

◆ 地震防災特集 ◆

沖・洪積層下の伏在断層の運動による地表面変位の解析

梶川昌三* 脇坂安彦**

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震時に、いわゆる「震災の帶」¹⁾が発生した。「震災の帶」の発生原因として、この帶の下に伏在断層が存在するという説²⁾、地下構造による地震波増幅説³⁾などが出されたが、現在では伏在断層説はほぼ否定されている^{4),5),6)}。「震災の帶」の発生原因としての伏在断層説は否定されたが、厚い沖・洪積層に覆われた伏在断層が活動したときに地表面がどのような変位の影響を受けるのかはまだ詳細にはわかっていない。土木構造物の設置や防災計画の立案にあたっては、地震動の対策は耐震設計等によりほぼ確立されているが、変位の影響については対策を立てることが困難であるため、あらかじめ変位の影響を把握しておく必要がある。

このような断層の変位のシミュレーションは過去にも数例行われている^{7),8)}が、地盤を等方均質媒体として扱うことや、広範囲にあらわれる変位のシミュレーションを行うことが主であった。そこで本研究では、より具体的な地盤モデルについてシミュレーションを行うこととした。まず、阪神地区における沖・洪積層地盤の詳細なモデル化および日本の多くの沖・洪積平野のデータから仮想沖・洪積層地盤のモデル化を行った。次に伏在断層の運動による地表面変位の解析を伏在断層の動的・静的パラメータおよび沖・洪積層の構造を変化させ、二次元弾性有限要素法および二次元弾塑性有限要素法により行った。

2. 地盤のモデル化

2.1 阪神地区地盤のモデル化の概要

沖・洪積層地盤のモデル化については、地層層序に関するモデル化と、地盤物性値に関するモデル化を行った。モデル化は今までに阪神地区で得られたボーリング資料および物理探査結果を整理し、さらに三次元地質モデル作成ソフトウェアを用いることにより行った。最終的に作成した地層層序に関する三次元モデルを、図-1に示す。

Displacement of Ground Surface Caused by Movement of Faults Buried Under Alluvium and Diluvium

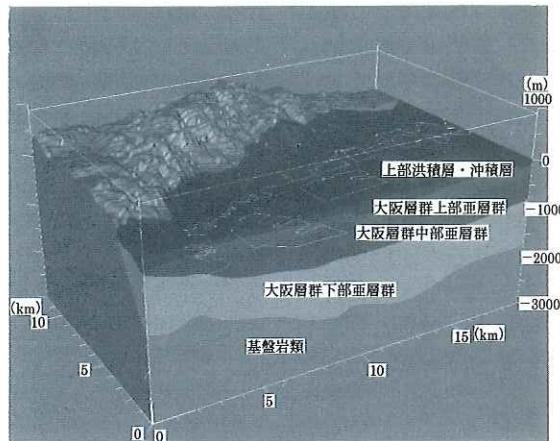


図-1 阪神地区地盤の三次元モデル

地盤物性値に関するモデル化は、モデル化した地層層序の各地層をそれぞれ適当な数で分割してそれに物性値を当てはめるという方法で行った。物性値としてはP波速度、S波速度、密度、剛性率、ポアソン比、N値、ヤング率を取り扱った。

2.2 阪神地区地盤のモデル化手法の詳細

地盤モデルの作成は、三次元地質モデル作成用ソフトウェアを用いた。主なモデル作成の手順は以下のとおりである。

- 物性値データ(ボーリングデータ)等および地表面位置データ(格子データ)を入力データとする。
- モデル化する三次元領域全体を多数のセルに切る。
- それぞれのセルに物性値を割り当てる補間計算を行い、物性値分布図を作成する。
- それぞれのセルの物性値を出力する。

詳細な物性値モデルの作成の方法は次の通りである。まず、ボーリングデータおよび物理探査データ(S波長周期微動探査データ)を配置し、三次元モデル対象領域全体に対して補間計算を行った。計算結果は物性値として各セルに割り当てた。補間計算においては、個々のセルに関してそのセルから近い位置にあるデータほど、よりその値の影響が強く出るよう平均化する必要がある。そこで、各物性値の三次元分布を求めるにあたって、以下の計算式を用いた。

