

# FCSR 新型管幕构件抗弯性能试验研究及数值分析

赵文, 张超哲, 王志国, 贾鹏蛟  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于翼缘板-槽钢连接的新型管幕构件(flange-channel steel roof, FCSR)室内抗弯试验, 研究了 FCSR 新型管幕构件的工作机理和破坏模式. 为充分研究钢管壁厚、翼缘板厚度、混凝土强度和钢管间距等结构关键参数对 FCSR 管幕构件抗弯性能的影响, 通过 ABAQUS 软件建立了 FCSR 管幕构件的有限元模型. 研究表明: 构件发生明显的延性破坏, 具有较高的横向刚度; 钢管壁厚和混凝土强度对构件承载力具有一定的影响, 翼缘板厚度对承载力影响不明显, 钢管间距对承载力影响较为明显. 研究结果可为新型管幕结构的应用提供一定的依据.

**关 键 词:** 管幕; 钢管混凝土; 槽钢; 抗弯性能; 数值分析

中图分类号: TU 93      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)04-0575-06

## Experimental Study and Numerical Analysis on Flexural Behavior of Flange-Channel Steel Roof Specimen

ZHAO Wen, ZHANG Chao-zhe, WANG Zhi-guo, JIA Peng-jiao  
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Chao-zhe, E-mail: chaozhe\_zhang@163.com)

**Abstract:** Based on the flexural tests on the FCSR (flange-channel steel roof) specimens, the working mechanism and failure mode of the specimens were investigated. In order to study the influence of the key parameters, including the tube thickness, the flange thickness, the compressive strength of the concrete and the spacing between the tubes on the flexural behavior of the specimens, finite element models of FCSR specimens were established by using the ABAQUS software. The results indicated that the lateral stiffness of the specimen is high and the failure mode is obvious ductile failure. The wall thickness of the steel pipe and the concrete strength may have certain influence on the bearing capacity of the specimen, while the thickness of the flange plate has no obvious influence on it. It is also found that the spacing of the steel pipe can affect the bearing capacity obviously. The research results may provide some basis for the application of the new pipe roof structure.

**Key words:** pipe roof; concrete-filled steel tube; channel steel; flexural behavior; numerical analysis

随着城市地下空间的迅猛发展,管幕工法作为一种新型地下工程暗挖技术,由于具有较高的承载力和抗弯刚度,能够减少临时支撑体系,优化施工步骤,有效控制地表沉降,确保周围建筑物的安全,因此得到广泛应用和快速发展<sup>[1-2]</sup>.

传统管幕结构的钢管之间仅通过锁扣连接,当内部的土体开挖后,较小的横向约束很难确保施工的安全性,所以需要密集的临时支护辅助施工,降低了施工效率<sup>[3-4]</sup>.贾鹏蛟等<sup>[5-6]</sup>对增强横向连接的 STS 新管幕构件采用室内试验和数值模拟相结合的方法,研究了构件的工作机理和破坏形式. Moon 等<sup>[7]</sup>采用数值分析的方法,对钢管混凝土受弯构件的受力特征进行研究,并对多个关键参数进行对比分析.文献[8-10]通过大量

构件试验,研究了钢管混凝土长细比、径厚比、混凝土强度等参数对承载力的影响。

考虑到传统管幕结构横向连接相对较弱和当前新型管幕结构存在的施工工艺复杂等问题,本文提出了一种采用翼缘板-槽钢连接的新型管幕结构,该结构通过翼缘板和槽钢将各个钢管沿横向进行连接,同时在钢管内部和管间浇注混凝土,使之成为协调受力的完整结构.较高的承载力和横向刚度一定程度上提高了工程安全性和结构可靠度.目前,国内外对于 FCSR 新型管幕结构的研究未见报道,为此本文设计构件进行室内试验.基于试验结果,采用 ABAQUS 有限元软件对构件进行建模,探究结构的工作机理和受力特征,并对影响结构抗弯性能的关键参数如钢管壁厚、翼缘板厚度、混凝土强度和钢管间距等参数进行分析,为工程实践和应用提供一定的参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计及加工

