

文章编号: 1004-4574(2008)01-0191-06

## 加速度峰值不对称性特征及其影响

孟凡超, 袁晓铭, 孙 锐, 曹振中

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 研究了地震波峰值的不对称性特征对土动力响应的影响以及地震波峰值不对称性的特征和规律。实验研究显示, 地震荷载自身的不对称性对土体变形发展影响显著, 其中加速度峰值的不对称性有重要影响, 有时起控制作用。利用国内外 287次 5级以上的实际地震记录, 用峰值不对称比描述了加速度峰值不对称性的特征和规律, 提出了其估计公式。结果表明: 加速度峰值不对称性特征明显, 不对称比变化范围在 1.0~3.3之间; 加速度峰值不对称比出现在 1.2~1.4的机率约为 1/3 在 1.1~1.5的机率约为 2/3 加速度峰值不对称比的平均值从 5级到 8级地震其变化范围为 1.4~1.2 总体上随震级加大而略有降低。

**关键词:** 地震波; 峰值不对称性; 不对称比; 土体变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

### Study on characteristics and effect of asymmetry of peak ground acceleration

MENG Fan-chao, YUAN Xiao-ming, SUN Rui, CAO Zhen-zhong

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract** The asymmetrical characteristics of PGA and its effect on the soil dynamic property are investigated. The effect of asymmetrical characteristics of seismic loads on the soil deformation is pointed out by using the triaxial dynamic tests. The test results indicate the asymmetrical characteristics of PGA has a significant effect and in some cases plays a dominant role. Using the records of 287 earthquakes above the magnitude 5 the feature of the asymmetry ratio of PGA is described and the its calculation formula is presented. The statistic results indicate that the asymmetrical characteristics of the earthquakes bards are obvious and the asymmetry ratio of PGA is 1.0~3.3. The probability of the asymmetry ratio of PGA is 30% for 1.2~1.4 and 60% for 1.1~1.5. The average asymmetry ratio of PGA is 1.4~1.2 from the magnitude 5 to the magnitude 8 and slightly decreases with increase of the magnitude.

**Keywords** earthquake wave; peak asymmetry; asymmetry ratio; soil deformation

地震波具有不对称性, 在地震记录中可以观察到这一事实。一些学者从宏观震害现象对地震动的不对称性进行了研究。时振梁等<sup>[1]</sup>曾对邢台地震的宏观震害现象进行了研究, 指出了房屋和桥梁的破坏方向并不是随机的, 而具有卓越方向, 且这种方向性受震源机制的控制。王景明<sup>[2]</sup>通过对唐山地震主震和余震的

收稿日期: 2007-12-10 修订日期: 2008-01-10

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助(2006B03); 国家自然科学基金资助项目(50478035); 国家科技部公益研究专项资助(2005D B2J122)

作者简介: 孟凡超(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程研究. E-mail: mfcim@163.com

研究,指出强震引起的地面运动及建筑物的倒塌具有一定的优势方向。这些成果表明了地震波本身确实存在一个方向上具有更强作用的强烈的不对称性性质。近来对近断层强地震动的研究表明,近断层地震动具有更强烈的大脉冲特性<sup>[3-4]</sup>,并通过近断层地震动下结构响应分析,得到了近断层地震动下建筑结构地震破坏特征的新认识<sup>[5]</sup>。

在强地震作用下,土体和地基呈现强非线性响应,特别是对软弱土层更是如此,因此地震波的不对称性对土体动力响应的影响理论上应更为强烈。另外,目前岩土工程抗震基本理论是基于等幅波实验得到的,在真实地震波作用计算分析时最常用的是 Seed在 20 世纪 70 年代提出的等效方法,将地震波折成等幅荷载进行计算。这一方法会将地震波不对称的作用和波序的作用完全不能予以考虑,导致在一些情况下计算结果完全不合理<sup>[6-9]</sup>。例如,采用等效方法,即便对建筑物荷载分配明显不均衡或地基土横向分布明显不均匀情况,也计算不出建筑物震陷实际的不均匀性,无法给出与实际震害现象定性上相一致的结果,分析表明是计算模型中将不对称和不规则的地震荷载转化为等幅往返荷载的做法所致<sup>[10]</sup>。土动力学和岩土工程抗震研究的基本问题是土在地震荷载下的反应,地震动的特性和土的动力响应之间应有十分密切的关系,地震波不对称性与土动力响应关系也应是其中的重要问题之一。但目前就二者的关系明显缺少两方面的工作,一是地震波的不对称性对土动力响应的认识还不充分;二是即使有证据表明地震波不对称性对土动力表现影响大,但对地震动自身不对称性特征及规律的了解和掌握目前还很不够,结果是否具有普遍性令人怀疑。

