

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—

三森 祐貴¹, 國生 剛治²

1 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻

2 中央大学理工学部

概要

液状化の判定には応力的判定法 (FL法) が標準的方法として使われている。液状化発生を直接的に支配する物理量として損失エネルギーに着目したエネルギー的判定法も提案されてきたが実用には至っていない。ここでは前論文で提案されたエネルギーによる簡易液状化判定法をモデル地盤に適用し, 異なる地震波に対して液状化判定を行い, FL法と対比した。その結果, 両者の判定結果には大まかな整合性が認められるが均質地盤では液状化しやすい深度に違いが現れること, エネルギー法ではFL法での応力低減係数に依らずとも地震動の継続時間・周期成分などの影響が自動的に反映されることが示された。また, 実際に液状化した東北地方太平洋沖地震での浦安市の地盤や十勝沖地震での端野町の地盤を対象に2つの方法で液状化判定を行い, 実挙動との対比によりエネルギー法の特徴と可能性を明らかにし, 既に実用的に使えることを示した。

キーワード: 液状化判定, エネルギー法, FL法, 地震動特性, 地盤条件

1. はじめに

液状化判定法は Seed-Idriss の研究¹⁾以来, 力の釣り合いに基づいた FL 法が標準的方法として使われてきた。一方, 液状化発生には地震時のくり返しせん断により地盤内部で失われる損失エネルギーが密接に関わっているため, エネルギー法による液状化判定も以前より提案されてきた²⁾³⁾⁴⁾。

2011 年東北地方太平洋沖地震のような継続時間の長い海溝型地震や 1995 年兵庫県南部地震のような地殻内で起きる短く激しい揺れの直下型地震に対しても統一的に液状化判定を行うためには, エネルギーに基づいた方法が優れていると思われる。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のが現状である。

國生⁵⁾⁶⁾は密度・細粒分含有率の異なる砂の三軸液状化試験データをエネルギー的視点から分析し, 供試体中の損失エネルギーが繰返し応力の波数や振幅に関わらず間隙水圧上昇や発生ひずみとほぼ一意的な関係があることを示し, それに基づいたエネルギー的液状化判定の具体的方法を提案した。さらにエネルギー法をモデル地盤に適用し, 同一地震動を入力させた FL 法と比較した。

ここでは, 前論文で提案されたエネルギーによる簡易

液状化判定法の可能性をさらに幅広く検討するために, 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 FL 法と対比しながら液状化判定に及ぼす影響を検討する。さらに 2011 年東北地方太平洋沖地震で実際に液状化した千葉県浦安市と 2003 年十勝沖地震で液状化した北海道北見市端野町の地盤にその地点あるいはその近傍で観測された地震波を入力し, エネルギー法と FL 法により液状化判定を行い, 実際の液状化挙動との対比からそれら判定法の適用性と特徴を調べる。

2. エネルギーによる液状化判定法

前論文⁵⁾⁶⁾で提案されたエネルギー法による液状化判定においては, 砂地盤の液状化発生に必要な単位体積当たりの累積損失エネルギー ΔW に対して, 地震波によりどれだけの上昇エネルギー E_u が単位面積当たり供給されるかを検討する。ここではこの方法の骨子を紹介する。

まず, FL 法と同様に地盤各部の液状化応力比 R_{L20} は標準貫入試験の N 値から細粒分を考慮し, 例えば道路橋示方書⁷⁾によって式(1)~(5)で算出できる。

$$R_{L20} = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & : N_a \geq 14 \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & : 14 \leq N_a \end{cases} \quad (1)$$

ここに補正 N 値 N_a は有効上載圧 98kPa 相当に換算した N_1 と細粒分含有率 F_c による補正係数 c_1, c_2 (式(3), (4)) から式(2)によって求めている。

$$N_a = c_1 N_1 + c_2 \tag{2}$$

$$c_1 = \begin{cases} 1.0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 40)/50 & (10\% \leq F_c < 60\%) \\ F_c/20 - 1 & (60\% \leq F_c) \end{cases} \tag{3}$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c - 10)/18 & (10\% \leq F_c) \end{cases} \tag{4}$$

また換算 N 値 N_1 は標準貫入試験の N 値と有効上載圧 σ'_v から式(5)で求めている ($p_0 = 98\text{kPa}$)。

$$N_1 = 1.7N/(\sigma'_v/p_0 + 0.7) \tag{5}$$

次に液状化発生に必要な単位体積当たりの累積損失エネルギー ΔW を有効拘束圧 σ'_c で基準化した $\Delta W/\sigma'_c$ を R_{L20} から式(6)で算出する。この関係式は相対密度や細粒分含有率の大小に依らず一意的に定まるとの実験的知見が得られている⁵⁾⁶⁾。

$$\Delta W/\sigma'_c = 0.032 - 0.48R_{L20} + 2.40R_{L20}^2 \tag{6}$$

また、損失エネルギー ΔW とそれを発生させるために必要な外部から与えるひずみエネルギー W との間には D_r や F_c によらず一意的に式(7)が成り立つことがやはり実験的に示されている⁵⁾⁶⁾。

$$W/\sigma'_c = 5.4 \times 10^{1.25 \times \log(\Delta W/\sigma'_c)} \tag{7}$$

これらの式を用いた具体的なエネルギー法の検討手順を以下に示す。

- 1) 対象地盤を標準貫入試験などの調査間隔に対応し厚さ $H=1\sim 2\text{m}$ 程度の水平要素に分割する。
- 2) 後に述べる FL 法と同様に各要素についての N 値と F_c から式(1)~(5)により R_{L20} を計算する。さらに R_{L20} から式(6)により液状化発生に対する基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ (軸ひずみ $\epsilon_{DA}=5\%$) を決定する。
- 3) $\Delta W/\sigma'_c$ に対応した基準化ひずみエネルギー W/σ'_c を式(7)により算定する。
- 4) 各要素の有効上載圧 σ'_v から $\sigma'_c = (1+2K_0)\sigma'_v/3$ とし、厚さ H の各要素の WH を算定する。以下では、 WH を各要素の液状化エネルギー容量と呼ぶことにする。
- 5) 地盤各水平要素での上昇エネルギー E_u を計算する。そのため地表の加速度時刻歴を用いて、等価線形 1 次元重複反射解析を行う。上昇エネルギー E_u は、その要素での上昇波速度波形 \dot{u} (上昇波加速度波形の 1 回積分で計算) を使って $(\dot{u})^2$ を時間積分し、地層のインピーダンス ρV_s を乗じた値を時間 t で積分することにより次式で求める。

$$E_u = \rho V_s \int_0^t (\dot{u})^2 dt \tag{8}$$

E_u は時間 t についての単調増加関数であり、最終値を E_{uf} とし、これを判定に用いる。

- 6) 各要素について、液状化エネルギー容量 WH と地震波上昇エネルギー最終値 E_{uf} の比 WH/E_{uf} を計算し、その値が小さい要素ほど早く液状化し易いと考え、各要素に $i=1, 2, 3, \dots$ の番号付けをする。その順に各要素の WH/E_{uf} の値を加え合わせ、その累計 ($\sum_i (WH/E_{uf})_i$: 累積エネルギー比と呼び AER と表す) が式(9)のように 1.0 に達するまでの要素が液状化すると考える。つまり、地震波動から供給されるエネルギーが液状化エネルギー容量を賄える限界の要素までは液状化していると考えていることになる。

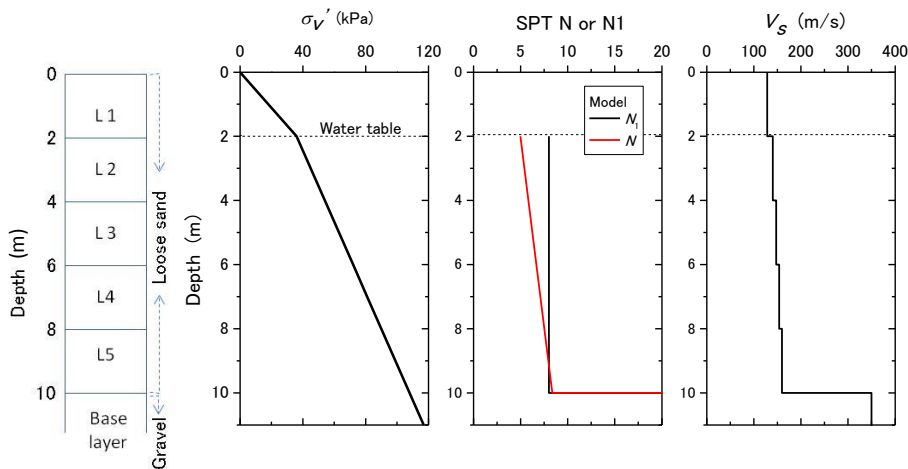


図1 基盤上に載る層厚 10m の均質砂地盤モデル

$$\sum_i (WH/E_{uf})_i = AER < 1.0 \quad (9)$$

すなわち FL 法では各深度ごとに液状化抵抗と地震時せん断応力の比により液状化判定するのに対し、エネルギー法では各深度ごとのエネルギー比 WH/E_{uf} により判定するのではないことに注意が必要である。むしろ、地盤に供給される全上昇波エネルギー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 $\sum WH/E_{uf}$ が 100% までの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。

3. 均質モデルでの異なる地震動による比較・検討

ここでは、入力地震動の継続時間や卓越振動数が液状化発生にどのような影響を与えるかを基本的に検討するために、異なる地震動を単純な均質地盤モデルに入力し、エネルギー法と FL 法により液状化判定を行い、エネルギー法の特徴を調べる。

(1) 地盤・地震条件

図 1 に示すような工学基盤上の層厚 10m、補正 N 値 $N_1=8$ で細粒分含有率 $F_c=0$ の均質砂地盤を、上から厚さ 2m ずつ L1~L5 層に分割した地盤モデルを設定する。地下水面は地表から 2m の深さで、不飽和の L1 層の湿潤密度を $\rho_l=1.8 \text{ t/m}^3$ 、L2~L5 層の飽和密度を $\rho_{sat}=1.9 \text{ t/m}^3$ とする。深度に対する N 値の変化は N_1 と σ'_v の値から式(5)により逆

