

王扬.强震下高层建筑横向晃动反应过程模拟分析[J].地震工程学报,2018,40(4):637-642.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.637

WANG Yang.Simulation Analysis of Transverse Vibration Response of High-Rise Buildings under Strong Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):637-642.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.637

强震下高层建筑横向晃动反应过程模拟分析

王 扬

(徐州工程学院,江苏 徐州 221018)

摘要:传统的静力弹塑性分析方法对强震作用下的高层建筑的横向晃动反应过程模拟时,存在计算结果不准确、计算用时较长的问题。提出新的强震下高层建筑横向晃动反应过程模拟分析方法,其基于直接积分法的三种方法实施模拟分析。分别是隐式方法、显式方法以及K&K模型方法。其中隐式方法和显式方法均能够对不同自由度下的高层建筑的横向晃动位移作出准确的计算,K&K模型通过高层建筑 Von Mises 屈服面,分析高层建筑钢材 Bauschinger 反应基础上,精确模拟出高层建筑在横向晃动反应中的变形过程。实验结果说明,所提方法对强震作用下的高层建筑的横向晃动反应的运算准确率和效率较高。

关键词:强震;高层建筑;横向晃动;反应过程;模拟分析;位移

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0637-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.637

Simulation Analysis of Transverse Vibration Response of High-Rise Buildings under Strong Earthquakes

WANG Yang

(Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, Jiangsu, China)

Abstract: Traditional analysis method for simulating the transverse vibration response process of high-rise buildings under the influence of a strong earthquake is associated with some problems, such as inaccurate calculation results and longer calculation time. This study aims to propose a new method for simulating the transverse vibration response process of high-rise buildings under strong earthquakes. This method is based on two methods, which are implicit and explicit methods. Both methods can be used to accurately calculate the transverse vibration displacement of high-rise buildings with different degrees of freedom and accurately simulate the deformation process of high-rise buildings during the transverse vibration response. The experimental results show that the proposed method can be applied to calculate the transverse vibration response of high-rise buildings under strong earthquakes with high accuracy and efficiency of operation.

Keywords: strong earthquake; high-rise building; transverse vibration; reaction process;

收稿日期: 2017-08-20

基金项目:江苏省社科基金规划课题(15GLB009)

作者简介:王 扬(1969—),男,江苏徐州人,硕士,高级实验师,研究方向:实验室管理、工程管理。E-mail:10793@xzit.edu.cn。

0 引言

随着我国国民经济、以及科学技术水平的不断发展,近几年,我国一些经济发达地区建立了一系列举世瞩目的高层建筑,这些高层建筑提升了城市的影响力以及国际竞争力,但其减震防震研究应成为城市化建设的考虑重点。高层建筑在强震作用下极易产生振动反应,甚至发生坍塌现象,造成人员伤亡以及财产损失,其后果极为严重。因此重点研究强震作用下高层建筑的倒塌机制^[1],设计有效的预防措施,提高其抗震能力至关重要。传统分析方法对强震作用下高层建筑的横向振动反应过程模拟时,存在计算结果不准确、计算用时较长。针对上述问题,本文提出一种新的强震下高层建筑横向振动反应过程模拟分析方法,以期提高高层建筑顶层横向振动分析的准确率和效率。

1 强震下高层建筑横向振动反应的过程模拟分析

1.1 直接积分法基本原理

高层建筑的横向振动位移变化方程在通常情况如下:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{P}(t) \tag{1}$$

其中:质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵以及地震激励分别由 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{P}$ 表示。直接积分法的中心算法是:把时间 t 分裂成大量的小时间分子 Δt ,通过动力方程的数据积分得到数值解^[2]。确定结构处于 t_n 时的反应值加速度、速度、位移分别是 $\ddot{u}_n$ 、 $\dot{u}_n$ 、 u_n ,通过数值方式在动力方程已经时间段 Δt 情况下 $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ 时反应值分别是 $\ddot{u}_{n+1}$ 、 $\dot{u}_{n+1}$ 、 u_{n+1} ,按照此顺序实施到最后可获得位移变化动力反应整体过程(图 1)^[3]。

