

## 液状化を伴う地盤の等価線形化

## EQUIVALENT LINEARIZATION OF LIQUEFIED SANDY SOIL

星 谷 勝\*・斉 藤 悦 郎\*\*

By Masaru HOSHIYA and Etsuro SAITO

## 1. はじめに

飽和砂質地盤は地震動の作用により間隙水圧が上昇し、それに伴い有効応力は減少する。このため、地盤は軟化し、さらに間隙水圧の上昇が著しくなると地盤はせん断力を失い液状化する。1964年の新潟地震では多くの砂質地盤がこのような現象を呈し支持力を失い、鉄筋コンクリート建物が転倒したり、橋桁が落ちた。この地震を契機として、液状化問題の研究が精力的に行われ、現在では液状化現象を物理的に説明できるようになった<sup>1),2)</sup>。

液状化現象を説明するには、現象の主要因である間隙水圧の上昇をいかに定量的に決定するかにある。そのためには、繰返し荷重作用下における砂の体積変化特性を明らかにすること、つまり土の構成式を確立することである<sup>3)</sup>。

石原・東畑<sup>4)</sup>、Martin<sup>5)</sup> および大岡<sup>6)</sup>は実験・経験式を根拠に応力経路や体積ひずみをモデル化して間隙水圧の上昇を推定している。Bazant<sup>7)</sup>、Zienkiewicz<sup>8)</sup> および Finn<sup>9)</sup>は応力やひずみの累積履歴を関数形にまとめて、体積変化とせん断ひずみ、または体積変化とせん断応力の関数形を作っておく方法 (Endochronic Theory) を提案して、間隙水圧の上昇を算定している。また、塑性論的方法で現象を解明しようと試みたものには西・江刺<sup>10)</sup>、佐藤・紫田<sup>11),12)</sup> および岡ら<sup>13)</sup>の研究がある。

以上の方法はいずれも有効応力解析法として分類され、地震時における地盤の応答解析に間隙水圧の上昇による地盤の軟化を考慮するものである。この方法は数値解析的に適用され、地盤特性を十分に考慮したモデル地

盤の出力波形が算出される。しかしながら、一方では数値解析のために、影響要因の出力へ与える定量評価が困難となる。すなわち、きめ細かく各要因を組み込んだ解析法で実際地盤を表現しているが、それゆえ適用するには本質的なものをとらえにくいものとなる。

そこで、液状化を伴う飽和砂質地盤の基本的な特性を反映し、しかも単純化したモデルで置き換えて液状化現象を検討することは総合的に現象を把握するためには必要なことと思われる。

本研究では、液状化現象を生じた応答波形から、直接飽和砂質地盤の地震時挙動を軟化を伴う線形モデルで表現し、液状化現象の支配的な要因を明らかにしようとするものである。

研究は次のような論理の展開から構成されている。

① まず、対象地盤として一様な非排水飽和砂質地盤を考えた。軟化現象を十分に説明できる地震波形データ(入力・出力)は現在十分に得られていない。そこで、この地盤を Finn<sup>14)</sup>の有効応力解析法でモデル化し、基盤に異なる周波数特性、振幅レベルの地震動を入力し数値解析的に応答波形の諸量を求めた。Finnのモデルが実際に照らして妥当なものであれば、このようにして算出した波形は観測データとみなすことができよう。これらのデータを解析し、軟化を伴う地盤応答を支配する要因を検討した結果、入力地震動の継続時間とせん断ひずみ振幅に関連した「せん断ひずみエネルギー」(後で定義する)であることを明らかにした。

② 次に①の観測波形を軟化を伴う等価線形系の入出力データとみなし、この等価地盤モデルを構成する特性値の固有円振動数と減衰定数を時間関数として同定した。同定手法は、拡張カルマンフィルター<sup>15)~17)</sup>による制御理論である。同定された特性値がせん断ひずみエネルギーの関数として表現できることを確認し、これより簡単な等価線形モデルの有用性を明らかにした。