算し、S 波速度 V_s は道路橋示方書⁷⁾に掲載された以下の経験式(10)で N 値より計算する。

$$V_s = 80N^{1/3} \quad (10)$$

なお各層ごとに V_s は一定値とし、それぞれの中間深度での値を当てはめている。

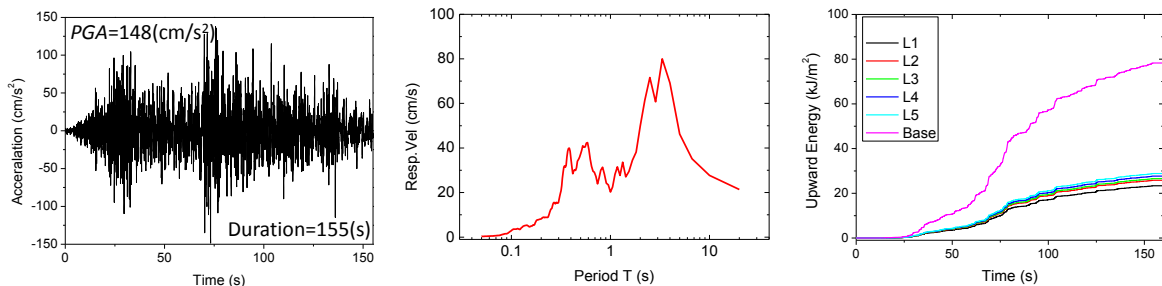
等価線形解析に用いるせん断剛性 G と減衰定数 D のひずみ振幅依存性については、Hardin-Drnevich モデルを変形した次式を用いた⁸⁾。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_r)^\alpha}, \quad \frac{D-D_0}{D_{max}-D_0} = \left(1 - \frac{G}{G_0}\right)^\beta \quad (11)$$

ここに、 G_0 =初期せん断剛性、 γ_r は G/G_0 が 0.5 となる指標ひずみ、 D_0 =初期減衰定数($D_0=0.02$)、 D_{max} =最大減衰定数($D_{max}=0.28$)、 α, β =ベキ定数($\alpha=0.83, \beta=1.44$)である。指標ひずみ γ_r は平均主応力 $\sigma'_c = (1 + 2K_0)\sigma'_v/3$ に応じて変化させ、 $\gamma_r = 0.893 \times 10^{-3} (\sigma'_c/p_0)^{0.5}$ によって計算した⁸⁾。

地震動には地表最大加速度 PGA が 150 cm/s^2 程度の図 2.1, 2.2 左列に示す 4 つの観測記録を使用した。東北地方太平洋沖地震からは(a)M9.0Y 波 (KiK-net/YMTH02 地表, EW 方向, 震源距離 $R=229 \text{ km}$, 地表最大加速度 $PGA=148 \text{ cm/s}^2$)、(b)M9.0T 波 (KiK-net/TKYH12 地表, NS 方向, $R=419 \text{ km}$, $PGA=158 \text{ cm/s}^2$) の 2 記録であり、新潟県中越地震からは(c)M6.8N 波 (KiK-net/NIGH08 地表, EW 方向, $R=68 \text{ km}$, $PGA=140 \text{ cm/s}^2$) と (d)M6.8G 波 (K-NET/GNM009 地表, EW 方向, $R=106 \text{ km}$, $PGA=153 \text{ cm/s}^2$) の 2 記録である。以下ではマグニチュードと地点名頭文字から成る略称で表すこととする。これら

(a)東北地方太平洋沖地震 M9.0Y



(b)東北地方太平洋沖地震 M9.0T

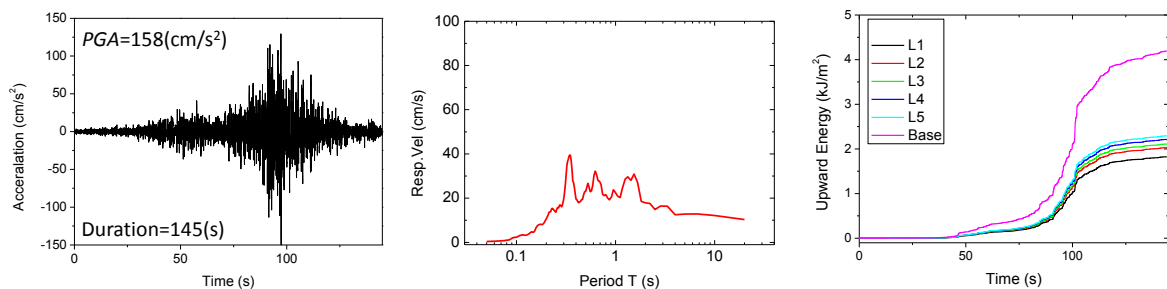
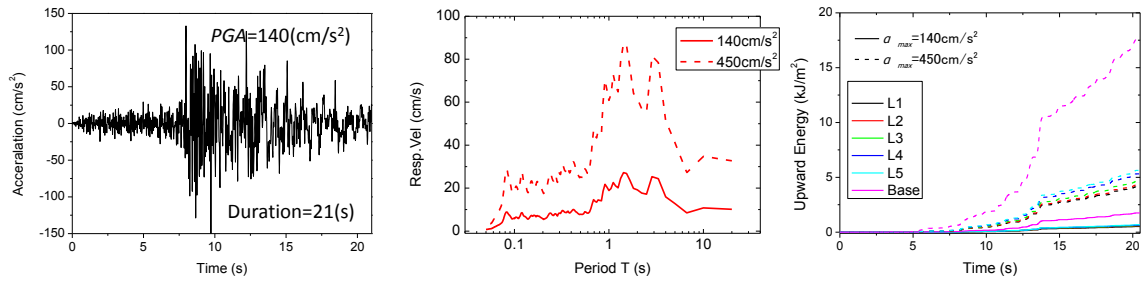


図 2.1 液状化検討に用いた地表加速度波形(左列)と速度応答スペクトル(減衰定数 5%)(中列)、上昇エネルギー(右列) : 東北地方太平洋沖地震での観測記録(a)(b)

(c) 新潟県中越地震 M6.8N



(d) 新潟県中越地震 M6.8G

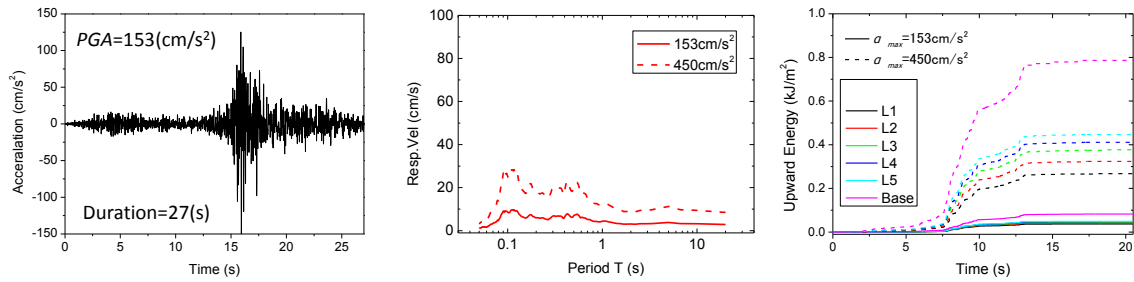


図 2.2 液状化検討に用いた地表加速度波形 (左列) と速度応答スペクトル (減衰定数 5%) (中列), 上昇エネルギー (右列) : 新潟県中越地震での観測記録(c)(d)

の地震動の加速度時刻歴をモデル地盤に入力し、エネルギー法と FL 法により液状化判定を行った。これらのうち新潟県中越地震の 2 つの地震動(c),(d)については観測地震波では両方法ともに液状化しない結果となったため、さらに最大加速度を約 3 倍の $PGA=450\text{cm/s}^2$ になるように振幅を拡大した波形によっても液状化判定を行った。以下ではこれらの地震動を M6.8N3, M6.8G3 と表わして区別する。

それぞれの速度応答スペクトルを図 2.1,2.2(a)~(d)の中列に示す。M9.0Y は 1 秒以上の長周期ピークが最も卓越し、M9.0T, M6.8N, M6.8G では相対的に長周期ピークが小さく短周期が卓越するようになることが分かる。また、地震動の計算に用いた範囲は初動からほぼ主要動終了時点までであり、その継続時間は図 2 に示すとおり東北地方

太平洋沖地震では 2 分を超えるのに対し、新潟県中越地震は 20~30s と短い。

図 2.1,2.2(a)~(d)右列には 4 つの地震動の加速度時刻歴をモデル地盤に入力した等価線形解析で得られた各層での上昇波から式(8)で計算した上昇エネルギーの時刻歴を示している。基盤での上昇エネルギー E_u の最終値を比較すると M9.0Y : $E_{uf}=78.3\text{kJ/m}^2$, M9.0T : $E_{uf}=4.19\text{kJ/m}^2$, M6.8N : $E_{uf}=1.76\text{kJ/m}^2$, M6.8G : $E_{uf}=0.08\text{kJ/m}^2$ であり、M9.0Y 波が圧倒的に大きく、中越地震の M6.8G 波では極めて小さいことが分かる。また、同じ M9.0 の地震でも M9.0T は M9.0Y に比べて震源距離が 2 倍に近く、 E_{uf} は 1 ケタ小さな値となっている。

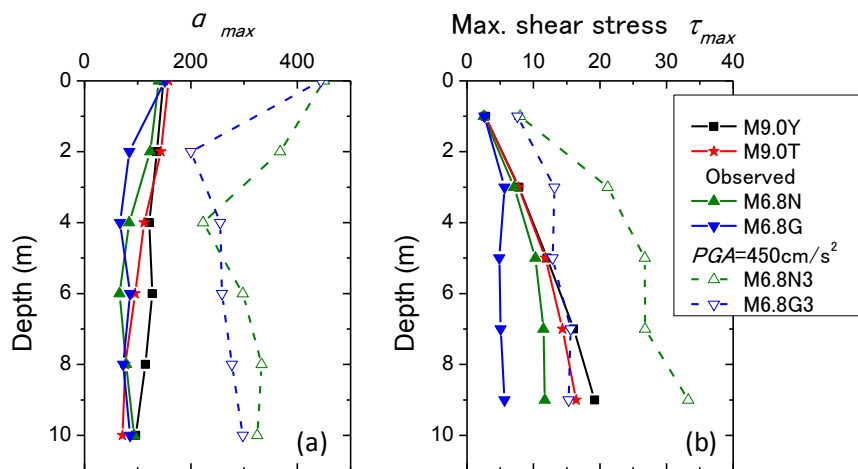


図 3 4 つの地震動で計算した最大加速度 a_{max} (a) と最大せん断応力 τ_{max} (b) の深度分布

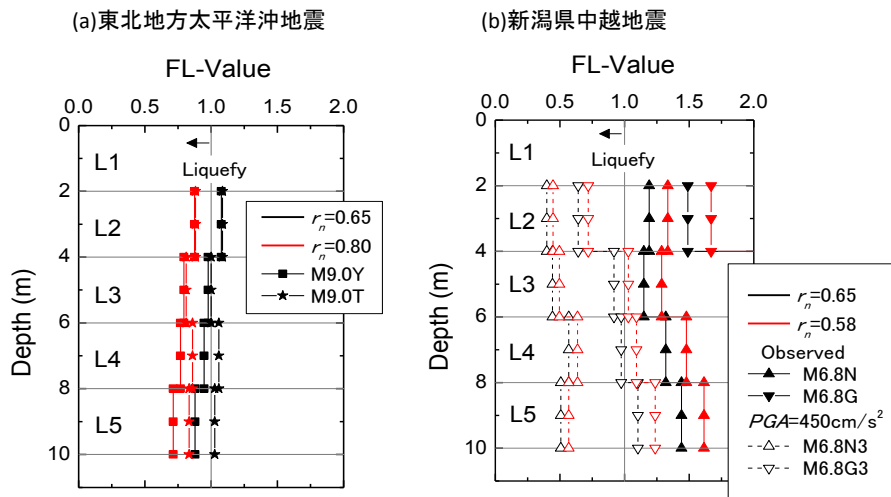


図4 4つの地震動による均質地盤モデルでのFL値の深度分布：東北地方太平洋沖地震(a)，新潟県中越地震(b)

