

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 08. 023

不同结构参数下 STS 管幕构件力学性能的数值分析

贾鹏蛟¹, 赵文¹, 郝云超², 韩健勇¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中铁七局集团有限公司勘测设计院, 河南郑州 450016)

摘 要: 以 8 榀 STS(steel tube slab)管幕构件室内试验为依托, 为充分研究 STS 管幕构件的力学性能, 建立构件的有限元模型, 分析钢管厚度、螺栓直径、配筋率、翼缘板间距等参数对 STS 管幕构件力学性能的影响。结果表明, 钢管厚度的变化, 对试件的极限承载力影响不大, 但能够有效地提高试件横向刚度, 翼缘板间距的变化, 对试件的极限承载力和横向刚度影响较显著, 螺栓直径、配筋率的变化, 对试件的极限承载力和横向刚度影响均不明显。

关键词: 管幕构件; 力学性能; 数值分析; 钢管混凝土; 结构参数

中图分类号: TU 93 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 3026(2016)08 - 1177 - 05

Numerical Analysis of the Mechanical Properties of Steel Tube Slab Component Under Different Structural Parameters

JIA Peng-jiao¹, ZHAO Wen¹, HAO Yun-chao², HAN Jian-yong¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Engineering Survey & Design Company of China Railway Seventh Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China. Corresponding author: HAN Jian-yong, E-mail: hanlwb@163.com)

Abstract: Based on the experimental results of 8 STS(steel tube slab) components, the finite element models were proposed to study the mechanical properties of STS components, and influence of steel thickness, bolt diameter, reinforcement ratio and flange distance on the mechanical properties of STS component was analyzed. The results indicate: steel thickness has a little influence on the flexural capacity of STS component, but it effectively improves lateral stiffness of STS component; flange distance has a notably influence on the flexural capacity and lateral stiffness of STS component; however, bolt diameter and reinforcement ratio have little influence on the flexural capacity and lateral stiffness of STS component.

Key words: steel tube slab(STS) component; mechanical properties; numerical analysis; concrete-filled steel tube; structural parameter

STS(steel tube slab)管幕结构是一种用于修建地铁站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。传统的管幕结构是以单个钢管顶进为基础, 各钢管间仅用锁扣连接, 使管幕结构相邻钢管的连接处受力十分薄弱, 当开挖管幕内部的土体修建主体结构时, 需架设多道临时支撑以保证整体结构的稳定性。STS 管幕结构弥补了传统管幕结构的不足, 用混凝土、翼缘板、螺栓将相邻钢管连成整体, 大大提高了其横向刚

度和承载力。因此, STS 管幕工法具有广阔的应用前景^[1-2]。

Abolhassan 等^[3-4]研究了钢管混凝土边框剪力墙, 得出该试件具有很好的延性并得到了荷载与位移的关系。Varma 等^[5]利用 ABAQUS 分析了钢管不同区域对核心混凝土约束的不同效果, 并采用纤维模型法分析了钢管混凝土压弯构件的力学性能。Ellobody 等^[6]利用 ABAQUS 分析钢管混凝土在不同的混凝土强度和钢管径厚比条件下的承载力变化。Zakaib1 等^[7-10]对钢管混凝土构件

的力学性能做了相关的试验研究。

但目前对管幕中钢管间连接形式的研究相对较少,鉴于此,本文结合室内试验,利用 ABAQUS 建立有限元模型,研究钢管厚度、螺栓直径、配筋率、翼缘板间距等参数对 STS 管幕构件抗弯承载力和横向刚度的影响,为 STS 管幕结构的推广提供参考。

1 有限元模型的建立

1.1 单元选取

钢管与翼缘板采用四节点减缩积分格式的壳单元(S4R)模拟;混凝土和钢垫片采用八节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R)模拟;螺栓采用两节点线性积分格式的三维桁架单元(T3D2)模拟。

1.2 材料本构模型

在 ABAQUS 中,垫片采用弹性模型,钢管、翼缘板、混凝土以及螺栓均采用弹塑性模型,屈服面选为 von Miss 屈服面,硬化特征由单轴应力-应变关系得到,各材料的单轴应力-应变关系如下:钢管间混凝土本构关系采用《混凝土结构设计规范》^[11]中的应力与应变关系曲线,螺栓和翼缘板采用理想弹塑性模型来模拟其应力与应变关系曲线^[12],钢管内的混凝土在钢管的约束下,混凝土的塑性会有所增加,钢管内的混凝土和普通混凝土在塑性性能上有较大差异,因此管内混凝土采用韩林海^[13]提出的钢管混凝土单轴应力-应变关系曲线。