为研究 FCSR 新型管幕结构的工作机理和受力特征,同时考虑到试验经济性和可操作性,以 1:4 的缩尺比例设计了简支梁形式的试件,对结构的抗弯性能进行了分析.试件整体沿纵向选取 500 mm,由 5 根等长的钢管,在钢管间下方通过翼缘板、上方通过槽钢进行连接,如图 1 所示.试验中钢管为 Q235 无缝钢管,内外径分别为 207, 219 mm,壁厚为 6 mm;翼缘板选用 Q235 冷轧钢板,设计厚度为 6 mm,所采用的槽钢为普通 5 号槽钢,在钢管内呈 C 型平行于水平面布置于试件上方.相邻钢管的中心距为 250 mm,试件组装完成后,选用 C30 细骨料混凝土进行浇注并养护.试件的计算长度为 1 000 mm,为两侧钢管的

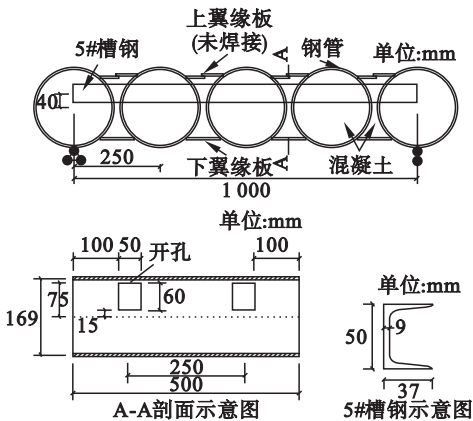


图 1 试件几何尺寸图  
Fig. 1 Geometric diagram of the specimen

中心距离. FCSR 构件的加工步骤:①在钢管侧面切割方孔;②通过槽钢将各钢管进行拼接;③在钢管间焊接翼缘板;④对焊接后的构件进行混凝土浇注并养护.考虑到此结构的上翼缘板在实际工程中主要起挡土作用,故在试验中仅作为混凝土浇筑模板,达到养护条件后进行拆除。

1.2 加载设备及测量内容

加载试验在东北大学结构实验室 5 000 kN 压力机上完成,采用简支梁的支座约束形式,对构件进行单点集中荷载加载,如图 2 所示.构件加载过程中的主要测量内容包括荷载、变形和应变,均通过静态应变仪测试系统进行采集。

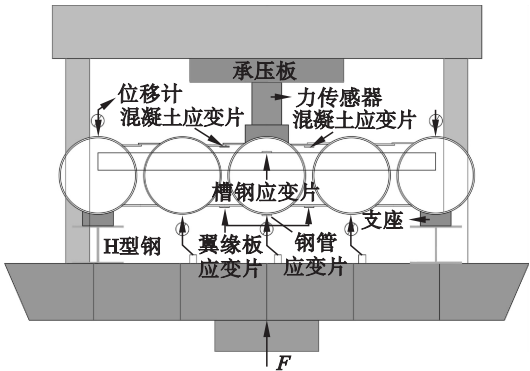


图 2 构件加载及测点布置图  
Fig. 2 Location of loading and monitoring points

- 1) 荷载测量:在构件与压力机之间布置量程为 1 000 kN 的力传感器,用来监测压力机对构件所施加的荷载;
- 2) 变形测量:在构件两端、跨中位置、1/4 点及 3/4 点处分别布置量程 100 mm 的位移计,用来记录试件相应位置的变形;
- 3) 应变测量:分别在钢管、下翼缘板、混凝土及槽钢上布置应变片,监测加载过程中各部件的受力情况。

2 试验结果

2.1 构件受力过程

FCSR 新型管幕构件在加载初期,钢管、翼缘板、混凝土及槽钢共同工作,表现为良好的组合结构受力特性,结构整体变形缓慢,混凝土未见裂缝出现.当荷载加载到 25.57%  $f_u$  ( $f_u$  表示极限荷载),在钢管与混凝土接触面出现微裂缝,均位于构件的受拉区位置,说明混凝土受拉区逐渐发生屈服.随着荷载的增加,各构件在单点集中荷载的作用下出现更多的裂缝,同时接触面出现的已有裂缝继续发展并逐渐加宽.尤其跨中钢管两侧管

间混凝土的裂缝,由于跨中的弯矩较大,发展速度较快,且均向构件加载点延伸.混凝土受拉区屈服后,翼缘板作为构件受拉区域的主拉筋继续承载,协调混凝土受拉区共同受力.同时钢管和翼缘板对混凝土起到较好的约束作用,一定程度上限制了裂缝的继续延伸和加宽,说明构件各部件配置比例得当,各部分能够相互协调共同受力.当荷载加载到  $75.49\% f_u$  时,翼缘板达到屈服状态,此时认为构件发生屈服.继续加载,槽钢协调混凝土受压区共同受力,跨中钢管两侧的管间混凝土出现破坏主裂缝,构件的变形不断增大,但构件整体性较好,能够继续承载,直到管间混凝土受压区部分发生压碎,翼缘板发生拉裂,构件由剪切破坏类型逐渐发展为弯曲破坏,该状态所对应的荷载为构件极限荷载.构件的屈服和极限荷载分别为 428, 567 kN, 构件的破坏形态如图 3 所示.



