

王德俊. 不规则公路桥梁地震动参数快速评估技术研究[J]. 华南地震, 2019, 39 (3): 89–94. [WANG Dejun. Research on Rapid Evaluation Technology of Seismic Motion Parameters of Irregular Highway Bridges[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 89–94]

不规则公路桥梁地震动参数快速评估技术研究

王德俊

(驻马店路通工程监理咨询有限公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 快速评估不规则公路桥梁的地震动参数为桥梁地震响应分析、桥梁安全性设计提供科学依据。研究一种快速、有效的不规则公路桥梁地震动参数评估技术, 以 C 形不规则公路桥梁为原型设计振动台与公路桥梁模型, 选取 Imperial Valley 波作为地震动输入, 采用加速度传感器、位移传感器采集桥梁加速度与位移数据; 结合已知地震动数据计算地震动持续时长参数, 优化衰减模型获取精确的地表峰值加速度参数。分析地表峰值加速度与其他地震动参数关系可知, 地表峰值加速度与损坏概率成正比, 桥梁结构发生损坏的概率在 50% 以下; 震级越大、震中距越小、地表峰值加速度越大。

关键词: 不规则; 公路桥梁; 地震动; 加速度; 衰减模型; 参数; 评估

中图分类号: U452.2+ 8

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0089-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.013

Research on Rapid Evaluation Technology of Seismic Motion Parameters of Irregular Highway Bridges

WANG Dejun

(Zhumadian Lutong Engineering Supervision Consulting Co., Ltd., Zhumadian 463000, China)

Abstract: Rapid evaluation of seismic parameters of irregular highway bridges provides scientific basis for bridge seismic response analysis and bridge safety design. A fast and effective technique for evaluating seismic parameters of irregular highway bridges is studied. Shaking table and highway bridge model are designed with C-shaped irregular highway bridges as prototype. Imperial Valley wave is selected as seismic input. Acceleration and displacement sensors are used to collect acceleration and displacement data of bridges, and the duration parameters of seismic ground motion are calculated with known seismic data. Optimize the attenuation model to obtain the precise peak acceleration parameters. The relationship between peak ground acceleration and other ground motion parameters shows that peak ground acceleration is proportional to the probability of damage, and the probability of bridge structure damage is less than 50%. The larger the magnitude, the smaller the epicenter

收稿日期: 2018-07-19

作者简介: 王德俊(1966–), 男, 高级工程师, 主要从事公路、桥梁、隧道施工及监理工作。

E-mail: wangdejun2399@163.com.

distance and the larger the peak ground acceleration.

Keywords: Irregular; Highway and bridge; Ground motion; Acceleration; Attenuation model; Parameters; Evaluation

0 引言

大跨度、轻质、高强度是公路桥梁的特点与性能要求,大跨度桥梁受地震动的影响相对敏感^[1-2]。公路桥梁根据形状可分为直线规则的桥梁、曲线不规则桥梁,研究不规则公路桥梁的地震动参数为掌握不规则公路桥梁抗震性能、评估桥梁地震损坏程度提供有效依据^[3-4]。公路桥梁发生地震时,描述地震动的参数较多,如震源深度、地震波传播速度、地表峰值加速度、地震场地参数、地震持续时长等等^[5-6],文章选取地表峰值加速度与地震持续时长作为地震动参数,进行快速评估。文章以 C 形不规则公路桥梁为原型,构建地震动模型,并设置地震波输入;采用位移传感器、加速度传感器采集地震动相关数据,快速计算不规则公路桥梁地震动的地表峰值加速度与地震持续时长两种参数。采用本文技术快速获取的地表峰值加速度研究不规则公路桥梁地震动过程中的规律,为桥梁地震响应、桥梁设计提供有效依据。

1 C 形不规则公路桥梁地震动参数快速评估

1.1 C 形不规则公路桥梁地震模拟

1.1.1 振动台与公路桥梁模型设计

构建 C 形不规则公路桥梁振动台,表 1 为振动台参数。由于 C 形不规则公路桥梁在模拟振动台约束尺寸之外,设计地震模拟振动台扩展系统实现非一致激励,达到有效评估公路桥梁地震动参数评估的效果^[7]。原振动台、扩展连接装置、扩展台是扩展系统的主要构成。

