文章编号:1674-2974(2025)05-0099-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025051

装配式地连墙不同节点形式的界面抗剪能力对比试验研究

刘晓东[1,2],穆保岗[1†],黄李骥[2],刘明虎[2],邓会元[2],龚维明[1],赵佳[1],肖世伟[3]
(1. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 210096;
2. 中交公路规划设计院有限公司,北京 100010;
3. 国网江西省电力有限公司吉安供电分公司,江西 吉安 343009)

摘 要:随着建筑工业化进程的迅猛发展,预制装配式地连墙在地下工程中的应用日益广泛.然而,针对不同形式竖向接头抗剪能力研究试验尚显不足.本文设计了包含刚性和柔性接头在内的4种形式的模型构件,完成了直剪加载试验和分析.试验结果表明:同等条件下刚性接头抗剪承载能力均高于柔性接头,其中拉结钢管接头承载能力最高,承插式接头承载能力最低;4种接头剪切破坏方式均为脆性破坏,破坏时刚性接头的锚固构造会影响裂缝形态,刚性接头的裂缝中均存在沿钢管壁的竖直裂缝,而柔性接头的裂缝则跨越了接缝部位,应变测试数据进一步验证了上述剪切状态下裂缝的发展特征.同时研究发现:采用PCI (precast/prestressed concrete institute)的计算公式计算刚性接头的抗剪承载力较为准确.上述研究为预制装配式地连墙的推广应用奠定了基础.

关键词:装配式地连墙;抗剪强度;刚性接头;柔性接头;脆性破坏
中图分类号:TU476.3 **文献标志码**:A

Comparative Test Study on Interfacial Shear Resistance of Different Joints of Prefabricated Diaphragm Walls

LIU Xiaodong[1,2], MU Baogang[1†], HUANG Liji[2], LIU Minghu[2], DENG Huiyuan[2], GONG Weiming[1], ZHAO Jia[1], XIAO Shiwei[3]
(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100010, China;
3. Ji'an Power Supply Branch of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Ji'an 343009, China)

Abstract: With the rapid development of building industrialization, prefabricated diaphragm walls have been increasingly applied in underground engineering. However, existing research on the shear resistance of different types of vertical joints remains inadequate. This study designed four model components incorporating rigid and flexible joints and conducted direct shear loading tests and analysis. The test results showed that under the same conditions, rigid joints generally had higher shear-bearing capacity than flexible joints, among which the steel pipe

* **收稿日期**:2024-04-03
基金项目:中交集团重大科技研发项目(2021-ZJKJ-07), Major Science and Technology Research and Development Project of CCCC (2021-ZJKJ-07)
作者简介:刘晓东(1970—),男,江苏扬州人,东南大学博士研究生
† 通信联系人,Email: mubaogang@seu.edu.cn

tie joint has the highest load-bearing capacity and the socket-type joint has the lowest; all four types of joints failed due to brittle shear failure modes. During failure, the anchorage structure of rigid joints affected the crack morphology with vertical cracks along the steel pipe wall in rigid joints. However, the flexible joints exhibited cracks crossing the joint section. Strain test data further verified the development characteristics of cracks under shear conditions. Meanwhile, it is found that the PCI formula provides a relatively accurate calculation of the shear-bearing capacity for rigid joints. The above research lays a foundation for the promotion and application of prefabricated diaphragm walls.

Key words: prefabricated diaphragm wall; shear strength; rigid joints; flexible joints; brittle failure

传统的现浇钢筋混凝土地下连续墙应用极为普遍.近年来,随着国内外大力推进交通基础设施行业的装配化进程,环保高效、墙体质量可靠的装配式地连墙,开始在实际工程中得以应用[1-3].由于预制结构的接缝处既是受力的薄弱点,也是抗渗漏的关键部位,因此,针对装配式地连墙接头的研究显得尤为重要.

装配式地连墙接头的力学性能很大程度上决定了地连墙整体的变形特征和破坏模式.通常而言,刚性接头在抗弯能力方面优于柔性接头,但两者在抗剪能力上的差异目前尚不明确.近年来,针对装配式地连墙,国内外学者设计和研制了各种接头:尹涛等[4]提出了H形钢接头,许国光等[5]设计研究了自卡式装配地下连续墙,杨毅秋等[6]重点研究了套筒锚接接头,胡坚尉和杨睿[7]设计了"V"字形接头,黄大明等[8]则提出螺栓连接接头,利用模型试验、数值分析对各种接头的抗弯承载力和刚度进行了分析.银霞等[9]开展了接头板的冲切试验,刘永超、李兆平等装配式领域的多位学者也开展了部分原位试验验证[10-12],王景全则从理论分析出发,对比了弯矩对齿键抗剪承载力的影响[13],但总体上对预制构件的界面剪切验证尚不充分.

由于装配式地连墙难以满足作为永久结构的抗渗性能要求,目前,发展初期的装配式地连墙结构多为临时支护结构,主要承担水平荷载,该结构剪力作用下的脆性破坏特征,特别值得关注.针对此类工况,本文设计并开展了钢管咬合、拉结钢管、灌注桩、承插式4种接头共8个构件的抗剪模型试验,对比了其抗剪承载力、裂缝发展、破坏形态及接头处应变发展历程等差异.