③ 以上①,②の結果の検証を行い、等価線形化法を

\* 正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科

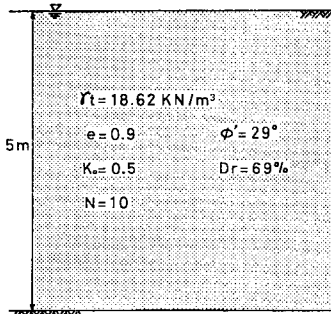
\*\* 正会員 工修 武蔵工業大学工学部土木工学科研究生(フジタ工業(株)技術研究所)

用いた簡易液状化予測の可能性を提案した。

本研究は以上の流れに沿って行われたものであるが、ここで用いた有効応力解析法による人工データが実際の現象を十分に表現し得るものという前提に立ち、等価線形モデルを提案するものである。方法論的には実データが十分に得られる場合にはもちろん同様な適用が可能であり、またさらに複雑な多層地盤に対しても同様な論理の構築ができるものである。

2. 非排水飽和砂質地盤の地震応答観測波形

対象地盤は図一 1 に示すような理想的な非排水飽和砂質地盤とした。同図には単位体積重量  $\gamma_t$ 、間隙比  $e$ 、静止土圧係数  $K_0$ 、 $N$  値、内部摩擦角  $\phi'$ 、相対密度  $D_r$  の諸値が与えられている。この地盤を Finn の有効応力解析法でモデル化<sup>(4)</sup> (表一) し、



図一 等価線形化のための対象地盤

表一 有効応力解析に用いた実験諸定数

間隙水圧モデル	応力~ひずみモデル
$C_1$ 0.80	$H_1$ 0.754
$C_2$ 0.79	$H_2$ 0.406
$C_3$ 0.45	$H_3$ 0.55
$C_4$ 0.73	$H_4$ 0.50
$m$ 0.43	
$n$ 0.62	
$K_2$ 0.0025	

基盤に異なる振幅レベル、振動数特性をもつ地震動を入力し、応答波形を数値解析的に求め観測波形データとした。Finn の有効応力解析法は、非排水飽和砂質水平地盤を対象とした 1 次元解析であり、地盤を多質点せん断ばりにモデル化して水平方向の運動方程式を満足する解を逐次積分により求めるものである。この際、各時刻ごとに間隙水圧モデルを適用し水圧の上昇を算定する。これより時々刻々と変化する地盤内の有効応力を知ることができ、有効応力の関数であるせん断定数、土の強度等の経時変化を考慮した解析を可能とするものである。

まず、解析に先立ち Finn のモデルの定性的な妥当性を確認するために石原<sup>(4)</sup>が行った新潟地震における川岸町の地盤データを用い、多層地盤系にモデル化した地盤の応答解析を行った。解析から得られた過剰間隙水圧の経時変化、各質点の相対変位応答、せん断ひずみ、液状化に伴う振動数特性の変化等から、定性的に液状化現象を表現できることが確認された。なお、解析用プログ

ラムは池田<sup>(8)</sup>が開発したものを、逐次積分はニューマークの  $\beta$  法によった。 $\beta=0.25$ 、時間刻み幅  $\Delta t=0.01$  秒とした。また減衰定数は臨界減衰の 2% とし、計算を安定させるために液状化発生後も初期の剛性の 3% を残すものとした。以上の検討から、Finn の有効応力解析法による応答解析結果を観測データとみなしても差し支えないと考え、図一 1 の対象地盤の解析を行っている。

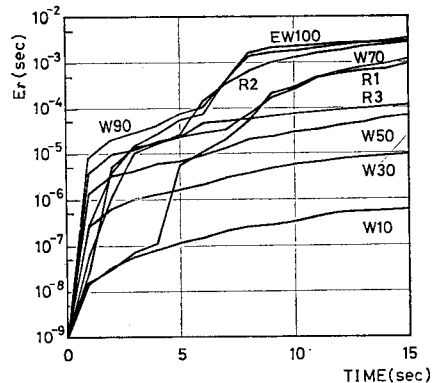
対象地盤を 1 自由度振動系にモデル化した。基盤入力加速度波形には以下に述べる 9 波を採用している。まず、振動数帯域が 0.01 Hz から 5 Hz の間でパワースペクトルが一定のホワイトノイズのサンプル波形を 5 波作成し、最大振幅値を 10, 30, 50, 70, 90  $\text{cm/s}^2$  と調整して採用した。波形が 30  $\text{cm/s}^2$  のホワイトノイズの場合には、W 30 などと記号で示すことにする。また、最大振幅値 100  $\text{cm/s}^2$  のホワイトノイズを形状関数を用いて非正常振幅特性をもたせた波形 EW 100 と実地震波形も用いている。実地震波形は、Millikan Library 地震記録 NS 成分 (最大振幅値を 100  $\text{cm/s}^2$  に修正, R 1)、Managua Nicaragua 地震記録 NS 成分 (最大振幅値を 100  $\text{cm/s}^2$  に修正, R 2)、El Centro 地震記録 NS 成分 (最大振幅値を 100  $\text{cm/s}^2$  に修正, R 3) の 3 波を用いた。以上合計 9 波の入力加速度波形を用い、Finn の方法で対象地盤の観測データを解析した。

