

# エネルギーに基づく液状化評価法による発生ひずみ・沈下量の簡易計算と 既往事例への適用

國生剛治<sup>1</sup>

1 中央大学名誉教授

## 概 要

筆者らは応力よりも直接的に液状化を支配する物理量として累積損失エネルギーに着目し、それと直結する累積ひずみエネルギーを地震上昇エネルギーと比較することにより簡便に液状化判定できるエネルギー法の手順を既に提示し、広範な地震動を対象とした適用例によりその有効性を示した。ここでは上昇エネルギーが定量化できる本方法の特徴をさらに生かし、既提案法で液状化すると判定された各層にエネルギーが均等に配分されると考えることで、複雑な有効応力動的応答解析に依らずとも、発生するせん断ひずみだけでなくそれに直結した体積ひずみや地表沈下量が計算できる評価手順を開発した。これを上記エネルギー法で既に検討した仮想均質地盤や既往液状化地盤に再度適用したところ、弱い層へのひずみの集中化が評価されると共に実測値とほぼ整合する沈下量が簡便に計算できることが分かった。

キーワード：液状化判定法、波動エネルギー、損失エネルギー、ひずみエネルギー、応力ひずみ履歴ループ

## 1. はじめに

エネルギーによる簡易液状化判定法は、現在定着している応力法（FL法）とは異なり地震動ごとの波形に対する調整パラメータを必要とせず、損失エネルギーのみで液状化挙動を一意的に評価できるため、多岐にわたる地震動へ広く適用できる手段として普及することが期待される。

筆者らは既にエネルギーによる判定法を提案し、モデル地盤に適用してFL法と比較することによりその適用性と特徴を調べた<sup>1)</sup>。すなわち、継続時間や卓越振動数の異なる地震動を均質モデル地盤に入力し比較すると共に、近年の地震で液状化した地盤モデルに近傍で観測された地震波を入力して実際の液状化挙動と対比した<sup>2)</sup>。

その結果、現行のFL法と提案したエネルギー法は幾つかの代表的地震動について類似の判定結果を与え、ある程度の整合性が確認できた。しかし、加速度が小さい割に周期や継続時間が長くエネルギーが大きい、あるいはその逆の特徴を持つ地震動では両者の差は大きくなり、FL法での等価せん断応力振幅の補正ではそのギャップを調整できなくなる場合があるのに対し、エネルギー法では波形に依らず液状化挙動が再現できることが分かった。

一般的にエネルギー法の基本原理は応力法と似て、地

盤各層の液状化エネルギー容量（損失エネルギーによる）と供給エネルギー（地震波エネルギーによる）との大小関係を比較することである。

筆者らのエネルギー法<sup>1)2)</sup>では地震動による上昇波エネルギーと地盤各層での液状化による損失エネルギーの評価に幾つかの単純化を導入することにより直接対比することを可能にしている<sup>3)</sup>。また、地震動が決まっていなくても上昇波のエネルギーをマグニチュードや震源距離などから算定することにより<sup>4)5)6)</sup>液状化判定が行える点は大きな長所である。しかし現状では両エネルギーの対比により、地層ごとの液状化（両振幅軸ひずみ5%または両振幅せん断ひずみ7.5%で定義する初期液状化）の有無を判定するまでに留まっている。

ここではさらに、地盤へ供給される地震エネルギーの総量が上昇波で規定できるという本エネルギー法の特徴を生かし、既に提案したエネルギー法<sup>1)</sup>で液状化すると判定された各層に対する地震エネルギーの配分割割に単純なルールを導入することにより、液状化による発生ひずみ量や沈下量まで算定できる方法を提案する。またその有効性を調べるため、筆者らが既に報告してきた液状化判定事例に再適用し、各層の発生ひずみを評価するとともに、それに基づいて地表沈下量を算定し、実測値との対比を行う。

## 2. エネルギー法での液状化評価手順

発生ひずみ算定法の説明に入る前に、既提案のエネルギーによる液状化評価（以下、1次評価と称する）の手順を、これまでに発表してきた論文<sup>1)2)3)</sup>をベースに、最近新たに加わった知見を加え以下に簡単に再整理する。

### 2.1 評価手順の要約

手順-1：

対象地盤を標準貫入試験などの調査間隔に対応して同一厚さ（ $H=1\sim 2\text{m}$ 程度）の水平層に分割する。

手順-2：

応力法と同様に、各層についての  $N$  値と  $F_c$  から繰返し回数  $N_c=20$  回（または 15 回）の液状化応力比  $R_{L20}(R_{L15})$  を計算する。これから液状化発生（軸ひずみ  $\varepsilon_{DA}=5\%$  で規定）に対する基準化累積損失エネルギー  $\sum \Delta W/\sigma'_c$ （以下では「損失エネルギー」とも略称）を最近行われた多数の原位置コア採取試料についての液状化試験結果<sup>7)</sup>の分析に基づく次式のいずれかにより決定する<sup>8)</sup>。

$$\sum \Delta W/\sigma'_c = 3.5(R_{L20} - 0.1)^2 + 0.008 \quad (1)$$

$$\sum \Delta W/\sigma'_c = 2.7(R_{L15} - 0.1)^2 + 0.008 \quad (2)$$

ここに  $\sum \Delta W$  は単位体積当たりの損失エネルギーで圧力と同じ次元を持ち、有効拘束圧  $\sigma'_c$  で基準化することで無次元化している。なお、液状化挙動が応力履歴に関わらずエネルギーでほぼ一意的に決まる<sup>9)</sup>ことを前提とすれば、 $R_{L20}$  による式(1)と  $R_{L15}$  による(2)は本来同じ損失エネルギーを与えることになるはずである。

手順-3：

損失エネルギー  $\sum \Delta W/\sigma'_c$  を賄うために使われる基準化累積ひずみエネルギー  $\sum W_*/\sigma'_c$ （以下では「ひずみエネルギー」とも略称）を 2.2 節（主要な式の根拠）の最後で述べている通り次式により算定することとする。

$$\sum W_*/\sigma'_c = 2 \times \sum \Delta W/\sigma'_c \quad (3)$$

ここに  $\sum W_*$  は上昇波エネルギー  $E_u$  と対比すべきひずみエネルギーであり、その定義は文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

手順-4：

各層の有効上載圧  $\sigma'_v$  から有効拘束圧  $\sigma'_c$  を静止土圧係数  $K_0$  により  $\sigma'_c = (1 + 2K_0)\sigma'_v/3$  で計算し、層の厚さ  $H$  とともに(3)式に乗じて各層の  $\sum W_*H$ （単位平面積当たりの液状化エネルギー容量）を算定する。

手順-5：

各層での上昇波エネルギー  $E_u$ （単位平面積当たりのエネルギー供給量）を計算する。そのため設計地震動により等価線形 1 次元重複反射解析を行い、各層での上昇波速度時刻歴  $\dot{u}$  と S 波インピーダンス  $\rho V_s$  より地震主要動の時間  $0 \sim t$  での時間積分により主要動終了時における最終累積上昇エネルギー  $E_{uf}$  を次式で求める<sup>9)10)</sup>。

$$E_{uf} = \rho V_s \int_0^t (\dot{u})^2 dt \quad (4)$$

あるいは、地点固有の設計地震動が与えられていない

場合には、地震基盤（地盤密度  $\rho=2.7 \text{ t/m}^3$ ,  $V_s=3000 \text{ m/s}$  に設定）での入射エネルギー  $E_{IP}$  を以下の良く知られた経験式で計算する<sup>4)5)6)</sup>。

$$E_{IP} = E_{Total}/(4\pi R^2) \quad (5)$$

$$\log E_{Total} = 1.5M + 1.8 \quad (6)$$

ここに式(5)は実体波のエネルギー放出中心からの球面伝播を仮定して、単位面積当たりの波動エネルギー  $E_{IP}$  ( $\text{kJ/m}^2$ ) を全放出エネルギー  $E_{Total}$  ( $\text{kJ}$ ) と放出中心からの等価震源距離  $R$  ( $\text{m}$ ) により求めるものである。 $E_{Total}$  は、地震マグニチュード  $M$  から Gutenberg<sup>11)</sup> の式(6)により計算される。また任意の層での上昇波エネルギー  $E_u$  と地震基盤の入射エネルギー  $E_{IP}$  との比  $\beta=E_u/E_{IP}$  は、対応する 2 層のインピーダンス  $\rho V_s$  の比  $\alpha$  により

$$\beta = \alpha^{0.70} : \alpha < 1.0 \quad (7)$$

で計算できる<sup>5)6)10)</sup>。

手順-6：

各層について液状化エネルギー容量  $\sum W_*H$  と最終累積上昇エネルギー  $E_{uf}$  の比  $\sum W_*H/E_{uf}$  を計算し、その値が小さい層ほど早く液状化し易いと考え、各層に  $i=1, 2, 3, \dots$  の番号付けをする。その順に各層の  $\sum W_*H/E_{uf}$  の値を加え合わせ、その累計（累積エネルギー比と呼び  $AER$  と表す） $\sum_i (\sum W_*H/E_{uf})_i$  が次式のように 1.0 に達するまでの層が液状化すると考える。

$$\sum_i (\sum W_*H/E_{uf})_i \equiv AER \leq 1.0 \quad (8)$$

つまり、地震上昇波エネルギーが液状化エネルギー容量を賄える限界の層数までは液状化すると考える。

すなわち、応力法 (FL 法) の各層での FL 値とは異なり、エネルギー法では各層でのエネルギー比  $\sum W_*H/E_{uf}$  により判定するのではなく、地盤に供給される上昇波エネルギーの総量を使ってエネルギー比の小さい層から順に液状化してゆき、エネルギー比の累積値  $\sum_i (\sum W_*H/E_{uf})_i$  が 100% までの範囲に入った層が液状化すると考えるため、個々の層だけでなく全体の層構成が判定結果に関わってくることになる点が大きな特徴である<sup>9)</sup>。

