

装配式整体式结构节点钢筋搭接连接方式研究综述

何小华¹, 高 强², 尹焕芝³

- (1. 西安市轨道交通集团有限公司, 陕西 西安 710021;
2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010;
3. 长安大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 为系统梳理装配式整体式结构节点钢筋搭接连接技术的研究进展与应用现状, 系统综述装配式整体式结构中钢筋搭接连接节点的传力机理与力学性能, 对比直接搭接(绑扎搭接、U形筋搭接、焊接)与间接搭接(螺旋箍筋约束浆锚、波纹管浆锚、灌浆套筒)的构造差异及适用场景, 分析了各国规范中搭接长度计算方法的差异性。研究表明: U形筋搭接凭借核心混凝土柱的销轴传力机制, 在梁柱节点及预制构件拼接中表现优异, 搭接长度为其关键控制参数; 间接搭接虽可显著缩短搭接区段, 但承载机理复杂, 实际工程需综合施工便捷性与力学合理性选择适配类型。国内规范未区分直接和间接搭接构造, 美国ACI 318—19首次明确间接搭接钢筋净距限值, Model Code通过粘结强度设计值关联混凝土强度与锚固长度。提出了未来需重点加强理论与实践协同、标准化体系构建及全寿命周期性能优化等方面的研究。

关键词: 装配式结构; 钢筋搭接; 传力机理; U型筋搭接; 搭接长度

中图分类号: TU793.257

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)05—0082—10

A Review of Reinforcement Lap-splicing Techniques for Joints in Precast Monolithic Concrete Structures

HE Xiaohua¹, GAO Qiang², YIN Huanzhi³

- (1. Xi'an Municipal Railway Transportation Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China;
2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;
3. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to review the research progress and application status of reinforcement lap connection technologies in assembled monolithic structural joints, the force transfer mechanisms and mechanical properties of reinforcement lap connection nodes were comprehensively analyzed. The structural differences and application scenarios between direct lap splices and indirect lap splices were compared, and the discrepancies in lap length calculation methods across various codes were analyzed. The results demonstrate that U-shaped rebar direct splicing proves optimal for prefabricated beam-column joints and component assembly, with splice length acting as a dominant control parameter. While indirect splicing substantially minimizes splice regions, its intricate load-transfer characteristics demand systematic evaluation of constructability versus mechanical integrity in practice. Current code systems remain underdeveloped, with only ACI 318—19 stipulating explicit specifications for indirect splice configurations. Addressing limitations in current research, future efforts should prioritize theory-practice synergy, standardized system development, and life-cycle performance optimization.

Keywords: assembled structures; reinforcement lap connection; force transfer mechanism; U-bar lap; lap connection length

国务院积极部署大力发展装配式建筑的八项重点任务,计划在未来10年内将装配式建筑占新建建筑面积的比例提升至30%^[1]。推进建筑结构装配化是助力达成“碳达峰、碳中和”战略目标的重要举措,也是协同推进智能建造与新型建筑工业化,促进乡村振兴与城市融合发展的关键途径^[2-3]。

装配式混凝土结构的快速发展对节点连接的可靠性和高效性提出了更高要求,其中钢筋搭接连接是关键环节。在装配式建筑结构体系中,安全高效的钢筋连接方式对于确保荷载的可靠传递、维护结构的整体稳定性及安全性能至关重要。连接节点的构造与性能直接关系到结构的整体性、承载能力、变形能力以及抗震性能。装配式结构中广泛应用的节点连接方式包括灌浆套筒连接、螺栓连接、搭接连接以及预留孔浆锚搭接连接等^[4-7]。其中,钢筋搭接连接节点因其灵活性高、适用性广、施工便捷、成本效益优势显著,成为装配式结构中应用最为广泛的连接方式之一。按搭接方式不同,钢筋搭接连接方式可分为直接搭接和间接搭接。钢筋直接搭接是指两根钢筋通过绑扎、U型筋或焊接等方式直接重叠固定,主要依靠混凝土粘结力实现荷载传递的连接方式,无需中间连接件^[8-10]。钢筋间接搭接是通过螺旋箍筋、波纹管或灌浆套筒等约束装置包裹钢筋搭接区域并注入灌浆料,形成机械咬合与粘结共同作用的连接方式,适用于对强度和耐久性要求较高的关键部位^[11-12]。直接搭接操作简便(如绑扎搭接仅需金属丝绑扎,U型筋搭接通过预制U型筋与现浇混凝土结合即可完成),而间接搭接则涉及预制孔道成型、约束装置安装及压力灌浆等复杂工序,对施工精度要求较高^[13-14]。在成本效益方面,直接搭接材料成本显著低于间接搭接,但间接搭接可有效缩短搭接长度,在大直径钢筋工程中综合经济性更优^[15]。力学性能方面,直接搭接延性较好但强度较低,绑扎搭接极限强度约为母材强度的85%^[16],而间接搭接则可通过约束装置提升强度,且抗震性能优异^[17]。因此,适用场景上,直接搭接适用于非关键部位的小直径钢筋,如板类分布筋连接;而间接搭接多用于抗震设防烈度 ≥ 7 度地区的大直径钢筋连接,如装配式框架柱主筋。

本文针对装配式结构钢筋搭接连接的两种主要方式,系统梳理国内外研究现状,归纳总结钢筋搭接连接节点的构造方法、传力机理及受力特性,对比各国规范中对钢筋搭接长度计算方法及构造的不同规定,并从施工缺陷影响、标准化设计体系、低碳智能

化等方面提出了装配式钢筋搭接连接的发展挑战与未来方向,旨在为预制装配式混凝土结构中钢筋连接提供参考。

1 直接搭接连接

1.1 绑扎搭接连接

绑扎搭接作为一种常见的钢筋连接技术,其操作方式是将两根钢筋的末端部分相互重叠一定长度,然后用金属丝或专用绑扎线固定以实现连接。这种连接方式简单易行、成本较低,适用于各种不同条件的施工作业环境,尤其适用于受拉和受压钢筋的连接。然而,绑扎搭接的传力性能相对较弱,可能会在搭接区域占用较多截面面积,影响混凝土的浇筑和振捣密实度。

绑扎搭接因其钢筋相互重叠的特点,通常适合于连接直径较小的钢筋^[5]。该连接方式易受多种因素影响,包括钢筋的外形特征、强度等级、混凝土的物理性能以及搭接钢筋之间的净间距等。如图1所示,在浇筑时,由于钢筋由绑扎丝直接固定,混凝土难以完全填充进绑扎区段内,导致钢筋和混凝土之间的粘结作用未能充分展现,当钢筋受力时,搭接区段的钢筋会因横向挤压效应而受到影响,可能会产生分离而导致试件破坏^[6]。

