

Bouc-Wen-Baber-Noori 滞回模型的参数敏感性分析

刘涛

(厦门大学建筑与土木工程学院 福建 厦门 361005)

摘要:本文以单自由度 Bouc-Wen-Baber-Noori(BWBN)弹塑性体系为研究对象,利用 MATLAB 求解地震荷载作用下的弹塑性时程响应,在 BWBN 模型滞回参数的取值区间内,通过拉丁超立方抽样,研究了各种滞回参数对单自由度体系动力时程响应(最大弹塑性位移、最大速度、非线性滞回位移和累积滞回耗能)的敏感性。研究结果表明 BWBN 单自由度体系的弹塑性动力时程响应对结构屈服前后的刚度比 α ,刚度退化参数 δ_η ,捏缩强度系数 q 具有较大敏感性。

关键词: Bouc-Wen-Baber-Noori 滞回模型;弹塑性时程分析;拉丁超立方抽样;敏感性分析

中图分类号: TU313.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-0038(2019)36-0072-02

0 引言

强震作用下,工程结构通常会发生屈服而进入非线性变形阶段,结构所受的力和变形不再具有比例关系,传统的线弹性分析理论不再适用。从简单到复杂,工程结构中常用的恢复力模型包括:理想弹塑性模型、双线性模型、Clough 模型、Takeda 三线性模型、Bouc-Wen 模型等^[1]。很多结构构件或消能减震设备的恢复力-位移滞回曲线会表现出明显的强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性^[2],Bouc-Wen 模型提出后经过多年的发展和改进,最新的 Bouc-Wen-Baber-Noori (BWBN) 模型可以很好的模拟以上滞回特性,所以在工程结构抗震设计和抗震性能评估方面得到广泛应用。

BWBN 模型一共有 13 个未知滞回参数,以往研究已证明参数 A 是冗余的,可以设置为 1。为了简化 BWBN 滞回模型的参数识别,本文以单自由度 BWBN 弹塑性体系为研究对象,通过 MATLAB 的 ode45 求解器求解其在地震荷载作用下的运动方程。在 BWBN 模型滞回参数的取值区间内,通过拉丁超立方抽样,分析各种滞回参数对单自由度 BWBN 体系最大弹塑性响应的敏感性。

1 基于 BWBN 模型的运动方程求解

基于 BWBN 滞回模型的单自由度体系的结构运动方程可以表述为:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \alpha\omega^2u + (1-\alpha)\omega^2z = -\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中: ξ -结构的阻尼比; ω -结构的自振频率; u -结构的位移; α -结构屈服前后的刚度比; \ddot{u}_g -地震动加速度; z -模型的非线性滞回位移:

$$\dot{z}(\dot{z}) = h(z) \frac{A\dot{u} - \nu|\beta|\dot{u}|z|^{n-1}z + \gamma\dot{u}|z|^n}{\eta} \quad (2)$$

式中: $\nu=1+\delta_\nu$, $\varepsilon, \eta=1+\delta_\eta$, δ_ν -刚度退化参数; δ_η -强度退化参数; $h(z)$ -描述

捏拢效应的函数:

$$h(z) = 1 - \zeta_1 \exp\left[-\left(\frac{z \operatorname{sgn}(\dot{u}) - qz_{\max}}{\zeta_2}\right)^2\right] \quad (3)$$

其中: $0 < \zeta_1 = \zeta_1 [1 - \exp(-p\varepsilon)] \leq 1$, $\zeta_2 = (\psi + \delta_\psi \varepsilon) (\lambda + \zeta_1)$; $\operatorname{sgn}(\dot{u})$ - 与速度 \dot{u} 相关的符号函数,当 $\dot{u} > 0$ 时为 1,当 $\dot{u} < 0$ 时为 -1; 累积耗能:

$$\dot{\varepsilon} = (1-\alpha)\omega_0^2 z \dot{u} \quad (4)$$

最大非线性滞回位移:

$$z_{\max} = \sqrt[n]{\frac{A}{\nu(\beta+\gamma)}} \quad (5)$$

令:

$$\begin{bmatrix} y_1(\dot{z}) \\ y_2(\dot{z}) \\ y_3(\dot{z}) \\ y_4(\dot{z}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(\dot{z}) \\ \dot{u}(\dot{z}) \\ z(\dot{z}) \\ \varepsilon(\dot{z}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

