Ⅰ-439　多点地震動シミュレーション

武蔵工業大学　学生員　○堀越　宏喜
武蔵工業大学　正会員　　星谷　勝
武蔵工業大学　正会員　　栗田　博昭

１．はじめに

地表面地震動は震源のメカニズム，伝播経路とその媒体，地表面近傍地盤などの影響を強く受ける複雑な運動である。この複雑な地表面における地震動の空間的および時間的な振動分布特性を表現するためには，アレー観測で得られる多点同時観測データをひと組のサンプル実現値として扱う統計確率論的手法が用いられる。 ライフライン，吊橋，あるいは火力発電所タービン建屋などのように空間的に広い領域を占める巨大構造物の耐震設計においては，地震動の空間・時間分布特性を明らかにして，多点地震入力波を作成することが必要となる。

一方，地震動の空間・時間分布特性については，アレー観測データに基づき，各種の統計確率モデルが研究されているが,モデルが確定するには，今後，実データの蓄積を待たなければならないのが現状である。

そこで，本研究では，地震動の空間・時間分布特性を表す統計確率モデルの既存の研究成果に基づき，多点地震動をシミュレートすることを目的とする。さらに，この手法によりシミュレートされたひと組のサンプル波が，与えた地震動の空間・時間分布特性を満足することを，数値計算例により示すこととする。

２．地震動の空間・時間分布特性

本研究では長大構造物の耐震設計に必用な入力を対象としているから，地震動を空間的な広がりの中で動的現象としてとらえることが必要である。地震動の空間・時間分布特性を統計確率論的に扱った研究は多数あるが，本研究で基本となるモデルは相互相関関数$R(\vec{x}_0,\tau)$または相互スペクトル密度関数$S(\vec{x}_0,f)$である。相互スペクトル密度関数モデルのうちで　HarichandranとVanmarcke[1]は地盤の均一性，地震動の定常性および異方性を想定して地震動の空間・時間分布特性を検討している。すなわち，空間的な広がりの中で，どの地点でのパワースペクトル密度関数も一定であるが，地震動の位相ずれは波動の伝播速度の方向ベクトル$\vec{c}$と２点間距離ベクトル$\vec{x}_0$のなす角度によって異なるという異方性を考慮して，相互スペクトル密度関数を次式で提案している。

$$S(\vec{x}_0,f) = S(f)\gamma(\vec{x}_0,f) \tag{1}$$

ここで，

$S(f)$＝均一場の代表地点における定常地震動のパワースペクトル密度関数。

$$\gamma(\vec{x}_0,f) = |\gamma(\vec{x}_0,f)|\,e^{-i2\pi fd} \tag{2}$$

$$|\gamma(\vec{x}_0,f)| = A\cdot\exp\{-2|\vec{x}_0|(1-A+\alpha A)/\alpha\theta(f)\} + (1-A)\exp\{-2|\vec{x}_0|(1-A+\alpha A)/\theta(f)\} \tag{3}$$

$$\theta(f) = k\{1+(f/f_0)^b\}^{-1/2} \quad \text{：相関距離指標} \tag{4}$$

$$d = \vec{c}\cdot\vec{x}_0/|\vec{c}|^2 \quad \text{：時間ずれ} \tag{5}$$

$\theta(f)$は相関距離指標(frequency dependent correlation distance)と呼び，2点間地震動の相関度を振動数依存の距離尺度で示したものといえる。(3)式のモデルではコヒーレンス$|\gamma(\vec{x}_0,f)|$が2点間距離$|\vec{x}_0|$と相関距離指標$\theta(f)$との比に対して指数関数的に減少していくという特徴がある。なお，アレー観測データなどの解析によって，(3)-(4)式における定数A,α,k,b,f_0を定めればこのモデルは実データに適合する一般的なモデルであるとしている。また，(2)式では位相ずれに対して地震動伝播の異方性を考慮している。実際の地震動では地震波の伝播に伴い，各点で時間ずれdが生じる。この時間ずれ（位相ずれに対応）は平面上で$\vec{c}$と$\vec{x}_0$とのなす角度をϕとおくと，(5)式より

$$d = \vec{c}\cdot\vec{x}_0/|\vec{c}|^2 = |\vec{x}_0|\cos\phi/|\vec{c}| \tag{6}$$

