

文章编号:1000-582X(2013)06-103-09

# 近断层竖向速度脉冲地震作用对 RC 柱抗剪性能的影响

赵卫锋<sup>1</sup>, 田淞午<sup>1</sup>, 周靖<sup>1,2</sup>

(1. 湘潭大学 土木工程系, 湖南 湘潭 411105; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

**摘要:**以单个 RC 柱为分析对象, 采用台湾集集地震中 3 组断层距 18 条速度脉冲型地震动记录, 通过非线性动力时程分析, 研究断层距、竖向与水平加速度谱值比、柱初始轴压比、竖向和水平振动周期以及剪跨比对 RC 柱抗剪性能的影响规律。结果表明: 近断层竖向速度脉冲地震作用对 RC 柱的抗剪性能有很大影响; 抗剪性能系数随反应谱比值增大而减小, 中等初始轴压比与断层距、以及剪跨比与近断层距(0~10 km)对柱抗剪性能有交互作用。最后, 对结果进行非线性回归分析, 建立了考虑近断层竖向速度脉冲地震效应及其影响因素交互作用的抗剪性能系数表达式。

**关键词:** 竖向速度脉冲地震作用; 钢筋混凝土柱; 抗剪需求; 抗剪承载力; 断层距

中图分类号: TU311

文献标志码: A

## Shear resistant performance of RC columns subjected to vertical near-fault velocity pulse-like earthquake actions

ZHAO Weifeng<sup>1</sup>, TIAN Songwu<sup>1</sup>, ZHOU Jing<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;  
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Single RC columns are used to investigate the influence of fault distance, vertical and horizontal acceleration spectral ratio, initial axial load ratio, fundamental period and shear span ratio on shear resistant behavior of RC columns. Eighteen-velocity pulse-like earthquake records divided into three-fault distance from Chi-Chi earthquake are used as excitations to execute nonlinear dynamic time history analysis. The results demonstrate that axial velocity pulse-like earthquake action has evident effects on the shear resistant performance of RC columns. Shear-resistant behavior factor decreases with the increase of spectral ratio, and medium initial axial load ratio and fault distance, shear span ratio and near fault distance (0~10 km) have coupling influence on the shear-resistant behavior of RC columns. Finally, nonlinear regression analysis of analytical data in the present study is carried out and empirical approach considering different effect of these factors is proposed.

**Key words:** vertical velocity pulse-like ground motion; reinforced concrete column; shear-resistant demand; shear-resistant capacity; fault-distance

收稿日期: 2013-01-06

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ6047); 亚热带建筑科学国家重点实验室基金项目(2010KB13); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20094301120001)

作者简介: 赵卫锋(1977-), 女, 博士研究生, 主要从事结构力学研究, (E-mail) weifengzhjing@126.com。

近断层速度脉冲型竖向强震作用对混凝土框架柱抗剪性能的影响,近年来引起较大关注<sup>[1-4]</sup>。大量近断层强震记录显示竖向与水平加速度峰值比可高达 2.0 以上,高峰值比速度脉冲地震作用下,混凝土框架柱很容易形成剪切破坏或剪压破坏,随着剪切破坏机制的形成和发展,柱竖向承载力损失很快,进而导致楼层框架柱的连续倒塌。2008 年汶川地震中,许多 RC 建筑物破坏有竖向地震作用的痕迹<sup>[3]</sup>。随着震害调查的深入,人们发现速度脉冲地震作用是导致工程结构抗剪脆性破坏的主要原因之一<sup>[1-4]</sup>:一方面近断层区域水平向速度脉冲地震效应增大了 RC 柱的抗剪需求;另一方面竖向速度脉冲地震效应通过高幅值的拉压作用降低了柱的抗震受剪承载力,同时伴随有 RC 框架柱竖向承载能力和刚度的快速退化<sup>[1-5]</sup>。

受制于速度脉冲型地震动效应研究的复杂性,关于近断层竖向速度脉冲地震效应对 RC 柱抗剪性能影响的研究尚不完善。Kunnath<sup>[1]</sup>研究了混凝土桥墩的抗震性能,发现竖向速度脉冲地震作用下桥墩的抗剪承载力有显著的减小。Elnashai<sup>[6]</sup>的试验表明竖向构件的抗剪性能对竖向激励十分敏感。Zaghloul<sup>[7]</sup>研究混凝土框架结构在双向速度脉冲和非速度脉冲地震作用下的抗剪需求和抗剪能力,结果表明速度脉冲地震作用下柱更容易出现脆性破坏;Austin<sup>[8]</sup>针对双桥柱结构的研究得到相似的结论。

课题组前期采用等效正弦速度脉冲激励进行过相关研究<sup>[9]</sup>,但研究对象是 RC 框架结构体系,没有深入地分析 RC 柱抗剪能力的动态变化;等效正弦速度脉冲激励与实际的方向性速度脉冲地震作用也有较大差异。文中以单个 RC 柱为考察对象,采用竖向和水平加载耦合速度脉冲强震作用的方式,重点考察竖向速度脉冲地震效应对 RC 柱抗剪性能的影响规律,并建立对抗剪承载力修正的表达模型,为 RC 柱的抗震设计提供参考。