1 4种接头形式

1.1 钢管咬合接头

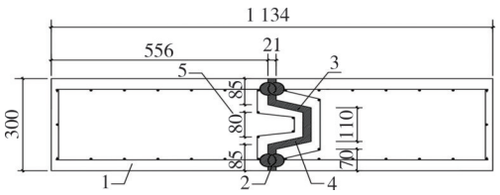
日本学者为使地下结构能够承受较大的水平力,研制出一种钢管咬合基础,基础的接头构造如图1所示.钢管咬合基础接头将切割好的圆形钢管在切口处焊接在一起,同时在钢管内部填筑砂浆,与钢管结合形成能够承受较大水平荷载的基础结构,这种连接方式能够承受较大的弯矩和轴力.



图1 钢管咬合基础接头原型

Fig.1 Prototype of steel pipe occlusal foundation joint

借鉴上述钢管咬合基础接头的构造,设计了采用双钢管咬合接头的装配式地下连续墙接头,分别置于接头的内外侧.钢管咬合接头由左右预制墙段和中间灌浆料三部分组成.每一幅预制墙段包含2个预埋圆形钢管,预制墙段之间通过两个圆形钢管咬合成整体墙幅,拼接后在中间咬合部分及接缝处填充高强灌浆料.双钢管咬合接头属于刚性接头,图2为钢管咬合接头的细部构造图.



(1—预制墙段,2—预埋圆形开口钢管,3—接缝注浆料,4—预制凹槽,5—预制凸榫)

(a)接头形式(俯视)(单位:mm)



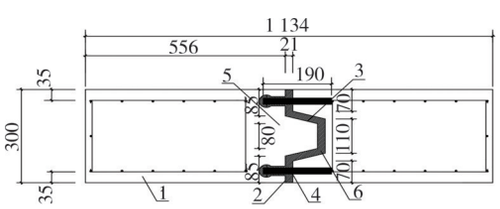
(b)实景图

图 2　钢管咬合接头

Fig.2　Steel pipe occlusal joint

1.2　拉结钢管接头

拉结钢管接头的构造形式以钢管咬合接头为基础,将其中一只钢管用带锚固板的钢筋替代,锚固筋与钢管结合形成的拉结钢管接头同样能够承受弯矩与剪力,也称为C-T接头,拉结钢管接头也属于刚性接头.拉结钢管接头由左右预制墙段和中间灌浆料三部分组成.每一幅预制墙段包含两个预埋圆形钢管或两个预埋锚固筋,预制墙段之间通过圆形钢管和锚固筋拼接成整体墙幅,拼接完成之后在中间接缝处填充高强灌浆料.图3为拉结钢管接头的构造与细部构造.



(1—预制墙段,2—圆形开口钢管,3—高强灌浆料,4—锚固筋,5—预制凹槽,6—预制凸榫)

(a)接头形式(俯视)(单位:mm)



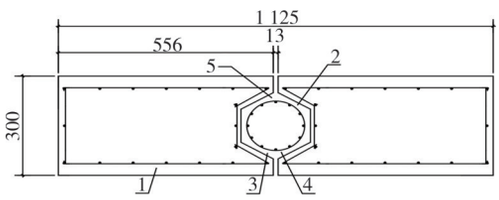
(b)试件制作图

图 3　拉结钢管接头

Fig.3　Rachel steel pipe joint

1.3　灌注桩接头

装配式地连墙灌注桩接头实质上与现浇地连墙接头类似.由左右预制墙段、灌注桩和中间灌浆料组成,预制墙段之间通过现浇灌注桩和接缝注浆连接在一起.一般认为灌注桩接头不能够承受较大的弯矩,但能承受一定的剪力,属于柔性接头.图4为灌注桩接头的构造图.



(1—预制墙段,2—圆形灌注桩,3—高强灌浆料,4,5—预制凹榫)

(a)接头形式(俯视)(单位:mm)



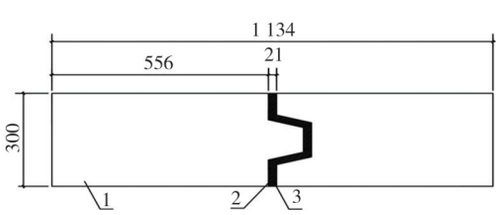
(b)试件制作图

图 4　装配式地连墙灌注桩接头

Fig.4　Prefabricated diaphragm wall cast-in-place pile joint

1.4　承插式接头

装配式地连墙的承插式接头由左右预制墙段和中间灌浆料组成.预制墙段之间通过接缝灌浆料连接在一起.承插式接头同样不能够承受弯矩,但能承受一定的剪力,属于柔性接头.图5为装配式地连墙承插式接头的构造图.



