 种型式, 把后期施工的基坑支护型式归纳为: 桩锚式和土钉墙式等两种型式。因此, 相邻基坑土条先、后期支护型式就有如图 1 所示的 6 种组合型式。这样分的目的是, 当前期支护为重力式挡土墙并在其中或外侧插入了刚性筋或墙体刚度很大时, 相临基坑宽度 B 应减去前期重力式挡土墙宽度 B_0 ; 对前期支护为土钉墙时, 相临基坑宽度 B 应算至邻建的外边墙; 对前期支护为桩锚时, 相临基坑宽度 B 只需算至前期桩的外侧。

显然, 相邻基坑土条土层性质、土条宽度、支护型式及组合型式不同时, 其土压力计算模型和计算公式也不同。下面分类进行土压力计算模型简化和计算方法探讨。

2 土条土压力计算方法

在基坑工程设计中, 对于图 1 中的 (a)、(c) 和 (e) 的后期支护结构, 当不考虑土条效应时, 土压力计算大多采用朗肯土压力理论, 主动土压力呈三角形或梯形分布, 被动土压力呈梯形分布, 主动滑裂面

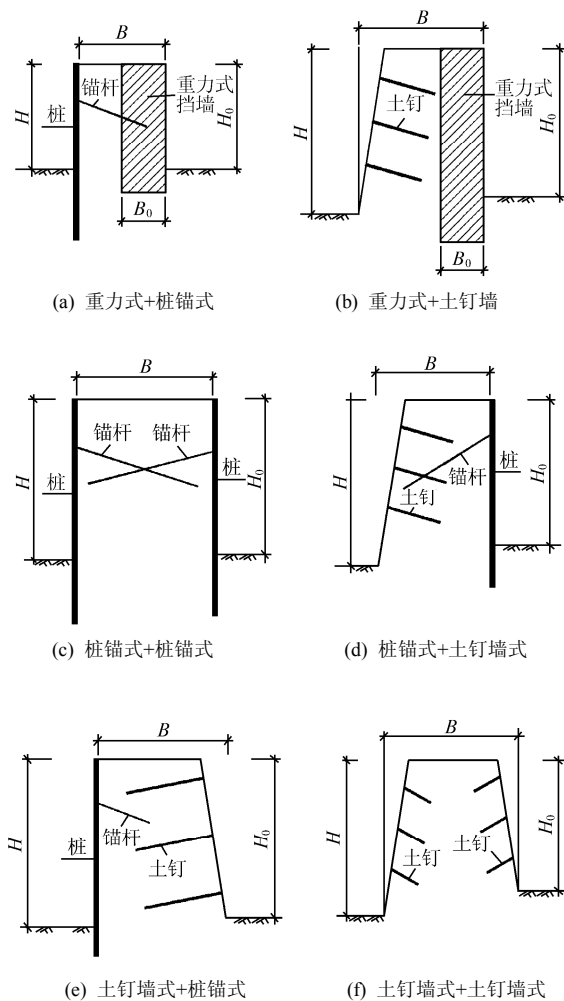


图 1 相邻基坑支护形式组合

Fig.1 The combined pattern of retaining and protection structure of neighbour excavation

与水平面呈 $45^\circ + \phi/2$ 相交, 被动滑裂面与水平面呈 $45^\circ - \phi/2$ 相交。对于图 1 中的 (b)、(d) 和 (f) 的后期支护结构, 主动土压力计算一般按库仑土压力理论, 并假定主动土压力呈三角形分布; 当土钉墙为倾斜时, 主动土压力按直立时的主动土压力乘以一个修正系数 ξ , ξ 的计算公式见文献[4]。当考虑土条效应时, 上述计算土压力的方法均不适用, 应寻求其他方法。文献[3]中提出了一个土条土体极限平衡时的主动土压力计算公式, 计算理论不是严格意义上的库仑土压力理论, 其计算式中土压力沿深度分布是一个常数, 认为土条主动土压力强度与计算点深度呈非线性关系的结论值得商榷。因此, 为了既能解决工程实际问题, 又有理论依据, 笔者提出了下面建立在库仑土压力理论基础之上的叠加法, 与同行们探讨。