峰值是地震荷载的第一要素,本文研究地震加速度峰值不对称性特征问题。首先通过实验说明地震波峰值不对称性对土体变形的不可忽视的影响,然后重点研究峰值不对称性的规律,选取国内外五级以上的实际地震记录,按不同震级分类,对加速度峰值不对称性特征进行统计分析,并给出相应的计算公式,给出地震波峰值不对称性对土变形平均影响的估计。

## 1 实验现象

针对地震波峰值不对称性对土体变形发展的影响问题,本文专门设计完成了一系列动三轴实验。实验是在中国地震局工程力学研究所和哈尔滨工业大学新研制出的全自动地震波输入动三轴装置上进行的,该装置闭环控制精度高、频带宽(0~20 Hz),能很好实现力、位移控制下地震波实验功能,可保证施加荷载的幅值和波形的高精度复现。实验所用土样为原状软粘土,取自我国杭州湾地区和天津地区。实验采用应力控制,实验中, $\sigma_3$ 为固结应力, $k_c$ 为固结比, $\sigma_d$ 为动应力峰值, $\gamma$ 为容重, $\omega$ 为含水量。

实验中采用了常用的 4 条地震加速度记录,分别为唐山大地震中在北京市的北京饭店得到了南北向水平加速度记录(简称唐山波,下同)以及宁河波、迁安波和 El Centro 波,分别如图 1 的 (a), (b), (c) 和 (d) 所示。对于土单元来说,土层中的地震加速度会转化成作用在土体上的应力,加速度时程与应力时程一致,分析土体受应力波下的反应实际上也代表了加速度荷载作用下土的性质。