图 3 构件受压破坏形态

Fig. 3 Failure mode of the specimen

2.2 试验结果分析

构件在单点集中荷载作用下的荷载-变形关系曲线见图 4. 结合构件受力过程,根据裂缝出现、下翼缘板屈服和构件破坏等三个关键节点,将荷载-变形曲线分为三个阶段即线弹性阶段、弹塑性阶段以及强化工作阶段. 与之对应的荷载为弹性荷载  $f_e$ 、屈服荷载  $f_y$  及极限荷载  $f_u$ .

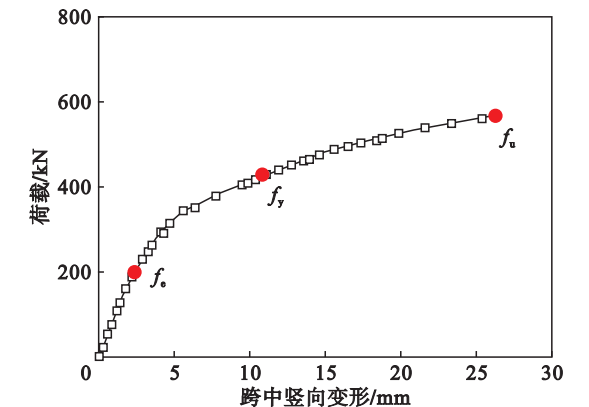


图 4 构件受压荷载变形关系曲线

Fig. 4 Load versus deformation curve of the specimen

不同加载阶段 FCSR 构件竖向变形沿构件跨度的发展过程曲线见图 5, 其中横轴表示构件横向长度即两铰支座之间距离,纵轴表示构件不同

位置处的竖向变形. 从图 5 中可以看出, 构件在加载初期结构变形较小, 竖向整体变形随着荷载的增加而缓慢增大, 但当达到屈服荷载后, 翼缘板的屈服导致混凝土内裂缝增多, 构件整体变形增速加快, 竖向变形曲线具有向正弦半波曲线发展的趋势.

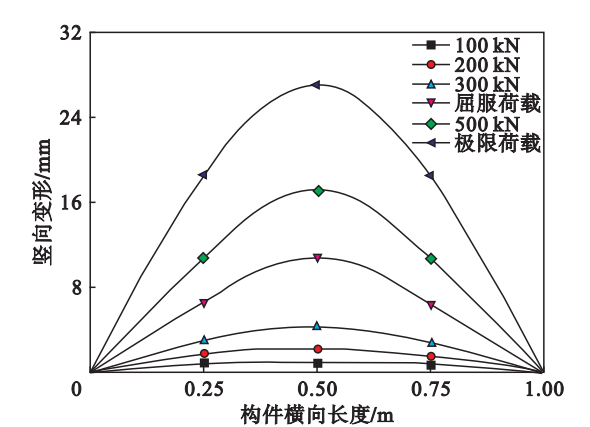


图 5 构件竖向变形曲线

Fig. 5 Vertical deformation curves of the specimen

3 有限元分析

3.1 材料单元和本构选择

采用 ABAQUS 有限元软件对 FCSR 构件进行建模, 其中各项参数与试验构件保持一致, 记为 FCSR-CP. 根据各部件的特点, 钢管、槽钢和翼缘板选用四节点减缩积分格式的壳单元来模拟, 采用八节点减缩积分格式的三维实体单元来模拟混凝土和垫块, 见图 6. 采用文献[6]提出的目前被广泛应用的二次塑流模型来模拟钢管弹塑性阶段的性能, 以及适应于 ABAQUS 软件的混凝土塑性损伤模型反映钢管内混凝土的受力性能. 依据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010), 钢管间受压混凝土本构模型采用混凝土单轴受压模型; 翼缘板和槽钢的应力应变关系采用两阶段曲线来模拟[6].

