

加筋土基础分析与设计

戴 荧

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 介绍加筋土基础设计理论、设计程序和计算方法, 并给出设计程序和设计实例, 以供参考。

关键词: 加筋土基础; 加筋条; 极限承载力; 沉降; 安全系数

置于天然地基上的浅基础, 承受荷载后, 应保证地基本身有足够的强度和稳定性。如遇松软地基, 强度较小, 不能承受基础上的荷载时, 在土体中设置加筋条, 依靠加筋条与土的相互摩擦, 以增强地基的承载力与稳定性, 即称为加筋土基础工程, 是一种较经济而又有效的方法。加筋土基础工程于 20 世纪 70 年代开始应用, 目前国际上已广泛推广, 取得了较好的效果。我国西部地区的桥涵工程, 以及城市与公路立交桥基础, 应用加筋土基础工程较为适宜, 具有推广价值。

1 加筋土基础理论

1.1 地基破坏模型

条形浅基础置于天然地基上, 地基设置数层加筋条基础承受荷载后, 地基的破坏模型有 3 种型式:

(1) 第一层加筋条置于距基础深度 d 处, $d/B > 2/3$, (B 为基础宽度), 第一层加筋条强度大, 并排列密集, 其作用类似一定深度的刚性基底, 破坏时为加筋条以上地基受剪破坏, 如图 1(1) 所示;

(2) 若 $d/B \leq 2/3$, 加筋条的层数 $N \leq 2 \sim 3$, 破坏时加筋条将被拉出, 如图 1(2) 所示;

(3) 若 $d/B \leq 2/3$, 而加筋条的层数 $N \geq 4$, 但不超过 6~7 层, 这种加筋土基础效果最好, 在这种情况下, 上层加筋条被折断, 土体即破坏, 如图 1(3) 所示。

1.2 破坏面的位置

设计条形浅基础时, 必须估算由于基础上荷载作用对加筋条所产生的力。1975 年, Binquet 与 Lee 提出以下分析方法。

图 2 所示是加筋土基础发生破坏的情况。中央

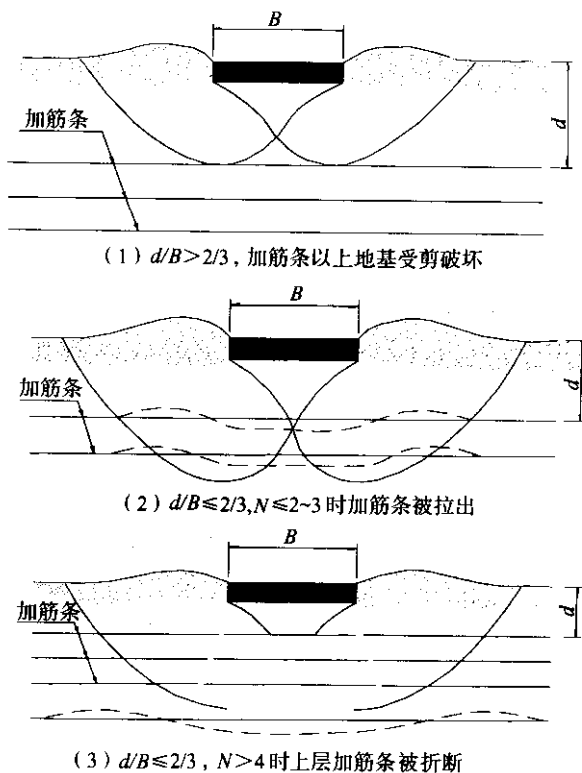


图 1 加筋土承载力破坏的 3 种模型

区 (区域 I) 直接在基础下面, 随着荷载作用基础产生沉降。区域 I 的两旁是区域 II, 土向外与向上推移。点 A' 、 A'' 、 A''' 和 B' 、 B'' 、 B''' 是确定区域 I 与区域 II 限界线上的各点。这些点由基础荷载在土中产生的剪应力 τ_{xz} 而定。 τ_{xz} 是在基础下深度 z 处、距基础中心线 x 距离处的剪应力, 用 Boussinesq 方程式求得:

$$\tau_{xz} = \frac{4bq_R x z^2}{\pi((x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2 z^2)} \quad (1)$$