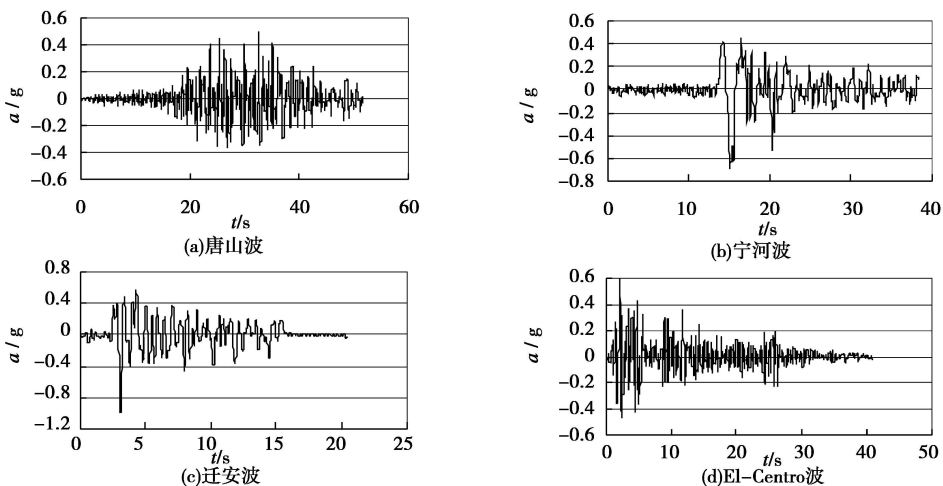


图 1 4 个地震加速度记录

Fig. 1 Four earthquake acceleration records

实验中采用的四条地震加速度记录是常见的,都具有不对称性,正负方向的峰值比分别为 1.33、1.54、1.78和 1.30,平均为 1.49。

为研究地震波峰值不对称性的影响,对同样工况的两个黏性土样,用源于一个地震波的两个等值反向的动应力时程分别进行实验。在实验中,施加动荷峰值时活塞处于最低位置,也就是波的最大峰值处于正向,称为 CM 实验;活塞处于最高位置,也就是波的最大峰值处于负向,称为 EM 实验。CM 实验和 EM 实验得到的土样两次应变对比如图 2。图 2 中 (a), (b), (c) 和 (d) 中采用的轴向动应力时程分别与图 1 中四个加速度记录波形相对应。从图 2 看出,每组 CM 和 EM 条件下不仅土的应变发展过程不同,而且最终的残余应变也相差很大;四组情况下,CM 实验的最终应变值比 EM 实验的最终应变值分别高出 156%, 120%, 56% 和 50%,平均为 96%。特别是后 3 组的情况,差异基本是地震峰值引起的。由此可见,地震动自身的不对称性对土体变形发展有显著影响,其中峰值的不对称性有重要影响,有时起控制作用。

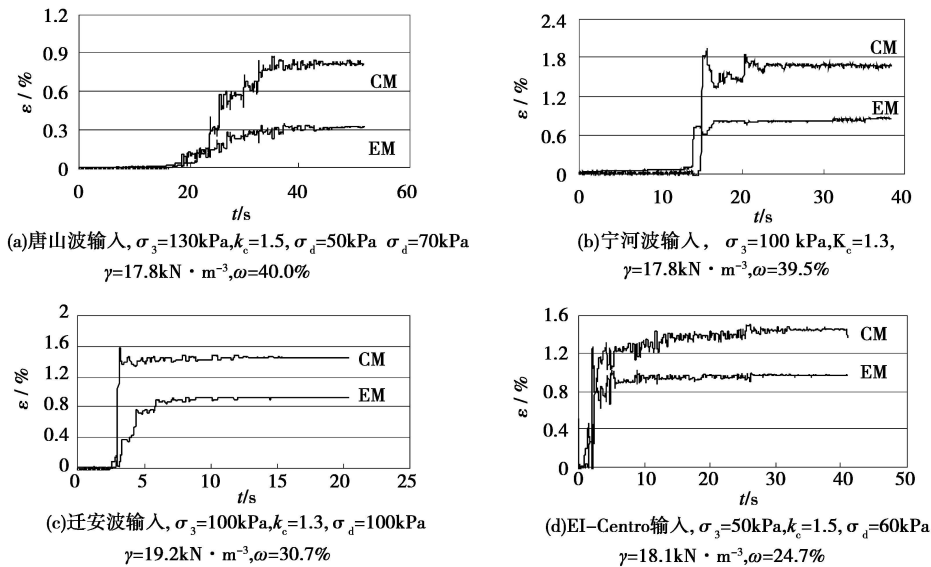


图 2 CM 和 EM 实验下粘性土的应变时程对比

Fig. 2 Comparison of strain histories of cohesive soils by CM test with that by EM test

这四组实验虽然表明了地震动不对称性对土体变形有不可忽视的影响,但实验中所能输入的地震波数量非常有限,结果是否具有普遍意义很大程度上取决于对地震动自身不对称性的了解和掌握程度,而这方面目前尚无研究成果可以借鉴,这也是本文下面要讨论的内容。

## 2 加速度峰值不对称特征分析

### 2.1 资料来源

本文采用实际地震记录的统计分析方法,获取地震加速度自身不对称性的特征和规律的认识。本文所选取的全都为自由场地的地震动加速度记录。搜集整理了包括中国、美国、印度、加拿大、土耳其、墨西哥等 11 个国家的 287 次地震,为了使选取的地震动具有代表性,每次地震取 1 条记录,其中一些大地震取了 2 条记录,计 332 条记录。五级以下地震动破坏性小,本文不予考虑;八级以上地震的记录又非常少,也不在统计之列。这些地震记录覆盖了大震、中震,近场、远场以及不同的土质条件。将所选取的记录按照震级的不同分为 5.0~5.5、5.5~6.0、6.0~6.5、6.5~7.0、7.0~7.5、7.5~8.0 共 6 个级别,列表于表 1,因篇幅所限,具体的地震记录略去。

