

魏强, 肖东升. 基于弹塑性时程分析的结构地震倒塌时间研究 [J]. 灾害学, 2021, 36(4): 7-13, 26. [WEI Qiang and XIAO Dongsheng. Seismic Collapse Time of Structures Based on Elastoplastic Time-history Analysis [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 7-13, 26. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.002.]

基于弹塑性时程分析的结构地震倒塌时间研究*

魏 强¹, 肖东升^{1,2,3}

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 测绘遥感地理信息防灾应急研究中心, 四川 成都 610500; 3. 成都高新减灾研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 地震过程中建筑倒塌前的时间段, 是人员逃生的重要阶段, 研究结构地震倒塌时间规律对人员倒塌逃生避险有重要的意义。针对地震逃生方法研究的需要, 基于 RC 框架结构的典型倒塌模式建立简化结构模型; 将 60 条不同特性的人工地震波输入到 8 个结构模型得到弹塑性时程分析结果, 再以结构损伤指数为 1 的条件求得结构地震倒塌时刻; 利用假设的双重调节模型和回归分析方法, 对地震波峰值加速度、特征周期和结构自振周期等因素与倒塌时间的关系进行了研究, 结果表明, 特征周期和结构自振周期在峰值加速度对倒塌时间的影响中存在双重调节效应; 整理已有研究文献的倒塌试验结果与回归模型对比, 验证弹塑性时程计算对倒塌时间估算的可行性。

关键词: 弹塑性; 时程分析; MATLAB; 地震倒塌时间

中图分类号: X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)04-0007-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.002

历次地震灾害表明, 建筑倒塌是地震灾害的最主要形式, 是造成人员伤亡的主要原因。提高结构抗倒塌能力、震中采取有效的避震方式和震后安全快速的救援则是减少人员伤亡的重要途径^[1]。提高结构抗倒塌能力研究主要有: 通过研究 RC 结构的损伤演化模式^[2]、构件重要性^[3-6]、结构鲁棒性^[7]来探寻结构倒塌机理。对震后应急救援的研究主要有: 预测压埋率加强震后救援快速反应^[8-10]、对压埋人员准确定位^[11]、对废墟中人员存活空间的分布规律研究^[1]、对建筑结构倒塌模式及废墟稳定性的研究^[12]等; 关于结构地震倒塌过程中的逃生避灾的研究相对较少, 原因可能是倒塌过程复杂不能精确还原, 真实震害数据有限。从地震发生到建筑倒塌前的时间段, 对人员逃生显得尤为重要, 它是人员能否安全疏散的重要依据。

据唐山地震后的调查^[13], 统计了 117 例能作出估计的地震发生到房屋倒塌时间, 多数被震醒的人提供的时间仅数秒, 震时清醒者提供的时间达十几秒, 少数可达 20 s 以上。20 s 以内的, 占 83%; 平均时间为 13.6 s; 粗略估计, 从唐山地震发生到房屋倒塌时间为 10~20 s; 民间流传“黄金 12 秒”的说法, 但无充分论证支撑。可见人们对倒塌时间的认知存在问题有: 数据来源于主观回忆,

缺乏论证的依据。若地震中建筑倒塌难以避免, 预估结构倒塌时间有助于科学逃生避灾, 提高人员生还; 若能了解结构特性与地震倒塌时间的关系, 可以预测既有建筑在大震中的倒塌前用时, 可以为人员地震逃生赢得相对充足时间。

目前对于结构地震倒塌的研究多集中在结构的抗地震倒塌设计中, 通过抗震设计的手段来减少灾害的发生; 但我国的既有建筑大都依据设计阶段时的规范, 相比目前的规范要求存在不足的情况, 且在近年发生的地震中, 大量房屋倒塌, 并对人员造成伤亡是不可否认的事实。因此, 针对这样的现状, 本文基于地震作用时结构不可避免的发生倒塌的前提下, 进行讨论和研究倒塌时间问题具有不可忽视的意义。

本文将建立简化的动力学模型, 利用弹塑性时程分析的方法来计算 RC 框架结构的地震倒塌时间, 并分析研究倒塌时间的影响因素以及一般规律, 为后续研究提供一些参考。

1 基本原理

1.1 低层结构的简化模型

据学者对震害调查: 由首层框架柱这一主要

* 收稿日期: 2021-03-19 修回日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774250); 四川省科技计划项目(2019JDR0112); 西南石油大学测绘遥感地信与防灾应急青年科技创新团队(2019CXTD07); 四川省科技创新苗子工程项目(2020046)

第一作者简介: 魏强(1989-), 男, 汉族, 四川绵竹人, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾及防护工程研究。E-mail: wq683@163.com

通讯作者: 肖东升(1974-), 男, 汉族, 四川绵阳人, 博士, 教授, 主要从事空间信息技术与防灾减灾研究。E-mail: xiaodsxds@163.com

的承受竖向荷载的结构构件大量屈服、断裂导致结构的倒塌是 RC 框架结构的主要倒塌模式^[12]。学者们对这一典型倒塌模式的机理研究存在共识：地震作用下，框架底层柱承担的竖向和水平向荷载最大，柱上、下端出现塑性铰后，该层变成几何可变体系，因无法承重而倒塌，出现经典的“层屈服机制”^[14]。翁旭然^[1]研究认为，二层及以上结构的倒塌与第一层结构的倒塌机理存在本质差别，一层倒塌先于上部结构，受地震产生的惯性力控制，上层结构刚体转动和层间变形组成，受重力控制。可以认为：结构开始发生倒塌的起点标志是底层柱的失效。若不考虑动力响应的模态效应，结构一层以上的部分可近似为一刚体，底层柱提供水平恢复力和阻尼力，结构以此简化为单自由度体系(图 1)，根据该体系的动力响应来判断一层柱是否失效，进而判断结构是否开始倒塌。

