

(48) 時間-空間変動を考慮した相対地震動の評価

建設省土木研究所 田村 敬一
 スタンフォード大学 S. R. Winterstein
 " H. C. Shah

1. はじめに

応答変位法による地中構造物の耐震設計では地震時に地盤に生ずる変形（ひずみ）を正しく評価することが最も基本となる。このような観点から、地震時地盤ひずみに関する研究が実測および解析の両面から進められている。一方、近年の高密度強震観測の進展に伴い、地震動の時間-空間変動特性に関する種々の研究が実施されてきている。本報文では、2種類の簡便な地震動の確率過程モデルを提案し、それを2地点間の最大相対変位の評価に応用した。提案モデルの有効性については、高密度強震観測記録と比較することにより検証した。

2. 地震動の確率過程モデル[1]

図1は地震動の時間-空間確率過程関数間の関係を示したものであり、上段の $C_s(\eta)$ 、 $C(\tau, \eta)$ および $S(f, \eta)$ は、それぞれ、空間相関関数、時間-空間相互相関関数および時間-空間クロススペクトル密度関数である。また、 η 、 τ および f は、それぞれ、空間座標、位相差および振動数を意味する。下段の各関数は、上段の関数を波数領域に変換したものである。地震動の時間-空間クロススペクトル密度関数のモデルとしては次式がよく仮定される[2]。

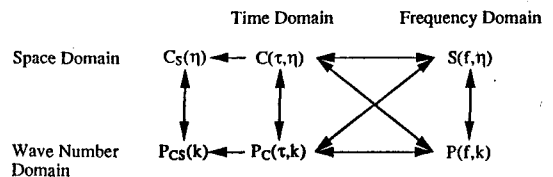


図1 時間-空間確率過程関数の関係

$$S(f, \eta) = S_0(f) \gamma(f, \eta) \exp(-i2\pi f \eta / c) \quad (1)$$

ここで、 $S_0(f)$ 、 $\gamma(f, \eta)$ および c は、それぞれ、任意の場所における地震動のパワースペクトル密度関数、コヒーレンスおよび地震波の見かけ上の伝播速度である。

本報文で提案する第一のモデルは地震動の時間-空間相互相関関数が次式に示すように、時間と空間の関数に分離できると仮定するものである。なお、以下の解析では地震動（変位）は時間並びに空間のいずれについても定常で平均値が0であるガウス過程に従うことを前提としている。

$$C(\tau, \eta) = C_0(\tau) \rho_s(\eta) = \sigma_u^2 \rho_T(\tau) \rho_s(\eta) \quad (2)$$

ここで、 σ_u 、 $\rho_T(\tau)$ および $\rho_s(\eta)$ は、それぞれ、地震動の2乗和平均平方根、任意の場所における時間相関係数（自己相関係数）および任意の時刻における空間相関係数である。このモデルを時間-空間分離相互相関関数モデル（以下、Time-Space Separable Correlation: TSSCモデル）と呼ぶことにする。 $C_0(\tau)$ は式(1)中の $S_0(f)$ の逆フーリエ変換として次式で与えられる。

$$C_0(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(f) \exp(i2\pi f \tau) df \quad (3)$$

したがって、TSSCモデルは $\rho_s(\eta)$ および、 $C_0(\tau)$ もしくは $S_0(f)$ のいずれか一方により規定される。また、式(2)は式(1)において次の条件が満たされる場合に相当する。

1) コヒーレンスを空間相関係数で置き換える。

$$\gamma(f, \eta) = \rho_s(\eta) \quad (4)$$

2) 地震波の見かけ上の伝播速度 c を無限大とみなす。

本報文で提案する第二のモデルは式(1)中のコヒーレンスが振動数に依らないと仮定するものである。

この場合、式(1)は次のようになる。

$$S(f, \eta) = S_0(f) \gamma(\eta) \exp(-i2\pi f \eta / c) \quad (5)$$

このモデルを振動数非依存型コヒーレンスモデル(以下、Frequency Independent Coherence: FICモデル)と呼ぶことにする。本モデルを確定するためには、 $S_0(f)$ 、 $\gamma(\eta)$ および c の3者を定める必要がある。FICモデルに対する時間-空間相互相関関数は、式(5)の逆フーリエ変換から次のように求められる。

$$C(\tau, \eta) = \sigma_u^2 \gamma(\eta) \rho_T(\tau - \eta / c) \quad (6)$$

さらに、上式で $\tau=0$ と置くことによりFICモデルから地震動の空間相関係数が次のように求められる。

$$\rho_s(\eta) = \gamma(\eta) \rho_T(-\eta / c) \quad (7)$$

式(7)において $c=\infty$ とおけば同式は式(4)と一致する。

3. 相対地震動の評価

距離 ξ 離れた2地点間の相対変位 $d(t, x; \xi)$ を任意の時刻 t 、任意の場所 x における変位 $u(t, x)$ より $d(t, x; \xi) = u(t, x + \xi) - u(t, x)$ で定義すれば、相対変位の時間-空間相互相関関数 $C_d(\tau, \eta; \xi)$ は $C(\tau, \eta)$ を用いて次のように表される。

$$C_d(\tau, \eta; \xi) = 2C(\tau, \eta) - C(\tau, \eta + \xi) - C(\tau, \eta - \xi) \quad (8)$$

