

(69) 液状化を伴う地盤の等価線形化

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
 フジタ工業(株) 正会員 ○斎藤 悦郎
 武蔵工業大学 学生員 山崎 見弘

1. はじめに

特に大きな地震外力を受けると、飽和砂質地盤は間隙水圧が上昇し、そのためせん断抵抗力を失い液状化現象を伴う。この現象により、各種構造物が過去に大きな被害を受けた実例が見られる。従って、構造物を敷設する地盤に対して、液状化への危険度を判定することは重要な意味を持つ。また、この液状化現象を考慮した応答解析方法として、有効応力解析法が提案されている。この方法は、応力-ひずみモデル、間隙水圧モデルなどの各要因を組み込んだ解析方法であり、地盤の軟化過程である間隙水圧の上昇、応答波形の長周期化など、実際の地盤現象を表現することができると思われるが、その反面、計算が複雑であり、また数値解析のために影響要因の出力へ与える定量的評価は困難なものとなる。従って、この解析方法を適用する際には、本質的なものを補えにくいと言えることができる。本研究は、液状化を伴う地盤の軟化特性を反映し、しかも単純化したモデルで液状化現象を表現する手法を提案した。そして、本手法を用いることにより、簡易な液状化予測の可能性を数値的に明らかにした。なお、本手法に用いる入力波形(観測波形)は、有効応力解析法から作成した。

2. 地盤モデル及び入力波形

対象とする地盤は、理想的な1自由度系、非排水飽和砂質地盤とした(図-1)。入力波形は、振幅特性、周波数特性の違う波、及び振幅に非定常性を持たせた波など計9波を使用した。W10, W30, W50, W70, W90の波形は、周波数が0.01~5 Hzの間で一様なパワーを有する有帯域ホワイトノイズであり、最大振幅値を10, 30, 50, 70, 90 cm/sec²と調整した。EW100の波形は、最大加速度振幅100 cm/sec²のホワイトノイズに振幅の非定常性を持たせるために形状関数を掛けた波形である。R1, R2, R3は実地震波であり、R1は、Millikan Library 地震記録NS成分、R2は、Managua Nicaragua 地震記録NS成分、R3は、El Centro地震記録NS成分を表わしている。なお、実地震波は3波とも最大振幅値を100 cm/sec²に修正して使用した。

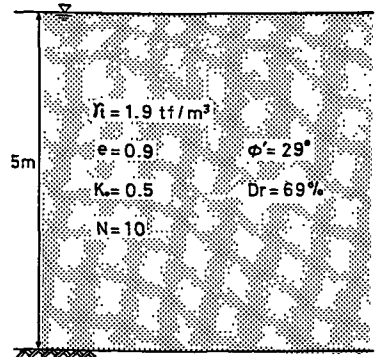


図-1 解析用対象地盤

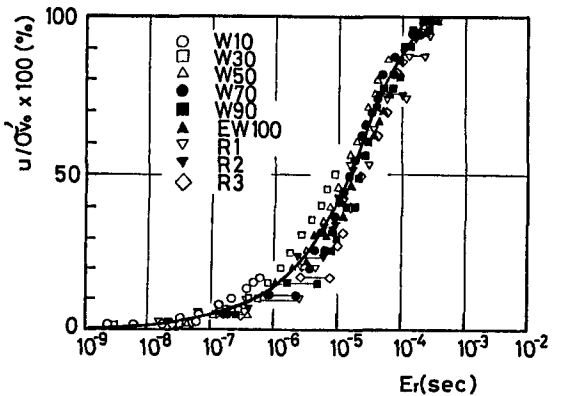
3. せん断ひずみエネルギーによる表現

間隙水圧は地震動の作用によって徐々に上昇し、地盤の軟化現象を引き起こす。この現象は、入力地震動の継続時間とその間に変動するせん断ひずみ振幅に影響を受ける。そこで、継続時間とせん断ひずみ振幅を考慮した物理量として、せん断ひずみエネルギー E_r を次式のように定義した。

$$E_r = \int_0^t \gamma^2(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $\gamma(t)$ は時刻 t におけるせん断ひずみである。

