

地下咬合型管幕构件抗弯刚度参数分析

赵文¹, 李伟伟², 金文强¹, 刘玉平¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东广州 510010)

摘 要: 基于咬合型管幕构件的抗弯性能试验, 运用 ABAQUS 建立了咬合型管幕构件的有限元模型, 并通过室内试验标定有限元模型. 研究了在不同参数组合下咬合型管幕构件的抗弯刚度变化规律, 并以此来找到最优的结构参数组合. 研究表明, 钢管直径与咬合程度在提升构件抗弯刚度上具有一定的相互作用影响, 当钢管咬合程度与钢管直径比值在 0.16~0.28 时, 构件具有较好的抗弯性能; 钢管直径、钢管壁厚及钢筋直径与构件抗弯刚度均呈线性正相关; 钢管直径对提升咬合型管幕构件的抗弯刚度具有显著作用, 其次是钢筋直径和钢管壁厚.

关 键 词: 地下工程; 咬合型管幕构件; 抗弯刚度; 参数分析; ABAQUS

中图分类号: TU 93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)07-1014-06

Parameter Analysis of Flexural Stiffness of Underground Secant Pipe Roof Structure

ZHAO Wen¹, LI Wei-wei², JIN Wen-qiang¹, LIU Yu-ping¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China. Corresponding author: JIN Wen-qiang, E-mail: jinwqneu@163.com)

Abstract: Based on the flexural behavior tests of secant pipe roof structure (SPRS), finite element models (FEMs) of the SPRS were established using ABAQUS and calibrated based on the laboratory tests. The influences of different parameters on flexural stiffness of SPRS were investigated, and the optimal parameters were given. The results showed that the overlapping distance between the adjacent tubes and the tube diameter interacts with each other in terms of the flexural stiffness. When the ratio of the overlapping distance to the tube diameter is between 0.16 and 0.28, the specimens have better bending resistance. The tube diameter, the tube thickness and the bar diameter have a linear correlation with the flexural stiffness. The tube diameter has a significant impact on the flexural stiffness of SPRS, followed by the diameter of the reinforcement and the tube thickness.

Key words: underground engineering; secant pipe roof structure (SPRS); flexural stiffness; parameter analysis; ABAQUS

管幕法是利用微型顶管技术在拟建的地下建筑物四周顶入钢管, 通过架设内部支撑、设置钢管间连接或改变相邻钢管间构造的方式, 形成的具有较强抗弯性能的地下工程支护结构. 管幕法最早出现在 1971 年日本 Kawase-Inae 穿越铁路的通道工程中^[1], 随后在比利时^[2]、新加坡^[3] 及美国^[4] 等国家多次得到应用. 中国在 1984 年首次应用管幕法修建了地下通道, 近年来管幕法得到了

快速的发展, 在管幕结构形式与施工方法上均得到了改进, 已被广泛应用于地铁车站与地下通道等暗挖地下工程中^[5]. Goto 等^[6] 通过现场试验及理论分析研究了在恒载与列车动载作用下管幕结构的应变、位移及管幕锁口的力学特性. Tan 等^[7] 研究了管幕形状和钢管直径对地表沉降的影响, 发现管幕作为超前支护结构可使隧道开挖时地表沉降减少 40%~50%. Hisatake 等^[8] 通过离心模型

试验研究了管幕结构不同开挖方式对地表沉降的影响,结果表明分步开挖较全断面开挖可明显减少地面沉降. 贾鹏蛟等^[9]对新管幕结构的纵向和横向受力模式进行研究,阐述了管幕结构的作用机理,并对管幕结构的抗弯承载力和抗剪承载力计算理论进行讨论,给出了相应的计算公式. Xie 等^[10]研究了管幕支护作用下矩形大断面开挖面的稳定性,揭示了矩形开挖面稳定及环境影响机制,并提出一种考虑管幕顶部土压力变化的稳定性分析模型. Jia 等^[11]通过室内试验和数值模拟得到了 STS 管幕结构的破坏机制和抗弯性能,并给出了抗弯承载力简化公式. 综上所述,当前存在的管幕结构主要包括两类:一类是管间无连接,整体管幕的抗弯承载力和抗弯刚度较弱,开挖管幕下方土体时需要架设临时支撑;另一类是管间增加连接的新型管幕结构,此种形式虽然增加了整体管幕的承载能力和抗变形能力,但管间复杂的连接形式增加了施工难度和施工工期.