さて、間隙水圧の上昇に伴う地盤の軟化現象は入力地震動が継続して作用し、その間せん断ひずみ振幅が変動して軟化を促進するものである。そこで、継続時間とひずみ振幅を組み込んだ物理量として次のせん断ひずみエネルギー  $E_r$  を定義して、各応答波形に対応したせん断ひずみエネルギーの経時変化を調べることとした。

$$E_r = \int_0^t \tau^2(t) dt; \text{ 次元 (s)} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\tau(t)$  は時間  $t$  におけるせん断ひずみ。

式 (1) は時間  $t$  の増加関数であり、時間  $t$  までの累積ひずみ蓄積量の指標となり、地盤の軟化現象、すなわち、間隙水圧の上昇、有効応力の減少に対して注入され



図二 せん断ひずみエネルギーの経時変化

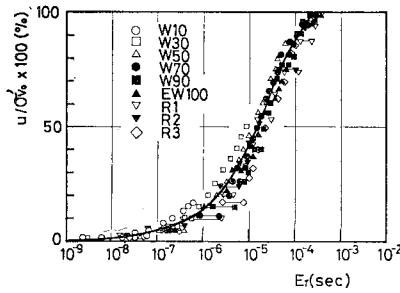


図-3 間隙水圧比-せん断ひずみエネルギーの経時変化

た全パワーと考えられる。

図-2 は各入力波形に対して応答せん断ひずみを求め、式(1)からせん断ひずみエネルギーを計算し、時間  $t$  に対して描いたものである。各入力波形ごとに異なるエネルギー蓄積の経時変化が読み取れる。図-2 は  $E_T$  の経時変化をみたものであるが、この  $E_T$  が間隙水圧の上昇に関与すると考えたのであるから、次に間隙水圧の経時変化を求め、 $E_T$  と共通の時間軸を消去して両者の関係を求めてみる。

図-3 は、初期有効応力  $\sigma'_{v0}$  を用いて過剰間隙水圧  $u$  を正規化した間隙水圧比と、せん断ひずみエネルギー  $E_T$  の関係を求めグラフで示したものである。同図は異なる入力ごとに求めた間隙水圧比とせん断ひずみエネルギーの関係が、多少の変動を伴うが1つの曲線上にプロットされることを示している。つまり、図-3 は入力波形とは独立に、せん断ひずみエネルギー蓄積量を知ることにより、この曲線を介して間隙水圧比の上昇を推定できることを示唆している。

### 3. 飽和砂質地盤の等価線形化

地震時における間隙水圧比の経時変化は、地盤の軟化の進行状況を示す重要な物理量であり、これを入力波形特性とは無関係にせん断ひずみエネルギー量の蓄積と関連させた1つの曲線で表わすことができた。そこで図-3の間隙水圧比とせん断ひずみエネルギーの関係を示す曲線が地盤応答特性を示す普遍的な基本関係式と考えられるならば、対象地盤を簡単な線形モデルで表現しても、そのモデルの動特性値をせん断ひずみエネルギーの関数としてとらえることが可能と推察される。すなわち、このモデルの動特性値が実地盤における間隙水圧比に対応した量であり、軟化現象を動特性値の変化から知ることができる。ここでは、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ずる現象を表現するために、応答変位の軸ずれ  $\alpha$  を考慮した、1自由度線形系システムで対象地盤を置き換えてみることにした。振動方程式は、次式で与えられる。

