

I - B 200 差分法・非線形有限要素法結合法による地盤の二次元地震応答解析

京都大学防災研究所 正会員 本田利器  
 京都大学防災研究所 正会員 澤田純男

1. はじめに

地盤の地下構造の影響を考慮した地震動の伝播特性に関する研究は多数行われているが、その多くにおいて地盤の線形挙動を仮定している。しかし、軟弱な表層地盤が広範にわたって塑性化した兵庫県南部地震の例にも見られるように、強震動の伝播特性をより正確に把握するためには、地盤の非線形挙動も考慮する必要がある。このような背景に鑑み、本検討では、差分法と非線形有限要素法を結合した手法により、表層地盤等の非線形挙動や、大規模な地下構造の影響を考慮した地盤の地震応答解析手法を開発することを目標としている。

2. 解析手法

ここで示す手法は、Moczo らによる差分法と有限要素法をハイブリッド化した手法<sup>1)</sup>に基づくものである。本手法では、地盤の大深度地下を含む線形領域を差分法で、また、表層地盤等の非線形挙動を考慮すべき領域を有限要素法で解析することができる。

(1)差分法領域

地盤は2次元の平面ひずみ場における P-SV 波動場として定式化している。この領域では減衰として、Emmerich らの手法<sup>2)</sup>により周波数依存性を有する Q 値を考慮している。差分方程式は、変位量を変数として中央差分法に基づき定式化している。

(2)非線形有限要素法領域

有限要素法領域では、4 節点アイソパラメトリック要素を用いた。非線形領域では完全弾塑性体を仮定し、降伏条件としては Coulomb の破壊基準を用いた。非線形挙動は荷重伝達法<sup>3)</sup>により考慮した。これは、図-1 に示されるように非線形系の応答力と線形応答を仮定した場合の応答力との差を調整外力として与えるものである。本検討の場合、Coulomb の破壊条件を越える応力を要素の節点力に換算したものが調整外力となる。

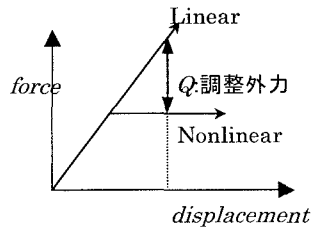


図-1 荷重伝達法の調整外力

(3)差分法-有限要素法結合領域

差分法-有限要素法結合領域での計算手法（時間ステップの更新方法）の概念図を図-2 に示す。同図の表記を用いて、時刻  $t=t_n$  から  $t=t_{n+1}$  に更新する場合の考え方を示すと以下ようになる。

- ① FD area 及び FD&FE area の  $t=t_n$  における状態を差分法により計算する。
- ② ①で算出された境界 A 上での値を境界条件として FD&FE area 及び FE area の  $t=t_n$  における状態を有限要素法により計算する。
- ③ ②で算出された境界 B 上での値を境界条件として

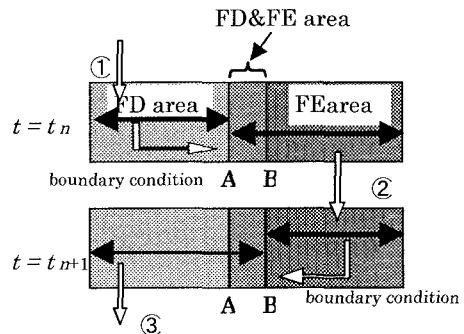


図-2 FD-FE 結合領域の解析手順

キーワード：非線形，有限要素法，差分法，結合法，地震応答解析

連絡先：京都府宇治市五ヶ庄 京大防災研 TEL 0774-38-4067 / FAX 0774-38-4070

$t=tn+1$  における上記①の計算を行う。以下同様のプロセスを繰り返す。

(4) 時間積分手法

本解析手法では、大規模な非線形解析の計算を迅速に行う必要があるため、有限要素法領域の時間積分の計算は酒井らによる計算法<sup>4)</sup>に基づく手法により行った。同手法は、収束計算を必要とせず、かつ、比較的高周波領域まで安定な時間積分法である。

3. 解析例

本手法を用いて、図-3 及び表-1 に示される地盤を対象として解析を行った。地盤モデルの左右両端では、Reynolds<sup>5)</sup>による透過境界を設けた。節点間隔は FD 及び FE の両領域で 1m とし、積分時間間隔は 1/1000 秒とした。入力波としてはモデル底辺に平行な線分上に一様なせん断波（Ricker Wavelet）を与えた。減衰は、FD 領域については 0.02~2Hz において一定の Q 値（P 及び SV 波それぞれに  $Q=50$  及び  $100$ ）を与え、FE 領域については、0.1 及び 10Hz において 2% となる Rayleigh 減衰を与えた。

図-4 に地盤モデル左端から 100m 間隔で地表面に設けた地点の変位（鉛直成分）の時間変化を示す。比較のため、同図には点線で線形解析をした場合の変位も示す。これより、地盤の非線形化の影響が残留変位、位相等に生じていることがわかる。

4. おわりに

差分法と非線形有限要素法を結合することにより、表層地盤などの非線形挙動を考慮した地盤の

地震応答解析を行う手法についてその有効性が示された。今後は、より実際の地盤を対象とした解析を行うことにより、表層の影響を考慮した地震動の伝播特性についての検討を行う予定である。

謝辞

本計算は京大科学研究所スーパーコンピュータラボラトリーの計算機により行った。記して謝意を表す。The program code for this computation was made based on the code for the hybrid FE-FD method, which was offered by Professor Moczo (Slovak Academy of Science). Authors would like to express their gratitude to him and his colleagues.

参考文献

- 1) P. Moczo et al. : Hybrid Modeling of P-SV Seismic Motion at Inhomogeneous Viscoelastic Topographic Structures, BSSA Vol.87, No.5, October 1997
- 2) H. Emmerich et al. : Incorporation of attenuation into time-domain computations of seismic wave fields, Geophysics, Vol.52, No.9, September 1987
- 3) 土岐ほか：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動，土木学会論文集 No.302, 1980年10月
- 4) 酒井ほか：収束計算を行わない動的な非線形 FEM のための時間積分法，土木学会論文集 No.507/I-30, 1995年1月
- 5) A. C. Reynolds : Boundary Conditions for the numerical solution of wave propagation problems, Geophysics, Vol.43, No.6, October 1978

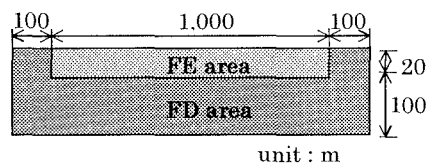


図-3 地盤モデル

表-1 地盤モデルの諸元

	FE area	FD area
P wave velocity [m/s]	260	400
S wave velocity [m/s]	150	200
Unit weight [kg/m <sup>3</sup> ]	2,000	2,000
Intrnl. frict. angle [deg]	20	-
Cohesion [N/m <sup>2</sup> ]	0	-

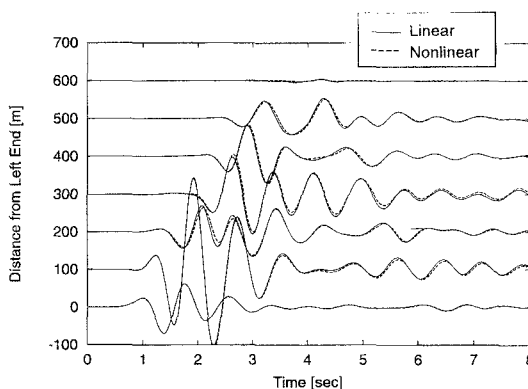


図-4 地表面における変位（鉛直成分）の時間変化