

# 管幕内顶进箱涵的前端网格长度合理设计

肖世国, 夏才初, 李向阳, 朱合华, 刘学增

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 上海市中环线虹许路北虹路下立交工程是目前世界上在饱和含水软土地层中施工的截面最大的管幕法工程。为保证在管幕内顶进大断面箱涵(前端嵌固钢板制网格框架)的施工过程中开挖面的稳定性, 在网格横截面尺寸一定的情况下, 设计合理的网格长度就十分重要。在考虑箱涵上部管幕允许沉降变形的基础上, 根据作用于网格内壁土压力的分布模式, 并兼顾考虑实际操作的可行性, 给出了网格长度的较为合理的设计计算方法, 详细计算出了较为合理的网格长度, 较好地满足了各主要控制因素。

**关键词:** 管幕; 箱涵; 网格; 土压力

中图分类号: TU 47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)11-1306-04

作者简介: 肖世国(1973-), 男, 博士后, 主要从事岩土工程与地下结构方面的研究工作。

## Design method for length of grids inserted in the front of a box culvert surrounded by pipe-roof

XIAO Shi-guo, XIA Cai-chu, LI Xiang-yang, ZHU He-hua, LIU Xue-zeng

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The subway crossing project through Hongxu Road is a pipe-roof project with the largest cross-section box culvert in the world now. It is constructed in saturated soft soil stratum in the Beihong Road located in Shanghai. In order to keep the cutting surface stable while the pipe-roof is pushed into the box culvert with many steel grids, it is very important to design rational length of grids with the given cross-section. On the basis of allowable vertical deflection of pipes over the culvert and mechanical model of earth pressure acting on inner plates of a grid, rational approach to design length of grids was given in some practical projects. Finally feasible length of grids was rationally given in detail for the practical project.

**Key words:** pipe-roof; box culvert; grid; earth pressure

## 0 引言

上海市中环线虹许路北虹路下立交工程设计采用管幕结合箱涵顶进的施工方法, 箱涵结构横断面外包尺寸为  $34\text{ m} \times 7.85\text{ m}$ , 管幕穿越段全长约  $125\text{ m}$ , 箱涵采用钢筋混凝土结构, 分 8 节预制, 每节长度为  $15.5\text{ m}$ 。这是我国第一次引进管幕法工艺施工, 也是世界上在饱和含水软土地层中施工的横断面最大的管幕法工程<sup>[1-3]</sup>。由于本工程是在上海地区含水率很高的淤泥质软粘土中施工, 在工程周边地面环境保护要求较高的情况下, 采用管幕内顶进箱涵的方法施工就必须考虑开挖工作面及其前方土体的稳定性问题, 因为这涉及到地面是否沉陷破坏。在国外类似工程中, 一般采用注浆预加固的方法来稳定开挖面及其前方土体<sup>[1, 2]</sup>, 但会涉及到不便于施工操作的一些问题。为此在本工程中拟采用在箱涵前端嵌固钢板制的网格框架的方法, 随着箱涵的顶进, 网格楔入土中, 在网格后端开挖挤动出的土体, 通过网格内的土体与网格内壁间的

摩阻力来平衡网格前端面的土压力, 以此达到在箱涵顶进过程中稳定开挖面(网格后端面)及其前方土体的目的。该摩阻力大小是与网格尺寸有密切关系的, 在确定出网格横截面尺寸后(算法参见文献[4]), 设计合理的网格长度对于开挖面及其前方土体的稳定性就显得十分重要。由于管幕在箱涵推进过程中起着十分重要的力学作用, 因此, 在考虑箱涵顶部管幕允许沉降变形的基础上, 结合作用于网格内壁土压力的分布模式<sup>[6]</sup>, 详细讨论箱涵以较为缓慢的速度推进过程中网格长度的经济合理确定问题。

## 1 基本假定

(1) 在箱涵以较为缓慢的速度顶进并开挖土体

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2004035493); 上海市科学技术委员会科研计划重大项目(04dz12004)

收稿日期: 2005-01-18

(即箱涵前方土体处于超挖状态)的过程中, 随着从网格后端挤出的土体的挖除, 网格外前方土体产生一定量的向开挖面的挤动后而达到新的平衡状态, 假定此时网格前方土体处于主动极限平衡状态。这实际上是在较为缓慢的箱涵推进速度下, 同一网格截面时所需要最小网格长度应满足的情况。

