

# 管棚保护下框架桥顶进工程高程控制分析

李庶林<sup>1\*</sup>, 李 凯<sup>1</sup>, 黄玉仁<sup>1,2</sup>, 陈东霞<sup>1</sup>, 张 昱<sup>1</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 中铁二十四局福州公司, 福建 福州 350013)

**摘要:** 大直径管棚保护下直接顶进预制箱涵技术是近年来国内发展起来的一种全新的施工技术,但其难度大,理论发展不完善,可借鉴的经验少。依托南昌市新龙岗大道下穿向莆铁路工程,根据实际工程情况建立力学分析模型,计算框架桥下钢管的受力,并根据钢管的受力情况假定钢管为 Winkler 弹性地基梁,运用弹性地基梁理论建立钢管挠曲微分方程并求解该微分方程,从而计算出框架桥顶进过程中的钢管挠曲变形,进而确定顶进过程中框架桥高程偏差情况。理论分析表明,底排管棚的支撑和引导作用有助于框架桥推进,并能有效遏制框架桥“栽头”和“抬头”现象,对于现场工程施工具有很好的参考价值。

**关键词:** 框架桥; 管棚; 桥式盾构; Winkler 弹性地基梁

**中图分类号:** U 455. 47

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2018)01-0144-05

大直径、大长度管棚保护下直接顶进预制箱涵技术是近年来国内发展起来的一种全新的施工技术,主要应用在下穿地表有重要建构筑物的条件中,如下穿铁路、高速公路等这样一些要求严格限制沉降量的环境。该技术在理论分析与计算方面发展不完善;在工程施工方面难度大、技术要求高。由于该技术在国内尚属施工新工艺新技术,成功应用的案例不多,可借鉴的经验少。中铁二十四局福州铁路建设有限公司于 2008 年在厦门市杏林大桥主体工程 C 标段下穿铁路部分隧道采用 299 mm 管棚超前支护、浅埋暗挖法成功施工,郑州市文化路下穿连霍高速公路立交桥<sup>[1]</sup>、新干县善政三路下穿京九线铁路<sup>[2]</sup>、霍尔果斯铁路口岸站顶进桥下穿精伊霍铁路<sup>[3]</sup>等工程也均采用该技术取得了良好工程效果。

尽管该技术在国内已有部分应用,但是关于管棚保护下框架桥顶进技术的理论研究仍不成熟。夏才初等<sup>[4]</sup>采用数值模拟的方法分析了框架桥顶进工程地表变形情况,结果表明管棚预支护能够有效减小地表变形。李向阳<sup>[5]</sup>采用 Winkler 弹性地基梁模型对管棚力学作用机理进行分析,指出管棚预支护具有超载和卸载作用,并在实际工程中加以验证。贾金青等<sup>[6]</sup>基于

Pasternak 弹性地基梁理论对 Winkler 弹性地基梁进行了改进,并指出 Pasternak 模型较 Winkler 模型拟合更好。

本文中以南海市新龙岗大道下穿向莆铁路工程为背景,针对框架桥推进过程中“抬头”现象开展必要的理论分析,以期能够在工程施工中指导施工,防止或遏制框架桥“抬头”现象,确保施工安全。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

南昌市新龙岗大道下穿向莆铁路工程位于南昌市西客站出站咽喉区,是连接南昌西客站南北走向的重要通道,其平面布置情况如图 1 所示。

本工程采用管棚保护下框架桥顶进技术,框架桥及混凝土预制箱涵构件,在框架桥四周施打钢管形成管棚加固土体,限制路基沉降。下穿框架桥的孔跨设置为(9+2×12.5+9) m,沿铁路线路方向长度为 50.6 m,轴向长度为 104.9 m。框架桥采用两个并列连续框架结构,每个框架全宽 24.8 m,全高 9.11 m,顶板厚 1.0 m,底板厚 1.1 m,中边墙厚 1.0 m。采用桥式盾构开挖,

收稿日期: 2017-05-12 录用日期: 2017-07-17

基金项目: 福建省自然科学基金(2014J01208)

\* 通信作者: xmuleek@qq.com

引文格式: 李庶林, 李凯, 黄玉仁, 等. 管棚保护下框架桥顶进工程高程控制分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(1): 144-148.