表 1 振动台设备性能参数

Table 1 Performance parameters of shaking table equipment

参数名称	数值
台面尺寸	2.0 m×2.2 m
激励方式	单向激励
加速度上限	27.7 cm/s ²
速度上限	100 cm/s
频率	0.1~30 Hz

将 C 形不规则曲线桥梁作为公路桥梁模型的原型,公路桥梁墩边分别是 24 m、29 m,每跨跨度是 32 m,为边墩安置抗扭支座,为中墩安置不可移动的铰支座。桥梁公路实验模型的墩高分别是 1.4、1.60、1.60, 1/20 为几何相似比, 1.5+1.5 为公路桥梁的跨径。构建公路桥梁实验模型见图 1,公路桥梁截面与墩截面尺寸见图 2。

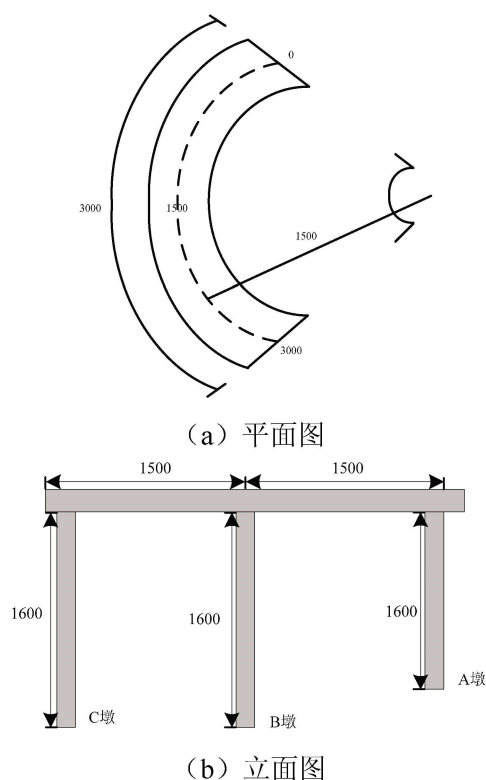


图 1 C 形不规则公路桥梁结构/mm

Fig.1 C-shaped irregular highway bridge structure/mm

陶砂微粒混凝土是桥梁模型主料,HRB335 钢筋是桥梁的主筋。以动力相似理论为依托,设置 $S_g=1$ 为实验模型重力加速度相似系数, 2412115 kg 是公路桥梁结构的原型质量, 429.7 kg 是模型的质量, 1350 kg 是人工质量, 2.5 是模型加速度相似比。

1.1.2 地震波选取

实验选取 Imperial Valley 波作为地震动输入,该地震波峰值是 0.1822 g, Imperial Valley 波的加载波时程与频谱排列情况见图 3。

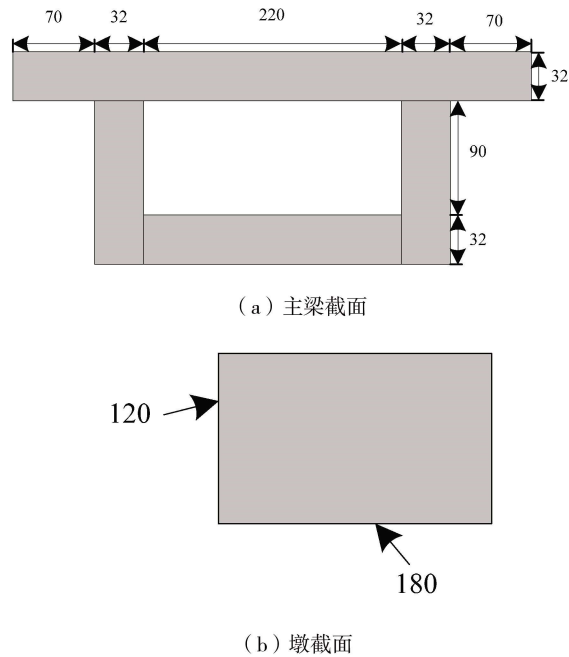


图 2 C 形公路桥梁的梁与墩截面尺寸/mm
Fig.2 Cross-sectional dimensions of beams and piers of C-shaped Highway Bridges/mm

