

文章编号:1007-4708(2014)04-0486-09

考虑地震动多点激励与材料应变率效应的主跨 300 m 级独塔斜拉桥弹塑性分析

柳国环^{*1,2}, 陆新征², 国巍³, 李敏⁴
孙雪艳⁵, 吕伟荣⁶, 全伟⁷

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;
3. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075; 4. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院, 大连 116023;
5. 北京金土木软件技术有限公司, 北京 100048; 6. 湖南科技大学 土木工程学院, 湘潭 411201;
7. 铁道第三勘察设计院 桥梁处, 天津 300142)

摘要:建立主跨 300 m 级独塔斜拉桥 MIDAS/Civil 空间有限元模型, 开发 Civil 2MARC 可视化接口程序, 进而将 MIDAS/Civil 模型转入 MSC. MARC 程序中并检验了模型转化前后的一致性。然后, 开发了基于地表功率谱的地表多点地震动生成理论的多点地震动可视化软件 MEMS_b (Multiple Earthquake Motions Simulation b)。进而说明了适用于多点位移-速度计算模型的相对精确性和容易实现的优势, 并与 MSC. MARC 程序相结合应用于该桥梁的多点激励分析。最后分析了该桥梁地震作用下的薄弱环节与弹塑性反应, 并研究多点输入和材料率效应对桥梁地震反应的影响规律。结果表明: (1) 开发的可视化接口程序 Civil2MARC 界面便于操作, 运行稳定, 转化高效且结果可靠; (2) 开发的可视化多点地震动生成程序 MEMS_b 界面友好, 参数设置灵活且结果有效; (3) 位移-速度多点计算模型理论完备, 并可通过 MSC. MARC 程序对位移-速度多点计算模型加以实现; (4) 解释并给出了应变率效应和多点地震动对该斜拉桥的塑性铰首次出现时间、位置以及计算末态塑性铰分布的影响规律。本文涉及到理论模型、程序开发及应用计算, 可为相关工程提供参考。

关键词:斜拉桥; MIDAS; Civil2MARC; MSC. MARC; 多点地震动; 弹塑性; 应变率

中图分类号: P315.9; U442 **文献标志码:** A **doi:** 10.7511/jslx201404012

1 引言

事先对结构在地震作用下的动力反应进行数值计算, 是把握结构动力特性与保障结构安全性的一种有效方法。结构的动力反应主要取决于三个方面: (1) 地震动输入; (2) 结构模型; (3) 分析方法及计算工具。对于独塔大跨斜拉桥结构形式, 本文综合考虑到多点地震动输入、有限元模型的快速建立、位移-速度的多点理论模型实现以及材料应变率效应, 研究地震作用下的斜拉桥结构体系的塑

性出现及发展的路径。图 1 是以流程图方式给出了相关内容。

有限元模型建立方面。MIDAS/Civil 是针对桥梁结构的分析软件之一, 前处理建模具有特色优势并在工程单位普及性较好; 但是, 核心程序对复杂结构动力弹塑性分析、失效与破坏的判断, 目前仍处于发展阶段。相比之下, MARC (MSC. MARC) 是致力于非线性分析的大型通用商业有限元软件。核心程序的分析能力十分强大且具有可用于二次

收稿日期: 2012-09-26; 修改稿收到日期: 2013-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(90815025); 国家自然科学基金(51178249, 50938008, 51108466); 中国博士后科学基金(2011M500332)资助项目.

作者简介: 柳国环* (1980-), 男, 博士, 副教授

(E-mail: liugh@tju.edu.cn);

陆新征(1978-), 男, 博士, 教授;

国巍(1982-), 男, 博士, 副教授;

李敏(1981-), 女, 博士, 讲师;

孙雪艳(1980-), 女, 硕士, 工程师;

吕伟荣(1974-), 男, 博士, 副教授;

全伟(1979-), 男, 博士, 高级工程师.

