

文章编号:1673-9469(2026)03-0001-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.001

管幕预筑结构拱形构件受力性能研究

张艳青^{1,2}, 张凯², 米磊磊², 韩石^{2,3*}, 周昊², 巩晓斌²

(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. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 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: 为探究矢跨比对地下工程中管幕预筑结构受力性能的影响,以矢跨比为参数,设计并完成了2个管幕预筑结构构件的受力试验,通过荷载-挠度曲线、钢管幕及混凝土截面的应变对比分析,探究不同矢跨比试件的破坏过程及破坏形态,分析矢跨比对构件力学性能的影响。建立数值计算模型,进一步探究矢跨比、混凝土强度、配筋率对管幕预筑结构拱形构件承载力的影响规律。结果表明:管幕预筑结构拱形构件采用固定端部约束,在对称集中荷载作用下呈现压弯破坏形态;矢跨比参数的变化对管幕预筑结构构件的承载力有较大影响,当矢跨比从0.048增加至0.102时,构件的极限承载力及刚度变大;混凝土强度、配筋率对构件的极限承载力影响较小。

关键词: 管幕预筑结构;数值分析;矢跨比;拱形构件;承载力

中图分类号:TU93

文献标识码:A

Study on Mechanical Properties of Arch Members of Pipe-Roof Pre-construction Structures

ZHANG Yanqing^{1,2}, ZHANG Kai², MI Leilei², HAN Shi^{2,3*}, ZHOU Hao², GONG Xiaobin²

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. College of Architecture and Water Conservancy Engineering, Bingtuan Xingxin Vocational and Technical College, Tiemenguan, Xinjiang 841007, China)

Abstract: In order to explore the influence of rise-span ratio on the mechanical properties of Pipe-Roof Pre-construction (PRP) structures in underground engineering, mechanical tests on two PRP structure members were designed and completed with rise-span ratio as a parameter. Through the comparative analysis of load-deflection curves and strains of steel pipe curtain and concrete section, the failure process and failure mode of different rise-span ratio specimens were explored, and the influence of rise-span ratio on the mechanical properties of members was analyzed. A numerical calculation model was established to further explore the influence of rise-span ratio, concrete strength and reinforcement ratio on the bearing capacity of the PRP structure arch members. The results show that with fixed end constraints, the bending failure mode of the PRP structure arch members is presented under symmetrical concentrated load. The change of rise-span ratio has a great influence on the bearing capacity of the PRP structure arch members. When the rise-span ratio increases from 0.048 to 0.102, the ultimate bearing capacity and stiffness of the members become larger. The concrete strength and reinforcement ratio have little effect on the ultimate bearing capacity of the members.

Key words: pipe-roof pre-construction structures; numerical analysis; rise-span ratio; arch members; bearing capacity

收稿日期:2025-02-26 修回日期:2025-04-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52008271);国家级大学生创新创业训练计划项目(202410107031)

第一作者:张艳青(1983—),女,山东泰安人,博士,副教授,从事钢筋混凝土结构方面的研究。

*通信作者:韩石(1982—),男,吉林辽源人,博士,副教授,从事隧道、地下空间工程及BIM技术应用方面的研究。

管幕预筑(Pipe-Roof Pre-construction, PRP)法^[1-2]相较于传统施工方法具有独特的优势,通过PRP法所形成的结构即为PRP结构。PRP结构是一种将用于施工的支撑体系和最终的结构受力体系相结合的新型地下结构。施工时,将大直径钢管沿设计轮廓顺次顶进围岩,随后切割钢管,并在相邻钢管上焊接连接钢板,形成近层和远层钢管幕,两层钢管幕之间形成环向空腔。将支撑管焊接在连接钢板之间,在空腔内绑扎钢筋并浇筑混凝土,形成永久性结构。最后,对被该永久性结构包围的土体进行开挖,形成地下空间。

目前,贾鹏蛟等^[3-5]对管幕结构(Steel Tube Slab, STS)的弯曲性能进行了研究,分析了各参数对STS力学性能的影响。张艳青等^[6-8]完成了PRP结构构件的受弯、受剪试验,通过分析试验现象和试验数据,研究了PRP结构构件的破坏模式与受力机理,得出与PRP结构构件相关的承载力计算公式。从组成上看,PRP结构与双钢板混凝土结构相似,两者都属于变截面钢板混凝土结构,因此双钢板混凝土结构的研究成果对于PRP结构的研究具有重要的参考价值^[9-11]。Yan等^[12-13]探究了曲率对双钢板混凝土结构受剪承载力的影响,研究结果表明在合理曲率范围内,增加曲率可提高组合曲梁的受剪承载力。郑莲琼等^[14]研究了曲线形钢管混凝土构件的受弯性能,并给出了相关的极限抗

弯承载力和抗弯刚度计算公式。

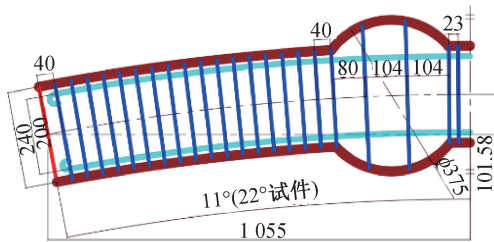
现有研究集中于对矩形、类矩形和马蹄形断面的力学性能分析,但断面形式从矩形变化为类矩形再到马蹄形时,其起拱度是不断变化的。PRP结构属于类矩形断面,目前考虑矢跨比对PRP结构受力性能影响规律的研究较少。鉴于此,本文以太原市迎泽大街实际工程为参照,完成了2个不同矢跨比PRP结构拱形构件的受力试验,对PRP结构构件各部分的破坏模式与受力机理进行研究分析,探究矢跨比对PRP结构构件受力破坏全过程的影响,为PRP结构的相关研究与优化提供了依据。

