

兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動

佐藤工業（株） 吉田望、末富岩雄、中村晋、規矩大義

兵庫県南部地震の際の地盤の非線形挙動を様々な観点から検討した。地震記録の解析からは、地盤が軟弱になるほど最大加速度が小さくなり、特に液状化の発生した地点ではその程度が著しいことがわかった。液状化解析からは、沖積粘性土層と液状化層の挙動が地表の応答に大きな影響を与えていることがわかった。鉛直アレー記録の逆解析からは、1%を越える大きなひずみが発生していたことが指摘された。また、三宮を通る断面について行った浅層地盤をモデル化した解析では、沖積粘性土の有無が地表の応答に大きく影響していることが指摘された。しかし、この解析では震度7の地域について特に他と異なる特徴的な地震動は得られなかった。全体として、沖積粘性土と埋立部分で非線形挙動が卓越し、地表の地震動に大きな影響を与えたと結論できる。

1 はじめに

兵庫県南部地震の際には、港湾の埋立地域では大規模な液状化が発生し、また、その陸側では気象庁震度7という大きな地震動があった。これらは地盤に大きな非線形挙動が生じた事を示唆しているように考えられる。本論では、いくつかの観点から、この地震の際の地盤の非線形挙動の程度を考察する。

2 観測記録からみた非線形挙動

地盤の非線形挙動は軟弱地盤でより起こりやすい。この場合、硬質な地盤に比べ、一般的に次の二つの現象が同時に現れる。すなわち、①軟弱地盤では地震動は増幅しやすいので、硬質地盤に比べ地震動が増幅する。②地盤の応力がせん断強度近になると、それ以上のせん断応力の伝達が阻止されるので、加速度の頭打ち現象が現れる。前者の例では、たとえば1989年ロマ・ブリエタ地震で、サンフランシスコでは岩盤サイトに対し埋め立て地等の軟弱地盤では3倍に近い増幅があったとされている。後者は数値計算的には確かめられているが、実現象から完全に確認されているとは言い難い。これは、前者が比較的地震動が小さいとき起こる現象であるのに対し、後者は地震動が大ききとき起こる現象であることから観測事例が少ないこと、増幅の程度を論じるためには地表記録のみでは不十分で、同時

に地下または近傍岩盤サイトの記録などが必要であるが、このような条件を備えた記録はほとんどないことに起因している。

図-1は地震記録の得られている地点の地表と基盤の最大加速度と最大速度（水平2成分の合成波）の比を道路橋示方書に示される地盤種別に応じて表したものである。ただし、地中の記録のない場所については、ポートアイランドのGL-83.4m、神戸大学、および関西電力により観測された三つの観測点（総合技術研究所、高砂発電所、海南港変電所）のGL-100mの記録を、これらの観測点から10km以内の地点の基盤と見なしている。なお、ポートアイランド記録は工学的に余り重要でない10Hz以上の高周波成分を除いている。

図-1で、Ⅲ種地盤の観測点は、竹谷小学校など少数の例外を除き埋め立て地であり、液状化が発生したと考えられるのに対し、Ⅱ種地盤は軟弱な表層があることもあるが顕著な液状化は見られないのが特徴である。これまで、地盤の特性は、岩盤、硬質地盤、軟弱地盤などに分けて分類されることが多かったが、図-1ではたまたま液状化が発生した場所と、そうでない場所にほぼ分けられている。両地盤の違いは、液状化発生の要因となる過剰間隙水圧の発生があるとせん断強度が減少するのに対し、そうでない場合にはせん断強度は一定と考えられる点である。

全体的にみて、基盤の加速度や速度が大きくなるにつれ増幅が小さくなっていく傾向が伺える。さら

キーワード：地震動、非線形、液状化

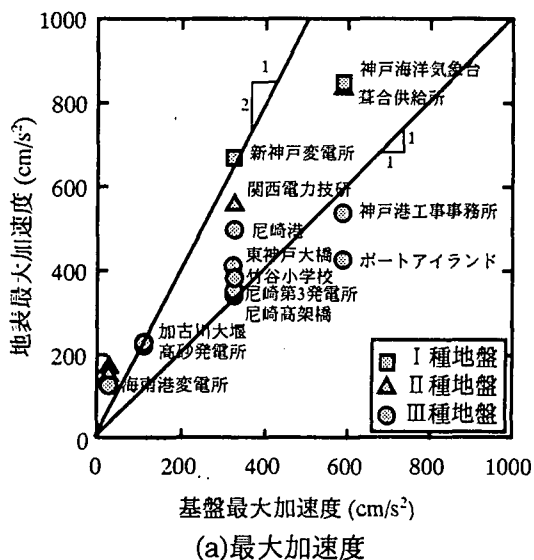
佐藤工業（株）中央技術研究所 03-3661-2298

に地盤種別でみると、液状化が発生したと考えられる地点ではその傾向がもっとも著しく、次に軟弱な地盤となっている。また、最大加速度は低下が著しいのに対し、最大速度の低下はそれほどには大きくはない。