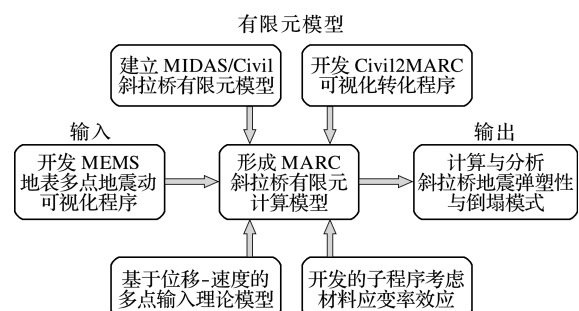


图 1 多点激励下基于 MARC 的斜拉桥弹塑性分析流程图
Fig. 1 Flowchart for elasto-plasticity and collapse analysis of bridge subject to multi-point ground motions using MARC

开发的用户子程序(User Subroutine)的开发功能,但是与 MARC 自身的计算能力相比, MARC 前处理的友好性并不足以满足工程技术人员的需要。因此,针对 MIDAS/Civil 与 MARC 各自的优势。本文开发了 Civil2MARC 可视化模型转化接口,以充分利用已经建立成功的 MIDAS/Civil 模型,通过 Civil2MARC 生成 MARC 格式文件,从而避开 MARC 建立模型的这一繁琐步骤。需要说明的是,由于 MIDAS/Civil 与 SAP 程序有较大区别,故 Civil2MARC 与 SAP2MARC^[1]的程序在编写逻辑与细节方面不同。

多点地震动生成方面。斜拉桥一般具有大跨几何特征。为便于应用,本文开发了可视化地表多点地震动程序 MEMS_b,其中相干函数可自由选择 Hao, H 模型^[2]、Wang, TJ 模型^[3,4]或 Harichandran, RS 模型^[5],拟合的规范反应谱分别依据现行公路桥梁规范^[6]、电力规范^[7]与建筑规范^[8]。需要说明的是,考虑到与当前规范要求相符合,编制程序中所采用的地表功率谱是基于我国当前规范^[6]规定的功率谱模型,而不涉及到基于震源机制的多点地震动理论相关的基岩功率谱^[9]。

多点计算理论模型方面。当前的多点激励理论模型一般会考虑到如下方法:加速度输入模型和位移输入模型。加速度输入模型由于涉及到叠加原理,因此适用于线性分析^[10];位移输入模型不仅适用于线性及非线性分析,而且适用于一致及多点输入。因此,备受研究者和工程人员青睐。位移输入模型的优势容易使得应用者忽视该理论模型自身的固有缺陷,文献[11]进一步分析了这一缺陷并给出了图解,文献[12]提出了理论严格的解决方法,文献[13]提出了无质量刚性元法,并分别应用于实际工程分析^[14,15],进而将底部刚性元法推广至土-结构相互作用的理论模型中^[16]。与上述四种理论模型相比,位移-速度计算模型很少受到关注,一方面是由于这四种理论模型的缺陷或不足之处尚未受到广泛关注而仍直接采用;另一方面是能够实现这四种理论模型的大型有限元软件(例如 ANSYS, SAP2000 等)应用较多、市场化普遍。事实上,位移-速度计算模型理论具有完善性,由于速

度项(在位移输入模型中该项忽略了)的存在而克服了位移输入模型的缺陷,但是可以实现这一理论模型的程序(例如 MSC.MARC)尚未在土木工程界得以广泛采用。简言之,与位移-速度理论模型相比,加速度模型限于线性分析;大刚度与大质量法需要刚度与质量的合理设置,而且需要通过改进方法方式以减少这两种方法所导致的误差;位移速度模型需要设置底部刚性元,以解决其固有缺陷。

材料的应变率方面。土木工程领域中,关于材料应变率因素对反应的影响早有研究^[17-20]。这些研究的面向对象主要集中于材料或构件层面,具有基础性。而对于大型结构体系而言,例如应变率对大跨斜拉桥结构体系反应的影响尤其是针对结构弹塑性及倒塌模式方面的研究较为少见。文献[21]开发了应变率子程序并通过试验加以验证,进一步结合文献[21,22]的成果共同应用于超高层的工程计算中^[1]。本文将应变率因素与多点地震激励同时考虑,并用于大跨斜拉桥的地震弹塑性分析。

