

文章编号:1673-2049(2011)02-0069-06

考虑应变率效应的 Pushover 分析方法

王文明, 李宏男

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:基于结构动力学原理,提出了一种在 Pushover 分析中考虑应变率效应的方法:首先,对结构进行不考虑应变率效应的 Pushover 分析;然后,计算顶点位移为 D_i 时,1/4 循环的时间和关键点在 1/4 循环内的应变变化量,根据关键点在 1/4 循环内的平均应变率对模型进行修正,进行第 2 次 Pushover 分析,得到 Pushover 曲线上的一个点 (D_i, V_i) ,改变 D_i 的值,按照该方法得到一系列 Pushover 曲线上的点;最后,将各个点用光滑曲线连接,得到结构考虑应变率效应的 Pushover 曲线。采用一个钢筋混凝土模型对该方法得到的 Pushover 曲线和逐步增量非线性时程分析方法得到的结果进行了对比。结果表明:该方法具有合理性。

关键词:Pushover 分析;应变率效应;1/4 循环;平均应变率;逐步增量非线性时程分析

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Pushover Analysis Method Considering Strain Rate Effect

WANG Wen-ming, LI Hong-nan

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Based on the dynamic theory of structures, a Pushover analysis method considering strain rate effect was proposed. Firstly, Pushover analysis of the structure without considering strain rate effect was performed. Secondly, the variance of strain at the important points in the 1/4 cycle and the duration of the cycle corresponding to the top displacement D_i were calculated, then the model could be modified according to average strain rates of the important points; Pushover analysis of the structure for the second time was performed, and a point (D_i, V_i) in the Pushover curve could be obtained; the value of D_i was changed, and many points could be got according to the method. Finally, the Pushover curve of the structure considering strain rate effect by connecting these points with smooth curve was obtained. Using a reinforced concrete model, the Pushover curve obtained by the method in the paper was compared with the result obtained by incremental dynamic analysis. Results show that the method is rational.

Key words: Pushover analysis; strain rate effect; 1/4 cycle; average strain rate; incremental dynamic analysis

0 引言

土木工程中应用的大多数材料都有一定的应变

率敏感性。钢筋和混凝土在不同应变率下有着不同的力学性能,随着应变率的提高,钢筋和混凝土的特征强度有不同程度的提高^[1-7]。在地震作用下,混凝

收稿日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90815026);国家地震专项科研项目(200808074);

高等学校学科创新引智计划项目(B08014)

作者简介:王文明(1987-),男,山东沂南人,工学博士研究生,E-mail:wangwenming87110@163.com。

土的应变率一般能达到 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大能达到 10^{-1} s^{-1} , 钢筋的应变率更大一些。对结构进行抗震分析时采用静态下的本构关系不尽合理, 应该考虑应变率效应。ABAQUS 软件有着强大的非线性分析功能, 对结构进行时程分析时, 采用材料的动态本构模型能够考虑应变率的不断变化。国外一些学者用该软件对结构进行地震作用下的非线性时程分析时, 考虑了材料的应变率效应^[8-9]。研究表明, 考虑材料的应变率效应后, 计算得到的结构响应发生了一定的变化。

Freeman^[10]最早提出了 Pushover 分析方法, 很多学者对其进行了研究和改进, 研究的焦点在该方法的加载模式和适用范围方面^[11-17]。目前, 该方法中的本构关系、弯矩-曲率关系和破坏准则大多都是静力荷载作用下的结果。从本质上说, Pushover 分析是一种解决动力问题的简化静力方法, 为了提高 Pushover 分析的准确性, 需要将应变率效应合理地考虑进去, 问题的难点在于如何考虑。Pankaj 等认为钢筋混凝土结构在动荷载或循环荷载作用下(如循环加载下结构的逐步退化、应变率效应)表现出来的一些特性很难被考虑到静力方法之中。Bracci 等认为可以通过改变构件弯矩-曲率关系的等效方法将应变率效应考虑到 Pushover 分析方法之中, 但是没有给出具体方法。本文中笔者基于结构动力学的原理, 提出了一种考虑应变率效应的 Pushover 分析方法。采用一个钢筋混凝土结构的简单模型, 对采用该方法得到的能力曲线和采用逐步增量非线性时程分析(IDA)方法得到的结果进行对比, 验证了该方法的合理性。

