

基于地震动数值模拟的交通系统震害预测

崔朝阳

河北工程大学土木工程学院

DOI:10.12238/etd.v6i1.11743

[摘要] 本文系统探讨了地震动数值模拟方法及其在交通系统震害预测中的应用。首先,简要介绍了地震动数值模拟方法,包括随机方法、确定性方法和混合方法,分析了其优缺点及适用场景。其次,针对桥梁、公路、铁路和地铁等交通基础设施,综述了地震动模拟的研究现状,重点探讨了不同设施在地震动作用下的响应特征及震害预测方法。研究表明,桥梁需关注局部场地效应和结构动力响应;公路和铁路需考虑地震动场的空间变异性;地铁则需结合三维传播特性及土-结构相互作用。重点论述了有限断层法在地震动模拟中的应用。该方法通过划分分子断层,结合震源机制、传播路径和场地效应,能够有效模拟地震动的空间变异性和时程特性,尤其适用于区域尺度的交通系统震害预测。为交通系统震害预测提供了理论支持,对提升基础设施抗震能力具有重要意义。

[关键词] 地震动数值模拟; 交通系统; 震害预测; 有限断层法

中图分类号: U491 文献标识码: A

Seismic damage prediction of traffic system based on ground motion numerical simulation

Zhaoyang Cui

School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering

[Abstract] In this paper, the numerical simulation method of ground motion and its application in the prediction of earthquake damage in transportation system are systematically discussed. Firstly, the numerical simulation methods of ground motion, including stochastic method, deterministic method and mixed method, are briefly introduced, and their advantages and disadvantages and applicable scenarios are analyzed. Secondly, for transportation infrastructure such as bridges, highways, railways and subways, the research status of ground motion simulation is reviewed, and the response characteristics and seismic damage prediction methods of different facilities under the action of ground motion are emphatically discussed. The results show that the bridge needs to pay attention to the local site effect and structural dynamic response. Roads and railways need to consider the spatial variability of ground motion fields; The subway needs to combine three-dimensional propagation characteristics and soil-structure interaction. The application of finite fault method in ground motion simulation is emphatically discussed. By dividing sub-faults, combining the source mechanism, propagation path and site effect, this method can effectively simulate the spatial variability and time history characteristics of ground motion, and is especially suitable for seismic damage prediction of transportation system at the regional scale. It provides theoretical support for the prediction of seismic damage in transportation system, and is of great significance for improving the seismic resistance of infrastructure.

[Key words] Numerical simulation of ground motion; Traffic system; Seismic damage prediction; Finite fault method

引言

在全球范围内,地震是一种拥有极大破坏力的灾害,对交通系统的运行构成了严重威胁。交通系统作为社会经济运行的动脉,其在地震中的受损情况不仅直接影响救援工作的开展,还会对震后地区的经济恢复和社会稳定产生深远影响^[1]。因此,准确

预测交通系统在地震中的震害情况,对于提升交通系统的抗震能力、制定科学合理的防灾减灾策略以及保障震后救援和恢复工作的顺利进行具有至关重要的意义。

目前,地震动模拟的主要方法有3种,有确定性方法,随机性方法和宽频带模拟方法^[2]。确定性方法基于对地震波传播物理

过程的精确描述和已知的地质模型参数进行地震动模拟。它通过建立精确的数学模型,如波动方程,结合具体的地质构造、岩石物理参数等,来准确计算地震波在介质中的传播路径、速度、振幅和相位等信息。例如,在已知地下介质的弹性参数(弹性模量、泊松比等)和密度分布的情况下,利用确定性方法可以精确模拟地震波在该介质中的传播情况。这种方法的优点是能够提供较为准确的地震动预测,对于特定的地质条件和地震场景,可以给出详细的地震动时程和频谱特性。然而,其局限性在于对输入参数的准确性要求极高,实际的地质条件往往非常复杂,存在大量的不确定性因素,如地质构造的复杂性、岩石参数的空间变异性等,这些因素难以精确获取和描述,从而限制了确定性方法的广泛应用。

随机性方法则是考虑到地震波传播过程中的不确定性因素,采用概率统计的方法来模拟地震动。它通过对大量的地震记录进行分析,建立地震动参数的概率分布模型,然后利用随机抽样的方法生成符合该概率分布的地震动时程。例如,随机振动理论在地震动模拟中的应用,通过将地震动视为随机过程,利用功率谱密度函数来描述地震动的频谱特性,再通过随机相位的叠加生成地震动时程。随机性方法的优势在于能够考虑到地震动的不确定性,对于评估地震风险和结构的可靠性具有重要意义。而且计算效率相对较高,不需要对复杂的地质模型进行精确建模。

