

考虑不均匀冻融损伤 RC 梁柱节点抗震性能评估

程小珊^{1,3}, 徐丽², 郟亚微¹

(1. 广安职业技术学院 建筑工程学院, 四川 广安 638000; 2. 四川水利职业技术学院, 四川 崇州 611231;
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:在严寒地区,冻融循环(freeze-thaw cycle, FTC)是导致钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构破坏的主要因素之一。冻融损伤后的 RC 梁柱节点的抗震性能评估对于结构安全性至关重要。然而,有关严寒环境下冻损伤 RC 梁柱节点抗震性能评估的研究却很少。该文深入探究了冻融循环次数(NFTCs)和轴压比(n)对 RC 梁柱节点抗震性能的影响,并在试验研究的基础上建立了综合考虑不均匀温度场分布和轴压比影响的冻损 RC 梁柱节点核心区剪力-剪应变计算模型。研究结果表明:随着 NFTCs 的增加,RC 节点的峰值荷载与核心区的抗剪承载力均下降,而节点延性与剪应变 γ 以及剪切变形占总变形的比例 Δ_{pz}/Δ 逐渐增加,且在经历 300 次 NFTCs 后节点核心区的 Δ_{pz}/Δ 高达 21.90%;所建立的冻损 RC 梁柱节点核心区剪力-剪应变计算模型能够准确计算剪力 V_{jh} 和剪应变 γ , 其平均误差不超过 20%,标准偏差不超过 0.1。该文所建立的剪切骨架曲线计算模型可用于冻融损伤 RC 梁柱节点的抗震性能评估。

关键词:冻融损伤;钢筋混凝土梁柱节点;抗震性能评估;剪切骨架曲线计算模型

中图分类号:TU375.4; P315.9

文献标志码:A

Evaluation of seismic performance of RC beam-column connections considering non-uniform freeze-thaw damage

CHENG Xiaoshan^{1,3}, XU Li², QIE Yawei¹

(1. School of Architectural Engineering, Guang'an Vocational Technical College, Guang'an 638000, China; 2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou 611231, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The freeze-thaw cycle (FTC) is one of a major factors leading to the damage of reinforced concrete (RC) structures in severely cold regions. The seismic performance evaluation of FTC-damaged RC beam-column connections is critical to the assessment of structural safety. However, the studies on the seismic performance evaluation of FTC-damaged RC beam-column connections under severe cold environments are still scarce. In this study, the influences of freeze-thaw cycles (N) and axial force ratio (n) on the seismic performance of RC beam-column connections are deeply investigated. Based on the test results, a calculation model of the shear force-strain envelope curve of RC connections that integrates the effects of the inhomogeneous temperature field distribution and axial compression ratio was established. The results show that with the increase of NFTCs, the bearing capacity of the RC connections and the shear bearing capacity of the core area decrease, while the ductility, shear strain γ , and shear deformation to the total deformation Δ_{pz}/Δ gradually increase, and after 300 freeze-thaw cycles, Δ_{pz}/Δ is up to 21.90%. The established shear force-distortion calculation model for the FTC-damaged RC core area can accurately calculate the shear force V_{jh} and shear distortion γ . The mean error of both the shear force V_{jh} and shear distortion γ does not exceed 20%, and the standard deviation does not exceed 0.1. Furthermore, the precision of V_{jh} is slightly higher than that of γ . The shear skeleton curve calculation model established can be used to evaluate the seismic performance of FTC-damaged RC beam-column connections under earthquake actions.

收稿日期:2024-08-19; 修回日期:2024-12-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278530);四川省教育厅人文社会科学重点研究基地项目(JGYQ2023025);广安市社科联课题(2019-45)

作者简介:程小珊(1987—),女,讲师,硕士,主要从事结构工程与工程管理研究。E-mail:chengxiaoshan216@126.com

Key words: freeze-thaw damage; RC beam-column connection; seismic performance evaluation; calculation model of shear skeleton curve

0 引言

节点是梁和柱的传力枢纽,是影响钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构抗震性能的关键部位^[1-2]。在地震作用下,一旦节点发生破坏即意味着与之相连的梁和柱同时失效,将产生灾难性的后果^[3-4]。可见,对 RC 节点的抗震性能展开深入研究,建立其科学的抗震性能评估模型,减少人员伤亡与经济损失,具有显著意义。鉴于此,在过去的四十年里,诸多学者对 RC 节点的抗震性能展开了大量的研究^[5-7]。研究明确了在地震作用下节点从起始受力状态下就存在斜压杆机构、桁架机构以及约束机构 3 种机构^[5-7]。但以往的研究均局限于完好节点,未能考虑冻害问题对节点抗震性能的影响。

冻融循环(freeze-thaw cycle, FTC)作为混凝土耐久性破坏的三大因素之一,20 世纪 40 年代就备受各国学者的关注^[8-17]。起初,学者关于冻害问题的焦点在于混凝土冻融损伤机理方面^[8-9],且一致认为混凝土内部孔隙率(毛细孔)是造成冻融损伤的最主要因素。之后,各国学者认识到混凝土作为一种工程材料,FTC 导致其性能的劣化归结到底还是力学性能的劣化。所以后来关于混凝土材料在 FTC 后力学性能的研究则浩如烟海^[10-11]。材料层面的 FTC 研究一致认为,FTC 作用削弱了混凝土的力学性能包括弹性模量、抗压强度以及抗拉强度,钢筋与混凝土之间的黏结强度^[10-11],且削弱的程度与冻融损伤程度成正比。影响冻融损伤程度的因素包括冻融循环次数(NFTCs)、混凝土强度以及试件内部温度场分布(冻融损伤是不均匀分布的^[12-13])。不能简单地以 NFTCs 表征冻融损伤程度,这导致了已有的诸多材料层面的冻融研究成果无法对比验证。混凝土动弹模量损失量 D 可表征冻融损伤程度的诸多影响因素,因此被广泛学者^[12-13]认为是可量化表征冻融损伤程度的优良指标。郑山锁等^[13]以 D 作为表征冻融损伤程度的物理指标,在蔡昊模型^[14]的基础上,建立了考虑混凝土结构内部不均匀分布温度场的冻融损伤模型。研究为 RC 构件层面冻融损伤程度的评估奠定了基础。

随着科技水平的提高,近年来,一些学者逐渐对构件层面的冻融展开了研究。探究重心由静力作用下 RC 构件的弯曲性能^[15]、剪切性能^[16]逐渐转为地震作用下的抗震性能^[17]。冻融作用下 RC 构件抗震性能的研究包括 RC 梁、RC 柱、再生混凝土柱以及 RC 剪力墙。服役中的 RC 梁、柱、节点大多处在相同的环境中。然而,关于 FTC 作用下 RC 梁柱节点抗震性能评估的研究则依然处于空白,仅郑捷等^[6]对冻融循环下 RC 节点的抗震性能进行了初步的试验探究,但其也并未对展开定性的抗震性能评估。

综上,本文在已有研究^[6]的基础上,从滞回性能、骨架曲线、剪切性能方面深入探究了冻融循环次数和轴压比对 RC 梁-柱节点抗震性能的影响,基于试验研究结果建立了综合考虑不均匀温度场分布和轴压比影响的冻融损伤 RC 梁柱节点剪力-剪应变骨架曲线计算模型。研究可用于冻融损伤 RC 梁柱节点的抗震性能评估。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计制作了几何构造与配筋均相同的 6 根 RC 梁-柱节点测试试件,以探究冻融循环作用下 RC 梁-柱节点的抗震性能,试件参数设计见表 1^[6]。由于人工气候模拟室尺寸的限制,无法对全尺寸 RC 梁柱节点进行 FTC 试验。与此同时,现有的有关冻融损伤 RC 构件的拟静力试验的研究都是采用的缩尺试件^[6,12,15-17]。鉴于此,依据标准 GB/T 50010—2010^[18],以 1:2 缩尺比例设计了 6 个配筋细节(相同的配筋率)、混凝土强度均与原型结构(5 层 RC 框架结构)相同的 RC 梁柱节点试件。梁截面尺寸为 150 mm×200 mm,柱截面尺寸为 200 mm×200 mm。箍筋为 HPB300,直径 6 mm,实测屈服强度为 270 MPa,弹性模量为 2.1×10^5 。柱端和梁端用箍筋加密以防止局部挤压,箍筋间距为 30 mm,其余箍筋间距均为 60 mm。钢筋混凝土梁柱节点的详细钢筋和尺寸见图 1。更为详细的设计参见文献^[6]。

节点的设计混凝土强度等级为 C50,实测立方体抗压强度 f_{cu} 为 55.08 MPa。由于中国早期标准^[18]没有考虑严寒地区结构的耐久性设计,因此设计的节点没有添加引气剂。试件浇筑后在经过 28 d 标准养护后,参考规范^[19]将梁柱节点在室温下的水中浸泡一周,然后转移到人工气候模拟实验室进行 FTC 测试。在达到设计的 NFTC 后,对其施加低循环载荷^[6]。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of test specimens

试件编号	NFTCs	FTCs 时间/d	轴压比 n	剪压比 $V_{jh}/f_c b_j h_j$	配箍率 $\rho_{sh} f_{yv}/f_c$
JD-1	0	0	0.191	0.208	0.030
JD-2	100	23	0.191	0.208	0.030
JD-3	200	46	0.191	0.208	0.030
JD-4	300	69	0.191	0.208	0.030
JD-7	200	46	0.051	0.208	0.030
JD-8	200	46	0.332	0.208	0.030

