

钢管混凝土拱桥抗震研究进展

徐粒寒¹, 徐略勤^{1,2}, 严广洋¹, 黄瀚¹, 袁茂均¹, 周建庭²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘要:当前,我国钢管混凝土(concrete filled steel tube, CFST)拱桥建设发展迅速,大量CFST拱桥建成于强震频发区,其抗震安全问题受到广泛关注。为了全面掌握国内外在CFST拱桥抗震领域的研究进展状况,首先,调研了国内外360篇与CFST拱桥抗震相关的研究文献,从发文章就其研究方向与研究趋势进行了宏观论述;然后,从CFST拱桥抗震模拟与分析方法、结构响应特性、震致损伤分析、减隔震等四个方面详细总结分析了当前的研究进展和不足;最后,对CFST拱桥抗震研究值得进一步探讨的方向进行了展望。研究表明,准确获取结构地震响应的动力分析方法、构件间动力响应的耦合行为、结构设计参数优化和合理设计方法、减隔震措施的合理布设方法及其结构响应的影响机理、普适性的损伤评估流程等是CFST拱桥抗震研究中具有重要意义的热点和方向;抗震风险评估、数字化技术的融合、普适性的研究手段与数据分析方法是今后值得重点研究的内容。本研究进展总结可为已建和待建CFST拱桥在抗震分析、设计及评估等方面提供参考。

关键词:CFST拱桥;抗震;统计分析;研究趋势;文献综述

中图分类号:U442.5⁺5

文献标志码:A

Research progress on seismic resistance of concrete filled steel tube arch bridges

XU Lihan¹, XU Lueqin^{1,2}, YAN Guangyang¹, HUANG Han¹, YUAN Maojun¹, ZHOU Jianting²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Currently, the construction of concrete filled steel tube (CFST) arch bridges in China is developing rapidly, and a large number of CFST arch bridges are located in the high-seismicity zones. The seismic resistance issues of CFST arch bridges have received widespread attention. This article first surveyed 360 domestic and foreign research literatures related to the seismic resistance of CFST arch bridges, and provided a macro discussion on their research direction and trends based on the number of publications. Afterwards, the current research progress and shortcomings were summarized in detail from four aspects: seismic simulation and analysis methods, seismic response characteristics, seismic damage analysis, and seismic isolation of CFST arch bridges. Finally, an outlook was made on the issues worth further research on the seismic resistance of CFST arch bridges in the future. The results show that the dynamic analysis method can accurately obtain the seismic response of structures, the coupling behavior of dynamic response amongst components, the optimization and reasonable design method of structural design parameters, the reasonable deployment method of seismic reduction and isolation measures and the mechanism of their impact on structural response, as well as the universal damage assessment process are of great significance for the seismic resistance of CFST arch bridges. In addition, seismic risk assessment, the application of digital technology, and universal research methods and data analysis methods are key areas worth studying in the

收稿日期:2024-07-14; 修回日期:2024-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52378482);重庆英才计划项目(cstc2022ycjh-bgzxm0133)

作者简介:徐粒寒(1996—),男,博士研究生,主要从事拱桥抗震研究。E-mail:lihanxu2-c@my.cityu.edu.hk

通信作者:徐略勤(1983—),男,教授,博士,主要从事桥梁抗震研究。E-mail:xulueqin@163.com

future. The research can provide a reference for the engineering and academic communities in the seismic analysis, design, and evaluation of existing and pending CFST arch bridges.

Key words: CFST arch bridge; seismic resistance; statistical analysis; research trends; literature review

0 引言

拱桥在中国,特别是西南地区交通网络的建设中得到了广泛应用,钢管混凝土(concrete filled steel tube, CFST)拱桥在其中扮演了极其重要的角色。在2008年我国汶川地震中,在所调研的297座各类拱桥中有超过60%发生不同程度的损坏^[1],且呈现如下典型特征:①规模越大的拱桥越易出现震害,且震害程度越严重;②相较于简支和连续梁桥,拱桥的无损和严重损伤的比例相对较高,有明显的两极化趋势;③近断层区域的拱桥破坏格外严重,例如距中央主断裂带3.6 km的南坝拱桥和距次级断裂带200 m的小鱼洞拱桥均发生了全桥倒塌。此外,1978年的日本宫城地震和2011年日本东部大地震中,钢桁架拱桥天王桥(Tennoh Bridge)的支撑系统均发生了严重损伤^[2-3];在2018年印尼苏拉威西地震中,钢箱拱桥帕鲁桥(Teluk Palu Bridge)发生了整体倒塌,可见不同类型拱桥的抗震性能并不理想。尽管上述震害中并没有CFST拱桥的典型案例,但西南地区CFST拱桥数量多,且普遍存在跨径大、分布区域地震风险高和断裂带密集的特点,因此存在显著的抗震风险。

目前,我国专门针对CFST拱桥的设计规范中^[4-6]涉及抗震的内容非常欠缺,而现行JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》^[7]主要适用于单跨不超过150 m的圬工或混凝土拱桥,对大跨拱桥仅给出抗震设计原则。因此,当前的学术研究成果对于认识CFST拱桥的各类抗震问题具有至关重要的意义。近年来,针对CFST拱桥抗震性能的研究取得了重要进展,但2003年以来^[8],国内外近20 a罕有综述文献对CFST拱桥抗震研究进行系统的梳理。鉴于此,本文通过关键词检索收集了总计360篇中英文文献,对当前CFST拱桥抗震问题的研究热点、研究现状、研究趋势和研究不足进行了系统分析,在此基础上指出了今后具有重要参考价值的研究内容和发展趋势(限于篇幅,本文仅列举107篇典型文献)。本综述可为已建和待建CFST拱桥在抗震分析、设计及评估等方面提供有力的参考。

1 宏观统计分析

图1统计了我国CFST拱桥的建设规模与地震发生情况,其中图1(a)是根据已有文献及媒体报道统计出2016—2023年拱桥建成数量。由图1(a)可知,自1990年旺苍东河桥建成以来,我国CFST拱桥建设的数量和规模迅速增加,其中西南地区新建CFST拱桥数量增速更为明显^[9]。图1(b)汇总了我国近10 a来3级以上的地震次数以及西南地区地震占比^[10-11],可见西南地区地震次数占比较大,高峰时接近全国总数的1/2。此外,地震年发生次数在2022年出现了明显的高峰,而西南地区的地震占比在2020年出现了明显的高峰,在高峰前也有较明显的逐年递增趋势。由此可合理推测,我国西南地区未来数十年内的地震风险有可能会持续增大,该地区大量的CFST拱桥将面临严峻的抗震考验。

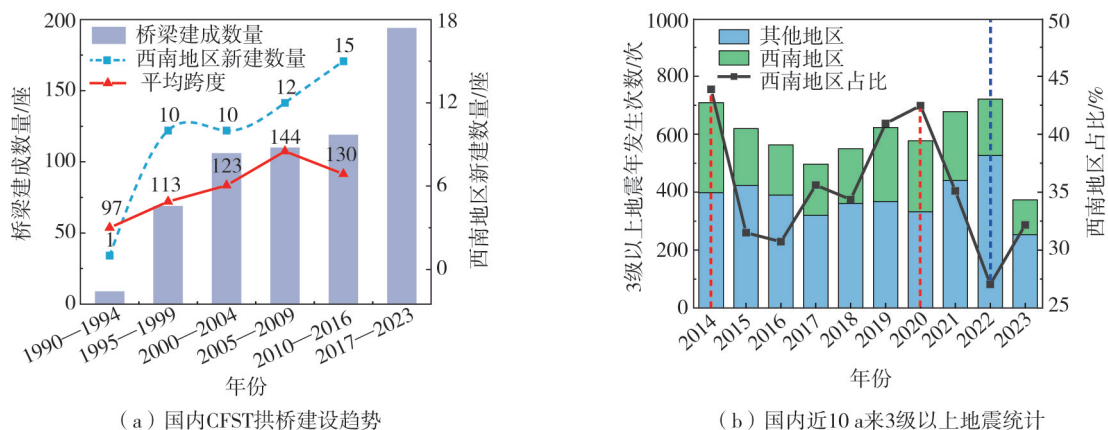


图1 拱桥建设与地震事件统计^[9-11]

Fig. 1 Statistics of arch bridge construction and earthquake events^[9-11]

图2以CFST拱桥为例,给出了工程结构抗震研究的基本思路和流程。通过震源产生的地震波经过场地输入结构,据此计算分析结构的地震响应,在响应结果的基础上开展相关领域的各类研究工作。从数学意义上可以等效为一个输入未知数 x (即地震动输入)在一个 $y=f(x)$ 的函数表达(即结构对地震输入的响应特性)下得到一个输出结果 y (即CFST拱桥地震响应)。其中, x 受地震动和场地相关因素的影响,函数 $y=f(x)$ 一般通过有效的模拟方法进行表征,例如对材料非线性、几何非线性等因素的有效模拟。输入和输出的过程通过抗震分析方法进行实现,例如反应谱分析、时程分析和非线性静力推覆分析(Pushover)等。在得到结构的地震响应后,后续可开展两个方面的研究,一方面是直接开展结构响应特性研究,比如结构设计参数的影响、地震响应规律的总结等;另一方面则包括基于响应结合结构抗震能力指标开展的损伤分析以及结合减隔震装置开展的减隔震研究等。

因此,本文就CFST拱桥抗震模拟和分析方法、CFST拱桥地震响应特性、CFST拱桥震致损伤分析和CFST拱桥减隔震四个方面的研究进展进行综述总结。

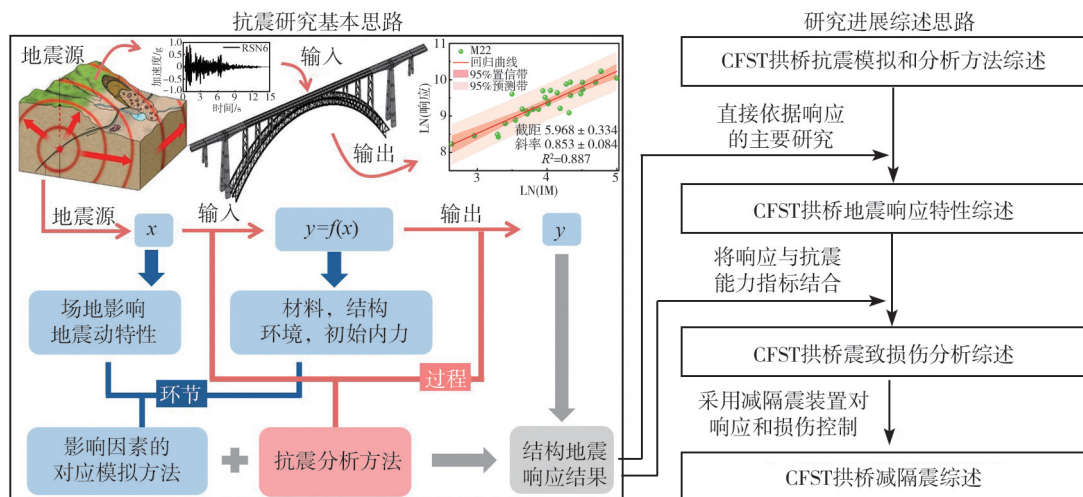


图2 结构抗震研究与综述基本思路

Fig. 2 Basic idea of structural seismic analysis and literature review

采用关键词检索,一共收集到关于CFST拱桥抗震研究的360篇中英文文献,其统计分析结果见图3。图3(a)是将所收集的360篇研究文献按上述四个综述部分进行分类后的发文量对比,图3(b)、(c)为四个部分综述内容按子一级划分的发文量对比。由图3(a)可知,CFST拱桥抗震模拟与分析方法、结构响应特性的研究明显多于其他2项;由图3(b)可知,在抗震分析方法中,有关地震动模拟的研究最为丰富。综合图3(a)~(c)可知,初始内力状态、抗震能力指标和减隔震装置研发的相关文献量明显更少。

