



基于连续倒塌抗力的弧形梁柱子结构数值分析

曹 祥, 任宜春, 周 浩

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究弧形框架结构的抗连续倒塌性能,基于 ANSYS/LS-DYNA 建立了弧形混凝土梁柱子结构精细化数值模型。通过相关试验进行合理验证后,考虑弧形梁曲率、梁截面配筋等参数变化,开展了中柱失效情形下的拟静力抗连续倒塌分析。结果表明:1)由于梁初始曲率的影响,加载时产生的附加扭矩会加速混凝土破坏与钢筋断裂,导致结构压拱机制和悬链线机制的失效提前;2)随着弧形梁曲率逐渐增大,梁柱子结构的连续倒塌抗力逐渐降低,但极限位移会逐渐增大;3)梁腰筋的布置能够有效增强弧形混凝土梁柱子结构的压拱效应,并延缓压拱阶段抗力的下降速率,甚至出现小幅度的抗力二次上升;当边柱梁端截面顶部钢筋在失效柱梁柱截面底部钢筋之前发生断裂时,结构不会出现明显的悬链线效应。

关键词:梁柱子结构; 弧形梁; 连续倒塌抗力; 数值分析

中图分类号: TU312⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)07-0035-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.07.086

Numerical analysis of arc beam-column substructure based on continuous collapse resistance

CAO Xiang, REN Yichun, ZHOU Hao

(College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to study the continuous collapse resistance of arc-frame structures, a refined numerical model of arc concrete beam-column substructures is established based on ANSYS/LS-DYNA. After reasonable verification through relevant tests, considering the changes of parameters such as arc beam curvature and beam section reinforcement, the quasi-static anti-continuous collapse analysis under the failure condition of the middle column is carried out. The results show that due to the influence of the initial curvature of the beam, the additional torque generated during loading will accelerate the failure of concrete and steel bar, resulting in the early failure of the arching mechanism and catenary mechanism of the structure. With the gradual increase of the curvature of the arc beam, the continuous collapse resistance of the beam-column substructure is gradually decreased, but the ultimate displacement is gradually increased. The arrangement of the beam waist reinforcement can effectively enhance the arch pressing effect of the arc concrete beam column structure, delay the decline rate of the resistance in the arch compression stage, and even appear the secondary increase of the resistance with small amplitude. When the top reinforcement of the end section of the side column beam breaks before the bottom reinforcement of the column section of the failed column and beam column does, the structure does not exhibit a significant catenary effect.

Key words: beam-column substructure; arc beams; continuous collapse resistance; numerical analysis

收稿日期: 2024-09-25

作者简介: 曹 祥(2001—),男,硕士研究生,从事结构抗连续倒塌方面的研究。

通信作者: 任宜春(1969—),女,副教授,从事工程结构健康监测与损伤识别方面的研究。

随着建筑结构功能要求的日益多样化,人们对建筑形式也提出了更高的追求。弧形混凝土框架结构因具有优美的建筑造型和良好的空间适用性等优点,被广泛应用于国内外大规模工程中。然而,由于服役时间的增长或偶然荷载的作用,局部结构破坏导致整体连续倒塌的事件时有发生^[1]。一系列恐怖袭击事件表明,伤亡的主要原因并非初始爆炸或撞击,而是建筑结构的连续倒塌。因此,提升结构的连续倒塌抗力已成为保障建筑安全的最后一道防线。

目前,通常采用替代荷载传力路径法进行结构抗连续倒塌的研究,包括非线性静力分析与线性静力分析。大量针对平面框架和梁柱子结构的连续倒塌试验^[2-5]表明,结构的抗连续倒塌机制主要依赖于压拱效应和悬链线效应。尽管结构的连续倒塌具有动力特性,但 PHAM 等^[6]、LIN 等^[7]开展的中柱失效情形下钢筋混凝土(reinforcement concrete, RC)梁柱子结构的动力试验表明,其破坏模式与拟静力试验结果一致。因此,拟静力试验结果能够准确反映 RC 子结构的连续倒塌破坏特征。在实际工程中,结构的连续倒塌往往表现出显著的空间效应,失效柱头会受到横向梁扭转作用的影响。RASHIDIAN 等^[8]通过 T 形框架连续倒塌试验研究了横向梁的作用,发现横梁能够提供额外的弯曲抗力,但无法有效发展压拱效应和悬链线效应。LIM 等^[9]的空间框架连续倒塌试验进一步表明,加载柱头产生的扭转作用对结构承载力的影响较小。而黄远等^[10]的研究则发现,在不同扭矩作用下,结构纵筋的断裂特征存在明显差异。

