

填充墙开洞对RC框架结构抗震性能影响研究 现状及展望

俞洁慧, 刘 猛

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年6月27日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月29日

摘 要

本文旨在系统梳理带洞口填充墙-RC框架结构抗震性能的研究现状,明确现有规范与技术瓶颈,提出未来发展方向。通过整合拟静力试验、振动台试验及ABAQUS等数值模拟成果,结合等效斜撑等简化模型,系统分析开洞率与洞口位置的影响机制。研究发现:洞口显著降低结构刚度,当开洞率超过30%时承载力下降达40%,并会引发窗间墙剪切破坏和短柱效应等典型震害;试验证实洞口参数直接主导破坏形态,有限元模型虽能模拟损伤演化却难以精准反映多方向地震共同作用的影响;现行中欧规范对洞口设计缺乏量化条款,工程常用的等效斜撑模型适用性有限。因此,未来需构建多尺度模型揭示损伤随时间发展的过程,验证纤维增强材料等新型加固技术,并将洞口参数设计纳入规范更新体系,从而提升结构抗震安全储备。

关键词

钢筋混凝土框架, 带洞口填充墙, 抗震性能, 相互作用, 简化模型

Research Status and Prospects on Seismic Performance of RC Frames with Perforated Infill Walls

Jiehui Yu, Meng Liu

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 29th, 2025

Abstract

This review systematically examines seismic performance of RC frames with perforated infill walls,

identifying limitations in current design codes and technical approaches while proposing future research directions. By synthesizing quasi-static tests, shake-table experiments, ABAQUS-based simulations, and equivalent strut models, we analyze how opening ratios and locations alter structural behavior. Key findings indicate: openings significantly reduce stiffness (causing 40% capacity loss at >30% opening ratio) and trigger localized failures including pier-wall shear cracks and short-column effects; experimental data confirm opening parameters dictate collapse patterns, though numerical models struggle to capture multidirectional seismic interactions; current Chinese and European codes lack quantitative design rules for openings, with strut models showing limited applicability. Consequently, developing multiscale frameworks to reveal time-dependent damage progression, validating advanced reinforcement materials, and codifying parametric design provisions for openings are essential to enhance structural safety.

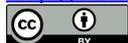
Keywords

RC Frames, Perforated Infill Walls, Seismic Performance, Interaction, Simplified Models

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋混凝土(RC)框架结构作为多层建筑的常用形式,在我国及全球范围内广泛应用。填充墙作为框架结构的关键部分,既是空间隔断,其与框架的连接也直接影响结构的动力性能和抗震能力。然而在当前《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) [1]里,针对填充墙的抗震设计规定仍存在一定的不足。规范简单地将填充墙划归为非结构构件,这种分类方式使得框架-填充墙体系在地震作用下的协同工作机制未获得应有的关注。从过往的震害统计数据[2]-[7]来看,填充墙 RC 框架结构在地震中出现的非理想失效模式,是造成建筑结构严重破坏甚至倒塌的关键原因。杨伟等[8]在汶川地震都江堰市建筑震害考察中指出,RC 框架结构中的填充墙普遍存在破坏现象。在地震作用下,填充墙的刚度效应容易导致结构薄弱层的破坏以及扭转效应的产生,进而对结构造成严重损伤,甚至存在倒塌的风险。含有门窗洞口的填充墙,其窗间墙部分易形成短墙受力状态,在地震剪力作用下易发生脆性剪切破坏,且裂缝常沿窗台水平通缝发展[9]。此外,填充墙框架结构中,窗间墙对框架柱的约束作用往往会引起柱的短柱效应、剪力重分布以及破坏截面的转移等问题,这些因素均是导致结构在地震中受损的潜在风险源。因此,深入研究填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能的影响,并探索合理的评估方法,显得尤为重要。

本文主要对现有研究成果进行了分析和总结,指出了其中的不足,并对未来的研究方向进行了展望。

2. 国内外相关规范考虑

2.1. 中国规范(GB 50011)

在我国现行的《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) [1]规定,填充墙的平面与竖向布置需保持均匀对称,以防止薄弱层或短柱的出现。填充墙应在框架柱全高范围内每隔 500 mm 至 600 mm 设置 2Φ6 拉筋,拉筋的嵌入长度在 6、7 度时宜沿墙全长贯通,8、9 度时亦应全长贯通。对于楼梯间及人流通道的填充墙,需采用钢丝网砂浆面层进行加固处理。规范将填充墙作为荷载处理,并通过周期折减来考虑其刚度效应。即便使用轻质填充墙,填充墙框架结构的刚度仍会比纯框架结构高出 5 至 10 倍[10]。设计人员需根据具体工程情况,将周期乘以折减系数 0.6 至 0.7,实际上是按照纯框架结构进行设计计算[11]。

