

· 综述 ·

工程地震动模型化研究综述及展望(II)

平稳模型及均匀调制过程

②
111-118

李英民 赖明
(重庆建筑大学建筑工程学院 400045)

p315.4
TU311.3

摘 要 综述了几十年来地震动工程学模型化研究的发展过程,较全面地分析了目前常用的平稳模型及均匀调制过程。

关键词 地震动, 平稳模型, 均匀调制过程
中图分类号 TU318

地震动模型, 工程抗震

2.2.2 工程学模型

本文所指的工程学模型是指主要以工程抗震为目的而发展的地震动模型,可能与某些地震学家所倡导的工程学模型在概念上有一定的差别。后者或是由于采用了工程上常用的统计方法或是其研究成果可被诸如地震动小区划之类的应用所采纳而称为工程学模型,它对地震学与地震工程学的联系与结合所起到的促进作用当然是不可低估的,工程抗震设计也必将越来越多地接受此类模型的研究成果来确定结构可能遭受的地震作用。有鉴于该类模型的研究目的在很大程度上还是地震学家所关心的震源机制和传播途径对于地震动的影响,作者仍将它们归为地震学模型。本节所讨论的将是工程师为确定抗震结构的地震动输入而进行的地震动模型化研究。工程上习惯于按照地震动模型所适用的抗震分析方法将其分为时域模型和频域模型,尽管有些模型在时域和频域上是完全等价的甚至是不易区分的。工程学模型的研究发展过程也正是人们认识和定量描述地震动工程特性的发展过程,以平稳和非平稳这两类模型对这一研究发展过程进行综述则将更利于把握其发展趋势。俞载道等^[26]曾给出了地面运动随机模型的概括性介绍。

2.2.2.1 平稳模型

(1) 随机脉冲模型

本世纪五六十年代,可以用作结构抗震分析的强震加速度记录为数尚不多,局限于当时的理论和技术水平,尽管已经注意到地震动的非平稳特性对于结构响应有着一定的影响,但缺乏对影响程度的定量描述,一般仍认为结构的响应主要取决于可以视为平稳过程的强震段(或主震段)记录。地震动的平稳模型正是基于这种认识提出的。Housner^[21]进行了

收稿日期:1997-09-18

李英民,男,1968年11生,副教授

国家自然科学基金资助项目 .No. 59478025

强地震加速度图的首次工程解释,即将其视为沿断层的不规则滑动所产生的高频地震波在传播过程中经大量的随机反射、折射及衰减的结果,数学上将其描述为时间上随机到达的等量随机脉冲,这不仅为基于物理意义的地震学模型的研究构筑了基本思路,也为工程学模型的研究构筑了物理基础和研究途径。沿袭这一思路,地震学家提出了随机脉冲模型,即将地震动过程描述为时间上随机分布的一系列随机脉冲叠加而成的平稳随机过程,如 Housner^[27]用时间上随机发生的大量单周加速度正弦波来构造随机脉冲模型,Goodman, Rosenblueth 和 Newmark, Rosenblueth 和 Bustamante 等又研究和发展的随机脉冲模型。

(2) 白噪声模型和散粒噪声模型

地震动的随机脉冲模型具有较为明确的物理意义,特别是有可能将其与地震学模型相结合,但在实际应用中这一模型的数学实现却并不十分简单,各个脉冲的幅值和到时均需随机产生。从随机过程的角度看,白噪声模型可解释为时间上随机到达的随机脉冲的合成,只要到达时刻为均匀泊松过程,且到达速率与脉冲方差的乘积为常量。Hudson, Bycroft^[28]、Rosenblueth 及 Ward 等均提出了地震动的白噪声模型。之后这一模型又得到了进一步的应用和发展,用白噪声过程计算得的有阻尼速度反应谱与 Housner 基于当时有限数量加速度记录统计得出的平均反应谱相接近。