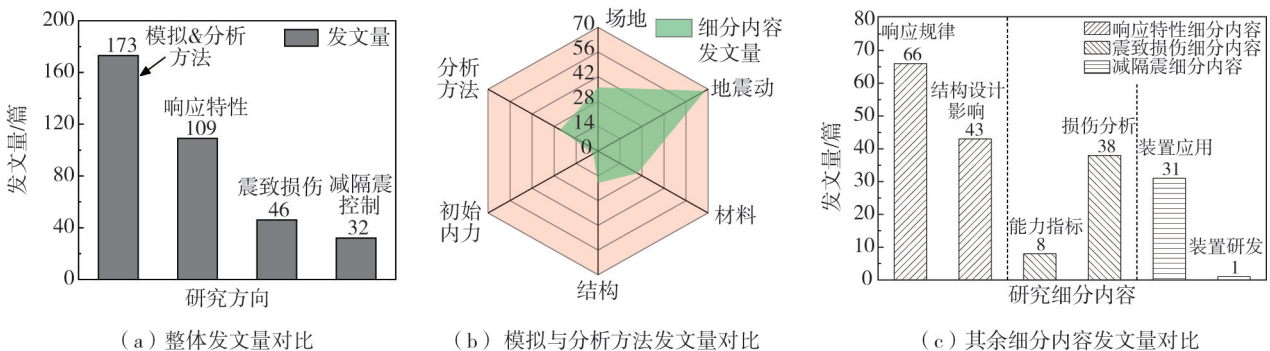


图3 CFST拱桥抗震研究文献统计

Fig. 3 Statistics of literature on seismic research of CFST arch bridges

2 CFST拱桥抗震模拟和分析方法综述

2.1 场地和地震动模拟

场地和地震动特性的考量是在整个工程结构抗震分析思路中的最初步骤,通过有效方法对两者的各类特性进行模拟,将直接决定分析中输入值 x 的准确性,见图2。

在场地模拟方面,现有研究主要关注场地自身模拟以及场地-结构相互作用模拟两大类,其发文量分别为7篇与29篇,可见对于场地-结构相互作用的研究明显更多。对于场地自身的研究,李涛等^[12]依据桥梁抗震设计规范的基本要求,指出较差的场地条件会显著增大CFST拱桥地震内力响应;闫维明等^[13]同样针对场地条件的影响,开展了振动台试验研究,并与数值模拟进行了对照,发现土层的“过滤”作用明显改变了地震动的低频成分,进而导致CFST拱桥的响应发生较大改变,其中拱顶的加速度放大系数随场地的变化最为显著;WANG等^[14]就CFST拱桥在粉质黏土、卵石黏土和裸卵石土层3种场地条件下的地震响应进行振动台试验和数值模拟对比,在模拟中采用无限元组成的传输边界等效场地土壤介质,通过试验验证了模拟方法的有效性,同时指出粉质黏土在强震下具有更好的耗能现象。此外,叶丹等^[15]、郭晓^[16]、王天成^[17]分别就V形河谷的场地效应、岩溶区场地和卵石地基对CFST拱桥地震响应的影响进行了研究。总体而言,国内外目前对场地条件的模拟及其影响的研究较为丰富,且有一定数量的试验支撑,但研究成果的系统性仍然存在一定的不足。

对于场地-结构相互作用,目前主要分析方法包括集中参数法、子结构法和整体分析法三类^[18-19]。集中参数法将半无限地基简化为弹簧-阻尼-质量的三元件系统,通过元件参数对场地-结构相互作用的力学行为进行表达,该方法应用简便,但在非线性和地形变化较大的地基条件下适用性较差。子结构法是将场地-结构体系划分为多个子系统,采用数值模型对每个子系统进行分析,然后通过各子结构交界面的变形协调条件对子结构进行整合分析,因此,该方法能得到较为准确的中间计算结果,但由于其遵从迭加原理,因此理论上仅适用于线性系统。整体法将地基与结构视作一个系统,可以更细致地考虑地基的非线性特征,常用的整体分析法可进一步细分为边界元法、混合元法和有限元法等。

图4(a)为各文献对上述3种方法的应用趋势。总体来看,参数法应用最多,在2000—2010年和2010—2020年2个10a区间,参数法的应用均多于整体分析法,而在20a后采用整体法的研究更多,且采用整体法的文献发表层次相对更高,而子结构法由于针对非线性的分析受限,仅有一篇文章采用,并且是与有限元方法相结合的研究^[20]。郑家树等^[21]最先采用弹簧作为基础边界条件对场地-结构相互作用进行了研究,其后大量学者更多采用大质量法^[22]、 m 法、 p - y 法^[23-25]、Penzien模型^[26]等方法研究场地-结构相互作用效应。谢开仲^[20]通过有限元、无限元等方法,首次针对CFST拱桥的地基-结构相互作用问题采用整体法进行了分析;张博等^[27]、张波^[18]分别采用实体有限元和三维非线性黏弹性人工边界进行了场地-结构相互作用分析。在场地-结构相互作用的影响方面,文献[28-29]指出其对结构自振特性和内力响应均有影响;文献[18]建议在较软的基础条件下应考虑场地-结构相互作用,但在坚硬基础条件下可根据实际情况忽略场地-结构相互作用,以提升计算效率;文献[24]分析发现桩-土作用对CFST拱桥拱肋内力和风撑应力的放大效应最为显著,对拱肋位移的影响最小;而文献[30]发现桩-土作用对拱肋位移的影响最为明显,对拱肋内力相对较小;但2篇文献均认可桩-土及场地-结构相互作用的影响机理较为复杂。文献[20,26]也指出,场地-结构相互作用在不同地震动输入方式和结构形式下会有显著不同的影响,机理非常复杂。

在地震动模拟方面,当前研究主要分为地震动输入方式、地震动特性模拟和影响,其发文量见图4(b)。由图可知,有关地震动输入方式的研究明显多于地震动特性,总体发文量有衰减的趋势,主要由于对输入方式的研究急剧下降所致。近年来,有关地震动特性模拟和影响的研究正逐渐受到学者们的关注。

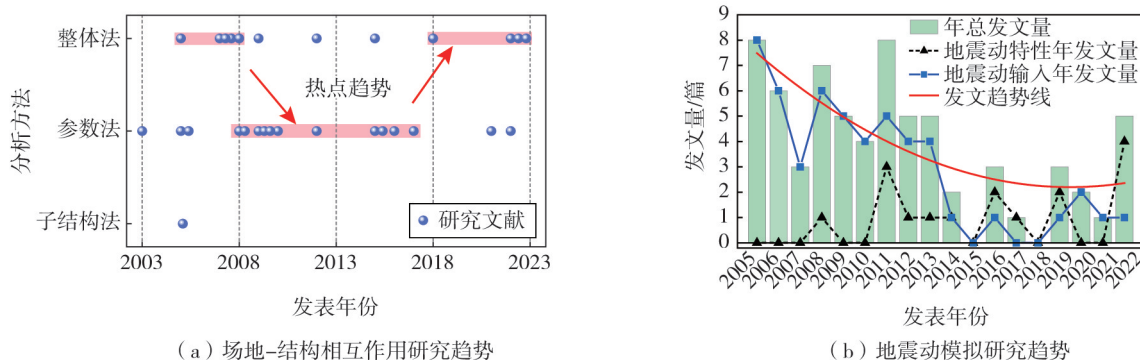


图4 模拟方法研究文献统计

Fig. 4 Statistics of literature on simulation approaches

在地震动输入方式方面,研究发现CFST拱桥结构大多较柔,存在显著的三维空间响应特性^[31-33],因此学者们普遍认可在CFST拱桥抗震分析中应该考虑三向地震激励,但就3个地震动分量中主分量的输入方

向问题暂未形成统一的看法。同时,除了3个平动方向外,对3个转动分量输入的模拟及其对CFST拱桥地震响应的影响还暂未有研究。对于大跨CFST拱桥两端拱座相距较远的情况,地震动在输入结构的过程中会经历时间和空间维度的变化,由此产生诸如行波、部分相干等效效应。因此,除了激励的维度外,激励的方式是地震动输入研究的另一主要内容,即非一致激励和多点激励的问题。文献[34-36]建议在CFST拱桥的抗震分析中,应尽量采用非一致激励的方式来考虑地震动的时空变异性,其结果与采用一致激励的分析方法差异显著,但就其对不同构件响应的影响规律仍缺乏一致的结论。此外,学者认为除结构和分析方法的差异外,不同场地地震动自身特性也是非常重要的影响因素。除地震动基本三要素外,诸如场地和震源机制影响下的脉冲特性和能量特性等都是近年来CFST拱桥抗震研究中的热点。从2008年至今,国内外共有16篇文献专门研究地震动特性对CFST拱桥地震响应的影响,且均为针对近断层地震动,包含滑冲效应^[37]、脉冲效应^[38-39]和谱密度^[40]等。上述研究较为详细地讨论和阐述了不同近断层地震动参数和效应的模拟和等效方法,及其对CFST拱桥地震响应和损伤分布的影响,如王立宪等^[41]、刘少天^[42]、陈彦江等^[43]、李勇^[44]、丁庆灯^[45]、徐略勤等^[46]分别应用随机振动法、频谱变换、小波分析和人工合成法等进行了模拟,均取得了较好的效果。采用地震动高频成分(high-frequency part, HFP)结合人工等效脉冲模型(artificial equivalent pulse model, AEPM)的方法合成不同脉冲参数的近断层地震动,可为近断层CFST拱桥抗震分析提供参考,见图5。

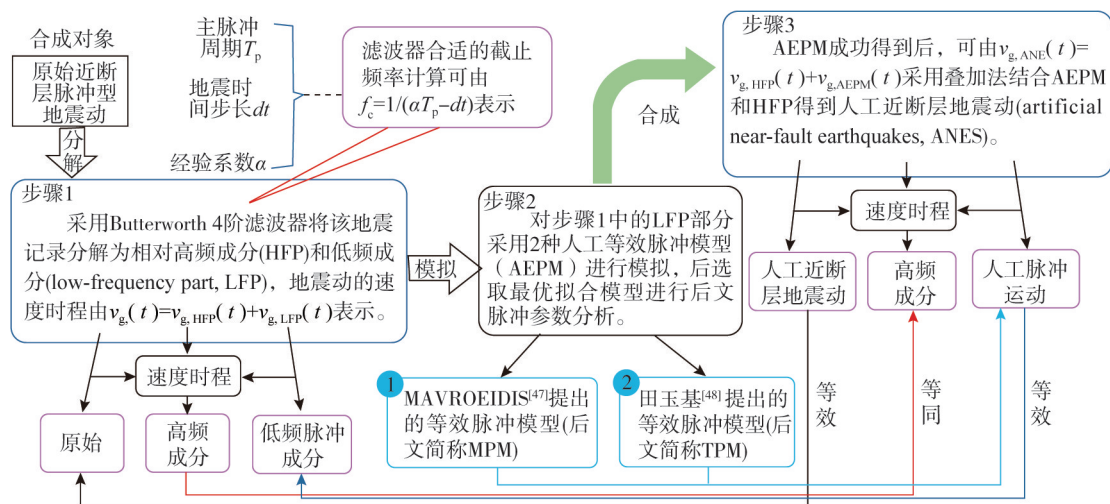


图5 人工脉冲地震动合成方法流程图^[46]

