

束合管幕结构结合缝力学性能数值分析*

吉茂杰¹ 朱科峰¹ 周希圣¹ 黄小平¹ 焦伯昌² 洪剑宇² 柳 猷² 吕培林³

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 201102, 上海; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海;

3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200125, 上海)

摘 要 [目的] U-BIT(束合管幕结构)工法可以解决传统管幕法钢管节之间无法协同工作、支护效率差等问题。而束合管幕结构结合缝的受力性能将决定束合管幕整体结构的受力性能,因此有必要研究束合管幕结合缝的力学性能和破坏机理。[方法] 提出一种梁-刚性板-弹簧有限元数值模型,并与试验数据进行对比验证;分析了束合管幕结构结合缝的全过程受力机理,以及结合缝混凝土与钢管节的黏结强度、预应力张拉力大小、预应力筋位置等因素,对束合管幕结构力学性能的影响。[结果及结论] 结合缝脱开、预应力筋屈服、锁扣接触及锁扣拉坏是结合缝破坏的重要性能点;增大结合缝的黏结强度能够增加结合缝脱开弯矩,降低结合缝脱开安全系数,使其安全储备有所减小;提高预应力筋的预拉力能够有效提高结合缝脱开弯矩,但无法提高结合缝的屈服弯矩和极限弯矩,且结构极限状态延性系数较低;调整预应力筋位置,使其更靠近结合缝受拉侧,能够有效提高结合缝脱开弯矩。

关键词 地下结构;束合管幕;结合缝;力学性能

中图分类号 U455.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.017

Numerical Analysis for Mechanical Properties of Bundled Integrate Structure Joints

JI Maojie¹, ZHU Kefeng¹, ZHOU Xisheng¹, HUANG Xiaoping¹, JIAO Bochong², HONG Jianyu², LIU Xian², LYU Peilin³

(1. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201102, Shanghai, China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., 200125, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The U-BIT (underground bundled integrate tunnel) method can solve the problems of steel pipe sections inability in collaborative work and poor support efficiency of the traditional pipe curtain method. The mechanical properties of U-BIT joints determine those of the overall U-BIT, so it is necessary to study the mechanical properties and

failure mechanism of the U-BIT joints. [Method] A beam-rigid plate-spring finite element numerical model is proposed and compared with the experimental data for verification; the full-process stress mechanism of the U-BIT joints is analyzed, as well as the influence of factors such as the bonding strength between the joint concrete and the steel pipe section, the size of the prestressed tension force, and the position of the prestressed tendons on the mechanical properties of U-BIT joints. [Result & Conclusion] The joint separation, prestressed tendon yielding, lock contact and lock failure are important performance points in joint failure; increasing the bonding strength of the joint can increase its separation bending moment, reduce the joint separation safety factor, lowering its safety reserve to some extent. Increasing the pretension of the prestressed tendon can effectively improve the joint separation bending moment, but cannot increase the yield bending moment and ultimate bending moment of the joint, and the ductility coefficient of the structure in limit state is relatively low. Adjusting the position of the prestressed tendon to make it closer to the joint tensile side can effectively increase joint separation bending moment.

Key words underground structure; BIT; joint; mechanical property

1 研究背景及目的

近年来,管幕法发展迅速,逐渐衍生出管幕-箱涵法、以环梁为连接方式的 NTR(新管幕结构)工法、以翼缘板螺栓连接为连接方式的 STS(新型管幕支护体系)工法、以无黏结预应力为连接方式的 PCR(预应力管幕结构)工法、开发新型 JES(节段式组合结构)接头的 JES 工法^[1-2],以及在此基础上衍生出的 U-BIT(束合管幕结构)工法。

束合管幕工法利用横向无黏结预应力筋,将全周矩形管节联结成一个整体,其基本思想是将采用横向预应力的矩形管节作为支护结构,管节通过锁

* 国家自然科学基金资助项目(52478409)

