

新管幕结构受力模式及关键技术分析

贾鹏蛟¹, 赵文¹, 关永平², 李伟伟¹
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘 要: 沈阳地铁九号线奥体中心站采用 Steel Tube Slab 管幕工法建造覆土超浅埋暗挖地铁车站. 对新管幕结构的纵向和横向受力模式进行研究, 阐述了管幕结构的作用机理, 并对管幕结构的抗弯承载力和抗剪承载力计算理论进行讨论, 给出了相应的计算公式. 结合奥体中心的施工工况, 对管幕结构的内力进行计算. 随着右侧导洞贯通时, 与左侧导洞相比较, 跨中正弯矩增加 8%, 最大负弯矩减小 17.8%. 管幕结构沿纵向跨中最大变形为 6.46 mm. 研究结果对新管幕工法的应用和推广具有参考意义.

关 键 词: STS 管幕; 超浅埋; 洞桩法; 受力模式; 弹性地基梁

中图分类号: U 449.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0891-05

Analysis of Mechanical Characteristic and Key Technique of Steel Tube Slab Structure

JIA Peng-jiao¹, ZHAO Wen¹, GUAN Yong-ping², LI Wei-wei¹
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China. Corresponding author: LI Wei-wei, E-mail: 2738573371@qq.com)

Abstract: Steel tube slab(STS) method is adopted to construct the ultra-shallow-buried subway station of the Aoti Central station, line 9 in Shenyang. The longitudinal and lateral mechanical characteristics of STS structure were investigated, and the interaction mechanism was elaborated; then, the calculation theory of bearing flexural capacity and shear capacity were discussed, and the relative formulas were presented. According to the construction condition, the internal force of STS structure during the construction was calculated. Compared with the left pilot tunnel, the positive mid-span bending moment of the supporting structure increases by 8% when the construction of right pilot tunnel is completed, and the maximum negative bending moment decreases by 17.8%. The maximum deformation of the longitudinal mid-span is 6.46 mm. The results can provide some important references for the application and promotion of STS.

Key words: steel tube slab; shallow-buried; pile-beam-arch; mechanical pattern; elastic foundation beam

管幕法作为一种地下工程暗挖技术,在钢管幕基础上构筑大跨度、大断面地下工程的施工工艺,尤其在城市复杂环境下穿既有隧道、道路、桥梁以及建造超浅埋工程中有着显著的优越性^[1].

管幕工法最早出现在欧洲,20 世纪 70 年代首次被用来成功修建了安特卫普的地下工程^[2].在美国也被用于修建浅埋隧道工程^[3].韩国和日本在传统管幕工法的基础上,对工法的施工步骤和连接方式进行优化,提出了新型的管幕工法,在韩国、日本以及新加坡等国家多次运用,取得了良好的经济效益和社会效益^[4-5].

中国首次应用管幕工法是 1984 年香港采用管幕法修建地下通道.1989 年用于修建台北松山机场地下通道工程,2004 年修建上海中环线虹许路北虹路地道^[6].

管幕工法经过多年的发展以及国内外学者的研究,取得了丰硕的成果.但随着地下工程施工遇到的周边环境越来越复杂,传统管幕结构在开挖期间必须辅以密集型钢支撑体系,且严格控制开挖步距和支撑体系间距,以确保管幕承载力能满足施工要求.此种工法已不能满足特殊施工的要求,研究和实践新的施工方法迫在眉睫.

新管幕结构(STS)是一种用于修建地铁站、下穿既有隧道、道路、铁路的新型地下支护体系,它采用混凝土、翼缘板以及螺栓将若干个钢管连接起来,形成一个共同受力的支护结构^[7].新管幕结构不仅提高了结构可靠性,而且能够有效减少对既有建筑影响、降低地层变形等.因此,新管幕工法有广阔的应用前景^[8-9].

新管幕工法结合洞桩法修建超浅埋车站在国内首次应用于实际工程中,缺乏相关经验.加之奥体中心站正上方为交通繁忙的青年大街主干道,埋深较浅.基于此,本文结合工程难点以及存在的问题,通过研究新管幕结构的受力模式以及施工过程中的风险分析,为以后的施工提供参考.

