

エネルギーによる液状化予測法の実用化に向けて

國生剛治¹

1 中央大学名誉教授

概 要

現行の液状化予測には応力法が広く使われているが、いっぽう液状化挙動は地震応力波形の違いに依らず土中で損失するエネルギーと直結していることが実験的に示されており、エネルギー法の適用性が高いことが知られている。このような背景の下、地盤工学会では2015～2018年度にわたり世界的にも前例の少ない「エネルギーに基づく液状化予測法に関する研究委員会」が活動した。本文は地盤工学ジャーナル/エネルギー委員会特集号の巻頭言として、委員会報告書をベースに筆者の個人的視点も加え研究展望としてまとめたものである。まず過去40年におよぶエネルギーによる液状化の研究の流れを整理し課題を確認した。次に地盤の液状化エネルギー容量(R側)については、損失エネルギーが水圧上昇や発生ひずみと一意的関係にあり、応力法の液状化強度比とも土質に依らず密接に関連付けられることを原地盤採取試料の試験結果を含めたデータで示すことができた。一方、地震波動エネルギー(L側)についてはその定義法を確認し実地盤での計算例を示した。さらに、R側とL側のエネルギーを対比して液状化挙動を予測するために提案された3種類のエネルギー法を取り上げて仮想均質地盤や実地盤に適用し、従来の応力法や有効応力解析による予測も含め結果の相互比較を行った。その結果エネルギー法相互間にも差異はあるものの、波形特性に関わらず損失エネルギーのみで予測できるエネルギー法の特長が確認でき、地震動の特性によっては応力法と異なる予測が得られた。エネルギー法相互間の差異についてはさらに吟味を重ねる必要はあるが、液状化挙動は本来損失エネルギーにより一意的に決定され、液状化による地盤剛性の変化や地盤沈下なども損失エネルギーにより連続的に評価できる可能性を考えれば、現行の応力法のみには依存するのではなくエネルギーによる液状化予測法も今後の設計指針に取り入れていくべきである。

キーワード：損失エネルギー、地震波動エネルギー、発生ひずみ、三軸試験、原位置試料

1. はじめに

Seed-Idrissの研究¹⁾以来、標準的方法として使われてきた力の釣り合いに基づいた液状化予測法(応力法)では、加速度により地盤に発生するせん断応力と砂の非排水繰返し強度の大小関係を比較している。本質的に不規則な地震動による地震時せん断応力と繰返し強度を比較するためには、地震波を液状化挙動の観点から見て等価な一定振幅で有限波数の正弦波に変換する手続きが必要となる。この際、地震マグニチュードや断層距離、地盤の特性などに関わる種々の地震動パラメータ(最大振幅、継続時間、波形、地盤動的応答、地盤深度など)の影響を考慮することが必要であり、そのための係数を導入し不規則波から正弦規則波への変換を行っている。特に近年の日本のように地殻内地震からプレート境界地震まで発震機構の違いにより、振幅・卓越周期・継続時間・等価繰返し回数などが異なる種々の地震が頻繁に発生する条件では、これが液状化予測結果に含まれる大きな不確定要素となり、地震による液状化発生の度に波形特性が議論の対象となる。

一方、液状化発生に直結する物理量として、せん断応力

の代わりにひずみを重視する方法²⁾や損失エネルギーに着目した液状化予測法³⁾⁴⁾も提案されている。特にエネルギーについては、非排水繰返しせん断試験での間隙水圧上昇が、土の内部損失エネルギーと密接に関連していることが多くの研究で指摘され⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾、地震動の繰返し回数や波形などに関わらずそのエネルギーにより液状化発生を一意的に評価できる可能性が示されてきた。また、水圧上昇だけでなく液状化に伴う発生ひずみも損失エネルギーと一意的関係があり、過剰間隙水圧が100%上昇し初期液状化に至った時点以降も地震波形の特性に依らないほぼ一意的関係を保つことが示されている¹⁰⁾。

図1には一例として継続時間が極端に異なるマグニチュード $M_f=9.0$ の2011年東北地方太平洋沖地震と $M_f=7.2$ の兵庫県南部地震の波形を用いた砂($D_r \sim 50\%$)の中空ねじりせん断液状化試験の結果を示すが、水圧上昇率が損失エネルギーによりほぼ一意的に評価できることが分かる。つまり継続時間の長い海溝型地震や地殻内で起きる短く激しい揺れの直下地震に対しても統一的に液状化予測を行うことが可能であり、エネルギーに基づいた方法が如何

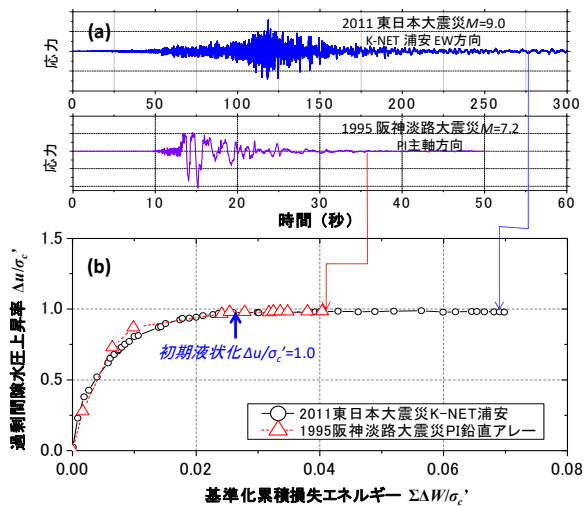


図1 M9.0とM7.2の地震波での損失エネルギーに対する過剰間隙水圧上昇率¹¹⁾

に優れているかはこの例からも明らかである。

それにも関わらず、エネルギーによる判定法は実務の場で使われるまでには至っていない。その大きな理由は耐震設計法全般について、設計震度や加速度を用いた力の釣合いに基づいた考え方が歴史的に主流となってきたためである。しかし液状化に関わる地盤や土構造物では、地震波形の中の最大ピークに対応した応力で破壊が決まるよりは応力～ひずみ履歴の累積的効果である累積エネルギーにより破壊が支配される特性がある。したがって、応力よりはエネルギーが液状化メカニズムの説明変数として本来優れており、実務への適用性も大きいはずである。

このような背景の下、地盤工学会に2015～2018年度の4年間にわたり「エネルギーに基づく液状化予測法に関する研究委員会」が設立され、エネルギー法の実用化を目指した調査研究が行われ報告書が纏められた¹¹⁾。

以下ではその報告書をベースにしつつ、エネルギーから見た液状化研究の経緯、エネルギー法を特徴付ける損失エネルギー～液状化挙動関係の一意性、地震波動エネルギーの定義・計算例、損失エネルギーとの対比による液状化評価法の説明と適用例ならびに応力法などとの対比、残された課題などについて筆者の個人的見解を含めて述べる。

2. エネルギー的視点による液状化研究の経緯

エネルギー的視点から液状化現象に迫る研究が始まってから40年ほど経過した。それらは土質材料の持つ液状化エネルギー容量 (Energy capacity : R側) に関するものと、地震波が運んでくる供給エネルギー (Energy demand : L側) の二つに大別できる。R側からの研究が圧倒的に多いが、近年多く得られるようになった地震観測データによるL側の研究も行われてきた。さらにR側とL側の比較の仕方を工夫して液状化予測法の開発もされてきた。この間の研究の発展経緯を分類分けし簡単に振り返る。

1) 液状化エネルギー容量の理論的研究 (R側)

エネルギー容量に関する研究の先駆けとして挙げられるのは Nemat-Nasser & Shokoh¹²⁾による半ば理論的研究である。これは緩い砂が繰返し载荷により排水条件では密実化し非排水条件では液状化する現象を粒子の再配分によるエネルギーの変化と捉えて関係式を構築し、実験データの説明を試みたものである。さらに近年には、個別要素法 (DEM) を用いて解析的に粒子間のひずみエネルギーが水圧上昇によって解放されるプロセスを再現する研究も行われている (Morimoto et al.¹³⁾, Kazama et al.¹⁴⁾。

2) 液状化エネルギー容量の実験的研究 (R側)

砂を使った非排水繰返し载荷室内実験によって液状化挙動に関わるエネルギー概念の有効性を示す研究は日本を中心として行われてきた。Towhata & Ishihara⁵⁾は正弦波の非排水中空ねじり繰返しせん断試験により、軸差せん断応力とねじりせん断応力を組み合わせた種々の応力経路によっても、間隙水圧の上昇率が損失エネルギー (shear work) によって一意的に表せることを示した。Yanagisawa & Sugano⁶⁾はやはり中空ねじりせん断試験によりひずみ制御の下でひずみ履歴の影響を調べ、正弦波だけでなく不規則波においても水圧上昇率が損失エネルギーと一意の関係にあることを示した。類似の研究は米国で Figueroa et al.⁷⁾により行われ、異なる有効拘束圧の下でのひずみ制御試験で水圧上昇率～損失エネルギー関係の一意性が示された。また液状化実験データを使い、例えば Green et al.¹⁵⁾や Jafarian et al.¹⁶⁾により水圧上昇率～損失エネルギー関係のモデル化が提案されている。また繰返し三軸試験により礫を含むまさ土について発生ひずみとの一意性が初期液状化段階まで見られることが報告されている (原ほか¹⁷⁾)。