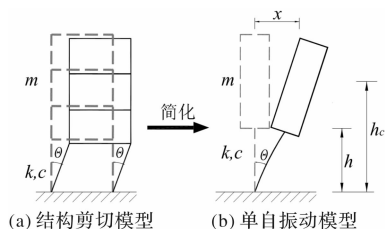


图 1 多层 RC 结构简化的单自由度体系振动

图 1 中 h 为一层柱的高度， h_c 为上部结构刚体的质心距地面高度， k 、 c 分别为一层柱的侧向刚度和阻尼系数； m 为上部结构质量， x 为刚体相对地面的振动位移。模型的动力微分方程为^[15]：

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + f_s = -m \ddot{x}_g \quad (1)$$

式中： m 为振系质量， x ， \dot{x} ， \ddot{x} ，分别为振系质心相对地面的位移、速度、加速度； \ddot{x}_g 为地面运动加速度； f_s 是振系恢复力。需要提出，模型简化尽量合理，需考虑减小上部楼层模态效应的影响，该简化方式仅限于楼层数 3 层以下，水平单方向地震作用力时，近似认为结构由一阶振型控制。

式(1)的各项同时乘以位移微分，并在地震持时内积分，可以得到系统能量运动平衡方程式：

$$m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt + c \int_0^t \dot{x}^2 dt + \int_0^t f_s \dot{x} dt = -m \int_0^t \ddot{x}_g \dot{x} dt \quad (2)$$

方程中 $m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt = 1/2 m \dot{x}^2$ 为振系动能； $c \int_0^t \dot{x}^2 dt$

表示阻尼耗能，即阻尼力所做功； $-m \int_0^t \ddot{x}_g \dot{x} dt$ 表示地

面运动传递给体系的总能量； $\int_0^t f_s \dot{x} dt$ 为系统的恢复力做功，大小为恢复力 - 位移曲线所围面积，其包含有可恢复的弹性形变能和不能恢复的累积滞回能。研究表明^[16]，弹性形变能比例很小，随时程进行减小，无累积过程，可不考虑该部分能量的影响，记为体系的滞回能 $E_h(t) = \int_0^t f_s \dot{x} dt$ 。

1.2 恢复力模型

在地震反应分析中常将实际的恢复力特性曲线模型化，即恢复力模型。常用的恢复力模型有双线性模型和三线性刚度退化模型。本文选用能够较好反应弯曲破坏为主的钢筋混凝土构件破坏特点且考虑刚度退化的 TAKATA 三线性恢复力模型^[17]。退化三线性模型(图 2)各典型阶段的力 - 变形关系式简述如下。

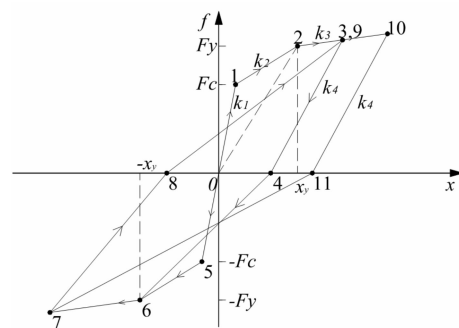


图 2 三线性恢复力模型

(1) 正向或反向弹性阶段(01 段或 05 段)。点 1 表示开裂点。此阶段有 $\dot{x} > 0$ ， $x < x_c$ ；或 $\dot{x} < 0$ ， $x > -x_c$ ；初始条件为 $x_0 = 0$ ， $f(x_0) = 0$ ；刚度降低系数 $\alpha = 1$ ； x_c 代表屈服应力 F_c 对应的位移。

$$f(x_{i+1}) = k_1 x_{i+1}, \quad k_1 = \frac{F_c}{x_0} \quad (3)$$

(2) 正向或反向弹塑性阶段(12 段或 56 段)。点 2 表示屈服点，此阶段有 $\dot{x} > 0$ ， $x_c < x < x_y$ ；或 $\dot{x} < 0$ ， $-x_c > x > -x_y$ ；初始条件为 $x_i = \pm x_c$ ， $f(x_i) = \pm F_c$ ；刚度降低系数为 $\alpha = \alpha_1 = k_2/k_1 < 1$ 。

$$f(x_{i+1}) = \pm F_c \pm \alpha_1 k_1 (x_{i+1} \mp x_c) \quad (4)$$

(3) 正向或反向硬化段(23 段或 67 段)。此阶段 $\dot{x} > 0$ ， $x > x_y$ 或 $\dot{x} < 0$ ， $x < -x_y$ ；初始条件为 $x_i = \pm x_y$ ， $f(x_i) = \pm f_y$ ；刚度降低系数为 $\alpha = \alpha_1 = k_3/k_1 < 1$ 。

$$f(x_{i+1}) = \pm f_y \pm \alpha_2 k_1 (x_{i+1} \mp x_y) \quad (5)$$

(4) 正向或反向硬化段卸载(34 段或 78 段)。此段 $\dot{x} < 0$ ， $x < x_3$ 或 $\dot{x} > 0$ ， $x > -x_7$ ；初始条件为 $x_i = x_3$ ， $f(x_i) = f(x_3)$ 或 $x_i = x_7$ ， $f(x_i) = -f(x_7)$ ；

