



工程科学学报  
*Chinese Journal of Engineering*  
ISSN 2095-9389, CN 10-1297/TF

## 《工程科学学报》网络首发论文

题目: 基于耐震时程法的连续刚构桥地震损伤分析  
作者: 李军, 石岩, 张奋杰, 王军文, 黄兆国  
DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.11.001  
收稿日期: 2020-12-11  
网络首发日期: 2021-12-17  
引用格式: 李军, 石岩, 张奋杰, 王军文, 黄兆国. 基于耐震时程法的连续刚构桥地震损伤分析[J/OL]. 工程科学学报.  
<https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.11.001>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于耐震时程法的连续刚构桥地震损伤分析

李 军<sup>1)</sup>, 石 岩<sup>1)✉</sup>, 张奋杰<sup>1)</sup>, 王军文<sup>2)</sup>, 黄兆国<sup>1)</sup>

1) 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050 2) 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043

\*通信作者 E-mail: syky86@163.com

**摘要** 探讨了在真实成桥内力状态下, 耐震时程法(Endurance time method, ETM)评估连续刚构桥地震反应与损伤的准确性和有效性. 以一座典型非规则连续刚构桥为背景, 采用 MIDAS/Civil 模拟实际施工过程, 经施工阶段分析得到 10 a 收缩徐变下的成桥内力状态, 再借助等效荷载法建立考虑成桥内力状态的 OpenSees 动力分析模型; 通过与天然地震动下的增量动力分析(Incremental dynamic analysis, IDA)结果相对比, 验证了采用 ETM 可快速准确地得到地震反应的适用性; 通过该方法分析了墩顶位移、梁端位移及碰撞力等地震反应, 并采用位移延性系数和 Park-Ang 损伤指数对桥墩损伤进行了量化分析与评估. 结果表明: ETM 可以有效地预测真实成桥内力状态下连续刚构桥达到某一损伤程度的时间; 耐震时间较短时主桥桥墩较引桥桥墩的损伤要小, 耐震时间较长时则反之.

**关键词** 桥梁工程; 连续刚构桥; 成桥内力状态; 耐震时程法; 损伤评估

中图分类号 U448.23

DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.11.001

## Application of the endurance time method to the seismic analysis and damage evaluation of a continuous rigid-frame bridge

LI Jun<sup>1)</sup>, SHI Yan<sup>1)</sup>, ZHANG Fen-jie<sup>1)✉</sup>, WANG Jun-wen<sup>2)</sup>, HUANG Zhao-guo<sup>1)</sup>

1) School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2) Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

\*✉Corresponding author, E-mail: syky86@163.com

**Abstract** The endurance time method (ETM) is a novel dynamic analysis method in which artificially intensified accelerograms characterized by the increase in seismic intensity with time are used as loading inputs. In this method, various dynamic responses, i.e., ranging from elastic to failure, under seismic excitations of different intensity levels are estimated with a reduced dynamic calculation effort. Based on these merits, this study investigated the accuracy and effectiveness of ETM in predicting the seismic responses and damage to continuous rigid-frame bridges considering the real internal force state (called element initial strain state) of the completed bridge. In detail, first, a typical irregular continuous rigid-frame bridge was selected as the target of the analysis, and its finite element model considering the real construction process was established by MIDAS/Civil. Then, the real internal force state considering the 10-year concrete shrinkage and creep was determined through construction phase analysis, and a dynamic analysis model considering the real internal force state was built via OpenSees utilizing the equivalent load method. Subsequently, the incremental dynamic analysis results under natural ground motions were obtained and compared with the results of the ETM, and the applicability of the ETM to obtain seismic responses rapidly and accurately was verified. Finally, the seismic responses of pier displacement, girder displacement, and pounding force were analyzed using the ETM, and the damage to piers was evaluated using the displacement ductility factor and Park-Ang damage index. The results indicate that ETM can predict the time when a continuous rigid-frame bridge reaches a certain damage status under the real internal force state of the completed bridge. Moreover, the damage to the main-bridge pier is smaller than that of the approach-bridge pier when the endurance time is short. However, when the endurance time is long, the opposite is true.

收稿日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908265,51768042);红柳优秀青年人才计划资助项目(04-061810);河北省自然科学基金资助项目(E2019210215);道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室资助项目(STKF201904)

网络首发时间: 2021-12-17 12:34:02 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1297.tf.20211216.1407.002.html>

**Key words** bridge engineering; continuous rigid-frame bridges; real internal force state; endurance time method; damage evaluation

连续刚构桥跨越能力强、受力合理且整体性能良好,在跨越高山峡谷、深水河流时优势突出,因此在我国得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>.近年来,我国加大了对西部地区的基础建设,高速铁路和公路线上的桥梁比重日益提高.但西部地区新构造活动强烈,断层与断裂带发育广泛,发生破坏性地震的概率非常大,故位于我国西部地区的桥梁结构具有较高的地震危险性<sup>[4-7]</sup>.例如,2008年汶川大地震中,接近完工的庙子坪大桥发生了主梁和主墩开裂、引桥落梁等严重震害,震后修复代价巨大<sup>[8]</sup>.连续刚构桥一般采用悬臂施工法,施工工期较长,施工过程复杂且预应力损失和混凝土收缩徐变较大,使其施工阶段和成桥阶段的内力状态受结构自重、预应力、二期铺装荷载、施工荷载以及不同收缩徐变年限等因素的影响很大<sup>[9-12]</sup>.因此,该类桥梁的结构体系与分析模型都不同于简支梁和连续梁等其它桥型.

目前,在对连续刚构桥进行抗震性能分析与评估时,一般采用常规分析方法,如非线性时程分析、静力弹塑性分析(Pushover)和增量动力分析(Incremental dynamic analysis, IDA)等.然而,针对同一个结构,采用这些不同分析方法时计算效率与准确性相差较大,且计算效率和准确性一般不可兼得.为此,一种集 Pushover 方法和 IDA 方法的优势于一体的新型抗震性能评估方法——耐震时程法(Endurance time method, ETM)应运而生,且近年来在国内外地震工程领域得到了较广泛的应用与发展<sup>[13-15]</sup>.在桥梁耐震时程分析方面,郭安薪等<sup>[16]</sup>探讨了 ETM 在少数几次计算与分析中预测公路桥梁碰撞反应的有效性和准确性,结果表明该方法具有足够的精度,可用于考虑碰撞效应的公路桥梁抗震分析和评估;He 等<sup>[17]</sup>将 ETM 应用于考虑冲刷影响的公路桥梁地震易损性评估,认为与 IDA 方法相比,基于 ETM 的桥梁地震易损性分析具有更高的计算精度和效率;沈禹等<sup>[18]</sup>对考虑行波效应的大跨度矮塔斜拉桥进行了耐震时程分析,证明 ETM 能够高效地预测出考虑行波效应的矮塔斜拉桥地震碰撞反应;郝朝伟等<sup>[19]</sup>针对高墩连续刚构桥进行耐震时程分析,通过与 IDA 方法对比,验证了 ETM 应用于此类桥梁抗震分析的高效性.从现有研究可知,使用 ETM 的关键是合成地震动强度随时间逐渐增大的耐震时程加速度曲线(Endurance time accelerogram, ETA),进而通过少数几次动力计算与分析即可得到结构在不同强度下从弹性、屈服、弹塑性直至倒塌阶段的抗震性能.然而,ETM 目前还未被用于考虑成桥内力状态的大跨高墩连续刚构桥抗震分析与性能评估中.