1 材料的应变率效应

1.1 钢材的应变率效应

早在 20 世纪中期, 国外学者就对钢材的应变率效应进行了研究, 随着试验方法和试验设备的改进, 所得的试验结果更为可靠。最近几十年, 中国有很多学者对钢材的应变率效应进行了研究, 文献[2]中研究了 3 种钢材(D60、58SiMn 和 45 号钢)的动态拉伸性能; 文献[3]中研究了建筑钢筋 HPB235、HRB335 和 HRB400 在高应变率($2 \sim 80 \text{ s}^{-1}$)下的力学特性; 文献[4]中研究了建筑钢筋 HPB235、HRB335 和 HRB400 在地震作用下其应变率范围内($2.5 \times 10^{-4} \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$)的力学特性。通过对其试验结果进行分析, 可以得到以下结论:

(1) 某些钢材对应变率很敏感, 而一些钢材对应

变率不敏感。应变率敏感钢材的屈服强度随着应变率的提高而提高, 在高应变率下能够提高数倍; 抗拉强度随着应变率的提高而提高, 但是提高的幅度不大; 一般来说, 屈服强度越小的钢材应变率效应越明显。

(2) 钢材的弹性模量随着应变率的提高基本保持不变, 对结构进行动力分析时可以不考虑钢材弹性模量的变化。

在地震作用下钢材的应变率一般不超过 1 s^{-1} 。对结构进行抗震分析时, 普通建筑钢材的动态本构模型可以参考文献[4]。在地震作用下的应变率范围内, 钢材的抗拉强度提高幅度很小, 可以不予考虑。钢材动态的屈服强度可按下式计算

$$\left. \begin{aligned} f_{yd} &= (1 + c_f \lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) f_{ys} \\ c_f &= 0.1709 - 3.289 \times 10^{-4} f_{ys} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: f_{yd} 为当前应变率下的钢材屈服强度; f_{ys} 为钢材静态屈服强度; $\dot{\epsilon}$ 为钢材当前的应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为钢材准静态应变率, 取 $\dot{\epsilon}_0 = 2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

1.2 混凝土的应变率效应

随着应变率的提高, 混凝土的弹性模量和泊松比如何变化没有达成共识, 分析中可以不予考虑。随着应变率的提高, 混凝土的抗压强度有明显的增加趋势。混凝土动态抗压强度可按下式计算

$$f_{cd} = (1.327 + 0.068 \lg \dot{\epsilon}_c) f_{cs} \quad (2)$$

式中: f_{cd} 为当前应变率下的混凝土抗压强度; f_{cs} 为准静态应变率下的混凝土抗压强度; $\dot{\epsilon}_c$ 为受压时混凝土当前的应变率。

随着应变率的提高, 混凝土的抗拉强度有明显的增加趋势。混凝土动态抗拉强度可按下式计算

$$f_{td} = [1.0 + 0.057 \lg (\dot{\epsilon}_t / \dot{\epsilon}_{ts})] f_{ts} \quad (3)$$

式中: f_{td} 为当前应变率下的混凝土抗拉强度; f_{ts} 为混凝土准静态应变率下的抗拉强度; $\dot{\epsilon}_t$ 为受拉时混凝土当前的应变率; $\dot{\epsilon}_{ts}$ 为混凝土准静态应变率, 取 $\dot{\epsilon}_{ts} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

2 Pushover 分析方法

Freeman 最早提出了 Pushover 分析方法, 并将其与设计反应谱相结合, 称为能力谱方法, 用于美国普季特湾海军造船厂的快速评估。之后虽有一定发展, 但没有引起足够重视。原始的 Pushover 分析方法基于 2 个基本假定: 结构的反应仅由基本振型控制; 结构屈服之后, 结构的振型不变。显然, 上述 2 个假定都是不符合实际的。但是, 大量的研究表明,