(2) FL法による判定

図3(a)(b)には等価線形解析で得られたそれぞれ最大加速度 a_{max} と最大せん断応力 τ_{max} の深度分布を4つの地震動について示している。長周期が卓越した M9.0Y では短周期が卓越した M6.8G に比べて深度方向に対する a_{max} の低減率は小さく、 τ_{max} の頭打ち傾向が深くまで現れにくいことが分かる。また、新潟県中越地震の観測波形 (observed) については長周期が比較的卓越した M6.8N の方が M6.8G より深くまで a_{max} 、 τ_{max} ともに大きくなっている。さらに、M6.8N、M6.8G の地表最大加速度 PGA を約3倍 ($PGA=450\text{cm/s}^2$) にした場合、各深度で a_{max} 、 τ_{max} が約3倍の値となっていることが分かる。

一般的に行われている FL 法による液状化判定は、 $F_L=R/L$ で定義した FL 値が 1.0 を下回る時に、液状化が発生するとするものである。ここで動的せん断強度比 R は、各層での N 値と F_c から式(1)~(5)により深度 1m ごとに算出した繰返し三軸試験の液状化強度比 R_{L20} より原地盤の静止土圧係数 K_0 を考慮して $R=R_{L20}(1+2K_0)/3$ により算定する。一方、地震時せん断応力比 L については、地震時最大せん断応力比 L_{max} から次式により算定する。

$$L=r_n L_{max}=r_n \tau_{max}/\sigma'_v=\tau_0/\sigma'_v \tag{12}$$

ここに $r_n=\tau_0/\tau_{max}$ は最大せん断応力 τ_{max} を等価な繰返し数と振幅 τ_0 の繰返し応力に低減する係数¹⁾である。この応力低減係数 r_n の値としては、次式⁹⁾により地震マグニチュード M から決めることとする。

$$r_n=0.1(M-1) \tag{13}$$

式(13)から $M=7.5$ に対して得られる $r_n=0.65$ は一般的によく用いられる値である。また、今回入力した地震波のマグニチュード $M=9.0$ 、 $M=6.8$ について式(13)より得られる応力低減係数 r_n はそれぞれ $r_n=0.80$ 、 0.58 となる。

図4にFL法による液状化判定結果をまとめて示している。図(a)のように東北地方太平洋沖地震の M9.0Y 波について $r_n=0.65$ ($M=7.5$) を適用すると、L2層では $F_L>1.0$ であり、L3~L5層では $F_L<1.0$ となり下の層ほど液状化しやすいことになる。また、 $r_n=0.80$ ($M=9.0$) を適用すると、すべての層で FL 値が 1.0 を下回る結果となる。M9.0T 波については深度方向に FL 値がほぼ一定となり、 $r_n=0.65$ を適用するとすべての層で FL 値は 1.0 または多少大きな値となるのに対し、 $r_n=0.80$ の場合にはすべての層で FL 値が 1.0 を下回り液状化する結果になる。

一方、図(b)のように新潟県中越地震の観測波 (observed) では図中の実線カーブのように $r_n=0.65$ 、 0.58 を適用した場合にすべての層で $F_L>1.0$ となり、さらに下の層へ行くほど FL 値が特に M6.8G ではグラフの枠域を越えて大きくなり液状化しにくくなる。

次に $PGA=450\text{cm/s}^2$ にスケールアップした結果を図4(b)に破線で示している。M6.8N3 の場合、 $F_L\approx 0.5$ で全層で激しく液状化することになる。M6.8G3 では浅い L2、L3 層の浅い層で液状化しやすい結果が得られ、M9.0Y での深い層ほど液状化しやすい傾向とは異なっており、M6.8 の短周期が卓越した地震動の特性を反映していると考えられる。

(3) エネルギー法の判定とFL法との比較

前記2. で述べたエネルギー法の手順に従い、 $N_1=8$, $F_c=0$ の条件から式(1)~(5)により計算した $RL_{20}=0.19$ を使うと式(6), (7)から $\Delta W/\sigma'_c=0.028$, $W/\sigma'_c=0.062$ となる。各水平要素の厚さを $H=1m$ とし、静止土圧係数 $K_0=0.5$ とし、図1に示した σ'_v から σ'_c を計算し、各層での液状化エネルギー容量 WH を計算する。

図5上段には(a)東北地方太平洋沖地震波と(b)新潟県中越地震波について水平要素の液状化エネルギー容量 WH と L1~L5 各層での上昇エネルギー E_{uf} の深度分布をそれぞれ実線と破線で示している。これらの単位はすべて kJ/m^2 である。また、図5(a)(b)の下段には対応する地震波についてエネルギー法の判定結果を示している。エネルギー法の手順6) で述べたように各水平要素のエネルギー比 WH/E_{uf} の値と、さらにそれらの値を小さい層から順に加えた累積エネルギー比 $AER=\sum WH/E_{uf}$ の深度に対する変化を横軸にとり、縦軸の深さに対して示している。これより図(a)に示す M9.0Y 波については上昇波エネルギー E_{uf} は各要素の液状化エネルギー容量をはるかに上回り、エネルギー比は勿論、累積エネルギー比 AER もすべて 1.0 以下で全要素が液状化することになる。これに対し M9.0T では E_{uf} がケタ違いに小さく、地下水位以深 1m 区間を除き液状化しない。一方、図(b)に実線で示す新潟県中越地震の観測波形 (observed) については E_{uf} が過小で AER がグ

ラフの枠域を越えて過大となり、まったく液状化の可能性がない。

表1(a)~(d)には4地震動のFL法とエネルギー法による判定結果を比較し、液状化の可能性のある要素を色付けして示している。FL法では液状化強度比 R , 2つの応力低減係数 r_n に対応した地震時せん断応力比 L , その比の F_L を示している。エネルギー法では $H=1m$ の水平要素ごとの WH と E_{uf} の値とこれらの比(%), それらの累積値(%) AER , さらに液状化の順番を示している。また、液状化対象層ではない地下水面より上部は除外している。

これより、地震動のうち M9.0Y が最も液状化し易く、 $r_n=0.80$ としたFL法とエネルギー法のいずれでも全層が液状化し、M6.8N と M6.8G ではいずれの方法でも液状化しない結果となる。特に M6.8G ではエネルギー比や AER が過大となり大部分がグラフの表示範囲に入らない。またその中間的な M9.0T 地震動ではいずれの方法でもある程度の液状化を生じるか、その間際の状態となる。このようにFL法とエネルギー法の判定結果は大まかには類似の傾向となることが分かる。しかし M9.0T 地震動の結果を詳細に見ると、FL法では $r_n=0.80, 0.65$ のいずれでも全層で $F_L=1.0$ 前後となりほぼ液状化しそうな判定であるのに対し、エネルギー法では深度 3m からの 1m 区間でかろうじて液状化可能性があるが、それ以深は可能性が低い。つまり液状化発生深度については明瞭な違いが現れる。

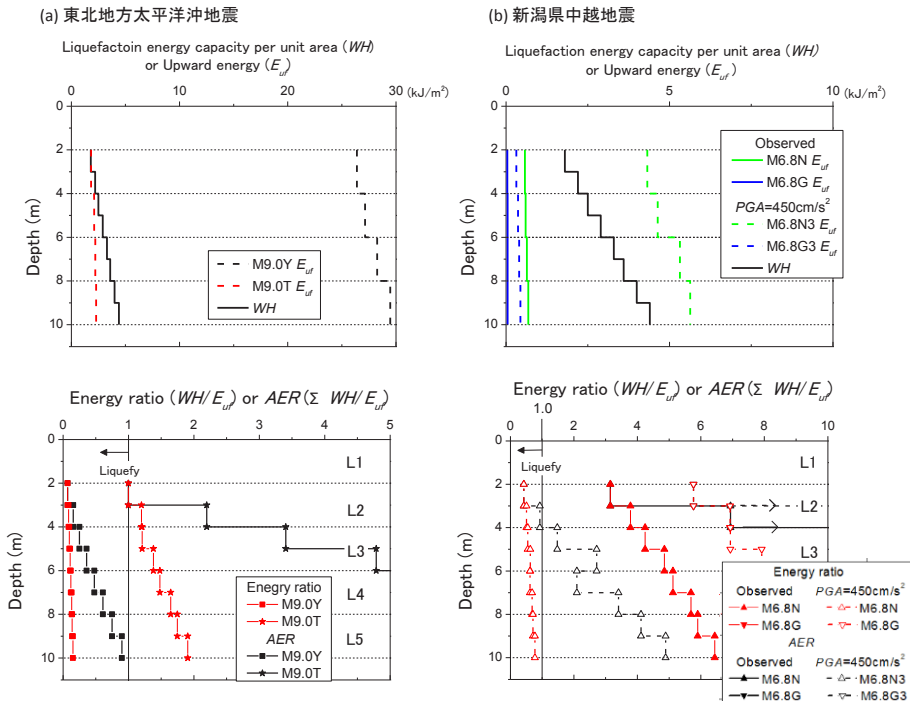


図5 4つの地震動による均質地盤モデルでの液状化エネルギー容量 WH と上昇エネルギー E_{uf} (上段) と液状化エネルギー比 WH/E_{uf} と累積エネルギー比 AER の深度分布 (下段): 東北地方太平洋沖地震(a), 新潟県中越地震(b)

