

反向槽钢连接抗连续倒塌性能参数化分析*

Parametric Study on Reverse Channel Connection Against Progressive Collapse

张洋洋¹, 赵丽洁¹, 王昊², 张照闪³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384;
3. 中建八局发展建设有限公司, 山东 青岛 266011)

摘要: 梁柱节点连接部位是建筑结构抵抗连续倒塌的关键位置。针对较新型的反向槽钢连接形式, 通过显式动力学程序 ANSYS/LS-DYNA 建立反向槽钢连接试件的三维有限元模型, 对中柱移除条件下的反向槽钢连接抗连续倒塌性能展开参数化分析, 研究了钢梁跨高比和端板构造形式对反向槽钢连接抗连续倒塌性能的影响规律。结果表明: 随着跨高比增加, 反向槽钢连接的梁柱节点极限承载力下降, 而悬链线机制抗力对总承载力的贡献呈增加趋势; 采用外伸端板的构造形式可以使反向槽钢连接具有更优的抗连续倒塌性能。

关键词: 反向槽钢连接; 连续倒塌; 数值模拟; 跨高比; 端板

中图分类号: TU391 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0108-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.020

ZHANG Yangyang¹, ZHAO Lijie¹, WANG Hao², ZHANG Zhaoshan³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. The Development
Construction Co., Ltd of China Construction Eighth Engineering Division, Qingdao 266011, China)

Abstract: The connection between beam column nodes is a critical location for building structures to resist continuous collapse. A three-dimensional finite element model of a reverse channel steel connection specimen was established using the explicit dynamics program ANSYS/LS-DYNA for a relatively new type of reverse channel steel connection. The anti continuous collapse performance of the reverse channel steel connection under the condition of removing the center column was analyzed parametrically, and the influence of steel beam span to height ratio and end plate construction form on the anti continuous collapse performance of the reverse channel steel connection was studied. The results show that the ultimate bearing capacity of the reverse channel connection decreases with the increase of the span-depth ratio, while the contribution of the catenary effect to the total bearing capacity increases; The inverted channel steel connection has better resistance to continuous collapse by adopting the construction form of extending the end plate.

Keywords: reverse channel connection; progressive collapse; numerical simulation; span-depth ratio; end plate

* 基金项目: 河北省自然科学基金青年基金项目 (E2019402183); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (19422051008-29)。

作者简介: 张洋洋 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 结构健康监测。

收稿日期: 2023-02-03

0 引言

对历次典型的连续倒塌事故进行分析后发现, 当结构遭受极端荷载作用发生初始局部损伤后, 损伤和破坏的扩散通常是从梁柱节点连接位置开始的^[1]。若相邻结构有足够的梁轴方向的约束, 当梁柱节点发生大变形时, 可以通过悬链线作用产生备

用荷载路径。梁柱节点是影响建筑结构抗连续倒塌性能的关键位置，大变形条件下，悬链线效应通常是防止结构连续倒塌的最后一道防线。半刚性螺栓连接节点钢结构由于其具有良好的承载力、变形能力以及易装卸的特点，得到研究人员的关注。如 Yang 等^[1]、Gong^[2]、钟伟辉等^[3]、Cassiano 等^[4] 分别对连接梁柱节点的抗连续倒塌性能展开研究，分析了节点类型、连接构造、几何尺寸、钢梁跨度等参数对总承载力、悬链线效应、节点连接破坏机理、节点转动能力等的影响。

随着钢管柱的使用逐渐广泛，在实际工程中较难通过在柱面上开孔来实现传统的梁柱螺栓连接。特别是将型钢梁与圆钢管柱进行连接时，使用端板连接、角钢连接等全螺栓方式连接更加困难。为了解决这一问题，Ding 等^[5] 提出了反向槽钢连接，其构造形式是将槽钢的两个翼缘与柱面进行焊接，钢梁与端板焊接，最后将钢梁和端板用螺栓固定在槽钢腹板上，很好地解决了利用螺栓对钢梁和钢管柱进行连接的问题。针对反向槽钢连接的力学性能，Wang 等^[6] 完成了一系列试验工作分析了反向槽钢连接构造参数对其弯矩-转角特性的影响；Alhendi 和 Celikag^[7-8] 通过有限元模型对反向槽钢连接抗弯敏感性展开分析，并推荐采用双反向槽钢构造形式提高连接的极限抗弯及转动能力；李玉成等^[9] 通过反向槽钢节点单调加载静力试验得到不同情况下反向槽钢的破坏形式和破坏位置；Jafarian 等^[10-11] 建立了反向槽钢的力学模型，提出了一种用于评估连接抗拉承载力及弹性刚度的方法；Wang 等^[12-13] 完成了一系列落锤冲击试验，并结合数值模拟指出反向槽钢连接在冲击荷载作用下具有良好的抗连续倒塌。上述研究结果表明，反向槽钢连接为典型的半刚性连接，其设计合理时自身的力学特性可满足结构抗连续倒塌基本需求，但目前较少对连续倒塌工况下反向槽钢连接的力学性能研究。

