

文章编号:1006-7329(2001)06-0016-06

地震动幅值特性参数的工程适用性研究^{*}

李英民¹, 丁文龙², 黄宗明¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 机械工业第三设计研究院, 重庆 400039)

摘要:提出了地震动幅值特性参数工程适用性的基本要求, 据此对现有幅值的定义进行了简要评述, 并通过其中六种不同幅值定义对结构弹性及弹塑性地震反应影响的显著性分析, 给出了在工程应用中如何选择地震动幅值特性参数的建议。

关键词:地震动; 幅值; 相关系数

中图分类号: TU318

文献标识码: A

人们对于地震动的直观认识是其强度水平, 并习惯地采用幅值参数来衡量。由于地震动的随机性和地震波序列的非规则性, 研究者基于不同的研究目的从不同的角度提出了不同的幅值定义, 迄今为止已达十几种之多^[1,2]。地震动幅值的定义从过去单一的最大值含义扩展到某种意义下的等代值(如求和、求平均等效等)含义这样一个更广泛的范畴上来, 所采用的物理量除了加速度、速度或位移等外还外延到能量等具有明确物理意义的量甚至无明确物理意义的量上来。为了研究的需要/可能还会提出一些更新的定义。

如此之多的幅值定义一方面表明了地震动的复杂性和人们认识这一问题的多方位性, 另一方面却给工程应用带来诸多不便。由于工程师很难区分各种定义对其分析目的而言孰优孰劣, 因而在结构抗震分析与设计中输入地震动的确定方面存在一定程度的任意性和盲目性, 致使对于分析结果的评判不能建立在一个统一的水准上。从工程应用的角度讲, 设计人员总是期望采用某种被大家广泛接受的定义或者给出使用不同定义时所得分析结果之间的调整方法, 就如同混凝土抗压强度测定中所采用的尺寸效应系数一样。

然而, 问题的复杂性却使得上述期望很难得以实现。首先, 各定义因其反应问题的角度各异而本身应具有各自相应的工程适用范围, 只是人们一直困于问题的难度而未予以考虑; 其次, 基于工程应用的习惯性和抗震规范的连续性等方面原因, 不同国家或地区的抗震设计规范就采用了不同的幅值参数, 如美国规范习惯于采用有效峰值, 而我国规范则更乐于接受峰值的定义; 再者, 虽然人们早已注意到不同幅值特性参数在工程应用上所带来的诸多不便, 但以往的研究更多地集中于地震动不同幅值参数间的统计相关关系, 很少涉及到关于哪些定义更适于工程应用或不同定义有什么样的适用范围等问题。

为此, 本文首先分析地震动特性参数工程适用性的基本要求, 据此对目前常用的十一种幅值定义进行定性评价, 然后着重比较其中几种定义对于结构弹性和弹塑性地震反应的影响显著性, 根据影响显著性程度给出适于工程应用的幅值定义的建议方案。

1 地震动幅值特性参数的工程适用性要求

一种幅值定义能较好地适用于工程应用, 应满足以下三方面的基本要求:

* 收稿日期: 2001-08-15

基金项目: 国家自然科学基金和重庆市科委资助(59878055, 50006017)。

作者简介: 李英民(1968-), 男, 山东无棣, 副教授、工学博士, 主要从事地震工程及结构抗震研究。

1) 简单性:在工程应用中,地震动的幅值定义首先应该物理意义明确易懂且计算简单,只有这样的定义,才能为工程界所广泛接受。

2) 统计性:地震动幅值受到震级、震中距、震源机制、传播途径和局部地质、地形地貌以及上部构筑物等的综合影响,而且不同的影响因素对不同的幅值定义也有不尽相同的影响,从而使各种幅值定义存在较大的离散性。但从工程应用的角度看,某种参数的离散性越大越不宜作为设计参数。

3) 重要性:从结构抗震的观点来看,只有对结构反应有明显影响的量才是值得考虑的。因此,一种好的幅值定义必须对结构反应有较显著的影响。

基于上述要求,可以对现有各幅值定义进行综合评价以确定其工程适用性。限于篇幅,本文定性评价了各定义的简单性要求,并直接引用已有的研究结论来评价各定义的统计特性,着重对各定义的重要性要求进行定量分析。

2 现有地震动幅值定义及简要评价

2.1 现有地震动幅值定义

地震动幅值可以指加速度、速度或位移等物理量的某些峰值、最大值或某种意义下的等代值。不同于规则时间序列(如谐波)的幅值定义,地震动因本身的复杂性和研究者的侧重点和认识角度不同幅值定义而存在多达十几种定义形式,表1列出了目前常用的、具有代表性的十一种幅值定义^[3,4]。