式(8)に式(2)もしくは(6)を代入することにより、TSSCモデルもしくはFICモデルに基づく $C_d(\tau, \eta; \xi)$ が定められる。また、相対変位の2乗和平均平方根は上式において $\tau = \eta = 0$ とおくことにより求められる。

$$\sigma_d^2 = C_d(0, 0; \xi) \quad (9)$$

工学的には相対変位の最大値 d_{max} が重要であるが、時間上もしくは空間上の区間 B における非超過確率 p に対応する d_{max} は、極値のポアソン到着を仮定することにより次式で求められる[3]。

$$d_{max} / \sigma_d = \begin{cases} \sqrt{2 \ln(-2B/L_D \ln p)} & \dots -2B/L_D \ln p \geq e \\ \dots & \dots \text{その他} \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 L_D は次式で与えられる。

$$L_{DT} = 2\pi [C_d(\tau, \eta; \xi) / \{-\partial^2 C_d(\tau, \eta; \xi) / \partial \tau^2\}]^{1/2}; \tau = \eta = 0 \quad (\text{時間最大}) \quad (11)$$

$$L_{DS} = 2\pi [C_d(\tau, \eta; \xi) / \{-\partial^2 C_d(\tau, \eta; \xi) / \partial \eta^2\}]^{1/2}; \tau = \eta = 0 \quad (\text{空間最大}) \quad (12)$$

4. 高密度強震観測記録の解析

本報文中で提案した地震動の確率過程モデルの妥当性を検証するために、建設省土木研究所による静岡県内の高密度強震観測記録から各種確率過程関数および相対変位を算出し、提案モデルから推定した値と比較した。解析対象とした記録は表1に示す4地震により得られた記録である。ただし、紙面の都合上、以下では震央方向成分の解析

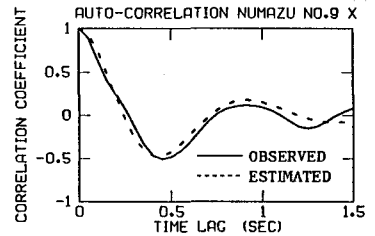


図2 時間相関係数(沼津 No. 9地点)

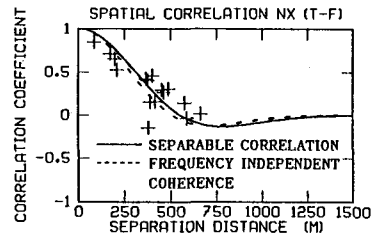


図3 空間相関係数(沼津)

表1 解析対象記録

Site	Date	Epicentral Region	Magnitude	Epicentral Distance [km]	Azimuth [degree]
Sagara	1983.11.24	S Coast of Chubu	5.0	45	277
Yaizu	1984. 9.14	Central Chubu	6.8	126	327
Numazu	1988. 9. 5	E Yamanashi Prefecture	5.6	45	25
Matsuzaki	1986.11.22	Near Izu-Oshima Is.	6.0	72	108

表2 パラメータの一覧(震央方向成分)

Site	B _T [sec]	# of Stations	u _{max} [cm]	σ _u [cm]	T ₀ [sec]	α	t ₀ [m]	B _S [m]	a ₀ [m]	c [m/s]
Sagara	3.0-8.5	8	0.239	.0792	0.70	0.25	470	1000	760	2635
Yaizu	1.0-9.0	8	0.937	.4145	1.65	0.15	530	2000	960	1276
Numazu	2.5-8.5	7	0.171	.0675	0.80	0.30	550	1500	650	2526
Matsuzaki	7.0-13.0	7	0.193	.0816	1.00	0.15	380	1000	370	1573

結果のみを示すことにする。

(1) 地震動の時間相関係数および空間相関係数

地震動の時間相関係数 $\rho_T(\tau)$ としては、次式を仮定した。

$$\rho_T(\tau) = \cos(2\pi \tau / T_0) / \{(2\pi \alpha \tau / T_0)^2 + 1\} \quad (13)$$