(1—预制墙段,2—预制凸榫,3—高强灌浆料)

图 5　承插式接头(单位:mm)

Fig.5　Socket joint(unit:mm)

2　4种接头试件的抗剪试验

2.1　试件制作

刚性接头(钢管咬合接头、拉结钢管接头)试件均由左右墙段和中间灌浆料三部分组成,分两次制作完成.

依托工程的装配式地下连续墙截面采用C50混凝土,单元墙幅截面长4.5 m,厚1.2 m,单节段高8.375 m,试件模型的几何缩尺比例考虑试验场地空间和制作方法、试件的边界条件、荷载.综合考虑上

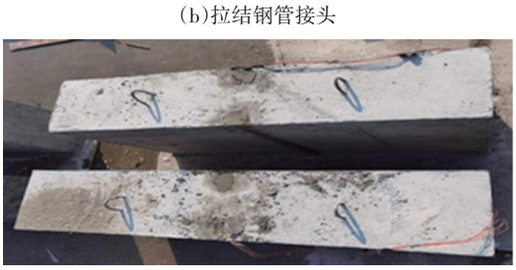
述因素,取相似比1∶4,抗剪试件的厚度0.3 m(控制尺寸),长宽分别为1.133 m、0.6 m,均采用实心截面,其中柔性接头(灌注桩接头、承插式接头)的试件为对比试验组.图6为构件浇筑后的实景照片.



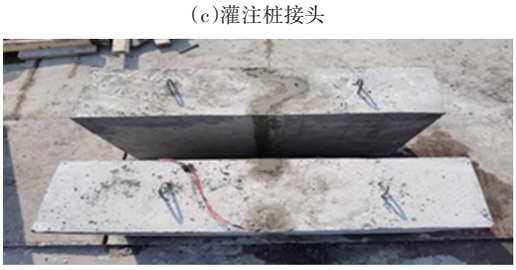
(a)钢管咬合接头



(b)拉结钢管接头



(c)灌注桩接头



(d)承插式接头

图6 试件实景

Fig.6 Actual scene of the specimens

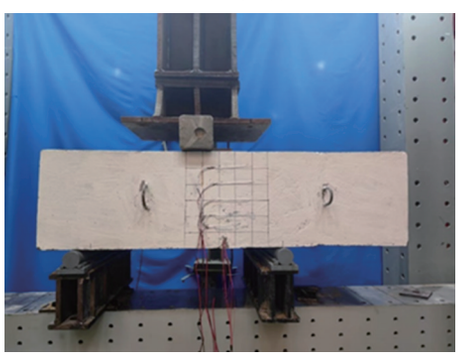
2.2 加载条件

4种接头的抗剪试验参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)[14],试件下方支座采用一端简支一端滑动,当部分构件较长、自重较大时,增加一个支座防止构件悬挑过多造成影响.试件上方由千斤顶反力架施加集中力F,加载示意图如图7所示.

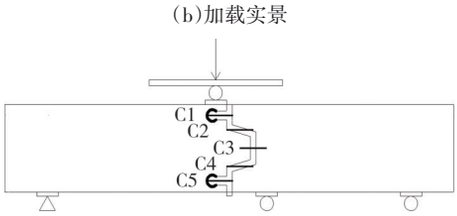
加载方式参考上述国家试验标准,先用伺服液压机位移控制千斤顶下落进行预加载,检查应变片、位移计的状况是否良好并进行相应调整,确认无误



(a)加载平台



(b)加载实景



(c)接头加载示意及应变片布置

图7 抗剪加载示意图

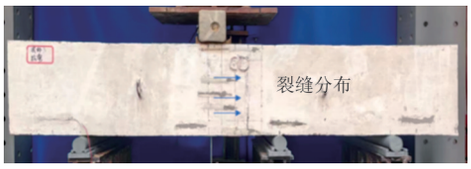
Fig.7 Schematic diagram of shear loading

后再进行正式加载.加载过程中每一级荷载持续时间为5 min,观察裂缝开展、应变发展情况.先按级差5 kN从零开始加载至墙身或接缝处出现裂缝,之后改为位移加载,直至试件完全破坏.

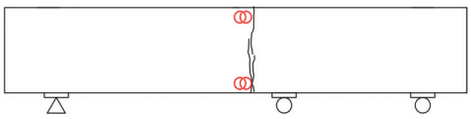
3 试验结果

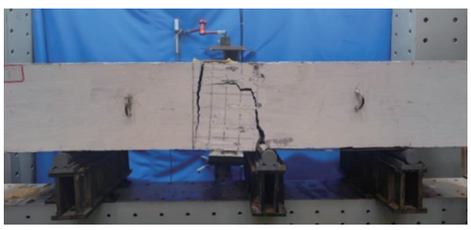
3.1 试件破坏形态

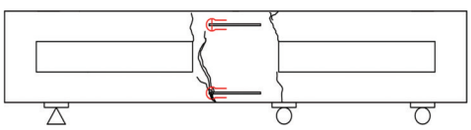
不同接头构件抗剪试验破坏及裂缝分布如图8所示.钢管咬合接头在构件破坏时其裂缝竖向延伸,并贯穿整个构件;拉结钢管接头在破坏时裂缝从拉结钢管与混凝土接触界面产生并由此点斜向延伸至构件底部.由此可知,刚性接头构件破坏时钢管与混凝土接触界面最先被“压溃”,裂缝由此界面竖直开展.灌注桩接头和承插式接头破坏时裂缝沿斜截面开展并延伸,跨越了连接部位,在底部达到最大值.

