

近断层滑冲型地震动频谱特性及强度指标研究

代慧娟^{1,2}, 白国良¹, 王 博¹, 王超群¹, 李 贞¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:我国抗震规范对近断层滑冲型地震动未进行专门规定. 通过与普通地震动的反应谱及周期参数的对比分析, 探讨近断层滑冲型地震动的频谱特性, 并通过分析近断层滑冲型地震动典型强度指标与双线性单自由度体系最大响应的相关性, 探讨结构地震反应分析时强度指标的选取问题. 结果表明: 近断层滑冲型地震动的平均加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱、输入能量谱与滞回耗能谱均明显大于普通地震动, 且两类地震动的放大系数具有一定的分布规律; 近断层滑冲型地震动各周期参数均明显大于普通地震动, 但不同周期参数的变异系数差别较大, 各周期参数间的相关性也有较大不同; 在进行近断层滑冲型地震动作用下的结构地震反应分析时, 建议对短周期结构采用峰值加速度选择与调整地震动输入, 而对中、长周期结构采用峰值速度选择与调整地震动输入.

关键词:近断层滑冲型地震动; 频谱特性; 强度指标; 双线性单自由度体系; 相关性分析

中图分类号: P 315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)03-0383-08

近断层滑冲型地震动属于脉冲型地震动, 其位移时程中含有永久性位移偏差. 受永久位移的大小和产生永久位移的时间影响, 其速度脉冲主要表现在平行于断层滑动方向的分量上, 且呈单向脉冲^[1]. 如图1所示.

已有研究在分析近断层脉冲型地震动时大多只研究向前方向性效应或者未明确区分向前方向性效应与滑冲效应^[2-5]. 文献[6]研究表明, 虽同为近断层脉冲型地震动, 但向前方向性效应与滑冲效应对结构反应的影响差别较大. 鉴于此, 本文有针对性地对近断层滑冲型地震动进行研究. 首先通过反应谱与周期参数分析, 探讨近断层滑冲型地震动的频谱特性; 然后分析近断层滑冲型地震动典型强度指标与双线性单自由度(SDOF)体系最大地震响应间的相关性, 为地震反应分析时合理选用强度指标提供参考.

1 地震动基本信息

目前实际记录到的近断层滑冲型地震动数量十分有限, 本文主要参考文献[7]选择. 为进行对比, 同时选择15条普通地震动. 表1为分析所用的30条地震动的基本信息.

2 近断层滑冲型地震动反应谱分析

2.1 反应谱的计算与对比

分别计算表1中30条地震动的加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱、输入能量谱和滞回耗能谱, 并进行平均化处理. 其中, 计算弹性反应谱时将地震动峰值加速度统一调幅至70 gal (1 gal = 1 cm · s⁻²), 自振周期取到20 s, 阻尼比取0.05; 计算滞回耗能谱时将地震动峰值加速度统一调幅至400 gal, 自振周期取到10 s, 阻尼比取0.05, 选取双线性恢复力模型, 强度折减系数取3, 屈服后刚度折减系数取0.2. 两类地震动的平均反应谱对比结果如图2~6所示.

收稿日期: 2012-12-31 修改稿日期: 2013-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178383); 国家科技支撑计划合作单位项目(2011BAJ08B05-4, 2012BAJ19B04-02)

作者简介: 代慧娟(1985-), 女, 河南洛阳人, 博士, 主要从事工程结构抗震研究工作.

表 1 地震动基本信息

Tab. 1 Basic information of ground motions

| 近断层滑冲型震动 | | 普通地震动 | |
|----------|---------------|-------|-------------------|
| 编号 | 台站 | 编号 | 台站 |
| 1 | LUCEME VALLEY | 1 | El CENTRO |
| 2 | TCU051-EW | 2 | CHALFANT/B-BEN270 |
| 3 | TCU052-EW | 3 | CHALFANT/B-BPL070 |
| 4 | TCU052-NS | 4 | COALINGA |
| 5 | TCU054-EW | 5 | DUZCE |
| 6 | TCU065-EW | 6 | GRA074 |
| 7 | TCU067-EW | 7 | KERN COUNTY |
| 8 | TCU068-EW | 8 | KOBE |
| 9 | TCU068-NS | 9 | MAMMOTH LAKES |
| 10 | TCU071-EW | 10 | NORTHRIDGE |
| 11 | TCU075-EW | 11 | QIANAN |
| 12 | TCU076-EW | 12 | SMART133O07EW |
| 13 | TCU082-EW | 13 | TABAS |
| 14 | TCU102-NS | 14 | WESTMORELANDt |
| 15 | TCU120-EW | 15 | WHITTIER NARROWS |