真实的白噪声过程是物理不可实现的。尽管地震动的某些特征(如加速度幅值的概率密度函数)一定程度上具有高斯特性^[29],线性阻尼结构地震响应的许多重要特征也可以近似用白噪声过程模拟,但从能量有限性和频率含量的角度看,将地震动过程用白噪声模型来模拟显然是不切实际的,从而导致了其无阻尼速度反应谱为常量而与周期无关的这一不合理现象。

事实上,白噪声过程是散粒噪声过程的特例,它完全等价于弱平稳散粒噪声过程^[30],即随机脉冲的到时服从均匀泊松过程,到达速率是不随时间变化的常量。

(3) 过滤白噪声模型和有限带宽白噪声模型

实际地震动过程的能量总是有限的,而且各频率含量之间也不可能是完全无关的。过滤白噪声模型和有限带宽白噪声模型正是基于这两方面因素对白噪声模型进行改进而提出的。过滤白噪声过程由 SDOF 振子对白噪声激励的滤波得出。Housner 和 Jennings^[31]以平稳高斯过程描述加速度图的强震段,并研究了滞回结构的地震响应。Kanai^[32], Tajimi^[33]以过滤白噪声模型描述强地震动过程,视基岩上的覆盖土层为 SDOF 线性滤波器,滤波器的脉冲响应函数相当于地震学模型中的 Green 函数,在研究了不同性质的土层对地震动影响的基础上提出了著名的地震动功率谱表达式,即 K-T 谱(金井清-田治见宏谱),这一谱形式后来被工程界普遍采用。

考虑到实际地震动过程所包含的频率不可能是无界的,其能量也仅可能趋于某一有限值,因而采用有限带宽过滤白噪声模型更趋合理,许多有关基于地震动过滤白噪声模型的研究成果在工程上得到了较为广泛的应用。

2.2.2.2 非平稳模型

在分析线性结构的地震响应时,上述平稳模型一般均可达到令人满意的精度。随着震害经验的积累,工程界已广泛认识到强震过程中结构所表现出的非线性行为。为了估计结构的非线性地震响应,在尽可能精确地模型化结构非线性性能的同时,工程师更认识到地震

动强非平稳性所产生的显著影响。大量研究表明,非平稳和平稳地震动模型对于同一非线性结构的地震响应是有显著差异的,在侧重于研究刚度或(和)强度退化型结构的响应以及非线性结构的累积损伤时,平稳模型往往低估了此类结构的响应因而是恰当的。

60年代,工程界已经认识到实际地震地面运动记录所表现出的强度和频率含量的非平稳性。不幸的是,由于缺乏频率含量非平稳性对结构非线性地震响应具有明显影响的正确认识、缺乏对频率含量非平稳性的合理定量描述(即便是已经提出了几种物理意义尚较为明确的描述指标,这些指标却总是基于某一特定地震记录所取得的离散采样值,鲜具统计意义的数学描述,而且难于从地震动记录识别,更难应用于工程实践)以及数学处理上的困难性和复杂性,地震动的模型化研究一直侧重于强度或时域的非平稳。近年来频率含量非平稳性的模型化才呈现出越来越受重视的趋势。

1) 强度非平稳模型(均匀调制过程)

一般地,典型地震动记录在强度上均表现出这样的性质,即具有一定长度的上升时间,达到某一强度并基本平稳地维持一段时间,然后趋于衰减直至地震动结束。地震动时域非平稳性的模型化研究基本上可以分为两类,最直接的方法即是在平稳模型的基础上引入一个随时间变化的强度包线函数。

