

管幕内箱涵顶进中顶部管幕竖向变形预测

肖世国¹, 夏才初², 朱合华², 李向阳², 刘学增²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 同济大学 土木工程学院, 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横截面最大的管幕法工程。针对实际箱涵顶进施工过程中顶部管幕出现的以隆起为主的竖向变形, 根据对箱涵前方滑动土体及箱涵体的力学分析, 确定作用于顶部管幕下的附加荷载, 进而将顶部中间部分的钢管视为在该附加荷载作用下的倒置于 Winkler 地基上的弹性地基梁, 以此模型预测分析顶部中间部分钢管幕的竖向变形, 并同实测结果进行比较, 发现二者在规律及大小上都较为接近, 说明该预测分析方法具有一定的合理性。

关键词: 隧道工程; 管幕; 箱涵; 竖向变形; Winkler 地基

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)09 - 1887 - 06

VERTICAL DEFORMATION PREDICTION ON UPPER PIPE-ROOF DURING A BOX CULVERT BEING PUSHED WITHIN A PIPE-ROOF

XIAO Shiguo¹, XIA Caichu², ZHU Hehua², LI Xiangyang², LIU Xuezeng²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Up to now, the subway crossing project through Hongxu Road is a pipe-roof project with the biggest cross-section of box culvert in the world. It is constructed in saturated soft soil stratum in the Beihong Road located in the middle ring-road in Shanghai. During the box culvert being pushed within the steel pipe-roof in the practical construction, the upper pipe-roof presents mainly upheaving deformation. According to analyzing mechanical equilibrium conditions on the culvert and sliding soil mass in front of it, the additional load on the upper pipe-roof is got. One of the upper and middle steel pipes can be thought of as a beam laid conversely on Winkler foundation and pressed by the additional load. The vertical deformation of the upper and middle steel pipe-roof can be predicted by the mechanical model. The theoretical results are compared with the monitoring results during the culvert being pushed. It is found that they are approximately same on variation characteristics and values, which shows the prediction method is reasonable in some degree.

Key words: tunneling engineering; pipe-roof; box culvert; vertical deformation; Winkler foundation

1 引言

上海市中环线虹许路北虹路下立交工程设计采

用管幕内箱涵顶进的施工方法, 箱涵横断面的外包尺寸为 34.00 m×7.85 m。这样大断面的矩形隧道在国内外少见报道, 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

收稿日期: 2005 - 05 - 20; **修回日期:** 2005 - 07 - 20

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项目(04dz12004)

作者简介: 肖世国(1973 -), 男, 博士, 1995年毕业于上海铁道大学铁道工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土体大变形分析及其控制等方面的教学与研究工作。E-mail: xiaoshiguo2003@tom.com

面最大的管幕法工程^[1~6]。该工程的平面及横断面示意图见图 1。工程轴线基本呈南北走向，管幕段位于在南北工作井之间，穿越虹桥路和西郊宾馆的树林，净距约 125 m。管幕段由 80 根 $\phi 970$ mm(壁厚 10 mm)的带横向锁口且呈“口”字型的钢管组成，管顶覆土厚度约 4.8 m。箱涵在工作井内预制，每节长度为 15.5 m，共 8 节，其侧墙厚度为 1.0 m，中隔墙厚度为 0.8 m，顶板厚度为 1.3 m，底板厚度为 1.4 m。该穿越工程处于上海地区含水量很高的淤泥质软黏土地层中。在箱涵顶进过程中，管幕的竖向变形与箱涵前方开挖面土体的稳定性有密切关系，并受箱涵顶进速度、注浆压力大小、掘进面稳定措施及出土方式等因素影响。关于管幕内顶进箱涵过程中顶部管幕竖向变形较为深入的理论预测分析，国内外相关报道并不多见。已有的相关研究主要是采用数值模拟的方法来近似分析管幕变形问题^[2, 7]，所得规律对实际工程有一定的参考意义，但在数量和精度上则存在明显的不足。对于本工程而言，在实际施工过程中，由于箱涵顶进速度稍快，注浆压力较大，而且不开挖用以稳定掘进面的网格内的土体，致使顶部管幕主要产生隆起变形。为了在施工中能够及时深入地认识到管幕的竖向变形，以便对可能出现的过大变形采取必要的处理措施，保证施工顺利进行，并旨在理论上说明分析问题的方法，本文采用理论解析的方法讨论实际施工中顶部管幕竖向变形的预测方法。

