

(19) 剛体化した改良地盤とそれととりまく軟弱地盤の地震時挙動

運輸省港湾技術研究所 正会員 箱 富 隆 昌

1. ま え が き

重要構造物を大規模な軟弱地盤に建設する機会が多くなっている。近年、セメントスラリーなどの硬化剤を軟弱地盤に直接混合し、地盤の強度を原位置で増加させ、構造物の基礎地盤とする深層混合処理工法(DM工法)が登場してきた。現在、このDM工法による改良地盤とそれととりまく軟弱地盤の動的相互作用を明らかにする目的で、すでに施工された改良地盤と軟弱地盤との地震動観測を行っている。本報告では、得られた地震動記録を用いて地震応答解析を行うと共に、地盤と構造物のモデル化および解析に用いる動的変形特性の解析結果に与える影響を報告するものである。

2. 応答解析条件

2.1 解析手法

地震応答解析は、土の材料非線形特性を等価線形化手法によって表現した2次元平面ひずみ等価線形振動解析プログラムFLUSH²⁾を用いて行った。地震時における地盤と構造物の相互作用を解析するには、土のもつせん断変形係数 G や減衰係数を適切に評価する必要がある。本手法では、これら係数をせん断ひずみ γ の関数として表現している。なお、プログラムは、モデル化による地盤の境界の影響を極力小さくするために、特に、無限地盤を表現する伝達境界を厚さの異なる左右両地盤に取り入れられるよう改良してある。

2.2 解析対象

地中地震観測は、図-1に示す横浜港大黒埠頭-12m岸壁である。地震計は、改良地盤および改良地盤から約3.3m離れた原地盤に設置してある¹⁾。地震応答解析の範囲は、広い振動現象を再現できると思われるが、計算時間、計算容量などを考慮すると地みくもに大きくすることはできない。解析は、図-2に示すように改良地盤の両下端から水平に対して引いた45°の線が地表面と交わる位置に境界面があるモデル1と改良地盤の両端から改良地盤の幅の2倍の位置に境界面があるモデル2に対して行った。なお、水平となる角度45°は、現行設計法による主働および受働側の崩壊面を想定して採用した値である。

2.3 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、
 1) 1968年の十勝沖地震において八戸港で観測された地震動記録から推定した地表面下9.4mの工学的な基盤層での入射波(最大加速度を150Galにしてある)および
 2) 1978年の伊豆大島近海地震と宮城県沖地震において図-1