表1 常用的地震动幅值定义

| 序号 | 幅值名称 | 幅值含义 |
|----|-------------------------|---|
| 1 | 峰值加速度 PGA 和峰值速度 PGV | 加速度和速度在时间历程上的最大值 |
| 2 | 有效峰值加速度 EPA 和有效峰值速度 EPV | $EPA = S_a / 2.5, EPV = S_v / 2.5$ S_a 为 0.1~0.5 s 5% 阻尼比加速度反应谱的平均值; S_v 为 1.0 s 附近(通常为 0.8~2.5 s) 5% 阻尼比速度反应谱的平均值 |
| 3 | 持续加速度 a_r 和持续速度 v_r | 加速度和速度时程中第 3、第 4 或第 5 个最大幅值(或平均值) |
| 4 | 等反应谱有效加速度 a_r | $a_r = a' / 0.90$, a' 为削峰后峰值加速度、要求削峰后时程的加速度反应谱面积达原时程反应谱面积的 90% |
| 5 | 概率有效峰值 | 按概率分布函数取超越概率小于 10% 或 5% 的峰值 |
| 6 | SQ*4 静力等效加速度 | 根据地震中简单刚体的倾覆、移动和牛顿第二定律反推的刚体加速度 |
| 7 | 等效简谐振幅 | 将地震动时程等效为 10 Hz 或 20 Hz 的简谐振动所得的振幅 |
| 8 | 平均振幅 \bar{z} | 地震动时程中前 10 个大振幅的平均值 |
| 9 | Arias 强度 I_A | $I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} \dot{w}^2(t) dt$ T_d 为记录总持时, g 为重力加速度, $\dot{w}(t)$ 为加速度时程 |
| 10 | 均方根加速度 a_{rms} | $a_{rms}^2 = \sigma_a^2 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \dot{w}^2(t) dt$ T_s 为强震段持时或等效平稳持时 |
| 11 | 谱强度 SI | $SI_{\zeta} = \int_{0.1}^{0.5} S_v(T, \zeta) dT$ S_v 为阻尼比为 ζ 的相对速度反应谱,一般取 $\zeta=0$ 或 0.02 |

2.2 对现有幅值定义的简要评价

从定义本身来看,各幅值定义的区别在于它们分别刻划了地震动强度水平的不同侧面,所采用的物理量也不尽相同。峰值主要反映了地震动高频成分的振幅即局部特性而很难反映整体特性。在时程分析方法十分普及的现阶段,当考查地震动时程与结构反应之间的关系时不难发现,峰值参数并非描述地震动特性的最理想参数,由高频成分所确定的个别尖锐峰值对结构反应的影响并不十分显著^[5],因此,工程界在乐于接受简单直观的峰值参数的同时也接受了具有等效意义的幅值定

义。有效峰值参数通过反应谱在一定频段上的平均将地震动特性与结构反应联系起来,并在一些国家的抗震规范中得到应用。持续加速度和平均振幅考虑了地震动中次要峰值的影响,包含了结构破坏有一定时间过程的含义,部分地反映了持时的影响,但仍以地震动的局部特性为主。等反应谱有效加速度确定过程中削峰的含义在于取消对结构反应影响甚微的极高频成分,但在确定削峰位置时比较麻烦。从时序分析的观点看,概率有效峰值有其合理性,具有相对和持续的含义,但主观性较强且处理繁琐。上述具有等效意义的幅值定义虽然具有一定程度的持续概念,但仍仅描述了地震动中的最大峰值及其附近的局部强度分布特性且处理也比较困难。Arias 强度、均方根加速度和谱强度则多是对地震动总能量或者总强度的一种平均描述或整体描述,类似于随机过程的均值概念;由于与地震动的强震段持续时间存在相互依存关系且强震平稳持时的确定有一定主观性,均方根加速度只有在一定假设下才成为唯一量,因而也未被认为是一个好的地震动设计参数^[4]。

从简单性方面来看,峰值和有效峰值的定义物理意义明确易懂,易于计算,且已分别为我国和美国等国家抗震规范所采用,并为工程界广泛接受。

从统计性方面来看,已有研究表明^[6],没有哪一种幅值定义的离散性较其它定义明显小,即是说,各幅值定义在统计方面无明显差别。

从对结构反应影响的重要性方面来看,过去在这一方面的相关性研究甚少。由于这是评价一种定义是否适于工程应用的重要方面,因此,下文着重从幅值对于结构反应的影响显著性这一角度,研究峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)、有效峰值加速度(EPA)、有效峰值速度(EPV)、Arias 强度(I_A)和谱强度(SI,阻尼比取 0.02)等六种常用定义的工程适用性。