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

ここで 2. における入力地震動、応答波形が式(2)の入出力データであるとみなし、等価固有円振動数  $\omega_{eq}$ 、等価減衰定数  $\beta_{eq}$ 、および応答変位軸の軸ずれ  $\alpha$  を同定することとした。同定には、制御理論における拡張カルマンフィルタ<sup>15)~17)</sup>を用いている。詳細は文献15), 17)に委ね、ここでは手法の概略を述べるにとどまる。

拡張カルマンフィルタは、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、システム同定の漸化的なアルゴリズムから構成されるものである。

式(2)を状態空間表示で示すと

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

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

$$x_3 = \beta_{eq}, x_4 = \omega_{eq}, x_5 = \alpha$$

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

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

次に式(2)の特性値  $\beta_{eq}$ ,  $\omega_{eq}$ ,  $\alpha$  は、地盤の軟化に対応して経時変化するものとする。そのために、観測データの時間軸を区間に分割(0.5s~1.0s)し、各区間内は定常であるものとした。そして、観測データとして応答変位、応答速度を用い、各区間に対して式(4)を組み込んだ拡張カルマンフィルタにより同定を行った。

図-4 は、一例として R2 の入力波形に対して、入力加速度、応答変位、間隙水圧比、 $\beta_{eq}$  および  $\omega_{eq}$  の経時変化を示した。同図から、間隙水圧比の上昇とともに、 $\omega_{eq}$  は減少し、また  $\beta_{eq}$  は増加する傾向を示した。この傾向は、 $\omega_{eq}$  に対して、間隙水圧比の上昇により地盤が軟化する現象と対応がつく。また有効応力解析では、時間に対して一定の粘性減衰を考えていることから、履歴曲線(Hardin-Drnevich型)から生ずる履歴減衰が時間によって変化することになり、 $\beta_{eq}$  の増加は、履歴減衰量の増加によるものと判断できる。

間隙水圧比が60%程度以上に上昇すると、 $\omega_{eq}$  はその傾向が急激になり、 $\beta_{eq}$  は急激に減少する傾向となった。このことは、応答変位波形においても間隙水圧比が60%前後から急激に長周期化し、また軸ずれも伴うことから、動特性が急変したことが推察され、 $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  の傾向と対応がつく。また池田<sup>18)</sup>は、同拡張カルマンフィルタを用いて、 $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  が時間的に線形変化する仮定、

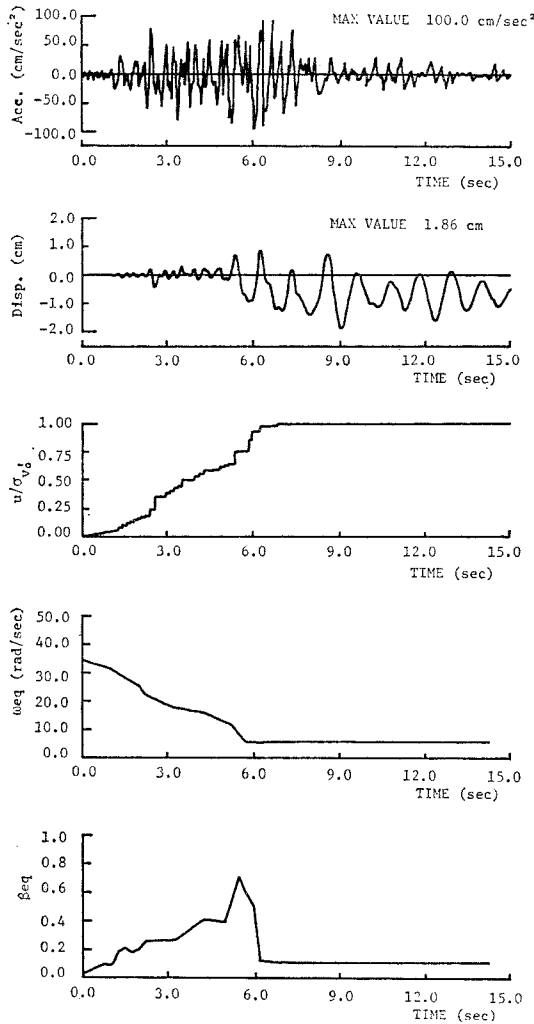


図-4 入力加速度，応答変位，間隙水圧比  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  の経時変化

$$\omega_{eq} = a_0 + a_1 t$$

$$\beta_{eq} = b_0 + b_1 t \quad (t; \text{時間})$$

のもとで  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  の同定を行った。しかしながら間隙水圧比が 60% 以上を生じた波形では、同定が不可能 ( $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  が発散する) であり、60% 以上の間隙水圧比を生ずる時間以後の波形をカットして同定を行った。このことから、間隙水圧比が 60% 以上になると、動特性が急変することがわかる。