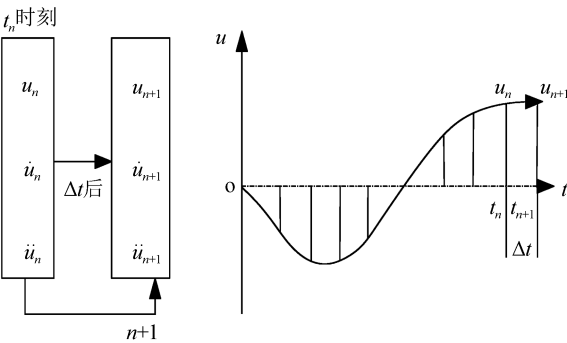


图 1 直接积分法基本原理

Fig.1 The basic principle of direct integration method

按照迭代求解方程组的不同需求,直接积分法又分为二种:一是隐式方法,此方法需要使用迭代求解方程组,统计量增多,同时额外需要的统计量可以和自由度的平方成正比关系^[4];二是显式方法,此方法使用求解解耦方程组,统计量缩减,在统计量最低的情况下和自由度数成正比关系;三为 $K\&K$ 模型方法。

1.2 隐式方法

1.2.1 Newmark- β 法($\beta \neq 0$)

根据以下公式的描述,对时间步进法进行丰富:

$$\ddot{u}_{n+1} = \ddot{u}_n + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u} + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{n+1} \tag{2}$$

$$u_{n+1} = u_n + (\Delta t)\dot{u}_n + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)(\Delta t)^2\right]\ddot{u}_n + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_{n+1} \tag{3}$$

其中 β 和 γ 重新改写了时间步内加速度的运行规律^[8],直接影响此措施是否准确、不受其他因素影响。

$$\begin{cases} \text{当 } \beta \geq \frac{1}{4} \text{ 时,无条件稳定;} \\ \text{当 } 0 < \beta \leq \frac{1}{4} \text{ 时,在 } \frac{\Delta t}{T} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{1-4\beta}} \text{ 时稳定。} \end{cases}$$

1.2.2 Hilber-Hughes-Taylor 法(即 HHT 法)($\beta \neq 0$)

Hughes 使因数 α 参与到 Newmark 方法中让其随时随地不受外界因素干扰^[9]。其公式总体相对于 Newmark 法来说, β 、 γ 里面代入了 α ,其他方面与 Newmark 相差无几。

$$\beta = \frac{1}{4}(1 - \alpha)^2, \gamma = \frac{1}{2} - \alpha, -\frac{1}{3} \leq \alpha \leq 0 \tag{4}$$

Newmark- β 法即 α 为 0 的情况下^[6],基于以上系数 Newmark 法的稳定性环境得到以下公式:

$$\Delta t \leq \frac{T_i}{\pi\sqrt{\left(\frac{1}{2} - \gamma\right)^2 - 4\beta}} = \infty \tag{5}$$

综上所述,HHT 法随时随地不受任何因素干扰。

1.3 显式方法

1.3.1 中心差分法

通过有限差分法取代位移变化对时间的求解过程是中心差分法。假设选取相同时间步长^[7], $\Delta t_n = \Delta t$,那么通过中心差分法获得速度以及加速度的相似是:

$$\dot{u}_n = \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t}, \ddot{u}_n = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{\Delta t^2} \tag{6}$$

位移变化的运动方程是:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (7)$$

把式(6) 添加到式(7), t_n 时刻的位移变化方程是:

$$\mathbf{M} \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{\Delta t^2} + \mathbf{C} \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t} + \mathbf{K}u_n = \mathbf{P}_n \quad (8)$$

式中,若 u_n 以及 u_{n-1} 为确定条件, t_n 和 t_n 之前时间的位移变化已知^[11-12],那么可以通过把确定项带入方程右边,可得:

$$\left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t}\right)u_{n+1} = \mathbf{P}_n - \left(\mathbf{K} - \frac{2\mathbf{M}}{\Delta t^2}\right)u_n - \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} - \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t}\right)u_{n-1} \quad (9)$$

可知, $n+1$ 时的运动变化在显式中可以通过 n 时间和 $n-1$ 时间获得^[8],迭代求解不参与此过程。

而中心差分法的稳定性需要在特定的状态下才能得以保持,当 $\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi}$ 时为稳定状态。 T_n 是运动位移的最小时间,所以中心差分法的时间间隔是微乎其微的。

