

アレー観測および応答シミュレーションによる 不整形地盤の地震動ならびに動ひずみ特性

神山 真¹・須藤鉄矢²・佐藤 勉³・鈴木猛康⁴

¹正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

²学生会員 東北工業大学大学院生 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

³正会員 工修 (株) システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

⁴正会員 工博 (株) 熊谷組技術研究所土木耐震研究グループ (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1043)

アレー観測システム KASSEM の不整形地盤地点に設置された観測点の地震動特性が実測と理論シミュレーションの比較に基づき議論される。不整形地盤の地震応答では加速度などの震動特性のみならず地盤に発生するひずみが重要であることに鑑み、実測記録からひずみの時刻歴が算定され、これが理論シミュレーションのひずみと比較される。ここでは不整形地盤の理論応答シミュレーションは面外震動問題 (SH 波)、面内震動問題 (P 波, SV 波) が別個に扱われ、プログラムのコード化は擬似スペクトル法で行われる。観測地点の不整形地盤構造を詳細にモデル化したシミュレーションにより加速度、ひずみの両面にわたり、実測記録と理論シミュレーションの結果は振幅レベル、波形ともよく一致することが述べられる。

Key Words : *pseudo-spectral method, irregular ground, earthquake response, surface wave, acceleration, strain*

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以来、再び不整形地盤の地震動特性が注目を集めるようになってきた。不整形地盤の地震動に及ぼす影響は三つの観点からとらえる必要があると考えられる。一つは、加速度などのベクトル量が不整形地盤に位置する特定の地点や領域で特別に大きな振幅をもって現れるという、「震動の特異増幅」の観点からである。二つは不整形性の存在により見掛け上水平方向に伝播する二次的な波動が発生し、これにより震動継続時間が大きくなるという点である。そして、三つは地盤内の応力、ひずみといったテンソル量からみた観点であり、不整形地盤では通常の平行成層地盤では発生しえない特別な成分の応力やひずみが引き起こされ、これがライフライン構造物や地盤液化現象などに決定的に大きな影響を及ぼすことが考えられるという点である。

筆者らは第三の観点が過去の地震における不整形地盤での地震被害の多さを解くカギと考え、これに適切な解析手法として擬似スペクトル法を取り上げ、モデル地盤を対象に解析的な検討を進めてきた^{1), 2)}。このような観点の重要性を立証するためには、実際の不整形地盤での記録、とりわけアレー記録に即して検討することが必要であると考えられる。本報告はこの視点にたって、筆

者らが永く観測に携ってきたアレー強震観測システム KASSEM³⁾ のアレー観測記録を用いて実測と理論応答シミュレーションの相関に焦点を合わせて不整形地盤の地震動特性について考察したものである。

2. 不整形地盤におけるアレー強震観測記録

アレー強震観測システム KASSEM³⁾ は宮城県から福島県にかけて設置された大規模かつ高密度の観測網である。このシステムは多くの目的をもって構築されたが、不整形地盤の地震時挙動の把握も大きな目的の一つとなっている。図-1 は KASSEM の宮城県柴田町船岡に位置するセンターアレー付近の地表における観測点配置を示したものである。図-1 に示す観測点 (WS9, H1, H3, H5, V1, WS10, S2) は異なる地盤構造を有する地点に設置されており、このうち、観測点 S2 はこの付近の第一次基盤と目される軟岩の槻木層 (S 波速度 500m/sec 程度) の露出している地点に位置している。これに対して他の観測点はこの槻木層の上に何らかの堆積層を有する地点にある。図-2 は図-1 の B-B' の線に沿っての地盤構造断面を示したものである (一部は推定)。図-2 に示すように、ここでの観測点は典型的な不整形地盤に分布していることがわかる。