本文首先以一座大跨高墩连续刚构桥为研究对象,采用 MIDAS/Civil 模拟其施工过程以获取成桥内力状态,再借助等效荷载法基于 OpenSees 平台建立考虑成桥内力状态的动力分析模型;其次,依据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)中的设计加速度反应谱合成了 3 条耐震时程加速度曲线,通过对比 ETM 与 IDA 分析结果,验证了采用 ETM 快速且准确地得到大跨高墩连续刚构桥地震反应的适用性;最后,基于该方法分析了主桥桥墩与引桥桥墩的墩顶位移、梁端位移及伸缩缝处的碰撞力等地震反应,采用位移延性系数  $\mu$  和改进 Park-Ang 双参数地震损伤模型的损伤指数 DI<sup>[20]</sup>对桥墩损伤进行了量化分析与评估.

## 1 耐震时程法基本理论及地震动选取

### 1.1 耐震时程法与耐震时程加速度曲线

从合成耐震时程加速度曲线的过程可知,在从 0 开始的某一时间段内,  $t$  时刻的目标加速度反应谱与该时间段内的持时  $t$  成线性关系:

$$S_{aT}(T, t) = \frac{t}{t_{Tar}} S_{ac}(T) \quad (1)$$

根据加速度反应谱与位移反应谱的函数关系,可得到  $t$  时刻的目标位移反应谱:

$$S_{uT}(T, t) = \frac{t}{t_{Tar}} S_{ac}(T) \times \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

式中:  $t_{Tar}$  为目标时间;  $t$  为任意时刻;  $T$  为结构自振周期;  $S_{ac}(T)$  为预先指定的目标反应谱(规范

谱);  $S_{ar}(T, t)$ 、 $S_{ur}(T, t)$  分别表示自振周期为  $T$  的结构在  $t$  时刻的目标加速度反应谱和目标位移反应谱。将式(1)和(2)转化为无约束变量的优化问题:

$$\min F(\ddot{u}_g) = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \left\{ [S_a(T, t) - S_{ar}(T, t)]^2 + \alpha [S_u(T, t) - S_{ur}(T, t)]^2 \right\} dt dT \quad (3)$$

式中:  $\ddot{u}_g$  为需要生成的耐震时程加速度曲线;  $\alpha$  为位移谱的权重系数;  $S_a(T, t)$  和  $S_u(T, t)$  分别表示  $t$  时刻的加速度反应谱和位移反应谱。

本文以我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)中的设计加速度反应谱为目标反应谱<sup>[21]</sup>, 采用 MATLAB 软件合成了 3 条持时为 30 s 耐震时程加速度曲线作为输入, 并取分析结果的平均值以使其精度更高. 首先, 基于白久林<sup>[22]</sup>编写的 MATLAB 优化算法对式(3)进行求解; 其次, 利用 SIMQKE 软件生成了与目标反应谱最为吻合的 3 条人工合成地震动, 其特征周期  $T_g$  为 0.35, 阻尼比为 0.05, 持时为 30 s; 然后, 将 3 条人工合成地震动作为初始输入地震动, 采用 MATLAB 计算得到持时为 30 s 的 3 条耐震时程加速度曲线(ETA1~ETA3), 如图 1(a)所示. 可以看出, 地震动强度(加速度)随时间不断增大, 符合耐震时程法的基本理念. 同时, 图 1(b)给出了 3 条耐震时程加速度曲线分别在 0~10 s、0~20 s、0~30 s 的地震反应谱与目标反应谱, 可以看出 3 个不同时段反应谱的吻合度较高, 进一步说明了优化算法程序的准确性。

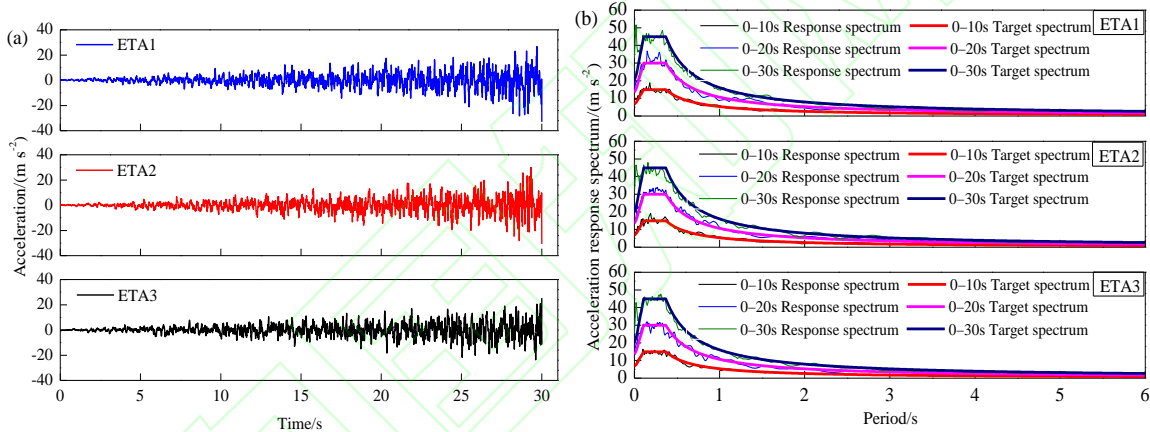


图 1 3 条 ETA 曲线(a)及其加速度反应谱曲线(b)  
Fig.1 Three ETA curves (a) and corresponding acceleration response spectra (b)

