

不整形地盤の地震観測と地震応答解析

東北工業大学	学生会員	吉田 勝
東北工業大学	正会員	神山 眞
(株) 熊谷組	正会員	鈴木 猛康

1 はじめに

兵庫県南部地震では『震災の帯』という局地的に被害の集中した地域での解析により、不整形地盤を中心としたローカルサイトの影響が注目を集めた。不整形地盤の地震応答特性を明らかにするためには実測、理論の両面からアプローチする必要がある。その意味から、高密度で展開されたアレー観測システムの地震記録が重要となる。本研究は高密度アレー観測システム KASSEM の記録を用いて、不整形地盤の影響を実測、理論の両面から検討したものである。ここでは、特に速度-応力型の SH 波を対象とした有限差分法を用いてシミュレーション解析を行い、観測された記録と比較することを試みた。

2 SH 波を対象とした速度-応力型の有限差分法

地盤震動を支配する波動方程式を有限差分法で解く際、速度と応力を主パラメータとすると有利である<sup>1)</sup>。ここではその定式化について簡単に述べる。いま、図1の座標系を参照し、SH 波を対象とした運動方程式は式(1)で与えられる。

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \rho f \quad \dots\dots(1)$$

$v$  = 変位、 $\rho$  = 密度、 $\mu$  = せん断弾性係数、 $f$  = 単位質量別の物体力加速度、 $t$  = 時間、 $x, z$  = 座標である。ここで  $\sigma_{xy} = \mu \partial v / \partial x$ 、 $\sigma_{zy} = \mu \partial v / \partial z$  だから式(1)は  $v$  の速度  $\dot{v}$  を導入すると一階の微分方程式の連立で次のように表される。

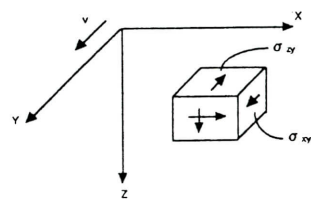


図1 座標系

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{v}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + f & \dots\dots(2) \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} = \mu \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} & \dots\dots(3) \\ \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} = \mu \frac{\partial \dot{v}}{\partial z} & \dots\dots(4) \end{cases}$$

式(2)~(4)は、 $\dot{v}$ 、 $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{zy}$ の3つのパラメータの差分表示をすることにより次の式(5)~(7)の陽の差分スキームを与える。

$$\begin{cases} \dot{V}(x, z, t + \Delta t/2) = \dot{V}(x, z, t - \Delta t/2) + \frac{1}{\rho(x, z)} \frac{\Delta t}{\Delta x} [\sigma_n(x + \Delta x/2, z, t) - \sigma_n(x - \Delta x/2, z, t)] \\ + \frac{1}{\rho(x, z)} \frac{\Delta t}{\Delta z} [\sigma_n(x, z + \Delta z/2, t) - \sigma_n(x, z - \Delta z/2, t)] & \dots\dots(5) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_n(x + \Delta x/2, z, t + \Delta t) = \sigma_n(x, z + \Delta z/2, t) \\ + \frac{\Delta t}{\Delta x} \mu(x + \Delta x/2, z) [\dot{V}(x + \Delta x, z, t + \Delta t/2) - \dot{V}(x, z, t + \Delta t/2)] & \dots\dots(6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_n(x, z + \Delta z/2, t + \Delta t) = \sigma_n(x, z + \Delta z/2, t) \\ + \frac{\Delta t}{\Delta z} \mu(x, z + \Delta z/2) [\dot{V}(x, z + \Delta z, t + \Delta t/2) - \dot{V}(x, z, t + \Delta t/2)] & \dots\dots(7) \end{cases}$$

式(5)~(7)の $\Delta x$ 、 $\Delta z$ 、 $\Delta t$ はそれぞれ座標  $x$ 、 $z$ 、時間  $t$  の刻み幅である。式(5)~(7)の差分式は、地盤物性に見合った $\Delta x$ 、 $\Delta z$ 、 $\Delta t$ を採用することにより、分散や発散のない安定した応答の時刻歴を求めることができる。なお、式(5)~(7)は、有限な計算領域に適用されるが、その仮想境界から人為的な反射波が生じる。ここでは Dai<sup>2)</sup>らによる吸収境界条件を用いて仮想境界からの反射波を消した。

差分法 不整形地盤 SH 波 アレー観測 KASSEM

仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号 TEL:022-229-1151 (内 436) FAX:022-229-8393

### 3 解析結果

KASSEM は宮城県柴田町のセンターアレーを中心とした各種の地盤に設置された強震アレーを加えて、全部で66成分の地震動を同時観測する大規模な観測システムである。