1.3 接触设置

通过设置接触面来模拟钢管、翼缘板与混凝土间的相互作用,在接触面上一般传递切向力和法向力。接触面切向力通过摩擦力来实现,采用 ABAQUS 所提供的库仑摩擦模型中的“罚函数”定义切向应力。当两个接触面处于黏结状态(剪应力小于临界值 $\tau_{crit} = \mu p$, μ 为摩擦系数, p 为两个接触面之间的接触压力)时,接触面之间的相对运动为零;当剪应力达到临界值 τ_{crit} 时,接触面之间产生相对滑动, τ_{crit} 与界面接触压力 p 成比例,且不小于界面平均黏结力 τ_{bond} , 本文摩擦系数取 0.3。接触面法向力通过“硬”接触实现,即当两个接触面脱离时,界面间将不存在相互作用。

1.4 边界条件及加载方式

在集中荷载作用处和支座处均设置一刚度很大的钢垫块,试件的边界条件施加于垫块底面的中线上,集中荷载施加在与加载垫块耦合的参考

点上。STS 管幕构件的边界条件为两端简支,施加荷载为单调静力加载。边界条件及加载方式,见图 1。

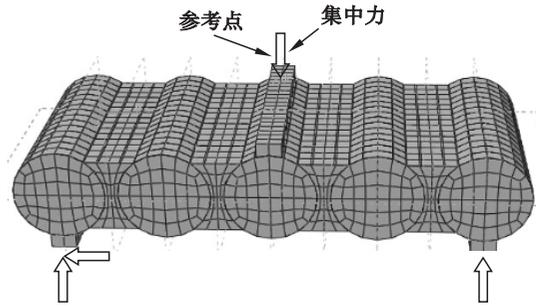


图 1 边界条件及加载方式

Fig. 1 Boundary conditions and loading method

2 试验验证

2.1 试验概况

贾鹏蛟^[1]对 STS 管幕构件进行了系列试验研究,共完成了 8 榀 STS 管幕构件静力试验,主要参数变化有:翼缘板厚度、配筋率、混凝土强度等级、横向连接螺栓、翼缘板焊接、钢管间距,试验的加载方式采用单调集中静力加载直至试件破坏。试验布置及试件截面尺寸,见图 2 和图 3。

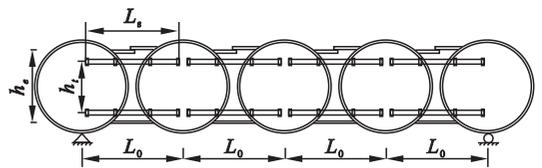


图 2 试件几何尺寸

Fig. 2 Geometrical sizes of specimen

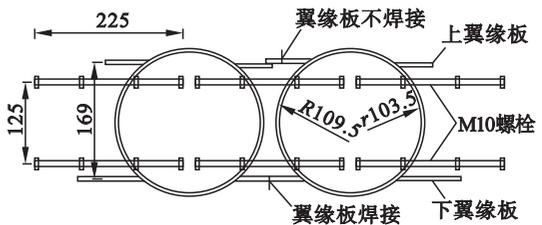


图 3 横向连接节点详图(单位 mm)

Fig. 3 Lateral connection joint of STS components

2.2 有限元模型

STS 管幕模型主要由四大部件组成:钢管、翼缘板、混凝土以及横向连接螺栓,见图 4。这四大部件的相互作用决定了 STS 管幕构件复杂的力学性能。

2.3 计算结果与试验结果对比分析

试件 STS-S6 的荷载与变形关系曲线有限元计算结果和实测结果的对比情况,见图 5。其

中,实线为室内试验实测结果,虚线是有限元计算结果,对比情况表明,有限元计算结果与实测结果吻合良好。

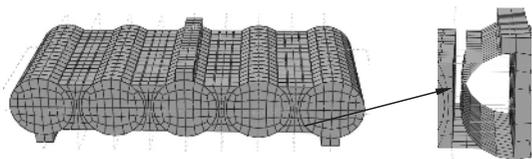


图 4 管幕构件的有限元模型

Fig. 4 Finite element model for STS component

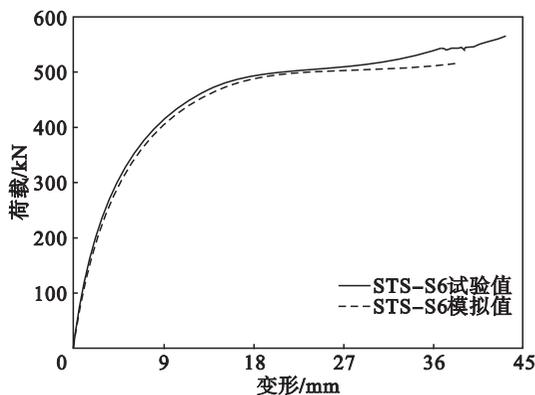


图 5 荷载-变形关系曲线计算结果和实测结果对比

Fig. 5 Comparison of load-deformation curves between analytical prediction and test results

