

近断层桥梁抗震的人工合成地震动

王燕航, 刘 浪

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:人工合成地震动作为抗震设计的一种重要手段,能够模拟出具有指定频率和幅度的地震波形,用于评估桥梁结构的抗震性能。基于人工合成地震动,对桥梁的破坏机理和结构变形特点进行研究,总结近断层桥梁抗震的应用及影响,展望近断层桥梁抗震的研究方向。结果表明:通过对地震波的脉冲成分提取,具有滑冲效应脉冲的近断层地震动引起的结构响应远大于具有方向性效应脉冲的近断层地震动。当滑冲效应和方向性效应均达到脉冲峰值时,结构响应最明显,引起严重的地震破坏。具有滑冲效应脉冲的地震动引起的永久位移会进一步加剧震害。黏弹性人工边界可对子结构节点施加地震荷载,时程分析结果更贴近现实。本文成果可为桥梁工程的抗震设计和安全评估提供有效支撑。

关键词:近断层桥梁; 人工合成地震动; 桥梁抗震; 抗震性能; 破坏机理; 抗震设计

中图分类号:U442.5+5

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)07-0040-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.07.090

Synthetic ground earthquake motion for seismic resistance of near-fault bridges

WANG Yanhang, LIU Lang

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: As an important mean of seismic design, synthetic ground earthquake motion can simulate seismic waveforms with specified frequency and amplitude to evaluate the seismic performance of bridge structures. Based on synthetic ground earthquake motion, the failure mechanism and structural deformation characteristics of bridges are studied, the application and influence of seismic resistance of near-fault bridges are summarized, and the research direction of seismic resistance of near-fault bridges is prospected. The results show that the structural response caused by the near-fault ground earthquake motion with slip effect pulse is much greater than that caused by the near-fault ground earthquake motion with directional effect pulse by extracting the pulse components of the earthquake wave. When both the slip effect and the directivity effect reach the peak of the pulse, the structural response is the most obvious, causing serious earthquake damage. The permanent displacement of the displacement caused by the ground earthquake motion with the sliding effect pulse will further aggravate the earthquake damage. The viscoelastic artificial boundary can apply seismic loads to the substructure joints, and the time course analysis results are closer to reality. The results can provide effective support for the earthquake design and safety assessment of bridge engineering.

Key words: near-fault bridge; synthetic ground earthquake motion; bridge seismic resistance; seismic performance; failure mechanism; seismic design

地震是最具破坏力的自然灾害之一,对桥梁结构的抗震性能提出了巨大挑战。在近断层地区,

收稿日期: 2023-12-09

作者简介: 王燕航(1997—),男,硕士研究生,从事桥梁抗震方面的研究。

通信作者: 刘 浪(1985—),女,副教授,从事桥梁抗震等方面的研究。

地震发生时断层周围的地面运动变形更加剧烈, 对桥梁的安全性和稳定性产生更为重要的影响。目前与近断层地震动相关联的问题仍难以解决^[1-3]。近断层桥梁是指靠近或在地震断层范围内的桥梁, 其承受的近断层地震动具有明显的长周期、大幅值速度脉冲^[4-7], 这会使桥梁产生较大的地震动力响应和结构破坏^[8]。1999 年台湾集集地震、2010 年新西兰基督城地震等震害表明, 近断层地震的特殊地震波和高强度地震动, 可能导致桥梁受到严重破坏(结构的倒塌、侧向位移、扭曲等), 造成人员伤亡和交通中断等严重后果。

人工合成地震动已成为桥梁荷载模拟的重要手段。人工合成地震动最早的探路者是日本, 日本作为一个建在断层线上的国家, 积累了大量的近断层地震数据。20 世纪, 日本最先使用数学方法和地震信号处理技术合成和模拟地震动, 用于结构的抗震性能评估和设计。中国在人工合成地震动方面的研究起步较晚, 于 20 世纪 90 年代才开始近断层桥梁抗震人工合成地震动的相关工作, 之后建立国家地震科学数据中心(national earthquake data center, NEDC)。目前, 针对人工合成近断层桥梁地震动的难点在于真实数据较少、结构响应非线性、各地震波之间的相关性和相干性、断层结构空间的复杂性、震源和场地特征的多样性^[9]。本文通过对具有不同脉冲效应近断层地震动的结构响应分析, 以期近断层地区跨断层桥梁抗震设计和抗震震害设防提供一定的借鉴与参考。