2 桥梁模型、Civil2MARC 开发与验证

2.1 桥梁模型概述

独塔斜拉桥示意图如图 2 所示。索塔采用箱型截面,斜拉索共 112 根,主次桥墩为薄壁桥墩,厚度为 1.2 m,混凝土级别 C50,主梁腹板厚度为 0.24 m。

2.2 Civil2MARC 程序可视化开发

可视化 Civil2MARC 程序基于 Microsoft visual studio 开发环境采用 Visual C# 编制而成,界面如图 3 所示。图 3(a)为打开程序后的主界面。通过该主界面可以实现诸多功能,简介如下。

(1) 勾选图 3(a)所示的“材料”自动显示图 3(b)界面,可以设置模型所需要的 MARC 子程序材料名称和数量。

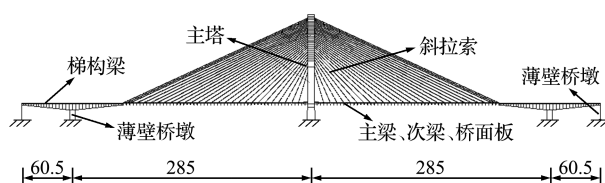


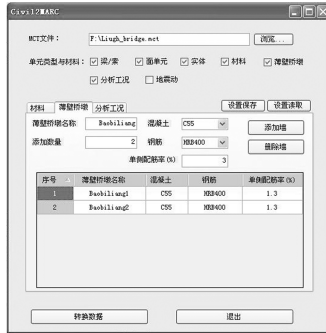
图 2 独塔斜拉桥示意图(单位:m)
Fig. 2 Schematic diagram of single tower cable-stayed bridge(unit:m)



(a) 转化程序 Civil2MARC 主界面



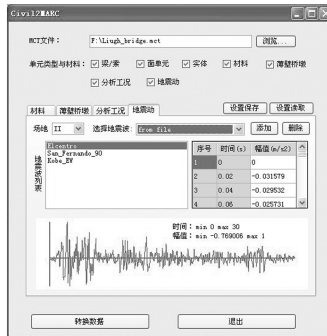
(b) 子程序名称



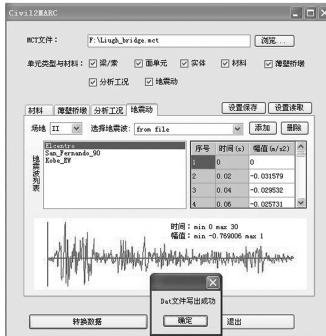
(c) 薄壁桥墩定义



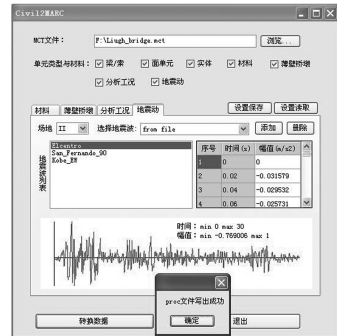
(d) 分析工况定义



(e) 地震动定义



(f) dat 文件成功



(g) proc 文件成功

图3 程序 Civil2MARC 可视化界面
Fig. 3 Visual interface of program Civil2MARC

(2) 勾选图 3(a)所示的“薄壁桥墩”自动显示图 3(c)界面,可以设置模型中通过壳单元模拟薄壁桥墩的名称、材料及配筋。

(3) 勾选图 3(a)所示的“分析工况”自动显示图 3(d)界面,可以设置重力分析、模态分析以及动力分析工况参数(包括作用方向)。

(4) 勾选图 3(a)所示“地震动”自动显示图 3(e)界面,可得地震波数据。

最后,通过点击“数据转化”按钮,成功转化后,会先后出现图 3(f,g)所示的“dat 文件写出成功”与“proc 文件写出成功”提示框。

2.3 Civil2MARC 准确性验证

为验证采用 Civil2MARC 转化模型的可靠性,对比转化前后的整体、局部模型以及模态分析分别进行了比较,如图 4 所示。从图 4(a,b)对比结果可以看出,模型通过 Civil2MARC 程序转化前后的一致性。从图 4(c)可以看出,模态分析结果相差

