

## 钢支护对管幕预筑结构构件受弯性能的影响

韩石<sup>1,2</sup>, 侯飞阳<sup>1</sup>, 张艳青<sup>1\*</sup>, 尤龙飞<sup>1</sup>, 吕宇宣<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 新疆生产建设兵团兴新职业技术学院 建筑与水利工程学院, 新疆 铁门关 841007)

**摘要:** 管幕预筑工法作为一种新型的地下浅埋暗挖技术, 其优秀的安全性和实用性得到越来越多的关注与发展。但对其受力性能缺乏全面、系统性的研究, 尤其在受弯性能方面。为进一步探究管幕预筑结构的受力性能, 设计两个受弯构件进行两点加载试验, 将试件中的对焊钢筋等效为钢管幕预筑结构钢板之间的钢支护, 以钢支护的设置参数, 对管幕预筑结构的受弯性能进行了试验研究, 为了充分研究钢支护对管幕预筑结构受弯性能的影响, 运用有限元软件建立管幕预筑结构构件的有限元模型; 通过与试验结果对比验证有限元模型的正确性。以此模型为依据, 分析钢支护的直径和位置对管幕预筑结构受弯性能的影响。研究表明, 钢支护与钢管幕之间的牢固焊接可有效阻止钢板与混凝土的分离, 提高试件的受力性能; 钢支护的直径对试件抗弯承载力有较大影响; 钢支护的位置对试件的抗弯承载力影响较大, 实际工程中应尽量将钢支护设置在等截面范围内、靠近截面高度突变的位置处。

**关键词:** 地下工程; 管幕预筑结构; 受弯性能; 钢支护; 刚性连接

**中图分类号:** TU375.1

**文献标识码:** A

## Influence of Steel Support on Flexural Performance of Precast Structural Components of the Pipe Curtain

HAN Shi<sup>1,2</sup>, HOU Feiyang<sup>1</sup>, ZHANG Yanqing<sup>1\*</sup>, YOU Longfei<sup>1</sup>, LYU Yuxuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of China Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Architecture and Water Conservancy Engineering, Bingtuan Xingxin Vocational and Technical College, Tiemenguan, Xinjiang 841007, China)

**Abstract:** The pipe curtain pre-assembly technology, as a new type of underground shallow-buried excavation method, has gained increasing attention and development due to its excellent safety and practicality. However, there is a lack of comprehensive and systematic research on its mechanical properties, especially in the aspect of bending performance. To further explore the mechanical properties of the pipe curtain pre-assembly structure, two bending components were designed for two-point loading tests. By treating the welded reinforcing bars in the specimen as steel supports between the precast structural steel plates of the steel tube and setting the steel struts as the parameter, the bending performance of the pipe curtain pre-assembly structure was tested and studied. In order to fully investigate the influence of the steel supports on the bending performance of the pipe curtain pre-assembly structure, the finite element software was used to establish the finite element model of the pipe curtain pre-assembly structure components. By comparing with the test results, the correctness of the finite element model was verified. Based on this model, the influence of the diameter and position of the steel struts on the bending performance of the pipe curtain pre-assembly structure was analyzed. The research results show that the firm welding between the steel struts and the steel curtain can effectively prevent the separation of the

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52008271)

第一作者: 韩石(1982—), 男, 吉林辽源人, 博士, 讲师, 从事隧道及地下工程施工新技术研究。

\* 通信作者: 张艳青(1983—), 女, 山东泰安人, 博士, 副教授, 从事钢筋混凝土结构研究。

steel plate from the concrete, improving the mechanical performance of the test specimen; the diameter of the steel struts has a significant impact on the bending bearing capacity of the test specimen; the position of the steel struts has a significant impact on the bending bearing capacity of the test specimen. In actual engineering, the steel supports should be set within the range of equal sections and at positions close to the sudden change in the section height.

**Key words:** underground engineering; tubular roof prefabricated structure; flexural performance; steel support; rigid connection

近年来,城市人口的急剧增长给城市带来了巨大的压力,引发了住房紧张、交通拥挤、环境恶化等各种问题。开发建设地下空间是提高土地利用效率、缓解交通拥堵的有效手段。然而,在人口稠密区进行地下建筑施工会对城市居民的正常生活造成很大影响。因此,具有地面沉降小,施工无噪声、无振动、周期短等特点<sup>[1]</sup>的管幕预筑工法越来越受到人们的青睐<sup>[2]</sup>。

管幕预筑工法是由韩国引入我国,经改进后形成一种地下空间暗挖技术<sup>[3]</sup>。与传统的暗挖方法相比,该工法不再按照开挖、支护、建设主体结构的顺序施工,而是先建设主体结构,在主体结构的基础上进行地下大空间开挖<sup>[3-6]</sup>,实现了支护-结构一体化<sup>[7-8]</sup>。管幕预筑结构作为一种新型支护-结构一体化的地下空间结构,其施工过程包括顶进大直径钢管、切割钢管、焊接连接钢板、绑扎钢筋,最终浇筑混凝土形成地下永久结构。目前,关于管幕预筑结构的研究较少,主要研究成果集中于管幕支护结构。关永平等<sup>[9-13]</sup>对管幕预筑结构进行了抗弯试验和数值模拟,明确了管幕工法中管幕支护构件的破坏模式与受力机理,分析了混凝土强度、翼缘板厚度、钢管间距以及管间横向连接方式对承载力的影响规律。张超哲等<sup>[14-15]</sup>对设有槽钢和螺纹杆连接件的管幕支护构件进行了试验研究,探讨了连接件对管幕支护结构构件受力性能的影响。宋玉香等<sup>[16-19]</sup>对管幕预筑结构进行偏压试验和抗弯试验,研究了偏心距、端部约束形式、连接件等对构件力学性能的影响。上述研究对于管幕支护结构中连接件的力学行为已有清晰的分析,但是针对管幕预筑结构中连接件的研究较为少见。