Citation: LI S L, LI K, HUANG Y R, et al. Analyses on elevation control of bridge shield tunneling project[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2018, 57(1): 144-148. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

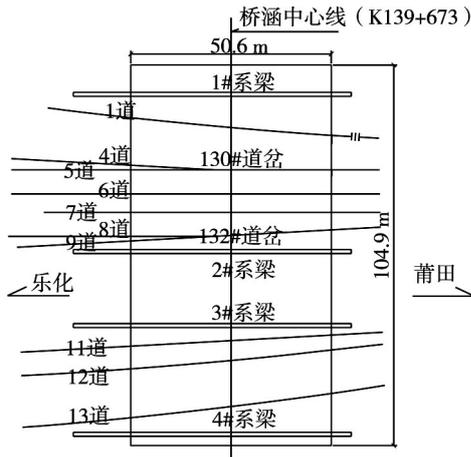


图 1 框架平面布置  
Fig. 1 Frame floorplan

管棚超前支护施工,箱身平置,轨底至箱顶距离 3.35 m.下穿框架桥顶进的示意图如图 2 所示.

### 1.2 工程地质

本工程的土质主要为人工弃填土、粉质黏土和泥质砂岩,框架桥底位于泥质砂岩强分化层上,地基承载力为 300 kPa.本段地表水不发育,地下水化学侵蚀类别为 H1,地面以上碳化环境类别为 T2,地下水水位较低(低于工作坑底面),对顶进基底土质不会造成不良影响.

### 1.3 管棚预支护

顶进前预先在框架桥顶面、两侧施打管棚,并在两端及中间设置系梁将顶面管棚连接成整体.顶面管棚采用  $\phi 299$  mm $\times$ 10 mm 无缝钢管,布置间距 0.5 m,打设长度 110 m,底面距离框架桥顶板按 20 cm 控制, M30 水泥浆填充.左右幅框架桥两侧各采用 4 根  $\phi 970$  mm $\times$ 14 mm 无缝钢管支护,侧面距离框架桥侧板按 15 cm 控制, M30 水泥浆填充.为控制框架桥顶进方向,框

架桥底部采用  $\phi 970$  mm $\times$ 14 mm 无缝钢管打设 8 根导轨,打设长度为 115 m, C20 混凝土填充.管棚的具体布置如图 3 所示.

## 2 高程姿态理论分析

框架桥在顶进过程中会产生“栽头”和“抬头”现象,底部管棚具有导向作用,当框架桥进入管棚内部时,由于管棚作用,只要底排管棚不产生沉降,框架桥“栽头”的可能性比较小.因此,主要是计算和控制框架桥顶进过程中“抬头”现象的发生,尤其是第一节框架桥随着桥式盾构顶进时容易发生“抬头”现象.

### 2.1 计算假定:

在顶进过程中,如果竖向偏差过大,会导致盾构切割管棚而使管棚丧失支护作用,因此桥式盾构、框架桥、管棚的相互作用是控制竖向偏差的关键.根据需要做计算假定如下: 1) 假定底排管棚为 Winkler 弹性地基上的弹性地基梁.2) 假定底排管棚受到的框架桥压力为线性分布.

尽管框架桥顶进过程中施工影响因素较多,所受的力随顶进状态改变而改变,难以准确分析.同时采用的 Winkler 弹性地基模型,忽略了地基的连续性,而将地基视为无穷多个独立工作的弹簧系统,计算的误差会比较大.因此采用理论分析方法能够反映和解释实际施工中的现象.

### 2.2 计算模型

#### 1) 框架桥受力分析

以右幅第一节框架桥顶进结束为例,为简化分析,忽略框架桥顶板与管棚底部夹心土加固的影响.千斤顶布置在框架桥底板处.沿着顶进方向(与铁路线正交的方向),框架桥的受力分析见图 4.