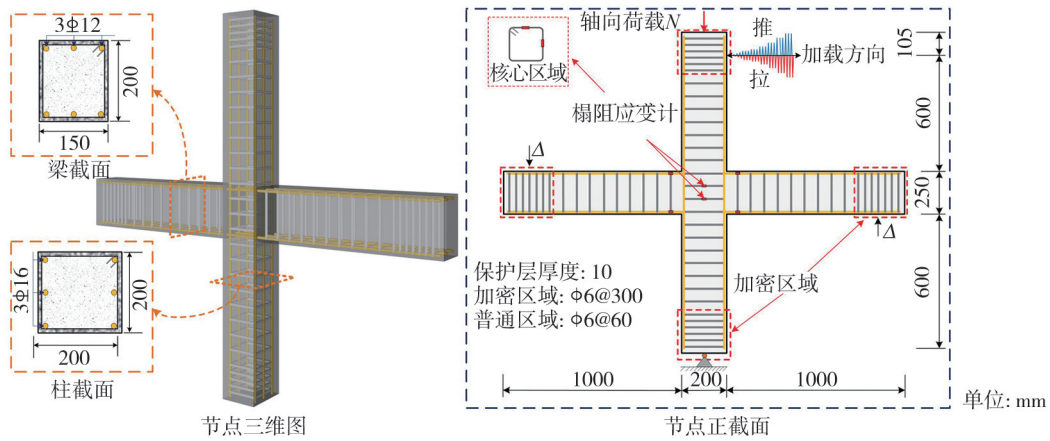


图 1 试件尺寸信息

Fig. 1 Dimensional information of specimens

1.2 FTC 测试

通过控制人工气候模拟实验室内的温度,可以重现冻融环境中的 FTC 过程。人工气候实验室的主要技术指标见^[6,19],见图 2。中国标准 GB/T 50882—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[19]中关于冷冻和融化温度范围的规定是:加热温度为 15~20℃;冷却温度为(-20)~(-15)℃。鉴于此,加热期间的最高温度设置为 15℃,冷却期间的最低温度设置为-17℃。冷却速率设置为 16℃/h,加热速率设置为 32℃/h。FTC 设置见图 2^[6,19]。

- 1) 控制方式:通过编程控制喷洒时间、湿度以及温度指标,实施在线监测。
- 2) 湿度控制:空载状态下的湿度变化范围为 30%~98% RH;当湿度变化范围在 30%~75% RH 时,湿度偏离-5%~+5%;当湿度波动范围在 75%~98%时,湿度偏差为-3%~+2%。
- 3) 温度控制:温度偏差为-2℃~+2℃,温度波动值≤±0.5℃。
- 4) 人工喷洒:垂直向下,降水量 10~15 cm/h(可调),降雨时间 1 min~100 h(可调节)。

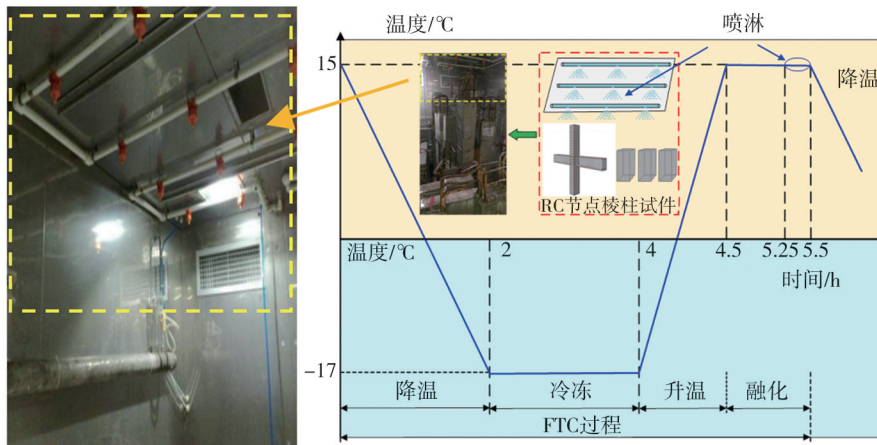


图 2 ZHT/W2300 人工气候实验室温度设置

Fig. 2 Temperature setting in ZHT/W2300 artificial climate laboratory

1.3 拟静力测试

加载系统和测点布局见图3所示。首先,通过液压千斤顶施加轴向压力至设计轴压比 n (n 值见表1),并在循环加载期间保持恒定。通过监测液压千斤顶的读数实现恒定轴压力,见图4。然后施加水平往复载荷。加载点距离柱上端105 mm,详细测点布置见图1。采用荷载-位移混合荷载方案。屈服前采用荷载控制,荷载增量为5 kN。屈服后,采用位移控制。荷载控制期间循环1次,位移控制期间循环3次^[6]。具体加载历程见图4。循环荷载的停机条件是试件载荷降至峰值载荷的80%,或者试件严重失效。

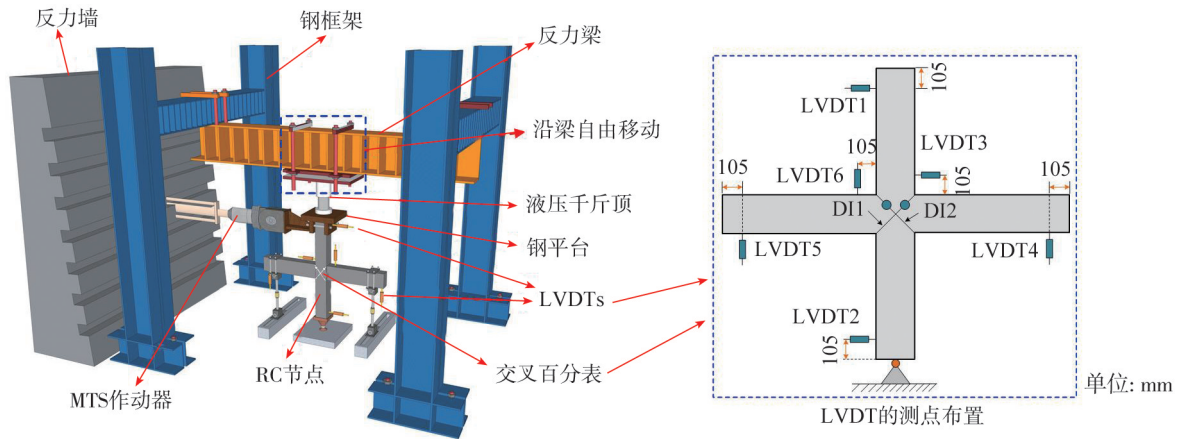


图3 测试设置和测点布局

Fig. 3 Test set-up and measuring points layout

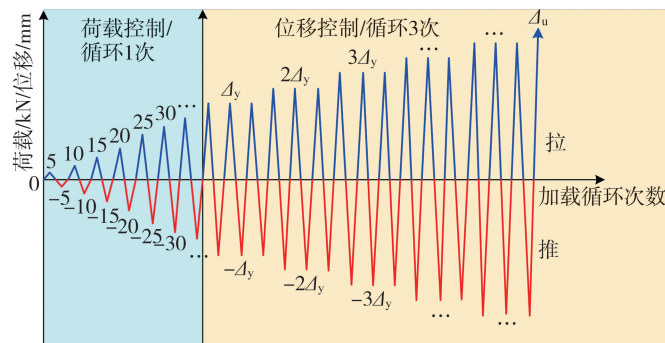


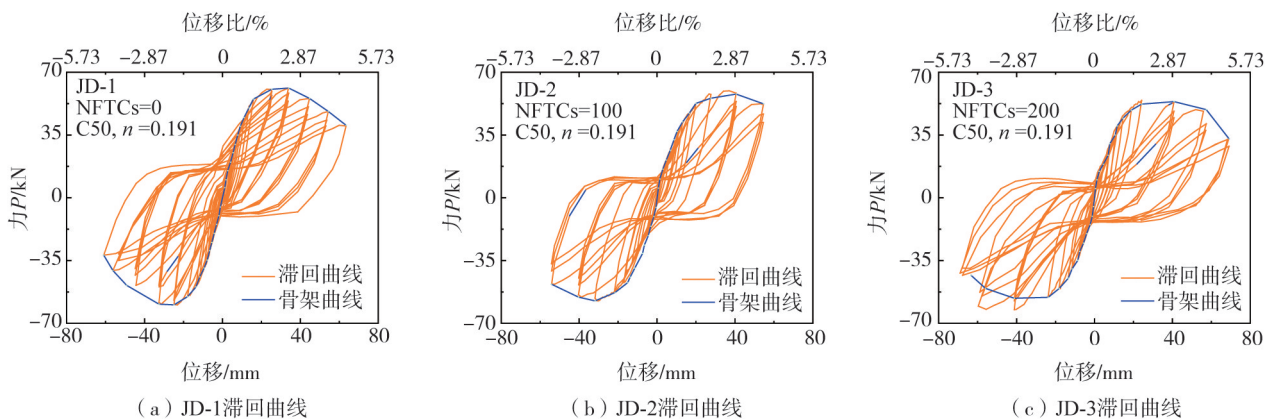
图4 加载制度

Fig. 4 Loading system

2 结果分析

2.1 滞回曲线

各节点试件柱顶水平荷载-位移滞回曲线见图5。由图可知,6个节点的滞回性能大体一致:屈服前,滞回曲线近似呈斜直线,无明显刚度退化;屈服后,加卸载刚度退化逐渐显著,残余位移逐渐明显;峰值后,残余位移进一步显著,致使滞回环形状向“反弓形”变化。



