

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701008



钢筋混凝土建筑结构的 抗震性能分析与实验

郑睿¹, 于虹²

(1. 长江工程职业技术学院 土木工程系, 湖北 武汉 430212;
2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对钢筋混凝土建筑结构展开了抗震性能研究,提出一种高适应性的 Pushover 分析方法.在传统 Pushover 方法基础上,充分考虑高阶振型和结构刚度蜕变的影响,通过补充设计提升抗震性能分析的适应性.为了有效应对地震中的不确定性,配置了 3 种载荷.实验结果表明:对于钢筋混凝土结构,在倒三角载荷、抛物线载荷及分层分布载荷下,可以从位移、角位移方面给出稳定的抗震性能分析.

关键词: 建筑结构; 抗震性能; 位移分析; 角位移分析; Pushover 分析法

中图分类号: TU 317 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2017)01-0045-04

Seismic Performance Analysis and Experimental Study of Reinforced Concrete Building Structure

ZHENG Rui¹, YU Hong²

(1. Department of Civil Engineering, Chang Jiang Institute of Technology, Wuhan 430212, China;
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The high adaptable Pushover analysis method is proposed to study the seismic behavior of reinforced concrete structures. This method is based on the traditional Pushover method, considering the effect of stiffness degradation and high order vibration modes, the seismic performance analysis of adaptability is improved by additional design. In order to effectively deal with the uncertainty in the earthquake, three kinds of load are distributed. The experimental results show that the seismic behavior of reinforced concrete structures can be analyzed according to the displacement and angular displacement under the inverted triangular load, the parabolic load and the stratified distribution load.

Keywords: building structure; seismic performance; displacement analysis; angular displacement analysis; Pushover analysis

在我国规模不断扩大的城市中,高层建筑与超高层建筑大都以钢筋混凝土建筑结构为主,故钢筋混凝土建筑结构的抗震性能分析成为当下建筑行业关注的焦点^[1-2]. 20 世纪末期,基于承载力的抗震性能分析是普遍采用的理论方法^[3]. 针对此项理论中的不足,季静等^[4]进行了改进,建立了一种基于位移的抗震性能分析理论体系框架.董云菲^[5]基于位移的抗震分析理论,注重对要分析的建筑实体进行结构分析,并从力学的角度分析震灾发生后建筑实体可能发生的弹性变形和塑性变形,从而具有了更高的实用性. Pan 等^[6]基于位移抗震性能的分析思想,将位移分析具体为结构总位移分析和层间相对位移分析,

使得位移分析理论更加全面. 时程分析是抗震性能实验分析的一种常见方法,综合考虑对惯性力、阻尼力、恢复力,构建有针对性的微分方程,进而从强度和变形两个角度分析地震发生时建筑结构的安全程度^[7]. 在时程分析的基础上,如果突出地震震动时的加速度变化分析,就形成了增量动力学分析方法^[8]. Pushover 方法从弹性性能和塑性性能的角度出发,分析建筑结构的抗震性能^[9]. 当然,地震发生时在诸多方面存在不确定性,如地震震源、主震波发生的时刻、不同空间点位上的震动强度差异,都会影响到各种抗震性能分析方法的可靠性^[10]. 本文在 Pushover 分析方法的基础上,改进提升其适应性,并通过 3 种不同地震载荷加载模式的配置提升抗震性能分析的可靠性.

1 3 种地震载荷加载模式的配置

Pushover 分析方法的基本原理是,构建地震发生时,建筑结构所受到的载荷情况. 因此,合理的载荷模式配置,有利于提升 Pushover 分析方法的准确性. 在分析建筑结构抗震性能时,地震过程中的诸多不确定性因素更是成为影响 Pushover 方法分析效果的最大障碍. 往往建立起的一种载荷模式,对于一种情况下的抗震性能分析是合理的,但是对于另一种情况下的抗震性能分析则是不准确的,甚至是失效的. 当地震发生时,为了尽可能覆盖载荷分布,在建筑结构的 Pushover 抗震分析中,配置 3 种载荷模式. 其中,倒三角形形态分布的载荷模式数学表达式为

$$C_T = \frac{z_i g_i}{\sum_{j=1}^n z_j g_j} \cdot \tau. \tag{1}$$

式(1)中: n 为建筑的总层数; g_i 为第 i 层建筑在垂直方向上的高度; g_j 为第 j 层建筑在垂直方向上的高度; z_i 为第 i 层建筑所受的重力载荷; z_j 为第 j 层建筑所受的重力载荷.