4.51%,进而说明模型转化前后数据的可靠性。在此应该说明。当前 MARC 程序对于模拟钢筋混凝土构件的 52 号单元不能显示构件的拉伸图而只是一条线,从而不能辨识模型转化前后的一致性。基于这一考虑,图 4(a,b)采用了可以体现拉伸图的钢构件来代替钢筋混凝土构件,旨在能够对比模型构件转化前后的一致性。后文涉及到的模态分析(图 4(c))与时程分析工况,仍为原结构模型。

3 目标场地多点地震动理论与程序开发

3.1 基本理论简述

选用可以考虑低频分量的 Clough-Penzien 修正过滤白噪声模型^[5,23]。采用 Cholesky 法生成地震动加速度,考虑非平稳性^[24]。本文是基于地表功率谱多点地震动模拟,不涉及震源机制问题^[9]。

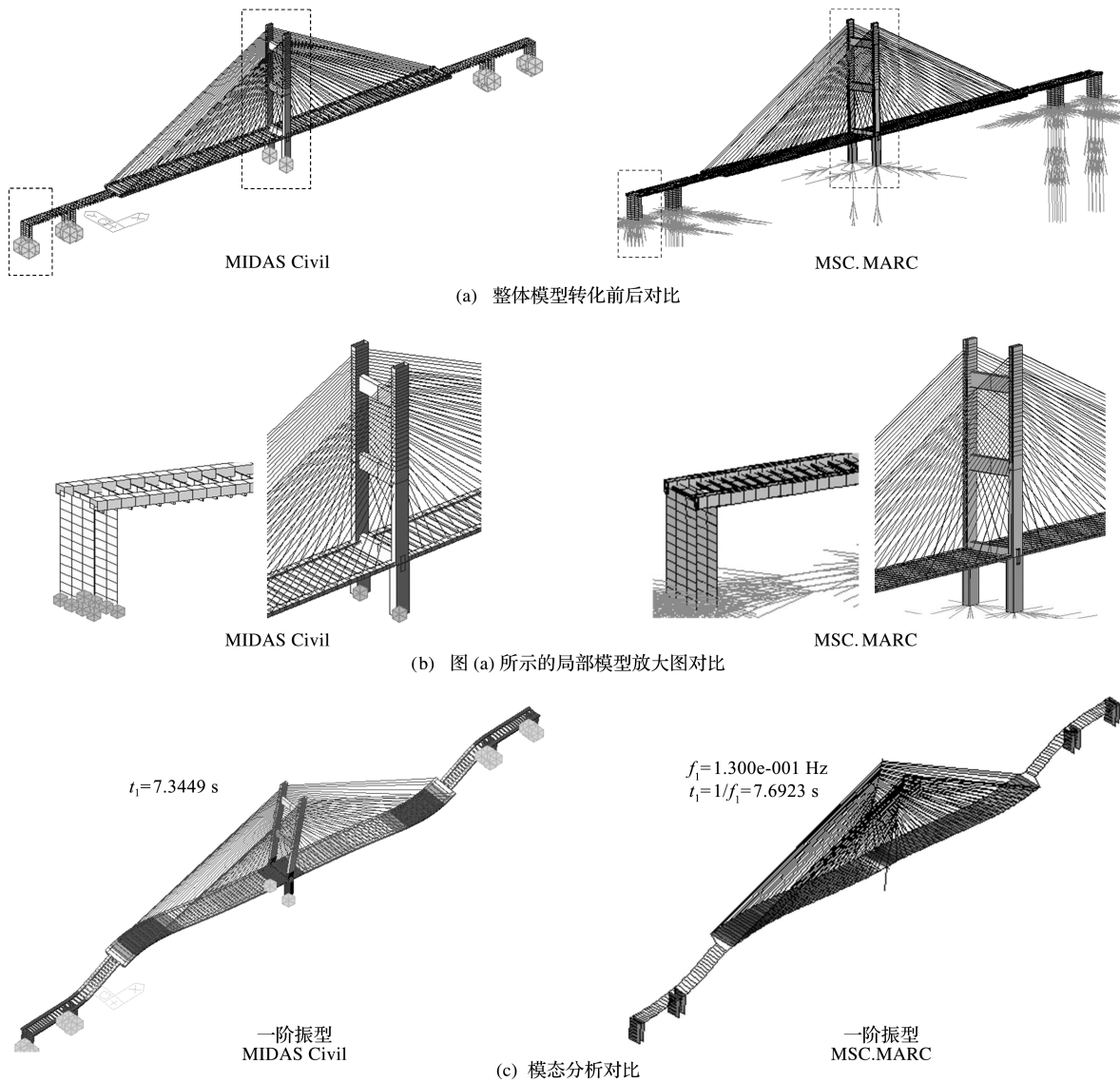


图4 MIDAS Civil与转化后的MSC.MARC模型对比

Fig. 4 Comparison between MIDAS Civil model and model transformed from MIDAS Civil to MSC.MARC

3.2 MEMS_b 可视化程序开发

本文编制了可视化程序 MEMS_b,如图5所示。

如图5界面所示,首先需要目标功率谱参数、支座点坐标、波速和包络函数参数,然后,选择相干函数模型与规范反应谱,最后点击运行命令“Run”计算。