采用文献 [1]、[6] 中的试验试件、试验装置及加载方式，利用通用显式动力学程序 ANSYS/LS-DYNA 建立了反向槽钢连接节点和端板连接节点有限元模型，进行了端板形式、钢梁跨高比等重要工程参数对反向槽钢连接抗连续倒塌力学性能影响的参数化分析工作，进而得出各参数对抗连续性倒塌

性能的影响。

1 试验概况

为保证反向槽钢连接抗连续倒塌性能有限元模型的计算准确性，选取文献 [6] 和文献 [1] 中的相关试验对有限元模型进行验证。

1.1 反向槽钢连接抗弯性能试验

文献 [6] 通过一系列准静态加载试验获得了反向槽钢连接的破坏模式及弯矩-转角曲线。选择了其中的两个典型试验结果用于有限元模型验证，分别为试验一（外伸端板反向槽钢连接抗弯试验，RCC-E）和试验五（平端板反向槽钢连接抗弯试验，RCC-F）。试件由方钢管柱、型钢梁及反向槽钢连接构成。型钢梁支撑在实心半圆柱支座上，支座与钢梁端部距离分别为 810 mm（试验一）和 600 mm（试验五）。在钢管柱顶部施加准静态竖向位移荷载。表 1、表 2 分别为试验试件中各构件的截面尺寸及各部位组件的钢材力学性能指标。

表 1 反向槽钢连接试验试件尺寸
Table 1 Details of reverse channel connection specimens

材料	试验一 (RCC-E)	试验五 (RCC-F)
梁截面	UB406 × 178 × 74	
柱截面	400 × 200 × 10 mm	
槽钢截面	PFC180 × 90 × 26	
端板类型	外伸端板 (h = 500 mm)	平端板 (h = 400 mm)

1.2 端板连接抗连续倒塌试验

由于文献 [6] 中试验仅可获得反向槽钢连接的抗弯性能，为充分验证有限元模型的准确性，考虑到端板连接与反向槽钢连接构造形式具有一定的相似性，选择文献 [1] 中的端板连接抗连续倒塌试验，用于验证有限元模型模拟节点连接连续倒塌过程的能力。

表 2 反向槽钢连接试验钢材材性
Table 2 Material properties of reverse channel connections

钢材位置	弹性模量 /MPa	屈服应力 /MPa	失效力 /MPa	失效力变 /%
梁腹板	218.660	389	611	20.00
梁翼缘板	218.123	389	612	18.30
柱	192.415	425	656	19.80
槽钢腹板	220.054	352	625	17.69
槽钢翼缘	214.524	315	637	20.25
端板	202.538	300	689	21.00

端板连接抗连续倒塌试验采取双跨试件，钢梁在反弯点处截断，通过铰支座的形式分别与 A-型支

建筑结构

撑刚架及反力墙相连,同时设置了横向约束系统,用于抑制试验中可能出现的平面外位移。在试验中,利用作动器在中柱顶部施加竖向的准确静态位移进行加载,直至节点连接最终破坏失效。钢梁和钢柱截面分别采用 $UB254 \times 146 \times 37$ 和 $UC203 \times 203 \times 71$; 端板高度为 306 mm, 厚度 12 mm; 螺栓采用 10.9 级 M20 高强螺栓。

试验可获得端板连接在中柱移除假定下的全过程弯矩、轴力、荷载-位移曲线以及破坏模式等。

2 有限元建模

连续倒塌过程涉及大变形、材料断裂、接触等高度非线性问题,采用静力非线性方法极易出现收敛性问题。因此,采用显式动力学求解器 LS-DYNA 对反向槽钢连接在柱移除条件下,由开始加载至最终发生破坏的连续倒塌工况全过程进行求解计算。

2.1 材料模型及单元类型

选取合适的材料本构是获得准确的有限元计算结果的基础,研究对象由钢材构成,同时在分析过程中反向槽钢连接会发生材料破坏,因此对有限元模型中的反向槽钢连接试件的各个部位采用了 ANSYS/LS-DYNA 中的塑性随动强化模型来考虑材料失效破坏,钢材力学性能参数基于表 2 确定。反向槽钢连接抗弯试验中支座部分仅起到支撑试件的作用,无需考虑其受力、变形等情况,因此对于支座部分采用刚体材料进行建模以提高计算效率。