1 试验概况

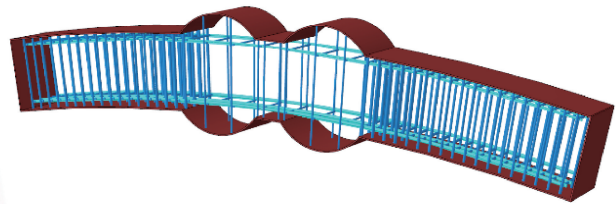
1.1 试件设计

为研究矢跨比对PRP结构构件受力性能的影响,本文设计并制作了2个试件,试件编号分别为XG-1和XG-2。参照太原市迎泽大街实际工程,试件起拱度分别设计为 22° 和 30° ,图1(a)与图2(a)所示为试件整体的一半,其起拱度分别为 11° 和 15° ,矢跨比分别为0.048和0.066。试件几何尺寸及内部钢筋构造形式如图1和图2所示。

试件计算跨径长2 110 mm,平截面宽度为240 mm,高度为200 mm,变截面部分最大截面高度为375 mm,试验钢管和钢板型号为Q235,上下厚度均为4 mm。试件采用强度为C30的商品混



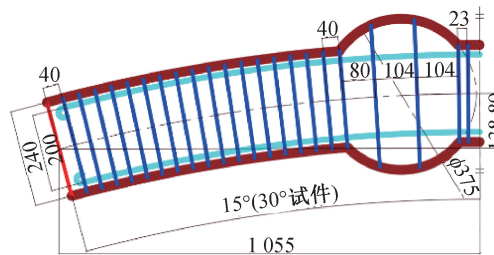
(a) 试件尺寸(单位: mm)



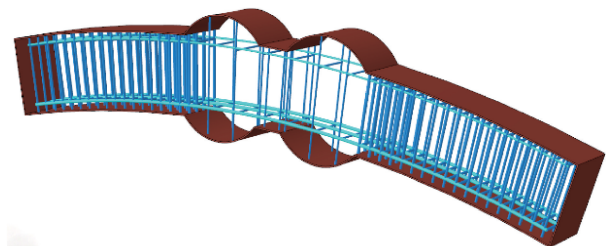
(b) 试件立体图

图1 试件 XG-1

Fig. 1 Specimen XG-1



(a) 试件尺寸(单位: mm)



(b) 试件立体图

图2 试件 XG-2

Fig. 2 Specimen XG-2

凝土,箍筋和对拉筋均采用直径为 8 mm 的 HPB300 钢筋,纵筋采用直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋(表 1)。为防止试件在剪跨段内发生破坏,在试件两端一定范围内进行加密配筋。

1.2 试验加载及测量方案

本试验采用两点对称加载,使用 50 t 液压千斤顶进行单调静力加载,加载过程按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[15]中规定的加载方式执行,实际工作区段长度为 680 mm。试件加载情况见图 3,荷载与应变数据均由静态电阻应变仪自动采集。正式加载时采用位移控制连续加载,通过采集装置观察加载位移所对应的荷

载,每级荷载取为预估极限荷载的 10%,每级荷载加载完成后持荷 10 min。为观察此类构件的最终破坏形态,各试件均加载至发生严重破坏而无法承受荷载的状态。

在试件跨中和左、右加载点截面底部安装位移计,测量试件的竖向挠度。在截面 1、截面 3、截面 5 及跨中左右截面变化处由下到上等距离布设 5 列混凝土应变片(H1-1—H5-5),每列数量为 5 个,用以测量混凝土应变随外部荷载的变化,见图 4(a)。为测量钢板应变,在 5 个关键截面上布置应变片,见图 4(b)。试件内部立柱(L)、对拉钢筋(D)和纵筋(ZJ)的应变测点主要位于试件受拉侧,布置如图 4(c)所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Specimen design parameters

试件编号	纵向配筋率/%	矢高/mm	计算跨径/mm	矢跨比	钢板厚度/mm	连接件形式
XG-1	0.55	101.58	2 110	0.048	4	对拉钢筋
XG-2	0.55	138.89	2 110	0.066	4	对拉钢筋