刚度降低系数为 $\alpha = \alpha_4 = \frac{k_4}{k_1} = \frac{F_y}{x_y k_1}$ 。

$$f(x_{i+1}) = \begin{cases} f(x_3) + \frac{F_y}{x_y} (x_{i+1} - x_3); \\ -f(x_7) + \frac{F_y}{x_y} (x_{i+1} + x_7). \end{cases} \quad (6)$$

(5) 正向硬化阶段卸载至零且第一次反向加载(46 段)。此阶段 $\dot{x} < 0$ ， $x < x_4$ ；初始条件为 $x_i = x_4$ ， $f(x_i) = f(x_4) = 0$ ；刚度降低系数为 $\alpha = \frac{F_y}{(x_4 + x_y) k_i}$ 。

$$f(x_{i+1}) = \frac{F_y}{x_4 + x_y} (x_{i+1} - x_4) \quad (7)$$

(6) 负向硬化阶段卸载至零再正向加载(83

段)。此阶段 $\dot{x} > 0$, $x > -x_g$; 初始条件为 $x_i = -x_g$, $f(x_i) = -f(x_g) = 0$; 刚度降低系数为 $\alpha = \frac{f(x_3)}{(x_3 + x_8)k_1}$ 。

$$f(x_{i+1}) = \frac{f(x_3)}{x_3 + x_8}(x_{i+1} + x_8)。$$
 (8)

式中: x_3 , $f(x_3)$, x_4 , x_7 , $f(x_7)$, x_8 分别表示与点 3、4、7、8 对应的恢复力与变形的绝对值。

基于该模型对恢复力的描述, 恢复力同时取决于位移和速度, 记为 $f_s = f_s(x, \dot{x})$, 将其代入式 (1) 中得式 (9), 滞回能表达式为 $E_h(t) = \int_0^t f_s(x, \dot{x}) \dot{x} dt$ 。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_s(x, \dot{x}) = -m\ddot{x}_g。$$
 (9)

1.3 双重参数型倒塌判定准则

目前关于 RC 框架结构倒塌的判定准则有很多, 各有优劣; 本文选用基于最大位移和能量的倒塌判定准则^[18], 主要有以下两点考虑:

(1) PARK-ANG^[19]同时考虑到了能够体现结构地震过程中的损伤累计效应的变形、能量等参数, 能够从中提取倒塌相关的时间变量, 且计算相对简单。

(2) 张松柏^[20]通过对多种关于 RC 结构的地震倒塌判定准则对比分析能够: 同时考虑位移和能量的双重标准倒塌判定准则, 相比其他种类的判定方法更能准确判定结构的倒塌点。

该类双参数损伤模型可表达为^[19]:

$$D = f\left(\frac{\delta_m}{\delta_u}, \frac{E_h}{E_u}\right)。$$
 (10)

式中: D 为结构的实际损伤指数; δ_m 是结构构件在地震作用下的实际最大变形; δ_u 是构件在单调荷载作用下的极限变形; E_h 是构件在地震作用下的累积滞回耗能; E_u 是结构极限累积滞回耗能。为了形式简单, 计算方便的考虑, 本文采用 PARK 等^[19]通过对钢筋混凝土梁柱试验结果提出的模型:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E_h}{F_y \delta_u}。$$
 (11)

式中: β 是结构构件耗能因子, 对于 RC 框架结构, 平均值取值为 0.1 ~ 0.15, 本文取 0.15; F_y 是结构构件的屈服剪力, 由屈服变形和初始刚度决定, 即:

$$F_y = k \cdot x_y。$$
 (12)

式中: x_y 为体系一层柱顶处相对地面的屈服位移, 令 θ_y 为屈服相对位移角, 即 $x_y = h_c \theta_y$; 令 θ_m 为极限相对位移角, 即: $\delta_u = h_c \theta_m$; 将参数式联同式 (12) 和 β 取值代入式 (11) 中, 得到式 (13):

$$D = \frac{\delta_m}{h_c \theta_m} + 0.15 \frac{E_h}{k \theta_y \theta_m h_c^2}。$$
 (13)

在动力响应过程中, δ_m 、 E_h 都随时间变化, 令其均为时间 t 的函数, 即 $\delta_m(t)$ 、 $E_h(t)$, 分别表示时刻 t 的最大的相对位移值和累积滞回能, 见式 (15)。因此损伤指数 D 亦为 t 的函数, 即 $D(t)$ 表

示时刻 t 的结构损伤值, 将其替换式 (13) 中的对应项后得式 (14), 则可根据求得任意时刻结构的累积损伤值。

$$D(t) = \frac{\delta_m(t)}{h_c \theta_m} + 0.15 \frac{E_h(t)}{k \theta_y \theta_m h_c^2};$$
 (14)

$$\delta_m(t) = \max\{x(\tau)\}; \tau \in [0, t]。$$
 (15)