综上所述,国内外学者对建筑结构的抗连续倒塌进行了大量的试验和理论研究。然而,这些研究大多集中于直线梁框架和直线梁柱子结构,对于弧形梁结构的抗连续倒塌研究仍然较少。与直线梁框架相比,弧形混凝土框架的主要受力构件——弧形梁处于弯剪扭复合受力状态,其抗连续倒塌机理尚未得到充分揭示。本文基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了弧形混凝土梁柱子结构模型,并通过相关试验验证了建模方法的准确性。在此基础上,分析了弧形梁曲率及梁截面

配筋对此类结构抗连续倒塌性能的影响,以期能为弧形框架结构抗连续倒塌设计提供参考。

1 建模方法与验证

1.1 建模方法

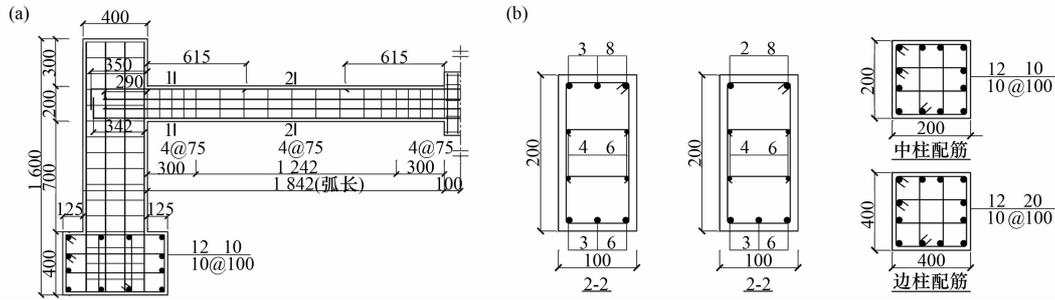
使用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立弧形梁柱子结构的有限元模型,针对中柱失效情形进行拟静力抗连续倒塌分析。混凝土部分采用 8 节点缩减积分的 Solid164 实体单元进行建模,该单元在计算效率上优于全积分单元,但为确保计算结果可靠,需设置沙漏系数^[11]以防止出现沙漏模态(零能模式)。钢筋部分则采用 BEAM161 梁单元建模,并参考 QIAN 等^[12]的数值模拟研究,通过设置 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字,采用节点耦合的方法将钢筋嵌入混凝土,从而实现较好的模拟精度。

混凝土材料采用连续面帽盖模型(continuous surface cap model, CSCM)^[13]进行模拟,通过关键字 *MAT_CSCM 定义混凝土材料属性,该模型能够有效模拟低围压下混凝土的力学性能,包括损伤演化、约束效应以及应变率效应。钢筋则采用塑性随动硬化模型进行模拟,通过关键字 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 定义钢筋材料属性,该模型仅需提供弹性模量、屈服强度、屈服后切向模量和破坏应变。当应变超过极限值时,删除相应的单元。加载所用钢板及支座处钢垫块均采用弹性材料进行模拟。

1.2 建模方法验证

为验证建模方法的准确性,选取弧形梁柱子结构连续倒塌试件 S60^[14]进行分析,试件基本信息如图 1 所示。

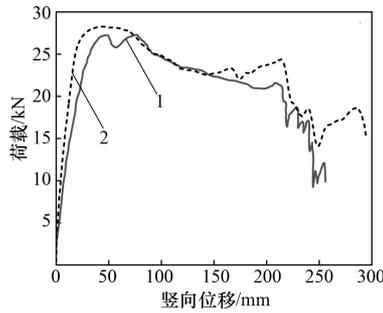
试件的荷载-位移曲线对比如图 2 所示。由图 2 可知:模拟结果与试验结果的荷载-位移曲线吻合较好,能够较为准确地反映 RC 梁柱子结构在整个倒塌过程中的抗力变化。由于试验中混凝土浇注会引起刚度不确定性以及开裂造成的材料位移,有限元模拟的刚度会相对偏大,因此模拟曲线的压拱峰值点早于试验曲线。在抗力曲线下降段,由于有限元模拟未考虑混凝土破坏及钢筋断裂引起的动力冲击,模拟曲线显得较为平滑。