いっぽう、繰返し载荷試験機とコンピュータを組み合わせたハイブリッド実験により土質材料の損失エネルギーを調べる実験も行われ、損失エネルギーと水圧上昇や発生ひずみとの密接な関係が指摘された (片田ほか¹⁸⁾, 下村ほか^{19, 20, 21)})。

これらの主に水圧上昇に着目した液状化予測ではなく、風間ら^{22) 23) 24)}は液状化を考慮した設計において重要な地盤の剛性低下の程度を評価する方法として応力制御よりはひずみ制御試験の優位性を指摘し、種々の土質材料でひずみ振幅を段階的に増やしながら载荷するひずみ制御試験により累積損失エネルギーを調べ、まさ土・砂質土・粘性土など土質による靱性の違いを明確に差別化できることを示している。

國生⁹⁾は応力制御三軸試験による相対密度 D_r 、細粒分含有率 F_c の異なる砂供試体の正弦波による液状化試験データについて累積損失エネルギーが水圧上昇率 r_u のみでなく個々の D_r や F_c の条件ごとに両振幅軸ひずみ ϵ_{DA} と良い一意的相関があり、初期液状化 ($r_u=100\%$) 以降の大ひずみ発生を伴う激しい液状化現象の良い指標となることを示した。また応力法による液状化予測で使われる初期液

状化の強度比 ($r_r=100\%$ や $\varepsilon_{DM}=5\%$ など)に対応した応力比 R_L)とも D_r や F_c に依らずかなり良い相関があり、現行の応力法で使われる液状化強度データからエネルギー法での液状化エネルギー閾値を容易に決定できることを示した。

このように液状化現象でのエネルギー容量の有用性の認識が広まると共に、砂の液状化特性・変形特性・体積ひずみなどを従来の応力比のみでなく損失エネルギーと関連付けて評価する研究も見られるようになった(中山ほか²⁵⁾、仙頭ほか²⁶⁾、大島ほか²⁷⁾)。

一方、不規則波载荷による液状化現象で良く用いられる疲労破壊理論(例えば²⁸⁾)とエネルギーの一意性について調べた研究の一例として Pan & Yang²⁹⁾が挙げられる。応力制御三軸試験により大小の応力振幅パルスから構成される不規則波の载荷を行い、水圧上昇率は最大振幅パルスの表れる順番により変動することから疲労理論の適用性は低いが、累積損失エネルギーとは最大振幅の表れる順番に関わらずほぼ一意的関係があることから、エネルギー概念の優位性を明らかにしている。

波形の不規則性の影響については、中空ねじり試験機を用いた研究(國生ら¹⁰⁾)で、水圧上昇率や発生ひずみがマグニチュード・震源距離の異なる種々の地震波についても累積損失エネルギーにより初期液状化まではほぼ一意的に評価できるが、7.5%を超える大きな両振幅せん断ひずみ領域では波形によるバラツキが拡大することが示され、その原因の一つとして不規則波では両振幅ひずみだけでは表せない中立ひずみの変動が損失エネルギー発生に関わっている可能性が指摘されている。

またエネルギー概念の応用的研究として、リングねじりせん断試験で得られた累積損失エネルギー～累積せん断ひずみ関係から再液状化に対する抵抗性の変化を容易に評価する研究(古関ら³⁰⁾)や、液状化強度がエネルギーで一意的に評価できることを前提に、少ない液状化試験データから応力法での液状化強度曲線を簡易に求める工夫(本多・重野³¹⁾)などの実験的研究も行われている。

3) 地震波動エネルギーの研究 (L側)

L側のエネルギーについては、地震波動のエネルギー全体を直接規定することはせず前述のように地盤モデルに規定の地震動を入力し地盤応答解析によりひずみエネルギーを計算する方法が風間ら⁸⁾³²⁾によって採用されてきた。

これに対し波動エネルギーを直接把握する立場から、國生・本山³³⁾は兵庫県南部地震での鉛直アレー記録の分析からSH波重複反射の仮定に基づき地盤内での上昇エネルギーと下降エネルギーを計算し、その差分である地盤内で失われる損失エネルギーが液状化層で大きくなる傾向を神戸PIの鉛直アレー記録により明らかにした。

また、地盤内での地震波動のエネルギーフローの特性を検討し、基盤から地表に近づくほど上昇波動エネルギーは地層境界での波の反射や地盤内部減衰のために減少する一般的傾向があることを示した(國生ほか³⁴⁾)。さらに30地点での9つの強地震の鉛直アレー記録分析により、上昇

波動エネルギーは地表に近づくほど急激に減少すること、2層間のエネルギー減少割合は対応するインピーダンス比のほぼ0.7乗に比例すること、基盤での入射エネルギーは地震マグニチュードと震源距離を使い実体波の球面減衰と Gutenbergによる放出エネルギー式³⁷⁾から概略計算できることを示した(國生・鈴木³⁵⁾³⁶⁾)

4) R側とL側の対比による液状化予測法の研究

前記の理論的研究¹²⁾の影響を受け、エネルギー概念による液状化予測法が Davis & Berrill³⁾、Berrill & Davis⁴⁾により提案された。これは砂層のエネルギー容量については標準貫入試験 N 値と関連付け、サイトへの地震供給エネルギーについては Gutenberg-Richter 式³⁷⁾と地震実体波の距離減衰式³⁸⁾をベースとした経験式で評価している。多地点の液状化履歴データに基づき液状化・非液状化を分ける境界線を描き、それを液状化応力比～N 値関係とする手法を使っている。類似の研究として Law et al.³⁹⁾などが挙げられるが、いずれにおいても地震供給エネルギーは経験式によるサイトでの代表値を指定するのみで、地盤のどの深度で定義するかについては述べられていない。

一方、風間ら⁸⁾³²⁾は、地震動を入力する等価線形地震応答解析により地盤各深度で費やされる累積損失エネルギーを累積ひずみエネルギーから等価減衰定数を用いて計算し、対応する地盤が蓄え得る液状化エネルギー容量と対比することにより液状化予測する方法を提案し、神戸PI地盤に兵庫県南部地震・三陸はるか沖地震など多くの強震記録を入力することによりその適用性を明示した。

他方で下村ら¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾は、繰返しせん断試験とコンピュータを結んだハイブリッド液状化実験を行って地盤を入力する損傷エネルギーと地盤各層への分配率、それによる液状化程度を建築上部構造でのエネルギーの釣合に基づく設計法の枠組みに倣って評価する研究を行ってきた。

それらとは異なる観点から、國生ら⁹⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾は波動エネルギーの定義式に遡り地盤への供給エネルギーとして地震SH波の累積上昇エネルギー E_u を各層で計算する方法を提示した。これを地盤各層が液状化するまでのエネルギー容量と対比することにより液状化予測する方法を提案し、現行の応力法と比較検討した。均質地盤モデルや液状化履歴のある実地盤について種々の地震動を入力した結果、幾つかの地震波では応力法と類似の結果となる一方で、加速度振幅に比して波動エネルギーが過大または過小なような地震波では両者に食い違いが現れることを示した。さらに、波動論、粘弾性モデル、砂の液状化試験データに基づき、本予測法で採用した上昇エネルギーの算出法やエネルギー容量との対比法の根拠を示した(國生⁴¹⁾)。

以上のようにエネルギー的視点からの液状化研究は、R側での多くの研究により損失エネルギーと水圧上昇、発生ひずみ、剛性低下などの液状化挙動との間に波形の違いに依らないほぼ一意的関係が示されている。また、応力法での液状化強度と対応する累積損失エネルギーの間にも相

関係が確認されている。また、損失エネルギーに着目することにより土質による変形性・靱性の違いなどを明確に差別化でき、性能設計に資することも指摘されている。

ただし、大多数の研究は人工的な室内調整試料で行われ、原地盤での多様な乱れの少ない試料についての系統的な研究が不足していることから、その点が今回の委員会活動の大きな狙いの一つとなった。

このように R 側の研究は進んでいるものの、エネルギーによる液状化予測法は未だ実用化段階に至っていない。これには歴史的背景と共に、原地盤で地震波動がもたらす L 側のエネルギーを R 側エネルギーとどのように対比するかについての検討がまだ不十分なことに大きな理由があると思われる。このため特に液状化事例との比較を含めた実証的研究の積み重ねが必要とされる。

以下ではこのような背景のもと、まず R 側について損失エネルギー～液状化挙動関係を例示しその一意性について原位置試料の試験データを含め確認すると共に、L 側については地震波動エネルギーの定義法とその実測データを紹介する。さらに前記委員会¹¹⁾の主要目的の一つであったエネルギーによる液状化予測法の比較検討について、3種類の予測法を取り上げて幾つかの地盤モデルと入力地震動へ適用し問題点を整理した結果について述べる。