図-2は、せん断ひずみエネルギー E_r と間隙水圧比 u_0



(初期有効応力 σ'_v を用いて過剰間隙水圧 u を正規化し

図-2 間隙水圧比-せん断ひずみエネルギー曲線

たもの)の関係を求めた図である。この図から、多少のパラッキはあるものの両要因の関係は1つの曲線で表わされ、入力波形とは独立にせん断ひずみエネルギーの量を知ることにより、この曲線から間隙水圧比の上昇量を推定できることがわかる。

4. 等価線形モデルを用いた地盤特性値の同定

液状化発生過程の複雑な現象を軟化を伴う等価線形モデルで表現する。観測波形を軟化を伴う等価線形系の入力データと見なし、等価線形モデルを構成する特性値である固有円振動数 ω_{eq} と減衰定数 β_{eq} 、応答変位波形の軸ズレ量 α を同定した。同定手法は制御理論の拡張カルマンフィルターである。

拡張カルマンフィルターは、非線形連続型状態方程式と非線形離散型観測方程式に対する、最適状態量の推定の漸化的なアルゴリズムから構成されるものである。また、等価線形モデルとして、間隙水圧の上昇に伴い、地盤に永久ひずみが生じる現象を表現するために、応答変位 α 軸ズレ(α)をも考慮した、1自由度線形系システムで対象地盤を置き換えた。振動方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{x} + 2\beta_{eq}\omega_{eq}\dot{x} + \omega_{eq}^2(x + \alpha) = -\ddot{y}(t) \quad (2)$$

(2)式を状態空間表示で示すと、

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -2\beta_{eq}\omega_{eq}x_2 - \omega_{eq}^2(x_1 + \alpha) - u \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $u = \ddot{y}(t)$, $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$ とした。

次に同定すべきパラメーターを

$$x_3 = \beta_{eq}, \quad x_4 = \omega_{eq}, \quad x_5 = \alpha \quad (4,5)$$

とにおいて、これらを状態ベクトルに組み込むと、(3)式は拡張されて次の非線形連続型状態方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -2x_3x_4x_2 - x_4^2(x_1 + x_5) - u \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

拡張カルマンフィルターに用いる観測波形は、応答変位、応答速度波形とした。そして、時間軸を区間に分割し区間内は定常であるものとして、各区間に対して ω_{eq} 、 β_{eq} 、 α の同定を行なった。

図-3は、Managua Nicaragua地震記録NS成分の入力波形における、入力加速度、応答変位、間隙水圧比、 ω_{eq} 、 β_{eq} の経時変化を示したものである。

同図から、間隙水圧比の上昇に伴い、 ω_{eq} は減少し、 β_{eq} は増加する傾向を示した。これより、液状化発生過程の軟化現象は ω_{eq} 、 β_{eq} で表現できることがわかる。

また、間隙水圧比が60%以上になると、応答変位波形は急激に長周期化し、それとともに軸ズレ現象も伴う。この現象から、動特性である ω_{eq} 、 β_{eq} が急変することが推察され、その傾向は ω_{eq} 、 β_{eq} の経時変化と対応がつく。