本文通过开展管幕预筑构件的竖向两点集中加载试验,并结合 ANSYS 数值模拟,探究了钢支护的焊接方式(点焊与满焊)、直径和位置 3 个因素对管幕预筑结构构件受弯性能的影响。研究成果对于探究管幕预筑结构中连接上下管幕的支护钢结构的力学性能具有重要价值。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验设计了 2 个管幕预筑结构受弯试件,即 VSCF3 和 VSCF3D。试件由 4 根直径为 250 mm 的钢管切割后与 Q345 平板焊接而成,钢板内部设置连接件后浇筑强度等级为 C30 的混凝土。2 个试件的区别在于钢支护与钢板之间焊接方式:试件 VSCF3D 为点焊,试件 VSCF3 为满焊。除焊接方式外,其他设计参数均相同,试件连接件形式为对拉钢筋,钢管幕强度为 345 MPa。试件构造形式如图 1 所示,试件长度为 1 450 mm,钢管和钢板厚度均为 4 mm,试件端部配置 HRB335 钢筋,纵筋直径为 8 mm,箍筋直径为 6 mm,通过绑扎方式将纵筋、栓钉和对拉钢筋连接形成整体骨架。

参照太原市迎泽街下穿火车站通道工程中的管幕预筑结构<sup>[11]</sup>,按照强度等效的原则,钢支护采用直径为 6 mm 的 HPB300 对拉钢筋。沿试件宽度方向布置 2 根钢支护,其间距为 140 mm,距离钢板边缘均为 30 mm,距离截面突变处 12.5 mm。在钢管内部沿试件宽度方向布置对拉钢筋连接件,其位置分别位于钢管 1/4 和 1/2 截面处,间距为 140 mm。

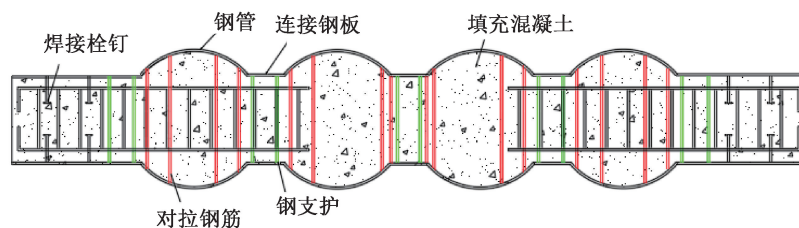


图 1 试件设计

Fig. 1 Specimen design

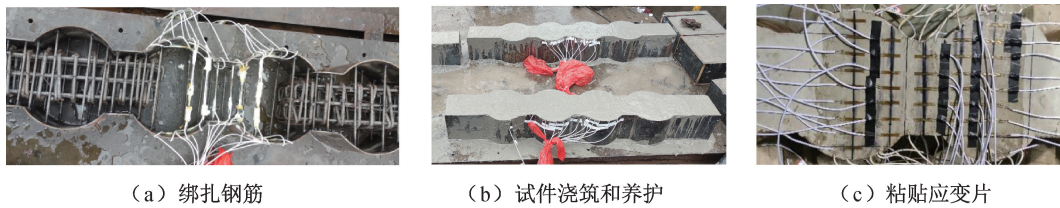


图2 试件制作与浇筑

Fig. 2 Specimen fabrication and pouring

### 1.2 试件制作

试件制作过程大致可以分为3个步骤(图2),即绑扎钢筋、试件浇筑和养护、粘贴应变片。试验所用钢板、纵筋、架立钢筋和对拉钢筋均留样,测试其屈服强度与屈服应变。每个试件浇筑时预留3个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的混凝土标准立方体试块,并与试件同条件养护。试件浇筑4 h后开始进行蒸汽养护:从室温开始,每0.5 h升温一次,2~3 h内升温至60℃,恒温养护48 h后降至室温。试验当天,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)<sup>[20]</sup>测试得到预留混凝土试块的抗压强度分别为29、31、30 MPa。

### 1.3 试验装置及量测内容

试验现场如图3所示,试验采用1 500 kN油压千斤顶对两端简支的试件进行两点对称加载,加载装置包括设计承载力为800 kN的自平衡加载架、千斤顶、荷载传感器、分配梁以及采集应变的静态电阻应变仪。为保证加载点处试件表面受力均匀,在加载点放置长度100 mm、厚度20 mm、宽度与试件相同的垫块。各试件在正式加载前均进行预加载,预加荷载值为数值模拟所得极限荷载的20%。正式加载采用分级加载方法,每级荷载增量取数值模拟极限荷载的10%,每级加载后持荷10 min,观察并记录裂缝情况。为观察试件的最终破坏形态,试件均加载至发生严重破坏而无法再承受荷载。

