文章编号:1674-2974(2025)03-0001-14 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025023

多腔式型钢混凝土地下连续墙受弯承载力研究

秦鹏†,幸永康,宁继鸿,易伟建,陈仁朋
(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:总结了钢筋混凝土地下连续墙在工程应用中的局限性,在此基础上提出多腔式型钢混凝土(multi-cavity steel reinforced concrete,MSRC)组合结构作为深基坑支护结构的研究设想并对其抗弯性能开展研究.对采用不同制作工艺的两类MSRC结构开展纯弯试验.试验结果显示,两类构件在承载力等性能上差异较小,均表现为受弯破坏且具有较好的延性与后期承载力.对构件受弯全过程中钢材与混凝土相互作用进行有限元分析,发现钢材在中后期承担了80%以上的弯矩,而混凝土的主要作用是延缓钢材的局部屈曲.分析混凝土强度、钢材屈服强度、含钢率对构件受弯承载力与抗弯刚度的影响,结果显示:三类参数均与构件受弯承载力呈正相关,含钢率影响最显著,混凝土强度影响最小;混凝土强度和含钢率与构件初始抗弯刚度和使用阶段抗弯刚度呈正相关,混凝土强度影响较小,含钢率影响显著;钢材屈服强度与抗弯刚度呈负相关,但影响在10%以内.在平截面假定基础上给出适用于MSRC结构受弯承载力计算式,计算结果与试验和有限元模拟值吻合较好.

关键词:基坑支护;组合结构;受弯试验;ABAQUS
中图分类号:TU398 **文献标志码**:A

Research on Flexural Bearing Capacity of Multi-cavity Steel Reinforced Concrete Underground Continuous Walls

QIN Peng†,XING Yongkang,NING Jihong,YI Weijian,CHEN Renpeng
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The paper elucidates the inherent limitations encountered by reinforced concrete continuous walls within engineering applications. It introduces the novel research concept of multi-cavity steel reinforced concrete (MSRC) as a potential solution for structural support in deep foundation pits, followed by a meticulous investigation into its bending performance. Experimental scrutiny was conducted through pure bending tests on two distinct variants of MSRC structures, each subjected to unique manufacturing processes. Results from these tests unveil subtle discrepancies in bearing capacity and other pertinent properties between the two structures. Moreover, both variants demonstrate susceptibility to bending failure in the pure bending tests, yet exhibit commendable ductility and late-stage load-bearing capacity. A comprehensive finite element analysis delves into the intricate interaction between steel and concrete throughout the entire bending process, revealing steel's predominant role in accounting

* **收稿日期**:2024-03-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52090082), National Natural Science Foundation of China(52090082)
作者简介:秦鹏(1979—),男,湖南常德人,湖南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: Pengqin@hnu.edu.cn

for over 80% of the bending capacity during the mid to late stages. Conversely, concrete primarily serves to mitigate local buckling of the steel. Analyzing the influences of concrete strength, steel yield strength, and steel content on member bending load capacity and stiffness reveals a positive correlation with all three parameters, with steel content exerting the greatest impact and concrete content the least. Additionally, concrete strength and steel content positively correlate with initial bending stiffness and stiffness during operational phases, albeit with concrete strength exerting a relatively minor effect. Steel content emerges as a significant determinant of stiffness. Conversely, the yield strength of steel exhibits a negative correlation with bending stiffness, albeit within a deviation threshold of 10%. Based on the assumption of a flat cross-section, the paper proposes a calculation formula for the bending capacity of MSRC structures, which demonstrates good agreement with experimental and finite element simulation results.

Key words: foundation pit support; composite structure; bending tests; ABAQUS

钢筋混凝土地下连续墙作为基坑支护结构的一种形式,具有集挡土、承重和防渗于一体的优点,可应用于地质条件复杂的大型基坑中,因此在基坑工程快速发展的背景下得到了广泛应用.然而,在其设计与施工过程中也暴露出一些长期存在的局限性:钢筋笼现场绑扎需占用施工场地并消耗工期;泥浆护壁不当易引起孔壁坍塌,造成导墙及地面沉降、地下连续墙表面不平整;混凝土水下浇筑容易夹泥造成墙面无规则渗水,增加后期维修难度与成本;预埋接头质量不理想,通常需加砌内墙或复合墙,造成资源浪费的同时也减少了主体结构的使用面积.

为克服钢筋混凝土地下连续墙的上述不足,提出用多腔式型钢混凝土(multi-cavity steel reinforced concrete,MSRC)组合结构代替钢筋混凝土结构承担面内和面外荷载,这类结构包括多腔式H型钢混凝土(H-MSRC)和多腔式冷弯内卷边槽钢(C型钢)混凝土(C-MSRC).H-MSRC是指将H型钢翼缘对接焊接在一起形成多个腔体,在腔体内部浇筑混凝土形成的一类新型结构;C-MSRC是指将冷弯C型钢通过喇叭形焊缝连接形成多个腔体,在腔体内部浇筑混凝土形成的一类新型结构.

初步分析,相较于钢筋混凝土地下连续墙,这种新型结构特点如下:1)型钢部分可以在工厂预制,无须占用施工场地的同时也避免了钢筋绑扎带来的人工和时间成本;2)型钢作为外壁可以在混凝土浇筑时避免孔壁坍塌,减少泥浆护壁时间,利于保护周边环境;3)钢混组合结构具有承载能力强、刚度大的优点,同等受力条件下可使墙体厚度相较现浇钢筋混凝土地下连续墙更薄,可缓解一些特大城市在深层地下空间开发中施工场地大小受到的限制;4)钢材作为外壁,既能避免因混凝土夹泥、开裂造成的墙面不规则渗水,也保证了墙体构件表面平整.故该新型结构地下连续墙可兼作主体结构内墙.相关研究成果表明,“两墙合一”在缩短工期、降低工程造价、节能环保等方面具有优势.

综上所述,MSRC结构代替钢筋混凝土结构承担荷载能提升施工速度、提高墙体质量、减少资源浪费与环境污染,在基坑工程的绿色施工、可持续发展上具有推广价值[1-3].

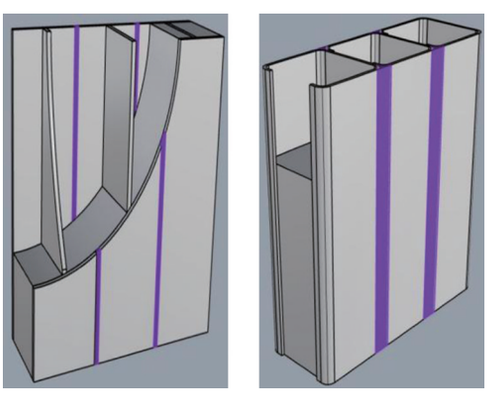
多腔式型钢混凝土组合结构可看作由多个矩形或方形钢管混凝土结构组合而成,目前诸多学者对多腔钢管混凝土构件的性能做了大量研究工作.研究内容主要集中于多腔钢管混凝土柱以及钢管束组合墙的轴压、偏压以及抗震性能[4-8].而要探索该类构件在地下空间应用时的复杂受力性能,对其受弯性能的研究是基础.针对钢管混凝土受弯构件,国内外已有研究显示其具有良好的受弯承载力及延性[9-13].对其受弯承载力计算方法各国也给出相应规范[14-16].但是相关研究与技术规程都是针对单个腔体的钢管混凝土构件.对多腔体钢管混凝土构件的受弯性能研究则相对较少.贺吉春等[17]基于全截面塑性假定,提出钢管混凝土束剪力墙在偏压状态下的受弯承载力计算公式,同时指出该公式计算值比实际偏大,需乘修正系数0.8,而修正系数是否与实际相符仍有待验证.王文铭[18]设计了一种采用栓钉与肋板共同连接的多腔钢板组合板,提出其受弯承

载力计算方法并将计算值与试验值对比,对比结果显示计算值偏于保守.

因此,为了给这类新型组合结构在地下空间中的应用奠定基础,本文将从试验和有限元分析出发,开展对MSRC结构的抗弯性能研究,并基于试验与有限元结果,提出适用于该类结构的受弯承载力计算方法.

1　模型试验

本节设计了2个多腔式型钢混凝土纯弯构件,包括1个H-MSRC与1个C-MSRC,如图1所示,以探究不同工艺制作的两个构件在受力性能上的差异.