ここで、 T_0 および α はパラメータであり、実測データから求めた時間相関係数との2乗誤差が最小となるように定めた。図2に当てはめの一例を示す。次に、空間相関係数 $\rho_S(\eta)$ としては次式を仮定した。

$$\rho_S(\eta) = \{1 - (\eta / \xi_0)^2\} \exp\{-(\eta / \xi_0)^2\} \quad (14)$$

ここで、 ξ_0 は実測データとの2乗誤差が最小となるように定めるパラメータである。図3に当てはめの一例を示す。図中の実線は式(14)のパラメータの当てはめを行った空間相関係数であり、実測データから求めた値(+印)の特徴をよくとらえていることがわかる。また、破線は後述する FICモデルから評価した空間相関係数を示したものである。表2に各パラメータの一覧を示す。表中の B_T および B_S は、式(10)中の B に相当する、それぞれ、地震動の定常性を仮定した時間上および空間上の長さである。また、これらのパラメータの他に、各観測地区ごとの変位の最大値 u_{max} および2乗和平均平方根 σ_u の平均値を示している。

(2) コヒーレンスおよび地震波の見かけ上の伝播速度

コヒーレンスのモデルとしては、次式に示す振動数非依存型の関数を仮定した。

$$\gamma(\eta) = \exp\{-(\eta / a_0)^2\} \quad (15)$$

パラメータ a_0 は実測データとの当てはめから求めた。ここで、コヒーレンスは地震動の卓越振動数に対して計算することとした。図4に当てはめの例を示す。地震波の見かけ上の伝播速度は、相互相関係数が最大値を示す位相遅れと観測点間の距離との関係から算出した。算出結果例を図5に示す。式(7)に示したように、コヒーレンスおよび地震波の伝播速度を用いて FICモデルより空間相関関数を求めることができる。結果は図2に示したとおりであり、実測データから求めた空間相関関数を直接的に近似した TSSCモデルと FICモデルから評価した空間相関関数はよく合致していることがわかる。

(3) 最大相対変位

図6は TSSCモデル並びに FICモデルから求めた相対変位の2乗和平均平方根と実測データから求めた値との比較を示したものである。両モデルとも実測データとよく一致していることがわかる。

図7は任意の2地点の位置を固定した上で求めた時間上の最大相対変位を示したものであり、ここで非超過確率 p は 0.5 とした。実測データから求めた最大相対変位は地点間の距離の増加に伴い増加し、ある距離以上になると頭打ちになる傾向を示すが、両モデルから算出した最大相対変位とも、その傾向をよくとらえていることがわかる。図8は、 $p=0.5$ (実線) の他に $p=0.16, 0.84$ (破線) に

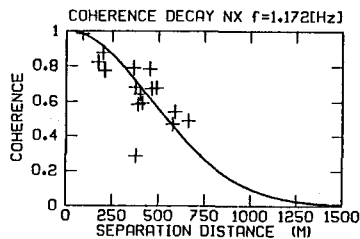


図4 コヒーレンスの距離減衰 (沼津)

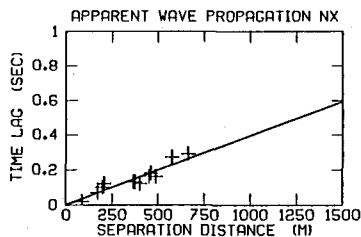


図5 相互相関係数の位相遅れ (沼津)

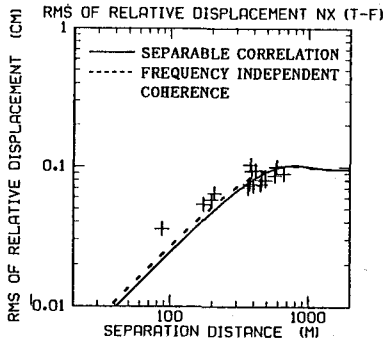


図6 相対変位の2乗和平均平方根 (沼津)

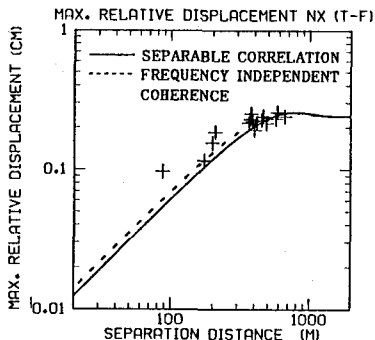


図7 時間上の最大相対変位 (沼津, $p=0.5$)

