

水平平行顶管引起的地面沉降计算方法研究

魏新江, 魏 纲

(浙江大学城市学院 土木工程系, 杭州 310015)

摘 要: 对水平平行双线顶管之间的相互作用进行了分析, 提出了横向扰动区范围的计算公式。考虑先施工顶管对后施工顶管的影响, 提出了一种新的后施工顶管地面沉降计算方法, 并给出算例分析。分析表明, 水平平行顶管施工时由于中间区域受到双重扰动, 会产生较大的地面沉降。当两顶管轴线距离较近时, 由于先施工顶管对周围土体产生的扰动会使后施工顶管产生的扰动加剧, 后施工顶管引起的最大地面沉降值和沉降槽宽度都要变大, 且地面沉降曲线是不对称的, 其最大沉降点要偏向先施工顶管侧, 但仍然可以采用 Peck 公式进行计算。

关 键 词: 平行顶管; 地面沉降; 土体损失; 土体扰动

中图分类号: TU 434

文献标识码: A

Study on calculational method of ground settlement induced by level parallel pipe jacking

WEI Xin-jiang, WEI Gang

(Department of Civil Engineering, City College Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: The interaction of two level parallel pipe jacking is analyzed; and the calculation of lateral disturbance scope is advanced. Considering the effects of former pipe jacking on the latter, a new calculational method for ground settlement of latter pipe jacking is put forward with an analytical calculation example. It is shown that the ground settlement produced by middle zone is greater because of double disturbance during parallel pipe jacking construction. Also, the surrounding soil disturbance due to former pipe jacking construction will strengthen the disturbance during latter pipe jacking construction when the axes of two pipe jacking are in close quarters. Thus, the maximum ground settlement and width of settlement trough during latter pipe jacking construction become greater. In addition, curves of ground settlement are dissymmetric for latter pipe jacking and can still be calculated with Peck formula. The maximum settlement point on curves leans towards the side of former pipe jacking.

Key words: parallel pipe jacking; ground settlement; ground loss; soil disturbance

1 引 言

近年来顶管施工技术在我国得到迅速发展, 并广泛应用于取排水管道工程中。由于城市地下空间的限制及现有管线的存在, 使近距离双线平行管道的施工成为不可回避的课题。水平平行顶管在工程应用中使用较多, 由于管道之间的相互影响, 水平平行顶管产生的沉降要大于单顶管, 特别是当轴线距离较近时会对周围环境造成较大危害。因此, 预测水平平行顶管施工引起的地面沉降量及影响范围对指导工程施工有重要意义。

目前水平平行顶管施工引起的地面沉降计算方

法主要有两种: 一是不考虑先施工顶管对后施工顶管的影响, 分别独自计算出地面沉降量, 然后叠加得到最终平行顶管施工引起的地面沉降量^[1]; 二是考虑先施工顶管对后施工顶管的影响, 认为后施工顶管引起的土体损失量要大于先施工顶管, 但地面沉降曲线仍然是轴对称的, 其他同方法^[2]。现场实测与有限元模拟结果表明^[3~5], 当两顶管轴线距离较近时, 后施工顶管引起的地面沉降曲线是不对称的(图 1), 采用前面两种计算方法得到的地面沉降曲线与实测不符。本文就这一问题展开研究, 提出了一种新的后施工顶管地面沉降计算方法。

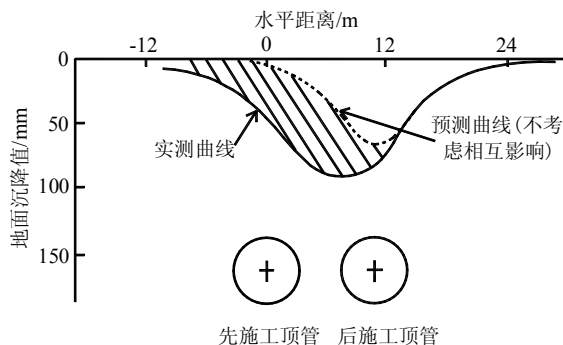
图1 近距离平行顶管引起的地面沉降曲线^[3]

