

双圆盾构掘进施工扰动土体附加应力分析

孙统立^{1,2}, 张庆贺¹, 韦良文¹, 吴敏慧¹, 张冬茵³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 江苏省交通规划设计院, 南京 210005; 3. 深圳市建设工程质量监督总站, 深圳 518032)

摘 要: 应用弹性力学 Mindlin 解建立了双圆盾构掘进引起土体附加应力积分表达式。运用复化 Gauss-Legendre 数值积分公式, 定量分析了双圆盾构正面推力、盾构与土体侧摩阻力对土体扰动的程度及范围。分析表明, 双圆盾构掘进对土体扰动具有区域性特征, 盾构机上部表现为背土挤土, 侧面则表现为挤压剪切效应, 并且侧摩阻力对土体的扰动程度更大。所得结论对于双圆盾构穿越临近地下管线或建筑物桩基的施工提供理论依据。

关 键 词: 双圆盾构; 正面推力; 侧摩阻力; 施工扰动; 附加应力

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Analysis of additional stresses of soil disturbance induced by propulsion of double-O-tube shield

SUN Tong-li^{1,2}, ZHANG Qing-he¹, WEI Liang-wen¹, WU Min-hui¹, ZHANG Dong-yin³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Jiangsu Provincial Communication Planning and Design Institute, Nanjing 210005, China; 3. Shenzhen Construction Quality Supervision Center, Shenzhen 518032, China)

Abstract: The additional stresses induced by propulsion of double-o-tube(DOT) shield are calculated by means of the Mindlin's equations in elasticity. The characteristics of additional stresses and the extent of soil disturbance of DOT shield construction are analyzed with compound Gauss-Legendre integral arithmetic. In the analysis, the excess earth pressure and the lateral friction between shield skin with surrounding soil are taken into account. The outcome makes clear that the soil disturbance of DOT shield has the regional characters, such as drag and extrusion above the sea-gulled segment and extrusion and friction lateral of the shield skin. The lateral friction has more effect on soil disturbance than the excess earth pressure. The conclusion can be as reference for the traversing construction nearby the underground pipeline and the building foundation for DOT shield.

Key words: DOT shield; excess earth pressure; lateral friction; soil disturbance; additional stress

1 引 言

2004 年, 中国第一条地铁双圆盾构隧道(double-O-tube, DOT)在上海贯通, 中国成为继日本之后第二个掌握双圆盾构隧道施工技术的国家^[1]。与单圆盾构施工双线隧道相比, 双圆盾构工法具有许多优势, 它能够一次完成双线隧道, 具有施工速度快、土方挖掘量少、隧道断面面积利用率高等特点。双圆盾构正逐渐成为地铁隧道、道路隧道等地下工程施工的主流形式。

盾构施工不可避免地对土体产生损伤扰动, 表现为盾构对土体的挤压和松动、加载与卸载、孔隙水压上升与下降所引起土性的变异、地表隆起与下

沉等^[2]。文献[3]利用弹性力学 Kelvin 解及弹性地基梁理论, 建立了盾构推进对相邻桩体内力及挠曲影响的计算公式; 文献[4]考虑了盾构正面附加推力分析盾构推进引起周围土体附加应力分布; 文献[5]和文献[6]运用弹性力学 Mindlin 解, 分析了顶管施工引起临近水平平行管道上附加荷载的分布特征。对于单圆盾构工法的土体扰动、沉降特征等, 国内外专家已做了较多地研究, 但对于双圆盾构工法引起的施工扰动、地层移动尚缺乏足够地认识, 有待于进一步的研究。

本文基于弹性力学 Mindlin 解, 考虑正面附加推力及侧摩阻力作用下双圆盾构掘进引起的附加荷载, 讨论双圆盾构隧道开挖后隧道周围土体的应力

分布特征, 为双圆盾构穿越临近地下管线及桩基的施工提供理论依据。

2 理论分析

双圆盾构 Mindlin 解可以看作 2 个单圆盾构作用的线性叠加, 不考虑左右单圆的相互影响。分析中考虑盾构正面附加推力, 盾壳与土体侧摩擦阻力的共同作用。

正常施工中正面附加推力一般控制在 ± 20 kPa 之间, 但在一些特殊情况下, 例如当开挖面前方存在不明障碍物、盾构机穿越不同土层、管片拼装、盾构进出洞时都可能导致正面推力有较大的波动, 尤其是双圆盾构采用辐条式刀盘, 左右刀盘以一固定相位角旋转切削土体, 盾构土仓内土体与正面地层基本呈直接相通状态, 正面设定土压与盾构切口地层变形关系更直接, 反应更灵敏、更迅速, 因此土压管理对于双圆盾构掘进则显得尤为重要^[1]。