2.2. 欧洲规范(Eurocode 8/FEMA)

Eurocode 8 [12]明确要求考虑非结构构件填充墙在地震时的作用, 因其可能显著影响结构的刚度和质量分布, 并需通过柔性连接(如滑动缝或弹性连接件)避免因刚度突变引发局部破坏。此外, 设计中应严格控制填充墙的平面布置对称性, 避免因洞口、开孔或竖向分布不均导致严重不规则性。当建筑立面存在显著不规则现象(例如一个或多个楼层的填充墙数量相较于其他楼层急剧减少)时, 需按规范要求增大相应楼层竖向构件的抗震作用效应。若未采用精细化分析模型, 可通过将地震作用效应乘以放大系数 η 实现上述要求, 具体表达式为:

$$\eta = 1 + \frac{\Delta V_{RW}}{\sum V_{Ed}} \leq q$$

式中, ΔV_{RW} 为所考虑楼层填充墙承载力总折减值, $\sum V_{Ed}$ 为该楼层竖向构件地震剪力设计值之和, q 为结构行为系数。若计算所得 $\eta < 1.1$, 则无需修正地震作用效应;

若填充墙显著增强结构侧向刚度, 可将其等效为斜撑模型参与整体分析, 但需确保模型涵盖梁、柱、节点及填充墙的协同变形; 所有延性等级结构(低震级除外)需采取构造措施(如混凝土边框约束洞口)防止填充墙脆性开裂或过早解体。

2.3. 美国规范(FEMA450/ASCE 7)

美国抗震规范体系复杂, 涉及多个标准, 其中核心规范包括 FEMA450 和 ASCE 7 等。

FEMA450 [13]中提到在非结构构件填充墙可能因建筑变形过大而与主体结构框架产生相互作用, 进而意外地承担了结构作用。此时连接界面或节点处的应力累积可能超过材料承载极限。因此, 此类构件间的空间公差成为关键控制因素。相关规范要求着重强调外墙构件的附属连接件必须具备足够延展性和强度, 同时需特别关注各构件间的相互作用关系。

ASCE 7-05 [14]规定, 在填充墙与周边框架连接良好且限制框架侧移的情况下, 需按公式计算 RC 框架结构的基本自振周期:

$$T_a = \frac{0.0019}{\sqrt{C_w}} h$$

式中, C_w 为填充墙刚度贡献系数, 考虑填充墙面积、宽度、高度及数量对结构整体刚度的影响。

规范要求主要基于宏观效应和经验, 而深入理解开洞填充墙的复杂行为则需要依赖更精细的试验研究。

3. 试验研究进展

3.1. 拟静力试验

在试验研究领域, 学者们精心设计了多种实验方案, 深入研究了填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能的具体影响。拟静力试验作为一种常用的研究手段, 被广泛应用于相关研究中。例如, 周振轶[15]和李旭东[16]分别针对空框架及填充墙 RC 框架进行拟静力试验, 综合分析了骨架曲线、承载力与耗能能力等性能, 结果显示填充墙显著提高了结构的初始刚度和峰值承载力, 但当开洞率超过 30%时, 承载能力降幅达 40%。唐兴荣[17]进一步探讨了拉结筋、构造柱和水平系梁等构造措施对填充墙 RC 框架抗震性能的影响。研究表明, 配置了构造柱和水平系梁的试件展现出较好的位移延性和耗能能力, 且刚度退化过程较为缓慢。熊灏等[18]通过实体与开洞填充墙对比试验发现, 墙体开洞率对构件的抗侧承载力有影响, 当轴压比、材料强度等因素相同时, 开洞率越大, 构件的开裂荷载与极限荷载就会相应的降低。Stavridis

[2]开展了一系列试验,重点研究了实体填充墙与开洞填充墙的失效模式。孔璟常等[19]通过四个单层单跨足尺的拟静力试验,考察了实体与开洞混凝土空心砌块在 RC 框架中的抗震性能,并分析了不同填充墙 RC 框架结构的失效模式、滞回性能、刚度、延性与耗能能力等抗震特性。