ここで示したような傾向は、地盤に非線形挙動が起こったことを明瞭に示唆するものと考えられる。そこで、以下ではどの程度の非線形性が発生したかを詳細に検討する。

なお、基盤加速度 200cm/s^2 以下のⅢ種地盤の3つの観測点では、観測点そのものについての液状化の発生は確認していないが、近傍では液状化サイトもあり、多分液状化が発生したと考えられるが、他の液状化したサイトに比べ増幅比がかなり大きいのは興味深い。これは、次章で述べる解析でも明らかになるが、最大加速度の発生は液状化に至る前であることに起因している。すなわち、この地震では主要動が最初に現れるような震動であったので地震動が相対的に小さい遠方のサイトでは過剰間隙水圧の低下に伴う強度の低下が顕著になる前に最大応答値を示したのに対し、ポートアイランドのような近傍のサイトでは大きな主要動の間に過剰間隙水圧も発生し強度低下も起こったと考えれば説明できる。なお、遠方のサイトでは地震動の繰返し数も多いので、地震動の振幅が小さくても液状化する可能性はある。逆に、主要動がくる前にある程度の大きさの波動が入力されていれば、それにより主要動の時点では強度も低下しているであろうから、最大加速度や最大速度で見た増幅特性は、この地震のもの(図-1)とは異なる可能性もある。

かになるが、最大加速度の発生は液状化に至る前であることに起因している。すなわち、この地震では主要動が最初に現れるような震動であったので地震動が相対的に小さい遠方のサイトでは過剰間隙水圧の低下に伴う強度の低下が顕著になる前に最大応答値を示したのに対し、ポートアイランドのような近傍のサイトでは大きな主要動の間に過剰間隙水圧も発生し強度低下も起こったと考えれば説明できる。なお、遠方のサイトでは地震動の繰返し数も多いので、地震動の振幅が小さくても液状化する可能性はある。逆に、主要動がくる前にある程度の大きさの波動が入力されていれば、それにより主要動の時点では強度も低下しているであろうから、最大加速度や最大速度で見た増幅特性は、この地震のもの(図-1)とは異なる可能性もある。



3 液状化に伴う非線形挙動

鉛直アレー記録の得られているポートアイランドで液状化解析を行った¹⁾。解析に用いるのはYUSAYUSA-2²⁾である。また、比較のため全応力等価線形解析も行う。

非線形解析では、材料の非線形性のモデル化が重要であることは論を待たないが、一方では、現時点では精度の高い非線形解析を行うに必要な精度で材料特性が把握されていないという問題がある。ここでは、以下の方針に基づき非線形材料特性をモ