框架桥和盾构顶部所受总压力为  $G_0$ .框架桥自重

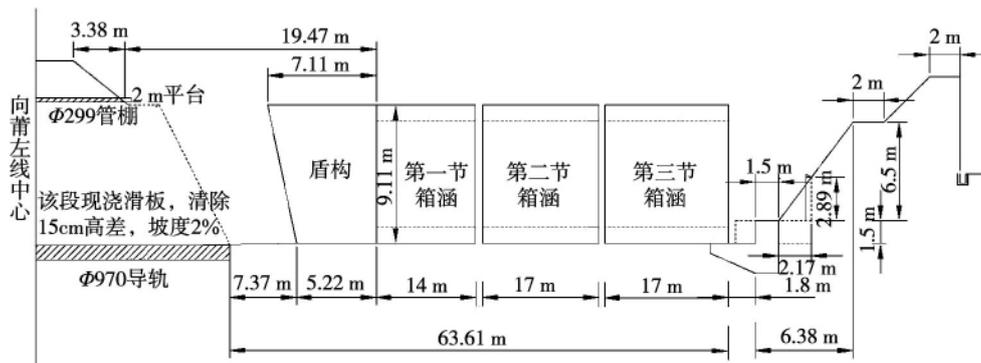


图 2 框架桥顶进示意图  
Fig. 2 The illustration of frame jacking

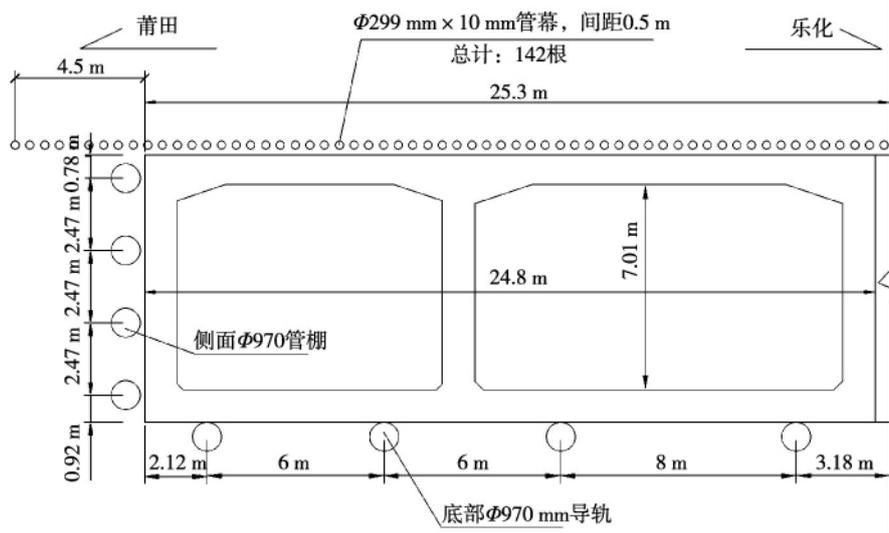


图3 管棚布置

Fig. 3 The layout of tube shed

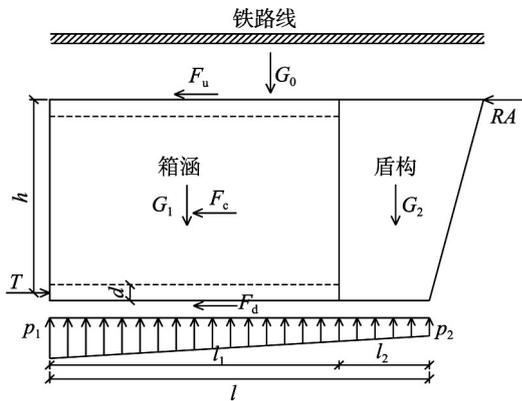


图4 框架桥受力分析计算模型

Fig. 4 Boxing force analysis and calculation model

为  $G_1$  桥式盾构自重为  $G_2$ , 千斤顶推力为  $T$ , 盾构钢刃角正面阻力为  $R$ , 钢刃角正面积为  $A$ , 则迎面阻力为  $RA$ . 顶板摩擦阻力为  $F_u$ , 两侧摩擦阻力为  $F_c$ , 底板摩擦阻力为  $F_d$ , 底板所受管棚的两侧反力分别为  $p_1$  和  $p_2$ . 设框架桥宽为  $L$ , 长为  $l_1$ , 桥式盾构顶板长度与底板长度相差较小, 为简化计算, 令盾构顶板长度与底板长度等长, 取底板长为  $l_2$ . 框架桥与盾构底板总长  $l$ . 框架桥与盾构两端所受的接触压力分别为  $p_1$  和  $p_2$ .  $d$  为底板厚度, 假设为线性分布. 根据受力平衡条件, 可得:

竖直方向受力平衡:

$$\frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{G_0 + G_1 + G_2}{Bl} \quad (1)$$

C 点力矩平衡:

$$\frac{p_1 - p_2}{2} \times \frac{1}{6}Bl^2 + G_2 \times \frac{l_1}{2} + F_d \times \frac{d}{2} =$$

$$G_1 \times \frac{l_2}{2} + RA + F_c h_1 + F_u h_1. \quad (2)$$

求解方程组 (1)、(2) 可得:

$$p_{1,2} = \frac{G_0 + G_1 + G_2}{Bl} \pm 6 \left[ \frac{G_1 \frac{l_2}{2} - G_2 \frac{l_1}{2}}{Bl^2} + \frac{RA + (F_c + F_u)h + F_d \frac{d}{2}}{Bl^2} \right]. \quad (3)$$

管棚和框架桥之间只有拉应力, 没有压应力, 若计算得  $p_2 < 0$ , 则取  $p_2 = 0$ .

### 2) 管棚受力分析

根据作用力与反作用力, 管棚与框架桥接触部分所受的接触压力也分别为  $p_1$  和  $p_2$ , 因此管棚所受的外力即为接触压力扣除管棚在该深度处自重应力的部分, 记为  $p_z$ . 如图 5 所示, 钢管为半无限长梁, 受局部荷载作用, 左端简支.

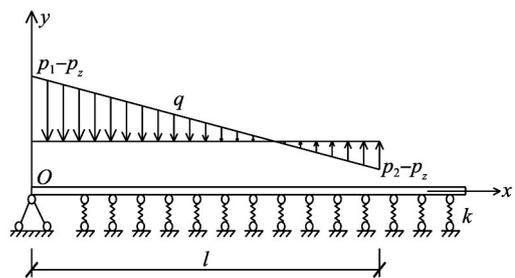


图5 管棚的弹性地基梁计算模型

Fig. 5 Calculation model of elastic foundation beam

图 5 中取分布力向下为正, 位移向上为正, 土体基

床系数为  $k$  其挠曲微分方程式<sup>[7]</sup>为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = q(x) \quad (4)$$

其中

$$q(x) = \begin{cases} -\frac{p_1 - p_2}{l}x + p_2 - p_z & (x \leq l) \\ 0 & (x > l) \end{cases} \quad (5)$$

该微分方程的边界条件有

$$\begin{cases} y \Big|_{x=0} = 0, \\ \vartheta = \frac{dy}{dx} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \\ M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = 0, \\ Q = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

考虑  $x \leq l$  的情况, 可解得梁的挠度曲线方程为

$$y = \left[ \frac{(p_1 - p_2)b}{4EI\alpha^4} (B_4 - 0.5) - \frac{(p_1 - p_2)b}{4EI\alpha^5} \left( \frac{B_1 - 0.5}{l} + \alpha B_4 \right) \right] \varphi_2 + \left[ \frac{(p_1 - p_2)b}{4EI\alpha^4} (B_2 + 0.5) + \frac{(p_1 - p_2)b}{4EI\alpha^5} \left( \frac{B_3}{l} - \alpha B_2 \right) \right] \varphi_4 + \frac{(p_1 - p_2)b}{8EI\alpha^5} \left( \frac{\psi_6}{l} \right) - \frac{(p_1 - p_2)}{4EI\alpha^4} \psi_5 \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} B_1 &= 0.5e^{-\alpha l} \cos(\alpha l), \\ B_2 &= 0.5e^{-\alpha l} (\sin(\alpha l) - \cos(\alpha l)), \\ B_3 &= -0.5e^{-\alpha l} \sin(\alpha l), \\ B_4 &= 0.5e^{-\alpha l} (\sin(\alpha l) + \cos(\alpha l)); \\ \varphi_2 &= \cosh(\alpha x) \sin(\alpha x) + \sinh(\alpha x) \cos(\alpha x), \\ \varphi_4 &= \cosh(\alpha x) \sin(\alpha x) - \sinh(\alpha x) \cos(\alpha x); \\ \psi_5 &= 1 - \cosh(\alpha x) \cos(\alpha x) \quad \psi_6 = 2\alpha x - \varphi_2; \end{aligned}$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI}} \quad k \text{ 为土体基床系数; } b \text{ 为地基梁宽度, 取值为}$$

单根管棚直径.