(a)H-MSRC结构　　(b)冷弯C-MSRC结构

图1　多腔式型钢混凝土结构

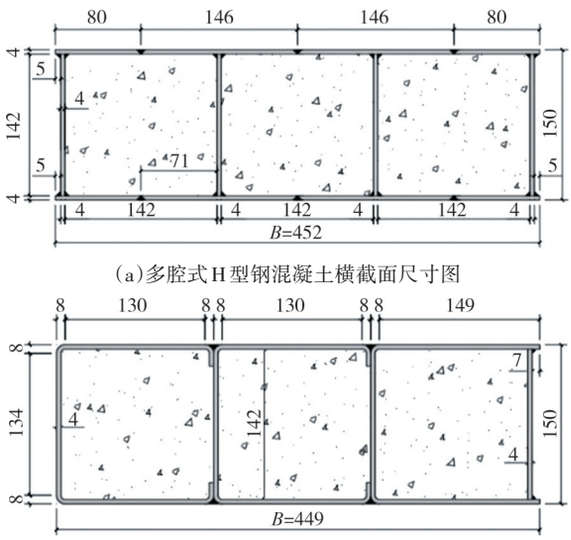
Fig.1　Multi-cavity steel reinforced concrete structure

1.1　试件制备与参数

试件所有钢材均由同一批次4 mm厚Q345钢材切割加工得到.试件混凝土材料使用同一批次的混凝土,强度等级为C50.试件总长度均为2 m.将H型钢以及槽钢翼缘对接焊接形成多腔式H型钢构件;利用喇叭形焊缝焊接形成多腔式冷弯C型钢结构.钢结构部分竖直摆放于钢模板上,底部与模板点焊在一起,避免混凝土浇筑时渗漏.试件边浇筑边振捣,在试件浇筑至略高于试件顶面后停止浇筑,浇筑完毕浇水养护28 d.试件横截面尺寸见图2,试件各项尺寸参数及混凝土抗压强度见表1,钢材性能见表2,应变片布置方式见图3.

B为构件宽度,H为构件高度,L_0为构件计算长度,L为构件长度,t为H-MSRC构件的上、下翼缘及腹板厚度和C-MSRC构件的钢材厚,h_c为核心混凝土高度,R为冷弯C型钢倒角内半径,f_{ck}为混凝土立方体抗压强度,通过150 mm×150 mm×150 mm混凝土立方体标准试块轴心抗压试验得到.

钢材弹性模量约为2.06×10^5 MPa,f_y为钢材屈服



(a)多腔式H型钢混凝土横截面尺寸图

(b)多腔式C型钢混凝土横截面尺寸

图2　试件横截面尺寸(单位:mm)

Fig.2　Cross section of the specimen(unit: mm)

表1　试件参数

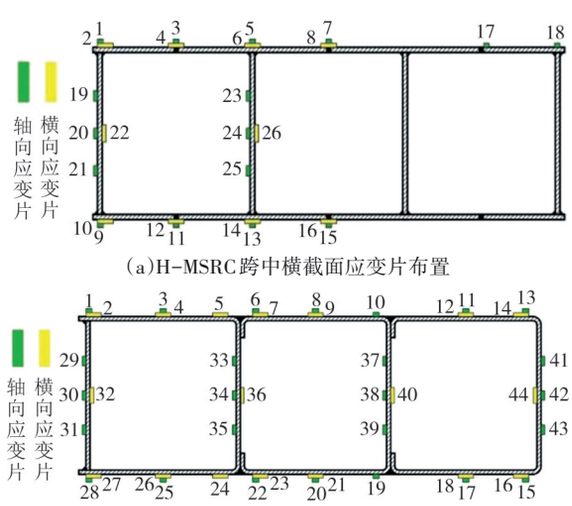
Tab.1　Parameter of the specimen

试件编号	$B\times H\times L_0$/(mm×mm×mm)	L/mm	t/mm	h_c/mm	R/mm	f_{ck}/MPa
H-MSRC	452×150×1 800	2 000	4	142	—	35.8
C-MSRC	449×150×1 800	2 000	4	142	4	35.8

表2　钢材性能

Tab.2　Properties of the steel

序号	厚度/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	伸长率/%
S1	3.85	419.9	558.7	0.245
S2	3.82	463.1	572.3	0.245



(a)H-MSRC跨中横截面应变片布置

(b)C-MSRC跨中横截面应变片布置

图3　应变片布置

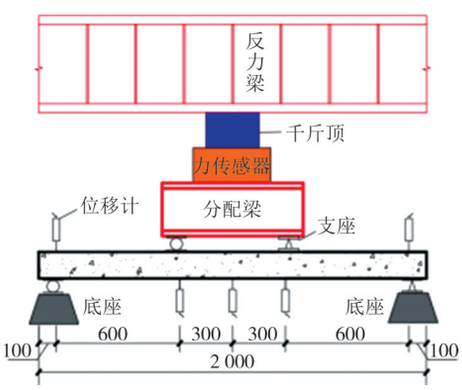
Fig.3　Layout of strain gauges

强度,f_u为钢材极限强度.

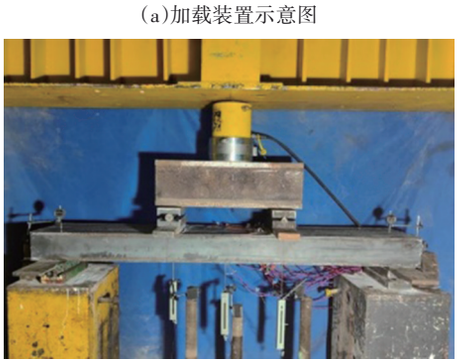
1.2 试件加载

本次试验梁式构件采用四点加载方式,构件长度为2 000 mm,纯弯段长度为600 mm.一端为滑动铰支座,另一端为固定铰支座,支座间距1 800 mm.加载装置如图4所示.千斤顶量程1 500 kN,置于分配梁与反力架之间,通过分配梁将荷载分配至梁两端顶部.在纯弯段的中部和端部共设置3个位移计,在构件两端支座处各设置1个位移计,用于测量构件相对支座的竖向挠度变形数据.

加载初期采用力加载控制,每级荷载为预计峰值荷载的1/15.当荷载-跨中挠度曲线出现明显非线性特征时,每级荷载为峰值荷载的1/25.每级荷载达到稳定后等待2 min,用于记录试验现象和数据.接近预计峰值荷载时,改用位移控制,缓慢连续加载,加载速率约0.5 mm/min.



(a)加载装置示意图



(b)加载装置实物图

图4 加载装置

Fig.4 Test setup

1.3 试验现象与破坏形态

当试件跨中截面$L_0/20$(L_0为支座间距)发生左右挠度时停止加载.两个试件在加载过程中荷载均未出现明显下降,展现了MSRC构件较好的延性.图5展示了试件的整体破坏形态,两个试件最终破坏形态类似,均呈悬链线状,表现为受弯破坏.纯弯段受压区钢板在加载后期均出现了如图6所示的局部屈曲.试件内部混凝土裂缝分布形态如图7和图8所示,底部混凝土破损是切割表面钢材时造成的.混凝土裂缝分布均匀且较为密集.大部分裂缝上端已经超过了形心轴,到达了构件截面高度约3/4处.