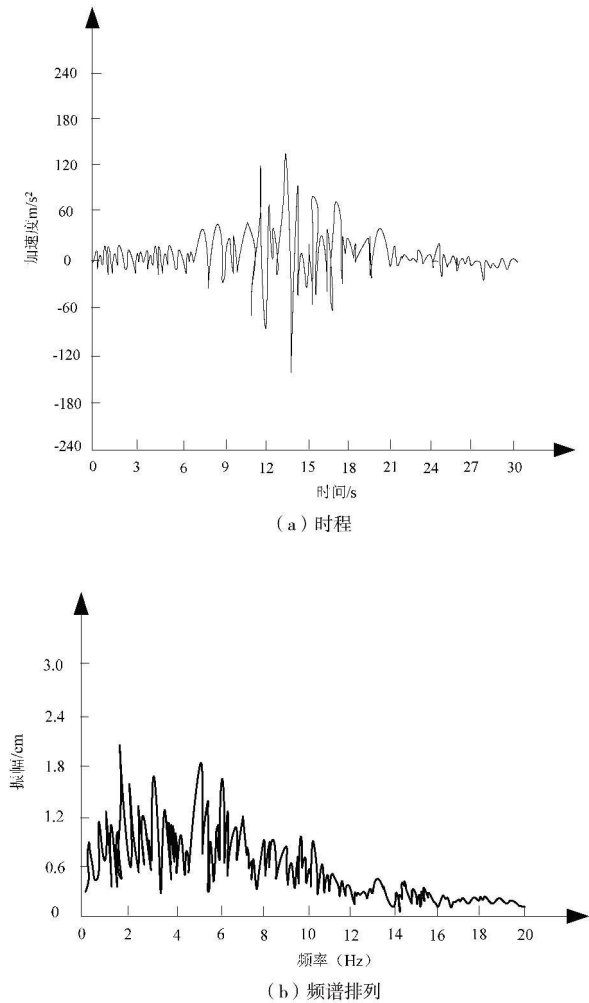


图 3 地震动输入加载波时程与频谱排列
Fig.3 Time history and frequency spectrum of input wave of ground motion

1.1.3 测量点布置

为构建完成的公路桥梁模型安装传感器测量地震动计算所需的各项参数，纵桥向加速度与位移传感器安装在振动台台面上，横桥向加速度与位移传感器安装在桥梁墩顶^[8]。将位移传感器分别安装在 A 墩、C 墩顶主梁横桥向和 B 墩顶主梁纵桥向；将加速度传感器安装在 A 墩基础承台，同时为不同墩底安装纵桥向与横桥向加速度传感器；另外，在 A 墩顶部主梁纵桥向、不同跨中横桥向与纵桥向、C 墩顶主桥梁横桥向分别安装一个加速度传感器。加速度传感器与位移传感器设计如下：

(1) 加速度传感器设计。将 ADI 公司的 ADXL202 生产的双轴加速度传感器作为不规则公路桥梁地震动加速度传感器，具有价格低廉、能耗小、功能全面的优势， ± 2 是该加速度计的测量区间^[9-10]。ADXL202 具备获取振动加速度与重力加速度的功能，可用于动态与静态加速度的测量^[11]。以滤波电容为中介在 0.01 Hz~5 kHz 区间设置 ADXL202 加速度计的频率响应范围。500 为 ADXL202 加速度计的噪声值，100 Hz 带宽下的分辨率约是 6 mg。利用 0.047 μ f 的电容设置加速度传感器的频率相应区间，令加速度传感器动态区间高于 60 dB，符合精准测量功率桥梁加速度变化的标准。

(2) 位移传感器设计。研究采用的位移传感器基于电位器传感进行设计。电位器本质上是一种机电传感器件，可转换位移非电量为与其存在函数关系的电阻值变化，形成输出电压变化^[12-13]。同轴安装的转盘、盘簧、电位计是直线式位移传感器的主要结构，详见图 4。

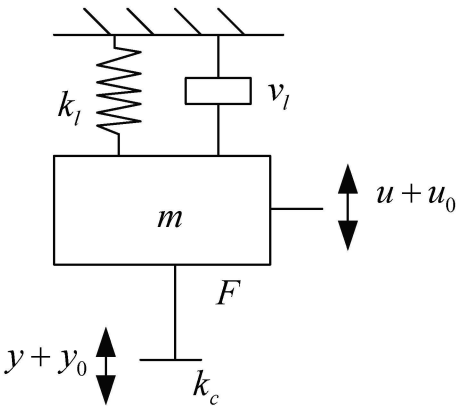


图 4 直线式位移测量传感器原理
Fig.4 Principle of linear displacement sensor

图 4 中, m 和 k_l 分别表示运动质量与拉簧刚度; v_l 与 k 分别是阻尼系数与拉丝的拉伸刚度; v 、 v_0 、 y 分别表示拉丝的阻尼系数、拉簧的预拉变形、被测物体的初始坐标; u 、 y_0 、 F 表示质量的运动位移、被测物体的位移以及拉丝中的拉力; 基于上述参数构建直线式位移测量传感器的运动方程如下:

$$\begin{cases} ms^2u + v_lsu + k_l(u + u_0) - F = 0 \\ F = k[(y + y_0) - (u + u_0)] + vs(y - u) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 地震动参数计算与评估