Fig. 5 Workflow of synthesis method of seismic motion with artificial pulses^[46]

2.2 材料与结构模拟

CFST拱桥的主拱肋作为核心受力构件,通过钢管内灌混凝土的方式形成组合材料截面。因此在确立了场地及地震动模拟方法后,对CFST拱桥材料和结构特性的有效模拟,是保证结构响应分析结果准确可靠的重要条件,也是CFST拱桥抗震分析方法有别于其他工程结构甚至是其他类型拱桥的关键特点,见图6。由图6(a)可知,现有文献对材料自身因素和外界影响因素的模拟在研究数量上大致相同。其中,对自身因素研究最多的是材料非线性,除此之外分别有2篇关于收缩徐变,一篇关于特殊内填混凝土材料和一篇关于钢材与混凝土材料相互作用的研究^[49-51];而对外界影响因素的研究,从内容上看分别包含钢管锈蚀^[52]、环境温度^[53]、混凝土脱空^[54]、材料损伤^[55]和截面加固^[56-57]等诸多方向,覆盖面相对较广,但各方向大多只有1~2篇文献,研究结论可对照性相对较弱。从图6(a)可明显观察到,有关材料模拟的研究重心,近年来已逐渐从材料非线性向外界影响因素倾斜。

由于钢管混凝土材料具备通过内填混凝土提高管壁受压稳定性,同时借助钢管对内填混凝土的套箍作用来提高混凝土的抗压强度和延性等特征,因此有关材料非线性的研究大多集中在这种组合材料本构模型的有效模拟方面。过往研究主要采用双材料修正本构或单材料统一本构的方法进行模拟,其具体修正和统一的方法各有侧重。学者们普遍认可材料非线性的有效模拟对CFST拱桥抗震性能的影响非常显著,部分情况下甚至会产生高达40%的响应差异^[58],在对CFST拱桥进行抗震薄弱部位和损伤机理分析时,材料非线性对分析结果几乎起决定性作用。此外,HAN等^[50]指出内灌混凝土的收缩徐变效应不但会显著影响CFST拱桥的地震响应规律,而且由于收缩徐变产生的结构应力重分布现象还会影响截面的承载能力,是材料模拟中不可忽视的因素。

在结构模拟层面,文献[59]主要针对 CFST 拱桥构件、结构简化及结构特性三个方面开展研究,其中针对 CFST 拱桥主拱肋的模拟研究最多,后两者相对较少。对于主拱肋的模拟,除采用有限元法通过实体模型进行模拟外,还有统一理论法、换算材料法、双单元法和采用 Midas/Civil 独有的施工联合截面模块进行模拟^[59]。其中,换算材料法将钢或者混凝土作为目标材料,根据另一种材料的弹性模量与目标材料的弹性模量之比来换算成组合截面。常见的计算公式为

$$EA = E_s A_s + \alpha_1 E_c A_c \tag{1}$$

$$EI = E_s I_s + \alpha_2 E_c I_c \tag{2}$$

式中: E_s 、 E_c 分别为钢管和核心混凝土的弹性模量; A_s 、 A_c 分别为钢管和混凝土的截面面积; I_s 、 I_c 分别为钢管和核心混凝土的抗弯惯矩; α_1 、 α_2 为小于 1.0 的系数,主要考虑了对核心混凝土刚度的适当折减。统一理论与换算材料法采用类似的思想,将 2 种材料视作统一的材料,并建立全过程受力曲线,见图 6(b)。

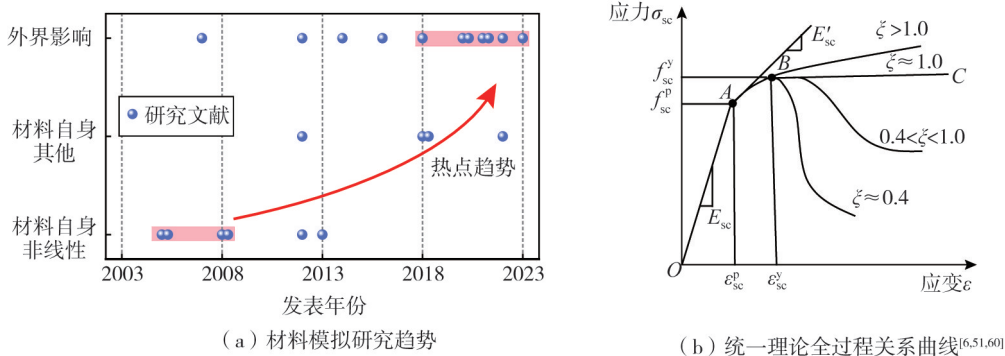


图 6 材料与结构模拟研究

Fig. 6 Research on material and structural simulations

图 6(b)中,OA 段是线弹性阶段,AB 段是弹塑性阶段,按抛物线变化,BC 段是弹塑性阶段。在 BC 段,受钢管约束效应的影响,曲线可能出现上升或下降。各阶段表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_{sc} \varepsilon & (OA \text{ 段}) \\ \frac{A_1 f_{sc}^y Q}{1 + B_1 Q} & (AB \text{ 段}) \\ f_{sc}^y + E'_{sc} (\varepsilon - \varepsilon_{sc}^y) & (BC \text{ 段}) \end{cases} \tag{3}$$

式中: E_{sc} 、 E'_{sc} 分别为钢管混凝土材料弹性和强化阶段的切线弹性模量; ε_{sc}^y 、 f_{sc}^y 分别为屈服应变和屈服应力,受钢管约束效应和混凝土抗压强度的影响; A_1 、 B_1 分别为受钢管和混凝土性能影响的 3 个无量纲系数; Q 为应变 ε 的函数。

双单元法是采用 2 个独立的单元分别模拟钢管和混凝土 2 种材料的力学特性,通过共用节点和单元轴偏移使其形成一个整体,其建模方法见图 7。根据钢管材料类型和等级的不同,通常采用低碳钢和高强钢 2 种应力-应变本构关系。

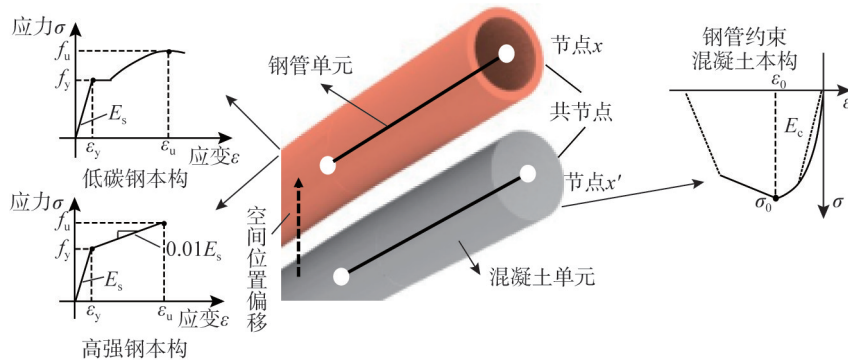


图 7 双单元模拟方法示意图^[51,58]

Fig. 7 Schematic diagram of dual-element simulation method^[51,58]

对于圆钢管混凝土,采用考虑钢管约束效应的混凝土本构,韩林海^[61]提出的计算方法如式(4)~式(8)所示:

$$\sigma/\sigma_0 = 2\varepsilon/\varepsilon_0 - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2 \quad (\varepsilon/\varepsilon_0 \leq 1) \quad (4)$$

$$\sigma/\sigma_0 = \begin{cases} 1+q \cdot ((\varepsilon/\varepsilon_0)^{0.1\xi} - 1) & (\xi \geq 1.12, \varepsilon/\varepsilon_0 > 1) \\ \frac{\varepsilon/\varepsilon_0}{\beta \cdot (\varepsilon/\varepsilon_0 - 1)^2 + \varepsilon/\varepsilon_0} & (\xi < 1.12, \varepsilon/\varepsilon_0 > 1) \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\sigma_0 = \left[1 + (-0.054 \cdot \xi^2 + 0.4\xi) \cdot \left(\frac{24}{f'_c} \right)^{0.45} \right] \cdot f'_c \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \cdot \left(\frac{f'_c}{24} \right) - 1 \right] \cdot \xi^{0.2} (\mu\varepsilon) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5 \cdot f'_c (\mu\varepsilon) \quad (8)$$

式中, q, β 为与约束效应系数 ξ 和混凝土圆柱体轴心抗压强度 f'_c 有关的系数, ξ 计算如式(9)所示:

$$\xi = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}} = \alpha \cdot \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (9)$$

式中: α 为截面含钢率, $\alpha = A_s/A_c$; f_y 为钢材屈服强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值, 其余符号意义同前。上述模拟方法侧重点各有不同, 其应用需视具体分析情况而定。

在结构简化方面, 部分学者对支座、伸缩缝和桥台等影响模型边界条件的连接单元进行了探讨^[62], 而部分学者则重点关注结构构件的简化思路, 包括通过荷载等效的方式简化部分构件质量^[63], 探讨各类杆系模型简化方法的差异等。

与梁桥显著不同的是, 大跨 CFST 拱桥的主拱肋通常采用分阶段成型的施工方法, 会产生复杂的初始内力和几何状态。文献[39, 64-65]分别通过等效荷载模拟、接续分析等方法, 研究了中承式 CFST 拱桥运营阶段的吊杆初拉力和拱肋初应力对结构抗震性能的影响, 其中[64-65]的 2 篇文献均认为初拉力和初应力对结构抗震分析的影响有限, 在分析中可不予以考虑。与之相反, 文献[66-67]指出通过一次成桥的方式来近似代替 CFST 拱桥施工成型过程会产生较大误差, 初始内力和几何状态的影响不可忽略。然而, 围绕大跨 CFST 拱桥成拱过程对其抗震性能的影响研究目前仍然较少, 仅有刘滔^[67]、ZHAO 等^[68]、唐成^[69]分别研究了一座 CFST 拱桥考虑主拱肋不同混凝土浇筑方式、一座 CFST 劲性骨架拱桥考虑拱肋分环分段成型过程对抗震性能的影响, 研究表明忽略施工过程和主拱肋分阶段成型会严重低估 CFST 拱桥的地震响应。图 8 展示了张令等^[39]不考虑施工过程, 采用静力自平衡状态接续的简化抗震分析方法。图 9(a) 为 CFST 拱桥的典型成拱施工过程, 图 9(b) 为组合截面逐次成型的典型阶段, 图 9(c) 展示了组合截面分阶段成型过程中的典型应力累积现象。由此可见, 考虑成拱过程后, 钢管和管内混凝土应变不再符合平截面假定, 考虑成拱过程与否会导致结构在地震作用下会进入不同的弹塑性状态。该问题对 CFST 拱桥抗震分析的影响还需进一步的研究来充分论证。

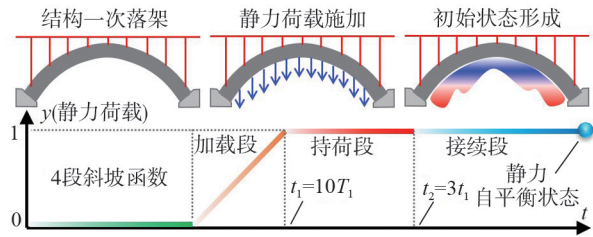


图 8 静力自平衡状态分析方法^[39,65]