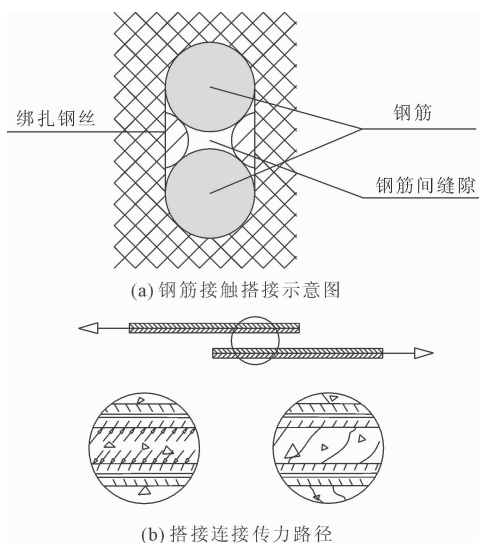


图1 钢筋接触搭接机理图

1.1.1 传力机理

钢筋的传力性能与其在混凝土中的粘结锚固作用密切相关,而钢筋的绑扎搭接连接可视作粘结锚固作用的一种特殊形式,即两根钢筋并列锚固且相向承受荷载^[7]。钢筋的搭接方式对其粘结应力的分布有着显著影响^[18],并且在此类接触搭接中,粘

结力通常未出现明显损耗^[19]。绑扎搭接连接主要是由化学粘附力、摩擦力以及钢筋与混凝土的机械咬合力来进行力的传递。如图 2 所示,在受到外力作用时,一根钢筋会通过其搭接区域将荷载传递给周围的混凝土,混凝土凭借这种约束作用,再将荷载有效传递至另一根相对方向的钢筋,从而实现两根反向钢筋间应力的有效传递。

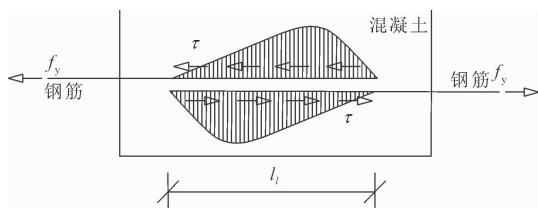


图 2 搭接传力模型

1.1.2 节点力学性能

绑扎搭接连接是工程中最常用的连接方式之一,学者们对使用绑扎搭接连接方式的节点传力性能进行大量试验研究。胡伦坚等^[20]研究了 HRB500 级钢筋绑扎搭接连接性能,通过拔出法试验分析了钢筋与混凝土的粘结锚固性能。部分学者发现接触搭接方式的连接性能优于非接触搭接^[21],并总结了绑扎搭接等各种搭接方式的优缺点^[22]。不同搭接长度对搭接连接节点力学性能影响显著,是连接节点质量的重要控制因素^[23],因此规范中给出具体搭接长度^[24]。

1.2 U 型筋搭接连接

U 型筋搭接连接是装配式混凝土结构中常用的钢筋连接技术,施工时将预留的 U 型钢筋交错搭接,插入水平钢筋后浇筑混凝土,形成整体结构(图 3)。U 型筋搭接连接施工效率高,预制构件可以在工厂中生产,然后在施工现场进行快速组装,减少了现场施工时间和劳动力成本。同时,节点的承载力和抗震性能较高,能够有效增强结构的整体性能。然而,U 型筋搭接连接需要精确计算搭接长度和钢筋的配置,设计过程较为复杂,主要适用于装配式混凝土结构梁柱节点或预制构件的拼接处。

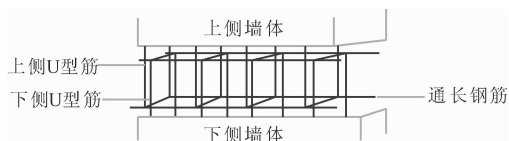


图 3 U 型筋搭接连接

1.2.1 传力机理

U 型钢筋搭接连接节点主要通过两侧 U 型筋

构建的互锁环内的核心混凝土柱来实现力的传递,主要起到抗剪作用。其工作机制近似于销轴原理,核心混凝土柱的两侧钢筋所承受的拉力能够自相平衡,因此并不存在传统意义上的钢筋锚固问题。

1.2.2 节点力学性能

U 型筋搭接连接节点的破坏主要包括 U 型筋拉断、插筋屈服和混凝土剪切破坏,学者们通过静力荷载和低周往复荷载试验研究其静力性能和抗震性能。余志武等^[25]通过试验与数值模拟,深入研究了 U 型套箍钢筋连接中 U 型钢筋的锚固性能,涵盖了锚固试件在受力过程中的荷载-位移曲线变化、破坏形态、混凝土开裂行为、钢筋变形特性以及钢筋混凝土之间的粘结性能等多个方面,拉拔试验和数值模拟显示,U 型钢筋深埋时,试件表现出较好的延性和可靠性。焦安亮^[26]研究发现,U 型筋混凝土剪力墙试件的锚固性能随着 U 型筋扣合高度的增加而提升。王世昕^[27]探讨了 U 型筋搭接对预制梁承载能力的影响,据此提出了一个用于确定搭接长度的计算公式,并通过试验评估了不同搭接长度下试件的力学性能表现。陈宜虎等^[28]提出 U 型钢筋环扣连接技术在不同搭接长度下优化了节点性能,建议搭接长度为 $0.6l_{IE}$ (l_{IE} 为抗震搭接长度)。张锡治等^[29]对若干采用 U 型筋搭接连接的上下预制墙体进行了轴拉试验,发现搭接长度足够时可以提升上下预制墙体的承载力,而搭接长度不足则导致混凝土剪切破坏。冯帅克等^[30]研究了半预制装配式地下车站侧墙底节点的抗震性能,通过拟静力试验和有限元分析,发现 U 型钢筋搭接连接能够有效传递钢筋应力,预制拼装节点在连接区内可能出现 U 型筋弯弧内部混凝土的压碎破坏以及 U 型筋弯弧段的断裂破坏。

1.3 焊接连接

钢筋焊接连接是通过高温熔融金属实现钢筋端部冶金结合的一种连接方式,属于典型的刚性连接技术,主要分为电弧焊和闪光对焊两大类。其核心工艺在于利用焊接热量使母材与填充金属形成连续均质的焊缝区域。电弧焊通过电极与钢筋间产生的电弧热局部熔融钢筋端面并引入焊条材料填充,适用于现场施工及复杂位置连接;闪光对焊则通过电阻热使钢筋端部迅速熔化并在顶锻压力下完成原子扩散结合,多用于工厂化预制场景。焊接连接的优势在于接头强度高、施工效率高,且不受钢筋直径限制。但其应用受限于作业环境、工艺控制难度及热影响区性能退化风险。