梁柱连接时各组件几何形状较规则,采用八节点六面体单元 Solid 164 建立有限元模型。当单元尺寸较大时,可以增加计算时间步长,提高计算效率,但对于大变形和失效破坏部位的模拟精度较差;反之可以获得较准确的计算结果,但会造成计算时间的明显增加。因此,综合考虑计算精度和计算效率的需求,参考文献 [12] 的参数,在节点连接大变形区域采用 5 mm 网格,在远离大变形区域以弹性变形为主的部分采用 40 mm 网格,不考虑各钢板的厚度不同,均将单元划分为 2 份。

2.2 约束、加载与接触设置

在进行有限元模拟计算时,对模型施加符合实际约束情况的边界条件,才能获得准确结果。对于反向槽钢连接抗弯试验,在模型中建立了与试验中

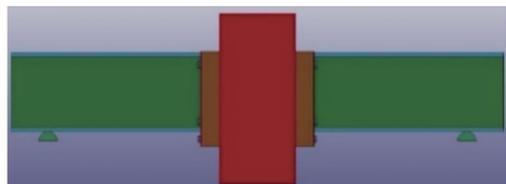
尺寸相同的半圆柱支座,放置在节点左、右梁段下翼缘位置,用于支撑反向槽钢连接试件。对于端板连接抗连续倒塌试验,由于水平约束系统较为复杂,无需完全按实际尺寸建立由 A-型框架及底板、铰支座等构成的约束系统。考虑试验水平约束系统实际作用,并允许梁端发生转动的同时提供水平位移约束,以及模拟试件周边结构对试件的约束拉结作用,因此采用可承受轴力作用但不约束节点转动的 Link 161 单元代替水平约束系统。此外,在端板连接抗倒塌试验中,由于研究对象为平面钢框架节点,因此在试验中设置了平面外约束系统,用于抑制试件可能发生的平面外位移,在有限元模型中,采用直接对试件全部节点施加平面外位移约束的方式,保证与试验的约束效果一致。

反向槽钢连接抗弯试验和端板连接抗连续倒塌试验均采用准静态位移加载,在有限元模拟中采用与试验相同的加载形式,即在中柱顶部施加竖向位移,直至连接破坏。

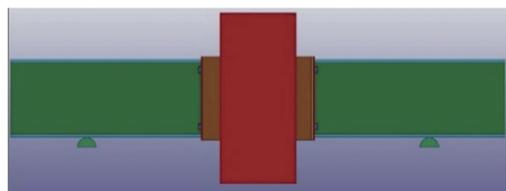
采用自动单面接触,该接触可以在计算中自动搜索可能发生接触的作用面,程序在某一荷载步发现面与面间出现穿透时,会立即在面与面间引入一对相互作用力用于模拟面与面间的接触作用。

2.3 有限元模型

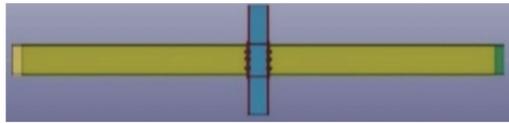
采用 2.1、2.2 中描述的建模方法,分别建立文献 [6] 中的外伸端板反向槽钢连接 (RCC-E) 试件、平端板反向槽钢连接 (RCC-F) 试件及文献 [1] 中的平端板连接 (FEP) 试件有限元模型,用于验证有限元建模方法的有效性。RCC-E、RCC-F、FEP 试件的有限元模型分别如图 1、图 2 所示。