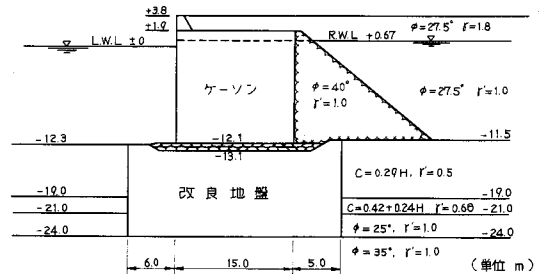


図-1 解析断面

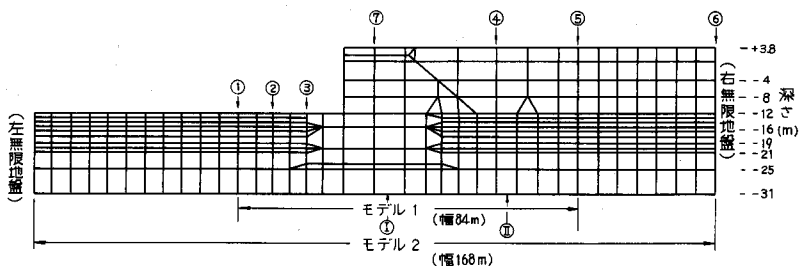


図-2 解析モデル

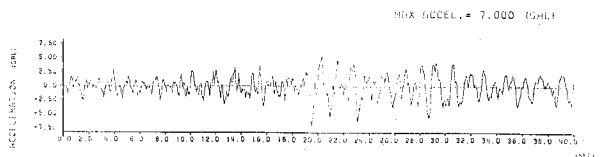


図-3 地震動波形

に示す解析対象の基礎層(33m)で得られた地震動である。図-3に宮城県沖地震の波形、そのパワースペクトルは、図-10のTV-1に示す。

2.4 地盤の物質定数

図-1に示したDM工法による改良地盤の地震時における挙動を調べるために、地震計が設置されたが、地震計の設置に先立ち改良地盤および原地盤においてPS波速度検層が行われた。速度検層は、地震計設置用の孔を利用して行った。振源と測定孔の距離は3mで、測定は、測定孔の中の受振器を1m間隔に移動させながら行った。図-4は、原地盤におけるP波およびS波の走時曲線である。図からP波速度は地盤深度にほぼ1600m/sであることが推察される。しかし、S波の走時曲線の深さに対する傾きをみるとS波速度(V_s)は、深さと共に速くなっていることが推察される。そこで、1m間隔ごとに得られた走時曲線のデータをもとに各層ごとのS波速度(PS詳細)と深さ方向に平均的に求めたもの(PS平均)を図-5に示す。また、PS波速度検層が行われていない場合に用いられる地盤の ρ_u 値およびN値から求めた結果(PS慣用)も合わせて示した。なお、 ρ_u 値およびN値は、図-7に示す土質データなどを参考に決めた。原地盤の粘性土が正規圧密粘性土、また粘性土のせん断変形係数が拘束圧に依存することを考えると、深さと共にS波速度が速くなっていくことは当然の結果とも考えられる。-21mから-25mの砂層といわれる層のPS慣用のS波速度が他の2つに比較して大きくなっている。これは、砂と粘性土の中間的性質を持っているこの層を工学的に砂層とみなしてN値からS波速度を求めたためと考えられる。したがって、経験式から砂と粘性土の中間的性質を持っている地盤のS波速度を推定するときは、十分な配慮が必要と考えられる。改良地盤のP波およびS波速度は、実測値を用いた。以上から、微小せん断ひずみ($\gamma=10^{-6}$)のときのせん断変形係数 G_0 を求めた。次に、広範囲なせん断ひずみ γ のせん断変形係数 G および減衰係数 δ について述べる。室内試験から求めた土のせん断変形係数 G および減衰係数 δ を $G/G_0 \sim \gamma$ および $\delta \sim \gamma$ の関係で示したのが図-6である。また、図には原位置の $G/G_0 \sim \gamma$ および $\delta \sim \gamma$ 曲線が求められていない場合に、粘性土に対して提案されている標準曲線から求めた2つの異なる拘束圧 P に対する曲線も合わせて示した。なお、室内試験の海底面下7~13mの土の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線には、拘束圧の低い海底面下0~7mの粘性土より強いひずみ依存性がみられる。これは、7~13mの土が図-5のS波速度からみられるように粘性土と砂の中間的性質を持っているためと考えられる。埋立砂などの砂に対する室内試験は行っていないので、現在、提案されている曲線を利用した。改良地盤およびケーソンは、線形材料とした。なお、図-9に示すPS平均、PS慣用、PS詳細(1)の粘性土の $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $\delta \sim \gamma$ 曲線は、室内試験結果、砂は平均曲線、PS詳細(2)の粘性土および砂の