可将高阶运动方程转化为一阶偏微分方程组,然后采用 MATLAB 中的 ODE45 求解器求解:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -2\xi\omega y_2 - \alpha\omega^2 y_1 - (1-\alpha)\omega^2 y_3 - \ddot{u}_g \\ \dot{y}_3 = \left(1 - \zeta_1 [1 - e^{-p\varepsilon}] \exp\left[-\left(\frac{y_3 \operatorname{sgn}(y_2) - q \sqrt[n]{\frac{A}{(1+\delta_\nu \gamma^4)(\beta+\gamma)}}}{(\psi + \delta_\psi \gamma^4)(\lambda + \zeta_1 [1 - e^{-p\varepsilon}] D)}\right)^2\right]\right) \frac{A y_2 - (1+\delta_\nu \gamma^4) |\beta| |y_3|^{n-1} y_3 + \gamma y_2 |y_3|^n}{(1+\delta_\eta \gamma^4)} \\ \dot{y}_4 = (1-\alpha)\omega_0^2 y_2 y_3 \end{cases} \quad (7)$$

基于 BWBN 模型的非弹性单自由度体系具有 13 个滞回控制参数、

保证工程质量的不断提高。

3 结束语

综上所述,随着时代的不断发展,在现阶段的工程建设中,想要更好的开展工程施工就需要提高工作人员的工作积极性,同时有效降低工作人员的浪费情况。而且建筑管理人员还需要聘请相应是检测人员对工程进行检查,这样不仅仅可以有效提高工程的施工质量还可以转变传统的工作模式以及检测模式,让工程的质量可以得到有效保障。而且现阶段为了更好的检测建筑工程的质量,需要各管理人员寻求一些高能力的检测人员,让这些检测人员通过专业的知识以及专业的设备进行检测,这样不仅仅可以对建筑工程中出现的问题进行妥善处理,还可以综合考虑建筑工程的情况。而且现阶段人们对于工程质量管理等方面都进行了一系列的加强措施,并将权、责、利进行有机统一,在加强工程素质教育的同时加强工程管理人员的质量意识,树立“以质量为本”的新型理念,从而有效丰富了工程检测中的具体过程,从而提高建筑项目的质量。

参考文献

- [1]2019 年陕西省回弹法检测混凝土抗压强度能力验证现场试验考核工作圆满结束[J].陕西建筑,2019(10):53.
- [2]福建农林大学交通与土木工程学院数字福建智能交通技术物联网实验室[J].福建建设科技,2019(4):92.
- [3]水利部长江科学院工程质量检测中心水环境试验室通过 2018 年度国家认监委能力验证[J].长江科学院院报,2019,36(6):25.
- [4]住房和城乡建设部行业标准《智能建筑工程质量检测标准》自 2019 年 6 月 1 日起实施[J].智能建筑,2019(6):10.

收稿日期:2019-11-23

作者简介:卢才植(1983-),男,壮族,广西南宁人,工程师,本科,主要从事建筑工程质量检测工作。

个频率参数和1个阻尼参数,各个滞回参数的几何意义和取值范围见表1。

表1 滞回参数的几何意义和取值范围

| 模型参数 | 几何意义 | 取值范围 |
|---------------|---------------------------------|-------------|
| A | 滞回形状控制参数,一般取为1.0 | 1.0 |
| α | 屈服前后刚度比 | [0, 0.5] |
| β | 滞回形状控制参数 | [0.5, 1.5] |
| γ | 滞回形状控制参数 | [-0.3, 0.5] |
| n | 滞回形状控制参数,控制屈服点尖锐程度 | [1, 50] |
| δ_u | 强度退化参数 | [0, 0.05] |
| δ_n | 刚度退化参数 | [0, 0.3] |
| ζ_s | 捏缩参数,表征捏缩滑移的强烈程度 | [0.7, 1.0] |
| q | 捏缩参数,表征捏缩的强度 | [0, 0.3] |
| p | 捏缩参数,描述滞回曲线斜率的变化 | [0, 5] |
| ψ | 捏缩参数,表征滞回环捏缩的数量 | [0, 0.2] |
| δ_ψ | 捏缩参数,表征捏缩滑移宽度的扩展速度 | [0, 0.01] |
| λ | 捏缩参数,描述 ξ_2 随 ξ_1 的变化情况 | [0, 1] |

2 参数敏感性分析

本文假定所研究的单自由度体系自振频率 $f=1\text{Hz}$ ($\omega=2\pi f=6.283$),阻尼比为 $\xi=0.05$ 。采用调幅缩放的EI Centro地震波对基于BWBN模型的单自由度体系进行动力时程分析,研究BWBN模型滞回参数对最大弹塑性位移 u_{max} 、最大速度 \dot{u}_{max} 、非线性滞回位移 z 和累积滞回耗能 ϵ 的敏感性,EI Centro地震波时程如图1所示。