(a) RCC-E



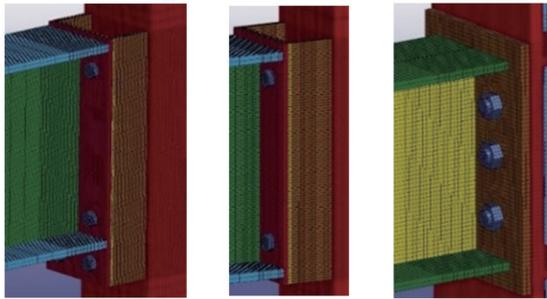
(b) RCC-F



(c) FEP

图 1 试验验证有限元模型

Fig. 1 Finite element model for verification



(a) RCC-E (b) RCC-F (c) FEP

图 2 验证模型节点连接细节

Fig. 2 Detail of finite element models

2.4 有限元模型的验证

2.4.1 失效模式对比

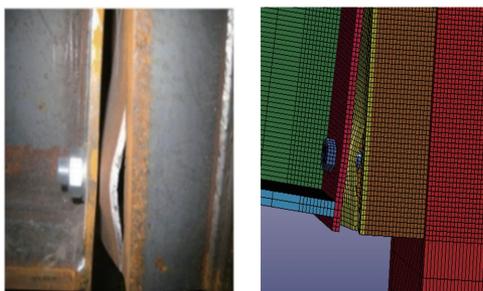
图 3~图 5 为试验和有限元模拟获得的 RCC-E、RCC-F 和 FEP 的失效模式。在反向槽钢连接抗弯试验中，RCC-E、RCC-F 的失效模式均为槽钢腹板下



(a) 试验 (b) 模拟

图 3 RCC-E 失效模式对比

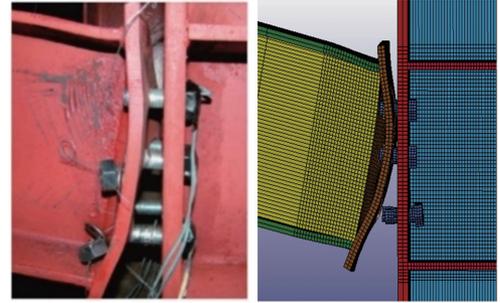
Fig. 3 Comparison of failure mode (RCC-E)



(a) 试验 (b) 模拟

图 4 RCC-F 失效模式对比

Fig. 4 Comparison of failure mode (RCC-F)



(a) 试验 (b) 模拟

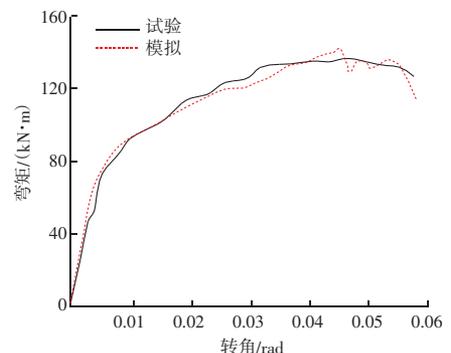
图 5 FEP 失效模式对比

Fig. 5 Comparison of failure mode (FEP)

部在拉力作用下凸起，最终在紧邻翼缘处发生了材料撕裂；而对于 FEP 试件，加载至大变形条件下在钢梁中产生了较大的轴向拉力，连接位置的高强螺栓在拉力作用下达到极限并发生破坏，型钢柱与型钢梁之间的连接中断，导致节点发生了破坏。从有限元模拟结果可以看出，3 个试验所对应的有限元模型均较为准确地获得了试件的失效模式。

2.4.2 力学性能对比

图 6 为试验和有限元模拟获得的 RCC-E、RCC-F 的弯矩-转角 ($M-\theta$) 曲线以及 FEP 的荷载-位移 ($P-\delta$) 曲线。可以看出，RCC-E 和 RCC-F 的弯矩均在经历了初期小变形阶段的快速增加后出现了刚度下降，弯矩增速变缓，达到最大值后开始下降，最终发生破坏；FEP 在初期小变形阶段荷载快速增加后出现刚度下降，荷载处于稳定状态，直至竖向位移达到 200 mm 后，随着悬链线效应的发展，荷载进一步增加，达到最大值后，高强螺栓失效，连接发生破坏。通过结果对比可以看出，数值模拟获得的力学性能曲线与试验结果较为吻合，很好地反映了试件的弯矩和荷载随变形增加的变化规律。RCC-E、RCC-F 和 FEP 有限元模拟的结果误差分别为 2.21%、1.05% 和 4.32%。验证了模型的准确性。



(a) 弯矩-转角曲线对比 (RCC-E)

建筑结构

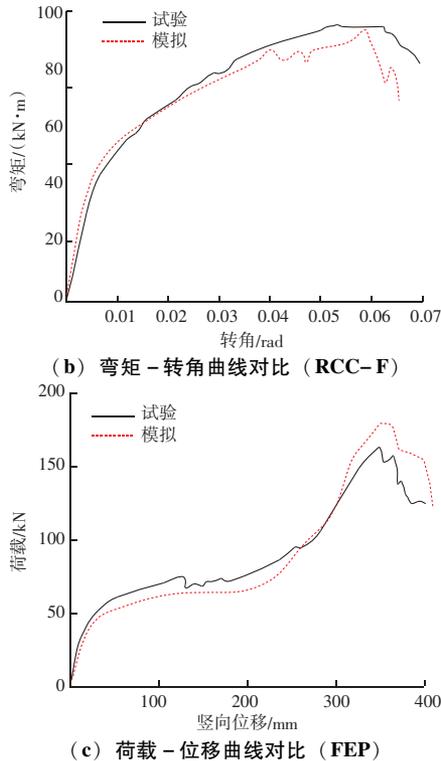


图6 弯矩-转角曲线、荷载-位移曲线对比
Fig. 6 Comparison of moment-rotation curves and comparison of load-displacement curves