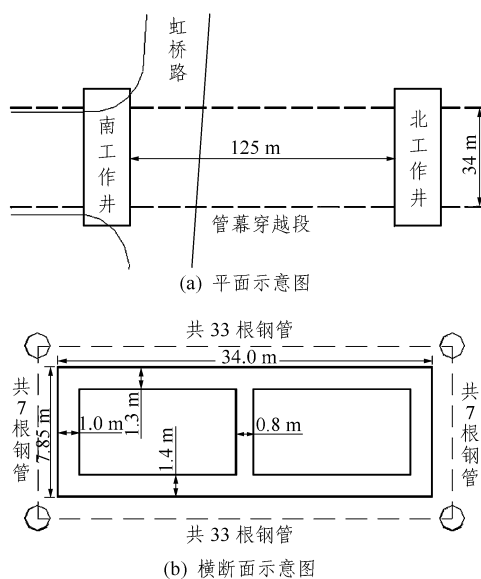


图 1 工程概况示意图

Fig.1 Sketch map of a practical construction

2 隆起变形力学原因

在箱涵顶进施工中，挖除从网格后端挤出的土体，由于箱涵具有一定的顶进速率，常常使得箱涵前方土体处于欠挖状态，从而使箱涵前方的部分顶部管幕段出现隆起现象。同时，由于实际施工中在箱涵的上、下、左、右侧均采用注入减阻泥浆的措施，而注浆应力(100~200 kPa)相对箱涵体的自重应力(78 kPa)较大，因而致使箱涵很有可能悬浮离开底部管幕而与顶部管幕直接接触，进而在箱涵与顶部管幕间又产生相互挤压作用力，于是造成相应段的管幕出现隆起现象，在这两种主要力学作用下，顶部管幕会出现隆起变形。由于管幕的横向锁口连接较弱，为简化力学分析，对于顶部管幕中间部分的钢管就不计其横向锁口对钢管的约束作用，同时由于顶部管幕上部覆盖有 4.8 m 厚的软弱黏土层，所以顶部管幕中间部分的每根钢管就可视为在这两种力学模型作用下倒置于软弱黏土地基上的梁。由于 Winkler 假定在软弱黏土地层中有相对较好的适用性^[8]，因此，可以将顶部管幕中间部分的每根钢管视为倒置于 Winkler 地基上的弹性地基梁，本文就讨论用这种力学模型计算预测箱涵顶进过程中顶部中间部分管幕的竖向变形。

3 箱涵前方土体及箱涵受力分析

3.1 箱涵前方土体受力分析

随着箱涵的推进挤压，挖除从网格后端挤出的土体，在箱涵前方一定范围内的土体产生隆起，进而挤压其上部的钢管幕。根据室内模型试验结果^[9]以及周顺华等^[10]的叙述，该影响范围约为距箱涵前端面 2 倍箱涵高度的距离之内。为简化分析，假定该影响区域内的土体滑移面为直线^[10]，并将滑动的土体整体视为刚体，则单位厚度该滑动土体的整体力学分析模型如图 2 所示。图 2 中， p_u 为土体滑动对顶部钢管幕产生的压力，近似按均匀分布计算； θ 为土体滑移面与垂直方向的夹角，由前述可知有 $\tan\theta = 2$ ； H 为箱涵高度； σ_n 、 τ_n 分别为作用于滑移面上的平均正应力和剪应力，由土体强度条件易知， $\tau_n = c + \sigma_n \tan\phi$ ，其中， c 、 ϕ 分别为土体的黏聚力和内摩擦角； τ_u 为滑移部分的土体与顶部钢管幕间的剪应力，且有 $\tau_u = c_0 + p_u \tan\phi_0$ ，其中 c_0 、 ϕ_0 分别为土体与钢管间的黏聚力和外摩擦角； R_n 为箱涵迎面阻

