

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.05.022

# 可更换梁段腹板开孔的梁柱节点滞回性能研究

马艳宁

(西安建筑科技大学设计研究总院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为解决钢框架梁柱节点焊缝脆性破坏及震后修复问题, 提出一种带腹板开孔型可更换梁段的钢框架梁柱节点。通过 ABAQUS 建立有限元分析模型, 分析腹板开孔半径和开孔位置对新型节点滞回性能的影响。结果表明: 所有模型的塑性铰均出现在可更换耗能梁段处, 非耗能梁段基本处于弹性阶段, 能在震后实现可更换耗能梁段的修复。研究表明, 新型节点的承载力随腹板开孔半径的增大而减小, 腹板开孔半径对新型节点滞回性能影响较小。给出腹板开孔半径和开孔位置的取值范围, 为工程设计提供参考。

**关键词:** 腹板开孔; 可更换梁段; 钢框架; 梁柱节点; 滞回性能

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)05—0124—05

## Hysteretic Behavior of Beam-column Joints with Replaceable Beam and Web Openings

MA Yanning

(Design and Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of beam-column joint brittle failure in steel frame and repair after earthquake, a new type of beam-column joint with web opening replaceable beam is proposed. The finite element analysis models are established by ABAQUS to analyze the influence of web opening radius and location on the seismic behavior of the new joint. The results show that the plastic hinges of all models appear in the replaceable energy dissipation beam, and the non-energy dissipation beam is basically in the elastic stage, which can realize the repair of the replaceable energy dissipation beam after the earthquake. The bearing capacity of the new joint decreases with the increase of the web opening radius, and the influence of the web opening radius on the seismic behavior of the new joint is small. The value range of web opening radius and opening position is given, which can provide reference for engineering design.

**Keywords:** web opening; replaceable beam; steel frame; beam-column joints; seismic behavior

美国北岭地震和日本阪神地震中出现钢框架结构梁柱节点域焊缝发生脆性破坏的现象, 各国学者对此提出削弱型或加强型梁柱节点<sup>[1-4]</sup>, 提高节点延性和抗震性能。节点的延性设计可以避免结构在地震作用下发生脆性破坏甚至倒塌, 但是地震作用使得结构构件产生残余变形, 导致结构难以修复, 失去使用功能。吕西林等<sup>[5]</sup>提出可恢复功能防震结构, 能够实现结构震后快速恢复其正常使用功能。

梁腹板开孔是削弱型梁柱节点的一种, 因其既能实现塑性铰外移, 又能使设备管线从梁中穿过, 而

备受研究人员的关注。王秀丽等<sup>[6]</sup>通过试验和数值模拟研究发现, 梁腹板开孔型连接节点可以使节点由脆性破坏转变为发生梁的局部屈曲破坏, 有效的避免梁柱连接焊缝的脆性断裂, 并给出开孔直径和开孔位置的设计建议。杨娜等<sup>[7]</sup>研究了梁腹板开圆孔型节点在混凝土楼板组合效应下的结构响应, 组合效应不仅加大了节点在梁柱根部发生脆性破坏的可能性, 而且影响了腹板开圆孔节点的破坏模式, 考虑组合效应后的节点临界开孔半径比不考虑组合效应下的半径大。杨应华等<sup>[8]</sup>在梁腹板开

孔的基础上,提出了套管加强梁腹板开孔的梁柱节点形式,该节点能使塑性铰外移,具有较高的耗能能力和延性,有效的提高了节点的承载能力。

可恢复功能防震结构包含了摇摆、自复位、可更换和附加耗能装置等技术,其中可更换耗能梁段在钢结构中的应用得到了广泛的研究。纪晓东等<sup>[9]</sup>提出端板-抗剪键连接、拼接板连接、腹板-螺栓连接、腹板-结构胶连接等四种可更换耗能梁段的连接方式。关彬林等<sup>[10]</sup>对端板连接可更换耗能梁段在钢框筒结构中的应用进行试验研究,耗能梁段在两阶段加载过程中均能有效耗能。程倩倩等<sup>[11]</sup>对高强钢框筒中双槽钢截面可更换耗能梁段展开试验和数值模拟研究,建议耗能梁段长度比为 0.84 ~ 1.40。张浩等<sup>[12]</sup>通过试验对钢框筒结构中端板连接的低屈服点可更换耗能梁段进行研究,试验中考虑楼板的组合效应,结果表明组合效应仅对弹性刚度有明显影响,对结构抗震性能影响较小。