強震観測システム KASSEM の観測点は宮城県から福島県にかけて広域的に配置されていることから、一つの地震で同時に全観測点で記録が得られることは珍しいが、たまたま 1996 年 2 月 17 日午前 0 時 22 分に発生した福島県沖（北緯 37° 18.3′，東経 142° 33.0′）を震源とする M=6.5 の地震で全観測点で記録が取得された。図-1 の観測点でもほぼ完全な形で記録が得られているので、本研究ではこれらの記録を例に実測と理論応答シミュレーションの結果を比較する。

3. ひずみ時刻歴の算定

図-1 のアレー観測点により得られた加速度記録から変位記録を数値計算により求め、これを利用して地盤のひずみを算定した。ここでの各観測点の記録は 3 成分のアレー観測により時刻が同期されて得られているので各種の成分のひずみを数値的に求めることが可能である。変位記録からのひずみ算定法は種々考えられるが、ここでは地震測地学 (Seismo-Geodetic) ⁴⁾ の原理を用いた。

いま、全部で N 個の観測点で 3 方向の変位記録が同時に得られたとする。このとき、N 個の中の一つの基準観測点を O とすれば、この基準観測点に対する任意観測点 n の i 方向の変位差分は変位の空間微分と j 方向での観測点間距離から次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta u_i^{(n)} &= u_i^{(n)} - u_i^{(o)} = (\partial u_i / \partial x_j) \Delta x_j^{(n)} \\ \Delta x_j^{(n)} &= x_j^{(n)} - x_j^{(o)} \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) の変位差分は観測変位記録から求められるので、これを用いて式 (1) の連立方程式を解けば、空間微分は算定可能である。このように算定される空間微分からひずみの各成分は次のように与えられる。

$$e_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2 \quad (2)$$

上記の方法は地表面に展開された観測点が最低 3 観測点あれば、地表での自由表面の境界条件を用いて全成分のひずみが求められる。本研究では図-1 に示す観測点のうちセンターの観測点 (H1, H3, H5, V1) から構成される三つの小三角形ごとにひずみ成分を算定した。ここに観測点 H1, H3, H5 は辺長 400m の正三角形の各頂点に設置されており、観測点 V1 はその重心に位置している。このように空間的に離散した観測点の変位記録からひずみを算定する場合、空間サンプリング長さに基づくエイリアジングが生じて算定に誤差が引き起こされる可能性がある。これを避けるため、本研究では観測点間の距離と地盤の波動伝播速度を考慮して、0.5~5.0 秒のバンドパスフィルターを原加速度記録に適用して、これから求まる変位記録によりひずみを算定した。

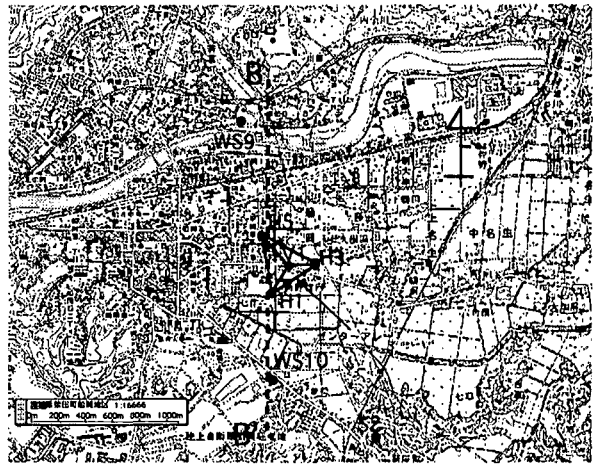


図-1 KASSEM センターアレーにおける観測点配置

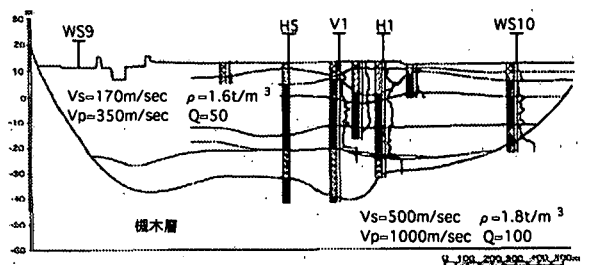


図-2 地盤断面と観測点配置

4. 理論応答シミュレーション

図-2 の二次元地盤断面に対して面外震動問題 (SH 波)、面内震動問題 (P-SV 波) の応答計算を別途に行った。ここでは紙数の関係から面内震動問題 (P-SV 波) の結果のみを示す。