## 1 地震记录与 RC 柱数值模型

### 1.1 地震记录

采用美国太平洋地震工程研究中心强震数据库<sup>[10]</sup>收集的台湾集集强震记录进行动力时程分析。地震记录取南北向 3 个断层距范围,分别是:0~10 km,20~30 km 和 30~45 km,如表 1 所示。一般的地震记录断层距越小,地震速度脉冲效应越显著,断层距大小能够体现地震加速度记录速度脉冲效应的大小。每个断层距范围内取 6 组水平和竖向强震加速度时程。地震动强度以加速度基阶反应谱(水平向振动周期分别为 0.07 s,竖向振动周期分别为 0.008 s)表征,竖向与水平加速度反应谱值比依次设定为 0.5、1.0、1.5、2.0。

### 1.2 柱数值参数

设计 4 根 RC 柱,净高分别为 750、937.5、1 125、1 312.5 mm,截面尺寸均为 400 mm×400 mm。混凝土圆柱体抗压强度特征值取 25.3 N/mm<sup>2</sup>,抗拉强度 2.515 N/mm<sup>2</sup>,最大应变 0.002。纵向钢筋单侧 4φ22(HRB335,对称配筋),横向箍筋 8φ150,屈服强度按规范标准值设定。混凝土柱数值计算模型如图 1 所示。通过变化柱端质量块,保持分析实现 RC 柱水平和竖向振动周期变化。利用结构弹塑性分析程序 Seismostruct<sup>[11]</sup>进行动力分析。Seismostruct 是专业为结构地震工程研究开发的动力和静力分析模拟平台,纤维材料模拟结构构件,目前已广泛应用于地震工程研究。为验证程序分析混凝土框架柱抗剪性能的有效性和敏感性,首先对 1 根剪弯破坏的混凝土柱拟静力试验结果进行了模拟分析<sup>[12]</sup>,以确定程序的相关参数设置。数值分析的材料本构模型,钢筋采用 Menegotto-Pinto 模型,混凝土采用非线性约束模型<sup>[11]</sup>。试验测试和数值分析比较如图 2 所示。从图可知,二者的最大载荷水平、位移以及刚度和强度退化趋势等都有较高的吻合,表明程序能够进行混凝土柱的抗剪性能数值模拟研究。

表 1 分析采用的台湾集集地震记录

分组/km	地震记录 站台	断层距/ km	竖向地震记录			水平向地震记录		
			加速度 峰值/g	速度峰值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	延时/s	加速度 峰值/g	速度峰值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	延时/s
0~10	TCU049	4.48	0.171	26.1	90	0.251	61.2	90
	TCU052	0.24	0.241	110.5	90	0.419	118.4	90
	TCU054	5.92	0.130	30.9	90	0.188	38.5	90
	TCU072	7.36	0.279	35.8	90	0.400	56.3	90
	TCU076	1.95	0.281	34.0	90	0.416	64.2	90
	TCU103	4.01	0.149	64.3	90	0.162	26.8	90
20~30	CHY026	29.25	0.074	23.9	90	0.066	32.6	90
	CHY104	20.72	0.125	34.1	150	0.187	55.2	150
	TCU042	23.34	0.086	19.7	90	0.199	39.3	90
	TCU107	20.35	0.088	27.8	90	0.158	47.4	90
	TCU117	25.55	0.088	19.7	90	0.12	54.4	90
	TCU111	22.22	0.079	24.7	90	0.099	35.6	90
30~45	CHY032	39.34	0.062	7.4	90	0.078	19.4	90
	CHY082	38.27	0.081	8.9	90	0.063	24.7	90
	HWA036	43.64	0.032	7.0	90	0.058	12.7	90
	TCU033	38.19	0.079	15.6	90	0.18	24.5	90
	TCU119	38.95	0.062	15.4	90	0.058	16.8	90
	HWA024	44.32	0.025	4.5	90	0.024	4.8	90