本文将塑性铰外移和可更换耗能梁段的理念相结合,提出一种带腹板开孔型可更换耗能梁段的钢框架梁柱节点,在实现塑性铰外移的前提下,利用耗能梁段耗散地震能量,在震后更换变形严重的耗能梁段,快速恢复结构的使用功能。通过有限元分析软件 ABAQUS 建立数值模型,在验证建模方法有效性的前提下,分析开孔半径  $r$  和开孔位置  $b$  对新型节点滞回性能的影响。

## 1 有限元模型建立及验证

### 1.1 有限元模型建立

本文提出的带腹板开孔型可更换耗能梁段的钢框架梁柱节点如图 1 所示,削弱参数  $r$  为可更换耗能梁段腹板开孔半径, $b$  为所开圆孔中心距柱表面的距离,通过非耗能短梁长度调节开孔位置。

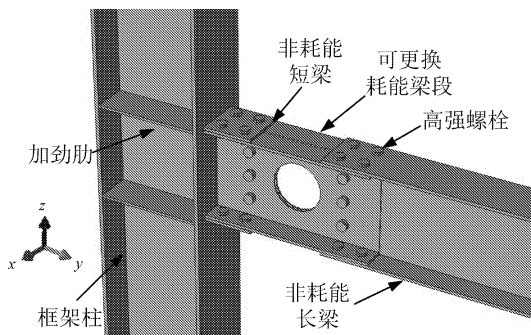


图 1 带腹板开孔型可更换耗能梁段的梁柱节点

参考文献[13]中的试件节点尺寸,Base 模型柱高为 3 000 mm,非耗能短梁长度为 200 mm,非耗能

长梁长度为 2 000 mm,耗能梁段总长为 700 mm,其中与非耗能短梁和非耗能长梁的搭接长度均为 200 mm。柱截面为 H450 × 300 × 12 × 16 mm,梁截面为 H400 × 200 × 8 × 12 mm,耗能梁段采用槽钢,其截面为 376 × 90 × 6 × 12 mm。节点域柱中加劲肋厚度与梁翼缘相同,取 12 mm。可更换耗能梁段与非耗能梁段在翼缘与腹板处分别采用螺栓连接,螺栓采用 10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓。节点详细尺寸如图 2 所示。

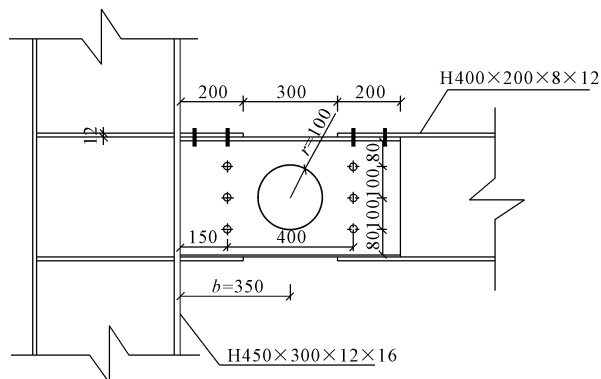


图 2 节点尺寸详图(单位:mm)

本文重点研究腹板半径  $r$  和开孔位置  $b$  对新型梁柱节点滞回性能的影响,Base 模型中的相关尺寸为: $r = 100$  mm, $b = 350$  mm。在 Base 模型的基础上,对腹板开孔半径  $r$  和开孔位置  $b$  进行变参分析,各模型尺寸及编号如表 1 所示,其中模型 SJ1 作为对照模型,不设置腹板开孔型可更换耗能梁段,梁与柱采用焊接的方式连接。

表 1 模型参数及模拟结果

模型编号	$r$ /mm	$b$ /mm	$P_y$ /kN	$P_{max}$ /kN	$\mu$
Base	100	350	153.2	167.7	5.93
SJ1	—	—	172.5	196.0	4.57
SJ2	80	350	161.9	180.6	5.26
SJ3	90	350	157.2	174.2	5.48
SJ4	110	350	147.3	159.2	6.19
SJ5	120	350	140.2	151.4	6.21
SJ6	100	325	150.1	165.6	5.71
SJ7	100	375	154.4	172.0	4.99