間隙水圧比が 100% になると、 $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  は一定値となった。これは有効応力解析の計算では、100% 以後の応答計算においても安定を保つために、初期剛性に対して 3% の剛性を残して一定値にしているためである。この 3% は、固有円振動数で 5.93 rad/s となり、同定結果と一致する。

図-5, 6 は、すべての入力波形に対して、それぞれ

$\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  の経時変化を示したもので、間隙水圧比と対比して前例に示した R2 と、ほぼ同様な傾向を示した。以上により、液状化発生過程の物理現象は、等価線形モデルによって定性的に対応が付き、また  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  として定量的にも明らかにすることができた。

次に 図-2 の結果と 図-5 の結果から共通の時間軸を除き、両者の関係を求めてみた。図-7 はこのようにし

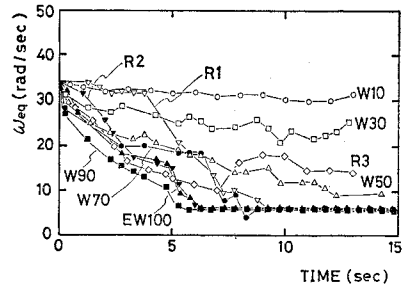


図-5  $\omega_{eq}$  の経時変化

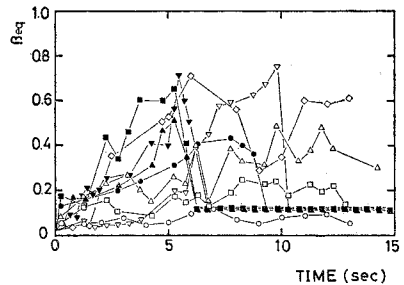


図-6  $\beta_{eq}$  の経時変化

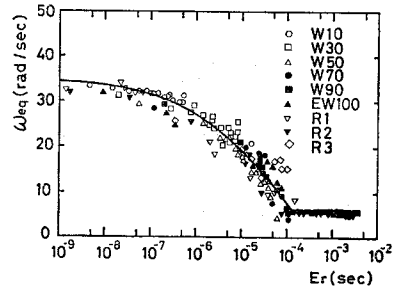


図-7  $\omega_{eq}-E_r$  曲線

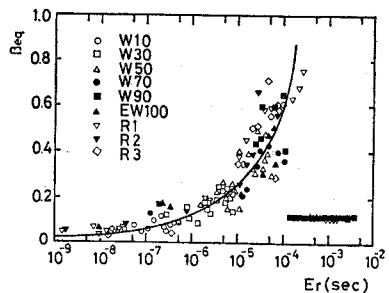


図-8  $\beta_{eq}-E_r$  曲線

て得られた  $\omega_{eq}$  とせん断ひずみエネルギー  $E_T$  の関係を示すものである。同様に 図-2 と 図-6 の結果を用いて  $\beta_{eq}$  と  $E_T$  の関係を求めると 図-8 のようになった。

図-7, 8 はともにばらつきがあるが, 図に示した曲線による傾向は明確に示されている。これらの曲線は  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  がひずみエネルギーの蓄積に対して, 入力波形特性に依存しない1つの関数で与えられることを示すものである。

