

1. はじめに

地震時液状化は、ほとんどの大きな地震時において生じており、構造物に被害をもたらすことが多い。兵庫県南部地震においても、護岸の背後などの液状化による側方流動が生じた個所では被害が顕著であった。しかし、液状化を生じていても側方流動を伴っていない場合には、構造物被害は大きくなかった。この原因のひとつとして、液状化による免震効果により地表面加速度が低減したことが指摘されている¹⁾²⁾。また、地中構造物に作用する土圧も周辺地盤が液状化することにより低減することが、振動台実験等により報告されており³⁾、このことも構造物被害が小さかったことの原因のひとつであると思われる。このように、地盤の液状化は、構造物の応答ならびに構造物への作用力の面からみてむしろ好ましい場合があるのではないかという指摘がなされている¹⁾。

上述のように周辺地盤が液状化した構造物の地震時応答特性の研究は重要であり、現状では有効応力に基づく逐次非線形解析が実施されている。しかし、実際の解析は2または3次元で行う必要があるため、その実施は容易でない。ところで、国生ら⁴⁾は、兵庫県南部地震においてポットライント[®]で観測された地震波形を等価線形解析により逆解析し、水圧上昇により軟化した地層も含めて、全ての地層の動的物性値を同定した。また、同定した動的物性値を用いたときの地震応答解析結果は実測値と良好に一致していた。これは言い換えると水圧上昇により軟化した地層であっても、せん断弾性係数と減衰比を適切に定めた上で等価線形解析を行えば、地盤の挙動をシミュレートできることになる。適切に定めた物性値を用いた等価線形解析の順解析が行えるようになれば、既存の数値解析プログラムにより多次元液状化応答解析が比較的容易に行えるようになるため、実務に携わる技術者にとっては大きな手助けとなるであろう。また、現在提案されている構成式は、液状化時の挙動を模擬できることに努力が傾注されているため、いわゆる動的変形試験結果を正確に表現できないことが少なくないので、適切に定めた動的物性値を用いた等価線形解析の方が、有効応力に基づく逐次非線形解析を行うよりも信頼性の高い解析結果が得られる可能性がないとは言えない。

そこで本論文では、等価線形解析による液状化解析の順解析の可能性を検討した。

2. 動的強度試験結果における剛性比、減衰比とせん断ひずみの関係

地震応答解析に必要な土質材料のせん断弾性定数と減衰比を繰返し載荷試験から求める場合、通常は、動的変形試験が行われ、得られた応力～ひずみループから、以下の式により等価せん断弾性係数 G_{eq} と等価減衰比 h_{eq} が計算される。

$$G_{eq} = \frac{(\text{せん断応力片振幅})}{(\text{せん断ひずみ片振幅})} \quad (1a)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{(\text{履歴ループの面積})}{(\text{せん断応力片振幅}) \times (\text{せん断ひずみ片振幅})} \quad (1b)$$

サイクリックモビリティにより応力～ひずみループが楕円形ではなく、逆S字を描いている場合でも式(1)で定義した G_{eq} 、 h_{eq} を用いて等価線形解析を行えば比較的妥当な解析結果が得られることは、既に指摘されている⁵⁾。

ところで、動的強度試験においては、繰返し載荷に伴い、履歴ループの形状は変化してゆくが、各ループ毎に式(1)により、動的変形試験結果と同様に G_{eq} と h_{eq} を計算することが可能である。そこで、砂礫の実験データについて、一波毎の $G_{eq} \sim \gamma$ 、 $G_{eq} \sim h_{eq}$ 関係を示したのが図1、図2である。また、 $G_{eq} \sim \gamma$ 関係を両対数で表示したものが図3である。これらの図より、 $G_{eq} \sim \gamma$ 関係は応力比 R の影響をうけるが、 $G_{eq} \sim h_{eq}$ 関係は、応力比 R の影響をあまりうけないので、全加振過程を通じて用いることができると言える。

3. 等価線形解析による液状化解析の手順

等価線形解析により液状化解析を行う方法として次のような手順を一案として考えた。

- ①等価線形解析を実施する。
- ②計算の結果得られたせん断応力の時刻歴と非排水繰返しせん断強度試験結果から累積損傷度の時刻歴を計算し、その大きさに着目して、地震動継続時間をいくつか（ひとつでも良いかもしれない）の時間ゾーンに分割する。

③何らかの方法（累積損傷度理論を用いる）のほか、実際にせん断応力履歴を供試体に加えることも考えられる）により、せん断応力の時刻歴に応じたせん断ひずみの時刻歴を求める。各時間ゾーンでの最大せん断応力ならびにそれに対応したせん断ひずみからせん断弾性定数を計算し、各時間ゾーンの G_{eq} とする。更に図3から、 G_{eq} に対応した h_{eq} を求める。

