

NSTS 管幕结构横向连接方法试验研究

李 雪, 王连广, 杨 佳

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 提出一种基于钢管连接的 NSTS(new steel tube slab)管幕结构,在纵向大钢管之间横向布置连接小钢管,浇筑混凝土后形成纵横向复合钢管混凝土整体结构,以解决现有管幕结构施工难度大、横向刚度及承载力低等缺点.通过试验研究不同钢管连接方式对 NSTS 构件受力性能的影响.结果表明,采用螺栓+T 型钢板连接及采用螺栓连接的试件与仅采用 T 型钢板连接的试件相比,承载力分别提高 58.4%,51.2%,刚度分别提高 123.3%,97.5%,螺栓+T 型钢板的连接方法对 NSTS 构件的受力性能最为有利;混凝土强度等级对试件的刚度和变形影响较大,对承载力影响不明显.

关 键 词: NSTS 结构;钢管混凝土;连接方法;受力性能;试验研究

中图分类号: TU 317⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)07-1028-06

Experimental Study on Transverse Connection Method of the NSTS Structure

LI Xue, WANG Lian-guang, YANG Jia

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Lian-guang, E-mail: wanglianguang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: A new steel tube slab (NSTS) structure using small-sized steel tubes as transverse connections was presented in order to ease the construction difficulty and enhance the transverse stiffness and the bearing capacity of the NSTS. Small-sized steel tubes were arranged between the longitudinal steel tubes in transverse direction, forming a composite structure of concrete-filled steel tube after concreting the longitudinal and transverse steel tubes. The connection methods between the transverse tube and the longitudinal tube were studied by analyzing the mechanical behavior of NSTS members. The results indicate that the bearing capacity of the specimen connected by bolts + T-shaped steel plate, and only by bolts is increased by 58.4% and 51.2% respectively, compared with that connected only by T-shaped steel plate, and the stiffness is increased by 123.3% and 97.5%, respectively. The connection method of bolts + T-shaped steel plate is most favorable to the mechanical behavior of the NSTS members. The concrete strength affects the stiffness and deflection of the specimen, but has little impact on the bearing capacity.

Key words: NSTS structure; concrete-filled steel tube; connection method; mechanical behavior; experimental study

管幕法是地下工程暗挖法之一,它是利用微型顶管技术在拟建的地下建筑物四周顶进钢管,钢管之间以锁口导向,并注入防水材料,形成地下空间围护结构.管幕法适用于软土地层浅埋式大断面长距离暗挖地下工程,具有地面沉降较小、对

周围环境及交通影响小等优点,已在国内外一些地下工程中得到应用,各国专家、学者对其受力性能进行了相关研究.

1971 年,日本修建的 Kawase-Inae 穿越铁路的通道工程首先采用了管幕法^[1],此后,比利时、

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N170106006); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540303, 20170540304).

作者简介: 李 雪(1991-),女,辽宁阜新人,东北大学博士研究生;王连广(1964-),男,辽宁鞍山人,东北大学教授,博士生导师.

新加坡等国家先后将管幕法应用于地下工程^[2-4],中国大陆 2004 年首次在隧道施工中使用管幕法. 随着管幕法应用范围的扩大,国内外专家、学者对管幕结构进行了改进,逐渐形成 NTR (new tubular roof), STS 等新的管幕工法^[5-7]. Yen 和 Shi 等^[8-9]通过有限元分析估算曲线管幕钢管顶力,结合监测数据给出了顶管荷载公式. 黎永索等^[10]对管幕法地表沉降进行了研究,预测结果和监测结果吻合良好. 李慎刚等^[11]研究了顶管过程中地表竖向变形及顶力的变化规律. Lee 等^[12]通过模型试验、近景摄影测量技术及有限元分析对管棚隧道的稳定性及破坏模式进行了研究. Sim 等^[13]通过试验研究了整体式管棚的受力性能和下承式隧道的受力性能. 阎石等^[14]对 NTR 构件的横向锚固力学性能进行了研究. 贾鹏蛟等^[15-16]对 STS 管幕构件的力学性能进行了参数分析. STS 管幕结构施工时,先将大钢管顶进岩土中,人工清理大钢管内渣土,并在大钢管内清理大钢管之间的渣土,布置连接钢筋或螺杆,然后,在大钢管内及钢管之间浇筑混凝土,形成整体结构. 研究表明,STS 管幕结构存在的不足是:在纵向钢管内利用人工清理相邻纵向钢管之间的渣土时,由于受施工空间限制,钢管之间渣土很难清理干净,无法保证钢管之间钢筋混凝土的浇筑质量,大大降低横向连接结构的承载力和刚度,带来安全隐患.

