

# 地震応答解析に基づく地表ひずみ分布と埋設管被害分布との関連について

沖村孝<sup>1</sup>・荒木繁幸<sup>2</sup>・木村裕之<sup>3</sup>・ラザビ ソヘール<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 理博 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町)

<sup>2</sup>工修 (株) ダイヤコンサルタント 関西・中部支社 (〒564-0045 吹田市金田町 28-21)

<sup>3</sup>正会員 工修 (株) ダイヤコンサルタント ジオテクニカル事業部 (〒330-8660 さいたま市吉野原町 2-272-3)

<sup>4</sup>Member of ASCE 工博 (株) ダイヤコンサルタント ジオテクニカル事業部 (〒330-8660 さいたま市吉野原町 2-272-3)

神戸市を横断する断面を対象に、2種類の地震応答解析を組み合わせることで地表ひずみ分布を求め、下水道埋設管被害分布との関連を探った。本研究で用いた地震応答解析は、震源モデルと深層地盤モデルから理論的に地震波を生成する断層地震解析と、浅層地盤モデルを水と土との2相を連成で解く有効応力解析の2つを組み合わせた。地震応答を残留変位量について求め、解析結果として地表面の体積ひずみに着目して、兵庫県南部地震における下水道埋設管の被害分布と照らし合わせた。その結果、地盤変形が大きい沿岸部に下水道埋設管の被害が集中しており、解析結果における体積ひずみの大きい値を示す範囲とやや相関が見られた。ひずみ分布によって埋設管の被害予想や分析をする1視点として考えられる。

**Key words:** Hyogo-ken nanbu earthquake, fault rupture model, ground motion, effective stress analysis, earthquake damage, sewerage pipelines

## 1. はじめに

神戸の地盤研究会では、兵庫県南部地震の地震動と被害との関係について地図-情報システム JIBANKUN を中心に実態を解明し、将来の地震防災に役立たせようと官学民3者共同で研究が進められている。本研究もその一部として、非線形解析により神戸市横断面を解析し地表ひずみ分布と、埋設管の被害分布との関係について考察した結果である。なお、本研究では地震応答解析を2段階に分け、震源モデルから理論的に地震波を生成する断層地震解析と、浅層モデルについて有効応力解析によって構成され、地表面のひずみ分布と埋設管被害分布との比較を行った。

## 2. 断層地震解析

震源モデルと深層地盤モデルをもとに薄層要素法による断層地震解析を実施した。将来的に発生が予想される地震に対して防災計画を立案とするため、活断層情報から地震波を推定する方法を採った。類似の解析結果は神戸大学地点において得られた記録がすでに発表されている<sup>1)</sup>。

今回の解析は地盤の3次元的広がりの中、震源を設定し断層地震解析を行い、神戸市街地を横断する3つの断面位置で理論地震波を出力した(図-1)。震源モデルは既往文献<sup>1)</sup>と同じモデルを使用している(図-2)。断層地震解析の特徴は、深層地盤を薄層要素で深さ方向に離散化し、波の伝播方向の展開

を波数級数法により、震源モデルを Kostrov による応力降下モデルを導入している。神戸市を縦貫する断層に沿って断層地震解析を行い、対象断面位置で得られた理論地震波を図-4, 6, 8 に示す。