扣定位,内部填充混凝土连接管幕,并张拉横向预应力筋形成整体后进行暗挖施工。束合管幕结构示意图如图1所示。

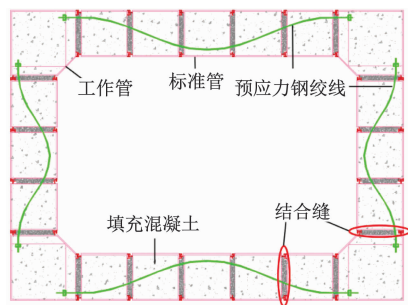


图1 束合管幕结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of U-BIT

基于管幕法的施工方式及结构特点,国内外针对管幕法的研究主要集中在两个方面:①管幕法施工过程中的环境影响、地面沉降和开挖面稳定性^[3];②管幕结构刚度、受力性能及破坏模式等^[4]。目前,束合结构作为一种新型结构,其施工工艺及结构性能研究尚处于初期阶段,为研究束合管幕结构的承载能力及变形规律,已对其进行了系列节点试验及足尺试验^[5-7]。根据已有文献的相关试验结果可知,当束合管幕结构受到破坏时,钢管节及其内部填充混凝土几乎不产生变形,也不会出现脱开现象,结构破坏仅发生在结合缝处。因此,束合管幕结合缝的受力性能将决定整体结构的受力性能,是整个束合管幕结构研究中的关键点。

为进一步探究束合结构结合缝的力学性能及拓展该结构的适用性,本文针对束合结构结合缝建立有限元数值模型,并结合结构试验加以验证,以期能够较为准确地反映出结构的受力机理。本文研究可为形成适合束合管幕结构的数值模拟计算方法提供技术支撑。

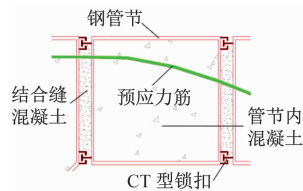
2 计算模型

2.1 结合缝设计

整个结合缝由钢管节、缝内混凝土、CT型锁扣及预应力筋等主要部件组成。结合缝结构示意图如图2所示。

2.2 结合缝数值模型

本文采用有限元数值计算软件 ANSYS 16.0 对结合缝进行数值计算,结合缝的模拟采用梁-刚性板-弹簧有限元模型,如图3所示。



a) 设计图



b) 实体图

图2 结合缝结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of joint structure

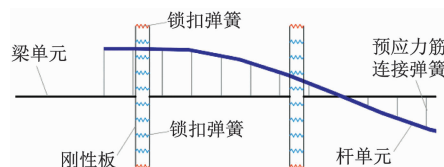


图3 梁-刚性板-弹簧有限元模型

Fig. 3 Finite element model of beam-rigid plate-spring

2.3 结合缝黏结模拟

2.3.1 结合缝变形

当结合缝张开或闭合时,即对应管片节点 k 发生位移(管片节点发生的位移包括结合缝张开或闭合时的转动角度 θ ,以及 x 、 y 方向的平动位移向量 u_x 和 u_y)后,在多点约束单元连接作用下,管片节点 i 产生位移联动。

节点 k 的矢量位移 u_k 可以表示为:

$$u_k = u_{kx}u_{0,x} + u_{ky}u_{0,y} + \theta u_{0rot,z} \quad (1)$$

节点 i 的矢量位移 u_i 可以表示为:

$$u_i = (H \sin \theta + u_{ix})u_{0,x} + (H \cos \theta + u_{iy})u_{0,y} + \theta u_{0rot,z} \quad (2)$$

式中:

$u_{0,x}$ 、 $u_{0,y}$ —— x 、 y 方向的单位平动位移向量;

$u_{0rot,z}$ —— z 方向的单元转动位移向量;

u_{kx} 、 u_{ky} —— u_k 在 x 、 y 方向上的平动位移分量;

u_{ix} 、 u_{iy} —— u_i 在 x 、 y 方向上的平动位移分量;