1 近断层地震

1.1 特性

近断层地震一般指断层距小于 20 km 范围内的区域地震事件。断层是地壳中的断裂带, 当两侧板块在地壳运动中相互滑动积累应变能, 而应变能积累到一定程度时, 会引发断层滑动, 产生地震。事实上, 近断层地震动是在一次强震中, 由断层破裂带两侧位置所记录到的非常接近的一组地面观测点的地震动。根据断层面的运动方向和滑动方式, 近断层地震可以分为正断层、逆断层和走滑断层(图 1), 其中正断层和逆断层均为倾滑断层(图 2)。

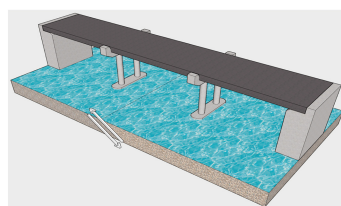


图 1 地震走滑断层

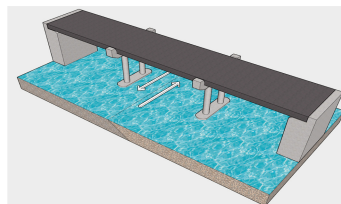


图 2 地震倾滑断层

1.2 研究方法

以 1999 年台湾集集地震为例, 断层附近的桥梁震害主要表现为桥墩和桥台损伤、主梁碰撞和落梁、支座和减隔震及限位装置损伤、全桥局部或连续倒塌^[10]。了解和掌握近断层地震的产生原理, 对于加强地震防灾意识和抗震建筑设计, 以及建立高效的地震监测和预警系统非常必要。近断层桥梁结构抗震分析涉及的主要问题是地震作用, 即近断层工程场地地震动的确定^[11]。地震动作用的结构响应等效分析: 1) 根据工程功能、安全需要、断层环境在已有的地震动数据库里选择接近的数据, 作为实际地震动输入桥梁结构模型; 2) 当现有数据库无符合实际工程项目的地震动数据时, 采用数学方法对真实地震动数据库进行叠加等效数学脉冲模型建立, 再根据工程实况进行参数调整, 将所得地震动输入桥梁结构模型; 3) 采用“分解+叠加”方法^[12], 通过叠加已有高频地震动脉冲和等效数学脉冲模型获得地震动。

2 人工合成地震动基本原理

基于数学模型和计算机模拟生成与实际地震事件类似的地震动信号, 比对和挑选出最适合的地震动数据, 其原理如下。

(1) 建立一个地震源模型, 描述地震发生的位置、规模和释放能量等关键参数, 并根据已知地震事件数据、震源机制和地震学理论进行模型分析。

(2) 地震波在地球内部传播的过程涉及地球结构、地震学参数以及介质特性等因素, 在不同介质中的传播速度和衰减特性等也需考虑。

(3) 基于地震源模型和介质传播模型, 使用数值计算方法来模拟地震波在地球内部的传播过程, 如建立和求解弹性波方程或应力强度方程。

(4) 从计算结果提取所需的地震动参数(如加速度、速度或位移等), 用于生成地震动时程, 用于表征结构的耐震性能。

(5) 人工合成的地震动时程需进一步的频谱调整, 包括地震动振幅、频率内容和持续时间等的调整, 以匹配结构的地震破坏机理。

为研究地震波在地球内部的传播过程, 万珂羽等^[13]利用相干性函数 Loh 模型和相干性曲线进行拟合对比, 相关函数如式(1)所示, 拟合如式(2)所示。

$$\gamma_{ij}(\omega) = \frac{\overline{S_{ij}(\omega)}}{\sqrt{\overline{S_{ii}(\omega)} \overline{S_{jj}(\omega)}}} \quad (1)$$

$$|\gamma(\omega, d)| = \exp[-(a + b\omega^2)d] \quad (2)$$

式中: i 和 j 为两个不同计算点; $\gamma_{ij}(\omega)$ 为 i 和 j 两点之间的相关函数; $\overline{S_{ii}(\omega)}$ 、 $\overline{S_{jj}(\omega)}$ 、 $\overline{S_{ij}(\omega)}$ 依次为平滑后的 i 点、 j 点自功率谱以及两点间互功率谱; d 为两计算点之间的距离, mm; ω 为频率, Hz。