表 1 対象とした 4 地震動による均質地盤モデルでの FL 法, エネルギー法で得られた R・L 値, FL 値, 上昇エネルギー E_{uf} , 液状化エネルギー容量 WH, 累積エネルギー比 AER

(a) M9.0Y(東北地方太平洋沖地震)

深度(m)	R	FL法				エネルギー法				順番	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.80$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)		
		L	FL	L	FL						
1	L1										
2	L1										
3	L2	0.13	0.12	1.08	0.14	0.88	1.8	7	7	①	
4	L2			0.88		2.2	26.39	8	16	②	
5	L3		0.13	0.13	0.98	0.16	0.80	2.5	10	25	③
6	L3				0.98		2.9	27.15	11	36	④
7	L4		0.13	0.13	0.95	0.16	0.77	3.3	12	48	⑤
8	L4				0.95		3.6	28.27	13	61	⑥
9	L5		0.14	0.14	0.88	0.17	0.71	4.0	14	75	⑦
10	L5				0.88		4.4	29.47	15	90	⑧

(b) M9.0T(東北地方太平洋沖地震)

深度(m)	R	FL法				エネルギー法				順番	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.80$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)		
		L	FL	L	FL						
1	L1										
2	L1										
3	L2	0.13	0.11	1.09	0.14	0.88	1.8	8	16	①	
4	L2			1.09		2.2	1.82	100	100	②	
5	L3		0.12	0.12	1.00	0.15	0.81	2.5	11	25	③
6	L3				1.00		2.9	2.11	121	220	④
7	L4		0.12	0.12	1.06	0.14	0.86	3.3	12	48	⑤
8	L4				1.06		3.6	2.21	148	165	⑥
9	L5		0.12	0.12	1.03	0.15	0.84	4.0	14	75	⑦
10	L5				1.03		4.4	2.29	175	191	⑧

(c) M6.8N観測波(新潟県中越地震)

深度(m)	R	FL法				エネルギー法				順番	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.58$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)		
		L	FL	L	FL						
1	L1										
2	L1										
3	L2	0.13	0.10	1.19	0.09	1.33	1.8	315	315		
4	L2			1.19		2.2	0.58	378	315		
5	L3		0.11	0.11	1.15	0.10	1.29	2.5	424		
6	L3				1.15		2.9	0.60	485		
7	L4		0.09	0.09	1.32	0.08	1.48	3.3	512		
8	L4				1.32		3.6	0.64	569		
9	L5		0.09	0.09	1.44	0.08	1.61	4.0	590		
10	L5				1.44		4.4	0.68	644		

(d) M6.8G観測波(新潟県中越地震)

深度(m)	R	FL法				エネルギー法				順番	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.58$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)		
		L	FL	L	FL						
1	L1										
2	L1										
3	L2	0.13	0.08	1.49	0.07	1.67	1.8	0.04	4278	4278	
4	L2			1.49		2.2	0.04	5133	4278		
5	L3		0.05	0.05	2.43	0.05	2.73	2.5	0.05	5570	
6	L3				2.43		2.9	0.05	6366		
7	L4		0.04	0.04	3.00	0.04	3.36	3.3	0.05	6798	
8	L4				3.00		3.6	0.05	7553		
9	L5		0.04	0.04	2.98	0.04	3.34	4.0	0.05	8007	
10	L5				2.98		4.4	0.05	8735		

(e) M6.8N3 PGA=450cm/s²波(新潟県中越地震)

深度(m)	R	FL法				エネルギー法				順番	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.58$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)		
		L	FL	L	FL						
1	L1										
2	L1										
3	L2	0.13	0.31	0.40	0.28	0.45	1.8	4.32	42	42	①
4	L2			0.40		2.2	4.32	51	93	②	
5	L3		0.28	0.28	0.44	0.25	0.50	2.5	4.64	55	148
6	L3				0.44		2.9	4.64	63		
7	L4		0.22	0.22	0.57	0.20	0.64	3.3	5.32	62	
8	L4				0.57		3.6	5.32	68		
9	L5		0.25	0.25	0.51	0.22	0.57	4.0	5.64	71	
10	L5				0.51		4.4	5.64	78		

(f) M6.8G3 PGA=450cm/s²波(新潟県中越地震)

深度(m)	R	FL法				エネルギー法				順番	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.58$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)		
		L	FL	L	FL						
1	L1										
2	L1										
3	L2	0.13	0.19	0.64	0.17	0.72	1.8	0.32	577	577	
4	L2			0.64		2.2	0.32	692	577		
5	L3		0.14	0.14	0.92	0.12	1.03	2.5	0.37	693	
6	L3				0.92		2.9	0.37	792		
7	L4		0.13	0.13	0.97	0.11	1.09	3.3	0.40	811	
8	L4				0.97		3.6	0.40	901		
9	L5		0.11	0.11	1.10	0.10	1.24	4.0	0.44	912	
10	L5				1.10		4.4	0.44	995		

新潟中越地震の M6.8N と M6.8G の観測波形 (observed) については両判定法ともに液状化が全く生じない結果となったため, この 2 地震動に限って加速度を約 3 倍 (地表最大加速度 $PGA=450\text{cm/s}^2$) にスケールアップし, 再び液状化判定した結果が図 4(b),5(b)の破線と表 1(e),(f)に示されている。これより, M6.8N3 については FL 法では $r_n=0.65$ だけでなく, $r_n=0.58$ とした場合にもかなり深部まで同程度に液状化するのに対しエネルギー法では浅い部分のみに限られ, M6.8G3 については FL 法では浅部のみ液状化するのに対しエネルギー法では全く液状化しないことになり判定結果に大幅な違いが表れる。

一方, 表 1 の(a)と(e)を比較すると, 最大加速度は 148gal と 450gal で約 3 倍違うため FL 法によると後者の方がはるかに F_L が小さく激しく液状化することになるが, 基盤での上昇エネルギーはそれぞれ $E_{uf}=78\text{kJ/m}^2$ と $E_{uf}=18\text{kJ/m}^2$ であるため, エネルギー法では前者で全層液状化するのに対し後者では地下水面直下の L2 層のみに留まる。

このように 2 つの判定法は大枠で整合している面もあるが, 加速度が大きい割には上昇エネルギーの小さな短周期の卓越した地震動では両者の不一致が目立ってくる。また均質地盤においては, 図 5 の下段や表 1 でのエネルギー比 WH/E_{uf} の値から分かるように, 液状化が発生しやすい深度は FL 法では地震動の卓越振動数によって変化するのに対し, エネルギー法では常に浅い方が先に液状化しやすい傾向が見られる。

4. 千葉県浦安市地盤での比較検討

2011 年東北地方太平洋沖地震では千葉県浦安市において広い範囲で液状化が発生し, 住宅や社会インフラに多大な被害が発生した。特に, 江戸川沿いの沖積地盤からなる元町に比べて, 1962 年以降に埋め立てた中町や新町に被害が集中した。大量に噴出した噴砂の細粒分含有率は数 10%に達しており, それらはすべて非塑性であった。

ここでは実際に液状化が生じた浦安市地盤を対象に液状化判定を行い, FL 法との対比によりエネルギー法の可能性を調べる。

(1) 地盤・地震条件

対象とした浦安市の地盤は元町の浦安市役所 (液状化の形跡なし) と, 新町の高洲小学校校庭 (液状化の形跡あり) で約 3km の離隔距離である。東北地方太平洋沖地震本震の地震波については前者では K-NET/CHB008 の地表 EW 方向波形 (図 6(a) 左列), 後者では東京大学地震研が GL-14m に設置した埋設型地震計の EW 方向波形 (図 6(b) 左列) を用い, 地震計設置位置の地盤について液状化判定を行った。計算に用いた地震動の継続時間は初動からほぼ SH 波主要動の範囲と思われる時点までの 236 秒間とした。図 6 の中列にはそれぞれの観測波形の速度応答スペクトルを示している。両者は類似しているが, 高洲小学校の方

が多少長周期が卓越していることが分かる。図6右列に示す基盤層で計算された上昇エネルギー E_{uf} を比較すると、浦安市役所： $E_{uf}=100\text{kJ/m}^2$ 、高洲小学校： $E_{uf}=146\text{kJ/m}^2$ であり、両者には約1.5倍の差がある。

表2(a)(b)にこれら2地点の地盤モデルと密度、N値などを示す。両地点ともに地表付近の埋土層B(B1, B2)とその下の沖積砂層As(As1, As2)、沖積粘土層Ac、硬質粘土層Nacがあり、GL-40m以深でN値50以上の基盤層Dgが現れ、基本的には類似した地層構造である。ただし、埋立地にある高洲小学校では旧海底のAs1層とB層の間に浚渫埋立層Fが存在する点が異なる。また高洲小学校ではAs1層を地中地震計設置深度の上下で①、②層に分割している。地下水位は浦安市役所でG.L.-2.5m、高洲小学校でG.L.-1.5mであり、これ以深の表2に矢印で示す範囲にある砂質土(B, F, As1層)を液状化判定対象としている。基準化N値 N_1 については式(5)を用いて算出した。各層の ρ_t や V_s については浦安市役所、高洲小学校のPS検

層データを参考に決定し、 F_c については非常にばらついた測定値を層ごとに平均し用いている。

等価線形解析に用いるせん断剛性 G と減衰定数 D のひずみ依存性については式(11)を用い、砂質土(B, F, As1)については $D_0=0.02$, $D_{max}=0.28$, $\alpha=0.83$, $\beta=1.44$, $\gamma_r=1.47 \times 10^{-3}(\sigma'_c/p_0)^{0.5}$, 粘性土(Ac, Nac)については $D_0=0.03$, $D_{max}=0.16$, $\alpha=0.87$, $\beta=1.43$, γ_r は σ'_c に依らず 2.40×10^{-3} と設定した⁸⁾。

液状化判定を砂質土を対象として行う場合、含まれる細粒土の塑性指数が問題となる。ここでは液状化により噴出した砂に含まれていた細粒土がすべて非塑性(NP)であったことから、とりあえず砂質土すべてについて非塑性と仮定している。