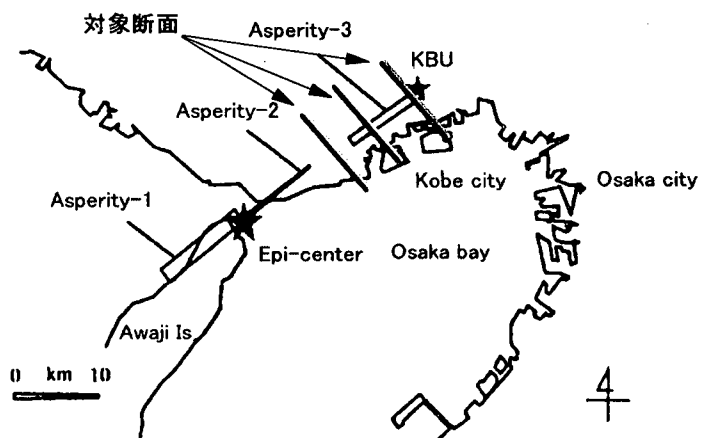


図-1 解析対象の平面

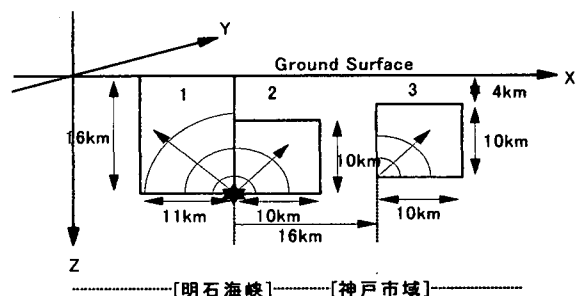


図-2 震源モデル

これら出力結果を、変位波形として浅層モデルの基盤に入力した。

### 3. 浅層地盤における有効応力解析

埋設管の被害は、地盤の変形やひずみと密接な関係があることが考えられたため、液状化や間隙水圧の影響を考慮して残留変形が解析できる、有効応力解析を実施した。本解析では Dynaflo と呼ばれる解析コードを用いている。

浅層地盤は、沖積世の軟弱な砂と粘土の互層として構成されており、山側から海側にかけて厚い層厚となっている。解析モデルとしては、断層に直交して、神戸市中心を横断する断面をとっている。地盤物性値は、JIBANKUN および神戸の地盤研究会で提供された地盤データから選択して採用している。ただし、有効応力解析では透水やダイレタンシーに関連するパラメータも必要とするため、既往研究成果を参考にして地盤物性値を決めた。

有効応力解析のモデルを作成するにあたり、特に以下のような工夫をした。

- ① 変位波形による入力をした
- ② 砂質土の粘着力を少し持たせた
- ③ 減衰比( $\eta=0.1$ )を新たに全節点に設定した
- ④ 海側の側方境界を延長した

断層地震解析によって変位波形を求め、浅層地盤を対象にして、基盤を Ma12 (洪積粘性土層) の底面として有効応力解析を実施した。一般に地震応答解析では加速度波形を入力するが、今回のような深層地盤モデルと浅層地盤モデルを組み合わせる場合、境界面で変位が一致していれば、深層地盤モデルと浅層地盤モデルとの境界で連続性が保たれるため、本解析では変位波形を入力した。

拘束圧のかからない地表面の砂質土は、まったく粘着力がない状態では、解析上、地震力によって容易に不安定な応力状態になり、実際の地盤と異なる挙動を示す。そこで砂質土については若干のみかけの粘着力を考慮した。なお、同じ砂質土であっても地下水に飽和している部分もあるため、表層の砂質土層は、地下水位を境に2分してモデル化した。

有効応力解析は非線形解析として材料非線形による履歴減衰を考慮している。加えて、地盤のもつ固有の粘性減衰と地盤の3次元空間の広がりの中で、波が伝播しながら消失する逸散減衰を想定することとした。数値解析上はモデルが2次元断面で設定されているため、減衰比を0.1に設定して全節点に導入し上記の減衰を表現した。その結果、数値解析上の安定性が向上し、実際に記録された地表面波形と同様な、減衰を伴う波形形状となった。

浅層地盤の解析モデルと入力変位波形を図-3~8に示す。断面は水平方向を1とし、鉛直方向を20倍にして拡大している。解析モデルで洪積砂質土層および Ma12 (洪積粘性土層)、Ma13 (沖積粘性土層)、および地表面は水を考慮せず、沖積砂質土層に