(2) 假设箱涵上部钢管下面的土体满足 Winkler 假定条件, 即将钢管视为置于 Winkler 地基上的弹性地基梁。

(3) 钢管间设置横向锁口连接, 但由于其抗弯刚度相对于钢管较弱, 所以就不计顶部钢管间横向锁口的约束作用, 取中间部分的一根钢管为研究对象。

## 2 力学分析

### 2.1 管幕力学作用

箱涵由一侧工作井(出发井)向另一侧工作井(接受井)缓慢顶进过程中其前端土体以及管幕的分析示意图如图 1 所示。由假定(1), 在箱涵缓慢顶进开挖过程中, 网格外前方土体  $ABFED$  达到主动极限平衡状态。其间先是在箱涵净高范围内的土体  $DFE$  沿极限滑动破裂面  $FE$  滑动, 然后为其上部 ( $DF$  面以上)的土体顺势下移滑动。于是造成相应一定长度段 ( $AB$  段, 长度为  $z$ ) 的管幕出现下部支撑的部分卸荷状态, 即由开挖操作前的原始自重应力状态变成新的应力状态。若设  $AB$  段钢管下面的土压力在开挖前为  $p_0$ , 在开挖滑动稳定后为  $p_1$ , 则因开挖操作而使此处产生的卸荷量  $\Delta p = p_0 - p_1$ , 而该  $\Delta p$  就是作用于该钢管上的使钢管产生挠曲的附加作用力, 或者说  $\Delta p$  就是管幕发挥承载作用而承担的上覆土体的压应力。也就是说, 从力学效果等价角度分析, 可以认为该钢管在外力  $\Delta p$  的作用下而产生了挠曲变形, 即  $\Delta p$  直接作用于钢管的  $AB$  段, 然后通过其端截面  $A$ 、 $B$  再向两侧传递, 分别作用于钢管的  $OA$  段与  $BO'$  段。具体地说, 其分析模型就是将  $AB$  段钢管视为在  $\Delta p$  的作用下的两端固定梁, 而  $OA$  段与  $BO'$  段则是在  $A$  端及  $B$  端集中荷载作用下的弹性地基梁, 其示意图如图 2 所示, 其中  $Q_A$ 、 $M_A$  与  $Q_B$ 、 $M_B$  分别为  $A$ 、 $B$  截面处的剪力与弯矩。

伴随着管幕的挠曲变形地面就会产生相应的沉降, 因此从地面环境保护等角度考虑, 地面的沉降变形应有一定的限制, 设其最大沉降量限制为  $[\delta]$ , 则管幕的最大挠度不能超过  $[\delta]$ 。这是管幕变形的主要控制条件, 也是其发挥承载作用的前提条件。同时, 在顶部管幕下土体挤动后达到新的平衡状态时, 管幕下土体的附加压应力应不超过该土体相应的容许承载力  $[\sigma]$ 。因此, 可由这两个条件分析管幕的主要力学作用,

并进而可确定出网格前方松动区的顶部宽度。

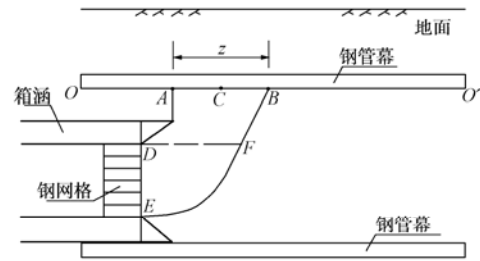


图 1 箱涵前方土体及管幕分析示意图

Fig. 1 Mechanical analysis on soil in front of the culvert and pipe-roof over the culvert

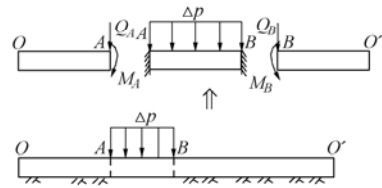


图 2 钢管简化计算模型示意图

Fig. 2 Simple calculation model of a steel pipe

另外, 在分析作用于钢管上的分布荷载时, 需要考虑钢管间距, 相邻两钢管的中间距为钢管外径与锁口宽度之和。在实际工程中从减小地面变形考虑应尽量减小顶部管幕与箱涵间的垂直距离(建筑空隙), 即该建筑空隙一般较小(如: 本工程中设为 20 cm), 所以就不计其对箱涵前方土体滑动的影响以简化分析。