(a) JD-1滞回曲线

(b) JD-2滞回曲线

(c) JD-3滞回曲线

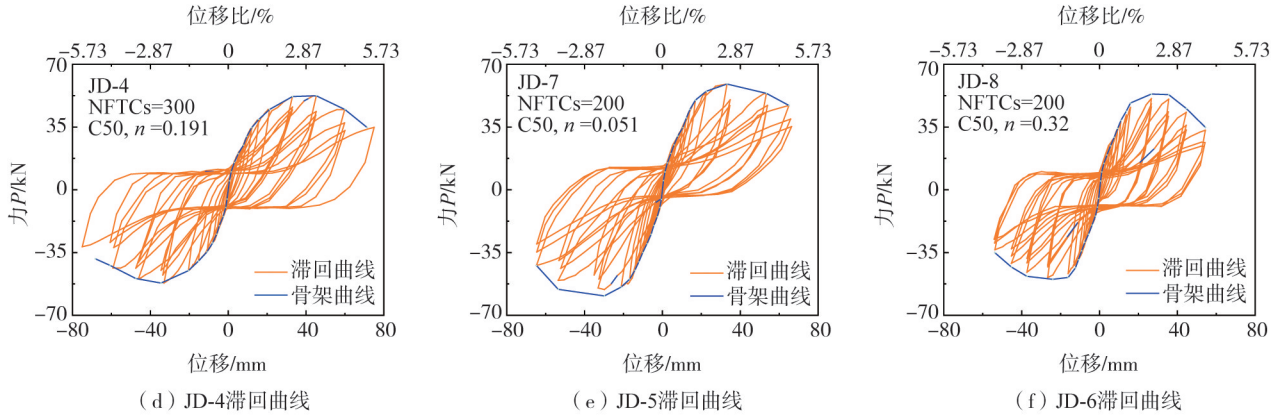


图 5 滞回曲线^[6]

Fig. 5 Hysteretic curves^[6]

2.2 骨架曲线

骨架曲线特征点标定方法见图 6。所有试件的骨架曲线见图 7。由图 6 与图 7 可知,骨架曲线各特征点参数随 NFTCs 与 n 的变化见图 8。由图 7~图 8 可知,随着 NFTCs 的增加,试样的开裂载荷、屈服载荷和峰值载荷均逐渐降低。然而极限位移与延性却呈现出略微增大的变化,这与 RONG 等^[17]、XU 等^[20]的研究相反。通常情况下,节点的性能会因为 FTC 而恶化。然而试验结果中极限位移与延性却呈现出略微增大的变化。这是因为 FTC 作用在加载前期时显著降低了梁端纵向钢筋与核心区的黏结性能,而最终残余的黏结强度随 NFTCs 的增加呈增加趋势。因此,在节点加载初期,致使 RC 梁柱节点核心区的破坏类型由混凝土强度控制的“斜压型”剪切破坏向梁纵筋在其连通的核心区的黏结退化转变,并且在加载后期的较大位移下可恢复部分荷载。在节点加载后期,相对较大的残余黏结强度导致“桁架机构”传进核心区域的剪力增加,“斜压杆机构”传进核心区域的剪力降低;致使核心区内混凝土承受到的斜向压应力降低,“斜压”破坏的发生逐渐推迟,节点的极限变形与屈服变形之差提高,极限位移与延性系数略微增加。开裂状态之前,不同 NFTCs 下节点的刚度接近;开裂状态之后节点的刚度显著降低。节点峰值后刚度和 NFTCs 之间的关系如式(1)所示:

$$S/S_0 = 1 - 0.00153NFTCs, R^2 = 0.99088 \tag{1}$$

现有研究^[21]结果表明,轴压比可以提高 RC 构件的峰值荷载,降低其变形能力。而本研究发现,冻融损伤节点的峰值荷载随着轴压比的增加而逐渐降低。这是由于设计节点核心区的剪压比已是中高水平(0.208,经过 200 次冻融循环后混凝土强度降低,节点实际剪压比将增大),在中高水平下斜压杆机构中的斜向压力已较大;随轴压比 n 的提高,节点核心区斜压杆机构中的压力得到了进一步提高,导致斜压杆中的压力提前企及了混凝土压溃能力。

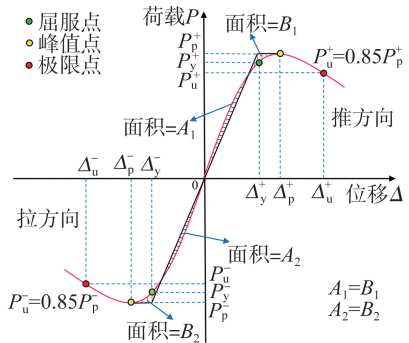
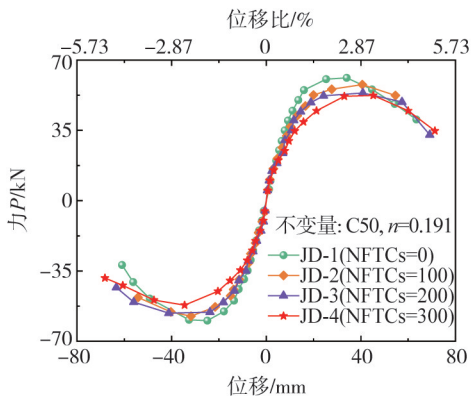
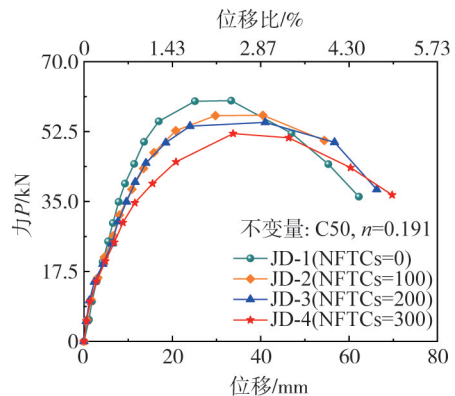


图 6 特征点标定方法

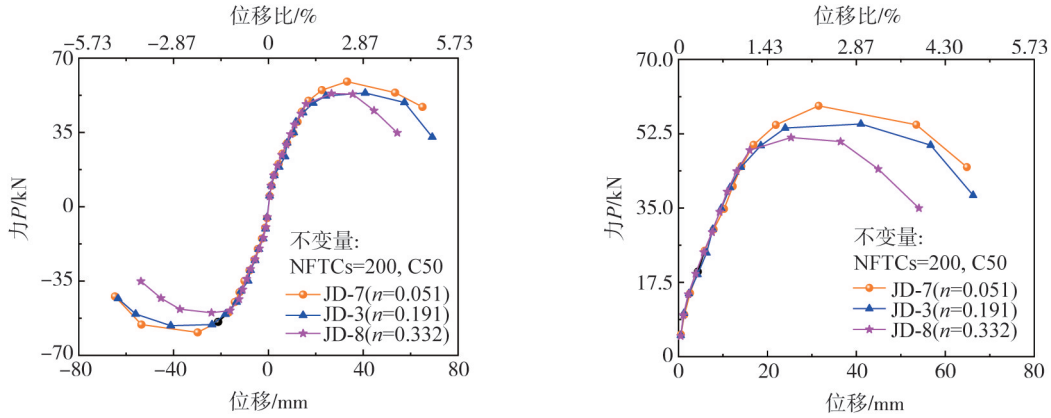
Fig. 6 Calibration method for characteristic points



(a) 不同冻融循环次数下的骨架曲线



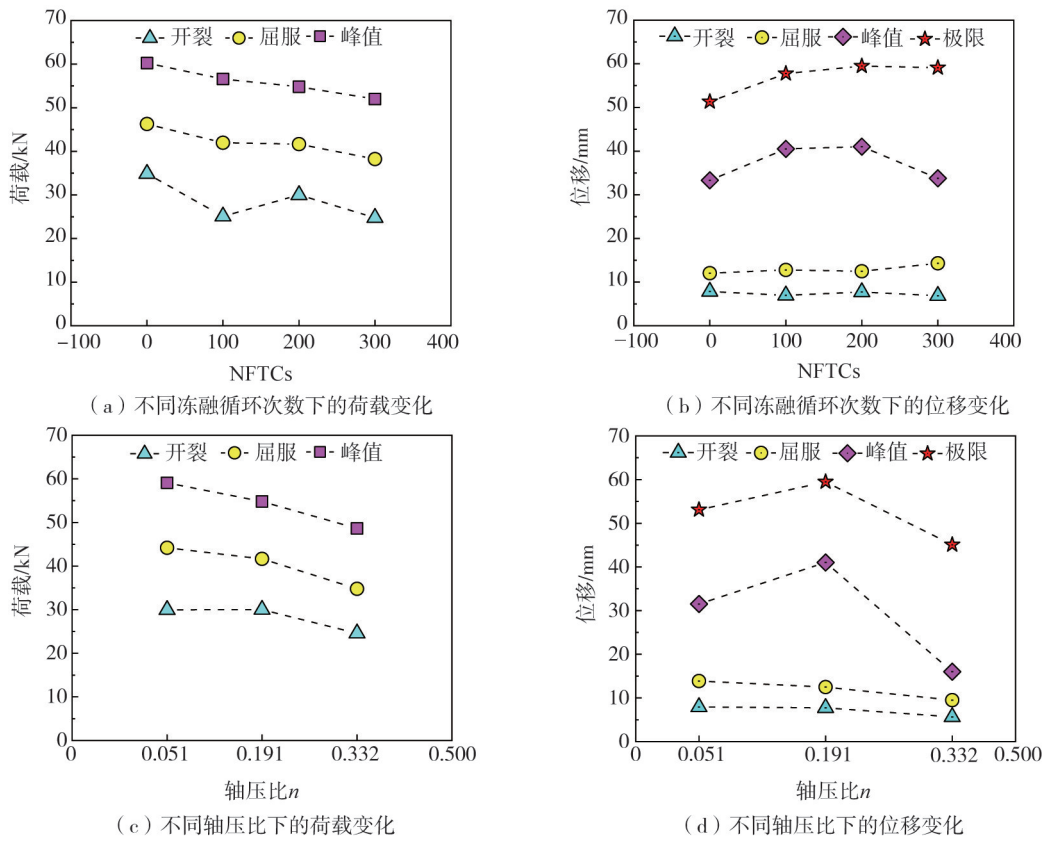
(b) 不同冻融循环次数下的平均骨架曲线



(c) 不同轴压比下的骨架曲线 (d) 不同轴压比下的平均骨架曲线

图7 骨架曲线^[6]