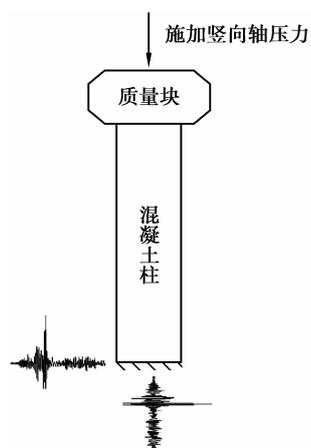


图 1 分析采用的 RC 柱

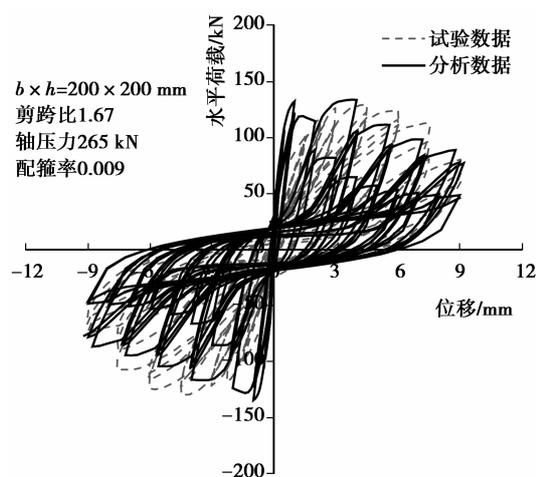


图 2 试验结果与分析结果的比较

## 2 参数影响分析

### 2.1 断层距的影响

以剪跨比为 3.5 和初始轴压比为 0.3 的 RC 柱为分析对象,竖向与水平加速度反应谱比值设定为 1.0,分析不同断层距时竖向速度脉冲地震效应对柱抗剪性能的影响。斜截面受剪承载力分别按我国混凝土结构设计规范的抗剪承载力模型(CS 模型)和美国 ACI 318-05 规范的抗剪承载力模型(AS 模型)计算。

图 3 和图 4 分别为同一组地震作用下,柱剪力需求时程曲线和即时轴力时程曲线示例。把抗剪需求时程中的负值镜像在正向一侧,绘制抗剪承载力与抗剪需求时程曲线,如图 5 所示。

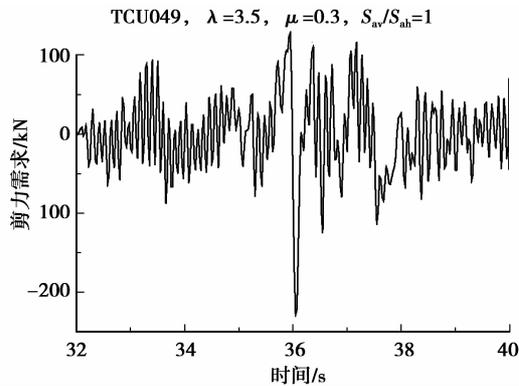


图 3 RC 柱的剪力需求时程曲线

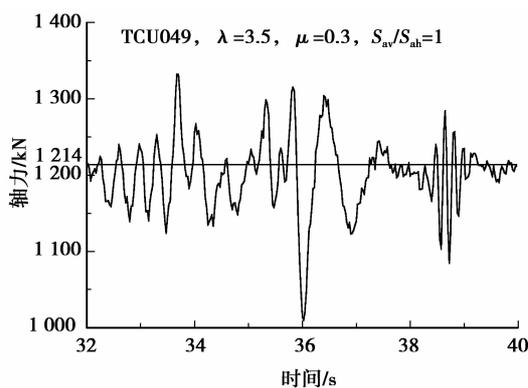


图 4 RC 柱的轴力时程曲线

定义 RC 柱的抗剪承载力与抗剪需求之比为抗剪性能系数  $\rho$ 。随断层距变化,6 组地震作用下 RC 柱的抗剪性能系数平均值变化趋势如图 6 所示,随断层距增大  $\rho$  增大。由于地震速度脉冲强度一般随

断层距减小而增大,以上变化趋势表明地震速度脉冲强度对 RC 柱的抗剪性能有显著的影响。

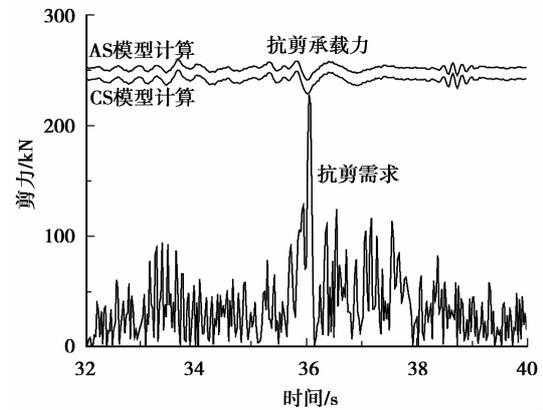


图 5 RC 柱的抗剪承载力与抗剪需求比较

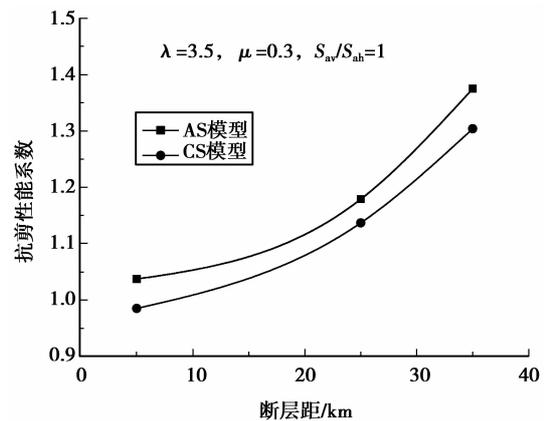


图 6 断层距对柱抗震性能系数的影响

### 2.2 谱比值的影响

为探究竖向与水平加速度谱比值对 RC 柱抗剪性能的影响,设定 RC 柱剪跨比为 3.5,初始轴压比为 0.3,进行参数分析。同一地震作用下,谱比值对轴力的影响如图 7 所示,结果表明谱比值对柱的即时轴力变化有显著的影响,谱比值越大,柱即时轴压力增减幅值越大,而剪力需求变化不明显,如图 8 所示。将不同断层距(3 组)和加速度谱比值(4 个)对应的抗剪性能系数的平均值(6 条记录)求出,进行比较,如图 9 所示。从图可知,抗剪性能系数随断层距的增大而增大,表明了近断层速度脉冲效应的影响显著;同一断层距范围内的抗剪性能系数随谱比值的增大而减小,表明竖向地震作用对柱抗剪性能有显著影响。