图 3 试验加载及采集装置

Fig. 3 Test loading and acquisition device

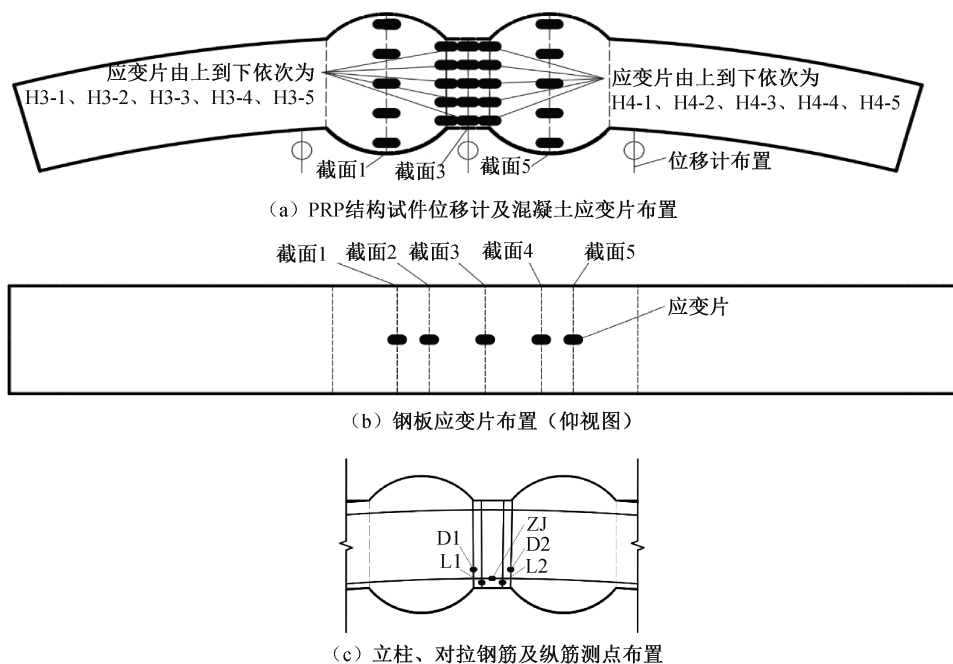


图 4 测点布置

Fig. 4 Measuring point arrangement

2 试验现象及破坏形态

2.1 试件 XG-1 破坏现象

试件 XG-1 在荷载施加前期无任何破坏现象。当加载至 70 kN 时,试件跨中截面变化处及加载点下方出现细微裂缝,见图 5(a)。随着荷载增加,试件裂缝高度发展至截面 3/4 处。继续加载至 244 kN 时,试件发出巨大响声,试件跨中两侧截面变化处钢板与混凝土分离程度加剧。荷载增加至 314 kN 时,试件跨中受压区混凝土出现破碎,上侧两鼓包处出现水平裂缝,见图 5(b)。当荷载增加至 397 kN 时,试件内部发出钢筋拉断声。继续加载至 411 kN 时,试件表面混凝土脱落,试验结束。试件破坏形态见图 5(c)。

2.2 试件 XG-2 破坏现象

当荷载达到 76 kN 时,试件 XG-2 跨中下方首次出现裂缝,见图 6(a)。加载至 198 kN 时,裂缝持续向上发展,裂缝宽度不断增加,试件截面变化处出现钢板与混凝土轻微分离的迹象。当荷载增加至 269 kN 时,试件发出响声,跨中右后方截面变化处对拉钢筋被拉断,此位置钢板与混凝土完全分离,见图 6(b)。继续加载至 353 kN 时,试件受压区鼓包范围内出现横向裂缝,混凝土有少量脱落。当荷载达到 463 kN 时,试件跨中立柱被拉断,钢板与混凝土完全分离,试件受压侧混凝土被压碎,试验结束。试件破坏形态见图 6(c)。

2.3 破坏现象分析

试件 XG-1 与试件 XG-2 破坏过程基本相似,初始裂缝均出现在试件受拉侧底部,且底部鼓包变化处裂缝更为明显,加载前期与受弯试验相似。当裂缝发展到受压区附近时,继续加载试件受压区均出现横向裂缝,最终破坏形态均呈现为压弯破坏。

3 试验结果及分析

3.1 试件荷载-挠度曲线

两试件的荷载-挠度曲线如图 7 所示。在实际工程中,构件过度变形将严重影响其正常使用性能,故定义试件立柱拉断时的荷载值为极限点^[15]。各试件特征点计算结果如表 2 所示。由试验结果得出,两试件的荷载-挠度曲线在弹性阶段相差不大,约在荷载达到 80 kN 后才出现明显不同。混凝土开裂后,试件的抗力主要由纵筋及钢管幕提供。因两试件的配筋参数完全相同,不同初始弯曲度的纵筋及钢管幕参与受力的程度直接影响试件的承载能力,故两者的最终承载力有所不同。

不同矢跨比的 PRP 结构构件之间的对比结果如表 3 所示。在相同参数下,随着矢跨比由 0.048 增加至 0.066,试件的极限承载力及刚度变大。试件 XG-2 相较于 XG-1 极限承载力提升了 12.1%,弹性阶段的刚度提升了 26.7%。

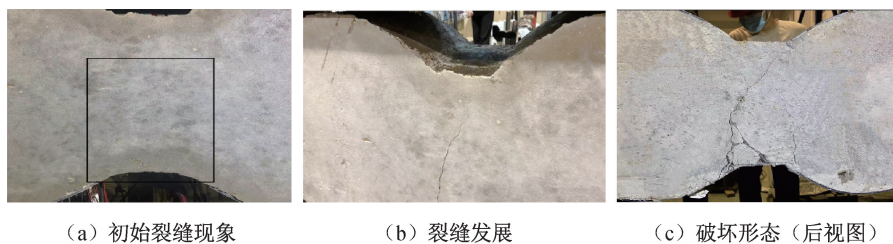


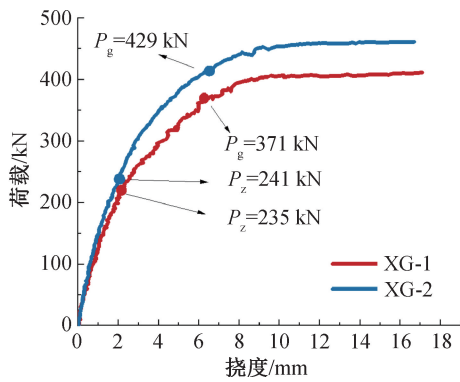
图 5 试件 XG-1 破坏

Fig. 5 Failure of specimen XG-1



图 6 试件 XG-2 破坏

Fig. 6 Failure of specimen XG-2



注:图中 P_z 为纵筋屈服荷载; P_g 为钢板屈服荷载。

图 7 试件荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of specimens

3.2 钢板、立柱、对拉钢筋和纵筋荷载-应变曲线

试件钢板、立柱、对拉钢筋和纵筋测点的荷载-应变曲线如图 8 所示,竖向虚线为各组成部分材料的屈服拉应变界限值。由应变曲线可知,混凝土开裂后,试件各组成部分的应变发展趋势大致相同,但纵筋早于钢板及连接件达到屈服。纵筋屈