3 近断层桥梁地震动模拟

3.1 人工边界建立

地震动模拟前应确定桥梁结构模型的人工边界。常见的人工边界有黏性边界和黏弹性边界。人工边界条件包含边界阻尼法、边界反射系数法和摄动法等。边界阻尼法通过在模拟区域边界设置合适的阻尼层或阻尼系数, 模拟无限大地震波场中的辐射衰减效应。边界反射系数法通过将边界处的反射波纳入计算, 实现边界处波动场的衰减。该方法通常使用边界反射系数来控制边界反射的程度。摄动法是一种基于变换的方法, 通过在边界附近引入特定的变换函数来消除或减小边界上的波动, 实现对边界效应的控制。何建涛等^[14]利用有限元软件 ABAQUS 对比黏性人工边界、黏弹性人工边界与远置边界随荷载变化的位移时程曲线, 得出黏弹性人工边界更加贴近远置边界。本文人工边界条件以边界阻尼为切入点进行模型人工黏弹性边界的布置。常规的黏弹性边界布置为在边界节点的法向和切向上设置并联的阻尼器和弹簧。相较于黏性边界, 黏

弹性边界的优势在于对边界节点的研究, 其分析结果更为精准且更贴近实况。黏弹性边界的建立, 关键在于在有限元软件 ABAQUS 或 ANSYS 等中输入适当的弹簧刚度和阻尼系数来设置人工边界上的弹簧-阻尼元件(图 3)。

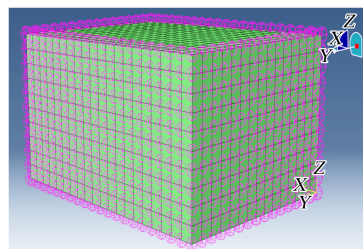


图 3 基于边界节点施加的弹簧-阻尼元件

地震动模拟之前需计算出边界上各节点的等效节点力 F_b (kN), 过程如式(3)所示。

$$F_b = (K_b u_b^f + C_b \dot{u}_b^f + \sigma_b^f) n A_b \quad (3)$$

式中: u_b^f 为节点自由场位移向量; $\dot{u}_b^f$ 为节点自由场的速度向量; σ_b^f 为节点自由场的应力张量; A_b 为节点的影响面积, m^2 ; K_b 、 C_b 分别为黏弹性边界的弹簧刚度和阻尼系数; n 为边界外法向余弦向量 $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$, 其中 α 、 β 、 γ 分别为边界外法向量与 x 轴、 y 轴、 z 轴所成的夹角。

根据谷音等^[15]对三维黏弹性边界的研究, 得出局部人工边界具有时空解耦的特性和较好的适用性, 计算耗时少。故本文采用局部人工边界, 模型选取如图 4 所示。在有限元软件 ABAQUS 中建立三维模型, 边界节点等效力如图 5 所示。

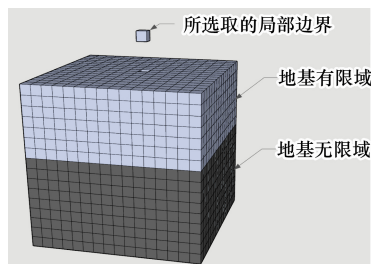


图 4 三维模型

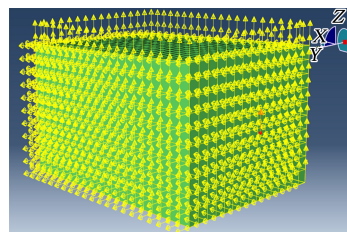


图 5 三维状态下边界节点等效力

3.2 地震动模拟方法

在早期的地震动模拟中, 研究人员通常根据特定地震事件的地震波数据, 利用地震动方程模拟地震波在地面或建筑物结构中的传播和影响。该模拟方式能有助于评估结构物的抗震性能, 指导制定地震安全标准和建筑设计规范。随着越来越多诸如近断层地震等复杂震况的桥梁工程出现, 选取特定的地震波数据模拟实际地震动的解决方案逐渐不再适用。合成地震动的思路: 目标工程区域, 地震相关参数→震源-传播路径-场地地震动模拟(平面层次)→时空分布地震动模拟(空间层次)→结构响应数据→利用破坏机理进行结构的抗震设计。地震动的模拟方法大体分为随机方法、确定性方法、混合方法^[16]。

3.3 地震动输入

参照 MAVROEIDI 等^[17]提出的跨断层地震动的合成方法, 结合“分解+叠加”方法^[12]的可行性, 采用底波叠加脉冲波的方法合成跨断层地震动, 系统分析跨断层地震动的脉冲特征。为保证桥梁结构的安全性, 采取最不利的高频脉冲进行叠加合成。根据河北省衡水市景县的抗震参数确定反应谱(图6), 并从 PEER 地震动数据库选取十