Fig. 8 Analysis method of static self-equilibrium state^[39,65]

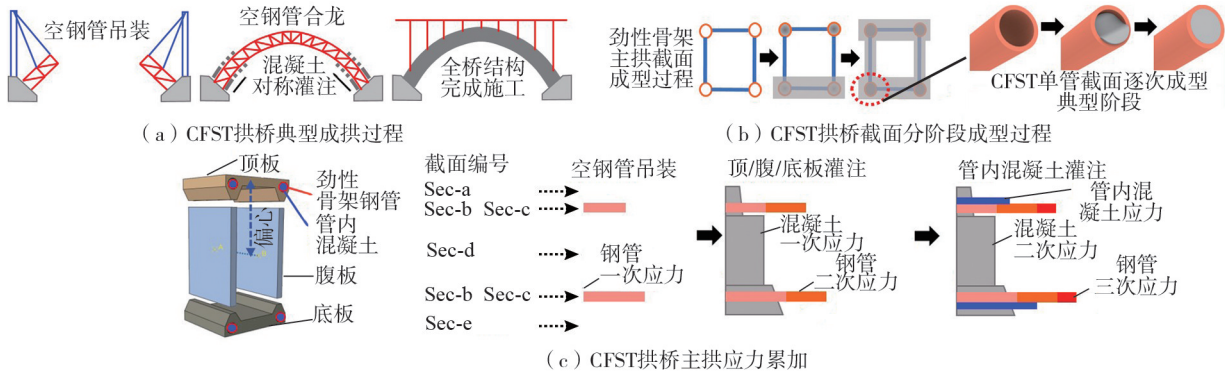


图 9 CFST 拱桥典型施工过程和应力累积^[68-70]

Fig. 9 Typical construction process and stress accumulation of CFST arch bridge^[68-70]

2.3 抗震分析方法

当前常用的抗震分析方法主要包括静力法、反应谱法、非线性静力推覆分析法(Pushover)、时程分析法等确定性分析方法和易损性分析等概率性分析方法,这些方法并无明显的研究对象针对性,对CFST拱桥同样适用。谢开仲等^[71]、韩兴^[72]、申现龙等^[73]、曾森等^[74]分别就模态Pushover、多振型Pushover、上界Pushover以及各类侧向力加载模式下的常规Pushover方法在CFST拱桥中的应用进行了深入研究。通过与时程分析的对比验证,学者们普遍认为合理的Pushover方法能够有效地分析CFST拱桥的抗震性能及损伤机理,但需要注意加载模式的选择。此外,部分学者还就增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法以及基于IDA的易损性分析在CFST拱桥抗震性能、破坏机理和结构抗震风险等方面的应用展开了一系列研究^[75-76],验证了各方法在CFST拱桥抗震分析中的可行性。

2.4 当前研究不足

从CFST拱桥抗震模拟与分析方法上述三个方面来看,当前国内外的研究总体上较为全面,其中材料与结构模拟是与CFST拱桥关联性最强的一部分,场地和地震动模拟以及抗震分析方法大多还是在工程抗震领域通用的一些模拟与分析方法,只是以CFST拱桥作为载体,并得到了各种因素的模拟对CFST拱桥抗震分析的影响规律。总体来看,现有研究存在如下不足:

1) 由于结构的地震响应受地震动与结构特性的耦合影响,且CFST拱桥结构体系较为复杂,因此针对CFST拱桥在各类场地条件下,如何有效选择地震动表征指标来对场地地震危险性和结构地震响应进行准确表达仍然存在明显的不足。

2) 成拱过程对CFST拱桥的初始应力和几何状态具有决定性的影响,现有研究无论是在材料还是结构模拟层面对成拱过程的考虑均严重不足。其中,最为关键的是大跨CFST拱桥拱肋作为采用复合材料的结构,其截面成型过程会历经扣索张拉、钢管节段拼装、混凝土灌注和拆索等一系列施工环节,使得截面应力状态明显不满足平截面假定,这对CFST拱桥地震响应应具有重要的影响,亟待开展进一步的研究。

3) 在抗震分析方法方面,已有的各类静动力分析方法相对比较成熟,但对CFST拱桥在不同场景下地震响应和震致损伤分析的适用性、准确性仍缺乏系统研究。对大跨CFST拱桥在近断层或跨断层地震动作用下的失效模式是否存在更为精准的分析方法也有待进一步探索。

3 CFST拱桥地震响应特性综述

3.1 结构响应特性研究

现有针对CFST拱桥地震响应特性的研究大多针对特定桥例,主要以内力、应力和位移等为响应指标,从拱肋、横撑、立柱及吊杆等不同构件角度进行讨论。图10(a)为66篇有关CFST拱桥地震响应特性研究的文献统计,可见针对上承式CFST拱桥的研究明显少于下承式和中承式CFST拱桥,3种结构形式的平均跨径均大于150m,说明研究对象普遍为大跨CFST拱桥。图10(b)~(d)分别以下、中、上承式CFST拱桥为对照,就研究文献中关注的响应项进行统计对比,可见主拱内力和位移响应是已有研究最为关注的内容,主拱内力响应的文献占比在3种不同结构形式的研究中均大于90%;而对主拱以外构件的研究明显偏少,66篇文献中对横撑、主梁和吊杆响应的研究各仅有4篇。

从响应规律来看,现有研究认为不同形式CFST拱桥的横向刚度均较纵向和竖向小,CFST拱桥横向抗震最不利。其中,主拱拱脚截面是CFST拱桥地震下内力响应的最不利位置,而拱顶是横向位移响应的最不利位置^[77-79]。主拱肋以外构件的地震响应主要有如下规律:①靠近拱脚处横撑的响应最显著^[80],但有研究认为其不作为设计控制构件,也有研究认为由于截面突变导致的应力集中,横撑是拱桥最易受损的构件^[39,81]。②中承式CFST拱桥的主梁在地震下内力和位移均较小,主梁不作为抗震设计控制构件^[82],其内力主要为轴力和竖向弯矩,横向位移较纵向位移偏大,且位移趋势与主拱相似,均为跨中位置最大。当主拱拱脚在地震作用下产生塑性铰后,结构受力体系发生转变,此时拱梁交界位置和主梁跨中位置的内力和位移响应需要重点分析。此外,上承式CFST拱桥主梁的内力响应较小,但在地震作用下端部梁体可能发生与支座的相对滑动,拉断伸缩缝,造成落梁危害。③中下承式拱桥的吊杆在地震作用下的内力响应普遍小于静载内力^[80,83],且跨中和拱脚附近吊杆的地震响应最为显著。④由于上承式CFST拱桥拱上立柱刚度分配不均匀,越靠近拱顶的矮立柱在地震作用下的内力响应越显著,同时还会承受较大的剪力^[84]。

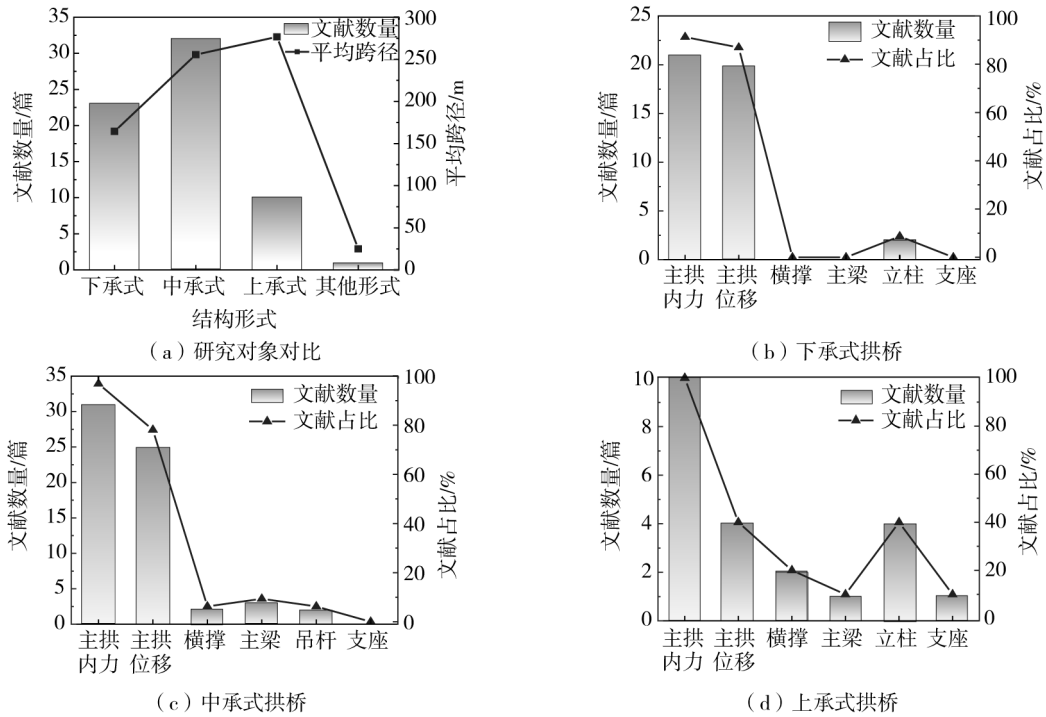


图 10 CFST 拱桥地震响应文献统计

Fig. 10 Statistics of literature on the seismic response of CFST arch bridges

除以特定桥例所开展的研究外,结构自身参数变化对 CFST 拱桥地震响应的影响也是研究的热点。以拱桥结构形式、研究参量和分析方法对文献进行了汇总,见图 11。由图可知,已有研究仍以中下承式 CFST 拱桥为主,且针对其横撑和主拱肋设计参数的研究较其余构件明显更多,主拱肋截面、刚度及材料的变化对结构地震响应的影响较小,主拱矢跨比对动力特性和地震响应的影响较大;横撑的形式和布设方式对 CFST 拱桥地震位移和内力响应都有明显影响,但由于不同研究选择的具体桥例不同,没有统一的结论;不同横撑的设置会改变 CFST 拱桥的刚度,特别是横向刚度,较大的刚度虽然会增强结构横向的稳定性,但一定程度上也会增大结构的地震力;吊杆形式对中下承式 CFST 拱桥面外内力和位移响应的影响较为有限,但对内响应的普遍影响较为显著;主梁连接方式会直接影响边界约束条件的设置,研究发现其对 CFST 拱桥整体地震响应的影响有限,主梁刚度和截面形式的改变对结构地震响应的影响较大,但在设计时需与其他荷载条件综合考量。

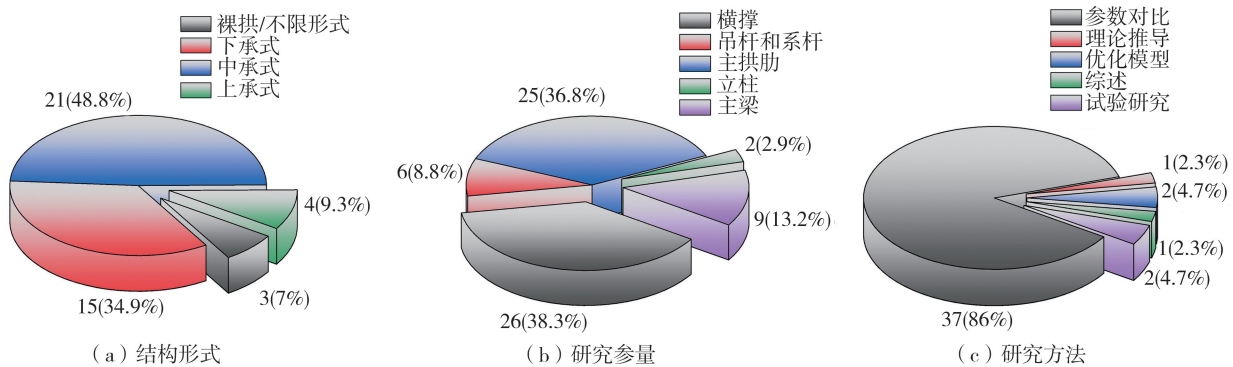


图 11 结构设计参数研究文献统计

Fig. 11 Statistics of literature on the impact of structural design parameters

3.2 研究不足与展望

1) 已有研究大多针对不同形式的 CFST 拱桥从主拱肋轴力、面内外弯矩进行讨论,响应对比指标较为单一。主拱肋地震响应最核心的特征是轴力会产生大幅变化,且存在显著的三向耦合现象,因此采用诸如 PMM(轴力-弯矩)响应面指标对主拱肋在地震作用下的压弯耦合响应规律进行刻画值得深入探讨。

