

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.03.005

格构式高墩连续梁桥 设计参数抗震适用性研究

欧智菁,王金泽,林建茂,谢铭勤

(福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350118)

摘要:以(雅西高速)干海子特大桥为工程背景,采用迈达斯(Midas Civil2017 版)有限元软件建立模型,选取墩刚度比、轴压比、柱肢截面含钢率、减隔震装置等作为关键的结构设计参数,研究 E2 地震作用下钢管混凝土格构式高墩桥梁塑性抗震性能和抗震适用性对全桥进行优化设计。结果表明,优化后的实桥模型可以大幅度降低地震响应,改善桁梁桥结构内力分布,提高结构安全可靠度,研究结果可为该类桥梁抗震设计提供技术支持,同时为钢管混凝土结构抗震规程进一步完善提供借鉴。

关键词:钢管混凝土;格构式高墩;连续桁梁桥;塑性性;抗震设计;安全可靠度

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)03-0230-06

Study on seismic applicability of design parameters of laced high-pier continuous-beam bridge

OU Zhijing, WANG Jinze, LIN Jianmao, XIE Mingqin

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The model of Ganhaizi Bridge (Yaxi Expressway) was established by using Midas (Midas Civil2017 version) finite element software. In this paper, the stiffness ratio of pier, axial compression ratio and steel content of column and limb section are selected. As the key structural design parameters. The elastic-plastic seismic performance and seismic applicability of concrete-filled steel tubular lattice truss bridge under E2 earthquake were studied to optimize the design of the whole bridge. Results show that the optimized real bridge model can greatly reduce the seismic response, improve the internal force distribution of truss bridge structure and improve the structural safety and reliability. The research results can provide technical support for the seismic design of this kind of bridge. At the same time, it provides a reference for the further improvement of seismic code of concrete-filled steel tubular structures.

Keywords: concrete-filled steel tube; latticed high piers; continuous truss bridge; elastoplasticity; seismic design; safety and reliability

钢管混凝土格构式高墩连续桁梁桥,是汇集主桁梁的轻型与格构墩的高延性性能于一体的新型桥梁结构,具有良好的抗震性能^[1]。其墩身自重小,可减小桥墩承受的地震荷载,对基础要求较

低;同时格构式桥墩通过合理设置的横撑和缀管,在地震作用下能有效地减少各构件承受的弯矩和剪力,改善整体受力性能。由于钢管混凝土桥墩的构件截面尺寸减小和混凝土减量化,减少了混

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(518781722);福州市科技项目(2018-G-64);福建工程学院科研发展基金(GY-ZI7148)

第一作者简介: 欧智菁(1975-),女,福建南平人,教授,博士,研究方向:钢管混凝土组合结构。

凝土收缩徐变;此外钢管混凝土构件具有良好的力学性能和施工简捷性,可拼装施工和缩短施工周期。因此,该桥型在我国西部山区已经推广应用,例如四川省雅西高速公路段上的干海子特大桥。

国内学者陆续对该类新型梁桥结构开展了相应的试验研究和理论分析。在试验研究方面,福州大学吴庆雄、陈宝春等以干海子大桥为研究对象,制作了两跨钢管混凝土组合桁梁-格构式墩模型,利用地震模拟振动台台阵系统,进行了该轻型桥梁的抗震性能试验^[2]。有限元理论分析方面,西南交通大学张翊等以钢管混凝土桁架梁桥地震反应为切入点,对干海子大桥第一联十一跨钢管混凝土桁架梁桥进行自振频率和振型分析^[3]。福州大学黄育凡等以干海子大桥为工程背景,开展了钢管混凝土桁梁-格构式高墩连续梁桥的非线性地震响应数值分析^[4]。

赵永飞选取干海子大桥第一联为研究对象,开展了曲线多跨钢管混凝土桁架桥地震反应特性分析研究。结果表明,曲线多跨钢管混凝土桁架梁桥与直桥相比,地震响应较为复杂;设计时应充分考虑多个方向的地震动组合以确定桥跨最不利受力状况^[5]。王海良以干海子沟特大桥为研究对象,建立有限元分析模型,进行结构增量动力分析,建立了基于联合失效概率分析法,形成了桥梁系统易损性曲线^[6]。福建工程学院欧智菁、林建茂等建立钢管混凝土格构式高墩连续桁架梁桥有限元计算模型,对直桥和弯桥弹性设计阶段结构参数的抗震适用性进行了研究,优化后的结构改善了地震作用下的内力分布,有效提高桥梁抗震性能^[7]。