为克服 NTR, STS 管幕结构施工难度大、横向连接钢筋混凝土结构承载力低、刚度小的缺点,在现有管幕结构的基础上,本文提出一种 NSTS (new steel tube slab) 管幕结构:在纵向大钢管之间布置连接小钢管,然后,同时在大、小钢管内浇筑混凝土,利用小钢管混凝土将纵向大钢管混凝土横向连接起来,形成由纵横钢管混凝土构成的整体结构. 该连接方法的基本思想是:以小直径钢管混凝土结构替代传统管幕结构纵向大钢管之间的肋梁或钢筋混凝土板连接结构,解决纵向钢管之间清理渣土困难、施工质量难以保证的问题;同时充分利用钢管混凝土结构刚度大、承载力高的特点,提供一种施工简单、横向连接性能好、地表沉降量小的管幕围护结构. 由于管幕结构常应用于穿越城市既有地下管线的工程,因此在开挖过程中通常不允许使用明火,不能简单地将纵横向钢管焊接连接,为此,横向钢管混凝土与纵向钢管混凝土的连接十分关键,是保障 NSTS 管幕结构使用的必要条件. 本文通过在小钢管端部设置螺栓或 T 型钢板,设计了 3 种纵横向钢管混凝土的

连接方式,通过试验,分析 NSTS 构件的受力模式和破坏机理,研究不同连接方式、混凝土强度等级等参数对 NSTS 构件受力性能的影响.

1 试验研究

1.1 试验设计

本试验制作了 5 个试件,试件长度为 1 029 mm,计算长度为 810 mm,大钢管圆心距为 405 mm,小钢管长度为 360 mm,小钢管伸入大钢管的长度为 81 mm,其他设计参数见表 1. 设计了 3 种不同的纵横钢管混凝土的连接方式:在小钢管端部设置螺栓 + T 型钢板(试件 NSTS1, NSTS4 和 NSTS5),见图 1a;仅设置 T 型钢板(试件 NSTS2),见图 1b;仅设置螺栓(试件 NSTS3),见图 1c.

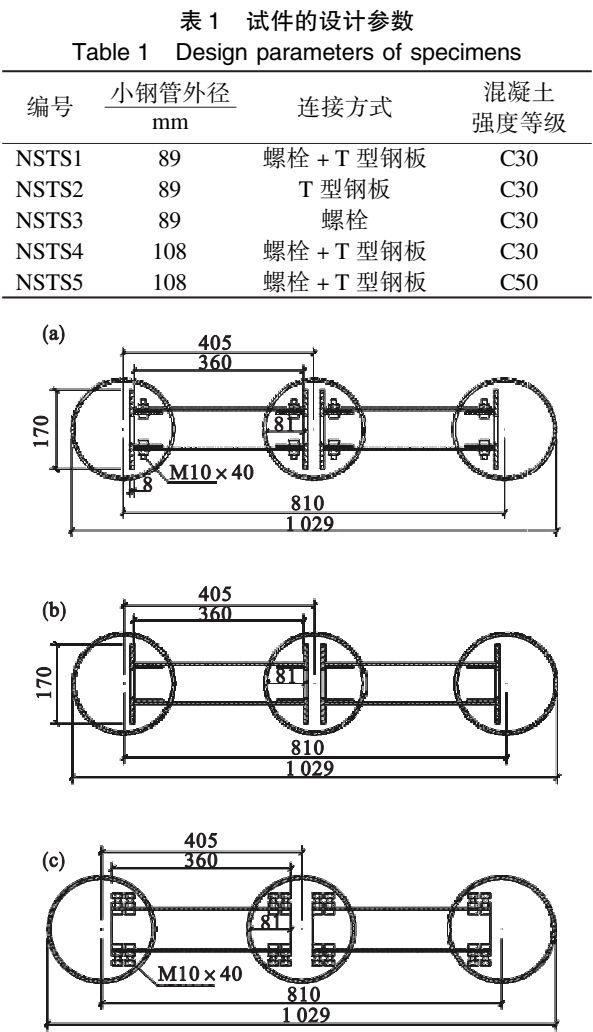


图 1 连接方式设计示意图 (mm)