由图 2~6 可以得出:近断层滑冲型地震动的平均加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱、输入能量谱与滞回耗能谱在长周期段均明显大于普通地震动,且加速度反应的差别明显小于其他几类反应。

2.2 基于平均峰值放大系数的反应谱对比分析

为进一步分析近断层滑冲型地震动的反应谱特点,计算表 1 中 30 条地震动的加速度反应峰值放大系数、速度反应峰值放大系数与位移反应峰值放大系数.表 2 为各类反应峰值放大系数的平均值。

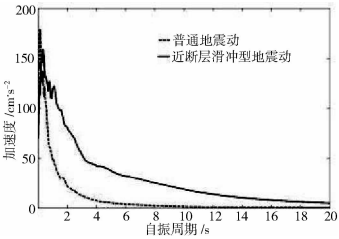


图 2 平均加速度反应谱对比
Fig. 2 Comparison of average acceleration response spectrum

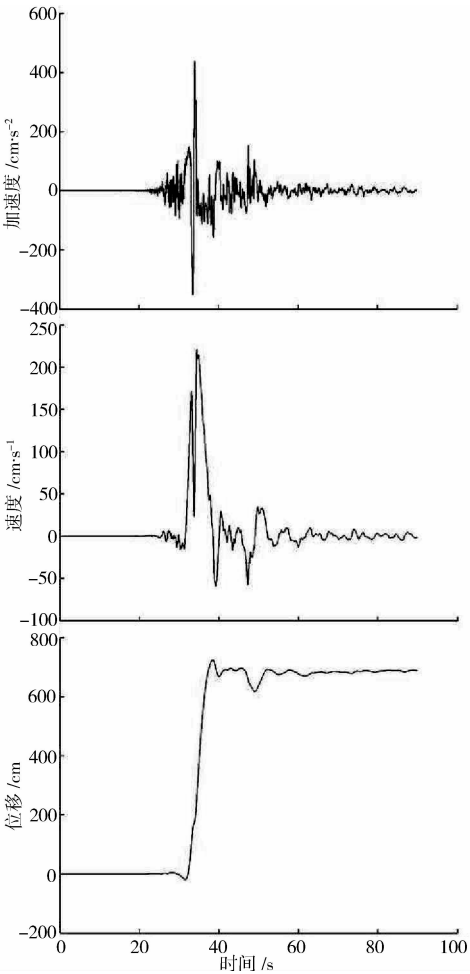


图 1 TCU052(NS)地震波时程
Fig. 1 Time-history of TCU052 (NS) wave

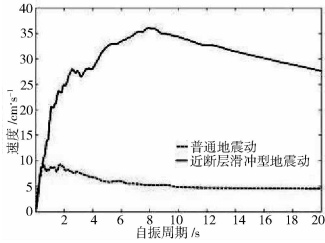


图 3 平均速度反应谱对比
Fig. 3 Comparison of average velocity response spectrum

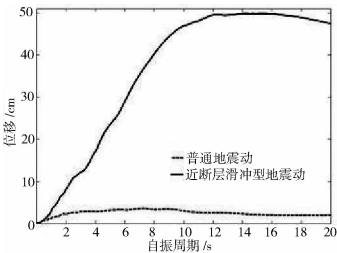


图 4 平均位移反应谱对比
Fig. 4 Comparison of average displacement response spectrum

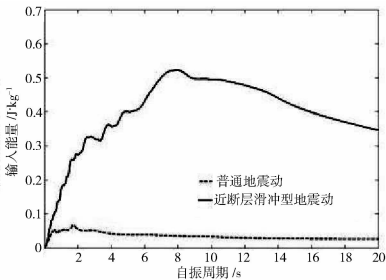


图 5 平均输入能量谱对比
Fig. 5 Comparison of average input energy spectrum

由表 2 可以看出:(1)近断层滑冲型地震动三类反应对应的平均峰值放大系数均小于普通地震动。(2)近断层滑冲型地震动的速度反应与位移反应对应的平均峰值放大系数均小于加速度反应的放大系数,而普通地震动则刚好相反。

表 3 为计算得到的地震动基本参数均值。由表 3 可以看出:近断层滑冲型地震动的持时、强震持时、峰值加速度、峰值速度、峰值位移、峰值速度与峰值加速度之比均大于普通地震动。