注: $P_y$  为屈服荷载, $P_{max}$  为峰值荷载, $\mu$  为延性系数, $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ ,其中  $\Delta_y$  为屈服位移, $\Delta_u$  为破坏位移。

### 1.2 单元选取和材料本构

有限元模型中的所有构件均采用 C3D8R 单元,柱、非耗能梁、耗能梁段和高强螺栓的网格大小分别为 50 mm、30 mm、20 mm 和 6 mm,对应的柱、非耗能短梁、非耗能长梁、耗能梁段和高强螺栓的单元数量

分别为 2 880、700、3 216、2 980 和 300。钢材等级为 Q235-B,参考《钢结构设计标准》<sup>[14]</sup> (GB 50017—2017)中对其名义值的规定,屈服强度  $f_y = 235$  MPa, 极限强度  $f_u = 370$  MPa。钢材本构关系采用三折线模型来模拟材料非线性,硬化模量为  $0.01E$ ,泊松比取为 0.3。

### 1.3 加载与边界条件

在有限元模型的柱顶、柱底和梁端分别建立参考点,将参考点与相应的面进行耦合。对柱顶耦合点施加轴压比为 0.3 的竖向轴压力,约束柱顶  $x、y$  方向的平动,允许柱顶在轴拉作用下产生  $z$  向位移,约束柱顶  $x、y、z$  方向的平动。对梁端耦合点施加位移荷载,当层间侧移角为 0.003 75 rad、0.005 rad 和 0.007 5 rad 时,每个加载级循环 6 次;当层间侧移角为 0.01 rad 时循环 4 次;当层间侧移角为 0.015 rad、0.020 rad、0.030 rad、0.040 rad 和 0.050 rad 时,每个加载级循环 2 次。为了防止梁在加载过程中发生面外变形,约束梁翼缘的面外位移。

### 1.4 有限元验证

以文献[7]中试件 SPB2 作为验证对象,采取上述建模方法建立试件 SPB2 的有限元模型。试验和有限元模拟结果均出现了梁腹板开孔处翼缘屈曲现象,腹板开孔有较为明显的变形,如图 3 所示。试件和有限元模型都实现了塑性铰外移至梁腹板开孔处的目的。

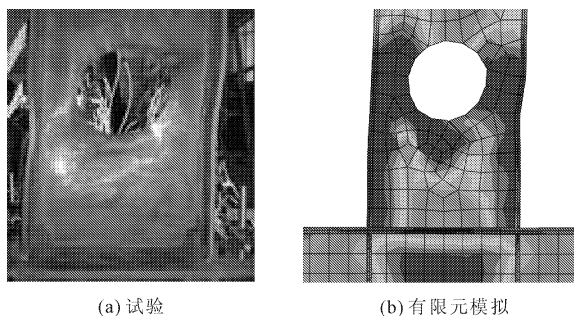


图 3 试件 SPB2 破坏模式对比图

图 4 为试验与有限元模拟结果的滞回曲线对比图,两者曲线趋势一致,吻合较好。试件 SPB2 水平承载力的试验值与有限元模拟值分别为 234.8 kN 和 229.1 kN,两者误差为 2.5%,在可接受范围内。