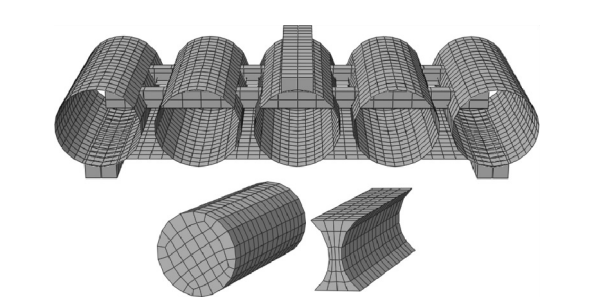


图 6 构件有限元模型

Fig. 6 Finite element models of the specimen



3.2 界面相互作用

在钢管侧壁开方孔后,将各部件按照设计要求进行组装,然后对各部件设置界面相互作用参数,混凝土和钢管及翼缘板接触面之间的相互作用有正应力和切应力.其中正应力选择“硬接触”来体现.利用 ABAQUS 软件中的“罚函数”库伦摩擦模型来实现接触面切应力.槽钢使用 Embedded region 命令嵌入在钢管混凝土内部,共同受力.垫块和钢管接触面共同变形,二者之间用 Tie 命令进行约束<sup>[5]</sup>.

3.3 荷载与边界约束

在建模过程中,首先设置参考点,同时将参考点和垫块上表面通过 Coupling 约束相互连接,再对参考点赋予集中荷载,此时荷载通过参考点传递到垫块上表面,实现对构件进行单点集中荷载加载.两侧垫块分别模拟简支梁约束,分别限制左右垫块 XYZ 和 YZ 方向位移,见图 7.

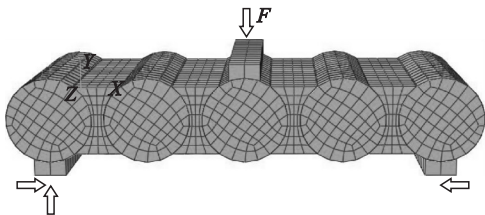


图 7 模型整体示意图  
Fig. 7 Diagram of whole model

3.4 数值计算结果和试验结果对比

将构件 FCSR - CP 通过数值分析得到的荷载 - 变形关系曲线同试验结果进行对比,如图 8 所示.由图 8 可知,在弹性阶段有限元计算曲线略低于试验所得曲线,分析原因是由于混凝土采用的损伤模型与实际存在一定偏差.当达到弹塑性阶段,两条曲线产生重合点,并开始出现弯曲,同时翼缘板逐渐开始屈服.在强化工作阶段,有限元

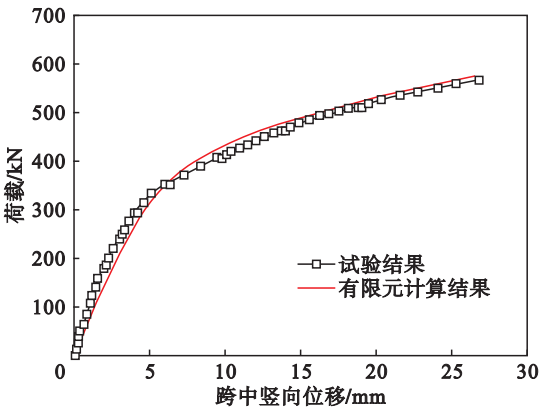


图 8 构件有限元模型计算结果和试验结果对比  
Fig. 8 Comparison between results of the laboratory test and numerical calculation of the specimen

曲线逐渐贴近试验曲线,最终二者几乎重合,直到构件破坏.有限元软件计算的构件极限荷载为 573.6 kN,试验结果为 567 kN,高 1.16%,但两条曲线整体吻合度较高,说明按照前文所采用的材料本构模型、选择的单元类型、界面相互作用以及荷载约束均较为合理,可以较为准确地模拟构件的工作机理和受力性能,为进一步研究 FCSR 新型管幕结构提供依据.

4 参数分析

以室内试验结果为依据,为详细研究 FCSR 构件的抗弯性能,运用 ABAQUS 有限元软件,对构件进行建模,分别研究钢管壁厚、翼缘板厚度、混凝土强度和钢管间距等部件参数对结构承载力、抗弯刚度及延性等抗弯性能指标的影响.控制单一变量对影响参数进行设计,各构件其他参数同室内试验构件的几何参数一致.