(2) FL法, エネルギー法による判定と比較

まずFL法については、図7(a)(b)に等価線形解析で得

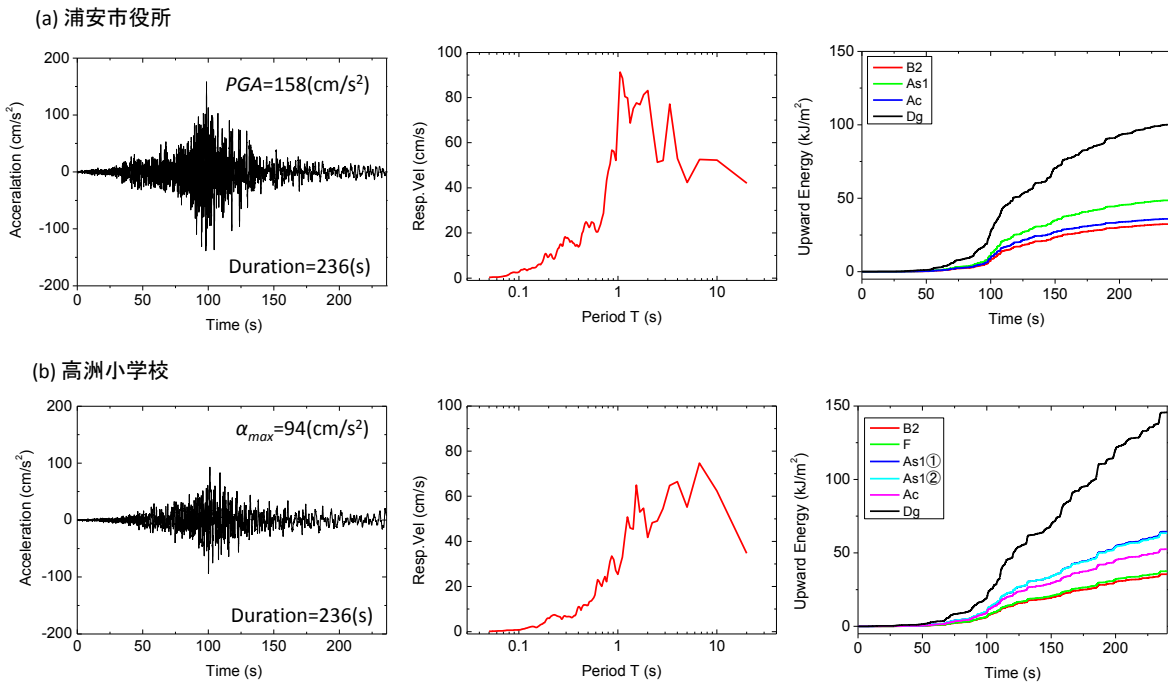


図6 東北地方太平洋沖地震での加速度波形(左列)と速度応答スペクトル(減衰定数5%)(中列)、上昇エネルギー(右列)：浦安市役所(a)、高洲小学校(b)

表2 浦安市役所(a)と高洲小学校(b)の地盤モデル

(a) 浦安市役所								(b) 高洲小学校									
深度(m)	層厚(m)	層タイプ	N値	有効上載圧 σ'_v (kN/m ²)	N1	細粒分含有率 Fe(%)	湿潤密度 ρ_t (t/m ³)	速度値 V_s (m/s) (Initial)	深度(m)	層厚(m)	層タイプ	N値	有効上載圧 σ'_v (kN/m ²)	N1	細粒分含有率 Fe(%)	湿潤密度 ρ_t (t/m ³)	速度値 V_s (m/s) (Initial)
0.0									0.0								
2.5	2.5	B1	6.0	22.7	11.0	50	1.80	145	1.5	1.5	B1	6.0	13.2	12.3		1.80	145
5.2	2.7	B2	3.0	55.9	4.1	40	1.80	115	3.7	2.2	B2	1.8	35.1	3.0	52	1.80	98
14.2	9.0	As1	9.6	106.3	9.6	11	1.90	160	6.7	3.0	F	1.0	52.6	1.4	95	1.60	100
36.8	22.6	Ac	0.4	212.5	0.2	44	1.60	140	14.0	9.3	As1①	8.6	93.6	9.2	23	1.90	160
41.9	5.1	Nac	4.8	295.2	2.0	62	1.65	180	16.0	2.0	As1②	8.6	102.4	8.7	52	1.90	160
		Dg	50.0				2.00	350	35.7	19.7	Ac	0.9	192.6	0.6	96	1.60	140
									38.7	3.0	As2	9.1	263.8	4.7		1.90	160
									43.7	5.0	Nac	4.1	293.0	2.0	95	1.65	180
											Dg	50.0				2.00	350

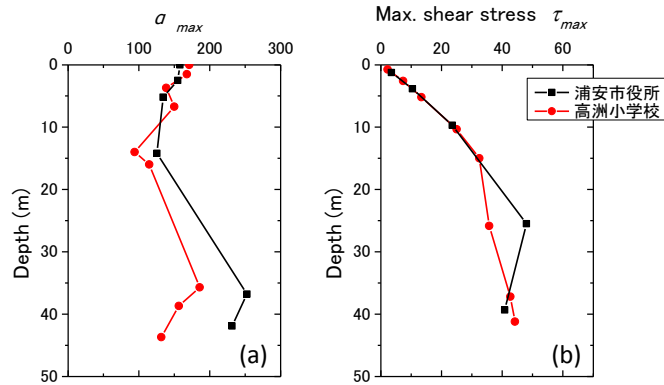


図7 浦安の2地点での最大加速度 α_{max} (a)と最大せん断応力 τ_{max} (b)の深度分布

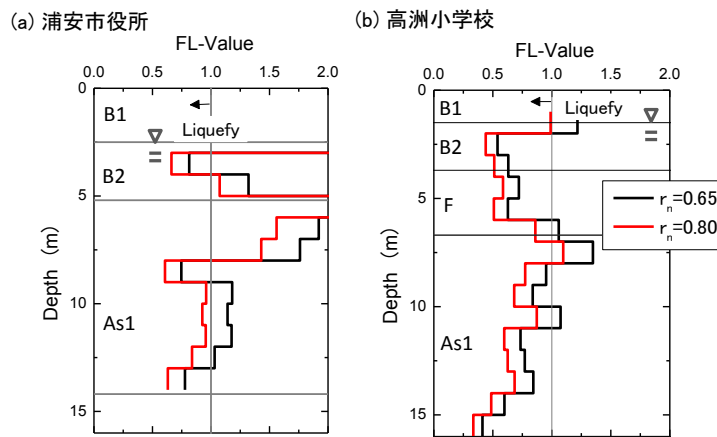


図8 浦安市役所(a), 高洲小学校(b)の FL 値の深度分布

られた最大加速度 α_{max} と最大せん断応力 τ_{max} の深度分布を2地点について示している。最大せん断応力 τ_{max} の深度分布は地表～G.L.-20m の範囲で2地点間に大きな違いがないことが分かる。前述の3.(2)の方法に従って各層のN値と細粒分含有率 F_c から式(1)～(5)により深さ1mごとに R_{L20} を算出し、 $K_0=0.5$ と仮定して液状化強度比 $R=R_{L20}(1+2K_0)/3$ を求める。また図7に示す最大せん断応力 τ_{max} と表2に示す有効鉛直応力 σ'_v から地震時せん断応力 L を式(12)により求め、 $FL=R/L$ で計算したFL値を図8にまとめて示している。この際、 $M=9.0$ に対応して $r_n=0.80$ であるが、一般的値の $r_n=0.65$ も用いている。

浦安市役所について $r_n=0.65$ を適用すると、B2, As1層ともに一部の深度で液状化する可能性があり、 $r_n=0.80$ ($M=9.0$) を適用した場合についてはさらにその可能性が高まる。高洲小学校では $r_n=0.65$ を適用するとB2, F, As1層で液状化し、 $r_n=0.80$ の場合にはほぼすべての深度で液状化することになる。

また、これらのFL値の深度分布から式(14)によりPL値を計算した。

$$P_L = \int_0^{20} (1-F_L)(10-0.5x) dx \quad (14)$$

$r_n=0.80$ の場合に浦安市役所と高洲小学校それぞれで

$P_L=7.3$, $P_L=30.7$ となり、やはり後者の方が液状化の程度は激しいという結果になる。

次にエネルギー法については、前記2.で述べた手順に従い、深さ1mごとの水平要素のN値と F_c から式(1)～(5)により R_{L20} を算出し、式(6), (7)から $\Delta W/\sigma'_c$, W/σ'_c を算出した。上昇エネルギー E_{uf} については図6のエネルギー時刻歴の最終値を層ごとに読み取った。

図9上段には各要素ごとの液状化エネルギー容量 WH と上昇エネルギー E_{uf} の深度分布、下段には累積エネルギー比とその累積値 AER の深度分布を2地点について(a)(b)それぞれに示している。これより、液状化エネルギー容量 WH については、深度が8mまでは浦安市役所のほうが圧倒的に大きいですが、8m以深では両者であまり差がない。一方、上昇エネルギー E_{uf} については高洲小学校のほうが浦安市役所より約50%大きくなっている。この結果、図9下段に示すように浦安市役所ではB2, As1層で $AER < 1.0$ となって液状化し、高洲小学校ではB2, F, As1層すべてで液状化することになり、後者の方がその程度が激しい。

表3には浦安市役所と高洲小学校でのFL法とエネルギー法による判定結果を比較し、液状化可能性ありの要素を色付けして示している。これより、浦安市役所ではエネルギー法とFL法でほぼ同じ深度のB2, As1層で液状化の可能性が認められる。高洲小学校でも両判定法でほぼすべて