综上所述,该类新型组合结构的抗震性能的研究主要集中在实桥方面,采用弹性反应谱法、线性时程法、非线性动力法等对钢管混凝土格构式高墩连续桁架梁桥开展动力性能研究,分析了该类组合桥梁非线性地震响应特征和该类组合结构破坏机理。而关于这类结构的抗震设计方面的文献目前仅针对弹性阶段的研究较为突出,为此,本文以干海子大桥为依托工程,研究 E2 地震作用下,钢管混凝土格构式连续梁桥的主要设计参数对桥梁结构抗震性能的影响规律进行分析和模拟,同时参考同类桥梁的计算结果进行对比验证,为钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的弹塑性抗震设计

提供理论支撑和借鉴。

1 有限元建模方法

1.1 工程概况

四川雅西高速干海子大桥是京昆高速控制性工程之一,同时也是一座极具代表性的桥梁——世界上第一座采用钢管混凝土的桥梁。该桥地处强震区,桥梁跨越山谷,墩高且梁长,又有纵向坡道和弯曲道路,为施工简便、减小地震作用力和降低造价,采用多跨多联形式,并采用钢管混凝土高墩(最高桥墩高 107 m)、钢管混凝土组合式桁梁的轻型结构,较钢筋混凝土连续梁桥的结构自重轻,可形成稳定性高、动力特性好、抗震能力强、使用期间变形协调的结构体系。桥梁总长 1 811 m,分为三联:第一联 40.7 m+9×44.5 m+40.7 m,第二联 45.1 m+3×44.5 m+11×62.5 m+3×44.5 m+45.1 m,第三联 45.1 m+4×44.5 m+45.1 m。

1.2 有限元建模方法

采用纤维模型法。大量的震后统计数据表明,桥梁结构的震害破坏往往出现在下部桥墩结构,而主梁在地震作用破坏过程中仍处于弹性工作状态,因此进行弹塑性时程分析计算时,上部钢管混凝土桁架梁均采用弹性单元模拟。文献[8]对变截面钢管混凝土格构柱进行拟静力试验,结果表明,格构墩柱肢钢管比缀管钢材先发生裂纹和屈服,故仅对下部钢管混凝土格构墩柱肢赋予纤维模型铰,如图 1。

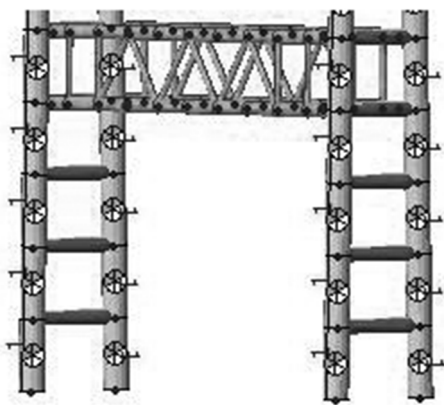


图 1 钢管混凝土格构柱肢纤维铰示意图
Fig.1 Schematic diagram of fiber hinge of CFST latticed column

钢材本构采用双折线本构模型^[9],核心约束混凝土采用 Kent&Park 本构模型^[10],可考虑钢管

对内部核心混凝土的约束效应。干海子大桥位于 8 度设防烈度区,桥址为 II 类场地,选取 El-Centro 波作为特征地震动,持续时间 53 s,时间间隔 0.02 s, E2 地震波加速度峰值为 0.26 g。标准模型如图所示,主梁跨径均为 45 m,下部墩高 50 m,桥墩柱肢纵向坡度为 1 : 50,运用 Midas civil 软件构造所做对称直线连续梁桥,全桥均采用梁单元模拟,分别采用不同的弹簧刚度值来模拟 5 墩固定支座 (GPZ-12.5GD) 和 6 墩盆式支座 (YXLZ-1000×12) 阻尼。主梁两端竖向、横向位移和绕 Y、Z 轴转动均受约束,释放纵向约束,墩底用固结形式约束所有方向的自由度。

2 主要设计参数的抗震适用性

根据文献[11]研究成果,梁墩刚度比、轴压比、墩高(长细比)和柱肢截面含钢率等是影响钢管混凝土格构式高墩连续桁梁桥弹性抗震性能的重要参数。因此,本节探讨罕遇地震(E2 地震)作用下结构的弹塑性抗震设计时,仍选择上述主要设计参数,研究其抗震适用性。