3.2. 振动台试验

除了拟静力试验,振动台试验也是评估填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能影响的关键手段。黄群贤等[5]通过振动台试验,对比分析了纯框架、完全填充墙框架和开洞填充墙框架的抗震性能,深入探讨了轻质填充墙框架的抗震特性,为填充墙开洞研究提供了新的视角。Hashemi 和 Mosalam [20]的三维缩尺试验通过振动台试验验证了填充墙对框架结构抗震性能的显著影响,为实际工程的抗震设计提供了有力的实验依据。

3.3. 其他试验

此外,还有学者利用其他类型的试验研究填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能的影响。例如,朱荣华和沈聚敏[21]采用拟动力试验,对比了实体砖填充墙与开门洞砖填充墙框架的抗震性能,研究指出发现开洞填充墙在洞口两侧及上方的破坏最为严重,并建议采用钢筋混凝土加固措施,并将拉结筋延长至洞口边缘,以增强结构的整体性。Mehrabi [22]等则针对 12 个 1:2 比例缩尺的单层单跨实体填充墙 RC 框架结构开展了拟静力加载试验研究,研究结果显示,当填充墙与框架均具备较高强度(即强填充墙-强框架体系)时,结构在承载能力及能量耗散效率方面均显著优于填充墙与框架强度均较低的组合(弱填充墙-弱框架体系)。这一发现为优化框架-填充墙体系的抗震设计提供了重要试验依据。

试验虽能揭示现象和验证模型,但成本高、周期长,数值模拟则为参数化研究和机理探究提供了高效手段。

4. 有限元模拟方法

在有限元模拟方法方面,随着计算机技术的飞速发展,有限元模拟已成为研究填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能影响的重要手段。学者们利用 ABAQUS、PERFORM-3D、OpenSEES 等有限元软件,建立了精细化的数值模型,对填充墙开洞 RC 框架结构的抗震性能进行了深入研究。例如,胡亮[23]采用有限元软件 ABAQUS 构建了混凝土框架填充墙结构模型,通过对比无填充墙的纯框架与满布填充墙的框架结构,系统开展了模态分析及动力时程分析,旨在探究填充墙对 RC 框架整体抗震性能的影响。吕远[24]则聚焦轻质加气混凝土(ALC)填充墙与钢框架的协同工作性能,基于 ABAQUS 平台建立了 10 榀两层单跨框架模型,通过对比纯框架、实心 ALC 板及开洞板材三种工况,深入探讨了填充墙体对结构刚度分布、承载能力及耗能特性的影响规律,特别指出当开洞率突破 50%临界值时,结构将出现短柱破坏模式且墙体抗震耗能作用显著弱化。石宏彬[25]则利用 PERFORM-3D 软件,针对开洞填充墙的等效斜撑杆模型进行了分析。王广庆[26]则对墙-框体系的水平抗力进行了解析,并基于 OpenSEES 创建了填充墙的宏观模型。

王璉[27]利用 SAP2000 对五层两跨 RC 框架进行了静力弹塑性分析,系统研究了填充墙开洞率及布置形式(包括纯框架、实体填充墙及不同竖向开洞布置如首层/中间层/顶层大空间等九种工况)对抗震性能的影响,揭示了洞口位置对刚度贡献的定量规律。

除了前文提及的 ABAQUS、PERFORM-3D、SAP2000 等常用有限元分析软件外,部分学者还积极探索并采用了其他类型的有限元模拟技术与方法,以进一步拓展框架-填充墙结构抗震性能研究的深度与广度。Mondal 和 Jain [28]利用分离式有限元模型研究了填充墙等效撑杆的有效宽度折减系数,该方法在预测开洞填充墙框架结构的侧向刚度方面表现出色。Budiwati [29]等人则采用纤维梁壳单元与等效斜撑来

模拟开洞填充墙, 通过调整等效斜撑的宽度, 使其与梁壳单元模型的有限元模拟结果相符, 从而提出了填充墙刚度折减系数与填充墙开洞率之间的经验公式, 并进一步完善了填充墙开洞影响的模拟方法。