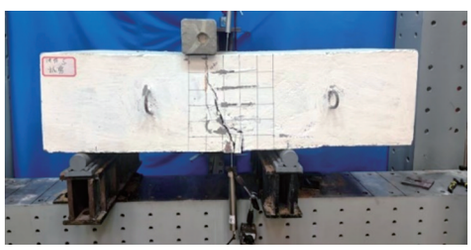


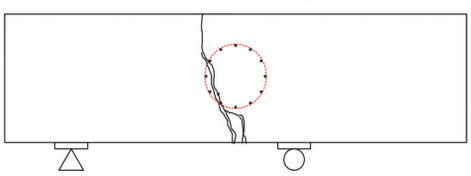
(a)钢管咬合接头破坏实景

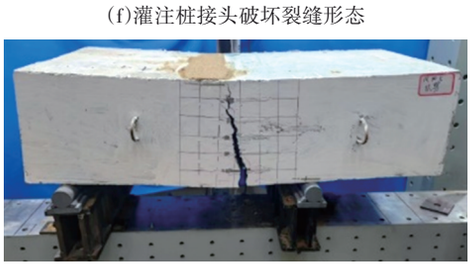

(b)钢管咬合接头裂缝形态


(c)拉结钢管接头破坏实景


(d)拉结钢管接头裂缝形态


(e)灌注桩接头破坏实景


(f)灌注桩接头破坏裂缝形态


(g)承插式接头破坏实景

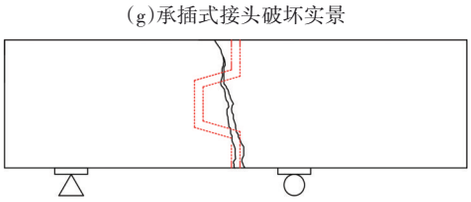
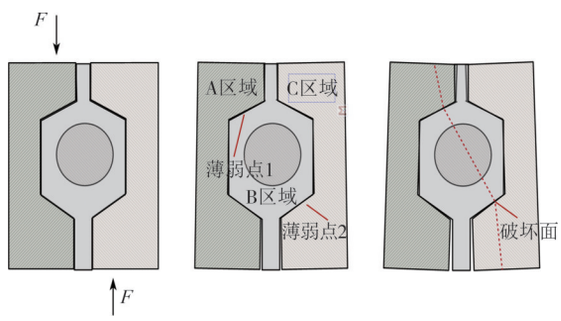

(h)承插式接头破坏裂缝形态

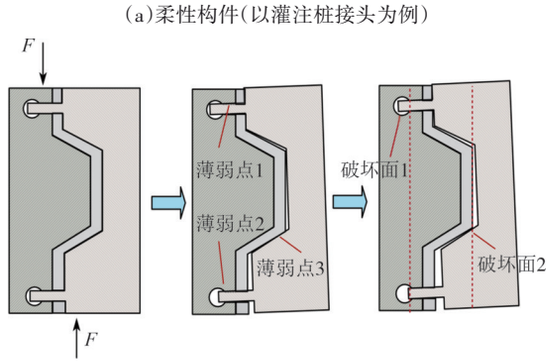
图 8　试件的破坏实景及裂缝分布

Fig.8　Damage scene and crack distribution of specimens

由图 9(a)(b)可知,柔性接头(以灌注桩接头为例)出现裂缝时,A、B 区域以及 C、B 区域出现相对滑移,在接触面上产生两个薄弱点.随着加载继续,裂缝进一步扩展,于是两个薄弱点之间形成斜向贯穿裂缝.而刚性接头(以拉结钢管接头为例)与柔性接头不同,因为存在连接筋材,在连接件与混凝土接触的部位,会出现应力集中,进而在构件破坏时,该位置就会形成贯通的破坏面.



(a)柔性构件(以灌注桩接头为例)



(b)刚性构件(以拉结钢管接头为例)

图 9　抗剪开裂机制示意

Fig.9　Load-bearing mechanisms of different structural components

因此,对比柔性接头构件与刚性接头构件,在构件达到极限状态时,连接件和剪力键均会对构件裂缝形态产生影响.