在此情况下,本文提出一种新型的管幕支护体系:咬合型管幕结构. 它既能满足施工所需要的承载力和抗弯刚度,管间连接又相对较为简单,是一种适用于修建暗挖地下隧道的新型地下支护体系. 考虑到不同管幕结构参数对其抗弯刚度的影响规律尚不明确,而在地下管幕设计及使用中,抗弯刚度是主要控制的结构参数之一,抗弯刚度过低则会使管幕结构在上覆土压力的作用下发生大变形,进而导致地表沉降,甚至发生塌陷.

鉴于此,本文结合室内试验,利用 ABAQUS 建立有限元模型,分析咬合程度、钢管直径、钢管壁厚及钢筋直径等结构参数对咬合型管幕构件抗弯刚度的影响,并以此来找到最优的结构参数组合,为其推广应用提供参考.

1 咬合型管幕简介

咬合型管幕结构^[12]由若干拼装钢管、混凝土及钢筋组成,其中,拼装钢管分为钢弧和可回收部分,由于其独特的设计,相邻钢管间的横向连接方式为钢弧间咬合形式搭接. 可回收部分开口处的两个侧壁上设有限位螺栓与滚珠,用以防止在顶进过程中圆弧与其发生相对的错动,减少钢板与其在相对运动时产生的摩擦力. 咬合型管幕的实施方式为:首先确定拼装钢管的尺寸以及需求数量,开挖竖井,搭建施工平台;在设计位置处顶进第一根上述拼装钢管,并在顶进过程中掏除钢管

内部土体;当上一根拼装钢管顶进完成后,松开可回收部分上的限位螺栓,开始顶进下一根钢管,由于该钢管的钢弧与上一根拼接钢管的可回收部分在位置上部分重叠相切,在顶进的过程中下一根钢管的钢弧将顶出并取代上一根钢管的可回收部分,进而实现与上一根钢管的咬合搭接;将相邻钢管间咬合部位焊接起来,如此循环,直至全部钢管顶进完成;在钢管内壁开孔,植入横向钢筋,最后灌注混凝土;当混凝土达到设计强度后,开挖结构下方土体. 咬合型管幕结构示意图见图 1.

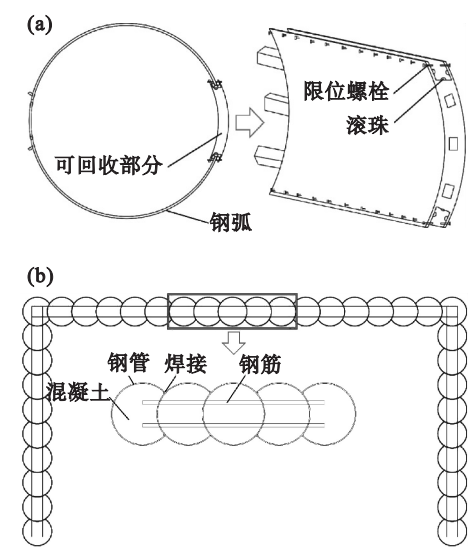


图 1 咬合型管幕结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of secant pipe roof structure
(a)—拼装钢管构造图;(b)—施工断面图.

2 有限元模型建立及验证

2.1 有限元模型建立

采用 ABAQUS 有限元分析软件建立模型,钢管、混凝土和钢垫块采用 8 节点减缩积分格式的实体单元(C3D8R);螺栓采用 2 节点线性积分格式的三维桁架单元(T3D2). 钢管本构模型采用文献^[13]提出的二次塑流模型,混凝土采用文献^[13]提出的混凝土塑性损伤模型. 钢筋采用理想弹塑性模型. 混凝土与钢管之间的相互作用由正应力和切应力构成,正应力通过接触来模拟;切应力通过设置罚函数来模拟,本模型中罚因子取 0.25. 模型的边界条件与加载方式同试验一致. 模型整体情况见图 2.