5. 简化分析模型

为更高效地评估填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能的具体影响, 众多学者开展了针对性研究, 并陆续提出了一系列简化分析模型。其中, 等效斜撑杆模型凭借其简洁性和实用性, 成为一种被广泛应用的简化分析手段。例如, 石宏彬[25]借助 PERFORM-3D 软件对填充墙开洞的等效斜撑杆模型进行了分析, 提出了一种用于结构抗震分析的简化方法。与此同时, Mondal [28]创新性地采用了分离式有限元模型与等效撑杆模型相结合的方式, 系统研究了中心开洞填充墙框架结构的侧向刚度变化规律, 并给出了中心开洞影响下等效撑杆模型有效宽度的折减系数, 为定量评估开洞对结构侧向刚度的影响提供了实用工具。此外, 部分学者从不同角度出发, 提出了其他类型的简化分析模型。例如, Budiwati [29]等提出了填充墙刚度折减系数与填充墙开洞率之间的经验公式, 为开洞填充墙的抗震设计提供了参考依据。欧洲规范 Eurocode 8 [12]建议使用等效压杆宽度折减法, 其中开洞率每增加 10%, 压杆宽度缩减 12%。赵伟通[30]对实体填充墙与包含门洞的填充墙进行了分离式建模, 并通过已有的实验数据验证了有限元模型的适用性, 为开洞填充墙抗震性能研究提供了新的方法。此外, 曹万林[31]-[33]过实验研究轻质填充墙对异形柱框架结构的影响, 提出了考虑填充墙刚度折减系数的建议, 这对提升异形柱框架结构的抗震性能具有重要的意义。Huang 等[34]基于 135 组试验提出了普适性骨架曲线, 显著提升了等效斜撑模型在模拟损伤演化和滞回行为中的精度, 为多尺度建模提供了重要基础。Liberatore 等[35]发展了基于试验数据库的随机等效斜撑模型, 通过量化填充墙材料与几何参数的变异性, 实现了对裂缝扩展和破坏模式的概率化预测, 为复杂洞口条件下的模型适用性提供了新思路。

6. 展望

尽管国内外学者对填充墙开洞对 RC 框架结构抗震性能的影响进行了广泛研究, 但通过对近期相关研究成果的整理和分析, 未来研究应重点关注以下几个方面:

(1) 建模与仿真技术的深化: 发展多尺度建模技术, 发展能跨尺度准确模拟从砌块/砂浆界面微观损伤到墙体宏观非线性行为, 并能高效耦合框架-填充墙相互作用的多尺度建模框架。以精确模拟填充墙与框架的微观与宏观相互作用, 包括裂缝扩展和结构响应。在建模中充分考虑实际工程条件, 如材料特性、结构不规则性等, 提高仿真结果的准确性和实用性。

(2) 抗震性能评估与加固策略: 深入研究填充墙 RC 框架结构在地震等动力荷载下的反应, 评估其抗震性能。开展易损性研究, 评估不同开洞条件下结构的地震风险, 为抗震设计提供依据。探索有效的修复和加固策略, 探索针对开洞填充墙典型震害(如洞口角部开裂、窗间墙剪切破坏)的新型高性能材料(如 FRP、ECC)加固技术或可更换耗能构件的设计, 提升受损结构的抗震能力。

(3) 规范与设计的更新: 基于研究成果, 推动相关建筑抗震设计规范的更新和完善, 更合理地考虑填充墙开洞的影响。推动在规范中更精细化地考虑洞口参数(位置、尺寸、形状)对结构整体刚度、周期、内力重分布以及构件层面(如短柱效应)设计需求的影响, 并纳入相应的设计条款或修正系数。结合研究成果, 改进现有的抗震设计方法, 提出更加科学合理的设计建议, 指导实际工程应用。

7. 结论

本文系统回顾了带洞口填充墙-RC 框架结构抗震性能的研究进展。研究表明: 洞口显著削弱墙体刚度, 改变结构刚度分布并引发应力集中, 导致承载力下降(开洞率 > 30%时降幅可达 40%)及破坏模式改