Bolotin^[34]似乎是提出用一确定性的强度包线函数与平稳随机过程的乘积表示非平稳地震动的倡导者。地震动加速度过程可简单地用下式表示,

$$\dot{X}_g(t) = f(t) \cdot \dot{X}(t) \quad (1)$$

式中 $\dot{X}_g(t)$ 为强度非平稳地震动加速度过程, $f(t)$ 为确定性强度包线函数, $\dot{X}(t) = \dot{X}_g(t)/f(t)$ 为平稳随机过程。注意到 $f(t)$ 的作用并不影响地震动的频率含量,一些文献又称此类过程为均匀调制过程。由于可以利用先前平稳地震动模型的许多定性甚至是定量的结论,以及数学处理上的方便性,这种描述强度非平稳性的方法受到了广泛的关注。原则上讲,这种过程可由强度包线函数 $f(t)$ 和平稳过程 $\dot{X}(t)$ 完全确定,因而对其研究也主要集中于两个方面,即强度包线函数的确定和平稳随机过程的选用。一般将 $\dot{X}(t)$ 视为过滤噪声过程更为合理,上节所述平稳过程在一定条件下互为等价,因而这一时期有关平稳随机过程 $\dot{X}(t)$ 的研究则可归结为线性滤波器的选用。

(I) 强度包线函数(均匀调制函数)

强度包线函数的确定过程事实上即是非平稳过程的平稳化过程。地震动记录的强非规则性质使得不同记录具有各不相同的包线,即便是同一记录采用不同的平稳化方法也有可能得出不同的包线,对各个具体记录均相适合的统一包线函数是不现实的。工程上所关心的是具有统计意义的包线,因而常常假定其具有简单的参数形式。常用的主要有两类,一类是单峰状的光滑曲线,如胡聿贤和周锡元^[35],Shinozuka和Sato^[36],Levy等^[37]所采用的

$$f(t) = C_0(e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (2)$$

Iyengar和Iyengar^[38]所采用的

$$f(t) = (A_1 + A_2 t) e^{\alpha t} \quad (3)$$

以及Saragoni和Hart^[39],Jurkevics和Ulrych^[40]所采用的 Γ 函数形式

$$f(t) = A t^{\gamma} e^{\alpha t} \quad (4)$$

等均属此类。另一类是具有上升、平稳及衰减段的三段曲线,如Jennings, Housner和Tsai,

Murakami 和 Penzien 所采用的分段连续形式

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-\alpha(t-t_2)} & t_2 \leq t \leq t_d \end{cases} \quad (5)$$

这一形式为我国工程界所常用,陈永祁等^[41]、宋雅桐等^[42]分别给出了相应于不同持时的包线参数取值,霍俊荣等^{[2]、[43]}研究了强度包线函数的影响因素以及衰减规律。不难看出,上述包线均为三参数型,这些参数分别支配着地震动强度的上升速率、所达到的峰值以及衰减的速率。另外,Goto 等采用了两参数的单峰曲线,Ohsaki 等^[44]利用平滑技术得出了正规化的强度包线,Polhemus 和 Cakmak^[45]利用 Box - Cox 变换估计了多项式形式的方差函数,由此得出的均方差函数能较好地描述加速度时程的强度变化,可用作强度包线函数。

事实上,只要强度包线函数随时间缓慢变化,其不同形式对于仿真记录的谱特性并无显著的影响^[46]。应该注意到,强度包线函数的定义中隐含着对地震动时程持时的规定。若采取 Trifunac 和 Brady^[47]的 90% 能量持时的定义,它可由强度包线完全确定,用光滑连续型包线更可得这种持时的封闭解而使分析更为简便^[48]。但在模拟大震远场长持时记录时,单峰型包线函数却由于其平稳段偏短而具有较大的误差^[49]。