综合表 2 与表 3 分析认为,正是由于近断层滑冲型地震动峰值远大于普通地震动,才导致虽然其三类反应对应的平均峰值放大系数均小于普通地震动,但其反应谱值仍远大于普通地震动。

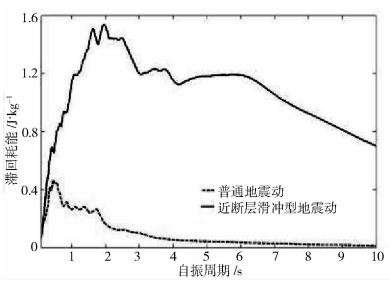


图 6 平均滞回耗能谱对比
Fig. 6 Comparison of average hysteretic energy spectrum

3 近断层滑冲型地震动周期特性分析

3.1 周期参数的选择

结构的地震反应与地震动的频谱特征密切相关,而地震动的周期参数是反映其频谱特征的重要指标。选择 10 种代表性周期参数进行分析。该 10 种周期参数可分为以下三类:

(1)基于地震动的卓越周期参数 T_{PF} 、 T_{PM} 、 T_{PE} 。分别为基于地震动的傅里叶幅值谱、边际谱、Hilbert 能量谱提取对应的峰值频率,然后取其倒数而来。其中,边际谱与 Hilbert 能量谱通过 Hilbert-Huang Transform(HHT)得到^[8]。

(2)基于弹性反应谱的卓越周期参数 T_{PSA} 、 T_{PSV} 、 T_{PSD} 、 T_{PSI} 。分别为弹性加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱、输入能量谱峰值对应的周期。

(3)平滑周期参数。主要计算参考文献[9-10]提出的三个可以区分地震动低频成分的平滑周期参数: T_{mh} 、 T_{gi} 、 T_{avg} ,如式(1)~(3)所示。

$$T_{mh} = \frac{\sum_i H_i^2 (1/f_i)}{\sum_i H_i^2} \quad \begin{matrix} 0.25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 20 \text{ Hz} \\ \Delta f \leq 0.05 \text{ Hz} \end{matrix} \tag{1}$$

式中, H_i 是指地震动边际谱对应的幅值; f_i 是指地震动边际谱对应的频率。

$$\begin{cases} T_{gi} = 2\pi \frac{IEPV}{IEPA} \\ IEPA = \frac{S_a(T_{PSA} - 0.2, T_{PSA} + 0.2)}{2.5} \\ IEPV = \frac{S_v(T_{PSV} - 0.2, T_{PSV} + 0.2)}{2.5} \end{cases} \tag{2}$$

$$T_{avg} = \frac{\sum_i T_i \left(\frac{S_a(T_i)}{PGA} \right)^2}{\sum_i \left(\frac{S_a(T_i)}{PGA} \right)^2} \quad 0.05 \text{ s} \leq T_i \leq 4 \text{ s}, \Delta T_i \leq 0.05 \text{ s} \tag{3}$$

3.2 周期参数间的相关性分析

每一种周期参数均可以从一定意义上反映地震动的频谱特性。为分析近断层滑冲型地震动不同周期

表 2 地震动平均峰值放大系数对比

Tab. 2 Comparison of average peak amplification factor of ground motions

| 地震动类型 | 加速度反应 | 速度反应 | 位移反应 | 不同类型反应平均峰值放大系数之比 |
|----------------|----------|----------|----------|------------------|
| 近断层滑冲型地震动 | 3.04 | 1.87 | 0.95 | 1 : 0.62 : 0.31 |
| 普通地震动 | 3.80 | 4.23 | 4.29 | 1 : 1.11 : 1.13 |
| 同类反应平均峰值放大系数之比 | 1 : 1.25 | 1 : 2.26 | 1 : 4.52 | —— |

表 3 地震动峰值参数对比

Tab. 3 Comparison of peak parameters of ground motions

| 地震动类型 | PGA/cm · s ⁻² | PGV/ cm · s ⁻¹ | PGD/cm |
|-----------|--------------------------|---------------------------|--------|
| 近断层滑冲型地震动 | 389.69 | 127.37 | 305.28 |
| 普通地震动 | 221.08 | 13.14 | 5.89 |

参数间的相关性,计算各周期参数间的相关系数如表 4 所示.其中,相关系数的计算公式见式(4)所示^[11].

$$\rho = \frac{n \sum (\ln X \ln Y) - \sum \ln X \sum \ln Y}{\sqrt{(n \sum (\ln X)^2 - (\sum \ln X)^2)(n \sum (\ln Y)^2 - (\sum \ln Y)^2)}} \quad (4)$$

式中, $Y = aX^b$, X 、 Y 分别是指需求相关性的两个量.此处是指任意的两种周期参数.