### 2.2 主要な式の根拠

ここで上記手順で示した重要な式について、既発表論文<sup>1)2)3)</sup>に最近得られた新たな知見を反映させながら、それらの根拠を再確認しておく。

まず液状化応力比  $R_L$  より液状化損失エネルギー  $\sum \Delta W/\sigma'_c$  を算定する式(1), (2)であるが、2011 年東北地方太平洋沖地震後に土木研究所により行われた多数の様々な密度や粒度、粘性、年代効果を有する現地ボーリングコア採取試料の三軸液状化試験の総合報告書<sup>7)</sup>のデータに基づいて谷本・國生<sup>8)</sup>により提案された式である。

以前に國生<sup>1)</sup>は液状化強度比が小さな緩い室内調整試料砂の三軸液状化試験から、繰返し応力比 CSR（あるいは

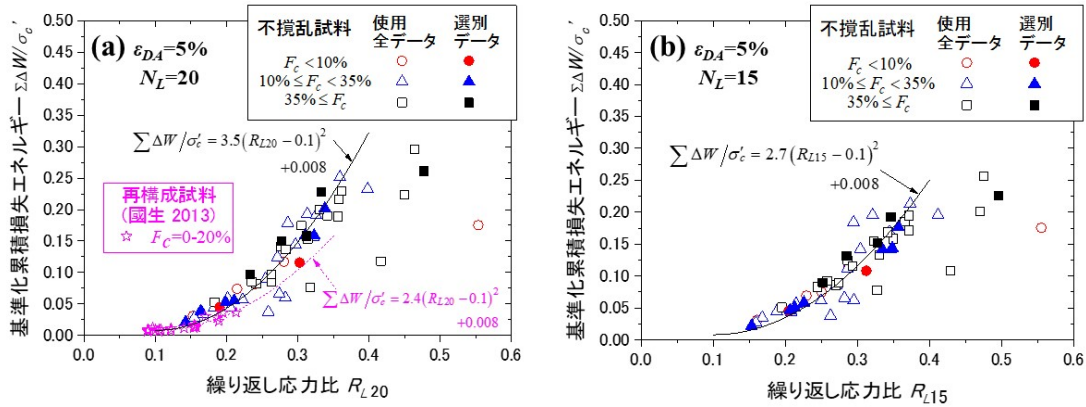


図1 両振幅軸ひずみ  $\varepsilon_{DA}=5\%$ に対応する繰返し応力比と基準化累積損失エネルギーの関係：(a)  $R_{L20}$ 、(b)  $R_{L15}$ 。

液状化までの繰返し回数  $N_L$  の違いに関わらず損失エネルギーと両振幅軸ひずみ  $\varepsilon_{DA}$  の間にはほぼ一意的関係が成り立つことを示した。一方、上述のコア採取試料では液状化強度比  $R_L$  が大きなものほど  $CSR$  が大きい ( $N_L$  が小さい) と特定の軸ひずみに達するためのエネルギーは小さくなり、エネルギーによる液状化挙動の一意性が見られないことが分かった<sup>12)</sup>。そしてこの特徴は、繰返し三軸試験結果で良く見られる軸ひずみが伸張側に偏って発生する現象と相関があることが見出された<sup>8)</sup>。それに対し、地盤が地震時に SH 波を受ける場合の応力の再現性に優れた中空ねじり繰返しせん断試験では、 $CSR$  (あるいは  $N_L$ ) に依らずエネルギーの一意性がみられることも確認された<sup>8)</sup>。

そこで多数の原位置採取試料の三軸試験データに基づき、FL 法で通常選ばれる  $N_L=20$  回あるいは 15 回の応力比  $CSR=R_L$  に着目して  $\Sigma \Delta W / \sigma'_c \sim CSR$  関係を指数関数で近似し、 $CSR=R_{L20}$  または  $CSR=R_{L15}$  に対応する  $\Sigma \Delta W / \sigma'_c$  を算定したところ、 $R_{L20}$  または  $R_{L15}$  との間に図 1(a)(b) のようなほぼ一意的関係が得られた<sup>8)</sup>。このうち白抜きのプロットは

使用した全データでありコア採取試料特有のばらつきが大きい、そのうち試料の乱れが小さく均質性が高いなどの観点から選別された塗りつぶしプロットについては細粒分の違いに依らず特に一意性が高いことが分かる<sup>8)</sup>。

なお、図 1(a)の星印プロットは以前に行われた室内調整砂のデータであり、破線で示す式

$$\Sigma \Delta W / \sigma'_c = 2.4(R_{L20} - 0.1)^2 + 0.008 \quad (9)$$

により  $R_{L20} \leq 0.22$  の範囲で近似できるとされた<sup>1)</sup>。原位置試料の選別データについてはこれと調和的ではあるがやや大きめのエネルギーを与える傾向があり、室内調整試料との整合性も考慮し係数値を 2.4→3.5 に調整して良い相関 (決定係数  $R^2=0.92$ ) が得られる式(1)により近似することとした<sup>8)</sup>。同様に  $CSR=R_{L15}$  に対応する液状化エネルギー容量と  $N_L=15$  回の強度  $R_{L15}$  の関係については図 1(b) のようにプロットされ、その相関式は式(2)のように得られる (決定係数  $R^2=0.92$ )<sup>8)</sup>。

次に式(3)の根拠について確認する。図 2(a)は典型的な三軸液状化試験での応力ひずみ関係を例示している。載荷 1

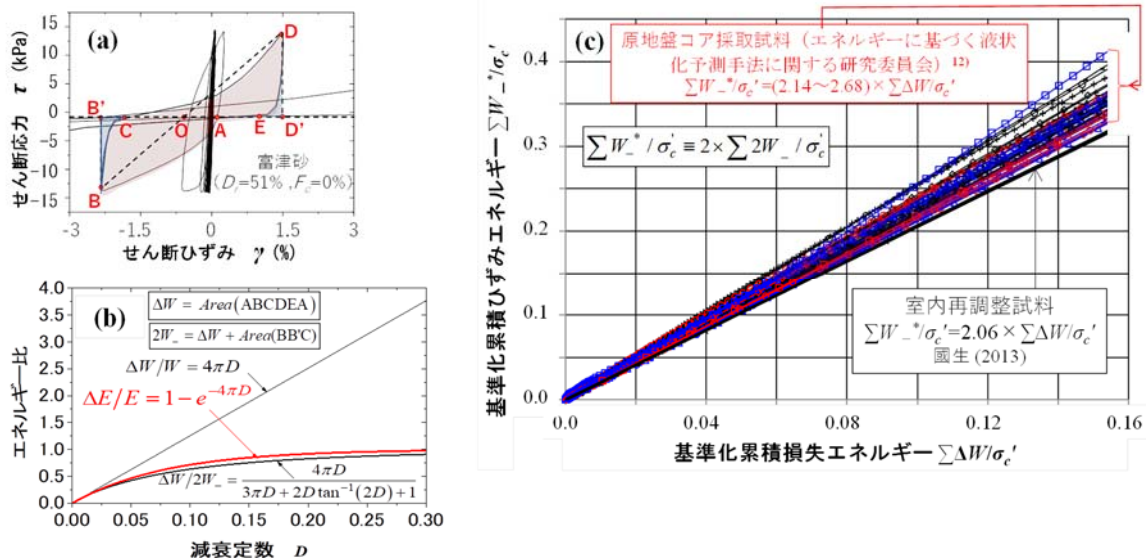


図2 液状化要素試験での損失エネルギーとひずみエネルギーの関連(a)、粘弾性体の繰返し荷重試験と波動伝播での理論エネルギー比の対比<sup>3)</sup>(b)、原地盤コア採取試料の三軸試験<sup>12)</sup>による  $\Sigma \Delta W / \sigma'_c$  と  $\Sigma W_c / \sigma'_c$  の関係 (c)