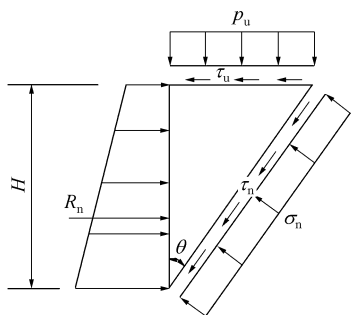


图 2 单位厚度滑动土体的整体力学分析模型

Fig.2 Mechanical model for sliding soil mass with unit thickness in front of culvert

力，可近似按被动土压力计算：

$$R_n = (\gamma H k_p / 2 + k_p p_u + 2c \sqrt{k_p}) H \quad (1)$$

式中： γ 为土体重度， k_p 为土体的被动土压力系数。

对于该单位厚度的滑动土体，由力学平衡条件可得

$$\left. \begin{aligned} R_n \sin \theta &= p_u H \sin \theta + (c + \sigma_n \tan \varphi) H / \cos \theta + \\ &\quad (c_0 + p_u \tan \varphi_0) H \sin \theta \tan \theta \\ \sigma_n H / \cos \theta + (c_0 + p_u \tan \varphi_0) H \sin \theta &= \\ R_n \cos \theta + p_u H \sin \theta \tan \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

联立式(1)与(2)可解出 p_u 。

3.2 箱涵受力分析

为了充分分析作用于顶部管幕下的箱涵与管幕间的接触压力，应以箱涵为研究对象对其进行力学分析，如图 3 所示。其中， p_g 、 τ_1 分别为箱涵与顶部管幕间的接触压力和摩阻力； σ_{gb} 、 τ_2 分别为箱涵底部与泥浆间的正应力和摩阻力； W 为箱涵的重力； T 为箱涵的推进力； x 、 z 向分别表示竖直方向和水平方向； O 点为箱涵的重心。此外，箱涵两侧面还分别受到注浆压力(设其中心点处之值为 σ_g)的作用，在图 3 中未表示出来。

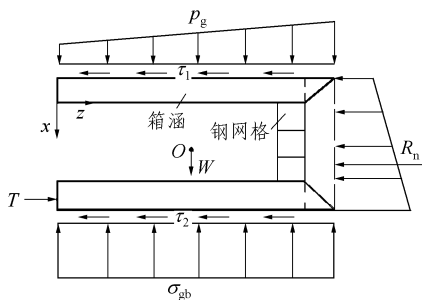


图 3 箱涵受力分析示意图

Fig.3 Mechanical model for culvert

在箱涵推进过程中，箱涵在外力作用下常常出现前端先于后端翘起的现象，因此箱涵顶部与管幕间的接触应力通常呈前端大后端小的情况，同时根据节 2 中关于顶部管幕隆起变形原因的分析，箱涵顶部与管幕间通常为直接接触，所以这里就假定该接触应力随箱涵顶进长度呈线性分布的形式，即 $p_g = a_1 + a_2 z$ ，这里， z 为任一时刻箱涵的顶进长度； a_1 、 a_2 均为待定系数。

由于箱涵顶进过程中一般近似保持为匀速，所以根据箱涵的力学平衡条件，即 x 、 z 向力的平衡以及对 O 点的力矩的平衡，可以得到如下方程：

$$\left. \begin{aligned} a_1 + a_2 z / 2 &= \sigma_{gb} - \sigma_w \\ T &= R_n + \tau_1 A_t f_m + \tau_2 A_t f_n + 2 \sigma_g A_s f_n \\ M_T + M_1 &= M_R + M_p + M_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： M_T 、 M_1 、 M_2 、 M_R 、 M_p 分别为推进力 T 、箱涵底部与泥浆间的摩阻力、箱涵顶部与钢管幕间的摩阻力、箱涵前端的迎面阻力 R_n 以及箱涵顶部与钢管幕间的接触压力对 O 点的力矩； f_n 、 f_m 分别为箱涵与泥浆和钢管幕间的摩擦因数； A_t 、 A_s 分别为箱涵的底面积和侧面积。