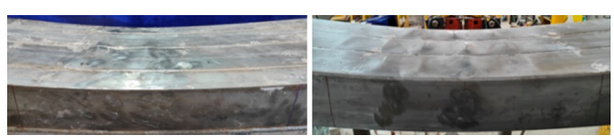
(a)H-MSRC试件



(b)C-MSRC试件

图5 试件整体破坏形态

Fig.5 The overall failure mode of the specimen



(a)H-MSRC纯弯段最终鼓曲形态　(b)C-MSRC纯弯段最终鼓曲形态

图6 试验结束后试件鼓曲形态

Fig.6 Drum shape of the specimen after the test



(a)H-MSRC试件腔1侧



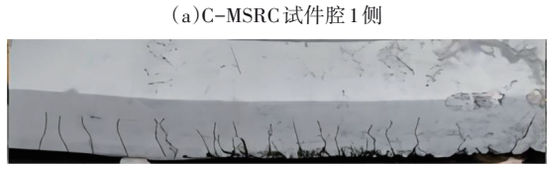
(b)H-MSRC试件腔3侧

图7 H-MSRC试件内部混凝土裂缝

Fig.7 The cracks within the concrete core of the H-MSRC specimen



(a)C-MSRC试件腔1侧



(b)C-MSRC试件腔3侧

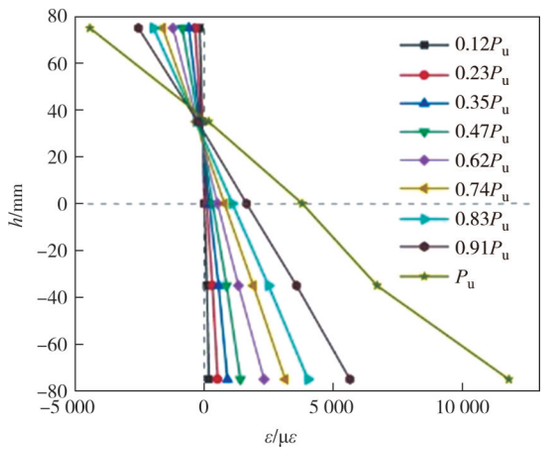
图8 C-MSRC试件内部混凝土裂缝

Fig.8 The cracks within the concrete core of the C-MSRC specimen

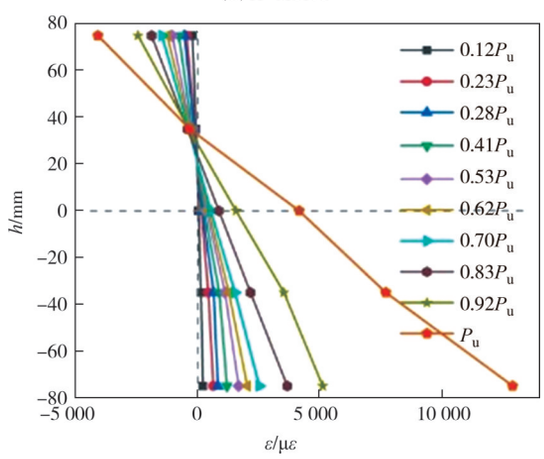
1.4 试验结果分析

1.4.1 平截面假定

H-MSRC 与 C-MSRC 构件腹板在各级荷载下沿构件不同高度处的应变变化见图 9. 两个构件基本符合平截面假定.



(a)H-MSRC



(b)C-MSRC

图 9　构件腹板不同高度处纵向应变分布

Fig.9　Longitudinal strain distribution at different heights of member web

1.4.2 荷载挠度曲线

图 10 所示为试件荷载(P)-跨中挠度(u_m)关系曲线,从图中可以看出,不同制作工艺形成的构件受弯性能差异较小. 根据文献[9]的定义,H-MSRC 与 C-MSRC 受弯构件的极限承载力分别为 572 kN 与 560 kN,两者极限承载力较为接近. 两类新型多腔式型钢混凝土构件的受弯过程可以用三个阶段来描述. 加载初期处于弹性阶段. 随着荷载增加,进入弹塑性阶段,此时荷载与位移呈非线性关系,位移增长速率变快. 当试件进入强化阶段后,荷载增长速率进一步放缓,曲线斜率明显降低. 随着跨中挠度不断增加,荷载仍将缓慢增加,但增幅较小.

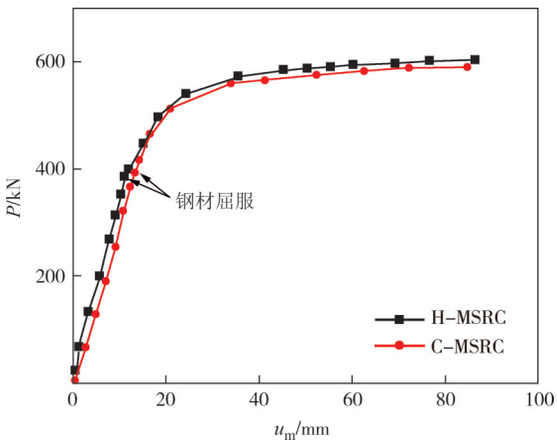


图 10　试件荷载(P)-跨中挠度(u_m)曲线

Fig.10　Specimen load (P)-mid-span deflection (u_m) curve

1.4.3 荷载-应变曲线

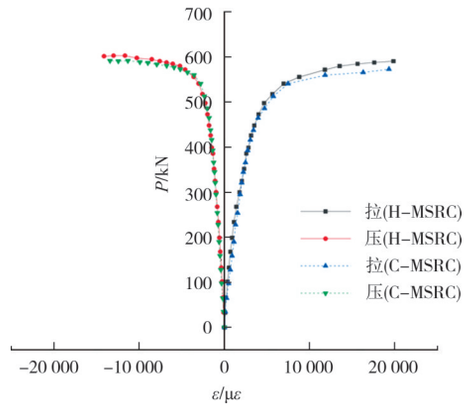
图 11 为荷载与翼缘、腹板纵横向应变关系图. 从图 11 可得到以下结论:

1)对于翼缘纵向应变,在加载的弹性阶段,翼缘纵向拉压应变绝对值相近,应变增长呈线性. 之后翼缘纵向应变在受拉区的增长速率大于受压区,表明此时受拉区混凝土已开裂. 因此受拉翼缘屈服时,受压区钢材尚未屈服,此时受拉区钢材的屈服面积随着荷载增大而不断增大,并逐渐往腹部移动,试件跨中挠度的增长速率明显快于荷载的增长速率,构件往全截面塑性发展.

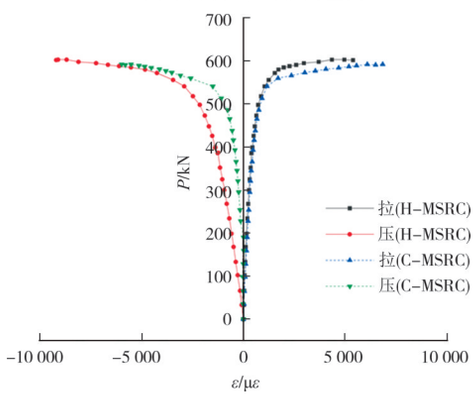
2)对于翼缘横向应变,加载初期,受压区翼缘横向应变与荷载基本呈线性增长,说明钢材尚未给混凝土提供约束力. 随着荷载逐渐增加,受压区横向应变增长速度逐渐变快,混凝土开始挤压钢材,钢材给混凝土提供一定的约束应力. 从图中还可以看出,受拉区翼缘钢材横向应变表现均为负,主要原因是受拉区纵向拉应变增长快,导致横向应变表现为收缩,因此应变片数据为负.

3)对于腹板纵向应变,在弹性阶段,钢腹板形心轴处和受压区应变增长较小,构件腹板上下对称位置处钢腹板应变曲线对称. 随着荷载不断增大,受拉区钢材纵向变形增长速率逐渐快于受压区,主要原因是受压区混凝土与钢材一起承担压应力,而受拉区仅有钢材承担. 随着中和轴上移,腹板受拉区高度高于受压区.

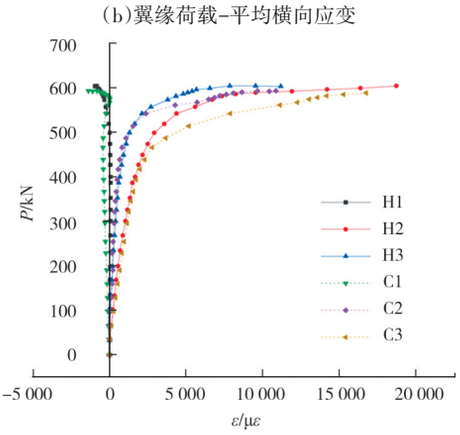
4)对于腹板横向应变,在荷载达到 500 kN 前,两个构件腹板中部横向应变变化不明显,在 0 左右波动. 当荷载接近极限荷载时,应变开始急剧降低,说明由于此处受到纵向拉应变引起横向收缩,故应变值呈负.