服时,两试件跨中对拉钢筋连接件的应变测量值分别为 1.213×10^{-6} 、 1.276×10^{-6} ,未达到屈服。两试件跨中钢板的应变测量值分别为 545×10^{-6} 、 431×10^{-6} ,钢板应变较小,说明在加载前期,构件的抗力主要由纵筋提供,在纵筋屈服后,试件对拉钢筋和立柱先后达到屈服,而后钢板屈服。

两试件跨中钢板、立柱和对拉钢筋的荷载-应变曲线对比如图 9 所示。由图 9(a)可知,试件开裂后,试件 XG-2 的荷载-应变曲线明显高于试件 XG-1。试件钢板达到屈服应变时,两试件的荷载差值为 58 kN,荷载差值反映了初始弯曲度对于承载力的贡献,说明增加矢跨比能够进一步提高钢管幕抵抗变形的能力。由图 9(b)(c)可知,在加载前期,试件立柱和对拉钢筋的应变均很小,基本无变化。混凝土开裂后,两试件前期应变增长较为缓慢,呈现拉应变。当荷载接近 70 kN 时应变开始增长,试件达到屈服应变时的荷载值分别为 272 和 297 kN。由立柱和对拉钢筋荷载-应变曲线可知,随着矢跨比增加,钢管幕参与受力的程度增大,试件立柱和对拉钢筋所能提供的承载力进一

表 2 主要试验结果

Tab. 2 Main test results

试件编号	开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂挠度 /mm	纵筋屈服荷载 P_z/kN	纵筋屈服挠度 /mm	钢板屈服荷载 P_g/kN	钢板屈服挠度 /mm	模拟屈服荷载 P_e/kN	极限荷载 P_u/kN	极限挠度 /mm
XG-2	76	0.42	241	2.09	429	7.11	435.4	445	8.75
XG-1	70	0.49	235	2.46	371	6.92	385.2	397	8.25

表 3 参数影响分析

Tab. 3 Parameter influence analysis

试件编号	矢跨比	极限承载力/kN	承载力提升程度/%	弹性终点荷载/kN	弹性终点位移/mm	刚度提升程度/%
XG-2	0.066	445	12.1	76	0.42	26.7
XG-1	0.048	397		70	0.49	

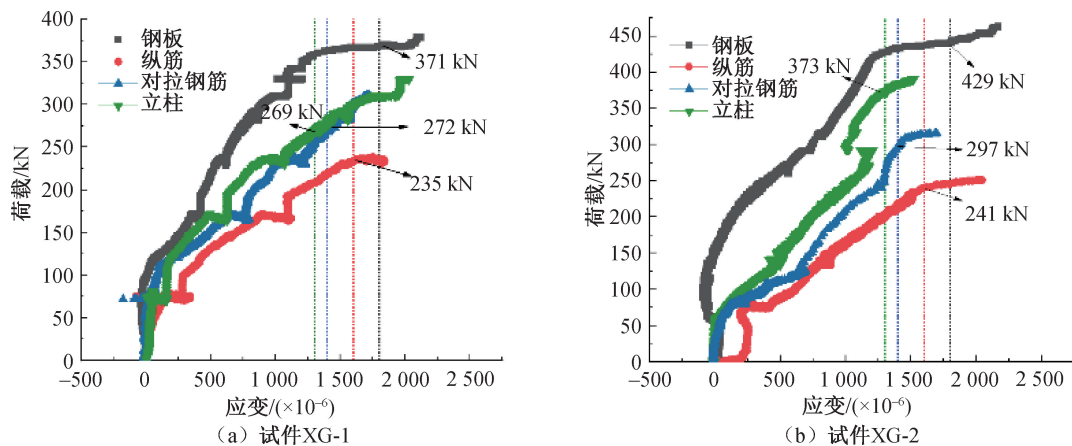


图 8 钢板、立柱、对拉钢筋和纵筋荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of steel plate, vertical column, transverse bar and longitudinal bar