式中: b 为一半的基础宽度, 即 $b = B/2$; B 为基础

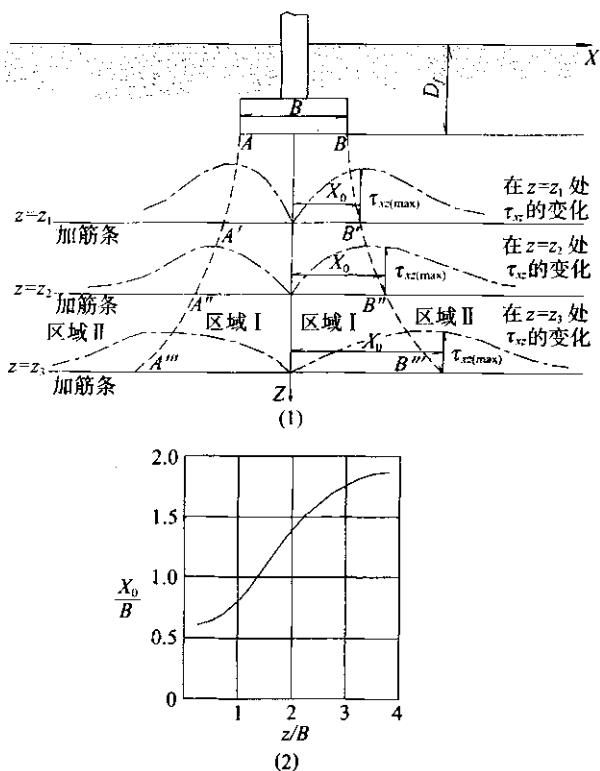


图 2 加筋土基础破坏机理

宽度; q_R 为基础上单位面积荷载; 式中其余符号如图 2 所示。

在任何深度 z 处 τ_{xz} 的变化, 在图 2(1) 中以虚线表示。在 A' 、 B' 点 ($z=z_1$) 处, τ_{xz} 为最大值。在 A'' 、 B'' 点等处情况相同。 $x=X_0$ 为无因次, 如图 2(2) 所示。

在加筋条层数 (N) 确定后, 置于加筋土上基础的单位面积荷载 (q_R) 对置于非加筋土上的单位面积荷载 (q_0) 的比是常数, 并与沉降水准面无关, 如图 3 所示。

2 计算公式

图 4(1) 表示连续基础置于非加筋土地基上, 承受单位面积荷载为 q_0 。图 4(2) 表示连续基础置于加筋土地基上 (一层加筋条, $N=1$), 承受单位面积荷载为 q_R 。在 2 种情况下, 假定沉降为 S 。在深度 z 处, 厚度为 ΔH 的单元土体单位长度的力, 由下式求得。

非加筋土情况: F_1 与 F_2 为竖向力, Q_1 为剪力。由平衡关系:

$$F_1 - F_2 - Q_1 = 0 \quad (2)$$

加筋土情况: F_3 与 F_4 为竖向力, Q_2 为剪力, $T_{(N=1)}$ 是加筋条产生的拉力。由于加筋条的变形, $T_{(N=1)}$ 为竖向力。

$$F_3 - F_4 - Q_2 + T_{(N=1)} = 0 \quad (3)$$

假定在 2 种情况下, 基础的沉降相等, 即:

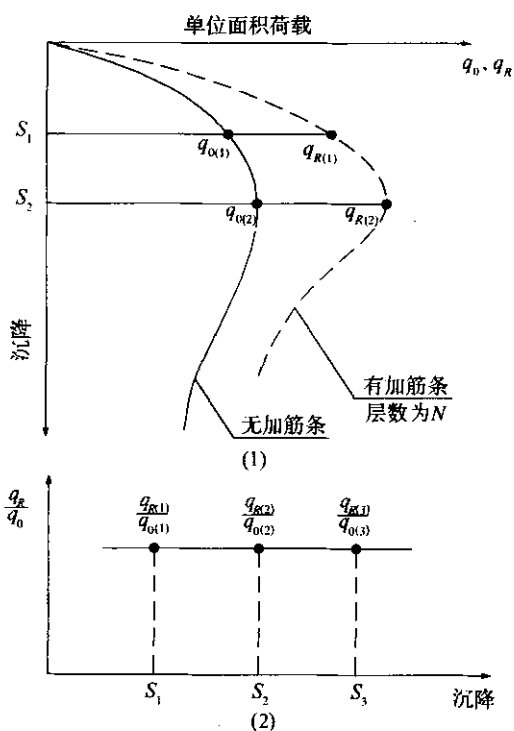


图 3 置于加筋土与非加筋土基础的单位面积荷载与沉降的关系

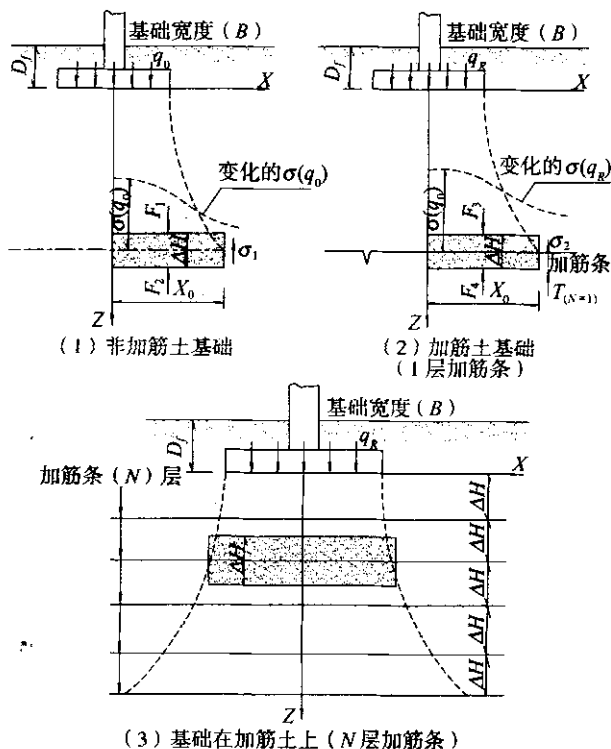


图 4

$$F_2 = F_4 \quad (4)$$

由式(3)减式(2), 并用式(4)的关系, 得:

$$T_{(N=1)} = F_3 - F_1 - Q_2 + Q_1 \quad (5)$$

F_1 力是由基础荷载 q_0 在单元土体中所产生的竖向应力 σ 而生成, 同样 F_3 是由荷载 q_R 在单元土体中所产生的竖向应力而生成。因此:

$$F_1 = \int_0^{x_0} \sigma(q_0) \cdot dx \quad (6)$$

$$F_3 = \int_0^{x_0} \sigma(q_R) \cdot dx \quad (7)$$

$$Q_1 = \tau_{xz}(q_0) \cdot \Delta H \quad (8)$$

$$Q_2 = \tau_{xz}(q_R) \cdot \Delta H \quad (9)$$

式中: $\sigma(q_0)$ 与 $\sigma(q_R)$ 是基础荷载 q_R 与 q_0 在深度 z 处产生的竖向应力; $\tau_{xz}(q_0)$ 与 $\tau_{xz}(q_R)$ 是荷载 q_0 与 q_R 在深度 z 处、离中心线距离 x 处所产生的剪应力。

用 Boussinesq 解法积分得:

$$\sigma(q_0) = \frac{q_0}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{z}{x-b} - \tan^{-1} \frac{z}{x+b} - \frac{2bz(x^2 - z^2 - b^2)}{(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma(q_R) = \frac{q_R}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{z}{x-b} - \tan^{-1} \frac{z}{x+b} - \frac{2bz(x^2 - z^2 - b^2)}{(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2} \right) \quad (11)$$

$$\tau_{xz}(q_0) = \frac{4bq_0X_0z^2}{\pi((X_0^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2)} \quad (12)$$

$$\tau_{xz}(q_R) = \frac{4bq_RX_0z^2}{\pi((X_0^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2)} \quad (13)$$