2.2 模型验证

李伟伟^[14]通过对 6 根咬合型管幕试件进行单点集中加载试验,分析了钢管咬合程度、钢筋配

置情况及上侧焊接情况等因素对试件的破坏模式、承载力和延性的影响. 标准试件的尺寸如图 3 所示, 所用钢管直径 (D) 为 219 mm, 壁厚 (t) 为 6 mm; 相邻钢管咬合距离 (s) 为 60 mm; 钢筋直径 (d) 为 12 mm; 钢管内部浇筑 C30 混凝土; 试件轴向长度为 300 mm; 试件计算长度 (L) 为 636 mm. 试验结果表明, 咬合型管幕各部件协同受力情况良好, 在加载前期, 试件跨中位移增长缓慢, 展现出较好的抗弯性能; 在加载后期, 试件跨中钢管屈服后试件的承载力仍缓慢增长, 最终发生延性破坏.

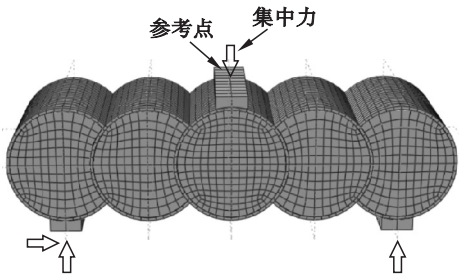


图 2 模型整体示意图
Fig. 2 Numerical model

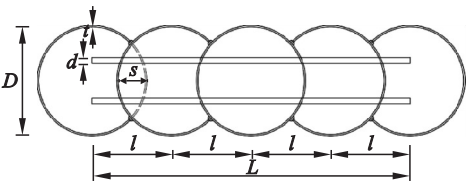


图 3 试件几何尺寸
Fig. 3 Geometric sizes of the specimen

由于咬合型管幕构件的延性较好, 本文将试件的极限荷载定义为当位移达到试件计算长度 $L/25$ 时对应的荷载, 并根据材料力学中单点集中荷载作用下简支梁跨中位移与抗弯刚度的关系, 参考文献[13], 将极限荷载 40% 时所对应的荷载和跨中位移计算的割线刚度作为试件的等效抗弯刚度. 标准试件的荷载与变形关系曲线有限元计算结果和试验结果的对比情况见图 4. 通过曲线

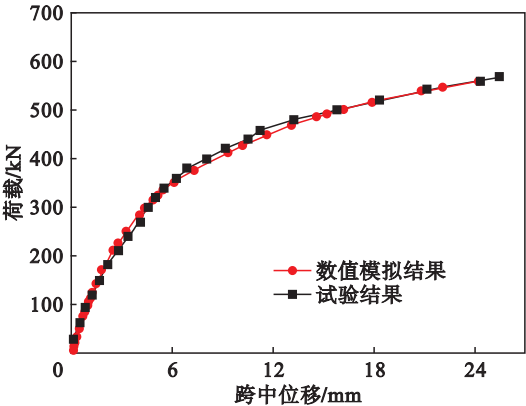


图 4 荷载与变形关系曲线计算结果和试验结果对比
Fig. 4 Comparison of load-deformation curves between analytical prediction and test results

可以计算得出, 试验与数值模拟获得的试件抗弯刚度分别为 455.2 与 485.5 $\text{kN}\cdot\text{m}^2$, 相差 6.7%, 在整个加载阶段, 数值模拟与试验所得的荷载与变形关系曲线基本一致, 吻合良好, 数值模拟能较好地反映咬合型管幕构件在加载过程中的变化情况, 可用于抗弯刚度分析.

3 不同组合参数抗弯刚度分析

3.1 参数分析

由于咬合型管幕构件是由钢管、混凝土及钢筋组成的复合结构, 在荷载作用下, 不同结构部件之间具有一定的相互作用关系, 同时钢管直径的增加会显著增加构件的截面惯性矩, 进而提高构件的抗弯刚度. 因此, 为了研究不同结构参数对咬合型管幕构件刚度的影响, 选取钢管直径为主要影响因素, 将其与其他结构参数组合, 采用正交模拟, 研究在不同参数组合下咬合型管幕构件的抗弯刚度变化规律, 并以此来找到最优的结构参数组合, 为咬合型管幕的实际应用提供理论依据.

3.1.1 钢管直径与咬合程度

为了研究钢管直径与咬合程度对试件抗弯刚度的影响规律, 针对钢管直径 (D) 分别为 219, 244, 269, 294, 319 mm 和咬合距离 (s) 分别为 40, 50, 60, 70, 80, 90 mm 的试件展开正交模拟. 各试件的抗弯刚度计算结果见表 1.