両問題とも応答計算は擬似スペクトル法を用いた。この手法の詳細は文献 1), 2) を参照されたい。擬似スペクトル法は解析空間を格子状のグリッド点で離散化して、このような離散点に対して時刻ごとにフーリエ変換を適用してベクトル量、テンソル量の時刻歴を求める手法である。このときのグリッド長、時間ステップ長は解析対象空間の物性を考慮して、かつ数値計算の安定性を確保するため問題に応じて適宜設定される。本研究ではボーリング資料、PS 検層結果を参照して設定された図-2 に示す各層の物性値を考慮して水平、鉛直方向のグリッド長を 7m とするとともに、数値計算の安定性確保のため時間ステップ長を 0.0005 秒とした。

図-1 に示すように、観測点 S2 は図-2 の基盤である樹木層が露出する観測点に位置している。そこで、本研究では S 波の垂直入射を仮定して観測点 S2 で得られた加速度記録の振幅を 1/2 して、これを図-2 の樹木層に

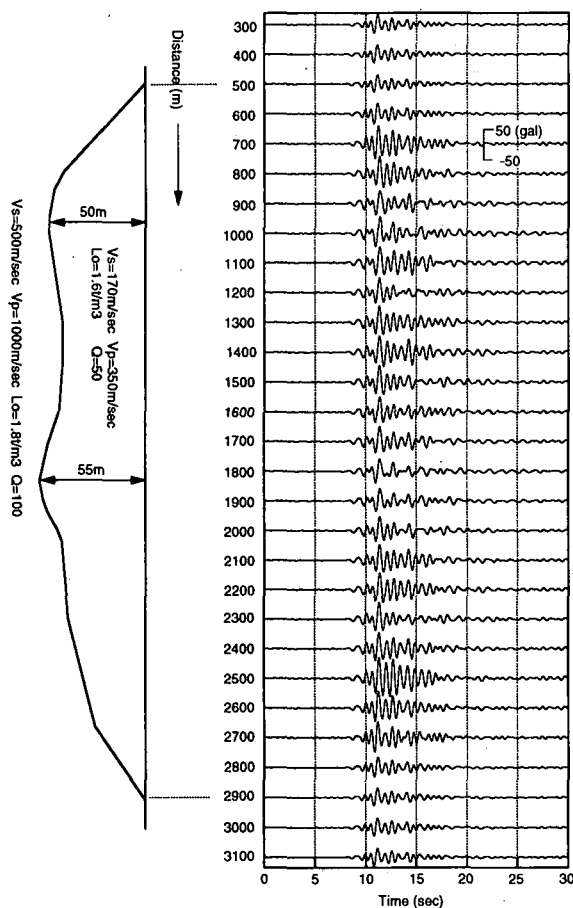


図-3 水平加速度の応答波形

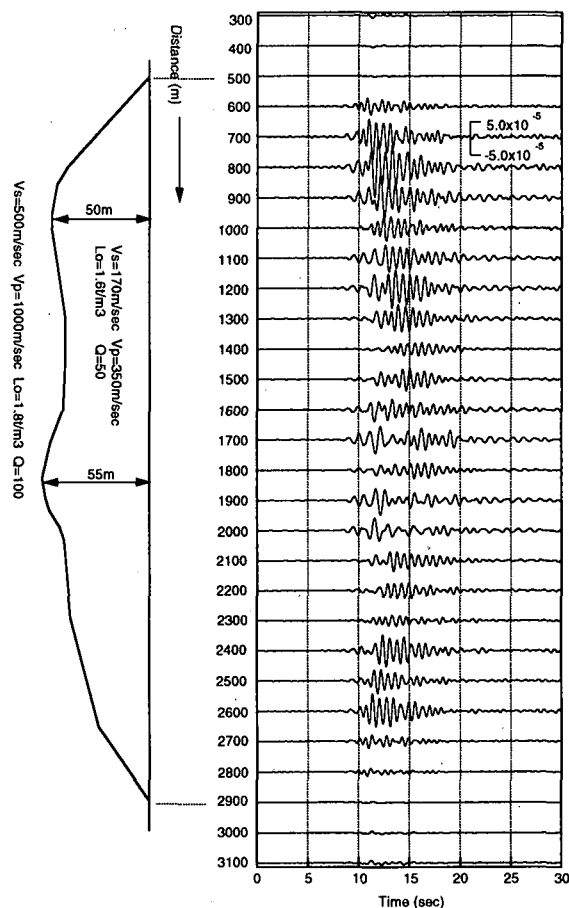


図-4 NS方向の直ひずみの応答波形

垂直入射させ応答シミュレーションを行った。なお、このときの入射加速度波形は上述の応答計算条件および実測ひずみとの比較を合理的に行うため、0.5~5.0秒のバンドパスフィルターを原加速度記録に適用したとした。

図-3は面内震動問題(P-SV波)の応答計算結果の代表として、各点の地表での水平加速度(図-2ではx軸方向)の応答波形を示したものである。また、図-4はひずみの応答波形の代表として南北方向(図-2ではx軸方向)の直ひずみ成分の地表での応答波形を示したものである。なお、この成分は地表でもゼロとならないことに注意されたい。図-3、図-4をみると加速度、ひずみとも地盤の不整形性により若干離れただけでも振幅、波形が大幅に異なることがわかる。