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n W(r_i, R) \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n W(r_i, R)}$$

$$W(r, R) = (R/r - 1)^2$$

V : セルが保有する物性値

W : 重み付け関数

r : 計算対象セルのデータ位置からの水平距離

R : 計算対象セルの物性値計算に用いるデータをその水平距離に応じて取捨する際の取り込み半径

n : 計算対象セルから取り込み半径 r 以内に存在するデータの数

Z : 計算対象セルの物性値を計算する際に参照されるデータの物性値

N 値の分布に関しては、上記取り込み半径 r 以内に存在するボーリングデータのうち、最も近くに位置しているものの N 値を対象セルの値とした。

2.3 仮想地盤のモデル化の概要

仮想モデルを作成したのは、阪神地区地盤モデルの計算結果の妥当性検証と、単純化した地盤モデルの計算結果から本研究の手法の妥当性を確かめるためである。

仮想沖・洪積層地盤物性値モデルの作成は次のように行った。まず、日本各地の沖・洪積平野の物理探査結果を多数収集し、それらの中から P 波速度、S 波速度、密度が得られた 38 地域のサンプルを抽出し、深度 10m 每の平均 S 波速度を求めた。その結果を使用して抽出した沖・洪積平野の S 波速度分布を 1,000m の深度で正規化するとばらつきが少なくなることがわかった。したがって、S 波速度分布は絶対深度で決まっているわけではなく、相対深度で規定されているといえる。そこで、S 波速度の深度分布についてその全データを深度で正規化する処理を行った。それらの結果をもとに正規化された深度ごとの平均的な S 波速度分布を決定し、深度幅 100m で S 波速度の移動平均を求めた。移動平均の値から同

区間の標準偏差(移動標準偏差)を算出した。偏差値のピークとなる深度で S 波速度の変化が現れるると、S 波速度構造は基盤を含め 5 層に分けることができた(図-2)。以上のようにして仮想モデルを作成した(図-3)。この層序を基に物性値(S 波・P 波速度、密度)の平均値を算出した。地表面変位量の解析に必要なその他の物性値(ポアソン比 σ 、ヤング率 E 、剛性率 G 、 N 値)は、先の物性値を元に次の理論式・経験式を用いて求めた。

$$\sigma = \frac{0.5 \times (Vp/Vs)^2 - 1}{(Vp/Vs)^2 - 1}$$

$$E = \rho \frac{Vs^2(3Vp^2 - 4Vs^2)}{Vp^2 - Vs^2}$$

$$G = \rho Vs^2$$

$$Vs(\text{m/s}) = 89.8N^{0.341}$$

なお、阪神地区のモデルとの比較を行うために、仮想モデルの深さは 2,000m とした(図-3)。

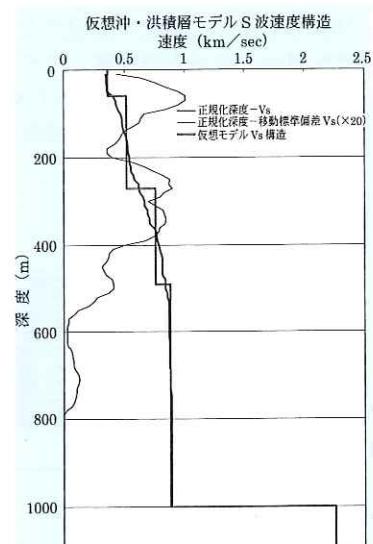


図-2 仮想沖・洪積層モデル S 波速度構造

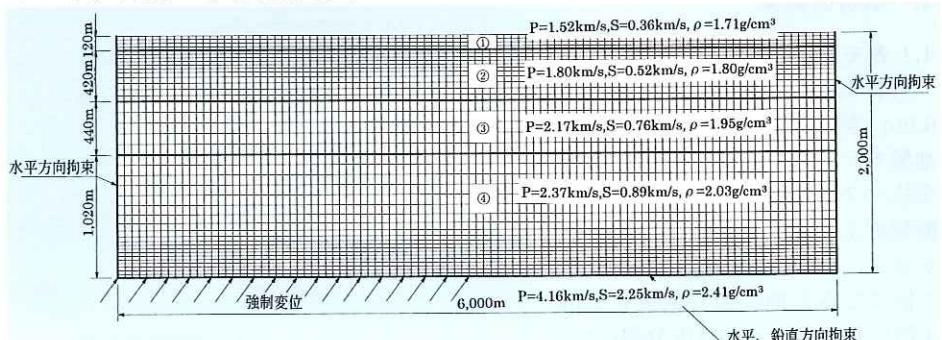


図-3 仮想沖・洪積層有限要素モデル

3. 解析の概要

今回の研究で目的とした地表面変位の計算には、弾性および弾塑性の二次元有限要素法を用いた。阪神地区地盤の解析に当たっては作成された三次元地質モデルの中から、既存の地質情報が多い特定の断面を選定した。選定した断面を図-4に示す。