采用相同的建模方法建立中柱移除条件下的反向槽钢连接试件有限元模型,进一步研究跨高比、端板形式等参数对反向槽钢连接抗连续倒塌性能的影响。

3 反向槽钢连接抗连续倒塌性能的参数化分析

已有研究^[12]表明,钢梁的跨高比会对结构的抗连续倒塌性能产生较大影响;文献[6]的结果表明,端板形式会对反向槽钢连接的抗弯性能产生较大影响,但对反向槽钢连接抗连续倒塌性能的影响未见报道。因此选取了钢梁跨高比及端板形式两个参数,研究其对反向槽钢连接抗连续倒塌性能的影响。对于端板,分别选取外伸端板和内端板两种构造形式;对于钢梁跨高比,选取8~24的范围进行研究,能够较充分覆盖实际工程需求的反向槽钢连接抗连续倒塌性能。

在参数分析中,以两种端板形式建立两组有限元模型。对于每组模型,均采用不改变截面尺寸,仅改变钢梁轴向长度的方式控制模型的跨高比,保证跨高比的改变不会导致其他工程参数发生变化。

参数化分析算例中RCC为反向槽钢连接,E为外伸端板,F为内端板;跨高比分别取8、12、16、20、24。表3为参数分析算例的部分计算结果。

表3 不同跨高比反向槽钢连接试件的参数分析结果
Table 3 Numerical results of reverse channel connections with various SDR

试件编号	极限荷载/kN	最大弯矩/(kN·m)	最大梁轴向拉力/kN	极限荷载时失效柱竖向位移/mm
RCC-E-8	153	115	—	139
RCC-E-12	104	112	183	187
RCC-E-16	81	105	211	236
RCC-E-20	68	97	223	314
RCC-E-24	65	90	289	350
RCC-F-8	112	94	—	156
RCC-F-12	74	87	99	212
RCC-F-16	55	82	137	275
RCC-F-20	50	75	189	300
RCC-F-24	47	67	212	343

3.1 跨高比对抗连续倒塌性能的影响

图7为两种反向槽钢连接在不同跨高比情况下的荷载-位移曲线。可以看出,随着跨高比的增加,极限荷载随之降低。在连续倒塌工况下,荷载 F 与梁机制和悬链线机制共同提供承载力平衡,对于对称双节点模型可以表达为:

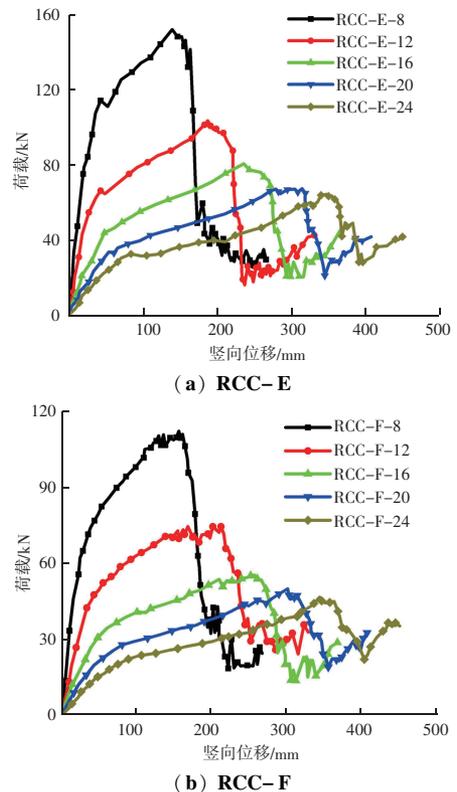


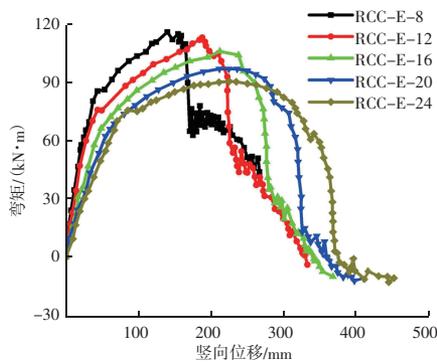
图7 跨高比对荷载-位移曲线的影响
Fig. 7 Effect of SDR to load-displacement curves