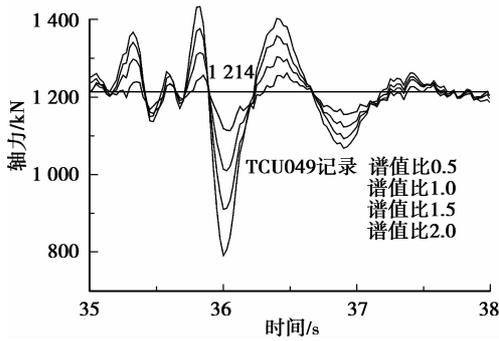


图7 谱比值对柱轴力的影响

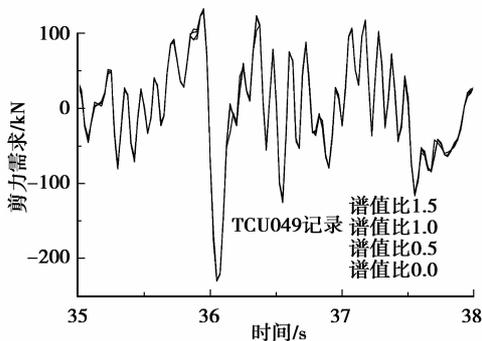
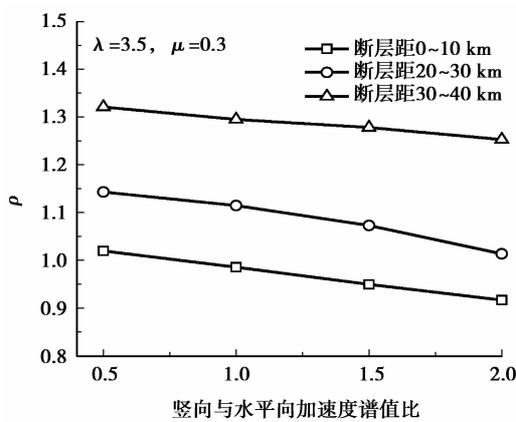
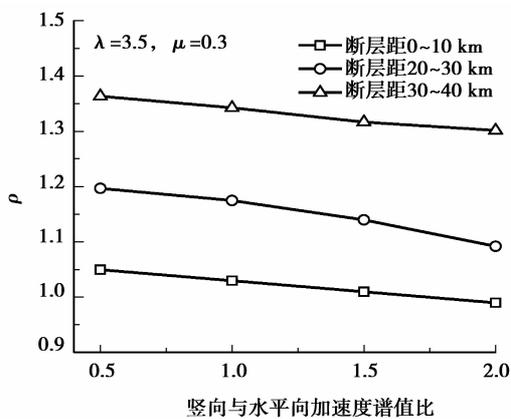