在计算推进力 T 时需要说明的是，作用于箱涵侧面的注浆压力一般为上小下大的线性分布形式，但在计算其合力时则可以采用中心点处之值 σ_g 与侧面积的乘积，二者是相等的。

根据前面叙述，在式(3)中， R_n 可近似按被动土压力计算； f_n 、 f_m 可根据试验结果^[9]取值。于是式(3)中只有 a_1 、 a_2 、 T 这 3 个待求未知量，因而可求得其定解。其中，最为关注的就是 a_1 、 a_2 ，箱涵与顶部管幕间的接触应力可以由此确定出来。

4 顶部管幕力学分析模型

由于顶部管幕的钢管横向锁口间的竖向连接刚度(抗弯)相对较弱，所以在箱涵顶进过程中，顶部管幕的中间部分受到的横向约束作用就较弱，因而产生的竖向隆起变形就较大，而顶部管幕的边缘部分受到的横向边界约束作用较强，于是产生的竖向隆起变形就较小。这里主要讨论较大的隆起变形，即顶部中间部分的管幕隆起变形情况，可取中间的一根钢管(含横向锁口)为分析对象。在实际工程中，钢管幕的纵向两端是钳固在两侧工作井壁地下连续

墙上的，因此可将钢管端部视为固定端。在箱涵顶进以前，钢管幕已经先顶进并存在于地层中，所以顶部钢管幕下面存在着因上覆土体及钢管自重而产生的初始土压力，但在该初始土压力作用下钢管幕并未产生竖向变形。随着箱涵的顶进，使得顶部钢管幕下的压应力发生变化，该压应力变化量才使得钢管幕产生竖向变形。设在未顶进箱涵前顶部钢管幕下的初始土压力为 p_0 ，则箱涵顶进后在箱涵顶部的钢管幕下的土压力变化量为 $p_g - p_0$ ，在箱涵前端滑移土体范围内的顶部钢管幕下的土压力变化量为 $p_u - p_0$ 。因实际操作中使顶部钢管产生隆起变形，所以该土压力变化量应不小于 0，若计算中出现局部小于 0 的情况，则该局部范围内按土压力增量为 0 处理。根据前面叙述，顶部钢管幕力学分析模型如图 4 所示，其中， L_z 为箱涵已顶进的长度，为表述方便，记 z_a ， z_b ， z_c 分别为作用于地基梁上分布荷载的端点距坐标原点 o 的距离，显然有 $z_b = L_z$ 。于是可根据 Winkler 地基梁方法计算顶部钢管的竖向位移。

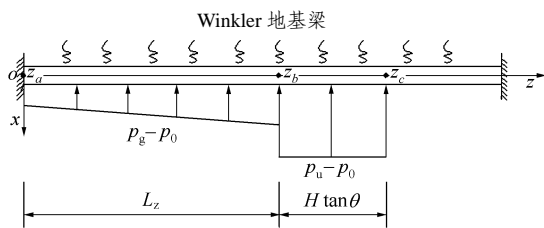


图 4 顶部钢管幕力学分析模型示意图

Fig.4 Mechanical model for one of the upper and middle steel pipes

5 顶部管幕竖向变形计算

对于图 4 所示的 Winkler 地基梁模型，其两端的边界条件均为竖向位移 $x = 0$ 和转角 $\xi = 0$ 。由弹性地基梁理论^[8]可以得到梁体任一截面处的竖向位移 x 和转角 ξ 的一般表达式为

$$\begin{cases} x = M_0 2\alpha^2 \varphi_3 / uK + Q_0 \alpha \varphi_4 / uK - \Delta x \\ \xi = M_0 2\alpha^3 \varphi_2 / uK + Q_0 2\alpha^2 \varphi_3 / uK - \Delta \xi \end{cases} \quad (4)$$

式中： M_0 ， Q_0 分别为在左端点 $z = 0$ 处的截面弯矩和剪力，需要根据另一端(右端点)的边界条件确定； u 为梁的计算宽度； K 为地基弹性系数； α 为弹性地基梁特征系数； φ_1 ， φ_2 ， φ_3 ， φ_4 均为系数^[8]； Δx ，