対してTSSCモデルから求めた時間上の最大相対変位を示したものである。2本の破線に挟まれる範囲は平均値から概ね標準偏差分のばらつきの範囲を示す。データには多少の変動が認められるものの、ここで提案したモデルから算出した最大相対変位は実測値とよく整合していることがわかる。なお、標準偏差分のばらつきの範囲が狭くなっているが、これは地震動のガウス過程分のばらつきのみを考慮し、モデルのパラメータ等のばらつきは考慮していないためである。距離と離れた2地点間の最大地盤ひずみを $\varepsilon_{max}=d_{max}/\xi$ で定義すれば、 ε_{max} は図8において左下から右上に45°で上がる軸に沿って読み取れることになる。このようにして求めた時間上の最大地盤ひずみは、 $p=0.5$ の場合、焼津地区で 35×10^{-6} 、他の地区では $(6 \sim 10) \times 10^{-6}$ 程度である。

図9は任意の時刻を固定した上で求めた空間上の最大相対変位の例を示したものであり、ここで p は0.5とした。本解析の範囲では空間上の最大地盤ひずみは、 $p=0.5$ の場合、焼津地区で 30×10^{-6} 、他の地区では $(4 \sim 7) \times 10^{-6}$ 程度である。

5. まとめ

地震動の時間-空間確率過程モデルとしてTSSCモデル並びにFICモデルを提案した。両モデルから評価した地震動の時間-空間変動特性並びに相対地震動特性は、いずれも実測データとよく合致し、また、モデル間の差異は実質上小さいものとみなせる。

【参考文献】 1) Tamura, K. et al. "Random Field Models of Spatially Varying Ground Motions", Blume Center Report No. 92, Stanford U., 1990 2) Loh, C. H. "Analysis of the Spatial Variation of Seismic Waves and Ground Movements from SMART-1 Array Data", EESD, Vol. 13, No. 5, 1985 3) Vanmarcke, E. H. et al. "Strong-Motion Duration and RMS Amplitude of Earthquake Records", BSSA, Vol. 70, No. 4, 1980

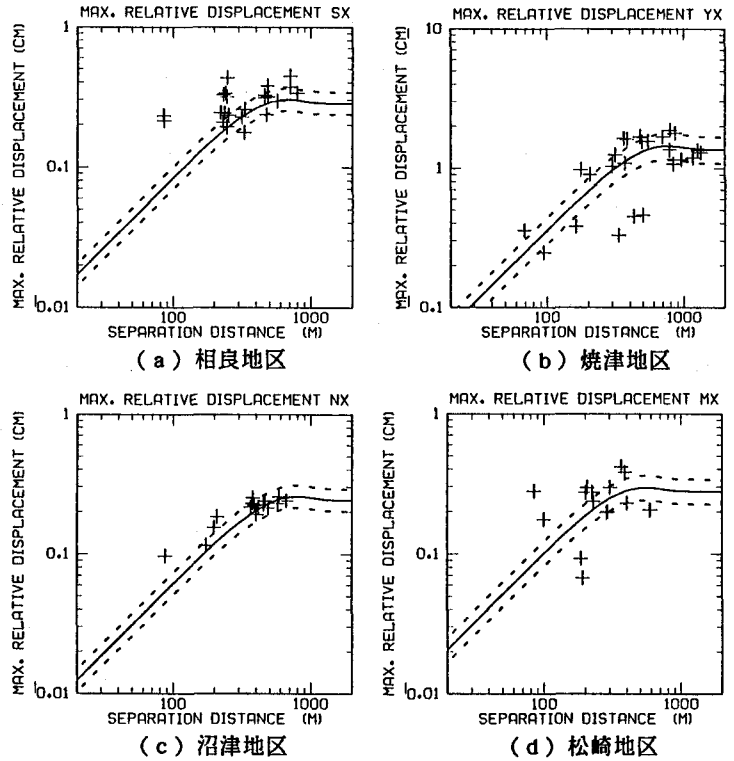


図8 時間上の最大相対変位 (TSSCモデル, $p=0.16, 0.5, 0.84$)

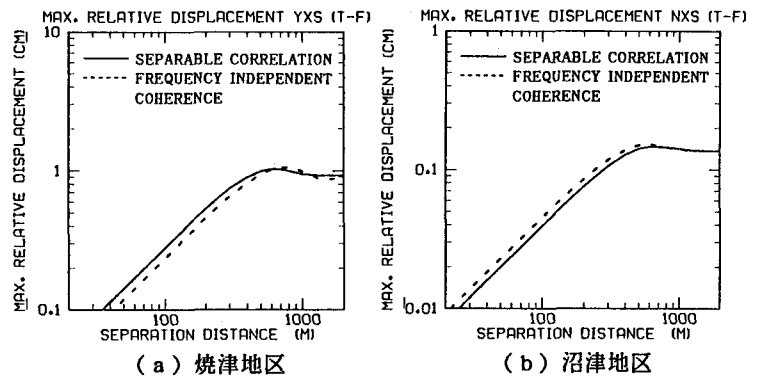


図9 空間上の最大相対変位 ($p=0.5$)