ついて水との連成を考慮した。黒線でその境界を示す。入力変位波形は時刻を0.1秒として断層地震解析により求めた。



図-3 西部断面の解析モデル

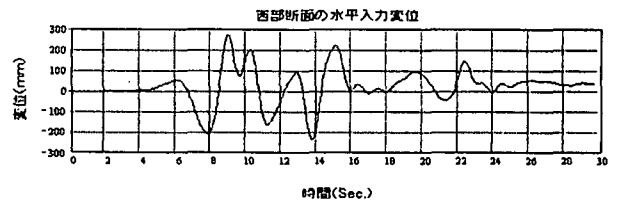


図-4 西部断面の入力変位波形

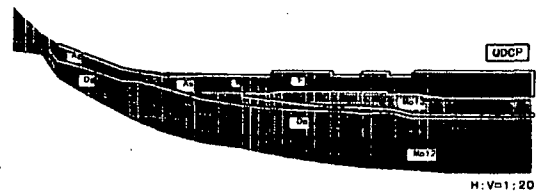


図-5 中部断面の解析モデル

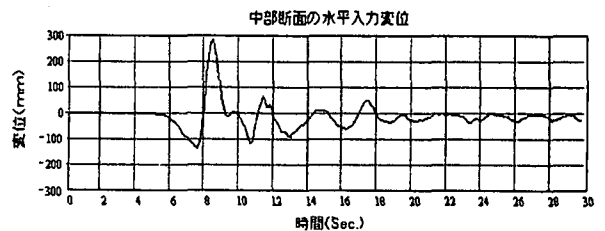


図-6 中部断面の入力変位波形

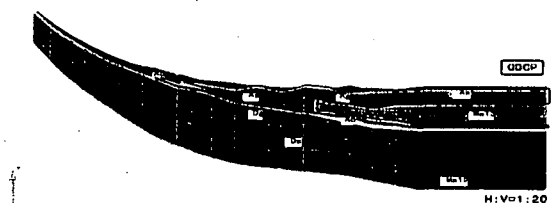


図-7 東部断面の解析モデル

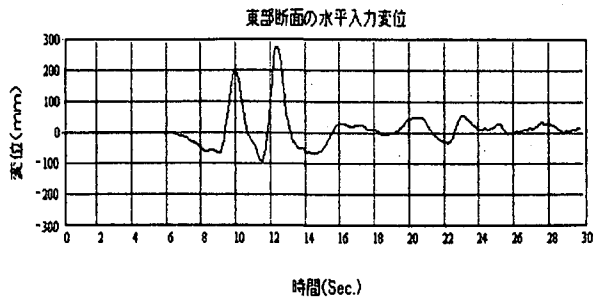


図-8 東部断面の入力変位波形

西部断面における体積ひずみ分布を図-9 に示す。W34 付近で体積圧縮を意味する青色コンターが分布している。図-10 に西部断面の下水道埋設管被害分布を示す。

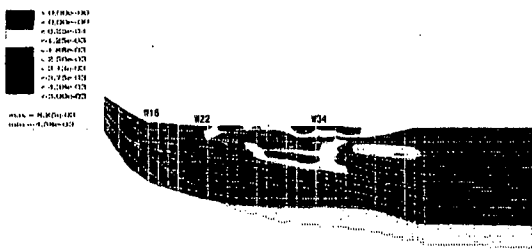


図-9 西部断面の体積ひずみ分布 (t=28.0Sec.)

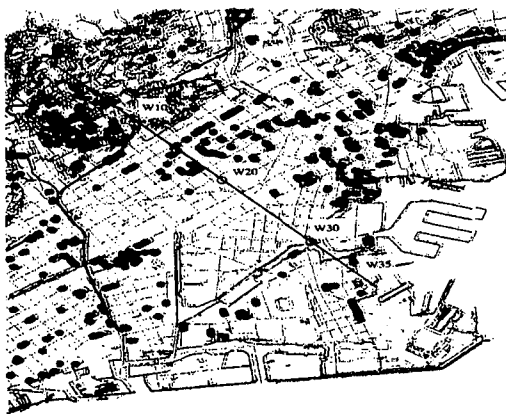


図-10 西部断面の下水道埋設管被害分布

図-11 には、変位時刻歴波形を示す。海側の W34 で大きな変形が右向き(プラス側)に発生している。これは、海に向かって永久変形が生じていることを意味する。これは、地盤の剛性が低いことを意味し、大きな変位振幅をとめない残留変位が大きくなり、間隙水圧の影響が考えられる。