Fig. 1 Sketch maps of the connection methods

(a) —螺栓 + T 型钢板连接; (b) —T 型钢板连接;
(c) —螺栓连接.

大钢管长 250 mm, 外径为 219 mm, 管壁厚

6 mm;小钢管外径采用 89 mm 和 108 mm 两种规格,管壁厚 4 mm;钢板规格为 170 mm × 170 mm,厚 8 mm;螺栓规格为 M10 高强螺栓. 试件的材料特性见表 2.

试件制作过程:1) 按设计尺寸将大、小钢管及钢板切割、打孔,见图 2a ~ 2d;2) 将小钢管插入大钢管内,按照设计的三种连接构造,将试件连接成型,见图 2e;3) 浇筑混凝土形成整体并在标准条件下养护,见图 2f.

表 2 试件的材料特性			
名称	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	混凝土轴心 抗压强度/MPa
大钢管	257.7	452.3	—
小钢管	349.5	404.3	—
钢板	272.8	595.0	—
C30 混凝土	—	—	21.4
C50 混凝土	—	—	34.7

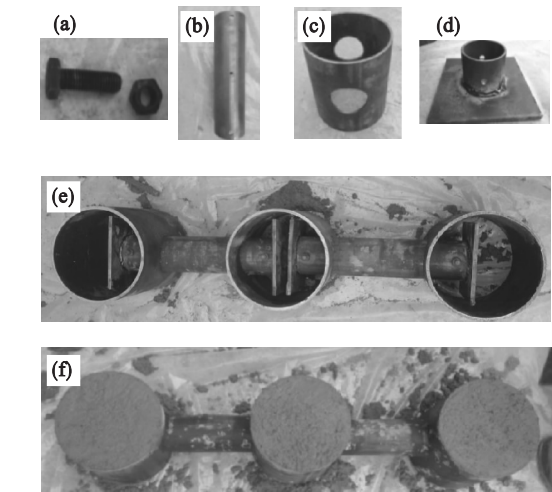


图 2 试件制作
Fig. 2 Specimen making

(a) —螺栓; (b) —小钢管; (c) —大钢管;
(d) —T 型钢板; (e) —连接成型; (f) —浇筑混凝土.

1.2 试验方法

在小钢管节点截面和中截面的顶部和底部沿小钢管纵向及环向粘贴应变片,测量该处应变,测点布置见图 3,图中 S1 ~ S8 分别表示沿节点截面顶部环向、顶部纵向、底部环向、底部纵向以及中截面顶部环向、顶部纵向、底部环向和底部纵向布置的应变片. 试验采用单点静力加载以及荷载控制的单调分级加载制度. 在跨中、支座处分别布置位移计,测量试件跨中及支座处位移,试验装置见图 4. 开始加载后,观测并记录各测点仪器仪表的读数,观察试件变形,试件达到极限荷载(P_u)后,继续加载至荷载降低到 85% P_u ,停止加载,试件

破坏.

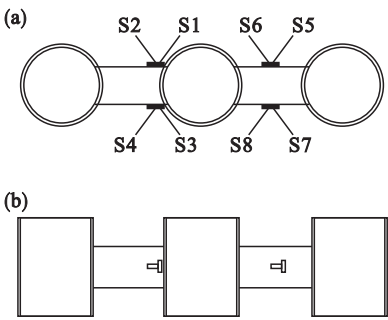


图 3 应变片布置
Fig. 3 Strain gauges arrangement
(a) —侧视图; (b) —俯视图.