Fig.7 Skeleton curves^[6]



(a) 不同冻融循环次数下的荷载变化 (b) 不同冻融循环次数下的位移变化
(c) 不同轴压比下的荷载变化 (d) 不同轴压比下的位移变化

图8 不同参数下力和位移变化

Fig.8 Changes in force and displacement under different parameters

2.3 剪切性能

2.3.1 剪应变 γ

在试验中,通过核心区对角线长度变化来测量不同加载条件下的连接核心区的剪切变形 γ , 见图9(a),对应的节点受力分析见图9(b)、(c)。核心区剪切变形 γ 的表达式为

$$\gamma = \frac{\sqrt{b^2+h^2}}{bh} \bar{X} \tag{2}$$

式中: h 为梁截面有效高度; b 为柱截面有效宽度; \bar{X} 为对角线方向的平均变位,按式(3)计算:

$$\bar{X} = \frac{\delta_1 + \delta'_1 + \delta_2 + \delta'_2}{2} \tag{3}$$

式中, $\delta_1 + \delta'_1$ 、 $\delta_2 + \delta'_2$ 分别为布置在核心区的交叉位移计测量的伸长值与压缩值。

核心区剪应变 γ 诱发的柱顶变形 Δ_{pz} 即剪切成分引起的节点变形:

$$\Delta_{pz} = 0.5\gamma \left(2 - \frac{b}{H} - \frac{h}{L} \right) H \quad (4)$$

式中: H 为试件高度; L 为试件宽度。

核心区剪应变 γ 诱发的柱顶变形占柱顶总变形 Δ 的比 Δ_{pz}/Δ , 即

$$\frac{\Delta_{pz}}{\Delta} = 0.5\gamma \left(2 - \frac{b}{H} - \frac{h}{L} \right) \frac{H}{\Delta} \quad (5)$$

实测剪切变形 γ 和剪切位移占比的 Δ_{pz}/Δ 变化, 见图 10。虽然节点核心区被梁和柱包围, 其处于单边冻融较梁、柱 (三边冻融) 受 FTC 的影响小, 但随着 NFTCs 的增加, γ 和 Δ_{pz}/Δ 仍逐渐增加。这是由于受 FTCs 后混凝土的力学性能恶化造成的。

尽管剪应变 γ 随着 n 的增加而减小, 但剪切变形与总变形之比 Δ_{pz}/Δ 却呈现出上升趋势。这主要是因为轴压比使节点的总变形明显减少所致 (图 8)。

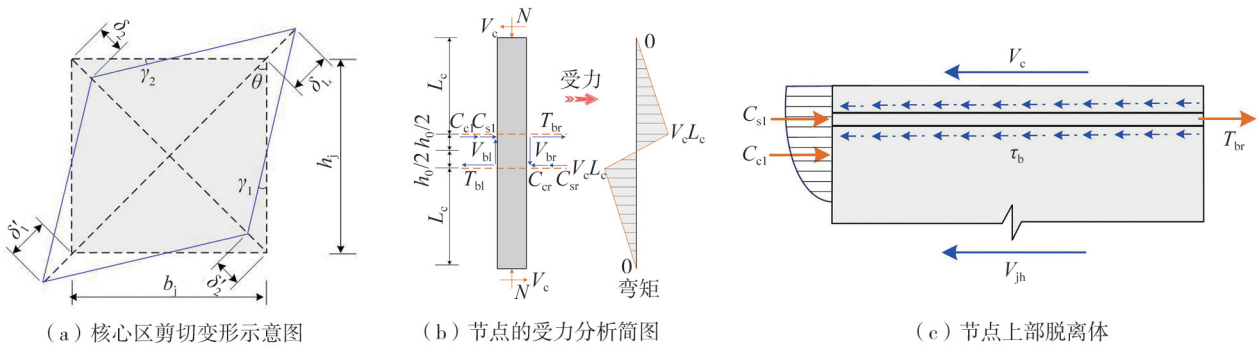


图 9 V_{jh} 和 γ 计算示意图^[6]

Fig. 9 Schematic diagram of V_{jh} and γ ^[6]

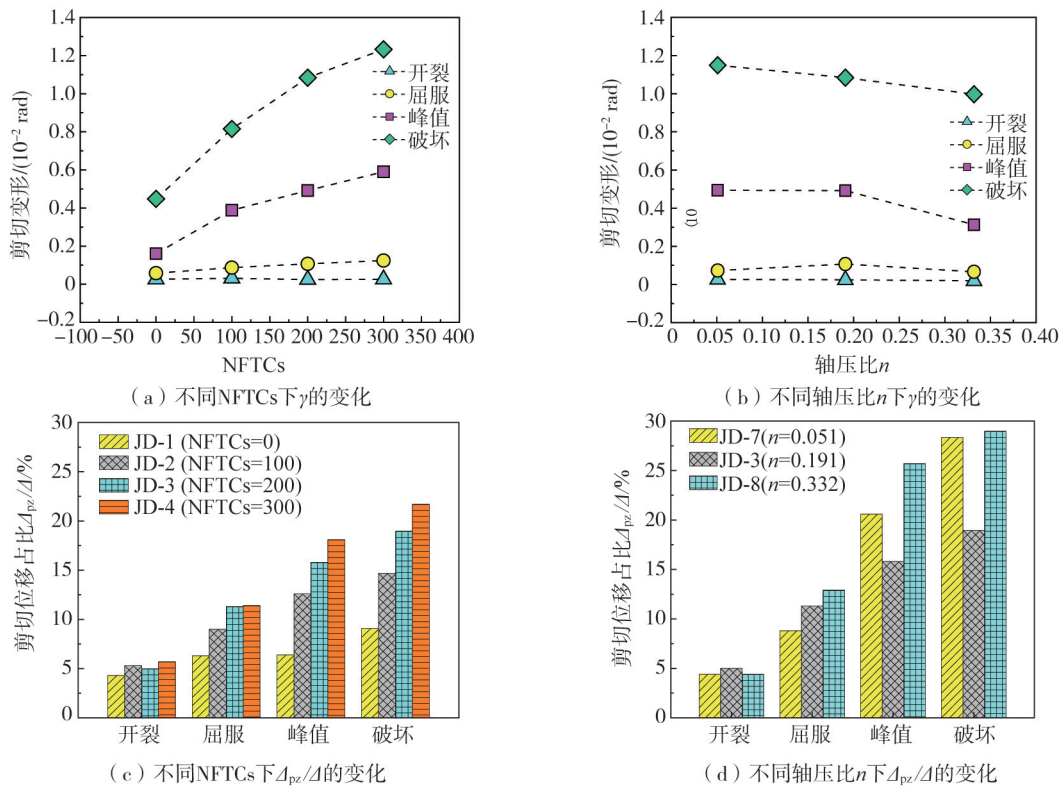


图 10 γ 和 Δ_{pz}/Δ 的变化

Fig. 10 Changes of γ and Δ_{pz}/Δ

2.3.2 剪力 V_{jh}

取柱的脱离体见图 9(b)。图中 V_c 为柱端剪力, 由力的平衡得柱端剪力等于柱顶水平力 P ; C_{sl} 、 C_{sr} 分别

为梁端受压侧纵筋压力; T_{br} 、 T_{bl} 为梁端受拉侧纵筋所受拉力; C_{cl} 、 C_{cr} 分别为梁端受压侧混凝土压力。

由图9(b)弯矩平衡(考虑 $P-\Delta$ 效应)条件有:

$$2V_c L_c + N\Delta = (T_{br} + T_{bl})h_0 \quad (6)$$

由图9(c)隔离体力的平衡可得:

$$V_{jh} = T_{br} + C_{sl} + C_{cl} - V_c \quad (7)$$

依据梁截面受压侧合力的大小等于受拉侧钢筋拉力的大小,则

$$T_{bl} = C_{sl} + C_{cl} \quad (8)$$

联立式(6)~式(8)可得:

$$V_{jh} = \frac{2V_c L_c + N\Delta}{h_0} - V_c \quad (9)$$

由式(9)得到 RC 节点核心区剪力 V_{jh} 。剪力 V_{jh} 随参数的变化规律见图 11。随 NFTCs 的增加,核心区剪力逐渐减小,呈现出与节点承载能力相同的变化规律。当轴压比从 0.051 逐渐增加到 0.332 时,核心区的剪力先增加然后减少,整体呈现出减小的变化趋势。

开裂、屈服、峰值下因 $P-\Delta$ 效应诱导的剪切荷载占 RC 节点核心区总剪切荷载 V_{jh} 的比例,见图 12。由图可知,因 $P-\Delta$ 效应诱导的剪切荷载占比与节点的冻损程度无显著相关关系。然而,值得指出的是峰值点处各试件因 $P-\Delta$ 诱导的核心区剪切荷载比例基本超过 20% (JD-7 除外),所占比例较大。因此,在建立冻融损伤 RC 梁柱节点剪力计算模型时,应考虑轴压比的影响,此为下文的计算模型奠定了理论基础。