図-11 西部断面の変位時刻歴

中部断面体積ひずみ分布を図-12 に示す。沿岸部 C22 周辺付近において体積伸張を意味する赤色コンターが分布している。

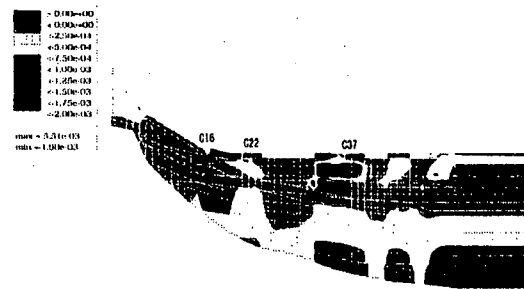


図-12 中部断面の体積ひずみ分布 (t=28.0Sec.)

図-13 に中部断面の下水道埋設管被害分布を示しており、沿岸部に被害が集中している。

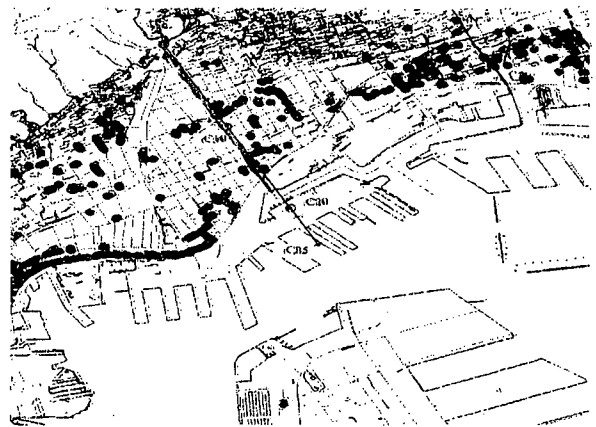


図-13 中部断面の下水道埋設管被害分布

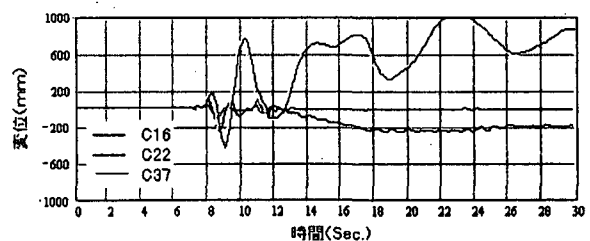


図-14 中部断面の変位時刻歴

図-14 には変位時刻歴波形を示す。山側と平野部との境界付近の C16 における変位時刻歴波形は、いくつかの大きな振幅を持つ波形の後は、振幅は小さく残留変位もなく大きな動きがなく推移する。一方、平野部の出力点 C22 では、振幅が大きくなり残留変位が山側(マイナス側)に向けて発生している。海側の出力点 C37 において振幅がさらに大きくなり地盤の剛性が低いことを意味する。大きな変位振幅をとめない残留変位が海側にかけて大きくなり、間隙水圧の影響が考えられる。

東部断面における体積ひずみ分布を、図-15 に示す。沿岸部で体積伸張を意味する赤色コンターが分布している。

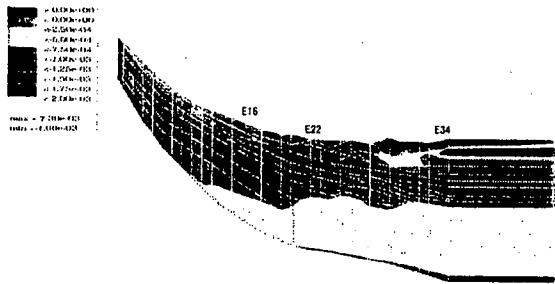


図-15 東部断面の体積ひずみ分布 (t=28.0Sec.)