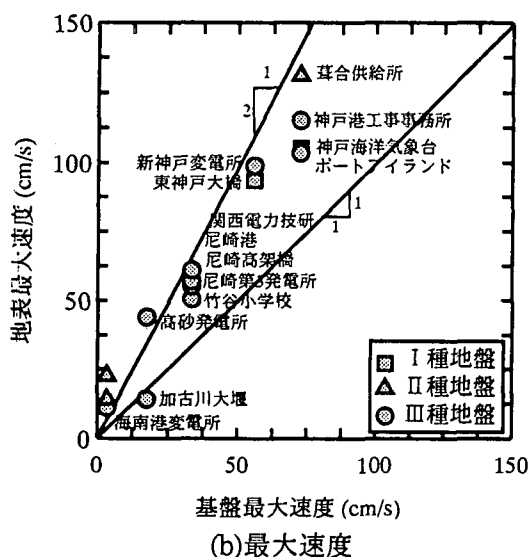


図-1 基盤と地表の最大応答値の関係

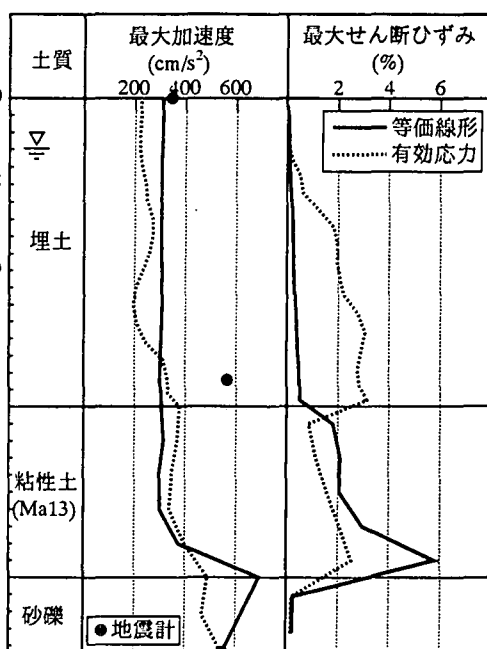


図-2 ポートアイランド液状化解析の最大応答値

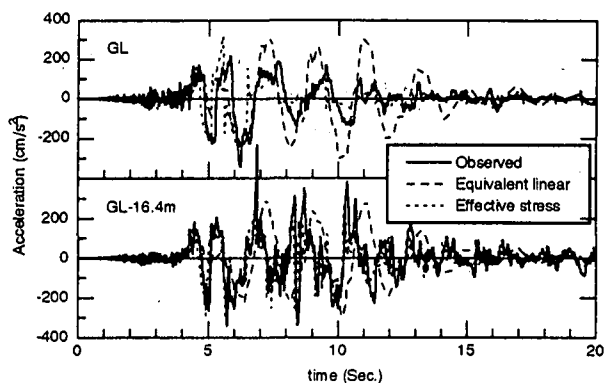


図-3 加速度時刻歴の比較

デル化した。

地震観測サイトの標準貫入試験の結果によれば、同じ層では深いほど N 値が大きくなっており、拘束圧依存性が現れていると考えられる。そこで、弾性定数、非線形特性のそれぞれに拘束圧依存性を考慮しモデル化する。すなわち、弾性定数は拘束圧の平方根に比例するとし、各層の中央における弾性定数の値がPS検層結果と等しいとして細分化された各層の弾性定数を求める。応力-ひずみ関係は、有効応力解析では双曲線モデルで表現するが、そのパラメータ（せん断強度）の決定方法は、後述のように層（材料）ごとに異なり、その過程で拘束圧依存性は自然に考慮される。等価線形解析では Hardin と Drnevich のモデルを使うので、 $G-\gamma$ 関係は液状化解析と同じになるが、減衰特性は異なる。

地震観測地点では厚さ 18m のマサ土による埋土がある。この層の動的変形特性は、ポートアイランドの北側で地震前に採取していた不攪乱試料および地震後に採取した攪乱試料による動的変形試験結果をターゲットにし決定する。結果として、モールクーロンの破壊条件を用い、内部摩擦角 ϕ を N 値の関数として大崎の式

$$\phi = \sqrt{20N} + 15 \quad (1)$$

で表せば、動的変形特性はほぼ満たされることがわかった。平均 N 値 5.5 を代入すれば、 $\phi=25.5^\circ$ となる。一方、最大減衰比は 23% に設定した。

この層では液状化の発生が想定される。液状化強度として地震前にポートアイランドで採取した不攪乱試料、および地震後に採取された攪乱資料を用いて実施された液状化試験結果を用いることにし、これを参考にして過剰間隙水圧の発生を制御するパラメータを決定する。

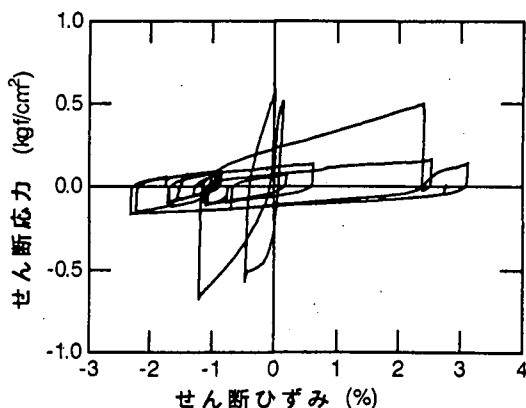


図-4 18層 (GL-17.2~18) の応力-ひずみ関係。液状化とサイクリックモビリティの発生が明瞭である。

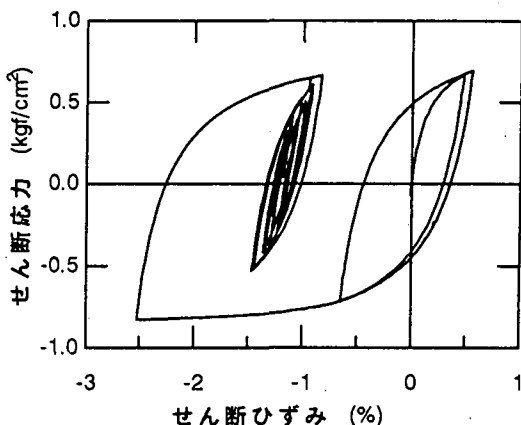


図-5 23層の応力-ひずみ関係。せん断応力波ほとんどせん断強度に達しており大きな非線形挙動が起こっていることがわかる。

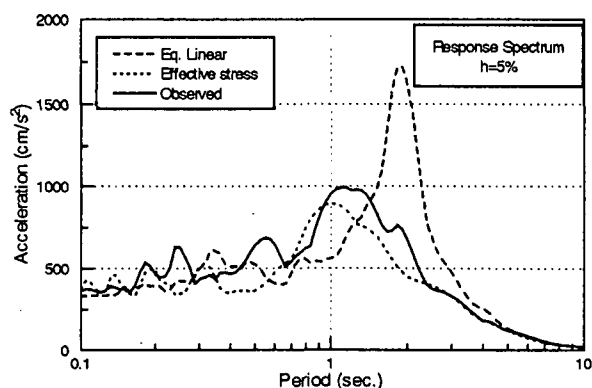


図-6 加速度応答スペクトルの比較

沖積粘性土層（いわゆる Ma13）に関しては、神戸から大阪地域に掛けての平均的な弾性定数 G_{max} と一軸圧縮強度 q_u の半分として定義した粘着力 c との関係を次式にモデル化する。

$$c = \frac{q_u}{2} = 0.721 \log G_{\max} - 1.12 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