表 1 地震动记录分组

Table 1 Grouping of earthquake records

震级	5.0 ≤ M < 5.5	5.5 ≤ M < 6.0	6.0 ≤ M < 6.5	6.5 ≤ M < 7.0	7.0 ≤ M < 7.5	7.5 ≤ M < 8.0
总计	95	71	57	40	42	27

### 2.2 峰值不对称比及特征

实际加速度记录中,最大峰值有时在正向、有时在负向,本文统计峰值时以绝对值计算,这样得到的为地震记录的最大峰值。本文以最大峰值与另一方向的峰值之比作为衡量地震动不对称性性质的代表量之一,将其定义为峰值不对称比 (asymmetry ratio of PGA),简称峰值比,记为  $R_A$ 。

图 3 表示了加速度峰值不对称比的分布。从图中可以看到,所有参加统计加速度记录的不对称比在 1.0~3.3 之间变化,平均值为 1.3。在 1.05 以下的占 13%, 87% 在 1.05 以上。由此看出,绝大多数地震波加速度正负峰值呈现较为显著的不对称性。

另外可以看到,六组震级下峰值不对称比的平均值分别为 1.37, 1.29, 1.34, 1.28, 1.25 和 1.24。总体趋势是随震级加大峰值不对称比是降低的。

图 4 进一步给出了 6 组不同震级等级下加速度峰值不对称比个数的区间分布,即每个震级下各个峰值比区间所拥有的个数占此震级所有统计数据总数的百分比,表示了加速度峰值不对称比出现在不同区间的比例。从图中可以看出,如果分别以不同震级下峰值比的平均值 1.37, 1.29, 1.34, 1.28, 1.25 和 1.24 为中值,对 6 组地震,小于中值所占的比例分别为 58%, 62%, 63%, 43%, 66% 和 59%, 大于中值所占的比例则分别为 42%, 38%, 37%, 57%, 34% 和 41%, 而峰值比大于 1.5 所占的比例分别为 27%, 20%, 12%, 10%, 10% 和 15%。