サイクルでの損失エネルギー $\Delta W$ は図形 ABCDEA の面積として次式で表される。

$$\Delta W = \text{Area}(\text{ABCDEA}) \quad (10)$$

この $\Delta W$ を賄うのはひずみエネルギー $W$ であり、 $\Delta W$ と $W$ の関係が必要となる。通常は例えば減衰定数 $D$ の定義式のように三角形 OBB'または ODD'の面積に対応した半サイクルの弾性ひずみエネルギー $W$ を考慮することが多い。

$$D = \Delta W / (4\pi W) \quad (11)$$

$\Delta W$ が小さくそれを賄うひずみエネルギー $W$ への影響が無視できる範囲についてはこれで問題ないが、 $\Delta W$ が図 2(a)のように大きくなると1サイクルでのひずみエネルギー $W$ は図形 BB'CDD'EA の内部面積で計算される<sup>3)</sup>。このうち前半 1/2 サイクルにおける面積 BB'C については損失せず回収され後半 1/2 サイクルの面積 DD'E に充てられると解釈できるため、1 サイクル中で $\Delta W$ を賄うのに必要なひずみエネルギーを $2W_-$ と表記すると、それは次式となる。

$$\begin{aligned} 2W_- &= \text{Area}(\text{BB'CDD'EA}) - \text{Area}(\text{BB'C}) \\ &= [(\Delta W + \text{Area}(\text{BB'CDD'EA}))] / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

したがって、式(10), (12)から損失エネルギー $\Delta W$ と $2W_-$ との比 $\Delta W / 2W_-$ が計算できる。

一方、地盤を内部減衰定数 $D$ の粘弾性体とした場合に1次元波動伝播中の波動損失エネルギー $\Delta E$ の上昇波エネルギー $E_u$ に対するエネルギー比は次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\Delta E / E_u = 1 - e^{-4\pi D} \quad (13)$$

図 2(b)には式(13)による波動エネルギー比 $\Delta E / E_u$ と $D$ の関係を示すが、 $D \neq 0$ では式(11)による $\Delta W / W = 4\pi D$ と一致することが分かる。また粘弾性体について式(10), (12)を用いて計算した損失エネルギー比 $\Delta W / 2W_-$ と $\Delta E / E_u$ は多少のズレはあるものの広い $D$ の範囲でほぼ一致する<sup>3)</sup>。これが本エネルギー法で波動エネルギーとひずみエネルギーを比較して液状化判定する理論的根拠となっている。

図 2(c)は室内調整試料<sup>3)</sup>と原位置採取試料<sup>12)</sup>の三軸液状化試験データを用いて $\Delta W$ と $2W_-$ の各サイクルでの累

積値を式(10), (12)で計算して $\sigma'_c$ で基準化し、 $\sum \Delta W / \sigma'_c$ と $\sum W_-^* / \sigma'_c$ を横軸と縦軸にプロットしている。その際、

$$\sum W_-^* = \sum 2W_- \times 2 \quad (14)$$

により $\sum W_-^*$ を新たに定義し直している。これは表層地盤において $E_u$ のうち実際に損失エネルギーに対応したひずみエネルギー $\sum 2W_-$ を賄うことができるのは50%としていたためであり、詳細は文献<sup>3)</sup>を参照願いたい。

図 2(c)より両者の関係は室内調整試料のみならず多様性に富んだ原位置試料( $N_1=0.9\sim 11$ ,  $F_c=1.1\sim 99\%$ ,  $I_p=0\sim 50$ )についても相関性の高い比例関係となることが分かる。つまり、液状化による損失エネルギーとそれを賄うひずみエネルギーの間に、1 サイクル毎の $\Delta W$ ,  $W_-^*$ だけでなくそれらの累積値 $\sum \Delta W$ ,  $\sum W_-^*$ についても液状化の全過程を通して一定の比例関係が成り立つことを意味している。室内調整試料<sup>3)</sup>では $\sum W_-^* = 2.06 \times \sum \Delta W$ 、原位置試料<sup>12)</sup>では土質の多様性を反映し $\sum W_-^* = (2.16 \sim 2.68) \times \sum \Delta W$ と幅はあるが、いずれも2に近い比例定数が得られる。

これより式(14)を考慮すると $\sum W_-^* / 2 = \sum 2W_- \approx \sum \Delta W$ となり、外部から供給するひずみエネルギー $\sum 2W_-$ と対応する損失エネルギー $\sum \Delta W$ はほぼ等値となる。つまり損失エネルギーと外部供給エネルギーは液状化全過程を通じてほぼ1:1であることになる。さらにひずみエネルギーを波動エネルギーと対比する際に、両者での载荷メカニズムが同一ではないため図 2(b)のように $\Delta E / E_u$ と $\Delta W / 2W_-$ が完全には一致しないことも考慮し、式(3)のように比例定数を2と定めることとする。

### 3. 液状化層でのせん断ひずみ算定法

前述の評価手順-6 の式(8)では上昇エネルギーの総量が液状化による損失エネルギーを賄える限界までの層は液状化するとしている。この際、液状化すると判定された層については初期液状化条件( $\gamma_{DA}=7.5\%$ )に対応した損失エ

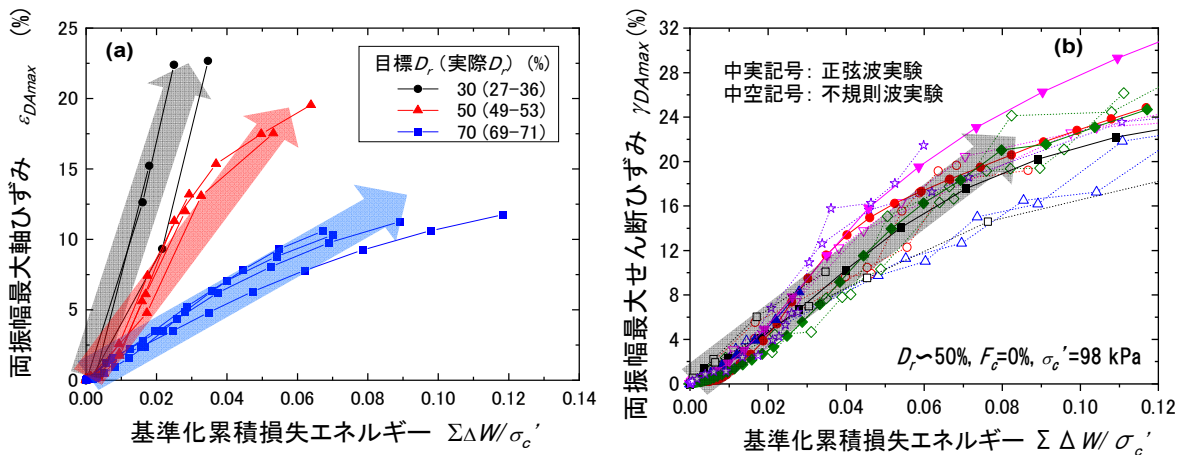


図3 損失エネルギーと発生ひずみの関係: (a) 3種類の $D_r$ の砂の正弦波三軸試験, (b)  $D_r=50\%$ の砂の正弦波と地震波による中空ねじりせん断試験

エネルギー  $\sum \Delta W$  を液状化するためのエネルギーの所要量と考え、上昇エネルギー総量  $E_u$  により最大限液状化させられる層の範囲を評価していることになる。

繰返しになるが、本エネルギー法の特長は地震上昇波によりサイト地盤に供給される上昇エネルギーの総量が決められる点である。この長所をさらに生かす方法として、損失エネルギー  $\sum \Delta W$  と発生する両振幅最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  の関係を使い、各液状化層での発生ひずみを評価することが考えられる。

図 3(a)には目標相対密度  $D_r \approx 30, 50, 70\%$  の室内調整砂について正弦波载荷の三軸液状化試験による  $\sum \Delta W/\sigma'_c$  と  $\varepsilon_{DAmax}$  の関係<sup>1)</sup>を示す。これより損失エネルギーと両振幅最大ひずみの間には目標  $D_r$  の設定誤差によるバラツキはあるが、同じ密度の砂であれば振幅・繰返し回数に依らずほぼ一意的関係が成り立つというエネルギー法のメリットが明瞭に読み取れる。また図 3(b)は  $D_r \approx 50\%$  の室内調整砂の中空単純せん断液状化試験による正弦波・不規則波载荷での  $\sum \Delta W/\sigma'_c$  と  $\gamma_{DAmax}$  の関係<sup>13)</sup>であり不規則波では正弦波よりバラツキが大きい、工学的には同一の関係として近似可能と思われる<sup>13)</sup>。そして両図共に損失エネルギー  $\sum \Delta W/\sigma'_c$  と発生ひずみの間には多少の非線形性はあるものの、実用的には図中に記入した矢印の帯のように比例関係で近似できることも分かる。

勿論、通常の室内要素実験で達成できるひずみには限界があり、このような比例関係がどの程度の大ひずみまで当てはまるかは室内試験法自体の問題点も含め今後の検証課題であるが、今回はひずみの大きさに関わらず単純な比例関係を仮定している。