4.1 钢管壁厚影响分析

为研究钢管壁厚对结构抗弯性能的影响,设计了 4 个编号为 FCSR - TT1 ~ FCSR - TT4 的构件,钢管壁厚分别为 4,5,7 和 8 mm,其他参数均与构件 FCSR - CP 相同.不同钢管壁厚构件的荷载 - 变形曲线如图 9 所示.由图 9 可知,FCSR - TT1 ~ FCSR - TT4 各构件的极限荷载分别为 514.8, 547.2,608.3 和 640.5 kN.加载过程中,受力阶段分为线弹性阶段、弹塑性阶段和强化工作阶段.分析钢管壁厚增加对结构承载力提高的影响,发现极限荷载依次提高 6.3%,4.8%,6.0% 和 5.3%,说明钢管壁厚的增加对承载力的提高具有一定影响.

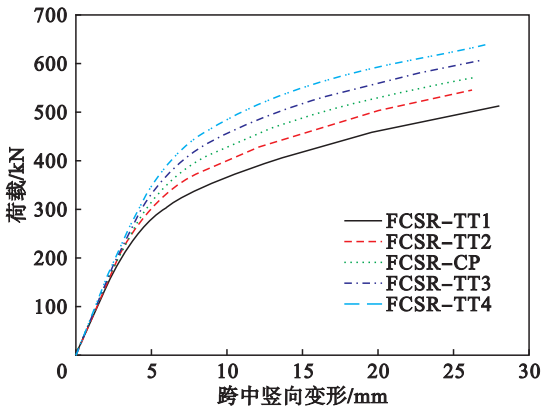


图 9 不同钢管壁厚构件荷载 - 变形曲线  
Fig. 9 Load versus deformation curves of specimens with different tube thickness

4.2 翼缘板厚度影响分析

为研究翼缘板厚度对结构抗弯性能的影响,设计了 4 个编号为 FCSR - FT1 ~ FCSR - FT4 的构

件,翼缘板厚度分别为 4,5,7 和 8 mm,其他参数均与构件 FCSR – FTCP 相同. 不同翼缘板厚度构件的荷载 – 变形曲线见图 10. FCSR – FT1 ~ FCSR – FT4 各构件的极限荷载分别为 525. 8,562. 8,585. 0 和 590. 2 kN,由图 10 可知,各构件曲线在弹性阶段较为吻合,在塑性强化阶段除 FCSR – FT1 出现较大分离外,其他构件曲线发展趋势较为一致,仅出现较小分离. 各构件的极限荷载依次提高 7. 0% , 1. 9% ,2. 0% 和 0. 9% ,增长速率趋于平缓,表明翼缘板厚度的增加对构件承载力影响不明显.

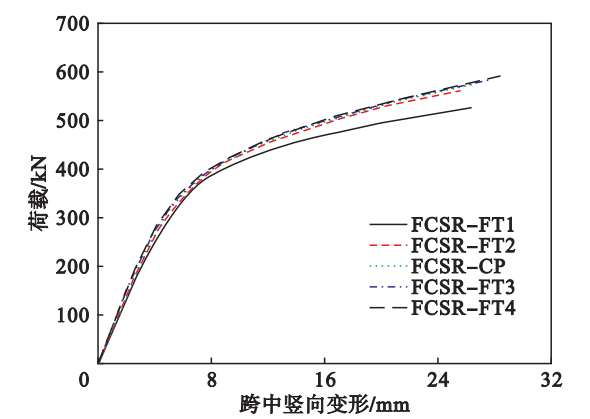


图 10 不同翼缘板厚度构件荷载 – 变形曲线  
Fig. 10 Load versus deformation curves of specimens with different flange thickness

### 4. 3 混凝土强度影响分析

为研究混凝土强度对结构抗弯性能的影响,设计了 4 个编号为 FCSR – C1 ~ FCSR – C4 的构件,混凝土强度分别为 C20,C25,C35 和 C40,其他参数均与构件 FCSR – CP 相同. 不同混凝土强度构件的荷载 – 变形曲线如图 11 所示. 各曲线在较小的荷载下发生分离,随着荷载的增加,分离趋势更加明显,但整体发展趋势较为一致,经过强化工作阶段后构件发生破坏. FCSR – C1 ~ FCSR – C4 各构件的极限荷载分别为 551. 2, 560. 4, 592. 3 和 610. 3 kN, 依次提高 1. 7% , 2. 4% , 3. 2% 和 3. 1% ,承载力提升幅度相对平稳,说明混凝土强度的增加对构件承载力提高具有一定影响.