双圆盾构由于海鸥形凹槽的存在, 盾壳本身对土体产生明显的背土效应。盾构对土体摩擦剪切效应使得盾壳带动周围扰动土体前移, 引起较大的地层损失。盾构机与土体之间的摩擦力 p 等于法向压力 σ_N 乘以摩擦系数 f , 即 $p = \sigma_N f$, σ_N 可近似取隧道轴线处的垂直土压力作为平均压力^[6], 等于土压力和地下水压力的合力, 对于砂性土可采用水土分算, 对于黏性土宜采用水土合算。摩擦系数 f 与土的特性密切相关, 其大小随着土体强度的增大而增大。

本文假定: ①土体不排水固结, 仅考虑盾构掘进施工扰动的影响; ②土体为匀质、线弹性半无限体, 不考虑隧道开挖后边界条件的改变; ③盾构沿直线推进, 不考虑盾构机纠偏、旋转的影响; ④盾构正面附加推力沿盾构推进面均匀分布, 侧摩阻力沿盾壳均匀分布; ⑤不考虑左右单圆之间的相互影响。

水平集中力作用下, 半无限地基中土体附加应力的 Mindlin 解^[7]为

$$\sigma_x = f(H) = \frac{Px}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{1-2\mu}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)(5-4\mu)}{R_2^3} + \frac{3x^2}{R_1^5} + \frac{3(3-4\mu)x^2}{R_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+H)^2} \left[3 - \frac{x^2(3R_2+z+H)}{R_2^2(R_2+z+H)} \right] - \frac{6H}{R_2^5} \left[3H - (3-2\mu)(z+H) + \frac{5x^2 \cdot z}{R_2^2} \right] \right\};$$

$$\sigma_y = g(H) = \frac{Px}{8\pi(1-\mu)} \left\{ -\frac{1-2\mu}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)(3-4\mu)}{R_2^3} + \frac{3y^2}{R_1^5} + \frac{3(3-4\mu)y^2}{R_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+H)^2} \left[1 - \frac{y^2(3R_2+z+H)}{R_2^2(R_2+z+H)} \right] - \frac{6H}{R_2^5} \left[H - (1-2\mu)(z+H) + \frac{5y^2 z}{R_2^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为集中荷载作用点及其对称点到所求应力点之间的距离; H 为集中荷载作用点埋深; P 为水平力集度; μ 为土体泊松比; (x, y, z) 为待求应力点的整体坐标。

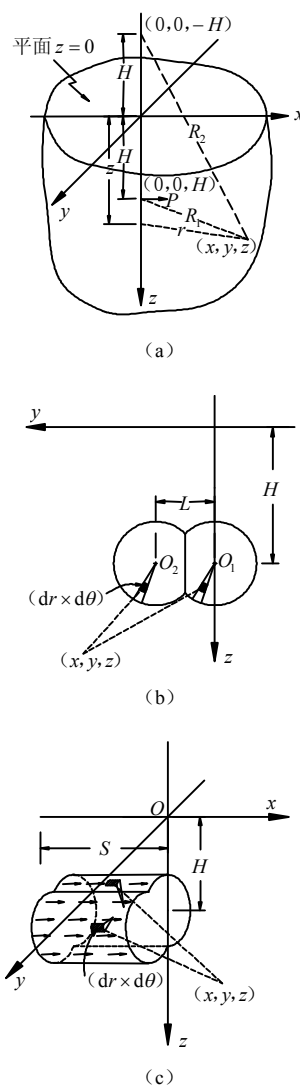


图1 双圆盾构 Mindlin 解示意图

Fig.1 The sketch map of Mindlin's equation of DOT shield

(1) 由图 1 可见, 正面附加推力作用下, 见图 1(b), 取微分面积 $rdrd\theta$, 荷载为 $p_1rdrd\theta$, p_1 为

正面荷载集度, 双圆盾构正面附加推力引起的正向及侧向附加应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x1} &= \iint_{S_1} f(r, \theta) dr d\theta; \\ \sigma_{y1} &= \iint_{S_1} g(r, \theta) dr d\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $S_1 (0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi)$ 为双圆盾构开挖面所占的面积; r 为距盾构中心的距离; R 为盾壳外径。