2.1 叠加法计算主动土压力合力

2.1.1 基本概念

如图 2 所示, 假定滑动楔体 abc 产生的主动土

压力 E_a 由滑动楔体 $abcd$ 产生的主动土压力 E_{at} 和滑动楔体 dec 产生的主动土压力 E_{ao} 构成, 由于 E_a 、 E_{at} 方向角相同, E_{ao} 与 E_a 、 E_{at} 方向角不同, 因此, 不能简单地取 $E_a = E_{at} + E_{ao}$, 而应取 E_{ao} 、 E_{at} 和 E_a 对坡脚 b 点处的力矩平衡, 即 $E_a h_a = E_{at} h_{at} + E_{ao} h_{ao}$, 式中, $h_a = h_{at}$, 于是, E_{at} 为

$$E_{at} = E_a - k_h E_{ao} \quad (1)$$

$$k_h = (1 + 2A \tan \theta - 3A \tan \phi) \cos \phi \sin \beta / \cos \delta \quad (2)$$

式中: k_h 为 E_{ao} 和 E_a 的力臂比; A 为基坑宽深比等于 B/H , H 为基坑深度, B 为土条宽度; θ 为滑裂角; ϕ 为土的内摩擦角; β 为坡面倾角; δ 为桩(墙)、土间摩擦角。 E_a 、 E_{ao} 均为库仑土压力理论计算出的主动土压力, 并假定两个滑动楔体具有相同的滑裂角 θ 。因滑裂角 θ 只与土体内摩擦角、坡角和桩、土间的摩擦角有关, 对均质土、直立边坡和桩、土间的摩擦角与土体内摩擦角相同的情况, 两个滑动楔体的滑裂角 θ 是一样的; 对非直立基坑边坡和桩、土间的摩擦角小于土体内摩擦角的情况, 滑动楔体 dec 的滑裂角大于滑动楔体 abc 的滑裂角 (大量算例表明, 差值小于 5°), 实际滑动楔体 dec 的土压力小于按相同滑裂角计算的土压力, 因此, 按式 (1) 计算的土条土压力 E_{at} 偏于安全。从另外一个角度理解, 土条土压力就是滑动楔体 abc 的土压力 E_a 减去挖去的滑动楔体 dec 的土压力 E_{ao} 。故此假定不会带来明显误差, 这也是叠加法的基本思路和相邻基坑土条土压力计算的假定条件。

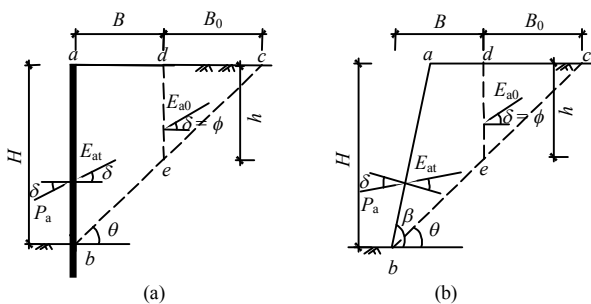


图 2 叠加法计算土条土压力简图

Fig.2 The calculation chart for the earth-platform earth pressure

2.1.2 非黏性土土条主动土压力合力计算

图 2(a) 对于非黏性土, E_a 及 E_{ao} 分别为

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (3)$$

$$E_{ao} = \frac{1}{2} \gamma h_o^2 K_{ao} \quad (4)$$

式中: γ 为土体重度; H 为基坑深度; $h_o = H - B \tan \theta$, K_a 为主动土压力系数, K_a 计算公式为

$$K_a = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \phi}} \right]^2} \quad (5)$$

求 K_{ao} 时把式 (5) 中的 δ 换成 ϕ 即可。滑裂角 θ 的计算公式是根据滑裂体在极限平衡条件下, 对主动土压力求极值后推导的, 计算公式为

$$\tan \theta = \frac{\cos(\phi + \delta)}{\sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cos \delta}{\sin \phi}} - \sin(\phi + \delta)} \quad (6)$$

当土条地面有荷载 q 时, 主动土压力系数 K_a 应乘以一个修正系数 k_q , $k_q = 1 + 2q/\gamma H$, 这时, K_a 为

$$K_a = k_q \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}} \right]^2} \quad (7)$$

图 2(b) 对于非黏性土, E_a 及 E_{ao} 仍按式 (3)、(4) 计算, 但 K_a 及 θ 应按下列式计算:

$$K_a = \frac{\sin(\beta - \phi)}{\sin^2 \beta \sin(\beta + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\sin(\beta + \delta) \sin \beta}} \right]^2} \quad (8)$$

$$\tan \theta = \frac{\sin(\beta + \phi + \delta)}{\cos(\beta + \phi + \delta) + \sqrt{\frac{\sin(\beta + \delta) \sin(\phi + \delta)}{\sin \beta \sin \phi}}} \quad (9)$$