3.2　剪力-滑移曲线

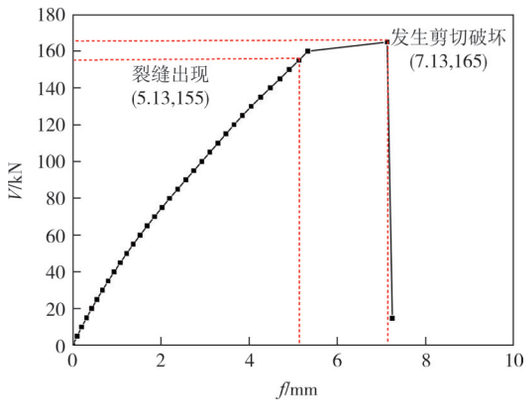
结合面受剪承载力,主要由界面剪切摩擦作用、连接件销栓抗剪作用以及剪力键作用[15]几部分构成,详见式(1).

$$V_{u(P)} = V_f + V_{bv} + V_{sv} \tag{1}$$

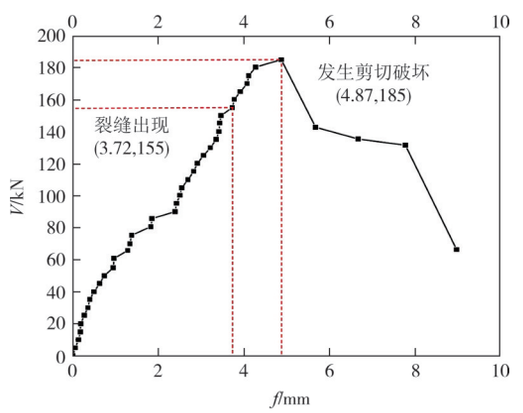
式中:$V_{u(P)}$为界面抗剪强度;V_f为剪切摩擦力;V_{bv}为剪力键提供剪力;V_{sv}为钢筋(钢管或灌注桩)抗剪强度.

4 种接头类型的试件跨中荷载-挠度曲线如图 10 所示,4 种接头发生剪切破坏时对应的承载力由大到小分别为拉结钢管接头(185 kN)>钢管咬合接头(165 kN)>灌注桩接头(155 kN)>承插式接头(140 kN).

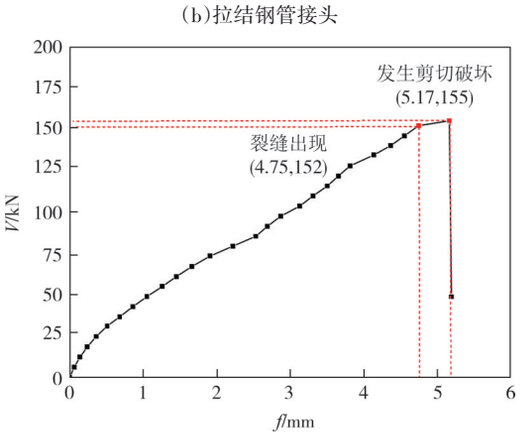
由荷载-挠度曲线可知:4 种接头的抗剪强度均



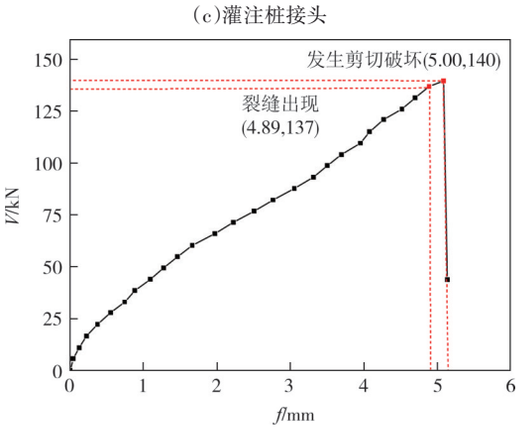
(a)钢管咬合接头



(b)拉结钢管接头



(c)灌注桩接头



(d)承插式接头

图 10 荷载(剪力)-滑移曲线

Fig.10 Curve of load (shear)-slip

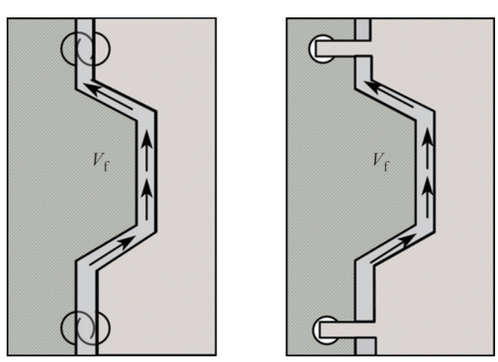
迅速退化,皆可视为脆性破坏.接头试件的抗弯试验加载过程均可分为3个阶段:

1)加载初期,荷载-挠度曲线的斜率基本保持不变,接缝处各构件均处于弹性阶段.如图11(a)~(d)所示,该阶段的抗剪力主由界面摩阻力提供,此时刚性接头的筋材连接件未受力.

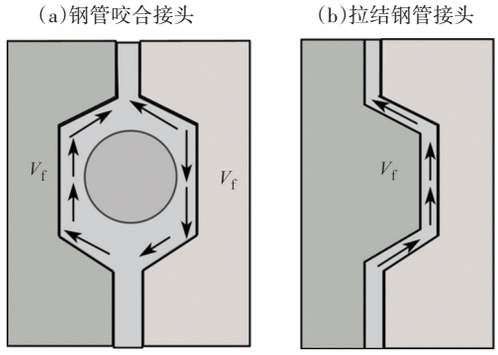
2)当荷载加载值大于最大静摩擦力时,混凝土与灌浆料之间发生相对滑移,裂缝出现.与柔性构件不同,刚性构件的连接钢管开始受力.