表 1 不同钢管直径与咬合程度条件下试件抗弯刚度计算结果

Table 1 Calculated results of the bending stiffness of specimens under different tube diameter and overlapping distance between adjacent tubes
 $\text{kN}\cdot\text{m}^2$

s/mm	D/mm				
	219	244	269	294	319
40	526.4	641.3	803.8	867.9	1 074.5
50	546.1	661.7	840.4	858.3	1 192.7
60	485.5	639.4	829.5	947.4	1 186.6
70	451.6	568.2	761.4	869.9	1 196.9
80	392.7	579.5	753.9	914	1 169.5
90	274.1	460.9	665.6	819.2	1 080.9

由表 1 可知, 随着钢管直径增加, 试件的抗弯刚度显著提升, 而咬合程度对试件抗弯刚度提升的影响相对较弱, 并且当钢管直径较小时, 试件的抗弯刚度随咬合程度的增加有降低趋势, 说明钢管直径与咬合程度在提升试件抗弯刚度上具有一定的相互作用影响.

为了获得优化的结构参数比值,进一步分析咬合程度与钢管直径比值对试件抗弯刚度的影响,咬合程度与钢管直径比值和抗弯刚度关系见图 5. 对图中曲线进行分析,可将抗弯刚度随咬合程度与钢管直径比值的变化分为 3 个阶段:

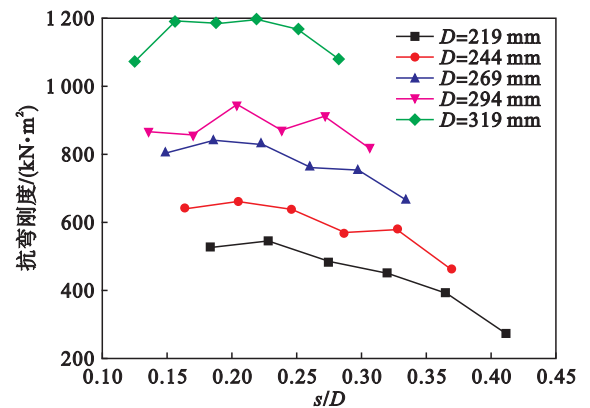


图 5 咬合程度与钢管直径比值和抗弯刚度关系
Fig. 5 Relationship between the ratio of overlapping distance to tube diameter and the bending stiffness

1) 当钢管咬合程度与钢管直径比值小于 0.16 时,试件的咬合程度过小,咬合处截面高度明显小于跨中截面,因而当试件破坏时,试件的最不利截面位于钢管咬合处. 在此阶段内,提高咬合程度,可以增加咬合处截面的高度,进而明显增加试件的抗弯刚度,并且抗弯刚度的增长率在 10% 以上,说明在此阶段内试件的抗弯刚度主要受到咬合程度的影响.

2) 当钢管咬合程度与钢管直径比值继续增加至 0.16 ~ 0.28 时,试件达到极限状态时的最不利截面开始向跨中截面发展. 在此阶段内,试件的抗弯刚度变化呈上下波动的形式,总体变化的百分比都在 10% 以内. 产生这种现象的原因可能是随着咬合程度增加,试件最不利截面开始向跨中发展,咬合程度对试件抗弯刚度的影响逐渐减弱;同时,咬合程度的变化,一方面影响了钢管对混凝土的约束作用,另一方面改变了计算截面尺寸,进而对刚度产生一定影响. 在综合作用下,试件的抗弯刚度发生波动变化.

3) 随着咬合程度与钢管直径比值增加至 0.28 ~ 0.41 时,试件的最不利截面稳定在跨中截面. 在这个阶段内,试件的抗弯刚度有减小趋势,变化的百分比平均在 15% 以上. 分析原因可能是随着咬合程度的进一步增加,试件的破坏模式发生了转变,导致试件的抗弯刚度有减小的趋势.

不同钢管直径下咬合程度与试件抗弯刚度的

关系曲线见图 6. 由图可知,当钢管直径较小时,随着咬合程度的增加,试件的抗弯刚度先增加,后逐渐减小;当钢管直径较大时,试件的抗弯刚度上下波动,变化不大,这与上述分析得到的结果基本一致.