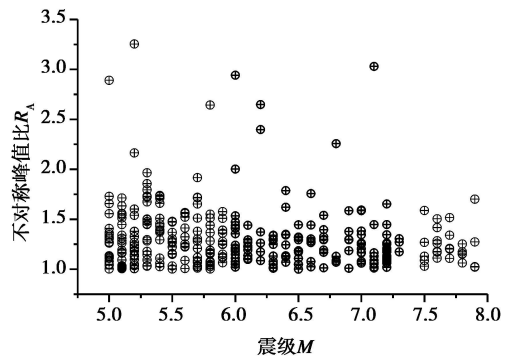


图 3 加速度峰值不对称比的分布

Fig 3 Distribution of the asymmetry ratio of PGA

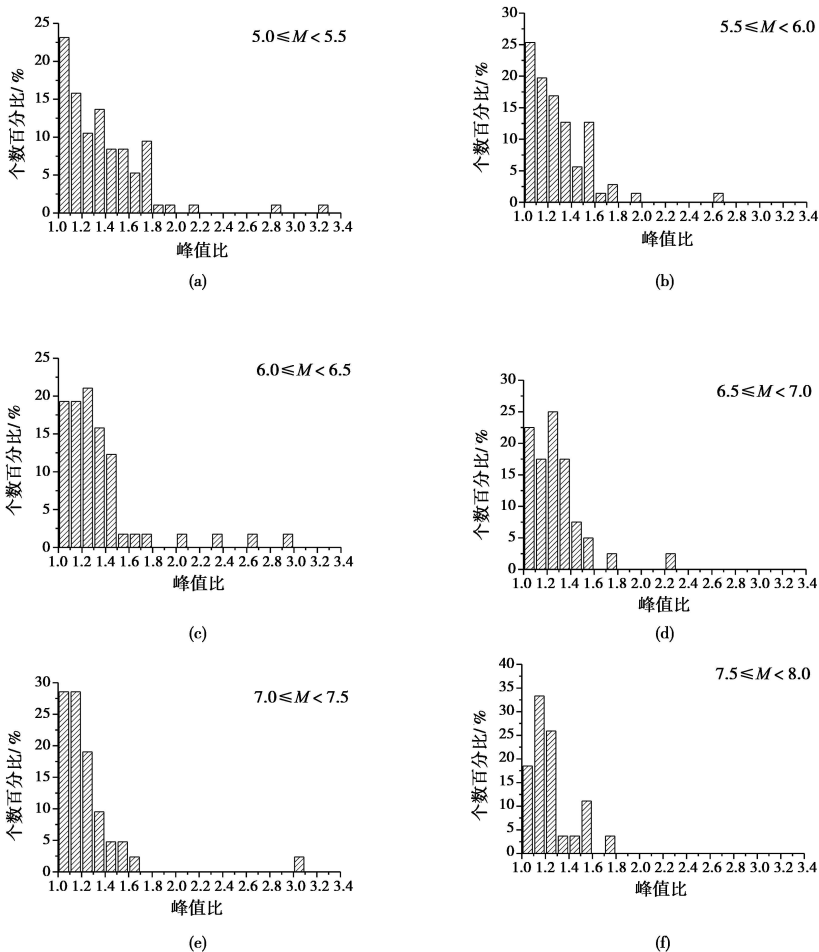


图 4 不同震级下加速度峰值不对称比个数的区间分布

Fig 4 Interval distribution of the number of the asymmetry ratio of PGA for the different magnitude

图 5 给出了所有统计点加速度峰值不对称比的比例分布, 即不同峰值比区间所拥有的个数占所有统计数据总数的百分比。如果以六组地震的峰值比平均值 1.3 为中线, 不同震级下加速度峰值不对称比都呈偏态分布。对 6 组地震, 在 1.2~1.3 之间的占 18%, 在 1.3~1.4 之间的占 13%; 在 1.1~1.3 之间的占 38%, 在 1.3~1.5 之间的占 20%; 在 1.0~1.3 之间的占 61%, 在 1.3~1.6 之间占 29%。说明加速度峰值不对称比出现在 1.0~1.3 之间的比例要超过峰值比在 1.3 以上的比例。

另外, 从图 5 看出, 加速度峰值不对称比在 1.2~1.4 之间的占 31%, 在 1.1~1.5 之间的占 60%。也就是说, 加速度峰值不对称比出现在 1.2~1.4 的比例约为 1/3, 在 1.1~1.5 的比例约为 2/3。

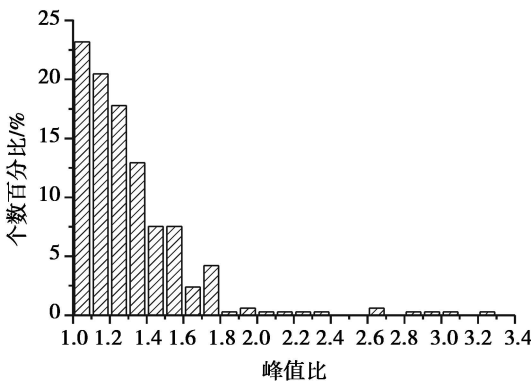


图 5 所有加速度峰值不对称比统计点的区间比例分布

Fig 5 Interval percentage distribution of number of asymmetry ratio for all PGA data