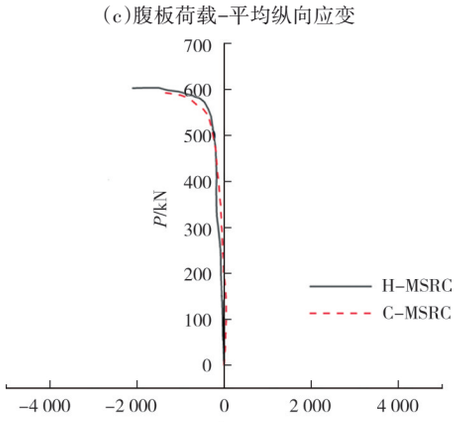
(a)翼缘荷载-平均纵向应变



(b)翼缘荷载-平均横向应变



(c)腹板荷载-平均纵向应变



(d)腹板荷载-平均横向应变

图 11 荷载-应变曲线

Fig.11 Curves of load-strain

2 有限元分析

2.1 本构关系

2.1.1 钢材本构模型

钢材泊松比取0.3,本构关系采用五段线关系模型[9],如图12(a)所示,其应力应变关系表达式如下:

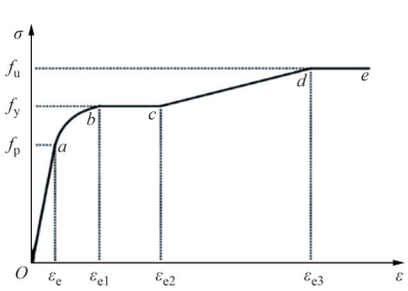
$$\sigma=\begin{cases}E_s\varepsilon,\varepsilon\leqslant\varepsilon_e\\-A\varepsilon^2+B\varepsilon+C,\varepsilon_e<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{e1}\\f_y,\varepsilon_{e1}<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{e2}\\f_y\left(1+0.6\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3}-\varepsilon_{e2}}\right),\varepsilon_{e2}<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{e3}\\1.6f_y,\varepsilon_{e3}<\varepsilon\end{cases}\tag{1}$$

式中:E_s为钢材弹性模量;f_y为钢材屈服强度;A=0.2$f_y/(\varepsilon_{e1}-\varepsilon_e)^2$; B=2$A\varepsilon_{e1}$; C=0.8f_y+$A\varepsilon_e^2$-$B\varepsilon_e$; ε_e=0.8f_y/E_s; ε_{e1}=1.5ε_e;ε_{e2}=10ε_{e1};ε_{e3}=100ε_{e1}.

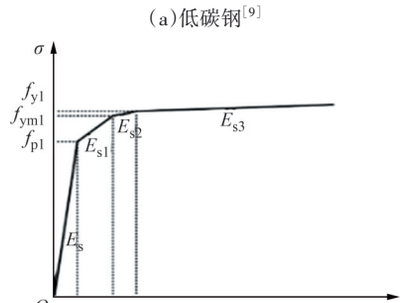
冷弯钢弯角区域钢材的应力-应变关系曲线采用 Abdel-Rahman 等[19]的研究成果,如图 12(b)所示.其表达式如下:

$$\sigma=\begin{cases}E_s\varepsilon,\varepsilon\leqslant\varepsilon_e\\f_{p1}+E_{s1}(\varepsilon-\varepsilon_e),\varepsilon_e<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{e1}\\f_{ym1}+E_{s2}(\varepsilon-\varepsilon_{e1}),\varepsilon_{e1}<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{e2}\\f_{y1}+E_{s3}(\varepsilon-\varepsilon_{e2}),\varepsilon_{e2}<\varepsilon\end{cases}\tag{2}$$

式中:f_{y1}为弯角区域钢材屈服强度;ε_e=0.75f_{y1}/E_s; f_{p1}=0.75f_{y1}; ε_{e1}= ε_e+0.125f_{y1}/E_{s1}; f_{ym1}=0.875f_{y1}; ε_{e2}= ε_{e1}+0.125f_{y1}/E_{s2}.



(a)低碳钢[9]



(b)冷弯钢角部[19]

图 12 钢材σ-ε曲线

Fig.12 σ-ε curve of reinforcement

2.1.2　混凝土本构模型

本文采用ABAQUS中提供的混凝土材料塑性损伤模型作为混凝土的本构模型.考虑到本文只研究单调荷载作用,因此未定义混凝土损伤.泊松比取0.2.处于受压状态下的混凝土本构关系采用文献[9]提出的适用于方、矩形钢管混凝土构件混凝土的$\sigma-\varepsilon$关系曲线,其表达式如下:

$$y=\begin{cases}2x-x^2, x\leqslant 1\\ \dfrac{x}{\beta\cdot(x-1)^{\eta}+x}, x>1\end{cases} \tag{3}$$

$$x=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{4}$$

$$y=\frac{\sigma}{\sigma_0} \tag{5}$$

式中:$\sigma_0=f_c'$;$\varepsilon_0=\varepsilon_{cc}+800\cdot\zeta^{0.2}(\mu\varepsilon)$;$\varepsilon_{cc}=1\ 300+12.5\cdot f_c'(\mu\varepsilon)$;$\eta=1.6+1.5/x$;$\beta=(f_c')/(1.2\sqrt{1+\zeta})$;$f_c'$为混凝土圆柱体轴心抗压强度.文献[20]中给出了圆柱体轴心抗压强度与立方体抗压强度之间的换算公式:

$$f_c'=\left[0.76+0.2\lg\left(\frac{f_{cu}}{19.6}\right)\right]\cdot f_{cu} \tag{6}$$

模型中混凝土受拉性能采用ABAQUS提供的以能量破坏准则定义的应力-断裂能关系[21]描述.混凝土断裂能G_f取0.154 N/mm,混凝土破坏应力参考沈聚敏等[22]给出的公式计算得到σ_{t0}=3.94 MPa.

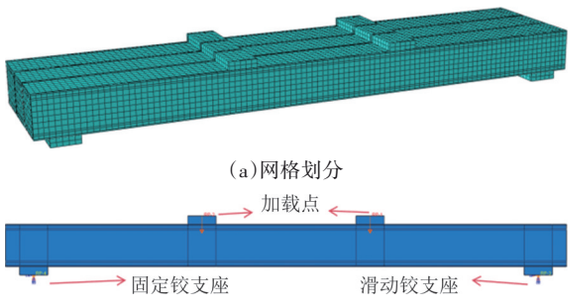
2.2　单元类型、网格划分、界面关系及边界条件

由于在试验加载过程中,型钢之间并未分离,为简化计算模型,将钢材部分作为整体建立.型钢和混凝土均采用八节点三维实体减缩积分单元C3D8R.构件计算长度的3分点处及两端各设置一个与试验装置大小相同的垫块,垫块采用解析刚体模拟.

钢材与混凝土之间法向界面选择“硬接触”,切向选择罚函数,切向摩擦系数取0.6.上方加载垫块设置参考点R_{P1}与R_{P2},向y轴负方向移动.构件两端垫块边界条件分别定义为固定铰支座和滑动铰支座.具体网格划分及边界条件见图13.

2.3　模型验证

试件受弯试验与模拟破坏形态对比如图14所示,对比结果表明两者在最终破坏形态和破坏位置等宏观方面均吻合良好.两种模型颜色不同主要是因为图14(a)和14(b)中相同颜色所代表的幅值不同.