## 1.2 地震动选取及等效耐震时间的换算

为验证 ETM 评估大跨高墩连续刚构桥抗震性能的有效性和实用性, 从 PEER 数据库中选取了 7 条天然地震动. 地震动选取时依据 PEER 调幅方法, 以所选地震动的平均反应谱与目标反应谱能够较好地吻合为准. 调幅后的 7 条天然地震动在阻尼比为 5% 时的反应谱及其平均反应谱与目标反应谱的对比如图 2 所示, 可见 7 条天然地震动的平均反应谱与目标反应谱能够较好地吻合. 本文耐震时程地震动和天然地震动均沿纵桥向输入。

不同地震动强度下结构的最大反应  $f(t)^{\text{EDP}}$  可通过下式计算:

$$f(t)^{\text{EDP}} = \text{Max}(\text{Abs}(f(\tau)), \tau \in [0, t]) \quad (4)$$

式中:  $f(\tau)$  为结构在  $[0, t]$  时间段内的地震反应时程, 对  $f(\tau)$  取绝对值的最大值便能得到  $f(t)^{\text{EDP}}$ 。

为了将 ETM 分析结果与 IDA 分析结果进行对比, 需要将做 IDA 分析时的地震动强度转化为耐震时间  $t$ . 本文以第一周期  $T_1$  对应的加速度反应谱  $S_{as}(T)$  作为强度指标, 单条天然地震动在取不同幅值时的等效耐震时间换算关系可表示为:

$$\frac{t_{ET}}{S_1 \cdot S_{aS}(T)} = \frac{t_{Tar}}{S_{aC}(T)} \Rightarrow t_{ET} = S_1 \cdot \frac{S_{aS}(T)}{S_{aC}(T)} \cdot t_{Tar} \quad (5)$$

式中： $t_{ET}$ 为单条地震动取不同幅值时地震动强度的等效耐震时间； $S_1$ 为单条地震动的调幅系数。

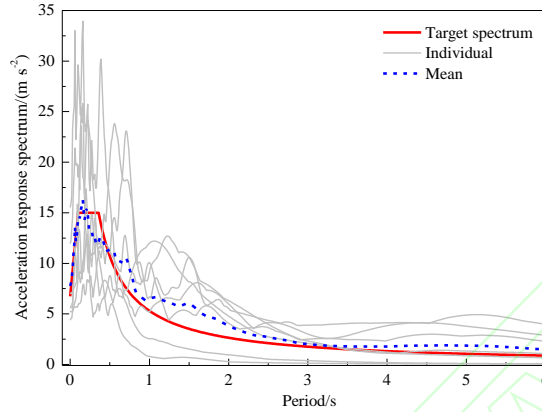


图2 7条天然地震动反应谱及其与目标反应谱的对比  
Fig.2 Comparison for individual, mean and target response spectra of seven natural ground motions

## 2 桥梁有限元模型

### 2.1 桥梁概况

本文以一座桥梁全长 620 m、桥面总宽 12 m 的大跨高墩连续刚构桥为工程背景，其中主桥是跨径为(120+220+120) m 的三跨连续 T 型刚构，引桥是跨径为 4 m×40 m 的四跨简支 T 梁，如图 3 所示。主桥上部结构为变截面单箱单室预应力钢筋混凝土箱梁；引桥上部结构为等截面钢筋混凝土 T 梁，且每跨 5 片；全桥桥墩均为钢筋混凝土桥墩，1<sup>#</sup>~2<sup>#</sup>墩为双薄壁空心墩，3<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>墩为单薄壁空心墩。具体截面构造及尺寸详见图 3。主桥采用悬臂施工法进行施工，施工时间约为 460 d。上部结构采用 C50 混凝土，下部结构采用 C40 混凝土；主筋和箍筋分别采用 HRB335 和 Q235 型号的钢筋，钢筋型号及直径详见图 3；箱梁采用 Strand1860 预应力钢绞线，共计 452 束。0<sup>#</sup>桥台、3<sup>#</sup>墩墩顶各设置 3 个盆式橡胶支座，7<sup>#</sup>桥台、3<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>墩墩顶各设置 5 个滑板支座。另外，桥台背墙处、相邻梁体间均设置伸缩缝 (E1~E6)。桥址场地类别为 II 类，抗震设防烈度为 9 度。