また、最大減衰比は21%である。

沖積粘性土層以深については、動的変形特性を設定するに足る試料を入手できなかったため、ここではGL-32.4mより上の部分のみを解析することにする。地震計は洪積砂質土層に設置されていることから、この解析範囲でも洪積砂質土層の材料特性は必要であるが、地震計設置位置と沖積粘性土層下端との距離がそれほど大きくないことから、解析結果に与える影響は小さいと考え、埋土同様、大崎の式を用い内部摩擦角を決め($\phi=32.3^\circ$)、最大減衰比は22%とした。

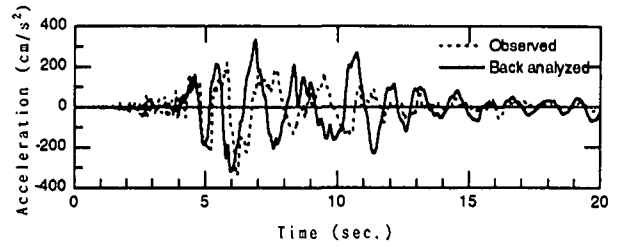
図-2に最大応答値、図-3に地表およびGL-16.4mの加速度波形を、図4、5にひずみの大きい第18層(GL-17.2~18m)および23層(GL-26~28m)のの応力-ひずみ関係を、図-6に地表の波形から計算した応答スペクトルを示す。

等価線形解析では沖積粘性土層でひずみが大きくなり、加速度が低下し、加速度の頭打ち現象が明瞭に現れた応答が得られた。有効応力解析でも沖積粘性土層の非線形挙動は著しい。図-5の応力-ひずみ関係からは、沖積粘性土でせん断強度に達するような大きな非線形性を示す挙動が明瞭にみられる。

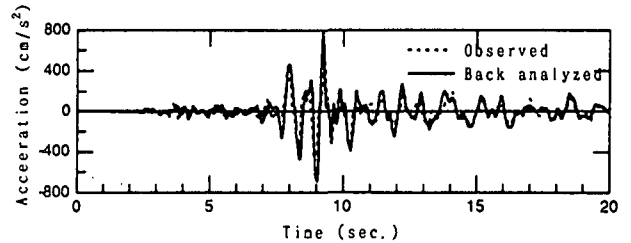
有効応力解析と等価線形法の挙動の違いは液状化の可能性のある埋土層でも顕著である。有効応力解析では、過剰間隙水圧の発生に伴うせん断強度の低下があるため、せん断変形が大きく、最大加速度は小さくなっている。これに比べると、等価線形解析では、埋土部分の最大加速度はほぼ一定値である。これは、等価線形解析では最大応答値をもとにして決めた定数を解析の最初から使うので、大きなせん断ひずみの生じている沖積粘性土層の剛性は最初から非常に低く、このため上部の埋土層は剛体的に動いたためと考えられる。

応答スペクトルを比較すると、有効応力解析では卓越周期に若干の差があるものの最大応答値および全体の形状は良く一致しているのに対し、等価線形解析では卓越周期に加え最大応答値も大きな差があることが分かる。

これらの結果より、有効応力解析では実現象をある程度把握できていると考えられる。また、応答結



(a) ポートアイランド



(b) 関西電力技術研究所

図-6 逆解析結果と観測値の比較

表-1 ポートアイランド逆解析結果

層厚 (m)	γ'_i (tf/m ²)	G_o (tf/m ²)	G (tf/m ²)	G/G_o	h (%)
2.0	1.7	5013	2099	0.582	7.1
3.0	2.0	9000	3423	0.380	8.3
7.6	2.0	9000	4592	0.510	23.2
6.4	2.0	9000	2049	0.228	46.7
8.0	1.7	5620	1215	0.216	27.8
5.0	2.0	12250	7856	0.641	8.2

表-2 関電技研逆解析結果

層厚 (m)	γ'_i (tf/m ²)	G_o (tf/m ²)	G (tf/m ²)	G/G_o	h (%)
3.1	1.4	1372	596	0.434	8.3
4.4	1.7	2375	352	0.148	16.2
3.5	1.7	3851	1913	0.487	8.3
6.5	2.0	23870	12755	0.534	8.3
2.8	2.0	4840	2469	0.510	12.5
5.1	2.0	32653	29469	0.902	3.3

果に対しては、埋土の液状化挙動も影響しているが、沖積粘性土の挙動もそれに劣らず地表の応答に影響していることが分かる。

4 逆解析による非線形挙動の同定

前述のように、非線形挙動の把握のためには、材料非線形性の把握が重要であるが、一方ではそのた

めには多くのコストがかかることから、通常、構造物の設計時にはボーリング調査や標準貫入試験は行われても、動的変形特性試験まで行われることはまれであり、鉛直アレー観測が行われている地点でさえもほとんど行われていない。前章で示したポートアイランドでも、既往の文献や調査資料のみでは不十分で、筆者らがいくつかの実験を追加して行っている。その他のサイトでは、既往文献などからだけでは動的変形特性はほとんど分かっていない。そこで非線形性の程度を把握するために、鉛直アレー観測記録について、逆解析により同定を行うこととした³⁾。対象としたのはポートアイランドと関西電力総合技術研究所の主要動部分である。

