

I-708

位相差分分布を考慮した空間地震動のシミュレーション

東電設計(株) 正会員 ○鹿 林、安中 正
東京電力(株) 正会員 嶋田昌義、藤谷昌弘

1. まえがき 長大構造物や地中埋設構造物の耐震性を動的応答解析により検討する際には入力地震動の空間的变化を考慮する必要がある。そのため、空間地震動の条件付きシミュレーション手法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾が提案されている。それらの手法は基本的に定常確率過程を対象としている。しかし、地震動は非定常特性を有し、強度の包絡特性はそれを構成する成分波の位相差分分布と関係することが指摘されている⁷⁾。ここでは、多次元定常確率過程シミュレーション理論を条件とする地震動の位相差分の分布を考慮することによって非定常に拡張し、非定常空間地震動をシミュレーションする。また、シミュレーションした地震動およびそれを用いて求めた歪について、実測地震動および実測地震動から求めた歪、定常シミュレーションの地震動および歪との比較を行う。

2. シミュレーション方法 与えられた相互スペクトル行列 $G(\omega)$ を満足する、平均値0の m 次元定常確率過程 $x_i(t)$, $i=1, 2, \dots, m$, (ここで、 m は地点数である)は

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^i \sqrt{2\Delta\omega} |B_{ij}(\omega_k)| \cos(\omega_k t + \beta_{ij}(\omega_k) + \phi_{jk}) \quad (1)$$

を用いてシミュレーションすることができる。ただし、式中の $|B_{ij}(\omega_k)|$ 、 $\beta_{ij}(\omega_k)$ は相互スペクトル行列 $G(\omega)$ を三角行列に分解したときの (i, j) 要素の絶対値と位相角であり、 ϕ_{jk} は $0-2\pi$ で独立の一樣乱数である。ここでは、 ϕ_{jk} が $0-2\pi$ で独立の一樣乱数でありながら、 ϕ_{jk} の差分の分布を条件地震動の位相差分分布と一致させることによって非定常地震動をシミュレーションする。シミュレーションは以下の手順で行う。

- ① 条件とする地震動 $u(t)$ のフーリエ振幅 $F_u(\omega_k)$ と位相 ϕ_{uk} ($k=1, \dots, N$)を求める。
- ② 位相差分($\Delta\phi_{up} = \phi_{uk} - \phi_{uk-1}$)を求め、位相差分の分布を正規分布⁷⁾により近似する。
- ③ 近似した正規分布確率密度関数より位相差分の確率乱数 $\Delta\phi_{jk}$ ($j=2, \dots, m$; $k=1, \dots, N-1$)を発生する。
- ④ ϕ_{1k} を ϕ_{uk} と一致させ、 ϕ_{jk} を次式より求める。

$$\phi_{j1} = 0; \quad \phi_{jk} = \phi_{jk-1} + \Delta\phi_{jk-1} \quad j=2, \dots, m; \quad k=2, \dots, N \quad (2)$$

- ⑤ 定常確率過程をシミュレーションする時には伝播を表す位相差 $\beta_{ii}(\omega_k)$ は0であるが、非定常特性を考慮する時には各要素波の重ね合わせに非定常性を正しく表現するため、 $\beta_{ii}(\omega_k) = \beta_{i1}(\omega_k)$ と設定する。

- ⑥ 地震動を空間的に均一と仮定し、式(1)を用いて $x_1(t), \dots, x_m(t)$ をシミュレーションする。

3. 空間地震動のシミュレーション シミュレーションの条件地震動は、福島観測地点で観測した1989年12月9日茨城県沖地震($M=5.6$, $R=92km$, $v=2400m/s$)の地盤変位とし、比較のため条件地震動と74m離れた地点の地盤変位を目的地震動として、2で示した手順を用いてシミュレーションを実施した。シミュレーションで必要となるコヒーレンスは文献8)で提案したコヒーレンスモデルより求めたものを用いた。条件地震動、目的地震動、定常および非定常によりシミュレーションした地盤変位を図1に示す。区間距離が短いため定常および非定常によりシミュレーションした地盤変位は目的地盤変位にかなり近い。ただし、区間距離が長くなると定常シミュレーションでは地盤変位が定常になり、非定常シミュレーションでは地

盤変位が非定常特性を保つ傾向が見られる。非定常シミュレーション結果から求めたコヒーレンスと実測記録のコヒーレンスとの比較を図2に示す。両者はよく一致していることが分かる。