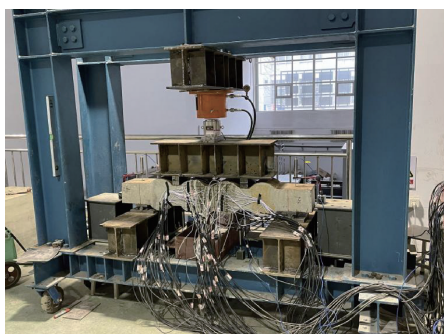


图3 试验现场

Fig. 3 Field tests

试验主要测量参数包括试件极限荷载、挠度和应变。荷载通过荷载传感器读取,并利用计算机自动记录。挠度测量:沿试件长度方向布置5个位移计(1—5号),其位置见图4(a),1、5号位移计用来测量支座沉降,2—4号位移计用来测量试件变形。应变测量:为了探究钢板的受力情况,在下部钢板上布置了5个应变片(G1—G5),其布置见图4(b)。

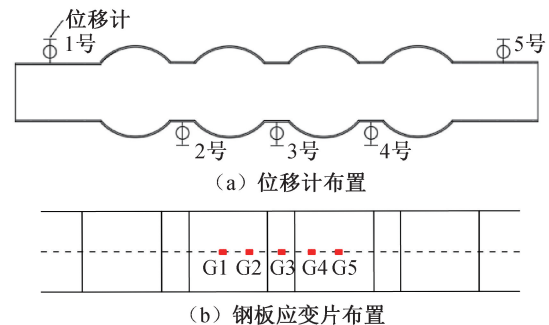


图4 测点布置

Fig. 4 Measuring point arrangement

## 2 试验现象与结果分析

### 2.1 试验现象

试件VSCF3D在荷载增至31 kN(52.7% $P_u$ ,  $P_u$ 为试件极限荷载)时,跨中底部钢管与平钢板连接处的混凝土表面出现一条高12 cm的竖向裂缝,见图5(a)。当荷载增加至42 kN(71.4% $P_u$ )时,裂缝宽度增大并向试件顶部延伸,跨中底部钢板与混凝土开始剥离,见图5(b)。当荷载增加至52 kN(88.3% $P_u$ )时,裂缝继续发展延伸至整个截面高度的2/3,见图5(c)。当荷载达到试件极限荷载58.9 kN时,试件发出明显钢筋拉断声,跨中竖向裂缝继续向上发展并贯穿截面,跨中底部左侧截面突变处钢板与混凝土明显分离,试件发生脆性破坏,最终破坏形态见图5(d)。

试件VSCF3在荷载达到34 kN时,跨中左侧截面突变处受拉侧混凝土出现第一条裂缝。继续加载,加载点下方和跨中右侧截面突变处相继出

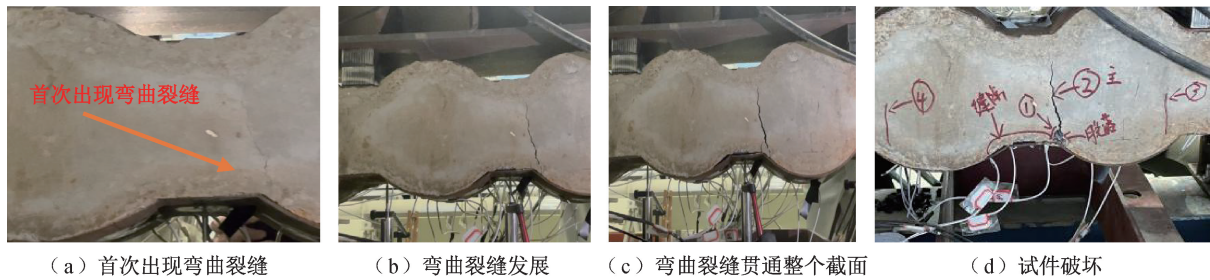


图5 试件 VSCF3D 破坏过程

Fig. 5 Failure process of specimen VSCF3D

现裂缝并缓慢发展,最终跨中左右两侧截面突变处裂缝发展为主裂缝(图6)。当荷载增加至 162 kN 时,主裂缝上下贯通,下部钢板与混凝土剥离,试件被破坏。

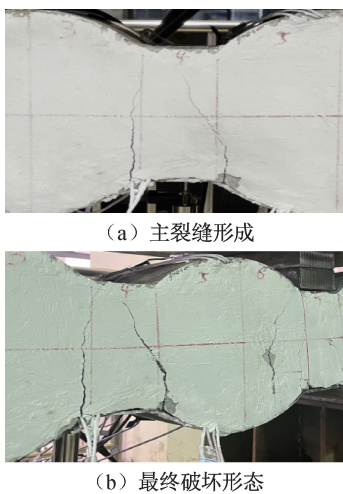


图6 试件 VSCF3 破坏过程

Fig. 6 Failure process of specimen VSCF3

试件 VSCF3D 和 VSCF3 的开裂荷载分别为 31、34 kN,两者相差不大。主要区别在于:在开裂初期,试件 VSCF3D 裂缝发展速度相对较快;试验结束后试件 VSCF3D 跨中混凝土碎裂程度较为严重;试件 VSCF3D 跨中底部钢板与混凝土剥离现象更显著。这主要是因为加载过程中,试件 VSCF3D 的钢支护无法提供受拉侧钢板的拉力,导致钢板