3 不同幅值定义对结构反应的影响显著性分析

3.1 分析思路及方法

本文拟通过大量单自由度体系的弹性和弹塑性动力时程反应分析,研究多种结构反应量(如绝对加速度、相对速度、相对位移及塑性滞回耗能等)与地面运动各幅值参数的相关关系,据此来考查各幅值定义对相应结构反应量的影响显著性。为此,定义相关系数谱的概念以利分析。

对于某给定 SDOF 结构,周期为 T_m ,确定 n 条具有不同幅值的地震波作为输入,由时程分析计算出相应于各地震波输入的结构弹性或弹塑性地震反应,由此可建立某种结构反应量的最大值 y_i 与某种地震波幅值定义 x_i 之间的一组观测数据 $\{x_i, y_i\}$,观测点数为 n 。若 x_i 和 y_i 之间存在线性相关趋势,则可以用总体相关系数描述 x_i 和 y_i 间相关程度的好坏,即:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{x_i, y_i} &= \frac{\text{COV}(x_i, y_i)}{\sigma_{x_i} \sigma_{y_i}} \\ \sigma_{x_i}^2 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \mu_{x_i})^2, \sigma_{y_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_{ik} - \mu_{y_i})^2 \\ \text{COV}(x_i, y_i) &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \mu_{x_i})(y_{ik} - \mu_{y_i}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, μ_{x_i} 和 μ_{y_i} 分别为 x_i 和 y_i 的均值, n 为采样点数。

改变结构周期,重复上述计算则得到相应于该周期的相关系数,直至得到分析所需的若干组不同周期与相应系数值的观测数据(如图 1 所示)。将所观测数据绘于横坐标为结构周期、纵坐标为相关系数值的坐标系中可得连接各点的曲线,定义该曲线为结构反应量与地震动幅值定义之间的相关系数谱。

若 x_i 和 y_i 间的相关系数越大,表明 y_i 和 x_i 相关程度越好,那么在其它影响因素相同的情况下,可近似认为 y_i 强烈地依赖于 x_i ,或者说 x_i 对于 y_i 影响较显著。上述相关系数谱可用于比较各幅值定义对于结构反应的影响程度。