3. 損失エネルギーとその一意性

液状化現象における損失エネルギーと間隙水圧上昇との関係は理論的研究とその後の実験的研究でその一意性が実証されてきたことは前述の通りである。さらに水圧が100%上昇した初期液状化以降についても発生ひずみと損失エネルギーの一意的關係が実験的に示されている。

まず始めに、損失エネルギーの定義法を確認しておく。図2には $D_r=51\%$ の砂の三軸試験による軸差応力 σ_d と軸ひずみ ε の関係を例示している。これより1サイクルの損失エネルギー ΔW は図中の履歴面積 A-B-C-D であり、それを繰返し回数 $k=1$ から任意のサイクルまで累計することにより累積損失エネルギーが次式で計算できる。これは単位体積当たりのエネルギーであり、応力の次元に一致することは容易に分かる。

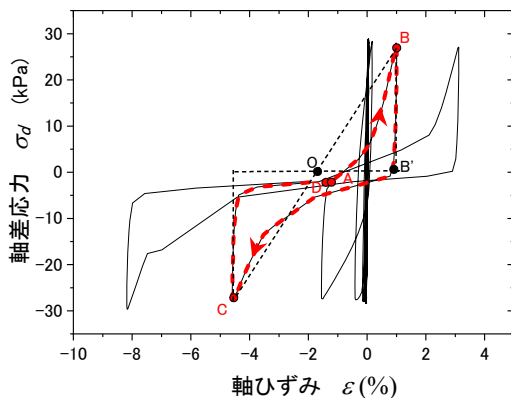


図2. 三軸液状化試験による軸応力～軸ひずみ関係の例示⁹⁾

$$\sum \Delta W = \sum_k \left(\int_A^D \sigma_d d\varepsilon \right)_k \quad (1)$$

図3には、このようにして得られた累積損失エネルギー $\sum \Delta W$ を有効拘束圧 σ'_c で除して無次元化した基準化累積損失エネルギー（文中では「損失エネルギー」と略称する場合あり） $\sum \Delta W / \sigma'_c$ を横軸にとり、縦軸には対応する軸ひずみ ε_{DA} と水圧上昇率 $\Delta u / \sigma'_c$ をとって示している。 $\Delta u / \sigma'_c$ は D_r の大きな違いにも関わらず $\sum \Delta W / \sigma'_c = 0.02$ 前後でほぼ $\Delta u / \sigma'_c = 100\%$ に上昇する相関関係があり、損失エネルギーは液状化発生までの非常に良い指標であることが分かる。また、軸ひずみと損失エネルギーの関係も相対密度 D_r ごとに (D_r 設定誤差によるばらつきはあるものの) ほぼ同じ経路で $\sum \Delta W / \sigma'_c$ に対して単調増加していると思なすことができよう。つまり水圧上昇だけでなく、液状化発生以降も含めて発生ひずみの評価が損失エネルギーにより可能であると言える。しかも、供試体ごとに異なる応力比 (R_L) で载荷し液状化に達する繰返し回数 (N_L) も大きく異なるにも拘らず、同じ D_r に対してはほぼ同一のカーブとなる点はエネルギーの一意性を裏付けるものである。

図4は中空ねじりせん断試験による $D_r \approx 50\%$ の砂の異なる振幅の正弦波と数種類の地震波を用いた液状化試験

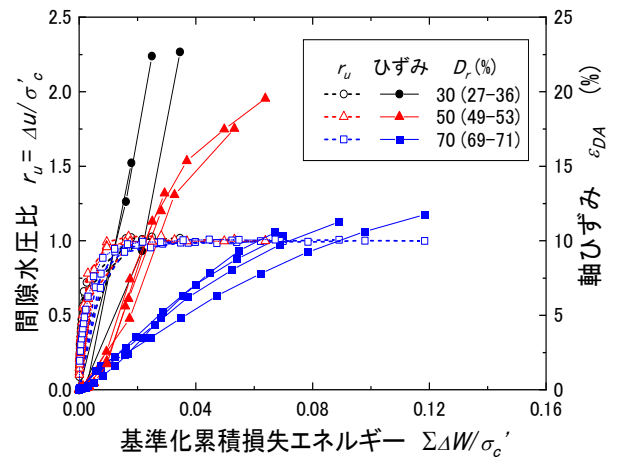


図3. 三軸試験での $\sum \Delta W / \sigma'_c$ に対する水圧上昇率 $\Delta u / \sigma'_c$ と軸ひずみ ε との関係 ($D_r \approx 30, 50, 70\%$)⁹⁾

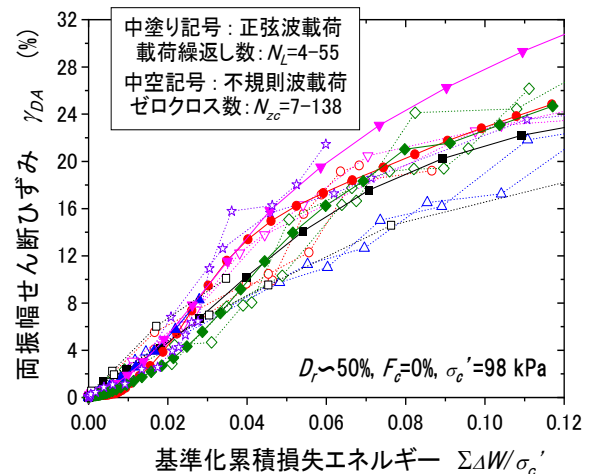


図4. 中空ねじり試験での基準化損失エネルギー $\sum \Delta W / \sigma'_c$ に対するせん断ひずみ γ の関係 ($D_r \approx 50\%$)¹⁰⁾

で得られた損失エネルギーと両振幅せん断ひずみのプロットを示す。正弦波では試験ごとに载荷応力振幅を変えて液状化に至る载荷回数が $N_L=4\sim 55$ もの違いがあるにも拘わらず、初期液状化に対応したせん断ひずみ 7.5%に $\Delta W/\sigma'_c=0.02\sim 0.04$ で達しておりやはりほぼ一意的関係となる事が分かる。さらにゼロクロス数が $N_{zc}=7\sim 138$ と波形・継続時間が大きく異なる多種の不規則波に対しても正弦波と同じく、損失エネルギーはひずみと少なくとも初期液状化時点まではほぼ一意的関係を保っていることが分かる。初期液状化以降の大ひずみに対しては地震動の不規則性による $\pm 20\%$ 程度のひずみのばらつきは無視しえないが、設計裕度として取り扱うことができよう。

次にこの一意性のある損失エネルギーと従来の応力法で使われている等価繰返し回数 N_L に対応して決まる液状化強度比 R_L との関連を知っておくことは重要である。

図 5(a)は三軸試験で室内調整砂の D_r と細粒分含有率 F_c を変化させた多くの実験を行いその液状化強度曲線から $N_c=20$ 回で軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{DA}=2, 5, 10\%$ に達する液状化強度比 $R_{L20} = \sigma_d/2\sigma'_c$ を読み取り、同じ ε_{DA} に達するための基準化エネルギー $\sum \Delta W/\sigma'_c$ との関係のプロットしている⁹⁾。これより、バラツキはあるものの R_{L20} に対し $\sum \Delta W/\sigma'_c$ が単

調に増加する傾向は明らかであり、しかも F_c の値に関わらずほぼ一意的関係が成り立つことが読み取れる。 $\varepsilon_{DA}=5\%$ の丸印のプロットを 2 次曲線で近似すると図中の太い実線カーブによる式(2)が得られる⁹⁾ (決定係数 $R^2=0.87$)。

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

これより、少なくとも再調整試料については D_r や F_c の大小に依らず $\sum \Delta W/\sigma'_c \sim R_L$ 関係はほぼ一意的に定まると判断できる。

一方、図 5(b)には多くの自然地盤のボーリング孔でチューブ採取したコア試料についての同様な試験結果を示す¹¹⁾⁴²⁾。この場合、繰返し载荷三軸試験に特有の良く知られた性質として、伸張側へひずみが偏る傾向が液状化強度の大きな土ほど現われ易い。それにともない、試験で载荷する繰返し応力比 R_L によって同じひずみが生じるための損失エネルギーが変化し見掛け上エネルギーの一意性が成り立たないように見える¹¹⁾。しかし、原位置の土が SH 波により受ける応力状態を忠実に再現できる中空ねじりせん断試験に依ればこのような傾向は見られない。そこで三軸試験特有のこの傾向を近似関数で補正し $N_L=20$ に対する R_{L20} に変換すると、式(2)と同じ関数形で多少大きめの値をとる次式が土質・原位置 N 値・細粒分含有率などに関わらずほぼ一意的に得られることが示されている⁴³⁾。

$$\sum \Delta W/\sigma'_c = 3.5 \cdot (R_{L20} - 0.1)^2 + 0.008 \quad (3)$$

この式により多様な土質に対し応力法での液状化強度から簡単に初期液状化に対応した損失エネルギーが計算できる。なお $N_L=15$ に対する R_{L15} と $\sum \Delta W/\sigma'_c$ との関係式も同様に誘導できるが⁴³⁾、いずれの $\sum \Delta W/\sigma'_c$ もエネルギーの一意性を考えれば等しくなければならないことになる。