1 工程概况

沈阳地铁九号线奥体中心站为 14 m 岛式站台车站,两端为明挖施工,中间跨为暗挖施工.其中,暗挖段采用新管幕支护结合洞桩法修建,三层双柱三跨断面,暗挖段长度为 80.5 m,结构净宽 22.9 m,高 21.14 m,覆土厚度约 3.0 m,底板埋深约 24.5 m,见图 1.结合新管幕结构的受力性能和施工工况,选取外径为 900 mm 的圆形钢管,厚度为 16 mm,翼缘板厚度为 20 mm,钢材为 Q235 钢.连接螺栓选取 M27,8.8 级高强度螺栓.

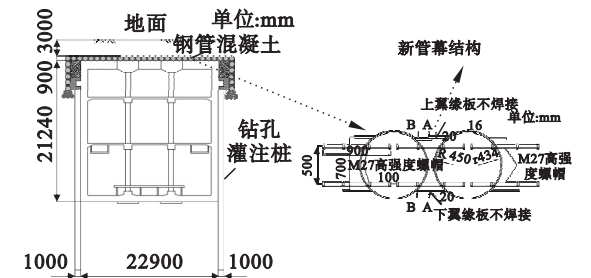


图 1 暗挖段标准横断面图
Fig. 1 Standard cross section

2 新管幕结构受力模式

2.1 新管幕法结合洞桩法施工工序

新管幕结构结合洞桩法施工主要包含以下 4

- 步,见图 2a~2d.
- 1) 施作新型管幕结构以及开挖上下导洞;
 - 2) 施作钢管柱以及相应的顶纵梁和底纵梁;
 - 3) 开挖站厅层土体,并架设斜撑,同时施作边桩、冠梁结构和中板等;
 - 4) 开挖站台层,施作底板、侧墙以及其他附属结构.

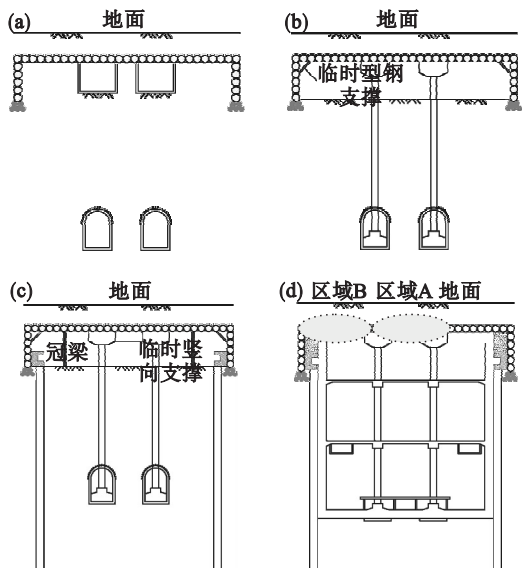


图 2 新管幕结合洞桩法施工工序图
Fig. 2 Construction process of STS combined with PBA method

2.2 新管幕结构的横向受力模式

当上导洞贯通时,新管幕结构在横向跨度 5 m 内没有支护体系,完全依靠自身承载能力,此时结构处于最不利情况.加之现有的管幕计算力学模型仅适用于管间连接较弱的传统管幕结构,忽略相邻钢管间的相互作用,将结构等效为纵向梁进行计算.

新管幕结构的管间连接较强,传统的计算模型已不适用.本文将新管幕结构视作 Winkler 弹性地基梁计算上部导洞贯通时其横向受力状态.考虑到上导洞贯通时管幕结构主要承受横向荷载,加之管幕结构长度较大,将其简化成平面应变模型.由于管幕结构上方土体较浅,将管幕结构的上方荷载等效为均布荷载 $q(x)$.

根据 Winkler 弹性地基梁,新管幕结构的计算模型见图 3.由图可知,上导洞开挖时导致的土体扰动可分为 AB 和 CD 两段,这两端范围内新管幕结构受到地基反力 $k(x)$ 作用;在 A 到 D 范围内承受上方荷载 $q(x)$;BC 段所受荷载由新管幕结构承担,而 OA 段和 DE 段仅承受地基反力 $k(x)$.