④各時間ゾーン毎に等価線形解析を実施する。その際、各時間ゾーン内では G_{eq} と h_{eq} の値が一定であるととし、各時間ゾーンにおける初期値は、ひとつ前の時間ゾーンの最終値であるととする。

⑤④の計算結果から、新たなせん断応力履歴の時刻歴を求める。

⑥③～⑤を何回か繰返し、ほぼ一定解析結果が得られるようになるまで繰返し、得られた結果をもって正解とする。

4. あとがき

3.で述べた内容は机上の提案に過ぎないので、今後は実問題を対象として、その適用性を検討する。

参考文献：1) 足立紀尚(1996)：阪神・淡路大震災に学ぶ地盤工学の課題、土と基礎、Vol.44, No.2, pp.3-6. 2) 石川浩次・溝口昭二・小野諭(1996)：神戸市街地の帯状被害と地盤、土と基礎、Vol.44, No.2, pp.38-41. 3) 例えば、田中幸久ら(1993)：狭路部での液状化対策を目的とした深層混合処理工法に関する模型振動実験と解析、第22回地震工学研究発表会講演概要、pp.67-70. 4) 園生剛治・佐藤清隆・松本正毅(1995)：1995年兵庫県南部地震での地盤の非線形震動特性、土と基礎、Vol.43, No.9, pp.39-43. 5) Watanabe,H. and Tochigi,H. (1985)：A consideration on the equivalent linearization of restoring force characteristics of structures, Proc. of JSCE, Structural Eng. / Vol.1, pp. 196-171-181. 6) Tatsuoka,F., Fujii,S., Yamada,S. and Maeda,S. (1982)：Prediction of shear strain time history in dense sand subjected to undrained random loading, Proc. of Sixth Japan Earthquake Eng. Symp., pp.537-544.

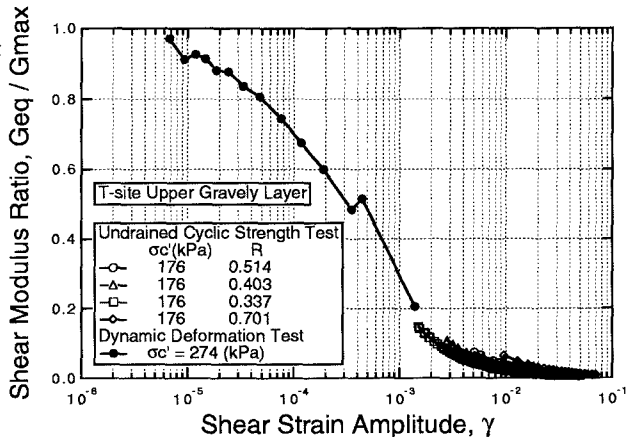


図1 動的変形試験ならびに動的強度試験から得られた剛性比とせん断ひずみの関係

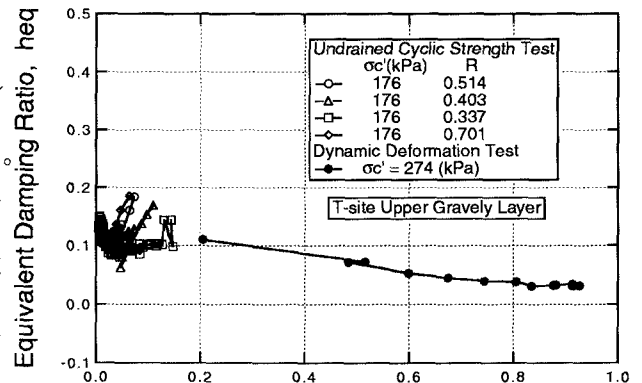


図2 動的変形試験ならびに動的強度試験から得られた減衰比と剛性比の関係

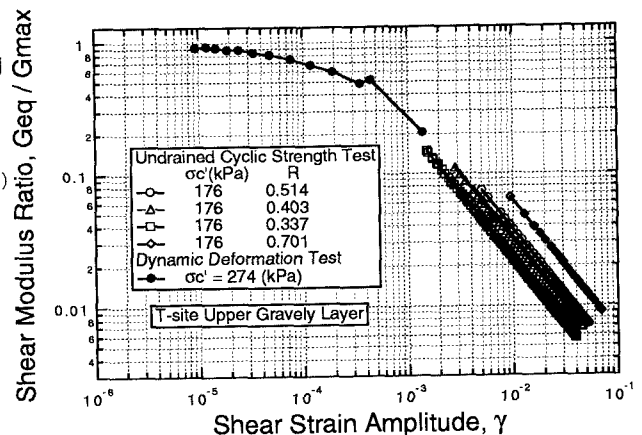


図3 動的変形試験ならびに動的強度試験から得られた剛性比とせん断ひずみの関係の両対数表示