1.3.1 传力机理

焊接节点的传力依赖于焊缝区域金属的连续性及其界面冶金结合的完整性。当外力作用于焊接节点时,应力通过母材基体传递至焊缝热影响区(Heat affected zone, HAZ)和熔合区。在理想焊接条件下,熔合区因经历再结晶过程形成细晶组织,其屈服强度通常高于母材,使应力在此区域呈现均匀分布特征。然而,在实际工程中由于热输入不均衡导致的热影响区晶粒粗化、残余应力集中及微观缺陷的存在,接头往往成为应力重分配的敏感区域。电弧焊接头中,焊脚长度与喉部厚度共同决定了抗剪承载能力,闪光对焊则依赖顶锻压力形成致密的穿晶结构,应力传递呈现轴向对称性^[31]。在循环荷载下,焊缝几何突变处易产生疲劳裂纹,需要通过后处理降低应力集中系数。此外,焊接热循环引起的相变可能导致接头脆化,需通过焊后热处理或限制碳当量进行控制。

1.3.2 节点力学性能

焊接节点的力学性能受工艺参数、材料匹配度及加载模式的综合影响。静力拉伸试验表明,优质焊接接头的断裂位置通常位于母材而非焊缝,证明其强度储备充足,例如 HRB400 钢筋闪光对接头的平均极限抗拉强度可达 625 MPa,超强系数达 1.15^[32]。但低周往复荷载试验揭示了焊接节点的潜在薄弱环节:热影响区因经历多次热循环易形成马氏体脆性相,导致滞回曲线出现捏拢效应,能量耗散能力较机械连接降低约 30%^[33]。在抗震设计中,焊接节点需满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011)中规定的残余变形限值,并通过狗骨式削弱设计平衡强度与延性^[34]。研究还发现,当焊接热输入超过 1.5 kJ/mm 时,热影响区硬度将超越 HV350 阈值,显著增加氢致裂纹敏感性,需通过预/后热工艺控制冷却速率^[35]。总体而言,焊接连接的力学性能高度依赖全流程质量控制,包括焊前坡口处理、层间温度监控及焊后检测,其工程适用性需结合全寿命周期成本综合评估。

1.4 讨论

直接搭接连接的两种形式各有优势和局限性。绑扎搭接连接适用于直径较小的钢筋,搭接长度是影响搭接性能的关键因素,不同搭接长度对试件的影响较大,是施工质量的重要控制因素,此外,接触搭接方式的性能优于非接触搭接,这为绑扎搭接连接的优化提供了方向。而 U 型筋搭接连接则更适用于装配式混凝土结构中的梁柱节点或预制构件的

拼接。在实际工程应用中,选择合适的连接方式需要综合考虑施工条件、成本、结构性能和设计要求。深入探究这些连接方式的特性与表现,有助于进一步优化结构设计,提升结构的安全性与可靠性。

2 间接搭接连接

2.1 螺旋箍筋约束浆锚搭接连接

螺旋箍筋约束搭接连接是约束钢筋浆锚搭接连接的主要方式之一^[36]。其构造如图 4 所示,在预制构件中预留有内壁粗糙的孔道,将搭接的钢筋插入孔道内,为了增强对钢筋搭接区域的约束作用,在上部构件的预埋钢筋周边配置沿孔洞长度方向伸展的螺旋箍筋^[37],并灌注高强水泥基灌浆料,以实现钢筋的搭接连接,使预制构件形成一个整体。

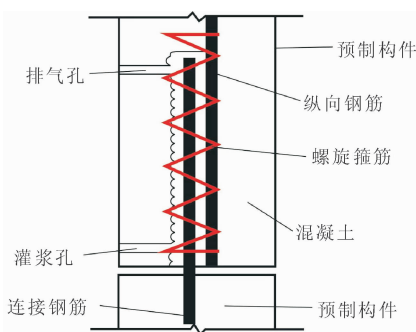


图 4 螺旋箍筋约束锚搭接连接

相较于传统的普通绑扎搭接连接,螺旋箍筋约束搭接连接具有形式简单、安全可靠、施工方便等优点^[38],并且能够显著缩短钢筋的搭接长度,可同步连接一定范围内的多根钢筋。然而,此种连接构造在制作过程中需要在混凝土初凝前形成孔洞,这一工艺相对繁琐,所用高强灌浆料凝固速度较快、对施工速度要求高,且所需成本较高^[39]。

2.1.1 传力机理

螺旋箍筋浆锚搭接的传力机理是利用螺旋形的孔道内壁增加钢筋与混凝土之间的粘结力,同时通过向连接部位注入高强度且具备微膨胀特性的灌浆料,可以充分利用灌浆材料与钢筋以及孔壁之间产生的粘结力和机械咬合力实现钢筋间的有效传力^[37]。这种连接方式可以用于框架柱间连接及剪力墙的竖向连接。

2.1.2 节点力学性能

对于螺旋箍筋约束浆锚钢筋搭接,已经累积了众多研究成果。Sagan 等^[40]重点探讨了约束浆锚搭接连接在预制混凝土结构中的应用,特别是其在不同条件下的力学性能及优化方法。陈云钢等^[41]认

为非接触搭接连接方式相较于传统接触搭接能提供更高的承载力。姜洪斌等^[42]提出了在非接触搭接构造中增设横向约束钢筋的优化方案,旨在提升搭接性能,并引入了有效搭接长度的概念。

在破坏模式方面,学者们通过对大量试验研究发现螺旋箍筋作为搭接约束措施,能够显著优化破坏模式,有效降低试件发生纵向劈裂破坏的风险,并且在保证连接可靠的前提下允许搭接连接长度的缩短。刘硕等^[43]针对 80 MPa 高强灌浆料成本较高、对施工速度要求高等问题,进行了 12 个单向拉伸拉拔试验,来评估螺旋箍筋约束浆锚钢筋搭接的力学性能和变形能力,采用 C30 细石混凝土替代高强灌浆料,钢筋搭接长度取为 $1.0l_a$ (l_a 为钢筋锚固长度),在所有试件的最终破坏阶段,钢筋都达到了屈服点,并且没有钢筋被拔出。这充分证明螺旋箍筋约束浆锚搭接在受力性能和变形性能方面表现出色,能够有效确保钢筋之间的牢固连接。