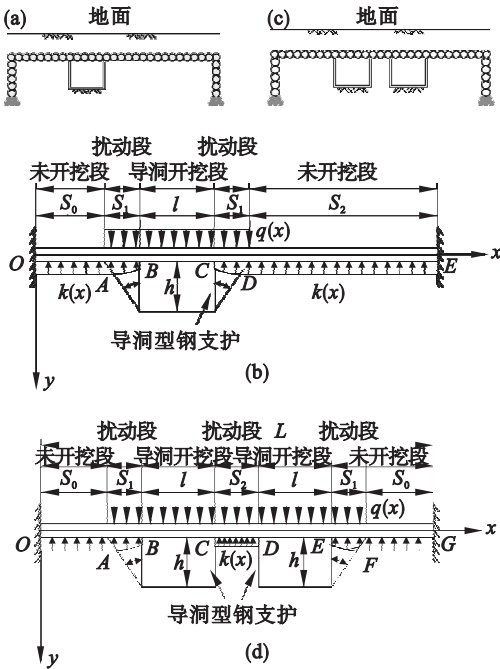


图3 新管幕横向受力计算模型

Fig. 3 Calculation model of STS structure

- (a) —左侧导洞贯通;
 (b) —左侧导洞贯通时的计算模型;
 (c) —左右侧导洞均贯通;
 (d) —左右侧导洞贯通时的计算模型.

1) 在 OA 段范围内, 不受地层荷载的作用, 地基反力为 $k(x) = Kw(x)$, 即

$$EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} + k(x)b = 0. \quad (1)$$

式中: EI 为新管幕结构的抗弯刚度; ω 为新管幕结构的竖向位移; b 为弹性地基梁单位宽度; k 为地基作用反力. 其中 K 是地层基床系数:

$$K = \frac{0.65E_s}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{E_s b^4}{EI}}. \quad (2)$$

当地层荷载为 0 时, 则 Winkler 弹性地基挠度方程的通解为

$$\omega_1(x) = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x). \quad (3)$$

式中 $\lambda^4 = \frac{Kb}{4EI}$.

2) AB 和 CD 两段受导洞施工的影响, 新管幕结构上方的竖向荷载和地反力分别为 $q(x)$ 和 $k(x)$, 可得

$$EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} + k(x)b = q(x), \quad (4)$$

$$q(x) = Pb, \quad (5)$$

$$P = \frac{\gamma B - c}{K_0 \tan \varphi} \left[1 - \exp \left(-\frac{K_0 H \tan \varphi}{b} \right) \right] + q \exp \left(-\frac{K_0 H \tan \varphi}{b} \right). \quad (6)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; q 为地面超载; K_0 为静止土压力系数; H 为管幕结构埋深.

此时, AB 段挠度控制方程的通解为

$$\omega_2(x) = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) + \omega_2^*. \quad (7)$$

由梁的连续性可以得到, 当 $x = s_0$ 时, 则

$$\omega_1|_{x=s_0} = \omega_2|_{x=s_0}, \quad (8)$$

$$\omega_1'|_{x=s_0} = \omega_2'|_{x=s_0}. \quad (9)$$

将其代入式(3)和式(4), 可得

$$\omega_2^* = \frac{q}{kb} (1 - \text{ch} \lambda (s_0 - x) \cos \lambda (s_0 - x)). \quad (10)$$

CD 段挠度控制方程的通解为

$$\omega_4(x) = e^{\lambda x} (B_1 \cos \lambda x + B_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (B_3 \cos \lambda x + B_4 \sin \lambda x) + \omega_4^*. \quad (11)$$

由梁的连续性可知, 当 $x = s_0 + 2s_1 + l$ 时, 则

$$\omega_4|_{x=s_0+2s_1+l} = \omega_5|_{x=s_0+2s_1+l}, \quad (12)$$

$$\omega_4'|_{x=s_0+2s_1+l} = \omega_5'|_{x=s_0+2s_1+l}. \quad (13)$$

将其代入式(4)和(11)则有

$$\omega_4^* = \frac{q}{kb} (1 - \text{ch} \lambda (x - s_0 - 2s_1 - l) \cos \lambda (x - s_0 - 2s_1 - l)). \quad (14)$$

3) 在 BC 段范围内, 新管幕结构上方的竖向荷载为 $q(x)$, 同时地基反力为 0, 则

$$EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} = bq(x). \quad (15)$$

BC 段的通解为

$$\omega_3(x) = \frac{qx^4}{24EI} + A_1 x^3 + A_2 x^2 + A_3 x + A_4. \quad (16)$$

4) 在 DE 段范围内, 由于未受到导洞施工的影响, 其控制方程为

$$EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} + k(x)b = 0. \quad (17)$$

DE 段控制方程的通解为

$$\omega_5(x) = e^{\lambda x} (B_1 \cos \lambda x + B_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (B_3 \cos \lambda x + B_4 \sin \lambda x). \quad (18)$$