1.3.2 显式 Newmark 法

在 $\beta=0$ 的条件中,Newmark 公式发生如下改变:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{u}_n + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{n+1} \quad (10)$$

$$u_{n+1} = u_n + (\Delta t)\dot{u}_n + \frac{1}{2}(\Delta t)^2\ddot{u}_n \quad (11)$$

得出 $n+1$ 时的运动变化可以在显示中通过 n 时间点获得^[14-1],此间无须迭代方程式。所以若 $\beta=0$,Newmark- β 法和 Wilson- θ 法则全部归于显式 Newmark 法范畴内。

只有在 $\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi}$ 时,显式 Newmark 法才能处于稳定状态。

1.3.3 K&K 模型方法

如图 2 所示,Krieg&Key 本构模型(K&K 模型)选取了高层建筑 Von Mises 屈服面,在分析高层建筑钢材 Bauschinger 反应基础上,能精确模拟出高层建筑在横向晃动反应中的变形过程。

高层建筑 Von Mises 屈服状态是:

$$\phi = \frac{3}{2}(s_{ij} - \alpha_{ij})(s_{ij} - \alpha_{ij}) - \sigma_y^2 = 0 \quad (12)$$

此间,高层建筑钢材最初屈服应力,应力偏张量以及移动张量分别由 σ_y 、 s_{ij} 、 α_{ij} 表示。

K&K 模型为:

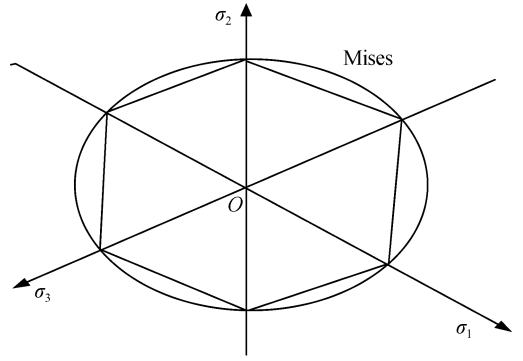


图 2 π 平面上高层建筑 Von Mises 屈服面

Fig.2 π Von Mises yield surface of a high rise building on a plane

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p = \sigma_y(\epsilon_{\text{eff}}^p, \beta) \quad (13)$$

$$E_p = \frac{EE_t}{E - E_t} \quad (14)$$

$$\epsilon_{\text{eff}}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (15)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \quad (16)$$

此间,高层建筑钢材的屈服应力是 σ_0 ,钢材的等效塑性应变是 ϵ_{eff}^p ;塑性应变率是 $\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p$;钢材的弹性模量由 E 表示,塑性模量由 E_p 表示,切线模量则由 E_t 表示; $\frac{1}{3} \sigma_{kk}$ 代表静水压力^[10];参考多种强化标准的数据由 β 表示。

随时动态强化是 $\beta=0$,若仅中心位移发生变化,加载曲面以及屈服曲面状态稳定,则只能满足加载路径和原加载路劲相近的状态; $\beta=1$ 是全部共性增强,若以屈服曲面为基准加载曲面发生横向扩充^[11],则和 Bauschinger 效应相矛盾;混合强化是 $0 < \beta < 1$,曲面的动态改变和中心位移都可兼顾。

在 $0 < \beta < 1$ 情况下, ϵ_{ij}^p 表达如下式:

$$\epsilon_{ij}^p = \epsilon_{ij}^{p(i)} + \epsilon_{ij}^{p(k)} \quad (17)$$

$$\epsilon_{ij}^{p(i)} = \beta \epsilon_{ij}^p \quad (18)$$

$$\epsilon_{ij}^{p(k)} = (1-\beta) \epsilon_{ij}^p \quad (19)$$

式中:各向同性强化阶段由 $\epsilon_{ij}^{p(i)}$ 表示;随动强化阶段的塑性应变率由 $\dot{\epsilon}_{ij}^{p(k)}$ 表示。