2) 当前研究大多停留在对各构件的地震响应进行独立对比,而 CFST 拱桥结构体系复杂,构件众多,不同构件间的响应存在复杂的耦合关系,某一构件的失效极有可能造成其他构件地震响应特性的显著改变。

尽管已有部分学者专门针对钢箱拱桥和钢筋混凝土拱桥的拱-撑,以及拱肋-拱上立柱耦合响应问题开展了研究^[81,85],但针对 CFST 拱桥的考虑构件耦合效应的地震响应特性分析较为欠缺。

3) 结构设计参数对 CFST 拱桥地震响应特性的影响本质上是数学优化问题,即如何设计结构参数使地震响应最小。由图 11(c)可知,已有绝大多数研究采用的是参数对比分析,仅有 2 篇文献^[86-87]通过数学优化思想建立了设计优化模型。参数对比分析仅能对比预设的几种设计参数,普适性和全面性都不够。可见当前 CFST 拱桥在地震响应特性研究数量较多,关注的点也较广泛,但研究的系统性和理论性相对较为欠缺,对同类 CFST 拱桥的抗震设计缺乏普遍的参考价值。

4 CFST 拱桥震致损伤分析综述

4.1 抗震能力指标

近年来,随着基于性能的抗震设计(performance based earthquake engineering, PBEE)和抗震韧性等理念的快速发展,对结构震后损伤状态的界定与评估变得格外重要。实现损伤模式与损伤状态的界定与评估,首先需要对各构件抗震机理有深刻的认识,进而针对构件不同损伤状态确定量化的指标。CFST 拱桥结构体系复杂,其核心受力构件钢管混凝土拱肋的抗震能力指标是研究的重点,已有文献虽然针对 CFST 拱肋的专门研究相对较少,但针对 CFST 构件抗震能力的研究较为丰富,如 NAKANISHI 等^[88]、PRIESTLEY 等^[89]、陈宝春等^[90]、韩林海等^[91]、钟善桐^[92]针对 CFST 构件在压弯、压弯扭以及往复荷载作用下的力学性能进行了大量的理论分析和试验研究,研究认为:①钢管初应力状态和荷载偏心率是影响钢管混凝土构件极限承载力的两大主要因素;②提出了与试验研究吻合良好的 CFST 偏心受压构件极限承载力、稳定及约束效应等理论计算方法;③建立了 CFST 构件偏心受压状态下钢管及混凝土各自的应力-应变、荷载-挠度曲线,截面屈服失效过程等非线性行为的理论计算模型;④得到了 CFST 构件在模拟地震荷载作用下强度、刚度、延性和滞回耗能等动力性能指标的计算方法。然而,这些研究对界定和评估 CFST 拱肋的抗震能力和震致损伤状态仍有一定的欠缺。

在 CFST 拱肋抗震能力指标方面,在检索的文献中仅有 6 篇最具相关性。谢开仲等^[93]依据 CFST 拱肋截面弹塑性屈服机理,从弯矩和轴压承载力出发,提出了对应不同损伤状态的 $N-M$ 抗震性能评估曲线模型,见图 12(a)~(c)。夏修身等^[94]基于钢管和约束混凝土各自的受力曲线,以材料层面的应变和截面层次的弯矩与曲率作为钢管混凝土拱肋的地震损伤指标,给出了具体的抗震性能水准及对应的损伤描述,见图 12(d)。吕文高^[95]、谢开仲等^[96]在 Park-Ang 双重破坏准则模型^[97]基础上,根据 CFST 拱桥特殊的受力特征,提出了弦杆、腹杆、横撑及吊杆各自的双参数损伤指标。LIU 等^[98]根据上述方法以一座 CFST 拱桥为例开展了易损性研究,分析了相关损伤指标的适用性。

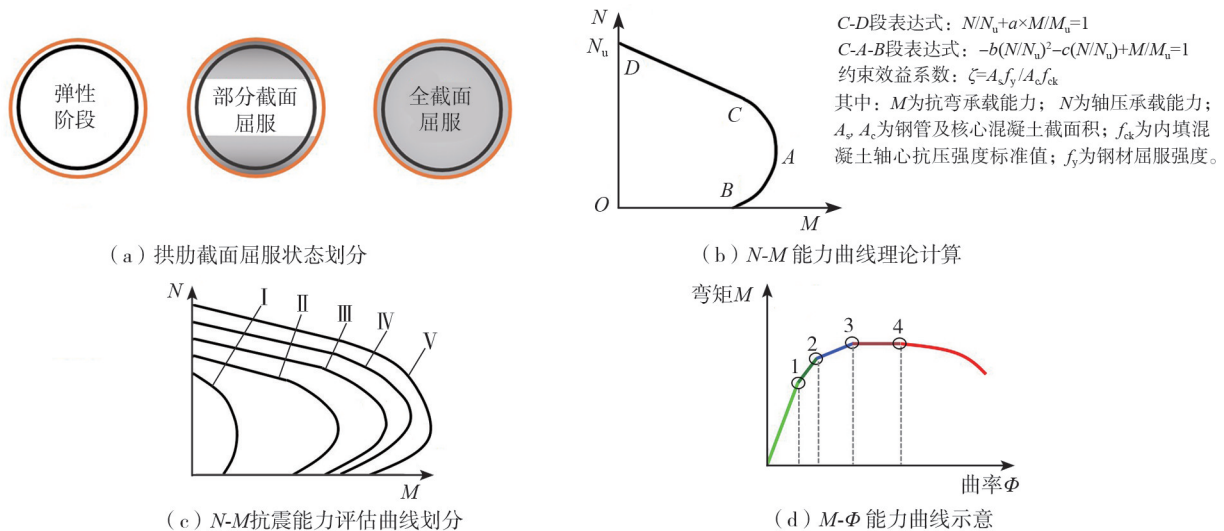


图 12 典型损伤指标示意图^[93-94]

Fig. 12 Schematic diagram of typical damage indicators^[93-94]

4.2 震致损伤分析

图 13 从结构形式、桥梁跨径和研究方法 3 个角度汇总了已有相关文献。由图可知,结构形式以中承式拱桥最多,占了近半数;桥梁跨径涵盖数米的拱肋试验模型至 600 m 的上承式拱桥;研究方法以非线性时程和易损性分析最为普遍。HUANG 等^[99]通过理论推导和试验验证,指出钢管混凝土主拱可以在一定程度上将拱脚基底剪力转化为拱圈轴力,但同时导致拱脚成为主拱圈抗震薄弱环节。张令等^[39]研究发现中承式 CFST 拱桥的损伤路径大致遵从边拱拱脚-肋间风撑-主拱拱脚,而系杆及吊杆一般不出现损伤。卓卫东等^[100]指出中承式 CFST 拱桥的钢管混凝土拱肋、吊杆和系杆安全储备较高,而交界墩和支座是地震易损构件。谢开仲等^[20,77]对 CFST 拱桥损伤和失效全过程进行了研究,指出破坏通常是损伤累积的最终结果。此外,当前研究有从易损构件和损伤分布分析开始向 CFST 拱桥结构体系整体损伤路径分析转变的趋势。该转变是因为学者们普遍认为针对 CFST 这一类复杂空间结构,当最易损构件由于累积损伤导致性能退化并退出工作后,结构整体的受力体系发生了改变,进而会在新的结构受力体系中产生新的易损构件,由此导致结构在地震作用下产生明显的损伤次序直至整体失效。

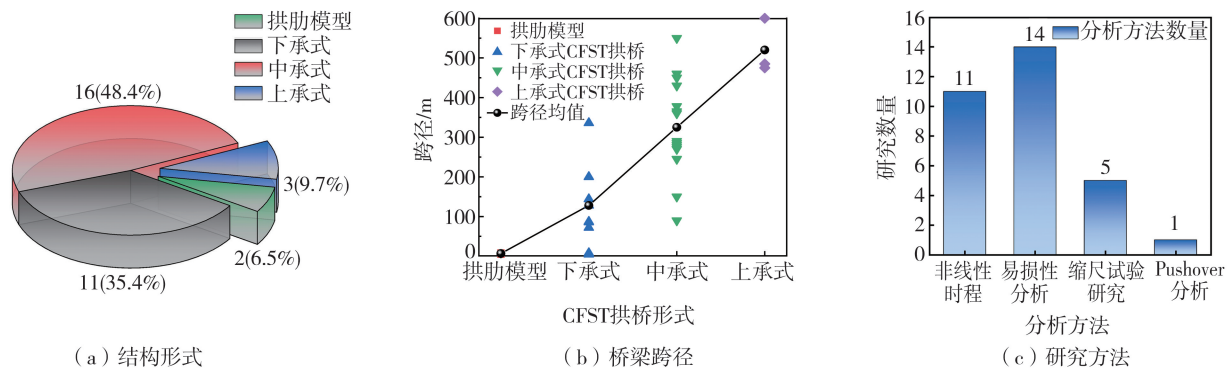


图 13 结构损伤分析文献统计

Fig. 13 Statistics of literature on the structural damage analysis

4.3 不足与展望

1) CFST 拱桥的组成构件繁多,各构件在地震作用下的受力特征和抗震能力不尽一致,因此损伤过程也有所区别。当前针对 CFST 拱桥抗震能力和损伤指标的研究主要集中在主拱圈上,针对其他构件的研究相对薄弱,且不同学者对不同损伤等级的量化和指标获取方法均有所区别。虽然部分研究以实际工程案例分析了所提指标体系和方法的有效性,但在试验验证方面仍较为缺乏。

2) 针对上承式 CFST 拱桥震致损伤的研究占比不到 10%,但其拱上建筑属于高度非规则梁桥,存在相当大的抗震风险,其抗震风险甚至高于 CFST 主拱,因此亟待开展研究。

3) 当前针对损伤分布和损伤路径的研究均难以得出普适性的结论,这与各学者研究所采用的桥例形式、跨径和分析方法,所选用的损伤评估指标,地震动输入方式及特性均有较大差异有关。因此,如何确立可靠的 CFST 拱桥抗震性能指标和普适性震致损伤分析流程,乃至更为合理通用的震致损伤评估方法是今后值得进一步深入研究的重要方向。

5 CFST 拱桥减隔震综述

5.1 减隔震研究

通过三维宏观统计分析(图 3),在 CFST 拱桥减隔震的已有研究中,装置研发仅有 JIN 等^[101]针对 CFST 拱桥中防屈曲约束支撑(buckling-restrained braced, BRB)的研发与应用开展了研究,其余文献均为减隔震装置的应用与效果分析。现有研究中针对下、中、上承式三类拱桥减隔震装置的典型应用示意图,见图 14。