## 2 有限元参数分析

### 2.1 开孔半径 $r$ 的影响

模型 SJ2 - SJ5 在模型 Base 的基础上改变可更换梁段的腹板开孔半径,分别取值为 80 mm、90

mm、110 mm 和 120 mm,研究腹板开孔半径对新型梁柱节点的滞回性能的影响。图 5 为各模型的破坏模式及 Mises 应力分布图。

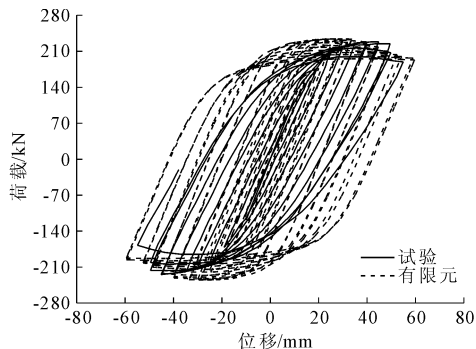


图 4 有限元曲线与试验曲线比较

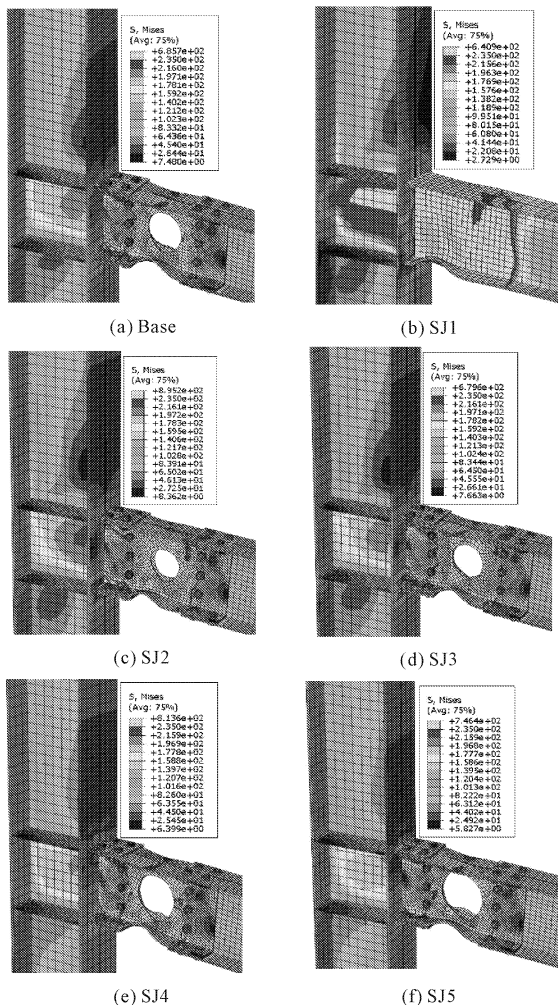


图 5 不同开孔半径模型的破坏模式及应力云图(单位:MPa)

由图 5 可知,模型 SJ1 的梁端塑性铰的位置与梁和柱连接的焊缝位置接近,容易出现焊缝断裂等脆性破坏。而模型 Base 及模型 SJ2 - SJ5 的破坏均是由于可更换耗能梁段出现塑性铰,且非耗能梁段

基本处于弹性阶段,仅非耗能短梁的部分螺栓孔处进入塑性阶段。这是理想的破坏模式,一方面既能通过可更换耗能梁段耗散地震能量,避免梁柱节点的脆性破坏,另一方面非耗能梁段没有发生塑性变形,便于震后可更换耗能梁段的修复,使建筑快速恢复使用功能。

图 6 为不同开孔半径模型的滞回曲线,由图 6 可知,各模型的滞回曲线均呈梭型,较为饱满。当开孔半径  $r \leq 0.225h$  ( $h$  为梁截面高度),模型 SJ2 和 SJ3 有轻微的捏缩现象,这主要是因为较小的开孔半径使得可更换耗能梁段具有较大的抗弯刚度,相同的位移荷载作用下,连接螺栓将受到更大的剪力,当剪力超过其最大静摩擦力时,连接螺栓将发生滑移,模型 SJ2 和 SJ3 的滞回曲线便出现了轻微的捏缩现象。