PARK^[20]、ANG^[21]和 WEN^[22]提出损伤划分标准, 当 $D \geq 1$ 时, 结构倒塌。可认为满足 $D(t) = 1$ 的最小 t 值则为结构的倒塌时间, 用数学表达为式 (16), 其中 T_{cl} 为结构开始发生倒塌的时刻, 即倒塌时间。

$$T_{cl} = \min\{t | D(t) = 1\}。$$
 (16)

1.4 倒塌时间数据获取方式

通过 Matlab 编制基于双线性滞回模型的单自由度体系地震响应分析程序, 计算出 RC 弹塑性结构的能量响应时程^[16], 再换算出结构在地震波作用下的损伤指数响应时程, 通过损伤指数为 1 的条件得到时刻 T_{cl} , 具体数据获取流程如图 3 所示。

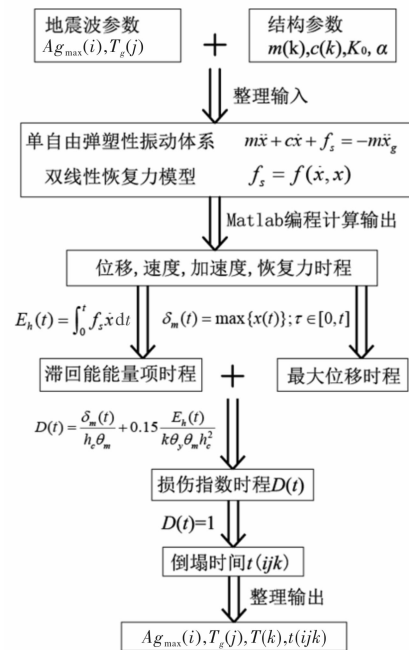


图3 倒塌时间数据获取流程

2 倒塌时间影响因素分析与模型假设

2.1 地震波的特性

表征地震波特性的参数^[23]主要有: 幅值, 反应地震的强度; 频谱, 反应能量频域上的分布特征, 与场地和震距有关; 持时, 反应能量在时间轴上的分布特征, 与能量相关。本文对于地震波的选取, 主要从以下几方面考虑: 暂不考虑地震波幅值的时序影响, 统一选用增加段、稳定段、衰减段的简单时序; 暂不考虑持时的影响, 统一选用 60 s 持时; 考虑与破坏烈度相关的峰值加速度的影响; 考虑地震波的特征周期的影响, 根据

国标《GB50011—2010 建筑抗震设计规范》^[24] 设定生成人工波。

综上本文将从与地震破坏强度相关的峰值加速度 $A_{g\max}$ 、与场地条件相关的地震波特征周期 T_g 两个特征进行研究。

2.2 结构体系特性

将式(1)变换成式(17)的动力学基本方程知道,当激励荷载一定时,结构响应由阻尼比、振系固有频率决定;阻尼比取决于结构材料性质,对于 RC 结构阻尼比取值 0.05;

$$\ddot{x} + 2\xi\omega \dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_g \quad (17)$$

振系固有频率取决于结构特性,其中 $\omega = \sqrt{k/m}$,在弹塑性响应中, ω 并非固定值;若 m 不变,结构的动力响应取决于变化的刚度 k 值,这也是结构损伤的来源,增加了研究难度。当地震荷载与结构一定,结构倒塌点对应的刚度值一定,刚度越大,则刚度从初始衰退到倒塌点需要的时间越长。本文认为,弹塑性过程中 k 的初始值仍可作为结构特性的代表参数,考虑量纲一致,将对初始自振周期 $T = 2\pi \sqrt{m/k}$ 进行研究。

2.3 倒塌时间起始与结束

本文所需要讨论的倒塌时间,应考虑室内人员的普遍感知。可认为从人体感知到地震引起的摇晃到结构发生倒塌的时间段为有效时间;在此之前的,结构摇晃不被人体所感知,并不会引起人员的逃生行为。因此,需要从两方面进行假设:一方面为排除同一地震源的不同地震波到达地面时间上的影响,本文仅依据地震时程记录进行计算,不考虑震源到地面的时间差影响;另一方面,为排除地震波作用起始时间后并不被人体感知的无效时间段的影响,在计算的时间段中,统一扣除结构模型底层位置角第一次达到开裂点前的时间。

2.4 模型假设

结构的倒塌演化过程可描述为:地震波从震源通过场地介质传播到地面,场地对地震波过滤后传递给结构,结构刚度衰变直至结构倒塌;倒塌影响过程中,地震波是主因,没有地震荷载将不

会有倒塌发生,其他因素影响将无从讨论。理论上,地震动峰值加速度和结构质量的乘积等于作用在结构上的惯性力,峰值加速度越大惯性力越大,对结构的破坏作用越强^[25]。则峰值加速度越大,结构越容易倒塌,倒塌需要的时间越短。

地震荷载一定时,认为结构初始刚度越大,自振周期越小,刚度衰变过程越长,越不容易倒塌,发生倒塌需要的时间越长。因此,自振周期加强或削弱地震荷载对结构倒塌的影响,即调节作用。按照《GB50011—2010 建筑抗震规范》地震影响系数曲线,结构自振周期与地震动特征周期接近时,地震作用最大,其原因在于“共振”。可能存在的关系是:地震波特征周期与结构自振周期共同调节地震峰值加速度对倒塌时间的影响。

综上,本研究拟考察三方面的内容:第1,峰值地震加速度对倒塌时间的影响;第2,自振周期在其间的调节作用;第3,特征周期影响着自振周期在峰值加速度对倒塌时间影响中的调节作用,即存在一个双重调节模型(图4)。