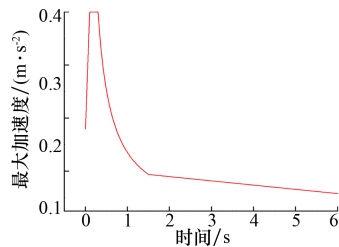


图6 目标反应谱

条无脉冲地震波数据($T_1 \sim T_{10}$), 以研究远场地震波(表1)叠加不同脉冲的结构响应。

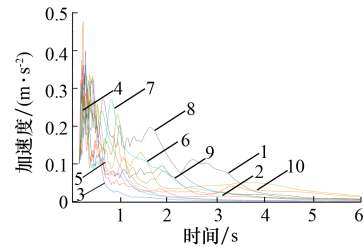
脉冲函数选用 MAKIS^[18]提出的速度脉冲模型, 具体如式(4)、(5)所示, 分别模拟脉冲型地震动的滑冲效应和方向性效应。

$$V(t) = \frac{v_p}{2} - \frac{v_p}{2} \cos(w_p t) \quad (0 \leq t \leq \frac{T_p}{2}) \quad (4)$$

$$V(t) = \frac{v_p}{2} \cos(w_p t + \frac{\pi}{2}) \quad (0 \leq t \leq \frac{T_p}{2}) \quad (5)$$

式中: v_p 为脉冲幅值, m/s; T_p 为脉冲周期, s; w_p 为频率, Hz。

经转换, 得到不同地震波对应的加速度反应谱, 如图7所示。由图7可知: 10条地震波的矩震级接近, 但地震波的幅值差异较大, 在相同地震事件中, 地面位移参数总体随断层距成正比。同时, 受震源机制等因素的影响, 地震中矩震级和断层距相同的地震波也会表现出不同的响应特征。



1— T_1 ; 2— T_2 ; 3— T_3 ; 4— T_4 ; 5— T_5 ;
6— T_6 ; 7— T_7 ; 8— T_8 ; 9— T_9 ; 10— T_{10} 。

图7 不同地震波的加速度反应谱

根据已选的10条远场地震波, 选取 t_1 为 $2t_2$ 为 $4t_3$ 为 $6s$ 的3个时间参考点, 分别将远场天然波所对应的加速度谱值与目标反应谱比对, 结

表1 远场地震波基本参数

编号	地震事件	阿里亚斯 强度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	断层距/km	矩震级	峰值地面加 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值地面加 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	峰值地面 位移/m
T_1	Parkfield	0	17.64	6.19	0.053 6	0.004 7	0.002 0
T_2	Parkfield	0	9.58	6.19	0.145 8	0.007 2	0.002 2
T_3	Lytle Creek	0	22.94	5.33	0.060 4	0.002 7	0.000 2
T_4	Lytle Creek	0	12.14	5.33	0.144 5	0.008 7	0.001 3
T_5	San Fernando	0	22.63	6.61	0.320 5	0.017 4	0.002 3
T_6	San Fernando	0	22.77	6.61	0.224 8	0.022 1	0.016 2
T_7	San Fernando	0	27.40	6.61	0.105 4	0.011 8	0.004 5
T_8	San Fernando	0	28.99	6.61	0.112 1	0.014 0	0.004 5
T_9	San Fernando	0	25.47	6.61	0.097 5	0.007 8	0.002 4
T_{10}	San Fernando	0	24.87	6.61	0.154 9	0.011 0	0.009 5

果如表 2 所示。由表 2 可知：地震波 $T_2 \sim T_4$ 所对应的反应谱可作为叠加脉冲的底波。

表 2 远场地震波反应谱与目标谱对比

反应谱组别	t_1	t_2	t_3
目标值	0.009 4	0.007 8	0.006 2
T_1	0.035 7	0.011 2	0.003 4
T_2	0.027 7	0.014 1	0.004 0
T_3	0.003 1	0.000 8	0.000 4
T_4	0.015 5	0.003 5	0.001 6
T_5	0.041 1	0.007 9	0.003 3
T_6	0.079 5	0.106 9	0.034 2
T_7	0.066 6	0.011 7	0.005 4
T_8	0.116 3	0.019 3	0.006 5
T_9	0.066 0	0.009 9	0.004 1
T_{10}	0.043 2	0.007 9	0.019 5