对试件整体承载力的贡献较小。

## 2.2 荷载-跨中挠度曲线

试件 VSCF3D 和 VSCF3 的荷载-挠度曲线如图7所示。通过分析试验数据并结合试验现象,可将管幕预筑结构构件的荷载-挠度曲线分为3个阶段:弹性工作阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段。

(1)弹性工作阶段(试件的荷载  $P \leq P_a$ ,  $P_a$  为开裂荷载)。在试件实际荷载达到  $P_a$  之前,试件表现出较大的刚度,钢板与混凝土表现出良好的组合效应,混凝土表面未出现裂缝,钢板与混凝土无剥离现象,荷载-挠度曲线呈线性增长趋势。

(2)带裂缝工作阶段( $P_a < P \leq P_y$ ,  $P_y$  为试件的屈服荷载)。该阶段始于弯曲裂缝出现,止于钢筋(纵筋或拉结筋)屈服。在此阶段,试件混凝土表面弯曲裂缝逐渐增多,钢板与混凝土之间出现微裂隙但并未完全剥离。试件荷载-挠度曲线大致呈线性关系,试件刚度小于弹性工作阶段。

(3)破坏阶段( $P_y < P \leq P_u$ ,  $P_u$  为试件的极限荷载)。在此阶段,随着荷载的增加,混凝土表面裂缝宽度逐渐增大,试件受拉侧钢板与混凝土剥离程度加剧,试件刚度明显下降,荷载-挠度曲线出现明显转折,挠度增长速度远大于荷载增加速度。当达到极限荷载(VSCF3D 为 58.9 kN, VSCF3 为 162 kN)时,试件发生弯曲破坏。

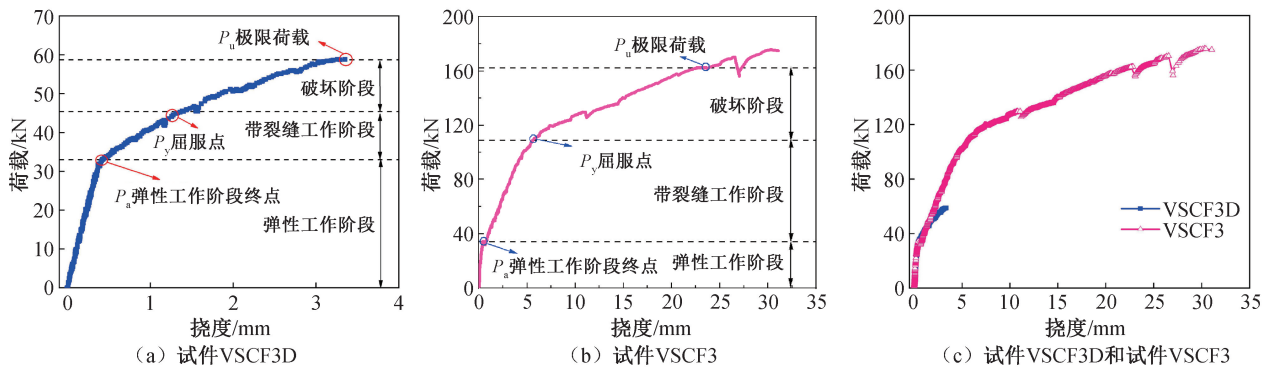


图7 试件荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load deflection curve of specimen

表 1 荷载变形曲线特征点数据

Tab. 1 Characteristic point data of load deformation curve

试件	开裂特征点		屈服特征点		极限特征点		初始刚度 EI/(kN·m <sup>2</sup> )
	开裂荷载 P <sub>a</sub> /kN	挠度/mm	屈服荷载 P <sub>y</sub> /kN	挠度/mm	极限荷载 P <sub>u</sub> /kN	挠度/mm	
VSCF3D	32.3	0.403	45.4	1.41	58.8	3.352	176.10
VSCF3	34.0	0.410	108.7	5.57	162.0	31.060	241.03

将各试件荷载-挠度曲线特征点结果列于表 1。开裂荷载 P<sub>a</sub> 为弹性工作阶段终点的荷载,开裂特征点取切线斜率与曲线初始斜率差值为 3% 的点;屈服荷载 P<sub>y</sub> 对应的屈服特征点按照等效弹塑性能量法求出;极限特征点取荷载最大值点。由表可知,各试件弹性工作阶段终点荷载 P<sub>a</sub> 接近,说明焊接形式对试件弹性工作阶段终点荷载影响不大。试件 VSCF3D 屈服荷载 P<sub>y</sub> 为 45.4 kN,试件 VSCF3 屈服荷载较 VSCF3D 提高了 139.4%。试件 VSCF3D 极限荷载 P<sub>u</sub> 为 58.8 kN,试件 VSCF3 极限荷载较 VSCF3D 提高了 175.5%,可见钢支护焊接形式对试件极限承载力的影响较大。试件 VSCF3D 初始刚度 EI 为 176.10 kN·m<sup>2</sup>,试件 VSCF3 初始刚度相较于 VSCF3D 提高了 36.9%,说明钢支护焊接形式对试件初始刚度影响较大。