上述确定性包线函数实质上是将振幅谱处理为非平稳的即随时间变化的,在人造地震动的模拟中通常将相位谱取为 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分布。Ohsaki^[49]的研究则为强度非平稳性问题的处理提供了另一途径。Ohsaki 通过对地震动相位特性的研究指出,对地震动时程形状起决定作用的是相位谱而非振幅谱,并提出用相位差谱的概念来描述强度的非平稳性,认为平稳过程的相位差谱是均匀分布的,而非平稳过程的相位差谱是非均匀分布的,其分布形状与强度包线相近。因而,直接采用相位差谱非均匀分布的相位谱即可得到强度非平稳地震动时程而无需再乘以包线函数。这种方法受到了工程界的广泛关注。Izumi 等, Nigam^{[50]、[51]}, Sawada^[52], Kubo^[53]等均研究了相位差谱的重要性及在地震动模拟中的可行性。胡聿贤和何训^[54]通过考虑相位修正和各傅氏分量对最大反应贡献的正负改进了常用的反应谱拟和方法。金星和廖振鹏^[55]根据群速度与相速度的关系给出了相位差谱的物理解释。朱昱和冯启民^[56-57]通过一些强震记录的统计分析,指出相位差分布更符合对数正态分布,并根据这一结论研究了人造地震动的合成以及相位差谱的数字特征。赵凤新和胡聿贤^[58]通过理论推导研究了相位差谱与振幅谱对地震动时程强度非平稳性和频率非平稳性的作用机制,指出 Ohsaki 有关相位差谱决定强度包线的结论只适用于频率平稳的时程,而对于频率非平稳时程的强度包线函数,振幅谱和相位差谱均具有不可忽略的影响。

(2) 线性滤波器

在地震动均匀调制模型的研究中,许多学者也使用了不同形式的线性滤波器。线性滤波器的特性可通过其传递函数或脉冲响应函数表达,也可由其平稳白噪声激励的输出谱密度函数或自相关函数描述。Iyengar 和 Iyengar^[38]采用了具有下式所示谱密度函数的滤波器:

$$G(\omega) = A_1 e^{-\alpha_1 \omega^2} + A_2 \omega^p e^{-\alpha_2 \omega^2} \quad (6)$$

而 Saragoni 和 Hart^[39]采用了谱密度函数为

$$G(\omega) = A |\omega|^p e^{-q|\omega|^2} \quad (7)$$

的滤波器。更为广泛采用的(Kanai^[59]; Tajimi^[33]; Shinozuka^[36]等; Jennings等; Levy^[37]等; Murakami), 则是谱密度函数为

$$G(\omega) = \frac{c_0^2 \omega_k^4 + 4 c_1^2 \zeta_r \omega_k^2 \omega^2}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4 \zeta_r \omega_r^2 \omega^2} \quad (8)$$

的 SDOF 线性振子或质量—弹簧—阻尼器系统, 具有固有频率 ω_r 和阻尼比 ζ_r , 白噪声输入分别以比例 C_0 和 C_1 作用于弹簧和阻尼器, 实际应用中常常局限于最简单的情形: 或者 $C_0 = 0$, 或者 $C_1 = 0$, 或者 $C_0 = C_1$ 。上述滤波器的谱密度函数为单峰型, 一般认为可较好地模拟均匀地基, 而多层地基上实际地震动记录的谱密度常表现出多峰性质, 此时用 SDOF 线性振子模拟地基的滤波作用在低频段上将产生较大的误差。Clough 和 Penzien^[60]提出了双重过滤的谱表达式, Yamada 等甚至提出了多重过滤的谱表达式, 叶天义^[61]、赖明等^[62]采用改进的双重过滤谱表达式研究了与现行设计反应谱相对应的谱参数。为了更合理地反映传播途径及场地对地震波的过滤作用, 常中仁^[63]提出了两自由度线性振子的滤波器, 并研究了与现行设计反应谱相对应的系统控制参数。

注意到时间序列分析中的自回归滑动平均过程 (ARMA 过程) 是描述平稳随机过程的良好模型之一, Jurkevics 和 Ulrych^[40], Chang, Kwiatkowski 等开创了用 ARMA 模型研究地震动的先河。许多学者遵循这一思路进行了大量的研究 (如 Nau, Oliver 等^[65]; Polhemus 和 Cakmak^[45]; Conte, Oliver 等^[61]), 指出由于用离散差分方程表示滤波器的运动方程, 这种模型在数值计算及理论分析等方面较之前述连续模型更具优越性, 而且一般较低阶的 ARMA 过程如 ARMA(2, 1) 和 ARMA(4, 1) 即可较好地描述地震动过程。Conte、Oliver 等^[61]并且指出前述滤波器 (包括单一滤波器和多重滤波器) 仅是较低阶的 ARMA 过程的特例, 适当选择 ARMA 参数即可使得二者完全等价。国内对此模型的研究较少, 蒋溥等^[4]、李英民^[66]的研究均表明这一模型具有较大的发展前途。