根据文章构建的不规则公路桥梁地震动模型, 得到加速度、位移等参数, 结合已知的地震动数据进行地震动参数快速评估, 本文评估的参数分别为地震动持续时长与地表峰值加速度。

1.2.1 地震动持续时长评估

采用以下公式计算不规则公路桥梁地震动持续时长:

$$LgG = \gamma_1 + \gamma_2M + \gamma_3Lg(R + R_0) \quad (2)$$

其中, G 表示地震动持续时长参数, 如 T_s , T_s 表示峰值平稳段持续时长; M 、 R 分别表示震级、震中距; γ_1 、 γ_2 、 γ_3 表示衰减系数。

1.2.2 地表峰值加速度计算

地表峰值加速度常作为地震动参数使用, 采用衰减模型计算不规则公路桥梁结构的地表峰值加速度, 计算公式如下:

$$\ln(y_{ij}) = aM_{wi} + bX_{i,j} = \ln(r_{i,j}) + e(h - h_c)\lambda_h + W_R + Q_l + Q_s + Q_{sl}\ln(x_{i,j}) + E_K + \zeta_{ij} + \theta_i \quad (3)$$

$$r_{i,j} = x_{i,j} + c \exp(dM_{ij}) \quad (4)$$

其中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别表示常数, 其他参数定义如表 2 所示。

采用近年来某省地震台站测量的权威数据优化衰减模型, 以获取准确的桥梁地表峰值加速度参数^[14-15], 方法为: 比较某省地震台测量的实际地表峰值加速度与采用衰减模型计算的地表峰值加速度, 得到两种结果随断层距的对数残差排列结果, 基于线性回归获取对数残差排列线性方程如下:

$$y = 0.001242x - 0.059721 \quad (5)$$

其中, 参数含义与表 2 一致。结合公式 (3) 和 (5) 获取精准的不规则公路桥梁地震动衰减模型如下:

$$y_{i,j} = \exp \left[\begin{aligned} & aM_{wi} + bX_{i,j} - \ln(r_{i,j}) + e(h - h_c)\lambda_h \\ & + W_R + Q_l + Q_s + Q_{sl}\ln(x_{i,j}) + E_K + \zeta_{ij} + \theta_i \end{aligned} \right] + 0.001242x - 0.059721 \quad (6)$$

表 2 衰减模型公式参数解释

Table 2 Explanation of formula parameters for attenuation model

参数代码	参数含义
$y(gal)$	水平方向几何地表峰值加速度均值
M_w	矩震级
X	断层距
h	震源深度
γh	震源正度优化项
W_R	潜没断层数据
Q_l	边缘接合数据
Q_s	俯冲板块数据
Q_{sl}	考虑地震传播路径的优化项
E_K	场地类型数据
ζ_{ij}	地震内部误差
θ_i	地震间误差

2 实验分析

根据文章构建的不规则公路桥梁地震动模型, 进行地震动参数快速评估测试, 验证本文技术快速获取地震动参数的性能与优势。

2.1 加速度传感器与位移传感器数据采集误差分析

速度与位移传感器采集数据不规则公路桥梁地震动加速度与位移的精确度影响地震动参数计算结果, 所以对两种传感器测量误差进行测试。加速度传感器误差在 0.5 以下符合测量标准, 位移传感器测量误差在 3 cm 以下为符合测量标准。实验为桥梁模型施加 8 种振动加速度、8 种重力加速度、8 种位移变化, 分别以 1~8 进行编号, 与本文技术测量结果进行对比, 测量误差结果如下。

表 3 中, 本文技术测量的振动加速度在 0.11~0.15 m/s^2 之间, 重力加速度在 0.08~1.02 m/s^2 之间, 位移测量误差最大仅为 1.2 cm, 三种测量指标均符合该高精度测量标准, 因此本文技术测得的加速度和位移数据精准、可靠, 可作为有效数据使用, 为快速评估不规则公路桥梁地震动参数提供可靠的数据基础。