图8 谱比值对柱抗剪需求的影响



(a) CS模型

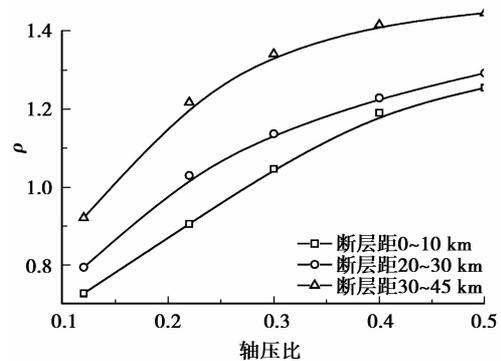


(b) AS模型

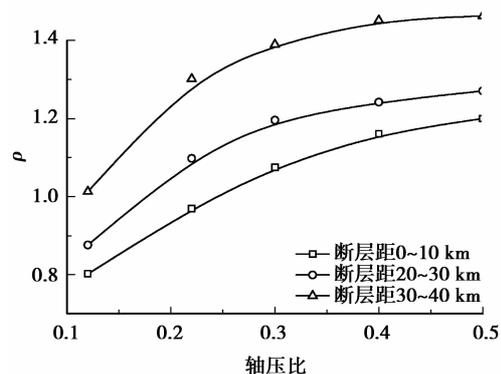
图9 谱比值对柱抗剪性能系数的影响

### 2.3 初始轴压比的影响

在竖向速度脉冲地震作用下,即时轴压比在初始轴压比上下波动,因此初始轴压比制约即时轴压比的变化范围。由于初始轴压比大于0.5以后,RC柱可能进入小偏心压屈破坏<sup>[13]</sup>。因此设定初始轴压比范围0.12~0.5,谱值比为1,剪跨比为3.5,进行参数分析。如图10所示,随初始轴压比增加,抗剪性能系数 $\rho$ 呈曲线增大,不同近断层范围内的 $\rho$ 曲线基本保持一致的走势。初始轴压比范围为0.12~0.25时, $\rho$ 值曲线近似线性增长;为0.25~0.5时, $\rho$ 呈曲线缓慢增长;当初始轴压比为0.5时, $\rho$ 值近乎达到最大值。由图可知,初始轴压比与断层距有一定的交互影响,表现在随轴压比在0.25~0.5之间增长,断层距越大, $\rho$ 值增长速率越缓慢。



(a) CS模型



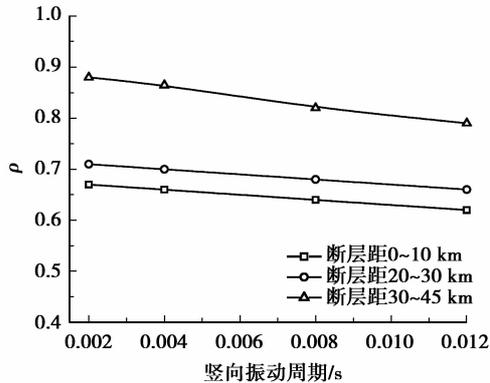
(b) AS模型

图10 初始轴压比对柱抗剪性能系数的影响

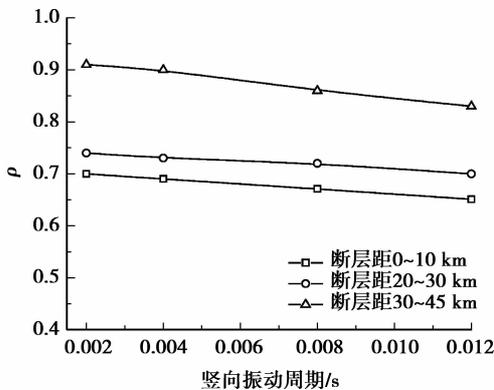
### 2.4 竖向和水平向振动周期的影响

随竖向振动周期的变化,竖向轴压力随竖向振动周期变化而变化,从而影响柱的抗剪性能。设定谱值比为1,轴压比为0.3,剪跨比为3,保持结构水平振动周期 $T_h=0.07$  s,改变柱端竖向质量实现竖向振动周期变化。如图11所示,随竖向振动增大,抗剪性能系数减小,对不同断层距内的地震动记录,

减小趋势基本是一致的,表明竖向振动周期的影响与速度脉冲地震作用没有明显的交互影响。



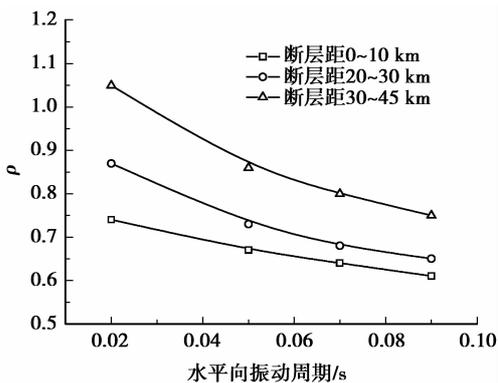
(a) CS模型



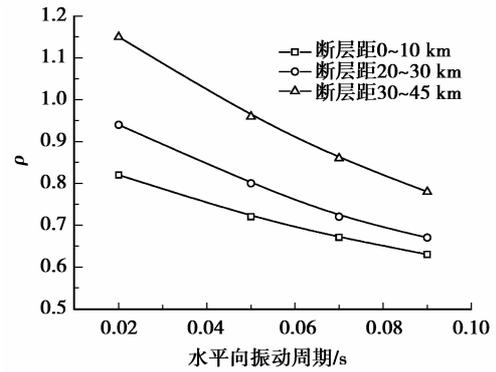
(b) AS模型

图 11 竖向振动周期对柱抗剪性能系数的影响

框架柱的水平向振动变化主要影响抗剪需求的变化,对框架柱抗剪能力影响较小。设定谱值比为 1.0,轴压比为 0.3,剪跨比为 3,保持结构竖向振动周期  $T_v=0.008$  s,改变柱端水平向质量实现水平向振动周期  $T_h$  变化。如图 12 所示,随水平向振动周期增大,抗剪性能系数减小;对不同断层距内的地震动记录,减小趋势有些不同,表明水平向振动周期的影响与速度脉冲地震效应有一定的交互影响,但不是很显著。