依照流动定律,移动张量 α_{ij} 表达如下:

$$\alpha_{ij} = \int d\alpha_{ij} = \int \frac{2}{3} E_p (1-\beta) d\lambda (s_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (20)$$

此间, $d\lambda$ 是正比例系数^[12],依照增量定律,等效塑性应变增量如下表达:

$$d\epsilon_{\text{eff}}^p = \left(\frac{2}{3} d\epsilon_{\text{eff}}^p d\epsilon_{\text{eff}}^p \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2}{3} d\lambda \sigma_y \quad (21)$$

弹性应变增量 $d\epsilon_{ij}^e$ 以及塑性应变增量 $d\epsilon_{ij}^p$ 构成总应变增量 $d\epsilon_{ij}$, 应力增量如下式:

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\epsilon_{kl} = D_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) = D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} \quad (22)$$

$$D_{ijkl}^e = 2G \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \quad (23)$$

$$D_{ijkl}^e = D_{ijkl} - D_{ijkl}^p \quad (24)$$

此间, 剪切模量、泊松比^[13]、Kronecker 符号函数分别由 G 、 ν 、 δ_{ij} 代表。

从式(6)~(24)得出:

$$d\lambda = \frac{(s_{ij} - \alpha_{ij}) d\epsilon_{ij}}{[2\sigma_y (\epsilon_{eff}^p, \beta) / 9G] (3G + E_p)} \quad (25)$$

$$D_{ijkl}^p = \frac{(s_{ij} - \alpha_{ij})(s_{kl} - \alpha_{kl})}{[\sigma_y (\epsilon_{eff}^p, \beta) / 9G^2] (3G + E_p)} \quad (26)$$

和 K&K 模型相关联的失效定律能左右代表材料的失效结果。单元整体积分点等效塑性应变是失效定律的基础准则^[14], 由此对材料失效进行判断可以防止大变形所引发的单元变形。

2 试验分析

为验证本文方法对高层建筑横向振动分析结果的准确率和计算效率, 以某个高层建筑为对象进行试验分析^[15]。实验为在振动台进行的尺桥墩振动台试验, 试验模型如图 3 所示。试验地震动输入选择 6 条 NGA 地震动, 且为单向输入。具体的输入方案如表 1 所列。

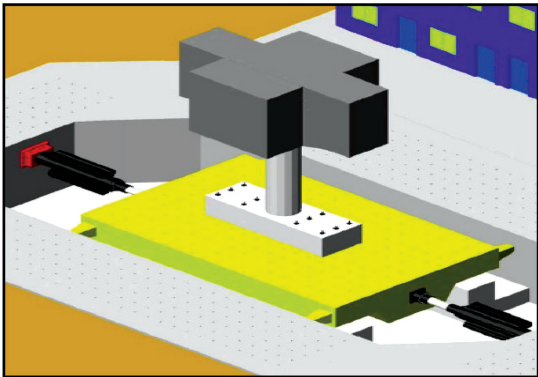
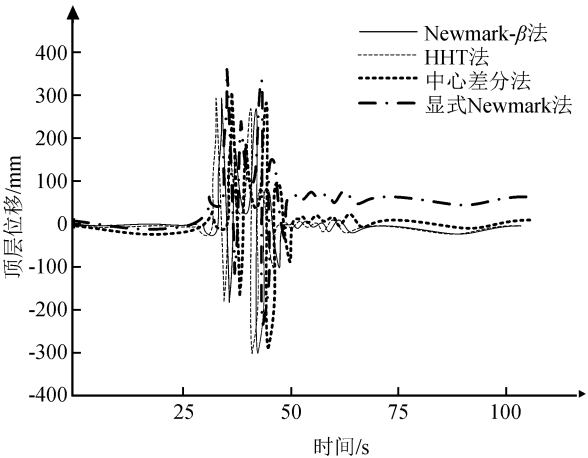