$\Delta \xi$ 可表示如下：

(1) 当 $0 \leq z \leq z_a$ 时，有

$$\Delta x = 0, \Delta \xi = 0 \quad (5)$$

(2) 当 $z_a \leq z \leq z_b$ 时，有

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{a_1 - p_0}{K} [1 - \varphi_{1\alpha(z-z_a)}] + \frac{a_2}{K} \left[(z - z_a) - \frac{1}{2\alpha} \varphi_{2\alpha(z-z_a)} \right] \\ \Delta \xi = \frac{(a_1 - p_0)\alpha}{K} \varphi_{4\alpha(z-z_a)} + \frac{a_2}{K} [1 - \varphi_{1\alpha(z-z_a)}] \end{cases} \quad (6)$$

(3) 当 $z_b \leq z \leq z_c$ 时，有

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{a_1 - p_0}{K} [\varphi_{1\alpha(z-z_b)} - \varphi_{1\alpha(z-z_a)}] + \\ \frac{a_2}{K} \left\{ (z_b - z_a) \varphi_{1\alpha(z-z_b)} + \frac{1}{2\alpha} [\varphi_{2\alpha(z-z_b)} - \varphi_{2\alpha(z-z_a)}] \right\} + \\ \frac{p_u - p_0}{K} [1 - \varphi_{1\alpha(z-z_b)}] \\ \Delta \xi = -\frac{(a_1 - p_0)\alpha}{K} [\varphi_{4\alpha(z-z_b)} - \varphi_{4\alpha(z-z_a)}] - \\ \frac{a_2\alpha}{K} \left\{ (z_b - z_a) \varphi_{4\alpha(z-z_b)} - \frac{1}{\alpha} [\varphi_{1\alpha(z-z_b)} - \varphi_{1\alpha(z-z_a)}] \right\} + \\ \frac{(p_u - p_0)\alpha}{K} \varphi_{4\alpha(z-z_b)} \end{cases} \quad (7)$$

(4) 当 $z \geq z_c$ 时，有

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{a_1 - p_0}{K} [\varphi_{1\alpha(z-z_b)} - \varphi_{1\alpha(z-z_a)}] + \\ \frac{a_2}{K} \left\{ (z_b - z_a) \varphi_{1\alpha(z-z_b)} + \frac{1}{2\alpha} [\varphi_{2\alpha(z-z_b)} - \varphi_{2\alpha(z-z_a)}] \right\} + \\ \frac{p_u - p_0}{K} [\varphi_{1\alpha(z-z_c)} - \varphi_{1\alpha(z-z_b)}] \\ \Delta \xi = -\frac{(a_1 - p_0)\alpha}{K} [\varphi_{4\alpha(z-z_b)} - \varphi_{4\alpha(z-z_a)}] - \\ \frac{a_2\alpha}{K} \left\{ (z_b - z_a) \varphi_{4\alpha(z-z_b)} - \frac{1}{\alpha} [\varphi_{1\alpha(z-z_b)} - \varphi_{1\alpha(z-z_a)}] \right\} - \\ \frac{(p_u - p_0)\alpha}{K} [\varphi_{4\alpha(z-z_c)} - \varphi_{4\alpha(z-z_b)}] \end{cases} \quad (8)$$

实际计算时，将右端点的边界条件代入式(4)后，解出 M_0 ， Q_0 ，再将 M_0 ， Q_0 代入式(4)中，就可得到在地基梁的任一横截面 z 处的竖向位移 x 及转角 ξ 的计算表达式。