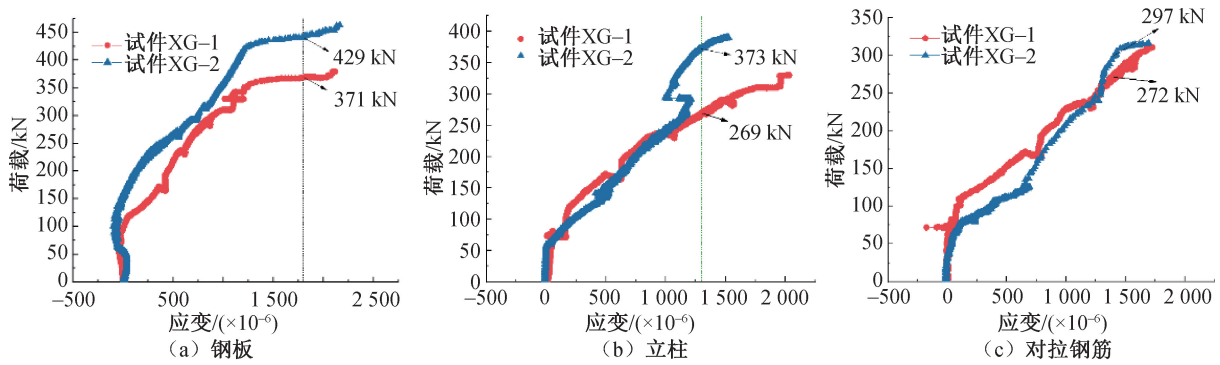


图9 荷载-应变曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-strain curves

步提升。在实际工程中,PRP 结构矢跨比的合理设置可进一步提高构件的整体承载能力。

3.3 钢板应变分布

试件 XG-1 和 XG-2 的钢板应变分布如图 10 所示。钢管截面最大处拉应变始终较小,在加载结束后仍未达到屈服。在加载过程中,应变折线表现出“拉—压—拉”的分布现象,这是由于钢管截面与平钢板承受拉应力,截面变化处向外鼓出,在钢管最大截面与截面变化处的一定范围内形成压应力,故呈现出了“拉—压—拉”的受力形式。当加载至 $0.2P_u$ 时两试件钢板存在受力趋势,试件 XG-2 的应变变化相较于 XG-1 更为明显,说明在加载前期,增加矢跨比能够提高钢板参与受力的程度。

3.4 混凝土截面荷载-应变曲线

试件跨中开裂时混凝土截面荷载-应变曲线如图 11 所示,混凝土应变片布置见图 4(a)。由图 11 可知,随着荷载增加,试件 XG-1 受拉侧底部混凝土逐渐开裂。测点 H4-1、H4-2 的应变在荷载达

到 50 kN 后开始发展,在荷载达到 70 kN 后应变发展到 700×10^{-6} ,与观测到的试验裂缝现象相吻合。测点 H4-4 在加载过程中应变一直较小,测点 H4-5 在加载过程中呈现压应变,当加载至 400 kN 时,应变达到 900×10^{-6} ,与构件破坏时受压区混凝土被压碎的试验现象一致。

试件 XG-2 与试件 XG-1 的混凝土应变发展相似,不同的是试件 XG-2 的测点 H4-5 在前期应变发展较为缓慢,在加载至 310 kN 后,应变快速发展。究其原因是 XG-2 初始弯曲度的增加提升了试件的刚度,延缓了应变发展,与试验中受压区混凝土出现破碎时的荷载相对应。

4 有限元分析

4.1 材料本构选取

模型中混凝土采用德鲁克-普拉格混凝土 (Drucker-Prager Concrete, DPC) 模型。DPC 模型是在 Von Mises 理论和 Mohr-Coulomb 理论的基础上得到的,可反映混凝土抗拉和抗压行为相差较大的情况,较好地模拟复杂条件下混凝土的受力