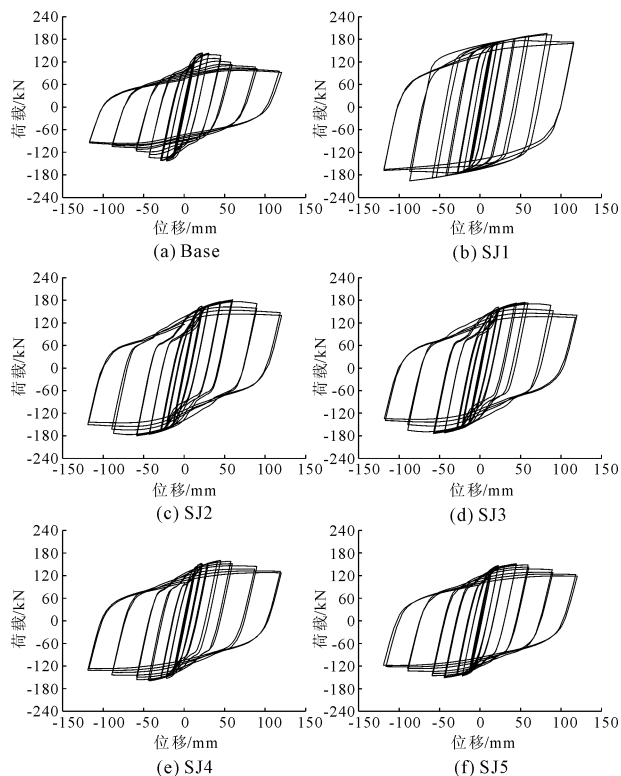


图 6 不同开孔半径模型的滞回曲线

图 7 为各模型的骨架曲线对比图,通过“等效能量法”确定模型骨架曲线的屈服点,以峰值荷载对应的点为骨架曲线的峰值点,当荷载下降到极限荷载的 85% 时,认为骨架曲线达到破坏点,屈服位移和破坏位移分别为屈服点和破坏点对应的位移,将骨架曲线的特征值列于表 1。由图可知,各模型的骨架曲线在弹性阶段基本吻合,随着开孔半径的增大,模型的屈服荷载和承载力均出现下降,而延性

系数则有所增大。与模型 SJ2 相比,模型 SJ3、Base、SJ4 和 SJ5 的承载力分别下降了 3.5%、7.1%、11.8% 和 16.2%。

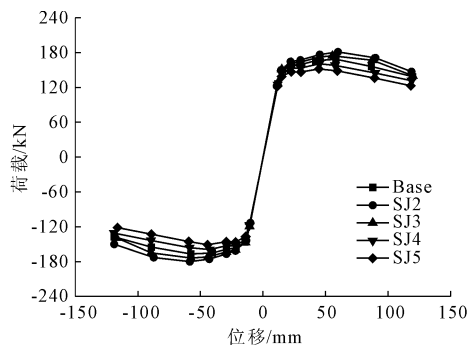


图 7 不同开孔半径模型的骨架曲线

图 8 为不同开孔半径模型的耗能系数,各模型在加载前期的耗能系数基本相等。随着荷载的增加,各模型均在可更换耗能梁段处形成塑性铰,耗能系数随着开孔半径的增大而减小,这表明各模型的塑性铰都得到了充分发展,造成截面削弱最严重的模型 SJ5 所耗散的能量最小。

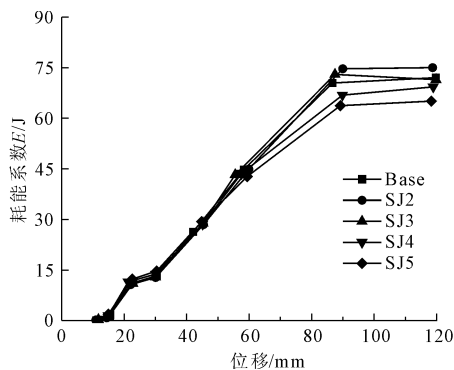


图 8 不同开孔半径模型的耗能系数

## 2.2 开孔位置 $b$ 的影响

模型 SJ6 和 SJ7 在模型 Base 的基础上改变可更换梁段的腹板开孔位置,分别取值为 325 mm 和 375 mm,研究腹板开孔位置对新型梁柱节点的滞回性能的影响。图 9 为各模型的破坏模式及 Mises 应力分布图,由图可知,各模型的破坏模式均为可更换耗能梁段处形成塑性铰,随着开孔位置的增加,与梁连接处的柱腹板应力变大,非耗能短梁的上、下翼缘塑性区增大,而过大的塑性变形将影响可更换耗能梁段的修复。

图 10 为不同开孔位置模型的滞回曲线,由图可知,各模型的滞回曲线大体上呈现梭型,较为饱满。模型 SJ6 和 SJ7 由于连接螺栓的滑移,其滞回曲线

有轻微的捏缩现象,此时开孔位置  $b$  的取值分别为  $0.81h$  和  $0.97h$ ,对于摩擦型高强螺栓而言,应尽量避免连接螺栓的滑动,因此开孔位置  $b$  不应过小或过大。

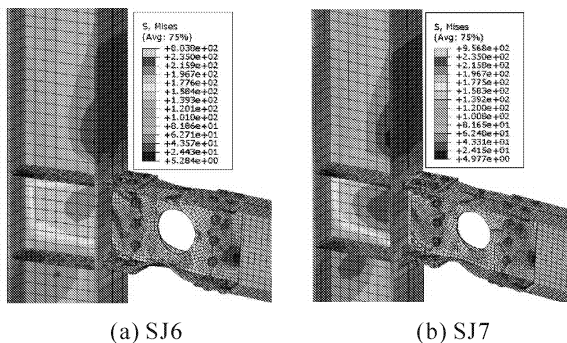


图 9 不同开孔位置模型的破坏模式及应力云图(单位:MPa)