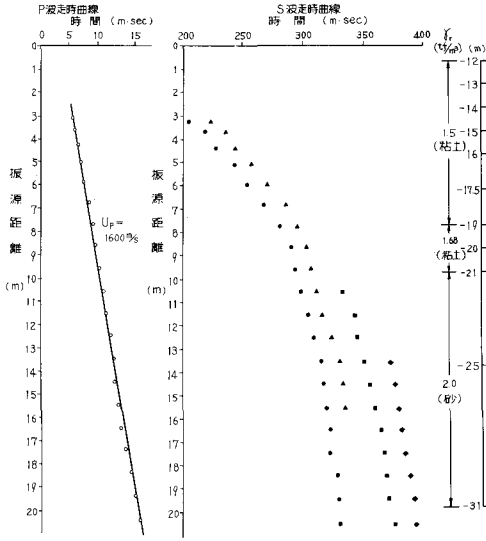


図-4 PS波走時曲線

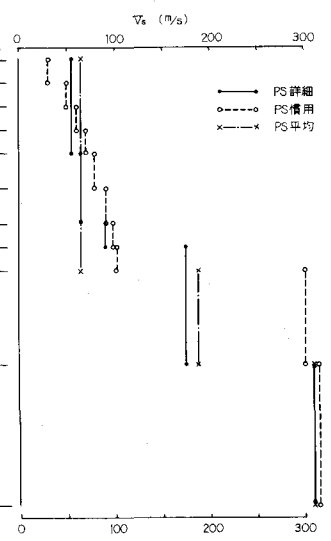


図-5 S波速度

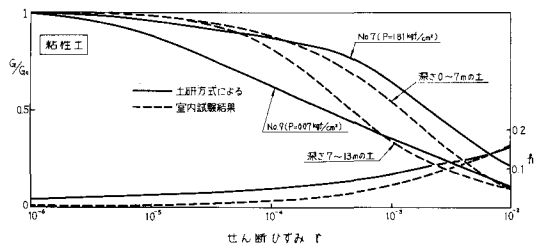


図-6 $G/G_0 \sim \gamma$, $\delta \sim \gamma$

また、PS波速度検層が行われていない場合に用いられる地盤の ρ_u 値およびN値から求めた結果(PS慣用)も合わせて示した。なお、 ρ_u 値およびN値は、図-7に示す土質データなどを参考に決めた。原地盤の粘性土が正規圧密粘性土、また粘性土のせん断変形係数が拘束圧に依存することを考えると、深さと共にS波速度が速くなっていくことは当然の結果とも考えられる。-21mから-25mの砂層といわれる層のPS慣用のS波速度が他の2つに比較して大きくなっている。これは、砂と粘性土の中間的性質を持っているこの層を工学的に砂層とみなしてN値からS波速度を求めたためと考えられる。したがって、経験式から砂と粘性土の中間的性質を持っている地盤のS波速度を推定するときは、十分な配慮が必要と考えられる。改良地盤のP波およびS波速度は、実測値を用いた。以上から、微小せん断ひずみ($\gamma=10^{-6}$)のときのせん断変形係数 G_0 を求めた。次に、広範囲なせん断ひずみ γ のせん断変形係数 G および減衰係数 δ について述べる。室内試験から求めた土のせん断変形係数 G および減衰係数 δ を $G/G_0 \sim \gamma$ および $\delta \sim \gamma$ の関係で示したのが図-6である。また、図には原位置の $G/G_0 \sim \gamma$ および $\delta \sim \gamma$ 曲線が求められていない場合に、粘性土に対して提案されている標準曲線から求めた2つの異なる拘束圧 P に対する曲線も合わせて示した。なお、室内試験の海底面下7~13mの土の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線には、拘束圧の低い海底面下0~7mの粘性土より強いひずみ依存性がみられる。これは、7~13mの土が図-5のS波速度からみられるように粘性土と砂の中間的性質を持っているためと考えられる。埋立砂などの砂に対する室内試験は行っていないので、現在、提案されている曲線を利用した。改良地盤およびケーソンは、線形材料とした。なお、図-9に示すPS平均、PS慣用、PS詳細(1)の粘性土の $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $\delta \sim \gamma$ 曲線は、室内試験結果、砂は平均曲線、PS詳細(2)の粘性土および砂の

$G/g_0 \sim \gamma$, $\rho \sim \gamma$ 曲線は、図-6に例として示した拘束圧の影響を考慮した曲線である。次節の解析範囲の検討では、PS詳細(1)を用いた。

3. 応答解析結果

3.1 解析範囲について

地震時における地盤および構造物の挙動を数値解析的に検討するには、解析対象の適切なモデル化が必要となる。今回は、図-2に示す2断面に対して解析範囲の検討を行った。図-7にモデル1の範囲におけるモデル1とモデル2の最大加速度の計算結果を示す。原地盤および改良地盤の加速度分布は、両モデルにおいて、ほぼ同じ傾向を示している。また、両モデルの最大加速度の値を比較すると改良地盤③で3%以内、改良地盤の両側の原地盤においては、左側①②がほぼ5%以内、右側は境界面⑤を除けば15%以内におさまった。また、最大せん断ひずみは、図示していないが、モデル1の境界部分を除くと10%以内であった。モデル2が絶対的な結果を与えるモデルであるわけではなく、きりがないため、この2断面から適切な解析範囲を議論することは困難を伴うが、依連境界の効果、更に改良地盤およびその周辺の地盤を解析するにはモデル1に採用した範囲でも工学的に許容できるのではないかと考えられる。なお、図-8はモデル2の最大せん断ひずみの深さ方向の分布を示したものである。改良地盤直下の地盤に発生する最大せん断ひずみは、同じ深さの他の地盤のそれと比較して、極めて大きくなっている。すなわち、地震時においては、剛体化した改良地盤直下の地盤には、過大なせん断能力が発生する恐れがあることを示している。