当  $x=l$  时, 即可求得顶进结束时刻钢管变形. 若  $y < 0$  说明框架桥“栽头”, 若  $y > 0$  说明框架桥“抬头”.

### 2.3 计算实例

以南昌市新龙岗大道下穿向莆铁路工程为例, 本工程底部采用  $\Phi 970 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$  管棚, 混凝土注浆, 钢材弹性模量  $E_1 = 210 \text{ GPa}$ , 砂浆弹性模量  $E_2 = 25 \text{ GPa}$ , 根据钢管混凝土计算公式

$$E = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{I_1 + I_2} \quad (8)$$

可得钢管混凝土弹性模量  $E = 162 \text{ GPa}$ ,  $I = 0.04346 \text{ mm}^4$ , 土体基床系数取  $k = 5000 \text{ kN/m}^3$ ,  $b = 0.97 \text{ m}$ , 可得  $\alpha = 0.115$ , 框架桥上覆土高度  $3.35 \text{ m}$ , 土容重取  $18.6 \text{ kN/m}^3$ , 第一节框架桥顶进长度为  $14 \text{ m}$ , 重  $28217.28 \text{ kN}$ , 盾构底板长度为  $8.23 \text{ m}$ , 重  $2100 \text{ kN}$ , 框架桥顶面与顶土荷载摩擦系数取  $0.3$ , 框架桥底板与地基土的摩擦系数取  $0.8$ , 侧面摩擦系数取  $0.7$ , 钢刃角正面阻力取  $500 \text{ kPa}$ , 钢刃角正面积为  $4.5 \text{ m}^2$ , 由此可得挠度方程为:

$$y = 8.561 \times 10^3 \varphi_2 + 3.176 \times 10^{-3} \varphi_4 + 0.1806 \left( \frac{\psi_6}{22.3} \right) + 0.01026 \psi_5.$$

当  $x = 22.23 \text{ m}$  时  $B$  点变形  $y_B = 3.96 \text{ mm}$ , 说明第一节框架桥顶进结束时框架桥抬头, 需要控制盾构使框架桥水平.

## 3 高程姿态控制讨论

### 3.1 高程姿态影响因素分析

#### 1) 推进长度

随着推进长度的增加, 由式(3)作出接触压力随着推进长度的变化图, 如图6所示.

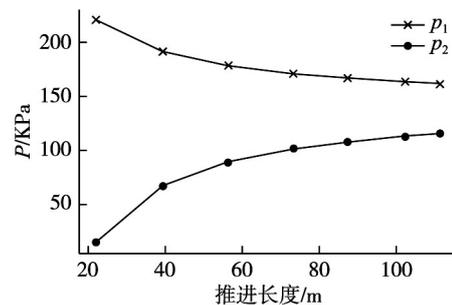


图6 接触压力随推进长度的变化趋势

Fig. 6 The contact pressure varies with the advancing length

由图6可知, 随着推进长度增加,  $p_1$  和  $p_2$  之间的差值趋于稳定, 即接触压力趋于常数, 接近框架桥自重与上覆土重之和. 在该压力下, 框架桥顶进接近水平. 因而, 推进长度的增加能逐步遏制框架桥“抬头”现象.

#### 2) 框架桥“接头”

本工程框架桥顶进过程中, 采用刚性“接头”, 即在中继间框架外壁接缝四周设置钢护套. 采用刚性接头, 等同于推进长度增加, 分析结果同(i)推进长度的影响, 能够有效遏制框架桥“抬头”现象.