図-16 に東部断面の下水道埋設管被害分布を示す。E10 から E20 にかけて被害が集中している。

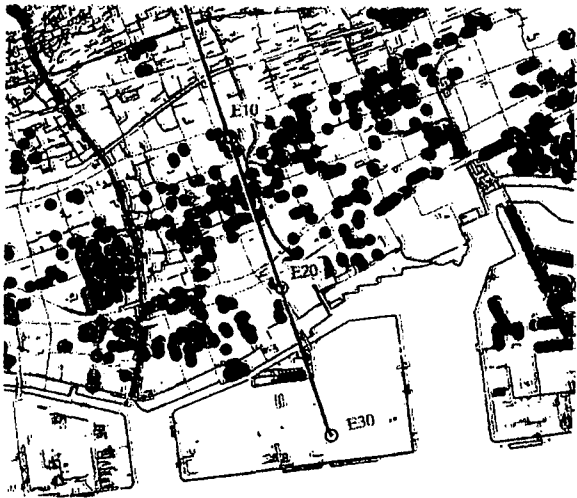


図-16 東部断面の下水道埋設管被害分布

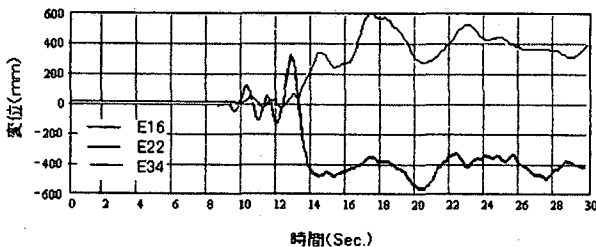


図-17 東部断面の変位時刻歴

図-17 で変位時刻歴からプラス側は海側方向を意味しているため、海側地点 E34 の変形は、海側へ移動するように変形している。一方で、境界部 E22 と市街地 E16 では、山側に寄っている。いわば山側と海側とが逆に変形した形となった。そのため E22 と E34 との間が広がったことを意味している。

一般的に埋設管の動的挙動は慣性力よりも地中変位によって左右される。埋設管の内、上水道管は管体の剛性が高く地盤との間にすべりが発生すると考えられ、継ぎ手構造の下水道管のほうが地盤変形を継ぎ手部で吸収するため地盤の影響を受けやすいと考えられる。被害分布との比較は、下水道埋設管被害分布と地盤の体積ひずみ分布と比較した。必ずしも体積ひずみの値が大きい位置と下水道埋設管の被

害が集中している位置とは一致していないものの、沿岸部の液状化の発生が考えられるような場所では、総じて体積ひずみが大きく、下水道埋設管の被害が分布している。

#### 4. おわりに

震源モデルと深層地盤データをもとに理論地震波を生成し、浅層地盤の有効応力法に基づく地震応答解析を実施した。解析結果から、神戸市を横断する断面において山側と海側の加速度や変位に関する応答に対比が見られ、海側は加速度応答に減衰効果が見られ、残留変形が大きくなる結果を得た。

地盤の変形やひずみと、埋設管被害との関係について関連が予想されたため、下水道埋設管分布と体積ひずみ分布と比較した。その結果、地盤変形が大きい沿岸部に下水道埋設管の被害が集中しており、解析結果の体積ひずみ(伸張)が大きい値を示す範囲とやや相関が見られた。今後、ひずみ分布によって埋設管の被害予想や分析をする1視点として考えられる。

謝辞：本研究は、神戸の地盤研究会地震動分科会で検討された内容を抜粋しまとめたものである。地盤データは(株)応用地質から、また下水道埋設管被害分布図は(株)建設企画コンサルタントから提供があり、研究会では多くの有益の議論や指摘があった。ここに感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 竹宮宏和・合田和哉：薄層要素に基づく離散ディスロケーション法による断層近傍地震動のシミュレーション、土木学会論文集、No.639/IV-46、pp.89-98、2000。