图 3 实验模型
Fig.3 Experimental model

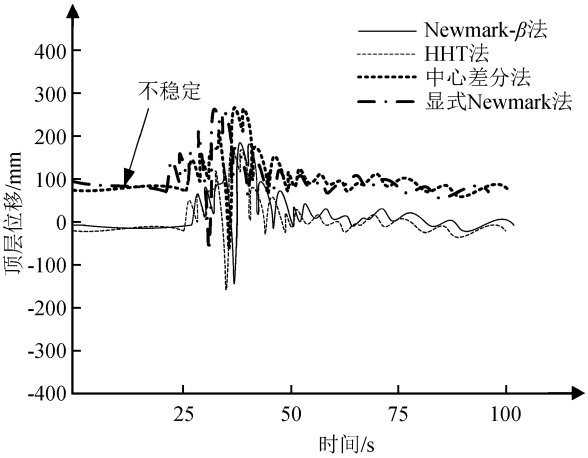
表 1 地震动加载序列

Table 1 Loading sequence of ground motion				
顺序	名称	NGA 文件	滤波后 PGA	滤波后 PGV
1	EQ1	AGW191, at3	0.244	15.66
2	EQ2	CLS191, at3	0.377	39.88
3	EQ3	LGP111, at3	0.568	81.84
4	EQ4	CLS191, at3	0.488	41.21
5	EQ5	TAK111, at3	0.488	97.42
6	EQ6	LGP111, at3	0.552	81.67

试验主要对足尺振动台的 EQ1 的工程情况进行分析, 主要对高层建筑在顶层横向振动位移进行计算。图 4 分别给出了 Newmark- β 法、HHT 法、中心差分法以及显式 Newmark 法下强震高层建筑顶层横向振动位移的试验结果。试验分析中隐性 Newmark- β 法的 γ 和 β 值分别是 0.5 和 0.25, HHT 法中的 α 为 0.5, 显式 Newmark 法的 γ 值同样取 0.5, 图 4(a) 中给出了隐式方法中 Newmark- β 法和 HHT 法时间间隔为 0.004 s 时, 以及显式方法中中心差分法和显式 Newmark 法时间间隔为 0.000 4 s 时强震下高层建筑顶层横向振动的位移实时曲线。从图中可以看出四种方法计算的结果精确度均较好; 若将隐式方法的时间间隔提高至 0.04 s, 显式方法的时间间隔提高至 0.004 s, 其结果为图 4(b)。从图中可看出隐式方法的稳定性较好, 计算结果比较准确, 显式方法虽然在强震下高层建筑的横向振动反应分析中稳定性较好, 但由于时间间隔发生变



(a) EQ1地震动加载序列(隐式 $t=0.004$ s, 显式 $t=0.000$ 4 s)



(b) EQ1地震动加载序列(隐式 $t=0.04$ s, 显式 $t=0.004$ s)

图 4 顶层位移曲线图

Fig. 4 Displacement curve of top floor

化导致显示分析过程稳定性被破坏,使计算的结果准确性有所降低。

在隐式方法时间间隔取 0.04 s,显式方法时间间隔为 0.004 s 时,采用的四种计算方法对不同地震动加载序列的计算如表 2 所列。从表中数据能明显看出,在不同的地震强度下,采用显式方法计算出准确结果的用时远远高于隐性计算,即其计算效果较差,从而可以得出对于自由度较低的高层结构,采用隐式方法计算横向晃动位移效率较好。

表 2 计算时间结果(单位:s)

Table 2 Results of calculation time (Unit:s)				
计算时间	Newmark- β	HHT	中性差分法	显式 Newmark
EQ1	42	41	2 535	2 535
EQ2	41	40	2 521	2 521
EQ3	40	40	2 534	2 532
EQ4	41	41	2 522	2 521
EQ5	42	41	2 533	2 539
EQ6	40	43	2 522	2 523