(2) 在侧摩阻力作用下 (图 1(c)) 千斤顶力作用使盾构向前掘进, 周围土体经过损伤扰动, 产生变形。取微分面积 $Rd\theta$, 荷载为 $p_2 Rd\theta$, p_2 为单位面积上盾壳与土体之间的摩擦力集度, R 为盾壳外径, 则有

$$\sigma_{x2} = \iint_{S_2} f(l, \theta) dl d\theta; \quad \sigma_{y2} = \iint_{S_2} g(l, \theta) dl d\theta \quad (3)$$

式中: $S_2 (0 \leq l \leq S, 0 \leq \theta \leq 2\pi)$ 为双圆盾构盾壳侧面积; l 为距开挖面的距离; S 为盾壳长度。

双圆盾构掘进引起的土体附加应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{x1} + \sigma_{x2} = \iint_{S_1} f(r, \theta) dr d\theta + \iint_{S_2} f(l, \theta) dl d\theta; \\ \sigma_y &= \sigma_{y1} + \sigma_{y2} = \iint_{S_1} g(r, \theta) dr d\theta + \iint_{S_2} g(l, \theta) dl d\theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3 数值积分格式及收敛性

式 (4) 很难直接积分计算, 可采用 Gauss-Legendre 多重积分求积公式求解, 作积分变换, 令 $\theta = \pi\xi + \pi$, $r = 0.5R\eta + 0.5R$, $l = 0.5S\zeta + 0.5S$, 则有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\xi, \eta) d\xi d\eta + \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\xi, \zeta) d\xi d\zeta; \\ \sigma_y &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 G(\xi, \eta) d\xi d\eta + \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 G(\xi, \zeta) d\xi d\zeta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

一般不期望采用高阶的 Gauss-Legendre 求积公式来获取较高的求积精度, 因为其余项表达式中的高阶导数难以估计, 甚至是无界的, 而是采用复化的 Gauss-Legendre 求积公式来求解^[8], 即将积分区间 $[a, b]$ 划分成若干个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$, 在每个子区间上采用低阶的 Gauss 求积公式, 然后将每个子区间上的数值积分累加起来作为整个 $[a, b]$ 区间上积分的近似值, 并以此改进数值求积的精度。

式 (4) 中, r 的最高次幂 m 为 7, 故取积分点个数为 $n \geq \frac{(m+1)}{2} = 4$, 本文采用 5 点 Gauss-Legendre

公式, 见式 (6), 式 (5)、式 (6) 积分变换的参数意义见文献[8]。

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = 0.2369 f(0.9062) + 0.2369 f(-0.9062) + 0.4786 f(0.5385) + 0.4786 f(-0.5385) + 0.5689 f(0) \quad (6)$$

比较 5 点 Gauss 公式、10 点 Gauss 公式、 10×10 等分 5 点复化 Gauss 公式和 100×100 等分 5 点复化 Gauss 公式可知, 复化的 Gauss-Legendre 求积公式收敛精度较高, 且积分结果的稳定性较好, 故本文计算均采用 10×10 等分 5 点复化 Gauss-Legendre 公式。当然, 式 (4) 亦可采用定积分与 5 点 Gauss-Legendre 数值积分相结合的方法求解, 只是计算过程更为繁琐^[4-6]。