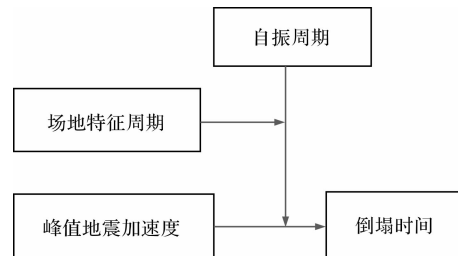


图4 双重调节模型假设

3 时程分析计算与结果分析

3.1 算例设计

对8栋RC框架结构分别输入60条人工地震波进行弹塑性时程分析,结构的特性参数见表1,人工地震波的特性参数见表2,各工况的倒塌时间计算结果处理见图5。

表1 各结构计算参数

结构	总层数	底层高/m	首层柱截面/m	$K/(N/m)$	m/kg	平均轴压比	T/s
结构1	1	4.2	0.35×0.35	2.43×10^7	6.43×10^5	0.90	1.02
结构2	1	4.2	0.35×0.35	2.43×10^7	6.08×10^5	0.85	0.99
结构3	1	4.2	0.35×0.35	2.43×10^7	5.36×10^5	0.75	0.93
结构4	1	4.2	0.35×0.35	2.43×10^7	4.65×10^5	0.65	0.87
结构5	2	4.2	0.50×0.50	1.01×10^8	1.29×10^6	0.90	0.71
结构6	2	4.2	0.50×0.50	1.01×10^8	1.22×10^6	0.85	0.69
结构7	2	4.2	0.50×0.50	1.01×10^8	1.07×10^6	0.75	0.64
结构8	2	4.2	0.50×0.50	1.01×10^8	9.30×10^5	0.65	0.60

注:结构砼强度等级 C30,弹性模量 $E = 3.00 \times 10^{10}$ Pa;每层4根柱;屈服位移角取 1/250,极限位移角 1/50;开裂位移取屈服位移角 0.25 倍,即 1/1 000。

表 2 人工地震波计算参数

人工地震波编号	烈度	特征周期/s	最大影响系数	峰值/(m/s^2)
(1) - (10)	FOR - 9(0.40 m/s^2)	0.2、0.25、0.30、0.35、0.40、 0.45、0.55、0.65、0.75、0.9	0.90	0.405
(11) - (20)	FOR - 8(0.30 m/s^2)	0.2、0.25、0.30、0.35、0.40、 0.45、0.55、0.65、0.75、0.9	0.68	0.306
(21) - (30)	FOR - 8(0.20 m/s^2)	0.2、0.25、0.30、0.35、0.40、 0.45、0.55、0.65、0.75、0.9	0.45	0.203
(31) - (40)	RA - 9(0.40 m/s^2)	0.2、0.25、0.30、0.35、0.40、 0.45、0.55、0.65、0.75、0.9	1.40	0.630
(41) - (50)	RA - 8(0.30 m/s^2)	0.2、0.25、0.30、0.35、0.40、 0.45、0.55、0.65、0.75、0.9	1.20	0.540
(51) - (60)	RA - 8(0.20 m/s^2)	0.2、0.25、0.30、0.35、0.40、 0.45、0.55、0.65、0.75、0.9	0.9	0.405

注: 人工地震波按照国标取值, 其他参数取值: 最小周期 0.02 s, 最大周期 6 s, 稳定阶段开始时刻 4 s, 稳定阶段持时 40 s, 总持时 60 s; g 为重力加速度。