(a) 半结构配筋; (b) 截面配筋详图

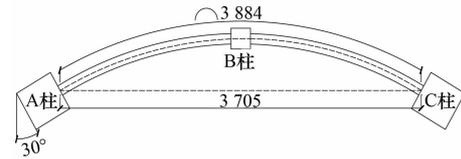
图 1 S60 试件尺寸及配筋

mm



1—试验值; 2—模拟值。

图 2 模拟与试验对比



1—试验值; 2—模拟值。

图 3 模型平面示意

mm

2 弧形混凝土梁柱子结构抗连续倒塌性能分析

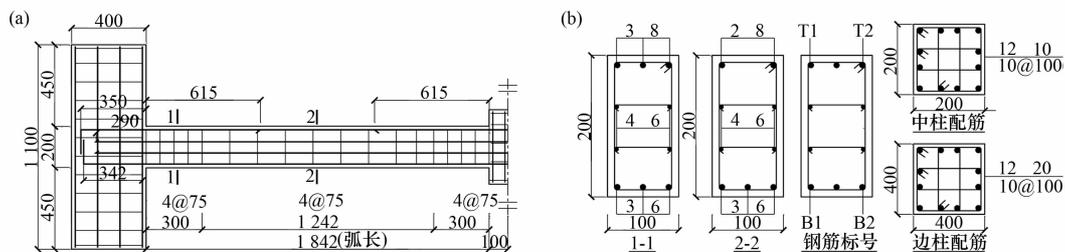
2.1 弧形混凝土梁柱子结构模型

按照国家现行规范要求, 设计了一栋 6 层 RC 弧形框架建筑, 层高均为 3.3 m, 混凝土强度等级为 C35, 钢筋采用 HRB400。选取底层外围梁柱子结构(A60)作为研究对象, 并进行 1/3 缩尺处理。由于本文主要研究梁柱子结构的连续倒塌抗力, 不考虑楼板及上部结构的约束作用, 因此将边柱尺寸适当放大, 并通过钢板对柱端进行固结, 以确保梁具有足够牢固的边界约束。同时, 在失效柱柱头处通过钢板施加荷载, 防止局部压碎。子结构平面布置如图 3 所示, 截面尺寸及配筋如图 4 所示。

2.2 弧形混凝土梁柱子结构抗连续倒塌机制分析

当结构处于中柱失效情形下发生倒塌破坏时, 会依次出现梁弯曲机制 (flexural action, FA)、压拱机制 (compressive arch action, CAA) 和悬链线机制 (catenary action, CA) 3 种典型的抗力机制。然而, 这 3 种机制之间并没有明显的界线^[15-16]。将 CAA 的起始点定义为边柱梁端顶部纵筋屈服点; 当边柱梁端顶部纵筋断裂时, 则视为结构破坏。A60 模型的荷载 - 位移曲线如图 5 所示。

由图 5 可知: 在加载初期的小变形阶段, 模型的抗力机制与常规框架设计中的梁受弯机制一致。在混凝土尚未开裂之前, 结构抗力随失效柱竖向位移的变化近似呈线性关系。随着竖向位移增加, 混凝土裂缝开始出现在梁端受拉区, 结构抗力逐渐达到 FA 机制峰值抗力点 A (14 mm, 30.04 kN)。此后, 由于梁截面受拉纵筋的屈服, 弯曲机制结束。



(a) 半结构配筋; (b) 截面配筋及钢筋标号

图 4 A60 模型尺寸及配筋

mm

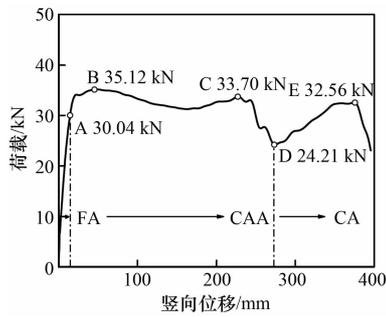


图 5 S60 荷载-位移曲线

随着混凝土裂缝进一步发展，边柱梁端截面中性轴下移，失效柱梁端截面中性轴上移。由于梁两端中性轴存在高差，在边柱拱推作用下，梁内形成压拱效应，结构抗力继续增加。当失效柱竖向位移为 46 mm 时，抗力到达第一个压拱机制峰值 35.12 kN。由于梁端截面受压区逐渐减小，梁内压拱效应逐渐减弱，结构抗力随之逐渐下降。随后，由于中柱梁端下部腰筋拉应力增加，结构抗力重新上升，达到第二个压拱机制峰值点 C (227 mm, 33.70 kN)。随后，由于失效柱梁端截面底部钢筋开始断裂，结构抗力出现陡降。当失效柱梁端截面底部钢筋及下层腰筋全部断裂后，压拱机制结束。

