

I-707

応答スペクトルとパワースペクトルによる空間変動特性について

東京大学大学院

学生会員○ 中村博一

東京大学生産技術研究所 正会員

山崎文雄

1. はじめに 長大構造物や大空間構造物の地震時挙動予測には、強震動の空間変動特性を地表面全体において考慮することが望ましいが、工学的には適切な地点さえ選べれば複数地点のみで考慮することも可能である。

振動数領域で地震動の空間変動特性を表すものとしてパワースペクトルから得られるコヒーレンス関数があり、複数支点を持つ空間的に広がりを持つ構造物の地震応答を表すものとして、応答スペクトルから得られる Dynamic Response Ratio (DRR) がある。この DRR は Loh *et al.*¹⁾ により提案され、後に Abrahamson and Bolt²⁾ により拡張されたもので、各支点における加速度記録から得られる応答スペクトルの和に対する、複数の支点における加速度記録の合成波から得られる応答スペクトルの比として定義されるものである。そこでは SMART-1 アレーの観測記録を用いて、主に各支点間距離における DRR の固有振動数に関する減少の傾向が調査された。このようなアレー観測記録に基づく DRR についてはさらに調査される必要があり、また固定した固有振動数における DRR の支点間距離に関する減少の傾向についても同時に検討することが望ましいと考えられる。

以上を考慮して本報告では、千葉アレーで観測された地震記録を用い、2 支点を持つ 1 自由度系の DRR について、その系の固有振動数および支点間距離に対する傾向を調査する。そして自由地盤表面におけるコヒーレンス関数との比較を行い、それらの類似点および異点について考察する。

2. 解析の方法および結果 以後の解析のために、地表面のある地点 x における加速度記録を定常均質確率波 $a_j, j=r, t, u$ (各々震央方向、震央直交方向、上下方向の振動成分) と仮定する。

ここでは図 1 のような 2 支点の 1 自由度系を考えているので、上述の DRR の定義により 2 支点を持つ 1 自由度系の加速度応答スペクトル S_{jj}^{aa} (減衰定数: h) は各支点の応答スペクトル S_j^a の和と DRR Φ_{jj}^d との積として式 (1) のように表すことができ、DRR の境界条件は式 (2) で表される。

$$S_{jj}^{aa}(h, \xi, f_0) = \{S_j^a(h, 0, f_0; x) + S_j^a(h, 0, f_0; x + \xi)\} \Phi_{jj}^d(h, \xi, f_0) \quad (1)$$

$$\Phi_{jj}^d(h, 0, f_0) = 1.0 \quad (2)$$

また 2 地点間のクロスパワースペクトル P_{jj} は各地点のものの相乗平均と地震動の空間変動特性を表すコヒーレンス関数 γ_{jj} および位相差 ϕ_{jj} とで式 (3) のように表され、コヒーレンス関数の境界条件は式 (4) で表される。

$$P_{jj}(\xi, f) = \sqrt{P_{jj}(0, f; x) P_{jj}(0, f; x + \xi)} \gamma_{jj}(\xi, f) e^{2\pi i \phi_{jj}(\xi, f)} \quad (3)$$

$$\gamma_{jj}(0, f) = 1.0 \quad (4)$$

式 (1) により DRR は 2 支点間における地震動の位相差により直接影響を受けることがわかる。そして式 (3) によりコヒーレンス関数は 2 地点間における地震動の位相差の不規則変動成分により影響され減少することが知られているが、位相差そのものは含まないことがわかる。

また DRR およびコヒーレンス関数は支点間距離および地点間距離各々が 0.0 で 1.0 になるという境界条件式 (2) と (4) を満たすことがわかる。

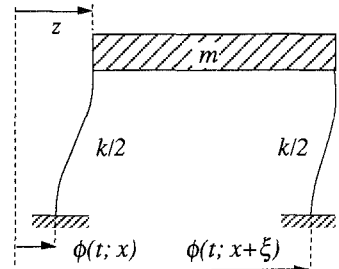
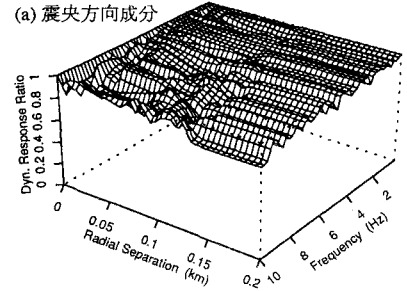
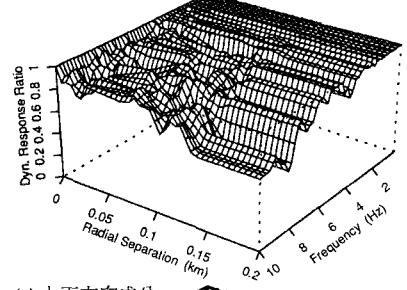


図 1 異なる入力を受ける 2 支点の 1 自由度系
ここで ϕ は各支点の変位、 z は質点のものである。

(a) 震央方向成分



(b) 震央直交方向成分



(c) 上下方向成分

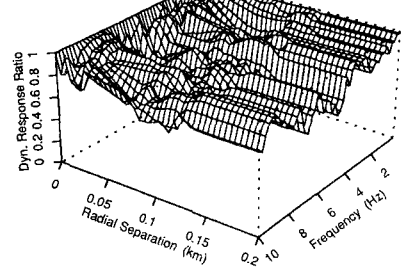


図 2 アレー加速度記録から得られた固有振動数と支点間の震央方向距離に関する Dynamic Response Ratio ($h=2\%$)