表 4 近断层滑冲型地震动各周期参数间的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between frequency parameters of near-fault fling-step-type ground motions

| 周期参数 | T_{PF} | T_{PM} | T_{PE} | T_{PSA} | T_{PSV} | T_{PSD} | T_{PSI} | T_{mh} | T_{gi} | T_{avg} |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| T_{PF} | 1.00 | 0.37 | 0.31 | <u>0.79</u> | 0.27 | -0.31 | 0.29 | <u>0.85</u> | <u>0.78</u> | <u>0.79</u> |
| T_{PM} | | 1.00 | -0.08 | 0.21 | 0.03 | 0.16 | 0.13 | 0.13 | -0.03 | 0.02 |
| T_{PE} | | | 1.00 | 0.33 | 0.52 | -0.38 | 0.52 | 0.59 | <u>0.61</u> | <u>0.68</u> |
| T_{PSA} | | | | 1.00 | 0.14 | -0.33 | 0.35 | <u>0.63</u> | <u>0.61</u> | <u>0.66</u> |
| T_{PSV} | | | | | 1.00 | 0.15 | <u>0.80</u> | <u>0.61</u> | <u>0.62</u> | 0.37 |
| T_{PSD} | | | | | | 1.00 | 0.27 | -0.19 | -0.34 | -0.47 |
| T_{PSI} | | | | | | | 1.00 | 0.55 | 0.48 | 0.42 |
| T_{mh} | | | | | | | | 1.00 | <u>0.88</u> | <u>0.87</u> |
| T_{gi} | | | | | | | | | 1.00 | <u>0.82</u> |
| T_{avg} | | | | | | | | | | 1.00 |

注:为突出说明,对表中相关性系数大于 0.6 的数字作加粗并加下划线处理.

由表 4 可以得出:近断层滑冲型地震动不同周期参数间的相关性差别较大,其中, T_{PSA} 与 T_{PF} 具有较好的相关性; T_{PSI} 与 T_{PSV} 具有较好的相关性; T_{mh} 与 T_{PF} 、 T_{PSA} 、 T_{PSV} 具有较好的相关性; T_{gi} 与 T_{PF} 、 T_{PE} 、 T_{PSA} 、 T_{PSV} 、 T_{mh} 、 T_{avg} 具有较好的相关性; T_{avg} 与 T_{PF} 、 T_{PE} 、 T_{PSA} 、 T_{mh} 、 T_{gi} 具有较好的相关性; T_{PM} 与 T_{PE} 、 T_{PSI} 具有较好的相关性.

3.3 周期参数的计算与对比

计算两类地震动各周期参数的平均值及变异系数,如表 5 所示.

表 5 地震动周期参数对比

Tab. 5 Comparison of period parameters of ground motions

| 地震动类型 | 周期参数 | T_{PF} | T_{PM} | T_{PE} | T_{PSA} | T_{PSV} | T_{PSD} | T_{PSI} | T_{mh} | T_{gi} | T_{avg} |
|-----------|------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| 近断层滑冲型地震动 | 均值 | 1.92 | 11.57 | 4.44 | 0.61 | 5.50 | 12.99 | 6.61 | 1.85 | 1.62 | 1.20 |
| | 变异系数 | 1.15 | 0.56 | 0.75 | 0.67 | 0.54 | 0.36 | 0.59 | 0.26 | 0.47 | 0.24 |
| 普通地震动 | 均值 | 0.51 | 3.43 | 0.72 | 0.20 | 1.26 | 3.96 | 1.71 | 1.19 | 0.52 | 0.47 |
| | 变异系数 | 0.86 | 0.60 | 1.04 | 0.75 | 0.56 | 0.65 | 0.88 | 0.22 | 0.27 | 0.40 |
| 均值之比 | | 3.76 | 3.37 | 6.17 | 3.05 | 4.37 | 3.28 | 3.87 | 1.55 | 3.12 | 2.55 |