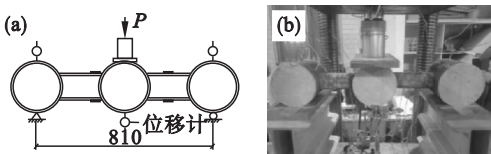


图 4 试验装置 (mm)
Fig. 4 Testing setup
(a) —示意图; (b) —实景图.

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏模式

荷载作用初期,试件变形较小;当荷载达到 50% P_u 左右,试件的小钢管与大钢管连接节点底部开始出现相对位移,即小钢管开始从大钢管中拔出;随着荷载增加,试件变形及小钢管底部拔出长度逐渐增加,当荷载达到 75% P_u 左右,试件内部开始出现声响,试件变形增长速度明显加快;随着荷载继续增加,小钢管连接节点顶部出现外凸,底部拔出长度继续增加,试件变形持续增长,直至试件破坏.

整个加载过程中,大钢管内混凝土表面未见裂缝. 试件整体及局部破坏形态见图 5,图 6. 可见,NSTS 试件的典型破坏模式为:连接小钢管底部拔出部分长度、顶部压凸.



图 5 试件整体破坏形态
Fig. 5 Failure modes of the specimen

2.2 荷载与变形关系

各试件的荷载与变形关系曲线见图 7. 可以看出,试件荷载与变形关系曲线呈弹性直线段、弹塑性微弯曲段、强化直线段 3 个阶段.

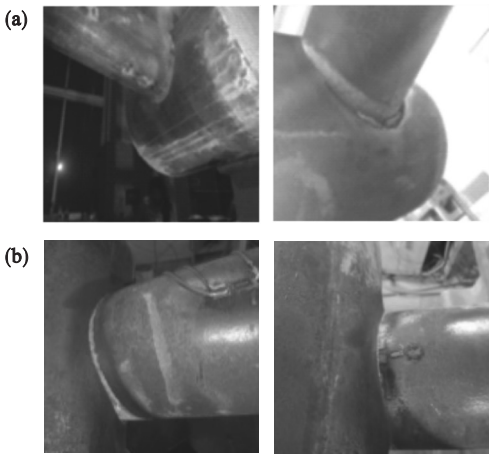


图 6 试件局部破坏形态
Fig. 6 Local failure mode

(a)—小钢管底部拔出；(b)—小钢管顶部外凸。

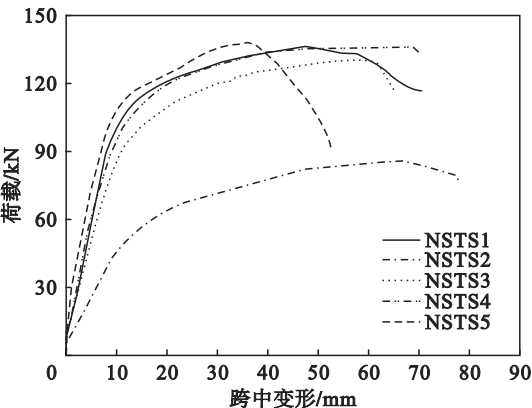


图 7 荷载与变形关系

Fig. 7 Relationship between load and displacement

加载初期,NSTS 试件的整体工作性能良好,变形增长速度较慢,荷载与变形关系处于线弹性阶段;当荷载达到 $50\% P_u$ 左右,荷载与变形关系进入微弯曲段,此阶段,随着荷载的增加,试件变形增长速度逐渐变大,刚度不断减小,荷载与变形关系曲线呈非线性变化;当荷载达到 $85\% P_u$ 左右,荷载与变形关系进入强化直线段,试件变形增长速度明显大于荷载的增长速度,刚度明显下降;当加载至极限荷载后,试件变形继续增长,荷载开始下降,试件破坏. 试验结果见表 3.

表 3 试验结果
Table 3 Test results

试件编号	P_c /kN	P_u /kN	Δ_u /mm
NSTS1	72. 04	136. 20	45. 30
NSTS2	40. 42	86. 00	66. 93
NSTS3	65. 00	130. 00	60. 92
NSTS4	69. 94	136. 60	67. 76
NSTS5	75. 04	138. 20	35. 37

注: P_c 为小钢管开始从大钢管拔出时的荷载; Δ_u 为试件达到极限荷载时的跨中变形.