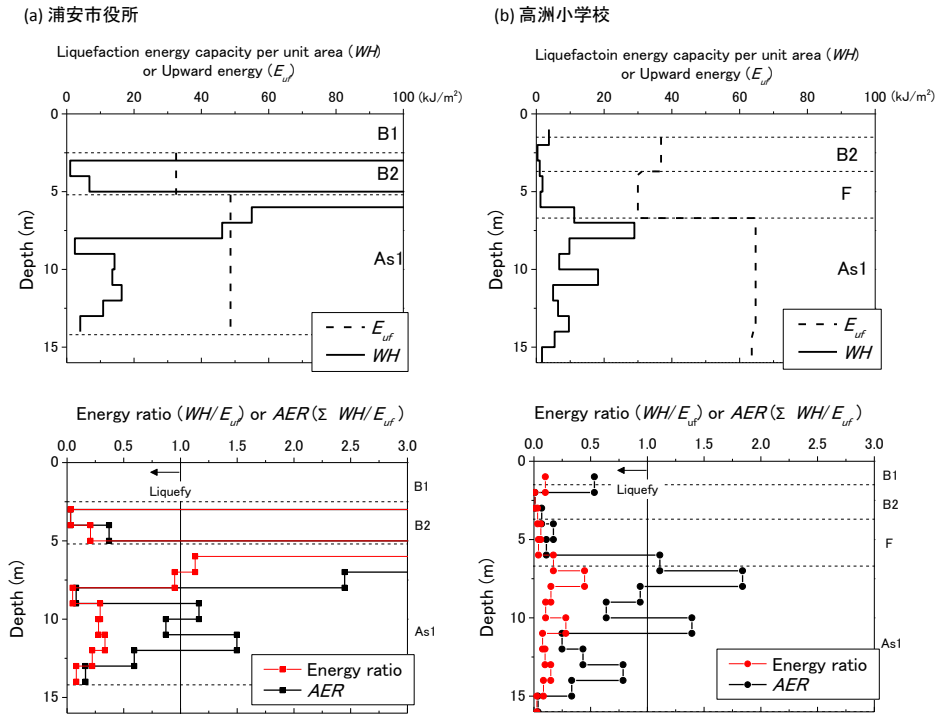


図9 液状化エネルギー容量 WH と上昇エネルギー E_{uf} と液状化エネルギー比 WH/E_{uf} と累積エネルギー比 AER の深度分布：浦安市役所(a), 高洲小学校(b)

表3 浦安市役所, 高洲小学校のFL法, エネルギー法で得られた $R \cdot L$ 値, FL 値, 上昇エネルギー E_{uf} , 液状化エネルギー容量 WH , 累積エネルギー比 AER

(a)浦安市役所

深度(m)	細粒分含有率(%)	FL法				エネルギー法				順番	
		R	$r_v=0.65$		$r_v=0.80$		WH (kN/m^2)	E_{uf} (kN/m^2)	WH/E_{uf} (%)		AER (%)
			L	FL	L	FL					
1	B1										
2	B1										
3		25.75		207	168	7.13E+06		1.47E+07		×	
4	B2	0.10	0.12	0.82	0.66	1.51	32.49	3	3	①	
5		0.16		1.32	1.07	10.10		21	37	④	
6		26	0.63	4.27	3.47	515.46		1059		×	
7			0.28	1.92	1.56	54.97		113		×	
8			0.26	1.76	1.43	46.17		95		×	
9		11	0.11	0.75	0.61	2.41		5	8	②	
10	As1		0.17	1.18	0.96	14.19	48.66	29	116	×	
11			0.17	1.14	0.93	13.55		28	87	⑥	
12			0.17	1.18	0.96	16.30		34		×	
13		44	0.15	1.03	0.84	10.81		22	59	⑤	
14			0.11	0.78	0.63	4.02		8	16	③	

(b)高洲小学校

深度(m)	細粒分含有率(%)	FL法				エネルギー法				順番	
		R	$r_v=0.65$		$r_v=0.80$		WH (kN/m^2)	E_{uf} (kN/m^2)	WH/E_{uf} (%)		AER (%)
			L	FL	L	FL					
1	B1										
2	B2	52	0.17	1.22	0.99	3.72		10	53	⑨	
3			0.08	0.54	0.44	0.35	36.81	1	1	①	
4			0.11	0.63	0.51	1.00		3	7	③	
5	F	95	0.12	0.17	0.72	1.83	29.98	6	17	⑤	
6			0.11	0.63	0.51	1.23		4	11	④	
7			0.19	1.06	0.86	11.18		17	111	×	
8			0.24	1.35	1.10	28.93		45		×	
9			0.17	0.95	0.77	9.76		15	94	⑫	
10	As1		0.15	0.84	0.68	6.76		10	64	⑩	
11	①	23	0.17	1.08	0.87	18.23	64.71	28		×	
12			0.13	0.74	0.60	4.95		8	25	⑥	
13			0.14	0.77	0.63	6.42		10	43	⑧	
14			0.15	0.84	0.69	9.62		15	79	⑪	
15	As1	52	0.13	0.60	0.49	5.41	63.57	9	33	⑦	
16	②		0.09	0.41	0.33	1.69		3	4	②	

の層で液状化する類似の傾向が見られる。また、両方法ともに高洲小学校の方が浦安市役所より液状化の程度が激しいことも整合している。

図10には2地点の同一深度ごとにFL値と WH/E_{uf} の対応関係を示している。既述のようにエネルギー法ではエネルギー比 WH/E_{uf} が小さい要素ほど早く液状化しやすいと考えることが出来る。両地点ともに大まかにはFL値が大きいほど WH/E_{uf} も大きい右上がりの関係になっており、FL法で液状化しやすい深度はエネルギー法でも液状化しやすい全体的傾向が確認できる。前出の均質地盤では両方法の間で液状化しやすさに深度方向の違いが現れた。しかし、実際の異なる物性値からなる多層地盤ではこのような

違いが目立たなくなり、両方法で液状化しやすい層の順序に大まかな対応関係が見られることが分かる。

これらの液状化判定結果を実際に生じた液状化実態と比較する。高洲小学校のある浚渫埋立した中町・新町では液状化被害が発生し、浦安市役所のある元町では被害が発生しなかったことから、浚渫埋立F層が液状化の主要因と考えられる。また元町の埋土B層は液状化していないと考えられるが、中町・新町でのB層についても元町とは施工時期がかなり異なっているため液状化の可能性は否定できない。一方、両地点に存在するAs1層については元町で液状化発生が確認されていないことから、今回液状化しなかった可能性が高い。しかし、いずれの液状化判

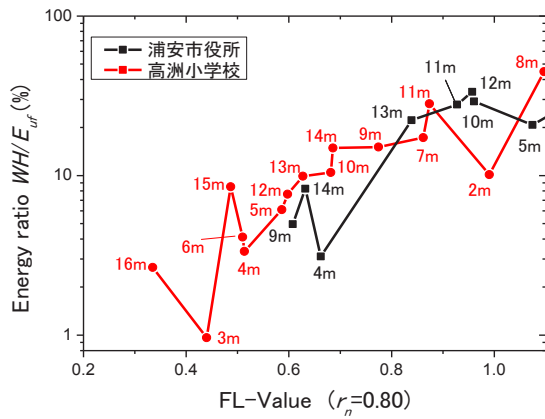


図 10 浦安地盤での FL 値とエネルギー比 WH/E_{uf} の関係

定結果からも As1 層で液状化するかなりの層厚があることになり、実際の液状化履歴との整合性については疑問が残る。

この点については、まず今回液状化に関わる土に含まれるすべての細粒分を非塑性と仮定したことが原因となっている可能性がある。さらに、F 層と As1 層での年代効果の差異も関わっている可能性がある。これらは FL 法・エネルギー法の違いに依らない原位置液状化強度の再評価の課題であり、今後、別途検討が必要である。

5. 北海道北見市端野町地盤での液状化判定

十勝沖地震は 2003 年 9 月 26 日に発生し、北海道襟裳岬東南東沖深さ 45km を震源とした M8.0 の地震である。震源に近い太平洋沿岸域を中心に港湾構造物やライフライン施設に被害が生じた。その中で特異だったのは、図 11 (a) に示すように震源から 230km の遠距離で気象庁震度 4、PGA がわずか 50cm/s^2 程度であったと思われる北見市端野町で液状化が生じたことである。液状化は農地の数ヶ所で起きたが、そのうち最大のは火山灰質砂質土を埋め戻した緩斜面において地中で液状化した砂が流動噴出し、図 11 (b) に示すように長さ 200m 巾 50m にわたり地表面陥没を起した¹⁰⁾。噴き出した砂は勾配の緩い溝の中を泥流化して 1km 下流まで流れた。

(1) 地盤・地震条件

スウェーデン式サウンディング試験 (SWS) により図 11 (b) に示す 12 地点で調査を行った¹⁰⁾。それらの試験データ (貫入長 25cm 当り) を稲田¹¹⁾ の換算式により 1m 区間ごとに平均化して標準貫入試験 N 値に変換し、深度に対して示したのが図 12 である。そのうち太線で示す調査点 1、7 を代表として選び出し、その N 値に基づき厚さ 1m の水平要素に切り分けた地盤モデルを表 4 (a) (b) のように作成した。表における N_i 、 V_s は式(5)、(10)を用いて算

出した。砂は平均粒径 $D_{50}=0.2\text{mm}$ で非塑性細粒分を含んでおり、細粒分含有率 F_c は文献¹⁰⁾により一律 33%とした。地下水位は調査点 1 で G.L.-1m、調査点 7 で G.L.-2m であり、これ以深を液状化検討対象としている。

等価線形解析に用いるせん断剛性 G と減衰定数 D のひずみ依存性については式(11)を用い、 $D_0=0.02$ 、 $D_{max}=0.28$ 、 $\alpha=0.83$ 、 $\beta=1.44$ 、 $\gamma_r=1.33 \times 10^{-3} (\sigma'_c/p_0)^{0.5}$ と設定した⁸⁾。

地盤の地震時応力と上昇エネルギーを算定するため、表 4 の地盤モデルの地表に図 13 (a) に示す K-NET/HKD054 (液状化地点からの距離 10km) で記録された地表 EW 方向波形を入力した。地震動の継続時間は初動からほぼ SH 波主要動の範囲と思われる時点までの 100 秒間とした。図

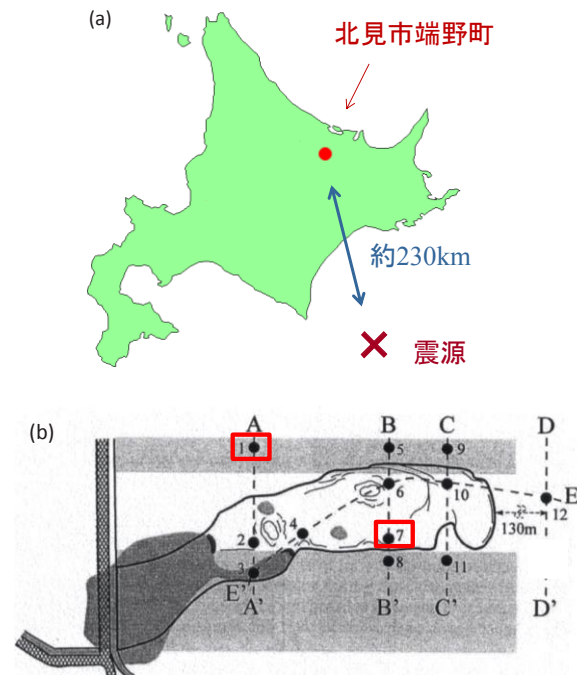


図 11 北見市端野町液状化対象地点概要¹⁰⁾

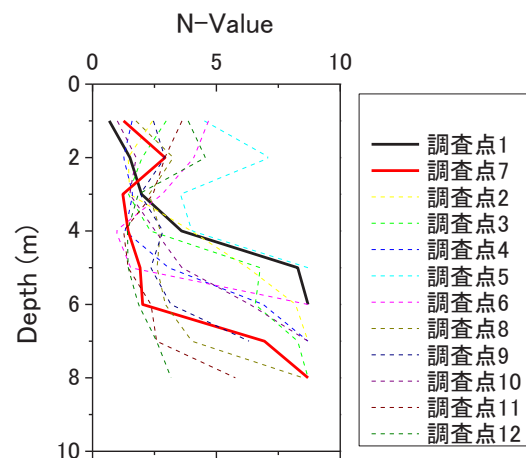


図 12 対象地点の N 値の深度分布

表4 対象とした2調査点の地盤モデル：調査点1(a), 調査点7(b)

