基于 Pasternak 弹性地基梁的穿河顶管管幕力学模型及管径优化

牛野*

中铁第四勘察设计院集团有限公司，武汉 430063

* 通信作者，tsyny@163.com

2023-10-25 收稿；2024-03-24 修回；2024-03-28 接受

基金项目：中铁第四勘察设计院科技研究开发计划“水下复合地层(局部超浅埋)长距离管幕支护技术研究”

中图分类号：TU348　　文章编号：2096-8523(2025)02-0322-08　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230594

摘　要：支护管的受力特性分析是顶管管幕结构设计的基础，其保证了隧道开挖的安全。为了分析隧道开挖过程中顶管管幕力学特性，基于 Pasternak 模型构建管幕底部支护管力学解析模型，充分利用位移、转角、弯矩和剪力连续性条件，推导出支护管位移及内力方程，且计算结果更接近于工程实测应变，证明模型具有适用性。同时以秦淮新河段顶管管幕为例，通过分析支护管最大应变变化规律优选出合理的管幕直径。研究表明：初期管径对管幕底部支护管支护性能影响较大，后期随管径增大影响逐渐减小至平稳；开挖步长和管间间距对支护管支护性能呈正相关影响，小管径时对支护管最大应变影响更明显；管间距对支护管纵向应变影响较小，管幕卸载杠杆作用可有效将开挖区卸载值传递至非开挖区，从而保证管幕开挖面稳定性。

关键词：穿河隧道；顶管管幕；Pasternak 弹性地基梁；受力特性；管径优化

随着我国城市地下空间的深入开发，顶管技术已成为地下管道铺设工程中的基本工法之一[1-5]，而以顶管技术为基础的管幕+暗挖工法也被广泛用于大断面地下空间结构施工中[6-11]。相比于成熟的管棚结构，管幕具有以下特点：支护管直径比较大，一般不小于 600 mm；支护管一次顶进距离长，一般大于 100 m；管幕多应用于三面或全断面支护的大断面地下工程；管幕结构断面各部位埋深差异较大，其顶部与底部支护力学不尽相同[12-14]。由此可见，管幕结构相比管棚结构更为复杂，在考虑管幕支护性能及经济适用性时，能否直接利用管棚基本理论对管幕结构进行设计及参数优选，是仍需研究的课题。

目前，国内外相关研究工作如下：常艄东[15]基于 Winkler 弹性地基梁理论[16-19]推导出隧道开挖过程中管棚支护力学模型；苟德明等[20]、张俊儒等[21]均在 Winkler 弹性地基梁模型基础上，利用 Pasternak 双参数弹性地基梁理论[22-27]推导了管棚变形和内力计算公式；肖世国等[28]、夏才初等[29]同样利用 Winkler 弹性地基梁模型，得出了箱涵顶进过程中上排管幕变形方程，并分析了其承载性能；ZHANG 等[30]以管棚为研究对象，基于双参数弹性地基梁模型采用有限差分法分析其变形和内力规律。JUNEJA 等[31]以离心模型试验对隧道超前支护结构和开挖模式下地表变形展开了研究，文献 [15] 和 [20] 都对管棚施工过程中管道应变和地表变形进行了监测分析，并与理论计算值进行了对比。黄华等[32]利用 ANSYS 建立了管棚三维有限元模型，分析了不同影响条件下管棚支护结构的受力和变形规律。董新平等[33]通过有限元法分析了不同管棚参数条件下位移和敏感度变化规律，提出了优选的管棚直径。

归纳上述研究成果可知，管棚及箱涵顶进管幕的力学机制方面的研究较为成熟，支护管分布和长

著录信息：牛野. 基于 Pasternak 弹性地基梁的穿河顶管管幕力学模型及管径优化 [J]. 地质科技通报，2025，44(2)：322-329.
NIU Ye. Mechanical model and pipe diameter optimization of a pipe jacking roof in river crossings according to the Pasternak elastic foundation beam[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 322-329.

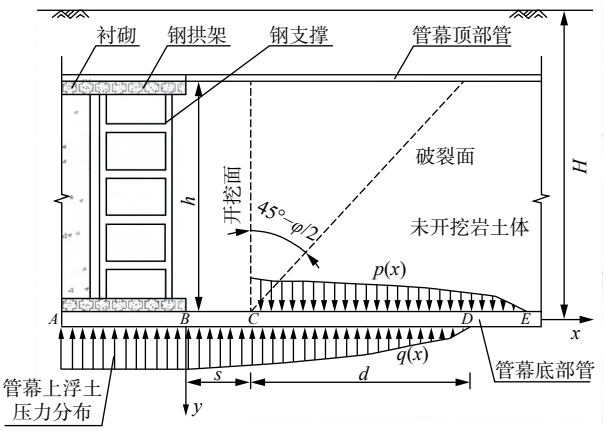
© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

度、隧道开挖进尺及开挖模式会影响其支护效果，简单的加大管径、加密管间距不合理也不经济。同样，暗挖顶管管幕设计也存在管径及间距的参数优选问题[34-37]。然而目前在大断面暗挖隧道管幕的力学模型主要以管幕–箱涵工法为研究对象[38-41]，模型多以顶部支护管为对象，相关计算方法对于底部支护管受力变形最不利的大断面暗挖隧道管幕并非完全适用。