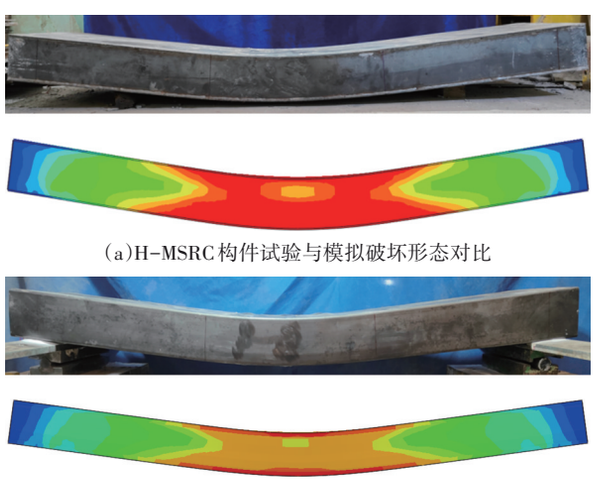


(a)网格划分

(b)边界条件

图13　网格划分和边界条件

Fig.13　Mesh dividing and boundary conditions



(a)H-MSRC构件试验与模拟破坏形态对比

(b)C-MSRC构件试验与模拟破坏形态对比

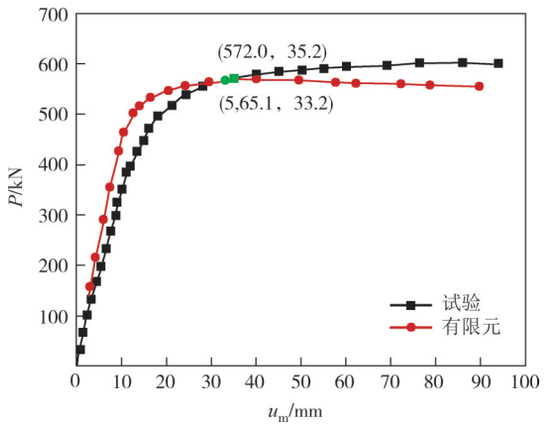
图14　试件受弯试验与模拟破坏形态对比图

Fig.14　Comparison of specimen bending test and simulated failure patterns

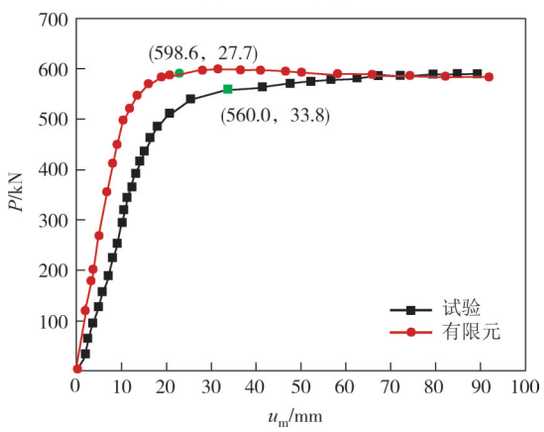
试验得到的荷载-挠度曲线与有限元模拟得到的曲线对比情况如图15所示,两类构件荷载-挠度曲线走势均基本保持一致.绿色标识点代表极限承载力,H-MSRC与C-MSRC构件有限元计算和试验得到的极限承载力分别为565.1 kN、572.0 kN和598.6 kN、560.0 kN.H-MSRC与C-MSRC构件模拟值/试验值分别为0.988与1.069,有限元计算得到的受弯极限承载力结果与试验值接近.有限元模型在前期刚度大于试验构件,分析原因可能是模拟材料本构时偏理想,未考虑施工质量缺陷.

2.4　受弯构件全过程分析

由于两种结构破坏形态、承载力大小基本相同,在有限元模型中,两类构件各阶段应力变化基本相同.因此以H-MSRC构件作为典型范例进行全过程受力分析,分析不同荷载下钢材和混凝土之间的相互作用.在H-MSRC构件弯矩-挠度曲线上选取了4



(a)H-MSRC试件



(b)C-MSRC试件

图 15 试验与模拟获得的荷载-挠度分布曲线对比图

Fig.15 Comparison of load-deflection distribution curves obtained from test and simulation

个特征点D_1、D_2、D_3和D_4，如图 16 所示，分别代表混凝土受拉区边缘受拉破坏、钢材受拉屈服、受拉区最外缘应变达到 10 000 με和卸载点.

图 17 展示了受力过程中钢材、混凝土以及整个构件的跨中弯矩-挠度关系曲线. 通过对跨中弯矩-挠度曲线的分析以及各曲线原始计算报告数据的提取，可以得到加载过程中各特征点处各部分承担的弯矩大小及占比，结果展示在表 3 中. 由表 3 可知，在特征点D_1处，H-MSRC 构件(C-MSRC 构件)钢材和混凝土承担的弯矩比重分别为 67% 和 33%(61% 和 39%)；到达特征点D_2处时，由于混凝土受拉区开裂，因此混凝土承担的弯矩降至 11%(13%)，钢材承担了绝大部分弯矩；特征点D_3和D_4处钢材承担的弯矩基本上变化不大，分别为 84% 和 82%(84% 和 85%)，相较于特征点D_2占比低的原因可能是：在这一阶段，混凝土受到约束作用较大，且力臂变长，导致混凝土承担的弯矩有所增加. 根据图 17、表 3 可以看出，在整个受力过程中，钢材起主要承担弯矩的作用，而混凝土在这一过程中的主要作用是延缓钢材局部屈曲.

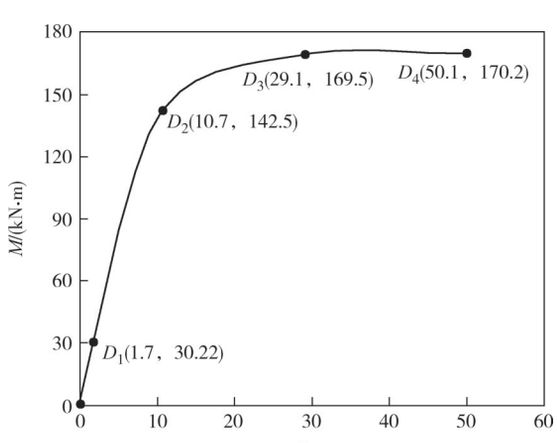
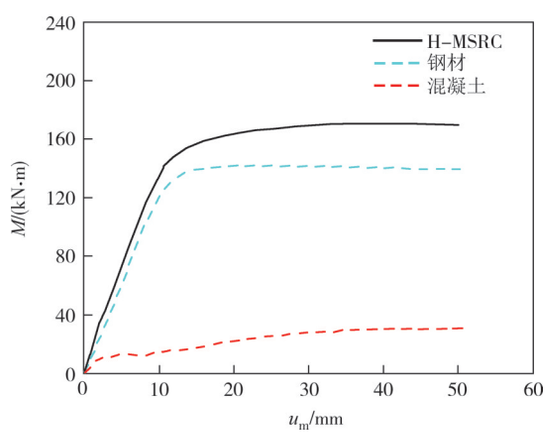
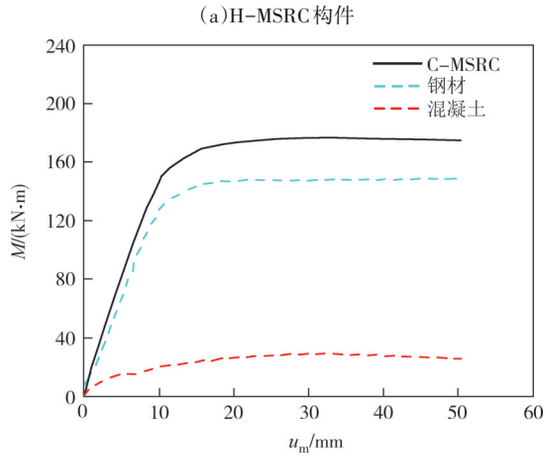


图 16 典型构件弯矩-挠度曲线

Fig.16 Bending moment-deflection curve of a typical member



(a)H-MSRC构件



(b)C-MSRC构件

图 17 构件各部分跨中弯矩-挠度曲线

Fig.17 Mid-span bending moment-deflection curves of each part of the member

2.5 模拟参数分析

本文利用有限元软件进一步研究了混凝土强度、钢材屈服强度和钢板厚度(含钢率)对构件受弯承载力、初始抗弯刚度和使用阶段抗弯刚度的影响，

各参数取值及计算结果如表4所示,H开头编号表示为H-MSRC,C开头编号表示为C-MSRC,H-1至H-4对比参数为混凝土强度(30~60 MPa),H-3、H-5、H-6、H-7对比参数为钢材屈服强度(235~419.9 MPa),H-3、H-8、H-9、H-10对比参数为钢材含钢率(7.3%~14.6%,对应的钢板厚度为3~6 mm).

表3　各部分承载大小及占比

Tab.3　Bearing size and proportion of each part

构件	特征点	总承载力/(kN·m)	钢材受弯承载力/(kN·m)	钢材占比/%	混凝土受弯承载力/(kN·m)	混凝土占比/%
H-MSRC	D_1	30.18	20.25	67	9.93	33
	D_2	142.51	126.89	89	15.62	11
	D_3	169.53	141.67	84	27.86	16
	D_4	170.21	139.62	82	30.59	18
C-MSRC	D_1	15.54	9.48	61	6.06	39
	D_2	150.01	129.77	87	20.24	13
	D_3	179.59	150.86	84	28.73	16
	D_4	178.36	151.61	85	26.75	15