求 K_{ao} 时把式 (8) 中的 δ 换成 ϕ 、取 $\beta = 90^\circ$ 即可。当地面有荷载 q 时, K_a 应乘以修正系数 k_q , θ 不变。因此, 对于非黏性土, 当相邻基坑土条地面分布有地面荷载, 坡面倾斜时, 滑裂角 θ 按式 (9) 计算, 主动土压力系数 K_a 按下面的通式计算:

$$K_a = \frac{k_q \sin^2(\beta - \phi)}{\sin^2 \beta \sin(\beta + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\sin(\beta + \delta) \sin \beta}} \right]^2} \quad (10)$$

2.1.3 黏性土土条主动土压力合力计算

图 2(a) 对于黏性土且分布有地面荷载时, 计算主动土压力系数 K_a 及滑裂角 θ 不能用前面的对主动土压力求极值的方法推导, 而应该用相似几何图解法求解, 因篇幅有限, 这里只给出推导的结果。 K_a 及 θ 的计算式为

$$K_a = \frac{1}{\cos^2(\phi + \delta)} \left[k_q (\cos \delta + \sin(\phi + \delta) \sin \phi) + 2\eta \cos \phi \sin(\phi + \delta) - 2\sqrt{(k_q \sin \phi + \eta \cos \phi)(k_q \cos \delta \sin(\phi + \delta) + \eta \cos \phi)} \right] \quad (11)$$

$$\tan \theta = \frac{\cos(\phi + \delta)}{\xi - \sin(\phi + \delta)} \quad (12)$$

式中: ξ 、 η 为中间系数, 它们的表达式为

$$\xi = \sqrt{\frac{k_q \cos \delta \sin(\phi + \delta) + \eta \cos \phi}{k_q \sin \phi + \eta \cos \phi}} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{2c}{\gamma H} \quad (14)$$

式中: c 为土条黏聚力, 其他各符号意义同前。求 K_{a0} 时把式 (11) 中的 δ 换成 ϕ 、取 $k_q = 1$ 即可。

图 2(b) 对于黏性土又分布有地面荷载时, 主动土压力系数 K_a 及滑裂角 θ 的计算公式为

$$K_a = \frac{1}{\sin \beta \sin^2(\beta + \phi + \delta)} k_q \left[\sin \beta \sin(\beta + \delta) + \sin(\phi + \delta) \sin \phi \right] - 2\eta \sin \beta \cos \phi \cos(\beta + \phi + \delta) - 2 \left[(k_q \sin \beta \sin \phi + \eta \sin \beta \cos \phi) (k_q \sin(\beta + \delta) \sin(\phi + \delta) + \eta \sin \beta \cos \phi) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\tan \theta = \frac{\sin(\beta + \phi + \delta)}{\xi + \cos(\beta + \phi + \delta)} \quad (16)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{k_q \sin(\beta + \delta) \sin(\phi + \delta) + \eta \sin \beta \cos \phi}{k_q \sin \beta \sin \phi + \eta \sin \beta \cos \phi}} \quad (17)$$

求 K_{a0} 时把式 (15) 中的 δ 换成 ϕ 、取 $k_q = 1$ 和 $\beta = 90^\circ$ 即可。

讨论: (1) 式 (15) 及 (16) 是黏性土、边坡非直立且地面有荷载时, 计算主动土压力系数 K_a 及滑裂角 θ 的通式。当土条为非黏性土时, 式 (8) 及式 (9) 是边坡非直立且地面有荷载时的计算主动土压力系数 K_a 及滑裂角 θ 的通式。(2) 工程实践中, 一般不考虑地面堆载, 于是 $k_q = 1$ 。文献[2]在给出计算主动土压力系数 K_a 及滑裂角 θ 的公式时, 未考虑桩 (墙)、土间的摩擦力, 即取 $\delta = 0$, 于是式 (5)、(4) 就变成:

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (18)$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (19)$$

式 (8)、(9) 就变成:

$$K_a = \frac{\sin(\beta - \phi)}{\sin \beta + \sin \phi} \left(\frac{1}{\tan \frac{\beta + \phi}{2}} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (20)$$

$$\theta = \frac{\beta + \phi}{2} \quad (21)$$

式 (11)、(12) 就变成:

$$K_a = \frac{(1 - \sin \phi)(1 - \sin \phi - 2\eta \cos \phi)}{\cos^2 \phi} \quad (22)$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (23)$$