図-6に地表の加速度時刻歴を比較して示す。ポートアイランドでは大まかな傾向はとらえられているが、位相などにはかなりの差が見られる。これに対し、関電技研では最大値は逆解析結果の方がやや大きいものの、全体として非常によく一致した波形が得られている。主要動付近の振幅の違いは、実応答では急激に変化していると考えられるのに対し、逆解析では主要動付近に5秒間の記録をターゲットとして同定しているためと考えられる。両者の一致度の違いは、ポートアイランドでは液状化の発生があったのに対し、関電技研では液状化が起らなかったことと関係していると考えられるが、詳細な検

討はできていない。

剛性の低下はポートアイランドでは20%、関電技研では15%にまで及んでおり、減衰定数の値も10%を超えるものがあるなど、大きな非線形性を示している。前章で用いた動的変形特性と比較すれば、1%を超えるような大きなひずみが発生していることは確実である。なお、ポートアイランドで46.7%と非常に大きな減衰となっているのは液状化の影響で、常識的な地盤からは考えられない値である。これから、大規模な液状化が生じたような記録から本検討で用いた等価線形の考えに基づいて地盤の定数を同定することには限界があると考えられる。

5 非線形性を考慮した地震動特性

これまで示した3、4章の解析により、地盤に大きな非線形性が現れていることが明らかとなった。しかし、これまで検討したのは特定のサイトであったので、次に、非線形挙動の地域的な広がりを検討する。とはいっても、これまで再三述べてきているように、詳細な非線形解析を行うに足る動的変形特性は得られていない。したがって、詳細な地震動の評価は無理で、概略的な評価にならざるをえない。

神戸市およびその東側の被害地域では、地形は海岸と直交する方向に変化が急で、海岸と平行する方

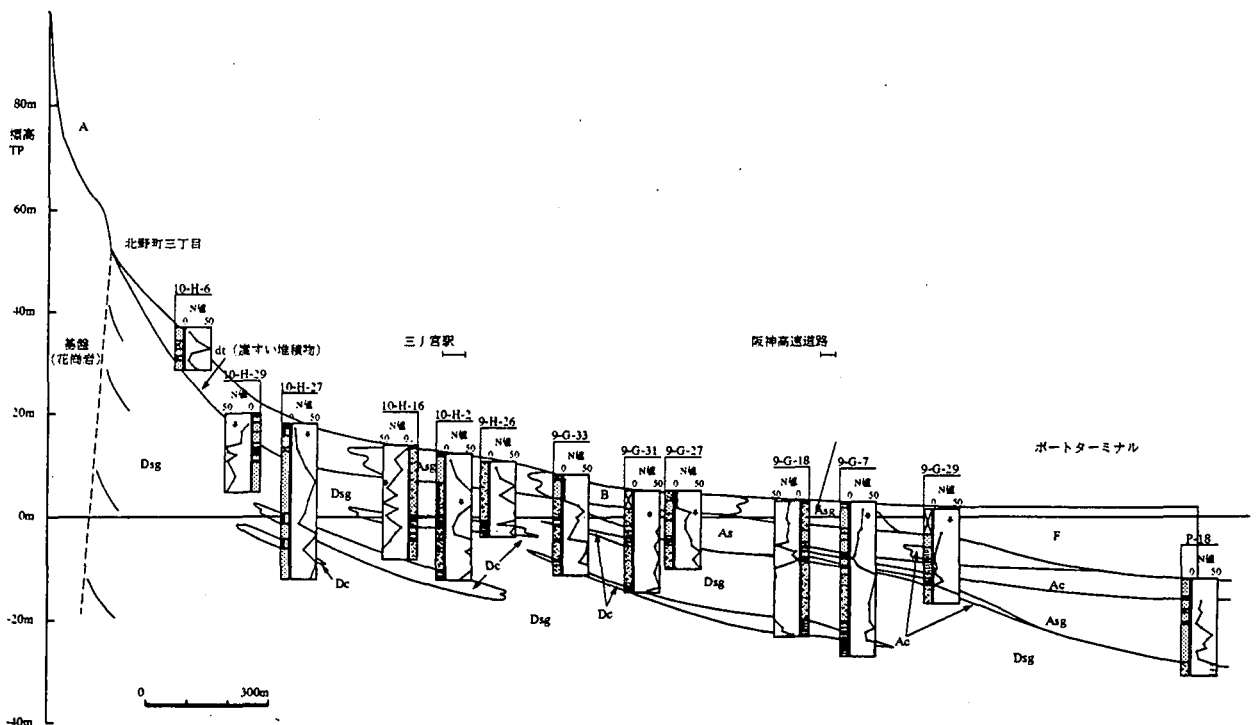


図-7 三宮駅を通る断面の表層地盤

向には比較的均質である。そこで、ここでは三宮駅付近を通る断面について検討することにする。図-7に表層部分の地盤構造を示す。3章で示したように、洪積層以深の動的変形特性はほとんど把握されていない。また、基盤位置も現在のところ共通の認識が得られるところまで把握できていない状態にある。さらに、深層部で大きな非線形挙動が生じるとは考えにくい面もある。したがって、ここでは表層地盤のみについて解析を行う。