液状化層が単一の場合には図 3 のような関係により  $\sum \Delta W/\sigma'_c$  から  $\varepsilon_{DAmax}$  または  $\gamma_{DAmax}$  が算定可能であることは容易に分かる。いっぽう液状化層が複数ある地盤条件では、各層への上昇エネルギーの配分量は地盤条件と地震条件により大幅に変動すると考えられる。その評価のためには液状化の発生過程を組み込んだ信頼性の高い有効応力動的解析を異なるサイト・地震動ごとに行う必要があるが、それでは簡易評価法では無くなってしまう。ここではそれに代わる第一近似として、前述の 1 次評価により液状化するとされた複数の層の間で上昇エネルギーが均等配分されると仮定し、以下の 2 次評価によりひずみ発生量を算定することを考える。この配分割合は地盤や地震動に依存して実際は変動するため、ここで設定したエネルギーの各層均等配分方式はあくまで第一次近似ではあるが、これにより 1 次評価より実現現象に近づくことは期待できよう。

手順-7 :

手順-6 で液状化すると判定された層 (総数  $m$ ) のみを

対象にして、基盤での波動エネルギー  $E_{uf}$  が  $E_{uf}/m$  ずつ均等に分割されて上昇し、第  $i$  層には  $(E_{uf})_i/m$  が到達すると考える。

手順-8 :

損失エネルギー  $\sum \Delta W$  と最大両振幅ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  の間には図 3 に示すように振幅・波形などに依らずほぼ一意的比例関係があり、さらに図 2(c)により  $\sum \Delta W$  とひずみエネルギー  $\sum W^*$  の比例関係も成り立つ。したがって、第  $i$  層での最大両振幅ひずみ  $(\gamma_{DAmax})_i$  はその層への上昇エネルギー  $(E_{uf})_i/m$  と初期液状化 ( $\gamma_{DA} = 7.5\%$ ) に対応したエネルギー容量  $\sum (W^*H)_i$  を用いて次式で算定できる。

$$(\gamma_{DAmax})_i = 7.5\% \times (E_{uf})_i / m / \sum (W^*H)_i \quad (15)$$

#### 4. 地盤沈下量の評価

液状化する各層ごとに発生最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  が算定できれば、 $\gamma_{max}$  と体積ひずみ  $\varepsilon_v$  の関係を用いて各層での体積ひずみを計算することができる。 $\gamma_{max} \sim \varepsilon_v$  関係としては、細粒分を含まない富士川砂の再調整試料について不規則地震波形による繰返し単純せん断試験の結果をまとめた Ishihara & Yoshimine の設計用チャート<sup>14)</sup>が良く知られている。他にも、龍岡ら<sup>15)</sup>の浅間山砂再調整試料のねじりせん断試験による結果や、國生ら<sup>16)</sup>による豊浦砂や成田洪積不攪乱砂の三軸試験結果などがあるが、原地盤から採取した不攪乱試料についてのデータは極めて限られている。

ここでは土木研究所が東北地方太平洋地震後に行った多くの沖積・盛土・埋立地盤で原地盤でのボーリング孔から採取したコア試料の正弦波による応力制御三軸液状化試験<sup>7)</sup>に基づいて、繰返し载荷最終サイクルでの最大両振幅軸ひずみ  $\varepsilon_{DA}$  と試験後の圧密排水量から求めた体積ひずみ  $\varepsilon_v$  の関係を整理した。

報告書<sup>7)</sup>に記載された 52 試料 227 供試体の試験データは多地点の種々の深度に対応しており、同一深度の採取試料から切り分けた 3~5 供試体について原位置と同じ拘束圧条件で異なる繰返し応力比の液状化試験が行われている。繰返し载荷は両振幅軸ひずみ  $\varepsilon_{DAmax} = 10\%$  または载荷回数  $N_c = 500$  回を上限として行われた。関連する物理定数や直近で行われた標準貫入試験データも備わっている<sup>7)</sup>。

これらのデータについてまず液状化可能性の観点から、i) 液状化判定基準類で採用されている  $I_p < 15$ ,  $C_c < 10\%$  に該当しない、ii) 粘性土に近い乾燥密度  $\rho_d < 1.0 \text{ t/m}^3$ , iii) 载荷繰返し数  $N_c > 250$  でも  $\varepsilon_{DA} \approx 10\%$  に到達しないものを、を削除し 121 データに絞った。さらに、iv) 標準貫入試験  $N$  値測定時のサンプラー採取試料と直近同一深度のコア採取試料の間で細粒分含有率  $F_c$  の違いが過大 ( $\pm 20\%$  以上) で同一土質と見なせないもの<sup>8)</sup>, v) 三軸繰返し载荷での圧縮と伸張のひずみ比が 1:20 より過度に伸張側へ偏りが

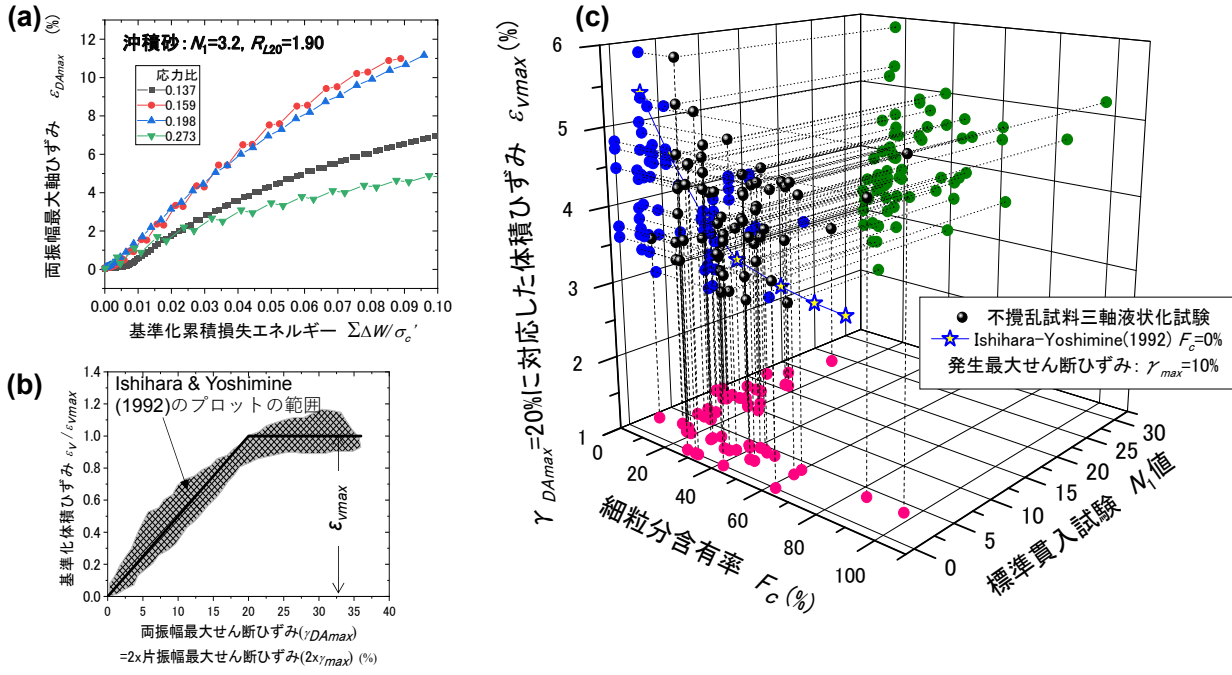


図 4 原地盤コア試料三軸液状化試験結果：(a)損失エネルギーと両振幅最大軸ひずみの関係例，  
 (b)基準化した液状化体積ひずみ  $\epsilon_v / \epsilon_{vmax}$  と両振幅最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  の概念的関係，  
 (c)液状化体積ひずみ  $\epsilon_v$  と標準貫入試験  $N_1$  値，細粒分含有率  $F_c$  との関係

あり体積ひずみはその影響を受ける可能性のあるもの、vi) 同一試料から切り分けた供試体相互間での物理特性が過度に隔たるもの、vii)  $F_c$  が大きいものほど  $N_1$  値が低下する全体的傾向から大きく外れるもの、について除外した結果、最終的に信頼性が比較的高い 66 データが選ばれた。この段階での主要パラメータの範囲は  $N_1=0\sim 23$ ,  $F_c=1\sim 97\%$ , 礫分含有率  $G_c=0\sim 57\%$ , 塑性指数  $I_p=0\sim 11$  であった。

これらの原位置採取試料についてはまず、室内調整砂について図 3 で示したような損失エネルギー  $\Sigma \Delta W$  と発生ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  の間のほぼ線形的な関係が成り立つかが問題となる。図 4(a)にはその代表例として基準化  $N$  値  $N_1=3.2$ ,  $R_{L20}=0.190$  の沖積砂試料の 4 段階の繰返し応力比による  $\Sigma \Delta W \sim \gamma_{DAmax}$  関係を例示している。図 3(a)と比較すると、原位置試料の不均一性によるバラツキは見られるものの、 $D_r=70\%$  程度の室内調整砂にほぼ対応した関係となっており、比例関係で近似できると見ることができよう。勿論、密度・細粒分・塑性などについて極めて多様性のある原位置試料についての三軸試験結果は幅広く変化するが、液状化し易い緩い砂質土以外は  $\gamma_{DAmax}$  に対する  $\Sigma \Delta W$  が非常に大きくなるため<sup>12)</sup>、線形近似が液状化予測結果に与える影響は小さいと考えられる。