在悬链线机制阶段，由于失效柱梁端截面底部钢筋被拉断，截面顶部钢筋由受压逐渐转为受拉。此后，结构抗力开始由梁截面顶部钢筋的拉力提供，抗力在陡降后重新上升，直至达到点 E (378 mm, 32.56 kN)，此时左侧边柱梁端截面顶部外侧钢筋拉断，结构承载力骤降。随着失效柱位移的加载，边柱梁端截面顶部钢筋相继断裂，悬链线机制失效，最终导致结构发生倒塌破坏。

根据结构的荷载-位移曲线，从结构弯曲机制峰值点 A 到悬链线机制峰值点 E，对应的失效柱竖向位移分别为 14、378 mm。这表明，按照最大抗弯承载力进行设计时，此类结构仍具备较大的抗力和变形储备能力。

2.3 弧形混凝土梁损伤及钢筋应变分析

2.3.1 混凝土损伤

选取 A60 模型 AB 跨梁在失效柱竖向位移 δ 为 10 (FA 阶段)、80 mm (CAA 阶段) 时的混凝土塑性损伤云图 (图 6) 进行分析。其中，靠近曲率中心的一侧为梁内侧。

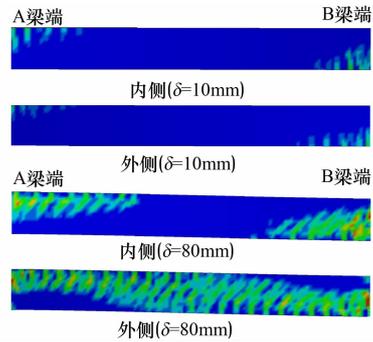
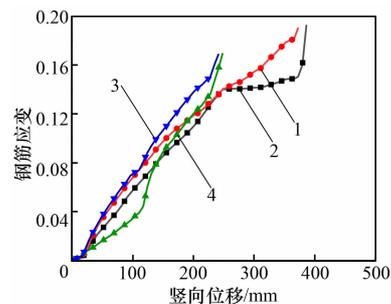


图 6 混凝土塑性损伤

尽管有限元模拟无法准确显示混凝土裂缝，但可以通过混凝土的塑性损伤来分析梁体裂缝的发展趋势及破坏情况。在加载初期，边柱梁端截面顶部与中柱梁端截面底部会出现细小的竖向裂缝，此时结构抗力主要由梁截面的受弯承载力提供，因此裂缝以受弯裂缝为主。随着竖向位移的加载，梁端裂缝迅速发展，同时梁跨中斜裂缝开始出现并迅速布满整个梁身。此后，中柱梁端截面底部被逐渐被拉开形成贯通裂缝，钢筋随之逐渐屈服并断裂。与常规直线梁对称的混凝土塑性损伤不同，弧形梁由于受到扭矩的影响，其外侧混凝土损伤发展较快，梁体裂缝也更早出现。

2.3.2 钢筋应变

选取边柱梁端截面 SA (section A) 和失效柱梁端截面 SB (section B) 的钢筋应变绝对值进行分析 (图 7)，截面钢筋编号如图 4 (b) 所示，其中截面左侧为梁外侧，右侧为梁内侧。



1—SAT1; 2—SAT2; 3—SBB1; 4—SBB2。

图 7 钢筋应变

由图 7 可知：在整个倒塌破坏过程中，由于直线型梁柱子结构的梁截面中性轴始终保持水平，因此同一梁截面上内外两侧钢筋的应变发展趋势及断裂时间基本一致。然而，弧形梁柱子结构由于受到扭矩的影响，其弧形梁内外两侧钢筋应变

的发展出现了明显的差异。通过分析截面钢筋应变可以发现, 失效柱附近梁端截面底部外侧钢筋的应变快于内侧, 而边柱附近梁端截面顶部外侧钢筋的应变也快于内侧。这是因为在弧形梁模型中, 初始曲率产生的附加扭矩与弯矩所引起的应力相互叠加, 导致梁截面中性轴发生扭曲。在边柱梁端截面, 中性轴呈现为内侧高、外侧低的斜轴; 而在失效柱梁端截面, 则呈现为外侧高、内侧低的斜轴。