抛物线形态分布的载荷模式数学表达式为

$$C_P = \frac{z_i g_i^\lambda}{\sum_{j=1}^n z_j g_j^\lambda} \cdot \tau. \tag{2}$$

式(2)中: λ 为高阶震型的影响系数,其取值为

$$\lambda = \begin{cases} 1.0, & t \leq 0.5, \\ 0.5t + 0.75, & 0.5 < t \leq 2.5, \\ 2.0, & t > 2.5. \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中: t 为钢筋混凝土建筑结构的自振周期.

呈分层分布的幂级载荷模式数学表达式为

$$C_D = \begin{cases} \frac{z_i g_i^\lambda}{\sum_{j=1}^n z_j g_j^\lambda} \cdot \tau, \\ \frac{z_i g_i}{\sum_{j=1}^m z_j g_j} \cdot \left(1 - \frac{z_i g_i^\lambda}{\sum_{j=1}^n z_j g_j^\lambda} \cdot \tau \right). \end{cases} \tag{4}$$

式(4)中: m 为钢筋混凝土建筑结构的楼层序号, $m = \text{int}(n/2)$, $\text{int}()$ 表示取整处理.

2 高适应性 Pushover 抗震性能分析方法

在 Pushover 方法的抗震性能分析过程,对地震发生时的高阶震型影响、结构刚度蜕变等情况考虑得不够充分,因此,对不确定性较大的地震适应性较差. 为此,建立一种高适应性的 Pushover 抗震性能分析方法.

用 S 表示建筑结构的侧向上的位移大小,用 S_0 表示建筑结构的侧向上的名义位移大小,用 θ 表示施加载荷大小的参数. 那么,3 者之间的关系为

$$S = \theta S_0. \tag{5}$$

建筑结构的形状不尽相同,那么 S_0 也会有所不同.但在实际进行分析时,为了分析过程的方便,对同一建筑结构的形状给予 S_0 相同的取值.

设计一个标准化模态下的位移大小,用 \bar{S} 表示. \bar{S} 确定后,Pushover 分析中的载荷形状也随之确定.如果要确定此状态下建筑结构的刚度,可根据 Pushover 的分析结果,以及各个结构对应的自振周期和震型,采用反应谱的相关算法,建筑结构各层间的位移 S_Δ 为

$$S_\Delta = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\Theta_j (\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}) \rho_j]}. \tag{6}$$

式(6)中: i 为建筑结构的楼层; j 为建筑结构的第 j 阶震型; Θ_j 为第 j 阶震型的参数; $\varphi_{i,j}$ 为第 j 阶震型的位移大小; ρ_j 为第 j 个模态所对应的反应谱.

计算出各层间的位移 S_Δ ,可进一步计算建筑结构各层的位移 S_i ,即

$$S_i = \sum_{k=1}^i S_\Delta^k. \tag{7}$$

计算出建筑结构全部楼层的位移大小之后,用 $\max S_i$ 表示其中的最大值,那么,可以对各个楼层的位移大小执行归一化处理,计算过程为

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{\max S_i}. \tag{8}$$

对于钢筋混凝土结构而言,如果结构反应达到一个峰值,那么,对应的载荷形状就会维持在稳定的状态.这时,即便载荷的数值大小发生变化,其形状也不会再改变.侧向载荷的更新处理为

$$S_i = S_{i-1} + \Delta\theta_i \bar{S}_i S_0. \tag{9}$$

3 实验结果与分析

用 SAP 2000 软件设置钢筋混凝土的浇注结构框架,共仿真设置了 8 层的建筑结构.底层的楼层高度设置为 3.8 m,第 2~8 层的高度设置为 2.8 m,楼层的边缘跨度为 5.8 m,中间跨度为 3.6 m.在边缘跨度上,梁的截面长度设置为 50 cm、宽度为 26 cm.楼体模型中,其他梁的截面长度设置为 40 cm,宽度为 26 cm.楼体模型中,柱子的截面长度和宽度都设置为 45 cm.在建筑材料方面,梁和柱都设置二级钢筋配置 C30 混凝土的类型.

在地震波的仿真设置上,设定地震波的持续时间为 30 s,仿真步长为 0.03 s,地震波最大加速度为 $200 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$.

在 3 种载荷状态下,Pushover 分析得到的楼层可允许的位移、楼层可允许的角位移,分别如图 1,2 所示.图 1,2 中: n 为楼层; s 为楼层位移; ω 为楼层角位移.