由表 5 可以看出:(1)近断层滑冲型地震动的周期参数均大于普通地震动,但不同类型的周期参数均值之比差别较大.这主要是由于近断层滑冲型地震动的长周期成分比较丰富引起的,而各周期参数差别较大则说明不同周期参数受长周期成分的影响程度不同.(2)除 T_{gi} 、 T_{mh} 、 T_{PF} 外,近断层滑冲型地震动的各周期参数的变异系数均小于普通地震动.(3)近断层滑冲型地震动各周期参数的变异系数存在较大差别.(4)综合各周期参数的物理含义与变异系数的大小,考虑到两类地震动对应的周期参数 T_{mh} 的变异系数均较小(分别为 0.26 与 0.22),建议采用 T_{mh} 作为表征近断层滑冲型地震动频谱特性的指标.

4 近断层滑冲型地震动强度指标分析

4.1 地震动强度指标综述

参考文献[12]挑选 12 种典型地震动强度指标:1)加速度型强度指标,如 PGA 、 AI 、 a_{rms} 、 I_c 、 CAV 、 ASI ;2)速度型强度指标,如 PGV 、 V/A 、 v_{rms} 、 HI ;3)位移型强度指标,如 PGD 、 d_{rms} .

(1)峰值加速度(PGA).峰值加速度是目前大多数国家结构抗震分析和设计中采用的地震动强度指标.其数学表达式为:

$$PGA = \max |a(t)| \quad (5)$$

式中, $a(t)$ 为加速度时程.

(2) Arias 强度 (AI). Arias 强度是以时域方法描述地震动潜在破坏势的一个参数, 其数学表达式为:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} [a(t)]^2 dt \quad (6)$$

式中, t_d 为地震动持时.

(3) 均方根加速度 (a_{rms}). 均方根加速度反映了地震动记录峰值和频谱的影响, 数学表达式为:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_0} \quad (7)$$

式中, λ_0 为均方加速度.

(4) 特征强度 (I_c). 特征强度是与结构破坏指数呈线性关系的一个地震动强度指标, 其数学表达式为:

$$I_c = a_{rms}^{1.5} t_d^{0.5} \quad (8)$$

式中, a_{rms} 为均方加速度.

(5) 累积绝对速度 (CAV). 累积绝对速度的数学表达式为:

$$CAV = \int_0^{t_d} |a(t)| dt \quad (9)$$

(6) 加速度谱强度 (ASI). 加速度谱强度的数学表达式为:

$$ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\zeta = 5\%, T) dT \quad (10)$$

式中, $S_a(\zeta = 5\%, T)$ 为阻尼比 5% 时的拟加速度谱.

(7) 峰值速度 (PGV). 峰值速度的数学表达式为:

$$PGV = \max |v(t)| \quad (11)$$

式中, $v(t)$ 为地震动速度时程. 目前日本采用 PGV 作为烈度的物理标准.

(8) 峰值速度与峰值加速度比 (V/A). 为兼顾考虑地震动峰值速度与峰值加速度的影响, 有学者建议使用峰值速度与峰值加速度比作为一种强度指标, 数学表达式为:

$$V/A = \frac{PGV}{PGA} = \frac{\max |v(t)|}{\max |a(t)|} \quad (12)$$

(9) 均方根速度 (v_{rms}). 均方根速度的数学表达式为:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} [v(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_{v0}} \quad (13)$$

式中, λ_{v0} 为均方速度.

(10) Housner 强度 (HI). Housner 强度可表示为周期在 0.1~2.5 s 内拟速度反应谱所围面积的平均值, 其数学表达式为:

$$HI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} PSV(\zeta = 5\%, T) dT \quad (14)$$

式中, $PSV(\zeta = 5\%, T)$ 为阻尼比 5% 时的拟速度谱.

(11) 峰值位移 (PGD). 峰值位移的数学表达式为:

$$PGD = \max |d(t)| \quad (15)$$

式中, $d(t)$ 为地震动位移时程.

(12) 均方根位移 (d_{rms}). 均方根位移的数学表达式为:

$$d_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} [d(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_{d0}} \quad (16)$$

式中, λ_{d0} 为均方位移.

4.2 近断层滑冲型地震动强度指标的分析方法

通过近断层滑冲型地震动典型强度指标与双线性 SDOF 体系的最大地震响应(加速度、速度和位

移)之间的相关性评价各地震动强度指标的合理性.具体步骤如下:

1)确定单自由度体系模型参数.自振周期取 0.5 s、2.0 s、4.0 s、5.0 s、6.0 s;延性系数取 1.0、2.0 和 3.0;采用双线性恢复力模型,刚度折减系数取 0.2.