3.2 観測結果との比較

地震応答解析を行うにあたって重要なことは、適切な解析範囲を知ると共に、解析に用いる地盤などの物質定数が適切であるかどうかである。2.4において述べたように、応答解析に用いる物質定数は、現地観測、経験式などから直接的、間接的に求めることができる。今回、地震時における改良地盤の動的挙動を把握するために行われている地震観測の結果と比較しながら、応答解析に用いた物質定数の影響を調べた。なお、解析範囲は、モデル1を用いた。図-9は、伊豆大島近海地震(YDF-1)と宮城県沖地震(YDF-7)で得られた原地盤および改良地盤の最大加速度と応答解析結果である。なお、原地盤の解析結果は、依連境界(無限地盤)のものである。原地盤の実測値は、海底面に近づくと共に大きくなっている。PS平均による粘性土地盤の相速度は、両地震とも深さ方向に一定の値を示している。一方、PS平均と同じ $G/g_0 \sim \rho \sim \gamma$ および $\rho \sim \gamma$ 曲線を持つPS詳細(1)の加速度をみると、特にYDF-1は海底面近づくと共に大きくなっている。更に、PS慣用も同様の傾向を示している。これらの結果は、実測値の傾向と一致している。また、PS詳細(1)およびPS詳細(2)からは $G/g_0 \sim \rho \sim \gamma$ および $\rho \sim \gamma$ の違いをみることもできるが、両地震の解析結果をみると加速度の一致度は余りよくない。すなわ

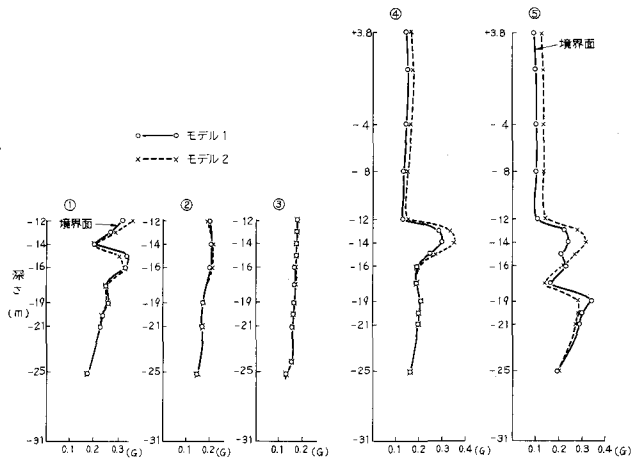


図-7 最大加速度

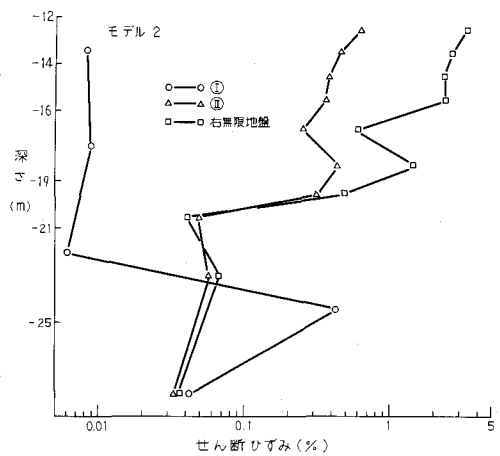


図-8 最大せん断ひずみ

ち、解析結果は、微小ひずみのときのせん断変形係数 G_0 の他に、 $G_0 \sim \gamma$ および $\gamma \sim \sigma$ の関係にも影響を受けることがわかる。次に、現地盤の実測値と解析結果を比較すると、YDF-1はPS慣用、PS詳細(2)、YDF-7はPS慣用の解析結果が比較的実測値に近い値を示している。また、改良地盤の挙動をみると解析による加速度分布は、実測結果と同様に、深さによる変化が小さく、かつ、直線的に変化している。したがって、原地盤の表面の最大加速度が顕著に大きくなっていることを考えると、改良地盤が剛体として挙動していることが解析からわかる。しかし、加速度の値は、実測の方が解析結果より大きくなっている。この差についての検討は、今後詰めること