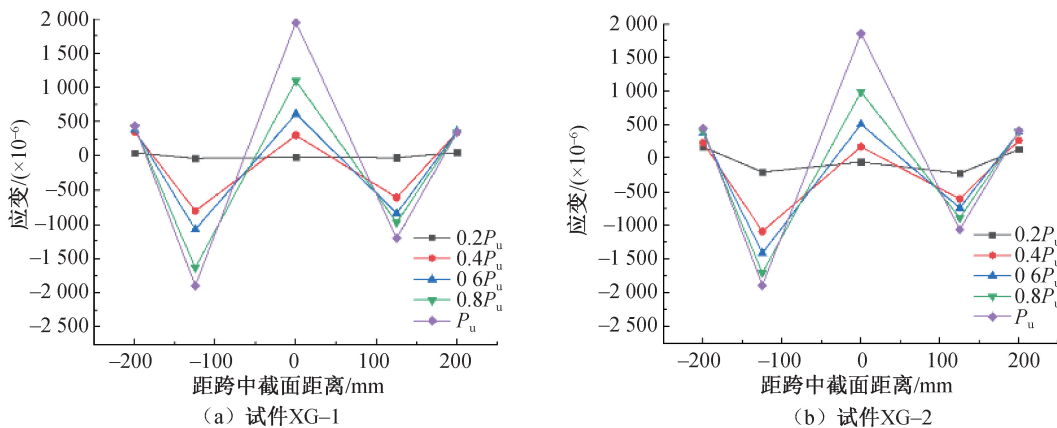


图10 受拉侧钢板沿轴线应变分布

Fig. 10 Strain distribution of tensile steel plate along the axis

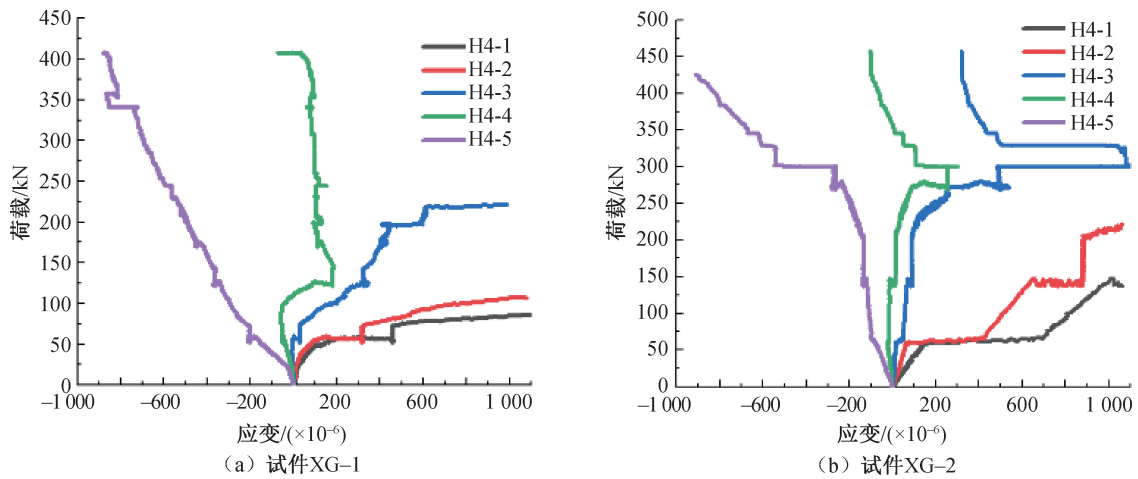
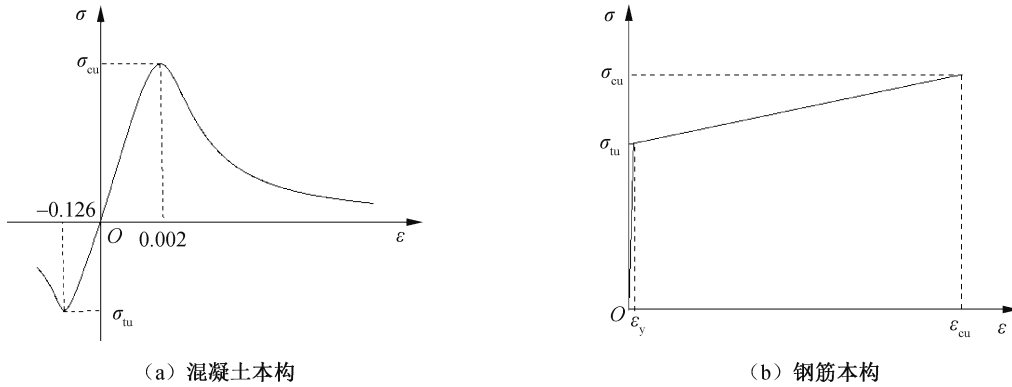


图 11 混凝土截面荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of concrete mid-span section



(a) 混凝土本构

(b) 钢筋本构

图 12 应力-应变关系曲线

Fig. 12 Stress-strain relationship curves

特性,见图 12(a)。钢板和钢筋均采用理想弹塑性模型来模拟其应力-应变关系曲线,见图 12(b)。图中 σ_{cu} 代表钢筋和混凝土峰值拉应力,Pa; σ_{tu} 代表混凝土峰值压应力,Pa; ε_{cu} 代表钢筋峰值拉应变; σ_y 代表钢筋屈服拉应力,Pa; ε_y 代表钢筋屈服拉应变。

4.2 加载及约束方式

在荷载作用位置建立较大刚度的垫块,荷载施加于垫块上部的中线上,边界条件施加于试件两侧钢板外表面的节点上,并约束 X 、 Y 、 Z 三个方向的自由度。施加荷载为位移加载,边界条件及加载方式见图 13。

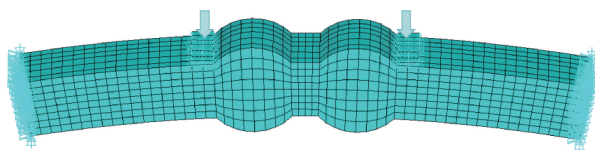


图 13 有限元模型

Fig. 13 Finite element model

4.3 模型验证

为进一步确定数值模拟的准确性,提取数值模型计算结果中的应变云图来验证试验所测开裂荷载,通过对比应变云图的发展规律来验证试验破坏形态。应变云图取 $150 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 为混凝土受拉开裂应变。试件 XG-1 和 XG-2 通过数值模型计算的开裂荷载分别为 55 和 62 kN,两试件的试验开裂荷载分别为 70 和 76 kN,且裂缝出现及发展趋势与数值应变云图中所体现的应变发展区域相符,均出现在跨中截面变化处(图 14)。考虑到试验过程中裂缝只有达到肉眼可识别的宽度时才能被观察到,观测开裂荷载大于模拟开裂荷载是可以理解的,故模拟得到的试件开裂荷载和开裂形式与试验结果基本符合。

通过 ANSYS 软件数值模拟得到的荷载-挠度曲线与试验得到的曲线对比如图 15 所示。结果表明,数值模拟结果和试验结果所对应的荷载-挠度曲线走势基本相同,极限承载力较为接近,数值模型可较好地模拟试件的破坏形态。