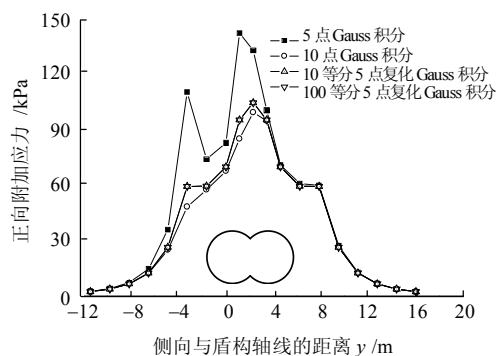


图 2 正向附加应力 σ_x 沿侧向 y 的变化

Fig.2 Variation of additional stress σ_x with lateral y

4 算例分析

根据上述原理, 采用 Visual Fortran 6.0 编制了相应的计算程序 DOTMS.for。以上海轨道交通 M6 线双圆盾构区间隧道工程为背景, 分析双圆盾构掘进引起的土体附加应力。工程选用由日本石川岛播磨重工业株式会社 (IHI) 制造的横向双连型双圆盾构进行隧道掘进。其切削面呈眼镜型, 断面尺寸 (外径 $\times$ 宽度) 为 $\phi 6.52 \text{ m} \times 11.12 \text{ m}$, 两圆中心距为 4 600 mm, 切削面积为 58.37 m^2 。该工程隧道中心埋深约为 13.31 m, 按照水土合算, 计算隧道轴线处的垂直土压力为 262.7 kPa, 取盾壳与土体摩擦系数为 0.30^[6], 则盾壳与土体之间的摩擦力 p 约为 78.8 kPa。本文土体受力以压为正, 以拉为负。根据盾构的掘进状况、土层参数, 计算中采用的物理力学参数见表 1。

如图 1 中所示计算模型, σ_x 为与盾构正面附加推力 SP 同方向的附加应力, 该应力的大小对于与盾构相交叠地下管线、桩基的侧向变形有较大影响。计算所得 σ_x 的分布见图 3~5。

表 1 计算参数

Table 1 Computation parameters

正面附加推力	盾壳与土体摩擦力	盾构机半径	土体泊松比	隧道埋深	左右单圆圆心距	盾构机本体的长度
SP/kPa	SF/kPa	R/m	μ	H/m	L/m	S/m
20	78.8	3.26	0.35	13.31	4.6	7.13

4.1 盾构掘进引起正前方向上附加应力 σ_x 的分布

图 3 为盾构正面附加推力沿盾构推进方向 x 的分布。可见附加应力 σ_x 沿盾构推进方向近似为反对称分布，在盾构开挖面前上方土体受到挤压，表现为压应力，开挖面后方则表现为拉应力，在盾构机的中间位置处附加荷载为 0，前后影响范围约为盾构开挖面前后 25.0 m，并且最大压、拉应力的峰值分别出现在开挖面前方 $0.6D$ (D 为双圆盾构纵向直径， $D=6.52\text{ m}$)、后方 $1.5D$ 位置处。在盾壳的侧面附加荷载小于盾构机的上部，并且距离盾壳侧向距离越远，附加荷载值越小。

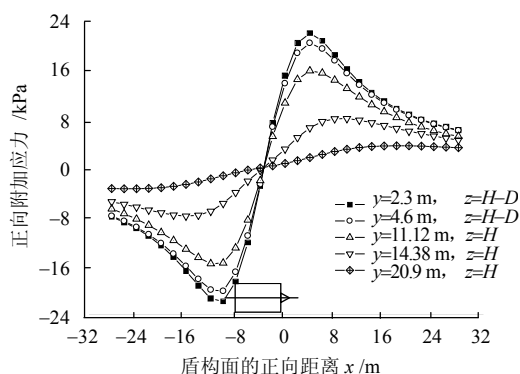


图 3 正向附加应力 σ_x 沿推进方向 x 的变化
Fig.3 Variation of additional stress σ_x with frontal x

图 4 (a) 为盾构中心埋深上部 $1.0D$ (埋深 6.79 m) 处盾构正面附加推力 σ_x 沿距离盾构轴线侧向距离的分布。在推进面前方表现为明显的“土拱效应”，最大值出现在双圆盾构的中轴线处，向两侧应力值逐渐衰减，影响范围主要发生在盾构中轴线左右两侧 $2.0D$ 范围内。开挖面前上方 5.0 m 处的应力值大于 1.0 m 处的应力值，这是由于距离盾构较近的土体处于卸荷扰动区，应力值小于前方的受挤压土体。图 4 (b) 为盾构侧面土体的正面附加推力随距离盾构轴线侧向距离的分布 ($H=13.31\text{ m}$)，距离盾壳越近，应力幅值越大，衰减的越快，在盾构侧面约为 $1.5D$ 应力值趋于稳定。比较图 4 (a) 和图 4 (b)，盾构掘进过程中，在盾构开挖面前方、侧面形成挤压应力区盾壳对土体的局部损伤扰动程度较大。