(a) CS模型

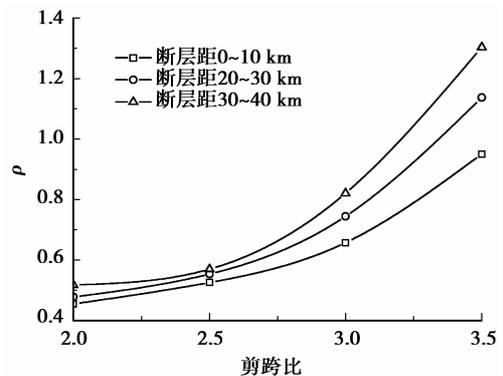


(b) AS模型

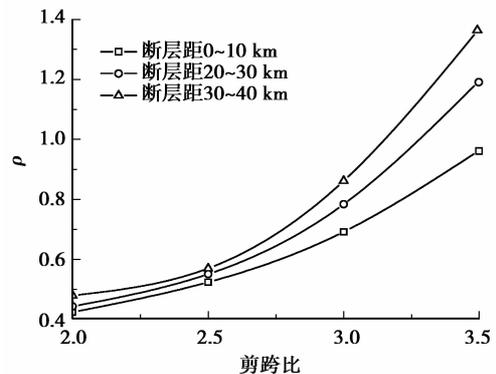
图 12 水平向振动周期对柱抗剪性能系数的影响

### 2.5 剪跨比的影响

剪跨比是 RC 柱的重要性能参数,能够反映柱截面弯矩应力和剪切应力的比例关系,是 RC 柱抗剪破坏形式的主导参数之一。设定谱值比 1,轴压比为 0.3,进行参数分析。如图 13 所示,随剪跨比增大,抗剪性能系数增大,不同断层距对应的抗剪性能系数  $\rho$  曲线走势基本一致。剪跨比在 2.0~2.5 范围内, $\rho$  值增大速度近乎一致且较缓慢;但剪跨比在 2.5~3.5 范围内, $\rho$  值增长比率变大且呈曲线迅速增长。从图中可以看出剪跨比与近断层有一定的交互影响。



(a) CS模型



(b) AS模型

图 13 剪跨比对柱抗剪性能系数的影响

### 3 结果分析

近断层竖向速度脉冲地震作用对 RC 柱最不利抗剪性能的交互影响有以下 4 个因素:断层距、竖向与水平向加速度谱值比、初始轴压比和剪跨比。振动周期与断层距无明显的交互影响,不予考虑。为了建立考虑竖向速度脉冲地震效应及交互作用的最不利抗剪性能定量预测模型,更好地揭示近断层地震作用对 RC 柱的抗剪能力的影响,以下针对 3 个断层距范围(0~10 km、20~30 km、30~45 km)、每个范围内 6 组加速度时程记录、4 种加速度谱值比(0.5、1、1.5、2)、5 种初始轴压比(0.12、0.22、0.3、0.4、0.5)、4 种剪跨比(2.0、2.5、3.0、3.5)共 1 440 种工况进行 RC 柱最不利抗剪性能系数的回归分析。采用 SPSS 专业数据分析软件,对 1 440 种工况的计算结果进行非线性回归分析。依据参数变化趋势,简化给出如下定量关系

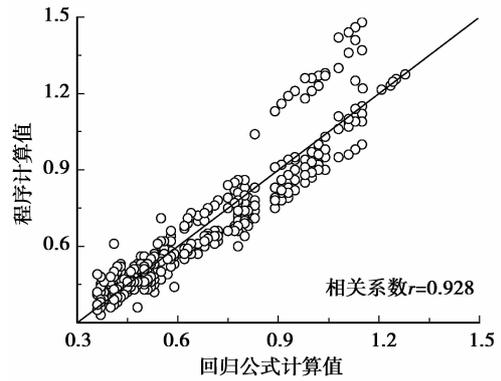
$$\nu = \beta_{\lambda}\beta_{\mu}\beta_{\kappa}, \quad (1)$$

式中: $\beta_{\lambda}=C_1\lambda^2+C_2\lambda+C_3$ ,剪跨比引起的作用效应;  
 $\beta_{\mu}=C_4\mu^2+C_5\mu+C_6$ ,初始轴压比引起的作用效应;  
 $\beta_{\kappa}=C_7\kappa+C_8$ ,双向加速度谱值比引起的作用效应;  
 $C_1\sim C_8$ ,回归系数,取值如表 2 所示。

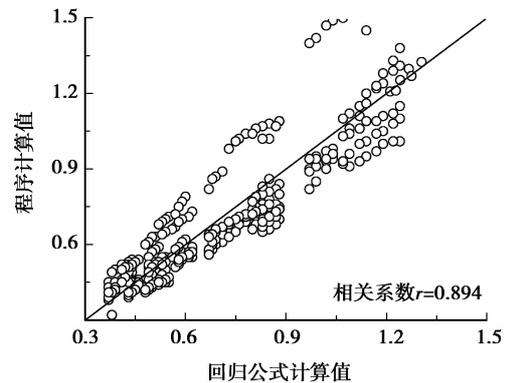
表 2 参数  $C_1\sim C_8$  的值

参数	CS 模型			AS 模型		
	0~10	20~30	30~45	0~10	20~30	30~45
$C_1$	1.335	1.418	1.780	1.415	1.492	2.239
$C_2$	-5.461	-5.823	-7.572	-5.127	-5.523	-6.821
$C_3$	7.979	8.364	10.333	7.575	7.894	8.902
$C_4$	-0.112	-0.593	-1.381	-0.103	-0.561	-1.311
$C_5$	0.577	0.869	1.357	0.345	0.628	1.137
$C_6$	0.308	0.290	0.270	0.249	0.245	0.024
$C_7$	-0.018	-0.017	-0.010	-0.017	-0.015	-0.008
$C_8$	0.434	0.436	0.437	0.450	0.457	0.460