次に、間隙水圧比が100%になると、 ω_{eq} 、 β_{eq} の値は

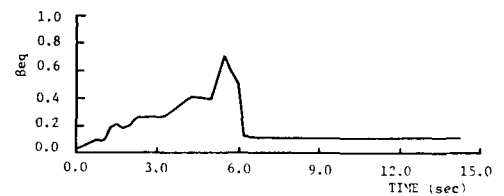
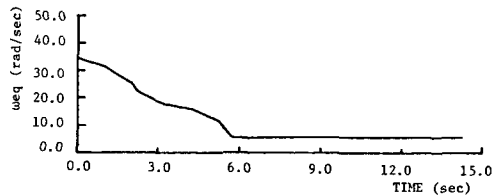
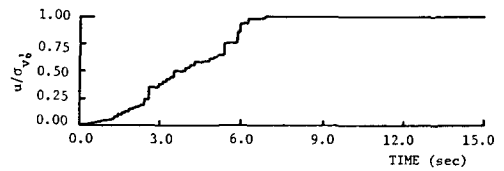
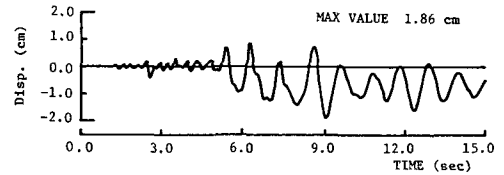
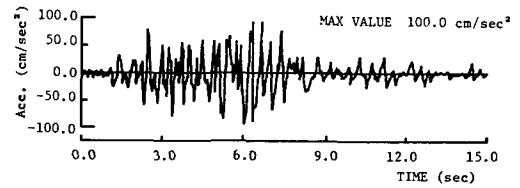


図-3 入力加速度、応答変位、間隙水圧比、 ω_{eq} 、 β_{eq} の経時変化(RZの場合)

一定となった。これは有効応力解析法の計算において、100%以後の応答計算における安定性を保つために、初期剛性に対して3%の剛性を残して一定にしているためである。この3%は固有円振動数で 5.93 rad/sec となり、同定結果と一致する。

同定された特性値 ω_{eq} 、 β_{eq} とひずみエネルギー E_r の関係を示したものが図-4、5である。同図より、パラッキはあるが図に示した曲線によりその傾向を表現できる。この曲線から入力波特性に関係なく、動特性がせん断ひずみエネルギーの1つの関数で表現できることが示される。

以上より液状化発生過程の動特性は、等価線形1自由度系モデルで表現することができた。

5. 液状化簡易予測

図-4、5及び図-2の曲線を用いた液状化の予測を行う。まず、初期の ω_{eq} 、 β_{eq} を用いて、継続時間 T_d の入力波形に対する線形1自由度系の応答を求め、せん断ひずみエネルギー蓄積量を算出する。図-4、5の曲線から算出されたせん断ひずみエネルギーに対応した ω_{eq} 、 β_{eq} を求める。これらの値が初期値と異なるときは、これらの ω_{eq} 、 β_{eq} を採用して再び同様の計算を行ない、せん断ひずみエネルギーを計算する。

図-4、5に戻り、対応する ω_{eq} 、 β_{eq} を求める。もし、 ω_{eq} 、 β_{eq} が異なるならば、再度同様の計算を収斂するまで繰り返す。

以上、等価線形化法により得られたせん断ひずみエネルギー量を用い、図-2の対応する間隙水圧比を求める。そして、等価線形化法及び有効応力解析法により求められたせん断ひずみエネルギー、間隙水圧比を比較することで、両方法が一致するならば等価線形化法による液状化予測が妥当なものであると判断する。このような方法で、継続時間 T_d での液状化予測ができるわけである。

図-6、7は、入力波形W10、継続時間 $T_d=15 \text{ sec}$ 及び入力波形R1、継続時間 $T_d=8 \text{ sec}$ の波形に対して、等価線形化法が収斂過程を示したものである。以下にその過程について例を示す。

1) W10, $T_d=15 \text{ sec}$ の場合 (図-6)

初期値 $\omega_{eq} = 34.33 \text{ rad/sec}$ 、 $\beta_{eq} = 0.02$ から計算を行ない、4回の繰返し計算で収斂した。そのときのせん断ひずみエネルギーは $E_r = 7.02 \times 10^{-7} \text{ sec}$ となり、対応する間隙水圧比は図-2から $\frac{u}{\sigma'_{vo}} = 0.110$ となった。これは間隙水圧比が11%まで上昇することを示している。次に、有効応力解析法により算出したせん断ひずみエネルギーと間隙水圧比は、