4. 地震波動エネルギーの算出

次に L 側の波動エネルギーの算出法を確認し、計算例を示す。SH 波の重複反射を前提とすれば、液状化検討対象層の上昇エネルギー E_u は、その層での上昇波速度波形 \dot{u} (上昇波加速度波形の時間積分で計算) の 2 乗を地震継続時間 t_1 全体にわたり積分し、地層の S 波インピーダンス ρV_s を乗じることにより次式で求められる⁴⁴⁾³⁸⁾。

$$E_u = \rho V_s \int_0^{t_1} (\dot{u})^2 dt \quad (4)$$

図 6 には 9 つの強地震における全国 30 か所の鉛直アレー地震観測点での記録を使って成層地盤モデルの等価線形重複反射解析を行い、各層での上昇波を用いて式(4)により計算した上昇エネルギー E_u の深度 z に対する変化を片対数グラフで示している³⁵⁾。入力エネルギーの大小に関わらず、大多数の地点で最深部に到達した上昇エネルギーが地表に近づくほど 1/10 以下に急激に減少することが分かる。従来、波動エネルギーが基盤から地表まで上昇していく過程で、例えば Joyner & Fumal⁴⁵⁾の地盤の増幅率評価に見られるように、波動エネルギーがほぼそのまま保たれ

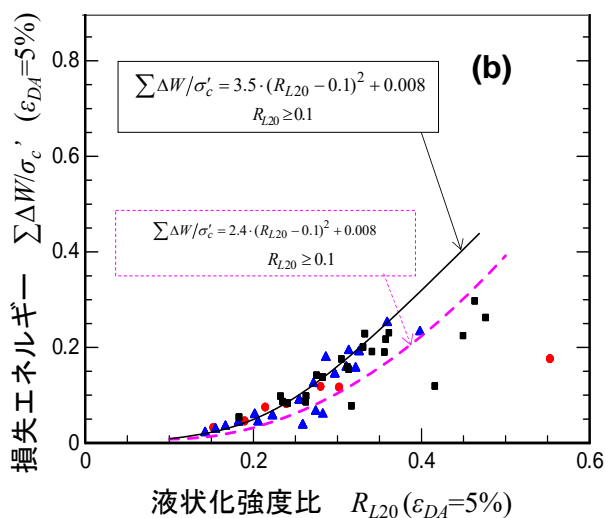
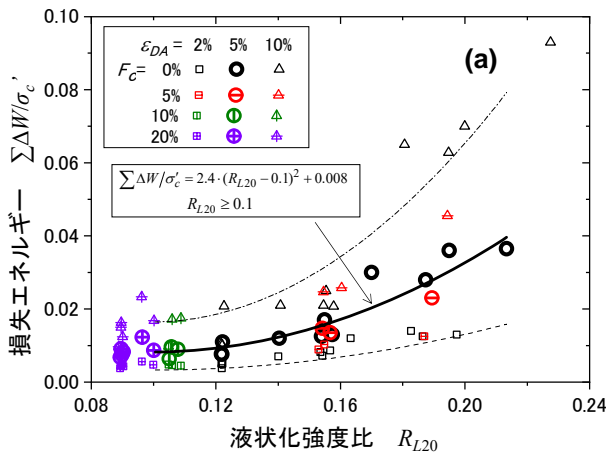


図 5. 三軸液状化試験による損失エネルギー $\sum \Delta W/\sigma'_c$ と R_{L20} の関係: (a)室内調整試料($D_r=30\sim 70\%$, $F_c=0\sim 20\%$)⁹⁾, (b)多地点での原地盤コア採取試料($N_L=0\sim 23$, $F_c=1\sim 97\%$)¹¹⁾⁴³⁾

ると考えることが多かったが、実際は地盤深部に到達した地震波動エネルギーは地表に近づくにしたがって大半の地点で大幅に減少することが分かる。

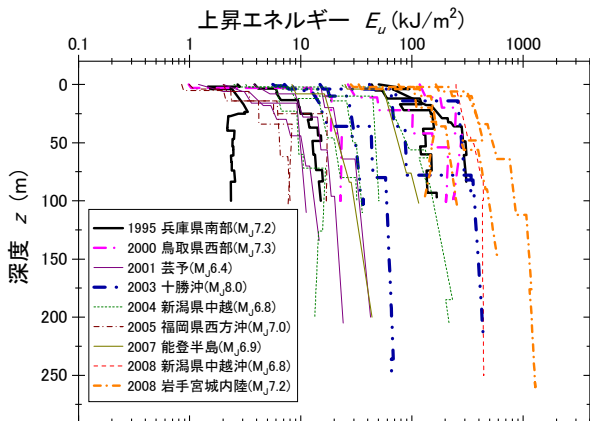


図 6. 鉛直アレー地震観測 30 地点での上昇エネルギー E_u の深度 z 方向への変化³⁵⁾

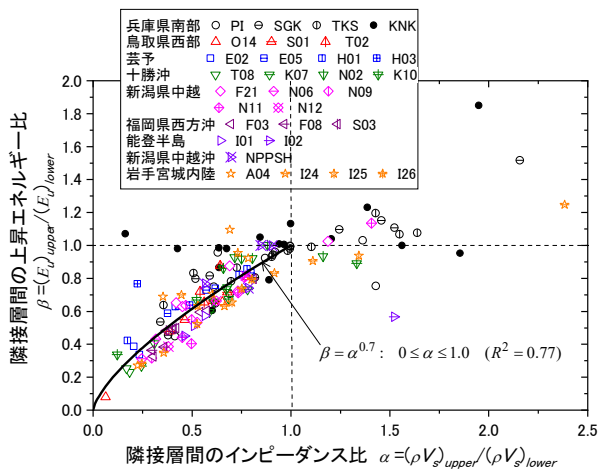


図 7. 鉛直アレー地震観測 30 地点での地層間上昇エネルギー比 β のインピーダンス比 α に対するプロット³⁶⁾

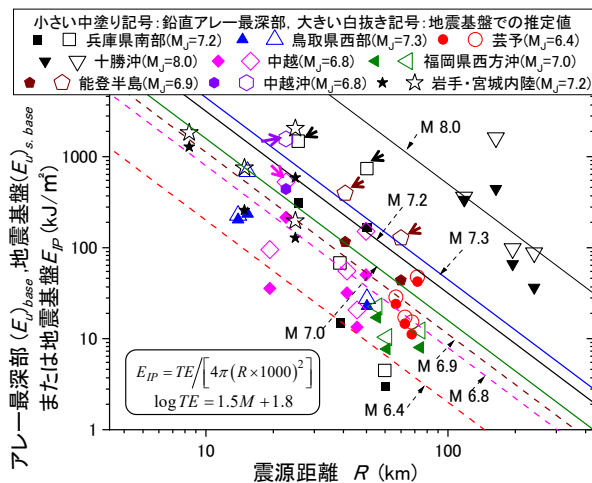


図 8. 鉛直アレー地震観測 30 地点での最深部または地震基盤での上昇エネルギー $(E_u)_{base}$ 、 $(E_u)_{s,base}$ と震源距離 R との関係³⁶⁾

図 6 の E_u の深度分布に基づき、各地点の成層地盤モデルで隣接する 2 層それぞれの上境界に入射する上昇エネルギー E_u の比 [上層/下層 ; $\beta = (E_u)_{upper} / (E_u)_{lower}$] を計算し、対応する 2 層のインピーダンス比 [上層/下層 ; $\alpha = (\rho V_s)_{upper} / (\rho V_s)_{lower}$] に対して図 7 にプロットしている³⁶⁾。一般にインピーダンス ρV_s は浅くなるほど小さくなるからインピーダンス $0 \leq \alpha \leq 1.0$ の範囲のみ着目すると、次式により近似できる³⁶⁾ ($R^2=0.77$)。当然ながら、 $\alpha=0$ の場合は $\beta=0$ となり、 $\alpha=1.0$ は層境界のない均一層に対応しているため上昇エネルギー比は $\beta=1.0$ となる。

$$\beta = \alpha^{0.70} : 0 \leq \alpha \leq 1.0 \quad (5)$$

なお、式(5)は 2016 年熊本地震においても概略適合することが新たに確認されている⁴⁶⁾。

図 8 には 30 観測点 9 地震について、鉛直アレー最深部 (深度 100m 内外) での記録から計算された上昇エネルギー $(E_u)_{base}$ (kJ/m^2) を震源距離 R (km) に対して両対数グラフに中塗り記号で示す³⁵⁾³⁶⁾。プロットは大きなバラツキを示すが、マグニチュード M の大きさに対応して地震ごとにグループ化でき、 R と共に E_u が減少する全体的な傾向は読みとれる。同図中にプロットした大きな白抜き記号は鉛直アレー最深部での $(E_u)_{base}$ (同図中の中塗り記号) から式(5)を用いて $V_s=3000 \text{ m/s}$, $\rho=2.7 \text{ t}/\text{m}^3$ に設定した地震基盤での上昇エネルギー $(E_u)_{s,base}$ を計算した値であり、対応する同種の中塗り記号に比べすべての地点で増加している。