3 弧形混凝土梁柱子结构抗连续倒塌性能参数分析

从 A60 模型的分析结果可以看出, 与直线型梁柱子结构相比, 弧形梁柱子结构由于受到梁初始曲率的影响, 弧形梁外侧应力发展明显快于内侧。这种不均匀的应力发展不仅加速了混凝土的破坏和钢筋的断裂, 还导致结构压拱机制及悬链线机制提前失效。因此, 有必要建立不同曲率及梁截面配筋的弧形梁柱子结构模型, 进一步探究曲率和梁截面配筋对这类结构连续倒塌抗力的具体影响。

3.1 弧形梁曲率

为研究弧形梁曲率对弧形梁柱子结构抗力机制发展的影响, 在边柱间弦长相同的情况下, 建立不同圆心角的梁柱子结构模型。具体模型参数及命名如表 1 所示, 各模型的三维示意如图 8 所示, 且各模型的配筋均与 A60 模型保持一致。

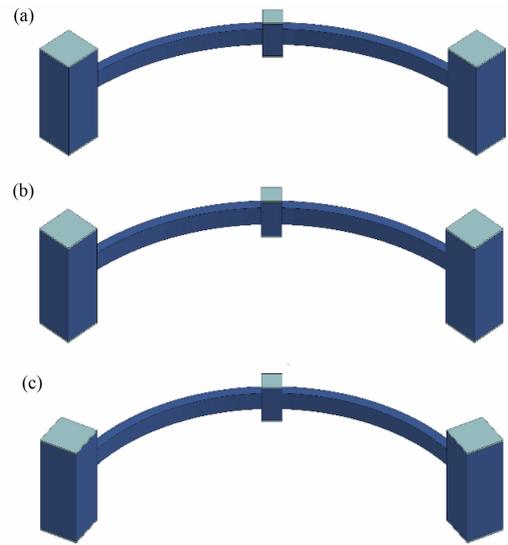
表 1 不同曲率模型

模型编号	弦长/mm	圆心角/(°)
A60	3 705	60
A90	3 705	90
A120	3 705	120

各模型的荷载 - 位移曲线如图 9 所示, 根据曲线选取对应机制承载力的峰值。其中, 压拱机制仅选取第一个峰值点, 具体数值如表 2 所示。

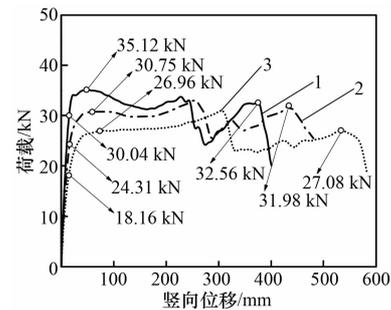
表 2 抗力机制承载力峰值 kN

模型编号	FA	CAA	CA
A60	30.04	35.12	32.56
A90	24.31	30.75	31.98
A120	18.16	26.96	27.08



(a) A60 模型; (b) A90 模型; (c) A120 模型

图 8 不同梁曲率模型示意



1—A60; 2—A90; 3—A120。

图 9 不同曲率模型的荷载 - 位移曲线

当子结构边柱间的弦长确定时, 弧形梁曲率与圆心角大小呈正相关。曲率越大的模型, 在加载过程中产生的扭矩也越大。由图 9 可知: 在加载初期, 由于轴向压力能够在一定程度上减小钢筋受的拉应力, 随着结构圆心角的增加, 结构达到压拱机制峰值点时的竖向位移也随之增大。在悬链线阶段, 由于附加扭矩的影响, 梁截面中性轴发生偏转, 且扭矩越大, 偏转程度越大, 从而导致梁端截面受压钢筋所受的压应力随之增加。因此, 对于弧形梁曲率较大的子结构, 钢筋由受压转化为受拉所需的时间更长, 结构破坏时的失效位移也随之增加。由表 2 可知: 由于曲率越大的模型在加载时产生的附加扭矩也越大, 因此随着曲率的增加, 结构的连续倒塌抗力逐渐降低。