宽频带模拟方法旨在同时准确模拟地震动的低频和高频成分。地震波包含了丰富的频率成分,不同频率成分对工程结构的影响不同,低频成分主要影响结构的整体响应,而高频成分则对结构的局部细节和材料损伤等有重要影响。宽频带模拟方法通常结合了多种模拟技术,如在低频段采用基于波动理论的确定性方法,以准确描述地震波的传播和结构的整体响应;在高频段则采用随机方法或经验格林函数法等,考虑高频成分的不确定性和局部效应。例如,通过将有限元法与随机振动理论相结合,在低频段利用有限元法精确计算地震波传播,在高频段利用随机振动理论生成高频地震动分量,从而实现宽频带的地震动模拟。这种方法能够更全面地反映地震动对工程结构的作用,为工程结构的抗震设计提供更合理的地震动输入。

1 交通系统地震动模拟研究现状

1.1 桥梁结构

桥梁作为公路交通的关键节点,其在地震中的安全性至关重要。地震动数值模拟借助先进的有限元软件,能够建立精细化的桥梁有限元模型,全面模拟不同地震波作用下桥梁的动力响应^[3]。对于大跨度斜拉桥,通过数值模拟可以深入分析主梁、桥墩和拉索等关键部位的应力应变分布,从而有效预测在强震下可能出现的拉索断裂、桥墩开裂等震害情况。研究人员利用地震动数值模拟,对某地区多座桥梁进行分析,结果发现位于软土地基上的桥梁,在地震时由于地基土的软化和液化,桥墩底部所受弯矩和剪力显著增加,更易发生破坏,为桥梁抗震加固提供了科学依据。

1.2 公路结构

公路路基和路面在地震作用下极易出现滑坡、塌陷、开裂等病害。地震动数值模拟能够综合考虑场地的地质条件、地震波特性和路基路面材料特性等多方面因素,深入分析地震时路基土体的变形和稳定性。在山区公路,由于地形复杂,地震动传播受到山体地形的影响,通过数值模拟地震动在复杂地形中的传播,能够精准预测因山体滑坡导致的路基掩埋和路面破坏位置,从而提前制定防范措施。在软土地区,模拟可评估地震引起地基沉降对路面平整度的影响,为震后公路的快速修复和恢复交通提供了重要指导。比如,在某软土地区的公路建设中,依据数值模拟结果,在设计阶段就采取了加固地基、设置排水系统等措施,以减少地震对路基路面的损害。

1.3 地铁结构

城市地铁作为城市交通的重要组成部分,其抗震安全不容忽视。地震动数值模拟可建立地铁车站的三维模型,充分考虑车站结构与周围土体的相互作用,全面分析地震时车站顶板、侧墙和底板的受力情况,预测结构的薄弱部位和可能出现的破坏形式,如墙体开裂、柱体破坏等。对于区间隧道,模拟能深入研究地震波传播引起的隧道衬砌变形和内力变化,评估隧道在地震中的稳定性。例如,在地铁线路穿越富水砂层区域的震害预测中,通过数值模拟考虑了砂土液化对隧道的影响,为采取有效的抗震加固措施提供了依据。

2 有限断层法在地震动模拟中的应用

地震动的三个关键因素是震源、传播路径和局部场地,近断层地震动模拟需要解决震源模型、地壳内的地震波传播和复杂场地影响等三个问题。为了能够成功模拟大震近场的地震动,Beresnev和Atkinson提出了随机有限断层法。随机有限断层法是一种基于物理的地震动模拟方法,通过将地震断层划分为多个子断层,分别模拟每个子断层的地震动贡献,最终叠加得到整个断层的地震动场。该方法结合了地震震源机制、传播路径和场地效应,能够生成符合实际地震动特征的时间序列,适用于区域尺度的地震动场模拟。