2)相关系数的计算.首先计算各地震动的强度指标;然后通过弹塑性时程分析获得各地震动作用下不同参数弹塑性 SDOF 体系对应的最大加速度响应、速度响应和位移响应;最后根据式(4)计算得到各自振周期、各延性系数下不同强度指标与最大地震响应的相关系数.

3)相关系数对比分析.相关系数越大则说明对应的地震动强度指标越合理.

4.3 近断层滑冲型地震动强度指标与 SDOF 体系最大地震响应的相关性分析

分别计算近断层滑冲型地震动 12 种强度指标与 5 种周期、3 种延性系数下 3 种最大响应间的相关系数,并进行对比分析.限于篇幅,仅列出加速度型强度指标、速度型强度指标及位移型强度指标的代表性指标 PGA、PGV、PGD 与双线性 SDOF 在延性系数 $\mu=1.0$ 时的最大地震响应间的相关系数,如图 7~9 所示.

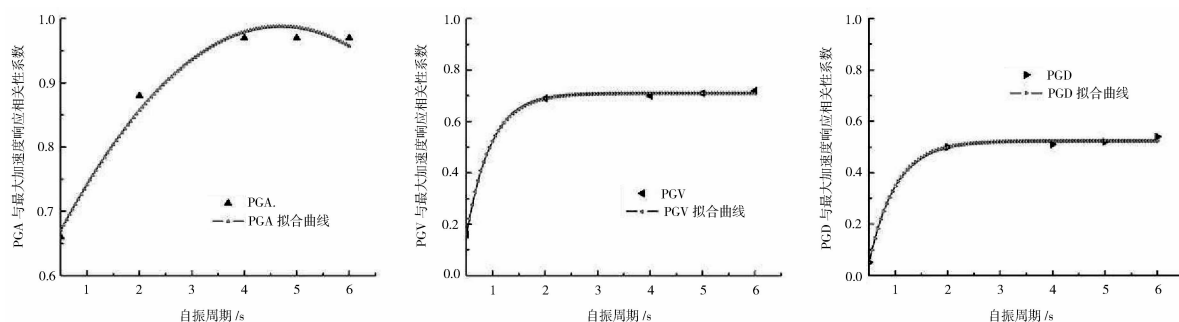


图7 双线性 SDOF 体系 $\mu=1.0$ 时加速度最大响应与典型地震动强度指标的相关性系数

Fig. 7 Correlation coefficients between the maximum acceleration responses of the bilinear SDOF system with $\mu=1.0$ and typical ground motion intensity parameters

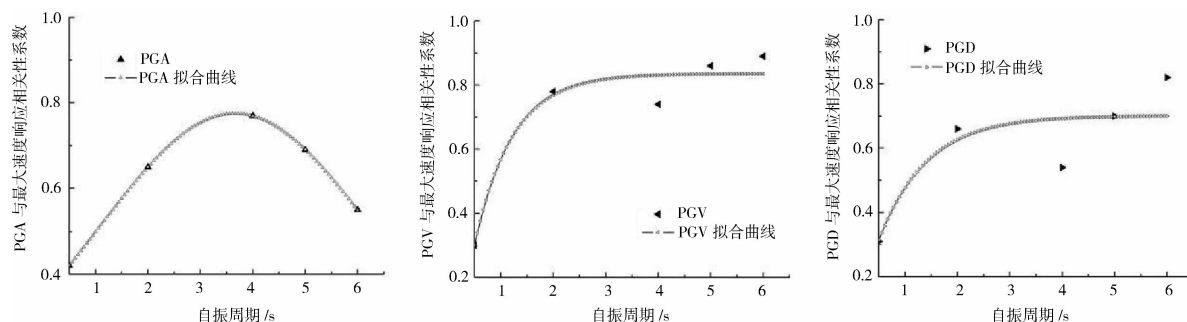


图8 双线性 SDOF 体系 $\mu=1.0$ 时速度最大响应与典型地震动强度指标的相关性系数

Fig. 8 Correlation coefficients between the maximum velocity responses of the bilinear SDOF system with $\mu=1.0$ and typical ground motion intensity parameters