以上の前提の下で、片振幅せん断ひずみ  $\gamma_{max}=10\%$  つまり両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}=20\%$  (ポアソン比  $\nu=0.5$  として両振幅軸ひずみ  $\epsilon_{DAmax} = \gamma_{DAmax} / (1 + \nu) = 13.33\%$ ) に対応した体積ひずみ  $(\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%}$  を両者の比例関係を仮定

して計算した。ここで  $\gamma_{DAmax}=20\%$  つまり  $\gamma_{max}=10\%$  に着目した理由は、Ishihara & Yoshimine の研究<sup>14)</sup>に基づいている。すなわち図 4(b)のようにハッチングで概念的に示したプロット範囲は  $\epsilon_v$  が  $\gamma_{max}$  に対しほぼ比例的に増加し、 $\gamma_{max}=10\%$  付近で一定となる関係が示されており、それが設計実務でも使われていることによる。

体積ひずみ  $(\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%}$  は種々の土質定数に支配されると考えられるが、その中から通常の標準貫入試験で容易に求められるものとして、基準化  $N$  値  $N_1$ , 細粒分含有率  $F_c$  (%), 礫分含有率  $G_c$  (%)に着目し、これら 3 変数による体積ひずみの重相関分析を行い次式が得られた。

$$(\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%} = 3.85 - 0.0562 \times N_1 + 0.0120 \times F_c + 0.0290 \times G_c \quad (16)$$

なお、 $(\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%}$ ,  $F_c$ ,  $G_c$  は供試体個別の測定値であるが、 $N_1$  については 1 供試体ごとに直近の同一深度で計測された共通の値を使っている。右辺の 3 変数のうち、通常の砂質地盤での液状化問題で関りが大きいのは  $N_1$  と  $F_c$  であり、 $G_c$  はその係数が 0.0290 で  $F_c$  の係数 0.0120 より大きいものの少数の礫質地盤を除いては  $G_c$  自体の値が小さいことが多いため実質的影響は小さいと考えられる。実際、今回の 66 データ中  $G_c > 10\%$  は 10 データのみで 41 データは  $G_c = 0\%$  であった。式(16)の決定係数は  $R^2=0.458$  であり決して高くはないが、原地盤の不均質性を考慮すればやむを得ないと言えよう。





### 5.1 均質地盤

はじめに、基準化  $N$  値  $N_1=8.0$ 、細粒分含有率  $F_c=0\%$  の均質モデル地盤に東北太平洋地震 ( $M=9.0$ ) の K-NET 浦安 EW 波を地表面から入力したケース<sup>1)</sup>を再度取り上げる。図 5(a)に示すように、基盤上に載る厚さ 10m の砂層を厚さ  $H=2\text{m}$  ずつの L1~L5 に分割し、地表に図 5(b)の実時間波形 (RT) と加速度振幅は変えず時間軸を 1/2 に圧縮した波形 (RT/2) の 2 種類を入力し、等価線形重複反射解析により各層での地震時せん断応力と図 5(c)に示す上昇エネルギーを計算している。

表 1 には前論文での応力法の評価結果<sup>1)</sup>との比較を含むエネルギー法による評価結果を示している。まず各層の  $N_1$  値と  $F_c=0\%$ より初期液状化に対応した液状化強度比  $R_{L20}$  を道路橋示方書の式<sup>17)</sup>により計算し、それに対応する損失エネルギー $\sum \Delta W/\sigma_c'$ については、今回は前論文<sup>1)</sup>で用いた室内調整試料による式(9)とは異なり原位置採取試料から誘導した式(1)により決定した。ひずみエネルギー $\sum W_*/\sigma_c'$ については前論文から見直した式(3)により損失エネルギー $\sum \Delta W/\sigma_c'$ から決定した。

地下水面以深の L2~L5 の判定結果を表 1 左寄りの応力法 (FL 法) の欄と右側のエネルギー法の液状化可能性 1 次評価の欄に RT と RT/2 入力に分けて示している。実時間地震波の RT 入力では、FL 法 ( $M=9.0$  に対応した地震時せん断応力低減率  $r_n=0.80$  を使用<sup>1)</sup>) とエネルギー法で液状化すると判定された層 (表 1 の陰影部分) は整合している。一方 RT/2 入力では、FL 法では  $M=7.5$  の地震に対応した  $r_n=0.65$ <sup>1)</sup> を使用しても液状化する層は RT 入力と大きくは変わらないのに対し、エネルギー法では図 5(c)から分かるように上昇エネルギーが 1/8 ほどに激減することにより液状化が浅部 L2 層のみに限定される。このようにエネルギー法では応力法に比べて地震波のエネルギーや振動数成分の違いを反映し易い点の特徴である。これらのエネルギー法の結果には本論文では前論文<sup>1)</sup>と異なり新たに式(1)、式(3)の見直しが反映されたにも関わらず、前論文<sup>1)</sup>とほぼ同じ知見が得られたことになる。

この結果を引き継いで、各層で発生する両振幅最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  を計算し、表 1 のエネルギー法の RT・RT/2 波形それぞれのひずみ評価欄に太字で示している。1 次評価で L2~L5 の 4 層が液状化すると結果となった RT 波形の場合には、手順-7 において  $m=4$  とした上昇エネルギー  $(E_{uf})/4$  を使い、式(15)により各層の最大発生ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  が計算される。その結果、液状化順位の高い層①では  $\gamma_{DAmax}=17.0\%$  の大きなひずみが発生するのに対し順位の低い層④では  $\gamma_{DAmax}=8.4\%$  と違いが現われる。つまり手順-6 までの 1 次評価に比べ、手順-7 以降の 2 次評価では液状化順位

の高い層でひずみが集中的に成長する傾向となる。これにより層ごとの液状化の激しさの差異が評価できる。

RT/2 波形の場合は 1 次評価での液状化は L2 層に絞られているため ( $m=1$ )、全上昇エネルギーは単一層のみで使われ、複数層へのエネルギー配分の仮定なしに式(15)を使って  $\gamma_{DAmax}=9.3\%$  のひずみ発生量が決まることになる。

次に、手順-7, 8 で計算された最大せん断ひずみから液状化による地表面沈下を手順-9, 10 により算出した結果を表 1 の RT と RT/2 の沈下量評価欄にそれぞれ示す。まず式(16)により  $N_1=8$ ,  $F_c=0\%$ ,  $G_c=0\%$  と設定することにより両振幅最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}=20\%$  に対する体積ひずみ (上限値) が  $(\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%}=3.4\%$  と計算される。さらに式(17)により各層の最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  から体積ひずみ  $\epsilon_v$  が計算され、この地盤モデルでの層厚  $H=2\text{m}$  を使って式(18)で沈下量が計算される。RT 波形と RT/2 波形についてそれぞれ  $S=16.2\text{cm}$  と  $3.2\text{cm}$  となり、同じ加速度の波形でありながら周期成分や上昇エネルギーの違いにより沈下量に大きな差異が生じるとの結果が得られる。

### 5.2 浦安市高洲小学校

次に、既に文献<sup>2)</sup>で検討対象とした千葉県浦安市の高洲小学校地盤が 2011 年東北地方太平洋沖地震で図 6(a)の写真のように大量の噴砂を伴い激しく液状化した事例について、引き続き発生ひずみや沈下量を計算する。

この地点は表 2 のように GL.-43.7m の礫質工学基盤上の陸上埋立層 (B1・B2)、浚渫埋立層 (F)、沖積層 (As・Ac) などからなり、そのうち GL.-1.5m の地下水面から GL.-16.0m までが液状化検討対象とされ、表 3 のように厚さ  $H=1.0\text{m}$  の等厚に分割しモデル化されている。細粒分が非常に多い層も含むが、大量の噴砂 (細粒分を含む) がすべて非塑性であったことから非塑性 (NP) と仮定している<sup>2)</sup>。まず各層の  $R_{L20}$  を  $N_1$  値と細粒分含有率  $F_c$  より道路橋示方書の式<sup>17)</sup>により算定し、さらに損失エネルギー $\sum \Delta W/\sigma_c'$ とひずみエネルギー $\sum W_*/\sigma_c'$ は式(1)と式(3)を使って  $R_{L20}$  より算定した。

この地点の GL.-14m に東京大学地震研究所が設置した地中地震計の加速度記録 (図 6(b)) を入力して等価線形重複反射解析を行い、各層での地震時せん断応力と図 6(c)に示す上昇エネルギーを計算した<sup>2)</sup>。これらより応力法とエネルギー法での液状化判定を行い、応力法 (応力低減係数  $r_n=0.80$ ) については前論文の結果と同一であるため割愛するが、GL.7~8m の 1 層を除きほぼ全層が  $F_L<1.0$  で液状化する結果が得られている<sup>2)</sup>。