特に、この解析断面では基盤の変動が著しい地点付近で加速度、ひずみの振幅が大きくなる傾向が伺い知れるとともに、そのような基盤変動付近から二次的に発生した波動が水平方向に伝播している様相が観察される。特に、図-4の直ひずみの応答計算結果に水平方向への伝播が顕著に現れており、このことからこのひずみ成分が地盤の不整形性の存在により特別に発生される成分であることが指摘される。

なお、紙数の関係からここでは示しえないが、このひずみ成分は地盤中の分布として地盤浅部ほど大きくなる特性を有している。

5. 理論応答結果と実測記録の比較

上述のように求められた応答シミュレーション波形を実測記録と比較した。ここで、応答シミュレーション波形が周期0.5~5.0秒の周期帯で求められていることに対応して実測記録もこの周期帯域で濾波された記録を用いて比較する。図-5はアレー観測点でのNS方向加速度記録とそれらの観測点に対応する地点で求められた応答加速度波形を比較したものである。観測点WS10の比較を除き、他の観測点では加速度振幅、震動継続時間も実測と応答シミュレーションはよく対応していることがわかる。観測点WS10での不一致はこの観測点が基盤の大幅に変動する地点に位置しており、この付近の地盤構造が図-2の解析モデルと異なることに原因していることが考えられる。一方、図-4に示した直ひずみ成分の応答波形を対応するひずみ成分の実測波形と比較して示したのが図-6、図-7である。図-6は三角形

H5-H1-V1 から求められた実測ひずみ, 図-7 は三角形 V1-H1-H3 から求められた実測ひずみを対象とした実測と応答シミュレーションの比較である。これらを見ると, 両方の比較においてひずみ振幅, 波形とも実測, 応答シミュレーションがよく対応していることがわかる。一方, 二つの三角形の距離が隣接しているにも係らず, 図-6, 図-7 の実測ひずみが大きく異なっている。このように隣接している近距離にもかかわらず大きく異なる状況は応答結果でも再現されており, このひずみ成分は近距離で急激に大きさが変化する特性を有することが実測と応答シミュレーションから立証される。