$$F = 2M(\theta)\cos\theta/0.5L + 2F_N\sin\theta \quad (1)$$

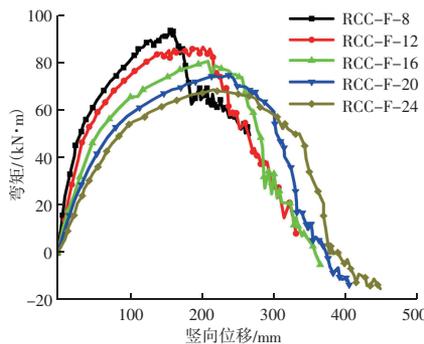
式中： M 为节点弯矩； F_N 为梁轴力； L 为跨度； θ 为节点转角。

由式(1)可以看出，荷载的大小同时受节点弯矩、梁轴力、节点转角及跨度的影响。当其他参数为确定值时，跨度越大，荷载越小；而节点弯矩和梁轴力对荷载大小的影响，均需要综合考虑节点转角的影响。根据图8和图9可知，不同节点的弯矩均随跨高比增加而减小，轴力随跨高比增加而增大，原因是跨高比越大，节点抗弯能力越小。考虑从开始加载直至节点最终发生破坏过程中，节点转角均小于 12° ，代入式(1)可知悬链线机制平衡的荷载较小，主要荷载仍由梁机制平衡，因此荷载的变化主要受节点弯矩控制，与节点弯矩随跨高比的变化呈相同规律。

综合考虑，试件的最大弯矩和极限承载力均呈现出减小趋势，而梁轴力增大。随着失效柱竖向位移的增加，节点变形增大，梁机制逐渐发展为悬链线机制，抵抗中柱处竖向荷载主要由悬链线机制抗力提供。表明跨高比增大有助于悬链线效应的形成，但对梁机制阶段的节点连接抗弯性能产生不利影



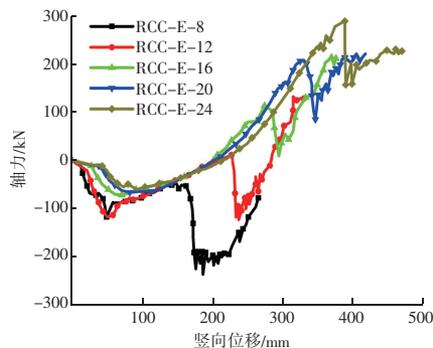
(a) RCC-E



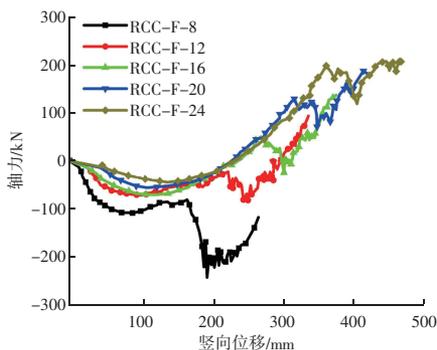
(b) RCC-F

图8 跨高比对弯矩-位移曲线的影响

Fig. 8 Effect of SDR tomoment-rotation curves



(a) RCC-E



(b) RCC-F

图9 跨高比对轴力-位移曲线的影响

Fig. 9 Effect of SDR tonormal force-displacement curves

响。虽然从结果上看上述情况会导致极限承载力绝对数值的降低，但当结构本身已满足设计承载力要求时，可以有效提高结构的极限承载力-设计承载力比值，提高结构在遭受偶然极端荷载情况下发生较大位移时的安全性。

3.2 端板形式对反向槽钢连接抗连续倒塌性能的影响

为了分析端板形式对抗连续倒塌性能的影响，对比了相同跨高比条件下的 RCC-E 和 RCC-F 的力学性能曲线如图 10 所示。当跨高比为 8 时，梁轴力直至节点最终发生破坏的全过程均呈受压状态，对于平衡荷载起反作用，RCC-E-8 和 RCC-F-8 梁机制分别为 160 和 130 kN，而荷载分别为 152 和 111 kN，梁中轴向压力使承载能力分别降低了 5% 和 15%；随着跨高比的增加，梁轴力在初期为压力在后期转为拉力，且极限拉力不断提高，同时随着节点转角的不断增加，悬链线机制能提供更大的荷载抵抗力，极限荷载不断增加。当跨高比为 24 时，RCC-E-24 和 RCC-F-24 的梁机制分别为 42 和 32 kN，由于梁中轴向拉力较大，悬链线机制充分发挥作用，试件的极限荷载分别为 64 和 46 kN，试件可承受的极限荷