有限要素法に当たってのモデルは、阪神地区地盤モデルでは約5,000節点、5,000要素、仮想地盤モデルでは約4,000節点、4,000要素とし、地表面に近い場所ほど節点を細かくし、最小で約10m間隔とした。弾性有限要素法で計算に使用する地盤物性値は、モデル化した地盤物性値のうちヤング率とポアソン比である。弾塑性有限要素法ではさらに内部摩擦角 ϕ と粘着力 C を使用した。これらの値は次の経験式より算出した。

$$C(\text{kN/m}^2) = 6N$$

$$\phi = 15 + (15N)^{0.5}$$

モデルの境界条件は、地盤の無限性を考慮するため、モデル側面は水平方向拘束、モデル底面は断層食い違い量を強制変位で入力するため、水平・鉛直方向を拘束し、モデル左部分に強制変位を入力し解析を行った。

解析計算は、阪神地区地盤モデルと仮想地盤モデルとの比較のため、伏在断層の深度を基盤上端部で地表面から2,000mの位置とし、与える断層の強制変位は6m、3m、1.5mの3ケース、伏在断層の傾斜角は50°、70°、90°の逆断層の3ケースを設定した。計算ケースは全部で36(2地盤モデル×3ケース×3ケース×2解析法)である。

4. 解析の結果

4.1 各モデルの解析結果

解析結果の例として、強制変位6.0m、傾斜角50°の場合の阪神地区地盤モデルの弾性有限要素法による変位ベクトルを図-5に示す。変位は断層直上でもっとも大きく、撓曲状を示す。また、強制変位の量が2倍、4倍になると地表面変位量も2倍、4倍になった。これは成分別についてもいえ、線形性を有している。ま

た、傾斜角度が70°の時が地表面変位量は最も大きくなつた。

また、両モデルの弾塑性有限要素法解析の結果も、変位の絶対値はそれぞれ異なっているが、上記弾性有限要素法による解析結果と同じ傾向を示した。

以上のように、地表面の変形は撓曲状になることがわかった。このことは阪神地区の伏在断層の上位にある沖・洪積層に撓曲が生じていること⁹⁾と調和的である。

4.2 各解析結果の比較

ここでは解析の結果地表面に現れた合成変位量の絶対値について、各解析結果の比較を行う。

阪神地区モデルについて弾性解析結果と弾塑性解析結果を比較すると、例えば、与えたパラメータが強制変位6.0m、傾斜角90°のときの地表面合成変位量はそれぞれ3.849m、4.114mと弾塑性解析のほうが若干大きくなり、ほかのどのケースをみても同じ傾向となる。

次に仮想モデルについて弾性解析結果と弾塑性解析結果を比較すると、例えば、与えたパラメータが強制変位6.0m、傾斜角90°のときの地表面合成変位量はそれぞれ4.077m、4.164mと阪神地

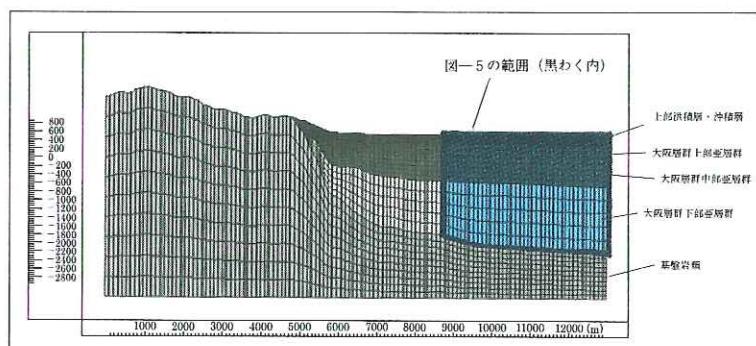


図-4 阪神地区地盤断面図

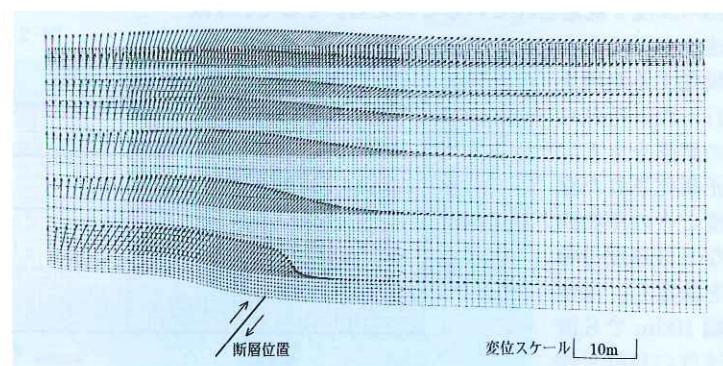


図-5 解析結果の例
(阪神地区地盤モデル、弾性有限要素法、強制変位6.0m、傾斜角50°)