6. まとめ

アレー強震観測システム KASSEM の記録を利用した不整形地盤の実測地震記録と応答シミュレーションの比較から加速度などのベクトル量とともにひずみ成分においても実測結果が応答シミュレーションでよく説明されることがわかった。特に, ここで対象としたひずみ成分は不整形地盤特有の影響で発生されるものであり, かつその振幅がかなりの大きさ示すことが実測と理論の両面から立証されたことから, このようなひずみや応力といったテンソル量を重要視する立場から不整形地盤の地震動ならびに地震被害を考察すべきことが示唆される。

これまでの不整形地盤の地震応答では深さ数 km のオーダーを有する平野の規模での不整形性の大きさを指摘する研究が主になされてきたが, ここで取り扱った深さ数十メートルのオーダーでも不整形性の影響は無視できないことが本研究の一つの結論として導かれる。特に, 地盤内の応力やひずみを重要視する視点に立てば, むしろ本研究で対象とした程度の規模の不整形性が重要であることが指摘できる。

参考文献

- 1) 神山 他: 擬似スペクトル法による不整形地盤の地震応答解析とその評価, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.137-140, 1997
- 2) 佐藤, 神山: Pseudo-Spectral Method による P-SV 波を対象とした不整形地盤の地震応答解析, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1B, pp.450-451, 1998
- 3) 鈴木, 金子: 熊谷組強震アレー観測システムのテレメータ化, 熊谷組技術研究報告, 第 56 号, pp.119-125, 1997
- 4) Bodin, P. et al.: Dynamic deformation of shallow sediments in the valley of Mexico, BSSA, Vol.87, pp.528-539, 1997

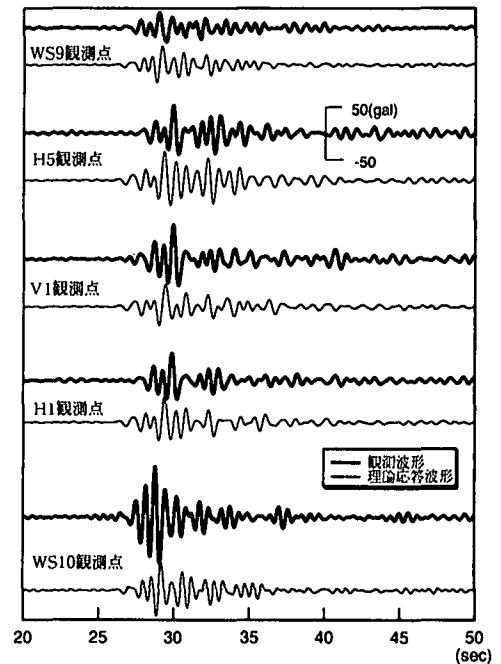


図-5 実測加速度記録と応答加速度波形に比較

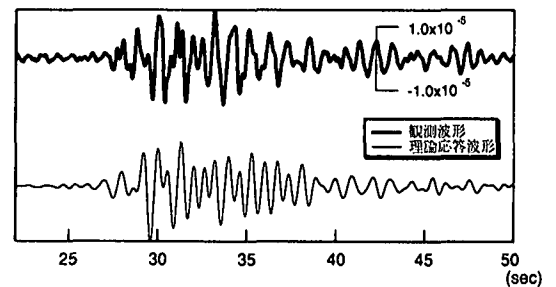


図-6 NS 方向の直ひずみの実測記録と応答シミュレーション波形の比較 (三角形 H5-H1-V1)

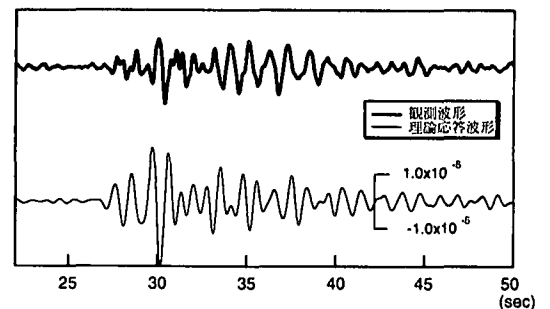


図-7 NS 方向の直ひずみの実測記録と応答シミュレーション波形の比較 (三角形 V1-H1-H3)