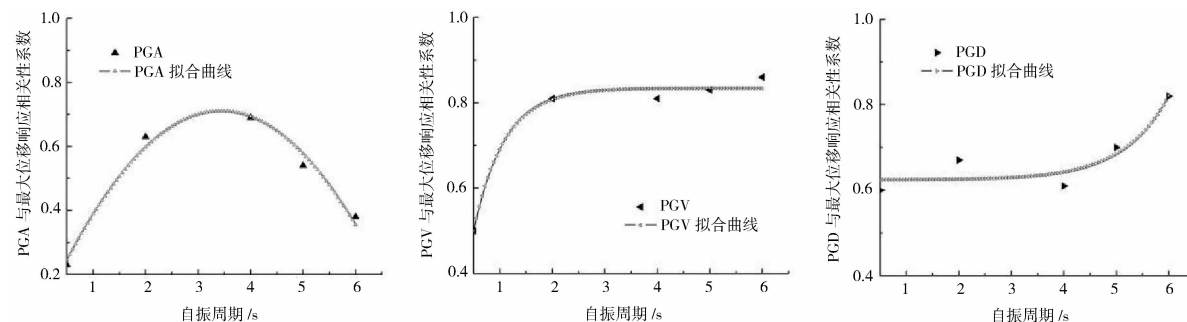


图9 双线性 SDOF 体系 $\mu=1.0$ 时位移最大响应与典型地震动强度指标的相关性系数

Fig. 9 Correlation coefficients between the maximum displacement responses of the bilinear SDOF system with $\mu=1.0$ and typical ground motion intensity parameters

综合计算结果及图7~9可以看出:在短周期范围内,以PGA为代表的加速度型强度指标与三类最大响应间的相关性较好;在中、长周期范围内,以PGA为代表的加速度型强度指标、以PGV为代表的速度型强度指标与以PGD为代表的位移型强度指标分别与最大加速度响应、最大速度响应与最大位移响应的相关性最好,其中,PGV在中、长周期段与三类响应均具有较好的相关性。此外,对比分析表明,延性系数对相关性的影响没有明显一致的变化规律,但延性系数对同类型强度参数的影响基本保持一致。

图10为典型代表性强度指标与最大响应的相关性随着延性系数的变化情况。综合计算结果及图10可以看出:随着延性系数的增大,在短周期范围内,以PGA为代表的加速度型强度指标与结构最大响应的相关性不断增大;在长周期范围内,PGA、PGV和PGD分别与最大加速度响应、最大速度响应和最大位移响应的相关系数均基本保持不变。

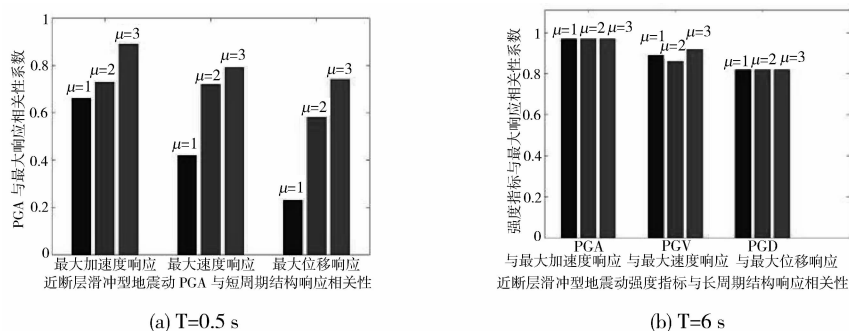


图10 延性系数对相关性的影响柱状图

Fig. 10 Histogram of correlation coefficients under different ductility ratios

综合以上分析结果可知,对近断层滑冲型地震动而言,不存在同一个强度指标与结构各周期段、各种响应类型均具有较好的相关性。受限于目前记录到的近断层滑冲型地震动数量,本文所做的工作仅属于初步探讨,更有效的结论有待于更多实际地震动记录的计算与分析。基于本文分析结果,在进行近断层滑冲型地震动作用下的结构响应分析时,建议对短周期结构采用峰值加速度选择与调整地震动输入,对中、长周期结构,建议采用峰值速度选择与调整地震动输入。

5 结 论

本文通过对比近断层滑冲型地震动与普通地震动的反应谱与周期参数探讨了近断层滑冲型地震动的频谱特性,并分析了典型强度指标与最大地震响应的相关性。所得主要结论如下:

(1)近断层滑冲型地震动的平均加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱、输入能量谱与滞回耗能谱在长周期段均明显大于普通地震动;近断层滑冲型地震动三类反应对应的平均峰值放大系数均小于与普通地震动;近断层滑冲型地震动的速度反应与位移反应对应的平均峰值放大系数均小于加速度反应的放大系数,而普通地震动则刚好相反;但由于近断层滑冲型地震动的峰值远大于普通地震动,所以其反应谱值仍远大于普通地震动,且位移反应与速度反应更为明显。