新管幕结构左右两端均受到土体的约束, 则结构两端可假定为固定端, 即

当 $x = 0$ 时:

$$\left. \begin{aligned} \omega|_{x=0} &= 0, \\ \omega'|_{x=0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

当 $x = L$ 时:

$$\left. \begin{aligned} \omega|_{x=L} &= 0, \\ \omega'|_{x=L} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由梁的连续性可以得到, 当 $x = s_0 + s_1$ 时:

$$\left. \begin{aligned} \omega_2|_{x=s_0+s_1} &= \omega_3|_{x=s_0+s_1}, \\ \omega_2'|_{x=s_0+s_1} &= \omega_3'|_{x=s_0+s_1}, \\ \omega_2''|_{x=s_0+s_1} &= \omega_3''|_{x=s_0+s_1}, \\ \omega_2'''|_{x=s_0+s_1} &= \omega_3'''|_{x=s_0+s_1}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

当 $x = s_0 + s_1 + l$ 时:

$$\left. \begin{aligned} \omega_3|_{x=s_0+s_1+l} &= \omega_4|_{x=s_0+s_1+l}, \\ \omega_3'|_{x=s_0+s_1+l} &= \omega_4'|_{x=s_0+s_1+l}, \\ \omega_3''|_{x=s_0+s_1+l} &= \omega_4''|_{x=s_0+s_1+l}, \\ \omega_3'''|_{x=s_0+s_1+l} &= \omega_4'''|_{x=s_0+s_1+l}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将上述边界条件代入式(3),(7),(14),(16),(18),建立 12 个方程,即可求解 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4$ 等 12 个未知参数.

根据本文提出的管幕结构计算模型,结合新管幕结构的横向跨度 L 为 27 m,导洞跨度 l 为 5 m,导洞距边墙的距离 s_0 为 7 m,导洞高度 h 为 5 m,新管幕结构的等效横向抗弯刚度为 $4.32 \times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}$.可得到上部导洞贯通时新管幕结构的弯矩和剪力,见图 4.由图可知,新管幕结构在导洞两侧 3 m 范围为核心受力区.当左侧导洞贯通时,导洞跨中的管幕结构正弯矩为 $248 \text{ kN}\cdot\text{m}$,导洞边墙位置处管幕结构最大负弯矩为 $-370 \text{ kN}\cdot\text{m}$.由于计算模型中假定导洞边墙为刚性支座,导致边墙处的负弯矩较大;此时剪力最大值达到 125 kN ,也位于导洞边墙位置.当右侧导洞贯通时,导洞跨中正弯矩达到 $268 \text{ kN}\cdot\text{m}$,增加了 8% 左右,而导洞边墙位置处最大负弯矩为 $-304 \text{ kN}\cdot\text{m}$,减小了 17.8%.当上部导洞贯通后,整体管幕结构的正弯矩增加,负弯矩减小,符合结构的受力模式,表明本文提出的计算模型能较好预测新管幕结构的横向受力模式.

2.3 新管幕结构的纵向受力模式

新管幕结构纵向最不利工况,见图 2d.当站厅层施工完成后,由于区域 B 的管幕结构主要承担横向受力,则区域 A 处的管幕结构在纵向受力为整个过程的最不利工况.管幕结构可沿纵向等效为连续梁结构,边跨为 6.05 m,中间跨度为 6.5 m,见图 5.

为研究管幕结构的纵向受力状态和竖向变形的最不利情况,把单根钢管混凝土构件作为研究对象,不考虑钢管间横向作用,计算其弯矩、剪力和竖向变形.采用文献[10]提出的钢管混凝土的抗弯刚度计算方法:

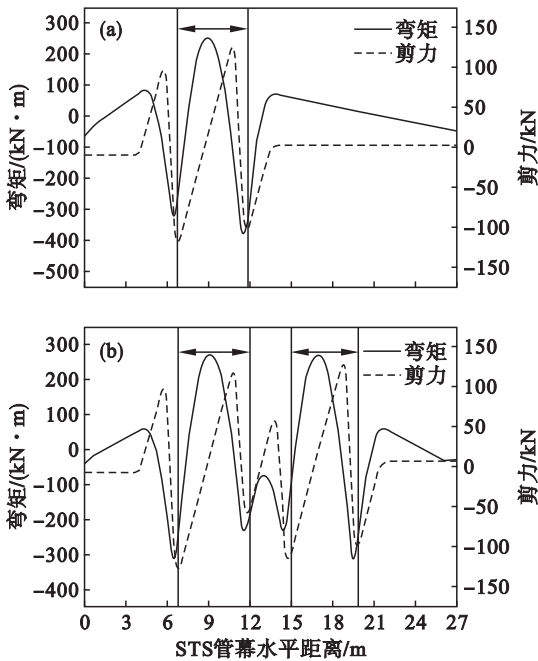


图 4 上部导洞贯通时新管幕内力变化曲线
Fig. 4 Internal force curves of STS structure after excavation of the upper pilot
(a)—左侧导洞贯通;(b)—右侧导洞贯通.

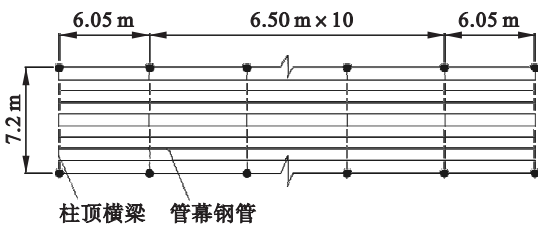


图 5 区域 A 管幕结构纵向受力模型
Fig. 5 Longitudinal mechanical model of STS structure in area A

$$E_{scm} I_{sc} = E_s I_s + E_c I_c, \quad (23)$$

$$E_{scm} = k_2 E_{sc}. \quad (24)$$

考虑到钢管混凝土结构出现混凝土开裂时,会导致整体结构的刚度退化.本文基于文献[11]对式(19),(20)进行了改进,进一步完善了钢管混凝土结构的抗弯刚度计算公式:

$$E_{scm} I_{sc}^0 = E_{scm} (0.6625 + 0.9375\alpha) I_{sc}. \quad (25)$$

管幕结构在上方荷载作用下的内力分布见图 6.由图可知,管幕结构跨中最大正弯矩为 $176.99 \text{ kN}\cdot\text{m}$,最大负弯矩为 $260.29 \text{ kN}\cdot\text{m}$,最大剪力为 236.62 kN ,三者均位于边跨位置.表明在施工过程中,纵向方向的边跨位置为整体结构的最薄弱环节.按照钟善桐模型计算出的管幕结构纵向承载力为 $4\,160 \text{ kN}\cdot\text{m}$,抗剪承载力为 $8\,479 \text{ kN}$,表明管幕结构在最不利工况下满足施工要求.在管幕结构变形方面,其最大变形发生在边跨位置,约 6.46 mm ,而本工程的管幕结构竖向

变形控制值为 10 mm,表明其变形同样满足施工 要求.