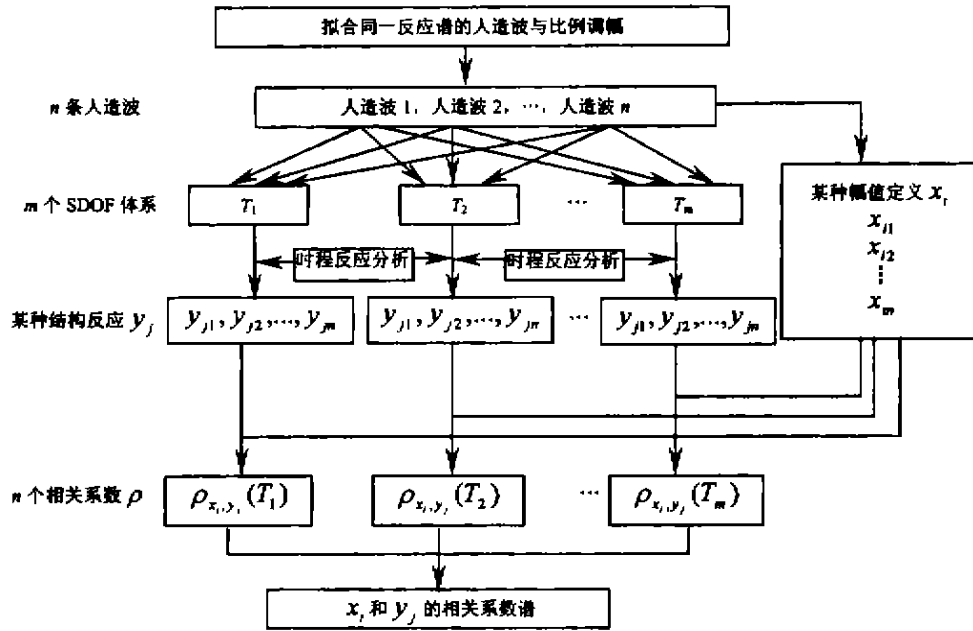


图 1 相关系数谱计算框图

当然,上述结论成立的前提在于 x_i 和 y_j 间线性相关或接近线性相关。大量的分析表明^[7],在其它影响因素不变的条件下,地震动幅值与结构弹性反应间的相关性较好地符合线性相关,与结构弹塑性反应间的相关性则部分符合线性,部分符合对数线性。无论哪种相关,只要相关程度好,就可以认为结构反应受该幅值定义的影响更直接或更显著。因此,分析中对每一组 $\{x_i, y_j\}$ 均按线性相关和对数线性相关分别计算相关系数谱,最终取其中大者作为 x_i 与 y_j 间的相关系数谱。

3.2 分析参数取值

应当注意到,结构地震反应是多种地震动特性和结构动力特性综合作用的结果,因而直接用实际地震记录作为输入来单纯研究幅值与结构反应的影响显著性是很困难的。为了有效地排除其他可能影响结构反应的地震动特性因素,如谱特性和持时特性等,分析中采用人造地震动作为输入。

结构统一考虑为具有 5% 阻尼比的 SDOF 体系。当考查其弹塑性反应时,恢复力模型取为两折线模型(如图 2),第二刚度系数(ρ)取为 0.05,刚度退化系数(α)取为 0.4,且不同地震波输入下结构的恢复力特性保持相同。

所用的人造地震动输入是以拟合统一反应谱特性(如现行规范设计反应谱) I 类场地标准谱^[3]的 30 条人造波为基础,经 5 次调幅至其峰值分别 80, 110, 150, 220 及 280 gal 的 150 条人造地震波。当考查幅值定义与结构弹性反应间的相关程度时,无论地震波幅值多大,结构均考虑为弹性;当考查幅值定义与结构弹塑性反应间的相关程度时,结构均考虑进入弹塑性状态。

3.3 结果分析

选取结构的绝对加速度反应 A 、相对速度反应 V 、相对位移反应 D 和弹塑性滞回耗能 E_d 作为统计量,考查这四种结构反应量与峰值加速度 PGA 、峰值速度 PGV 、有效峰值加速度 EPA 、有效峰值速度 EPV 、Arias 强度 I_A 和谱强度 SI (尼比取 0.0) 等六种幅值定义间的相关系数谱。

图 3 给出了结构弹性反应(加速度、速度和位移)与六种

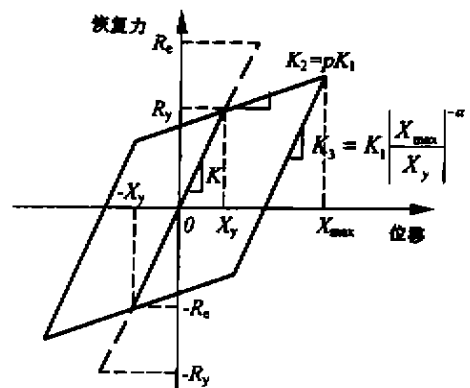


图 2 两折线恢复力模型

幅值定义间的相关系数谱。可以看出:

1) 对于弹性反应而言,各种结构反应量与不同幅值定义间的相关系数谱具有大致相同的规律,各种反应量与 PGA 、 EPA 、 EPV 、 I_A 以及 SI 的相关系数谱极为接近,谱值均达 0.9 以上,优于与 PGV 的相关系数谱(一般在 0.7~0.9 之间)。

2) 随着结构周期的延长,除了 PGV 外,各幅值定义与结构加速度的相关系数总体上略有增大趋势,而与结构速度和位移反应的相关系数谱总体上呈减小趋势。

3) 随着结构周期的延长, PGV 与各结构反应量的相关系数谱有一定波动,而其它幅值定义的谱随周期变化规律相对平稳。

上述规律表明,除了 PGV 外,其它五种幅值定义与结构弹性加速度、速度及位移反应量的相关性虽然有差别,但相关系数值基本上均达到 0.90 以上,这对于工程抗震分析与设计而言,可以认为处于良好相关水平。

图 4 给出了结构弹塑性反应(加速度、速度、位移及塑性滞回耗能)与六种幅值定义的相关系数谱。与弹性结构反应相比,可以看出:

1) 各幅值定义与加速度、速度、位移反应以及塑性滞回耗能间的相关系数谱仍具有大致相同的规律,各相关系数谱表现出与弹性结构相似的规律,即各种反应量与 PGA 、 EPA 、 EPV 、 I_A 和 SI 的相关系数谱值十分接近,且优于与 PGV 的相关系数谱。