工程位于II类场地,考虑8度罕遇,参数取值为 $\omega_g = 16.5$, $\xi_g = 0.79$, $\omega_f = 0.32$, $\zeta_f = 0.63$ 和 $S_0 = 0.28$ 。根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/TB 02-01-2008)选择反应谱参数。限于篇幅,图6仅给出点3(主塔支座位置)的计算结果。

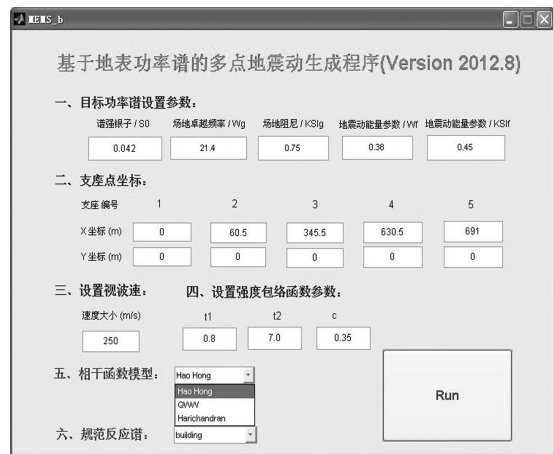


图5 基于地表功率谱的多点地震动可视化程序界面
Fig. 5 Visual Program visual interface for generating multiple earthquake motions simulation based ground power spectrum

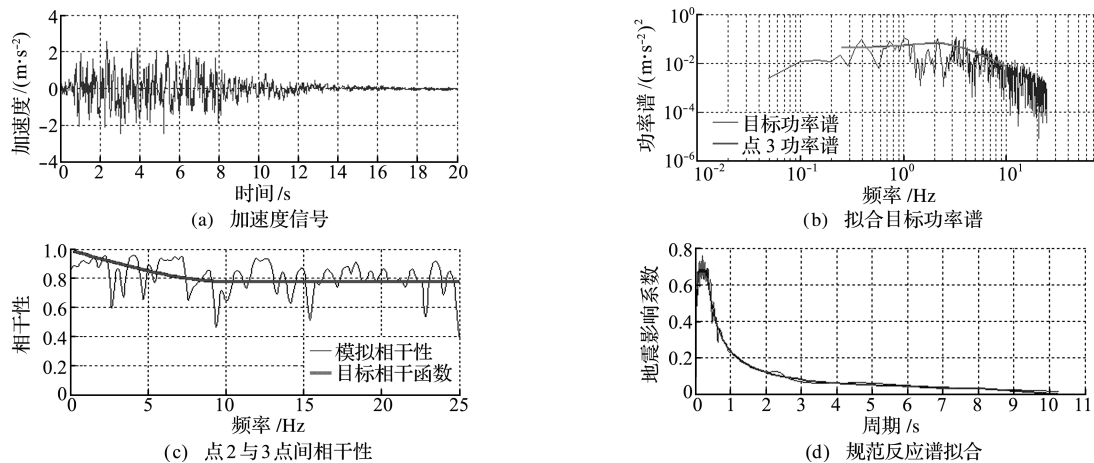


图6 采用 MEMS_b 的计算结果显示

Fig. 6 Graphic display of calculated results using MEMS_b

4 位移-速度多点模型、优势与实现

地震地面运动作用下的动力方程可表达为^[14]