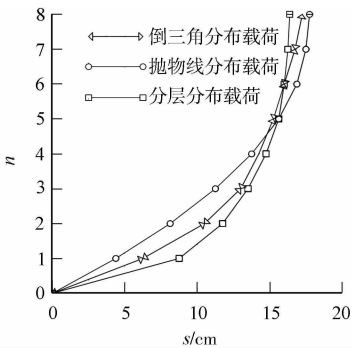


图 1 楼层可允许的位移

Fig. 1 Allowable displacement of floor

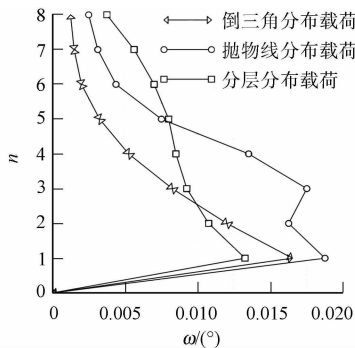


图 2 楼层可允许的角位移

Fig. 2 Allowable angular displacement of floor

由图 1 可知:在倒三角形分布载荷下,第 1 层楼的最大位移为 6.8 cm,在抛物线形态分布载荷下,最大位移为 4.5 cm,在分层分布载荷下,最大位移为 8.2 cm;第 8 层楼的最大位移为 17.4 cm,在抛物线形态分布载荷下,最大位移为 17.8 cm,在分层分布载荷下,最大位移为 16.8 cm.

由图 2 可知:在倒三角形分布载荷下,第 1 层楼的最大角位移为 0.016° ,在抛物线形态分布载荷

下,最大角位移为 0.018° ,在分层分布载荷下,最大角位移为 0.013° ;第 8 层楼的最大角位移为 0.002° ,在抛物线形态分布载荷下,最大角位移为 0.003° ,在分层分布载荷下,最大角位移为 0.004° .

文中方法对于不同形态的载荷可以给出理想的分析结果,并且 3 种载荷的分析结果比较稳定.因此,文中方法在抗震性能分析具有较好的可靠性,对于地震发生时的不确定性,具有更好的处理能力.

4 结束语

面对不断扩建的城市和不断兴起的新型小区,提升其间高层建筑的抗震性能成为生命财产安全的重要保证.针对钢筋混凝土建筑结构的抗震性能分析问题,在 Pushover 分析方法的基础上进行了改进和补充,使之对地震中的不确定性具有更好的适应性.同时,配置了倒三角形形态的载荷分布、抛物线形态的载荷分布、分层分布的幂级数载荷分布 3 种不同的载荷分布,更加全面地完成抗震性能分析.在 3 种形态的载荷分布情况下,Pushover 分析方法对于钢筋混凝土结构的抗震性能分析具有很好的适应性.

参考文献:

- [1] BLACK G,DAVIDSON R A,PEI S,*et al.* Empirical loss analysis to support definition of seismic performance objectives for woodframe buildings[J]. *Structural Safety*,2010,32(3):209-219.
- [2] 王曙光,陆伟东,刘伟庆,等.昆明新国际机场航站楼基础隔震设计及抗震性能分析[J]. *振动与冲击*,2011,30(11):260-265.
- [3] HAMID N H,MANDER J B. A comparative seismic performance between precast hollow core walls and conventional walls using incremental dynamic analysis[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*,2012,37(7):1801-1815.
- [4] 季静,陈学伟,何慧贤,等.基于概率和位移的框支剪力墙结构抗震性能评估方法[J]. *地震工程与工程振动*,2009,29(6):108-114.
- [5] 董云菲.考虑支座非荷载初始位移的超长复杂隔震结构抗震性能分析[D].兰州:兰州理工大学,2014:21-25.
- [6] PAN Jiawen,YU Xi,FAN Jin. Seismic performance assessment of arch dams using incremental nonlinear dynamic analysis[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*,2015,19(3):305-326.
- [7] JEHEL P,LEGER P,LBRAHIMDEGOVIC A. Initial versus tangent stiffness-based rayleigh damping in inelastic time history seismic analyses[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,2014,43(3):467-484.
- [8] VAMVATSIKOS D. Estimating seismic performance uncertainty using IDA with progressive accelerogram-wise latin hypercube sampling[J]. *Journal of Structural Engineering*,2014,140(8):657-670.
- [9] 王瑜,陈震.建筑造型理论下景观构筑物的结构隐形作用[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*,2015,36(1):97-102.
- [10] 袁成,李景叶,陈小宏.基于概率统计的地震岩相识别不确定性定量评价方法[J]. *地球物理学报*,2015,58(10):3825-3826.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)