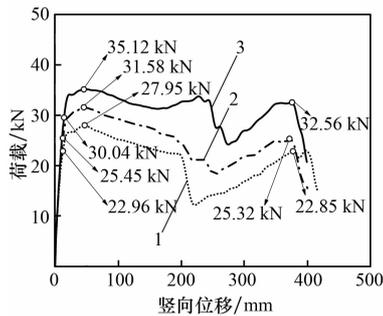
3.2 弧形梁腰筋配筋率

腰筋不仅可以作为架立钢筋, 使梁内形成完整的钢筋骨架, 还能有效增强梁的抗扭能力。因

此,为探究腰筋配比对弧形梁柱子结构连续倒塌抗力机制发展的影响,在圆心角相同的情况下,建立不同腰筋配筋率的子结构模型以进行连续倒塌分析。模型参数及命名如表 3 所示,各模型的荷载-位移曲线如图 10 所示,各模型抗力机制承载力峰值如表 4 所示。

表 3 不同腰筋配置模型

模型编号	顶部纵筋符号	底部纵筋符号	腰筋符号 (配筋率/%)
A60-T0	3C ₈	3C ₆	0
A60-T4	3C ₈	3C ₆	4C ₄ (0.25)
A60	3C ₈	3C ₆	4C ₆ (0.56)



1—A60-T0; 2—A60-T4; 3—A160。

图 10 不同腰筋配比模型的荷载-位移曲线

表 4 抗力机制承载力峰值 kN

模型编号	FA	CAA	CA
A60-T0	22.96	27.95	22.85
A60-T4	25.45	31.58	25.32
A60	30.04	35.12	32.56

由图 10、表 4 可知:在加载初期,由于结构竖向抗力主要由梁顶部钢筋、底部钢筋及混凝土提供,受腰筋的影响较小,因此不同腰筋配比的

模型抗力曲线发展基本一致。在 CAA 阶段,腰筋的布置能够约束混凝土的收缩,并减小受拉区混凝土裂缝的扩展,从而有效增强结构的压拱效应。相比与未布置腰筋的模型,A60-T4 与 A60 的压拱机制峰值抗力均出现明显提升。在失效柱梁端截面底部钢筋屈服后,腰筋可作为受力钢筋提供额外的拉力,因此配置腰筋的模型在压拱机制下降段的斜率减小,甚至出现小幅度的抗力二次上升现象。在 CA 阶段,腰筋的布置有效提高了结构的承载力,但对结构最终失效位移的影响不明显。

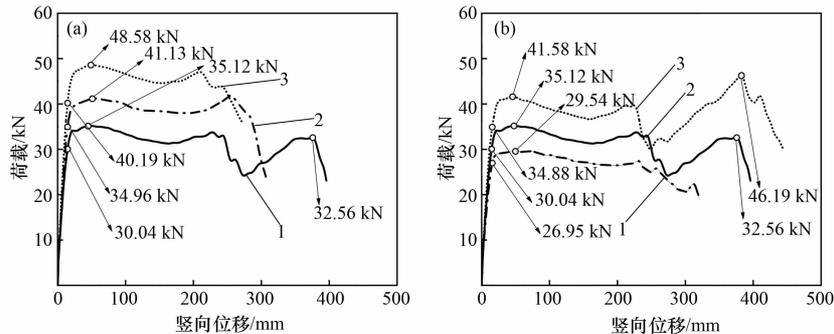
3.3 弧形梁纵筋配筋率

由于梁底部钢筋和顶部钢筋在抗力机制发展中的受力机理不同,按照梁顶钢筋配筋率和梁底钢筋配筋率的差异,分别建立弧形梁柱子结构模型进行分析。模型的配筋信息如表 5 所示,不同配筋率下的模型荷载-位移曲线如图 11 所示,各模型抗力机制承载力峰值如表 6 所示。

表 5 不同纵筋配置模型

模型编号	顶部纵筋符号 (配筋率/%)	底部纵筋符号 (配筋率/%)	腰筋符号
A60	3C ₈ (0.75)	3C ₆ (0.42)	4C ₆
A60-L8	3C ₈ (0.75)	3C ₈ (0.75)	4C ₆
A60-L10	3C ₈ (0.75)	3C ₁₀ (1.18)	4C ₆
A60-Y6	3C ₆ (0.42)	3C ₆ (0.42)	4C ₆
A60-Y10	3C ₁₀ (1.18)	3C ₆ (0.42)	4C ₆