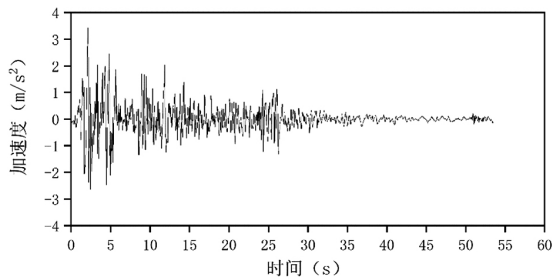


图1 EI Centro地震波加速度时程曲线

为了实现BWBN滞回模型的参数敏感性分析,本文采用拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling, LHS)生成参数样本。根据分析的类型和目的,确定BWBN模型的12个滞回参数(参数 A 为冗余参数,其值设为1)为随机输入变量,抽样次数为500。

本文采用斯皮尔曼秩相关系数法进行敏感性分析,如果斯皮尔曼秩相关系数接近1或-1,输入变量对输出变量的影响显著,如果该系数趋近于零,输入变量对输出变量的影响微弱。图2为计算得到的输入变量(12个模型滞回参数)和输出变量(u_{max} 、 \dot{u}_{max} 、 z 和 ϵ)的斯皮尔曼秩相关系数矩阵,其中数值小于0.3的斯皮尔曼秩相关系数没有显示。

根据所计算的斯皮尔曼秩相关系数,可以发现BWBN单自由度体系的最大弹塑性位移对结构屈服前后的刚度比 α 最为敏感,对捏缩强度系数 q 的敏感性次之,对其他参数的敏感性较小;单自由度体系的最大速度对捏缩强度系数 q 最为敏感,对结构屈服前后的刚度比 α 敏感性较大,对其余参数不太敏感;单自由度体系的非线性滞回位移对捏缩参数 ψ 最为敏感,对刚度退化参数 δ_n 和捏缩参数 ζ_s 、 q 、 p 的敏感性大致相同,对其他参数的敏感性较小;单自由度体系的累积滞回耗能对刚度退化参数 δ_n 最为敏感,对其他参数不敏感。

3 结论

本文研究了BWBN模型参数对单自由度弹性体系动力时程响应的敏感性,通过拉丁超立方抽样和弹塑性动力时程分析,计算得到输入变量(BWBN模型的12个滞回参数)和输出变量(最大弹塑性位移、最大速度、非线性滞回位移和累积滞回耗能)的斯皮尔曼秩相关系数。研究结果表明BWBN单自由度体系的最大弹塑性位移对结构屈服前后的刚度比 α 最为敏感,单自由度体系的最大速度对捏缩强度系数 q 最为敏感,

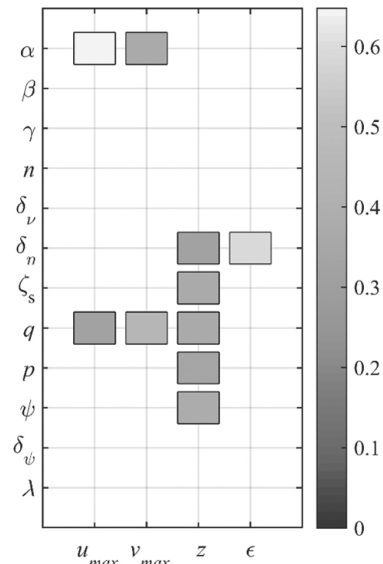


图2 斯皮尔曼秩相关系数分布

单自由度体系的非线性滞回位移对捏缩参数 ψ 最为敏感,单自由度体系的累积滞回耗能对刚度退化参数 δ_n 最为敏感。

基金项目:国家青年自然科学基金项目(51908478);福建省教育厅中青年骨干教师教育科研项目(JAT170005);厦门市交通基础设施智能管养工程技术研究中心开放基金(TCIMI201808)。

参考文献

- [1]余波,宁超列.工程结构非弹性地震动力反应分析与参数识别——BWBN模型的基本理论与程序设计[M].北京:科学出版社,2016:15-129.
- [2]宁超列.基于Bouc-Wen-Baber-Noori模型的非弹性反应谱研究.地震工程与工程振动,2015,35(3):191-198.
- [3]秦权,林道锦,梅刚.结构可靠度随机有限元分析——理论及工程应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [4]Zdenek Kala.Sensitivity Analysis of the Stability Problems of Thin-walled Structures [J].Journal of Constructional Steel Research,2005(6D):415-422.

收稿日期:2019-11-16

作者简介:刘涛(1986-),男,汉族,山东沾化人,助理教授,硕导,主要从事结构抗震、结构防灾减灾、结构健康监测等研究工作。