以上研究表明,螺旋箍筋浆锚搭接通过在搭接连接的钢筋中加设螺旋箍筋,增强了钢筋的约束力,形成了紧密的约束环,从而增加了连接的强度和可靠性。然而,螺旋箍筋浆锚搭接技术在实际应用中可能会遇到灌浆缺陷问题等技术挑战,这可能会影响结构的整体安全和抗震性能。对于直径在 20 mm 以上的钢筋,不宜采用浆锚搭接方式。螺旋箍筋浆锚搭接技术在提高预制构件的连接强度、变形能力方面具有显著优势,但也存在诸多局限和挑战,需要在实际应用中综合考虑。

2.2 波纹管浆锚搭接连接

波纹管浆锚搭接连接技术是一种先进的钢筋连接方法,其工作原理与套筒灌浆连接技术相似。其主要构造见图 5,上部预制混凝土构件预设的波纹管孔道与下部构件中伸出的浆锚钢筋精准对位,通过协同操作连接灌浆孔和排气孔,利用高压注浆机将灌浆材料注入孔道内部,可以保证钢筋之间高效且牢固的连接。这一过程确保了钢筋在连接区域的充分粘结,完成结构的连续性构建^[44]。

2.2.1 传力机理

波纹管浆锚搭接连接主要依靠灌浆料与钢筋表面之间的粘结作用进行传力,灌浆料的粘性和强度对传力效果有直接影响。波纹管本身对灌浆料和钢筋提供了侧向约束,提高搭接区域的整体性能,防止灌浆料在受力时发生侧向膨胀,从而提高了连接区域的承载能力和延性。研究表明,搭接长度对连接性能有显著影响,适当的搭接长度可以确保钢筋之

间的有效应力传递,而灌浆料的流动性与密实度对传力机制也至关重要,良好的流动性和密实度可以确保灌浆料充分填充波纹管和钢筋之间的空隙,形成良好的粘结以保证力的传递。

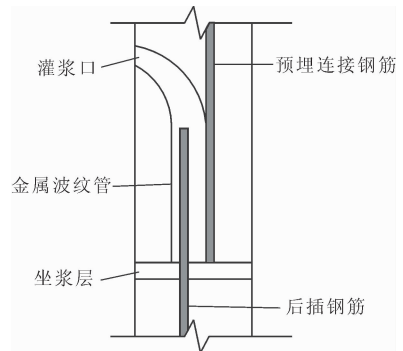


图 5 波纹管浆锚搭接连接构造

2.2.2 节点力学性能

武章印^[45]研发了一种创新的波纹管预成孔钢筋约束浆锚搭接连接技术,旨在研究其力学性能并寻求有效缩短钢筋搭接长度的方法。该技术简化了成孔步骤,强化了搭接部位的整体构造,并分析了混凝土强度等级、搭接尺寸以及钢筋规格对试件力学特性及极限搭接长度的影响。在成孔工艺方面,运用波纹管进行预成孔降低了成本效益,规避了后期脱模的繁琐步骤,极大地简化了整体施工流程。数值分析与有限元模拟结果表明,在考虑 1.2 倍的抗震放大系数后,取 0.8 倍受拉钢筋锚固长度作为搭接长度即可充分确保钢筋间实现高效且稳固的连接,降低了生产成本并便于施工,具有良好的应用前景。

孙志刚等^[46]为验证预埋波纹管成孔钢筋约束浆锚搭接连接的力学行为及可靠性,以纵筋直径、混凝土强度、螺旋箍筋直径及螺距作为关键参数,设计并制作了 60 组共计 180 个接头试件。单向拉伸试验结果显示,所有试件的破坏模式均为预埋筋被拔出,表明接头的抗拉承载力主要取决于预埋筋与混凝土间的粘结强度。对于直径为 10 mm 和 12 mm 的接头试件,螺旋箍筋构造对接头抗拉强度的影响不明显,而对于直径 14 mm 的试件,优化螺旋箍筋的配置可以减少混凝土损伤。赵唯坚等^[36]研究表明,随钢筋直径与锚固长度的增加,极限承载力呈现上升趋势,但平均粘结强度则逐渐减小;试件的粘结能量与钢筋锚固长度成正比,但随钢筋直径增大而下降。刘一龙等^[47]认为,采用波纹管浆锚搭接技术的试件连接性能可靠,其钢筋搭接长度的值应确定

为 $0.6l_a$ 。

因此,波纹管浆锚搭接连接方式的连接性能可靠、造价较低、且生产过程高效。采用波纹管预埋成孔技术,成功避免了后期脱模的繁琐,简化了施工工艺流程,提高了施工效率,还有效增强了钢筋搭接区域的结构整体性,提升了连接部位的稳定性和可靠性。然而在施工中,由于成孔和搭接过程中的误差,施工质量不易保证,受施工现场环境温度等因素影响也较大,需要精确的施工控制和质量检测。

2.3 灌浆套筒连接

套筒灌浆连接是一种将带肋钢筋置于具有凹凸内壁的金属套筒内,灌注专用高强水泥基灌浆料填充套筒与钢筋间隙,待灌浆料硬化形成整体,实现钢筋间有效传力的对接连接技术。灌浆套筒连接可分为半灌浆套筒和全灌浆套筒两大类(图6)。全灌浆套筒要求两端的钢筋都通过套筒灌浆进行连接,因此连接长度较长,造价相对较高。半灌浆套筒一端通过内部螺纹实现机械连接,另一端采用套筒灌浆连接,其长度相对较短,成本较全灌浆套筒而言更为经济,在工程中应用广泛。

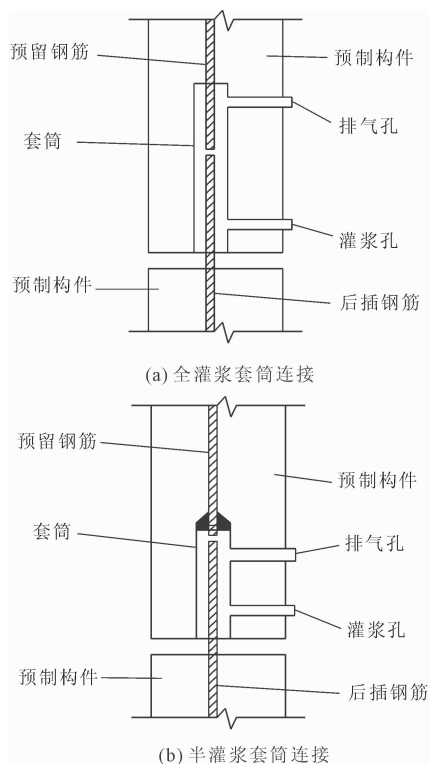


图6 套筒灌浆连接

2.3.1 传力机理

套筒灌浆连接的传力依赖于钢筋插入套筒后,灌浆料在套筒与钢筋间形成的粘结力和机械咬合力

传递荷载。这种连接方式也是通过搭接方式进行连接,尤其是在对中搭接的情况下,两根搭接钢筋需进行弯折处理,导致其在套筒内全长位置不一致,增加了受力状态的复杂性。为优化灌浆套筒的对接接头的力学性能,通常在筒壁内部设置剪力键、刻痕等构造措施,对套筒的材料性能和铸造工艺提出了更高的标准。为了获得更大的承载力,往往还需要考虑减小套筒的口径设计^[48]。