图11(a)~(d)所示的4种构件出现裂缝时所受剪力分别为:155 kN、155 kN、152 kN、137 kN.

3)随着加载值进一步加大,裂缝开始发展,在荷载达到极限值时,钢管咬合接头所受剪力为165 kN,拉结钢管咬合接头为185 kN,与其对应的开裂荷载(155 kN)比较可以看出:柔性接头在裂缝出现后仍可承受一定荷载直至破坏;而灌注桩接头受剪承载力极限值为155 kN,承插式接头则为140 kN,对比此类接头的开裂荷载(152 kN、137 kN)可以发现:柔性接头在出现裂缝后很难继续承受荷载,会迅速破坏.



(a)钢管咬合接头 (b)拉结钢管接头



(c)灌注桩接头 (d)承插式接头

图 11 弹性阶段不同接头的界面抗剪机理

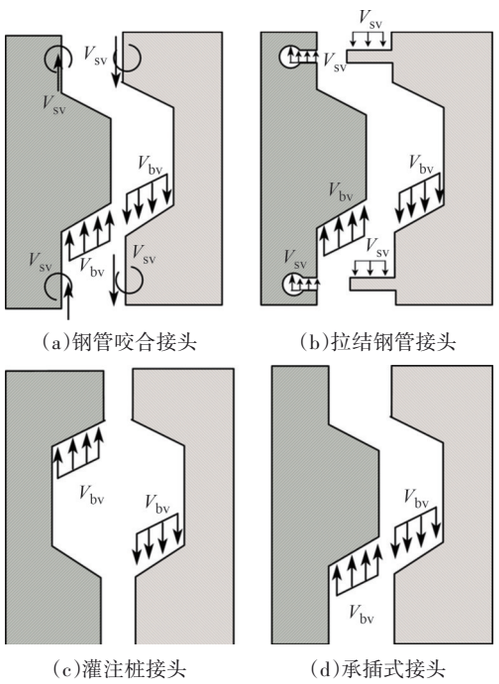
Fig.11 Shear resistance mechanisms at the interfaces of different joints in the elastic stage

破坏阶段不同接头抗剪机理如图12(a)~(d)所示:

1)滑移出现之后,抗剪承载力主要由钢筋或钢管以及剪力键承担.相较于拉结钢管接头,钢管咬合

接头的约束类似于“铰接”,这种约束程度致使其抗剪承载力低于拉结钢管接头,所以钢管咬合接头的抗剪承载力极限值小于拉结钢管.

2)相较于刚性接头,柔性接头抗剪承载力主要由剪力键提供,在裂缝出现后,柔性构件抗剪承载力很快达到极限值,在本次模型试验中,刚性接头的连接筋材可将抗剪性能提高约32%.



(a)钢管咬合接头　(b)拉结钢管接头

(c)灌注桩接头　(d)承插式接头

图 12　破坏阶段不同接头的界面抗剪机理

Fig.12　Shear resistance mechanisms at the interfaces of different joints in the failure stage

将试验得到的4种接头的剪力极限值与规范公式[16](只考虑截面抗剪能力)计算得到的剪力理论值对比,对比结果如表1所示.拉结钢管接头极限剪力试验值高出理论值16%,承插式接头极限剪力试验值低于理论值12%.