由图 11、表 6 可知:在小变形阶段,适当增加配筋率能够提高梁截面的抗弯能力。因此,梁截面配筋率较大的模型在 FA 阶段表现出更强的抗弯性能。进入压拱阶段后,由于梁端弯矩随着梁配筋率的增加而提升,结构的压拱效应随之增强,



(a) 梁顶钢筋配筋率变化下荷载-位移曲线; (b) 梁底钢筋配筋率变化下荷载-位移曲线

1—A60-Y6; 2—A60; 3—A160-Y10。

图 11 不同受弯纵筋配比模型荷载-位移曲线

表 6 抗力机制承载力峰值 kN

模型编号	FA	CAA	CA
A60	30.04	35.12	32.56
A60-L8	34.96	41.13	—
A60-L10	40.19	48.58	—
A60-Y6	26.95	29.54	—
A60-Y10	34.88	41.58	46.19

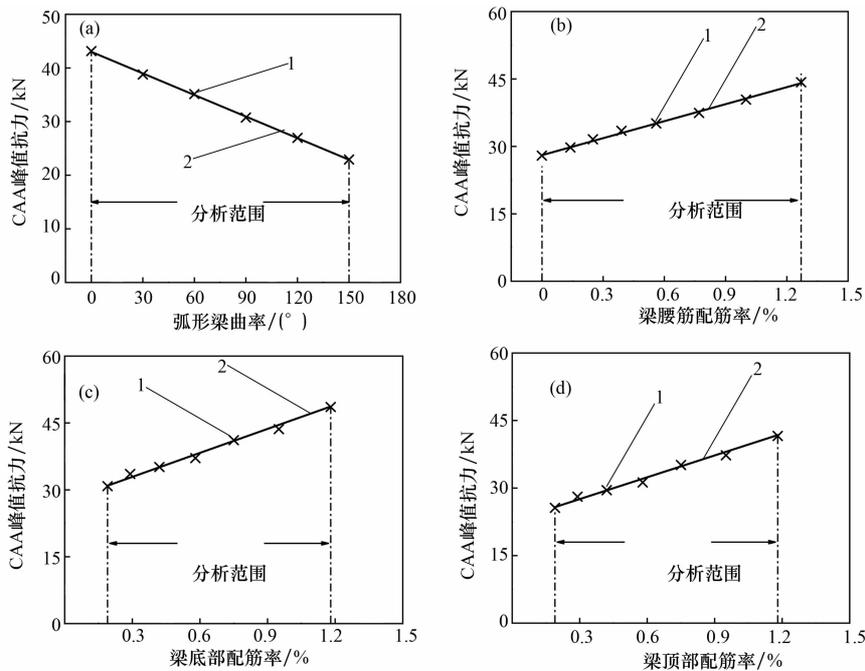
从而导致结构在 CAA 阶段的连续倒塌抗力也随之提升。在大变形阶段, 当失效柱梁端截面底部钢筋断裂后, 梁轴力主要由梁顶部钢筋的拉力提供, 但梁的轴向变形会随着梁顶钢筋配筋率的增大逐渐减小, 从而导致 CA 机制的失效位移减小。当梁截面底部钢筋配置过多(如 A60-L8、A60-L10)或顶部钢筋配置过少(如 A60-Y6)时, 边柱梁端截面顶部钢筋会在梁底部钢筋达到极限应变或极限强度之前发生断裂, 此时结构尚未出现明显的悬链线效应。

3.4 抗力变化规律分析

通过上述分析可知, 弧形梁柱子结构在小变形阶段的倒塌抗力主要依赖于梁弯曲机制和压拱机制, 且压拱阶段的峰值承载力通常为此类结构的极限承载力。相比于大变形阶段的悬链线机制,

该阶段的破坏主要集中在梁端附近区域, 对构件整体的破坏相对较轻, 更符合结构设计的安全性要求。为探究此类结构在弧形梁曲率和梁截面配筋影响下的 CAA 阶段抗力变化规律, 对上一节的参数进行拓展, 并选取各模型压拱机制的第一个峰值点进行量化分析, 子结构模型 CAA 阶段峰值承载力随参数变化关系如图 12 所示。