2.3.2 节点力学性能

国内外学者针对装配式构件套筒灌浆搭接连接进行了大量研究。Ling等^[49]指出,不同构造设计的灌浆套筒连接接头性能存在显著差异,部分新式套筒能够提供更有效的约束,延缓灌浆料裂缝的生成与发展,并展现出较高的粘结强度。Kim等^[50]的研究证实了灌浆料强度是影响接头性能的关键因素之一。余琼等^[48,51]的试验结果显示,随着搭接长度的改变,接头横截面的应变也会发生相应的变化,为提高套筒灌浆接头的施工效率,研发了一种新型套筒约束浆锚搭接接头,并对此进行了63次拉伸性能测试,重点考察了钢筋直径、搭接长度等参数对试件破坏特征、最大承载力、力-位移响应以及钢筋与套筒应变情况的影响,给出了计算平均搭接粘结应力和确定临界搭接长度的公式。

上述研究通过一系列的力学性能试验,全面研究了灌浆套筒搭接连接的可靠性^[52],为装配式建筑中竖向构件的连接提供了重要的理论和试验依据,有助于提高结构的安全性和可靠性。然而,装配式建筑中竖向构件连接的灌浆套筒技术仍面临诸多挑战,如灌浆质量控制、套筒偏转等问题,需要进一步的研究和改进。目前,对于新型两边管头形成缩口的新灌浆套筒,尚缺乏对内壁带肋套筒约束效果的深入研究。

2.4 讨论

在预制混凝土结构中,钢筋主要借助套筒灌浆连接、约束浆锚搭接连接以及机械连接等间接途径来实现连接。钢筋连接技术是预制装配式混凝土结构的核心技术,其可靠性对于确保结构整体的稳定状态以及抗震性能至关重要。螺旋箍筋约束浆锚搭接连接具有形式简洁、安全可靠、施工便捷的优点,能够大幅度减少钢筋的搭接长度,从而提高施工效率,但结构制作过程繁琐,灌浆料成本高且对施工速度要求高;波纹管浆锚搭接连接具有连接性能可靠、

成本较低、施工过程高效等优点,然而其局限性在于施工质量不易保证,需要精确的施工控制和质量检测;灌浆套筒连接能有效实现装配式混凝土结构中的钢筋连接,满足设计要求,但在对中搭接的过程中钢筋受力状态复杂,需要优化套筒设计以提高其力学性能。实际工程中需根据具体情况选择适宜的钢筋搭接方式,以确保施工便捷、节点受力合理及连接性能可靠。

3 钢筋搭接长度计算方法

对装配式结构中钢筋搭接连接节点而言,钢筋的搭接长度对节点传力性能、构件承载能力、结构整体性能以及抗震性能等均具有显著影响,合理的搭接长度是保证节点“等同现浇”的重要前提。基于此,针对不同规范中对于钢筋搭接长度的计算方法、建议取值及构造要求等方面进行总结和对比,为我国装配式混凝土结构中普遍存在的钢筋搭接接头设计提供参考。

3.1 GB 50010—2010 规范

我国的《混凝土结构设计规范》^[9](GB 50010—2010)通过采用钢筋屈服强度体现钢筋本身的力学性能,屈服强度越高,所需锚固和搭接长度理论上越大,同时根据钢筋外形系数考虑了不同外形钢筋(如光圆、带肋)与混凝土的粘结性能差异。以混凝土轴心抗拉强度反映混凝土对钢筋的锚固能力,抗拉强度越高,锚固和搭接长度可相应减小。除此以外还考虑了钢筋的布置情况、工程的具体环境条件等实际因素对锚固和搭接长度的调整,且明确了最小搭接长度限制,保证结构安全性。所采用的计算公式如下:

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (1)$$

$$l_a = \xi_a l_{ab} \quad (2)$$

$$l_l = \xi_l l_a \geq 300 \text{ mm} \quad (3)$$

式中: l_{ab} 为受拉钢筋的基本锚固长度; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值,当混凝土等级高于C60时,按C60取值; d 为锚固钢筋直径; α 为锚固钢筋外形系数,按表1取值; l_a 为钢筋锚固长度; ξ_a 为锚固长度修正系数,对普通带肋钢筋的公称直径大于25 mm时取1.10,当多于一项时,可按连乘计算,但不应小于0.6;对预应力筋,可取1.0; l_l 为受拉纵筋搭接长度; ξ_l 为受拉纵筋搭接长

度修正系数,按表2取值。

表1 锚固钢筋外形系数 α 取值

钢筋类型	光圆钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢丝	三股钢绞线	七股钢绞线
α	0.16	0.14	0.13	0.16	0.17

注:光圆钢筋的末端应制作180°弯钩,弯钩后平直段的长度不应小于 $3d$,但当该钢筋用作受压钢筋时,可以省略弯钩的制作。

表2 锚固钢筋外形系数 ξ_l 取值

纵向搭接钢筋接头面积百分率/%	≤ 25	50	100
ξ_l	1.2	1.4	1.6

中国规范采用混凝土的抗拉强度 f_t 来表示混凝土对粘结锚固强度的影响,在混凝土保护层厚度小于或等于钢筋直径5倍的情况下,为防止混凝土劈裂破坏造成钢筋锚固失效,规范规定必须在钢筋的搭接锚固区段内设置箍筋或其他横向约束措施。同时针对中国规范关于钢筋搭接连接长度的计算中,未明确给出钢筋间接搭接的概念且并未考虑横向钢筋的影响效果,仅给出了搭接区域横向钢筋的基本构造要求,建议基于实际情况对 ξ_l 给予修正。