H ——节点 i 与节点 k 的竖向距离。

结合缝节点位移关系图如图4所示。

2.3.2 黏结受力弹簧单元

黏结弹簧单元分为受拉与受压两类单元,受拉单元模拟结合缝受拉脱开后退出工作的情况,受压单元模拟结合缝处混凝土压碎后仍然保持一定承载力的情况。

受压弹簧采用理想弹塑性本构模型,当受压弹簧单元对应区域的混凝土在达到极限压力之前,受压弹簧的应力与应变呈线性关系。当受压弹簧对应面积的混凝土受力超过极限压力后,该受压弹簧

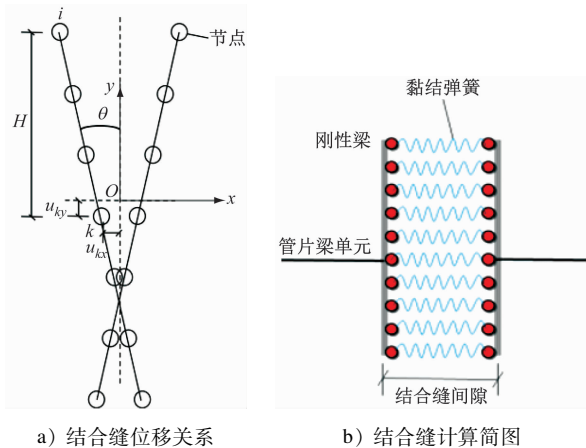


图4 结合缝节点位移关系图

Fig. 4 Displacement relationship diagram of joint nodes

受力进入平台段。

当受拉弹簧单元对应区域的混凝土受压时,弹簧不受力;当受拉弹簧单元对应区域的混凝土受拉且不超过极限拉力时,受拉弹簧的应力与应变呈线性关系;当受拉弹簧单元对应区域的混凝土受拉超过极限拉力时,该受拉弹簧不再继续承担外荷载。

2.3.3 结合缝锁扣模拟

当锁扣单元的两个节点发生的闭合位移 δ 小于 δ_0 (δ_0 为锁扣之间的间隙) 时,锁扣不承担拉压荷载,待间隙闭合后,锁扣受拉单元开始正常受力。当锁扣单元所受拉力超过极限承载力时,锁扣弹簧单元失效;当锁扣受压单元所受压力超过极限承载力时,该单元受力进入平台段。

锁扣受拉刚度 K 可以表示为:

$$K = \begin{cases} 0, & \delta \leq \delta_0 \\ \frac{F}{(\delta_u - \delta_0)}, & \delta_0 < \delta < \delta_u \\ -\infty, & \delta \geq \delta_u \end{cases} \quad (3)$$

式中:

F, δ_u ——锁扣临界破坏时的极限承载力及变形值,其值可由试验获得。

2.3.4 预应力模拟

预应力筋模型采用具有 3 个自由度的两节点杆单元 link180。该单元可承受轴向拉压力作用,但不能承受弯矩作用,具有塑性、应力强化及大变形等特性。结合该结构特性,采用理想弹塑性本构模型模拟预应力筋的受力状态。将混凝土节点与预应力筋节点进行耦合,两者的端部自由度保持一致,并能够产生共同变形。

3 模型验证

将上述模型代入 ANSYS 有限元软件中进行计算,并将计算结果与文献[6-7]中的试验结果进行对比。下文主要对负弯矩压弯试验和正弯矩压弯试验中的结合缝张开情况进行分析。上述试验所采用的试件均为由 3 个矩形断面钢管节组成的束合管幕结构,试件长为 3.2 m、宽为 1.5 m、高为 1.0 m,管节间隙为 100 mm,沿宽度方向每 500 mm 设置一组预应力束,预应力束的张拉应力为 1 046.25 MPa。

3.1 负弯矩压弯试验

根据负弯矩压弯试验条件建立数值模型,负弯矩压弯试验加载工况为:在保持每个水平千斤顶力为 795 kN 的前提下,竖向千斤顶的顶力逐级加载,每级增量 10 kN 直至破坏。负弯矩工况下,数值模型张开量计算结果验证,如图 5 所示。由图 5 可知:负弯矩工况下,结合缝张开量计算曲线能够较好地反映试验曲线的发展与刚度特征。