对于以基本阵型振动为主的结构,Pushover 分析方法可以得到令人满意的结果。Loma Prieta 地震(1989 年)、Northridge 地震(1994 年)和 Kobe 地震(1995 年)给人们带来了巨大的经济损失和社会影响,人们更加关注结构在不同强度地震作用下的状态。在该背景之下,基于性能的抗震设计理念被提出并得到发展。基于性能的抗震设计依赖于计算结构非线性反应的方法,由于非线性动力时程分析的计算成本较高,并且计算结果对所选取的地震波较为敏感,设计者更倾向于采用非线性静力分析方法。能力谱方法被认为是现有建筑抗震性能评估、新建建筑性能目标验证和震害研究的有力工具,它需要建立结构的能力曲线和需求曲线,能力曲线的建立需要对结构进行 Pushover 分析。近十多年来,很多学者对 Pushover 分析方法进行了研究,研究的焦点在该方法的加载模式和适用范围方面,文献[11]中指出了 Pushover 分析方法的优点和缺点。考虑到结构屈服后振型的变化,Bracci 等和 Gupta 等采用自适应的 Pushover 分析方法计算结构的能力曲线,在推覆分析过程中,加载模式随着结构动力特性的改变而改变。这种加载模式虽然更为合理一些,但是不便于工程应用,为了考虑高阶振型的影响,Chopra 等提出了模态推覆分析方法,通过对结构进行多阶模态下的 Pushover 分析并对其进行组合,得到结构的反应。为了将自适应推覆分析和模态推覆分析的优点结合起来,Kalkan 等提出了自适应模态推覆分析方法。

目前,Pushover 分析方法已经取得了很大改进,但仍存在以下 3 个方面的缺陷:

(1)对于平面不规则的结构,侧向力的分布模式还不够合理。扭转振动对这种结构有一定影响,如何在分析中合理考虑该问题需要深入研究。

(2)Pushover 分析还不能合理地考虑结构在地震作用过程中的强度退化和刚度退化。由于退化现象的存在,结构的能力在地震作用过程中是不断降低的,如何考虑该问题需要深入研究。

(3)材料的应变率效应还没有被考虑到 Pushover 分析方法之中。Pankaj 等指出,钢筋混凝土结构在动荷载或循环荷载作用下表现出来的一些特性很难被考虑到非线性静力方法之中。Bracci 等提出,可以通过改变构件弯矩-曲率关系的方法考虑应变率效应,但没有给出改变的方法。在 Pushover 分析中,如何考虑应变率效应是笔者旨在解决的问题。

3 考虑应变率效应的 Pushover 分析方法

3.1 1/4 循环的时间

在简谐运动中,回复力为 0 的位置叫做这个简谐运动的平衡位置。在地震作用下,结构发生复杂的往复运动,这里将各层间剪力为 0 的位置称为结构的平衡位置,将相邻的平衡位置出现时刻之间的过程称为一个半循环过程。对于以第 1 振型振动为主的结构,可以近似认为当结构的基底剪力为 0 时,结构处在平衡位置;在材料没有进入非线性阶段时,结构的平衡位置为结构的初始位置。如果材料进入非线性阶段,由于残余位移的存在,结构的平衡位置不断发生变化,其平衡位置可以根据结构顶点位移时程和结构的基底剪力时程确定。图 1 为本文中模型在峰值加速度调幅到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的 El Centro 波作用下的顶点位移时程曲线,在地震作用过程中,结构的顶点位移有很多极值点。在绝大多数情况下,结构的顶点位移在一个半循环内仅有一个极值,这里将相邻的平衡位置和顶点位移极值所在时刻之间的过程称为一个 1/4 循环。