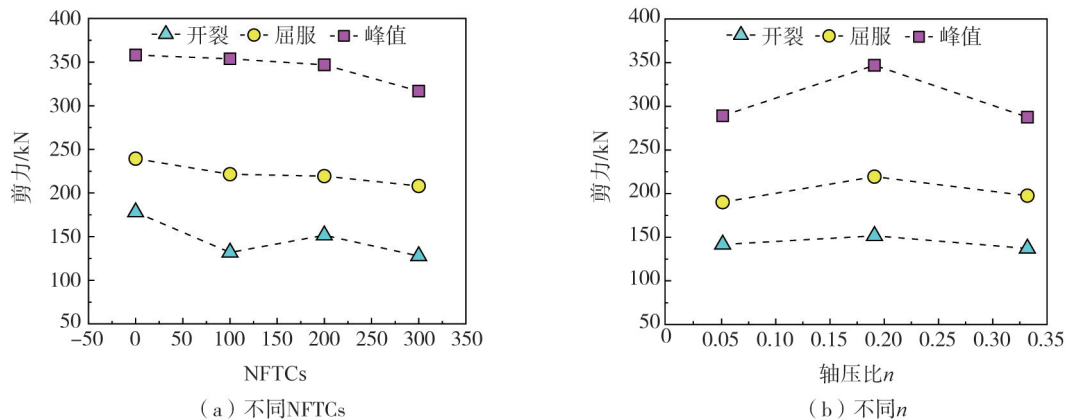


图 11 剪力 V_{jh} 变化

Fig. 11 Changes of shear force V_{jh}

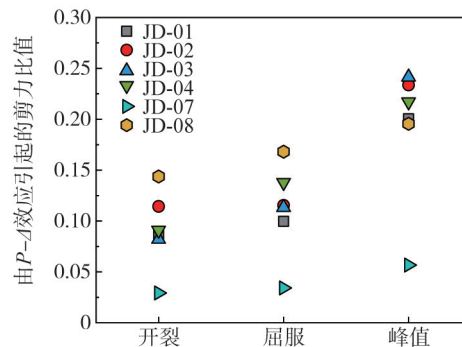


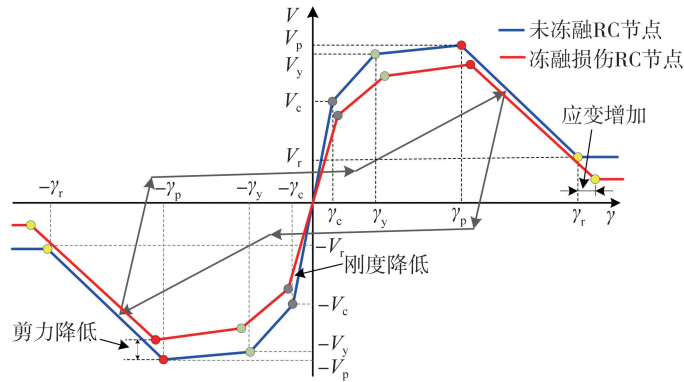
图 12 由 $P-\Delta$ 效应引起的剪力的占比

Fig. 12 Proportion of shear force caused by the $P-\Delta$ effect

3 RC 节点剪切骨架曲线模型

RC 节点核心区剪切骨架计算模型是 RC 节点核心区剪切恢复力模型的主要组成部分,准确建立其量化计算公式具有重要意义。LOWES 等^[22]提出的四折线 Pinching4 滞回模型,见图 13,能够较全面反映节点核心区的剪切滞回特性。因此,本文参考该模型建立节点核心区剪切骨架曲线计算模型(包含冻融节点和

未冻融节点)。与此同时,考虑到严寒环境下冻融损伤 RC 节点中混凝土力学性能劣化对其抗剪性能影响机理非常复杂,采用理论方法难以进行准确表征。因此,本文首先参考 HASELTON 等^[23]的模型,并考虑斜压杆应力扩散现象,给出了未冻融 RC 节点核心区剪切骨架曲线计算公式。进而依据前述冻融损伤 RC 节点的实测结果,通过多参数回归分析,构建了综合考虑冻融损伤程度与轴压比影响的 RC 节点核心区剪切骨架曲线计算公式,详细建立过程见图 13。



注: V_c —开裂剪力; γ_c —开裂应变; V_y —屈服剪力; γ_y —屈服应变; V_p —峰值剪力; γ_p —峰值应变; V_r —残余剪力; γ_r —残余应变; $V_r = 0.2V_p$ 。

图 13 Pinching4 模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of Pinching4 model

3.1 未冻融 RC 节点

为准确表征 RC 节点剪切破坏全过程的受剪性能, HASELTON 等^[23]提出了基于斜压杆模型的节点剪切骨架曲线计算公式,取得了良好的计算精度并有效地简化了计算流程。因此,本文参考 MITRA 等^[23]提出的模型,并考虑斜压杆应力扩散现象,定量化标定了未冻融 RC 节点剪切骨架曲线特征点的参数,具体如下。

1) 斜压杆有效宽度

由圣维南原理可知,节点斜压杆中存在如图 14(a)所示的应力扩散现象,因而斜压杆有效受压宽度大于其端部受压区宽度。由图 14(a)可知,节点斜压杆的有效宽度 w_{struct} 为

$$w_{struct} = \sqrt{c_b^2 + c_c^2} + 2l_{sp} \tan \varphi \tag{10}$$

$$c_b = h_b / 5 \tag{11}$$

$$c_c = [0.25 + 0.85N / (A_c f_c)] h_c \tag{12}$$

式中: φ 为应力扩散角度,取 $\varphi = 26.5^\circ$ ^[23]; l_{sp} 为应力扩散长度,取 $l_{sp} = l/6$ ^[23], l 为节点斜压杆长度^[23]; c_b 、 c_c 分别为梁截面、柱截面的受压区高度,分别按式(11)、式(12)计算确定; h_b 、 h_c 分别为梁截面、柱截面高度; N 为柱受到的轴向压力; A_c 为柱截面面积; f_c 为混凝土抗压强度。

2) 剪力传递机制

斜压杆模型中假定核心区剪力均匀分布且仅通过斜压杆传递,则根据静力平衡关系可知,核心区剪力为

$$V = f_{c,struct} w_{struct} b_j \cos a_{struct} \tag{13}$$

式中: b_j 为节点核心区有效宽度; a_{struct} 为斜压杆与水平方向的夹角,其值取为 $\arctan(h_b/h_c)$; $f_{c,struct}$ 为考虑混凝土软化效应及箍筋约束效应的斜压杆有效压应力,按式(14)计算确定。

$$f_{c,struct} = \begin{cases} 3.62 \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cc}} \right| - 2.82 \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cc}} \right| + 1, & \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cc}} \right| < 0.39 \\ 0.45, & \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cc}} \right| > 0.39 \end{cases} \tag{14}$$

式中: $f_{c,mander}$ 为基于 Mander 混凝土本构模型^[24]计算的节点约束混凝土压应力; ε_{cc} 为约束混凝土峰值压应变; ε_t 为斜压杆混凝土拉应变,根据开裂混凝土的平均应变摩尔圆(图 14(b))可知:

$$\varepsilon_t = \frac{\gamma}{2 \sin a_{struct} \cos a_{struct}} - \varepsilon_{struct} \tag{15}$$

式中 ε_{struct} 为斜压杆压应变。

3) 节点剪切变形

假定节点核心区仅发生剪切变形,则由图9(a)所示的节点斜压杆模型几何变形关系可知,斜压杆压应变 $\varepsilon_{\text{struct}}$ 可表示为

$$\varepsilon_{\text{struct}} = \gamma \sin a_{\text{struct}} \cos a_{\text{struct}} \quad (16)$$

4) 特征点的标定

基于计算式(10)~式(16),通过编制 MATLAB 计算程序,计算得到了各未冻融节点剪切破坏全过程的剪力-剪切变形关系。进而依据图7和图13的特征参数标定方法,确定了未冻融节点的屈服特征点、峰值特征点、残余特征点的剪力和剪切变形。开裂点的确定如下。

节点开裂状态以核心区混凝土率先企及抗拉强度 f_t 为表征。取核心区内部的微元体 X 为目标,其受力见图14(c)。依据微元体 X (图14(c))在双向受力下斜截面主拉应力计算式,得核心区开裂时剪切应力最大 τ_{max} 为

$$\tau_{\text{max}} = \sqrt{f_t^2 + f_t(\sigma_b + \sigma_c) + \sigma_b \sigma_c} \quad (17)$$

式中 $\sigma_c = N/b_c h_c$ 为柱端传输给核心区的轴应力; b_c 为柱截面宽度; σ_b 为箍筋约束在核心区形成的应力,取压为正。

当核心区开裂时,由 τ_{max} 可得核心区开裂剪力 V_{jc} ,即

$$\tau_{\text{max}} = V_{jc}/b_j h_j \quad (18)$$

式中 h_j 为核心区截面有效高度。

节点的开裂剪力 V_{jc} 为

$$V_{jc} = \eta \varphi_c b_j h_j \sqrt{f_t^2 + f_t(\sigma_b + \sigma_c) + \sigma_b \sigma_c} \quad (19)$$

由于非预应力梁,其轴向力可近似为0;且开裂前核心区箍筋对混凝土约束作用可忽略不计即 $\sigma_b = 0$ 。鉴于此,式(19)转化为

$$V_{jc} = \eta \varphi_c b_j h_j f_t \sqrt{1 + \sigma_c/f_t} \quad (20)$$

式中:当 $\sigma_c \geq 0.5f_c$ 时,取 $\sigma_c = 0.5f_c$; η 为综合影响系数,其值取为0.67; φ_c 为梁对节点约束参数,无正交梁节点取 $\varphi_c = 1.0$ 。