2. 3 荷载与应变关系

各试件小钢管的荷载与应变关系曲线见图 8. 可以看出,荷载作用初期,小钢管应变较小且增长缓慢,荷载与应变关系曲线呈线性,小钢管处于弹性状态. 试件 NSTS1, NSTS2, NSTS3 和 NSTS4,当荷载达到 $(65\% \sim 70\%) P_u$ 左右,小钢管底部受拉屈服、顶部受压屈服. 试件 NSTS5,当荷载达到 $80\% P_u$ 左右,小钢管底部受拉屈服、顶部受压屈服. 这是由于,试件 NSTS5 小钢管内的混凝土强度等级较高,更好地约束了钢管的屈曲. 而后,随着荷载增加,应变以较高的速度增长,直至试件破坏.

总体上,各试件小钢管节点截面先于中截面发生屈服,且节点截面纵向先于环向发生屈服. 表明,在本次试验中,大小钢管连接节点截面是试件的薄弱截面.

2. 4 参数影响分析

2. 4. 1 连接方式的影响

不同连接方式的 NSTS 试件荷载与变形关系曲线见图 9a. 试件 NSTS1 与试件 NSTS2 相比,承载力和刚度分别提高 $58. 4\%$, $123. 3\%$; 试件 NSTS3 与试件 NSTS2 相比,承载力和刚度分别提高 $51. 2\%$ 和 $97. 5\%$. 结果表明:采用螺栓 + T 型钢板连接及采用螺栓连接的试件与仅采用 T 型钢板连接的试件相比,刚度和承载力均有明显提高,连接性能得到显著改善. 这是由于,小钢管端部仅设置 T 型钢板的试件,T 型钢板与小钢管之间相互独立工作,与混凝土之间没有约束作用,使连接性能大大降低.

试件 NSTS1 与试件 NSTS3 相比,承载力和刚度分别提高 $4. 8\%$, $16. 8\%$. 表明:采用螺栓 + T 型钢板的连接方法对改善试件的受力性能最为有利. 这是由于,T 型钢板通过螺栓固定在小钢管端部,二者在荷载作用下共同工作,T 型钢板与混凝土之间产生相互约束作用,并且这一约束作用要强于仅设置螺栓的试件中螺栓与混凝土的相互约束作用.

2. 4. 2 连接小钢管直径的影响

不同连接小钢管直径的 NSTS 试件荷载与变形关系曲线见图 9b. 可以看出,试件 NSTS1 与 NSTS4 的承载力及跨中变形相近,二者荷载与变形关系曲线基本一致. 说明在本次试验的设计参数下,连接小钢管直径的增大对试件承载力影响不明显,试件的承载力主要由连接构造决定.

2. 4. 3 混凝土强度的影响

不同混凝土强度的 NSTS 试件荷载与变形关

系曲线见图 9c. 试件 NSTS4 与试件 NSTS5 相比, 承载力提高了 1.2%, 刚度提高 19.7%, 跨中变形有所减小. 表明: 混凝土强度等级主要影响试件的刚度和变形, 对试件承载力的提高不明显.