将式(10)~式(13)代入式(6)~式(9), 简化后得以下诸式:

$$F_1 = A_1q_0B \quad (14)$$

$$F_3 = A_1q_RB \quad (15)$$

$$Q_1 = A_2q_0\Delta H \quad (16)$$

$$Q_2 = A_2q_R\Delta H \quad (17)$$

式中: A_1 与 $A_2 = f(z/B)$ 。
 A_1 与 A_2 随深度 z 而变化, 如图 5 所示。

式(14)通过式(17)代入式(5), 得:

$$\begin{aligned} T_{(N=1)} &= A_1q_RB - A_1q_0B - A_2q_R\Delta H + A_2q_0\Delta H \\ &= A_1B(q_R - q_0) - A_2\Delta H(q_R - q_0) \\ &= q_0 \left(\frac{q_R}{q_0} - 1 \right) (A_1B - A_2\Delta H) \end{aligned} \quad (18)$$

如图 4(2) 所示, 式(18)的推导, 是基于假定基础下的地基设置 1 层加筋条。如果设置 N 层, 中至中间距为 ΔH , 如图 4(3) 所示, 则有:

$$T_{(N)} = \frac{T_{(N=1)}}{N} \quad (19)$$

合并式(18)与式(19), 得:

$$T_{(N)} = \frac{1}{N} \left(\frac{q_R}{q_0} - 1 \right) (A_1B - A_2\Delta H) \quad (20)$$

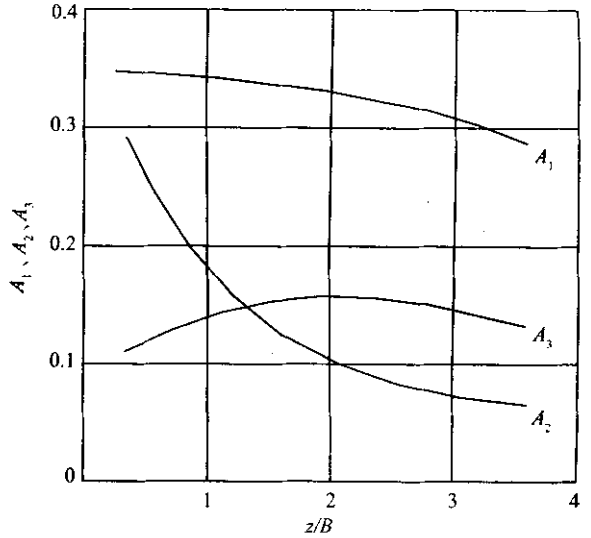


图 5 A_1, A_2, A_3 随 z/B 变化

$T_{(N)}$ 的单位是 kN/m 。

3 安全系数

在用式(20)求得每层加筋条由基础荷载产生的力后, 需确定在 z 深度处的加筋条是否会被折断或拉出而破坏。在深度 z 处, 抵抗折断的安全系数为:

$$FS_{(B)} = \frac{\omega n f_y}{T_{(N)}} \quad (21)$$

式中: $FS_{(B)}$ 为加筋条抵抗折断的安全系数; ω 为单根加筋条的宽度; t 为加筋条的厚度; n 为每单位长度基础的加筋条系数; f_y 为材料屈服或抗折断强度; $\omega \cdot n$ 项可定义为线密度比 (LDR), 则:

$$FS_{(B)} = \left(\frac{t f_y}{T_{(N)}} \right) (LDR) \quad (22)$$

在一定深度处, 抵抗加筋条被拉出的阻力, 是由土与加筋条间的摩阻所产生的。按照静力学原理, 在深度 z 处, 阻止加筋条被拉出的基础单位长度摩擦力, 可由下式求得 (图 6):