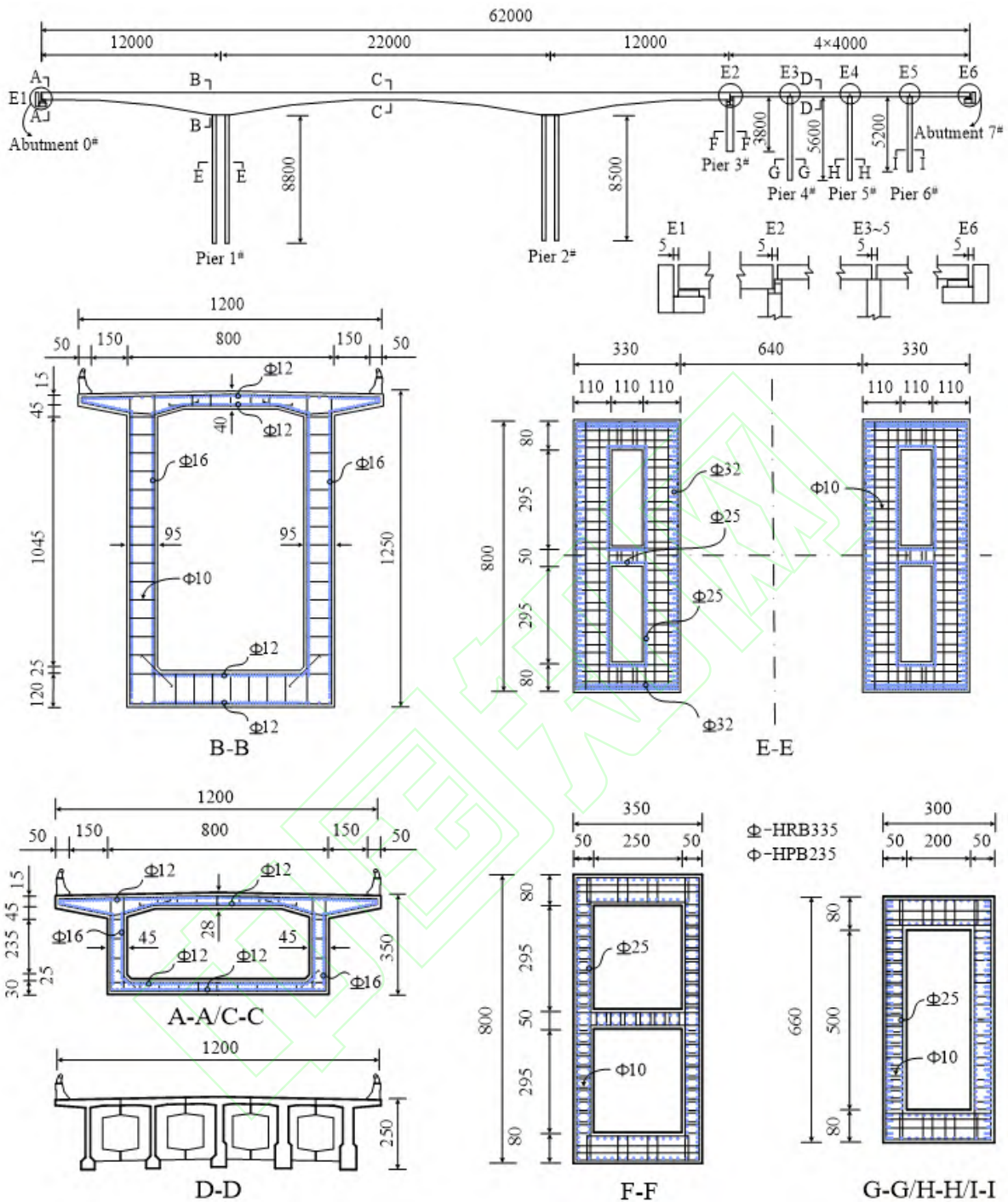


图3 大跨高墩连续刚构桥的构造形式与截面尺寸(单位: cm)  
 Fig.3 Structural forms and section details of a long-span continuous rigid-frame bridge with high piers (unit: cm)

### 2.2 有限元分析模型

大跨高墩连续刚构桥的施工工期较长且其成桥内力状态受施工过程的影响很大.MIDAS/Civil 软件和 OpenSees 地震模拟平台在桥梁施工过程模拟与非线性动力时程分析方面各具优势.本文结合两者优点,采用 MIDAS/Civil 模拟实际施工过程,采用 OpenSees 进行动力时程分析,将通过等效荷载法得到的等效内力荷载附加于 OpenSees 动力分析模型,使其处于真实内力状态.

(1) MIDAS/Civil 施工阶段分析模型.首先建立考虑施工过程中结构自重、预应力、二期铺装、施工荷载及 10 a 收缩徐变等因素的有限元模型.按照悬臂施工法,整个施工过程共划分成 38 个施工阶

段, 输入预应力钢束共计 452 束, 全桥附加二期铺装荷载, 考虑 10 a 收缩徐变.墩底固结, 不考虑桩土相互作用.

(2) 基于等效荷载法的成桥内力状态.在 MIDAS/Civil 中经施工阶段分析与静力分析后得到 10 a 收缩徐变下真实的成桥内力状态, 采用等效荷载法获取其内力等效荷载<sup>[23]</sup>, 再将其附加到 OpenSees 动力分析模型, 经静力分析后得到与成桥内力状态基本相同的等效内力状态, 以便利用 OpenSees 进行基于成桥内力状态的动力分析.

(3) OpenSees 动力分析模型.基于 OpenSees 所建立的全桥动力分析模型如图 4 所示.关键受力部位(塑性铰区 P1~P16)采用基于位移的非线性纤维梁柱单元模拟, 且纤维截面上混凝土和主筋分别采用 Concrete01 材料和 Steel02 材料模拟.假设非关键受力部位处于弹性状态且都采用弹性梁柱单元模拟; 采用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟全桥支座, 图 4 中的  $F_y$  为屈服力,  $x_y$  为屈服位移,  $k_1$  为初始刚度,  $k_2$  为屈服后刚度.采用接触单元力学模型中的 Hertz-damp 碰撞模型<sup>[24]</sup>考虑主桥和引桥梁体间、梁体与桥台背墙间的碰撞作用, 图 4 中的  $\Delta_G$  为碰撞初始间隙,  $\delta_y$  为屈服位移,  $\delta_m$  为碰撞过程中最大侵入深度,  $F_m$  为最大碰撞力,  $K_1$  为初始碰撞刚度,  $K_2$  为屈服后刚度,  $K_{eff}$  为有效刚度.模型阻尼比取 5%, 并采用瑞利阻尼.

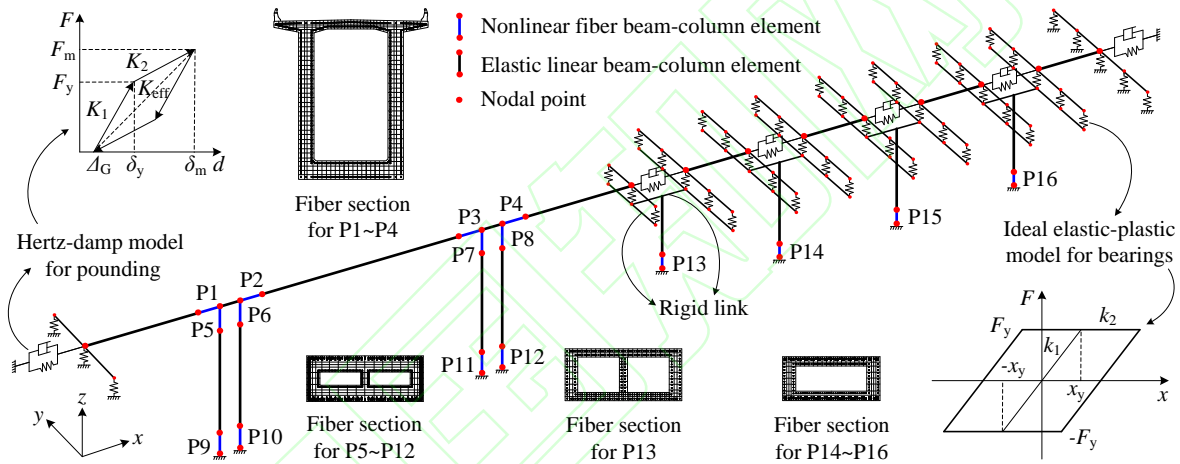


图 4 全桥动力分析模型  
Fig.4 Dynamic analysis model of the bridge

(4) 动力特性分析.为验证采用 MIDAS/Civil 和 OpenSees 分别建立的有限元模型的一致性和合理性, 同时为保证动力计算结果的正确性, 对两个模型分别进行动力特性分析.前 5 阶自振周期和振型描述见表 1,  $T_M$  为 MIDAS/Civil 计算周期,  $T_O$  为 OpenSees 计算周期.前 5 阶自振周期的最大误差不超过 5%, 且此误差主要来源于软件差异, 故所建 OpenSees 模型与 MIDAS/Civil 模型基本保持一致.