2) 随结构周期的延长,除了 PGV 外,各幅值定义与结构加速度反应的相关系数谱总体上略有增大趋势;与结构速度和位移反应的相关系数谱总体上呈减小趋势;与结构塑性滞回耗能的相关系数谱基本呈先下降后上升的规律。

3) 随结构周期的延长,除 PGV 与各结构反应量的相关系数谱波动较大外,其余幅值定义的谱均相对平稳。

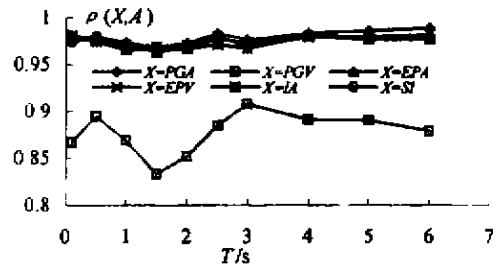
4) 比较结构弹性和弹塑性反应量与同种幅值定义的相关性,对于加速度和速度反应而言,弹塑性的相关性与弹性的相关性基本上处于同一水平;对于位移反应而言,弹性的相关性比弹塑性的相关性好。

除了 PGV 以外,其它五种幅值定义与各结构反应的相关性系数谱值都在 0.8 以上,这对于工程抗震分析与设计而言,仍可以认为处于良好相关水平。

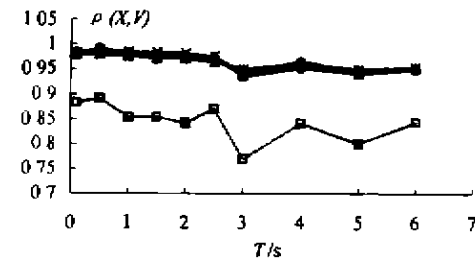
5 结论

基于单自由度体系在拟合相同反应谱的人造地震波输入下弹性和弹塑性动力时程反应分析,提出了地震动幅值与结构反应量之间的相关系数谱概念,以相关水平的好坏近似反映该幅值定义对结构反应量的影响显著性,主要规律有:

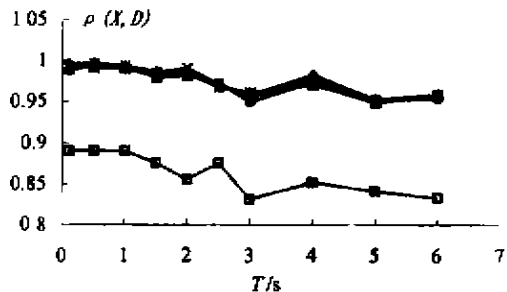
1) 无论弹性还是弹塑性反应, PGA 、 EPA 、 EPV 、 I_A 和 SI 对结构的各种反应量的相关性水平