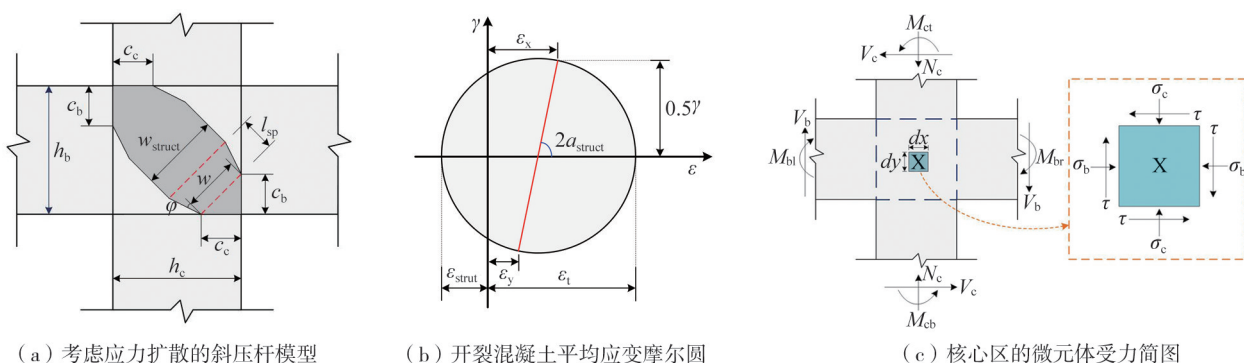


图14 计算机理

Fig. 14 Mechanism of calculation

3.2 考虑不均匀分布温度场的冻融损伤模型 D

郑山锁等^[13, 25-26]以混凝土动弹模量损失量 D 作为冻融损伤程度的物理指标,从冻损机理为出发点,基于蔡昊模型^[14],综合试验结果与理论推导,提出了广泛适用的并可考虑混凝土结构内部不均匀分布温度场的冻融损伤模型,如式(21)所示:

$$D = \frac{V_d}{V} \left\{ 1 - \left[1 - 0.014N \cdot f_{cu}^{-0.804} \left(\frac{\eta}{K} \times U_{\text{max}} \times \frac{d\theta}{dt} \times \varphi(\bar{L}) \right)^{1.205} \right]^{1/2.205} \right\} \quad (21)$$

式中: V_d 为受冻融影响混凝土的体积; V 为处于冻融环境中混凝土结构的体积; N 为冻融循环次数; K 为孔溶液在水泥浆体中的渗透参数的简写 (m^2); η 为孔溶液动力黏滞参数; U_{max} 为单位体积水泥浆体内最大孔溶液结冰速率; $d\theta/dt$ ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) 为降温速率; 更为详细的参数解释请见郑山锁等^[13]的研究。

3.3 冻损 RC 节点

前述试验结果表明,严寒环境下冻融损伤 RC 节点的剪切骨架曲线形状与未冻融节点的类似,但其特征点参数将随冻融损伤程度和轴压比的变化而不断变化。因此,本文选取轴压比和冻损程度为参数,对完好试件核心区剪力-剪应变进行多参数修正,以建立严寒环境下冻融损伤 RC 节点核心区剪切骨架曲线参数计算方法,相应修正公式如式(22)、式(23)所示:

$$V'_i = f_i(D, n) V_i \tag{22}$$

$$\gamma'_i = g_i(D, n) \gamma_i \tag{23}$$

式中: V'_i, γ'_i 为冻融损伤 RC 节点核心区剪切骨架曲线特征点 i 的剪力和剪应变; V_i, γ_i 为未冻融 RC 节点核心区剪切骨架曲线特征点 i 的剪力和剪应变; $f_i(D, n), g_i(D, n)$ 为综合考虑不均匀温度场分布的冻融损伤参数 D 与轴压比 n 影响的节点核心区特征点剪力和剪应变修正函数。

将冻融损伤 RC 节点核心区剪力和剪应变分别除以相同条件下未冻融节点核心区的剪力和剪应变,从而得到各试件不同特征状态下的剪力和剪应变修正系数随冻融损伤程度 D 和轴压比 n 的变化规律,见图 15~图 16。值得指出的是,为保证文章所建剪切骨架曲线模型的准确性,在建立过程中加入了同一批次的 14 个 RC 节点试件。由图 15~图 16 可知,随 D 的增大,节点核心区不同特征点的剪力修正系数逐渐减小,剪应变修正系数则呈增大趋势。不同轴压比节点核心区各特征点的剪力和剪应变修正系数近似呈线性变化关系。鉴于此,将冻融损伤 RC 节点核心区不同特征点的剪力和剪应变修正函数 $f_i(D, n), g_i(D, n)$ 假定为关于轴压比 n 和冻融损伤程度 D 的二次函数形式,并考虑边界条件得到相应的表达式如式(24)、式(25)所示:

$$f_i(D, n) = (aD^2 + bD + c)(dn^2 + en + f) + 1 \tag{24}$$

$$g_i(D, n) = (aD^2 + bD + c)(dn^2 + en + f) + 1 \tag{25}$$

式中, a, b, c, d, e, f 均为拟合参数,其值多参数回归分析得到,具体分析结果见图 17。其中,为了确保多参数回归计算公式的准确性,在回归计算时随机选择 2 个试件(表 2)的特征点数据不参与多参数非线性曲面回归分析,而仅用于验证计算模型的准确性。至此,得到冻融损伤 RC 节点核心区剪切骨架曲线计算公式如式(26)~式(33)所示。

开裂剪力 V'_c 和剪应变 γ'_c ,如式(26)、式(27)所示:

$$V'_c = [(7.70D^2 - 4.14D - 0.02) \times (-6.14n^2 + 2.56n + 0.28) + 1] V_c \tag{26}$$

$$\gamma'_c = [(1.15D^2 + 4.34D - 0.01)(7.35n^2 - 0.74n + 0.24) + 1] \gamma_c \tag{27}$$

屈服剪力 V'_y 和剪应变 γ'_y ,如式(28)、式(29)所示:

$$V'_y = [(0.39D^2 - 2.83D - 0.007)(1.96n^2 - 0.80n + 0.36) + 1] V_y \tag{28}$$

$$\gamma'_y = [(-13.74D^2 + 10.11D - 0.03)(-8.38n^2 + 5.05n - 0.11) + 1] \gamma_y \tag{29}$$

峰值剪力 V'_p 和剪应变 γ'_p ,如式(30)、式(31)所示:

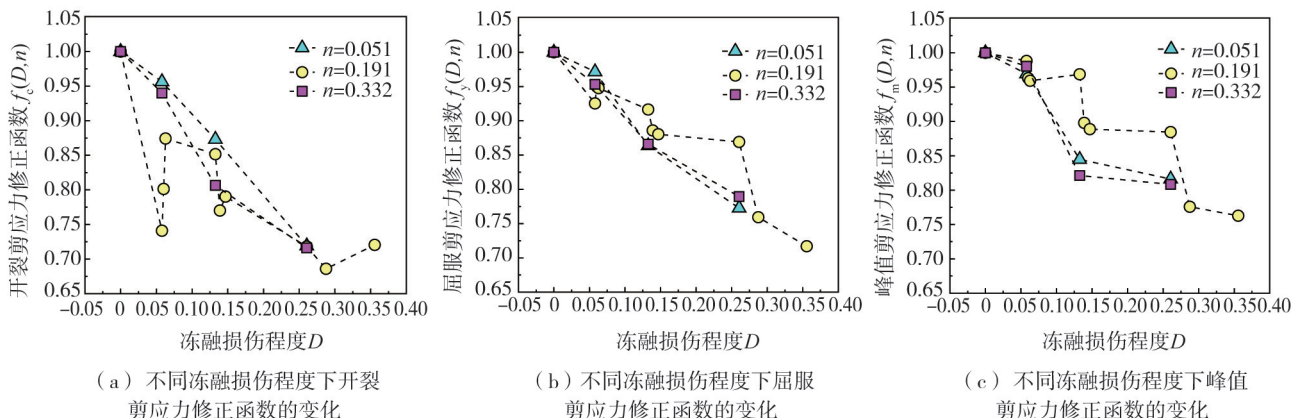
$$V'_m = [(1.44D^2 - 1.92D + 0.01)(4.58n^2 - 1.63n + 0.59) + 1] V_m \tag{30}$$

$$\gamma'_m = [(-6.06D^2 + 11.67D + 0.02)(3.75n^2 + 0.75n + 0.58) + 1] \gamma_m \tag{31}$$

残余剪力 V'_u 和剪应变 γ'_u ,如式(32)、式(33)所示:

$$V'_r = 0.2V'_m \tag{32}$$

$$\gamma'_r = [(-11.41D^2 + 12.45D - 0.01)(9.29n^2 - 2.59n + 0.79) + 1] \gamma_r \tag{33}$$