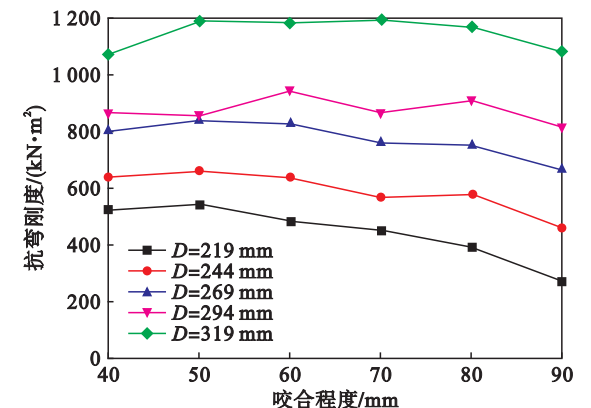


图 6 咬合程度与试件抗弯刚度关系
Fig. 6 Relationship between the overlapping distance and the bending stiffness

对不同咬合程度下钢管直径与试件抗弯刚度关系进行线性回归分析,得到拟合曲线,见图 7. 除了钢管直径为 244 mm 时的调整拟合优度为 0.90,其余均大于 0.94,具有显著的线性相关性. 随着钢管直径的增加,试件抗弯刚度呈线性增长,钢管直径每增加 1 mm,抗弯刚度提高 5.29 ~ 7.89 kN·m²,随着咬合程度的增加,提升率略有提高.

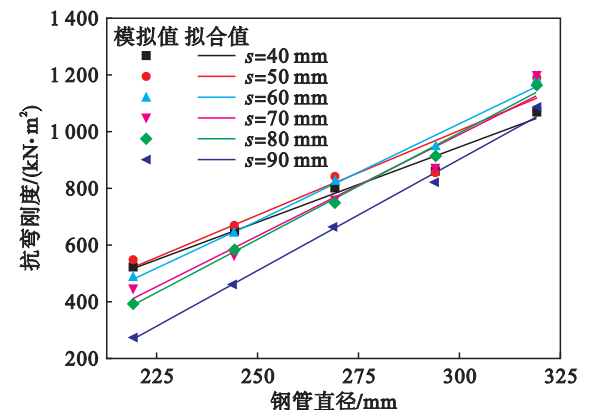


图 7 钢管直径与试件抗弯刚度关系
Fig. 7 Relationship between the tube diameter and the bending stiffness

3.1.2 钢管直径与钢管壁厚

为了研究钢管直径与钢管壁厚对试件抗弯刚度的影响规律,获得二者间最优的结构参数组合. 本文对钢管直径(D)分别为 219, 244, 269, 294, 319 mm 和钢管壁厚(t)分别为 4, 5, 6, 7, 8 mm 的试件展开正交模拟,经计算得到的试件抗弯刚度

见表 2.

表 2 不同钢管直径与钢管壁厚条件下试件抗弯刚度					
Table 2 Bending stiffness under different tube diameter and tube thickness $\text{kN}\cdot\text{m}^2$					
t/mm	D/mm				
	219	244	269	294	319
4	415.8	524.7	712.4	827.8	1 042.2
5	454.8	609.0	784.6	889.6	1 101.3
6	485.5	639.4	829.5	947.4	1 186.6
7	514.1	658.4	890.0	1 001.2	1 236.6
8	537.8	706.7	950.3	1 064.2	1 315.5

由表 2 可知,随着钢管直径与钢管壁厚的增加,试件的抗弯刚度逐渐稳定提升,并且钢管直径对试件抗弯刚度的影响大于钢管壁厚,二者间的相互影响不明显.

对不同钢管直径下钢管壁厚与试件抗弯刚度关系进行线性回归分析,见图 8. 除了钢管直径为 244 mm 时的调整拟合优度为 0.91,其余均为 0.99,具有显著的线性相关性. 由拟合曲线可知,随着钢管壁厚的增加,试件抗弯刚度呈线性增长,钢管壁厚每增加 1 mm,抗弯刚度提高 30.34 ~ 68.2 $\text{kN}\cdot\text{m}^2$. 同时,不同钢管直径下各组拟合曲线之间近似平行关系,随着钢管直径增加,拟合曲线的截距逐渐增大,这验证了在提升试件抗弯刚度上,钢管直径与钢管壁厚均独立发挥作用. 同时