建筑结构

载分别增加了 52% 和 44%。同时, RCC-E-24 和 RCC-F-24 在考虑悬链线机制作用时, 极限荷载对应的位移分别由 223 mm 和 217 mm 提高到 347 mm 和 344 mm, 提高比例分别为 56% 和 58%。说明细长梁有利于悬链线机制充分发挥作用, 提升结构的承载能力及延性, 对结构的抗连续倒塌性能产生积极影响。

随着位移的增加, 模型 RCC-E 和 RCC-F 总荷载、梁机制荷载和悬链线机制荷载发展趋势基本一致, 表明两种节点形式的总承载力、梁机制阶段承载能力和悬链线效应的发展趋势基本一致。总体来看, 相同跨高比时, RCC-F 的总荷载、梁机制荷载以及悬链线机制荷载均小于 RCC-E。表明 RCC-E 在总承载力、梁机制阶段的承载力和悬链线效应都比 RCC-F 表现优越。

基于模型 RCC-E 和 RCC-F 的比较, 外伸端板相较于平端板整体受力性能较好, 在其他参数相同的情况下具有更高的极限承载力, 推荐在抗连续倒塌设计中使用反向槽钢连接时, 在端板形式上首先考虑外伸端板构造形式。

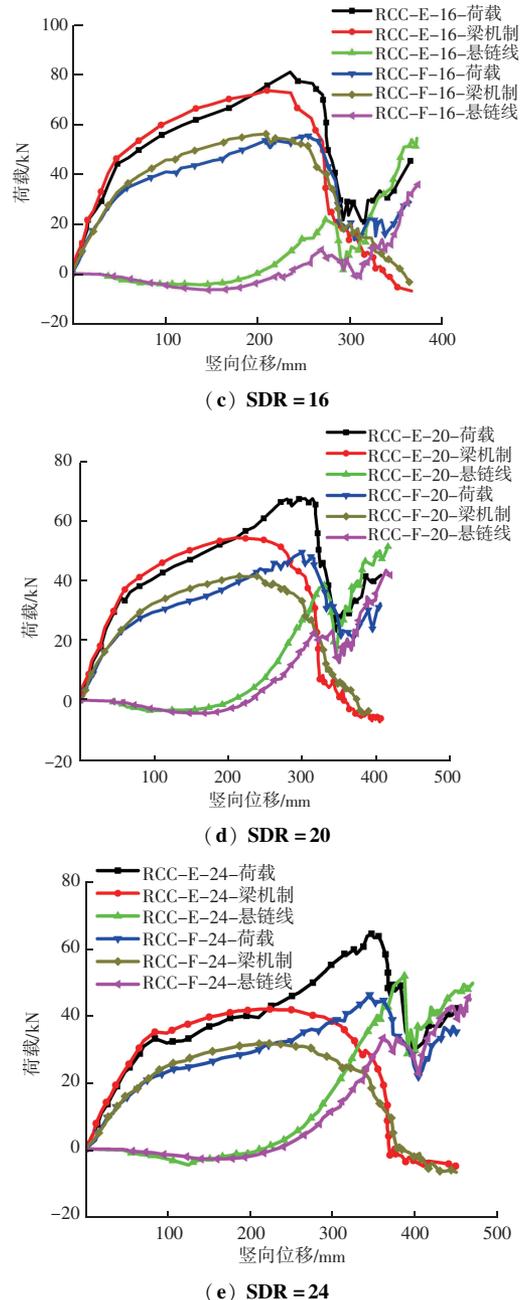
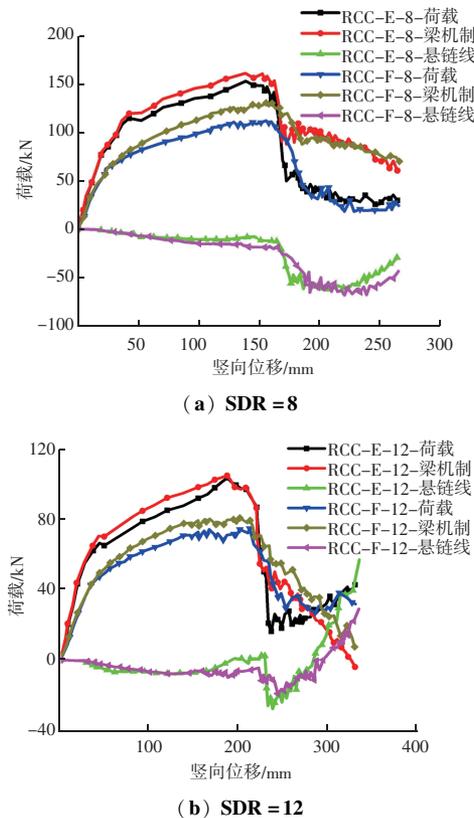