### 2.3 钢板应变分析

图 8 为试件 VSCF3D 和 VSCF3 受拉钢板沿试件纵向对称轴上不同位置测点的荷载-应变曲线。图中正应变值代表拉应变,负应变值代表压应变。由图 8 可知,在整个加载过程中,从应变片 G1 所在截面到 G3 所在截面的应变呈现出“拉-压-拉”的分布规律。加载初期,各测点处钢板没有应变或应变很小;当加载至 30 kN 时,各测点处的钢板应变增大。直至破坏,试件 VSCF3D 钢板的应变始终较小,未达到屈服,说明该试件钢板对承载力贡

献很小。在加载后期,试件 VSCF3 跨中截面(G3 所在截面)和高度突变截面(G2 所在截面)的受拉侧钢板均产生了较大的应变,并发生屈服,这说明钢板在抵抗试件 VSCF3 破坏的过程中发挥了较大作用。文献[11]的研究表明,管幕预筑结构受弯构件的破坏始于对拉钢筋及钢支护的屈服。

## 3 数值模拟

### 3.1 有限元模型

采用 ANSYS 有限元分析软件建立管幕预筑结构受弯试件的有限元模型。加载板、支座垫板与构件采用接触面绑定,钢管与连接钢板采用焊接单元连接,运用节点铰接来模拟钢支护与钢板之间的点焊形式。钢板与混凝土之间使用“罚函数”定义接触面的切向应力,摩擦因数取 0.3,使用“硬接触”定义接触面的法向应力,接触刚度设置为 1;纵筋、架立钢筋与混凝土<sup>[21]</sup>之间采用耦合约束,不考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移;拉结钢筋分别与钢板、混凝土耦合自由度。

### 3.2 有限元模型验证

图 9 为试件的试验结果与数值模拟结果对比图,结果表明,数值模拟结果与试验测试结果吻合较好,数值模型能较为准确地反映钢支护对管幕预筑结构构件受力性能的影响。

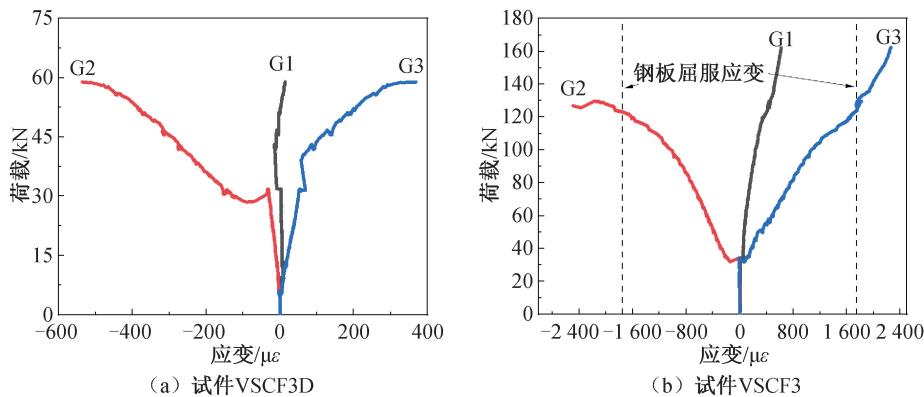


图 8 纵向对称轴上不同位置钢板应变变化

Fig. 8 Strain change of steel plate at different positions on the longitudinal symmetry axis

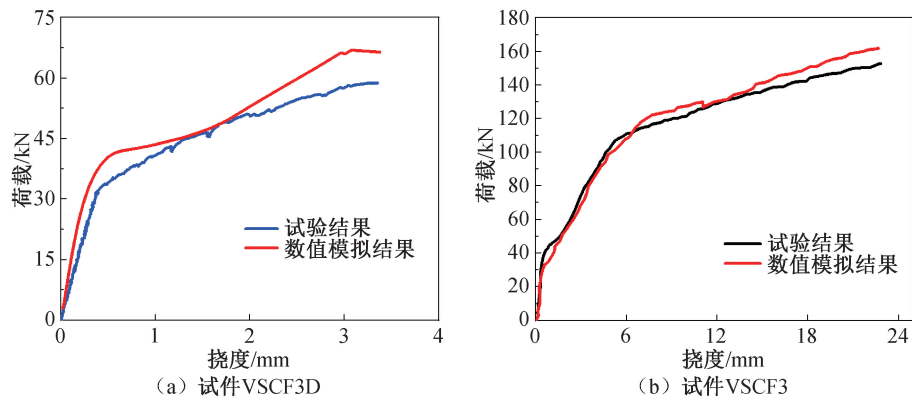


图9 试件试验结果与数值计算结果对比

Fig.9 Comparison of test results and numerical calculation results

基于数值模拟结果,对试验测得的开裂荷载进行验证,并对比混凝土应变发展规律,验证试件破坏形式。在模型中,混凝土的拉伸开裂应变取 $150\sim 200\ \mu\varepsilon$ ,极限压应变取 $3\ 300\ \mu\varepsilon$ 。结果表明,当荷载为 $25.6\ \text{kN}$ 时,模型中首先出现了拉伸开裂应变( $150\sim 200\ \mu\varepsilon$ )区域。试验中,试件的开裂荷载为 $32.3\ \text{kN}$ 。模型预测的开裂荷载小于试验观测值,其主要原因为试验中的裂缝只有达到人眼可识别的宽度(即可见裂缝)才能被观察到,实际的开裂荷载小于试验观测值。