因此，笔者在 Pasternak 弹性地基梁基础上，提出管幕底部支护管结构变形受力计算方法，并以宁芜铁路秦淮新河段隧道水下顶管管幕为例，分析开挖步长、管径和间距等对支护管最大应变影响规律，从而优选出适合的管幕直径范围。

1　管幕弹性地基梁分析

如图 1，2 所示的全断面开挖隧道模型，以开挖面为界，左侧为由钢拱架和钢支撑为主的初衬完成区域，右侧则为管幕隧道未开挖区域。以底部支护管为研究对象，将其受力模型按施工顺序分为以下部分：



AB 段. 初衬完成区；*BC* 段. 未衬砌开挖区；*CD* 段. 开挖扰动区；*DE* 段. 未扰动区；$p(x)$. 地基反力；$q(x)$. 管道上覆土压力；*d*. *CD* 段长度；*h*. 开挖高度；45°−*φ*/2. 破裂面与开挖面夹角；*s*. *BC* 段长度；*x*, *y*. 坐标轴方向；*H*. 管幕底部埋深；下同

图 1　隧道开挖过程中管幕受力模型

Fig. 1　Mechanical model of the pipe curtain during tunnel excavation

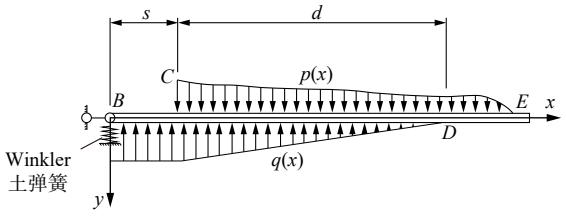


图 2　管幕底部支护管力学模型

Fig. 2　Mechanical model of the supporting pipe at the bottom of the pipe curtain

初衬完成区 *AB*、未衬砌开挖区 *BC*、开挖扰动区 *CD*、未扰动区 *DE*。本研究基于此模型有如下基本假定：

(1)Pasternak 地基模型如图 3 所示，该模型在 Winkler 地基模型基本假定上引入剪切层概念，因其考虑土体变形连续因素，可更好地考虑管道–土体的耦合相互作用。地基反力 $p(x)$ 满足：

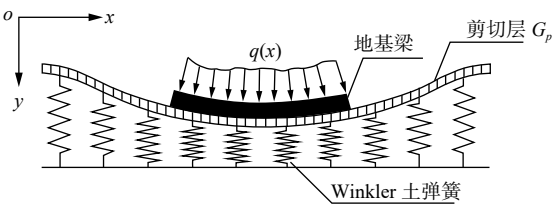
$$p(x)=k\omega(x)-G_p\frac{\mathrm{d}^2\omega(x)}{\mathrm{d}x^2}, \tag{1}$$

式中：$\omega(x)$ 为地基变形；k 为基床系数；G_p 为地基剪切模量。

(2)常用土柱理论和太沙基理论计算管道上覆土压力 $q(x)$，而由于土体的拱效应影响，太沙基理论相关计算参数难以量化。如图 2 所示，本研究采用更为保守的土柱理论计算 $q(x)$，扰动区段则采用三角形分布荷载形式。

(3)假设破裂面与开挖面夹角为 $45°-\varphi/2$，开挖面为主动极限平衡状态，则 *CD* 段长度 *d* 为：

$$d=h\tan(45°-\varphi/2), \tag{2}$$



G_p. 地基剪切模量

图 3　Pasternak 弹性地基梁模型

Fig. 3　Pasternak elastic foundation beam model

(4)管幕具有支护延滞效应，即其支护能力并非在初衬完成后立即释放。假定点 *B*(支护段与未支护段界限点)位置为一弹性固定端。

(5)考虑到支护管长度较长，开挖面距管幕前端较远，因此支护管力学解析模型采用半无限长弹性地基梁进行简化分析。

2　管幕弹性地基梁模型求解

2.1　微分方程求解

根据上述模型假设及分析，由弹性地基梁理论可得管幕底部支护管各段位移微分方程为：

(1)*BC* 段：

$$EI\frac{\mathrm{d}\omega^4(x)}{\mathrm{d}x^4}=bq_0, \tag{3}$$

则位移方程通解 $\omega_1(x)$ 为：

$$\omega_1(x)=\frac{q_0}{24EI}x^4+C_0x^3+C_1x^2+C_2x+C_3, \tag{4}$$

式中: q_0 为上覆地层土压力; b 为相邻顶管中心距; E 和 $\boldsymbol{I}$ 分别为支护管弹性模量和惯性矩; C_0, C_1, C_2, C_3 分别为边界方程待定系数。