在实际工程中, 常常将管幕纵向端点固定在两侧工作井壁的地下连续墙上, 相当于将钢管的端点固定约束。钢管一般相对较长(如: 本工程中全长约为 125 m), 因此在箱涵顶进一小段距离(本工程中约为 13 m)以后(即进入箱涵顶进的主要阶段),  $OA$  段及  $BO'$  段均可按长梁<sup>[5]</sup>计算, 于是  $A$ 、 $B$  两点的竖向位移可近似认为相等(严格地说, 在箱涵顶进初始阶段,  $A$ 、 $B$  两点的位移是不完全相等的)。另外, 由力学分析易知, 钢管上的最大挠度一般出现在  $AB$  段中点  $C$  处。由前述钢管分析模型可得,  $C$  点的挠度  $x_C$  应为  $AB$  段梁的相对挠度  $f_C$  与“支座” $B$  处(弹性地基梁  $BO'$  段的端点)的挠度  $x_B$  的和, 根据材料力学及弹性地基梁<sup>[5]</sup>分析可得

$$x_C = qz^4 / (384EI) + 2\alpha(Q_0 + \alpha M_0) / (Bk) \quad (1)$$

式中  $q = \Delta pB$ ;  $B$  为钢管的计算宽度;  $EI$  为钢管截面的抗弯刚度;  $\alpha$  为弹性地基梁的特征系数, 即  $\alpha = \sqrt[4]{kB / (4EI)}$ ;  $k$  为钢管下部土体的弹性地基系数。  $Q_0$  和  $M_0$  分别为  $A$  或  $B$  截面处的剪力和弯矩, 按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= qz/2, \\ M_0 &= qz^2/12. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这样, 由式 (1), 管幕挠度的控制条件为

$$qz^4/(384EI) + \alpha qz(1 + \alpha z/6)/(Bk) \leq [\delta] \quad (3)$$

同时, 根据弹性地基梁<sup>[5]</sup>分析可得管幕下土体的最大附加压应力在 A、B 点, 最大附加应力

$$\sigma_{\max} = 2\alpha(O_0 + \alpha M_0)/B \quad (4)$$

于是, 根据式 (2) 与式 (4), 管幕下土体的附加压应力条件为

$$\alpha qz(1 + \alpha z/6)/B \leq [\sigma]/K_s \quad (5)$$

式中  $K_s$  为安全系数。

把式 (3), (5) 联立, 可求得  $z$  和  $q$ , 网格前方土体的松动区顶部宽度及管幕下的土压力也可求得。

### 2.2 网格长度的确定

随着箱涵的顶进, 同步开挖网格后端挤出的土体, 在每次开挖完成后, 开挖面土体达到稳定的平衡状态时, 网格内土体的二维受力图式如图 3 所示 ( $R_a$ 、 $R_b$  分别为网格顶板与底板的摩擦阻力, 网格内侧壁摩擦阻力未表示, 为简化计算, 平衡后的开挖面仍按平面处理)。其中  $p_s$  为网格前端外顶部的竖向土压应力,  $k_a$  为主动土压力系数,  $\bar{a}$  为箱涵前方土体的天然重度,  $b$  为网格截面高度, 由于  $b$  一般选择小于土体自稳高度<sup>[4]</sup>, 因此稳定后的开挖面即为网格后端面<sup>[6]</sup>。在开挖面稳定时, 由静力平衡条件, 对于网格内土体进行整体受力分析有: 网格内壁提供的总摩擦阻力  $R$  等于作用于网格前端面上的总压力  $T$ 。根据文献[6]阐述的作用于网格内壁土压力的指数分布模式, 经积分整理后可得总摩擦阻力

$$R = 2c_0(a+b) + b(1+k_0)\tan\varphi_0[2a_3e^{a_2z}/a_2^2 + (\gamma b - 2a_3/a_2)L] \quad (6)$$