表 3 本文技术测量加速度与位移误差
Table 3 Acceleration and displacement errors measured by this technique

编号	振动加速度/(m/s ²)	重力加速度/(m/s ²)	位移/cm
1	0.12	0.08	1.1
2	0.11	0.09	1.2
3	0.12	1.01	0.8
4	0.13	0.09	1.1
5	0.13	0.09	1.1
6	0.15	0.09	0.9
7	0.14	1.02	0.9
8	0.15	0.09	1.0

2.2 地表峰值加速度与结构破坏概率的关系

不规则公路桥梁结构破坏程度分为轻微破坏、中度损坏、严重破坏、完全破坏四种，公式 (7)~(10)为桥梁结构发生不同程度破坏概率计算方法：

$$F(x_1) = \Psi \left[\frac{\ln(x/0.712)}{0.914} \right] \quad (7)$$

$$F(x_2) = \Psi \left[\frac{\ln(x/0.764)}{1.111} \right] \quad (8)$$

$$F(x_3) = \Psi \left[\frac{\ln(x/1.124)}{0.764} \right] \quad (9)$$

$$F(x_4) = \Psi \left[\frac{\ln(x/1.211)}{0.899} \right] \quad (10)$$

其中， $\Phi(x)$ 是标准正态分布函数。

公路桥梁某点地表峰值加速度为已知的情况下，根据上述方法得到各种程度结构破坏概率，绘制地表峰值加速度与结构破坏概率的关系曲线，如图 5 所示。

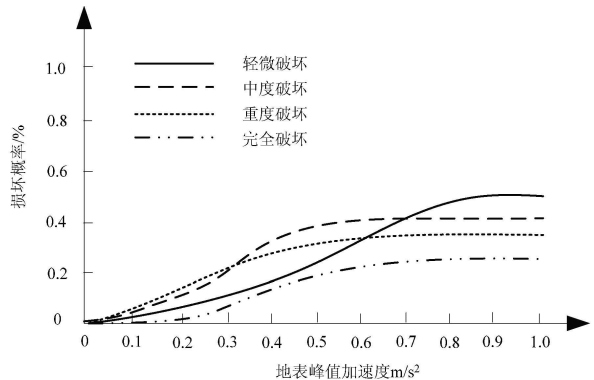


图 5 地表峰值加速度与结构破坏概率的关系曲线

Fig.5 Relation curve of peak acceleration of surface and structural failure probability

分析图 5 可知，不规则公路桥梁地表峰值加速度与损坏概率成正比，地表峰值加速度越大、损坏概率越大；当地表峰值加速度约为 0.1 m/s² 时，出现轻微破坏、中度破坏与重度破坏，当地表峰值加速度约为 0.2 m/s² 时，出现完全破坏。地表峰值加速度达到 1.0 m/s² 时，桥梁结构发生损坏的概率在 50%以下。