2.1 梁墩刚度比

梁墩刚度比对桥梁结构的抗震性能影响很大,本节通过调整格构墩高(18.5~92 m)来改变梁墩刚度比值(2.2~17.2),计算方法如式 1 所示,其余参数与标准模型一致。

$$R_1 = \frac{2E_G I_G H_i^3}{L^3 \left(\sum_{i=1}^2 E_p I_p \right)}$$

(1)

式(1)中: $E_G I_G$ 为主梁纵向抗弯刚度; L 为全桥长度; $E_p I_p$ 为桥墩抗弯刚度; H_i 为第 i 个桥墩的墩高。

E2 地震作用下,固定墩墩顶截面仍然为主梁弯矩最大值,桥墩弯矩与轴力控制截面在固定墩墩底,不同梁墩刚度比值参数下的桥墩控制截面指标峰值见表 1,各指标变化曲线见图 2~5 所示。由表 1 和图 2 可知,随着梁墩刚度比 R_1 的增大,格构墩弯矩与极限弯矩之比(M / M_u)和位移率 Δ / H 均逐渐减小,控制截面弯矩 - 曲率曲线斜率逐渐变大,弯矩峰值有不同程度增加,刚度退化下降幅值变缓,曲率延性系数 μ_φ 有小幅提升。当 R_1 由 2.2 增大到 17.2 时,曲率延性系数 μ_φ 增大 16.9%。分析上述规律,主要是因为随着墩高的增加,梁墩刚度比值 R_1 增大,格构墩越柔,耗散地震能量越多,使

得结构的地震响应值减小,后期非线性变形能力提高,结构延性越好。根据《公路钢管混凝土桥梁设计与施工指南》^[12] 规定:桥墩位移率 Δ / H 不得大于 1/50。综合考虑各指标影响,建议实桥工程中梁墩刚度比值在 $7.2 \leq R_1 \leq 17.2$ 范围,有利于提高桥墩的延性性能。

表 1 不同梁墩刚度比结果对比
Tab.1 Result comparison of the stiffness ratios of different R1

梁墩 刚度比 R_1	桥墩弯 矩 $M /$ (kN · m)	极限弯 矩 $M_u /$ (kN · m)	弯矩比 M / M_u	桥墩位 移 $\Delta /$ mm	位移率 Δ / H	曲率延 性系数 μ_φ
2.2	2 265	2 063	1.10	489	1/25	6.92
3.2	1 985	2 037	0.97	534	1/53	6.87
5.2	1 185	2 133	0.56	632	1/59	7.04
7.2	981	2 255	0.44	687	1/64	7.39
9.2	959	2 240	0.43	750	1/67	7.49
11.2	735	2 358	0.31	766	1/73	8.00
13.2	687	2 383	0.29	785	1/78	8.31
15.2	611	2 393	0.26	810	1/81	8.46
17.2	532	2 365	0.22	888	1/80	8.09

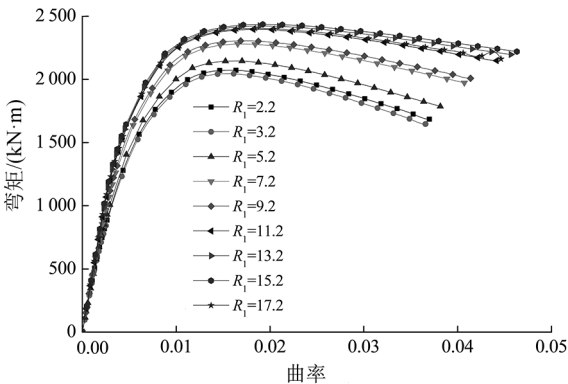


图 2 控制截面弯矩-曲率曲线
Fig.2 Moment-curvature curve of control section

2.2 轴压比

通过改变上部结构恒载,将轴压比(n)分别设为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 和 0.35,其余参数与标准模型一致。在 E2 地震荷载作用下,不同轴压比值的地震响应峰值及曲线图见表 2 和图 3。