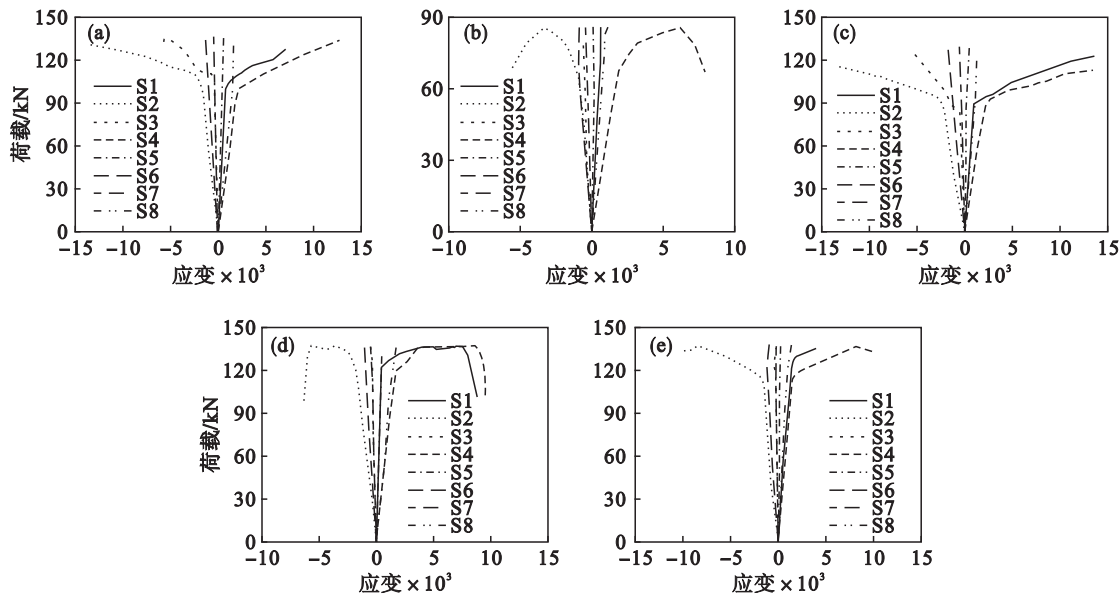


图 8 荷载与应变关系
Fig. 8 Relationship between load and strain
(a)—试件 NSTS1; (b)—试件 NSTS2; (c)—试件 NSTS3; (d)—试件 NSTS4; (e)—试件 NSTS5.

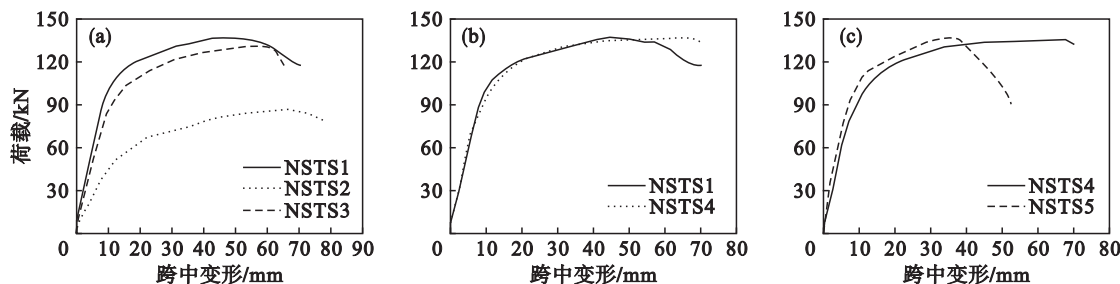


图 9 设计参数的影响
Fig. 9 Influences of design parameters
(a)—连接方式的影响; (b)—连接小钢管直径的影响; (c)—混凝土强度的影响.

3 结 论

1) 荷载作用初期, NSTS 试件整体工作性能良好, 荷载达到 50% P_u 左右时小钢管开始从大钢管内拔出; NSTS 试件的破坏模式为连接小钢管底部拔出部分长度, 且顶部出现外凸. 表明, 利用小钢管混凝土横向连接纵向大钢管混凝土的 NSTS 管幕结构是有效可行的, 具有施工简单、承载力高和刚度大等优点.

2) NSTS 试件的荷载与变形关系曲线呈弹性直线段、弹塑性微弯曲段、强化直线段 3 个阶段. 荷载作用初期, 试件小钢管应变处于弹性阶段; 试件 NSTS1 ~ NSTS4 在 (65% ~ 70%) P_u 时小钢管底部受拉屈服、顶部受压屈服; 试件 NSTS5 在 80% P_u 左右小钢管底部及顶部发生屈

服; 各试件小钢管节点截面先于中截面发生屈服.

3) 小钢管端部设置螺栓 + T 型钢板的试件与仅设置 T 型钢板的试件相比, 承载力和刚度分别提高 58.4%, 123.3%; 小钢管端部仅设置螺栓的试件与仅设置 T 型钢板的试件相比, 承载力和刚度分别提高 51.2%, 97.5%. 表明螺栓 + T 型钢板这一连接方式对改善 NSTS 试件的受力性能最为有利. 此外, 混凝土强度的提高可使试件刚度有所提高, 降低试件变形, 但对承载力提高不明显.