エネルギー法については本論文では原位置試料データに基づき式(1)と式(3)を見直したため、表 3 の 1 次評価欄



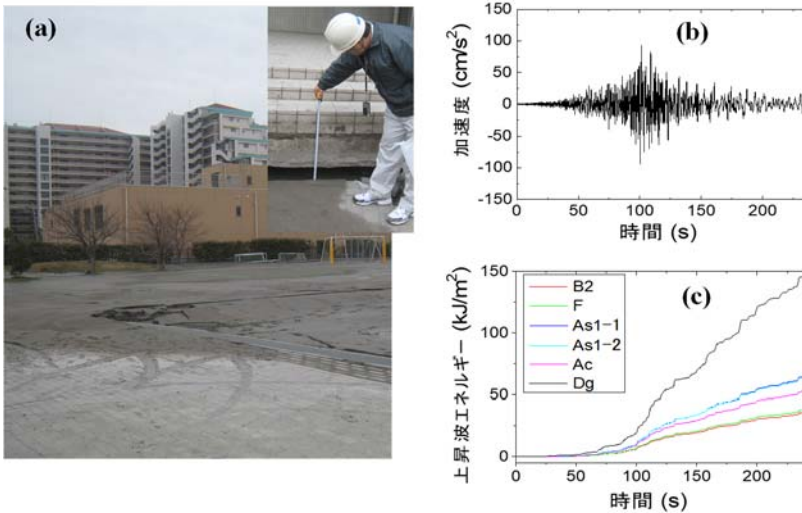


表2 浦安市高洲小学校の地盤条件

深度 (m)	層厚 (m)	土質	SPT-N	有効上載圧 $\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$N_i$
0.00					
1.50	1.5	B1	6.0	13.2	12.3
	2.2	B2	1.8	35.1	3.0
3.70	3.0	F	1.0	52.6	1.4
6.70	9.3	As1①	8.6	93.6	9.2
14.00 (Seism.)	2.0	As1②	8.6	102.4	8.7
16.00	19.7	Ac	0.9	192.6	0.6
35.70	3.0	As2	9.1	263.8	4.7
38.70	5.0	Nac	4.1	293.0	2.0
43.70		Dg	50.0		

図6 浦安市高洲小学校の液状化写真(a)と入力加速度波(b), 上昇波エネルギー時刻歴(c)

に陰影をつけて示すように液状化する層 ( $AER \leq 1.0$ ) の数は前論文<sup>2)</sup>の12層(①~⑫)から11層(①~⑪)に絞られる結果となった。

これ以降の発生ひずみ評価(2次評価)結果を表3の右寄りに太字で示す。上記の手順7)にしたがい  $m=11$  として各層に上昇する  $(E_{uf})_i/11$  のエネルギーがその層ですべて使われると考えると、式(15)により  $\gamma_{DAmax}$  が計算される。 $AER$  の小さい順に①~⑥は1次評価で設定した7.5%を超えるひずみが発生し、⑦~⑪については7.5%を下回り初期液状化に達しないこととなる。つまり1次評価で液状化するとされた11層から、2次評価ではひずみが集中化して陰影をつけた6層に液状化発生層が絞られる結果となる。特に⑥層については60%に近い両振幅最大せん断ひずみが発生することになり、これは通常の室内要素試験で達成で

きる範囲を超えている。今後さらなる実証研究は必要であるが、現時点では、室内試験と異なる原位置の条件下ではこのような可能性もありうると考えている。

次に沈下量を計算するために、1次評価で液状化するとされた層について式(17)により最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmax}$  から体積ひずみ  $\epsilon_v$  を計算する。その際に  $\gamma_{DAmax}=20\%$  に対応した体積ひずみ  $(\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%}$  が必要となり、式(16)により  $N_i$ ,  $F_c$  (礫分含有率については  $G_c=0$ ) から計算した値が表3の沈下量評価欄に示されている。特に①層では  $\gamma_{DAmax}$  が20%の上限を超えているため、式(17)にしたがい式(16)で計算される体積ひずみ上限値  $\epsilon_{v,lim} = (\epsilon_v)_{\gamma_{DAmax}=20\%}$  を使い、②~⑤層については式(17)の比例関係を使って  $\epsilon_v$  が算出される。なお  $\gamma_{DAmax} < 7.5\%$  で初期液状化に達しない⑥~⑪層でも同様に1%内外の小さい値ながら体積ひずみが算定され、

表3 浦安市高洲小学校地盤でのエネルギー法による液状化予測と発生ひずみ・沈下量算定結果

深度 (m)	層名	有効上載圧 $\sigma_v'$ (kPa)	SPT- $N_1$	細粒分含有率 $F_c$ (%)	$R_{L20}$	$\tau_{d0}/\sigma_c'$	エネルギー法 ( $H=1$ m)													
							液状化可能性1次評価						ひずみ評価 (液状化可能性2次評価)		沈下量評価					
							$\Delta W/\sigma_c'$	$W^*/\sigma_c'$	$W^*H$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$E_{uf}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$W^*H/E_{uf}$	$AER$	液状化発生順	$E_{uf}/m$ $m=11$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{DAmax}$ (%)	$\epsilon_v$ (%) ( $\gamma_{DAmax}=20\%$ )	$\epsilon_v \times H$ (cm)			
GL: 0 m																				
1.00	B1																			
2.00	B2	30.4	3.0	52	0.257	0.0939	0.188	3.81	36.81	0.103	0.513	⑨	3.35	6.6	4.31	1.42				
3.00		38.2	3.0	52	0.114	0.0087	0.017	0.44		0.012	0.012	①	3.35	56.6	4.31	4.31				
4.00	F	45.5	1.4	95	0.161	0.0211	0.042	1.28	29.98	0.043	0.089	③	2.73	16.0	4.91	3.93				
5.00		51.4	1.4	95	0.184	0.0327	0.065	2.24		0.075	0.216	⑤	2.73	9.1	4.91	2.24				
6.00		57.3	1.4	95	0.160	0.0206	0.041	1.57		0.053	0.141	④	2.73	13.0	4.91	3.19				
7.00		64.0	9.2	23	0.284	0.1259	0.252	10.75		0.166	1.228	⑬	x	x	x	x				
8.00		72.9	9.2	23	0.361	0.2463	0.493	23.93		0.370	1.866	⑮	x	x	x	x				
9.00		81.7	9.2	23	0.255	0.0920	0.184	10.02		0.155	0.898	⑪	5.88	4.4	3.61	0.80				
10.00		90.5	9.2	23	0.224	0.0620	0.124	7.49		0.116	0.743	⑩	5.88	5.9	3.61	1.06				
11.00	99.3	9.2	23	0.288	0.1311	0.262	17.37	0.268	1.497	⑭	x	x	x	x						
12.00	108.2	9.2	23	0.197	0.0407	0.081	5.87	0.091	0.307	⑥	5.88	7.5	3.61	1.36						
13.00	117.0	9.2	52	0.206	0.0476	0.095	7.43	0.115	0.627	⑧	5.88	5.9	3.95	1.17						
14.00	125.8	9.2	52	0.226	0.0633	0.127	10.61	0.164	1.062	⑫	x	x	x	x						
地蔵計 ■	As1-2	134.6	8.7	52	0.190	0.0363	0.073	6.52	63.57	0.103	0.409	⑦	5.78	6.6	3.98	1.32				
GL-14 m		143.5	8.7	52	0.131	0.0113	0.023	2.16		0.034	0.046	②	5.78	20.0	3.98	3.99				
注: エネルギー法での $\Delta W$ , $W^*$ の和記号 $\Sigma$ は省略。																				
																			地表沈下量	24.8

無視できる値ではないためそれを含めて式(18)により地表沈下量を計算している。その結果、 $S=24.8\text{ cm}$ の地表沈下が生じる計算結果となる。

図 6(a)の上部には筆者らが地震調査の際に撮影した杭支持の高洲小学校校舎(RC造)入口段差の写真を示すが、これからは約40cmの地盤沈下を読み取れる。ただし小学校校庭では厚さ10cm前後の非塑性細粒分に富む著しい噴砂があったことを考慮すると、この計算で対象としている地震時繰返し載荷によるダイレイタンスに起因した沈下量としてはほぼ妥当な値と言えよう。

### 5.3 浦安市舞浜二丁目

同じ2011年東北地方太平洋沖地震で噴砂や地盤沈下が生じた千葉県浦安市舞浜二丁目の液状化事例について、東野・國生<sup>18)</sup>はエネルギー法(1次評価)の適用性を調べている。ここではこの事例を再度取り上げ、発生せん断ひずみ、地盤沈下量までを計算する。

この地点は表4のようにGL-51mの礫層工学基盤上の埋立層(B)、浚渫埋立層(Rc・Rs)、沖積砂層(As:下部はシルト質)、沖積粘土層(Ac1,Ac2)からなるが、そのうち地下水面(GL-3.1m)以深で液状化の検討対象となる砂質部分のみをあらかじめ選定し、ほぼ $H=1\text{ m}$ の層厚で分割し表5のようにモデル化している<sup>18)</sup>。ここでは代表的地層について現地でのボーリング孔からチューブサンプリングしたコア採取試料について三軸液状化試験が実施されており<sup>7)</sup>、液状化強度比 $R_{L20}$ については試験結果から直接決定し、試験結果がない層については隣接する深度の試験結果を採用している<sup>18)</sup>。損失エネルギー $\sum \Delta W/\sigma_c'$ とひずみエネルギー $\sum W^*/\sigma_c'$ についても原論文<sup>18)</sup>では試験結果より