以 T_2 波为例，分析不同震况时的合成地震波，第一种为叠加 10 s 滑冲脉冲，第二种为叠加 10 s 方向性脉冲。原始加速度时程、速度时程、位移时程如图 8 所示，叠加 Makris 速度脉冲模型的加速度时程、速度时程、位移时程如图 9、10 所示。由图 8~10 可知：相较于原始天然波，后两者的加速度时程曲线在整个地震波周期范围内差异不大。从位移时程曲线来看，由于其值由速

度函数积分所得，积分过程中引入了常数，3 种情况下的位移时程图差异较大，地震位移在整个地震周期内始终维持在高位。侧面证实了滑冲效应地震波会引起不消散的位移，且这部分永久位移不会随地震波消散而骤减，这也正是滑冲效应脉冲地震比方向性效应地震的震害更严重的原因。

4 结论与展望

较于远场地震动，近断层地震动所造成的结构位移和内力更大，而当前的人工合成近断层地震动模拟却未能准确预测地震波形特征。地震动输入研究一般采用一致激励，忽略了跨断层桥梁在传播过程中由于受多种地质和介质条件的影响产生的多种地震波，且选取的地震动数据离断层较远，不能直接揭示地震波在地球内部传播过程的相干性和相关性。地震动分析常采用分项分析法，忽略了地震波在不同介质中的传播会受到多尺度效应的影响，引起结构不同程度的响应。地震波在土层中的折减和放大的研究并不完善，未能明确提出断层空间变化特征的计算和推理式，容易忽略断层处的永久位移所引起的震害。

鉴于现有地震动模拟方法的不足，人工合成

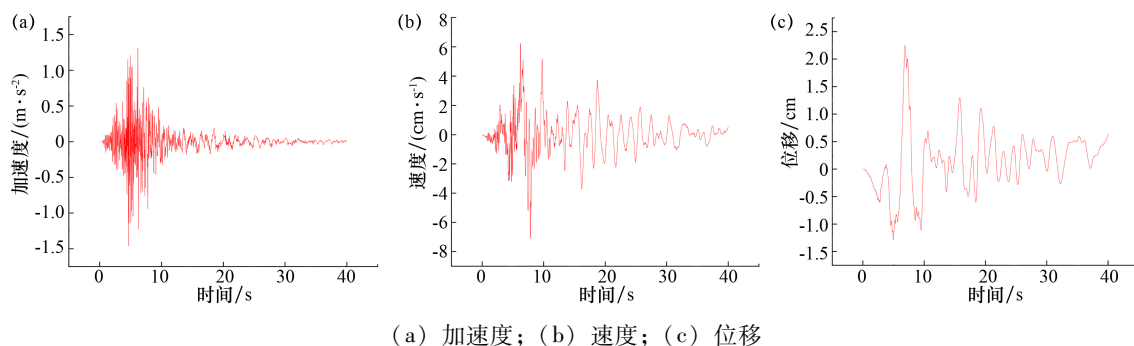


图 8 原始加速度、速度、位移时程

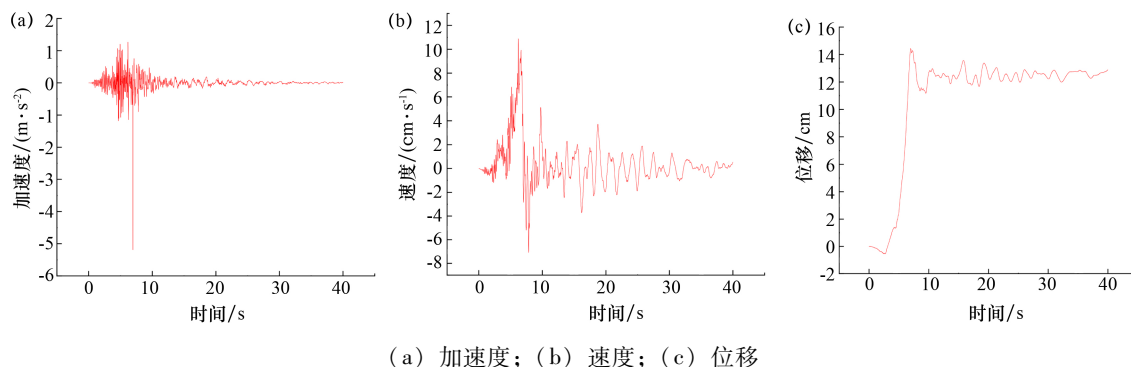
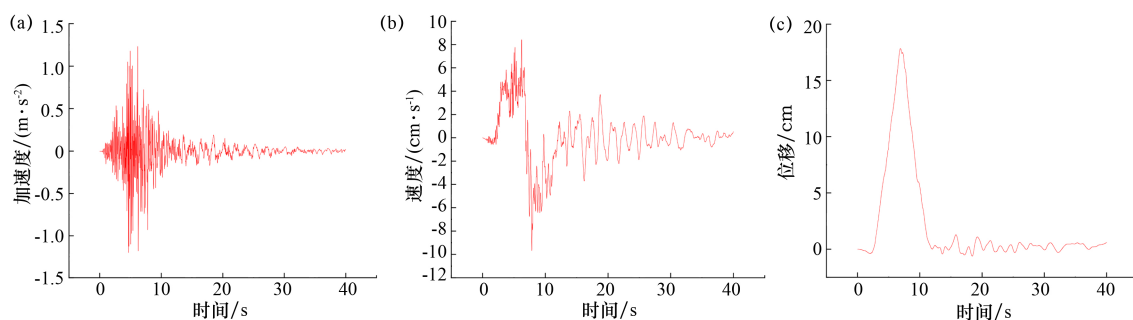