(2)CD 段:

$$E\boldsymbol{I}\frac{\mathrm{d}\omega^4(x)}{\mathrm{d}x^4}-G_pb^*\frac{\mathrm{d}\omega^2(x)}{\mathrm{d}x^2}+kb^*\omega(x)=bq(x)\,, \tag{5}$$

$$q(x)=q_0(s+d-x)/d\,, \tag{6}$$

对应位移方程通解 $\omega_2(x)$ 为:

$$\begin{aligned}\omega_2(x)=&C_4\mathrm{e}^{\alpha x}\cos\beta x+C_5\mathrm{e}^{\alpha x}\sin\beta x+\\&C_6\mathrm{e}^{-\alpha x}\cos\beta x+C_7\mathrm{e}^{-\alpha x}\sin\beta x+\omega^*(x)\,,\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{cases}\alpha=\lambda\sqrt{\left[1+\left(\dfrac{G_p\lambda^2}{k}\right)\right]}\\ \beta=\lambda\sqrt{\left[1-\left(\dfrac{G_p\lambda^2}{k}\right)\right]}\\ \lambda=\sqrt[4]{\dfrac{kb}{4E\boldsymbol{I}}}\\ b^*=b_0+\sqrt{\dfrac{G_p}{k}}\end{cases}\,, \tag{8}$$

式中: b_0 为管幕支护管的管径; b^*为考虑双参数地基连续性情况下梁的等效宽度; C_4, C_5, C_6, C_7 均为待定系数; α , β , λ 为方程通解中的系数。

$\omega(x)$ 和 $p(x)$ 应为高阶常系数微分方程的同阶一次式, 联立式(7)与(5)可得:

$$\omega^*(x)=\frac{bq_0}{kdb^*}(s+d-x)。 \tag{9}$$

Winkler 模型与 Pasternak 模型虽同为弹性地基梁模型但参数取值不同, Winkler 弹性地基梁方程采用初参数法求出特解 $\omega^*(x)$, 对于基于 Pasternak 弹性地基梁方程并不适用, 因此即使式(3)与式(10)方程形式相同, 但由于边界条件不同, 其待定系数也不一致。

(3)DE 段:

$$E\boldsymbol{I}\frac{\mathrm{d}\omega^4(x)}{\mathrm{d}x^4}-G_pb^*\frac{\mathrm{d}\omega^2(x)}{\mathrm{d}x^2}+kb^*\omega(x)=0。 \tag{10}$$

位移方程通解 $\omega_3(x)$ 为:

$$\begin{aligned}\omega_3(x)=&C_8\mathrm{e}^{-\alpha x}\cos\beta+C_9\mathrm{e}^{-\alpha x}\sin\beta x+\\&C_{10}\mathrm{e}^{\alpha x}\cos\beta x+C_{11}\mathrm{e}^{\alpha x}\sin\beta x\,,\end{aligned} \tag{11}$$

式中: C_8, C_9, C_{10}, C_{11} 均为待定系数。

根据弹性地基梁理论, 梁的位移与荷载存在以下关系:

$$\begin{cases}\theta(x)=\dfrac{\mathrm{d}\omega(x)}{dx}\\ M(x)=-E\boldsymbol{I}\dfrac{\mathrm{d}\omega^2(x)}{\mathrm{d}x^2}\\ Q(x)=-E\boldsymbol{I}\dfrac{\mathrm{d}\omega^3(x)}{\mathrm{d}x^3}\end{cases}\,, \tag{12}$$

式中: θ, M, Q 分别为梁的转角, 弯矩, 剪力。

由模型两端边界条件可得:

$$\begin{cases}\omega_1(0)=\omega_0\\ \omega_1'(0)=\theta_0\\ \omega_3(\infty)=0\\ \omega_3'(\infty)=0\end{cases}\,, \tag{13}$$

式中: ω_0 和 θ_0 分别为界限点 B 的位移和转角。由于无穷远处支护管变形趋于无限小, 则可认为 $C_{10}=C_{11}=0$ 。由解析模型 C 点和 D 点的位移、转角、弯矩和剪力连续要求, 可得出下式:

$$\begin{cases}\omega_1(s)=\omega_2(s),\omega_2(s+d)=\omega_3(s+d)\\ \omega_1'(s)=\omega_2'(s),\omega_2'(s+d)=\omega_3'(s+d)\\ \omega_1''(s)=\omega_2''(s),\omega_2''(s+d)=\omega_3''(s+d)\\ \omega_1'''(s)=\omega_2'''(s),\omega_2'''(s+d)=\omega_3'''(s+d)\end{cases}。 \tag{14}$$

基于边界要求及连续性要求, 将式(13)与(14)分别代入位移解析式(4)、(7)和(11), 可得:

$$\begin{bmatrix}0&0&1&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&0&0&0&0\\s^3&s^2&s&1&a_{24}&a_{25}&a_{26}&a_{27}&0&0\\3s^2&2s&1&0&a_{34}&a_{35}&a_{36}&a_{37}&0&0\\6s&2&0&0&a_{44}&a_{45}&a_{46}&a_{47}&0&0\\6&0&0&0&a_{54}&a_{55}&a_{56}&a_{57}&0&0\\0&0&0&0&a_{64}&a_{65}&a_{66}&a_{67}&a_{68}&a_{69}\\0&0&0&0&a_{74}&a_{75}&a_{76}&a_{77}&a_{78}&a_{79}\\0&0&0&0&a_{84}&a_{85}&a_{86}&a_{87}&a_{88}&a_{89}\\0&0&0&0&a_{94}&a_{95}&a_{96}&a_{97}&a_{98}&a_{99}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_0\\C_1\\C_2\\C_3\\C_4\\C_5\\C_6\\C_7\\C_8\\C_9\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\psi_0\\\psi_1\\\psi_2\\\psi_3\\\psi_4\\\psi_5\\\psi_6\\\psi_7\\\psi_8\\\psi_9\end{bmatrix}, \tag{15}$$