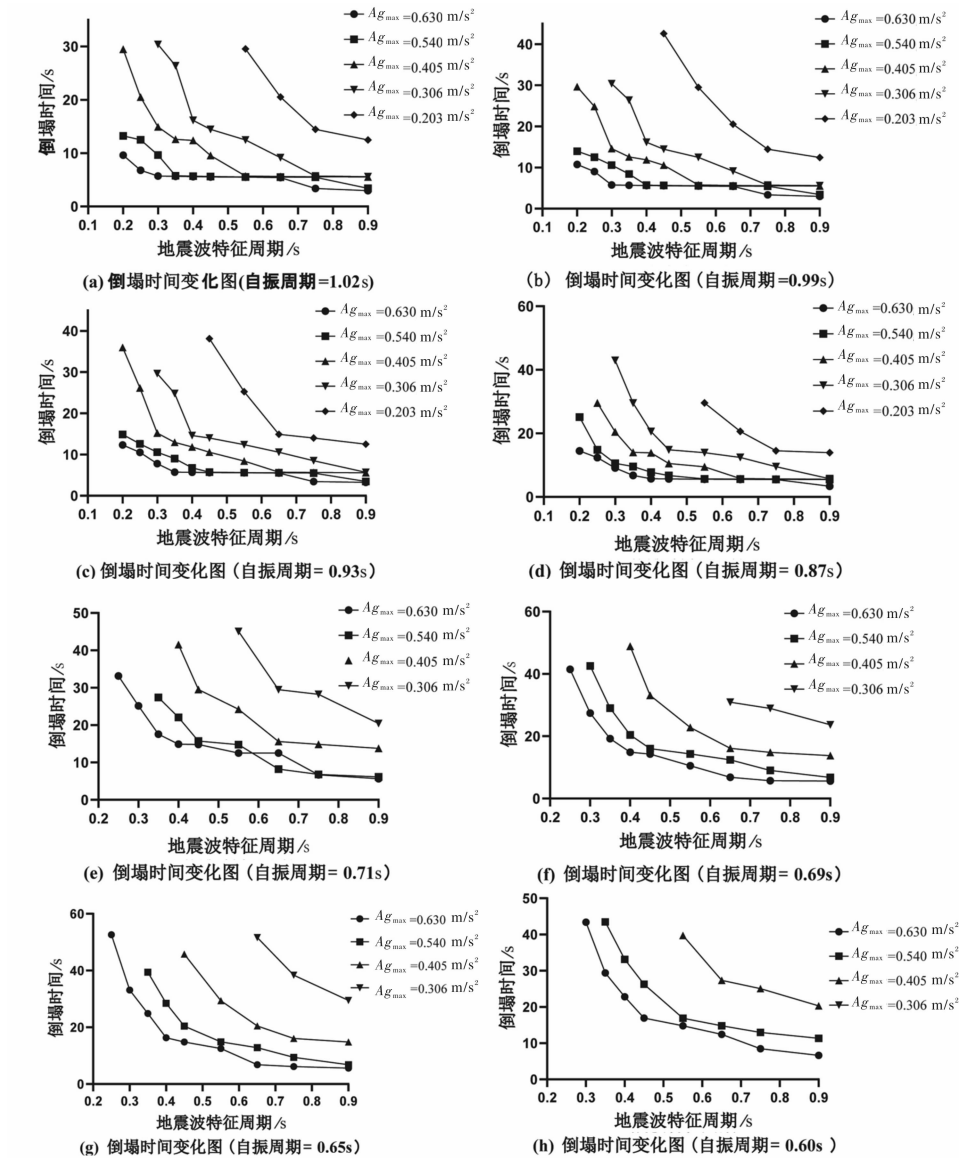


图 5 各结构的倒塌时间变化

3.2 结果分析与讨论

(1) 描述统计与相关性分析

为研究结构的倒塌时间与结构参数之间、倒塌时间与地震动参数之间的关系,引入 Pearson 相关系数^[26],两个随机变量的相关性用式(18)计算。式中, $Cov(X, Y)$ 为随机变量 X 和 Y 的协方差; $D(X)$ 和 $D(Y)$ 为随机变量 X 和 Y 的方差。

$$\rho_{\text{pearson}} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \quad (18)$$

由式(18)计算出影响参数和倒塌时间的相关性系数。如表 3 所示,倒塌时间分别与自振周期、加速度峰值、特征周期均存在显著负相关。

(2) 调节效应分析

为探讨结构自振周期在地震加速度峰值与倒塌时间之间关系的调节作用,以地震加速度峰值为预测变量,倒塌时间为结果变量,自振周期为调节变量,地震波特征周期为控制变量,采用 Process 软件包 Model1 进行调节效应分析。结果如表 4(模型 1),峰值地震加速度对倒塌时间具有显著的预测作用($B = -75.909$, $SE = 15.467$, $t = -17.190$, $p < 0.05$),自振周期对倒塌时间具有显著预测作用($B = -72.910$, $SE = 8.69$, $t = -24.93$, $p < 0.05$),自振周期与地震加速度峰值的乘积对倒塌时间具有显著预测作用($B = 40.768$,

$SE = 17.080$, $t = 2.390$, $p < 0.05$)。进一步的简单斜率分析结果表明(如图 6a),自振周期较高时会削弱地震加速度峰值对倒塌时间的影响($\beta = -34.455$, $p < 0.05$),这种显著的负向影响关系将随着自振周期的降低而增强($\beta = -46.035$, $p < 0.05$)。

为探索地震波特征周期对自振周期在地震加速度峰值与倒塌时间之间关系调节效应的影响,将自振周期与地震加速度峰值乘积项作为预测变量,倒塌时间作为结果变量,特征周期作为调节变量,采用同上 Model1 进行数据分析。结果如表 4(模型 2),特征周期对于倒塌时间存在显著的预测作用($B = -32.290$, $SE = 5.600$, $t = -5.76$, $p < 0.05$),加速度峰值、自振周期、特征周期三者乘积对倒塌时间存在显著预测作用($B = -32.230$, $SE = 13.050$, $t = 2.470$, $p < 0.05$)。进一步简单斜率分析结果表明(图 6b):当特征周期较高时会削弱自振频率在地震加速度峰值与倒塌时间之间关系的负调节作用($\beta = -48.347$, $p < 0.05$),这种显著的负调节作用将随着特征周期的降低而增强($\beta = -62.2317$, $p < 0.05$)。

综上所述表明,提高自振周期,降低特征周期可以降低地震峰值加速度变化对倒塌时间的影响;降低自振周期,提高特征周期,反之。

表 3 各变量的描述性统计及相关性分析 ($N=370$)

	M	SD	1	2	3
1 自振周期	0.875	0.142	—		
2 峰值加速度	0.461	0.128	-0.220***	—	
3 特征周期	0.541	0.215	-0.224***	-0.176***	—
4 倒塌时间	13.328	10.380	-0.513***	-0.245***	-0.211***