图 5 为盾构正面附加推力随埋深的变化。在盾构中轴线上部，土体受到挤压，靠近盾壳附近，最

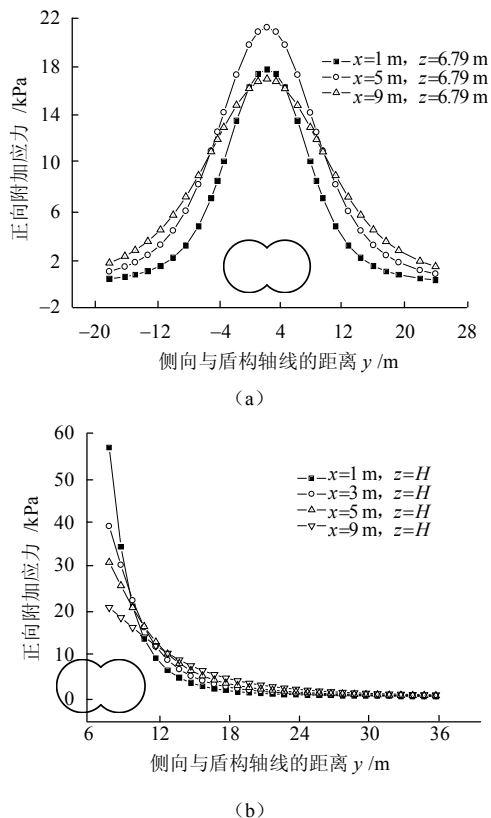


图 4 正向附加应力 σ_x 沿侧向 y 的变化
Fig.4 Variation of additional stress σ_x with lateral y

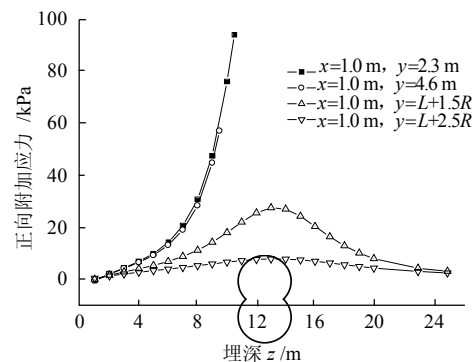


图 5 正向附加应力 σ_x 沿埋深的变化
Fig.5 Variation of additional stress σ_x with different depth

大压应力达 93.0 kPa。在盾构侧面，最大压应力出现在隧道中心埋深位置处，最大压应力达到 26.0 kPa，距离盾构越远，土体受到挤压越不明显。在盾构正面附加推力及盾壳摩擦力作用下，盾构周围土体大都表现为挤压、剪切扰动，诱发地层损失，引起地面沉降。由计算可知，在盾构开挖面前方 $x=5.0\text{ m}$ 和 9.0 m 处横剖面土层的应力分布与 $x=1.0\text{ m}$ 处类似，只是应力值减小。

4.2 双圆盾构掘进引起侧向附加应力 σ_y 的分布

如图 1 所示， σ_y 为双圆盾构掘进时引起的侧向附加应力，该应力的大小对于与盾构相平行地下管线、桩基的侧向变形及弯曲有较大影响。计算所

得 σ_y 的分布见图 6~8。

图 6 为盾构掘进引起的侧向附加应力沿盾构推进方向的分布。侧向附加应力 σ_y 沿盾构推进方向近似为反对称分布, 0 点位于盾壳的中间部位, 与正向附加应力 σ_x 对称点位置类似。在地面埋深为 6.79 m 处, 盾壳上部土体处于卸荷扰动状态, 土层表现为拉应力, 最大拉应力约为 -2.69 kPa, 开挖面后方土体受盾壳摩擦剪切作用, 土层表现为压应力。在盾构中心埋深位置处, 开挖面前方土体侧向应力为压应力, 开挖面后方为拉应力, 应力分布对于临近地下平行管线的侧向受弯不利。侧向应力的前后主要影响范围约为 +12.0~-18.0 m, 最大压、拉应力的峰值分别出现在盾构机长度的头部和尾部位置。