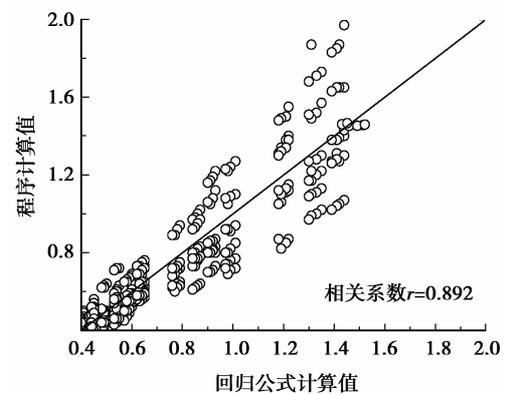
图 14 为考虑断层距、双向谱值比、初始轴压比和剪跨比 4 种因素情况下,抗剪性能系数的程序计算值与回归公式计算值的对比情况。



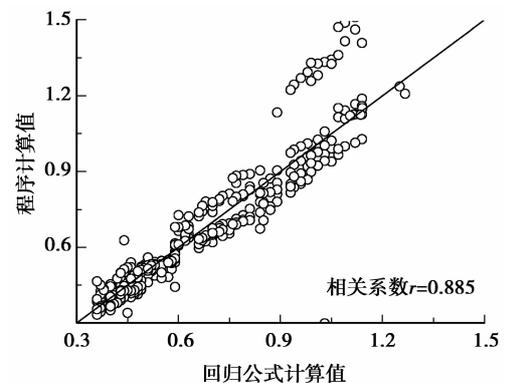
(a) 断层距0~10 km, CS模型



(b) 断层距20~30 km, CS模型



(c) 断层距30~40 km, CS模型



(d) 断层距0~10 km, AS模型

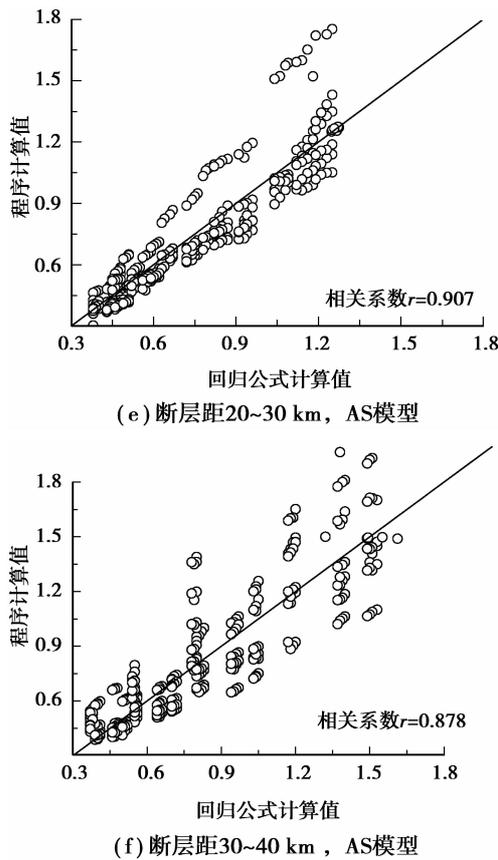


图 14 程序计算值与回归公式计算值的比较

1) 断层距为 0~10 km, 采用 CS 模型计算抗剪承载力时, 二者的相关系数  $r=0.928$ , 后者与前者之比的平均值为 1.005, 标准方差 0.111; 采用 AS 模型计算抗剪承载力时二者的相关系数  $r=0.885$ , 后者与前者之比的平均值为 1.061, 标准方差 0.160。

2) 断层距为 20~30 km, 采用 CS 模型计算抗剪承载力时, 二者的相关系数  $r=0.894$ , 后者与前者之比的平均值为 1.016, 标准方差 0.134; 采用 AS 模型计算抗剪承载力时二者的相关系数  $r=0.907$ , 后者与前者之比的平均值为 0.950, 标准方差 0.129。

3) 断层距为 30~45 km, 采用 CS 模型计算抗剪承载力时, 二者的相关系数  $r=0.892$ , 后者与前者之比的平均值为 1.039, 标准方差 0.155; 采用 AS 模型计算抗剪承载力时二者的相关系数  $r=0.878$ , 后者与前者之比的平均值为 0.985, 标准方差 0.169。可见有较好的吻合。