3 力学性能的影响因素

通过室内试验,分析了 STS 管幕构件的破坏模式以及对管幕构件力学性能的影响因素。鉴于室内试验条件的限制,为了充分地研究 STS 管幕构件的力学性能,利用 ABAQUS 建立有限元模型,分析钢管厚度、螺栓直径、配筋率、翼缘板间距等参数对 STS 管幕构件抗弯承载力、横向刚度的影响,为 STS 管幕结构的推广提供理论依据。其中横向刚度指试件线弹性工作阶段所对应的横向刚度,依照简支梁在单点集中荷载作用下跨中变形公式(1)^[14]可求得 STS 管幕构件的横向刚度:

$$u = \frac{pl^3}{48EI} \quad (1)$$

式中 p 为施加于试件的跨中集中荷载; l 为试件的长度; u 为试件的跨中变形; EI 为试件的等效刚度。

考虑构件在荷载与变形关系曲线的弹性阶段也会有轻微的波动,为了更加精确分析试件的横向刚度,在试件的弹性工作阶段取 3 组荷载与变形值,运用上述公式求出其对应的横向刚度,取均值作为 STS 管幕构件的等效刚度。

3.1 钢管厚度

为考虑钢管厚度对 STS 管幕构件力学性能

的影响,本文设计 5 组试件对其分析,见表 1。

表 1 STS 管幕试件设计参数
Table 1 Parameters of steel tube slabs

| 试件编号 | 钢管厚度/mm | 螺栓直径/mm | 配筋率/% | 翼缘板厚度/mm | 翼缘板间距/mm |
|---------|---------|---------|-------|----------|----------|
| STS-TT1 | 4 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-TT2 | 5 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-TT3 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-TT4 | 7 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-TT5 | 8 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |

根据数值模拟得到不同钢管厚度下试件的荷载与变形关系曲线,见图 6。可以看出,试件 STS-TT1 ~ STS-TT5 的极限承载力分别为 632.5, 656.4, 670.3, 675.1, 678.8 kN, 依次提高 3.78%, 2.12%, 0.72%, 0.49%, 表明试件的极限荷载随着钢管厚度的增加而逐渐增加,但增加的幅度逐渐变缓。试件 STS-TT1 ~ STS-TT5 对应的横向刚度分别是 2173, 2372, 2691, 2890, 3093 kN·m², 依次提高 9.2%, 13.4%, 7.35%, 7.1%, 表明试件的横向刚度随着钢管厚度增加而提高,但提高程度变缓。可见,增加钢管厚度对试件的承载力影响不大,但能够有效地提高横向刚度。

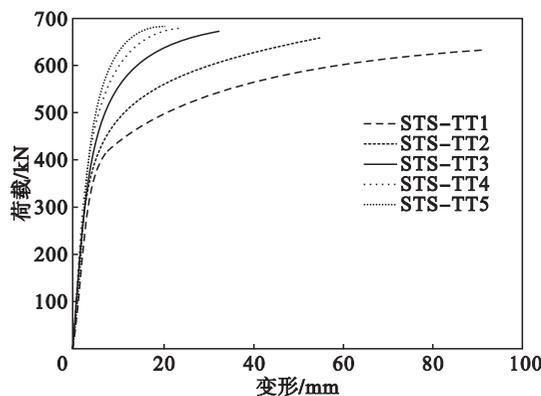


图 6 荷载-变形曲线

Fig. 6 Load-deformation curves

3.2 螺栓直径

为考虑螺栓直径对 STS 管幕构件力学性能的影响,本文设计 5 组试件对其分析,见表 2。

根据数值模拟得到不同螺栓直径下试件的荷载与变形关系曲线,见图 7。可以看出,试件 STS-BD1 ~ STS-BD5 的极限承载力分别为 644.8, 656.9, 670.3, 685.3, 701.6 kN, 依次提高 1.89%, 2%, 2.2%, 2.4%, 表明试件的极限荷载随着螺栓直径的增加基本呈线性增加。试件 STS-BD1 ~ STS-BD5 对应的横向刚度分别是 2535, 2622,

2 691 , 2 789 , 2 868 kN·m² , 依次提高 3.5% , 2.6% 3.6% 2.8% , 表明试件的横向刚度随着螺栓直径增加而线性提高. 可见 , 螺栓直径的变化对试件的极限承载力和横向刚度影响不明显.