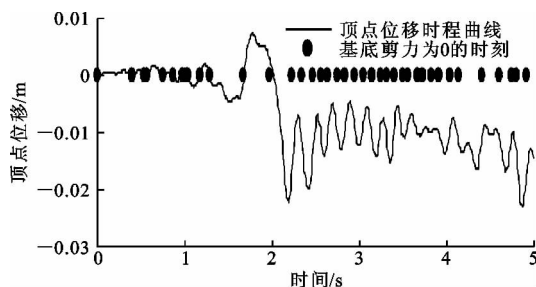


图 1 顶点位移时程曲线

Fig. 1 Time History Curves of Top Displacement

笔者对 1/4 循环的时间进行了研究,结果表明,材料处在弹性阶段时,对于以基本振型振动为主并且地震波的卓越周期 T_g 与结构的基本周期 T_1 之比不是很大 ($T_g/T_1 < 5$) 的结构,1/4 循环的时间大约等于结构基本周期的 1/4。这里需要指出的是,如果地震波的卓越周期与结构的基本周期之比很大,通过弹性动力时程分析得到的结构顶点位移时程曲线很复杂。例如,对于基本周期为 0.15 s 的单层结构,在迁安波和 El Centro 波作用下,结构的顶点位移时程曲线很光滑,满足 1/4 循环时间接近结构基本周期 1/4 的结论,但在天津波作用下,结构的顶点位移时程曲线较为复杂。根据结构动力学原理,上述结论也是正确的。当然,对于绝大多数结构

来说, $T_g/T_1 < 5$ 。

如果材料能够进入非线性阶段, $1/4$ 循环的时间变长, $1/4$ 循环时间的长短主要与结构的基本周期和 $1/4$ 循环内位移的改变量有关。对结构进行 Pushover 分析, 就是将结构从初始位置推覆到目标位移处或让结构达到倒塌状态, 推覆过程相当于一个 $1/4$ 循环, $1/4$ 循环的时间可以取等效线性单自由度体系周期的 $1/4$ 。等效线性单自由度体系周期 T_{equ} 可按式计算

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{equ}} &= T_1 \sqrt{K_e / K_{\text{equ}}} \\ K_{\text{equ}} &= D_i / V_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: K_e 为 Pushover 曲线原点处的切线斜率(图 2); K_{equ} 为将结构推覆到顶点位移 D_i 处的割线斜率; V_i 为顶点位移 D_i 处的基底剪力。

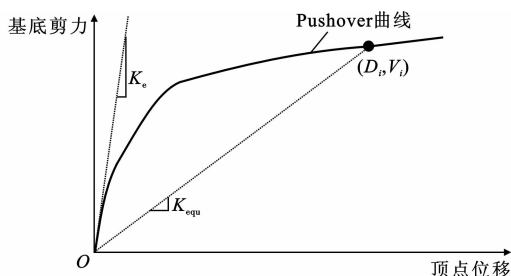


图 2 等效线性单自由度体系的刚度

Fig. 2 Stiffness of Single Freedom Degree System of Equivalent Linearity

由式(4)可以看出, T_{equ} 的大小与 D_i 的大小有关。

3.2 具体步骤

首先需要指出的是, 本文的方法是针对以基本振型振动为主的结构提出的, 因此该方法适用于以基本振型振动为主的结构。

将 Pushover 分析看作一个 $1/4$ 循环之后, 就能够考虑材料的应变率效应。目前看来, 在 $1/4$ 循环内采用平均应变率是最为方便且合理的。由于 Pushover 分析的目标位移是不确定的, 按照上述方法得到的结构能力曲线存在不确定性。为了得到结构确定的能力曲线, 并能使求得的能力曲线与通过 IDA 方法得到的能力曲线更为吻合, 将本文的方法在此基础上做了一点修正。考虑应变率效应的 Pushover 分析方法具体步骤如下:

(1) 确定结构的初始状态并建模。结构处在初始状态时, 每个构件控制截面关键点(对于梁和柱而言, 受拉钢筋和受压区边缘位置为关键点)的应变可以确定。

(2) 确定 Pushover 分析的目标位移 D , 选取合

理的加载模式, 对结构进行不考虑应变率效应的 Pushover 分析, 得到不考虑应变率效应的 Pushover 曲线。

(3) 计算顶点位移为 D_i 时关键点的应变(只考虑材料进入非线性的构件)和对应的 $1/4$ 循环时间[按照式(4)计算]; 计算每个关键点在 $1/4$ 循环内的平均应变率, 按照材料的动态本构模型计算材料在该应变率下的动态强度; 根据关键点的动态强度, 修改对应构件材料的本构关系; 采用合理的加载模式, 将结构推覆到顶点位移 D_i 处, 确定此时的基底剪力 V_i , 最终确定能力曲线上的一个点 (D_i, V_i) 。

(4) 不断改变 D_i 的值, 按照步骤 3 的方法确定能力曲线上的点, 将这些点用光滑曲线连接, 即可得到结构考虑应变率效应的 Pushover 曲线。

该方法不受结构形式和结构采用分析模型的限制。对结构进行 Pushover 分析时, 经常采用塑性铰模型, 下面简要说明在塑性铰模型中如何使用该方法。设置塑性铰时, 需要确定塑性铰的骨架曲线和滞回规则。骨架曲线可以是弯矩-曲率的关系, 也可以是弯矩-转角(转角为相应的截面曲率乘以塑性铰长度)的关系, 这 2 种方法没有本质区别。由于塑性铰模型为宏观计算模型, 软件在计算过程中不计算也不输出某点的应变, 仅输出塑性铰的转角或截面的曲率, 计算关键点的应变存在一定困难。关键点的应变可以按下面方法近似计算, 当截面的曲率为屈服曲率或极限曲率时, 关键点的应变可以根据平截面假定求得; 当截面的曲率在两者之间时, 可以采用线性插值的方法计算。

4 对比验证

为验证 Pushover 分析是否合理, 可以将计算的结果与非线性动力时程分析的结果进行对比。对于某条特定的地震波, 通过设定一系列单调增加的地震动强度指标, 分别对结构进行非线性时程分析, 可以得到结构在不同强度地震作用下的一系列非线性地震响应, 这种方法被称为逐步增量非线性时程分析, 也可称为动力推覆分析。本文中通过单调增加地震波的峰值加速度得到结构的能力曲线, 由于该曲线来自于非线性动力时程分析, 接近结构的实际抗震性能, 所以可以称为较准确意义上的结构能力曲线。该曲线可以用来验证通过 Pushover 分析得到能力曲线的准确性, 文献[17]中采用该方法对钢筋混凝土框架结构推覆分析的加载模式进行了研究, 本文中同样采用 IDA 方法对笔者提出的方法进

行验证。ABAQUS 软件可以在非线性动力时程分析中采用材料的动态本构模型,本文中采用该软件进行建模和分析。

4.1 模型介绍

在不同的加载模式下,结构的能力曲线不同。为了将加载模式的影响排除,采用如图 3 所示的结构模型,该结构模型由 1 根无质量的钢筋混凝土柱和柱顶的质量块组成。对于该结构而言,推覆分析时的加载模式只有 1 种。质量块质量为 4 800 kg,沿柱全长配置 $\Phi 8@100$ 的箍筋。纵筋采用 HRB335 钢筋,箍筋采用 HPB235 钢筋,弹性模量分别为 200、2 100 GPa。混凝土采用 C30,弹性模量和泊松比分别为 30 GPa、0.2。

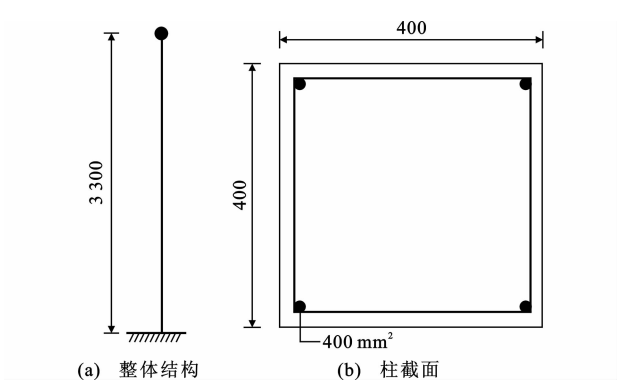


图 3 结构模型(单位:mm)
Fig. 3 Structural Model (Unit:mm)