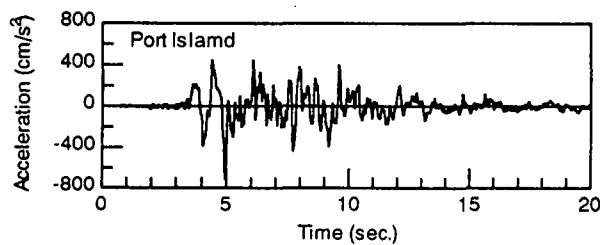
解析は、個々の地点で次元にモデル化し行う。これには二つの理由がある。図-7では地層はかなり傾斜しているように見えるが、これは縦横の縮尺が異なっているため、表層地盤についてみれば、傾斜は平均的には1%程度である。また、前章で行った解析では、軟弱地盤の減衰定数は10%のオーダーになっている。このような場合には表層地盤を側方に伝播する波動成分は小さいと考えられる。一方、二次元解析を行おうとすると、水平方向にも鉛直方向と同程度のメッシュサイズとする必要があるが、それには計算量が大きくなりすぎて実用的でないというのが二つ目の理由である。筆者らのこれまでの経験では、広い範囲を二次元解析するために横に長い要素を用いて行った場合には、応答結果に不整形の影響はうまく考慮できない。

解析は、等価線形手法を用いて行う。沿岸部の液状化発生地域では3章でみたように等価線形法の精度は余り良いとはいえないが、それでも波形で

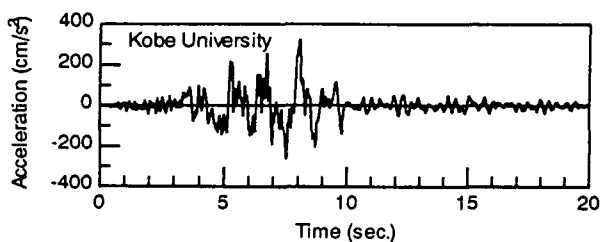
ればある程度説明していること、応答の連続的な変化をみたいので、途中で解析の種類を変えたくないことなどが、等価線形手法を用いる理由である。また、動的変形試験は通常非排水条件下で行われ、したがって過剰間隙水圧も発生し、その結果が G_γ 、 h_γ 関係に影響しているの、得られた動的変形特性の中には過剰間隙水圧発生の影響が含まれており、等価線形手法でも完全に液状化の発生を無視しているわけではないことも理由の一つである。

地盤のモデル化は、道路橋示方書に基づきN値からせん断波速度を算定し、動的変形特性には安田・山口の提案式³⁾を用いた。また、解析上の基盤は上半・中村⁶⁾が常時微動観測により想定した地盤の卓越周波数と概ね対応するように、せん断波速度500m/sを設定した。

入力地震動の設定も大きな議論の一つであるが、ここでは近くの観測点という事で、ポートアイランドの記録を用いる。表層非線形の影響を検討するので、複合波入力より入射波入力の方が好ましい。そこで、ここではポートアイランドの記録を基に、等価線形解析を行い、GL-83.4m位置の入射波を算定し、これを解析の入射波とした。また、比較のため、岩盤サイトである神戸大学の記録を用いた計算も行うことにした。両者の波形を図-8に、フーリエスペクトルを図-9に比較して示す。両者は0.7Hz付近および7Hzより大きい部分を除けばほぼ平行で、ポートアイランドの方が2倍程度大きな値となっている。神戸大学の波が0.7Hz付近で大きくなっているのは、震源特性や深層の地盤構造の影響と考え