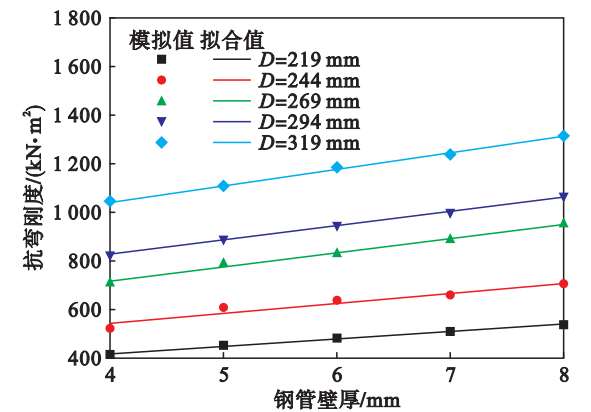


图 8 钢管壁厚与试件抗弯刚度关系曲线
Fig. 8 Relationship between the tube thickness and the bending stiffness

可以看出,随着钢管直径增加,试件抗弯刚度的提升率略有增加. 分析原因,从咬合型管幕构件各部件的作用机理上看,钢管在加载过程中起到主要承载作用,钢管的直径越大,试件达到同样挠度时,钢管自身承受的应力越大,导致钢管壁厚的影响程度有所增加.

3. 1. 3 钢管直径与钢筋直径

为了研究钢管直径与钢筋直径对试件抗弯刚度的影响规律,获得二者间最优的结构参数组合. 本文共设置了钢管直径(D)分别为 219, 244, 269, 294, 319 mm 和钢筋直径(d)分别为 8, 10, 12, 14, 16 mm 的试件展开正交模拟,经计算得到的试件抗弯刚度见表 3.

表 3 不同钢管直径与钢筋直径条件下试件抗弯刚度 计算结果统计					
Table 3 Calculated results of the bending stiffness under different tube diameter and bar diameter $\text{kN}\cdot\text{m}^2$					
d/mm	D/mm				
	219	244	269	294	319
8	425.8	527	672.3	741.4	875.3
10	455.9	580.7	755.5	858.2	1 033.7
12	485.5	639.4	829.5	947.4	1 186.6
14	511.8	655.5	907.9	989.4	1 278.7
16	530.3	680.3	941.7	1 024.9	1 313.3

由表 3 可知,随着钢管直径与钢筋直径的增加,试件的抗弯刚度逐渐稳定提升,并且钢管直径对试件抗弯刚度的影响大于钢筋直径,二者间的相互影响不明显.

对不同钢管直径下钢筋直径与试件抗弯刚度关系进行线性回归分析,见图 9. 各组数据的拟合优度均大于 0.91,具有显著的线性相关性. 随着钢筋直径的增加,试件抗弯刚度呈线性增长,钢筋

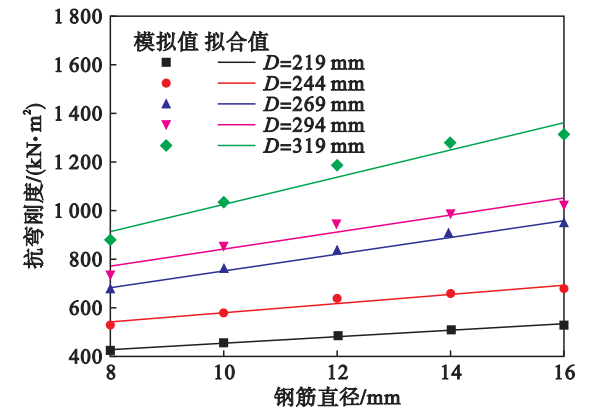


图 9 钢筋直径与试件抗弯刚度关系曲线
Fig. 9 Relationship between the bar diameter and the bending stiffness

直径每增加 1 mm,抗弯刚度提高 5.29 ~ 7.89 $\text{kN}\cdot\text{m}^2$. 除钢管直径 319 mm 的拟合曲线外,其余 4 组不同钢管直径下各拟合曲线之间近似平行关系. 这验证了在提升试件抗弯刚度上,钢管直径与钢筋直径均独立发挥作用. 而随着钢管直径

增加,试件抗弯刚度的提升率略有增长.分析原因是随着钢管直径增加,试件纵向截面面积显著增加,而钢筋截面面积相对越来越小,钢筋分担荷载的比例随之增加.