以研究对象和研究内容对 31 篇减隔震研究文献进行了统计见图 15。从桥例对象来看,上承式 CFST 拱桥受到的关注最少,仅有 3 篇相关文献;从研究内容来看,基于减震理念的阻尼器和基于隔震理念的各类支座研究较多。从拱桥震害现象和研究资料来看,横撑通常是拱桥结构中最易受损的构件之一,早期 USAMI 等^[102]在钢桁拱桥中采用 BRB 替换横撑的方式取得了良好的减震控制效果,但 BRB 在 CFST 拱桥中的应用研究明显不足,其原因可能包括:①中下承式拱桥的关注重点通常在主梁位移控制与拉索减震;②上承式

CFST 拱桥跨径普遍较大,与之对应的长大型 BRB 的研发工作相对滞后;③上承式 CFST 拱桥的主拱多采用桁架结构,整体性较强,拱肋间的相对位移较小,BRB 的减震效果不一定能得到充分利用。因此,如何通过有效的设计理论确保 BRB 能有效发挥作用是非常有价值但十分欠缺的研究。此外,BRB 不仅可以替换横撑,在大跨上承式 CFST 拱桥中还可以应用于拱上立柱和交界墩等部位进行联合减震控制,因此对该问题的研究值得进一步延伸。

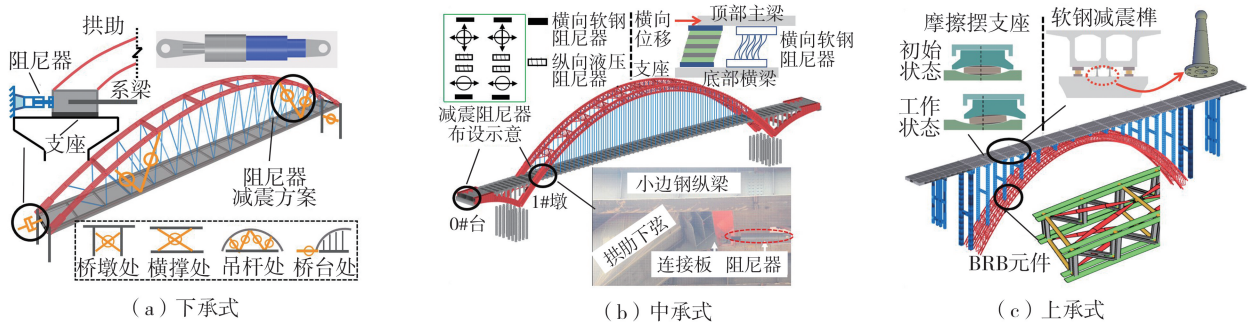


图 14 减隔震装置应用示意图

Fig. 14 Application illustration of seismic isolation devices

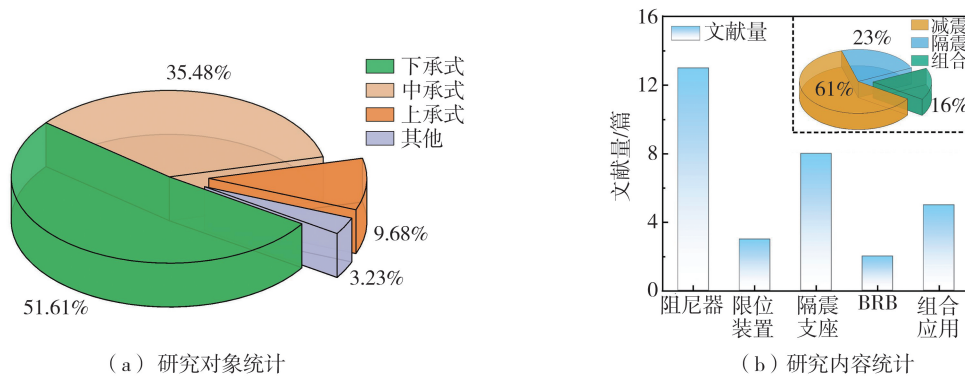


图 15 减隔震文献统计

Fig. 15 Literature statistics of research on seismic isolation

5.2 不足与待研究方向

1)减隔震措施通常对目标构件的控制效果显著,但同时会引起其余部分构件的内力或位移响应增大,如文献[103-104]通过黏滞阻尼器显著控住了某中承式 CFST 拱桥的主梁位移响应,但同时给拱顶位移和拱肋弯矩带来了不利影响,因此在减隔震设计时应当综合考量目标控制构件的减震效果和其余构件的附加响应,这在 CFST 拱桥的减隔震控制研究中非常欠缺。

2)近年来,软钢阻尼器等同时具备限位和耗能作用的装置在梁桥上的应用得到迅速发展,部分研究在应用的基础上形成了对应的理论设计方法^[105]。随着 CFST 拱桥建设数量的逐年增加,价格低廉、安装简易的软钢阻尼器在 CFST 拱桥上的应用研究是值得关注的方向。

3)CFST 拱桥各构件地震响应控制效果与减隔震装置的参数设置密切相关,文献[106-107]中分别就阻尼器与支座类型及其设计参数对结构地震响应的影响展开了研究,但未形成具有普适性的减隔震理论、减隔震装置选用原则和减隔震参数优化设计方法。

6 总结与展望

本文针对国内外在 CFST 拱桥抗震领域的相关研究,按照抗震研究的基本思路展开了系统性综述。重点从已有文献的研究内容、研究数量、研究趋势、研究对象和研究方法进行了统计分析,总结了当前研究的热点与不足,列举了各综述部分的典型研究成果。现有研究覆盖面广、分析论述详细,取得了一系列显著的进展,得出如下主要结论与展望:

1)当把本文 4 个综述方向视为按照研究深度所进行的抗震分析流程时,可以明显地发现当前研究的发

量随着研究内容的深入有明显的递减趋势。其中,模拟与分析方法中的初始内力状态、震致损伤部分的抗震能力指标和减隔震部分的装置研发等方面的发文量均为个位数,而这些内容均是 CFST 拱桥值得重点研究的方向。

2) 当前研究采用的研究手段和数据分析方法均相对单一,参数对比、结构内力/位移响应的直接对比分别是当前研究手段、数据分析中应用最多的方法,这就导致研究的论证过程缺乏系统性和应有深度,同时也导致研究结论缺乏普适性和广泛参考价值。因此,具有理论普适性的研究手段和数据分析方法是今后值得进一步深入的研究内容。

3) 随着基于 PBEE 的抗震性能设计逐渐向基于经济损失的风险评估转变,且 PBEE 本身又是作为工程结构地震风险控制及抗震韧性评估的起始环节,当获取了 CFST 拱桥抗震风险的评估结果后,如何通过减隔震措施等工程技术手段以及巨灾保险等金融技术手段形成有效的风险控制对策,可以使风险评估发挥更大价值,值得进一步开展深入研究。当前上述内容在工程抗震领域已有部分前沿性研究,但针对 CFST 拱桥的抗震风险评估仅有 2 项相关研究^[108-109]。CFST 拱桥通常是交通网络中的控制性工程,因此上述问题是今后值得开展的重要研究方向。

4) 当前以机器学习、图像识别及点云扫描为代表的数字化技术的应用与发展非常迅猛,而本文调研的所有文献中均未涉及相关数字化技术介入 CFST 拱桥抗震的研究。因此,结合数字化和智能化技术,对 CFST 拱桥抗震设计优化、减隔震合理布设、多源数据驱动的抗震分析与评估等领域开展前沿交叉研究,也是未来值得进一步发展的方向。

参考文献:

- [1] 陈乐生. 汶川地震公路震害调查-桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
CHEN Yuesheng. Report on highways' damage in the Wenchuan earthquake[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [2] KAWASHIMA K, BUCKLE I. Structural performance of bridges in the Tohoku-Oki earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(Sup. 1): 315-338.
- [3] KOSA K, SETIAWAN H, MIYAJIMA M, et al. Damage to teluk palu bridge in the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 331: 02003.
- [4] DBJ/T13-136-2011 钢管混凝土拱桥技术规程[S]. 福州: 福建省住房和城乡建设厅, 2011.
DBJ/T13-136-2011 Technical specification for concrete filled steel tube arch bridge[S]. Fuzhou: Fujian Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, 2011. (in Chinese)
- [5] GB 50923-2013 钢管混凝土拱桥技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
GB 50923-2013 Technical code for concrete-filled steel tube arch bridges[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [6] JTG/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
JTG/T D65-06-2015 Specifications for design of highway concrete-filled steel tubular arch bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [7] JTG/T 2231-01-2020 公路桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
JTG/T 2231-01-2020 Specifications for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [8] 孙潮, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥抗震研究进展[C]//中国钢协钢-混凝土组合结构分会第九次年会论文集. 福州: 福州大学土建学院, 2003, 35: 240-243.
SUN Chao, CHEN Baochun. Development of seismic analysis of concrete-filled steel tubular arch bridges[C]// Proceedings of the Ninth Annual Conference of Steel-Concrete Composite Structures Branch of China Steel Association, Fuzhou: Fuzhou University School of Civil Engineering, 2003, 35: 240-243. (in Chinese)
- [9] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016: 479-512.
CHEN Baochun. Concrete filled steel tubular arch bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2016: 479-512. (in Chinese)
- [10] 中国地震局. 大震目录[R/OL]. (2023-05-10)[2023-07-14]. <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/zqsd-lsdz/dztj/index.html>.
China Earthquake Administration. Large earthquake catalogue[R/OL]. (2023-05-10)[2023-07-14]. <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/zqsd-lsdz/dztj/index.html>. (in Chinese)
- [11] 中国地震台网. 历史查询[DB/OL]. (2023-05-10)[2023-07-14]. <http://www.ceic.ac.cn/history>.
China Seismic Network. History query [DB/OL]. (2023-05-10)[2023-07-14]. <http://www.ceic.ac.cn/history>. (in Chinese)
- [12] 李涛, 阎贵平, 李腾云, 等. 上承式大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应分析[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1): 4-8.
LI Tao, YAN Guiping, LI Tengyun, et al. Analysis of seismic response for deck and large span arch bridge concrete filled steel tube[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2005, 29(1): 4-8. (in Chinese)
- [13] 闫维明, 李晰, 陈彦江, 等. 钢管混凝土拱桥台阵试验研究: 场地条件的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 116-123.