以上により等価線形1自由度系モデルで液状化発生過程の動特性を表現することができた。

#### 4. 等価線形モデルおよび液状化予測の検証

ここでは, 図-7, 8 に示した等価線形モデルおよび図-3 を用いた液状化の予測に対する妥当性を検証する。検証方法は次のとおりである。まず初期値  $\omega_{eq}=34.33$  rad/s,  $\beta_{eq}=0.02$  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の蓄積量を算出する。図-7, 8 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  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  を求める。これらの値が初期値と異なるときには, これらの  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  を採用して再び同様の計算を行い, 等価線形モデルのせん断ひずみエネルギーを計算する。図-7, 8 に戻り, 対応する  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  を求める。もし  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  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。最後に, 最終的に得られたせん断ひずみエネルギー  $E_T$  を用い, 図-3 から対応する間隙水圧比を求める。

以上の等価線形化法によって求められたせん断ひずみ

エネルギーを, 対応する入力波形を用い, 有効応力解析法による計算から得られた継続時間  $T_d$  でのせん断ひずみエネルギーと比較する。両者が一致するならば, 等価線形モデルは妥当なものと判断する。同様に, 等価線形化法によって求められた間隙水圧比を, 有効応力解析法から算出された間隙水圧比と比較する。両者が一致するならば, 等価線形化法による液状化の予測が妥当であるものと判断する。

さて検証には, 表-2 に示した 18 ケースを用いた。同表から, 等価線形化法は, 有効応力解析法とほぼよい対応が付き, 等価線形モデルと液状化の予測に対する妥当性が検証された。

次に表中の3ケースについて, 等価線形化法の収斂過程を示す。

(1) 入力波形 W 10, 継続時間  $T_d=15$  s のとき

図-9 に示すように初期値  $\omega_{eq}=34.33$  rad/s,  $\beta_{eq}=0.02$  から計算を行い, 4 回の繰返し計算で収斂し, せん断ひずみエネルギー  $E_T$  は,  $7.02 \times 10^{-7}$  s となった。そして 図-3 から対応する間隙水圧比  $u/\sigma_{v0}'$  は, 0.110 となり, W 10 の 15 s 間の入力波形では, 間隙水圧比が 11% まで上昇することがわかる。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, それぞれ,  $E_T=5.94 \times 10^{-7}$  u/ $\sigma_{v0}'=0.163$  である。これより, 等価線形化法は, ほぼよい対応を示すことがわかる。

(2) 入力波形 R 1, 継続時間  $T_d=8$  s

図-10 から 4 回の繰返し計算で収斂し,  $E_T=3.00 \times$

表-2 等価線形化法と有効応力解析法との比較

入力加速度波形	等価線形化法				有効応力解析法	
	$T_d$ (s)	I.T. (回)	$E_T$ (s)	$u/\sigma_{v0}'$	$E_T$	$u/\sigma_{v0}'$
W 10	5	4	$1.88 \times 10^{-7}$	0.060	$1.67 \times 10^{-7}$	0.037
W 10	15	4	$7.02 \times 10^{-7}$	0.110	$5.94 \times 10^{-7}$	0.163
W 30	5	3	$1.84 \times 10^{-6}$	0.215	$1.65 \times 10^{-6}$	0.233
W 30	15	4	$1.08 \times 10^{-5}$	0.450	$9.45 \times 10^{-6}$	0.506
W 50	5	5	$7.57 \times 10^{-6}$	0.345	$6.91 \times 10^{-6}$	0.384
W 50	10	6	$3.31 \times 10^{-5}$	0.680	$3.09 \times 10^{-5}$	0.697
W 70	2	5	$8.83 \times 10^{-6}$	0.400	$9.90 \times 10^{-6}$	0.380
W 70	10	6	$2.08 \times 10^{-4}$	0.990	$2.62 \times 10^{-4}$	0.996
W 90	1	6	$6.37 \times 10^{-6}$	0.340	$8.58 \times 10^{-6}$	0.274
W 90	6	8	$9.18 \times 10^{-5}$	0.880	$1.11 \times 10^{-4}$	0.901
EW 100	1	4	$2.14 \times 10^{-7}$	0.068	$2.66 \times 10^{-7}$	0.060
EW 100	6	7	$6.80 \times 10^{-5}$	0.825	$7.42 \times 10^{-5}$	0.802
R 1	5	6	$4.98 \times 10^{-6}$	0.310	$5.75 \times 10^{-6}$	0.267
R 1	8	4	$3.00 \times 10^{-5}$	0.680	$5.53 \times 10^{-5}$	0.717
R 2	1	2	$7.23 \times 10^{-8}$	0.038	$6.01 \times 10^{-8}$	0.044
R 2	6	6	$7.10 \times 10^{-5}$	0.840	$1.48 \times 10^{-4}$	0.936
R 3	2	5	$1.51 \times 10^{-6}$	0.170	$4.99 \times 10^{-6}$	0.172
R 3	10	6	$1.00 \times 10^{-4}$	0.880	$7.48 \times 10^{-5}$	0.789