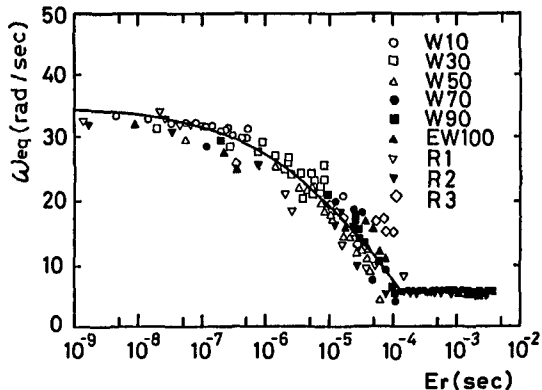


図-4 $\omega_{eq} - E_r$ 曲線

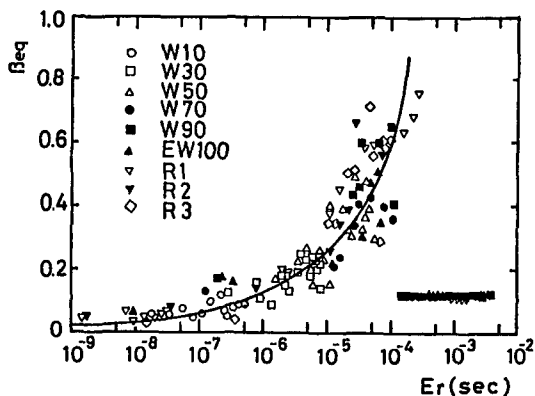


図-5 $\beta_{eq} - E_r$ 曲線

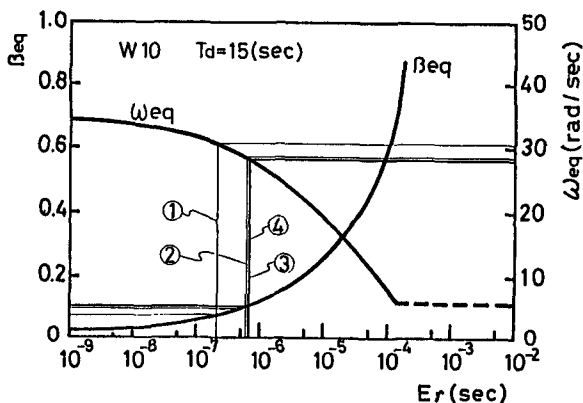


図-6 W10, $T_d=15 \text{ sec}$ の場合

それぞれ $E_r = 5.94 \times 10^7 \text{ sec}$ 、 $\omega\% = 0.163$ となる。
 これより、等価線形化法はほぼ良い対応を示すことがわかる。

2) R1, $T_d = 8 \text{ sec}$ の場合 (図-7)

初期値 $\omega_{eq} = 34.33 \text{ rad/sec}$, $\beta_{eq} = 0.02$ から計算を行ない、4回の繰返し計算で収束した。せん断ひずみエネルギーは $E_r = 3.00 \times 10^5 \text{ sec}$ 、図-2から間隙水圧比は $\omega\% = 0.680$ となった。また、有効応力解析法から求めたせん断ひずみエネルギーは $E_r = 5.53 \times 10^5 \text{ sec}$ 、間隙水圧比は $\omega\% = 0.717$ となり、等価線形化法が良い対応を示すことがわかる。

以上のような方法で、等価線形化法の検証のために、18ヶースの入力波形に対して、有効応力解析法による経過時間 T_d でのせん断ひずみエネルギー E_r 、間隙水圧比 $\omega\%$ との比較を行ない、たものが表-1である。

同表から、等価線形化法は有効応力解析法とほぼ良い対応が付き、等価線形化法を用いて液状化予測を行なうことの妥当性が明らかになった。

これらの検証から総合して、等価線形モデルは十分に液状化発生過程の地盤特性を表現できるモデルと行うことができる。また、この検証方法を用いた等価線形化法による応答計算の繰返しにより、液状化の予測を行なうことの可能性が示された。