3.2 ACI 318—19 规范

由美国混凝土学会发布,美国混凝土结构设计规范ACI 318—19^[17]中同样考虑了钢筋屈服强度对锚固长度的影响,以混凝土抗压强度作为参数,抗压强度越高,理论上锚固能力越强。同时通过多个修正系数分别考虑不同的实际情况,并且根据有效保护层厚度和横向钢筋影响系数考虑了混凝土对钢筋的包裹保护作用以及横向钢筋对锚固的增强作用。关于钢筋锚固长度的计算公式具体表述如下:

$$l_d = \left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \psi_g}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d} \right)} \right) d \quad (4)$$

$$(c_b + K_{tr})/d \leq 2.5 \quad (5)$$

$$c_b = \min(c_f, c_{so}, c_{si}) + 0.5d \quad (6)$$

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn} \quad (7)$$

式中: l_d 为钢筋锚固长度; λ 为混凝土类别系数,取值范围为0.75~1.0; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ψ_t 为受浇筑位置影响的钢筋位置系数,水平钢筋下方新浇筑混凝土厚度大于305 mm时取1.3,其他情况取为1.0; ψ_e 为钢筋环氧涂层系数,带环氧树脂涂层、混凝土保护层厚 $c < 3d$ 、钢筋净距低于 $6d$ 时,取1.5,其他情况取为1.2,无涂层时,取1.0; ψ_g 为考虑钢筋屈服强度的钢筋等级系数; ψ_s 为钢筋直径系

数,当钢筋直径 $d \leq 19 \text{ mm}$ 时取 0.8, $d \geq 22 \text{ mm}$ 时取为 1.0; c_b 为钢筋到最近的混凝土表面距离以及钢筋间中心间距一半的较小值; c_r, c_{so}, c_{si} 分别为搭接钢筋表面到各混凝土表面和其他钢筋表面的间距; K_r 为横向钢筋系数,配置横向钢筋时 K_r 可简化取为 0; A_r 为箍筋间距 s 内横跨潜在开裂面的所有横向钢筋的截面积之和; s 为搭接钢筋横向净间距; n 为沿分裂平面展开或搭接拼接的钢筋数量。

考虑到钢筋的拔出破坏方式,规范中规定 $(c_b + K_r)/d$ 限值不大于 2.5,在其小于 2.5 时,可能发生劈裂失效,当此项超出 2.5 时,预计会出现拉拔破坏,增大保护层厚度或横向钢筋不能增强钢筋的锚固性能。

美国规范 ACI 318—19 通过保护层厚度影响系数 ψ 综合考虑了横向钢筋对受拉钢筋搭接长度的影响,同时为保证间接搭接钢筋间混凝土的浇筑质量,对搭接钢筋横向净间距 s 的限值做了具体要求,但目前对于 s 的限值的试验研究较少^[37],关于 s 的限制取值建议参考 ACI 318 取值。

3.3 Model Code 2010 规范

由国际结构混凝土联合会发布,规范 Model Code 2010^[53] 中除了考虑钢筋屈服强度对锚固长度的影响外,还通过混凝土强度参与粘结强度设计值的计算以间接反应其对钢筋锚固长度的影响。除此还考虑了保护层厚度以及横向钢筋的影响,明确了最小锚固长度的取值,保证在不同工况下钢筋锚固的可靠性。关于钢筋基本锚固长度的计算公式具体表述如下:

$$l_d = \alpha_4 \frac{f_y d}{4f_{bd}} \geq l_{d,\min} \quad (8)$$

$$l_{d,\min} = \max(0.7f_y d / (4f_{bd}), 15d, 200 \text{ mm}) \quad (9)$$

$$f'_{bd} = (\alpha_{m2} + \alpha_{m3} f_{bd0} < 2.5f_{bd0} < (f'_c)^{1/2} \quad (10)$$

$$f_{bd0} = 0.35\eta_3\eta_4(f'_c)^{1/2} \quad (11)$$

$$\alpha_{m2} = \sqrt{(c_{\min}/d)(c_{\max}/c_{\min})^{0.15}} \quad (12)$$

$$\alpha_{m3} = k_d(K_{mr} - \alpha_1/50) \geq 0 \quad (13)$$

$$K_{mr} = \sum A_r/s_1 nd \leq 0.05 \quad (14)$$

式中: α_4 为钢筋端头形状影响系数,可取 0.7,其中计算钢筋的应力在整个搭接长度的极限不超过钢筋强度的 50%,或不超过 34% 的钢筋搭接截面,否则取 1.0; f_{bd} 为设计粘结强度; f_{bd0} 为基本设计粘结强度; $l_{d,\min}$ 为钢筋锚固长度最小值; α_{m2} 和 α_{m3} 分别为混凝土及横向钢筋对于约束的影响系数;当钢筋直径小于 25 mm 时, η_3 取为 1.0,直径大于 25 mm 时,

η_3 取为 $(25/d)^{0.3}$; η_4 为纵筋屈服强度系数,屈服强度为 800 MPa 时,取值为 0.68,屈服强度为 400 MPa 时取 1.2,其他屈服强度时通过插值法取得; c_{\max} 为最大混凝土覆盖面积; c_{\min} 为最小混凝土覆盖面积; k_d 为横向钢筋布置系数; K_{mr} 为横向钢筋约束系数; α_1 为横向钢筋直径系数; s_1 为横向钢筋的纵向间距。

3.4 搭接设计规范差异化

在计算钢筋的基本锚固长度时,中国规范中所采用的公式构建了一个较为基础的计算体系,着重依据钢筋的屈服强度和外形,以及混凝土的轴心抗拉强度来确定基本锚固长度。在此基础上通过修正系数调整受拉钢筋锚固长度和搭接长度,明确了最小搭接长度限制。这种计算方式相对较简单,主要针对常规的工程场景,为钢筋锚固与搭接长度计算搭建了基础框架,但并未充分考虑箍筋约束的具体效果,且该规范中关于钢筋搭接长度与锚固长度的计算公式未对接触搭接和间接搭接这两种连接方式进行明确区分。

ACI 318—19 规范则更贴合复杂的实际工程环境,除了纳入钢筋屈服强度和混凝土抗压强度这些基本因素外,还通过多个修正系数全面考量了钢筋位置、环境条件、间距以及保护层厚度等因素,对钢筋的有效保护层厚度和横向钢筋的影响进行了量化,设置了相关参数的限制条件,力求精确计算钢筋锚固长度,以适应不同环境下的工程需求。同时,规范中对钢筋的间接搭接连接方式规定了明确的构造要求,并在钢筋锚固长度的计算公式中采用了钢筋横向间距这一参数,从而间接考虑了间接搭接中钢筋位置对锚固性能的影响。