图 9 合成滑冲效应脉冲后的加速度、速度、位移时程



(a) 加速度; (b) 速度; (c) 位移

图 10 合成方向性效应脉冲后的加速度、速度、位移时程

地震动模拟的改进可沿多维度考虑震源机制和断层空间变化发展。震源机制产生的地震效应很大程度上决定了断层的性质。地震动数据库的建设很大程度上决定了未来人工合成地震动模拟的走向和进程。随着未来震源物理模型的不断丰富,也将完善人工合成地震动发展。

参考文献:

- [1] MOLLAIOLI F, BOSIA. Wavelet analysis for the characterization of forward directivity pulse like ground motions on energy basis [J]. *Meccanica*, 2012, 47 (1): 203 – 219.
- [2] MUKHOPADHYAY S, GUPTA V K. Directivity pulses in near fault ground motions-I: Identification, extraction and modeling [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 2 (1): 38 – 52.
- [3] SEHHATI R, ADRIAN R M, MOHAMED E. Effects of near fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33 (1): 767 – 779.
- [4] 李英民, 杨溥, 夏洪流, 等. 地震动频率非平稳特性对弹性反应谱的显著性影响分析 [C] // 第五届全国地震工程会议论文集 (I). 北京: 中国建筑学会, 1998: 482 – 488.
- [5] 朱瑞广, 吕大刚. 基于 Copula 函数的主余震地震动强度参数相关性分析 [J]. *工程力学*, 2019, 36 (2): 114 – 123.
- [6] ZHANG Y T, OUYANG X Y, SUN B Y, et al. A comparative study on seismic fragility analysis of RC frame structures with consideration of modeling uncertainty under far-field and near-field ground motion excitation [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2022, 20 (3): 1455 – 1487.
- [7] TODOROV B, BILLAHAM. Seismic fragility and damage assessment of reinforced concrete bridge pier under long-duration, near-fault, and far-field ground motions [J]. *Structures*, 2021, 31: 671 – 685.
- [8] 宗周红, 林元铮, 林津, 等. 跨断层地震动及其对桥梁结构影响研究进展 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36 (1): 80 – 96.
- [9] 盛兆琦, 胡进军, 谢礼立. 跨断层工程输入地震动模拟及其应用研究进展 [J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43 (1): 1 – 13.
- [10] 曹宁宁, 李淑慧. 桥梁抗震设计与加固技术探讨 [J]. *河南建材*, 2020 (4): 22 – 23.
- [11] 李小军, 孙静怡, 王宁, 等. 不同地震作用输入模式的跨断层桥梁地震反应分析 [J]. *震灾防御技术*, 2023, 18 (2): 203 – 214.
- [12] 李帅, 张凡, 颜晓伟, 等. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30 (2): 86 – 97; 106.
- [13] 万珂羽, 孙晓丹. 合成地震动空间相干性的震源机制影响 [J]. *自然灾害学报*, 2022, 31 (1): 137 – 146.
- [14] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现 [J]. *水利学报*, 2010, 41 (8): 960 – 969.
- [15] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元 [J]. *工程力学*, 2007 (12): 31 – 36.
- [16] 王海云, 谢礼立. 近断层地震动模拟现状 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23 (10): 1043 – 1049.
- [17] MAVROEIDIS G P, PAPAGEORGIOU A S. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93 (3): 1099 – 1131.
- [18] MAKRI S N, CHANG S P. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures [J]. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2000, 29 (1): 85 – 107.