(a) 加速度反应与不同幅值定义间的相关系数谱

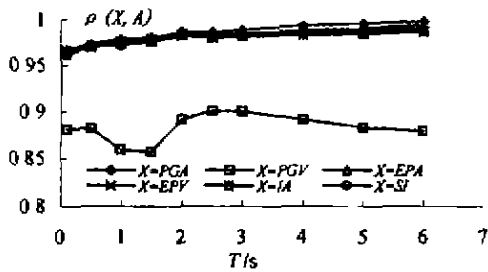


(b) 速度反应与不同幅值定义间的相关系数谱

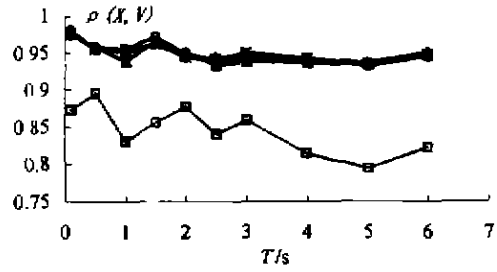


(c) 位移反应与不同幅值定义间的相关系数谱

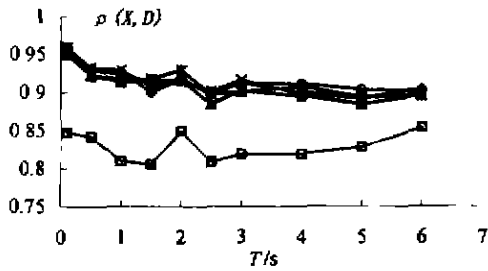
图 3 结构弹性反应与不同幅值定义间的相关系数谱



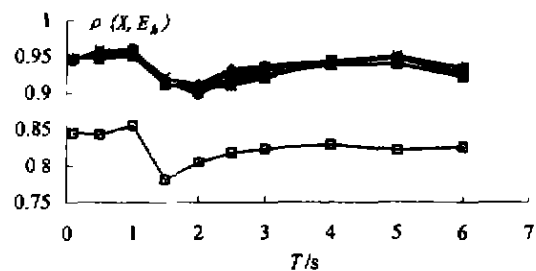
(a) 加速度反应与不同幅值定义间相关系数谱



(b) 速度反应与不同幅值定义间相关系数谱



(c) 位移反应与不同幅值定义间相关系数谱



(d) 塑性滞回耗能不同幅值定义间相关系数谱

图4 结构弹塑性反应与不同幅值定义间的相关系数谱

很接近,无明显优劣,优于PGV与上述结构反应量的相关性。

2) 同种结构反应量和同种幅值定义的相关性,对于加速度和速度反应而言,弹塑性的相关性与弹性的相关性基本处于同一水平;对于位移反应而言,弹性的相关性要比弹塑性的相关性要好。

3) 各幅值定义与加速度反应的相关程度最好,而与位移反应相关程度最差。

由此,结合本文所提出的三方面工程适用性要求,建议在确定结构地震动输入时,针对研究和分析目的的不同而采取不同的幅值定义来衡量和评价输入地震动的强度水平,即:当旨在分析结构的加速度、速度、位移反应或耗能性质以及与上述反应量相关的结构反应(如力、变形和塑性滞回耗能等)时,可视习惯或方便而采用PGA、EPA、EPV、I_v或SI中的任一种;PGA不宜作为唯一指标。

参考文献

[1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.
 [2] 李杰,李国强. 地震工程学导论[M]. 北京:地震出版社,1992.
 [3] 胡聿贤,何训. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动,1986,6(2):37-49.
 [4] 李英民. 工程地震动的模型化研究[D]. 重庆:重庆建筑大学,2000.
 [5] Schnabel R B, Seed H B. Accelerations in rock for earthquakes in the western United States[M]. BSSA, 1973,63(2):501-516.
 [6] Dowrick D J. Earthquake Resistant Design[M]. John Wiley and Sons Press, 1977.
 [7] 丁文龙. 强地震地面运动信息管理系统的研制[D]. 重庆:重庆大学,2001.

(下转第55页)

参考文献:

- [1] 魏唐棣,等.地源热泵地下埋管换热器的研究介绍[J].中国冷冻空调杂志,1999,47(12):91-98.
- [2] 周漠仁.流体力学泵与风机[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [3] D. A. Ball. Design Methods for Groud-Source Heat Pumps[J]. ASHRAE Trans, DC-83-08.
- [4] W. S. Johnson. Seasonal Performance Evaluation of Two Horizontal-coil Ground-coupled Heat Pump Systems [J]. ASHRAE Trans, NT-87-19-4.
- [5] V. C. Mei. New Approach for Analysis of Ground-Coil Design for Applied Heat Pump Systems[J]. ASHRAE Trans, HI-85-24.

Experimental Study of Ground-source Heat Pump Systems with Horizontal Heat Exchanger

SUN Chun-wu, ZHANG Su-yun, LIU Xian-ying

(Faculty of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper describes the double layer horizontal ground source heat pump systems constructed in 1998 with the buried depth of 0.9 m and 1.8 m. The program of study includes experimental equipments, heat exchanger size, testing meter and methods for data analysis. In addition, the heating and cooling performance at typical days are also illustrated. Among the influencing factors on the performance of the ground source heat pump systems, the parameter of heat exchanger and operation patterns of heat pump systems are analyzed. A heat transfer model has been set up for horizontal heat exchanger.

Keywords: horizontal burying coil; ground-source heat pump; cooling and heating test; parameter analysis; heat transfer model

(上接第21页)

Study on the Suitability of Amplitude Definitions of Strong Ground Motions for Engineering Purpose

LI Ying-min¹, DING Wen-long², HUANG Zong-ming¹

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Third Design and Research Institute, MI, Chongqing 400039, China)

Abstract: In this paper, the basic requirements for the suitability of the amplitude definitions of strong ground motion for engineering purpose are presented and brief comments on the definitions of amplitude of strong ground motion now widely used are given accordingly. The effects of different definitions of amplitude of strong ground motions on different structural response indexes of SDOF systems are discussed by dynamic time-history analysis.

Keywords: ground motion; amplitude; correlation coefficient