Fig.1 Curves of ground settlement induced by close quarters parallel pipe jacking

2 水平平行顶管地面沉降计算方法

2.1 平行顶管之间相互作用的理论分析

先施工顶管产生的地面沉降曲线一般呈轴对称, 施工引起的土体扰动是不均匀的, 随着离顶管距离的增大而逐渐减小。当两顶管轴线距离较近时, 一方面由于先施工顶管引起土体扰动, 使土体强度降低, 造成后施工顶管引起的土体扰动加剧, 另一方面后施工顶管开挖时周围朝向先施工顶管一侧的土体扰动程度要大于另一侧土体, 施工时该侧的土体损失也要大于另一侧。所以, 后施工顶管由于土体损失引起的最大地面沉降值和沉降槽宽度都要大于先施工顶管, 且地面沉降曲线是不对称的, 其最大沉降点要偏向先施工顶管侧, 但仍然可以采用 Peck 公式进行计算^[3]。

施工结束后, 平行顶管中间区域土体由于受到双重扰动产生的再固结沉降将非常大, 又由于后施工顶管侧土体受扰动程度要比先施工顶管侧大, 其产生的工后沉降也要比先施工顶管侧大, 因此最终地面沉降的最大值会慢慢偏向后施工顶管侧。

2.2 水平平行顶管横向扰动区范围计算

顶管施工时掘进机和后续管道与周围土体之间产生摩擦力, 对周围土体产生拖带效应, 在掘进机周围形成一拖带扰动区。根据极限平衡理论, 对于单顶管, 顶管两侧开挖卸荷扰动区与拖带扰动区相切, 倾角约成 $45^\circ + \varphi/2$ (φ 为土层加权平均内摩擦角), 与主动土压力角一致^[6]。对于平行顶管, 扰动区外侧边界可以认为是由 2 个顶管扰动区叠加而成。横向扰动区分布如图 2 所示, 图中 L 为横向扰动区范围; L' 为扰动重叠区范围; h 为管道轴线深度; B 为两顶管轴线水平距离; R' 为拖带扰动区半径。实际施工中后施工顶管产生的拖带扰动区要大于先施工顶管, 为简化分析, 可假定二者同样大。

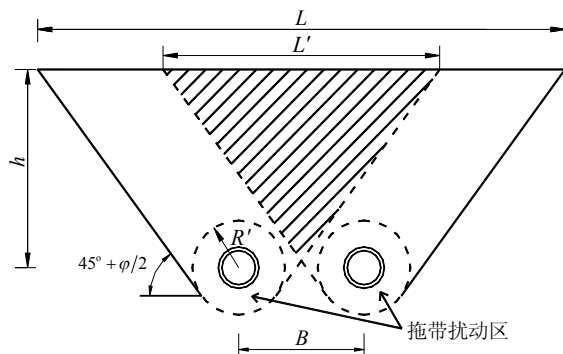


图2 平行顶管横向扰动区示意图

Fig.2 Sketch for lateral disturbance section of parallel pipe jacking

图 2 中阴影部分为两顶管扰动区的重叠区, 该区内土体受到 2 个顶管施工的扰动影响, 受扰动剧烈, 地面沉降要比受单顶管影响区大许多。根据 Cording and Hansmire^[3]的实测结果可知, 对于各种软塑到硬塑的黏土, 地面沉降槽边缘点到轴线的水平距离约为 $h+r$ (r 为管道外半径)。由此可以求得拖带扰动区半径约为

$$R' = \sqrt{(r+h)^2 + h^2} \sin \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} - \arctan \left(\frac{h}{h+r} \right) \right] \quad (1)$$