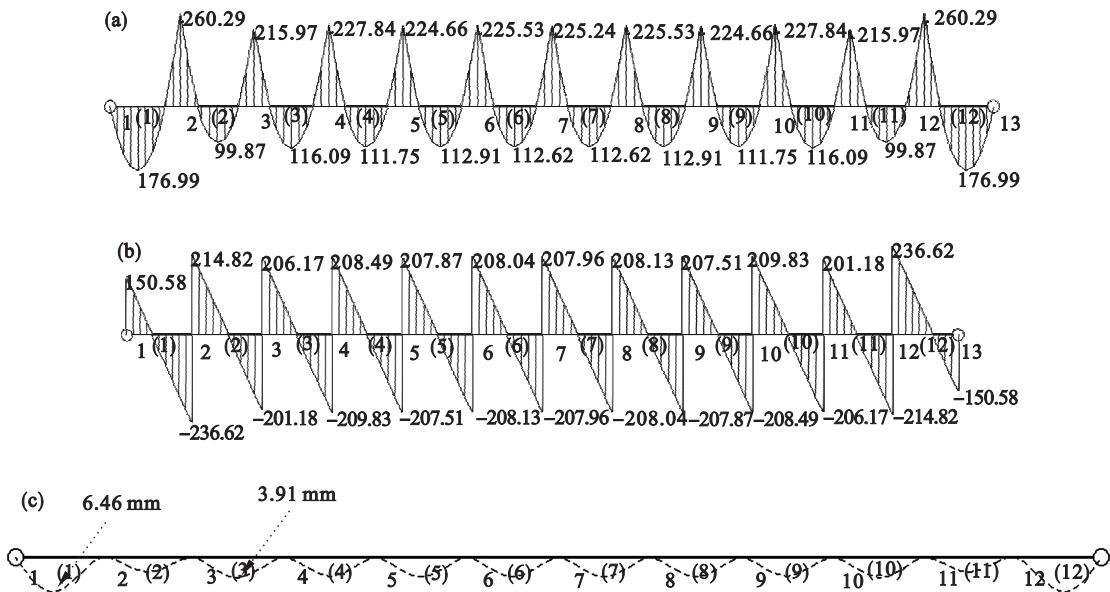


图 6 管幕结构纵向受力情况
Fig. 6 The longitudinal inner forces of the STS structure

(a)—弯矩图(单位 $\text{kN}\cdot\text{m}$); (b)—剪力图(单位 kN); (c)—纵向变形图.

3 结 论

- 1) 新管幕工法在复杂地质下修建三层三跨地铁暗挖车站,能够合理控制地层变形,确保施工安全性,还能提高空间利用率.
- 2) 提出了新管幕结构的横向和纵向受力模式的计算公式,为后期施工提供理论支撑.
- 3) 上导洞贯通时,在导洞左右两侧各 3 m 范围为主要受力区,此区域为管幕结构最不利受力区域.当左侧导洞贯通时,导洞跨中正上方的管幕结构正弯矩为 $248\text{ kN}\cdot\text{m}$,负弯矩为 $-370\text{ kN}\cdot\text{m}$.随着右侧导洞贯通时,跨中正弯矩增加 8%,最大负弯矩减小 17.8%.
- 4) 管幕结构沿纵向跨中最大正弯矩为 $176.99\text{ kN}\cdot\text{m}$,负弯矩为 $260.29\text{ kN}\cdot\text{m}$,最大变形为 6.46 mm ,均位于边跨位置,满足施工要求.

参考文献:

[1] Musso G. Jacked pipe provides roof for underground construction in busy urban area[J]. *Civil Engineering*,1979, 49(11):79-82.

[2] Hemerijckx I E. Tubular trust jacking for underground roof construction on the Antwerp Metro [J]. *Tunnelling*, 1985 (5):13-15.

[3] Rhodes G W, Kauschinger J L. Microtunnelling provides structural support for large tunnels with shallow cover[C]// North American Tunneling. Rotterdam; Balkema AA, 1996: 443-449.

[4] Kaneko M, Sibata Y, Katou K. The construction of large section tunnel under highway using FJ method in Oosawa Narita Line[J]. *Civil Construction*,2003,41:2-9.

[5] Bito Y. Construction methods of the structures passing through under railway lines [J]. *Japanese Railway Engineering*,1987,4(26):6-9.

[6] 肖世国,李向阳,夏才初,等. 管幕内顶进箱型时顶部管幕力学作用的试验研究[J]. *现代隧道技术*,2006,43(1):22-28.

(Xiao Shi-guo, Li Xiang-yang, Xia Cai-chu, et al. Study on the behavior of the upper pipe-curtain during the advance of a box culvert with in pipe-curtails by a model test[J]. *Modern Tunnelling Technology*,2006,43(1):22-28.)

[7] 赵文,贾鹏蛟,王连广,等. 地铁车站 STS 新管幕构件抗弯承载力试验研究[J]. *工程力学*,2016,33(8):167-176.

(Zhao Wen, Jia Peng-jiao, Wang Lian-guang, et al. Experimental study on the flexural capacity of steel tube slab members of subway station [J]. *Engineering Mechanics*, 2016,33(8):167-176.)

[8] Jiang B F, Jia P J, Zhao W, et al. The application of compressive sampling in rapid ultrasonic computerized tomography(UCT) technique of steel tube slab (STS) [J]. *Plos One*,2018,13(1):1-15.

[9] Jia P J, Zhao W, Chen Y, et al. A case study on the application of the steel tube slab structure in construction of a subway station[J]. *Applied Sciences*, 2018,8(9):1437.

[10] Furlong R W. Strength of steel encased concrete beam columns[J]. *Journal of Structural Division, ASCE*,1967,93(5):113-124.

[11] 钟善桐. 钢管混凝土刚度的分析[J]. *哈尔滨建筑大学学报*,1999,32(3):13-18.

(Zhong Shan-tong. Analysis of rigidity for concrete filled steel tube [J]. *Journal of Harbin University of Civil and Architecture*,1999,32(3):13-18.)