表 1 前 5 阶自振周期  
Table 1 First five-order natural vibration periods

Modal order	$T_M$	$T_O$	Mode description
1	4.10	3.91	The main bridge vibrates along the transverse bridge direction
2	3.40	3.25	The whole bridge vibrates along the longitudinal bridge direction
3	2.64	2.55	Second-order vibration of the main bridge along the transverse bridge
4	2.45	2.47	The approach bridge vibrates along the longitudinal bridge direction
5	1.83	1.86	The main bridge and approach bridge vibrate in different directions along the longitudinal bridge

### 3 耐震时程法的适用性验证

基于 OpenSees 平台, 对所建动力分析模型分别输入耐震时程地震动和天然地震动.通过对比 ETM 分析结果与 IDA 分析结果, 来验证 ETM 在桥梁动力分析中的适用性.地震反应指标为墩顶位移、墩梁

相对位移和伸缩缝处的碰撞力等.

(1) 桥墩位移.图 5 给出了在 ETM 和 IDA 分析中主桥 1<sup>#</sup>墩、引桥 3<sup>#</sup>墩(过渡墩)的墩顶位移时程曲线.可见:将 IDA 分析中不同幅值情况下的地震动强度转化为等效耐震时间后,桥梁地震反应随时间呈增大趋势,说明等效耐震时间的转化符合 ETM 的主要理念;ETM 曲线为带平台段的锯齿状递增曲线,说明利用 ETM 求出的桥梁累积最大地震反应在某一时间内不超过平台段地震持时所对应的地震反应;通过 ETM 和 IDA 分析得到的 1<sup>#</sup>墩位移时程曲线在总持时内都较吻合,3<sup>#</sup>墩位移时程曲线在 15 s 之前吻合度较高,超过 15 s 后二者之间的离散性逐渐增大,但误差在可接受范围内.

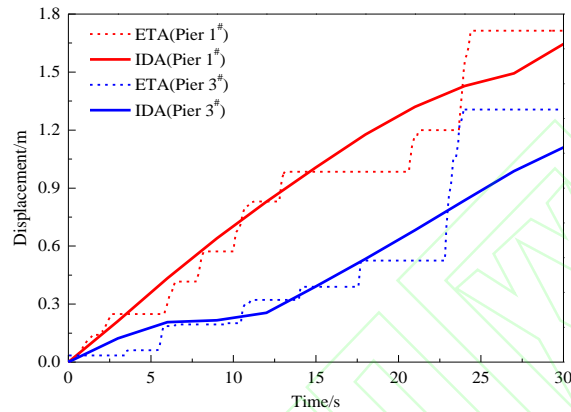


图 5 桥墩墩顶位移时程曲线  
Fig.5 Displacement-time history of the top of the piers

(2) 墩梁相对位移.图 6 给出了在 ETM 和 IDA 分析中 3<sup>#</sup>墩处主桥、引桥的墩梁相对位移时程曲线.可见:通过 ETM 和 IDA 分析得到的过渡墩处主桥的墩梁相对位移时程曲线吻合度较引桥要好,这主要是由于考虑碰撞效应时主桥与引桥的耦合作用对不同地震动的敏感性不同,且在 15 s 之前吻合度较好,15 s 以后吻合度降低,离散性增大,但整体来说,在前 15 s 的耐震时间里便可以反映出结构的地震反应.

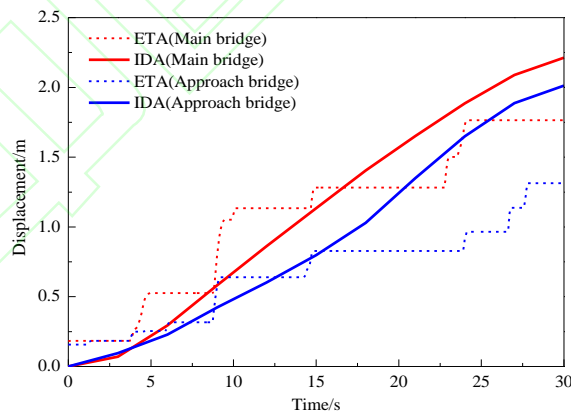


图 6 3<sup>#</sup>墩处墩梁相对位移时程曲线  
Fig.6 Relative displacement-time history between pier and girder at pier 3<sup>#</sup>

(3) 碰撞力.图 7 给出了在 ETM 和 IDA 分析中 3<sup>#</sup>墩处、7<sup>#</sup>台处伸缩缝间的碰撞力时程曲线.可见对于 3<sup>#</sup>墩,在持时小于 10 s 时 ETM 分析结果偏小,10 s 之后吻合度较高;对于 7<sup>#</sup>台,在持时大于 20 s 时 ETM 分析结果偏小,20 s 之前吻合度较高.

综上所述,针对不同地震反应指标,ETM 分析结果与 IDA 分析结果趋势一致、相差较小.由此可见,耐震时程法在评估大跨高墩连续刚构桥的抗震性能方面不仅具有较高的时效性,其适用性也满足



非线性动力分析的要求.

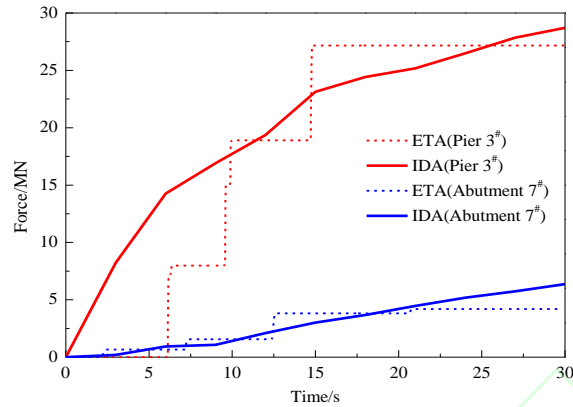


图7 伸缩缝间碰撞力时程曲线  
Fig.7 Pounding force-time history at the expansion joints

#### 4 基于耐震时程法的地震反应分析与损伤评估

基于 ETM 对大跨高墩连续刚构桥的地震反应和损伤状态进行量化分析.主要评价指标有:桥墩位移、梁端位移、伸缩缝处的碰撞力、位移延性系数以及 Park-Ang 损伤指数.其中,由位移延性系数  $\mu_d$  定义的桥墩损伤状态见文献[25];由 Park-Ang 损伤指数 DI 划分的桥墩损伤状态见文献[26].