表 2 不同轴压比的计算结果对比

Tab.2 Comparison of calculation results of different axial compression ratios

轴压比	桥墩弯矩 M / (kN · m)	极限弯矩 M_u / (kN · m)	弯矩比 M/M_u	桥墩位移 Δ / mm	位移率 Δ/H	曲率延性系数 μ_φ
0.10	947	2 395	0.40	650	1/77	8.48
0.15	959	2 240	0.43	750	1/67	7.49
0.20	957	2 209	0.43	836	1/60	7.20
0.25	1 000	1 774	0.56	961	1/52	6.78
0.30	1 041	—	—	1 338	1/37	—
0.35	1 316	—	—	1 381	1/36	—

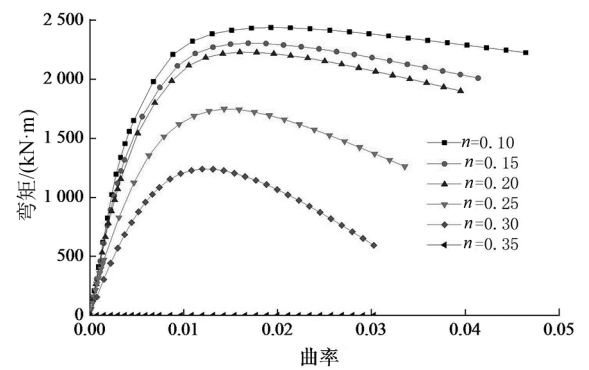


图 3 桥墩截面弯矩-曲率曲线

Fig.3 Moment curvature curve of the pier section

由表 2 可知,轴压比是影响罕遇地震作用下结构内部分布的重要参数。当轴压比 n 从 0.1 增大到 0.25 时,极限弯矩 M_u 降低了 25.9%;格构墩弯矩值 M 和弯矩比 M/M_u 分别增大了 5.6% 和 40%;墩顶位移变形量 Δ 和位移率 Δ/H 增大了 47.8%。当轴压比值大于 0.25 时,位移率为 1/52~1/35,均超出抗震设计规范 1/50 容许限值。

由图 3 可以看出,当轴压比 $n \leq 0.2$ 时,控制截面弯矩-曲率曲线较为接近;当 $n > 0.2$ 后,曲线斜率和弯矩峰值明显减小,刚度退化率急剧增加。结合表 2 可知,钢管混凝土格构墩的延性受轴压比影响很大,当 n 从 0.1 增大到 0.25 时,桥墩控制截面的曲率延性系数 μ_φ 降低了 20.0%。分析其原因,主要是因为随着轴压比的增大,地震力加强,桥墩弯矩和轴力响应增大,在一定程度上限值了格构墩的水平位移和变形,从而降低了桥墩的延性。因此同类桥梁工程设计中,应严格控制轴

压比值的大小(0.1~0.2 较为适宜),以满足结构安全使用性能。

2.3 柱肢截面含钢率

在顺桥向 E2 地震作用下,不同柱肢截面含钢率的桥型地震响应峰值及各个指标数值列于表 3,变化曲线如图 4 所示。

表 3 不同含钢率的计算结果对比

Tab.3 Comparison of calculation results of different steel content ratios

含钢率/%	桥墩弯矩 M / (kN · m)	极限弯矩 M_u / (kN · m)	弯矩比 M/M_u	桥墩位移 Δ / mm	位移率 Δ/H	曲率延性系数 μ_φ
4	799	2 402	0.33	782	1/64	8.62
7	959	2 240	0.43	750	1/67	7.49
11	1 176	2 177	0.54	666	1/75	7.12
15	1 360	2 010	0.68	662	1/76	6.85
19	1 560	1 780	0.88	647	1/77	6.77

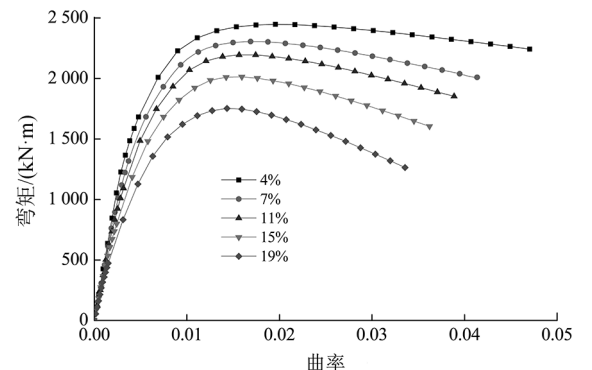


图 4 控制截面弯矩-曲率曲线

Fig.4 Moment curvature curve of the control section

2.4 减隔震装置

鉴于钢管混凝土格构式高墩连续梁桥结构周期长,选择橡胶支座+粘滞阻尼器装置。为了探究减隔震装置对该新型梁桥结构体系的影响规律,分别在不同的梁墩刚度比值和设防烈度等级双参数下做地震响应对比分析。引入隔震率概念来评价隔震效果,其计算公式如式(2)^[13],隔震率计算结果对比曲线见图 5。