由图 12(a) 可知, 结构抗力与弧形梁曲率呈负相关关系。随着弧形梁圆心角从 0° (直线梁) 增加到 150° , 结构压拱机制的峰值抗力从 43.13 kN 减小到 22.93 kN, 抗力下降幅度为 188%。由图 12(b) 可知: 随着梁腰筋配筋率从 0 逐渐增大到 1.42%, 结构压拱机制的峰值从 27.95 kN 增大到 46.00 kN, 抗力提升幅度为 165%。由图 12(c)、(d) 可知: 结构压拱机制抗力与梁截面底部配筋和截面顶部配筋呈明显正相关关系。随着梁截面底部配筋和截面顶部配筋从 0.19% 增加到 1.18%, 结构抗力峰值分别从 30.82、25.76 kN 增加到 48.58、41.77 kN, 抗力提升幅度分别为 58%、62%, 且峰值点对应的失效柱竖向位移基本相同。因此, 若对弧形框架结构连续倒塌抗力有更高需求, 可通过增加弧形梁截面配筋来实现。



(a) 曲率; (b) 梁截面腰筋配筋率; (c) 梁截面底部纵筋配筋率; (d) 梁截面顶部纵筋配筋率

1—模拟结果; 2—拟合曲线。

图 12 CAA 抗力变化

4 结 论

(1) 由于弧形梁初始曲率的影响,随着位移的增大,梁截面中性轴发生偏转,加速了混凝土的破坏与钢筋的断裂,从而导致结构压拱机制及悬链线机制提前失效。

(2) 弧形梁曲率越大的子结构模型,在加载中产生的扭矩越大。因此,结构抗力随曲率的增加而减小,但结构失效位移会逐渐增大。

(3) 腰筋的布置能够有效增强弧形梁结构的压拱效应,并延缓结构在压拱阶段抗力的下降速率,甚至出现小幅度的抗力二次上升。然而,这种布置对结构最终失效位移的影响有限。当边柱梁端截面顶部钢筋在失效柱梁端截面底部钢筋之前发生断裂时,结构不会表现出明显的悬链线效应。

参考文献:

- [1] 姜健,吕大刚,陆新征,等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势[J]. 建筑结构学报,2022,43(1): 1-28.
- [2] 易伟建,何庆锋,肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(5): 104-109;117.
- [3] QIN W H, LIU X Y, XI Z, et al. Experimental research on the progressive collapse resistance of concrete beam-column sub-assemblages reinforced with steel-FRP composite bar [J]. Engineering Structures, 2021, 233: 111776.
- [4] GU X L, ZHANG B, HUANG X K, et al. Experimental investigation on progressive collapse resistance of precast concrete frame structures with different beam-column connections [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56:104803.
- [5] ZENG Y H, SHEN Y P, NOORI M, et al. Experimental study on the progressive collapse resistance of emulative precast concrete beam-column subassemblies with various anchorage details [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 88:109242.
- [6] PHAM A T, TAN K H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading [J]. Engineering Structures, 2017, 139:31-45.
- [7] LIN K Q, CHEN Z F, LI Y, et al. Uncertainty analysis on progressive collapse of RC frame structures under dynamic column removal scenarios [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46:103811.
- [8] RASHIDIAN O, ABBASIA R, AHMADI R, et al. Progressive collapse of exterior reinforced concrete beam-column sub-assemblages: Considering the effects of a transverse frame [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10(4): 479-497.
- [9] LIM N S, TAN K H, LEE C K. Experimental studies of 3D RC substructures under exterior and corner column removal scenarios [J]. Engineering Structures, 2017, 150:409-427.
- [10] 黄远,王力. 考虑扭转作用的 RC 框架抗连续倒塌性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(5): 93-100.
- [11] 陈桂生,程小卫,李易. 湿式连接装配式混凝土梁柱子结构连续倒塌的精细数值分析[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊1): 157-164.
- [12] QIAN K, CHENG J F, WENG Y H, et al. Effect of loading methods on progressive collapse behavior of RC beam-slab substructures under corner column removal scenario [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103258.
- [13] YI F, YI W J, SUN J M, et al. On the progressive collapse performance of RC frame structures under impact column removal [J]. Engineering Structures, 2024, 307:117926.
- [14] 田艺. 弧形混凝土梁柱子结构抗连续倒塌性能与承载力计算方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2023.
- [15] GU X L, ZHANG B, WANG Y, et al. Experimental investigation and numerical simulation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering beam flange effects [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42:102797.
- [16] QIAN K, GENG S Y, LIANG S L, et al. Effects of loading regimes on the structural behavior of RC beam-column sub-assemblages against disproportionate collapse [J]. Engineering Structures, 2022, 251:113470.