- YAN Weiming, LI Xi, CHEN Yanjiang, et al. Shaking table research on a CFST arch bridge model: Effect of site condition[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 116–123. (in Chinese)
- [14] WANG T C, ZENG C F, RUAN Z H, et al. Shaking table test and numerical research on seismic response of a CFST arch bridge for different soil grounds[J]. *Transportation Geotechnics*, 2022, 36: 100822.
- [15] 叶丹, 周建庭, 王领, 等. 考虑河谷场地效应的大跨 CFST 拱桥地震响应分析[J]. *世界地震工程*, 2022, 38(3): 108–116.
YE Dan, ZHOU Jianting, WANG Ling, et al. Seismic response analysis of long span CFST arch bridge under valley site effect[J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38(3): 108–116. (in Chinese)
- [16] 郭晓. 岩溶地基—基础相互作用对钢管混凝土拱桥抗震的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
GUO Xiao. Influence of karst soil-foundation interaction on seismic resistance of concrete filled steel tubular arch bridges[D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese)
- [17] 王天成. 注浆砂卵石地基-拱座基础-CFST 拱桥结构体系地震响应研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
WANG Tiancheng. Seismic behavior of ground sand gravel soil-abutment-CFST arch bridge system[D]. Nanning: Guangxi University, 2022. (in Chinese)
- [18] 张波. 考虑地基与结构相互作用的上承式钢管混凝土拱桥地震响应研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
ZHANG Bo. The research on seismic response of concrete filled steel tube deck arch bridge considering foundation-structure interaction[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [19] 王克海, 李茜. 桥梁抗震的研究进展[J]. *工程力学*, 2007, 24(增刊2): 75–82, 128.
WANG Kehai, LI Qian. Research progress on seismic resistance of bridges[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(Sup. 2): 75–82, 128. (in Chinese)
- [20] 谢开仲. 大跨度钢管混凝土拱桥非线性地震反应分析与研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
XIE Kaizhong. Nonlinear analysis and research of seismic response of long-span concrete filled steel tubular arch bridges[D]. Nanning: Guangxi University, 2005. (in Chinese)
- [21] 郑家树, 金邦元. 大跨度钢管混凝土拱桥空间地震反应分析[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(1): 53–56.
ZHENG Jiashu, JIN Bangyuan. Three-dimensional seismic responses of long-span CFST arch bridge[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 38(1): 53–56. (in Chinese)
- [22] 谢开仲, 秦荣, 林海瑛. 大跨度 CFST 拱桥地震反应分析方法研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2005, 29(5): 700–703.
XIE Kaizhong, QIN Rong, LIN Haiying. On methods of seismic response analysis of long-span CFST arch bridge[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2005, 29(5): 700–703. (in Chinese)
- [23] 王建军, 谢开仲, 秦荣. 大跨度钢管混凝土提篮拱桥地震反应分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2009, 33(2): 365–368.
WANG Jianjun, XIE Kaizhong, QIN Rong. Seismic response analysis of long span X-style CFST arch bridge[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2009, 33(2): 365–368. (in Chinese)
- [24] 徐略勤, 张令, 龚浩. 大跨钢管混凝土系杆拱桥考虑桩-土作用的近断层地震响应研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(10): 63–72.
XU Lueqin, ZHANG Ling, GONG Hao. Near-fault seismic response of large-span CFST tied arch bridge considering soil-pile interaction[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(10): 63–72. (in Chinese)
- [25] 张令. 近断层地震作用下大跨钢管混凝土系杆拱桥抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
ZHANG Ling. Study on seismic performance of large-span CFST tied arch bridge subjected to near-fault ground motions[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [26] 王浩, 杨玉冬, 李爱群, 等. 土-桩-结构相互作用对大跨度 CFST 拱桥地震反应的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(3): 433–437.
WANG Hao, YANG Yudong, LI Aiqun, et al. Influences of soil-pile-structure interaction on seismic response of long span CFST arch bridge[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2005, 35(3): 433–437. (in Chinese)
- [27] 张博, 宰金珉. 考虑桩-土动力相互作用的钢管混凝土拱桥地震反应分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2007, 29(6): 23–27.
ZHANG Bo, ZAI Jinmin. Seismic response analysis of CFST arch bridge considering soil-pile dynamic interaction[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2007, 29(6): 23–27. (in Chinese)
- [28] 闫仙丽. 地震作用下钢管混凝土桁架拱桥的动力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
YAN Xianli. Research on dynamic performance of concrete-filled steel tubular trussed arch bridge under earthquake[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [29] 刘忠平, 陈克坚, 鄢勇. 铁路大跨连续梁拱组合桥地震响应研究[J]. *高速铁路技术*, 2016, 7(2): 36–41.
LIU Zhongping, CHEN Kejian, YAN Yong. Research on seismic response of railway long-span combined bridge with continuous beam and arch[J]. *High Speed Railway Technology*, 2016, 7(2): 36–41. (in Chinese)
- [30] 孙启鑫. 单承重力钢管混凝土系杆拱桥地震响应分析[D]. 西安: 长安大学, 2012.
SUN Qixin. Seismic response analysis of single loading plane CFST tied arch bridge[D]. Xi'an: Changan University, 2012. (in Chinese)
- [31] LIZ T, WANG G H, FAN J, et al. Seismic response analysis of multidimensional and multiangle long-span top-supported CFST arch bridge[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 6807916.

- [32] 郁金星. 地震动输入方式对铁路大跨系杆拱桥地震反应的影响[J]. 铁道建筑, 2014, 54(4): 24-26.
YU Jinxing. Influence of ground motion input mode on seismic response of railway long-span tied arch bridge[J]. Railway Engineering, 2014, 54(4): 24-26. (in Chinese)
- [33] 李少冲. 考虑竖向地震动和非线性的大跨度钢管混凝土拱桥地震反应分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2009.
LI Shaochong. Influences of vertical seismic and nonlinearity on seismic response analysis of long-span CFST arch bridge[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [34] ZHANG D Y, LI X, YAN W M, et al. Stochastic seismic analysis of a concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridge under tridirectional multiple excitations[J]. Engineering Structures, 2013, 52: 355-371.
- [35] BIK M, HAO H, REN W X. Seismic response of a concrete filled steel tubular arch bridge to spatially varying ground motions including local site effect[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(10): 1799-1817.
- [36] 李勇, 闫维明, 陈彦江, 等. 三跨飞燕式异型钢管混凝土拱桥地震反应及控制[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(1): 72-79.
LI Yong, YAN Weiming, CHEN Yanjiang, et al. Seismic response analysis and control of A three-span irregular flying swallow type of CFST arch bridge under seismic excitation[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(1): 72-79. (in Chinese)
- [37] XIN L F, LI X Z, ZHANG Z T, et al. Seismic behavior of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge subjected to near-fault fling-step motions[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 148-159.
- [38] 李晰, 何澜, 李倩, 等. 脉冲型地震动对CFST拱桥抗震性能的影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 731-740.
LI Xi, HE Lan, LI Qian, et al. Effect of pulse-like ground motion on seismic performance of concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 731-740. (in Chinese)
- [39] 张令, 徐略勤. 近断层地震下大跨钢管混凝土拱桥损伤模式研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 204-215.
ZHANG Ling, XU Lueqin. Damage pattern analysis of large-span CFST arch bridge under near-fault earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(3): 204-215. (in Chinese)
- [40] 邢帆, 祝兵. 近断层地震动对大跨钢管拱桥作用指标研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 190-195.
XING Fan, ZHU Bing. Seismic action assessment indicator of near-fault ground motion for long-span CFST arch bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(2): 190-195. (in Chinese)
- [41] 王立宪, 刘纪阳, 狄生奎, 等. 非一致激励下钢管混凝土拱桥平稳随机地震响应分析[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(2): 124-129.
WANG Lixian, LIU Qiyang, DI Shengkui, et al. Analysis of stationary random seismic response of arch bridge with concrete-filled steel tubes under non-uniform excitation[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(2): 124-129. (in Chinese)
- [42] 刘少天. 大跨径钢管混凝土拱桥动力特性与地震响应分析[D]. 西安: 长安大学, 2017.
LIU Shaotian. Dynamic behavior and seismic response analysis of long span CFST arch bridge[D]. Xi'an: Changan University, 2017. (in Chinese)
- [43] 陈彦江, 张德义, 李晰, 等. 空间变化地震作用下钢管混凝土拱桥的抗震分析[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 99-106.
CHEN Yanjiang, ZHANG Deyi, LI Xi, et al. Stochastic seismic analysis of a CFST arch bridge under spatially varying ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 99-106. (in Chinese)
- [44] 李勇. 钢管混凝土拱桥抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
LI Yong. Seismic behavioral study on concrete-filled steel tubular arch bridges[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [45] 丁庆灯. 基于小波分析的近场地震动模拟及工程应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
DING Qingdeng. Near-fault ground motions simulation based on wavelet analysis and its engineering application[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [46] 徐略勤, 袁茂均, 左英, 等. 近断层脉冲型地震作用下大跨拱桥动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(9): 94-104, 148.
XU Lueqin, YUAN Maojun, ZUO Ying, et al. Dynamic response analysis of long-span arch bridge under near-fault pulse seismic motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(9): 94-104, 148. (in Chinese)
- [47] MAVROEIDIS G P. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [48] 田玉基, 杨庆山, 卢明奇. 近断层脉冲型地震动的模拟方法[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 77-84, 114.
TIAN Yuji, YANG Qingshan, LU Mingqi. Simulation method of near-fault pulse-type ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 77-84, 114. (in Chinese)
- [49] 段伟峰. 钢管混凝土拱桥徐变及随机地震响应分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
DUAN Weifeng. Analysis on creep and random seismic response of concrete filled steel tube arch bridges[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)
- [50] HAN X, HAN B, XIEH B, et al. Seismic stability analysis of the large-span concrete-filled steel tube arch bridge considering the long-term effects[J]. Engineering Structures, 2022, 268: 114744.
- [51] 高明. 钢管橡胶混凝土对CFST拱桥抗震性能影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
GAO Ming. Study on seismic behavior of CFST arch bridge with steel tube filled with rubberized concrete[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [52] 范磊. 均匀锈蚀对钢管混凝土拱桥极限承载力和地震响应影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

- FAN Lei. Study on ultimate bearing capacity and seismic response of CFST arch bridge by uniform corrosion[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [53] 胡涛. 环境温度对上承式钢管混凝土拱桥自振特性的影响及地震响应分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
HU Tao. The influence of temperature on the self-vibration characteristics of CFST deck arch bridge and seismic response analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [54] GUO C, LUZ R. Effect of circumferential gap on dynamic performance of CFST arch bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 04020121.
- [55] 蒋灵翰. 结构损伤对下承式钢管混凝土系杆拱桥地震响应的影响[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(4): 197-198.
JIANG Linghan. Effect of structural damage on the seismic response of the down-bearing concrete-filled steel tube tied arch bridge[J]. China Water Transport, 2016, 16(4): 197-198. (in Chinese)
- [56] CHEND H, WANG W Z, LI Z, et al. Comparative analysis of seismic performance of 122-meter long concrete-filled steel tube arched chord truss bridge before and after reinforcement[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2020, 19(2): 90-102.
- [57] CHEND H, LI Y X, LI Z, et al. Reaction spectrum comparative analysis of seismic performance of 62 m CFST bridge with curved-string truss before and after reinforcement[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 4536365.
- [58] 谢开仲, 秦荣, 李秀梅, 等. 钢管混凝土拱桥的材料非线性地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2005, 21(3): 40-44.
XIE Kaizhong, QIN Rong, LI Xiumei, et al. Seismic response analysis of material nonlinearity of a concrete filled steel tube arch bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(3): 40-44. (in Chinese)
- [59] 李臣嵘. 钢管混凝土拱桥拱圈施工过程力学分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
LI Chenrong. Mechanical analysis of arch ring construction of concrete-filled steel tube arch bridge [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [60] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994(6): 21-27.
ZHONG Shantong. The unified theory of concrete filled steel tube (CFST) [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1994(6): 21-27. (in Chinese)
- [61] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016: 72-75.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 72-75. (in Chinese)
- [62] 徐叶琴. 大跨度钢管混凝土拱桥横向稳定性和横向抗震性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
XU Yeqin. Transversal stability and transversal seismic resistance of large span CFST arch bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [63] 胡肖强, 申哲会, 王金峰. 斜靠式钢管混凝土拱桥抗震性能分析[J]. 公路, 2011, 56(12): 59-63.
HU Xiaoqiang, SHEN Zhehui, WANG Jinfeng. Analysis of seismic performance of leaning concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Highway, 2011, 56(12): 59-63. (in Chinese)
- [64] 杜思义, 陈淮, 王宝聚. 某下承式钢管混凝土拱桥抗震分析[J]. 郑州大学学报(理学版), 2007, 39(3): 158-162.
DU Siyi, CHEN Huai, WANG Baoju. Anti-seismic analysis of a through concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2007, 39(3): 158-162. (in Chinese)
- [65] 吴乃森, 王元生, 何涛. 大跨度钢管混凝土拱桥地震响应分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(3): 30-34.
WU Naisen, WANG Yuansheng, HE Tao. Analysis of seismic response for CFST arch bridge[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2009, 30(3): 30-34. (in Chinese)
- [66] 周水兴. 钢管初应力对钢管混凝土拱桥承载力的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
ZHOU Shuixing. The study of effect on capacity of CSFT arch bridge with steel tube initial stress [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [67] 刘滔. 哑铃型钢管混凝土拱桥核心混凝土浇筑方式优化及地震响应分析[D]. 成都: 西华大学, 2019.
LIU Tao. Optimization of core concrete pouring method and seismic response analysis of dumbbell section CFST arch bridge [D]. Chengdu: Xihua University, 2019. (in Chinese)
- [68] ZHAO C H, DUAN J H, TANG C, et al. Seismic performance analysis of CFST stiff skeleton concrete arch bridge considering non-planar sectional stress induced by balanced ring-casting construction[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(1): 84-101.
- [69] 唐成. 分环分段浇筑钢管混凝土劲性骨架拱桥抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
TANG Cheng. Seismic performance analysis of CFST stiff skeleton concrete arch bridge considering balanced ring-casting construction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [70] TU B, LI Y, CAIS Y. Axial compressive behavior of concrete-encased CFST stub columns with high-level two-stage initial stresses[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(12): 04022116.
- [71] 谢开仲, 梁栋, 谢松茂, 等. 大跨度劲性骨架拱桥 Pushover 分析方法[J]. 铁道建筑, 2022, 62(9): 87-92.
XIE Kaizhong, LIANG Dong, XIE Songmao, et al. Pushover analysis method for long-span stiff skeleton arch bridge[J]. Railway Engineering, 2022, 62(9): 87-92. (in Chinese)
- [72] 韩兴. 基于已有振动台试验的钢管混凝土圆拱拱抗震性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
HAN Xing. Seismic behavior of CFST arch bridges based on existing shaking table test [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