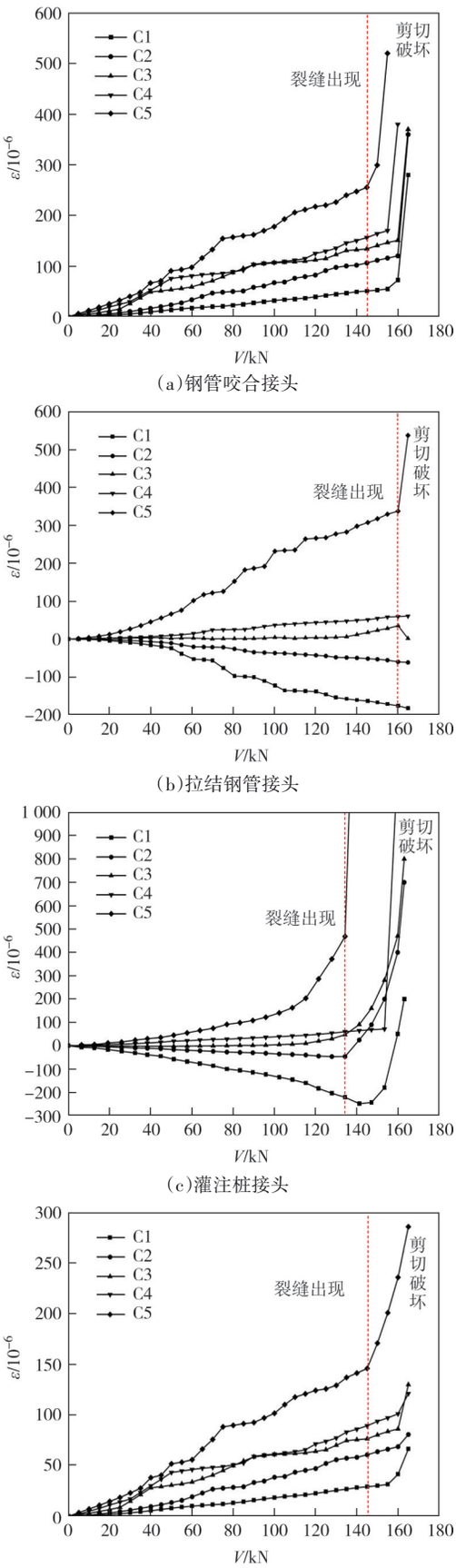
表 1　极限剪力试验值与计算值对比

Tab.1　Comparison of the ultimate shear force test value and the calculated value

试件类型	试验值 V/kN	计算值 V_u/kN	试验值/计算值
钢管咬合接头	165.05	159.16	1.04
拉结钢管接头	185.11	159.16	1.16
灌注桩接头	155.00	159.16	0.97
承插式接头	140.00	159.16	0.88

3.3　应变发展历程

通过在各个试件接头部位不同位置埋设应变片,可得到不同加载大小条件下各测点[布置位置见图7(c)]应变变化规律,如图13所示.



(a)钢管咬合接头

(b)拉结钢管接头

(c)灌注桩接头

(d)承插式接头

图 13　应变发展历程

Fig.13　Strain development process

在刚性接头试件出现裂缝之前,灌浆料各个测点(C1~C5)的应变都相对较小,且应变增长呈线性.刚性接头试件一旦出现裂缝,位于最下方的应变片C5的应变迅速增大至300 με,紧接着,在短时间内C1~C4应变片应变也迅速增大,裂缝从下端迅速延伸至顶端,试件承载能力急剧下降,试件发生脆性破坏.

在柔性接头试件出现裂缝之前,混凝土各个测点的应变都比较小,且增长基本呈线性.当柔性接头试件接头处出现裂缝后,应变片C5的应变迅速增大,与此同时,试件上侧的应变片(C1~C3)因裂缝的扩展,应变值开始从负转为正.其中,承插式的破坏应变值较小,试件的破坏模式表现为脆性破坏.

3.4 结果分析

从剪力传递的路径来看,与常见的横穿构件的斜截面剪切不同,预制构件的剪切属于界面剪切.在计算界面抗剪承载力时,通常采用摩擦抗剪模型及对应的修正理论.不同国家和地区针对墙幅接头界面抗剪承载力的计算,各自给出了不同的规范公式,主要考虑界面混凝土部分和连接钢筋两部分对抗剪承载力的贡献.当没有连接钢筋时,则只考虑混凝土部分的贡献.

表2为采用不同规范方法进行计算的结果.在ACI-318-05规范[17]和香港规范[18]中,仅考虑了横跨接头的钢筋对抗剪承载力的贡献,忽略了冷缝处混凝土的连接效应.在PCI设计手册[19]和欧盟规范[20]中,同时考虑接头部位混凝土连接和横置钢筋的效应.PCI设计手册针对钢管咬合接头和拉结钢管接头的计算值与试验值比较接近,但在计算时弱化了冷缝处混凝土连接对构件抗剪承载力的贡献.

表2 不同方法剪力计算值对比

Tab.2 Comparison of calculated shear force values for different methods kN

不同方法	钢管咬合接头	拉结钢管接头	灌注桩接头	承插式接头
ACI-318-05	158.4	160.1	113.2	—
香港规范	150.3	165.2	103.9	—
PCI设计手册	181.4	180.9	131.0	118.5
欧盟规范	211.8	220.5	183.0	109.2

4 结 论

本文通过室内模型试验对4种接头的抗剪性能进行了对比研究,得到以下结论:

1)刚性接头、柔性接头在剪力作用下都是脆性破坏,其中抗剪能力由大到小依次为:拉结钢管接头、钢管咬合接头、灌注桩接头、承插式接头,且刚性接头整体上优于柔性接头.

2)在裂缝形态上,在直剪作用下钢管咬合和拉结钢管两种刚性接头的裂缝分布均有沿管壁开展的竖直裂缝,且钢管和锚筋等连接筋材的存在会影响裂缝的开展.其中,柔性接头的裂缝均呈现一定倾斜角度,且跨越了接头位置.

3)接头附近的应变测试表明,无论是刚性接头还是柔性接头,在试件出现裂缝前,应变量的增长呈线性.一旦出现裂缝,应变值会迅速增大,试件承载能力急剧下降,试件发生脆性破坏.

4)PCI设计手册尽管弱化了混凝土齿键截面的贡献,但因其考虑了连接钢筋的作用,因此,针对刚性接头的咬合钢管和拉结钢管的抗剪计算,利用PCI设计手册得到的计算值与试验值较为相近,可用于刚性接头抗剪能力的计算.