式 (15)、(16) 就变成:

$$K_a = \frac{(\sin \beta - \sin \phi)^2 - 2\eta \sin \beta \cos \phi (1 + \cos(\beta + \phi))}{\sin \beta \sin^2(\beta + \phi)} \quad (24)$$

$$\theta = \frac{\beta + \phi}{2} \quad (25)$$

(3) 当 $k_q = 1$, $\delta = 0$, $\eta = 0$ 时, 即直立式边坡, 式 (22) 就变成式 (18); 对倾斜边坡, 式 (24) 就变成式 (20)。

2.2 土条主动土压力强度计算

上节讨论了叠加法计算土条主动土压力的方法并给出了不同条件下的计算公式, 下面讨论土条主动土压力强度的计算方法。首先, 利用式 (1)、(3) 及式 (4) 得到:

$$E_{at} = \frac{1}{2} \gamma (H^2 K_a - K_h h_0^2 K_{a0}) \quad (26)$$

假设, $E_{at} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{at}$, K_{at} 为土条主动土压力系数, 则:

$$K_{at} = K_a \left[1 - K_h \frac{K_{a0}}{K_a} \left(\frac{h_0}{H} \right)^2 \right] \quad (27)$$

当地面有荷载时, 主动土压力系数 K_{at} 应乘以一个修正系数 k_q 。于是, 土条主动土压力强度为 e_{at} :

$$e_{at} = \gamma h K_{at} \quad (28)$$

对支护结构进行受力计算时, 一般要计算主动土压力的水平分力 E_{atx} , 于是:

$$E_{atx} = E_{at} \sin(\beta + \delta) \quad (29)$$

$$e_{atx} = e_{at} \sin(\beta + \delta) \quad (30)$$

土条主动土压力合力的作用点位置按上述假定则为距坑底以上 $H/3$ 处。计算出了相邻基坑土条土压力合力及土压力强度后, 就可以按图 3 进行桩锚(撑)及土钉墙支护结构的受力计算及设计。计算方法及计算公式参照规范^[2]。

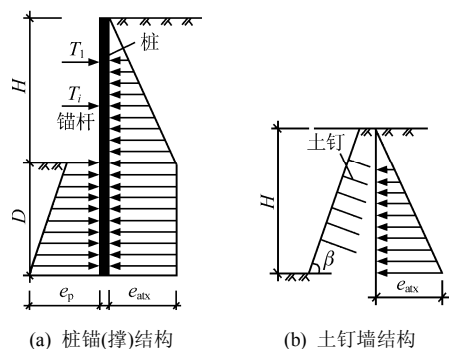


图 3 相邻基坑土条支护结构计算简图

Fig.3 Calculation chart for retaining and protection structure of neighbour excavation

2.3 土条临界宽度概念

在式(26)中, 如果令 $h_0 = 0$, 则 $K_{at} = K_a$, 即土条主动土压力即是库仑理论主动土压力, 其大小不需折减。当 $h_0 \geq 0$, K_{at} 始终小于 K_a , 即土条主动土压力始终小于库仑理论主动土压力, 如果按库仑理论计算土条主动土压力应进行折减, 折减系数 K 为

$$K = \left[1 - K_h \frac{K_{ao}}{K_a} \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 \right] \quad (31)$$

因此, 基坑工程设计应先计算 h_0 , 根据 h_0 大小判断按库仑理论计算主动土压力是否应折减。由于 $h_0 = H - B \tan \theta$, 也可以根据土条宽度 B 来判断。当 $h_0 = 0$, 即 $H - B \tan \theta = 0$ 这时 $B = H / \tan \theta$, 显然当 $B \geq H / \tan \theta$, $h_0 \leq 0$, 不需进行土压力折减; 当 $B < H / \tan \theta$, $h_0 > 0$, 需要进行土压力折减, 于是, 把 $H / \tan \theta$ 定义为土条临界宽度 B_{cr} 。因此, 进行相邻基坑土条支护设计时, 首先根据地质条件、基坑深度、地面荷载情况等条件, 计算库仑假定条件下的土条潜在滑裂角 θ , 然后计算土条临界宽度 B_{cr} , 再根据实际土条宽度 B 的大小判断土条土压力是否应折减, 并计算出土条土压力, 最后进行支护结构的设计计算。