表4　参数分析与承载力计算结果

Tab.4　Results of parameter analysis and bearing capacity calculation

试件编号	t/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	α/%	M_u/(kN·m)	K_i/(kN·m^2)	K_s/(kN·m^2)	M_{ue}/(kN·m)	M_{ue}/M_u
H-1	4	419.9	30.0	9.7	163.7	5 145.3	4 546.9	156.9	0.958
H-2	4	419.9	40.0	9.7	166.8	5 381.0	4 657.3	158.7	0.951
H-3	4	419.9	55.5	9.7	169.5	5 690.2	4 748.0	160.7	0.948
H-4	4	419.9	60.0	9.7	170.5	5 862.5	4 788.0	161.3	0.946
H-5	4	235.0	55.5	9.7	98.1	6 298.6	5000.7	92.3	0.941
H-6	4	345.0	55.5	9.7	140.6	5 977.1	4 797.4	133.2	0.947
H-7	4	390.0	55.5	9.7	157.7	5 842.6	4 759.1	149.7	0.949
H-8	3	419.9	55.5	7.3	126.8	5 121.3	3 558.2	123.7	0.975
H-9	5	419.9	55.5	12.1	207.7	7 026.1	5 901.5	196.5	0.946
H-10	6	419.9	55.5	14.6	246.7	8 185.3	7 122.0	231.4	0.938
C-1	4	419.9	30.0	9.7	173.6	5 619.0	4 967.9	161.2	0.928
C-2	4	419.9	40.0	9.7	176.0	5 944.0	5 115.2	162.9	0.926
C-3	4	419.9	55.5	9.7	179.6	6 300.6	5 232.8	165.0	0.919
C-4	4	419.9	60.0	9.7	180.6	6 540.2	5 275.8	165.6	0.917
C-5	4	235.0	55.5	9.7	106.2	6 992.2	5 538.1	95.8	0.902
C-6	4	345.0	55.5	9.7	150.6	6 587.6	5 325.3	137.4	0.912
C-7	4	390.0	55.5	9.7	167.7	6 402.6	5 263.6	154.1	0.919
C-8	3	419.9	55.5	7.3	136.3	5 258.1	4 024.2	127.8	0.938
C-9	5	419.9	55.5	12.1	222.2	7 760.9	6 498.8	201.8	0.908
C-10	6	419.9	55.5	14.6	264.2	9 223.7	7 818.0	237.2	0.898

2.5.1　混凝土强度

控制试件的钢板厚度、钢材屈服强度不变,混凝土强度从C30增加到C60,构件力学性能的变化如表5所示.S_u为受弯承载力的增长率,S_i为初始阶段抗弯刚度的增长率,S_s为使用阶段抗弯刚度的增长率.

分析结果表明,多腔式型钢混凝土纯弯构件的受弯承载力、初始抗弯刚度和使用阶段抗弯刚度均与混凝土强度呈正相关,但三者提升效果均不显著.初始抗弯刚度随混凝土强度变化的幅度较使用阶段抗弯刚度大,原因是加载前期混凝土参与度高,后期混凝土承担的荷载占比较小.

2.5.2　钢材屈服强度

控制试件的钢板厚度、混凝土强度不变,钢材屈服强度从235.0 MPa增加到419.9 MPa,构件力学性能的变化如表6所示.

分析结果表明:构件的受弯承载力随着钢材屈服强度提升显著增加,近似呈线性关系,抗弯刚度与

表5 混凝土强度对构件力学性能的影响

Tab. 5 Effect of concrete strength on mechanical properties of components

试件编号	f_{cu}/MP$_a$	S_u/%	S_i/%	S_s/%
H-1	30.0	—	—	—
H-2	40.0	1.9	4.6	2.4
H-3	55.5	3.5	10.6	4.4
H-4	60.0	4.2	13.9	5.3
C-1	30.0	—	—	—
C-2	40.0	1.4	5.8	3.0
C-3	55.5	3.5	12.1	5.3
C-4	60.0	4.0	14.1	5.8

表6 钢材屈服强度对构件力学性能的影响

Tab. 6 Effect of steel yield strength on mechanical properties of components

试件编号	f_y/MP$_a$	S_u/%	S_i/%	S_s/%
H-5	235.0	—	—	—
H-6	345.0	43.3	-5.1	-4.1
H-7	390.0	60.1	-7.2	-4.8
H-3	419.9	72.8	-9.7	-5.1
C-5	235.0	—	—	—
C-6	345.0	41.8	-5.8	-3.8
C-7	390.0	57.9	-8.4	-5.0
C-3	419.9	69.1	-9.9	-5.5

钢材屈服强度呈负相关. 此外,C-MSRC 构件承载力和刚度较H-MSRC构件有一定程度的提升.

2.5.3 含钢率

控制试件的钢材屈服强度、混凝土强度不变,钢板厚度从3 mm增加到6 mm,含钢率从7.3%增加到14.6%,构件力学性能的变化如表7所示.

表7 含钢率对构件力学性能的影响

Tab.7 Effect of steel content on mechanical properties of components %

试件编号	α	S_u	S_i	S_s
H-8	7.3	—	—	—
H-3	9.7	33.7	11.1	33.4
H-9	12.1	63.8	37.2	65.9
H-10	14.6	94.8	59.8	100.2
C-8	7.3	—	—	—
C-3	9.7	31.8	19.8	30.0
C-9	12.1	63.0	47.6	61.5
C-10	14.6	93.8	75.4	94.3

分析结果表明:构件的受弯承载力、初始抗弯刚度和使用阶段抗弯刚度均随钢材含钢率的提升而显著提升,近似呈线性关系. 钢材在整个过程中承担了绝大部分的荷载,因此含钢率是影响构件承载力和刚度的关键因素.

3 受弯承载力计算方法

3.1 截面拆分验算

多腔式型钢混凝土结构在国内外运用较少,尚未有相关行业规范提出其设计计算方法,因此本文首先将这类新型结构按照已有设计计算方法的结构形式,简化为两端的两个方钢管混凝土与中间的双钢板混凝土两种结构形式,见图18. 其中方钢管混凝土承载力计算公式借鉴《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)[14],双钢板混凝土受弯承载力则采用《核电站钢板混凝土结构技术标准》(GB/T 51340—2018)[23]的公式进行计算. 将两种结果形式承载力叠加得到三个腔体的多腔式型钢混凝土组合构件受弯承载力.

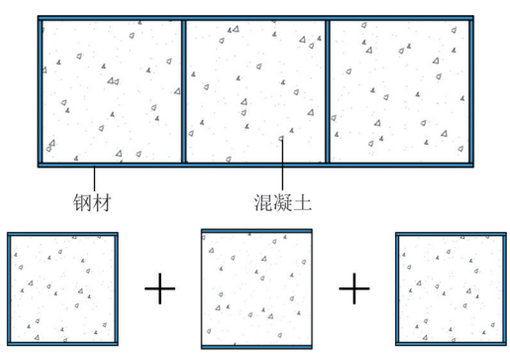


图18 截面拆分示意图

Fig.18 Splitting diagram of cross-section

将承载力计算结果与表4中20个构件的试验/有限元计算结果进行对比. 计算值/试验(有限元)平均值为1.002 3,均方差为0.057. 通过图19可知大部分计算结果误差均在10%以内,可见该简化方式计算结果较为精确. 但是理论值大于试验值/模拟值的概率为50%,偏不安全.

3.2 MSRC构件受弯承载力计算式

为得到MSRC构件的受弯承载力理论计算公式,提出以下假设:1)钢管与混凝土之间无相对滑动;2)构件弯曲变形满足平截面假定;3)构件达到受弯承载力时截面形成塑性铰,全截面钢材达到各自的屈服强度f_y;4)不考虑受拉区混凝土对承载力的贡献;5)不考虑钢管残余应力以及钢板局部屈曲的影响.

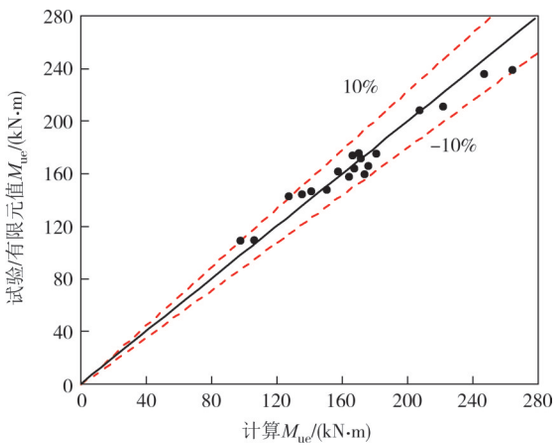


图 19　截面简化计算式与试验/有限元值对比

Fig.19　Comparison between simplified cross-section calculation formula and experimental/finite element values

3.2.1　腔体混凝土抗压强度计算

在 MSRC 构件受弯过程中,核心混凝土受到钢管的约束作用处于三向受压应力状态,因此抗压强度得到提高. 姚民乐等[24]、高金良等[25]基于线性莫尔强度准则提出钢管混凝土中核心混凝土的强度计算方法并证实其具有较好的适用性. 本文基于此方法计算 MSRC 构件腔体内混凝土抗压强度.

如图 20 所示,将矩形钢管的两边简化成双边固定超静定板对钢板进行力学计算. 其中 σ_1、σ_2 分别为顶板与侧板对核心混凝土侧向压应力的绝对值. b、h、t 分别为钢管宽度、钢管高度、钢板厚度. 当钢管混凝土达到承载力极限状态时,角度钢材达到屈服.