平行顶管横向扰动区范围的计算公式为

$$L = 2h + 2r + B \quad (2)$$

扰动重叠区范围:

$$L' = 2h + 2r - B \quad (3)$$

由图 2 可知, 当两顶管轴线距离很远时, 先施工顶管对后施工顶管没有影响, 随着两顶管轴线距离的靠近 (但 $B > h+r$), 此时先施工顶管只对后施工顶管轴线一侧的土体产生扰动, 相对影响较小, 可忽略不计, 此时可以采用前面提到的第一种方法来计算平行顶管引起的地面沉降。当两顶管轴线距离较近时 ($B \leq h+r$), 先施工顶管对后施工顶管的扰动影响较大, 此时计算后施工顶管引起的地面沉降时必须考虑该因素。

2.3 单顶管施工引起的地面沉降计算方法

单顶管施工由于土体损失引起的地面沉降计算方法主要有经验法^[7]和解析法^[8]。目前工程界常采用 Peck 提出的地面沉降横向分布估算公式^[7]:

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2I^2}}; S_{\max} = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi}i} \quad (4)$$

式中 $S(x)$ 为地面沉降量(m); x 为离顶管轴线的水平距离(m); $S_{\max}$ 为管道轴线上方的最大地面沉降量

(m); i 为地面沉降槽宽度系数(m); V_l 为隧道单位长度的土体损失量(m^3/m), 通常采用挖掘面面积的百分率来估算土体损失的大小, 令 η 为土体损失百分率, 则 $V_l = \pi r^2 \eta$ 。

O'Reilly 和 New(1982 年)^[9]提出对于黏土当管道轴线深度 $3 \text{ m} \leq h \leq 34 \text{ m}$ 时, i 的经验公式为

$$i = 0.43h + 1.1 \quad (5)$$

2.4 本文计算方法

当两顶管轴线距离较近即 $B \leq h + r$ 时, 由图 2 可以计算得到先施工顶管在后施工顶管侧的扰动区边缘点。根据极限平衡原理, 此处的地面沉降不受先施工顶管的扰动影响, 即该点的沉降值应等于采用单顶管计算方法(土体损失量同先施工顶管)计算得到的沉降值; 且后施工顶管引起的地面沉降槽在远离先施工顶管一侧的边界不变。由此, 笔者提出一种后施工顶管地面沉降的近似计算方法, 具体计算步骤如下:

① 求出先施工顶管的扰动区边缘点位置, 进而求得该点到后施工顶管轴线的距离 $l_1 = h + r - B$;

② 按先施工顶管地面沉降的计算方法, 令单位长度土体损失量为 V_{l1} , 沉降槽宽度系数为 i_1 , 由 Peck 公式可以求得 l_1 点处的地面沉降值为 S_1 ;

③ 根据经验及施工现场情况, 可以估算得到后施工顶管引起的土体损失量为 V_2 ($V_2 > V_{l1}$)。计算时先假定后施工顶管引起的土体损失量 $V_{l2} = V_2$, i_1 不变, 令 Peck 公式计算得到的沉降曲线为曲线 A, 可求得地面沉降值等于 S_1 的点离轴线距离为 l_2 ;

④ 由理论分析可知, 实际 l_1 处引起的地面沉降值应为 S_1 , 所以将曲线 A 向先施工顶管侧平移, 使 l_1 处的沉降值等于 S_1 , 令最大地面沉降值偏离轴线的距离为 l , 则 $l = l_2 - l_1$, l 与 B 相关;

⑤ 由于土体受到先施工顶管的扰动, 后施工顶管引起的地面沉降槽宽度要变大, 令新的沉降槽宽度系数为 i_2 。假定地面沉降槽总的宽度为沉降槽宽度系数的 6 倍^[10], 即 $3i_2 = 3i_1 + l$, 可以求得 i_2 ;

⑥ 由公式 $S_1 = \frac{V_{l3}}{\sqrt{2\pi i_2}} \exp\left[-\frac{l_2^2}{2i_2^2}\right]$ 求得实际土体损失量 V_{l3} ;