##### 4.1 地震反应分析

图 8 给出了 ETM 分析中 1<sup>#</sup>墩与 6<sup>#</sup>墩的墩顶位移时程曲线;图 9 给出了主桥梁端与引桥梁端的位移时程曲线;图 10 给出了 3<sup>#</sup>墩处与 7<sup>#</sup>台处伸缩缝间的碰撞力时程曲线.可见:

(1) 在较小地震动作用下,耐震时间较短,地震反应增长的平台段较短,近似线性增加,结构处于弹性阶段;而在较大地震动作用下,耐震时间较长,地震反应增长的平台段变长,相邻平台段之间的反应突变值增大,说明结构进入了非线性状态.

(2) 在相同的耐震时间下主桥和引桥的地震反应不同.例如,对于 ETA2,在耐震时间为 10 s 时,1<sup>#</sup>墩墩顶累积最大位移为 0.88 m,6<sup>#</sup>墩墩顶累积最大位移为 0.43 m,主桥梁端累计最大位移为 0.88 m,引桥梁端累计最大位移为 0.95 m.

(3) 通过 ETM 可以预测在不同伸缩缝处第一次发生碰撞的时间和第一次发生碰撞时碰撞力的大小.例如,对于 ETA2,3<sup>#</sup>墩处伸缩缝间第一次碰撞的时间为 4.4 s,碰撞力为  $2.2 \times 10^3$  kN.

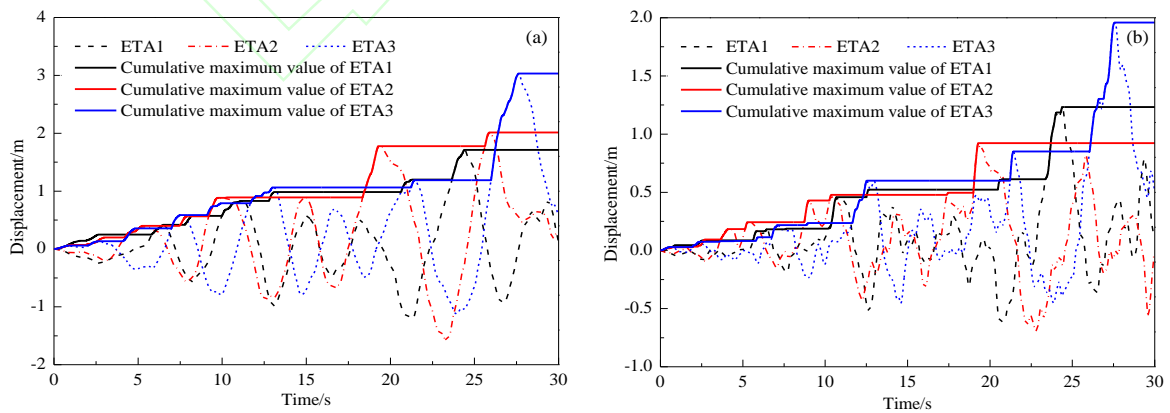


图8 桥墩位移时程曲线.(a) 1<sup>#</sup>墩;(b) 6<sup>#</sup>墩  
Fig.8 Displacement-time history of piers:(a) pier 1<sup>#</sup>;(b) pier 6<sup>#</sup>

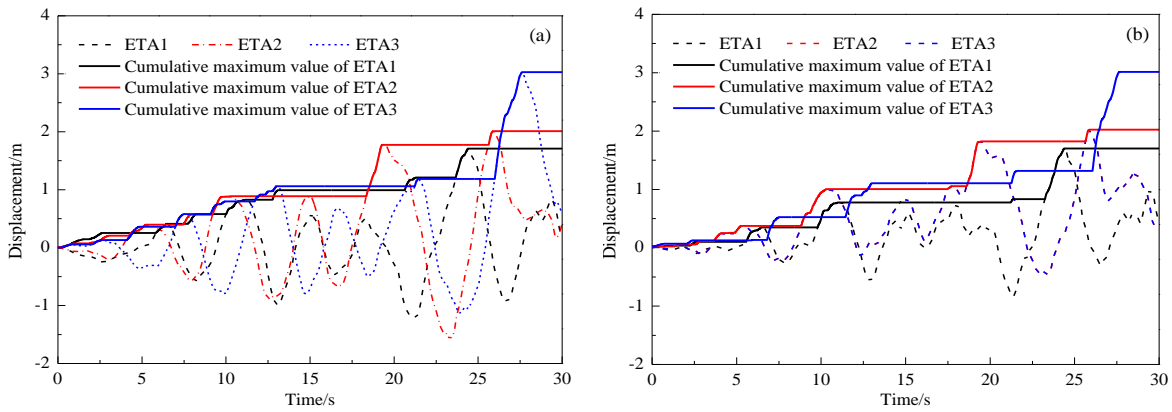


图9 梁端位移时程曲线. (a)主桥; (b)引桥  
Fig.9 Displacement-time history of the top of the girders: (a) main bridge; (b) approach bridge

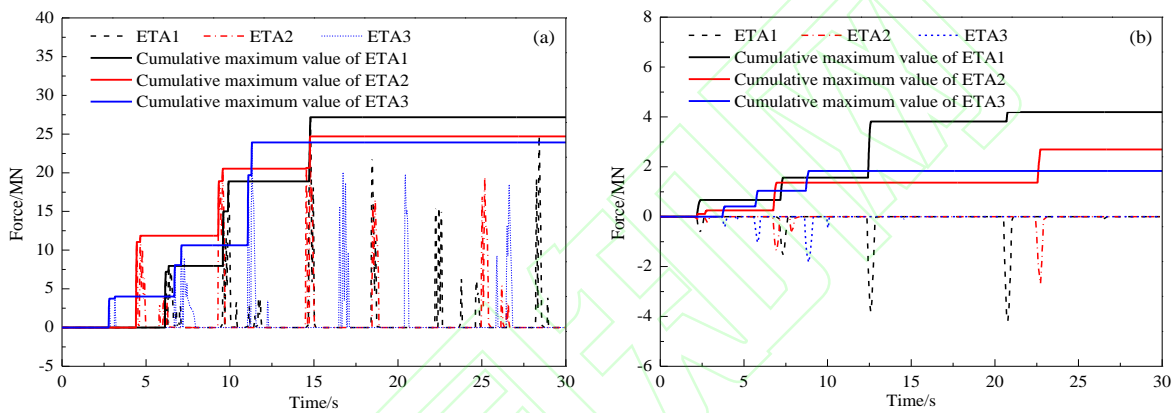


图10 伸缩缝处碰撞力时程曲线. (a) 3#墩; (b) 7#台  
Fig.10 Pounding force-time history of the expansion joints: (a) pier 3#; (b) pier 7#

#### 4.2 桥墩损伤评估

图 11、图 12 分别给出了 ETM 分析中 1<sup>#</sup>墩和 6<sup>#</sup>墩的位移延性系数变化曲线、Park-Ang 损伤指数变化曲线.可见:

(1) 采用 ETM 可以有效地预测大跨高墩连续刚构桥达到某一损伤程度的时间.例如, 对于 ETA2, 1<sup>#</sup>墩达到中度损伤时, 位移延性系数表征的耐震时间为 18.64 s, Park-Ang 损伤指数表征的耐震时间为 25.79 s.由于 Park-Ang 损伤指数是基于变形和滞回能量的指标, 故耐震时间较只单一考虑变形的位移延性系数指标要长, 且更加准确.