注: * 代表 $p < 0.05$, ** 代表 $p < 0.01$, *** 代表 $p < 0.001$, 下同。

表 4 调节模型检验

	模型 1 (自振周期调节)			模型 2 (自振周期、特征周期双重调节)		
	B	SE	t	B	SE	t
常数	107.86***	8.11	31.9	53.1451***	3.54	14.99
地震加速度峰值(A)	-75.91***	15.47	-17.19			
自振周期(B)	-72.91***	8.69	-24.9286			
特征周期(C)	-22.219***	1.37	-16.1898	-32.29***	5.60	-5.76
交互项(AB)	40.768**	17.08	2.3868	-72.73***	7.92	-9.18
交互项(ABC)				32.235**	13.05	2.47
交互项 ΔR^2		0.004			0.006	
F		5.696			6.100	

注: 因变量为倒塌时间

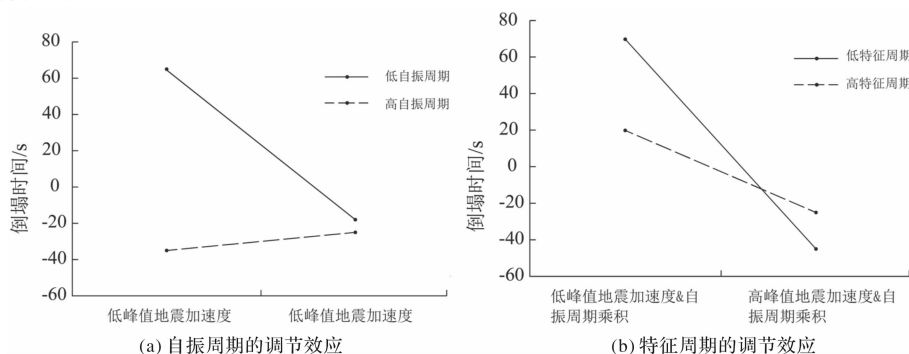


图 6 调节效应图

表 5 回归模型与实例对比误差

案例	地震波	T/s	$Ag_{\max}/(m/s^2)$	T_g/s	T_{cl} 试验值/s	T_{cl} 估算值/s	误差/s
案例 1	El centro	0.73	6.174	0.45	6.97	15.06	8.09
案例 2	El centro	0.60	5.586	0.45	20.28	24.11	3.81
案例 3	El centro	0.60	5.772	0.45	22.35	23.42	1.07

3.3 数学回归分析及实例对比

对自振周期 T 、地震加速度峰值 Ag_{\max} 、地震波特征周期 T_g 进行中心化, 并连同其交互项对倒塌时间 T_{cl} 进行逐步回归, 得到式(19)的数学关系, 拟合优度 $R^2 = 0.616$ 。式中变量平均值对应表 3, 各变量值域分别为 $T \in [0.6, 1.02]$ 、 $Ag_{\max} \in [1.989, 6.174]$ 、 $T_g \in [0.20, 0.90]$ 。由于振台试验所捕捉的倒塌时间数据相对真实, 将含有振台试验的文献数据进行相似比换算整理, 其中包括: 案例 1^[27]、案例 2^[28]、案例 3^[29]; 对自振周期值不在回归模型取值范围的, 按回归模型变量值域取最大值; 与本文的预估数值进行对比, 如表 5。研究表明估算值与试验值存在一定的误差, 总体上能够拟合, 说明本文自变量参数总体上解释了 RC 结构地震倒塌时间影响规律。

误差的原因可能有: 关于规范中屈服点和倒塌点的层间位移角与实际的差异; 结构模态效应造成的差异; 人工地震波与实际地震波存在差异; 样本数据量少; 讨论的因素变量单一, 未考虑其他层次的影响。

$$T_{cl} = 13.561 - 51.702(T - \bar{T}) - 37.782 \cdot (Ag_{\max} - \bar{Ag}_{\max}) - 20.702 \cdot (T_g - \bar{T}_g) + 445.621 \cdot (T - \bar{T})(Ag_{\max} - \bar{Ag}_{\max}) - 25.338 \cdot (T - \bar{T})(T_g - \bar{T}_g) \quad (19)$$

4 结论与问题展望

本文以单自由度弹塑性响应为理论依据进行时程分析, 以双重参数型损伤的倒塌判定条件计算 RC 结构地震倒塌的发生时间, 再通过地震波加速度峰值、特征周期和结构自振周期等因素与倒塌时间的关系进行分析, 得到如下结论:

(1) 地震峰值加速度是结构倒塌的根本因素, 峰值加速度越大, 倒塌时间越短。

(2) 提高自振周期, 降低特征周期可以降低地震峰值加速度变化对倒塌时间的影响; 反之影响增加。

(3) 弹塑性时程计算对倒塌时间估算具有可行性, 但与实际情况存在差异。

需要进一步深入研究的问题:

(1) 结构地震倒塌现象十分复杂, 影响因素繁多, 研究范围有待扩展。

(2) RC 结构地震倒塌时间的影响模型需赋予物理解释。

(3) 地震不可复制, 需大量试验或仿真, 结论建立在大量数据基础上。

参考文献:

- [1] 翁旭然. 建筑结构地震倒塌及存活空间分布规律研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.
- [2] 苏佑智, 刘伯权, 邢国华, 等. 地震作用下 RC 框架结构损