在有限断层法里,每个子源通常需要多次触发,以此确保整个地震的地震矩守恒。不过,该方法的模拟结果严重受制于子源尺寸,而且并不适用于中小地震的模拟。鉴于此,Motazedian和Atkinson对有限断层法加以改进,提出了动力学拐角频率这一概念。动力学拐角频率的诞生,让每个子断层拥有了各不相同的拐角频率。在地震波从震源向四周扩散期间,破裂起始点子断层的拐角频率最高,随着破裂面不断延伸,拐角频率逐步降低。当所有子断层都完成破裂时,动力学拐角频率降至最小值,也就是静力学拐角频率,这个数值由整个断层面的地震矩和应力降计算得出。与此同时,Motazedian和Atkinson在震源谱中加入高频标定因子,目的是保证远程辐射能守恒,还消除了子断层尺寸划分等人为因素对模拟结果的干扰。由于随机有限断层法理论通俗易懂,所以成为地震工程领域广泛运用的近场高频地震动模拟方法,并且经证实是模拟高频地震动最为行之有效的方法。

随机有限断层法把地震动时程在频域看成是具有有限带宽和有限持时的高斯白噪声,以此来体现地震动的随机特性。然后,结合考虑震源、传播路径以及场地条件的确定性幅值谱 $E(M_0, R, f)$,通过傅里叶逆变换获得地震动时程。图1以合成加速度时程为例,简要介绍了点源地震动随机模拟方法的主要流程。

在应用该方法合成地震动的过程中,关键就在于合理确定目标场点描述震源特性、传播路径效应和局部场地效应的傅里叶幅值谱:

$$E(M_0, R, f) = S(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \cdot I(f)$$

式中, M_0 代表地震矩; f 指的是频率; R 表示距离; $S(M_0, f)$ 作为震源谱函数,用于刻画震源能量的辐射特性,在模型中通常会采用 ω 平方模型; $P(R, f)$ 是传播路径函数,其作用是描述地震波在介质传播期间,因几何扩散以及非弹性衰减所引发的地震波幅值与持时的改变; $G(f)$ 为场地效应函数,它所描述的是因场点地形条件以及土壤特性,致使地震波幅值与频谱产生的变化; $I(f)$ 为地震动类型函数,决定着模拟地震动时程的参数类型为加速度、速度或位移。

震源模型主要分为运动学和动力学这两大类别。运动学模型着重关注断层的几何特性,像断层的尺寸大小、具体位置、位错分布状况、破裂传播的速度以及方式等都在其研究范畴内。而动力学模型是以初始应力场以及断层面岩石的破裂强度为基础,依据特定的准则来解析断层面的破裂过程以及地震动场。除此之外,震源模型还进一步细分为全局震源参数与局部震源参数。

全局参数包含了断层的破裂面积、长度、宽度、埋深、平均滑移量、平均破裂速度、破裂方式以及起始位置等内容。这些参数体现了地震破裂的宏观特征,并且通过定标律来阐述地震参数之间的相互关系。局部参数主要聚焦于断层面滑移的不

均匀性,其中包括凹凸体参数以及 k_2 参数。王海云经过对全球地震数据的分析,推导出了全局与局部震源参数的半经验或半理论的数学表达式,这为构建有限断层混合震源模型提供了重要的理论支持。

在确定了全局震源参数以及凹凸体等参数之后,把断层面划分成若干个小格($2M \times 2N$),让凹凸体所在区域的位错量等同于其平均位错量。借助傅里叶变换,将空间域转变为波数域,从而得到确定性部分的滑移量。每个小格在波数域上的随机滑移量,则运用具有随机相位的 k_2 模型来进行计算。把确定性部分与随机性部分的滑移量相加之后,再转换回空间域,如此便能够得到混合震源模型。这种方法将数学理论与半经验或半理论的统计关系式相结合,能够对特定震级的震源模型作出预测。

3 结语

通过随机有限断层法合成区域内的地震动场对交通系统进行震害预测模拟,可以充分考虑地震动在区域内的空间变化。利用该方法模拟地震动,获取不同位置处的地震动参数,进而结合公路网络结构特点和力学性能,评估不同路段和桥梁节点在地震作用下的损伤状态和破坏概率,为区域公路网络的抗震规划、加固设计以及震后应急救援提供科学依据。

[参考文献]

- [1]杨翰雯.区域公路网络地震韧性分析[D].中国地震局工程力学研究所,2019(01).
- [2]党鹏飞,刘启方,王冲,等.地震动随机有限断层模拟方法综述[J].地震工程与工程振动,2020,(06):131-139.
- [3]郑庆涛,苏俊省,李忠献.考虑地震动空间效应的斜拉桥模型振动台台阵试验[J].地震工程与工程振动,2024,(05):50-60.

作者简介:

崔朝阳(2000--),男,汉族,河北省邯郸市人,硕士研究生,主要从事公路工程抗震研究。