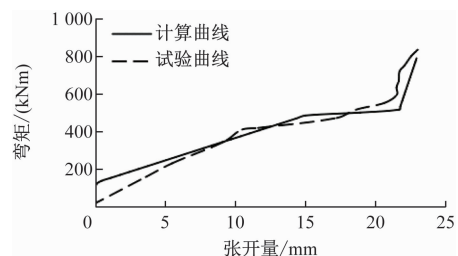


图5 负弯矩工况下数值模型张开量计算结果验证

Fig. 5 Verification of numerical model opening value calculation result under negative bending moment condition

3.2 正弯矩压弯试验

根据正弯矩压弯试验条件建立数值模型,正弯矩压弯试验加载工况为:在保持每个水平千斤顶力为 660 kN 的前提下,竖向千斤顶的顶力逐级加载,每级增量 15 kN 直至破坏。正弯矩工况下,数值模型张开量计算结果验证,如图 6 所示。由图 6 可知:正弯矩工况下,结合缝张开量计算曲线能够较好地反映试验曲线的发展与刚度特征。

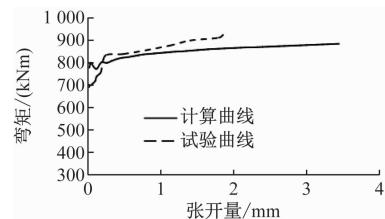


图6 正弯矩工况下数值模型张开量计算结果验证

Fig. 6 Verification of numerical model opening value calculation result under positive bending moment condition

4 结合缝受力全过程机理

4.1 负弯矩压弯工况

当结合缝内的混凝土与钢管节未出现脱开情况时,束合管幕结构处于弹性阶段。当结合缝受力达到脱开弯矩 M_t 并出现脱开后,束合管幕结构进入非线性阶段,束合管幕结构刚度有所降低,结合缝脱开高度随着荷载的增大而逐步增大,受压区高度逐步降低,同时预应力筋开始参与受力。当荷载达到一定程度后,结合缝上预应力筋出现屈服现象,此时的荷载为屈服弯矩 M_q 。由于束合管幕结构在结合缝处有预制的 CT 型锁扣,当结合缝在荷载作用下张开至 CT 型锁扣预设间隙后,锁扣接触开始受力,结合缝张开受限,束合管幕结构刚度逐渐提升。此时,束合管幕结构挠度与结合缝张开量较大,张开量接近截面高度的 2%。当荷载继续增大时,CT 型锁扣被拉开,束合管幕结构无法承受外荷载,结构受到破坏,达到极限弯矩 M_u 。

4.2 正弯矩压弯工况

当结合缝内混凝土与钢管节未出现脱开情况时,束合管幕结构同样处于弹性阶段。正弯矩工况下,预应力筋位于初始受压区,当结合缝受力达到脱开弯矩 M_t 并出现脱开后,受压区高度降低的幅度更大,直至预应力筋所在位置变为受拉区,预应力筋参与受力。由于预应力筋过于靠近受压区一侧,无法有效抑制束合管幕结构张开,因此在脱开一侧锁扣接触乃至拉坏过程中,预应力筋应变增量均较小,远未达到屈服点。而锁扣结构受到破坏后,束合管幕结构变形过大,可认定为结构破坏,不再具备承载能力。

对比正、负弯矩压弯工况下的结合缝张开量与弯矩之间的关系可知:①在正弯矩作用下,预应力筋不能充分发挥承载作用;当结合缝脱开后,在较小荷载增量情况下,张开量会迅速增大,直至锁扣接触。②极限状态下,锁扣和预应力筋共同承载结构内力,而正弯矩工况下的预应力筋受力较小,其所对应的极限弯矩 M_u 也较小。