变(如短柱效应、窗台水平裂缝); 试验与数值模拟揭示了洞口参数(大小、位置)的关键影响; 等效斜撑模型等简化方法为工程应用提供了实用工具, 但其精度和适用性仍需针对复杂洞口情况进一步验证。当前研究在洞口损伤动态演化机制、多维地震耦合效应及高性能加固技术等方面仍存在明显不足。未来需发展更精细的多尺度模型, 深化多维性能评估, 探索高效加固策略, 并推动设计规范对洞口影响的精细化考量, 以提升此类结构的抗震安全性能。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] Stavridis, A., Koutromanos, I. and Shing, P.B. (2011) Shake-Table Tests of a Three-Story Reinforced Concrete Frame with Masonry Infill Walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**, 1089-1108. <https://doi.org/10.1002/eqe.1174>
- [3] 刘玉姝, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 78-85.
- [4] 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 46-54.
- [5] 黄群贤, 郭子雄, 朱雁茹, 等. 混凝土空心砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 110-118.
- [6] 汪梦甫, 黄青山, 邬文奇. 新型外廊式钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1): 135-143.
- [7] 金昊贵, 李鸿晶, 孙广俊. 地震作用下钢筋混凝土框架——填充墙相互作用分析[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 31-41.
- [8] 杨伟, 侯爽, 欧进萍. 从汶川地震分析填充墙对结构整体抗震能力影响[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 770-775.
- [9] 彭娟, 李碧雄, 邓建辉. 芦山地震和汶川地震中空心砖填充墙震害反思[J]. 世界地震工程, 2014, 30(2): 186-193.
- [10] 黄靓, 施楚贤, 吕伟荣. 对框架填充墙结构抗震设计的思考[J]. 建筑结构, 2005, 35(8): 27-29.
- [11] 宁宁, 屈文俊. 填充墙对 RC 框架结构抗震性能影响研究现状[J]. 结构工程师, 2016, 32(3): 192-197.
- [12] (2005) Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part3: Assessment and Retrofitting of Buildings.
- [13] (2003) FEMA 450. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures.
- [14] (2006) ASCE/SEI 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- [15] 周振秩. 多层砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究和理论分析[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技学院, 2010.
- [16] 李旭东. 轻质砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [17] 唐兴荣, 杨亮, 刘利花, 等. 不同构造措施的砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 75-83.
- [18] 熊灏. 框架砌体填充墙在地震作用下的研究分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [19] 孔璟常. 开洞砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [20] Hashemi, S.A. and Mosalam, K.M. (2007) Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Including Effects of Infill Masonry Walls. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 2007/100.
- [21] 朱荣华, 沈聚敏. 砖填充墙钢筋混凝土框架拟动力地震反应试验及理论分析[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(4): 27-34.
- [22] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P. and Noland, J.L. (1994) Performance of Masonry Infilled R/C Frames under In-Plane Lateral Loads. Report CU/SR-94/6, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado.
- [23] 胡亮. 基于 ABAQUS 的框架填充墙动力有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [24] 吕远. ALC 填充墙对钢框架结构抗震性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2018.
- [25] 石宏彬. 框架结构填充墙影响及强梁弱柱成因研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
- [26] 王广庆. 砌块填充墙的精细化模拟与等效斜撑建模[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

- [27] 王璘. 填充墙对框架结构抗震性能影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [28] Mondal, G. and Jain, S.K. (2008) Lateral Stiffness of Masonry Infilled Reinforced Concrete (RC) Frames with Central Opening. *Earthquake Spectra*, **24**, 701-723. <https://doi.org/10.1193/1.2942376>
- [29] Budiwati, I.A.M. and Sukrawa, M. (2018) Development of Diagonal Strut Width Formula for Infill Wall with Reinforced Opening in Modeling Seismic Behavior of RC Infilled Frame Structures. *AIP Conference Proceedings*, **1977**, Article ID: 020062. <https://doi.org/10.1063/1.5042918>
- [30] 赵伟通, 孔璟常, 张宇康, 等. 开门洞砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能的有限元分析[J]. 特种结构, 2020, 37(2): 73-80.
- [31] 曹万林, 庞国新, 李云霄, 王光远. 轻质填充墙异形柱框架弹性阶段地震作用计算[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(3): 44-51.
- [32] 曹万林, 魏文湘, 曲英华, 张瑞捷, 庞国新. 轻质填充墙异型柱框架侧移刚度试验分析[C]//第二届结构工程学术会议论文集. 1993: 488-492.
- [33] 曹万林, 庞国新, 李云霄, 王光远. 轻质填充墙异型柱边框架抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 106-112.
- [34] Huang, H., Burton, H.V. and Sattar, S. (2020) Development and Utilization of a Database of Infilled Frame Experiments for Numerical Modeling. *Journal of Structural Engineering*, **146**, Article ID: 04020085. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002608](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002608)
- [35] Liberatore, L., Noto, F., Mollaioli, F. and Franchin, P. (2018) In-Plane Response of Masonry Infill Walls: Comprehensive Experimentally-Based Equivalent Strut Model for Deterministic and Probabilistic Analysis. *Engineering Structures*, **167**, 533-548. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.057>