隔震率 =
$$\frac{\text{无隔震结构反应值} - \text{隔震结构反应值}}{\text{无隔震结构反应值}} \times 100\%$$
 (2)

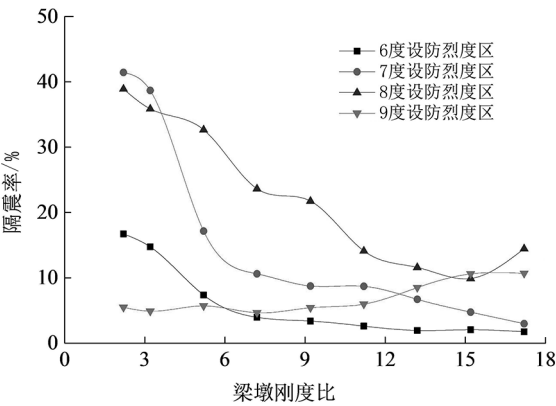


图 5 曲率延性系数 μ_{φ} 隔震率

Fig.5 Curvature ductility coefficient μ_{φ} isolation rate

由图 5 可知,设置减隔震装置后,曲率延性系数的隔震率在 1.7%~41.4%之间变化。在抗震设防烈度为 6 度、7 度和 8 度时,梁墩刚度比值 R_1 越小,曲率延性系数 μ_{φ} 隔震率越大,隔震效果越明显;当设防烈度为 9 度区时,梁墩刚度比越大,隔震效果越好。

3 抗震设计优化实例验证

采用延性抗震设计理念,对标准模型进行优化设计,参数见表 4。

表 4 优化模型与标准模型参数对比
Tab.4 Comparison of parameters between the optimized model and the standard model

模型	梁墩刚度比 R_1	轴压比	柱肢截面含钢率/%	减隔震装备
标准	9.2	0.15	7	无
优化	10.1	0.10	4	有

在罕遇地震作用下,模型优化前后结构的梁墩控制截面响应峰值对比结果见表 5 和图 6-8。

表 5 优化前后各指标响应峰值对比结果
Tab.5 Comparison results of response peaks for each index before and after optimization

模型	桥墩弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	桥墩轴力/kN	桥墩位移/mm	延性系数比
标准	959	13 126	750	7.49
优化	734	7 965	504	10.42

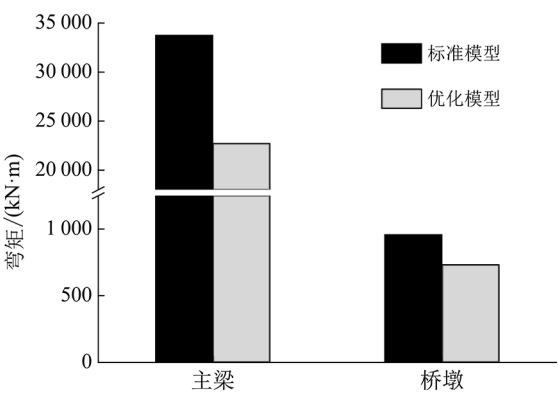


图 6 优化前后梁、墩弯矩值对比

Fig.6 Comparison of bending moment of beam and pier before and after optimization