### 4. 4 钢管间距影响分析

为研究钢管间距对结构抗弯性能的影响,设计了 3 个编号为 FCSR – TP1 ~ FCSR – TP3 的构件,钢管间距分别为 275,300 和 325 mm,其他参数均与构件 FCSR – CP 相同. 不同钢管间距构件的荷载 – 变形曲线见图 12. 可以看出,在弹性阶段各曲线斜率差异较大,说明钢管间距的增加对结构的初始刚度影响较大,构件 FCSR – CP, FCSR – TP3 与其他构件在变形为 7 mm 时便发生

分离,随着荷载的增加,经历弹塑性和强化工作阶段后构件达到极限荷载发生破坏. FCSR – TP1 ~ FCSR – TP3 各构件的极限荷载分别为 528. 9, 446. 3 和 381. 6 kN,极限荷载整体表现为下降趋势,依次降低 7. 8% ,11. 8% 和 18. 2% ,而且降低幅度在不断变大,表明钢管间距的增加对构件承载力产生明显影响.

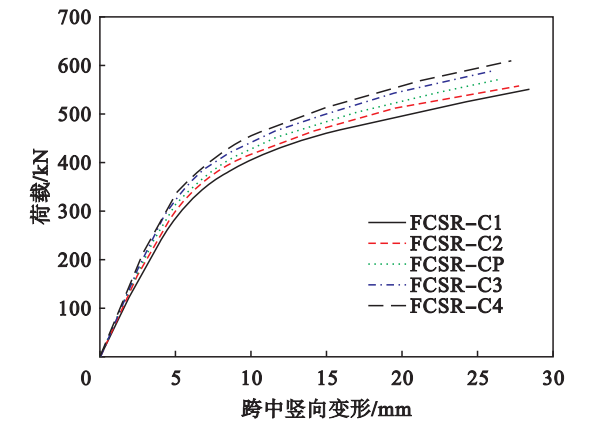


图 11 不同混凝土强度构件荷载 – 变形曲线  
Fig. 11 Load versus deformation curves of specimens with different compressive strength of the concrete

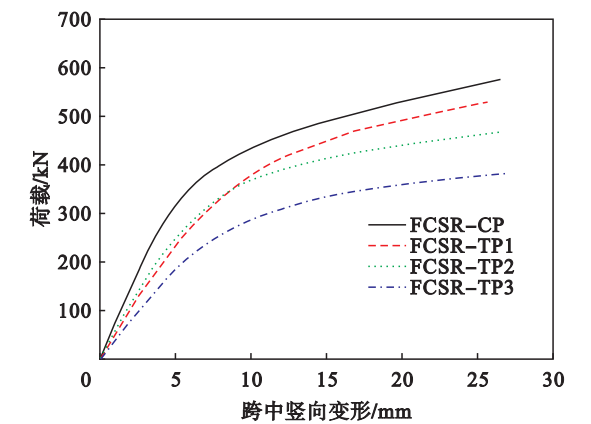


图 12 不同钢管间距构件荷载 – 变形曲线  
Fig. 12 Load versus deformation curves of specimens with different spacings between the tubes

### 4. 5 延性和刚度分析

延性系数能够评价结构截面从屈服开始达到极限荷载或达到之后而承载力未发生明显降低的变形能力,计算公式为

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y. \quad (1)$$

式中: $\Delta_y$  为构件屈服荷载所对应的跨中变形; $\Delta_u$  为构件极限荷载所对应的跨中变形.

将 FCSR 构件作为简支梁进行研究<sup>[6]</sup>,由材料力学可知,等效抗弯刚度的公式为

$$EI = \frac{l^3}{48} \cdot \frac{F}{w} \quad (2)$$

式中: $w$  为构件跨中变形; $F$  为单点集中荷载; $l$  为构件计算长度; $EI$  为等效抗弯刚度. 可知,刚度与构件荷载-变形曲线的斜率成正比,为提高计算精度,选取曲线弹性阶段上三点斜率进行计算,并对所计算的结果求平均值. 各构件的等效抗弯刚度计算结果如表 1 所示.