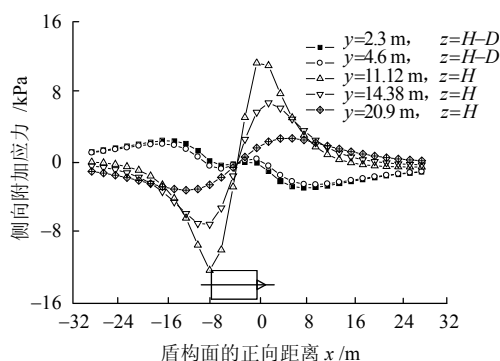


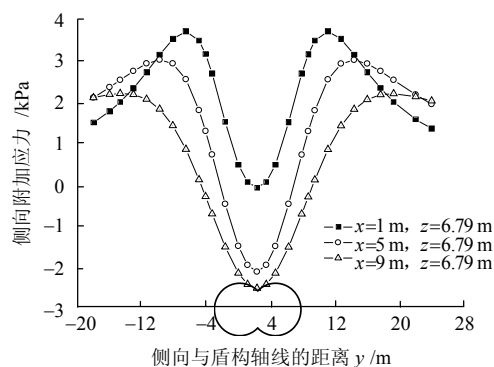
图 6 侧向附加应力 σ_y 沿推进方向 x 的变化

Fig.6 Variation of additional stress σ_y with frontal x

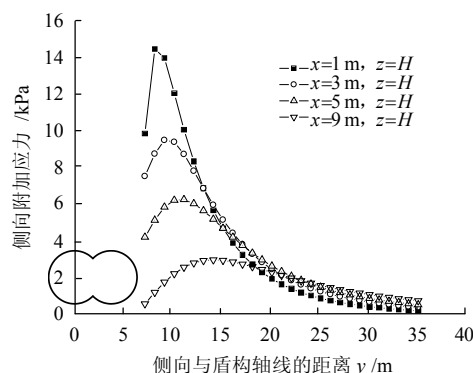
图 7 (a) 为距离盾构中心埋深上部 1.0D 处 (埋深为 6.79 m) 侧向附加推力 σ_y 随距离盾构轴线 y 的分布。侧向附加应力 σ_y 沿 y 轴方向关于盾构中轴线对称分布, 在开挖面前方盾构中轴线上部表现为拉应力, 两侧土体受到挤压, 离开开挖面距离越远, 压应力向两侧扩散, 最大拉应力值增大。即随着盾构掘进, 盾壳上部前方土体出现侧向应力 σ_y 拉应力区。图 7 (b) 为盾构中心埋深位置侧面土体的侧向附加应力分布 (埋深 13.31 m), 比较图 4 和图 7, 侧向附加应力的分布与正向附加应力不同, 随距离盾构侧向距离增大侧向应力先增大而后急剧下降, 最大值出现在盾壳侧面 0.5D 处。

图 8 为盾构侧向附加应力随埋深的变化。在盾构中轴线上部, 土体受到挤压, 靠近盾壳附近, 最大压应力达 9.59 kPa。在盾构侧面, 最大压应力出现在隧道中心埋深位置处, 最大压应力达到 14.87 kPa, 远大于盾构中轴线上部侧向应力。从图中还可以看出, 隧道中心埋深以下土层的侧向附加应力大于上部土层的应力, 这是由于受地表自由表

面应力散射的影响, 上部土层的应力衰减较快。



(a)



(b)

图 7 侧向附加应力 σ_y 沿侧向 y 的变化

Fig.7 Variation of additional stress σ_y with lateral y

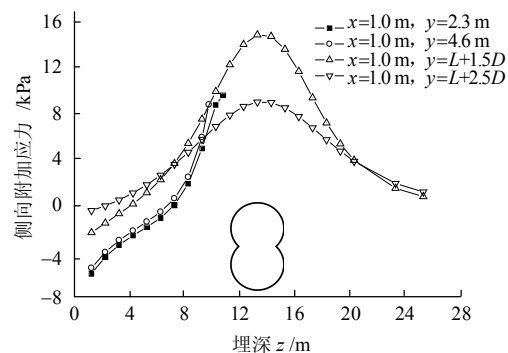


图 8 侧向附加应力 σ_y 沿埋深的变化

Fig.8 Variation of additional stress σ_y with different depths

4.3 共同作用引起的附加应力分析

图 9 为盾构正面附加推力、盾壳与土体侧摩阻力分别作用下引起的正向附加应力 σ_x 沿盾构推进方向 x 的分布 ($y=2.3$ m, $z=13.31$ m)。由图可见, 正面附加推力引起的土体附加应力占很小的比例, 约为 13%, 而且通过土舱压力的正确设定, 动态监测地面沉降并及时反馈, 可以将正面附加推力控制在很小的水平。然而, 由于盾壳与土体的接触面积较大, 盾构掘进时不可避免地对周围土体产生局部扰动。特别是在近距离穿越施工时, 应尽量减慢推进速度, 并利用盾构中心顶部的注浆孔及时填