式中: a 为各位移解析式中待定系数 $C_0 \sim C_9$ 对应的各函数式; $\psi_0 \sim \psi_9$ 为整理完成后 $\omega_1(x)$, $\omega_2(x)$, $\omega_3(x)$ 的组合式, 为简化方程, 将组合式记为 $\psi_0 \sim \psi_9$。

由式(15)计算可得全部待定系数 $C_0 \sim C_9$, 进而代入各位移解析方程。同理该计算模型同样适用于开挖扰动区 CD 段三角形分布荷载情况。

2.2　实例验证

由于目前暂无相关顶管管幕暗挖隧道施工时支护管的实测内力和变形数据, 而本研究模型对于取上部支护管为研究对象的管棚同样适用, 因此以文献 [20] 中工程实例支护管应变实测值为依据, 其参数选择及边界条件与文献 [20] 相同。由梁的弯曲理论应满足下式:

$$\varepsilon(x)=\left(\frac{b_0}{2}-t\right)\frac{\mathrm{d}\omega^2(x)}{\mathrm{d}x^2}\,, \tag{16}$$

式中: $\varepsilon(x)$ 为支护管应变; $\omega(x)$ 为支护管挠度; t 为支护管壁厚。

分别将计算参数和边界条件代入文献 [7] 以及本研究公式, 并对比支护管实测应变, 结果如表 1 所示。计算发现本研究力学模型计算值基本位于实测值之间, 且计算值更接近实测平均值, 证明本研究模型具有实用性。

表 1　不同计算模型支护管应变对比表

Table 1　Comparison of the supporting pipe strains for different calculation models

计算模型	1.2 m测点应变/με	8.2 m测点应变/με
现场实测值	−174	15.84
	−260	−31.68
实测平均值	−217	−7.92
文献[7]模型	−290	18.00
本研究模型	−236	−0.50

3　工程实例应用

拟建宁芜铁路隧道与秦淮新河斜交，交角约 41°，下穿距离约 385 m，图 4 为隧道纵断面图。考虑到施工过程中秦淮新河通航要求，采用管幕+冻结法在隧道外侧形成一圈钢管幕，并在管幕冻结加固圈内进行土体开挖及隧道结构的施作，该管幕隧道工程设计首先面临的就是支护管直径选取。本研究以管幕底部支护管为研究对象，采取上文推导的力学解析公式进行计算分析。

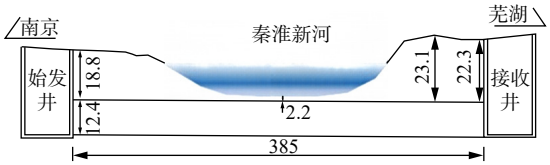


图 4　穿河隧道纵断面图（单位：m）

Fig. 4　Longitudinal section of the river tunnel

隧道初步设计断面如图 5 所示，由于该隧道穿越秦淮新河，其整体埋深情况由始发井位置至河底、接收井位置先降低后增大，致使管幕埋深为 2.2 ~ 23.1 m；管幕总体高度约为 12.4 m，宽度约为 11.9 m，隧道暗挖工序拟采用全断面方式开挖。埋深越大管幕支护管受力与变形越大，因此以管幕最大埋深位置为计算参考地层；由勘察图纸可知此最大埋深位置距接收井约为 25.4 m，由上至下地层主要为杂填土、粉质黏土、强风化长石石英砂岩、弱风化长石石英砂岩等；此时底部支护管埋深为 35.5 m，主要穿越弱风化长石石英砂岩地层。参数如表 2 所示。

管幕采用钢制支护管弹性模量为 200 GPa，密度为 7.85 g/cm^3，壁厚取管径的 1%，破坏时的屈服应力 σ_s 为 235 MPa，极限应变 ε_s 为 1 175 με。以支护端 B 作为计算零点，初位移 ω_0 与初转角 θ_0 分别为 10 mm 与 0。管幕底部取最大埋深值 35.5 m，根据表 2 土体参数采用土柱理论计算分层土压力。

基于上述工程设计参数，计算得出不同开挖步

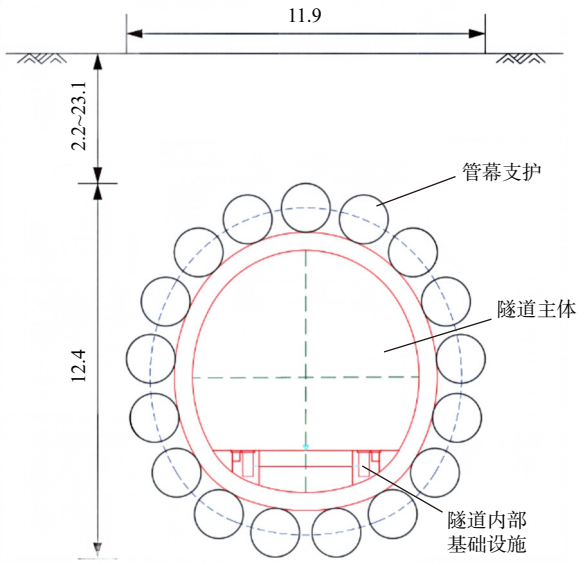


图 5　隧道管幕剖面图（单位：m）

Fig. 5　Tunnel pipe curtain section

表 2　地层参数

Table 2　Formation parameters

地层	厚度/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	密度/(g·cm^{-3})
1杂填土	1.4	—	—	—	1.75
2粉质黏土	5.6	39.96	11.18	6.01	1.95
1粉质黏土	0.5	30.15	9.72	4.75	1.93
2粉质黏土	7.8	44.56	12.50	7.26	1.98
5-2强风化长石石英砂岩	1.3	—	—	—	2.55
5-3弱风化长石石英砂岩	—	3.60	54.70	—	2.41