钢筋采用理想弹塑性本构模型,采用材料的动态本构模型时,只需定义一系列塑性应变率下的屈服强度比。需要指出的是,塑性应变率和应变率在数值上很接近。在 ABAQUS 软件中有很多材料本构模型,但只有混凝土损伤塑性(Concrete Damaged Plasticity, CDP)模型适用于混凝土在循环加载下的分析。这里混凝土采用 CDP 模型,混凝土在静力下的本构关系如图 4 所示,其中 σ 为应力, ϵ_m 为塑性应变。对于混凝土而言,仅考虑应变率对混凝土抗压强度的影响。采用混凝土的动态本构模型时,打开应变率相关选项,输入一系列应变率下的本构关系,ABAQUS 软件在计算的过程中根据线性插值的方法计算每一时刻每一积分点的应力和应变。

CDP 模型不能用于 B31 单元,用于 B21 单元时不能考虑材料的应变率效应。基于以上原因,钢筋混凝土柱采用 C3D8R 单元,单元尺寸为 0.1 m \times 0.1 m \times 0.1 m。钢筋均采用 T3D2 单元,单元长度为 0.1 m,通过软件中的 Embedded 将钢筋埋入混

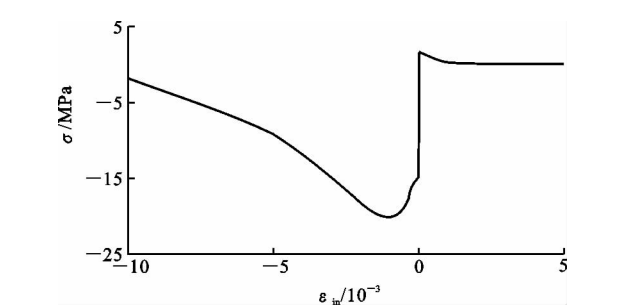


图 4 混凝土的本构关系
Fig. 4 Constitutive Relationship of Concrete
混凝土之中,不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移。

4.2 Pushover 分析

按照本文的方法,对结构进行 Pushover 分析,得到不考虑应变率效应的能力曲线和考虑应变率效应的能力曲线,如图 5 所示。

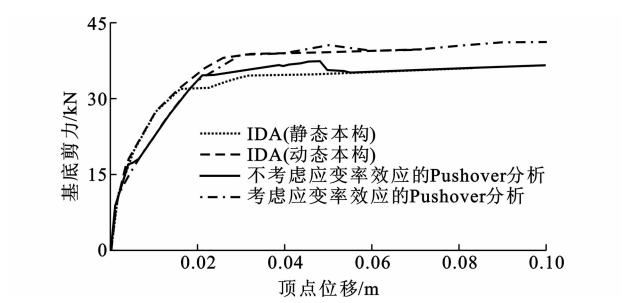


图 5 结构的 Pushover 曲线
Fig. 5 Pushover Curves of Structures

4.3 逐步增量非线性时程分析

本文中采用的地震波为 El Centro 波的南北分量,峰值加速度分别调幅到 1、2、3、4、5、6、7、8、10 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,分别对其进行考虑应变率效应的 IDA 和不考虑应变率效应的 IDA,分析中为节省时间只取地震波的前 5 s 强震段进行输入。每次分析可以得到能力曲线上的一个点,将所有点用光滑曲线连接,可以得到结构的能力曲线(图 5)。