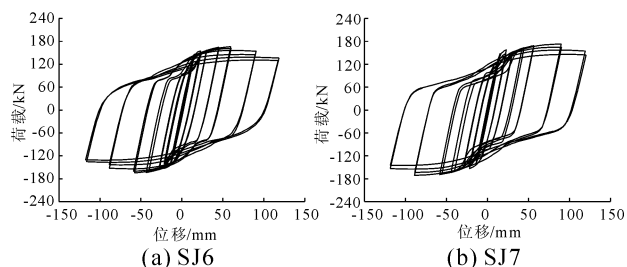


图 10 不同开孔位置模型的滞回曲线

图 11 为各模型的骨架曲线对比图,由图可知,各模型的骨架曲线基本吻合,模型的屈服荷载和承载力随着开孔位置  $b$  的增加略有增大,而延性系数则有明显下降。与模型 SJ6 相比,模型 SJ7 的承载力增大了 3.9%,延性系数下降了 12.6%,开孔位置对新型节点的承载力影响较小。

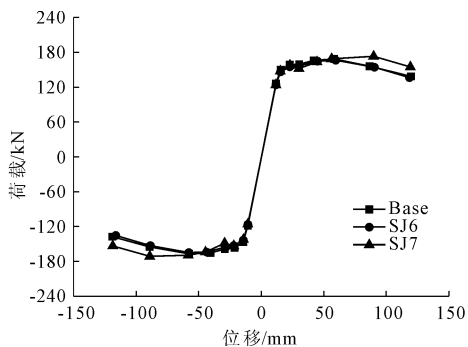


图 11 不同开孔位置模型的骨架曲线

图 12 为不同开孔位置模型的耗能系数,在整个加载过程中,各模型的耗能系数相差较小,这主要是因为可更换耗能梁段处的塑性铰均充分耗散地震能量,开孔位置  $b$  对带可更换耗能梁段的钢框架梁柱节点的耗能系数的影响较小。

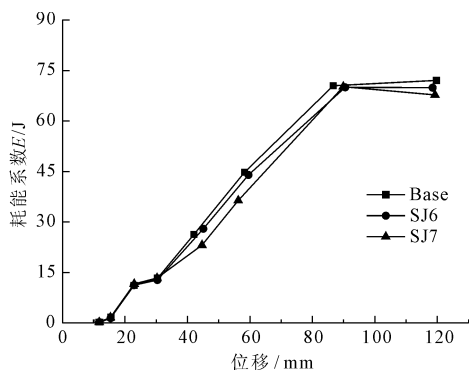


图 12 不同开孔位置模型的耗能系数

### 3 结 论

(1) 本文提出的带腹板开孔型可更换梁段的钢框架梁柱节点既能通过可更换耗能梁段耗散地震能量,避免梁柱节点的脆性破坏,又能在震后实现可更换耗能梁段的修复,使建筑快速恢复使用功能。

(2) 在可更换耗能梁段截面小于非耗能梁段及腹板开孔削弱的双重影响下,所有模型的塑性铰均出现在可更换耗能梁段处,是一种理想的破坏模式。

(3) 带腹板开孔型可更换梁段的钢框架梁柱节点的承载力随腹板开孔半径的增大而较小,腹板开孔半径对新型节点滞回性能影响较小。综合考虑新型节点的力学性能,建议腹板开孔半径  $r$  取值范围为  $0.225h \sim 0.275h$ ,腹板开孔位置  $b$  取值范围为  $0.81h \sim 0.97h$ 。

### 参考文献:

- [1] 刘智超. 装配式可更换梁段—梁腹板开孔削弱型节点滞回性能研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [2] 张 军,张 辰. 装配式钢结构住宅半刚性节点抗震性能的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):185-190.
- [3] 张文镜,刘 芸,王 燕,等. 带裂纹翼缘板加强型节点局部试件力学性能试验研究[J]. 青岛理工大学学报,2020,41(5):76-81,140.
- [4] 聂少锋,武杨凡,王继琴,等. 钢管加强梁腹板开孔型梁柱弱轴连接节点的抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造,2019,41(6):22-30.
- [5] 吕西林,武大洋,周 颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(2):1-15.
- [6] 王秀丽,沈世钊,殷占忠,等. 钢框架梁腹板开孔型连接节点力学性能试验研究[J]. 工程力学,2006(6):65-76.