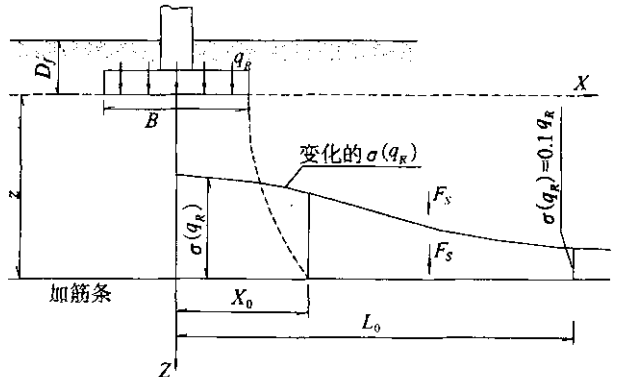


图 6 加筋条的作用力

$$F_B = 2 \tan \varphi_\mu \times \text{垂直力}$$

$$= 2 \tan \varphi_\mu (LDR) \int_{X_0}^{L_0} \sigma(q_R) dx + (LDR) \times \gamma \times$$

$$(L_0 - X_0)(z + D_f) \quad (23)$$

式中: γ 为土的密度; D_f 为基础深度; φ_μ 为加筋条与土的摩擦角; 其余符号见图 6。

$\sigma(q_R)$ 可由式(11)求得。 $x = L_0$ 是 $\sigma(q_R) = 0.1q_R$ 处距 Z 轴的距离。 L_0 是深度 z 的函数(如图 7 所示)。

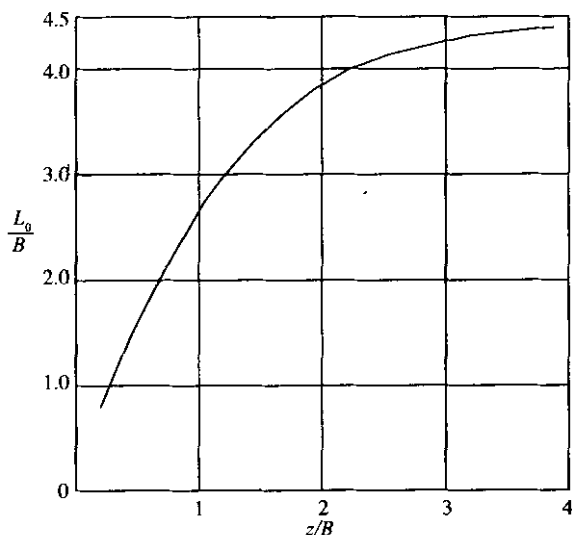


图 7 L_0/B 随 z/B 变化

式(23)可简化为:

$$F_B = 2(LDR) \tan \varphi_\mu (A_3 B q_0 (\frac{q_R}{q_0}) + \gamma (L_0 - X_0) (z + D_f)) \quad (24)$$

式中: A_3 无因次, 并是 x/B 的函数(如图 5 所示)。

抵抗加筋条被拉出的安全系数为:

$$FS_{(P)} = \frac{F_B}{T_{(N)}} \quad (25)$$

4 设计程序

连续条形基础置于加筋土基上, 其设计程序如下。

(1) 汇集设计资料, 其中包括: 设计荷载; 土的摩擦角 φ , 土与加筋条的摩擦角 φ_μ ; 抵抗承载力失败的安全系数 FS , 抵抗加筋条折断的安全系数 $FS_{(B)}$, 抵抗加筋条拉出的安全系数 $FS_{(P)}$; 加筋条抗折断强度 f_y ; 土的容重 γ ; 土的弹性模量 E_s , 土的泊桑比 μ_s ; 基础的容许沉降 S , 基础深度 D_f 。

(2) 假定基础宽度 B 、 d 和 N 值已知。 d 应小于 $2/3B$ 。从基础底至最下层加筋条的距离应等于或小

于 $2B$ 。计算 ΔH 。

(3) 假定 LDR 值。

(4) 计算非加筋土情况下的极限承载力(q_u), 用 Terzaghi 公式求得:

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

式中: N_c 、 N_q 、 N_γ 为承载力系数, 无因次, 是土内摩擦角 φ 的函数。

容许承载力为:

$$q_{(1)} = \frac{q_u}{FS} \quad (26)$$

(5) 计算非加筋土情况下, 根据容许沉降的容许承载力 $q_{(2)}$ 。根据刚性基础的沉降公式:

$$S = \frac{B q_{(2)}}{E_s} (1 - \mu_s^2) \alpha_r$$

因 $L/B = \infty$, $\alpha_r = 2$, 上式改为:

$$q_{(2)} = \frac{E_s S}{2B(1 - \mu_s^2)} \quad (27)$$

(6) 从所得容许承载力 $q_{(1)}$ 与 $q_{(2)}$, 取二者中低值等于 q_0 。

(7) 计算基础置于加筋地基上的 q_R 值:

$$q_R = \frac{\text{单位长度基础荷载}}{B} \quad (28)$$

(8) 用式(20)计算每层加筋条的拉力 $T_{(N)}$, 单位为 kN/m 。

(9) 用式(24)计算加筋条的摩阻力 F_B 。对每层加筋条, 计算 $F_B/T_{(N)}$ 值等于或大于抵抗加筋条被拉出的安全系数 $FS_{(P)}$ 。若 $F_B/T_{(N)}$ 小于 $FS_{(P)}$, 加筋条的长度需要增加。这样, F_B 与 $FS_{(P)}$ 值将增大, 而式(24)应改写为:

$$F_B = 2(LDR) \tan \varphi_\mu (A_3 B q_0 (\frac{q_R}{q_0}) + \gamma (L - X_0) (z + D_f)) \quad (29)$$

式中: L 为求得合适的 F_B 值时需要的加筋条长度。

(10) 用式(22)求得每根加筋条的厚度。

5 设计实例

连续基础置于加筋土基础上, 承受荷载 1.8 MN/m 。所得设计资料如下: 土容重 $\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 35^\circ$, $E_s = 3 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$, $\mu_s = 0.35$; 加筋条 $f_y = 2.5 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$, $\varphi_\mu = 28^\circ$, $FS_{(B)} = 3$, $FS_{(P)} = 2.5$; 基础 $D_f = 1 \text{ m}$, 抵抗承载力失败安全系数 FS 为 3; 容许沉降 $S = 25 \text{ mm}$; 使用年限为 50 年。

按照设计程序进行设计。

$B=1\text{ m}$, d =从基础底至第一层加筋条深度= 0.5 m , $\Delta H=0.5\text{ m}$, $N=5$; $LDR=65\%$ 。

假定加筋条宽度为 75 mm , $n=\frac{LDR}{\omega}=\frac{0.65}{0.075}=8.67\text{ 根/m}$, 即基础每米长度每层加筋条有 8.6 根 。

(1) 确定 q_0 值。

非加筋土, 用 Terzaghi 公式 $q_u=\gamma D_f N_q+\frac{1}{2}\times\gamma B N_\gamma$ (砂土, 粘聚力 $c=0$), 从土力学书中可以查得, 当 $\varphi=35^\circ$ 时, $N_q=33.30$, $N_\gamma=48.03$, 代入公式得:

$$q_u=17.3\times1\times33.3+\frac{1}{2}\times17.3\times1\times148.03=992\text{ kN/m}^2$$

容许承载力:

$$q_{(1)}=\frac{q_u}{FS}=\frac{992}{3}=330.7\text{ kN/m}^2$$

由式(27)得:

$$q_{(2)}=\frac{E_s S}{2B(1-\mu_s^2)}=\frac{(30\ 000)\times(0.025)}{2\times1\times(1-0.35^2)}=427.35\text{ kN/m}^2$$

因 $q_{(1)}<q_{(2)}$, 采用 $q_0=q_1=330.7\text{ kN/m}^2$ 。

(2) 确定 q_R 值。

由式(28)得:

$$q_R=\frac{1.8\text{ MN/m}}{B}=\frac{1.8\times10^3\text{ MN/m}}{1\text{ m}}=1.8\times10^3\text{ kN/m}^2$$