5 参数分析

以负弯矩压弯试验对应数值模型为基础,对几类关键参数进行影响分析,包括结合缝混凝土与钢管节的黏结强度、预应力张拉力大小和预应力筋

位置。

为便于更好地说明束合管幕结构的受力性能,设结合缝刚脱开时的张开量为 w_{tm} ,结合缝脱开高度达到极限状态(结合缝受拉全由预应力筋承担)时的张开量为 w_{sm} ,结构预应力筋屈服时的张开量为 w_{qum} 。定义 w_{sm}/w_{tm} 为结构脱开状态应力重分布系数, M_q/M_t 为结合缝脱开安全系数,极限承载力状态下的张开量为 w_{um} ,定义 w_{um}/w_{qum} 为结构极限状态延性。

5.1 黏结强度

不同黏结强度下,结合缝及预应力筋的受力性能如图 7 所示。

黏结强度每提升 1 MPa,结合缝脱开弯矩平均提升 273 kNm。结合缝脱开时,随着黏结强度的增大,预应力筋内力增量、挠度增量、结合缝张开增量和转角增量也随之增大,且增幅也越来越大。当预应力筋的长度相对初始状态发生进一步伸长后,各结构受力性能均不受黏结强度的影响。黏结强度对预应力筋最终轴力与结构极限承载力没有明显的影响效果。

分析上述试验结果可知,随着黏结强度的增大,结构脱开时,弯矩增大,但结合缝脱开状态应力重分布系数越小,脱开安全系数也越小,结构脱开时的结构刚度变化更大。在结合缝未脱开阶段,结合缝中的混凝土与钢管节之间的界面黏结力承担主要受力,较大的黏结强度导致结合缝脱开时内力重分布效应有所增强,使得预应力筋伸长增量也有所增加,导致束合管幕结构位移和变形更大。随着外荷载的增加,结构挠度增大,预应力筋开始承受拉力,束合管幕结构受力性能转由预应力筋和锁扣的承载力控制,此时黏结强度不再影响挠度,也不影响极限状态下的延性。

5.2 预应力张拉力

不同预应力筋张拉力下,结合缝及预应力筋的受力性能如图 8 所示。

随着预应力筋张拉力的增大,结合缝脱开弯矩逐渐增大,结合缝张开增量与转角增量逐渐降低,同时预应力筋的预应力增量也随之降低。当预应力筋屈服时,随着预应力筋预加力的增大,结构挠度与结合缝张开量均随之减小,但所对应的屈服弯矩在预应力筋张拉力超过 600 kN 后开始逐渐增大。束合管幕结构在受弯达到极限状态时,预应力筋最