6 实例分析

在本实际工程情况下，各主要计算参数如下：
 土体重度 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ，黏聚力 $c = 15 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 10.5^\circ$ (现场土体试验估测值)；土体与顶部钢管间的黏聚力 $c_0 = 10 \text{ kPa}$ ，外摩擦角 $\varphi_0 = 7^\circ$ (现场土体及钢管试验估测值)；箱涵高度 $H = 7.85 \text{ m}$ ，宽度为 34 m ，箱涵顶、底板厚度分别为 $1.3, 1.4 \text{ m}$ ，两侧壁厚度各为 1.0 m ，中壁厚度为 0.8 m ；箱涵与顶部管幕间的设计孔隙距离为 20 cm ；箱涵重度取为 25 kN/m^3 ；钢管的外径为 970 mm ，厚度为 10 mm ，弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，有效计算宽度 $u = 1.1 \text{ m}$ ，长度 $L = 125 \text{ m}$ ；顶部钢管幕上软弱黏土体的弹性地基系数 $K = 3\,000 \text{ kN/m}^3$ ；箱涵侧面中点处的注浆压力 $\sigma_g = 150 \text{ kPa}$ ，浆液与黏土混合物的重度 $\gamma_g = 12 \text{ kN/m}^3$ ；顶部管幕的上覆土体高度为 4.8 m ，顶部钢管幕的当量土柱高度取为 0.2 m ；箱涵与泥浆间的滑动摩擦因数 $f_n = 0.02$ ，箱涵与钢管 (表面黏有浆土混合物) 间的滑动摩擦因数 $f_m = 0.28$ 。

下面以第 4 节箱涵顶进结束时刻为例，计算顶部管幕的竖向位移。

此时，箱涵顶进长度 $L_z = 57.5 \text{ m}$ ，把各相关参数代入前述相应计算式中，并经过分析整理可得到如图 5 所示的力学计算模型。具体计算时可通过电算实现，其结果如图 6 所示，其中竖向位移 x 为负表示隆起变形。实际工程中对此种情况下顶部中间钢管的竖向位移进行了监测，监测值与计算值的比较如图 6 所示。可见，计算值同监测值在变化规律上是基本接近的，数值大小在靠近两端处也是比较

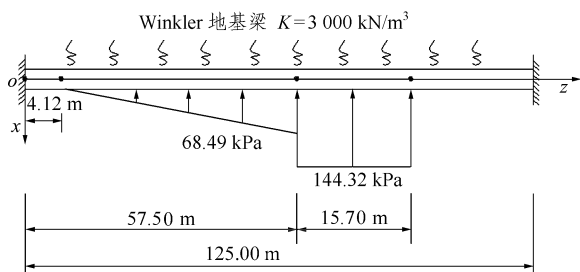


图 5 第 4 节箱涵顶进结束时刻顶部中间钢管的力学计算模型

Fig.5 Detailed computation model for one of the upper and middle steel pipes after the fourth section of the culvert being pushed

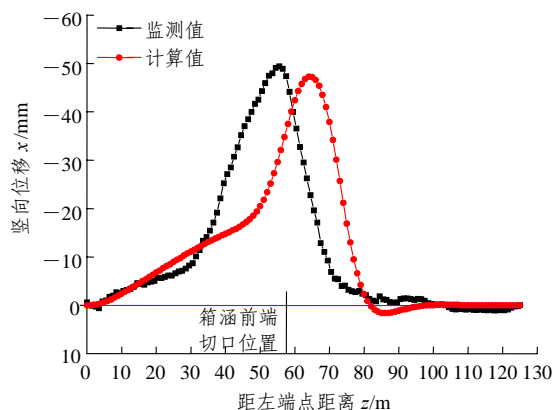


图 6 第 4 节箱涵顶进结束时刻顶部中间钢管竖向位移的计算值与监测值比较

Fig.6 Vertical displacement comparison between account values and monitoring values on one of the upper and middle steel pipes after the fourth section of culvert being pushed

接近的，只是在中间有一段稍有差别，但两者在同一数量级上。另外，两者峰值点出现的位置略有不同，监测结果为：在 $z \approx 56 \text{ m}$ 处出现隆起峰值；计算结果为：在 $z \approx 64 \text{ m}$ 处出现隆起峰值，相对于整个管长 125 m 来说，误差为 6.4% ，差别较小。因此，总的来说，计算值与监测值基本符合，说明理论计算方法是基本合理的，可以作为一种方法用于顶部中间钢管竖向变形的预测。