図2にセンターアレー付近での地盤断面図を示す。

今回解析対象とした地震記録は、平成8年2月17日0時22分の福島県沖地震（マグニチュード6.5、深さ58km）によるものである。この地震により初めてKASSEMの全観測点で記録が得られた。これらの記録を得た観測点のうちセンターアレー付近の観測点が図2の地盤断面図に対応して示されている（図2の白丸の点）。

図2に示すように槻木層がこの付近の第1次の基盤と考えられる。この層のS波速度はPS検層結果から500m/sec程度であることが知られている。一方、これ以浅の表層の構造は未知なので代表地点（図2のH1地点）のPS検層結果を参照して表層のS波速度を設定した（平均S波速度170m/sec）。

この地盤モデルを用いて上記の速度-応力型の有限差分法により応答計算を行った。応答波形を得た地点は図2に黒丸として示されている。なお、図2に示すように観測点S2（妙立寺観測点）は基盤（槻木層）露出点に位置しているので、ここでの記録を1/2したものを入射波として、S波垂直入射の条件により応答計算を行った。また、有限差分法の安定性を確保するため周期0.5秒以上の周期帯を解析対象とした。図3に図2の黒丸の算定地点における応答加速度波形を示す。

図3から傾斜基盤により生じた波動が水平方向に伝播している様子が観察されるとともに、このような波動の存在のため振幅も地点により著しく変化することがわかる。

図4はこのような理論応答波形と実測波形を観測点に対応させて比較したものである。この比較により、観測と理論は波形がよく似ていることがわかる。

### 4 結論

観測記録と理論応答計算の比較からここでの速度-応力型の有限差分法は不整形地盤の理論応答計算手法として有力なツールであることを知ることができた。また、不整形地盤では地震動特性により、わずかな距離でも大幅に変化すること、不整形性の存在により二次的に発生する波動が重要であることが指摘できる。

#### 参考文献

- 1) Virieux, J, SH-wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method: Geophysics, 49, 1933-1957.
- 2) Dai, N, et al: Bull. Seis. Soci. Am, Vol. 84, No. 1, PP185~191, 1994
- 3) 清水昭男、その他：熊谷組地震観測システム KASSEM の概要、熊谷技報第36号、1985.2

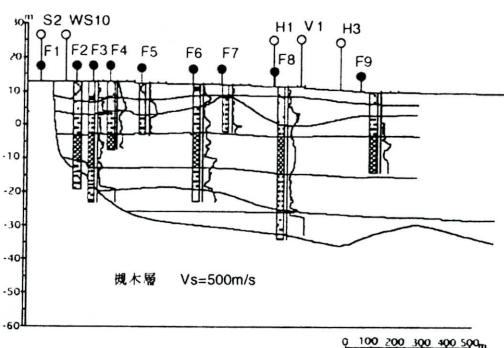


図2 センターアレー付近での地盤断面図

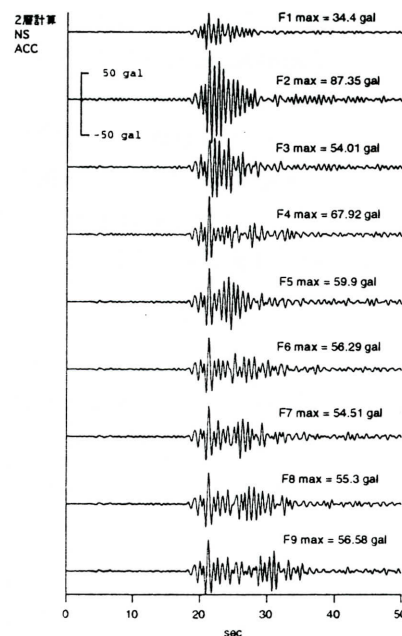


図3 理論計算結果の応答加速度記録

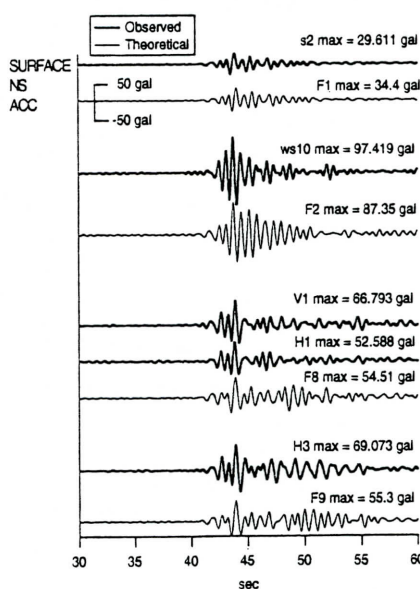


図4 理論応答波形と実測波形の比較