参考文献:

[1] 小林 朋司. 本町駅と営団地下鉄 3 号線との立体交差部の施工について[J]. 東工, 1971, 22(1): 89-92.
(Kobayashi T. The honmachi subway station construction in the No. 3 line of intersection [J]. Tokyo Institute of Technology, 1971, 22(1): 89-92.)

[2] Hemerijckx E. Tubular thrust jacking for underground roof construction on the Antwerp metro [J]. Tunnels and

- Tunneling,1985(5):13-15.
- [3] Darling P. Jacking under Singapore's busiest street [J]. *Tunnels & Tunnelling International*,1993,10(5):19-23.
- [4] Jeon H T, Kim Y H, Kim S K. The construction of Lot 923 subway station using the trenchless TRCM (tubular roof construction method) [J]. *Harmony of Nature and Civilization(Korean)*,2007,55(5):39-47.
- [5] Kang Y, Liu Q, Cheng Y, et al. Combined freeze-sealing and new tubular roof construction methods for seaside urban tunnel in soft ground [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2016,58:1-10.
- [6] 关永平, 赵文, 王连广, 等. STS 管幕结构抗弯性能试验研究及参数优化 [J]. *工程力学*,2017,34(9):83-91.
(Guan Yong-ping, Zhao Wen, Wang Lian-guang, et al. Study on parameter optimization and the flexural behavior of steel tube slab structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(9):83-91.)
- [7] Zhang P, Ma B, 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] Yen J, Shou K. Numerical simulation for the estimation the jacking force of pipe jacking [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2015,49:218-229.
- [9] Shi P, Liu W, Pan J, et al. Experimental and analytical study of jacking load during microtunneling Gongbei tunnel pipe roof [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2017,144(1):05017006.
- [10] 黎永索, 张可能, 黄常波, 等. 管幕预筑隧道地表沉降分析 [J]. *岩土力学*,2011,32(12):3701-3707.
(Li Yong-suo, Zhang Ke-neng, Huang Chang-bo, et al. Analysis of surface subsidence of tunnel built by pipe-roof pre-construction method [J]. *Rock and Soil Mechanics*,2011, 32(12):3701-3707.)
- [11] 李慎刚, 韩健勇, 石建军, 等. STS 新管幕工法钢管顶进现场试验 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2016,37(10):1469-1473.
(Li Shen-gang, Han Jian-yong, Shi Jian-jun, et al. Field test on steel pipe jacking by STS method [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(10):1469-1473.)
- [12] Lee J H, Lee Y J. Analysis of ground behavior for model tunnel excavation with pipe roof reinforcement using close range photogrammetric technique [J]. *Journal of Korean Tunnelling & Underground Space Association*,2014,16(4):387-402.
- [13] Sim Y, Jin K N. Experimental analysis for the effect of integrated pipe-roof in trenchless method [J]. *Journal of Korean Tunnelling & Underground Space Association*,2016,18(5):377-387.
- [14] 阎石, 王世哲, 金春福, 等. 新管幕构件横向锚固力学特性试验 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*,2016(5):778-787.
(Yan Shi, Wang Shi-zhe, Jin Chun-fu, et al. Experimental study on mechanical characteristics of horizontal anchor in new tubular roof method [J]. *Journal of Shenyang Construction University (Natural Science)*, 2016(5):778-787.)
- [15] 贾鹏蛟, 赵文, 郝云超, 等. 不同结构参数下 STS 管幕构件力学性能的数值分析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016,37(8):1177-1181.
(Jia Peng-jiao, Zhao Wen, Hao Yun-chao, et al. Numerical analysis of the mechanical properties of steel tube slab component under different structural parameters [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2016,37(8):1177-1181.)
- [16] Zhao W, Jia P, Yu H, et al. Study on the effect of combining steel tube slab (STS) with PBA method for a large span subway underground station in Shenyang [C]// The 4th ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. Jeju City,2017:10-13.