以上に示した DRR とコヒーレンス関数について、千葉アレー観測記録のデータベース³⁾の記録を用いて解析する。ただし水平2成分の加速度記録は震央と震央直交方向とのものに変換している。また加速度記録は複数の位相波から構成される非定常波であるが、短い時間ウィンドー(S-波部分の10秒間)と非常に狭い領域(約300メートル四方)を想定するので、定常均質な確率波でありしかも平面波であると考ええる。2支点間の DRR に関しては前処理を必要とせず、その傾向を見るために地表面の2次元空間で線形補間し、空間2次元と固有振動数との3次元関数にできる。しかし2地点間のコヒーレンス関数に関しては前処理が必要であり、有限の時系列からコヒーレンス関数を得るため、バンド幅が0.4 Hzの Parzen ウィンドーによりスペクトルの平滑化を行う($\Delta t=0.005$ 秒)。この平滑化のためコヒーレンス関数は振動数に対して局所的にかなり変動し、特に地盤の卓越振動数付近では急激に落ち込むので、その傾向を読み取ることは難しい。そこでコヒーレンス関数を見やすくするためにまず振動数領域においてその極大値を取り出し線形補間する。それから DRR の場合と同様に地表面の2次元空間で線形補間し、3次元関数とする⁴⁾。

3. Dynamic Response Ratio 図2と図3に地震記録8519³⁾のS-波部分に対する補間した DRR ($h=2\%$)とコヒーレンス関数とをそれぞれ示す。ここでコヒーレンス関数は2地点間における地震波の位相差を直接含まないので、従来の振動数と地点間距離とに対して図3のように表すことができるが、DRR は位相差の影響を主に含むため支点間距離に対して表しても意味がない。既往の研究^{1,2)}により震央方向の支点間距離と比較して震央直交方向のものにはあまり依存しないことがわかっており、ここでは3次元で図示するために固有振動数と震央方向の支点間距離とに対して図2のように表す。コヒーレンス関数自身については既に数多くの研究⁵⁾などが行われており、図2の DRR との比較のために図3にコヒーレンス関数を示している。DRR に関しては、地震動の水平2成分に関しては震央直交方向成分のほうが減少率が大きく約0.6まで減少し、高固有振動数においては支点間距離が数メートルでも減少しており、上下成分に関しては低固有振動数においても支点間距離が数メートルで減少していることがわかる。この減少傾向はコヒーレンス関数のものと類似するもので、DRR とコヒーレンス関数とは座標軸そのものは異なるが、両者とも同じ次元を持つ座標軸に対して表され、仮に両者の座標軸を同一視すれば、両者は同様の傾向を示しているのではないかと考えられる。

また、地震動の確率モデルを用いた多くのシミュレーション理論が提案されており、既に行われているが DRR を用いて、応答スペクトルの観点から数値的にシミュレーション理論を検証することができる⁶⁾。

4. まとめ 千葉アレーにより観測された地震記録を用いて、応答スペクトルから得られる Dynamic Response Ratio (DRR) の傾向について定性的に考察した。また振動数と地点間距離とに関する極大値を線形補間した2次元コヒーレンス関数との比較を行った。

結果をまとめると、直交3方向の各振動成分に対する DRR を比較し、座標軸を同一視した場合 DRR とコヒーレンス関数とは、その減少率に関して同様の傾向を示すことがわかった。地震動の水平2成分に関しては震央直交方向成分の減少率が大きく、また上下成分に関しては支点間距離がゼロ付近でも既に急激な落差をともなっているということがわかった。

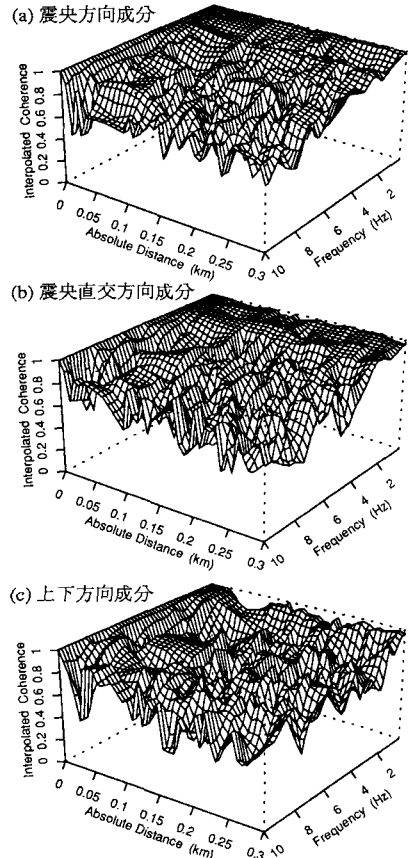


図3 アレー加速度記録から得られた振動数と地点間距離とに関するコヒーレンス関数

参考文献

1. Loh, C.H., J. Penzien and Y. B. Tsai, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 10, pp. 575-591, 1982.
2. Abrahamson, N.A. and B. A. Bolt, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 75, No. 5, pp. 1247-1264, 1985.
3. Katayama, T., F. Yamazaki, S. Nagata, L. Lu and T. Turker, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 19, pp. 1089-1106, 1990.
4. 中村博一・山崎文雄, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, 第1部門, pp. 506-507, 1993.
5. Harichandran, R.S. and E.H. Vanmarcke, *Journal of Engineering Mechanics*, Proc. ASCE, Vol. 112, No. 2, pp. 154-174, 1986.
6. Vanmarcke, E. H., E. Heredia-Zavoni and G. A. Fenton, *Journal of Engineering Mechanics*, Proc. ASCE, Vol. 119, No. 11, pp. 2333-2352, 1993.