2.3 震级和震中距对地表峰值加速度的影响分析

在公路桥梁结构中设置 P、O、Q 三点，测试震级和震中对地表峰值加速度的影响，测试结果如图 6 所示。

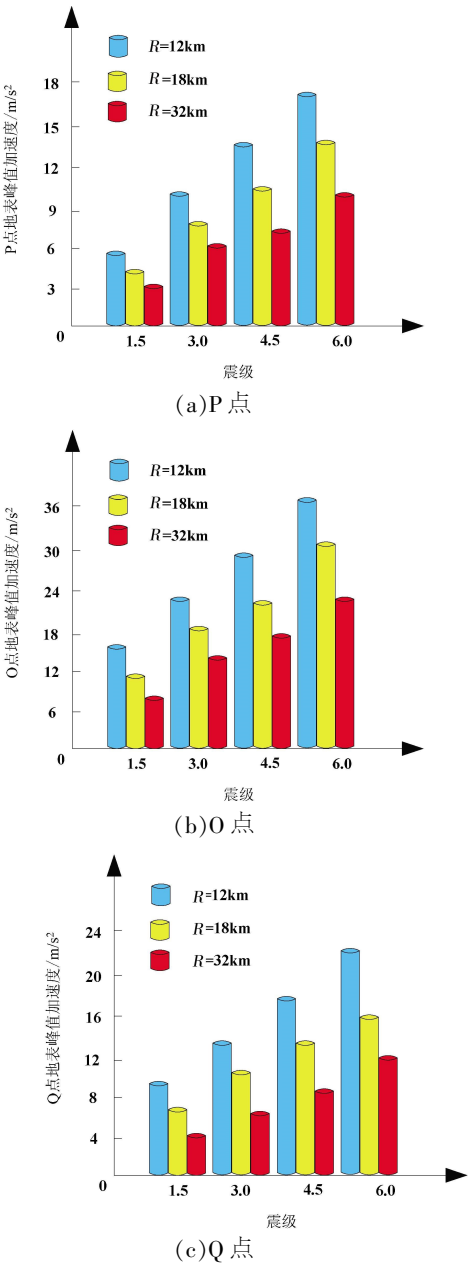


图 6 震级和震中距对地表峰值加速度的影响

Fig.6 The influence of magnitude and epicenter distance on peak ground acceleration

分析图 6 可知,在不规则公路桥梁结构的 P、O、Q 三点中,震级越大、地表峰值加速度越大,震中距越小、地表峰值加速度越大。因此,评估不规则公路桥梁地震损坏程度时,可基于地表峰值加速度与震级、震中距的关系,准确判断桥梁结构的受灾程度。

3 结语

本文通过构建 C 形不规则公路桥梁振动模型进行地震动参数快速评估获取,主要展示地表峰值加速度与地震波持续时长两种参数的获取过程。本文技术快速评估得到的峰值加速度参数精度较高,是因为采用优秀的衰减模型计算不规则公路桥梁结构的地表峰值加速度,并采用某省近年来权威振动台测得的数据对衰减模型进行优化,优化后的衰减模型计算精度高、可靠性强,向不规则公路桥梁地震响应分析、安全性能评估等项目提供科学的依据。

参考文献:

- [1] 吴晓阳,陈龙伟,袁晓铭,等. 场地 PGA 放大系数与场地特征参数相关性及其地震动快速评估方法研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,01(01):110-116.
- [2] 杨文,龙海云,姚琪. 2015 年 7 月 3 日新疆皮山 M_s 6.5 地震序列活动性及重新定位研究[J]. 地震,2017,37(1):166-174.
- [3] 周梦娇,李熙,牟文俊,等. 建筑结构被动隔振系统参数优化设计[J]. 计算机仿真,2016,33(1):344-347.
- [4] 蒋长胜,吴忠良,尹凤玲,等. 余震的序列参数稳定性和余震短期发生率预测效能的连续评估—以 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震为例[J]. 地球物理学报,2015,58(11):4163-4173.
- [5] 李敏,李小军. 九寨沟 $M7.0$ 地震仪器烈度计算比较分析[J]. 震灾防御技术,2017,12(4):803-814.
- [6] 蒋崇文,易伟建,庞于涛. 地震动强度指标与大跨度刚构桥梁损伤的相关性[J]. 中国公路学报,2016,29(9):97-102.
- [7] 董俊,单德山,张二华,等. 非规则桥梁近、远场地震易损性对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):159-165.
- [8] Manning E, Ramos L F, Fernandes F M. Tube-Jack testing for irregular masonry walls: regular masonry wall testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016,35(3):1-13.
- [9] 陈力波,黄才贵,黄勇冰,等. 公路规则梁桥地震易损性模型及简化计算方法[J]. 西南交通大学学报,2018,53(1):146-155.
- [10] 胡思聪,李立峰,王连华. 高墩多塔斜拉桥地震动强度指标选择及易损性评估[J]. 中国公路学报,2017,30(12):50-59.
- [11] Nakazono K, Ishiyama A, Ueda H, et al. Numerical evaluation on irregular field generated by screening current in high-field REBCO Coil for whole-body MRI [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017,27(4):1-5.
- [12] 李宁,李杨,李忠献. 基于向量 IM 的钢筋混凝土桥墩地震易损性分析[J]. 工程力学,2016,33(1):58-63.
- [13] 刘阳,刘文光,何文福,等. 长周期地震作用下考虑碰撞效应的偏心隔震结构损伤性能评价[J]. 振动工程学报,2015,28(6):910-917.
- [14] 丁宝荣,杜轲,孙景江,等. 考虑不确定性的地震烈度与地震动参数关系研究[J]. 地震工程与工程振动,2018,38(2):106-114.
- [15] 邵博,沈军,李莹甄,等. 综合石油地质、历史地震等资料评估吉林孤店隐伏断裂的地震危险性[J]. 中国地震,2015,31(4):668-678.