表4 浦安市舞浜二丁目の地盤条件

地層区分	GL-m	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	N1値	$F_c$ %	$R_{L20}$	$\sum \Delta W/\sigma_c'$	$V_s$ m/s	
	B	1.50	16.50					150
Rc	3.10	16.50	▽地下水位					150
	4.00							
Rs	4.33	18.30	3.4	25.5	0.211	0.078	150	
	5.30		20.9	20.1	(0.211)	(0.078)		
	5.90							
Ac1-1	7.30	15.20					155	
	8.30		10.7	10.1	0.164	0.026	170	
	9.30		16.2	12.9	0.263	0.310		
	10.30		18.2	8.4	0.303	0.237		
	11.30		11.0	12.0	0.323	0.141		
	12.30	18.50	10.5	12.0	0.323	0.141		
	13.33		4.3		(0.323)	(0.141)		
	14.31		2.3		(0.323)	(0.141)		
15.30	1.5			(0.323)	(0.141)			
16.30	2.6		(0.323)	(0.141)				
16.40								
Ac1-2	36.00	17.00					155	
Ac2	51.00	17.00					155	
基盤	68.00	19.60					300	

括弧内は試験結果がないことから、隣接する深度の試験結果を採用した。

直接算定しているが、本論文では前記の手順-2, 3 に則り $R_{L20}$ より式(1), (3)を使って決めることとする。

上昇波エネルギーはK-NET浦安EW記録を工学基盤まで戻した図7(a)に示す加速度波形を本地盤モデルの基盤から入力し、等価線形重複反射解析結果より図7(b)に示すように各層での $E_{uf}$ を計算している<sup>18)</sup>。1次評価によって、表5に陰影をつけた $AER \leq 1.0$ の5つの層(①~⑤)が液状化するとその原論文<sup>18)</sup>とほぼ同様の結果になった。

一方、応力法については道路橋示方書の基準<sup>17)</sup>にしたがい、同じ等価線形解析から算出した地震時せん断応力比 $L = \tau_{max}/\sigma_v'$ と $R = C_w R_{L20}$ (係数 $C_w=1.0$ )により算出した $F_L = R/L$ を同表に示し比較している<sup>18)</sup>。陰影をつけた $F_L < 1.0$ の液状化範囲はエネルギー法に比べてAs層の最上層に限定された結果となった。しかしここでは道路橋基準の地震動特性による補正係数 $C_w=1.0$ (応力低減係数 $r_n=0.65$ に対応)を使っている。前出の表3と同様に $M=9.0$ の地震に対する $r_n=0.8$ を用いた場合には表中の $L$ が $0.8/0.65=1.23$ 倍になるため、上部のRs層もほぼ液状化する範囲となり、次に述べるエネルギー法に近い結果となる。

ここからエネルギー法の手順-7に入り、 $m=5$ として各層に上昇するエネルギー( $E_{uf}$ ) <sub>$i$</sub> /5がその層ですべて使われると考えると、式(16)により5層で発生する最大せん断ひずみ $\gamma_{Dmax}$ はそれぞれ表5右寄りのひずみ評価欄の値となる。 $AER$ の小さい順に①~④の層では1次評価で設定した7.5%を超えて特に①~③では非常に大きなせん断ひずみが発生し、また⑤については7.5%を下回り初期液状化に達しない。つまり2次評価では液状化層が4層に絞られ、Rs層とAs層最上部には激しいひずみが生じる。

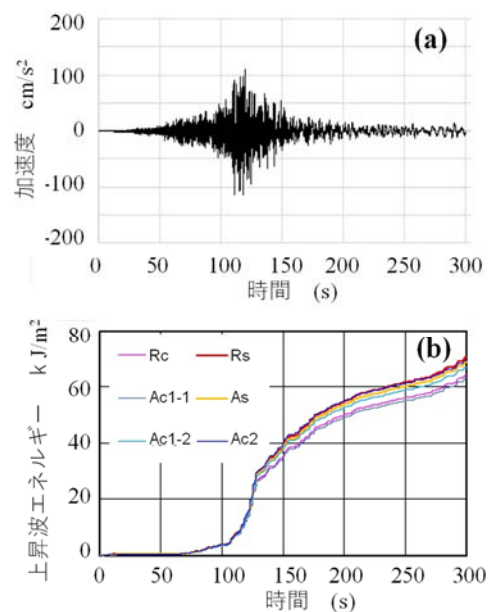


図7 入力加速度波(a)と上昇波エネルギー時刻歴(b)

表5 浦安市舞浜二丁目でのエネルギー法による液状化予測（応力法と対比）と発生ひずみ・沈下量算定結果

深度 (m)	層名	有効上載圧 $\sigma_v'$ (kPa)	SPT- $N_1$	細粒分含有率 $F_c$ (%)	応力法 (道路橋)				エネルギー法 ( $H \approx 1$ m)														
					$R_{L20}$ $\tau_d/\sigma_c'$	$L$ $\tau_{max}/\sigma_v'$	$C_w$ タイプ I	$F_L$	液状化可能性 1次評価					ひずみ評価 (液状化可能性 2次評価)			沈下量評価						
									$\Delta W/\sigma_c'$	$W_v/\sigma_c'$	$W_v \cdot H$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$E_{of}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$W_v \cdot H/E_{of}$ $E_{of}$	AER	液状化発生層	$E_{of}/m$ $m=5$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{DAmx}$ (%)	$(\epsilon_v)_{20\%}$ (%)	$\epsilon_v \times H$ (cm)				
GL: 0 m																							
1.50	B		4.8																				
3.10	Rc		4.6																				
4.00			2.4																				
4.95	Rs	59.9	3.4	25.5	0.211	0.167	1.00	1.26	0.051	0.102	3.88	70.5	0.055	0.093	②	14.1	27.2	3.96	3.77				
5.90		68.2	20.9	20.1	0.211	0.178	1.00	1.19	0.051	0.102	4.42	69.5	0.064	0.156	③	13.9	23.6	2.92	2.77				
7.30	Ac1-1																						
8.30	As	89.6	10.7	10.1	0.164	0.199	1.00	0.83	0.022	0.045	2.67	70.6	0.038	0.038	①	14.1	39.7	3.37	3.37				
9.30		98.3	16.2	12.9	0.263	0.199	1.00	1.32	0.101	0.202	13.24	69.9	0.189	0.346	④	14.0	7.9	3.10	1.23				
10.30		107.0	18.2	8.4	0.303	0.200	1.00	1.52	0.152	0.304	21.72	69.3	0.314	0.659	⑤	13.9	4.8	2.93	0.70				
11.30		115.7	11.0	12.0	0.323	0.200	1.00	1.61	0.182	0.364	28.08	68.7	0.409	1.068	⑥	x	x	x	x				
12.30		124.4	10.5	12.0	0.323	0.202	1.00	1.60	0.182	0.364	30.19	68.3	0.442	1.510	⑦	x	x	x	x				
13.33		133.3	4.3	12.0	0.323	0.204	1.00	1.58	0.182	0.364	33.17	67.8	0.489	1.999	⑧	x	x	x	x				
14.31		141.8	2.3	12.0	0.323	0.206	1.00	1.57	0.182	0.364	33.74	67.4	0.500	2.500	⑨	x	x	x	x				
15.30		150.5	1.5	12.0	0.323	0.207	1.00	1.56	0.182	0.364	36.35	67.1	0.541	3.041	⑩	x	x	x	x				
16.40		159.2	2.6	12.0	0.323	0.204	1.00	1.58	0.182	0.364	42.51	67.0	0.634	3.675	⑪	x	x	x	x				
注: エネルギー法での $\Delta W, W_v$ の和記号 $\Sigma$ は省略。																			地表沈下量	11.8			

平ら<sup>19)</sup>は浦安市舞浜三丁目において採取したボーリングコア (GL-2m~13m) に対して X 線 CT スキャン解析を行い、GL-6.15~8.85 m の浚渫埋立層でラミナー構造が消失し液状化したことを確認している。本調査点から 450m ほど離れているため深度の正確な対比はできないが、Rs 層が液状化したとの評価結果を裏付けるものと言えよう<sup>18)</sup>。

さらに手順-9, 10 によりここで算出された地震時最大両振幅ひずみ  $\gamma_{DAmx}$  (%) を用いて沈下量を計算する。その際の体積ひずみ  $\epsilon_v$  としては、①~③層で  $\gamma_{DAmx}$  が 20% の上限を超えているため式(16)の上限値を使う。それ以外の 2 次評価で初期液状化に達しないこととなった⑤層も含めて式(17)で算定し式(18)により地表沈下量を計算し表 5 のように  $S=11.8$  cm が得られる。

この地点の地表沈下量は近傍の先端支持杭基礎の抜上がり量から 15~17cm が報告されている<sup>7)</sup>。ここでも数 cm の噴砂が生じていたことが同じ文献の写真から読み取れ、これを考慮すると地表沈下量の計算値は実測値とほぼ整合していると判断できよう。