(a)調査点							(b)調査点																																																												
深度(m)	層厚(m)	N	有効上載圧 σ'_v (kN/m ²)	N ₁	細粒分 含有率 F _c (%)	湿潤密度 ρ (t/m ³)	速度値 V _s (m/s) (Initial)	深度(m)	層厚(m)	N	有効上載圧 σ'_v (kN/m ²)	N ₁	細粒分 含有率 F _c (%)	湿潤密度 ρ (t/m ³)	速度値 V _s (m/s) (Initial)																																																				
0.00								0.00																																																											
1.00	1.00	0.7	8.8	1.5	33	1.80	70	2.00	2.00	2.1	17.7	4.0	33	1.80	102																																																				
2.00	1.00	1.5	21.6	2.8			92	3.00	1.00	2.0	29.4	3.4			100	4.00	1.00	3.6	37.3	5.7	123	5.00	1.00	8.3	45.1	12.1	162	5.00		50.0				350	7.00							7.00																			50.0					2.10	350
3.00	1.00	2.0	29.4	3.4			100	4.00	1.00	3.6	37.3	5.7			123	5.00	1.00	8.3	45.1	12.1	162	5.00		50.0				350	7.00							7.00																			50.0					2.10	350						
4.00	1.00	3.6	37.3	5.7			123	5.00	1.00	8.3	45.1	12.1			162	5.00		50.0				350	7.00							7.00																			50.0					2.10	350												
5.00	1.00	8.3	45.1	12.1			162	5.00		50.0						350	7.00							7.00																			50.0					2.10	350																		
5.00		50.0						350	7.00									7.00																			50.0					2.10	350																								
7.00							7.00																																																												
										50.0					2.10	350																																																			

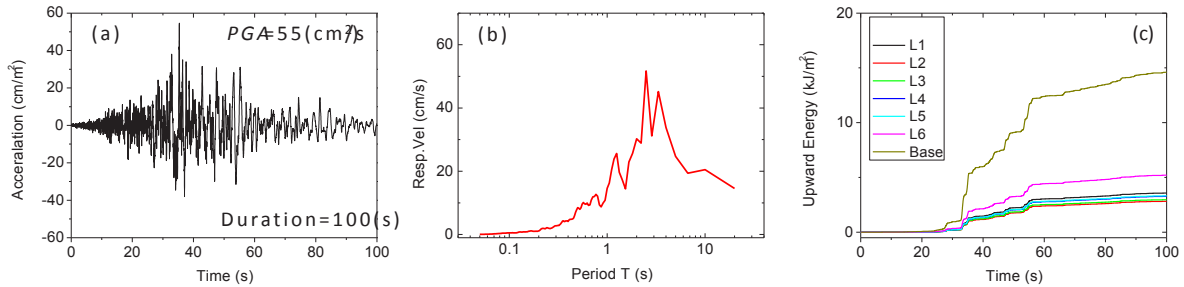


図13 十勝沖地震での K-NET/HKD054 の地表加速度波形(a)と速度応答スペクトル(減衰定数5%) (b), 調査点7の上昇エネルギー(c)

13(b)にはその速度応答スペクトルを示しているが、図2(a)に示すM9.0Y地震動と同じく3秒付近の長周期が卓越していることが分かる。

SWS 調査深度が約5~7mまででありそれ以深の地盤構造が不明であったため、表4の地盤モデルではその下に基盤層 $V_s=350$ m/s を加え、それを解析に用いた。また基盤層の V_s による影響を見るため調査点1では $V_s=250, 450$ m/s に変化した検討と地盤構造の影響を考慮するため基盤直上に N 値10で厚さ5mの層を挿入した検討も行っている。さらに、地震時の地下水位が必ずしも明瞭でないため、その影響を考慮すべく調査点7の地下水位を基準とした2mから1m, 3mに変化させ、その影響についても検討している。

(2) FL法・エネルギー法による判定と両者の比較

まずFL法について、図14(a)(b)には等価線形解析で得られた最大加速度 α_{max} と最大せん断応力 τ_{max} の深度分布を2つのSWS調査点1, 7について示している。調査点1では基盤の V_s や地盤構造を変化させても α_{max}, τ_{max} にほとんど影響を与えない。すなわち通常の液状化判定法に従い地表で設計地震入力を定めた場合には深部の地盤構造が表層地盤の応答に与える影響が小さいことを示している。また調査点7において地下水位の条件を変えてもやはり α_{max}, τ_{max} にはほとんど影響を与えない。また、3.(1)でのM9.0Y地震動と同じく α_{max} の深度方向の低減率は小さく、 τ_{max} の頭打ち傾向が深くまで現れにくい傾向が見られる。前記3.(2)の手順にしたがい各層の N_1 値と F_c から式(1)~(5)により R_{L20} を算出し、 $K_0=0.5$ と仮定し液状化強度比

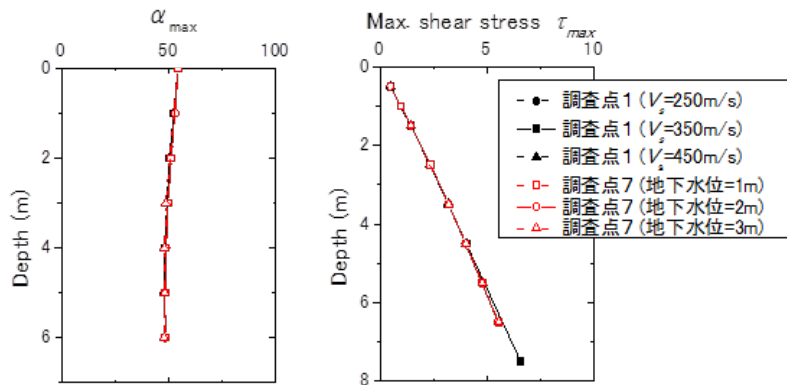


図14 調査点1, 調査点7の最大加速度 α_{max} (a)と最大せん断応力 τ_{max} (b)の深度分布

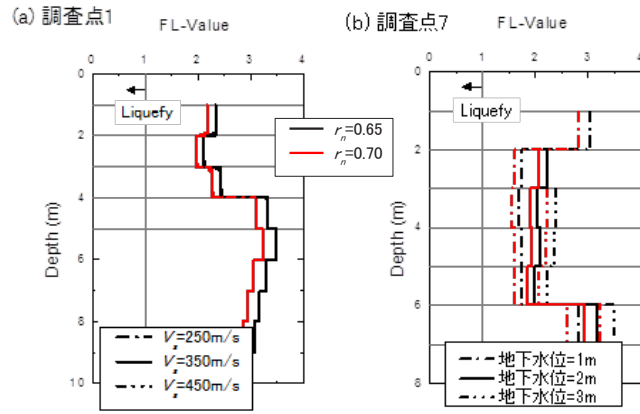


図 15 2つの調査点でのFL値の深度分布：調査点1(a)，調査点7(b)

$R=R_{L20}(1+2K_0)/3$ を求める。また図14(b)に示す最大せん断応力 τ_{max} と表4に示す有効鉛直応力 σ'_v から地震時せん断応力比 L を式(12)により求め、 $F_L=R/L$ によりFL値を算定する。この際、十勝沖地震のマグニチュード $M=8.0$ について式(13)より得られる応力低減係数 $r_n=0.70$ を $r_n=0.65$ と共に用いている。

図15(a)，(b)に調査点1と7でのFL法による液状化判定結果をまとめて示している。 $r_n=0.65$ と $r_n=0.70$ でFL値はほとんど変わらず、図中に実線で示すように調査点1，7ともにすべての深度で F_L は1.0を大きく上回りまったく液状化しない結果となった。

調査点1では基盤の V_s を標準ケースの350m/s以外に250m/sと450m/sに変化させたが、図(a)に示すようにカーブが重なってしまう。 $N=10$ ，層厚5mの層を挿入した場合でも同様に、 F_L は3.0前後となりまったく液状化しない結果となった。また調査点7で地下水位を標準ケースのGL-2mからGL-1mとGL-3mに変化させると、図(b)に示すように当然ながら地下水位が浅いほどFL値が小さくなる全体的傾向が読み取れる。GL-1mの場合には新たに液状化対象層に加わる1~2mの層ではN値が大きいため、 F_L 値も増加する結果となるが、いずれの場合にも液状化発生からは程遠いと判断される。

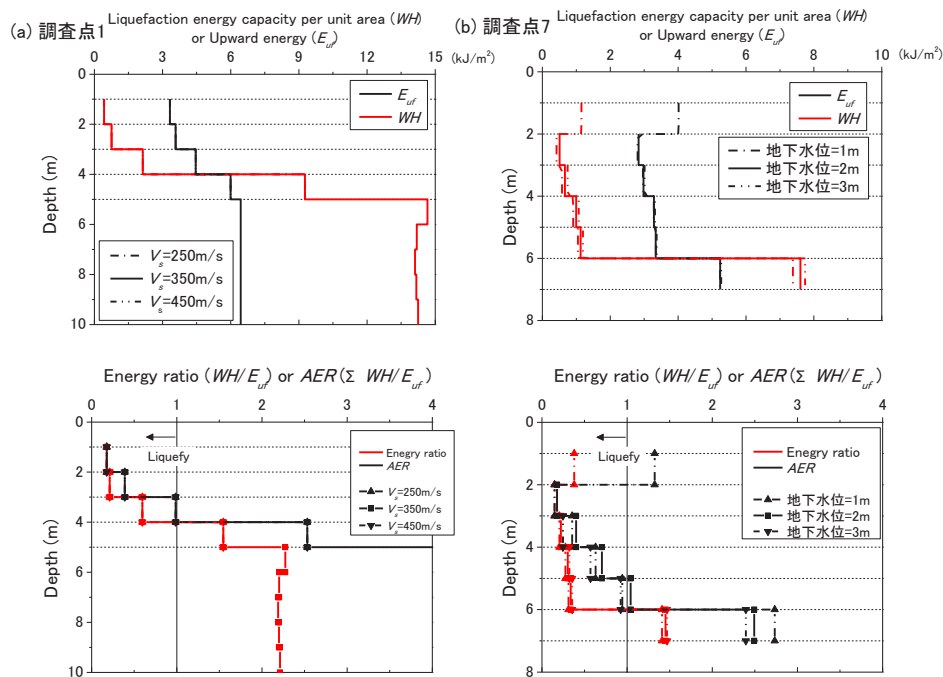


図 16 液状化エネルギー容量 WH と上昇エネルギー E_{uf} の液状化エネルギー比 WH/E_{uf} (上部) と累積エネルギー比 AER の深度分布 (下部)：調査点1(a)，調査点7(b)