(2) 在耐震时间较短时, 1<sup>#</sup>墩的损伤小于 6<sup>#</sup>墩的损伤; 在耐震时间较长时, 1<sup>#</sup>墩的损伤大于 6<sup>#</sup>墩的损伤.例如, 对于 ETA3, 在 15 s 时 1<sup>#</sup>墩的 Park-Ang 损伤指数为 0.039, 6<sup>#</sup>墩的 Park-Ang 损伤指数为 0.056, 在 30 s 时 1<sup>#</sup>墩的 Park-Ang 损伤指数为 0.817, 6<sup>#</sup>墩的 Park-Ang 损伤指数为 0.595.

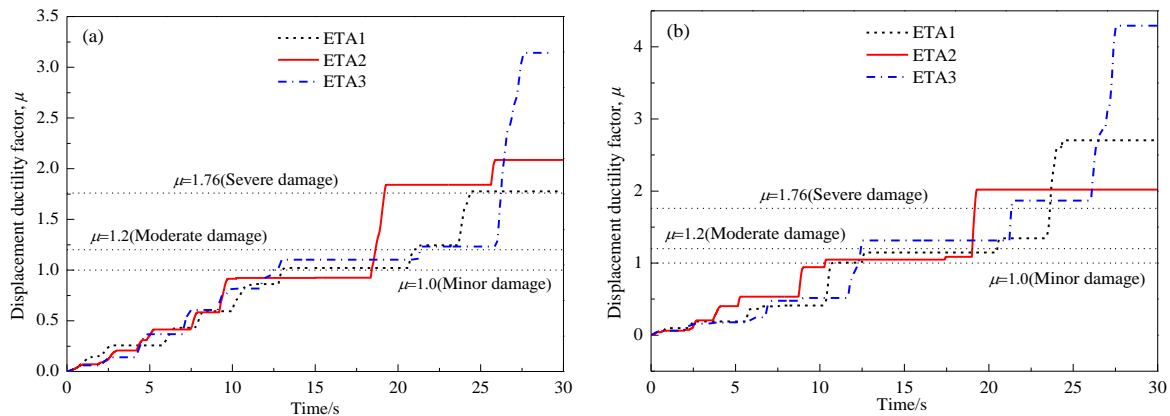


图 11 桥墩位移延性系数. (a)1<sup>#</sup>墩; (b)6<sup>#</sup>墩  
Fig.11 Displacement ductility factors of piers: (a) pier 1<sup>#</sup>; (b) pier 6<sup>#</sup>

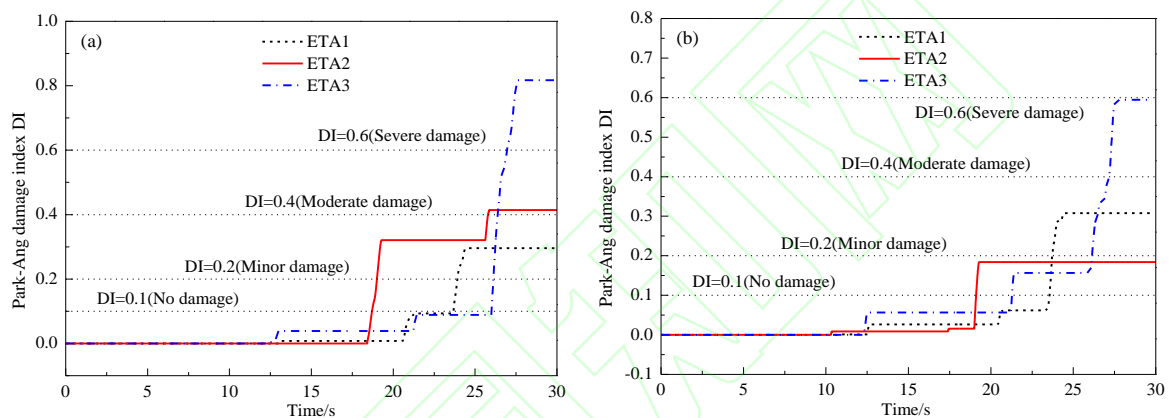


图 12 桥墩 Park-Ang 损伤指数. (a)1<sup>#</sup>墩; (b)6<sup>#</sup>墩  
Fig.12 Park-Ang damage index of piers: (a) pier 1<sup>#</sup>; (b) pier 6<sup>#</sup>

## 5 结论

(1) 大跨高墩连续刚构桥的 ETM 分析结果较 IDA 分析结果的离散性小; ETM 分析结果与 IDA 分析结果的平均值趋势一致, 但存在一定的误差, 此为耐震时程曲线与天然地震动在幅值和持时等指标上的差异所致, 但作为一种简化方法, ETM 依然可以满足动力时程分析的适用性要求。

(2) 采用 ETM 可以很好地预测不同地震动强度下的地震反应大小和达到某一损伤程度的时间; 当以 Park-Ang 损伤指数和位移延性系数为指标对桥墩进行损伤评估时, Park-Ang 损伤指数表征的耐震时间较位移延性系数更长, 且更加准确, 这是因为前者是基于变形和滞回能量的指标而后者只单一地考虑变形; 在相同的耐震时间下, 主桥与引桥的地震反应不同, 且耐震时间较短时主桥桥墩的损伤小于引桥桥墩的损伤, 耐震时间较长时则相反。

(3) ETM 仅需少数几次动力计算即可得到不同地震动强度下的地震反应, 如墩顶位移、墩梁相对位移和伸缩缝处的碰撞力等, 计算与分析效率高, 这在大跨高墩连续刚构桥的非线性动力分析方面优势突出, 可为这类大型复杂结构的抗震性能评估提供参考。