(a) ポートアイランド入射波



神戸大学観測波

図-8 計算に用いた基盤入射地震波

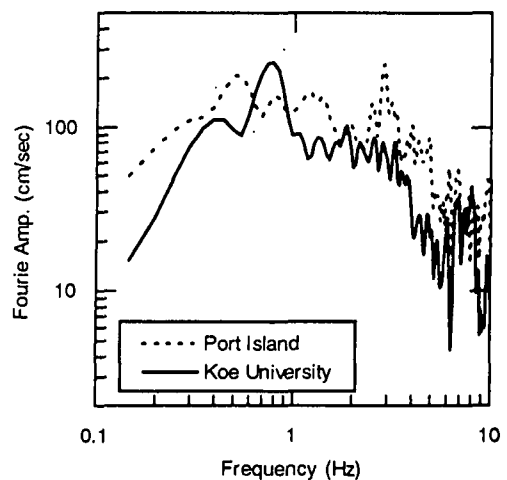


図-9 入射波のフーリエスペクトル

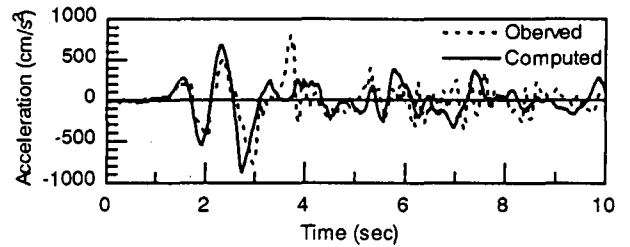
られる。一方、ポートアイランドの入射波でこの周波数帯域が小さいのは、反射波にこの周波数帯の成分が多いからで、その意味ではモデル化の誤差といえる。両方の影響が重なり合っこの付近では大きさが逆転している。次に、神戸大学は岩盤サイトとはいっても、観測地点の下方にせん断波速度300m/s程度の薄い層があり、7Hz以上の部分で振幅が大きくなっているものと考えられる。

解析の精度を検討する意味で、大阪ガス葺合供給所における記録と図-7でほぼ同程度の条件と考えられる1800m地点の計算値を比較し、図-10に示す。加速度波形を見ると、主要動の部分に関しては周期特性、最大値とも良く一致しているように見える。比較の対象とした図-7の1800m位置が葺合をモデルにした作ったわけではないことを考えれば、計算はかなり妥当なものと言えよう。

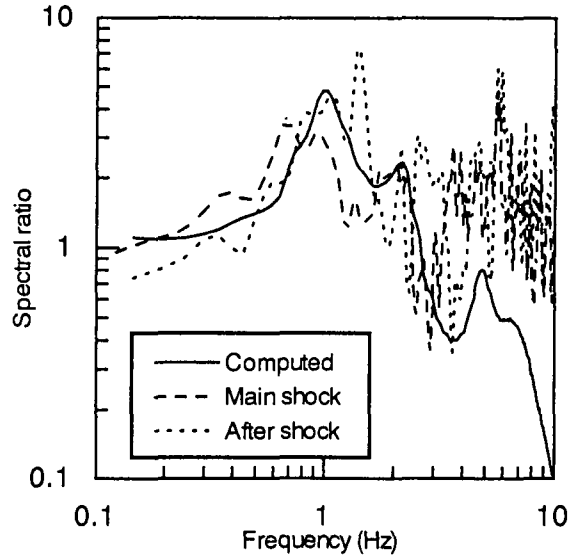
図-10(b)では地表記録の基盤に対するスペクトル比を比較している。ここでも基盤としたのは、計算に用いたものと同じポートアイランドの地中の複合波である。また、比較のために、本震後3分で起こったM=4.7の余震の記録も示している。

まず、本震と余震の記録を比較すると、本震記録の方が卓越振動数が小さくなり、スペクトル比も小さくなっている。したがって、本震の際非線形挙動が生じていることは明らかである。一方計算値は3Hzより長周期側ではこれらと似た形状を示し、卓越周期の位置、そのときのスペクトル比の大きさは両者の中間にある。前述のように、同じ地盤に対する応答を比較しているわけではないので、この差は地盤の差として捉えられるかもしれない。3Hzより高い振動数側では計算値のスペクトル比は急激に小さくなる。これは、図-10(a)で主要動以降の部分の波形の差が明瞭に現れてきた結果と考えられる。すなわち、解析では後に図-11で示すようにこの位置では著しい非線形挙動を示し、等価線形解析を行っているため減衰も大きく、高周波数成分が地表まで伝播しなかったからである。

図-11に断面に沿った最大加速度と最大速度の分布を示す。六甲山近くでは加速度、速度とも大きな変化はないが、1500m付近より海側では最大加速度が急激に低下するという傾向が明瞭にみられる。図-7の断面図と比較すると、この傾向は沖積粘性土



(a) 加速度時刻歴



(b) スペクトル比

図-10 葺合供油所と1800m地点との比較

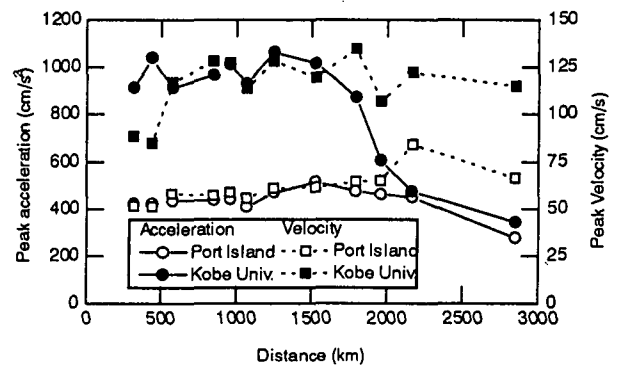


図-11 最大応答加速度と速度の分布

が地層に現れると顕著になる事が分かる。すなわち、3、4章と同様、沖積粘性土層の非線形挙動が地表の地震動に大きな影響を与えている。一方、最大速度の低下はそれほど大きくない。このことは、図-1の結果と整合するものと考えられる。