由表 1 可知,单点集中荷载作用下,FCSR 新型管幕构件表现出良好的延性,平均延性系数为 3.3,同时,构件表现出较高的横向抗弯刚度,能够有效控制变形,平均抗弯刚度为  $1\,560.4\text{ kN}\cdot\text{m}^2$ . 分析原因是由于翼缘板作为受拉筋较好地承担了受拉荷载,槽钢作为受压筋为混凝土分担受压荷载,同时在钢管和翼缘板的双重约束下,延缓了混凝土的开裂,能够有效提高构件的延性和抗弯刚度.

表 1 延性系数和等效抗弯刚度计算结果  
Table 1 Calculation results of ductility coefficient and equivalent bending stiffness

试件编号	$f_y$ kN	$\Delta_y$ mm	$f_u$ kN	$\Delta_u$ mm	$\mu$	$EI$ $\text{kN}\cdot\text{m}^2$
FCSR-CP	385.7	11.5	573.6	26.5	3.3	1 483.9
FCSR-TT1	390.1	9.0	514.8	28.0	2.4	1 462.2
FCSR-TT2	400.6	8.1	547.2	27.1	3.0	1 484.2
FCSR-TT3	414.7	6.7	608.3	26.7	3.3	1 553.9
FCSR-TT4	424.4	8.6	640.5	27.3	3.7	1 674.5
FCSR-FT1	327.8	5.7	525.8	26.4	4.6	1 389.0
FCSR-FT2	369.0	6.9	562.8	26.4	3.8	1 469.4
FCSR-FT3	413.0	8.7	585.0	28.1	3.2	1 575.3
FCSR-FT4	426.8	9.4	590.2	28.6	3.0	1 589.2
FCSR-C1	378.3	8.3	551.2	28.3	3.4	1 355.8
FCSR-C2	387.3	8.1	560.4	28.0	3.5	1 459.9
FCSR-C3	400.6	8.1	592.3	26.3	3.2	1 579.6
FCSR-C4	414.0	8.1	610.3	27.0	3.3	1 626.7
FCSR-TP1	363.8	9.3	528.9	25.6	2.8	1 430.5
FCSR-TP2	321.0	7.5	446.3	26.6	3.6	2 077.3
FCSR-TP3	255.1	7.9	381.6	27.4	3.5	1 754.3

注: $f_y$  为试件的屈服荷载,kN; $f_u$  为试件的极限荷载,kN; $\Delta_y$  为屈服荷载所对应的跨中变形; $\Delta_u$  为极限荷载所对应的跨中变形; $\mu$  为延性系数; $EI$  为抗弯刚度, $\text{kN}\cdot\text{m}^2$ .

## 5 结 论

1) FCSR 新型管幕构件在单点集中荷载作用下发生弯曲破坏,当荷载达到  $25.57\% f_u$  时钢管和混凝土接触面产生裂缝,达到  $75.49\% f_u$  时

翼缘板发生屈服,试件的极限荷载为  $567\text{ kN}$ .

2) 钢管壁厚和混凝土强度的增加对构件承载力具有一定的影响,极限荷载在  $1.7\% \sim 6.3\%$  范围变化;翼缘板厚度增加时,构件承载力增长趋于平缓,影响不明显.

3) 钢管间距的增加导致构件极限承载力显著降低,极限荷载在  $7.8\% \sim 18.2\%$  范围变化.

4) FCSR 构件表现出良好的延性,平均延性系数为 3.3,同时具有较高的横向抗弯刚度,能够有效控制变形.

## 参考文献:

[1] 张超哲. 型钢连接的新型地下管幕结构抗弯性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2018.  
(Zhang Chao-zhe. Study on flexural behaviors of section steel tube slab for underground space[D]. Shenyang:Northeastern University,2018. )

[2] 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 - 1443.

[3] Schumacher F P, Kim E. Modeling the pipe umbrella roof support system in a Western US underground coal mine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60(6): 114 - 124.

[4] Collier P J, Abbott D G. Micro-tunneling techniques to form an in-situ barrier around existing structures[C]//Proceedings of the Annual International Conference on High Level Radioactive Waste Management. Las Vegas, 1994: 386 - 394.

[5] Jia P J,Zhao W, Guan Y P, et al. Experimental study on the flexural behavior of steel tube slab composite beams and key parameters optimization [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(11): 2476 - 2489.

[6] 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.

[7] Moon J,Roeder C W, Lehman D E, et al. Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes [J]. *Engineering Structures*, 2012, 42(12): 349 - 361.

[8] Ekmekyapar T, Al-Eliwi B J M. Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 105 (8): 220 - 230.

[9] 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.

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