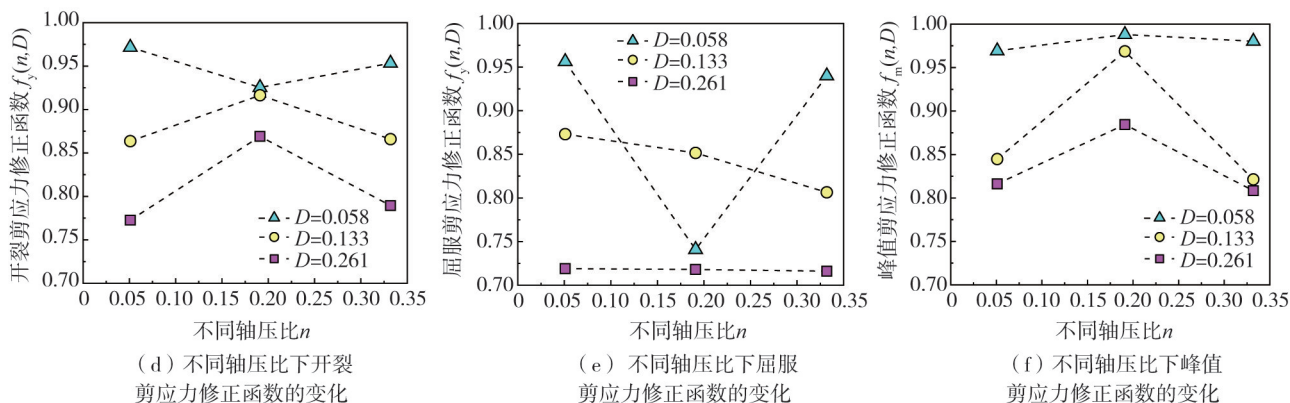


图 15 特征点 V 的变化

Fig. 15 Changes of characteristic point V

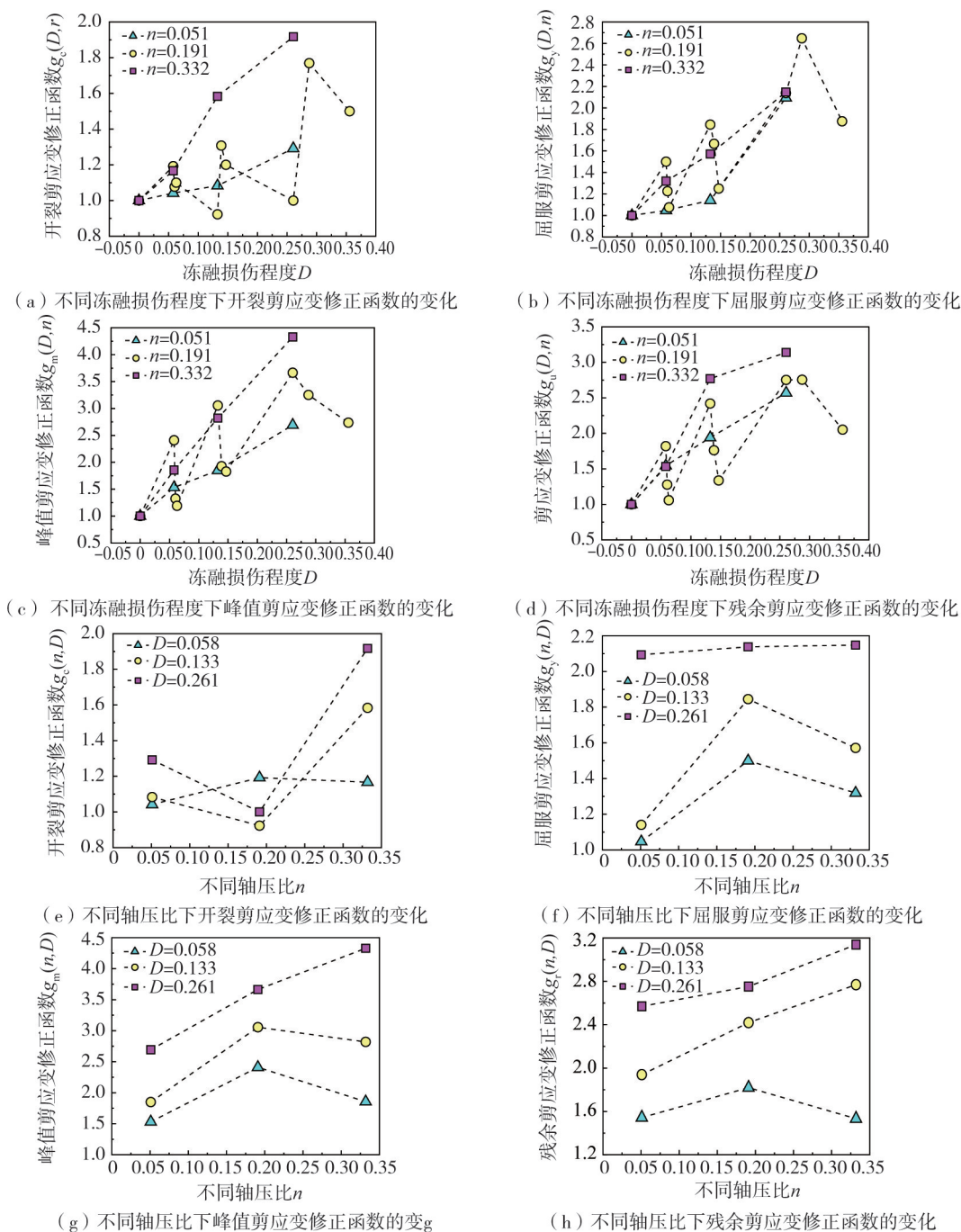


图 16 特征点 γ 的变化

Fig. 16 Changes of characteristic point γ

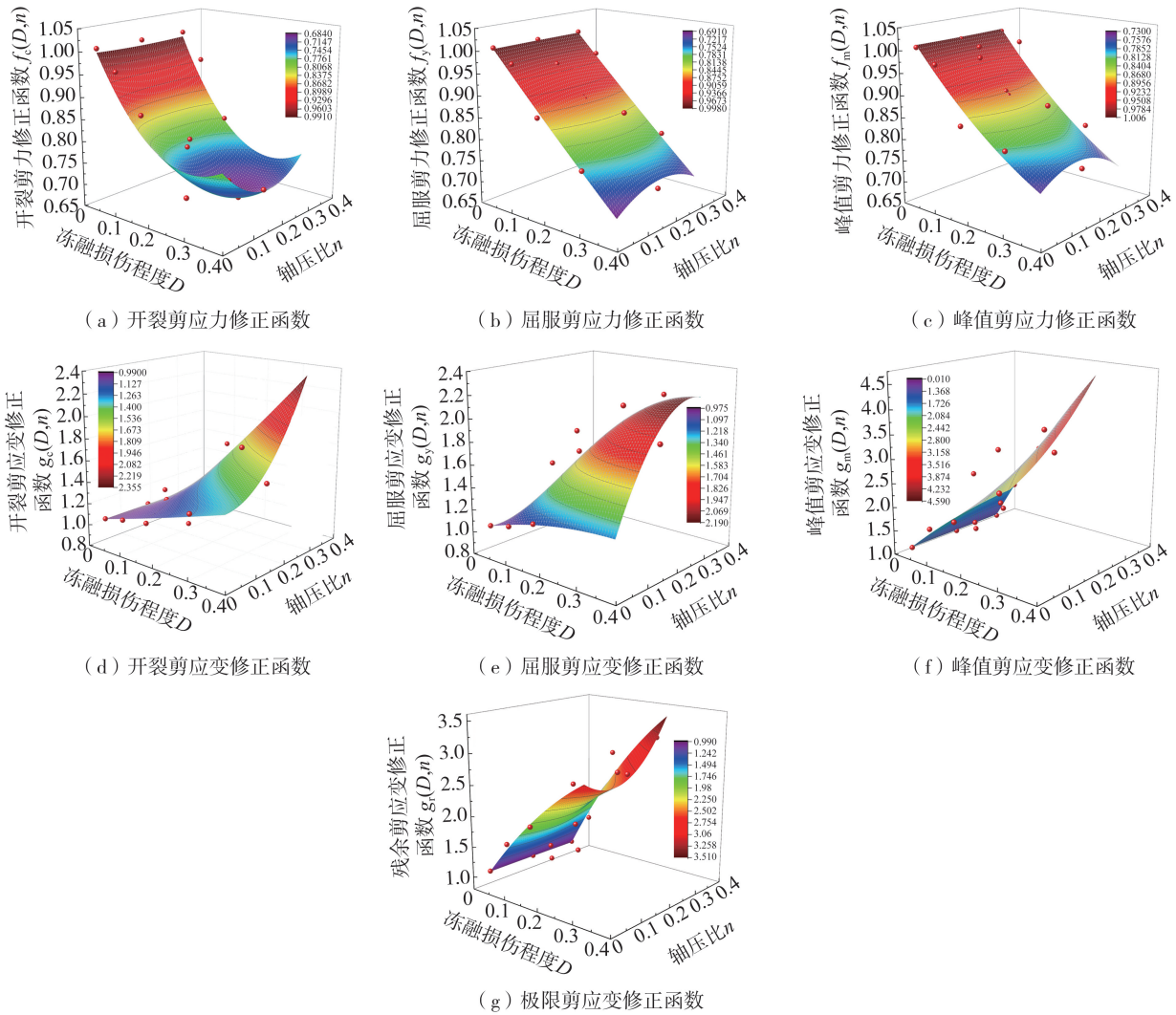


图 17 V 和 γ 的修正函数

Fig. 17 Correction function for V and γ

3.4 准确性验证

由 3.1 节~3.3 节所提出的未冻融与冻损 RC 节点剪切骨架曲线模型可计算出各 RC 节点核心区剪力 V_{jh} 和剪切应变 γ , 相应计算结果见表 2。图 18 (a)~(b) 是 20 个 RC 节点骨架曲线特征点的剪力 V_{jh} 和剪切变形 γ 的计算结果与试验结果的对比。由图 18(a)~(b) 可知, V_{jh} 和 γ 的计算结果是准确的, 平均误差不超过 20%, 标准偏差不超过 0.1。一些节点的剪切变形 γ 计算误差较大, 其原因可以归结为 FTC 作用的不确定性和混凝土材料本身的可变性^[10-12, 26-28]。

表 2 V_{jh} 和 γ 的计算结果

Table 2 Calculation results for V_{jh} and γ

编号	混凝土强度 f_{cu}	NFTCs	轴压比 n	开裂点		屈服点		峰值点		残余点
				剪力	剪应变	剪力	剪应变	剪力	剪应变	剪应变
JD-1	55.08	0	0.191	175.813	0.026	238.889	0.057	359.819	0.164	0.445
JD-2	55.08	100	0.191	155.137	0.031	228.230	0.074	342.925	0.255	0.639
JD-3	55.08	200	0.191	135.969*	0.024	214.323*	0.092	323.141*	0.365	0.856
JD-4	55.08	300	0.191	122.080	0.037*	192.257	0.111	316.770	0.530	1.145
JD-5	32.00	300	0.191	102.609	0.015	155.307	0.080	273.300	0.432*	1.098*
JD-6	40.3	300	0.191	111.613	0.023	172.597	0.080*	294.739	0.527	1.073
JD-7	55.08	200	0.051	134.484	0.026	193.708	0.073	303.514	0.514	1.173
JD-8	55.08	200	0.332	110.135	0.019	201.976	0.071	200.669	0.314	0.854
JD-9	32.00	0	0.191	141.287	0.010	210.696	0.039	350.821	0.112	0.378
JD-10	32.00	100	0.191	123.592*	0.011	200.328*	0.052	332.843*	0.180	0.555