- 伤演化过程分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 74-83.
- [3] 蒋淑慧, 袁行飞, 马烁. 考虑冗余度的杆系结构构件重要性评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(12): 187-192.
- [4] 罗立胜, 罗永峰. 既有网格结构构件重要性实用判定方法[J]. 结构工程师, 2017, 33(2): 109-114.
- [5] 张雷明, 刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007(3): 45-49.
- [6] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005(5): 746-750.
- [7] 任伟新, 靳启文. 结构的鲁棒性、冗余度和易损性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(9): 1-10.
- [8] 肖东升, 钟祖峰, 罗尚, 等. 基于直觉模糊层次分析法的地震压埋率模型研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(3): 127-135.
- [9] 肖东升, 项霞, 张发平. 基于置信区间的地震压埋人员实时伤亡状态预估模型[J]. 世界地震工程, 2012, 28(1): 26-32.
- [10] 肖东升, 钟祖峰. 基于人类动力学的地震压埋人员先验在室率研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 54-59.
- [11] 罗尚, 肖东升. 一种面向震后压埋人员的 RSSI 快速定位算法[J]. 测绘科学, 2020, 45(6): 142-149.
- [12] 付成祥. RC 框架结构典型地震倒塌模式研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- [13] 山西省地震局防震减灾宣传教育中心. 地震灾害防灾减灾知识读本[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2014: 19-30.
- [14] 王波. 典型 RC 框架结构地震倒塌机理研究[D]. 三河: 防灾科技学院, 2017.
- [15] ANIL KCHOPRA. 结构动力学理论及其在地震工程中的应用(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 139-205.
- [16] 张振浩, 陈威, 唐逸葵, 等. 基于 MATLAB 的地震作用下 SDOF 体系能量响应时程分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 113-128.
- [17] 朱铭. 钢管混凝土柱恢复力模型研究[J]. 广东建材, 2020, 36(6): 44-46.
- [18] 孙玉红, 聂立武, 韩古月. 地震作用下建筑结构倒塌失效准则分析[J]. 中外建筑, 2011(7): 199-201.
- [19] PARK Y-J, ANG AHS, WEN YK Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings[J]. Earthquake Spectra, 1987, 3(1): 1-26.
- [20] 张松柏. RC 框架结构地震倒塌判定准则分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [21] YOUNG-JI PARK, ALFREDO H-S, ANG, et al. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [22] PARK Y-J, ANG AHS, WEN YIC, et al. Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [23] 赵婷婷, 谭军, 金春峰. 谈时程分析中地震波的选取[J]. 山西建筑, 2017, 43(14): 41-43.
- [24] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [25] 郝敏, 刘晶波, 谢礼立. 基于 RC 框架结构破坏损伤的地震烈度物理标准研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(S1): 99-104.
- [26] ELENAS A, K MESKOURIS. Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures[J]. Engineering Structures, 2001, 23(6): 698-704.
- [27] 顾祥林, 黄庆华, 汪小林, 等. 地震中钢筋混凝土框架结构倒塌反应的试验研究与数值仿真[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 36-45.
- [28] 骆欢, 杜轲, 孙景江, 等. 地震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌全过程振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 49-56.
- [29] 黄庆华. 地震作用下钢筋混凝土框架结构空间倒塌反应分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.

(下转第 26 页)

king under different gradient, and the time-frequency analysis method that combination EMD and STFT is used to analysis its spectrum characteristics. Experimental results shown that: (1) According to the seismic signal, the dynamic process of simulated granular flow is divided into the separation start phase, the acceleration phase, the impact contact phase, and the accumulation phase, additionally, the time domain, time-frequency domain and instantaneous energy characteristics of each phase are analyzed; (2) The energy intensity, frequency and amplitude of the seismic signal generated by the relative movement of the granular flow have a strong correlation with the movement state of the granular flow relative to the chute; (3) the gradient of slope remarkably affect the characteristics of the wave curve and the energy distribution. Significantly, the maximum amplitudes of the acceleration phase and the impact contact phase gradually shows a good linear relationship; (4) The piedmont flat-type granular flow and the river-blocking granular flow caused the waveform, time-frequency diagram, instantaneous energy changes as well as the maximum amplitude of the piedmont flat-land granular flow in the accumulation stage is distinguish with the river-blocking granular flow, which could be quantified as discriminate signals for identification of river-blocking granular flow.

Key words: model experiment; Granular flow; gradient of slope; seismic signal; spectrum characteristics

(上接第 13 页)

Seismic Collapse Time of Structures Based on Elastoplastic Time-history Analysis

WEI Qiang¹ and XIAO Dongsheng^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Surveying, Mapping and Remote Sensing Geographic Information Disaster Prevention and
Emergency Research Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Institute of Care-Life, Chengdu 610041, China)

Abstract: The time before the collapse of buildings in earthquake is an important stage for people to escape. It is of great significance to study the collapse time rule of structures in earthquake for people to escape from collapse. Based on the typical collapse mode of RC frame structure, a simplified structure model is established for the study of earthquake escape methods. The elastoplastic time-history analysis results are obtained by inputting 60 artificial seismic waves with different characteristics into 8 structural models, and then the collapse time of the structure is obtained by taking the structural damage index as 1. The relationship between peak acceleration of seismic wave, characteristic period and natural vibration period of structure and collapse time is studied by using the assumed double regulation model and regression analysis method. The results show that the characteristic period and natural vibration period of structure have double regulation effect in the influence of peak acceleration on collapse time. To verify the feasibility of collapse time estimation by elastic-plastic time history calculation, the collapse test results of existing research literature are compared with regression model.

Key words: elastic-plastic; time history analysis; MATLAB; earthquake collapse time