进行双语案例库开发教学,改变传统的案例库教学,不仅提升研究生专业英语水平和工程实践应用能力,加深学生对专业和行业的认识,更能激发他们自主学习和思考的潜能,提升教学效果。混合式教学方式既能发挥教师课堂上的引领、监督和管理学生整体学习过程的作用,又结合现代网络信息科技手段激发学生对课程的兴趣、提高课程互动性,提升学生思维能力,也为考核评价体系的客观性和准确性提供了数据支持。线上线下混合式教学提高了双语地基处理案例库教学效果,教学手段和方式更加灵活多样,检测手段更加丰富和科学。利用线上教学平台和线下教学促使教师和学生的互动增加,提升学生自主外语学习能力,提高学生的外语语言应用能力和专业知识应用能力,促进课堂教学效果和课程国际化水平。

**致谢:** 本文受西安科技大学研究生案例库项目(201809)支持。

#### 参考文献:

- [1] 曾开华,鞠海燕.《土力学与地基基础》双语教学刍议[J].科技广场,2010(10):212-214.
- [2] 梁越,王俊杰.地基处理新技术研究生课堂教学模式研究[J].高等建筑教育,2015,24(2):44-46.

- [3] 尚家杰,刘宏新,郭丽峰,等.专业学位研究生有限元工程结构分析案例教学研究与实践[J].高等农业教育,2017,304(4):105-109.
- [4] 孙建渊,涂坤凯.专业学位研究生案例库全过程建设研究[J].教育探索,2016(12):76-79.
- [5] 章伟,时伟,张明义.案例教学法与“地基处理”课程教学改革[J].中国冶金教育,2007(4):37-39.
- [6] 王雁冰.充分结合实践的地基处理课程教学改革[J].山西建筑,2020,46(2):171-172.
- [7] 邵光辉.专业学位研究生地基处理新技术教学案例库建设与应用[J].教育教学论坛,2019(5):47-49.
- [8] 孟霆,姜海丽,刘艳磊.美国高校基于线上线下混合式教学模式的经验及启示[J].黑龙江高教研究,2021(4):80-84.
- [9] 朱忆琳,汪祥耀.SPOC视阈下会计双语混合教学模式研究——以“财务管理”双语课程为例[J].财会通讯,2019(34):32-35.
- [10] 纪亮.混合式教学模式在双语教学中的应用初探[J].中国教育学刊,2018(S1):61-62.
- [11] 郭明,楼丹,吴蓉晖,等.混合式教学模式下仪器分析双语教学探究[J].化学教育(中英文),2019,40(18):23-28.
- [12] 储方舟,吴静云,丁静鹄,等.生物水泥技术应用于液化地基处理的研究进展[J].水利与建筑工程学报,2019,17(2):91-96.

(上接第 128 页)

- [7] 杨娜,彭中华,许鑫森.钢结构梁腹板开圆孔组合节点性能数值分析[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(10):1232-1237.
- [8] 杨应华,吴言亮.套管加强梁腹板开孔梁柱节点滞回性能分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(6):788-792,798.
- [9] 纪晓东,王彦栋,马琦峰,等.可更换钢连梁抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(10):1-10.
- [10] 关彬林,连鸣,苏明周,等.端板连接可更换 Q235 耗能梁段钢框筒子结构滞回性能及其影响因素研究[J].工程力学,2021,38(4):54-67.

- [11] 程倩倩,连鸣,关彬林,等.含双槽钢截面可更换耗能梁段的高强钢框筒结构滞回性能研究[J].工程力学,2021,38(5):98-112,121.
- [12] 张浩,连鸣,苏明周,等.带可更换低屈服点耗能梁段-端板连接的钢框筒结构抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2020,53(7):28-42.
- [13] 杨庆山,李波,杨娜.梁腹板开圆孔钢框架梁柱节点的性能研究[J].工程力学,2007(9):111-121,139.
- [14] 钢结构设计规范:GB 50017—2017[S].北京:中国计划出版社,2018.