试件达到极限荷载的数值模拟应变结果如图10所示,试件工作区段内的预测应变如图11(a)所示。可以看出,数值模拟结果能够反映裂缝的发展趋势,试件VSCF3D的数值模拟应变结果与

试验结果略有差异(图11),主要原因是该试件在试验中的不完全对称导致了试验误差,造成加载过程中应变分布不对称,最终仅在跨中一侧出现了主裂缝。

图12为数值模型预测的受拉侧钢管应力云图。可以看出,在加载过程中,受拉钢板外侧的应力沿纵轴方向有明显的变化。在G3所在的跨中段和靠近跨中左右两侧的钢管最大截面高度处(G1和G5)出现拉应力,在最大截面高度1/2处(G2和G4)出现压应力,与试验结果吻合较好。

### 3.3 参数分析

由于试验条件限制,难以通过试验研究钢支护的直径和位置参数对构件受弯性能的影响。

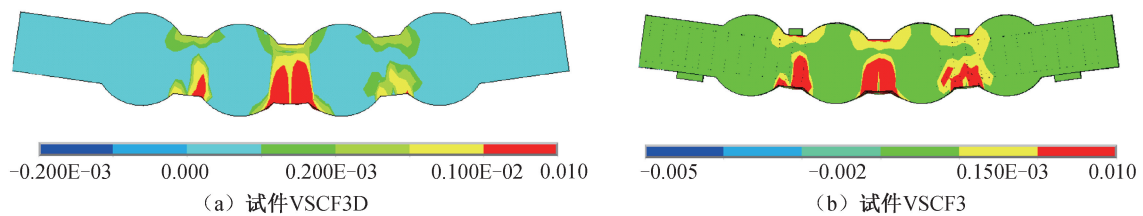


图10 试件应变云图

Fig.10 Strain cloud diagram of specimen

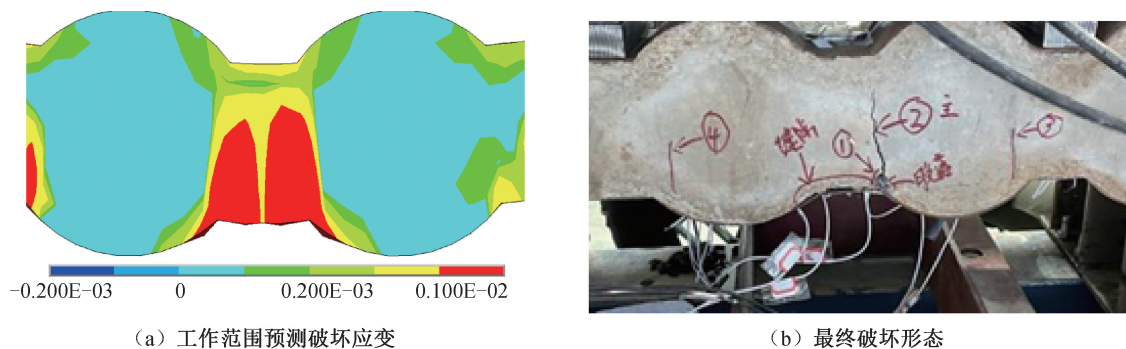


图11 试件VSCF3D数值模拟破坏与试验破坏对比

Fig.11 Comparison of failure mode predicted by numerical simulation and experimental tests for specimen VSCF3D