为进一步分析显式分析法在强震下高层建筑横向振动顶层的位移变化计算结果的精确度,向试验模型输入如图 5 所示的 taft 地震波。图 6 为采用四

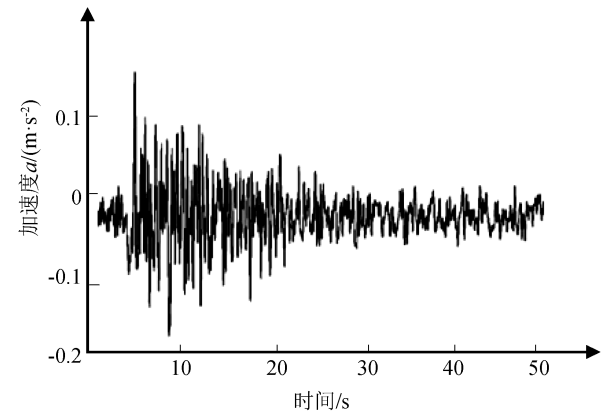


图 5 地震动输入

Fig.5 Ground motion input

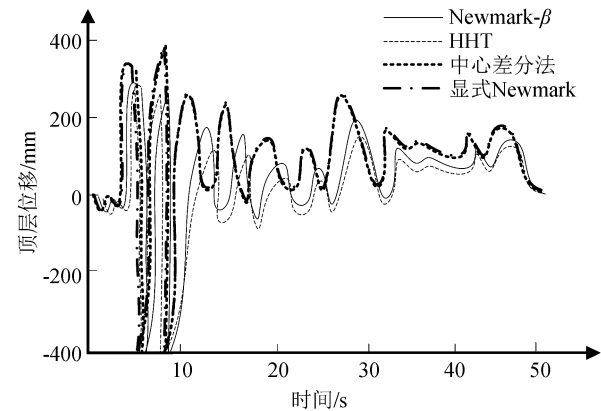


图 6 顶层位移曲线图

Fig.6 Displacement curve of top floor

种计算方法得到的高层建筑顶层横向振动的位移变化曲线。为保持试验结果的可比性,设置隐式方法中 γ 和 β 值分别同上试验(即分别为 0.5 和 0.25)、HHT 法 α 为 0.5,显式方法 γ 为 0.5;隐式方法与显式方法的时间间隔分别为 0.04 和 0.000 4 s。从图 7 可以看出,四种方法计算顶层位移的精度都较高,说明本文显示分析法在计算强震下高层建筑横向振动位移变化计算结果准确率较高。

表 3 为基于图 6 四种方法顶层位移变化情况的计算时间。从表中可以得出显式方法计算用时大约为隐式方法的一半,说明将本文方法中显式方法应用与计算自由度高的高层建筑横向振动位移变化的效率较高。

表 3 计算时间(单位:h)

Table 3 Calculation time (Unit:h)				
	Newmark-	HHT	中性差分法	显式 Newmark
计算时间	171	170	86	87

从上述试验可以看出,本文采用直接积分法中的隐式方法和显式方法的计算结果的精度都较高,但显式方法对计算条件的稳定度要求较高,在实际应用中需要对时间间隔进行明确设置;从计算结果的效率来看,隐式方法更偏向于计算自由度较低的高层结构,由于显式方法的时间间隔过小,在计算自由度较高的高层建筑时的计算效率较高。因此本文方法可以对不同自由度的高层建筑的横向振动位移采取不同的计算方法,且计算结果的精确度和效率均较高。

3 结论

本文提出的强震下高层建筑横向晃动反应的过程模拟分析方法,采用直接积分法中的三种方法实现高层建筑横向晃动反应位移以及变形的准确分析。

参考文献(References)

[1] 丁柱,张立翔.强地震作用下混凝土重力坝响应特性分析[J].水利水电技术,2016,47(10):1-5.
DING Zhu,ZHANG Lixiang.Analysis on Response Characteristics of Gravity Dam under Strong Earthquake Effect[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(10):1-5.
[2] 崔炜,王洪亮,朱银邦,等.进水塔群与软岩地基的联合作用分析[J].水利水电技术,2016,47(11):44-47.
CUI Wei,WANG Hongliang,ZHU Yinbang,et al.Analysis on Combined Effect of Intake-Tower Group and Soft Rock Foundation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,