续表

编号	混凝土强度 f_{cu}	NFTCs	轴压比 n	开裂点		屈服点		峰值点		残余点
				剪力	剪应变	剪力	剪应变	剪力	剪应变	剪应变
JD-11	32.00	200	0.191	106.950	0.012	187.137	0.065	311.952	0.263	0.758
JD-12	40.30	0	0.191	160.450	0.013	219.765	0.040	364.393	0.154	0.400
JD-13	40.30	100	0.191	140.931	0.014	209.576	0.053	346.642	0.243	0.581
JD-14	40.30	200	0.191	122.799	0.016*	196.480	0.066	325.924	0.350	0.785
JD-15	55.08	0	0.051	160.816	0.024	219.653	0.064	344.088	0.271	0.588
JD-16	55.08	100	0.051	147.202	0.025	208.213	0.068	325.276	0.382	0.863
JD-17	55.08	300	0.051	125.437	0.031	169.595	0.077*	272.894	0.715	1.586*
JD-18	55.08	0	0.332	168.365	0.012	227.659	0.041	352.077	0.114	0.357
JD-19	55.08	100	0.332	151.928	0.014	216.333	0.056	331.574	0.205	0.591
JD-20	55.08	300	0.332	125.651	0.023	178.107	0.087	274.488	0.476*	1.203

注：“*”为未参与多参数非线性曲面回归分析。

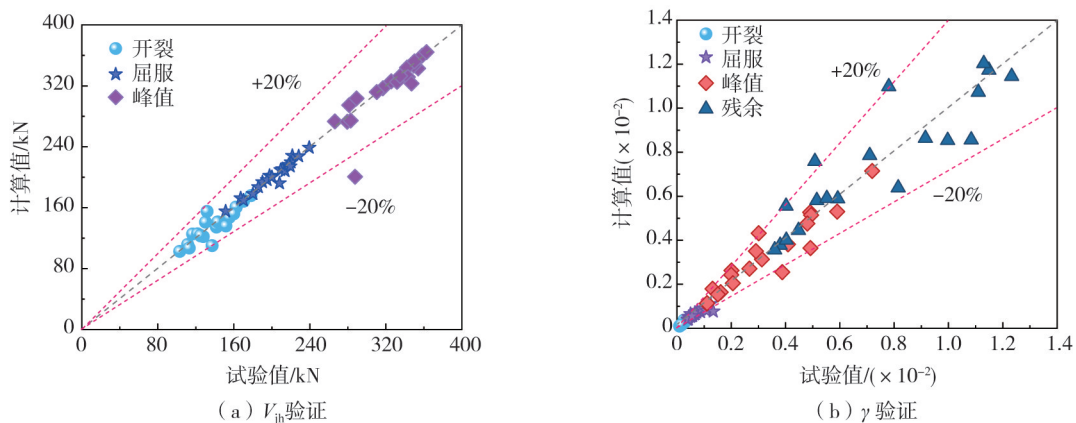


图 18 验证结果

Fig. 18 Validation results

4 结论

本文深入研究了 NFTCs 和 n 对 RC 梁柱节点抗震性能的影响,并根据试验结果建立了 RC 节点核心区剪切骨架曲线计算模型,得出如下主要结论:

1) 通常情况下,由于 FTCs 的作用,构件的性能会变差。然而,冻融损伤节点的延性却略有增加。与此同时,随 NFTCs 的增加,RC 节点的峰值荷载与核心区的抗剪承载力均下降,而 γ 和 Δ_{vz}/Δ 逐渐增加,且 300 次 NFTCs 后节点核心区的 Δ_{vz}/Δ 高达 21.90%。因此,在评估冻融环境下在役 RC 结构的抗震性能时,不能忽视节点核心区的剪切变形对整体结构水平位移的影响。

2) 对于没有受到 FTC 作用的节点,柱顶承载能力通常随着轴力比 n 的增加而增加。然而,当 $V_{jh}/f_c b_j h_j$ 大于 0.208 时,轴力比 n 的增加将导致冻融损伤 RC 节点核心区的承载能力、变形能力和剪切变形下降。

3) 结合四折线 Pinching4 模型与 Mitra 模型,考虑斜压杆应力扩散现象,建立了未冻融 RC 节点核心区剪切骨架曲线理论计算公式。

4) 提出了一个综合不均匀温度场分布和轴压比影响的冻损 RC 梁柱节点剪力-剪应变计算模型,并对计算模型的精度进行了验证。结果表明,剪力 V_{jh} 和剪应变 γ 的平均误差不超过 20%,标准偏差不超过 0.1。

参考文献:

- [1] 李宏男,肖诗云,霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 10-19.
LI Hongnan, XIAO Shiyun, HUO Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 10-19. (in Chinese)
- [2] ARABY M Z, RIZAL S, ABDULLAH, et al. Deformation capacity of RC beam-column joints strengthened with ferrocement[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4398.
- [3] 叶列平,陆新征. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.

- YE Lieping, LU Xinzhen. Analysis of the seismic damage of the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [4] ZHANG X C, LI B. Damage characteristics and assessment of corroded RC beam-column joint under cyclic loading based on acoustic emission monitoring[J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 110090.
- [5] UGALE A B, KHANTE S N. Role of different types of varying hoops reinforcement in RC beam-column joint performance[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 1590-1595.
- [6] 郑捷, 董立国, 秦卿, 等. 冻融循环下钢筋混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(10): 73-81. ZHENG Jie, DONG Ligu, QIN Qing, et al. Experiment study on seismic behaviors of RC beam-column joints after freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(10): 73-81. (in Chinese)
- [7] GONG M S, ZUO Z X, SUN J, et al. Influence of the column-to-beam flexural strength ratio on the failure mode of beam-column connections in RC frames[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2021, 20(2): 441-452.
- [8] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1945, 41(1): 245-272.
- [9] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume change in hardened Portland cement paste during freezing[J]. *Highway Research Board*, 1953, 32: 285-297.
- [10] DUAN A, JIN W L, QIAN J R. Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete[J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(7): 1309-1324.
- [11] HANJARI K Z, UTGENANNT P, LUNDGREN K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3): 244-254.
- [12] GONG F Y, REN M Q, MAEKAWA K. Simulation of spatially non-uniform frost damage in RC beams under various exposure and confining conditions[J]. *Engineering Structures*, 2018, 176: 859-870.
- [13] 郑山锁, 汪锋, 付晓亮, 等. 基于材性的混凝土结构及构件冻融损伤模型试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(3): 176-183. ZHENG Shansuo, WANG Feng, FU Xiaoliang, et al. Experimental study on freeze-thaw damage model for concrete structures and members based on material[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(3): 176-183. (in Chinese)
- [14] 蔡昊. 混凝土抗冻耐久性预测模型[D]. 北京: 清华大学, 1998. CAI Hao. The prediction model of concrete freeze-thaw durability[D]. Beijing: Tsinghua University, 1998. (in Chinese)
- [15] DUAN A, LI Z Y, ZHANG W C, et al. Flexural behaviour of reinforced concrete beams under freeze-thaw cycles and sustained load[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(10): 1350-1358.
- [16] CAO D F, ZHOU K F, ZHOU M, et al. Study on the shear behaviors of RC beams after freeze-thaw cycles[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 488-489: 750-754.
- [17] RONG X L, ZHANG Y X, ZHENG S S, et al. Seismic performance of reinforced concrete beams under freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 60: 103979.
- [18] GB/T 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. GB/T 50010—2010 National Standard of the People's Republic of China, Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [19] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. GB/T 50082—2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [20] XU S H, LI A B, JI Z Y, et al. Seismic performance of reinforced concrete columns after freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 861-871.
- [21] 刘超, 白国良, 贾胜伟, 等. 不同轴压比再生混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(6): 21-28. LIU Chao, BAI Guoliang, JIA Shengwei, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled concrete frame joints with different axial compression ratios[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(6): 21-28. (in Chinese)
- [22] LOWES L N, ALTOONTASH A. Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(12): 1686-1697.
- [23] HASLTON C B, GOULET C A, MITRANI-REISER J, et al. An assessment to benchmark the seismic performance of a code-conforming reinforced concrete moment-frame building [R]. PEER Report 2007/12, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, August 2008.
- [24] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [25] RONG X L, LI L, ZHENG S S, et al. Freeze-thaw damage model for concrete considering a nonuniform temperature field[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72: 106747.
- [26] RONG X L, LI L, HUANG W Y, et al. Experimental investigation of the seismic resistance of RC beam-column connections after freeze-thaw cycle treatment[J]. *Engineering Structures*, 2023, 290: 116330.
- [27] 刘付钧, 肖永生, 樊健生, 等. 笼模钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(6): 14-24. LIU Fujun, XIAO Yongsheng, FAN Jiansheng, et al. Experimental study on seismic performance of integrated RC columns with reinforcement cage and formwork[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(6): 14-24. (in Chinese)
- [28] 覃龙寿, 陈健伟, 周济, 等. 四螺箍约束钢筋混凝土方形柱抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(3): 106-117. QIN Longshou, CHEN Jianwei, ZHOU Ji, et al. Study on seismic performance of square reinforced concrete columns with four interlocking spirals[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(3): 106-117. (in Chinese)