规范 Model Code 2010 中并未对钢筋的间接搭接做出明确规定,更聚焦于钢筋与混凝土的粘结性能。虽然同样以钢筋屈服强度为基础,但重点在于通过一系列复杂计算确定与粘结强度有关的设计值,进而得出锚固长度。规范中充分考虑了最小和最大保护层厚度的关系以及横向钢筋的综合作用,还明确了最小锚固长度的取值规则,旨在从粘结性能角度确保钢筋锚固的可靠性。

4 装配式钢筋搭接连接的未来方向与挑战

4.1 施工缺陷对于构件长期性能的影响

当前研究基于施工缺陷对于构件性能的影响仍存在不足。工程实际中,施工误差对于装配式钢筋连接节点的传力方式、力学性能、可靠性等方面的影

响不能忽略,如波纹管成孔偏差可导致浆锚粘结强度衰减^[46],U形筋安装错位会削弱销轴效应^[29]。因此,需量化施工误差对于节点力学性能的影响,建立施工缺陷影响下结构构件长期性能预测模型。

4.2 标准化设计体系构建的关键路径

装配式连接技术亟需破解“设计-施工-检测”脱节难题。设计方面,建议制定分级选型标准,依据节点位置、性能、抗震等方面要求,明确连接方式选取方案,增强现有标准与高性能材料的适配性。施工方面,建立工艺参数库,基于机器学习分析历史工程数据,通过标准化降低人为因素导致的性能离散性。检测方面,推动智能监测技术,结合数字平台预警性能退化,实现从“被动加固”到“主动防护”的转变。

4.3 低碳化与智能化转型方向

积极响应“双碳”目标,形成“材料-施工-运维”全绿色智能化产业。材料方面,研发可拆卸连接接头^[50],提高建造过程材料循环利用率、减少拆除过程资源损耗。施工方面,结合智能可视化手段,提高施工精度,避免施工缺陷影响结构性能。运维方面,提高装配式结构钢筋连接节点耐久性,研究环境-荷载耦合影响下结构性能退化过程,提升建筑结构使用寿命。

5 结 论

(1) 直接搭接连接方式中,绑扎搭接操作简单、成本低,适用于小直径钢筋连接,但传力性能较弱;U形筋搭接连接施工效率高、节点承载力和抗震性能好,适用于装配式混凝土结构的梁柱节点或预制构件拼接。焊接连接施工效率高,且不受钢筋直径限制,但热影响区脆化风险制约其抗震应用,需严格工艺控制。

(2) 间接搭接连接方式中,螺旋箍筋约束浆锚搭接连接可缩短搭接长度 30% 以上,但制作工艺繁琐、灌浆料成本高;波纹管浆锚搭接连接,连接性能可靠、成本较低、施工高效,但成孔精度不足易导致灌浆缺陷,施工质量不易保证;灌浆套筒连接能有效实现钢筋连接,但对中搭接时钢筋弯折致受力复杂,套筒内壁剪力键设计及灌浆密实度是性能提升的关键。

(3) 在计算钢筋的基本锚固长度时,不同规范给出了不同的计算公式。GB 50010—2010 通过混凝土抗拉强度来表示混凝土对粘结锚固强度的影响,但并未针对直接、间接搭接做出区别;ACI 318—19 引

入钢筋净距参数量化间接搭接性能,明确 $s \leq 4d$ 的限值要求,并通过保护层厚度系数反映约束效应;Model Code 2010 较为详细分析钢筋端头对锚固长度的影响,并给出横向钢筋对锚固长度影响的构造要求。

(4) 未来在装配式建筑结构中,结合工程实际需求,合理选用并优化这些连接方式,非关键部位小直径钢筋宜采用绑扎搭接;抗震设防区(≥ 7 度)大直径钢筋优先选用U形筋或灌浆套筒连接;根据规范计算合理的搭接计算长度,能够有效增强结构的安全性、稳固性,同时加快施工进度,提高施工效率。

参考文献:

- [1] 王艺静. 国务院部署大力发展装配式建筑 8 项重点任务力争用 10 年左右的时间,使装配式建筑占新建建筑面积的比例达 30% [J]. 中国勘察设计, 2016(11): 8.
- [2] 张子颀, 邓开来, 徐腾飞. 预制装配式混凝土桥梁结构 2019 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 183-191.
- [3] 严 薇, 曹永红, 李国荣. 装配式结构体系的发展与建筑工业化 [J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(5): 131-135.
- [4] Soudki K A, Rizkalla S H, Leblanc B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations: part 1: mild steel connections [J]. PCI Journal, 1995, 40(4): 78-96.
- [5] Park R. A perspective on the seismic design of precast concrete structures in New Zealand [J]. PCI Journal, 1995, 40(3): 40-60.
- [6] 陈云钢, 刘家斌, 郭正兴. 预制混凝土结构波纹管浆锚钢筋锚固性能试验研究 [J]. 建筑技术, 2014, 45(1): 65-67.
- [7] 钱稼茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 26-38.
- [8] 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [10] 黄 俊. 疲劳及单调荷载下 UHPC 中搭接钢筋粘结性能试验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [11] 丰炜东. 地铁车站出入口装配式侧墙 U 型筋搭接连接节点受弯性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [12] 彭一伦. 装配式建筑套筒灌浆连接施工质量控制 [J]. 建筑技术, 2021, 52(1): 25-27.
- [13] 张微敬, 钱稼茹, 于检生, 等. 竖向分布钢筋单排间接