4.4 结果分析

- 通过对计算结果进行分析,可以得到以下结论:
- (1) 在非线性动力时程分析中,是否考虑材料的应变率效应对计算得到的最大基底剪力和最大顶点位移有一定的影响。考虑材料的应变率效应后,计算得到的最大基底剪力增大,最大顶点位移减小。
 - (2) 采用不考虑应变率效应 Pushover 分析得到的结构能力曲线与不考虑应变率效应 IDA 得到的结构能力曲线吻合较好,但与结构采用动态本构模型 IDA 得到的能力曲线相差较大,说明现有的 Pushover 分析方法存在缺陷。
 - (3) 采用本文方法得到的结构能力曲线与采用

动态本构模型 IDA 得到的能力曲线吻合较好,验证了该方法的合理性。

5 结 语

基于结构动力学原理,提出了一种在 Pushover 分析中考虑应变率效应的方法。该方法不仅可以应用于微观模型,还可以用于宏观模型。对该方法得到的 Pushover 曲线和 IDA 得到的结果进行对比,验证了它的合理性。

参考文献:

References:

- [1] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-32.
- [2] 杨道明, 于捷, 李紫桐, 等. 高应变率下三种钢材性能及损伤机理的实验研究[J]. 兵工学报, 1992(3): 65-73.
YANG Dao-ming, YU Jie, LI Zi-tong, et al. An Experimental Study on the Tensile Properties and Damage Mechanism of Three Alloy Steels at High Strain Rate[J]. Acta Armamentarii, 1992(3): 65-73.
- [3] 林峰, 顾祥林, 匡昕昕, 等. 高应变率下建筑钢筋的本构模型[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 14-20.
LIN Feng, GU Xiang-lin, KUANG Xin-xin, et al. Constitutive Models for Reinforcing Steel Bars Under High Strain Rates[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1): 14-20.
- [4] 李敏, 李宏男. 建筑钢筋动态试验及本构模型[J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 70-75.
LI Min, LI Hong-nan. Dynamic Test and Constitutive Model for Reinforcing Steel[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 70-75.
- [5] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
YAN Dong-ming. Experimental and Theoretical Study on the Dynamic Properties of Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [6] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型[J]. 水力学报, 1997(7): 72-77.
DONG Yu-li, XIE He-ping, ZHAO Peng. Experimental Study and Constitutive Model on Concrete Under Compression with Different Strain Rate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(7): 72-77.
- [7] 肖诗云, 林皋, 王哲, 等. 应变率对混凝土抗拉特性影响[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(6): 721-725.
- XIAO Shi-yun, LIN Gao, WANG Zhe, et al. Effects of Strain Rate on Dynamic Behavior of Concrete in Tension[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(6): 721-725.
- [8] PANKAJ P, ERMIAO L. Material Modelling in the Seismic Response Analysis for the Design of RC Framed Structures[J]. Engineering Structures, 2005, 27(7): 1014-1023.
- [9] BHOWMICK A K, DRIVER R G, GRONDIN G Y. Seismic Analysis of Steel Plate Shear Walls Considering Strain Rate and P -delta Effects[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(5): 1149-1159.
- [10] FREEMAN S A. The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design[C]//ECEE. Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: Balkema A A, 1998: 6-11.
- [11] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G D P K. Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 452-464.
- [12] BRACCI J M, KUNNATH S K, REINHORN A M. Seismic Performance and Retrofit Evaluation for Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(1): 3-10.
- [13] GUPTA B, KUNNATH S K. Adaptive Spectra-based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(2): 367-391.
- [14] CHOPRA A K, GOEL R K. A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 561-582.
- [15] KALKAN E, KUNNATH S K. Adaptive Model Combination Procedure for Nonlinear Static Analysis of Building Structures[J]. Journal of Structure Engineering, 2006, 132(11): 1721-1731.
- [16] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental Dynamic Analysis[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [17] 马千里, 叶列平, 陆新征, 等. 采用逐步增量弹塑性时程方法对 RC 框架结构推覆分析侧力模式的研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 132-140.
MA Qian-li, YIE Lie-ping, LU Xin-zheng, et al. Study on Lateral Load Patterns of Pushover Analysis Using Incremental Dynamical Analysis for RC Frame Structures[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 132-140.