上述试验研究仅初步探讨了4种接头在应用层面的抗剪性能及对比分析结果.对于刚性接头而言,仍需从机理层面明确其抗剪能力的来源,并量化相关影响因素.此外,还需进一步研究刚性接头作为永久结构使用时,在轴力、弯矩和剪力等多种内力叠加情况下的受力性能.

参考文献

[1] 朱旻,孙晓辉,陈湘生,等. 地铁地下车站绿色高效智能建造的思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2037-2047.
ZHU M, SUN X H, CHEN X S, et al. Green, efficient, and intelligent construction of underground metro station[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(12): 2037-2047.(in Chinese)

[2] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1849-1870.
YANG X R. Development and prospect of construction technology for prefabricated metro station in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11):1 849-1870.(in Chinese)

[3] FARHAT M, ISSA M A. Fabrication and construction procedures of a totally precast concrete counterfort retaining wall system for highways [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2017, 22(2): 04016026.

[4] 尹涛,徐涛,李大龙,等. H形钢接头在莫桑比克马普托大桥超深地下连续墙中的应用[J]. 公路, 2018, 63(2):8 4-87.
YIN T, XU T, LI D L, et al. Application of H-shaped steel joint in ultra-deep diaphragm wall of Maputo Bridge in Mozambique[J]. Highway, 2018, 63(2): 84-87.(in Chinese)

[5] 许国光, 油新华, 耿冬青, 等. 自卡式预制地下连续墙接头工艺研究[J]. 施工技术, 2018, 47(3): 135-136.
XU G G, YOU X H, GENG D Q, et al. Study on the technology of self-clamping precast diaphragm wall joints [J]. Construction Technology, 2018, 47(3): 135-136. (in Chinese)

[6] 杨毅秋, 周慧超, 杨贵生, 等. 装配式地下连续墙设计施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 91-97.
YANG Y Q, ZHOU H C, YANG G S, et al. Research on the design and construction technique of prefabricated diaphragm walls [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(2): 91-97. (in Chinese)

[7] 胡坚尉, 杨睿. 预制地下连续墙竖向拼接接头研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 2397-2400.
HU J W, YANG R. Study on vertical splicing joint of prefabricated diaphragm wall [J]. Building Structure, 2022, 52 (Sup.2): 2397-2400. (in Chinese)

[8] 黄大明, 黄栩, 王坤为, 等. 分节预制地下连续墙螺栓连接横向接头力学性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(1): 138-143.
HUANG D M, HUANG X, WANG K W, et al. Research on mechanical property of bolt connection transversal joint of segmental pre-cast diaphragm wall [J]. Building Structure, 2022, 52(1): 138-143. (in Chinese)

[9] 银霞, 袁昌, 李栋伟, 等. 新型预制地下连续墙接头力学与抗渗性能研究[J]. 施工技术, 2021, 50(9): 99-102.
YIN X, YUAN C, LI D W, et al. Study on mechanical property and impermeability of new precast diaphragm wall joint [J]. Construction Technology, 2021, 50(9): 99-102. (in Chinese)

[10] 刘永超, 石长城, 杨贵生, 等. 装配式地连墙原型试验及受力变形特性研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(8): 85-90.
LIU Y C, SHI C C, YANG G S, et al. The in-situ test and study of deformation characteristics of prefabricated diaphragm walls [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(8): 85-90. (in Chinese)

[11] 李兆平, 王臣, 苏会峰, 等. 装配式地铁车站结构接头混凝土裂缝及接缝变形规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 409-413.
LI Z P, WANG C, SU H F, et al. An experiment study on the evolution law of concrete structure crack and joint seam deformation for tenon groove joints in the prefabricated metro station [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup.1): 409-413. (in Chinese)

[12] AHMED G H, AZIZ O Q. Shear strength of joints in precast posttensioned segmental bridges during 1959-2019, review and analysis[J]. Structures, 2019, 20: 527-542.

[13] 王景全, 刘桐旭, 王震. 考虑弯距影响的混凝土键齿接缝抗剪承载力计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 553-558.
WANG J Q, LIU T X, WANG Z. Calculation method for shear strength of concrete keyed joints considering bending effects [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(3): 553-558. (in Chinese)

[14] 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.
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[15] 赵作周, 周剑, 侯建群, 等. 装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 40-47.
ZHAO Z Z, ZHOU J, HOU J Q, et al. Review of studies on shear resisting mechanisms and calculating formulas of shear resisting capacity of horizontal joints in fabricated reinforced concrete shear wall structures [J]. Building Structure, 2015, 45(12): 40-47. (in Chinese)

[16] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010(2015 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 (2015 edition)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[17] ACI Committee 318. ACI 318-05 building code requirements for reinforced concrete [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2005.

[18] Bulidings department code of practice for precast concrete construction[S]. Hong Kong: Hong Kong Building Department, 2003.

[19] PCI design handbook: precast and prestressed concrete (MNL-120-04) (6th edition) [S]. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2004.

[20] EN 1992-1-1: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.