长和管间距条件下支护管应变曲线，发现支护管最大应变所处位置为界限点 B（即计算模型弹性固定端），最大应变随管径变化的关系曲线如图 6 所示。底部支护管最大应变与管径呈负相关，小管径情况（400 ~ 800 mm）下管径变化对支护管最大应变影响较大，管径越大管径影响的边际效应越弱，说明为提高管幕承载性能而只片面增大支护管管径既不科学也不经济。

当管径小于 1 200 mm 时支护管最大应变都大于管道屈服应变 1 175 με，当管径等于 1 600 mm 时管间距大于 500 mm 或单次开挖步长大于 4 m 时底部支护管仍有不利影响，而当管径大于等于 2 000 mm 时管道基本不受施工条件影响均处在稳定承载状态。综合以上分析，在满足支护管力学条件下应选取管径允许下限值，同时由于本工程采用冻结法，按照施工要求和相关规定，管径不应小于 1 400 mm。因此，本工程管幕初选管径不小于 1 600 mm，间距小于

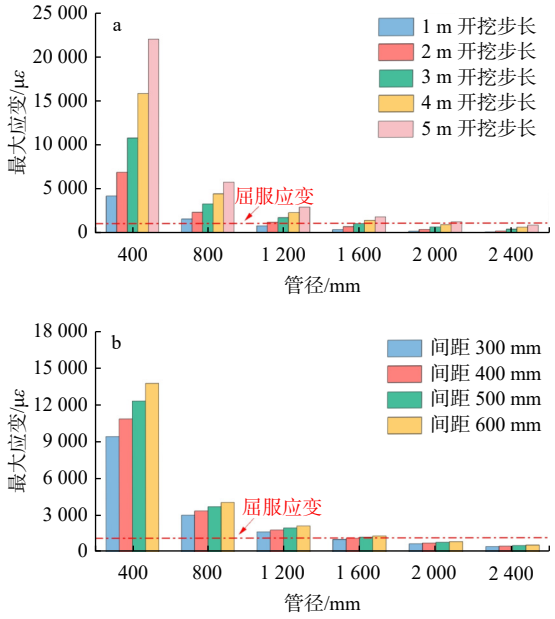


图 6　不同开挖步长 (a) 与不同间距 (b) 条件下支护管应变随管径变化曲线

Fig. 6　Change curve of the strain in the supporting pipe with the pipe diameter under different excavation step length (a) and spacing (b) conditions

400 mm, 同时建议单次开挖步长不超过 3 m。

为进一步分析管幕支护管应变分布规律, 本研究在改进的管幕支护管理论模型基础上, 以 1 600 mm 管径、开挖步长 1 m 和 300 ~ 600 mm 管间距为计算参数, 对穿越秦淮新河管幕支护管纵向应变进行求解, 计算结果如图 7 所示。

由计算结果可知: ①同一开挖步长条件下管间距对底部支护管纵向应变影响较小, 大间距条件下支护管应变略大于小间距支护管, 这说明管间距产生的微土拱效应对支护管变形有一定影响; ②支护管应变在开挖步长 s 范围内(开挖未支护段)时逐渐减小并趋于零, 且在开挖扰动区长 d 范围内先增大

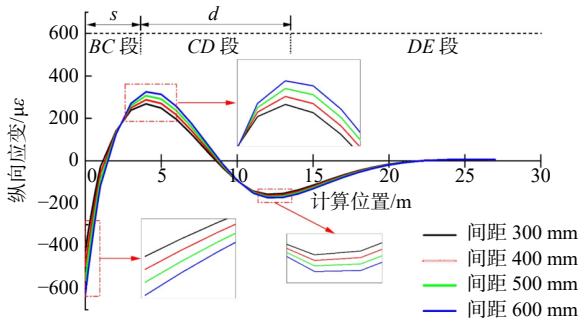


图 7　底部管径 1 600 mm 支护管纵向应变计算曲线

Fig. 7　Longitudinal strain calculation curve for bottom diameter 1 600 mm support pipe

后减小, 在远离开挖面的未受扰动段逐渐减小至零, 说明管幕卸载杠杆作用可有效将开挖区卸载值传递至非开挖区, 即使是未扰动区支护管结构也会受到影响, 从而保证开挖面的稳定; ③支护管最大应变位于开挖支护与未支护的界限点, 纵向最大应变 −600 ~ −400 με, 小于管道屈服应变, 说明支护管结构安全; 同时距此界限点 20 m 远管幕变形较小, 说明在开挖面 20 m 开挖影响范围内需注意开挖作业形式, 尽量避免对管幕产生过大扰动, 进而保证开挖面稳定。