をしたい。図-10にYDF-7の基盤層(TV-1)と海底面(TV-4)における実測および解析の地震動のパワースペクトルを示す。その卓越振動数は、実測および解析で比較的良好に合っている。なお、基盤層に対する海底面の周波数伝達関数の卓越振動数は、実測では1.4Hz付近にあるがPS慣用では2Hz付近と高い振動数になっている。

このように、地震応答解析結果の信頼性は、解析手法にも左右されるであろうが、解析に用いる物質定数によって大きく影響を受けることがわかる。今回用いた地震動記録は、最大加速度が小さいもので、大地震を対象とする場合は、更に詳細な検討が必要であろう。

参考文献

- 1) 稲富他：剛体化した改良地盤とそれをとりまく軟弱地盤内の地震動観測，第5回地震工学シンポジウム講演集，1978年11月，PP.153~160
- 2) Lysmer, J. et al. : FLUSH - A computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EERC, No. 75-30, 1975
- 3) 今井他：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質，第4回地震工学シンポジウム講演集，1975年11月，PP.89~96
- 4) 岩崎他：地盤の動的モデル化，地質と調査，第2号，1980年，PP.19~25
- 5) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1978年，P.197

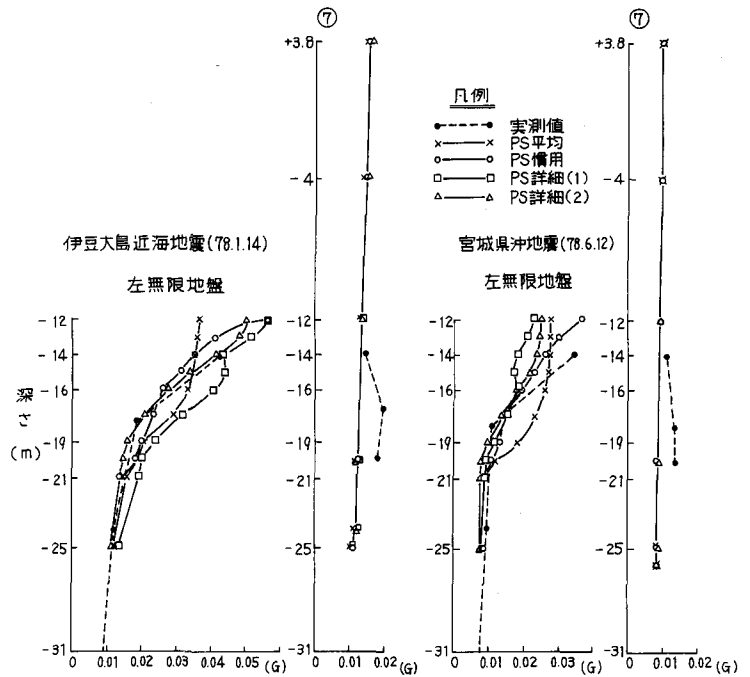
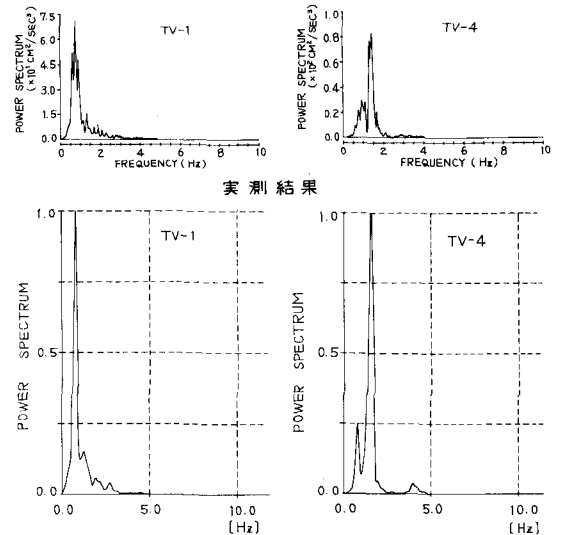


図-9 最大加速度



解析結果

図-10 パワースペクトル(YDF-7)