- [73] 申现龙, 陈永祁, 刘荷, 等. Pushover 方法在钢管混凝土拱桥抗震分析中应用[J]. 振动与冲击, 2018, 37(6): 182-187, 194.
SHEN Xianlong, CHEN Yongqi, LIU He, et al. Application of the Pushover method in the seismic analysis of CFST arch bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 182-187, 194. (in Chinese)
- [74] 曾森, 高龙涛, 陈少峰, 等. 钢管混凝土拱桥多振型组合 pushover 方法可行性例证[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 80-85.
ZENG Sen, GAO Longtao, CHEN Shaofeng, et al. Example verification of the feasibility of multi-modal pushover method for concrete-filled steel tube arch bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 80-85. (in Chinese)
- [75] 王力, 虞庐松, 刘世忠, 等. 横向地震作用下异型钢管混凝土拱桥地震易损性分析[J]. 兰州交通大学学报, 2020, 39(5): 13-19.
WANG Li, YU Lusong, LIU Shizhong, et al. Seismic vulnerability analysis of irregular concrete-filled steel tube arch bridge under transverse seismic action[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, 39(5): 13-19. (in Chinese)
- [76] 刘震. 中承式钢管混凝土拱桥地震易损性分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 72-79, 88.
LIU Zhen. Analysis on seismic fragility of half-through CFST arch bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(8): 72-79, 88. (in Chinese)
- [77] 谢开仲, 秦荣, 王建军. 大跨度钢管混凝土拱桥地震反应分析[J]. 中南公路工程, 2005, 30(2): 15-19.
XIE Kaizhong, QIN Rong, WANG Jianjun. The seismic response analysis of long span CFST arch bridge[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(2): 15-19. (in Chinese)
- [78] XIONG F, KUNNATH S K, LIU H W. Seismic behavior of concrete filled steel tubular arch structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 4(1): 107-115.
- [79] YAN X L, LI Q N, GAO C, et al. Research on dynamic performance of concrete-filled steel tubular trussed arch bridge under earthquake[J]. Advanced Materials Research, 2011, 368-373: 1222-1226.
- [80] 滕乐. 大跨度钢管混凝土桁架拱桥静动力计算和拱脚外包段详细应力计算与优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
TENG Yue. Analysis of static and dynamic performance and local stress of outer-packed concrete at the bottom of arch rib of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [81] DENGK L, YAN G H, YANG H P, et al. RC arch bridge seismic performance evaluation by sectional N-M interaction and coupling effect of brace beams[J]. Engineering Structures, 2019, 183: 18-29.
- [82] 杨一维. 大跨中承钢管混凝土桁架拱桥静动力计算和拱脚详细应力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
YANG Yiwei. Analysis of static and dynamic performance of long-span half-through concrete-filled steel tubular truss arch bridge and detailed stress of its arch springer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [83] YANW M, LI Y, CHEN Y J. Seismic testing of a long-span concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Key Engineering Materials, 2010, 456: 89-102.
- [84] 李光川. 特大跨度劲性骨架钢管混凝土拱桥静动力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
LI Guangchuan. Study on static and dynamic characteristics of super long span steel tubular concrete arch bridge with stiffened frame[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [85] 徐粒寒, 徐略勤, 邓海容, 等. 地震作用下拱肋一字撑损伤模式与抗震性能评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(1): 215-227.
XU Lihan, XU Lueqin, DENG Hairong, et al. Arch rib-straight brace damage pattern and the seismic performance evaluation under earthquakes[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(1): 215-227. (in Chinese)
- [86] 杨晴. 钢管混凝土拱桥静、动力性能优化方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
YANG Qing. Optimization method research of static and dynamic performance of concrete-filled steel tubular arch bridge[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [87] 陈成. 下承式钢管混凝土刚架系杆拱桥抗震性能研究与优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
CHEN Cheng. Research and optimization of seismic behavior on through concrete-filled steel tubular rigid frame tied arch bridge[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [88] NAKANISHI K, KITADA T, NAKAI H. Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 51(3): 297-319.
- [89] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, XIAO Y, et al. Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-Part 1: Theoretical considerations and test design[J]. ACI Structural Journal 91 (5), 1994, 91(4): 394-405.
- [90] 陈宝春, 晏巧玲, 薛建阳. 钢管混凝土复合短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 82-91.
CHEN Baochun, YAN Qiaoling, XUE Jianyang. Experimental study on compressive property of concrete-filled steel tubular hybrid stub columns[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 82-91. (in Chinese)
- [91] 韩林海, 尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 9-18.
HAN Linhai, YAO Guohuang. Effect of initial stress on bearing capacity of concrete-filled steel tubular beam-columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 9-18. (in Chinese)
- [92] 钟善桐. 钢管混凝土偏心受压构件承载力计算的研究[J]. 建筑结构学报, 1985, 6(4): 21-31.
ZHONG Shantong. Research on the calculation of load bearing capacity of concrete-filled steel tubular columns under eccentric loading [J]. Journal of Building Structures, 1985, 6(4): 21-31. (in Chinese)
- [93] 谢开仲, 吕文高, 覃乐勤. 钢管混凝土拱桥拱肋抗震能力评估方法[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(4): 540-544.

- XIE Kaizhong, LV Wengao, QIN Yueqin. Seismic capacity evaluation for ribs of CFST arch bridge [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(4): 540-544. (in Chinese)
- [94] 夏修身, 杜骞, 戴胜勇. 大跨度钢管混凝土拱桥抗震性能指标研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(1): 110-116.
XIA Xiushen, DU Qian, DAI Shengyong. Seismic performance index of long-span concrete filled steel tube arch bridges [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(1): 110-116. (in Chinese)
- [95] 吕文高. 大跨度钢管混凝土拱桥抗震能力评估[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
LV Wengao. The seismic capacity evaluation of long-span concrete filled steel tubular arch bridges [D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese)
- [96] 谢开仲, 吕文高, 覃乐勤, 等. 钢管混凝土拱桥地震破坏评估研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 53-59.
XIE Kaizhong, LV Wengao, QIN Leqin, et al. Research on seismic damage evaluation of CFST arch bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 53-59. (in Chinese)
- [97] PARKY J, ANG A H. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [98] LIU Z, ZHANG Z. Fragility analysis of concrete-filled steel tube arch bridge subjected to near-fault ground motion considering the wave passage effect [J]. Smart Structures and Systems, 2017, 19(4): 415-429.
- [99] HUANG F Y, FU C, ZHUANG Y Z, et al. Experiment on seismic performance of concrete filled steel tubular arch-rib under multi-shaking-tables [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 116: 212-224.
- [100] 卓卫东, 颜全哲, 吴梅容, 等. 中承式钢管混凝土拱桥地震易损性分析[J]. 铁道学报, 2019, 41(5): 126-132.
ZHUO Weidong, YAN Quanzhe, WU Meirong, et al. Seismic fragility analysis of half-through concrete filled steel tubular arch bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 126-132. (in Chinese)
- [101] JIN S S, AI P P, ZHOU J T, et al. Seismic performance of an assembled self-centering buckling-restrained brace and its application in arch bridge structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107600.
- [102] USAMI T, LUZ H, GE H B. A seismic upgrading method for steel arch bridges using buckling-restrained braces [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34(4/5): 471-496.
- [103] 李纲. 大跨度钢管混凝土拱桥行波效应及减震分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
LI Gang. Analysis of the traveling wave effect and vibration reducing of long-span concrete-filled steel tubular arch bridges [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [104] 王浩, 周锐, 程怀宇, 等. 弹塑性钢阻尼器用于大跨度 CFST 拱桥的减震控制研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 116-121.
WANG Hao, ZHOU Rui, CHENG Huaiyu, et al. Seismic response control of a long-span CFST arch bridge with EPSDs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(12): 116-121. (in Chinese)
- [105] YUEK F, XU L Q, LIU J, et al. Seismic performance of an energy dissipating shear key for highway bridges using butterfly-shaped steel plates [J]. Engineering Structures, 2023, 295: 116885.
- [106] 邓育林, 占诗棋, 刘飞飞, 等. 地震作用下基于需求能力比的大跨度 CFST 拱桥粘滞阻尼器减震效率分析[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(6): 47-53.
DENG Yulin, ZHAN Shiqi, LIU Feifei, et al. Analysis of earthquake-reduction rate of viscous damper for long-span CFST arch bridge based on demand-capacity ratio under earthquake excitation [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(6): 47-53. (in Chinese)
- [107] 何磊. 钢管混凝土系杆拱桥地震响应分析与减隔震技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
HE Lei. Seismic performance and isolation technology analysis on CFST tied arch bridges [D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese)
- [108] 王力. 高速铁路钢管混凝土拱桥抗震性能分析及地震经济风险评估[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
WANG Li. Seismic performance analysis and seismic economic risk assessment of CFST arch bridge over high-speed railway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2018. (in Chinese)
- [109] 冯莉, 樊燕燕, 王力, 等. 基于性能的高速铁路钢管混凝土拱桥地震经济风险分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(3): 573-580.
FENG Li, FAN Yanyan, WANG Li, et al. Performance-based seismic financial risk assessment of a CFST arch bridge over high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3): 573-580. (in Chinese)