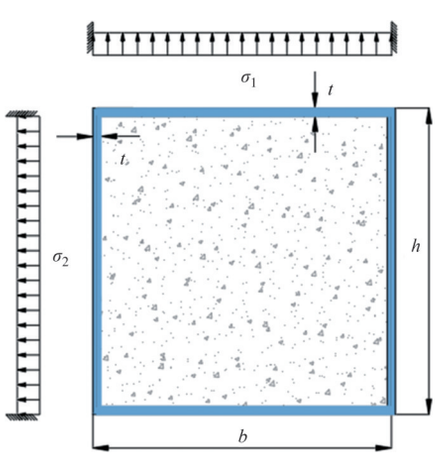


图 20　核心混凝土计算模型

Fig.20　Calculation model of core concrete

$$f_y = \frac{M''_{max}}{W_z} = \frac{\sigma_1 h^2/12}{t^2/6} = \frac{h^2}{2t^2}\sigma_1 \tag{7}$$

$$f_y = \frac{M'_{max}}{W_z} = \frac{\sigma_2 b^2/12}{t^2/6} = \frac{b^2}{2t^2}\sigma_2 \tag{8}$$

解得,

$$\sigma_1 = \frac{2t^2}{h^2} f_y \tag{9}$$

$$\sigma_2 = \frac{2t^2}{b^2} f_y \tag{10}$$

根据线性莫尔强度准则,当核心混凝土破坏时,其极限应力为:

$$f_M = f_c + k\sigma_3 \tag{11}$$

式中:f_M 为根据线性莫尔强度准则得到的核心混凝土的极限应力;f_c 为核心混凝土的立方体抗压强度;σ_3 为矩形钢管先屈服边角点对混凝土的侧压应力,对纯弯构件,$\sigma_3=\sigma_2$;k 为核心混凝土轴心抗压、拉强度的比值,理论值一般可取 3.0~7.5[26],本文计算时取 k=7.5.

3.2.2　受弯承载力计算式

截面受力分布如图 21 所示,由截面合力平衡条件可得:

$$f_y B t_1 + 4f_y(h_c - x)t_3 - f_y B t_2 - 4f_y x t_3 - 3f_M b_c x = 0 \tag{12}$$

式中:f_y 为钢材屈服强度;B 为型钢构件翼缘宽度;t_1、t_2 和 t_3 分别为受拉翼缘、受压翼缘、腹板钢材厚度,在本文中 $t_1=t_2=t_3=t$;h_c 为混凝土截面高度;f_M 为混凝土强度.

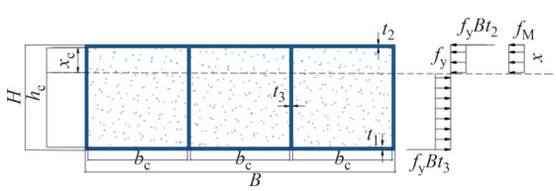


图 21　跨中截面受力分布

Fig.21　Force distribution at mid-span section

由式(12)可得混凝土受压区高度 x

$$x = \frac{4f_y h_c t}{8f_y t + 3f_M b_c} \tag{13}$$

对截面中性轴取矩,截面受弯承载力可表示为:

$$M_{ue} = f_y B t(h_c + t) + 4f_y t\left(x^2 - h_c x + \frac{h_c^2}{2}\right) + \frac{3}{2} f_M h_c x^2 \tag{14}$$

对于 C-MSRC 构件的钢材屈服强度 f_{ye},采用将冷弯钢弯角处与平板处屈服强度进行加权平均计算的简化方式[9]:

$$f_{ye} = \alpha_c f_{y1} + (1 - \alpha_c) f_y \tag{15}$$

$$f_{y1} = m f_y \tag{16}$$

式中:α_c 为弯角区钢材面积与钢材总面积比值;f_{y1} 为弯角区屈服强度;m 为弯角处与平板区屈服强度比值,根据材性试验测得 m=1.103.

3.3 计算结果校核

以H-MSRC构件为例,由图9(a)可知H-MSRC构件受压区高度约为38 mm,根据式(13)计算得到构件受压区高度x=36.5 mm. 计算值与试验值较为接近. 根据式(14)计算得到构件受弯承载力为160.7 kN·m,与试验值(169.5 kN·m)的比值为0.948. 其中钢材分担截面弯矩152.2 kN·m,占总承载力的94.7%,混凝土分担截面弯矩8.5 kN·m,占总承载力的5.3%. 与图17(a)中有限元模拟结果(钢材承担84%,混凝土承担16%)相比,钢材分担的承载力提升了约10个百分点,主要原因有两个:一是该计算方法不考虑受拉区混凝土对承载力的贡献;二是计算时假设全截面钢材达到各自的屈服强度,而实际上钢材腹板部分区域并未达到屈服强度. 由于试验数据较少,不足以形成规律性的结论,故本文在试验验证的有限元基础上,通过改变钢板厚度、混凝土强度、钢材屈服强度等参数,得到一系列构件的有限元计算数据,与上述公式计算值进行比对,如表4与图22所示. 计算值与试验或有限元模拟值之比的平均值为0.933,均方差为0.020,与试验或有限元结果基本吻合,且理论值偏保守.

3.4 计算公式拓展

在地下连续墙实际工程应用中,MSRC结构腔体个数具有随机性,为使该承载力计算公式具有普遍适用性,将腔体拓展至n个后,得到受弯承载力计算式为:

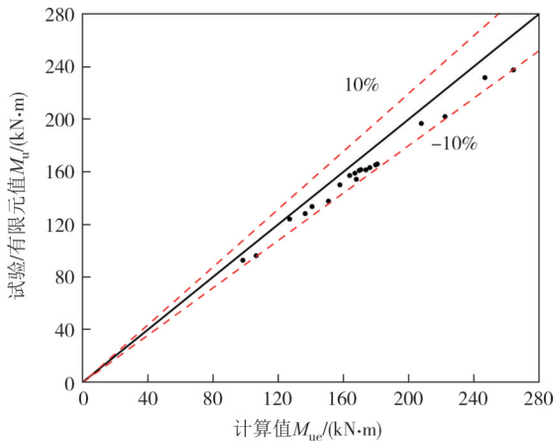


图22 计算值与试验/有限元值对比

Fig.22 Comparison between calculated values and experimental/finite element values

$$M_{ue}=f_y Bt(h_c+t)+(n+1)f_y t\left(x^2-h_c x+\frac{h_c^2}{2}\right)+\frac{n}{2}f_M h_c x^2 \tag{17}$$

3.5 拓展公式验证

为更好探索该拓展公式在MSRC构件受弯承载力计算中的适用性,引用杨有福等[27]、吴乃森等[28]、李斌等[29]的单腔钢管混凝土受弯承载力试验数据,与拓展公式计算结果进行对比,对比结果见表8. 对

表8 拓展公式与单腔钢管混凝土数据库对比

Tab.8 Comparison between expanded formula and single cavity concrete-filled steel tube database

来源	编号	$B\times D\times t$/(mm×mm×mm)	f_y/MPa	f_{ck}/MPa	M_u/(kN·m)	M_{ue}/(kN·m)	M_{ue}/M_u
文献[27]	rcb1	120×150×2.93	293.8	23.1	31.4	27.6	0.879
文献[27]	rcb3	90×150×2.93	293.8	23.1	29.3	23.4	0.798
文献[27]	rcb5	90×120×2.93	293.8	23.1	21.1	16.6	0.787
文献[27]	rcb7	60×120×2.93	293.8	23.1	18.4	13.3	0.722
文献[28]	1	100×100×3	280	42.71	15.28	13.7	0.897
文献[28]	2	100×100×4	280	42.71	16.99	17.5	1.030
文献[28]	3	100×150×4	280	42.71	46.73	32.5	0.695
文献[28]	4	100×150×5	280	42.71	48.32	39.5	0.817
文献[28]	5	100×200×4	280	42.71	55.08	51.5	0.935
文献[28]	6	100×200×5	280	42.71	76.12	62.6	0.822
文献[28]	7	100×200×6	280	42.71	92.74	73.4	0.791
文献[29]	CFSTB-1	150×150×8	410	54.1	121.8	110.0	0.903
文献[29]	CFSTB-2	120×150×8	410	54.1	97.1	95.5	0.983
文献[29]	CFSTB-3	90×150×8	410	54.1	78.9	81.1	1.028
文献[29]	CFSTB-4	90×120×8	410	54.1	56.9	56.7	0.996
文献[29]	CFSTB-5	150×150×8	410	32.1	118.8	107.9	0.908
文献[29]	CFSTB-6	120×150×8	410	32.1	96.5	93.7	0.971
文献[29]	CFSTB-7	90×150×8	410	32.1	78.7	79.8	1.014
文献[29]	CFSTB-8	90×120×8	410	32.1	53.0	55.9	1.055

比结果显示,计算值/试验值的平均值为0.896,标准差为0.109. 可见,该公式的计算值与试验值较为接近,且具有足够的安全储备,适用于MSRC构件受弯承载力的计算.