ただし,  $T_d$ =継続時間, I.T.=繰返し回数,  
 $E_T$ =せん断ひずみエネルギー,  $u/\sigma_{v0}'$ =間隙水圧比

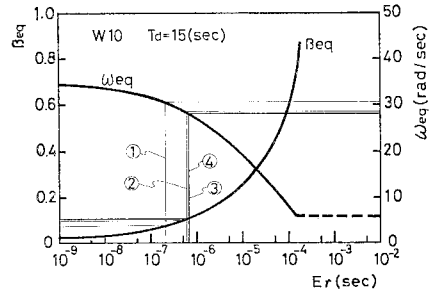


図-9 W 10,  $T_d=15$  s の場合

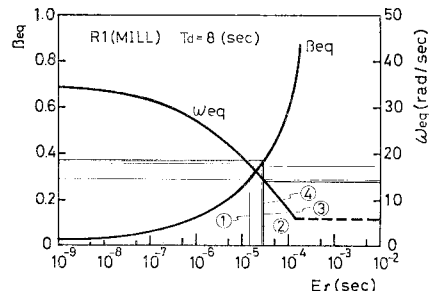


図-10 R 1,  $T_d=8$  s の場合

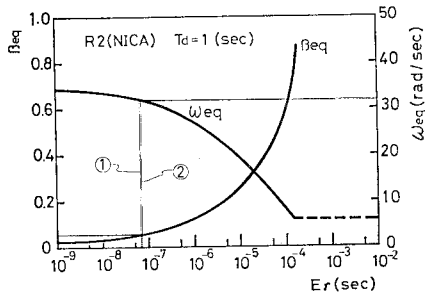


図-11 R2,  $T_d=1$  s の場合

$10^{-5}$  s, また 図-3 から  $u/\sigma_v' = 0.680$  となることからわかる。また有効応力解析法から,  $T_d=8$  s で,  $E_r=5.53 \times 10^{-5}$  s,  $u/\sigma_v' = 0.717$  となり, 等価線形化法がよい対応を示すことがわかる。

### (3) 入力波形 R2, 継続時間 $T_d=1$ s

図-11 から 2 回の繰返し計算で収斂し,  $E_r=7.23 \times 10^{-8}$  s また 図-3 から  $u/\sigma_v' = 0.038$  となることからわかる。また有効応力解析法では,  $T_d=1$  s で  $E_r=6.01 \times 10^{-8}$  s,  $u/\sigma_v' = 0.044$  となり, 等価線形化法が, よい対応を示すことがわかる。以上の検証から総合すると, 本論文で提案する等価線形モデルは, 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いえる。またこの検証手法を用いて, 等価線形化手法による応答の繰返し計算で, 液状化の予測を行うことができることを示すものである。

本研究の対象地盤は例題に過ぎない。多くの地盤種に対してここで示した等価モデルの考え方, 解析手法を適用するならば, 比較的単純な方法で地盤の液状化を判定できるものと思われる。

## 5. 結 び

非排水飽和砂質地盤を Finn の有効応力解析法でモデル化して, 地震入力に対する地盤応答を解析した。これから得られた応答波形を観測波形データとみなして, 軟化を伴う等価線形モデルの同定を行い, この単純なモデルが地盤応答特性の本質を総合的に表現し得るものであることを明らかにした。地盤の軟化現象がせん断ひずみエネルギー蓄積によって判断できることを, 等価線形モデルの動特性値  $\omega_{eq}$ ,  $\beta_{eq}$  とせん断ひずみエネルギーとの関係を導くことによって明らかにした。最後に, 等価線形モデルの検証を行い, 地盤液状化の予測に有用な手段となることを示した。