図中に記入した右下がりの直線は、実体波の球面波エネルギー拡散を前提とし地震マグニチュード M と震源距離 R (km) から入射エネルギー E_{IP} (kJ/m^2) を算定する以下の経験式で、Davis & Berrill³⁾ が液状化予測に使った式と基本的に同一である。

$$E_{IP} = TE \sqrt{4\pi(R \times 1000)^2} \quad (6)$$

$$\log TE = 1.5M + 1.8 \quad (7)$$

上昇エネルギー $(E_u)_{s,base}$, $(E_u)_{base}$ のプロットのバラツキは大きいですが、対応する M についての経験式とある程度整合していることが確認でき、大きく乖離しているプロットの幾つかについては震源メカニズムにより説明できる可能性がある³⁶⁾。また地震基盤での $(E_u)_{s,base}$ の方が $(E_u)_{base}$ より平均的には経験式との一致度は高いように見える。

したがって、地点固有の設計地震動が決まっていなくても、 $(E_u)_{s,base}$ により式(5) (6) (7)を用いて地盤各層の上昇エネルギー E_u を概略評価することができる。

5. 損失エネルギーと波動エネルギーとの対比法

前述のようにエネルギー概念による液状化予測法は最初に Davis & Berrill³⁾ により提案された。そこでは、 R 側については標準入力試験 N 値から、 L 側についてはマグニチュードと震源距離からそれぞれ経験式により算出し、既往の液状化履歴データから液状化発生の有無の境界を判断する (米国の応力法⁴⁷⁾ と類似の方法をとる) もので、 L 側

のエネルギーが定義される深度は規定されておらず、特定の地層を対象とした R 側と L 側の対比にはなっていない。その後もこのやり方の延長上で L 側のエネルギーに代わり Arias Intensity⁴⁸⁾を使って既往の液状化履歴データに基づく類似の方法が提案され⁴⁹⁾、これもエネルギー法と見なされている。ただし Arias Intensity には地盤の性質 (ρV_s) は含まれておらず、加速度波形のみから計算されるため式 (4) で定義される本来の波動エネルギーとは異なる物理量であり、いわば地盤の液状化に対し地盤とは切り離された剛盤上の上部構造物モデルへの入力を想定していることに相当する。

以下に取り上げるエネルギー法による液状化予測法はそれらとは異なり、地盤の各層ごとに応力法と同様に液状化抵抗に対応した液状化エネルギー容量 (R 側) と、地震時せん断力に対応した地震入力エネルギー (L 側) との対比を行うこととしている。

R 側については、応力法で蓄積された多岐にわたる土質材料の繰返し载荷試験データを使い、100%水圧上昇あるいは特定の発生ひずみ振幅 (例えば両振幅の軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ 、せん断ひずみ $\gamma_{DA}=7.5\%$) についての液状化応力比 R_L と対応する損失エネルギー $\sum \Delta W / \sigma'_c$ の関係が例えば式 (2), (3) のように得られる。応力法では R_L を定めるに当たり、想定する地震に対して等価な繰返し回数を例えば $N_c=15, 20$ のように決める必要があるが、エネルギー法では損失エネルギー $\sum \Delta W / \sigma'_c$ は繰返し回数などの波形特性に依らず一意的に決定できることは言うまでもない。

一方、L 側については、ある地点に上昇してくる地震波動エネルギーのうち、実際に累積損失エネルギー $\sum \Delta W$ として使うことができるエネルギー量を各層毎に決める必要がある。ここでは日本で発表されている以下の3種類のエネルギー法について検討した。

(1) 等価線形解析による方法 (A 法)

風間ら^{8) 32)}による方法で、地盤の地震応答解析によって地盤各部の応力～ひずみ履歴ループから損失エネルギー $\sum \Delta W$ の時刻歴を求める。これは地震動によって地盤内で履歴減衰により失われるエネルギーであり、入力地震動が供給する波動エネルギーの定量値そのものはこの方法では表に現れない。応答解析で計算される地盤で損失されるエネルギー $\sum \Delta W$ を、100%水圧上昇あるいは両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ などについての土の液状化エネルギー容量と対比することにより液状化予測ができることになる。使われる解析法としては地盤の非線形挙動をなるべく忠実に模擬する逐次非線形有効応力解析が考えられるが、それでは簡易評価法ではなくなる。それに代わり等価線形解析を使って計算した地盤各部の累積ひずみエネルギーから等価減衰定数を使って損失エネルギー $\sum \Delta W$ を算定し液状化容量と対比する方法がとられる³²⁾。

(2) 上昇波動エネルギーによる方法 (B 法)

國生^{9) 41)}による方法で、地震波の供給エネルギーとして

の上昇波動エネルギー E_u は波動論に基づいて設計地震波から式 (4) により直接計算するか、あるいは地震マグニチュードと等価震源距離、地層の S 波インピーダンス ρV_s から式 (5) (6) (7) によって簡易に決めることもできる^{35) 36)}。そのように算出した地盤各深度での上昇波エネルギー E_u と、液状化を引き起こす地盤材料の累積損失エネルギー $\sum \Delta W$ に関連付けられた累積ひずみエネルギー $\sum W$ とを対比する。このため地盤での SH 波伝播時の波動減衰による損失エネルギー ΔE と地盤材料内の繰返し载荷時の履歴減衰による累積損失エネルギー $\sum \Delta W$ とを等価に置く必要がある。すなわち、 ΔE を賄う累積波動エネルギー E_u と $\sum \Delta W$ を賄う累積ひずみエネルギー $\sum W^*$ を粘弾性波動理論と室内液状化試験データを使って地盤の各層で直接対比することで液状化予測する方法をとっている ($\sum W^*$ の定義など理論的背景については文献⁴¹⁾を参照)。この方法では入力エネルギーが定量的に与えられるため、液状化可能性が R 側だけでなく L 側からも把握しやすい。

(3) エネルギー平衡式に基づく方法 (C 法)

酒向ら^{19) 20) 21)}が提案し、建築構造物のエネルギーの釣合いに基づく耐震設計法の考え方を地盤に適用した方法である。1次元多層地盤を剛基盤上に載る多質点振動モデルに置換え、剛体の工学基盤に与える地動加速度で定義される全体の入力エネルギーを固有周期 T の 1 質点系のエネルギースペクトルの形で計算する。そのエネルギーを有効拘束圧や基準ひずみで規定する方式で地盤各層に分配し、各層のエネルギー容量と比較することにより液状化予測を行う。この方法でも地震入力エネルギーが定量的に決められるが、剛基盤を前提としたその定義方法は上記(2)の地盤中の上昇波エネルギーとは異なる。

6. エネルギーに基づく液状化予測法の適用例

これら 3 種類のエネルギー法を仮想均質地盤と既往液状化地盤に適用し、相互の比較および応力法 (道路橋示方書⁵⁰⁾、建築基礎構造設計指針⁵¹⁾、港湾施設の技術基準・同解説⁵²⁾) との比較を行い、さらに一部では実務で使われている有効応力非線形解析⁵³⁾とも比較した。

1) 均質地盤モデル

図9(a)の仮想均質地盤モデルに図9(b)の道路橋示方書⁵⁰⁾に掲載されている2種類の地震動 (タイプ I: I-I-1, タイプ II: II-I-1) の振幅を 1.0, 0.5, 0.2 倍と段階的に変化させ $V_s=350\text{m/s}$ の基盤より入力した。ちなみに振幅 1.0 倍での基盤上昇波累積エネルギー最終値 E_{uf} はタイプ I で $E_{uf} \approx 120\text{kJ/m}^2$ 、タイプ II では $E_{uf} \approx 60\text{kJ/m}^2$ と 2 倍程度異なっている。

表 1 に示すように、振幅 1.0 倍では液状化強度に比して十分大きいためすべてについて液状化する結果が得られ現行の応力法とも整合したが、入力振幅を 0.5, 0.2 倍と減少させた場合には応力法と明瞭な違いが現われ、全体的にエネルギー法の方が液状化しにくい評価となった。また波

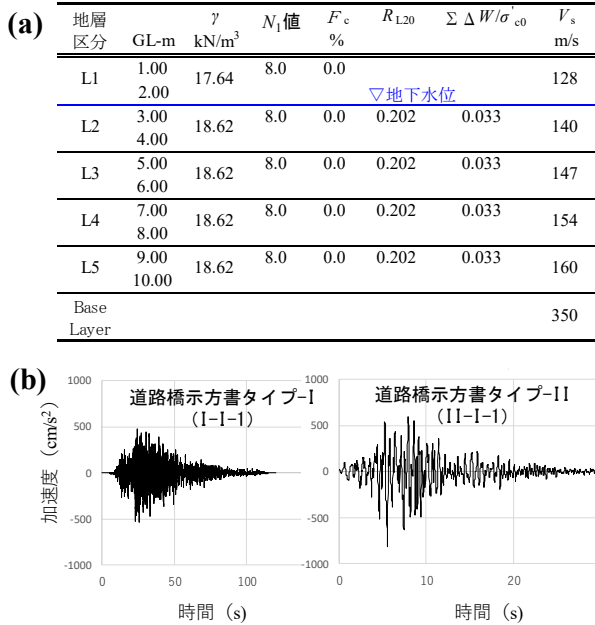


図9. 均質地盤モデル¹¹⁾: (a)モデル地盤, (b)基盤から入力した2種類の地震波 (I-I-1, II-I-1)