シミュレーション地震動を入力地震動とする際には、地盤相対変位あるいは歪の特性が重要である。実測記録から求めた歪み、定常シミュレーションから求めた歪および非定常シミュレーションから求めた歪を図3に示す。定常シミュレーションの歪の時刻歴は定常となり、非定常シミュレーションの歪の時刻歴は実測記録の歪の時刻歴と違うが、ある程度の非定常性が現れている。歪の最大値をみると一般的な傾向として、定常シミュレーションの歪は実測の歪よりやや小さく、非定常シミュレーションの歪は実測の歪に近くなっている。したがって、相対変位が重要な場合のシミュレーションでは、地震動の非定常性を考慮することによってより実際に近い結果が期待できると考えられる。

4. まとめ 多次元定常確率過程シミュレーション理論を地震動のフーリエ位相差分の分布を考慮することによって非定常に拡張した非定常空間地震動の条件付きシミュレーション方法を提案した。その方法によりシミュレーションした地震動およびそれを用いて求めた地盤歪は定常を仮定した結果よりも改善され、実測地震動および実測地震動から求めた地盤歪に近く結果が得られた。

5. 参考文献 1) 川上英二(土木学会論文報告集、第410号/I-12、pp. 435-443, 1989). 2) 小野牧夫・川上英二(第21回地震工学研究発表会、pp. 185-188, 1991). 3) Vanmarcke, E. and G. Fenton (Structure safety, Vol. 10, pp. 247-264, 1991). 4) 盛川仁・亀田弘行(京都大学防災研究所、都市耐震センター研究報告別冊第8号、1991). 5) Abrahamson, N. (Proc. 10th world conf. on earthquake eng., pp. 845-850, 1992). 6) 星谷勝(土木学会第47回年次学術講演会、1992). 7) 大崎順彦 et al. (第5回日本地震工学シンポジウム講演集、pp. 201-208, 1978). 8) Lu, L. et al. (Will appear on the Proc. of 5th U.S. national conf. on earthquake eng., 1994).

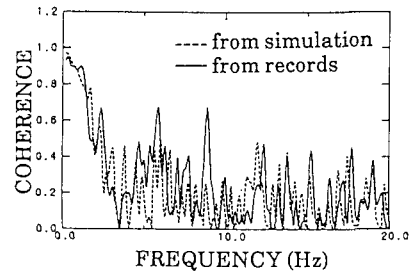


図2 観測とシミュレーションのコヒーレンスの比較

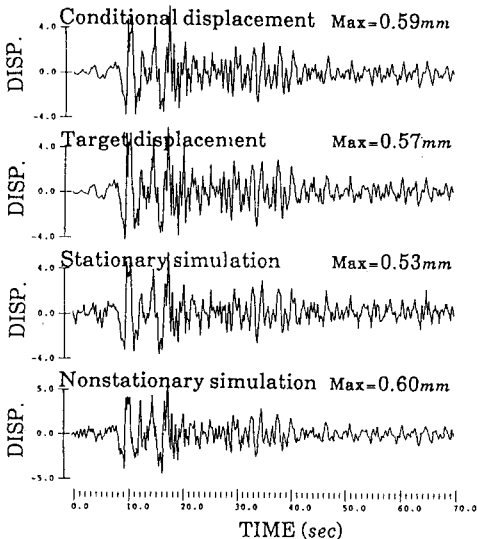


図1 条件地震動、目的地震動、シミュレーションした地震動の時刻歴

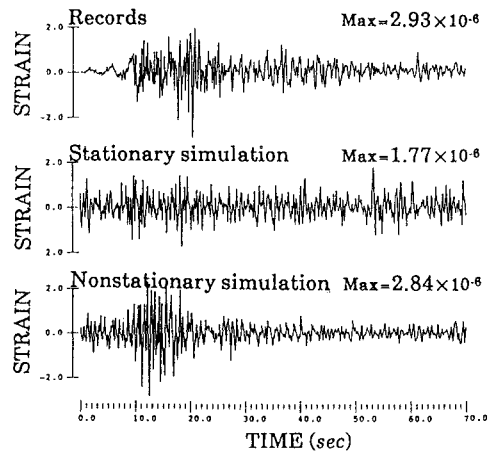


図3 観測とシミュレーションした地盤変位から求めた歪みの時刻歴