图 10 不同端板形式 RCC 抗连续倒塌力学性能对比
Fig. 10 Comparison of mechanical properties between RCC with various end plate

4 结论

(1) 随跨高比增大, 试件的最大弯矩和极限承载力均呈现减小趋势, 而梁轴力增大。适当地增大跨高比有利于悬链线机制形成, 有利于结构在发生较大位移时保持一定的承载能力。

(2) 外伸端板反向槽钢连接无 (下转第 154 页)

研究与应用

failure due to rainfalls using lg physical slope models [J]. *Soils & Foundations*, 2018, 58 (2): 290–305.

- [10] COGAN J, GRATCHEV I. A study on the effect of rainfall and slope characteristics on landslide initiation by means of flume tests [J]. *Landslides*, 2019, 16 (12): 2369–2379.
- [11] Chen C Y, Chen T C, Yu F C, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring [J]. *Environmental Geology*, 2005, 47: 715–724.
- [12] 魏衍杰, 盛园园, 马超. 瞬态渗流条件下水力特性对非饱和边坡稳定性的影响 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2024, 38 (1): 88–92.
- [13] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications [J].

Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53 (5): 727–739.

- [14] 宋小平, 周卫军, 张号, 等. 基于多视角三维激光扫描技术的建筑墙体微小裂缝监测方法 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2024, 38 (3): 163–168.
- [15] HAN L, WANG H, LIU X, et al. Particle image velocimetry of oil-water two-phase flow with high water cut and low flow velocity in a horizontal small-diameter pipe [J]. *Sensors*, 2019, 19 (12): 2702.
- [16] 杨登芳, 胡新丽, 徐楚, 等. 基于物理模型试验的多层滑带滑坡变形演化特征 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41 (2): 300–308.
- [17] UCHIMURA T, TOWHATA I, WANG L, et al. Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors [J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55 (5): 1086–1099.

(上接第 114 页)

论是梁机制、悬链线机制还是抵抗的总荷载均优于平端板反向槽钢连接, 说明外伸端板反向槽钢连接具有更优的抗连续倒塌性能。因此, 在进行抗连续倒塌设计时, 推荐采用外伸端板形式的反向槽钢连接。

参 考 文 献

- [1] YANG B, TAN K H. Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario [J]. *Engineering Structures*, 2013, 54: 112–130.
- [2] GONG Y L. Test, modeling and design of bolted angle connections subjected to column removal [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 39 (10): 315–326.
- [3] 钟伟辉, 孟宝, 郝际平. 不同跨度比下腹板双角钢连接抗倒塌性能研究 [J]. *工程科学与技术*, 2017, 49 (4): 86–96.
- [4] CASSIANO D, DANIELLO M, REBELO C. Parametric finite element analyses on flush end-plate joints under column removal [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 137: 77–92.
- [5] DING J, WANG Y C. Experimental study of structural fire behavior of steel beam to concrete filled tubular column assemblies with different types of joints [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29 (12): 3485–3502.
- [6] WANG Y C, XUE L. Experimental study of moment-rotation characteristics of reverse channel connections to tubular columns [J].

Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 92–104.

- [7] ALHENDI H, CELIKAG M. Parametric study on moment-rotation characteristics of reverse channel connections to tubular columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 104: 261–273.
- [8] ALHENDI H, CELIKAG M. Finite element prediction of reverse channel connections to tubular columns behavior [J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 599–609.
- [9] 李玉成, 王振, 徐成祥. 方钢管柱-H形钢梁槽钢节点受力性能研究 [J]. *工业建筑*, 2017, 47 (6): 144–151.
- [10] JAFARIAN M, WANG Y C. Force-deflection relationship of reverse channel connection web component subjected to transverse load [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 104: 206–226.
- [11] JAFARIAN M., WANG Y C. Tying resistance of reverse channel connection to concrete filled square and rectangular tubular sections [J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 17–30.
- [12] WANG H, YANG B, CHEN K, et al. Parametric analysis and simplified approach for steel-framed subassemblies with reverse channel connection under falling-debris impact [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111263.
- [13] WANG H, TAN K H, YANG B. Impact resistance of steel frames with different beam-column connections subject to falling-floor impact on various locations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147 (4): 04021017.