表 2 STS 管幕试件设计参数

Table 2 Parameters of steel tube slabs

| 试件编号 | 钢管厚度/mm | 螺栓直径/mm | 配筋率/% | 翼缘板厚度/mm | 翼缘板间距/mm |
|---------|---------|---------|-------|----------|----------|
| STS-BD1 | 6 | 8 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-BD2 | 6 | 9 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-BD3 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-BD4 | 6 | 11 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-BD5 | 6 | 12 | 0.90 | 6 | 169 |

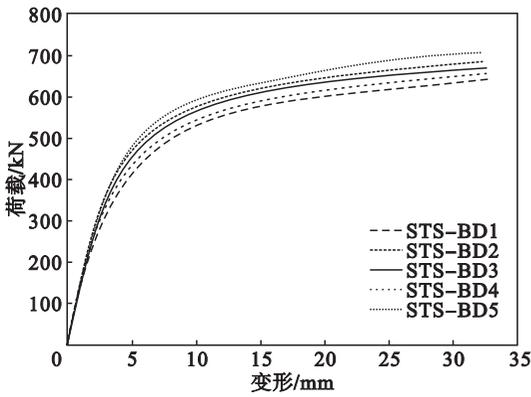


图 7 荷载-变形曲线

Fig. 7 Load-deformation curves

3.3 配筋率

为考虑配筋率对 STS 管幕构件力学性能的影响 , 本文设计 5 组试件对其分析 , 见表 3.

表 3 STS 管幕试件设计参数

Table 3 Parameters of steel tube slabs

| 试件编号 | 钢管厚度/mm | 螺栓直径/mm | 配筋率/% | 翼缘板厚度/mm | 翼缘板间距/mm |
|---------|---------|---------|-------|----------|----------|
| STS-RR1 | 6 | 10 | 0.54 | 6 | 169 |
| STS-RR2 | 6 | 10 | 0.72 | 6 | 169 |
| STS-RR3 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-RR4 | 6 | 10 | 1.08 | 6 | 169 |
| STS-RR5 | 6 | 10 | 1.26 | 6 | 169 |

根据数值模拟得到不同配筋率下试件的荷载与变形关系曲线 , 见图 8. 可以看出 , 试件 STS-RR1 ~ STS-RR5 的极限承载力分别为 642.2 , 656.4 , 670.3 , 682.8 , 695.9 kN , 依次提高 2.18% , 2.13% , 1.79% , 1.91% , 试件极限荷载随着配筋率的增加基本呈线性增加. 试件 STS-RR1 ~

STS-RR5 对应的横向刚度分别是 2 491 , 2 639 , 2 691 , 2 882 , 2 951 kN·m² , 依次提高 5.9% , 2.0% , 7.1% , 2.4% . 表明试件的横向刚度随着配筋率的增加而提高. 可见 , 配筋率的变化对试件的极限承载力和横向刚度影响不明显.

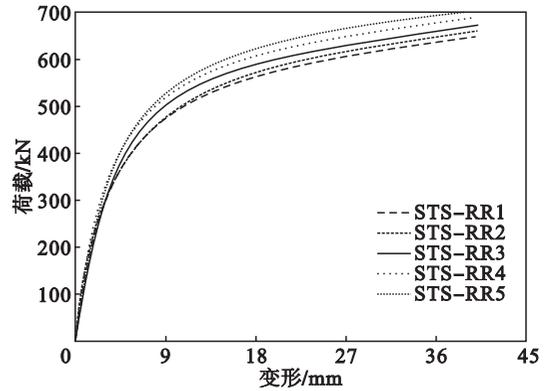


图 8 荷载-变形曲线

Fig. 8 Load-deformation curves

3.4 翼缘板间距

为考虑翼缘板间距对 STS 管幕构件力学性能的影响 , 本文设计 4 组试件对其分析 , 见表 4.