- 搭接的带现浇暗柱预制剪力墙抗震性能试验[J]. 土木工程学报,2012,45(10):89-97.
- [14] 江胜学,徐军林,汤明生,等. 装配整体式混凝土框架U形梁-柱中节点抗震性能研究[J/OL]. 建筑科学与工程学报,1-13[2025-08-19]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1442.TU.20250522.1455.004>.
- [15] 吴成材. 钢筋连接技术手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [16] 马军卫. 新型全装配式混凝土框架-剪力墙结构抗震性能研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [17] ACI Committee 318. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [18] 张微敬,钱稼茹,陈康,等. 竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):12-16.
- [19] 廖东峰. 竖向钢筋不同连接方式的装配式钢筋混凝土剪力墙抗震性能[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [20] 胡伦坚,刘立新,阎红兵. HRB500级钢筋连接性能研究[J]. 施工技术,2005,34(7):46-48.
- [21] Walker W T. Laboratory tests of spaced and tied reinforcing bars [J]. ACI Journal Proceedings, 1951,47(5):365-372.
- [22] 宋绪传. 钢筋混凝土梁钢筋非接触搭接性能研究[D]. 济南:山东大学,2007.
- [23] 张伟. 装配整体式混凝土结构钢筋连接技术研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- [24] Chamberlin S J. Spacing of spliced bars in tension pull-out specimens [J]. ACI Journal Proceedings, 1952,49(4):261-274.
- [25] 余志武,彭晓丹,国巍,等. 装配式剪力墙结构中U型套箍钢筋连接的锚固性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(4):879-886.
- [26] 焦安亮,张鹏,郜玉芬,等. 装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙竖向连接钢筋锚固性能机理研究[J]. 工业建筑,2019,49(1):69-76,129.
- [27] 王世昕. 环形钢筋搭接试验研究[D]. 成都:西华大学,2017.
- [28] 陈宜虎,陆鹏远,张敏,等. 装配式混凝土U型钢钢筋环扣的连接长度[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(2):131-140.
- [29] 张锡治,张群礼,高华超,等. 预制混凝土墙体U型钢钢筋搭接连接受拉承载性能研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):49-58.
- [30] 冯帅克,郭正兴,刘毅,等. 半预制装配式地下车站侧墙底节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2023,40(2):190-201,212.
- [31] Zhang Fei, Su Xuekuan, Chen Ziyong, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of a super high strength Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2015,67:483-491.
- [32] 董现春,王全礼,陈延清,等. 经济型HRB400S钢筋的焊接性试验研究[J]. 首钢科技,2009(1):20-23.
- [33] Wei Xiaojun, Zhou Hao, Kamaris G S, et al. Cyclic behaviour of welded stainless steel beam-to-column connections; Experimental and numerical study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024,218:108736.
- [34] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [35] Mehner T, Scharf I, Frint P, et al. Hydrogen embrittlement of a quenching and partitioning steel during corrosion and zinc electroplating [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019,744:247-254.
- [36] 赵唯坚,郭婉楠,金峤,等. 预制装配式剪力墙结构竖向连接形式的发展现状[J]. 工业建筑,2014,44(4):115-121,59.
- [37] 马军卫,尹万云,刘守城,等. 钢筋约束浆锚搭接连接的试验研究[J]. 建筑结构,2015,45(2):32-35,79.
- [38] 江佳斐,隋凯,马川峰,等. 预制装配式混凝土螺旋箍筋约束浆锚钢筋搭接性能研究现状[J]. 施工技术,2018,47(12):44-47.
- [39] 张士军,王良,辛振宇,等. 建筑施工中钢筋连接技术研究进展[J]. 山东建筑大学学报,2014,29(6):546-550.
- [40] Sagan V E, Gergely P, White R N. Behavior and design of noncontact lap splices subjected to repeated inelastic tensile loading [J]. Structural Journal, 1991,88(4):420-431.
- [41] 陈云钢,刘家彬,郭正兴,等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):83-89.
- [42] 姜洪斌,张海顺,刘文清,等. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):28-31,36.
- [43] 刘硕,胡翔,周鑫,等. 直径10 mm和14 mm钢筋约束浆锚搭接连接力学性能试验研究[J]. 施工技术,2017,46(4):13-17.
- [44] 宋晓璐,钱稼茹,冯葆纯,等. 小剪跨比喷涂混凝土夹芯剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2014,44(7):16-20.
- [45] 武章印. 波纹管预成孔钢筋约束浆锚搭接连接力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2019.

- (2020-06-06) [2025-04-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/06/content_5517606.html.
- [4] 叶静,郑梦泽,黄春芳. 人工智能时代计算机类专业课程标准建设探索[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(4):88-95,187.
- [5] 张良. 信息化背景下建筑施工企业会计课程教学改革探索[J]. 建筑科学, 2025, 41(1):202.
- [6] 史兴俊,牛继强,朱桃丽,等. 智慧教学背景下信息化课程资源建设——以“中国地理”为例[J]. 中学地理教学参考, 2023(32):54-57.
- [7] 王继茹,朱靖,王建,等. 数据驱动的知识图谱在本科教学信息化改革中的作用[J]. 高等工程教育研究, 2024(3):121-128.
- [8] 范小平,向红. 教育信息化背景下包装印刷类课程教学设计与实施[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(4):59-66,79.
- [9] 韩洪兴,申道明,马芸,等. 《流体力学》教学模式课程思政的探索与实践[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(3):237-240.
- [10] 廖红建,黎莹. 工科专业课程思政教学探索——以《土力学》混合式教学为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(1):195-198.
- [11] 朱光甲. 教育信息化背景下数字媒体专业人才培养体系的优化[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(4):34-40.
- [12] 吴环宇,杨柯华,丁志坤,等. 信息化与智能化背景下工程造价创新创业人才培养探索与实践[J]. 建筑经济, 2023, 44(S2):51-56.
- [13] 杨乐,王正松,赵玉良. 基于教育信息化建设的“机器学习”课程教学模式改革[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(4):110-116.
- [14] 王娜. 建筑节能技术(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2020.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发《2025年工程建设规范标准编制及相关工作计划》的通知[EB/OL]. 中华人民共和国住房和城乡建设部. (2025-03-18) [2025-04-16]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2025/art_d8133726269b4d9b88e1885c586bec5c.html.
- [16] 马小魁,梁健,宋双红. 教育信息化下微生物学课程思政教的实践与思考[J]. 微生物学杂志, 2025, 45(1):139-144.

(上接第91页)

- [46] 孙志刚,郑永峰,唐书峰,等. 波纹管成孔钢筋约束浆锚搭接连接力学性能[J]. 工业建筑, 2023, 53(8):52-57.
- [47] 刘一龙. 预埋金属波纹管浆锚钢筋搭接连接力学性能研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2019.
- [48] 余琼,唐佩妍,张星魁,等. 搭接长度对套筒灌浆搭接接头反复拉压力学性能影响试验[J]. 同济大学大学学报, 2022, 50(5):690-702.
- [49] Ling J H, Rahman A B A, Ibrahim I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load [J]. Construction and Building Materials, 2012, 33(3):90-98.
- [50] Kim H K. Bond strength of mortar-filled steel pipe splices reflecting confining effect [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2012, 11(1):125-132.
- [51] 余琼,许志远,袁炜航,等. 两种因素影响下套筒约束浆锚搭接接头拉伸试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12):34-42.
- [52] 刘文超. 新型灌浆料套筒钢筋搭接连接受力与剪力墙抗震性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
- [53] International Federation for Structural Concrete. fib Model Code for Concrete Structures 2010 [S]. Germany: Ernst & Sohn, 2010:153-189.