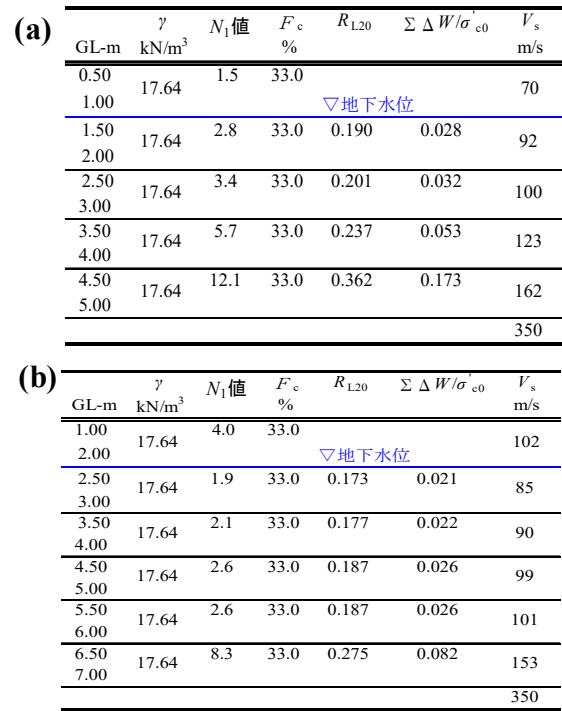


表1. 仮想均質地盤でのエネルギー法と応力法の比較結果¹¹⁾

		I-I-1波形 (入力振幅1.0倍)					
		エネルギー法			応力法		
層名	深度 (m)	A法 G/60=100%	B法	C法 a)法	道路橋	建築基礎	港湾
L2	2~4	○	○	○	○	○	○
L3	4~6	○	○	○	○	○	○
L4	6~8	○	○	○	○	○	○
L5	8~10	○	○	○	○	○	○
		I-I-1波形 (入力振幅0.5倍)					
		エネルギー法			応力法		
層名	深度 (m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾
L2	2~4		○	○	○	○	○
L3	4~6		○	○	○	○	○
L4	6~8		○	○	○	○	○
L5	8~10		○	○	○	○	○
		I-I-1波形 (入力振幅0.2倍)					
		エネルギー法			応力法		
層名	深度 (m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾
L2	2~4		○			○	
L3	4~6					○	
L4	6~8					○	
L5	8~10					○	
		II-I-1波形 (入力振幅1.0倍)					
		エネルギー法			応力法		
層名	深度 (m)	A法 G/60=100%	B法	C法 a)法	道路橋	建築基礎	港湾
L2	2~4	○	○	○	○	○	○
L3	4~6	○	○	○	○	○	○
L4	6~8	○	○	○	○	○	○
L5	8~10	○	○	○	○	○	○
		II-I-1波形 (入力振幅0.5倍)					
		エネルギー法			応力法		
層名	深度 (m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾
L2	2~4		○	○	○	○	○
L3	4~6		○	○	○	○	○
L4	6~8		○	○	○	○	○
L5	8~10		○	○	○	○	○
		II-I-1波形 (入力振幅0.2倍)					
		エネルギー法			応力法		
層名	深度 (m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾
L2	2~4					○	
L3	4~6					○	
L4	6~8					○	
L5	8~10					○	

注: ○ 液状化可能性あり

動エネルギーの大きなタイプI地震動の方が液状化し易い評価のエネルギー法に対し、応力法では逆の傾向となった。エネルギー法の間でも不一致が生じたが、これにはR側とL側のエネルギー比較法の違いが関わっている。

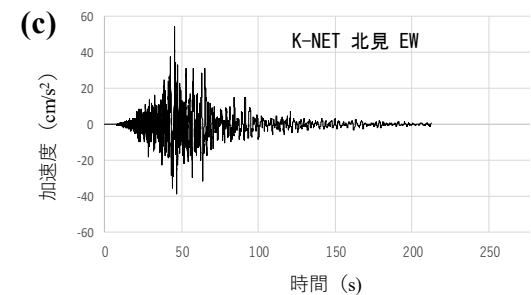


図10. 端野町での地盤モデルと地震動記録¹¹⁾: (a)調査点1, (b)調査点7での地盤モデル, (c)K-NET 北見記録

2) 2003年十勝沖地震端野町地盤

2003年十勝沖地震 ($M=8.0$) の際に震源距離 230km にあった北海道北見市端野町の極めて密度の緩い造成農地が地表最大加速度 50cm/s^2 程度で液状化・流動破壊を起こした⁵⁴⁾。図10(a),(b)には地盤調査に基づく2か所(調査地点1,7)の地盤モデルを示す。この液状化地点から約10km離れた K-NET 北見 EW の図10(c)に示す地表波を $V_s=350\text{m/s}$ の基盤に引き戻して入力した。

表2に示すように応力法や非線形有効応力解析も含め実際に起きていた液状化を予測したのはエネルギーB法と応力法の港湾基準(等価加速度と等価N値からなる設計用チャートを用いている)のみであった。

エネルギーB法については、地盤の上昇波動エネルギーの定量値を直接比較に用いていることがこのような小加速度でありながらある程度のエネルギーを持つ地震動による液状化可能性を評価できた理由と考えられる¹¹⁾。

設計用チャートを用いる港湾基準は別として、他の応力法ではR側とL側の応力を対比するため極めて低い加速度値が適用範囲外となったと思われる。また有効応力解析については、非常に小さな応力振幅レベルでのダイレイタ

ンシーモデル適用性の吟味が十分でないことが液状化を再現できなかった理由と考えられる¹¹⁾。

3) 東北地方太平洋沖地震浦安市舞浜地点

2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_f=9.0$) の際に液状化した浦安市舞浜二丁目地先の首都高速道路の高架脇のボーリング調査データ⁴²⁾を用いて図11(a)の地盤モデルを作成した。この地点は地震によって噴砂に覆われ橋脚基礎の抜け上がりが17cm程度確認されていた⁴²⁾。

この地盤に2.5kmほど離れた非液状化地盤で記録されたK-NET浦安EWの地表波(図11(b)参照)を $V_s=300\text{m/s}$ の基盤に引き戻し入力した。

表3のようにエネルギー法のうちB法については埋立層(Rs)と沖積砂層(As)浅部の液状化を予測し、応力法の一部や有効応力解析の予測とも整合した。この層での液状化発生は地震後の地質調査⁵⁵⁾とも整合している。しかしエネルギー法のA・B・Cの間では評価に開きが生じた。一方、As層深部については応力法の一部以外は液状化を予測せず、エネルギー法、応力法の多くと有効応力解析の評価がかなり整合した結果となった。

4) 評価結果のまとめ

これらの結果を参考にエネルギー法の特徴と検討課題を考える。エネルギー法では現在実務に使われている応力法のように加速度値とその変換係数に依存することなく、R側については累積損失エネルギー $\Sigma\Delta W$ により一意的に液状化挙動を評価できるが、 $\Sigma\Delta W$ を賄うことのできるL側の波動エネルギーの評価が重要であることが明らかとなった。

A法については地盤応答解析を用いて算定される ΣW から $\Sigma\Delta W$ を評価する³²⁾ため波動エネルギーを直接扱わずに済むが、その際用いるパラメータの剛性比 G/G_0 や等価減衰定数が適切な評価結果を得るための鍵であり、今後実用的に使うためには地盤特性に応じて液状化挙動を適切に再現できるこれらパラメータの設定についてガイドラインを明示する必要がある。

B法については波動論により上昇波エネルギー E_u の算定法や液状化予測における $\Sigma\Delta W$ との対比法さらにその理論的根拠も示されている一方で、実際問題への適用において簡素化を図るため現象の大胆な近似がされている⁴¹⁾。今後適用例を増やしていきながら、この近似の妥当性を調べ信頼性の向上を図っていく必要がある。

C法については、まず波動エネルギーを剛基盤上の地盤モデルに入力しており、モデル各要素へのエネルギーの分配割合を初期有効拘束圧と基準ひずみにより決定している。この過程でエネルギースペクトルを用いるためその固有周期を2通りの方法(a・b法)で決めている^{19) 20) 21)}。このように様々な仮定を導入しているため、今後実用度を高めるには既往液状化履歴などとの比較データの蓄積によりこれらの仮定条件の適用性を実証することが必要と思われる。