表 4 STS 管幕试件设计参数

Table 4 Parameters of steel tube slabs

| 试件编号 | 钢管厚度/mm | 螺栓直径/mm | 配筋率/% | 翼缘板厚度/mm | 翼缘板间距/mm |
|---------|---------|---------|-------|----------|----------|
| STS-FS1 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 149 |
| STS-FS2 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 169 |
| STS-FS3 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 189 |
| STS-FS4 | 6 | 10 | 0.90 | 6 | 209 |

根据数值模拟得到不同翼缘板间距下试件的荷载与变形关系曲线 , 见图 9. 可以看出 , 试件 STS-FS1 ~ STS-FS4 的极限承载力分别为 615.3 , 670.3 , 663.1 , 623.2 kN , 极限承载力分别先提高 8.2% , 后减小 1.1% , 6.0% . 因为随着翼缘板间距增加 , 试件的剪跨比逐渐减小 , 当剪跨比减小到一定程度后 , 试件破坏由弯曲破坏转化为斜压破坏 , 造成试件的极限承载力降低 , 表明随着翼缘板间距增加 , 极限承载力先增加后降低. 试件 STS-FS1 ~ STS-FS4 对应的横向刚度分别是 2 229 , 2 691 , 2 710 , 2 860 kN·m² , 依次提高 20.7% , 0.7% , 5.5% , 表明试件的横向刚度随着翼缘板间距的增加而提高. 可见 , 翼缘板间距的变化对试件的极限承载力和横向刚度影响较显著.

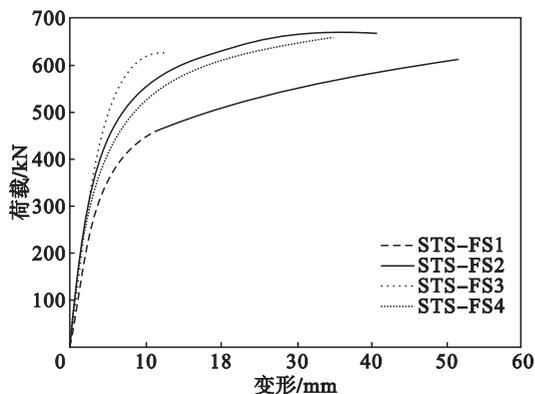


图 9 荷载 - 变形曲线

Fig. 9 Load-deformation curves

4 结 论

1) 钢管厚度每增加 1 mm, 试件的极限承载力在 0.49% ~ 3.78% 范围内变化, 刚度在 7.1% ~ 13.4% 范围内变化。可见, 钢管厚度的增加对试件的极限承载力影响不大, 但能够有效地提高横向刚度。

2) 随着翼缘板间距的增加, 试件的极限承载力先增加后减小, 而试件的横向刚度持续增加, 在 0.7% ~ 20.7% 范围内变化。可见, 翼缘板间距的变化对试件的极限承载力和横向刚度影响较显著。

3) 螺栓直径每增加 1 mm、配筋率每增加 0.18%, 试件的极限承载力在 1.79% ~ 2.4% 范围内变化, 横向刚度在 2.0% ~ 7.1% 范围内变化。可见, 螺栓直径、配筋率的增加对试件的极限承载力和横向刚度影响均不明显。

参考文献：

[1] 贾鹏蛟. 地下暗挖车站 STS 新管幕结构抗弯性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
(Jia Peng-jiao. Study on flexural behavior of steel tube slab structure during subsurface excavation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)

[2] Guan Y P, Zhao W, Li S G, et al. Key techniques and risk management for the application of the pile-beam-arch (PBA) excavation method: a case study of the Zhongjie subway station [J/OL]. [2015 - 05 - 10]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/275362>.

[3] Abolhassan A A. Seismic behavior and design of steel plate shear walls [R]. Moraga, CA: Structural Steel Educational Council, 2001.

[4] Astaneh-Asl A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls [M]. Moraga, CA: Structural Steel Educational Council, 2002.

[5] Varma A H, Ricles J M, Sause R, et al. Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (2): 169 - 179.

[6] Ellobody E, Young B, Lam D. Behavior of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub column [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62 (7): 706 - 715.

[7] Zakaib S, Fam A. Flexural performance and moment connection of concrete-filled GFRP tube-encased steel I-sections [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16 (5): 604 - 613.

[8] Tuan C Y. Flexural behavior of nonposttensioned and posttensioned concrete-filled circular steel tubes [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134 (6): 1057 - 1060.

[9] Colel B, Fam A. Flexural load testing of concrete-filled FRP tubes with longitudinal steel and FRP rebar [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10 (2): 161 - 171.

[10] Bambach M R, Jama H, Zhao X L, et al. Plastic analysis and design of steel plate shear walls [J]. *Engineering Structure*, 2008, 30 (10): 2859 - 2870.

[11] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)

[12] Bambach M R, Jama H, Zhao X L, et al. Hollow and concrete filled steel hollow sections under transverse impact load [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30 (10): 2859 - 2870.

[13] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(Han Lin-hai. Concrete filled steel tubular structure—theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007.)

[14] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
(Liu Hong-wen. Material mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.)