最後に、いわゆる震災の帯と呼ばれる震度7の地域の地震動について検討する。図-7の断面では、この部分はおおよそ500mから1500mの間である。この地域は図-7でみれば、これまで指摘した、大きな非線形性を示した沖積粘性土や埋立層が見られ

ない地域である。図-11ではこの地域では加速度、速度とも大きい地域である。したがって、この結果からのみ言えば、これまでの常識、すなわち、「軟弱地盤は地震動の増幅が大きいので被害が大きくなる」とは反対に、震災の帯では地盤が比較的好かったため、非線形効果による地震動の低下が現れず地震動が大きくなったと言うことも可能であろう。しかし、図-11では震災の帯からはずれた500mより北側の地点でも加速度の値は大きく、この説明は単純には成り立たないようにも見える。さらに、震災の帯より南側では最大加速度は低くなっているものの、最大速度の低下はほとんどなく、比較的長周期の構造物についての説明はできない。また、他の断面で同じ様なことがいえるのかの検討はしていないので、一般的に成立するという保証もない。

震災の帯が、地震動の焦点効果であるという説明も行われている(たとえば文献7)。すなわち、鉛直下方から伝達する波動と図-7の東側の基盤(花崗岩)から側方に伝播してきた波動が干渉し、地震動が大きくなったという訳である。しかし、これまでに見てきたような次元の解析がある程度実状を表しているとすれば、地盤ではせん断強度を超えてせん断応力波伝わらないという性質があるので、入力地震波の大小に関わらず地表の応答には限界があることになる。したがって、焦点効果により大きな入力波があったとしても、これが大きな非線形挙動をする地盤であれば、非常に大きな被害には至らなかったのではないかと推測もできる。すなわち、震災の帯ができるためには、地震動の伝播と表層の非線形性の両方の効果を考える必要があるように考えられる。

このような考え方が事実に近いとすれば、これまで行われてきた設計用の地震動予測の方法は問題がある可能性がある。これまでの方法に基づけば、たとえばサイト近傍の岩盤で得られた波動や、サイト(近傍)の地表で得られた(と想定される)波動から重複反射理論で求めた波動が鉛直下方から入射してくるとしてサイトの応答を求めている。そこには、大局的な地形の不整形の影響、たとえば上で述べたような焦点効果の影響は含まれていない。この点は、今後さらに詳細な検討が必要と考えられる。

6 おわりに

兵庫県南部地震の際の地盤の非線形挙動およびそれが地震動に与える影響を様々な観点から検討した。その結果次のような事が分かった。

- ①非線形挙動が著しいのは沖積粘性土(Ma13)および沿岸地域の埋め立てに用いられたマサ土である。前者は液状化強度が小さく、後者は液状化の発生により著しい非線形挙動を示す。
- ②震災の帯と言われる震度7の地域に特徴的な地震動は、表層のみの解析からは抽出できなかった。
- ③入射地震動が大きいとき、地盤の非線形性により地表の応答に加速度の頭打ち現象が現れるというこれまでの計算結果に基づく経験則は今回の計算でも確認できた。しかし、この現象が実際にも起きているか否かという点は、観測記録からは確認することが出来なかった。また、加速度は低下するが、速度は必ずしも低下しないという、これまで知られていなかった現象が数値計算で得られた。したがって、加速度よりも速度に影響を受けやすい長周期構造物では地盤の非線形挙動による有利さはない可能性がある。これらがどの程度事実かについては、今後さらに詳細な検討が必要である。

謝辞 本報告では、気象庁87型電磁式強震計波形データ、関西地震観測研究協議会による観測記録、同協議会を通じて公開されている神戸市開発局、建設省土木研究所、関西電力株式会社、大阪ガス株式会社による観測記録、運輸省港湾技術研究所による観測記録を使用させていただきました。記して関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉田望、1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析、土と基礎、Vol.43、No.10、pp.49-54、1995
- 2) 吉田望、東畑郁生、YUSAYUSA-2理論と使用法、1991
- 3) 辻原治、沢田勉、谷高博、鉛直アレー観測記録による成層地盤構造の同定、土木学会第43回年次学術講演会、pp.998-999、1988
- 4) 安田進、坪田邦治、小林利雄、西川修、野村博之、兵庫県南部地震による液状化発生地点の地層構成、第23回地震工学研究発表会、pp.217-220、1995
- 5) 安田進、山口勇(1985):種々の不攪乱土における動的変形特性、第20回土質工学研究発表会講演集、pp.539-542
- 6) 上半文昭、中村豊、常時微動による神戸市街における表層地盤の地震動特性-阪神淡路大震災に関連して-、第23回地震工学研究発表会、pp.209-212、1995
- 7) 永野正行、源栄正人、神戸市の基盤不整形構造を考慮した地盤震動特性に関する解析的検討 その1 平面波入射による地震動の増幅特性、日本建築学会大会各術講演梗概集(北海道)、pp.171-172、1995