表5 対象とした2調査点のFL法、エネルギー法で得られたR・L値FL値、上昇エネルギー E_{uf} 、液状化エネルギー容量WH、累積エネルギー比AER：調査点1(a)、調査点7(b)

(a) 調査点1

深度(m)	FL法						エネルギー法				
	R	$r_n=0.65$		$r_n=0.70$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)	順番	
		L	FL	L	FL						
0.5	L1										
1.5	L2	0.10	0.04	2.34	0.05	2.17	0.43	3.32	18	18	①
2.5	L3	0.11	0.05	2.12	0.06	1.97	0.76	3.58	21	39	②
3.5	L4	0.14	0.06	2.44	0.06	2.27	2.13	4.46	60	99	③
4.5	L5	0.20	0.06	3.33	0.06	3.09	9.27	5.99	155		

(b) 調査点7

深度(m)	FL法					エネルギー法					
	R	$r_n=0.65$		$r_n=0.70$		WH (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	WH/ E_u (%)	AER (%)	順番	
		L	FL	L	FL						
0.5											
1.5	L1										
2.5	L2	0.09	0.04	2.24	0.04	2.08	0.54	2.84	18	18	①
3.5	L3	0.09	0.04	2.06	0.05	1.91	0.70	2.98	22	40	②
4.5	L4	0.10	0.05	2.09	0.05	1.94	1.03	3.29	30	71	③
5.5	L5	0.10	0.05	2.00	0.05	1.86	1.16	3.34	34	104	
6.5	L6	0.16	0.05	3.17	0.05	2.94	7.67	5.24	145		

次に前記2. に記したエネルギー法の手順に従い、各層の N_1 値と F_c から式(1)~(5)により RL_{20} を算出し、式(6)、(7)から $\Delta W/\sigma'_c$ 、 W/σ'_c を算出し、エネルギー法による液状化判定を行う。

図16の上段に液状化エネルギー容量WHと上昇エネルギー E_{uf} の深度分布、下段にエネルギー比とAERの深度分布を(a)調査点1と(b)調査点7についてそれぞれ示している。これよりエネルギー法では両地点ともに地下水面直下のL2~L4で液状化可能性があるとの判定結果が得られる。

調査点1で基盤 V_s を標準ケースの350m/sから変動させた場合や基盤層の直上に $N=10$ の層を挿入した場合の影響は無視できること、さらに調査点7で地下水位を標準ケースから変動させた場合については多少の影響が出るが、いずれにしても地下水面直下の層で液状化する結果となる。

表5には2調査点でのFL法とエネルギー法による判定結果の比較を示している。両者の評価結果は明確に分かれ、エネルギー法では液状化するという判定結果になり、実際の液状化履歴とも整合するのに対して、FL法は実挙動とは大きく反する判定結果が得られる。つまり、加速度は小さく発生せん断応力は小さいが継続時間や周期成分からある程度大きなエネルギーを有する地震動が引き起こす端野町のような液状化現象は、最大せん断応力と応力低減係数によるFL法では評価しきれず、エネルギー法によらざるを得ないことを示している。

以上の評価には、SWSに基づいたN値・S波速度の評価や入力地震動の決め方などかなりの不確実性が含まれており、液状化判定結果も定量的には当然その影響を受けると考えられる。ただし本研究の主目的がFL法・エネルギー法の相対的対比であり、これらの不確実性は両判定法の結果に同じ定性的影響を及ぼすと想定される。したがってこれら不確実性によってエネルギー法の方が実際の液状化挙動に近いとの今回得られた結果を逆転させるものにはならないと思われる。

6. まとめ

エネルギー法とFL法を均質モデル地盤に適用し、 $M=9.0$ 、6.8の地震による4種類の地表観測地震動を入力して液状化判定を行い、以下の知見を得た。

- ここで選んだ4つの地震動の範囲では、マグニチュード M に応じて応力低減係数 r_n を調整したFL法とエネルギー法はだまかには整合する結果を与える。
 - ただし、加速度は大きいエネルギーは小さいような短周期が卓越する地震動で両者の食い違いが目立つようになる。
 - さらに食い違う点として、FL法によれば長周期地震動では深い深度のほうが液状化しやすいのに対し、短周期では浅い深度が液状化しやすい傾向が見られる。一方、エネルギー法では、均一砂層地盤では地震動に依らず常に浅い深度のほうが液状化する傾向が見られる。
- また、東北地方太平洋沖地震の浦安市や十勝沖地震の北見市で実際に液状化した地盤のモデルに地震波を入力し、FL法とエネルギー法から液状化判定を行ったところ、以下の知見を得た。
- 浦安市ではFL法・エネルギー法ともに、浦安市役所と高洲小学校の両地点ともに液状化する層が存在し、後者の方が液状化の程度が前者より激しいことなど、両方法の判定結果にはある程度整合が見られる。また、均質地盤とは異なり、液状化しやすい層の順序も両方法でだまかな対応関係が認められる。ただしFL法では応力低減係数 r_n の値如何で結果に巾が出るため、その決め方に適切な判断を要するのに対し、エネルギー法では一意的に結果が得られる。
 - FL法・エネルギー法ともに埋立地ではない浦安市役所でも液状化することになり、実際の液状化挙動とは一致していない。この点を解決するには砂質土に含まれる細粒土の塑性的性質の影響や年代効果についてさらに検討が必要である。
 - 北見市端野町の判定結果によれば、FL法では液状化は全く生じず実際の液状化履歴と反するのに対し、エネルギー法では浅い深度から液状化する傾向が見られる。つまり、このような加速度は小さいエネルギーは大きな地震動については、エネルギー法による判定に依らざるを得ないことを示している。

これらの知見を集約すると、応力低減係数 r_n を適切に調整したFL法とエネルギー法の比較によれば多くのケースで類似の判定結果を与える。しかし、加速度が大きい割

に周期や継続時間が短いなどの理由でエネルギーが小さい、あるいは加速度が小さい割に周期や継続時間が大きいなどの理由でエネルギーが大きくなるような地震動の場合、両者の差は大きくなり、 r_n の調整ではそのギャップを調整できなくなる。この結論は液状化が損失エネルギーと一意的に結びついていることを前提とすれば当然と言え、エネルギー法の方が地震波動の特徴も捉えやすくFL法より合理的であると言えよう。このようにエネルギー法は優れた特徴を有しており、従来のFL法の信頼性を確認するための比較手段として実務に適用する段階に来ている。今後はさらに多くの液状化事例に適用することによって信頼性を向上させていく予定である。

謝辞

本研究に当たり、地震動のデータについては防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netと東大地震研究所の観測データを使用させていただいた。また、株・地震工学研究所には本研究で用いた等価線形解析の商用ソフトウェアを提供いただいた。さらに筆者らの研究室所属の大学院生向井彩子氏と卒業研究生石田小百合氏の協力を得た。これらの関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of SMFE Div. ASCE*, 97 (9), pp. 1249-1274, 1971.
- 2) Davis, R. O. and Berrill, J. B.: Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.10, pp. 59-68, 1982.
- 3) 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, pp. 106-118, 1985.
- 4) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳沢栄司: 地盤に入力された累積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 No.631/III-48, 161-177, 1999.
- 5) 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.
- 6) Kokusho, T.: Liquefaction potential evaluation – energy-based method versus stress-based method -, *Canadian Geotechnical Journal*, No.50, pp. 1-12, 2013.
- 7) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 12章, 平成14年, pp. 134-137, 2002.
- 8) 國生剛治: 地震地盤動力学の基礎, 鹿島出版, 3.1.4 等価線形モデルと土質試験データとの対比, pp. 90-92, 2014.
- 9) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, *Soils and Foundations*, 23 (4), pp. 56-74, 1983.
- 10) Tsukamoto, Y. Ishihara, K. Kokusho, T. Hara, T. Tsutsumi, Y. : Fluidisation and subsidence of gently sloped farming fields reclaimed with volcanic soils during 2003 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Earthquake Geotechnical Case Histories for performance-based Design*, pp. 109-118, 2009.
- 11) 稲田倍徳: スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, Vol.8, No.1, pp. 13-18, 1960.

(2014. 1. 16 受付)

Energy-Based Liquefaction Potential Evaluation Compared with FL-Method - Case Studies on Various Earthquake Motions and Soil Conditions -

Yuki MIMORI¹ and Takaji KOKUSHO²

1 Graduate Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Chuo University

2 Department of Civil & Environmental Engineering, Chuo University

Abstract

Liquefaction potential at a site is currently evaluated by a Stress-Based Method (SBM) or FL-Method in almost all engineering practice. An Energy-Based Method (EBM) focusing on dissipated energy as physical quantity controlling liquefaction behavior was already proposed, but is not used in engineering practice. In this paper, Energy-Based Method proposed in a previous paper is applied to a uniform sand model, and evaluates liquefaction potential by different seismic motions to compare with FL-Method. Two evaluation results tend to be consistent with each other in many cases, though in a uniform sand deposit liquefaction always starts from shallow depth in EBM while it depends on dominant period of motions in SBM. Also shown is that EBM intrinsically reflects the effect such as durations and dominant periods in seismic motions without depending on parameters such as the stress reduction coefficient. Then actual liquefaction cases in Urayasu during Tohoku earthquake and in Tanno-cho during Tokachioki earthquake are studied by the two methods and the results are compared to know the applicability of EBM in comparison of SBM.

Key words: liquefaction potential evaluation, energy-based method, FL-method, seismic ground motion, case study