4　结论

(1)相较于传统管棚, 大断面管幕底部支护管最易失稳, 因此, 应以底部支护管作为分析对象建立支护管力学解析模型。

(2)本研究在 Pasternak 弹性地基梁基础上, 充分考虑了支护管力学模型中各段的边界条件, 基于分界点位置的位移、转角、弯矩和剪力连续性要求, 优化位移方程并求解, 使得相应计算值更符合实际工况。

(3)底部支护管最大应变先随管径急剧降低, 后逐步趋于平稳, 说明小管径下开挖步长和管间距对支护管结构承载影响较大, 而大管径下开挖步长和管间距对支护管结构承载影响较小, 因此, 通过增加支护管管径来提升管幕承载性能, 是不合理的。

(4)基于本研究支护管力学模型对秦淮新河段管幕进行了初步设计, 结果为管径 1 600 mm, 间距小于 400 mm, 单次开挖不超过 3 m; 并以初步设计条件进行了支护管纵向应变求解, 发现管间距对支护管纵向应变影响较小, 支护管最大应变位于开挖支护与未支护的界限点, 管幕卸载杠杆作用可有效将开挖区卸载值传递至非开挖区, 从而保证管幕开挖面稳定性。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1]　周雨恒, 周浩, 袁明, 等. 考虑管土接触状态的圆曲线顶管顶进力计算方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 63-71.
ZHOU Y H, ZHOU H, YUAN M, et al. Jacking force calculation method of circular curved pipe jacking with consideration of pipe-soil contact characteristics[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 63-71. (in Chinese with English abstract)

[2] 徐天硕, 王乐, 刘锴鑫, 等. 基于滚刀破岩特性的岩石顶管迎面阻力计算模型 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 259-265.
XU T S, WANG L, LIU K X, et al. A calculation model for the head-on resistance of rock pipe jacking based on the rock breaking characteristics of the disc cutter[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 259-265. (in Chinese with English abstract)

[3] 兰彬, 张鹏, 张云龙, 等. 矩形顶管管周差异摩阻力对地层纵向水平位移的影响 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 215-221.
LAN B, ZHANG P, ZHANG Y L, et al. Influence of differential frictional resistance around rectangular pipe jacking on longitudinal horizontal displacement of strata[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 215-221. (in Chinese with English abstract)

[4] 袁心, 马保松, 赵阳森, 等. 矩形顶管施工中管周压力的实测与分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1225-1233.
YUAN X, MA B S, ZHAO Y S, et al. Field measurement and analysis of pipe pressure during box jacking construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1225-1233. (in Chinese with English abstract)

[5] 牛国伦, 马保松, 张鹏, 等. 大直径顶管施工管土相互作用实测分析——以佛山市电力隧道顶管工程为例 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1353-1360.
NIU G L, MA B, ZHANG P, et al. Measurement analysis of pipe-soil interaction in large-diameter pipe jacking project of a power tunnel in Foshan, China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1353-1360. (in Chinese with English abstract)

[6] ZHANG P, BEHBAHANI S S, MA B S, et al. A jacking force study of curved steel pipe roof in Gongbei tunnel: Calculation review and monitoring data analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72: 305-322.

[7] ZHANG P, MA B S, ZENG C, et al. Key techniques for the largest curved pipe jacking roof to date: A case study of Gongbei tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59: 134-145.

[8] ZHANG P, FENG X, ZENG C, et al. Field performance of steel pipes during curve jacking in Gongbei tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2022, 128: 104585.

[9] HAO Z, ZHANG H, ZHANG G, et al. The prediction of ground settlement of a box culvert jacked under the action of an ultra-shallow buried pipe curtain[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(10): 12423-12438.

[10] LIU X, ZHANG R, HHANG J, et al. Deformation mechanism and limit support pressure of cutting steel plate during connection between pipes in large spacing using pipe curtain structure method[J]. Underground Space, 2024, 18: 83-96.

[11] 吉小明, 龙兵, 杨雪强. 管幕预加固中近接顶管施工的三维模拟分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊): 267-274.
JI X M, LONG B, YANG X Q. Three-dimensional simulation analysis of adjacent pipe jacking construction in pipe curtain pre-reinforcement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 267-274. (in Chinese)

[12] 沈桂平, 曹文宏, 杨俊龙, 等. 管幕法综述 [J]. 岩土工程界, 2006(2): 27-29.
SHEN G P, CAO W H, YANG J L, et al. Summary of tube curtain method[J]. Geotechnical Engineering, 2006(2): 27-29. (in Chinese)

[13] 朱合华, 闫治国, 李向阳, 等. 饱和软土地层中管幕法隧道施工风险分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5549-5554.
ZHU H H, YAN Z G, LI X Y, et al. Risk analysis of pipe-curtain tunnel construction in saturated soft soil stratum[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5549-5554. (in Chinese)

[14] 刘学增, 朱合华, 官林星, 等. 管幕法隧道施工方案研究 [C]//佚名中国土木工程学会第十一届、隧道及地下工程分会第十三届年会论文集. 北京: [出版社不详], 2004: 5.
LIU X Z, ZHU H H, GUAN L X, et al. Research on tunnel construction scheme of tube curtain method[C]//Anon. Proceedings of the 11th Annual Conference of the Chinese Society of Civil Engineers and the 13th Annual Conference of the Branch of Tunneling and Underground Engineering. Beijing: [s. n.], 2004: 5. (in Chinese)