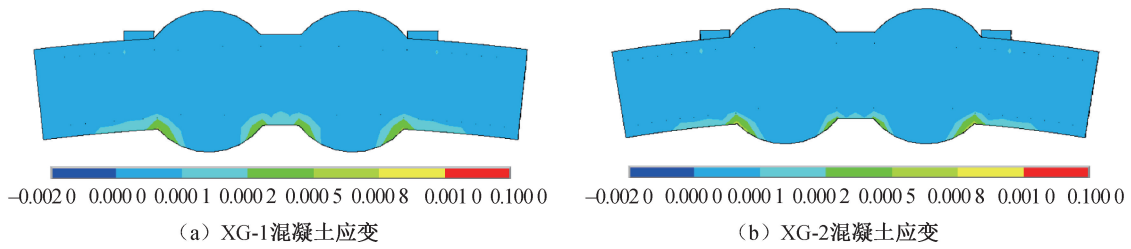


图 14 试件开裂时应变分布

Fig. 14 Strain distribution upon cracking of specimens

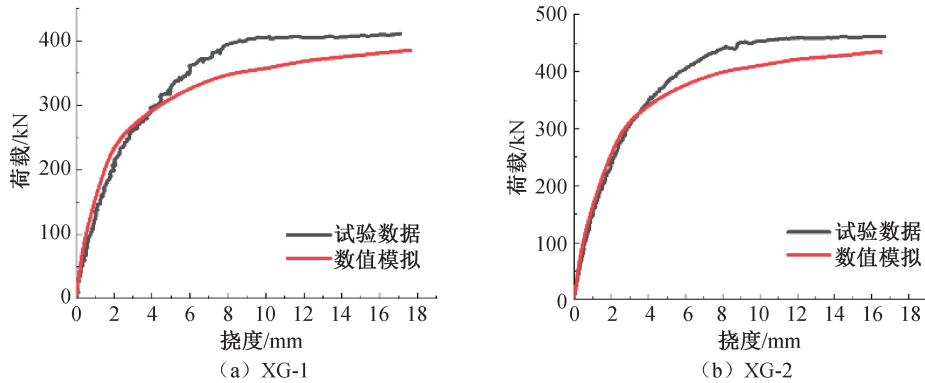


图 15 试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 15 Comparison of experimental results and numerical simulation results

4.4 参数影响分析

为研究各参数对 PRP 结构拱形构件受力性能的影响,确定合理有效的措施来提高构件的受力性能,以矢跨比、混凝土强度和配筋率为参数,建立数值模型。以 XG-1 为基础试件,各设计参数均在此模型上进行改变。

4.4.1 矢跨比

为研究矢跨比对 PRP 结构拱形构件承载力的影响,通过数值模拟建立编号为 XG-1-22°—XG-1-46°的 4 个试件,各试件除矢跨比不同外,其余参数均相同,具体参数见表 4。

表 4 试件设计参数

Tab. 4 Specimen design parameters

试件编号	纵向配筋率/%	混凝土强度/MPa	矢跨比	钢板厚度/mm	连接件直径/mm
XG-1-22°	0.55	20.1	0.048	4	6
XG-1-30°	0.55	20.1	0.066	4	6
XG-1-38°	0.55	20.1	0.084	4	6
XG-1-46°	0.55	20.1	0.102	4	6

通过数值模拟得到不同矢跨比试件的荷载-位移曲线,如图 16 所示。各试件的极限承载力分别为 385、435、507 和 551 kN,极限承载力依次提高了 13.0%、16.6%、8.7%。结果表明,极限承载力随着矢跨比的增加而提高。矢跨比对试件刚度有

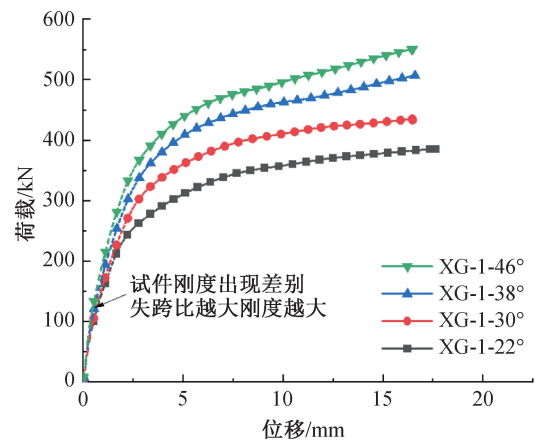


图 16 矢跨比的影响

Fig. 16 Influence of rise-span ratio

一定影响,随着矢跨比增加,试件刚度越来越大。

4.4.2 混凝土强度

为研究混凝土强度对 PRP 结构拱形构件承载力的影响,通过数值模拟建立编号为 XG-1-C30—XG-1-C50 的 5 个试件,各试件除混凝土强度不同外,其余参数均相同,具体参数见表 5。

通过数值模拟所得不同混凝土强度试件的荷载-位移曲线如图 17 所示。各试件的极限承载力分别为 385、400、413、425 和 436 kN,极限承载力依次提高了 3.90%、3.25%、2.90%、2.58%。结果表明,极限承载力随着混凝土强度的增加而提高,但

表 5 试件设计参数

Tab. 5 Specimen design parameters

试件编号	纵向配筋率/%	混凝土强度/MPa	矢跨比	钢板厚度/mm	连接件直径/mm
XG-1-C30	0.55	20.1	0.048	4	6
XG-1-C35	0.55	23.4	0.048	4	6
XG-1-C40	0.55	26.8	0.048	4	6
XG-1-C45	0.55	29.6	0.048	4	6
XG-1-C50	0.55	32.4	0.048	4	6

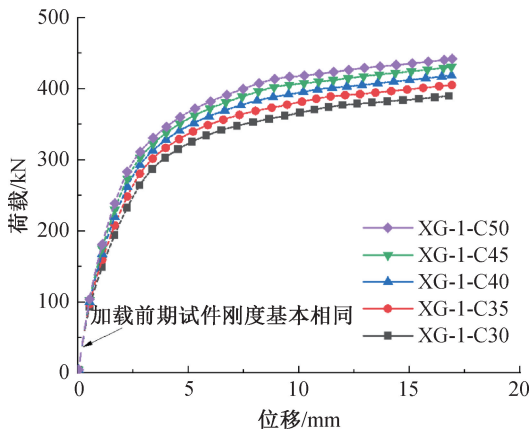


图 17 混凝土强度的影响

Fig. 17 Influence of concrete strength

提高程度逐渐变缓,混凝土强度对初始刚度影响不大。

4.4.3 配筋率

为研究配筋率对 PRP 结构拱形构件承载力的影响,通过数值模拟建立编号为 XG-1-6—XG-1-12 的 4 个试件,各试件除配筋率不同外,其余参数均相同,具体参数见表 6。