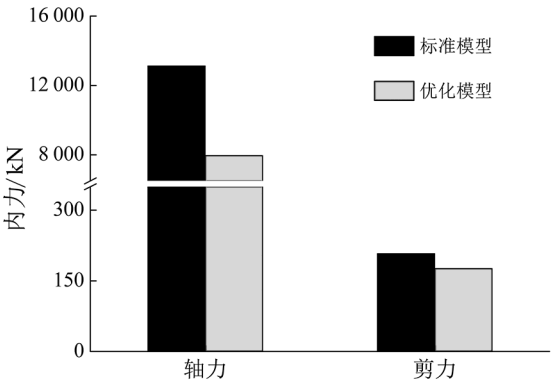


图 7 优化前后桥墩轴力、剪力对比

Fig.7 Comparison of axial force and shear force before and after optimization

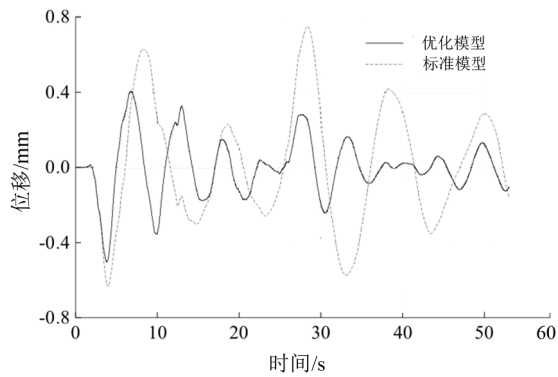


图 8 优化前后桥墩位移时程对比

Fig.8 Time history comparison of the piers' displacement before and after optimization

由表 5 和图 6 可看出,在 E2 地震作用下,优化后的实桥结构上部主梁弯矩值减小了 32.7%;格构墩控制截面的弯矩、轴力和剪力值分别减小

了23.5%、39.3%、15.4%和32.5%;格构墩控制截面的曲率延性系数值提高了39.1%。由此可知,优化后的实桥结构可显著降低结构的地震响应值,改善桥墩的延性性能。

4 结论

1)梁墩刚度比值、轴压比和柱肢截面含钢率是影响钢管混凝土格构式高墩连续桁梁桥弹塑性抗震性能的重要参数。随着梁墩刚度比的增大、轴压比和含钢率的减小,钢管混凝土格构墩的延性逐渐提高,抗震性能越好。

2)不同设防烈度下,减隔震支座对格构墩的隔震效果有一定差异。抗震设防烈度为6度~8

度时,梁墩刚度比值 R_1 越小,曲率延性系数 μ_e 的隔震率越大,隔震效果越明显;设防烈度为9度时,梁墩刚度比越大,隔震效果越好。

3)建议钢管混凝土格构式高墩连续桁梁桥结构设计时,梁墩刚度比选择7.2~17.2之间;轴压比控制在0.1~0.2范围内;柱肢截面含钢率选择在4%~11%较为合理。

4)根据本文建议的设计参数取值范围,对钢管混凝土格构式高墩连续桁梁桥进行抗震优化设计,优化后的计算模型与实桥相比,可有效降低罕遇地震作用下的响应值,改善内力分布,从而有效提升结构整体抗震性能。

参考文献:

- [1] 韩林海,陶忠,刘威. 钢管混凝土结构—理论与实践[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001(6): 24-34.
- [2] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 89-96.
- [3] 张翊. 钢管混凝土桁架梁桥地震反应分析[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [4] 黄育凡. 钢管混凝土组合桁式梁-格构式高墩连续梁桥非线性地震性能研究[D]. 福州:福州大学, 2011.
- [5] 赵永飞. 曲线多跨钢管混凝土桁架梁桥地震反应特性分析研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
- [6] 王海良,张铎,王剑,等. 基于IDA的钢管混凝土空间组合桁架连续梁桥抗震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(2): 76-86.
- [7] 欧智菁,陈盛富. 等截面钢管混凝土格构柱骨架曲线统一算法研究[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(2): 91-10.
- [8] 欧智菁,陈盛富,吴庆雄,等. 变截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(3): 77-83.
- [9] 陈永健. 考虑约束作用的圆钢管钢骨混凝土柱本构关系及承载能力研究[D]. 南京:东南大学, 2004.
- [10] 文捷. 钢筋混凝土及钢管混凝土材料阻尼研究[D]. 北京:北京交通大学, 2006.
- [11] 林建茂,欧智菁,林上顺,等. 钢管混凝土格构式梁桥设计参数抗震研究[J]. 福建工程学院学报, 2017, 15(6): 549-554.
- [12] 赵毅峰. 公路钢管混凝土桥梁设计与施工指南研究[M]. 四川科技年鉴. 成都:四川省人民出版社, 2009: 271.
- [13] 孙颖,陈天海,卓卫东,等. 长周期地震作用下隔震连续梁桥地震反应特性研究[J]. 工程力学, 2016, 31(S1): 244-250.

(责任编辑:陈雯)