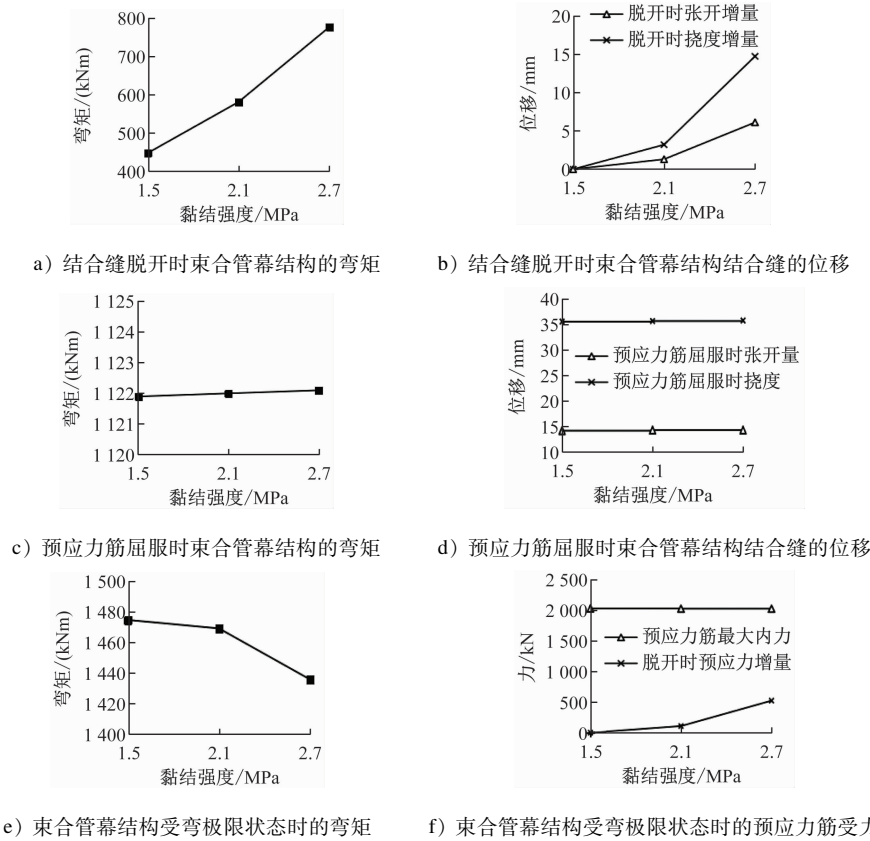


图7 不同黏结强度下结合缝及预应力筋的受力性能

Fig. 7 Mechanical properties of joints and prestressed tendons at different bonding strengths

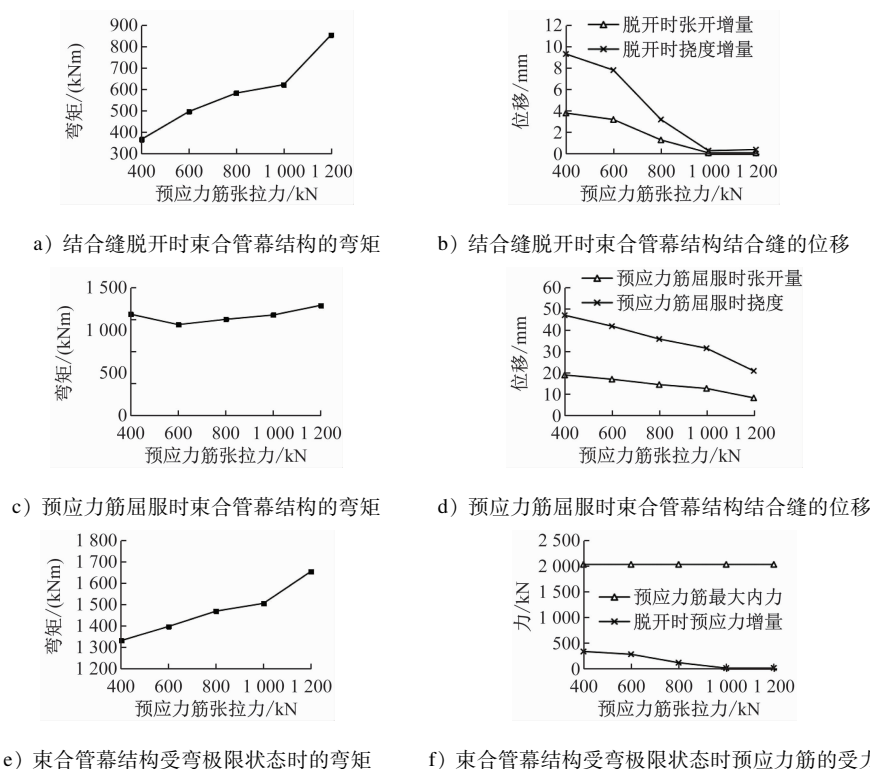


图8 不同预应力筋张拉力下结合缝及预应力筋的受力性能

Fig. 8 Mechanical properties of joints and prestressed tendons under different prestressed tendon tension

大内力不受预应力筋张拉力的影响,结构极限弯矩随预应力的增大而增大,不同预应力筋张拉力不影响此时的结构挠度和张开量。

分析上述试验结果可知,预应力筋张拉力主要影响束合管幕结构的脱开荷载,对结构极限承载力没有明显的影响效果。预应力筋张拉力并不影响结合缝临界脱开时的张开量与转角,但预应力筋张拉力对结合缝脱开后的张开增量、转角增量,以及预应力筋达到屈服状态时的张开量及转角值影响显著。