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{X}_t = \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{X}}_s - \mathbf{K}_s \mathbf{X}_s \quad (1)$$

式中,具体参数与下标物理意义参见文献[14]。

选取瑞利阻尼 $\mathbf{C}_t = \alpha \mathbf{M}_t + \beta \mathbf{K}_t$, 并考虑集中质量矩阵耦合元素 $\mathbf{M}_s = \mathbf{0}$, 式(1)可进一步表达为

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{X}}_t + (\alpha \mathbf{M}_t + \beta \mathbf{K}_t) \dot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{X}_t = -\mathbf{K}_s \mathbf{X}_s + \beta \mathbf{K}_s \dot{\mathbf{X}}_s \quad (2)$$

式(3)为位移输入模型:

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{X}_t = -\mathbf{K}_s \mathbf{X}_s \quad (3)$$

位移-速度输入模型式(2)与常用的位移输入模型式(3)相比,由于速度项 $\beta \mathbf{K}_s \dot{\mathbf{X}}_s$ 的存在,可以克服位移输入模型固有的因单元尺寸划分过于精细所导致的问题。关于位移输入模型由该项导致的问题讨论,以及位移-速度模型等可详见文献[14,15,28]。

同位移输入模型相比,采用针对位移输入模型固有问题的底部刚性元方法即可以避免位移输入模型中的问题,可参考文献[14,15],只是在求解方程时需要同时获知地震动的位移与速度信号。在 MSC. MARC 中,这两种信号形式,可以通过两种途径实现,(1)加速度输入,程序自动通过积分和纠偏生成相应的速度和位移信号;(2)位移输入,程序自动求导一次生成速度信号。下文采用 MSC. MARC 程序进行多点激励。直接采用大刚度及大质量法对计算结果误差影响可详见文献[11,12]。

5 应变率与多点地震动对桥梁地震反应影响

主要考察一致输入(Case 1)、一致输入+应变率(Case 2)、多点输入(Case 3)和多点输入+应变率(Case 4)四种工况,并通过调整地震动峰值考察桥梁出现塑性铰的位置和时间,结果列入表1和表2。

由表1可知:

(1) 各种工况下,首次出现塑性铰的位置具有基本一致性,基本均出现在主塔墩顶位置(0.25 g, Case 4 出现在边跨主次梁),说明桥梁主塔墩顶部较为薄弱。

(2) 与不考虑应变率效应工况相比,考虑应变率效应后,首次出现塑性铰的时间滞后,说明了应变率效应有提高材料强度的作用,这与文献[24,27]的试验与程序编制结果相一致。

由表2可知:

(1) 与一致地震动输入工况相比,多点地震动输入下桥梁塑性铰出现位置较多(0.25 g 和 0.4 g)或进入塑性较强(0.8 g 和 1.0 g),说明地震动输入的不均匀性对结构体系最终进入塑性状态产生了不利影响。

(2) 地震动峰值较小时(0.25 g 和 0.4 g),与不考虑应变率效应相比,塑性铰出现得相对较少;说明,当地震动强度相对小时,应变率效应使材料强度提高,使结构进入塑性的部位减少。

(3) 地震动峰值较大时(0.8 g 和 1.0 g),与不考虑应变率效应相比,塑性铰出现位置虽然具有一致性但均未倒塌,可能是由于该桥跨度大,周期长(基本周期接近 8 s),地震动相对于结构而言是高频荷载作用于长周期结构,对结构高频振型分量产生作用,而对低频振型分量贡献小甚至为零。