## 参考文献

- [1] Fan L C. *Bridge Seismic Design*. Shanghai: Tongji University Press, 1997  
(范立础. 桥梁抗震. 上海: 同济大学出版社, 1997)
- [2] Wang H L, Xie C L, Liu D, et al. Continuous reinforced concrete rigid-frame bridges in China. *Pract Period Struct Des Constr*, 2019, 24(2): 05019002
- [3] Peng Y C, Zhang Z X. Development of a novel type of open-web continuous reinforced-concrete rigid-frame bridge. *J Bridge Eng*, 2020, 25(8): 05020005
- [4] Li J Z, Guan Z G. Research progress on bridge seismic design: Target from seismic alleviation to post-earthquake structural resilience. *China J Highw Transp*, 2017, 30(12): 1

- (李建中, 管仲国. 桥梁抗震设计理论发展: 从结构抗震减震到震后可恢复设计. 中国公路学报, 2017, 30(12): 1)
- [5] Shi Y, Wang D S, Sun Z G. Analysis of seismic response of seismically mitigated and isolated bridge subjected to near-fault ground motion. *Bridge Constr*, 2014, 44(3): 19  
(石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析. 桥梁建设, 2014, 44(3): 19)
- [6] Wang D S, An Z H, Sun Z G, et al. Lead core heating effects on seismic response of isolated bridges. *J Basic Sci Eng*, 2020, 28(5): 1172  
(王东升, 安正汉, 孙治国, 等. 铅芯温度效应对隔震桥梁地震反应影响研究. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(5): 1172)
- [7] Hui Y X, Mao M J, Liu H F, et al. Influence of structural seismic response of bridges crossing active fault. *J Jilin Univ (Eng Technol Ed)*, 2018, 48(6): 1725  
(惠迎新, 毛明杰, 刘海峰, 等. 跨断层桥梁结构地震响应影响. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(6): 1725)
- [8] Chen L S, Zhuang W L, Zhao H Q, et al. *Report on Highways Damage in the Wenchuan Earthquake: Bridges*. Beijing: China Communications Press, 2012  
(陈乐生, 庄卫林, 赵河清, 等. 汶川大地震公路震害调查: 桥梁. 北京: 人民交通出版社, 2012)
- [9] Pan Z F, Fu C C, Jiang Y. Uncertainty analysis of creep and shrinkage effects in long-span continuous rigid frame of sutong bridge. *J Bridge Eng*, 2011, 16(2): 248
- [10] Shi Y, Zhang F J, Han J P, et al. Seismic damage analysis of a long-span continuous rigid frame bridge with high piers during typical construction stages. *J Vib Shock*, 2020, 39(22): 89  
(石岩, 张奋杰, 韩建平, 等. 高墩大跨度连续刚构桥典型施工阶段地震损伤分析. 振动与冲击, 2020, 39(22): 89)
- [11] Zhao Y W, Liu Y Q, Yang S P, et al. An improved Bouc-Wen model for describing hysteretic characteristics of shock absorbers. *Chin J Eng*, 2020, 42(10): 1352  
(赵义伟, 刘永强, 杨绍普, 等. 一种描述减振器滞回特性的 Bouc-Wen 改进模型. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1352)
- [12] Yu J, Lü X B, Qin Y J. Experimental study on concrete beams without web reinforcement based on fractal theory. *Chin J Eng*, 2021, 43(10): 1385  
(于江, 吕旭滨, 秦拥军. 基于分形理论无腹筋混凝土梁的受剪性能. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1385)
- [13] Basim M C, Estekanchi H E. Application of endurance time method in performance-based optimum design of structures. *Struct Saf*, 2015, 56: 52
- [14] Maleki-Amin M J, Estekanchi H E. Damage estimation of steel moment-resisting frames by endurance time method using damage-based target time. *J Earthq Eng*, 2018, 22(10): 1806
- [15] Bai J L, Jin S S, Zhao J X, et al. Seismic performance evaluation of soil-foundation-reinforced concrete frame systems by endurance time method. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2019, 118: 47
- [16] Guo A X, Shen Y, Bai J L, et al. Application of the endurance time method to the seismic analysis and evaluation of highway bridges considering pounding effects. *Eng Struct*, 2017, 131: 220
- [17] He H F, Wei K, Zhang J R, et al. Application of endurance time method to seismic fragility evaluation of highway bridges considering scour effect. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2020, 136: 106243
- [18] Shen Y, Tan H S, Wang X Z, et al. Application of the endurance time method to seismic-induced pounding analysis for long-span extradosed cable-stayed bridges considering wave passage effects. *Eng Mech*, 2020, 37(3): 131  
(沈禹, 谈华顺, 王献攀, 等. 考虑行波效应的大跨度矮塔斜拉桥耐震时程分析. 工程力学, 2020, 37(3): 131)
- [19] Hao C W, Chen Y J, He H X, et al. The endurance time method in the seismic analysis of the continual rigid-bridge with high piers. *J Disaster Prev Mitig Eng*, 2017, 37(2): 215  
(郝朝伟, 陈彦江, 何浩祥, 等. 耐震时程法在高墩刚构桥抗震分析中的应用. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 215)
- [20] Wang D S, Feng Q M, Wang G X. A modified Park-Ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life. *China Civ Eng J*, 2004, 37(11): 41  
(王东升, 冯启民, 王国新. 考虑低周疲劳寿命的改进 Park-Ang 地震损伤模型. 土木工程学报, 2004, 37(11): 41)
- [21] Ministry of Transport of the People's Republic of China. *JTG/T B02-01—2008 Specifications for Seismic Design of Highway Bridges*. Beijing: China Communications Press, 2008  
(中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则. 北京: 人民交通出版社, 2008)
- [22] Bai J L. *Main Seismic Failure Mode Analyses and Optimization of Reinforced Concrete Frame Structures* [Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015  
(白久林. 钢筋混凝土框架结构地震主要失效模式分析与优化[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015)
- [23] Li J. *Seismic Response and Fragility Analysis of Long-Span Continuous Rigid-Frame Bridge with High-Rise Piers Considering Internal Force State* [Dissertation]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021: 33  
(李军. 考虑内力状态的大跨高墩连续刚构桥地震反应及易损性分析[学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021: 33)
- [24] Zhao D H, Liu Y, Li H N, et al. Modified Hertz-damp model for base-isolated structural pounding. *J Vib Shock*, 2017, 36(12): 236  
(赵大海, 刘勇, 李宏男, 等. 隔震结构碰撞分析的改进 Hertz-damp 模型. 振动与冲击, 2017, 36(12): 236)
- [25] Hwang H, Liu J B. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges. *China Civ Eng J*, 2004, 37(6): 47  
(Hwang H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析. 土木工程学报, 2004, 37(6): 47)
- [26] Hindi R A, Sexsmith R G. A proposed damage model for RC bridge columns under cyclic loading. *Earthq Spec*, 2001, 17(2): 261