本研究の対象地盤は例題にすぎず、他の地盤に対して、提案した等価線形モデルの考え方、解析方法を適用することにより、簡単な方法で地盤の液状化現象の予測が行なえると思われる。

また、今後は実際の地盤に近づくために、多層地盤における液状化の簡易予測法の確立を目指すものである。

*参考文献

- 1) Finn, W.D.L. 地: An Effective Stress Model for Liquefaction, Proc. ASCE, Vol 103, No GT6, 1977.
- 2) Jazwinski, A.H: Stochastic Process and Filtering Theory, Academic Press, 1970
- 3) 星谷 勝, 斎藤悦郎: 振環加マンフィルターを用いた同定問題の各種構造系への応用, 土木学会論文報告集 (投稿中)
- 4) Yun C.-B. and M. Shinozuka: Identification of nonlinear structural dynamic systems, J. Struct. Mech, 8(2), PP182~203, 1980.
- 5) Carmichael D.G: The state estimation problem in experimental structural mechanics, Application of Statistics & probability soil and structural engineering, 3rd. inter. conf. PP802~815, 1979.2.
- 6) 星谷 勝, 斎藤悦郎: 液状化を伴う地盤の等価線形化, 土木学会論文報告集 (投稿中)

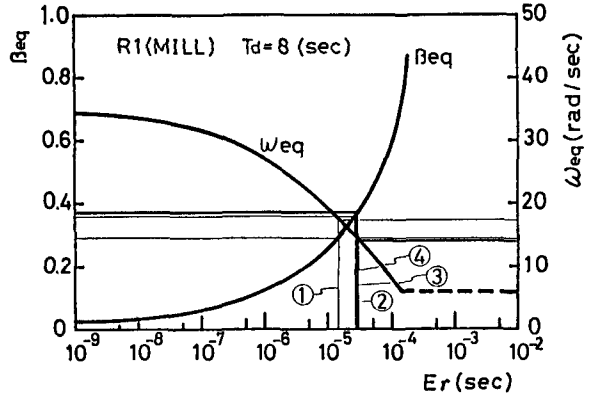


図-7 R1, $T_d = 8 \text{ sec}$ の場合

表-1 等価線形化法と有効応力解析法との比較

Input Wave	Equivalent Linearization Method		Effective Stress Method			
	Case	IT	E_r Fig-3,4	U/σ'_v Fig-2	E_r	U/σ'_v
W10	5	4	1.88×10^7	0.060	1.67×10^7	0.037
W10	15	4	7.02×10^7	0.110	5.94×10^7	0.163
W30	5	3	1.84×10^6	0.215	1.65×10^6	0.233
W30	15	4	1.08×10^5	0.450	9.45×10^6	0.506
W50	5	5	7.57×10^6	0.345	6.91×10^6	0.384
W50	10	6	3.31×10^5	0.680	3.09×10^5	0.697
W70	2	5	8.83×10^6	0.400	9.90×10^6	0.380
W70	10	6	2.08×10^4	0.990	2.62×10^4	0.996
W90	1	6	6.37×10^6	0.340	8.58×10^6	0.274
W90	6	8	9.18×10^5	0.880	1.11×10^4	0.901
EW100	1	4	2.14×10^7	0.068	2.26×10^7	0.060
EW100	6	7	6.80×10^5	0.825	7.42×10^5	0.802
R1	5	6	4.98×10^6	0.310	5.75×10^6	0.267
R1	8	4	3.00×10^5	0.680	5.53×10^5	0.717
R2	1	2	7.23×10^8	0.038	6.01×10^8	0.044
R2	6	6	7.10×10^5	0.840	1.48×10^4	0.936
R3	2	5	1.51×10^6	0.170	4.99×10^6	0.172
R3	10	6	1.00×10^4	0.880	7.48×10^5	0.789

Td : Time duration IT : Iteration Time