随着预应力筋张拉力的增大,束合管幕结构脱开状态应力重分布系数增大,结构脱开状态受力性能逐渐提升,但结合缝脱开安全系数有所降低,表明预应力筋的安全储备较低。另一方面,随着预应力筋张拉力的增大,预应力筋屈服时的位移降幅最大可达44%,但极限状态的结构位移差异仅在1%以内,结构极限状态延性系数较大,束合管幕结构在极限状态下的延性更好,即极限状态下的受力变形性能有所提升。

5.3 预应力位置

设预应力筋张拉力为800 kN、预应力筋线型为

折线型,不同预应力筋与截面顶部距离(120 mm、200 mm、280 mm、360 mm)下,结合缝及预应力筋的受力性能如图9所示。

随着预应力筋与截面顶部距离的增大,束合管幕结构脱开弯矩逐渐降低,但结合缝脱开时的结构挠度增量与结合缝张开增量出现先降低后增加的趋势。在预应力筋屈服阶段,束合管幕结构所对应的屈服弯矩随着预应力筋与截面顶部距离的增大而线性降低,屈服阶段的挠度和结合缝张开量也有相同的变化趋势。

在束合管幕结构的受弯极限状态,预应力筋能达到的最大内力与其距截面顶部距离无关。而极限弯矩基本随着预应力筋与截面顶部距离的增大而逐渐降低,且预应力筋越远离截面顶部,极限弯矩的降幅也越大。在此工况下,结构挠度和结合缝张开量变化受预应力筋位置偏移的影响较小。

分析上述试验结果可知,预应力筋越靠近结合缝受拉位置,其发挥的承载作用越明显,能够有效提升结合缝的脱开弯矩、屈服弯矩及极限弯矩。

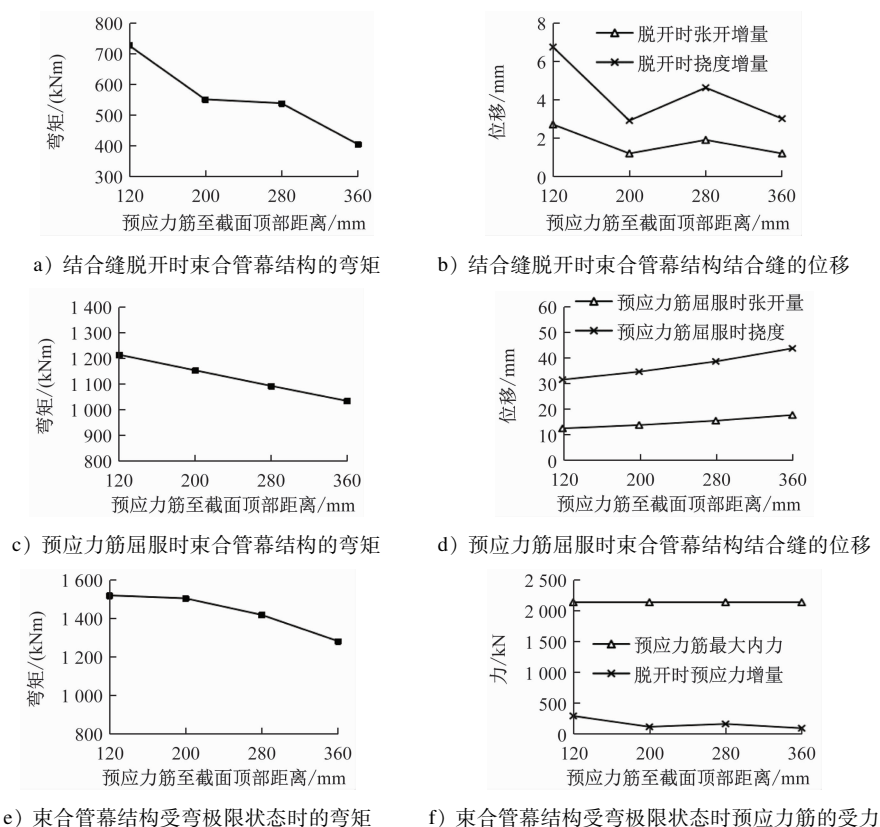


图9 不同预应力筋与截面顶部距离下结合缝及预应力筋的受力性能

Fig. 9 Mechanical properties of joints and prestressed tendons at different distances between prestressed tendons and section top