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

除了以上两个因素以外,影响框架桥高程控制的还有管棚刚度及地基刚度等,由式(7),管棚刚度增加能使钢管变形减小,从而使框架桥上抬量或下倾量减小。基床系数 $k$ 增大,地基的变形量减小,框架桥的上抬量或下倾量相应减小。

### 3.2 高程姿态控制措施

1) 箱涵顶部夹心土注浆。开挖过程中框架桥的自重会小于被其置换的同体积的土体自重,底排管棚会因为应力减小而产生一定量上抬,而要遏制框架桥“抬头”需适当增加框架桥顶部压力,增大底排管棚的压应力,遏制变形。

2) 及时校对高程轴线方向,做到勤观察勤纠偏。顶进过程中采取阶梯状挖土方法、调整挖土顺序等及时纠偏,避免压力差过大导致支架变形或破坏。

3) 注意桥式盾构各墩柱内部土体开挖同步性。盾构开挖时,在角部发生卡机现象容易引发内部杆件失稳,需要保证内部土体开挖同步性,并及时观察局部孤石及管棚侵限现象。

4) 做好路基监测。开挖过程中中间土体的脱空容易引起铁路局部变形过大,需勤观测勤报告,同时避免列车通行时挖土施工及顶进。

## 4 结 论

本文的理论分析表明:

1) 底排管棚的支撑和引导作用有助于框架桥推进,并能有效遏制框架桥“栽头”和“抬头”现象。框架

桥推进过程中,“抬头”现象控制尤为重要,随着框架桥顶进长度增加,能逐渐遏制框架桥“抬头”现象。

2) 增加底排管棚刚度、框架桥顶部前方增加注浆压力、每节框架桥之间采用刚性连接均能有效遏制框架桥推进过程中地基的沉降量与隆起量。

3) 在推进过程中需要特别注意桥式盾构内部杆件发生破坏、变形,在推进中及时观察、及时纠偏,保持桥式盾构墩柱内部土体开挖的同步性,在框架桥推进过程中至关重要。

4) 本文中采用的理论分析方法能够反应和解释实际施工中的现象,对实际施工有所指导。

### 参考文献:

- [1] 郭亚宇. 框架桥下穿连霍高速公路施工技术[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(3): 58-59.
- [2] 欧阳鸿志. 桥式盾构法在下穿铁路既有有线框架桥施工中的应用[J]. 工程技术与应用, 2016, 41(2): 41-42.
- [3] 艾长江. 框架桥下穿铁路顶进法施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2013(增1): 107-108.
- [4] 夏才初, 龚建伍, 陈佑新, 等. 滑行道下超长管棚-箱涵桥顶进地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 696-703.
- [5] 李向阳. 大断面管幕-框架桥推进工法中管幕力学作用与开挖面稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 2006: 31-40.
- [6] 贾金青, 王海涛, 涂兵雄, 等. 管棚力学行为的解析分析与现场测试[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1858-1864.
- [7] 朱合华, 张子新, 廖少明, 等. 地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 49-51.

## Analyses on Elevation Control of Bridge Shield Tunneling Project

LI Shulin<sup>1\*</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, HUANG Yuren<sup>1,2</sup>, CHEN Dongxia<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen 361005, China;

2. China Railway 24 Bureau of Fuzhou, Fuzhou 350013, China)

**Abstract:** The direct jacking technology under the protection of pipe shed is very strict to the control of subgrade deformation, and there is little related research on the theories at home and abroad. Based on the actual engineering situation, the mechanics analysis model is established to calculate the force of the steel pipe under the frame bridge. According to the stress condition of the steel pipe, the steel pipe is assumed to be the Winkler elastic foundation beam. Based on the beam theory, the differential equation of steel pipe is established, and which is solved to calculate the deflection deformation of the steel pipe during the jacking process of the frame bridge, and then the height deviation of the frame bridge during the jacking process is determined. The theoretical analysis shows that the support and guidance of the bottom pipe shed contribute to the advance of the frame bridge and can effectively curb the phenomenon of "sink" and "rise" of the frame bridge. During the process of frame bridge advancement, the control about the phenomenon of "rise" very important. With the increase of the length of the frame bridge, it can gradually curb the phenomenon of the "rise" of the frame bridge.

**Key words:** box culvert; tube shed; bridge shield; Winkler elastic foundation beam

<http://jxmu.xmu.edu.cn>