[15] 常艄东. 管棚法超前预支护作用机理的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 1999: 36-43.
CHANG S D. Study on the mechanism of advanced pre-support by pipe shed method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999: 36-43. (in Chinese with English abstract)

[16] 王家乐, 夏桂云. Winkler 地基上修正 Timoshenko 梁振动分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(3): 30-37.
WANG J L, XIA G Y. Vibration analysis for a modified Timoshenko beam on Winkler elastic foundation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3): 30-37. (in Chinese with English abstract)

[17] 丁敏, 李静, 罗双, 等. 基于直接刚度法的弹性地基深梁单元 [J]. 铁道学报, 2020, 42(5): 136-142.
DING M, LI J, LUO S, et al. Deep beam element on elastic foundation based on direct stiffness method[J]. Journal of The China Railway Society, 2020, 42(5): 136-142. (in Chinese with English abstract)

[18] 马建军, 秦紫果, 刘丰军, 等. 考虑有限深度土体运动的 Winkler 地基梁自由振动分析 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 62-66+99.
MA J J, QIN Z G, LIU F J, et al. Free vibration of beams on winkler foundation with the consideration of finite-depth soil motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(6): 62-66+99. (in Chinese with English abstract)

[19] 代云云, 周晶. 改进的 Winkler 弹性地基模型在触地段动力分析中的应用 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1451-1457.
DAI Y Y, ZHOU J. Application of an improved Winkler elastic foundation-based model to the dynamic analysis of damaged pipelines in the touchdown zone[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(9): 1451-1457. (in Chinese with English abstract)

[20] 苟德明, 阳军生, 张 戈. 浅埋暗挖隧道管棚变形监测及受力机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1258-1264.

GOU D M, YANG J S, ZHANG G. Deformation monitoring and mechanical behaviors of pipe-roof in shallow tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1258-1264. (in Chinese with English abstract)

[21] 张俊儒, 严丛文, 叶伦, 等. 箱涵顶进对下方管幕的力学作用分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊 1): 73-79.
ZHANG J R, YAN C W, YE L, et al. Mechanical analysis of box culvert jacking on the lower pipe curtain[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S1): 73-79. (in Chinese)

[22] 肖旻, 王正中, 吴浪, 等. 基于双参数弹性地基梁理论的梯形渠道冻胀力学模型 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 71-78.
XIAO M, WANG Z Z, WU L, et al. Frost-heaving mechanical model of concrete lining trapezoidal canal based on two-parameter elastic foundation beam theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14): 71-78. (in Chinese with English abstract)

[23] 张金轮, 张阿祥, 葛仁余, 等. 三参数 Pasternak 黏弹性地基中锥形桩的横向自由振动特性研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 183-196.
ZHANG J L, ZHANG A X, GE R Y, et al. Transverse free vibration characteristics of a tapered pile in the three-parameter Pasternak viscoelastic foundation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 183-196. (in Chinese with English abstract)

[24] 滕兆春, 王伟斌, 郑文达. 温度影响下 Winkler-Pasternak 弹性地基上多孔 FGM 矩形板的自由振动分析 [J]. 工程力学, 2022, 39(4): 246-256.
TENG Z C, WANG W B, ZHENG W D. Free vibration analyses of porous fgm rectangular plates on a winkler-Pasternak elastic foundation considering the temperature effect[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(4): 246-256. (in Chinese with English abstract)

[25] 欧阳煜, 夏登科. Pasternak 双参数地基上 Euler-Bernoulli 裂纹梁弯曲的解析解 [J]. 力学季刊, 2021, 42(4): 685-695.
OUYANG Y, XIA D K. Analytical solution of bending deformation of the Euler-bernoulli cracked beam on Pasternak two-parameter foundation[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2021, 42(4): 685-695. (in Chinese with English abstract)

[26] 王满, 马建军, 韩书娟. 考虑有限深度土体运动的 Winkler 地基梁 1/2 次谐波共振响应分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 165-170.
WANG M, MA J J, HAN S J. 1/2 sub-harmonic resonance of beams on Winkler foundation with consideration of finite-depth soil motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 165-170. (in Chinese with English abstract)

[27] 蒲育, 滕兆春. Winkler-Pasternak 弹性地基梁自由振动的二维弹性分析 [J]. 计算力学学报, 2016, 33(2): 182-187.
PU Y, TENG Z C. Two-dimensional elastic analysis for free vibration of beams set on winkler-Pasternak elastic foundations[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(2): 182-187. (in Chinese with English abstract)

[28] 肖世国, 夏才初, 朱合华, 等. 管幕内箱涵顶进中顶部管幕竖向变形预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1887-1892.
XIAO S G, XIA C C, ZHU H H, et al. Vertical deformation prediction on upper pipe-roof during a box culvert being pushed within a pipe-roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1887-1892. (in Chinese with English abstract)

[29] 夏才初, 阙程柯, 刘 胜. 顶进箱涵全断面置换管幕工法中钢管幕内力研究及实例分析 [J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3555-3560.
XIA C C, QUE C K, LIU S. Study of internal forces and case study of pipe-roof for box culvert jacking and replacement full face pipe-roof method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3555-3560. (in Chinese with English abstract)

[30] ZHANG Z Q, LI H Y, LIU H Y, et al. Load transferring mechanism of pipe umbrella support in shallow-buried tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43: 213-221.