6 结语

1) 束合管幕结构结合缝的全过程受力机理为:结合缝脱开前,结构整体性好,结合缝刚度大;结合缝脱开后,结合缝刚度迅速降低,且随着外荷载的不断增大,依次出现预应力筋屈服、锁扣接触并失效等现象。

2) 结合缝黏结强度的增大能够增加结合缝脱开弯矩,降低结合缝脱开安全系数,使预应力筋的安全储备更小。

3) 预应力筋能通过其预加荷载及受拉作用影响结合缝的受力性能。提高预应力筋的预应力值能够有效提高脱开弯矩,降低脱开状态应力重分布系数,但无法提高结合缝的屈服弯矩和极限弯矩,且结构极限状态延性系数较低。

4) 调整预应力筋位置,使之更加靠近结合缝受拉侧,能够有效提高结合缝脱开弯矩。

本文通过建立束合管幕结构结合缝数值模型,与结构试验结果进行匹配,验证所提数值模型的准确性。此外,本文还分析了束合管幕结构结合缝的全过程受力机理,以及结合缝混凝土与钢管节的黏结强度、预应力张拉力大小、预应力筋位置等因素,对束合管幕结构力学性能的影响。

参考文献

- [1] 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.
GUAN Yongping, ZHAO Wen, WANG Lianguang, et al. Study on parameter optimization and the flexural behavior of steel tube slab structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 83.
- [2] 熊学玉,高心宇,王寿生,等. 预应力管幕工艺及设计方法初探[J]. 建筑结构, 2018, 48(8): 91.
XIONG Xueyu, GAO Xinyu, WANG Shousheng, et al. Study on

technology and design method of prestressed concrete roof[J]. Building Structure, 2018, 48(8): 91.

- [3] HISATAKE M, OHNO S. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 120.
- [4] 孙钧,虞兴福,孙旻,等. 超大型“管幕-箱涵”顶进施工土体变形的分析与预测[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1021.
SUN Jun, YU Xingfu, SUN Min, et al. Analysis and prediction on soft ground deformation of a super-large shallow buried “pipe-roofing and box-culvert” jacking project under construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1021.
- [5] 毕湘利,张中杰,刘书,等. 饱和软土地区束合管幕结构受力性能足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 953.
BI Xiangli, ZHANG Zhongjie, LIU Shu, et al. Full-scale experimental study on mechanical behaviors of bundled integrate structure in saturated soft soil area[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(6): 953.
- [6] 毕湘利,王秀志,张中杰,等. 束合管幕结构结合缝压弯性能足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1342.
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on joint bending performance of bundled integrate structure[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1342.
- [7] 毕湘利,王秀志,张中杰,等. 束合管幕结构结合缝受剪性能足尺试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 245.
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on shear performance of joints of bundled integrate structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 245.

· 收稿日期:2023-01-18 修回日期:2023-10-23 出版日期:2025-05-10
Received:2023-01-18 Revised:2023-10-23 Published:2025-05-10
· 第一作者:吉茂杰,正高级工程师,jimaojie@shmetro.com
通信作者:柳献,教授,xian.liu@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 97 页)

- WU Yongzhe, JIN Yijie, ZHANG Zhiyu, et al. Numerical simulation and deformation control of shield tunneling through soft soil layer pre-reinforcement[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(1): 22.
- [8] 刘洪亮,章邦超,郭佳,等. 土压盾构穿越上软下硬地层洞内超前注浆加固技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 240.
LIU Hongliang, ZHANG Bangchao, GUO Jia, et al. Advance grouting reinforcement technology for earth pressure shield tunnel-

ling through upper-soft-lower-hard strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 240.

· 收稿日期:2024-04-17 修回日期:2024-05-15 出版日期:2025-05-10
Received:2024-04-17 Revised:2024-05-15 Published:2025-05-10
· 通信作者:苟长飞,高级工程师,530777879@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license