3 工程实例

下面举两个不同支护结构型式的土条工程实例。

3.1 工程实例 1

深圳华强花园 A、B、C 座基坑, 长×宽为

156 m×45 m, 基坑深度 9.6 m。距其南侧 7.5 m 是先期施工的 D 座基坑, 其长×宽为 52 m×45 m, 深度 9 m, 两基坑于宽度方向平行相邻, D 座基坑为悬臂式密排人工挖孔桩支护, 桩径 1.2 m。相邻土条净宽 6.0 m, 土条上部 6.5 m 厚为回填砾质黏性土, 重度 $\gamma = 18.1 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 12 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi = 16^\circ$; 填土层下有 6~12 m 厚的黏性土, 重度 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 22 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi = 20^\circ$ 。A、B、C 座基坑东、西、北三侧均采用直立式土钉墙支护; 南侧先施作一排桩距 1.0 m 的三重管旋喷桩, 桩长入坑底 2 m, 在旋喷桩中插入与桩同长的 $\phi 57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 钢管; 开挖面直立, 在开挖面打入纵横间距为 1.2 m×1.0 m, 长均为 6 m、倾角为 10° 的 $\phi 48 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 钢管土钉。土条地面限载。支护结构典型剖面见图 4。

设计验算过程: ①首先, 对坑底以上的土层进行物理、力学指标加权平均, 得到: 平均重度 $\bar{\gamma} = 18.2 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $\bar{c} = 15.2 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\bar{\phi} = 17.3^\circ$ 。②计算土条临界宽度 B_{cr} : 利用式(14)得 $\eta = 0.174$, 取 $\delta = \phi/2 = 8.7^\circ$, 于是, $\xi = 1.137$, $\tan \theta = 1.287$, $B_{cr} = 7.5 \text{ m} > 6 \text{ m}$, 应进行土压力折减。③利用式(2)、(11)及(25)计算 $K_h = 1.96$, $K_a = 0.260$, $K_{ao} = 0.246$, $K_{at} = 0.241$ 。④土条主动土压力合力 $E_{atx} = 199.79 \text{ kN/m}$, 土压力强度 $e_{atx} = 4.4h$ 。⑤计算土条稳定区土钉抗拉力合力 $\sum T_{ij} = 252.60 \text{ kN/m}$, $\sum T_{ij} > E_{atx}$, 土条整体稳定。⑥单根土钉最大抗拉力 $T_{u \max} = 85.2 \text{ kN/m}$, 单根土钉最大受拉荷载 $T_k = 42.00 \text{ kN/m}$, $T_{u \max} > 1.25 \times 1.1 \times T_k = 57.80 \text{ kN/m}$, 土钉局部稳定性符合规范要求。

监测结果: 在基坑南侧坡顶共布置了 4 个水平位移及沉降监测点, 最大水平位移为 4 mm, 最大沉降为 2 mm。

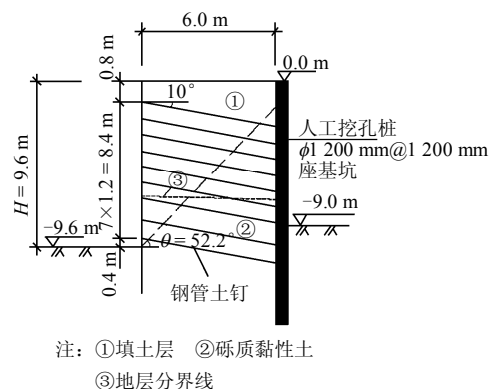


图 4 工程实例 1 相邻基坑土条支护结构简图
Fig.4 Chart of retaining and protection structure for No.1 engineering

3.2 工程实例 2

深圳益田假日广场基坑深为 17.8 m，桩锚支护，在其西侧 12 m 为后期开挖的深圳世纪假日广场基坑，基坑深 18.6 m，如图 5 所示。两基坑相邻土条地层为砾质黏土和强风化花岗岩，砾质黏土的 $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 22 \text{ kPa}$ ， $\phi = 23^\circ$ ，厚度为 19.8 m；强风化花岗岩的 $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 50 \text{ kPa}$ ， $\phi = 28^\circ$ ，厚度 5~8 m。土条地面限载。