4 结 论

1)H-MSRC和C-MSRC构件在纯弯试验中均表现为受弯破坏,构件变形明显,荷载-挠度曲线形状相似,均未出现下降段,极限承载能力接近. 说明多腔式型钢混凝土构件具有较好的延性性能. 不同制作工艺形成构件受弯性能差异较小.

2)有限元ABAQUS模拟得到的结果与试验接近,破坏形态与试验试件吻合. 通过对构件受力全过程钢材与混凝土相互作用分析得到,在加载过程中,钢材承担的弯矩比例不断增加,接近极限承载力时,钢材承载占比为80%以上,此后基本维持不变. 混凝土主要起到延缓钢材局部屈曲的作用.

3)混凝土强度、钢材屈服强度、含钢率与MSRC构件受弯承载力呈正相关,含钢率影响最显著,混凝土影响最小. 混凝土强度和含钢率与构件初始抗弯刚度和使用阶段抗弯刚度呈正相关,混凝土强度影响较小,含钢率影响显著;随着钢材屈服强度提升,抗弯刚度反而降低,但影响在10%以内.

4)通过截面塑性理论推得MSRC结构受弯承载力计算式. 通过该计算式得到的理论值与试验和有限元模拟值吻合较好.

上述结论对MSRC结构的受弯性能进行了较为详细的阐述. 作为对MSRC结构在地下工程应用的初步探索,为后续相关研究奠定了基础.

参考文献

[1] 王卫东,王建华.深基坑工程中主体工程地下结构与支护结构相结合的研究与实践[J].工业建筑, 2004(增刊2):69-79.
WANG W D, WANG J H. Research and Practice on the combination of underground structure and supporting structure of main works in deep foundation pit engineering [J]. Industrial Building, 2004 (Sup.2): 69-79.(in Chinese)

[2] 王卫东. 地下连续墙作为主体结构的设计[J]. 建筑结构, 2002, 32(1): 3-8.
WANG W D. Designing method of diaphragm wall used as main body structure [J]. Building Structure, 2002, 32 (1) : 3-8. (in Chinese)

[3] 孙连勇, 代长顺, 袁言臣, 等. 地铁车站预制桩与主体结构相结合新工法[J]. 现代制造技术与装备, 2019, 55(10): 134-135.
SUN L Y, DAI C S, YUAN Y C, et al. A new method of combining prefabricated piles and main structure of metro station[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019, 55(10): 134-135.(in Chinese)

[4] 吴丽丽, 韩港豪, 武海鹏, 等. 十字形多腔组合轻型钢管混凝土柱轴压试验及承载力计算[J/OL]. 工程力学: 1-12[2024-03-21]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11.2595. o3.20240115.1717.010.html.
WU L L, HAN G H, WU H P, et al. Experimental study on axial compression test and bearing capacity calculation of cross-shaped multi-cavity composite lightweight steel tube concrete columns [J/OL]. Engineering Mechanics: 1-12 [2024-03-21]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11.2595. o3.20240115.1717.010.html. (in Chinese)

[5] 王云鹤, 郭兰慧, 张素梅, 等. 一字形多腔钢管混凝土短肢组合剪力墙轴压性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 105-111.
WANG Y H, GUO L H, ZHANG S M, et al. Experimental study and finite element analysis of axial compression behavior of I-shaped multi-cavity concrete-filled steel tubular short-leg composite shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (Sup.1): 105-111.(in Chinese)

[6] 徐礼华, 宋杨, 刘素梅, 等. 多腔式多边形钢管混凝土柱偏心受压承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(4): 135-146.
XU L H, SONG Y, LIU S M, et al. Study on the eccentric compressive bearing capacity of polygonal multi-cell concrete filled steel tubular columns [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4): 135-146.(in Chinese)

[7] 汤序霖, 丁昌银, 陈庆军, 等. 带加劲肋多腔双层钢板-混凝土组合剪力墙的抗震性能试验[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 150-161.
TANG X L, DING C Y, CHEN Q J, et al. Seismic behavior of composite shear wall with double steel plates and infill concrete with stiffeners[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 150-161.(in Chinese)

[8] 沙振方, 陈凯. CFST框架格栅管式双钢板组合剪力墙弹塑性分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 751-756.
SHA Z F, CHEN K. Elastic-plastic analysis of CFST frame and double steel plate composite shear wall with grid tube[J]. Building Structure, 2021, 51(Sup.1): 751-756.(in Chinese)

[9] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
HAN L H. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.(in Chinese)

[10] HAN L H. Flexural behavior of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(2): 313-337.

[11] WANG R, HAN L H, NIE J G, et al. Flexural performance of rectangular CFST members [J]. Thin-Walled Structures, 2014,

79:154-165.

[12] LI G C,LIU D,YANG Z J,et al. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017,128:732-744.

[13] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
CAI S H. Modern steel tube confined concrete structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese)

[14] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Technical code of concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014.(in Chinese)

[15] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete-filled steel tubular structures: AIJ-CFT (1997)[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1997.

[16] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings: AISC-LRFD (1999) [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1999.

[17] 贺吉春, 黄太华. 钢管混凝土束剪力墙受弯承载力公式推导[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2020, 29(2): 7-9.
HE J C,HUANG T H. Derivation of the bending bearing capacity formula of concrete-filled steel tubular shear wall [J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2020, 29(2): 7-9.(in Chinese)

[18] 王文铭. 多腔钢板-混凝土组合板静力及抗冲击性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2022.
WANG W M. Study on static and impact resistance performance of multi-cavity steel plate-concrete composite slabs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.(in Chinese)

[19] ABDEL-RAHMAN N,SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members [J]. Journal of Structural Engineering,1997,123(9):1135-1143.

[20] TAO Z,WANG Z B,YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research,2013,89:121-131.

[21] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781.

[22] 沈聚敏,王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
SHEN J M, WANG C Z, JING J J. Finite element analysis of reinforced concrete and limit analysis of plate and shell [M]. Beijing:Tsinghua University Press,1993.(in Chinese)

[23] 核电站钢板混凝土结构技术标准:GB/T 51340—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Technical standard for steel plate concrete structures of nuclear power plants: GB/T 51340—2018 [S]. Beijing: China Planning Press,2018.(in Chinese)

[24] 姚民乐,徐东方,高金良. 矩形钢管混凝土受弯构件承载力的研究[J]. 浙江建筑, 2006, 23(4):18-20.
YAO M L, XU D F, GAO J L. Study on bearing capacity of concrete-filled rectangular steel tubular flexural members [J]. Zhejiang Construction,2006,23(4):18-20.(in Chinese)

[25] 高金良, 姚民乐. 轴心受压钢管混凝土短柱中混凝土强度的研究[J]. 嘉兴学院学报, 2004, 16(3):72-73.

[26] 赵均海, 顾强, 马淑芳. 基于双剪统一强度理论的轴心受压钢管混凝土承载力的研究[J]. 工程力学, 2002, 19(2): 32-35.
ZHAO J H, GU Q, MA S F. The study of the axial compressive strength of concrete filled steel tube (CFST) based on the twin shear unified strength theory [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(2): 32-35.(in Chinese)

[27] 杨有福, 韩林海. 矩形钢管混凝土构件抗弯力学性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 41-48.
YANG Y F, HAN L H. Experimental studies on behavior of concrete-filled RHS members subjected to pure bending [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001,21(3): 41-48.(in Chinese)

[28] 吴乃森, 刘雪冬, 赵艳艳, 等. 方矩形钢管混凝土抗弯性能研究及规范对比[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, 29(4): 20-23.
WU N S, LIU X D, ZHAO Y Y, et al. Experimental investigation and code comparison on flexural bearing capacity of concrete-filled rectangular steel tubes [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2012, 29(4): 20-23.(in Chinese)

[29] 李斌, 闻洋. 矩形钢管混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(6): 51-52.
LI B, WEN Y. Study on mechanical properties of concrete-filled rectangular steel tube beams [J]. Building Structure, 2010, 40(6): 51-52.(in Chinese)