となる。つまり，各点における地震動の時間ずれは $\vec{c}$ と $\vec{x}_0$ とのなす角度 ϕ と $|\vec{c}|$，$|\vec{x}_0|$ とによって定まる。このように，波動伝播方向と距離ベクトルとの位置関係によって位相ずれが影響を受けるという異方性を考慮している。なお $|\vec{c}|$ は見かけの伝播速度であり，文献(1)のアレー観測で考慮している2km程度の広がりの空間においては，波の分散性を考える必要はなく，(5)式により時間ずれは十分に表現できるとしている。

３．多点地震動のシミュレーション

本研究では，確率論手法を用いた応答解析において，効率よく応答計算を行う手法である応答共分散漸化式の多点入力[2]として組込みが可能な自己回帰モデル[Autoregressive Model；ARモデル]を用いて多点地震動のシミュレーションを行う。ARモデルによる方法は，要求される地震動の相互相関特性を満足するようにモデルの係数を決定する方法である。したがって地震動の空間・時間分布特性を示す相互相関関数 $R(\vec{x}_0,\tau)$ が必要となる。

先に示した地震動の空間・時間分布特性は，相互スペクトル密度関数モデルであるから多点地震動をＡＲモデルによりシミュレートするには，相互スペクトル密度関数 $S(\vec{x}_0,f)$ をフーリエ逆変換することにより，次式の相互相関関数 $R(\vec{x}_0,\tau)$ を求めることになる。

$$R(\vec{x}_0,\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}S(\vec{x}_0,f)\,e^{i2\pi f\tau}\,df \tag{7}$$

ここで，(1)式および(2)式を用いれば，上式は，

$$R(\vec{x}_0,\tau)=2\int_{0}^{\infty}S(f)\,|\gamma(\vec{x}_0,f)|\cdot\cos 2\pi f(\tau-d)\,df \tag{8}$$

である。(8)式により，パワースペクトル密度関数Ｓ（ｆ）さえ与えれば，相互相関関数は数値解析的に求めることができる。

多点地震動を平均値が0の定常確率ガウス過程と見なすとき，その定常ＡＲモデルの基本式は次式で与えられる[2),3)]。

$$u_i(j)=\sum_{P=1}^{m}\sum_{K=1}^{M}b_{ip}(k)\,u_p(j-k)+\varepsilon_i(j) \tag{9}$$

ここで，

$i=1,2,\cdots,m$(m:地点数)，　$j=1,2,\cdots,N$(j:時刻を表す指標で，$t=(j-1)\Delta t$：Δtは離散時間間隔)

M:ＡＲモデルの次数，N:1波形のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝの離散ﾃﾞｰﾀ個数

多点地震動は，(9)式によりシミュレートされる。ＡＲモデルの詳細は文献(2),(3)を参照していただきたい。なお，均一な確率場の代表地点における変位波形のパワースペクトル密度関数は，後藤・亀田[4)]により提案された次式を用いる。

$$S(f)=\frac{2}{3\pi^5 f_g{}^5}\exp\{-4|f|/f_g\} \tag{10}$$

ここで，

f_g＝地盤の卓越振動数

なお，数値計算例は講演の際に示すこととする。

４．おわりに

本研究は，地震動の空間・時間分布特性を表す統計確率モデルの既存の研究成果に基づき，互いに相関を有する多点地震動を，ＡＲモデルによりシミュレートする手法を開発したものである。

＜参考文献＞

1) Harichandran,R.,S. & Vanmarcke,E.,H. ,J. of E.M. Div.,ASCE,Vol.112,No.2,FEB.,1986,pp.154-174.
2) Hoshiya,M. & Shibusawa,S. , J. of E.M. Div.,ASCE, Vol.112, No.4,APR.,1986,pp.412-421.
3) Hoshiya,M. & Chiba,T. , Proc. of JSCE, No. 296, APR., 1980, pp.121-130.
4) Goto,H. & Kameda,H. , Proc. 4WCEE, Chile, Vol.1,A-1,1969,pp.39-54.