- 2016,47(11):44-47.
- [3] 桂跃,付坚,侯英杰,等.高分解度泥炭土直剪抗剪强度特性及机理[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):418-426.
GUI Yue,FU Jian,HOU Yingjie, et al. Shear Strength Properties and Mechanisms of Peaty Soil with High Degree of Decomposition in Direct Shear Tests[J].Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):418-426.
- [4] 陈龙伟,冯浩,袁晓铭.基于单台强震数据软厚场地地震反应不确定性分析[J].土木建筑与环境工程,2015,37(3):35-41.
CHEN Longwei,FENG Hao,YUAN Xiaoming. Variability Analysis of Deep-soft Site Response Using Single-station Strong-motion Records[J].Journal of Chongqing Jianzhu University,2015,37(3):35-41.
- [5] 何政,张昊强.超高层建筑结构竖向地震响应的谱单元分析[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(8):72-77.
HE Zheng,ZHANG Haoqiang. Spectrum Elements for Simulating Responses of Ultra High-rise Building Structures Excited by Vertical Component of Impulse-type Strong Earthquakes[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2014,46(8):72-77.
- [6] 崔铁军,马云东.超高层建筑受飞机撞击后坍塌过程模拟分析[J].建筑结构学报,2016,37(1):48-55.
CUI Tiejun,MA Yundong. Simulation of Collapse Process of Super High-rise Buildings by Aircraft Collision[J].Journal of Building Structures,2016,37(1):48-55.
- [7] 柳国环,刘伟,赵大海,等.基于 ABAQUS 的超高层建筑动力弹塑性抗震分析[J].计算力学学报,2016,33(2):188-193.
LIU Guohuan,LIU Wei,ZHAO Dahai, et al. Dynamic Elastoplastic Seismic Analysis for a Super High-rise Building Based on ABAQUS[J].Chinese Journal of Computational Mechanics,2016,33(2):188-193.
- [8] 赵剑明,刘小生,杨玉生,等.高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2015,37(12):2254-2261.
ZHAO Jianming,LIU Xiaosheng,YANG Yusheng, et al. Criteria for Seismic Safety Evaluation and Maximum Aseismic Capability of High Concrete Face Rockfill Dams[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(12):2254-2261.
- [9] 张建伟,张翌娜,赵瑜,等.强震作用下高拱坝损伤开裂数值模拟分析[J].水力发电,2014,40(4):35-37.
ZHANG Jianwei,ZHANG Yina,ZHAO Yu, et al. Study on Damage and Fracture Mode of High Arch Dam under Strong Earthquake[J].Water Power,2014,40(4):35-37.
- [10] 祝爱玉,张东宁,蒋长胜,等.川滇地区地壳应变能密度变化率与强震复发间隔的数值模拟[J].地震地质,2015,37(3):906-927.
ZHU Aiyu,ZHANG Dongning,JIANG Changsheng, et al. The Numerical Simulation of the Strain Energy Density Changing Rate and Strong Earthquake Recurrence Interval of the Sichuan—Yunnan Block [J]. Seismology and Geology,2015,37(3):906-927.
- [11] 朱胜,李莉,何政.强震作用下边框架柱激发失效后混凝土结构接触-碰撞响应模拟[J].工业建筑,2016,46(6):66-73.
ZHU Sheng,LI Li,HE Zheng. Simulation of Contact-impact Responses in Concrete Structures Excited by Severe Earthquakes with the Consideration of Local Failure Triggered by Side Columns[J].Industrial Construction,2016,46(6):66-73.
- [12] 陈行,邱敏,彭雅婷,等.岷江双线特大桥高边坡稳定性研究[J].地质力学学报,2015,21(1):108-116.
CHEN Hang,QIU Min,PENG Yating, et al. Study on the Stability of High Slope of the Minjiang River Double-track Bridge[J].Journal of Geomechanics,2015,21(1):108-116.
- [13] 苏成,黄志坚,刘小路.高层建筑地震作用计算的时域显式随机模拟法[J].建筑结构学报,2015,36(1):13-22.
SU Cheng,HUANG Zhijian,LIU Xiaolu. Time-domain Explicit Random Simulation Method for Seismic Analysis of Tall Buildings[J].Journal of Building Structures,2015,36(1):13-22.
- [14] 陶勇.基于环境振动的高层建筑结构动力特性实测与数值模拟[J].建筑科学,2015,31(1):110-114.
TAO Yong. Analysis of Field Vibration Test and Numerical Simulation for A Complex High-rise Structure Based on Environmental Vibration[J].Building Science,2015,31(1):110-114.
- [15] CHOUN Y,YUN C. Sloshing Analysis of Rectangular Tanks with a Submerged Structure by Using Small-Amplitude Water Wave Theory[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2015,28(7):763-783.