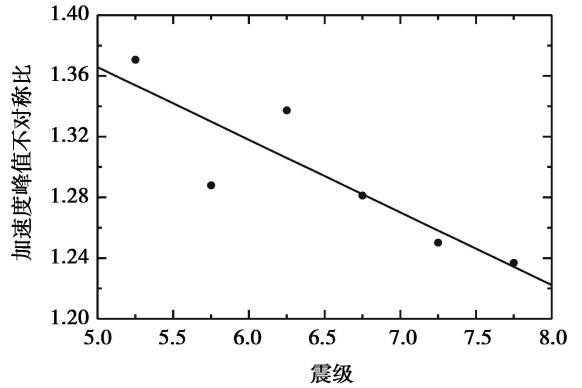


图 6 加速度峰值不对称比随震级变化的拟合曲线

Fig 6 Fitting curve of relationship between asymmetry ratio of PGA and magnitude

### 2.3 不对称比的计算公式

以上面不同震级下峰值比的平均值统计结果为基础, 本文给出了如下加速度峰值不对称比平均值随震级变化的拟合公式

$$R_A = 1.60512 - 0.0478M \tag{1}$$

其中,  $R_A$  为加速度峰值不对称比,  $M$  为震级。

图 6 中给出了统计结果与拟合公式的对比, 总体趋势二者一致。总体上说, 地震峰值不对称比平均为 1.3 随震级加大而减小, 变化范围在 1.2~1.4 之间。

按本文得到的地震峰值不对称比的变化规律, 以往观察到的房屋和桥梁破坏具有卓越方向、建筑物倒塌具有一定优势方向的结果应是具有普遍意义的震害现象。同时, 上面应用源于一个地震波的两个等值反向动应力时程进行的动三轴实验中, 土体变形差异应也是具有普遍意义的结果。并且, 通过本文得到的地震峰值不对称比变化规律以及实验结果, 可以初步估计到土体变形差异主要范围预计在 50%~150% 之间, 100% 的差别应是具有平均意义的结果。

## 3 结论

- (1) 地震荷载自身的不对称性对土体变形发展有显著影响, 其中加速度峰值不对称性有重要影响, 有时起控制作用, 因此需要认真研究;
- (2) 地震加速度峰值不对称性特征可以用峰值不对称比描述, 统计结果具有规律性;
- (3) 加速度峰值不对称性特征明显, 不对称比平均值为 1.3 变化范围在 1.0~3.3 之间;
- (4) 加速度峰值不对称比值出现在 1.2~1.4 的机率约为三分之一, 在 1.1~1.5 的机率约为 2/3;
- (5) 加速度峰值不对称比的平均值总体上随震级加大而略有降低, 从 5 级到 8 级地震其范围变化为 1.4~1.2;
- (6) 以往观察到的房屋和桥梁破坏具有卓越方向、建筑物倒塌具有一定优势方向的结论与本文结果相

符,从一定程度上进一步说明这是一种具有普遍意义的现象。

本文讨论的强地震动具有普遍意义,但还不是专门的近断层地震动情况。从目前的认识看,近断层强地震动峰值不对称性应更强,但因资料有限,目前还难以给出具有统计意义的结果。另外,本文讨论的仅是峰值的不对称性,事实上除了峰值外,地震时程中还有一些具有较大幅值的脉冲,与峰值共同组合后控制着土单元的动力响应,这种组合的不对称性及对土的作用是今后需进一步研究的课题。

## 参考文献:

- [1] 时振梁,鄢家全,汪素云. 建筑物的破坏和断层附近的地面运动[J]. 地球物理学报, 1978, 21(3): 234-241.
- [2] 王景明. 地面建筑物倾倒方向与强震地面运动[J]. 地震学报, 1982, 4(1): 90-97.
- [3] 刘启方,袁一凡,金星,等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1-10.
- [4] 田玉红,王培德. 200km震中距内的加速度记录和地震动特征[J]. 地震学报, 1994, 16(3): 399-402.
- [5] 戴君武. 性能抗震设计中的扭转震动分析方法研究 & 地震动的脉冲特性与结构破坏之间的关系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [6] 袁晓铭,孙锐,孟上九. 土地地震大变形分析中 Seed有效循环次数方法的局限性[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 207-211.
- [7] 谢定义,巫志辉. 不规则动荷脉冲波对砂土液化特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(4): 1-12.
- [8] Ishihara K, Yasuda S. Sand liquefaction under random earthquake loading condition[C] // Proc. 5<sup>th</sup> WCEE, 1973: 329-338.
- [9] 石兆吉,郁寿松,翁鹿年. 塘沽新港地区震陷计算分析[J]. 土木工程学报, 1988, (4): 24-33.
- [10] 袁晓铭,孙锐,孟上九. 软弱地基土上建筑物不均匀震陷机理研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 67-72.