式中  $a$  为网格截面横向宽度;  $L$  为网格长度;  $c_0$ 、 $\varphi_0$  为土体与网格内壁间的粘聚力、外摩擦角;  $k_0$  为网格内土体横向间的侧压力系数, 可近似按静止土压力系数计算;  $a_2$ 、 $a_3$  为系数, 按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= [2\tan\varphi_0(a+k_0b)]/(k_1ab), \\ a_3 &= [2c_0(a+b) + \tan\varphi_0\gamma b(a+k_0b)]/(k_1ab). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中  $k_1$  为网格内土体纵向间的侧压力系数, 可近似按主动土压力系数计算。

由前述网格前方土体达到主动极限平衡状态, 所以作用于网格前端面上的合土压力

$$T = k_a(p_s + \gamma b/2)ab \quad (8)$$

这样, 由  $R=T$ , 则根据式 (6)、式 (8) 可得

$$2c_0(a+b) + b(1+k_0)\tan\varphi_0[2a_3e^{a_2z}/a_2^2 + (\gamma b - 2a_3/a_2)L] = k_a(p_s + \gamma b/2)ab \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 在网格截面尺寸一定的情况下,

$L$  值就可以确定下来。另外, 还可以根据文献[6]所述的作用于网格内壁土压力的指数分布模式利用在  $z=L$  处的边界条件计算  $L$  值。从理论上讲, 二者结果应该是一致的, 这里就不再赘述。

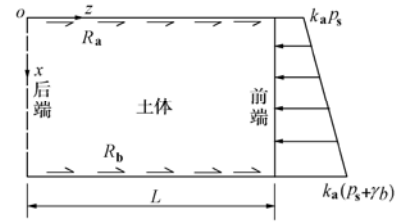


图 3 网格内土体二维受力图式

Fig. 3 Two dimensional sketch drawing of soil in a grid

在实际工程中, 在确定出网格横截面尺寸以后, 应尽量设计合理的网格长度, 若网格长度过长, 则会增加箱涵顶进阻力, 提高工程造价; 而网格长度过短, 就会使箱涵前方土体发生滑动失稳, 进而导致地面出现过大的沉降变形, 甚至出现工程事故。另外, 由于箱涵前方扰动区内土体力学性质可能有所变化, 为安全起见, 在设计网格长度时, 土体的物理力学性质要以现场实测结果为主要参考, 且强度参数宜取快剪指标。若箱涵前方会出现不同土层, 则应以力学性较差的土体参数作为参考。另外, 由于实际工程多处于软弱粘土地层中, 土体中的渗流速度较慢, 所以就不考虑渗流场的作用; 同时, 在实际管幕内缓慢顶进箱涵的过程中, 箱涵前方扰动区附近的地下水位一般降低较快, 所以也不考虑水压力的作用, 以此简化分析。

### 3 实例计算

本工程条件下, 室内试验测得土体的粘聚力与内摩擦角 (快剪指标) 分别为:  $c = 10 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 10.5^\circ$ , 土体的天然重度为  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ 。同时, 取有效内摩擦角为  $\varphi' = 13^\circ$ , 土体与钢板间的粘聚力约为土体粘聚力的 1/3, 外摩擦角约为土体内摩擦角的 2/3, 即  $c_0 = 3 \text{ kPa}$ ,  $\varphi_0 = 7^\circ$ 。管幕下土体容许承载力取为  $[\sigma] = 130 \text{ kPa}$ , 相应安全系数取为  $K_s = 1.05$ 。管幕的允许沉降挠曲量  $[\delta] = 30 \text{ mm}$ 。构成管幕的钢管外径为  $970 \text{ mm}$ , 壁厚  $10 \text{ mm}$ , 相邻两钢管中一中间距为  $B = 1.1 \text{ m}$ , 钢管的弹性模量取为  $E = 210 \text{ GPa}$ 。钢管下部土体的弹性地基系数取为  $k = 5000 \text{ kN/m}^3$ 。管幕上覆土体高度为  $4.8 \text{ m}$ , 单根钢管 (包括横向锁口部分) 的当量土柱高度取为  $0.2 \text{ m}$ 。箱涵内底板距顶部管幕底面深度  $h_1 = 6.65 \text{ m}$ , 内顶板距顶部管幕底面深度  $h_2 = 1.5 \text{ m}$ 。在各网格中, 最靠近底板的网格就要提供最大的摩擦阻力, 而最靠近顶板的网格就提供相对最小的摩擦阻力, 因此这两类网格是两种极端情况, 其它网格长度则介于这两类