表2. 端野町でのエネルギー法と応力法の比較結果¹¹⁾

		調査地点1						
		エネルギー法			簡易応力法			有効応力解析
層名	深度(m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾	
L2	1~2		○				○	
L3	2~3		○				○	
L4	3~4							
L5	4~5							
		調査地点7						
		エネルギー法			簡易応力法			有効応力解析
層名	深度(m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾	
L2	2~3		○				○	
L3	3~4		○				○	
L4	4~5						○	
L5	5~6						○	
L6	6~7							

注：○ 液状化可能性あり

(a)

地層区分	GL-m	γ kN/m ³	N_1 値	F_c %	R_{L20}	$\Sigma \Delta W / \sigma_{co}$	V_s m/s
B	1.50	16.50					150
Rc	3.10 4.00	16.50	▽地下水位				150
Rs	4.33		3.4	25.5	0.211	0.078	150
	5.30	18.30	20.9	20.1	(0.211)	(0.078)	
	5.90						
Ac1-1	7.30	15.20					155
As	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。

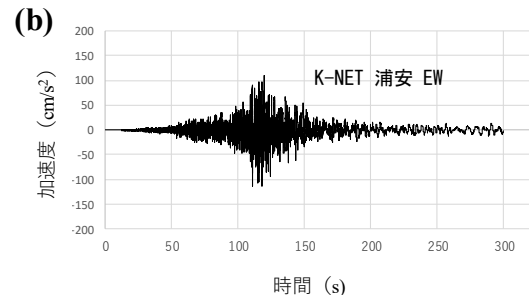


図11. 浦安舞浜での地盤モデル(a)と入力加速度波(b)¹¹⁾

表3. 浦安舞浜でのエネルギー法と応力法の比較結果¹¹⁾

		エネルギー法			簡易応力法			有効応力解析
層名	深度(m)	A法	B法	C法	道路橋	建築基礎	港湾	
Rc	3.1~4.0							
Rs	4.0~5.9		○		○			○
Ac1-1	5.9~7.3							
As	7.3~9.0		○		○	○		○
	9.0~10.0		○		○			○
	10.0~11.0		○					○
	11.0~12.0							
	12.0~13.0							
	13.0~14.0							○
	14.0~15.0							○
15.0~16.0							○	
16.0~16.4							○	

注：○ 液状化可能性あり、
エネルギーB法については、報告書¹¹⁾では一部不適切であった層分割を修正。

今回、実務で使われている有効応力解析法とエネルギー法との比較も試みた。端野町では実際の液状化発生を予測できたエネルギーB法との整合性は確認できなかったものの、浦安舞浜地点ではエネルギーB法と地震後の地盤調査での液状化層の確認結果も含め良い一致性が確認された。その一方で、エネルギーB法ではエネルギー値により液状化予測しているのに対し、今回用いた有効応力非線形解析法では水圧上昇率 ($r_w=0.90$) により液状化予測することとなっている⁵³)。液状化挙動での損失エネルギーの一意性を前提に、有効応力解析においてもエネルギー値により液状化予測する場合にエネルギーB法の結果とどの程度整合するかについては別途検討が必要と思われる。

7. まとめと今後の課題

エネルギーによる液状化予測法については、特にR側での多くの既往研究により累積損失エネルギーと水圧上昇、発生ひずみの間に波形の違いに依らないほぼ一意的関係が主に室内調整試料について示されてきた。

これに対し今回の委員会では、原地盤からのコア採取試料による大量の液状化試験データに基づく検討が加えられた。その結果、三軸試験では同一の試料でも応力振幅が大きいものほど液状化に至るまでの累積損失エネルギーが小さくなり、特に液状化強度の大きな材料ではエネルギーの一意性が成り立ちにくいような結果となることが分かった。しかし原地盤の応力状態に近い繰返し単純せん断試験ではエネルギー一意性が成立することが確認できるため、これは三軸試験の宿命である伸張方向へ偏ったひずみ発生が原因であると考えられる。このひずみの偏りの要因を考慮して試験結果を補正することにより、多岐にわたる地盤材料の三軸試験結果について累積損失エネルギーと応力法での液状化強度とのほぼ一意的関係が成り立つことが示された。

また規則波のみでなく不規則地震波についてもエネルギー一意性は少なくとも初期液状化時点までは確認された。さらに大ひずみ領域については波形固有の不規則性による変動は大きくなるものの、設計的裕度を含めて考えるべき範囲であると思われる。また、応力法での液状化強度と対応する累積損失エネルギーの間にも明瞭な相関関係が例えば式(3)のように見いだされ、エネルギー法を採用するR側の条件は整えられた。このようにエネルギー容量(R側)については加速度振幅、波数・継続時間や個別波形の特殊性など煩雑な情報を必要としないエネルギー法の優位性は十分明らかにされた。

次に、原地盤においてR側エネルギーをL側の地震波動エネルギーとどのように対比するかについて、3種類の液状化予測法(A・B・C法)を取り上げ比較検討を行った。これにはまずL側エネルギーを如何に評価するかが関わるため、その定義法と実地盤での計算例を示した。いずれの方法でもR側とL側のエネルギーを比較することは同じであるが、数値解析の中で間接的に比較する場合と定量

値を直接比較する場合に分かれる。

これら3種類のエネルギー法について、2種類の地震動を仮想均質地盤モデルに入力したところ、地震動が液状化強度に比して十分大きくすべてについて液状化する結果が得られ現行の応力法とも整合した。一方入力振幅を0.5倍・0.2倍と減少させた場合には応力法と整合せず、エネルギー法では相互に食違いが生ずるものの、波動エネルギーの大きな入力波の方が応力法に比べて液状化し易い共通的傾向が認められた。

またエネルギー法を2003年十勝沖地震($M=8.0$)で地表最大加速度 50cm/s^2 程度で液状化した地点に適用したところ、地盤(浅部)での液状化を予測したのはエネルギーB法のみで、地盤からの入力波動エネルギーを直接R側と定量比較する方法の優位性が示されたと考えられる。

さらに、エネルギー法を2011年東北地方太平洋沖地震($M=9.0$)の際に液状化した浦安市舞浜地点に適用した。エネルギーB法が埋立層と沖積砂層の液状化を予測し、幾つかの応力法と有効応力解析の予測と整合し、さらに地震後の現場での調査結果とも調和的であった。

以上の液状化予測法の比較検討から全体的に明らかになったこととして、応力法は加速度値に圧倒的に依存するのに対し、エネルギー法は同程度の加速度でも波動エネルギーの大小によって評価結果に大きな差が現れる点である。エネルギー法では加速度値に直接支配されず、累積損失エネルギー $\sum\Delta W$ により一意的に液状化挙動を評価できる。ただし現状ではエネルギー法相互間の食い違いも目立ち、それを埋めていくには $\sum\Delta W$ を賄うL側エネルギーの評価とR側との比較法についてさらなる吟味が必要であることが今回の比較検討で改めて明らかとなった。

未だ適用例の少ないエネルギー法であり、今後既往液状化事例や模型実験などとの比較による実証データを積み重ねていく必要がある。このため特に応力法との比較を含め既往液状化事例、模型実験による実証的研究や砂の構成式をできるだけ忠実に再現できる逐次非線形有効応力解析との比較研究が必要である。

今回の委員会活動では以上で述べた以外にも、損失エネルギーのせん断剛性低下率 G/G_0 や体積ひずみ ϵ_v などとの相関についても多数の原位置コア採取試料の試験データに基づいた整理を行った。未だ検討が十分でない面もあるが、損失エネルギーをパラメータとした G/G_0 や ϵ_v などの一意的評価の可能性が示され、今後さらにデータ収集・分析が進められることを期待したい。

また液状化予測に留まらず、液状化を考慮した構造物設計においても、液状化関連の設計で必要となる定数(地盤剛性・バネ定数・沈下量・残留強度など)の累積損失エネルギーによる評価式を提案していくことも重要である。これらはエネルギーの連続関数として与えられるため、応力法の F_L 、 P_L や水圧上昇率などで設計定数を不連続的に変化させる現行の設計法に代わる合理的な方法を提供することが期待できる。