⑦ 如 V_{l3} 与假定的后施工顶管土体损失量 V_2 相差较大, 则应相应调整 V_2 , 重新计算得到一个新的 V_{l3} , 使之与 V_2 接近。重复以上步骤, 可以得到一个与 V_2 近似的 V_{l3} ;

⑧ 已知 l 、 V_{l3} 、 i_2 , 令沉降曲线的零点偏离轴

线距离为 l , 采用 Peck 公式就可以求得后施工顶管的地面沉降曲线。先施工顶管的地面沉降曲线采用 Peck 公式计算, 参数取 V_{l1} 、 i_1 , 将先施工顶管和后施工顶管的地面沉降曲线叠加就得到水平平行顶管的最终地面沉降曲线。

3 算例分析

已知某水平平行双线顶管, 均采用内径为 2 800 mm, 壁厚 300 mm 的钢筋混凝土圆形管道, 该管道位于淤泥质粉质黏土层, 两顶管轴线距离 B 为 10 m, 管道轴线深度 $h = 19.09 \text{ m}$, 管道外半径 $r = 1.7 \text{ m}$ 。

由式 (5) 可以求得 $i_1 = 9.309 \text{ m}$, 先施工顶管的土体损失百分率按 4 % 计算, 即 $V_{l1} = 0.363 \text{ m}^3/\text{m}$ 。采用本文方法, 假定后施工顶管的土体损失百分率按 5 % 计算, 则 $V_{l2} = 0.454 \text{ m}^3/\text{m}$, 求得 $l_2 = 12.454 \text{ m}$, $l = 1.664 \text{ m}$, $i_2 = 9.864 \text{ m}$, $V_{l3} = 0.436 \text{ m}^3/\text{m}$ 。采用相同方法, 分别假定后施工顶管的土体损失百分率取 6 % 和 7 %, 计算得到 $l = 2.874 \text{ m}$ 和 3.819 m 。由此计算得到的后施工顶管地面沉降曲线见图 3, 图中 0 点为后施工顶管轴线处, 先施工顶管轴线位于 -5 m 处, 土体损失百分率取 4 % 时即不考虑先施工顶管的影响。由图 3 可见, 按本文方法计算得到的后施工顶管地面沉降曲线与图 1 的实测地面沉降曲线形状非常相似, 表明本文方法具有实用性。先施工顶管产生的土体扰动越大, 后施工顶管的土体损失量取值就越大, 后施工顶管产生的最大沉降值、沉降槽宽度和偏心距 l 也越大。因此, 在先施工顶管施工时应尽可能的减小对周围土体的扰动。分别取两顶管轴线距离 B 为 6, 10, 20 m 和 30 m, 后施工顶管的土体损失百分率分别按 6 %, 5.6 %, 4.3 % 和 4 % 计算, 计算得到的后施工顶管地面沉降与先施工顶管地面沉降进行叠加, 得到平行顶管总的地面沉降, 计算结果见图 4 (图中 0 点为先施工顶管轴线处, 后施工顶管轴线在图中右侧)。当 $B = 10 \text{ m}$ 时计算结果与现场实测数据较吻合; 当两顶管轴线距离较近时, 考虑先施工顶管对后施工顶管的影响, 两顶管中间区域地面沉降相当大, 最大沉降点偏向先施工顶管侧。随着两顶管轴线距离增大, 两顶管的相互影响逐渐减小, 中间区域的地面沉降要明显减小, 地面沉降曲线的形状也由“V”型逐渐向“锅底”状过渡。当两顶管轴线距离较大时, 可以忽略先施工顶管对后施工顶管的影响, 此时地面沉降曲线呈“W”型, 峰值出现在两个顶管轴线处。