表 6 试件设计参数

Tab. 6 Specimen design parameters

试件编号	纵向配筋率/%	混凝土强度/MPa	矢跨比	钢板厚度/mm	连接件直径/mm
XG-1-6	0.20	20.1	0.048	4	6
XG-1-8	0.34	20.1	0.048	4	6
XG-1-10	0.55	20.1	0.048	4	6
XG-1-12	0.79	20.1	0.048	4	6

通过数值计算所得不同配筋率试件的荷载-位移曲线如图 18 所示。各试件的极限承载力分别为 363、374、385 和 398 kN,极限承载力依次提高了 3.03%、2.94%、3.38%。结果表明,极限承载力随着配筋率的增加而提高,配筋率对构件初始刚度基本无影响。

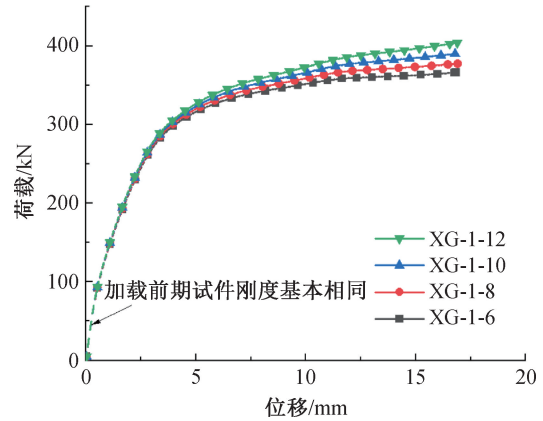


图 18 配筋率的影响

Fig. 18 Influence of reinforcement ratio

5 结论

1) 在对称荷载的作用下,PRP 结构拱形构件的破坏形态呈现压弯破坏。PRP 结构拱形构件破坏一般发生在截面变化处,破坏始于纵筋屈服,终于受拉侧钢板屈服。主要破坏过程为:在平钢板与钢管幕相交的截面变化处,受拉侧钢板有被拉平的趋势,该趋势导致截面处产生竖向裂缝,对拉钢筋产生拉力并逐渐屈服,导致变形增大、裂缝贯通截面,上部受压侧混凝土被压碎,构件发生破坏。

2) 当矢跨比为 0.048、0.066、0.084 和 0.102 时,构件承载力依次提高了 13.0%、16.6%、8.7%,矢跨比对试件极限承载力影响较大,试件刚度随矢跨比增加而变大。

3) 当混凝土强度等级为 C30、C35、C40、C45 和 C50 时,试件承载力依次提高了 3.90%、3.25%、2.90%、2.58%;当配筋率为 0.20%、0.34%、0.55% 和 0.79% 时,试件承载力依次提高了 3.03%、2.94%、3.38%。上述参数对试件的承载力影响较小,实际工程应用中可按照构造要求选择。

参考文献:

[1] 金春福. 地下大跨度新管幕结构体系施工力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
 JIN C F. Mechanical performance of long-span underground structure with NTR construction method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
 [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 P J, ZHAO W, GUAN Y P, et al. Analysis of mechanical characteristic and key technique of steel tube slab structure [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(6):891-895.
- [6] 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.
- [7] SHI H, JI W W, ZHANG Y Q, et al. Research on flexural performance of new pipe-roof pre-construction structures [J]. *Structures*, 2023, 57:105279.
- [8] ZHANG Y Q, YOU L F, HAN S, et al. Study on out-of-plane shear behavior of new tubular roof prefabricated structures [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18:e01857.
- [9] 徐庆鹏,韦芳芳,郑泽军,等. 火灾后双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(2):1-10.
XU Q P, WEI F F, ZHENG Z J, et al. Finite element analysis of seismic performance of concrete-filled double steel plate composite shear wall after fire [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2022, 39(2):1-10.
- [10] 袁朝庆,代晓辉,宋爽,等. 底部加强双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(2):11-18.
YUAN C Q, DAI X H, SONG S, et al. Study on seismic resistance of double steel concrete at the bottom [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2022, 39(2):11-18.
- [11] 谭燕秋,宫玉侠,吴欣. 两边连接双层钢板剪力墙承载力性能研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(4):8-12.
TAN Y Q, GONG Y X, WU X. The bearing capacity performance of two-side connected steel-plate-steel shear wall [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2013, 30(4):8-12.
- [12] YAN J B, RICHARD LIEW J Y, QIAN X D, et al. Ultimate strength behavior of curved steel-concrete-steel sandwich composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 115:316-328.
- [13] YAN J B, XIONG M X, QIAN X D, et al. Numerical and parametric study of curved steel-concrete-steel sandwich composite beams under concentrated loading [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(10):3981-4001.
- [14] 郑莲琼,周子程,陈敏,等. 曲线形不锈钢管混凝土构件受弯力学性能研究[J]. *工业建筑*, 2023, 53(8):118-126.
ZHENG L Q, ZHOU Z C, CHEN M, et al. Research on mechanical properties of curved concrete-filled stainless steel tubular members under bending [J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(8):118-126.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

(责任编辑 唐彦彦)