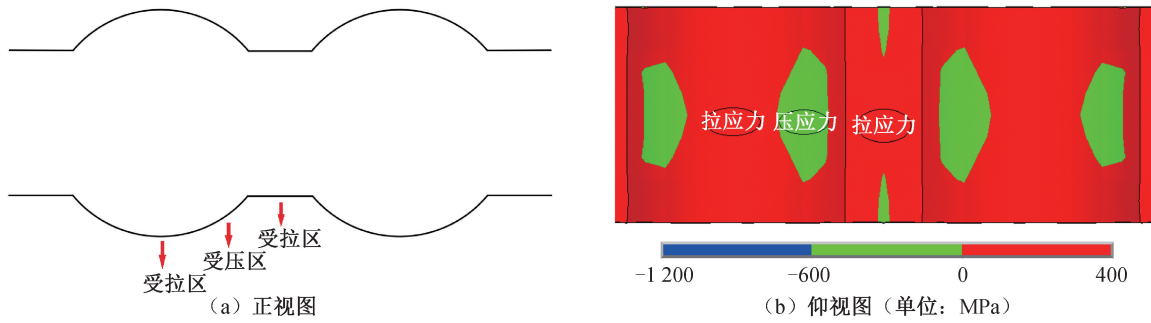


图 12 受拉侧管幕应力云图

Fig. 12 Stress cloud diagram of tension side pipe curtain

因此,以试件 VSCF3 作为基准模型,建立不同钢支护直径和位置的有限元模型,分析钢支护的不同设计参数对管幕预筑结构构件受弯性能的影响。

### 3.3.1 钢支护的直径

为研究钢支护直径对管幕预筑结构构件抗弯承载力的影响,本研究建立了 2 个管幕预筑结构有限元模型,除钢支护的直径不同外,其余参数均相同。

运用有限元分析软件 ANSYS 计算得到的荷载-挠度关系曲线如图 13 所示。钢支护直径为 8、10 mm 的试件,其极限抗弯承载力分别为 173、231 kN。相较于基准试件 VSCF3,其抗弯承载力分别提高了 6.8% 和 37.5%。这表明极限抗弯承载力随着钢支护直径的增大而提高,且提升幅度逐渐变大。从图 13 可以看出,在裂缝形成前,钢支护的直径对试件初始刚度影响甚微,弯矩主要由混凝土承担;弯曲裂缝出现后,钢支护开始参与抗弯,其直径对试件抗弯承载力影响较大。

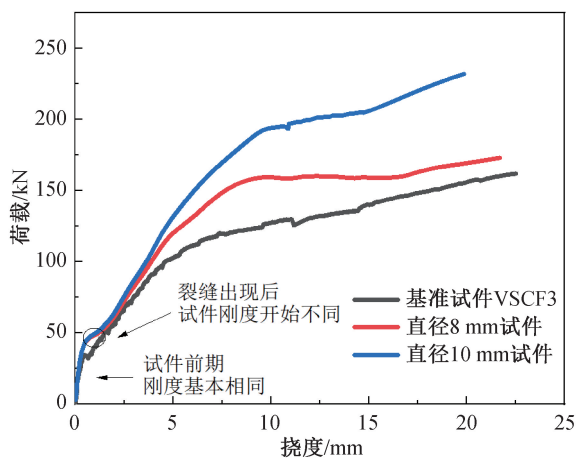


图 13 荷载-挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection curve

### 3.3.2 钢支护的位置

为研究钢支护位置对管幕预筑结构试件抗弯承载力的影响,设计 2 个有限元模型进行对比分析。将钢支护的位置分别布置在试件截面突变处和钢管 1/2 截面处,其余设计参数均与试件 VSCF3 保持一致。

钢支护布置在不同位置时,试件的荷载-挠度曲线如图 14 所示。可以看出,钢支护位于钢管 1/2 截面处和试件截面突变处时,极限抗弯承载力分别为 125、146 kN,相较于基准试件 VSCF3 分别降低了 22.8% 和 9.8%。因此,在实际工程中应按照构造要求,谨慎选择钢支护的位置。