区モデルと同様、弾塑性解析のほうが若干大きくなり、ほかのどのケースをみても同じ傾向となる。

以上の結果は、弾塑性解析は塑性に入った部分は剛性が非常に小さくなるため、そこで変位を吸収してしまい、地表面変位は弾性解析に比べて小さくなるだろうという当初の考え方と逆の結果になつた。

阪神地区モデルと仮想モデルの計算結果を比較すると、例えば、与えたパラメータが強制変位6.0m、傾斜角度90°では、先に書いた結果から、弾性解析、弾塑性解析とも仮想モデルのほうが若干大きくなる。この傾向はほかのどのケースにおいても同じである。これは、物性値そのものの違いと、計算に使用した物性区分(節点・要素数)が阪神地区モデルのほうが細かかったことと、モデル形状の影響が出ているものと考えられる。

5. 考察および今後の課題

伏在断層が活動した1948年の福井地震($M=7.1$: 松田の式¹⁰⁾による予想基盤変位量1.8m、基盤の深さ約200m)の例をみると、地表面の上下変位は60~70cmであり¹¹⁾、基盤変位量の3割程度である。この地震は横ずれ成分が卓越していることを差し引いても、今回、行った解析の方が基盤が深い位置にもかかわらず、基盤変位に対して大きな地表面変位が現れ、解析手法に問題があることが考えられる。また、弾性解析でも弾塑性解析でも地表面変位にはほとんど差がでなかつたことも今回の手法が妥当でなかつた可能性を示しているものとみられる。

有限要素法解析では境界条件やモデルの形状、物性区分の細かさのようなモデル作成の基本的な前提条件および解析を行う際の時間項により、解析結果が影響を受けると考えられる。今回、最も解析結果に影響を与えたのは、弾塑性解析で時間項を考慮しなかつたことであると考えられる。今回の解析では、断層部分の変形は強制変位により静的に変位をかけたが、実際の場合、変位を起こす時間が地表面の変位量に影響を及ぼすことが考えられる。つまり、断層の動きはせいぜい數十秒ほどの短時間であるが、今回は時間を考慮しなかつたので、地表面の変形としては褶曲現象のような時間スケールのものを再現している可能性がある。したがって、今後は時間項を考慮した動的有限要素法解析を実施する必要がある。また、この他にも地盤物性値の吟味、強制変位の掛け方の吟味、三次元解析の適用等を行うことが必要と考

えられる。

他方、今回は最高で5,000節点、5,000要素のモデルを作成したが、これ以上、節点数、要素数を増やすとしても、地層の分布自体を適切に表現することが難しいため、解析結果の改良効果は得られないと思われる。

境界条件についてはモデル範囲をもっと大きくとれば今回のように側面が水平方向のみ拘束ではなく、水平方向・垂直方向とも拘束された固定境界としても構わないであろう。

以上のような事を考慮し、今後は動弾塑性解析などを行い、比較検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 鳴本利彦、堤昭人、大友幸子、川本英子：神戸市・芦屋市・西宮市における地震被害と推定地震断層、「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録、日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会, pp.41-42, 1995.
- 2) 鳴本利彦：“震災の帶”的不思議、科学, 65卷, pp.195-198, 1995.
- 3) 源栄正人、永野正行：深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の增幅特性解析、日本建築学会構造系論文集, 第488号, pp.39-48, 1996.
- 4) 入倉孝次郎：“震災の帶”をもたらした強震動、科学, 66, pp.86-92, 1996a.
- 5) 入倉孝次郎：阪神・淡路大震災－防災研究への取り組み－阪神大震災を引き起こした強震動、京都大学防災研究所年報, 第39号A, pp.17-33, 1996b.
- 6) 入倉孝次郎：「兵庫県南部地震の強震動はすべてわかったのか？」、京都大学防災研究所研究集会資料集, 251p, 1997.
- 7) 大塚康範：地震断層のずれにともなう地盤・岩盤の変形解析(その1)、応用地質, 19, pp.9-18, 1978.
- 8) 小松原琢：庄内体積盆地東部における伏在断層の成長に伴う活褶曲の変形過程、地学雑誌, 107, pp.368-389, 1998.
- 9) 藤田和夫、佐野正人：阪神・淡路大震災と六甲変動、科学, 66, pp.793-805, 1996.
- 10) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について、地震, 2, 28, 269-283, 1975.
- 11) 太田陽子、廣内大助：福井地震による被害と地震断層、自然災害科学, Vol.17, No.1, pp.3-7, 1998.

梶川昌三*



建設省国土地理院地理調査部地理第三課課長補佐
(前 地質研究室主任研究員)
Shozo KAJIKAWA

脇坂安彦**



建設省土木研究所環境部
地質研究室長
Yasuhiko WAKIZAKA