[31] JUNEJA A, HEGDE A, LEE, F H, et al. Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4): 377-381.

[32] 黄华, 巩江峰, 邸成, 等. 铁路隧道超前管棚变形规律及参数研究 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 65-70.
HUANG H, GONG J F, DI C, et al. Research on the deformation law and parameters of advanced pipe shed for railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 65-70. (in Chinese with English abstract)

[33] 董新平, 彭中和. 浅埋地下工程管棚法施工中合理管棚直径分析 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1355-1360.
DONG X P, PENG H Z. Optimum diameter analysis of pipe roofs applied in underground engineering with shallow overburden[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1355-1360. (in Chinese with English abstract)

[34] 黄炫茜. 青岛地铁上软下硬地层浅埋暗挖施工稳定性分析 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2023.
HUANG X Q. Stability analysis of shallow excavation in soft and hard stratum of Qingdao subway[D]. Dalian Liaoning: Dalian Maritime University, 2023. (in Chinese with English abstract)

[35] 李勋. 超浅埋暗挖车站洞桩法施工横向管幕承载机理及地表沉降预测方法研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
LI X. Study on the bearing mechanism of transverse pipe curtain and the prediction method of surface settlement in the construction of ultra-shallow buried underground excavation station hole pile method[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023. (in Chinese with English abstract)

[36] 朱雁飞, 毕湘利, 郭彦, 等. 富水饱和软土地层轨道交通地下车站暗挖工法研究综述 [J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊 1): 1-7.
ZHU Y F, BI X L, GUO Y, et al. Summary of research on underground excavation method of rail transit underground station in water-rich saturated soft soil stratum[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S1): 1-7. (in Chinese)

[37] 袁贝, 陈卫忠. 城市市区地下空间暗挖工法适应性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1172-1182.
YUAN B, CHEN W Z. Study on adaptability of underground excavation method in urban area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1172-1182. (in Chinese with English abstract)

[38] 黄慷, 吴小建, 王红卫. 软土大型地下空间管幕-冻结-注浆暗挖工艺研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 2): 729-742.
HUANG K, WU X J, WANG H W. Study on pipe curtain-freezing-

grouting underground excavation technology for large underground space in soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 729-742. (in Chinese)

[39] 孙金, 周凯. 下穿铁路路基双重置换管幕法地表沉降分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1271-1275, 1288.
SUN J, ZHOU K. Analysis on ground settlements of pipe-roof by dual replacement under railway roadbed[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1271-1275+1288. (in Chinese with English abstract)

[40] 胡玉银, 吴欣之, 袁勇, 等. 地下立体交通工程中的箱涵顶进双重置换施工工法研究 [J]. 建筑施工, 2010, 32(2): 85-87.
HU Y Y, WU X Z, YUAN Y, et al. Research on double replacement construction method of box culvert jacking in underground three-dimensional traffic engineering [J]. Building construction, 2010, 32(2): 85-87. (in Chinese with English abstract)

[41] 赵洪岩, 张勇, 陈峰军, 等. 箱涵顶进置换管幕工法土体变形分布式光纤监测研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1355-1361.
ZHAO H Y, ZHANG Y, CHEN F J, et al. Distributed optic fiber sensors for soil deformation monitoring for construction method of box culverts being pushed to replace pipe roofs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1355-1361. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于 Pasternak 弹性地基梁的穿河顶管管幕力学模型及管径优化”

Mechanical model and pipe diameter optimization of a pipe jacking roof in river crossings according to the Pasternak elastic foundation beam

NIU Ye*

China Railway Siyuan Survey & Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China

* Corresponding author, tsyny@163.com

Abstract: The analysis of the force characteristics of the support pipe is the basis for the structural design of the pipe jacking roof, which ensures the safety of tunnel excavation. [**Objective**] In order to analyze the mechanical behavior of the pipe roof during tunnel excavation, [**Methods**] an analytical model of the support pipe at the bottom of the pipe jacking roof is constructed based on the Pasternak elastic foundation beam theory, making full use of the displacement, rotation, bending moment, and shear continuity conditions to derive the displacement and internal force equations of the support pipe. [**Results**] The calculation results are in close agreement with the measured strain from the project, proving the applicability of the model. Moreover, by analyzing the maximum strain change law of the support pipe, the reasonable pipe roof diameter was selected, using the pipe jacking roof of the Qinhuai New River section as an example. [**Conclusion**] The research shows that the initial pipe diameter significantly influences the support performance of the bottom support pipe, with this influence gradually decreasing as the pipe diameter increases. The excavation step length and pipe spacing positively impact the support performance, with a more pronounced effect on the maximum strain of the support pipe when the pipe diameter is small. Pipe spacing has minimal effect on the longitudinal strain of the support pipe. The unloading lever of the pipe jacking roof can effectively transfer the unloading value from the excavation area to the unexcavated area, thus ensuring the stability of the excavation surface of the pipe jacking roof.

Key words: river-crossing tunnel; pipe jacking roof; Pasternak elastic foundation beam; mechanical characteristics; pipe diameter optimization.

Received: 2023-10-25; Revised: 2024-03-24; Accepted: 2024-03-28

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230594