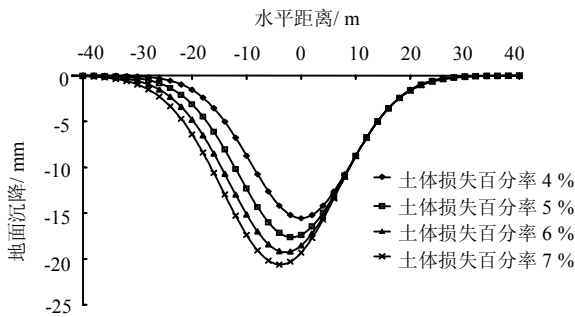


图3 后施工顶管引起的地面沉降曲线
Fig.3 Curves of ground settlement induced by latter pipe jacking

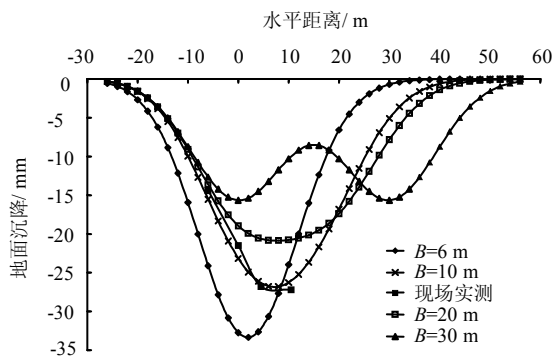


图4 水平平行顶管引起的地面沉降曲线
Fig.4 Curves of ground settlement induced by level parallel pipe jacking

4 结 语

水平平行顶管施工引起的横向地面沉降曲线形状与两顶管轴线距离有关。当距离较远时,可忽略先施工顶管对后施工顶管的影响;当距离较近时,先施工顶管对周围土体产生的扰动会使后施工顶管施工时产生的扰动加剧,后施工顶管由土体损失引起的最大地面沉降值和沉降槽宽度都要变大,且地面沉降曲线是不对称的,其最大沉降点要向先施工顶管方向偏移。中间区域由于受到双重扰动,会产生较大的地面沉降,因此应尽可能地减小先施工顶管引起的土体扰动程度。

本文方法是一种简化计算方法,目前先施工顶管与后施工顶管之间的相互作用还不是很清楚,后施工顶管引起土体损失量的取值是经验性的,可能会产生误差。对于水平平行顶管引起的地面变形计算方法还需要作进一步地研究。

参 考 文 献

[1] 屠毓敏. 长距离顶管穿越海堤时的堤面沉降分析[J]. 中国市政工程, 2001, (1): 53—55.

TU Yu-min. Surface settlement from long distance pipe jacking through an embankment[J]. **China Civil Engineering**, 2001, (1): 53—55.

- [2] 胡熹竹. 大口径管道前后同步平行顶进施工法初探[J]. 上海市政工程, 1999, (1): 30—33.
HU Xi-zhu. Primary study on construction methods by parallel piping by synchronism before and after piles with large-aperture[J]. **Shanghai Municipal Engineering**, 1999, (1): 30—33.
- [3] Cording E J, Hansmire W H. Displacements around soft ground tunnels[A]. **5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Argentina: [s. n.], 1975. 571—633.
- [4] Bartlett J V, Bubbers B L. Surface movements caused by bored tunnelling[A]. **Conference on Subway Construction**[C]. [s. l.]: Budapest-Balatonfured, 1970. 513—539.
- [5] Addenbrooke T I, Potts D M. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects[J]. **The International Journal of Geomechanics**, 2001, 1(2): 249—271.
- [6] 魏纲, 徐日庆, 屠玮. 顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 476—482.
WEI Gang, XU Ri-qing, TU Wei. Testing study and analysis of soil disturbance induced by pipe jacking construction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 476—482.
- [7] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [A]. **7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Mexico City: [s. n.], 1969. 225—290.
- [8] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(9): 846—856.
- [9] O'Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction[A]. **Proceedings of Tunneling'82**[C]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982, 137—181.
- [10] 易宏伟. 盾构施工对土体扰动与地层移动影响的研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.