謝辞：

本研究展望の内容は 2015～2019 年にわたって行われた「エネルギーに基づく液状化予測法に関する研究委員会」の報告書に基づくところが大きい。長期間にわたる委員会活動において副委員長の風間基樹教授（東北大学）はじめ幹事・委員の皆様には討議や報告書執筆などで大変なご貢献を頂いた。この委員会の発足は以前の研究発表会で筆者とエネルギー法の意義と実用化について議論を交わした風間先生が学会に働きかけて実現したこと、本ジャーナル特別号発刊に当たっても風間先生がリーダーシップを発揮されたことをここに記しておきたい。末筆ながら風間先生はじめ関係各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal on SMFE Div. ASCE*, 97 (SM9), 1249-1273, 1971.
- NRC (National Research Council): Liquefaction of soils during earthquakes, Committee of Earthquake Engineering, *Commission of Engineering and Technical Systems*, National Academy Press, Washington, D.C., 1985.
- Davis, R. O. and Berrill, J. B.: Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.10, 59-68, 1982.
- Berrill, J. B. and Davis, R. O.: Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: Revised model?, *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.25, No.2, 106-118, 1985.
- Towhata, K. Ishihara: Shear work and pore water pressure in undrained shear, *Soils and Foundations*, 25(3), 73-84, 1985.
- Yanagisawa, E. and Sugano, T.: Undrained shear behaviors of sand in view of shear work, *Intern. Conf. on SMFE (Special Volume on Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes)*, New Delhi, India, Balkema Publishers 155-158, 1994.
- Figueroa, J. L., Saada, A. S., Liang, L. and Dahisaria, N. M.: Evaluation of soil liquefaction by energy principles, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120 (9), 1554-1569, 1994.
- 風間基樹, 柳沢栄司, 増田昌昭: 定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性, *地盤工学会誌*, 46(4), 21-24, 1998.
- 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*, 8 (3), 463-475, 2013.
- 國生剛治, 金子陽輔, 岡田侑子: 正弦波・不規則波繰返し載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, 205-221, 2018.
- エネルギーに基づく液状化予測法に関する研究委員会: エネルギーに基づく液状化予測法に関する研究委員会報告書, *地盤工学会*, 2019.
- Nemat-Nasser, S. and Shokoh, A.: A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing, *Canadian Geotechnique*, No.16, 659-678, 1979.
- Morimoto H., Okada N. and Kazama M.: Evaluation of elastic energy of granular assemblies subjected to various consolidation histories by DEM, *Powders and Grains*, 2001.
- Kazama, M., Morimoto, H., Mori, T., Sento, N. and Shinozaki, T.: Micromechanical interpretation of liquefaction resistance of over-consolidated granular assemblies, *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, 217-223, 2006.
- Green, R. A., Mitchell, J. K. and Politto, C. P.: An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils, *Proc. John Booker Memorial Symposium*, Sydney, Australia, Balkema Publishers, 2000.
- Jafarian, Y., Towhata, I., Baziar, M.H., Noorzad, A., and Bahmanpour, A.: Strain energy-based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier 35, 13-28, 2012.
- 原 忠, 天野真輔, 國生剛治, 大石富彦: 繰返し三軸試験による砂礫材料の損失エネルギーの検討, 第 35 回地盤工学研究発表会, 53-54, 2000.
- 片田敏行, 阿部幸樹, 東山晃: ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液状化過程の考案, *土木学会論文集*, 388, III-8, 43-50, 1987.
- 下村修一, 安達俊夫, 酒匂教明: エネルギーの釣合に基づく地盤の地震時挙動の評価に関する研究, *日本建築学会構造系論文集* 第 75 巻 第 650 号, 807-815, 2010.
- 下村修一, 安達俊夫, 酒匂教明: 粘性減衰により吸収されるエネルギー及び多層地盤のエネルギー分配率の評価, *日本建築学会構造系論文集* 第 76 巻 第 661 号, 553-562, 2011.
- 下村修一, 安達俊夫, 朝枝亮太, 酒匂教明: 地盤の液状化による地表面沈下量の推定, *日本建築学会構造系論文集* 第 77 巻 第 680 号, 1545-1552, 2012.
- 風間基樹, 河又洋介, 鈴木崇弘, 柳沢栄司: 表層地盤応答・液状化から見た三陸はるか沖地震の強震動強さ, *三陸はるか沖地震シンポジウム論文集*, 28-35, 1998.
- 風間基樹, 加賀谷俊和, 柳沢栄司: まさ土の液状化抵抗の特殊性, *土木学会論文集*, 645, III-50, 153-166, 2000.
- 風間基樹, 高村浩之, 海野寿康, 仙頭紀明, 渦岡良介: 不飽和火山灰質砂質土の液状化機構について, *土木学会論文集 C*, 62(2), 546-561, 2006.
- 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: 流動限界と損失エネルギーによるまさ土の液状化特性の評価, *土木学会論文集*, 687, III-56, 303-308, 2001.
- 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介: 非排水繰返しせん断履歴後の再圧密試験と体積収縮特性のモデル化, *土木学会論文集*, III-67, 307-317, 2004.
- 大島貴充, 風間基樹, 仙頭紀明, 河村健輔, 林健太郎: 溶液型薬液改良砂の液状化抵抗および繰返しせん断後の変形特性, *土木学会論文集 C*, 64(4), 732-745, 2008.
- Annaki, M. and Lee, K.L.: Equivalent uniform cycle concept for soil dynamics, *Journal of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 103 (GT6), 549-564, 1977.
- Pan K. and Yang Z. X.: Evaluation of the liquefaction potential of sand under random loading conditions: equivalent approach versus energy-based method, *Journal of Earthquake Engineering, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 650-665, 2017.
- 古閑潤一, W, Seto, 青柳悠大: 消散エネルギーに着目した複数回液状化試験結果の分析 *土木学会第 70 回年次学術講演会*, 587-588, 2015.
- 本多 剛, 重野 喜政: 異なる相対密度を持った珪砂の液状化強度曲線の評価第 52 回地盤工学研究発表会 1529-1530, 2017.
- 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳沢栄司: 地盤に入力された累加損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, *土木学会論文集*, 631, III-48, 161-177, 1999.
- 國生剛治, 本山隆一: 地震波の上昇波と下降波の分離による表層地盤でのエネルギー収支, *土木学会論文集 No.652/III-51*, 257-267, 2002.
- 國生剛治, 本山隆一, 万谷昌吾, 本山 寛 (2004): 表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計, *日本地震工学会論文集*, 第 4 巻, 第 4 号, 1-20.
- 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 (電子ジャーナル)* 第 11 巻, 第 1 号, 14-31, 2011.
- 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 (電子ジャーナル)* 第 12 巻, 第 5 号, 2012.
- Gutenberg, B.: The energy of earthquakes, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, CXII (455), 1-14, 1956.
- 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 -, 第 4 章 184-194 鹿島出版会, 2014.
- Law, K. T., Cao, Y. L., and He, G. N.: An energy approach for assessing seismic liquefaction potential, *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 320-329, 1990.
- 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, 603-618 2014.
- 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, 283-293, 2016.

- 42) 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.
- 43) 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・エネルギー委員会特集号, 印刷中, 2020.
- 44) Sarma, S. K.: Energy Flux of Strong Earthquakes, *Tectonophysics*, Elsevier Publishing Company, 159-173, 1970.
- 45) Joyner, W. B. and Fumal, T. E.: Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion, *Proc. of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.2, 777-783, 1984.
- 46) 石澤友浩, 國生剛治: 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・エネルギー委員会特集号, 印刷中, 2020.
- 47) Idriss, I.M. and Boulanger, R.: Soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute*, MNO-12, 2008.
- 48) Arias, A.: A measure of earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants. *The MIT Press*, Cambridge, MA, USA, 438-483, 1970.
- 49) Kayen, R.E. and Mitchell, J.K.: Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias Intensity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(12), 1162-1174, 1997.
- 50) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017.
- 51) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 4.5 地盤の液状化, 2001.
- 52) 日本港湾協会: 港湾施設の技術上の基準・同解説 H30 年版, 2018.
- 53) 運輸省港湾技術研究所: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研試料 No.869, 1997.
- 54) Tsukamoto, Y. Ishihara, K., Kokusho, T, Hara, T. and Tsutsumi, Y.: Fluidization and subsidence of gently sloped farming fields reclaimed with volcanic soils during 2003 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Geotechnical Case History Volume*, Balkema, 109-118, 2009.
- 55) 平朝彦, 飯島耕一ほか: 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, 410-418, 2012.

Energy-Based Liquefaction Potential Evaluation Recommended in Practical Design

Takaji KOKUSHO¹

¹ Professor Emeritus, Chuo University

Abstract

It is widely recognized that liquefaction behavior is more closely correlated to dissipated energy than to applied stress, and hence Energy-Based Method (EBM) for liquefaction evaluation seems promising though Stress-Based Method (SBM) is exclusively used worldwide. With this background, a research committee on EBM for liquefaction was held in the Japanese Geotechnical Society probably as a first endeavor in the world. In this article, as the first paper in a special volume edited by the committee, a perspective on energy-based liquefaction interpretations is summarized based on the committee report together with a personal view of the author. Among the major findings, test results on various intact soils sampled in situ demonstrate that cumulative dissipated energy can uniquely determine pore-pressure buildup and induced strain regardless of cyclic loading histories, and correlate with *CRR* in SBM uniquely again irrespective of soil properties. Liquefaction evaluations are implemented for a hypothetical uniform sand layer as well as two case history soil layers by employing three different EBMs available in Japan wherein the cumulative dissipated energy is compared with earthquake wave energy at each soil layer. The comparative study reveals in general that the EBM can predict liquefaction behavior without worrying about the variability of earthquake waves unlike the SBM, though there still remain differences in the evaluations among the three EBMs to be studied further. Considering the great advantage of EBM over SBM, it is strongly recommended to be employed in engineering practice.

Key words: dissipated energy, earthquake wave energy, induced strain, triaxial test, in situ sample