采用 6 组典型的设计参数, 比较 AS 模型和 CS 模型对抗剪修正系数  $\nu$  的影响, 如表 3 所示。从表可知, 两者的大小主要与剪跨比有关。剪跨比大, 依据 AS 模型获得的抗剪修正系数公式计算值大, 反

之则小。

表 3 AS 模型与 CS 模型计算结果的比较 km

参数	CS 模型			AS 模型				
	$\lambda$	$\mu$	$\kappa$	0~10	20~30	30~45		
2.0	0.2	0.5	0.427	0.450	0.485	0.413	0.441	0.382
2.0	0.3	1.5	0.460	0.488	0.539	0.434	0.469	0.467
2.0	0.4	1.0	0.519	0.543	0.584	0.478	0.506	0.513
3.0	0.2	1.5	0.616	0.661	0.746	0.657	0.719	0.766
3.0	0.3	1.0	0.708	0.762	0.859	0.733	0.804	0.959
3.0	0.4	0.5	0.799	0.848	0.930	0.806	0.868	1.054

### 3 结 论

分析了近断层竖向速度脉冲地震作用及其因素交互作用, 建立了 RC 柱考虑竖向速度脉冲效应的抗剪性能系数预测模型。

1) 近断层速度脉冲强度对 RC 柱的抗剪性能有重大影响。随断层距的减小, 柱的抗剪性能呈曲线下降。近断层地震区域的抗剪设计应考虑竖向速度脉冲效应的影响。

2) 随着竖向和水平加速度谱值比的增大, RC 柱的轴向力波动幅值越大, 抗剪需求变化不显著, 但柱最不利抗剪性能呈直线降低, 表明竖向地震作用对柱的抗剪性能有重要的影响。

3) 在分析的轴压比范围内, 抗剪性能随初始轴压比增大而提高, 同时初始轴压比与断层距有一定的交互影响, 主要体现在随轴压比在 0.25~0.5 范围内增长, 断层距越大, 抗剪性能系数值增长速率越缓慢。

4) 竖向振动周期对抗剪性能系数的影响与地震动近断距没有交互影响; 水平向振动周期对抗剪性能系数的影响与地震动近断距有一定的交互影响, 但不是很显著。

5) 剪跨比与近断层有一定的交互影响, 表现在剪跨比增大, 抗剪性能总体提高, 但断层距越小, 抗剪性能提高比率相对较小。

#### 参考文献:

[1] Kunnath S, Erduran E, Chai Y H, et al. Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(3): 282-290.

[2] Elwood K J, Moehle J P. Dynamic shear and axial-load

- failure of reinforced concrete columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1189-1198.
- [3] 温增平, 徐超, 陆鸣, 等. 汶川地震重灾区典型钢筋混凝土框架结构震害现象[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(6): 753-760.
- WEN Zengping, XU Chao, LU Ming, et al. Damage features of R. C frame structures in Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2009, 35(6): 753-760.
- [4] Kim S J, Holub C J, Elnashai A S. Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC bridge piers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(2): 252-260.
- [5] Zhang J, Elnashai A. Investigation of RC columns under multi-directional motions[C]// *Proceedings of the US-Japan Workshop on Large-scale Experiments on the Seismic Performance of Bridges*, Doubletree, San Francisco, USA, 2005.
- [6] Elnashai A, Spencer B, Kuchma D, et al. Analysis and distributed hybrid simulation of shear-sensitive RC bridges subjected to horizontal and vertical earthquake ground motion[J]. *Technical Memorandum of Public Works Research Institute*, 2005, 3983: 351-368.
- [7] Zaghlool B S. Behaviour of three-dimensional concrete structures under concurrent orthogonal seismic excitations [D]. New Zealand: University of Canterbury, 2007.
- [8] Brown A, Saiidi M S. Investigation of near-fault vs. far field ground motion effects on a substandard bridge bent[C/OL]// *Proceedings of the 24th US-Japan Bridge Engineering Workshop*, September 22-24, 2008, Minneapolis, MN. [2011-12-10]. <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/24>.
- [9] 周靖, 方小丹. 速度脉冲激励作用下混凝土框架柱抗剪性能研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(10): 109-115.
- ZHOU Jing, FANG Xiaodan. Shear-resistant behavior of concrete frame columns subjected to velocity pulse-like excitations[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(10): 109-115.
- [10] National Science Foundation. PEER strong motion database [DB/OL]. [2011-08-15]. <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- [11] SeismoSoft. SeismoStruct: a computer program for finite element analysis [EB/OL]. [2011-11-21]. <http://www.seissoft.com>.
- [12] Ono A, Shirai N, Adachi H. Elasto-plastic behavior of reinforced concrete column with fluctuating axial force [J]. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1989, 11: 239-246.
- [13] 张先进, 陈家夔. 在高轴压和循环剪力作用下钢筋混凝土框架短柱的抗剪性能[J]. *西南交通大学学报*, 1989(1): 60-67.
- ZHANG Xianjin, CHEN Jiakui. Shear behavior of reinforced concrete short columns subjected to high axial and cyclic lateral loads[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1989(1): 60-67.

(编辑 陈移峰)