7 结语

在实际箱涵顶进施工中，顶部管幕产生了以隆起变形为主的竖向变形，产生该变形的荷载来源主要有两个方面：一个是箱涵前端土体向前的滑移作用，另一个是因注浆使箱涵上移顶推其顶部的钢管幕。根据力学平衡条件可以分析出这两方面的作用荷载分布，进而将顶部钢管视为在该分布荷载作用下的倒置于上覆软弱黏土上的 Winkler 地基梁，以此计算其竖向隆起变形。计算值与监测值的对比结果表明，计算值在变化规律及大小上均与监测值较为接近，说明理论分析方法具有一定的合理性，可以作为一种预测顶部钢管隆起变形的分析方法。同时，应该注意的是，本文分析方法是建立在 Winkler 假定基础上的，所以对于适用于 Winkler 假定条件的地基 (如饱和软黏土地层) 本文的方法才更具有合理性。

参考文献(References):

- [1] Liao H J, Cheng M. Construction of a piperoofed underpass below groundwater table[A]. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering[C]. [s. l.]: [s. n.], 1996. 202 - 210.
- [2] 姚大钧, 吴志宏, 张郁慧. 软弱黏土中管幕工法之设计与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增2): 4 999 - 5 005.(Yao Daniel T C, Wu Chihung, Chang Y H. Design and analysis of pipe roofing method in soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 4 999 - 5 005.(in Chinese))
- [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.(No.2 Municipal Construction Co., Ltd., Shanghai. Invite public bidding file of the subway crossing project through Hongxu road in the Beihong road located in the middle ring-road in Shanghai[R]. Shanghai: No.2 Municipal Construction Co. Ltd., Shanghai, 2003.(in Chinese))
- [4] Satoh S, Furuyama S, Murai Y, et al. Construction of a subway tunnel just beneath a conventional railway by means of large-diameter long pipe-roof method[A]. In: North American Tunneling'96[C]. [s. l.]: [s. n.], 1996. 113 - 116
- [5] Musso G. Jacked pipe provides roof for underground construction in busy urban area[J]. Civil Engineering, ASCE, 1979, 11(49): 79 - 82.
- [6] 何宜章. 我国非开挖行业之现状[J]. 非开挖技术, 2003, 20(4/5): 1 - 7.(He Yizhang. Trenchless industry market in China[J]. Trenchless Technology, 2003, 20(4/5): 1 - 7.(in Chinese))
- [7] Tan W L, Ranjith P G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunneling[A]. In: the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference Session Schedule[C]. [s. l.]: [s. n.], 2001. 1 - 10.
- [8] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. 190 - 210.(Xu Gancheng, Bai Hongcai, Zheng Yingren, et al. Support Structures in Underground Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. 190 - 210.(in Chinese))
- [9] 上海市中环线建设发展有限公司, 上海市第二市政工程有限公司, 同济大学, 等. 大断面管幕—箱涵顶进应用技术研究(分报告二“室内试验”)[R]. 上海: 同济大学, 2005.(The Middle Ring Road Construction and Development Co., Ltd., Shanghai, No.2 Municipal Construction Co., Ltd., Shanghai, Tongji University, et al. Application technology research report on pushing a big cross-section culvert within a steel pipe-roof(the second part “laboratory test”)[R]. Shanghai: Tongji University, 2005.(in Chinese))
- [10] 周顺华, 廖全燕, 刘建国, 等. 矩形顶管隧道顶进过程的地层损失[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 342 - 345.(Zhou Shunhua, Liao Quanyan, Liu Jianguo, et al. Stratum loss during pipe jacking of rectangular tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 342 - 345.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 3种岩石高温后力学性质的试验研究;
- (2) 基于真实细观结构的岩土工程材料三维数值分析方法;
- (3) 适用于小型岩石试件的三轴压缩试验技术与设备的开发及其应用;
- (4) 克服岩土工程有限元病态问题方法的对比与研究;
- (5) 岩体应力与渗流的耦合及其工程应用;
- (6) 加筋挡土墙长期工作性能的黏弹塑性有限元分析;
- (7) 岩体渗流—应力耦合有限元计算的精细积分方法;
- (8) 各向异性岩石纵横波的波速比特性研究;
- (9) 短文(研究进展与工程实录)。