由此可见, 选用不同的强度包线函数和线性滤波器, 即可确定不同的地震动均匀调制过程。事实上, 在构成均匀调制过程时, 强度包线乘子与线性滤波器的顺序是可以交换的。Chang 等^[64], Nau 等^[65]及 Shinozuka^[66]甚至给出了更为广泛的描述 (附图)。附图中的输入平稳过程可以是白噪声、散粒噪声、泊松过程或 ARMA 过程, 线性滤波器可以是单个, 也可以是多重形式。第一种方式对于分析更易于处理且对频域模拟方法更方便; 后一种方式则更具物理意义, 因为滤波器的瞬态响应直接表示在输出中^[65]。两种方法所得出的地震动过程谱形状可能相近。值得指出的是, Scanlan 和 Sachs^[67]提出用有限数量的三



a) 地震动过程表示为平稳过滤过程与强度包线的乘积



b) 地震动过程表示为线性滤波器对非平稳过程的滤波

附图

角级数和模型来近似过滤白噪声模型,各谐波的振幅初值通过功率谱与反应谱的近似关系确定,即

$$\begin{cases} \ddot{X}_r(t) = f(t) \cdot \sum_{i=1}^n A(\omega_i) \cos(\omega_i t + \Phi_i) \\ A(\omega) \approx 2 \sqrt{G(\omega) \cdot \Delta\omega} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\Delta\omega$ 为频率间隔,经迭代计算即可产生具有给定反应谱的加速度时程,因而在大多数国家以反应谱为主要设计地震动参数且应进行大震作用下变形验算的结构抗震设计中得到了广泛的应用。

另一类方法则不采用方程(1)所规定的乘积形式。注意到构成散粒噪声过程的随机脉冲具有时变到达速率时合成将为非平稳这一事实,Amin 和 Ang^[68]提出直接用过滤散粒噪声模型表述地震动加速度过程,模拟过程中应选择与强度包线函数相对应的时变到达速率构成散粒噪声过程。这种模型为地震动的仿真提供了一个更具物理意义的解释,但计算机实现却不及上述模型简单。

(待续)

参 考 文 献

- 26 俞载道,曹国敏.随机振动理论及其应用,上海:同济大学出版社,1988.423~477
- 27 Housner G W. Properties of strong motion earthquake. BSSA, 1995, 45(3): 197~218
- 28 Bycroft G N. White noise representation of earthquakes. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1960, 86(2): 1~16
- 29 Saragoni G R, Alarcon R, Crempien J. Gaussian properties of earthquake ground motion. Proc. of the 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980, (2): 491~498
- 30 Lin, Y. K. Probabilistic theory of structural dynamics. 1967. 67~95
- 31 Housner G W, Jennings P C. Generation of artificial earthquake, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1964, 90(1): 113~150
- 32 Kanai, K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 1975
- 33 Tajimi, H. A statistical model of determining the maximum response of a structure during an earthquake. Proc. of the 2nd WCEE, Tokyo - Kyoto, Japan, 1960
- 34 Bolotin V V. Statistical theory of aseismic design of structures. Proc. of the 2nd WCEE, Tokyo - Kyoto, Japan, 1960(2): 1365~1374
- 35 胡聿贤,周锡元.弹性体系在平稳化地面运动下的反应.地震工程研究报告集(一),1962.33~50
- 36 Shinozuka M, Sato Y. Simulation of nonstationary random process, J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1967, 93(1): 11~40
- 37 Levy R., Kozin F, Moonman R B. B Random processes for earthquake simulation, J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1971, 97(2)
- 38 Iyengar, R N, Iyengar K T S R. Anonstationary random process model for earthquake accelerograms, BSSA, 1969, 59(3)
- 39 Saragoni G R, Hart G C. Simulation of artificial earthquakes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 2(3): 249~267