设计计算：①计算临界宽度 B_{cr} ：利用公式 (14)，得到 $\eta = 0.130$ ，取 $\delta = \phi/2 = 11.5^\circ$ ，于是 $\xi = 1.150$ ， $\tan \theta = 1.412$ ， $B_{cr} = 13.2 \text{ m} > 12 \text{ m}$ ，土条主动土压力应进行折减。②由于土条地面变形不需严格控制，因此，基坑上部 6 m 采用纵横间距 1.5 m×1.5 m 的土钉墙支护，6 m 深以下采用桩径为 1.2 m 间距为 2.0 m 的人工挖孔桩支护，按设计要求应设置 4 排锚索，长度为 21~25 m。显然宽度才 12 m 的土条无法施作常规锚索，改用扩大头锚索，扩大头锚索直径经试验按 0.5 m 设计，扩大头长 5 m，实际施作锚索长度均为 13.5 m。③为简化计算，把基坑上 6 m 的土体按荷载考虑，则这时基坑深度降为 12.6 m，这时 $B_{cr} = 8.9 \text{ m} < 12 \text{ m}$ ，因此，简化后的土条主动土压力不需折减，按朗肯土压力理论计算，再进行支护结构的设计计算，设计结果如图 5 所示。

监测结果：在基坑坡顶和人工挖孔桩桩顶分别设置了 3 个水平位移和沉降监测点。基坑顶水平位移为 22~35 mm，沉降为 10~25 mm；桩顶水平位移为 15~26 mm，沉降为 5~11 mm。

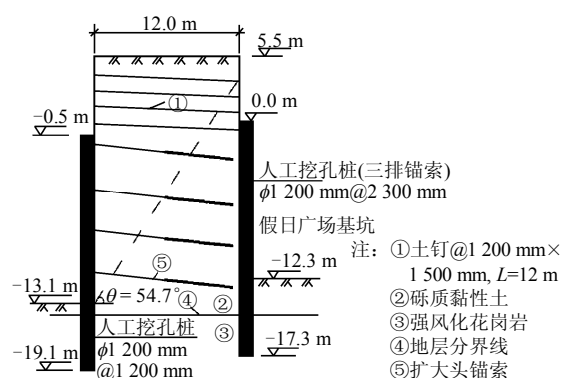


图 5 工程实例 2 相邻基坑土条支护结构简图
Fig.5 Chart of retaining and protection structure for No.2 engineering

4 结 论

(1) 相邻基坑土条土体的应力场、位移场是非常复杂的，其特征受相邻基坑开挖深度、支护方式、

地层条件、地下水条件及地面荷载条件等影响。本文从工程实用的角度，提出了简化的叠加法，方法本身的精确性有待大量工程实践的验证和完善。

(2) 本文提出的叠加法计算的土条主动土压力合力误差较小，土压力强度有一定的误差，特别是对黏性土地层。

(3) 本文提出的临界宽度 B_{cr} 概念清晰，计算方法简单。为简化计算滑裂角 θ ，可对黏性土地层先进行等效内摩擦角换算，然后按非黏性土计算公式计算可减少计算工作量。

参 考 文 献

- [1] 李兴高, 刘维宁. Coulomb 土压力理论的两种解[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 981—985.
LI Xing-gao, LIU Wei-ning. Two methods to get the Coulomb earth pressure theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 981—985.
- [2] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 条形荷载下挡土墙主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 183—186.
YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Active earth pressure on retaining wall due to strip surcharge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Supp.): 183—186.
- [3] 王贤能, 邹辉, 初振环. 土条状抗壁土压力计算方法及其应用分析[J]. 工程勘察, 2007, 11: 18—21.
WANG Xian-neng, ZHOU Hui, CHU Zheng-huan. The method and application of earth pressure calculation of the slice-like foundation pit[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2007, 11: 18—21.
- [4] 中华人民共和国行业标准. JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [5] 金亚兵, 赵行立. 不同成钉方法的土钉抗拉承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2004, (增刊): 169—173.
JIN Ya-bing, ZHAO Xing-li. Test and study on the bearing capacity of soil-nails in different driving methods[J]. *Industrial Construction*, 2004, (Supp.): 169—173.
- [6] 中华人民共和国水利行业标准. SL379—2007 水工挡土墙设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [7] 深圳市标准. SJG05—96 深圳地区建筑深基坑支护技术规范[S]. 1996.
- [8] 广州市标准. GJB02—98 广州地区建筑基坑支护技术规程[S]. 1998.
- [9] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [10] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.
- [11] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [12] 陈忠达. 公路挡土墙设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.