充润滑材料, 减少凹槽处的背土现象。

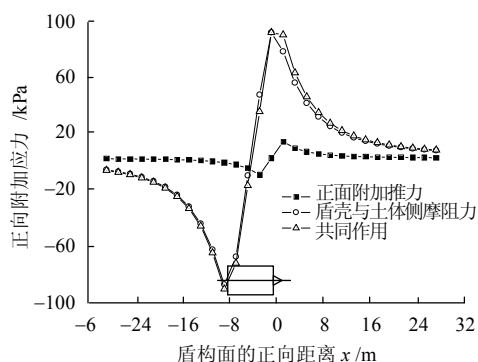


图9 共同作用引起的正向附加应力 σ_x 分布

Fig.9 Distribution of additional stress σ_x in co-operation

5 结 论

通过对双圆盾构掘进引起土体附加应力的分析, 得出如下基本结论:

(1) 由于正面附加推力及侧摩阻力的存在将不可避免地土体产生局部扰动, 并且侧摩阻力对土体的损伤扰动程度更大, 分析时不可忽略。

(2) 在正面附加推力及侧摩阻力作用下, 土体中以沿盾构推进方向的正向附加应力为主, 正向附加应力远大于侧向附加应力。

(3) 双圆盾构掘进对土体扰动具有区域性特征: 沿盾构推进方向, 附加应力在盾构机长度范围前后 $1.0D$ 内达到峰值 (D 为双圆盾构纵向直径, 为 6.52 m), 然后向两端逐步扩散; 垂直于盾构推进方向, 正向或侧向附加应力关于盾构中轴线对称分布, 从应力场的分布可以看出, 由于双圆盾构海鸥形凹槽的存在, 盾壳上部土体背土、挤土效应较明显, 侧面土体则表现为挤压、剪切效应; 沿埋深方向, 盾构中轴线上部的正向附加应力远大于盾构的侧面位置, 而侧向附加应力盾构中心埋深位置大于盾构机的上部。

(4) 对于临近垂直地下管线及建筑物桩基主要

受正向附加应力的影响, 而对于与双圆盾构相平行地下管线则主要受侧向附加应力的影响。

(5) 双圆盾构掘进对土体产生施工扰动, 而后由于盾尾间隙的存在以及土体后期固结的影响, 造成地面沉降。

参 考 文 献

- [1] 周文波, 顾春华. 双圆盾构施工技术[J]. 现代隧道技术, 2004, 41 (4): 22—32.
ZHOU Wen-bo, GU Chun-hua. Construction technique of DOT shield[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2004, 41(4): 22—32.
- [2] 易宏伟, 孙钧. 盾构施工对软黏土的扰动机理分析[J]. 同济大学学报, 2000, 28 (3): 277—281.
YI Hong-wei, SUN Jun. Mechanism analysis of disturbance caused by shield tunneling on soft clays[J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(3): 277—281.
- [3] 李永盛, 黄海鹰. 盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法[J]. 同济大学学报, 1997, 25 (3): 274—280.
LI Yong-sheng, HUANG Hai-ying. Computation of mechanical effects on adjacent piles by shield excavation[J]. *Journal of Tongji University*, 1997, 25(3): 274—280.
- [4] 张冬梅, 黄宏伟, 林平, 等. 地铁盾构推进引起周围土体附加应力的分析[J]. 地下空间, 1999, 19 (5): 379—382.
ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei, LIN Ping, et al. Analysis of superimposed stress induced by shield propulsion[J]. *Underground Space*, 1999, 19(5): 379—382.
- [5] 胡昕, 黄宏伟. 相邻平行顶管推进引起附加荷载的力学分析[J]. 岩土力学, 2001, 22 (1): 75—77.
HU Xin, HUANG Hong-wei. Mechanical analysis of superimposed load induced by propulsion of adjacent parallel pipe[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 75—77.
- [6] 魏纲. 顶管工程土与结构的性状及理论研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [7] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a Semi-Infinite solid[J]. *Physics*, 1936, 7(5): 195—201.
- [8] 吴勃英. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] 张建民, 王刚. 考虑地基液化后大变形的桩-土动力相互作用分析[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44 (3): 429—432.
ZHANG Jian-min, WANG Gang. Pile-soil dynamic interaction analysis considering large post-liquefaction ground deformation[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(3): 429—432.
- [19] 黄群贤, 林建华. 液化侧扩地基中桩基的有限元分析[J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2004, 25 (3): 328—330.
HUANG Qun-xian, LIN Jian-hua. Finite element analysis of the pile in foundation of laterally extending liquefaction[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2004, 25(3): 328—330.