3.2 抗弯刚度影响因素分析

为了进一步分析各结构参数对咬合型管幕构件抗弯刚度的影响,并量化影响程度,运用 SPSS 数理统计分析软件对各结构参数与咬合型管幕构件抗弯刚度进行 Pearson 相关性与显著性分析,计算结果见表 4.

表 4 各结构参数与构件抗弯刚度的相关性分析
Table 4 Correlation analysis between structure parameters and bending stiffness

分析项目	咬合程度	钢管直径	钢筋直径	钢管壁厚
Pearson 相关性	-0.033	0.862 **	0.346 **	0.241 **
显著性	0.601	0.000	0.000	0.000

注:**表示显著性<0.001,表明相关性显著.

由表 4 可知,咬合程度与管幕构件抗弯刚度间线性相关系数为 $-0.033 < 0.3$,呈极弱相关,并且显著性为 $0.601 > 0.005$,表明相关性不显著.分析原因是,咬合程度对试件抗弯刚度的影响较为离散,导致分析的相关性与显著性低.钢管直径、钢筋直径及钢管壁厚与咬合型管幕构件抗弯刚度间线性相关系数分别为 0.862, 0.346, 0.241,分别显示为极强相关、弱相关、弱相关.显著性均为 $0 < 0.05$,表明相关性很显著.因此,在提升咬合型管幕构件的抗弯刚度上各部件的影响作用从大至小为:钢管直径 > 钢筋直径 > 钢管壁厚.

4 结 论

- 1) 随着钢管咬合程度与钢管直径比值增加,咬合型管幕构件抗弯刚度先增加,后减小.当钢管咬合程度与钢管直径比值在 0.16~0.28 时,试件抗弯性能较为优异.
- 2) 在参数选取范围内,钢管直径、钢管壁厚及钢筋直径与试件抗弯刚度均呈线性正相关.
- 3) 在提升咬合型管幕构件的抗弯刚度上各部件的影响作用从大至小为:钢管直径 > 钢筋直径 > 钢管壁厚.

参考文献:

[1] 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.

[2] Hemerijckx I E. Tubular trust jacking for underground roof construction on the Antwerp Metro [J]. *Tunnelling*, 1985 (5):13-15.

[3] Darling P. Jacking under Singapore's busiest street [J]. *Tunnels and Tunneling International*, 1993, 23 (sup): 19-20.

[4] Rhodes G W, Kauschinger J L. Microtunnelling provides structural support for large tunnels with shallow cover[C]//North American Tunneling. Rotterdam:Balkema A A,1996:443-449.

[5] Jia P J,Zhao W,Du X,et al. Study on ground settlement and structural deformation for large span subway station using a new pre-supporting system[J]. *Royal Sociaty Open Science*, 2019,6(2):181035.

[6] Goto Y, Yamashita A, Iida T. Load distribution by joint in pipe beam roof [J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1984, 17 (12):243-252.

[7] Tan W L, Ranjith P G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunneling[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Mechanics. Seattle:[s. n.],2003:345-352.

[8] Hisatake M, Ohno S. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements abovea tunnel face [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2008, 23(2):120-127.

[9] 贾鹏蛟,赵文,关永平,等.新管幕结构受力模式及关键技术分析[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(6):891-895.
(Jia Peng-jiao,Zhao Wen,Guan Yong-ping,et al. Analysis of mechanical pattern and key technique of steel tube slab structure[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2019,40(6):891-895.)

[10] Xie X Y, Zhao M R, Shahrou I. Face stability model for rectangular large excavations reinforced by pipe roofing[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 94: 103132.

[11] 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*,2019,6(2):181035.

[12] 赵文,董驾潮,李伟伟,等.一种拼接钢管及使用拼接钢管的拼装式管幕结构支护体系施工方法:CN109751065B[P].2019-10-29.
(Zhao Wen,Dong Jia-chao,Li Wei-wei,et al. An assembled pipe curtain structure support system for spliced steel pipes and construction method:CN109751065B[P]. 2019-10-29.)

[13] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 2 版. 北京:科学出版社,2007:66-260.
(Han Lin-hai. Concrete filled steel tubular structure—theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press,2007:66-260.)

[14] 李伟伟. 地下工程咬合型管幕结构的抗弯性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2020.
(Li Wei-wei. Study on flexural behavior of tube connect tube structure on subsurface engineering [D]. Shenyang: Northeastern University,2020.)