网格长度之间。下面就按前述方法设计这两类网格的长度。

静止土压力系数  $k_0$  按文献[7]方法近似计算, 即  $k_0 = 0.95 - \sin\varphi' = 0.725$ 。

首先, 根据文献[4], 在试验土体的情况下, 网格截面尺寸可取为  $a = b = 0.6 \text{ m}$ 。

其次, 把相关参数代入式 (3)、式 (5), 并解二者联立方程组可得网格前方土体松动区顶部宽度  $z = 14.68 \text{ m}$ , 管幕承担的上覆土体附加线分布力  $q = 30.0 \text{ kN/m}$ 。

于是, 可算得管幕下面的土压力, 即

$$p_1 = p_0 - q/B = 18 \times (4.8 + 0.2) - 30.0/1.1 = 62.73 \text{ kPa}。$$

最后, 对于最底一排网格, 其前端外顶部竖向土压力  $p_s = p_1 + \bar{\alpha}(h_1 - b) = 171.63 \text{ kPa}$ , 而最顶一排网格相应则为  $p_s = 89.73 \text{ kPa}$ 。将相应各参数代入式 (9), 可得最底、顶一排各网格的长度  $L_1$ 、 $L_2$  分别为:

$$L_1 = 1.623 \text{ m}, L_2 = 1.016 \text{ m}, \text{ 实可取 } L_1 = 1.65 \text{ m}, L_2 = 1.05 \text{ m}。$$

若需再适当减小网格长度, 则可以将网格截面尺寸适当减小再进行计算与调整, 这里就不再赘述。

总之, 在箱涵以较为缓慢的速度推进过程中, 在试验土体的情况下, 若网格截面尺寸取为  $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$  (宽  $\times$  高), 则相应网格长度的设计值可以取为: 最底一排为  $1.65 \text{ m}$ , 最顶一排为  $1.05 \text{ m}$ 。

## 4 结 语

在管幕内较为缓慢的推进箱涵过程中, 在网格横截面尺寸一定的情况下, 设计合理的网格长度就十分重要, 它涉及到开挖面的稳定性及地面是否沉降破坏

的问题。本文在考虑箱涵上部管幕允许沉降变形的基础上, 根据作用于网格内壁土压力的分布模式, 给出了网格长度的较为经济合理的设计计算方法。在试验土体的情况下, 若网格截面尺寸取为  $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$  (宽  $\times$  高), 则网格长度可以取为: 最底一排为  $1.65 \text{ m}$ 、最顶一排为  $1.05 \text{ m}$ , 这种结果能较好地满足各主要控制条件, 因而是较为经济合理的。本文的设计计算方法可以为其它类似工程提供一定的参考。

## 参考文献:

- [1] 山添喬, 余村仁, 高原好孝, 池田亨, 藤田義教, 安藤進. 近畿自動車道松原海南線桧尾工事—ESA 工法による大断面ボックスカルバートの推進施工[J]. 土木施工, 1991, 32(12):1 - 12.
- [2] 金子益雄, 柴田一之, 加藤建治. フロンテッジヤッキンク工法による高速自動車道直下の大断面トンネルの施工—大成田線トンネル工事[J]. 土木施工, 2003, 44(4):2 - 10.
- [3] 上海市第二市政工程有限公司. 中环线北虹路(虹桥路—虹古路)地道工程招标文件[R]. 上海:上海市第二市政工程有限公司, 2003.
- [4] 肖世国, 夏才初, 李向阳, 等. 管幕内顶进箱涵前端网格横截面尺寸确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14):2593 - 2596.
- [5] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 刘朝. 地下工程支护结构[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003:190 - 210.
- [6] 肖世国, 朱合华, 李向阳, 等. 管幕内顶进箱涵前端网格内壁土压力分布模式[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8):908 - 911.
- [7] 刘成宇. 土力学[M]. 北京:中国铁道出版社 1990:85 - 202.