(3) 计算加筋条拉力。

由式(20)计算得每层加筋条拉力见表 1。

表 1 每层加筋条拉力

层数	$(\frac{q_0}{N})(\frac{q_R}{q_0}-1)$	$\frac{z}{m}$	z/B	A_1B	$A_2\Delta H$	$A_1B-A_2\Delta H$	$\frac{T_{(N)}}{\text{kN/m}}$
1	293.7	0.5	0.5	0.35	0.125	0.225	66.08
2	293.7	1.0	1.0	0.34	0.09	0.25	73.43
3	293.7	1.5	1.5	0.34	0.065	0.275	80.77
4	293.7	2.0	2.0	0.33	0.05	0.28	82.24
5	293.7	2.5	2.5	0.32	0.04	0.28	82.24

表中: A_1 与 A_2 自图 5 取得, $B=1\text{ m}$, $\Delta H=0.5\text{ m}$, $q_R/q_0=0.8\times10^3/330.7=5.44$ 。

计算加筋条由摩擦力发生的抗阻力时用式(24), 求得各层加筋条各参数值见表 2。

表 2 加筋土基础各项数值表

层数	1	2	3	4	5
$2(LDR)\tan\varphi_\mu$	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691
A_3	0.125	0.14	0.15	0.15	0.15
$A_3Bq_0(q_R/q_0)$	225.0	252.0	270.0	270.0	270.0
z/m	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
z/B	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
L_0/m	1.55	2.6	3.4	3.85	4.2
X_0/m	0.55	0.8	1.1	1.4	1.65
$(L_0-X_0)/\text{m}$	1.0	1.8	2.3	2.45	2.55
$(z+D_f)/\text{m}$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$\gamma(L_0-X_0)(z+D_f)$	25.95	62.28	99.48	127.16	154.4
$F_B/(\text{kN/m})$	173.4	217.2	255.1	274.4	293.3
$FS_{(p)}=F_B/T_{(N)}$	2.62	2.96	3.16	3.34	3.57

(4) 计算加筋条的厚度。

由式(22)可求得: $t=\frac{FS_{(B)}T_{(N)}}{f_y(LDR)}$ 。已知 $f_y=2.5\times10^5\text{ kN/m}^2$, $LDR=0.65$, $FS_{(B)}=3$, 则 $t=(\frac{3}{(2.5\times10^5)\times0.65})T_{(N)}=(1.846\times10^{-5})T_{(N)}$ 。

第 1 层: $t=(1.846\times10^{-5})\times66.08=1.22\text{ mm}$

第 2 层: $t=(1.846\times10^{-5})\times73.43=1.36\text{ mm}$

第 3 层: $t=(1.846\times10^{-5})\times80.77=1.49\text{ mm}$

第 4 层: $t=(1.846\times10^{-5})\times82.24=1.52\text{ mm}$

第 5 层: $t=(1.846\times10^{-5})\times82.24=1.52\text{ mm}$

每层加筋条厚度均用 1.6 mm , 可以满足要求。如用镀锌钢条, 每年腐蚀率为 0.025 mm , 则加筋条厚度应为 $t=1.6+0.025\times50=2.85\text{ mm}$, 使用年限为 50 年 。各层加筋条长度如图 8 所示。

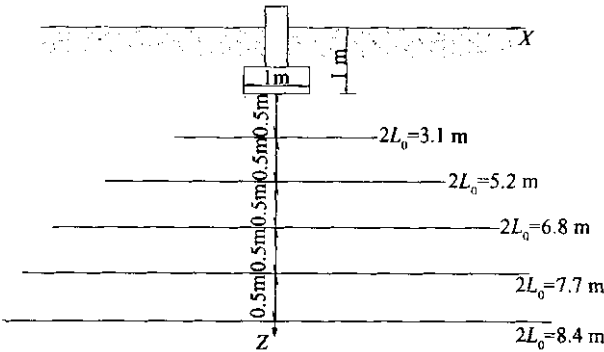


图 8 各层加筋条长度