## 6. まとめ

筆者らが既に発表したエネルギーに基づく液状化評価法ではサイト地盤に供給される地震上昇エネルギーの総量が定量化できるが、その特長を生かし本論文では液状化層での発生ひずみと地盤沈下量が簡便に評価可能な計算手順を以下のように組み立てた。

(1) 既に提案したエネルギー法の 1 次評価の手順-1~6 で液状化すると判定された各層を対象に上昇波エネルギーが均等に配分されると仮定することにより、各層で発生する最大せん断ひずみを算出する 2 次評価手順-7, 8 を考えた。この際、損失エネルギーとせん断ひずみはほぼ比例関係にあり、振幅・繰返し回数・波形に依ら

ず一意的であるとのエネルギー法の特長を利用している。これにより上昇波エネルギーから、各層の液状化可能性のみならず発生ひずみの大小を通じて液状化の激しさまで簡便に評価できる。

(2) 2 次評価で得られた各層の最大せん断ひずみから液状化に伴う体積ひずみ  $\epsilon_v$  を計算し、それらを深さ方向に積分することで地表沈下量  $S$  を算定する評価手法-9, 10 を提示した。

(3) 原地盤の沈下量評価に適用可能な最大せん断ひずみ  $\gamma_{DAmx}$  ~ 体積ひずみ  $\epsilon_v$  関係を得るため、多地点で採取したコア試料の三軸液状化試験 (土木研究所が東日本大震災以降に実施) から多数の  $\gamma_{DAmx} \sim \epsilon_v$  関係を整理し、液状化後体積ひずみを基準化 N 値  $N_1$ 、細粒分含有率  $F_c$  などから算定する式を導出し沈下量評価に用いた。

以上の評価法を用いて筆者らが既に検討した 3 ケースの地盤を再度取り上げ、液状化判定における応力法に対するエネルギー法の特徴を最新の知見を反映して再確認し、引き続き液状化に伴うひずみと沈下量の計算を行い、以下の知見を得た。

(4) 2 次評価の手順-7, 8 においては、手順-6 の 1 次評価で選ばれた液状化発生層のうち発生順位が高く弱い層に集中的に大きなひずみが発生する一方で、順位が低く比較的強い層では  $\gamma_{DAmx} < 7.5\%$  となって初期液状化に達せず、液状化範囲が絞られる傾向となる。

(5) これは、1 次評価では  $\gamma_{DAmx} = 7.5\%$  に対応したひずみエネルギーを用い上昇エネルギー総量で液状化させる範囲の上限を決めていたのに対し、2 次評価では全ての液状化層に上昇エネルギーを均等配分することで弱い層には発生ひずみ 7.5% を遥かに超えてエネルギーが配分され、強い層ではその逆となるためである。この配分割合は地盤や地震動に依存して実際は変動するためあくまで第一次近似ではあるが、これにより 1 次



液状化評価より実現象に近づくことは期待できる。

- (6) 同じ地震波を加速度は変えずに実時間(RT)と 1/2 圧縮時間(RT/2)で仮想均質地盤に入力した場合、上昇エネルギーは 8 : 1 ほどの違いとなり、RT に比べ RT/2 では液状化範囲や発生ひずみは極めて絞られ、同じ最大加速度にも関わらず沈下量も 1/5 程度と評価される。
- (7) 東日本大震災の際に激しい液状化を起こした浦安市高洲小学校では、液状化層が 1 次評価の 11 層から 2 次評価では 6 層に絞られ、最大 60%程度の両振幅せん断ひずみと 25 cm の地表沈下量が計算される。同じく舞浜二丁目では液状化層が 1 次評価の 5 層から 2 次評価では 4 層に絞られ、最大 40%の両振幅せん断ひずみと 12 cm の地表沈下量が計算される。
- (8) 上記 2 地点での実測の地表沈下量は近傍の先端支持杭基礎の抜上がり量からそれぞれ約 40 cm と 15~17 cm であったが、前者では 10cm 前後、後者では数 cm の噴砂が地表を広く覆っていた。上記計算値にこれらの噴砂厚さを加算することで、本評価法により実測沈下量がある程度再現できることが確認できたと言えよう。
- 今後さらに事例適用の積み重ねは必要とされるが、エネルギー法の特徴を生かし、複雑な有効応力動的応答解析によらなくても液状化地盤での液状化の可能性と発生ひずみ・沈下量が手順-1~6 の 1 次評価と手順-7~10 の 2 次評価により簡便に求められる手法が示された。

#### 参 考 文 献

- 1) 國生剛治: エネルギーによる液状化判定法の適用性検討と FL法との対比, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.3, pp.463-475, 2013.
- 2) 三森祐貴, 國生剛治: エネルギーによる液状化判定法とFL法との比較—種々の地震動・地盤条件での検討—, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No.4, pp. 603-618, 2014.
- 3) 國生剛治: エネルギーによる液状化判定法の適用性検討と FL 法との対比: 補遺, 地盤工学ジャーナル Vol.11, No.3, pp. 283-293, 2016.
- 4) 國生剛治, 鈴木 拓: 強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー, 日本地震工学会論文集, 第11巻, 第1号, pp. 14-31, 2011.
- 5) 國生剛治, 鈴木 拓: 強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー(補遺), 日本地震工学会論文集, 第12 巻, 第7号, pp. 62-68, 2012.
- 6) 石澤友浩, 國生剛治, ハザリカ ヘマンタ: 2016 年熊本地震の地震観測記録(KiK-net)における波動エネルギーの距離減衰, 地盤工学ジャーナル(特集号) Vol.15, No.1, pp. 81-89, 2020.
- 7) 佐々木哲也, 石原雅規, 谷本俊輔, 林宏親, 江川拓也, 鷺見浩司, 川口剛: 細粒分を含む砂の液状化強度特性に関する再検討, 土木研究所資料, 第 4253 号, 2016.
- 8) 谷本俊輔, 國生剛治: 原位置試料の液状化エネルギー容量と液状化強度比の関係, 地盤工学ジャーナル Vol.15, No.1, pp. 25-38, 2020.
- 9) Sarma, S. K.: Energy Flux of Strong Earthquakes, *Tectonophysics*, Elsevier Publishing Company, pp. 159-173, 1971.
- 10) 國生剛治: 地震地盤動力学の基礎—エネルギー的視点を含めて—, 鹿島出版会, 第 4 章, 2014.
- 11) Gutenberg, B.: The energy of earthquakes, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, Vol.CXII, No.455, pp. 1-14, 1956.
- 12) エネルギーに基づく液状化予測手法に関する研究委員会: エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム委員会活動報告及び論文集, 地盤工学会, 2019.
- 13) 國生剛治, 金子陽輔, 岡田侑子: 正弦波・不規則波繰返し载荷による砂の損失エネルギーと液状化挙動, 地盤工学ジャーナル Vol.13, No.3, pp. 205-221, 2018.
- 14) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, 32, pp. 173-188, 1992.
- 15) Tatsuoka, F., Sasaki, T. and Yamada, S.: Settlements in saturated sand induced by cyclic undrained simple shear, *Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Vol. 3, pp. 95-102, 1984.
- 16) 國生剛治, 吉田保夫, 西 好一, 江刺靖行: 密な砂地盤の地震時安定性評価法の検討—(その 1) 密な砂の動的強度特性, 研究報告: 383025, 電力中央研究所報告, 1983.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp. 161-169, 2017.
- 18) 東野圭悟, 國生剛治: エネルギーによる液状化判定法の適用事例—FL 法, 有効応力解析との比較—, エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム委員会活動報告及び論文集, 地盤工学会, 2019.
- 19) 平 朝彦ほか: ボーリングコアの X 線 CT スキャン解析による東北地方太平洋沖地震における地盤液状化層の同定: 浦安市舞浜 3 丁目コア試料の例, 地質学雑誌, 第 118 巻第 7 号, pp. 410-418, 2012.

(2020.5.10 受付)

---

---

## Energy-based liquefaction potential evaluation for induced strain and settlement

Takaji KOKUSHO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Professor Emeritus, Department of Civil & Environment Eng., Chuo University

### Abstract

Energy-Based Method (EBM) for liquefaction potential evaluation was previously proposed, wherein the total energy demand at a site is determined by upward wave energy. To make the most of the EBM already developed (the first stage evaluation), additional steps have been proposed to evaluate the liquefaction-induced strain and associated soil settlement using given earthquake wave energy by introducing a simple assumption that the wave energy is equally shared among the liquefied layers already selected in the first stage. By applying this to a uniform sand layer as well as case history sites, it has been found that the two-stage evaluation tends to calculate much higher liquefaction-induced strains than 7.5% in a smaller number of layers than the first stage. Furthermore, soil subsidence at the case history site has been calculated using a robust correlation of volumetric strain versus shear strain based on database of various intact soils. The ground surface subsidence thus calculated is found to be agreeable with post-earthquake observation at the same site. Thus, the newly developed two-stage EBM of liquefaction evaluation can predict not only the possibility of liquefaction but also the maximum induced strain in individual liquefied layers, and associated surface settlement without resorting to complicated nonlinear effective stress dynamic response analyses.

Key words: energy-based liquefaction potential, upward wave energy, induced strain, volumetric strain, soil settlement