本方法は, 非線形応答計算の等価線形による応答計算法に対する拡張といえる。特徴としては, 非線形問題ではせん断剛性および減衰のひずみ依存カーブに対して, ひずみエネルギー依存カーブとして表現した点と, 間隙

水圧比のひずみエネルギー依存カーブを加えた点にある。非線形問題の等価線形化法は, せん断剛性, 減衰のひずみ依存カーブを各地盤種に対して, 動的三軸試験から求めておき, これらのカーブを用い応答計算を行う。本方法では, 同様に, せん断剛性, 減衰および間隙水圧比のひずみエネルギー依存カーブを, 各地盤種および拘束圧に対して動的三軸試験から求めておく。これらのカーブは, 動的三軸試験のテストピースを 1 自由度系のシステムとして拡張カルマンフィルターを用いて求める。このようにして求められたカーブを用いれば, 液状化を伴う多層地盤の等価線形化法による応答計算が可能である。

なお, 等価線形モデルの同定に用いた拡張カルマンフィルターの詳細は, 主題の地盤軟化現象をマクロ的にとらえる目的から離れるので, 参考文献 15)~17) へ委ねることとした。

本研究は, 武蔵工業大学応用力学研究室における構造系の同定に関する総合研究のうちで, 液状化地盤特性に関する研究をまとめたものである。

本研究を遂行するに際し, 計算は大学院生, 池田君(現在神奈川県), 山崎君, 丸山君に協力いただいた。ここに感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 土質工学シリーズ, 技報堂, 1980.
- 2) 石原研一: 液状化を考慮した地盤の応答解析法, 土と基礎, Vol. 29, No. 11, pp. 85~91, 1981.
- 3) 柴田 徹・岡二三生: 液状化のメカニズム, 土と基礎, Vol. 29, No. 9, pp. 83~90, 1981.
- 4) Ishihara, K. and I. To-hata: Effective stress method in one-dimensional soil response analysis, Proc. 7th World Conf. on Earthquake Eng. Istanbul, pp. 73~80, 1980.
- 5) Martin, G.R., W.D.L. Finn and H.B. Seed: Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, Proc. ASCE, Vol. 101, No. GT 5, pp. 423~438, 1975.
- 6) Oh-oka, H.: Drained and undrained stress-strain behavior of sands subjected to cyclic shear stress under nearly plane strain conditions, 土質工学論文報告集, Vol. 16, No. 3, pp. 19~31, 1974.
- 7) Bazant, Z.P. and R.J. Krizek: Endochronic constitutive law for liquefaction of sand, Proc. ASCE, Vol. 102, No. EM 2, pp. 225~238, 1976.
- 8) Zienkiewicz, O.C., C.T. Chang and H. Hinton: Non-linear seismic response and liquefaction, Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 2, pp. 381~404, 1978.
- 9) Finn, W.D.L. and S. Bhatia: Endochronic theory of sand liquefaction, Proc. 7th World Conf. on Earthquake Eng., Istanbul, pp. 149~153, 1980.
- 10) 西 好一・江刺端行: くり返し荷重下での永久変形に着目した土質材料の動的強度-変形特性, 電力中央研究所報告, 380048, 1981.
- 11) Sato, T., T. Shibata and M. Kosaka: Dynamic behavior and liquefaction of saturated sandy soil, Proc.

- Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, Vol. 2, pp. 523~532, 1980.
- 12) Sato, T., T. Shibata and R. Ito : Dynamic behavior of sandy soil and liquefaction, Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, St. Louis, pp. 683~686, 1981.
  - 13) Oka, F. and H. Washizu : Constitutive equation of sands and overconsolidated clays under dynamic loads based on elasto-plasticity, Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, St. Louis, pp. 71~74, 1981.
  - 14) Finn, W.D.L., K.W. Lee and G.R. Martin : An effective stress model for liquefaction, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT 6, pp. 517~533, 1977.
  - 15) Jazwinski, A.H. : Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 1970.
  - 16) 有本 卓 : カルマンフィルター, 産業図書, 1979.
  - 17) 星谷 勝・齊藤悦郎 : 拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, No. 339, 1983年11月.
  - 18) 池田雅己 : 液状化を伴う地盤応答の等価線形特性, 武蔵工業大学土木工学科修士論文, 昭和57年度.  
(1983.4.9・受付)
-