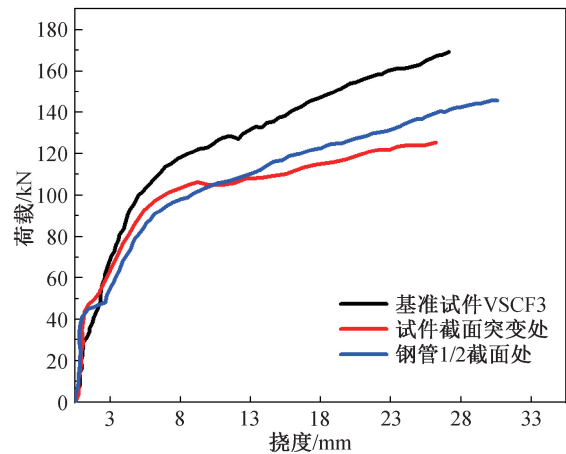


图 14 荷载-挠度曲线

Fig. 14 Load-deflection curve

## 4 结论

1) 实际工程中应保证钢板与钢支护之间的有效焊接,在保证钢管钢支护在施工过程中起支护作用的同时,充分发挥钢支护在结构受力中的作用。

2) 钢支护的直径对试件的极限抗弯承载力有较大影响,直径为 8、10 mm 时,试件的极限抗弯承

载力分别提高了 6.8% 和 37.5%。

3) 钢支护的位置对试件的抗弯承载力影响较大, 实际工程中应尽量将钢支护设置在等截面范围内、靠近截面高度突变的位置处。

#### 参考文献:

- [1] 许伯宁. 管幕预筑结构受力性能研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.  
XU B N. Research on mechanical properties of pipe-roof pre-construction structures [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [2] 沈桂平, 曹文宏, 杨俊龙, 等. 管幕法综述[J]. 岩土工程界, 2006(2): 27-29.  
SHEN G P, CAO W H, YANG J L, et al. A literature review of the pipe roof method [J]. Geotechnical Engineering World, 2006(2): 27-29.
- [3] 邢凯, 陈涛, 黄常波. 新管幕工法概述[J]. 施工技术, 2009, 38(8): 63-67.  
XING K, CHEN T, HUANG C B. On new tubular roof method [J]. Construction Technology, 2009, 38(8): 63-67.
- [4] 杨仙, 张可能, 李钟, 等. 管幕预筑法中钢管顶进对地面沉降的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(4): 469-473.  
YANG X, ZHANG K N, LI Z, et al. Influence of steel pipe jacking on earth surface settlement in pipe roof pre-construction method [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(4): 469-473.
- [5] 阎石, 张占军, 金春福, 等. 开挖过程中新管幕结构内力数值分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(6): 1064-1069.  
YAN S, ZHANG Z J, JIN C F, et al. Numerical analysis on inner forces of underground new tubular roof structure during excavation [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(6): 1064-1069.
- [6] 杨仙, 张可能, 李钟, 等. 地铁站新预筑法施工中顶管间距的优化设计[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 61-66.  
YANG X, ZHANG K N, LI Z, et al. Optimal design of distance between jacking pipes of mew pre-construction method in metro station [J]. China Railway Science, 2011, 32(2): 61-66.
- [7] 李积栋, 油新华, 肖龙鸽. 地下工程支护-结构一体管幕预筑法技术及发展[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(3): 456-460.  
LI J D, YOU X H, XIAO L G. Technology and development of support-structure integral pipe-roofing pre-construction method for underground works [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(3): 456-460.
- [8] 李积栋, 油新华. 支护-结构一体化管幕预筑法地铁站优化分析[J]. 施工技术, 2018, 47(13): 89-93.  
LI J D, YOU X H. Optimized analysis of the supporting-structure integration pipe-roofing pre-construction method of subway station [J]. Construction Technology, 2018, 47(13): 89-93.
- [9] 关永平, 贾鹏蛟, 赵文, 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 Y P, JIA P J, ZHAO W, et al. Study on parameter optimization and the flexural behavior of steel tube slab structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 83-91.
- [10] 贾鹏蛟, 赵文, 关永平, 等. STS 新管幕构件抗弯性能试验研究及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2738-2746.  
JIA P J, ZHAO W, GUAN Y P, et al. Numerical simulation and experimental study on flexural behavior of steel tube slab members [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2738-2746.
- [11] 贾鹏蛟, 赵文, 刘云安, 等. 翼缘板连接的管幕结构抗弯性能的影响研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(2): 390-396+412.  
JIA P J, ZHAO W, LIU Y A, et al. Study on mechanical properties of flange connected forms of pipe roofing structure [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(2): 390-396+412.
- [12] 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 W, JIA P J, WANG L G, et al. Experimental study on the flexural capacity of steel tube slab members of subway station [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 167-176.
- [13] 贾鹏蛟, 史培新, 关永平, 等. STS 管幕结构横向抗弯刚度计算模型及参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(8): 1159-1165.  
JIA P J, SHI P X, GUAN Y P, et al. Calculation model of flexural stiffness of STS structure and parameters optimization [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(8): 1159-1165.
- [14] 张超哲, 赵文, 贾鹏蛟, 等. 槽钢连接的新型地下管幕构件力学性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 464-477.  
ZHANG C Z, ZHAO W, JIA P J, et al. Mechanical property of channel steel tube slab composite beams for underground space [J]. Journal of Central South University, 2020, 51(2): 464-477.

- ity(Science and Technology), 2020, 51(2): 464-477.
- [15] 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, 32(5): 778-787.  
YAN S, WANG S Z, JIN C F, et al. Experimental study on mechanical characteristics of horizontal anchor in new tubular roof method[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(5): 778-787.
- [16] 宋玉香,郑永翔,张艳青,等.对拉钢筋对管幕预筑结构偏压构件受力性能影响研究[J].隧道建设(中英文), 2024, 44(6):1174-1183.  
SONG Y X, ZHENG Y X, ZHANG Y Q, et al. Effects of transverse reinforcement on mechanical performance of eccentric compression members in pipe roof prefabricated structures[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(6): 1174-1183.
- [17] 刘勇,陈炳廷,郑永翔,等.变截面双钢板钢筋混凝土偏压构件承载力影响因素分析[J/OL].应用力学学报, 1-11[2025-04-06]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1112.03.20250305.1016.006>.  
LIU Y, CHEN B T, ZHENG Y X, et al. Analysis of factors affecting the bearing capacity of variable cross section double-skin steel plate reinforced concrete eccentric compression members[J/OL]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1-11[2025-04-06]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1112.03.20250305.1016.006>.
- [18] 宋玉香,许伯宁,刘勇,等.设计参数对双钢板混凝土偏压构件受力性能的影响[J].应用力学学报, 2023, 40(6):1354-1363.  
SONG Y X, XU B N, LIU Y, et al. Effects of design parameters on mechanical properties of eccentrically loaded double-steel-plate-concrete members[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(6): 1354-1363.
- [19] 张艳青,吕宇宣,韩石,等.管幕预筑结构构件受弯性能试验[J].吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5):1390-1399.  
ZHANG Y Q, LYU Y X, HAN S, et al. Experimental research on flexural performance of tubular roof prefabricated structural components[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5):1390-1399.
- [20] 中华人民共和国建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社, 2003.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [21] 左咏梅,郭章雷,朱立华,等.基于扩展有限元的混凝土三点弯曲梁断裂性能数值模拟研究[J].河北工程大学学报(自然科学版), 2022,39(4): 26-32+40.  
ZUO Y M, GUO Z L, ZHU L H, et al. Numerical simulation study on fracture performance of concrete three-point bending beams based on extended finite element [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022,39(4): 26-32+40.

(责任编辑 张爱丽)