(2)近断层滑冲型地震动特性周期均明显大于普通地震动;各周期参数的变异系数存在较大差别;综合各周期参数的物理含义与变异系数,建议采用 T_{mh} 作为表征近断层滑冲型地震动频谱特性的指标。

(3)在进行近断层滑冲型地震动作用下的地震反应分析时,建议对短周期结构采用峰值加速度选择与调整地震动输入,对中、长周期结构,采用峰值速度选择与调整地震动输入。

参考文献 References

- [1] 刘启方,袁一凡,金星. 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.
LIU Qi-fang, YUAN Yi-fan, JIN Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2006, 26(1): 1-10.
- [2] AJIT C, ERIC M. Pulse extraction and displacement response evaluation for long-period ground motions[J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2010, 3(4): 211-223.
- [3] FARID S, HOSSEIN J, GHANNAD M A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30: 536-546.
- [4] REZA S, ADRIAN R M, MOHAMED E. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-sto-

- ry structures[J]. Engineering structures, 2011, 33:767-779.
- [5] 马长飞, 谭平, 张亚辉, 等. 近场地震作用下考虑 $P-\Delta$ 效应的首层柱顶隔震结构地震反应分析[J]. 振动工程学报, 2012, 25(4):439-445.
- MA Chang-fei, TAN Ping, HANG Ya-hui, et al. Seismic analysis of first-floor column top isolation structures subjected to near-field ground motions considering $P-\Delta$ effects[J]. Journal of vibration engineering, 2012, 25(4):439-445.
- [6] EROL K, MEERI S, SASHI K, et al. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. Earthquake spectra, 2006, 22(2):367-390.
- [7] YANGD X, PAN J W, LI G. Interstory drift ratio of building structures subjected to near-fault ground motions based on generalized drift spectral analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30:1182-1197.
- [8] 吴琛, 周瑞忠. Hilbert-Huang 变换在提取地震信号动力特性中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5):41-46.
- WU Chen, ZHOU Rui-zhong. Application of Hilbert-Huang transform in extracting dynamic properties of seismic signals[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2006, 26(5):41-46.
- [9] YANGD X, WANG W. Nonlocal period parameters of frequency content characterization for near-fault ground motions[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2012, DOI 10.1002/eqe.2157.
- [10] YANGD X, PAN J W, LI G. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2009, 38:1257-1280.
- [11] RAFAEL R. On ground motion intensity indices[J]. Earthquake spectra, 2007, 23(1):147-173.
- [12] 陆新征, 叶列平, 缪志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析: 原理、模型与在 ABAQUS, MSC. MARC 和 SAP2000 上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- LU Xin-zheng, YE Lie-ping, MIAO Zhi-wei, et al. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake: theory, model and implementation on ABAQUS, MSC. MARC and SAP2000[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

Study on spectral characteristics and intensity indices of near-fault fling-step-type ground motions

DAI Hui-juan^{1,2}, BAI Guo-liang¹, WANG Bo¹, WANG Chao-qun¹, LI Zhen¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The current China Seismic Code has no special provisions about near-fault fling-step-type ground motions. The spectral characteristics are explored according to the comparative analysis including period response spectrums and period parameters between near-fault fling-step-type ground motions and ordinary ground motions. Besides, in order to explore the selection problems of the intensity indices for seismic response analysis, correlation between intensity indices and bilinear single degree-of-freedom (SDOF) system responses for near-fault fling-step-type ground motions are discussed. The results show that: (1) Response spectrums corresponding to near-fault fling-step-type ground motions are greater than ordinary ground motions. The average peak amplification coefficients of the two types of ground motions have a certain distribution law. (2) All period parameters of near-fault fling-step-type ground motions are significantly higher than ordinary ground motions. Coefficients of variation for different period parameters are different, and the correlation among each period parameter is also different. (3) For short-period structures, peak ground acceleration (PGA) index is advised to be the same as the index for selecting and adjusting ground motion inputs. For medium-to-long period structures, peak ground velocity (PGV) index is advised to be the same as the index for selecting and adjusting ground motion inputs.

Key words: near-fault fling-step-type ground motions; spectral characteristics; intensity indices; bilinear SDOF systems; correlation analysis