

2003 年十勝沖地震による北見市端野町の液状化判定

—FL 法とエネルギー法による液状化判定の比較—

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治

中央大学理工学部 三森 祐貴

中央大学理工学部 学生会員 ○石田 小百合

1. はじめに

液状化判定は以前より力の釣り合いに基づいた FL 法により行われてきた。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¹⁾。ここでは十勝沖地震により実際に液状化の被害があった北見市端野町の地盤モデルに地震動を入力し、FL 法とエネルギー法から液状化判定を行い、両者の比較・検討を行う。

2. 地盤・地震条件

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 の地震動である。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、震源から 230km の遠距離で気象庁震度 4、地表最大加速度は 50cm/s² 程度であった北見市端野町で液状化が生じたことである。液状化は農業用地の数ヶ所で起きたが、そのうち最大のも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-1 に示すように長さ 200m 巾 50m にわたり地表面陥没を起した²⁾。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。

地盤調査は図-2 の調査点 1~12 でスウェーデン式サウンディング試験(SWS)により行い、得られた荷重 W_{sw} と半回転数 N_{sw} から式(1)の稲田式³⁾より N 値を算出した。

$$N = \begin{cases} 0.03 W_{sw} + 0.050 N_{sw} & \text{粘土・粘性土層} \\ 0.02 W_{sw} + 0.067 N_{sw} & \text{礫・砂・砂質土層} \end{cases} \quad (1)$$

表-1 に調査点 1 の地盤モデルを示す。地下水面は調査点 1 については地表から 1m の深さ、調査点 7 については地表から 2m の深さで、不飽和の L1 の湿潤密度、L2~5 の飽和密度ともに $\rho_t = \rho_{sat} = 1.8 \text{ t/m}^3$ とする。 N_1 値は以下の式(2)より、S 波速度 V_s は道路橋示方書に掲載された以下の経験式(3)より N 値から計算する($p_0 = 98 \text{ kPa}$)。なお各層ごとに V_s は一定値とし、それぞれの中点深度での値を当てはめている。

$$N_1 = 1.7N / (\sigma'_v / p_0 + 0.7) \quad (2)$$

$$V_s = 80 N_1^{1/3} \quad (3)$$

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⁴⁾。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + (\gamma/\gamma_r)^\alpha}, \quad \frac{D - D_0}{D_{max} - D_0} = (1 - \frac{G}{G_0})^\beta \quad (4)$$

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 σ'_m に応じ $\gamma_r \propto \sigma'_m{}^{0.5}$ によって変化させた⁵⁾。

本研究では FL 法とエネルギー法の解析結果を比較・検討するため、北見市端野町の地盤の地表に、そこから 10km 離れた地点で防災科学研究所が観測した地震波(K-NET 北見)(図-3)を入力し、液状化解析を行った。地震動の継続時間は初動から SH 波主要動の範囲と思われる時点までの 100 秒間とした。

3. FL 法による判定

FL 法では、液状化抵抗比 R と地震時せん断強度比 L の比 $F_L = R/L$ が 1.0 を下回る際に液状化発生と判定する。ここに動的せん断強度比 R は原地盤の静止土圧係数を $K_0 = 0.5$ と仮定し、繰返し三軸試験の液状化強度比 R_L より $R = R_L(1 + 2K_0)/3$ から算出する。なお液状化応力比 R_L については、道路橋示方書の式(5)に基き N_1 値から求める。ここに N_a は細粒分含有率 F_c の影響を考慮した補正 N 値のことである。

$$R_{L20} = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} & : N_a \geq 14 \\ 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \times 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} & : 14 \leq N_a \end{cases} \quad (5)$$

また地震時せん断強度比 L は、 $L = r_n L_{max} = r_n \tau_{max} / (\sigma'_v) = \tau_0 / (\sigma'_v)$ により求める。等価応力振幅 τ_0 を求めるため最大応力振幅 τ_{max} に乗ずる低減係数 r_n については $r_n = \tau_0 / \tau_{max} = 0.1(M-1)$ により求め、通常どおり $r_n = 0.65$ に設定した場合と十勝沖地震の $M = 0.80$ に対応する $r_n = 0.70$ に設定した場合について検討した。



図-1 被害状況

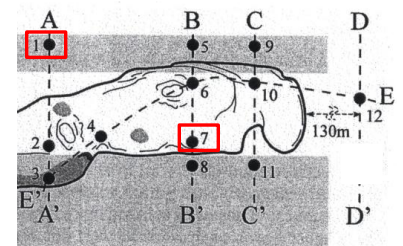
図-2 調査点 1~12 の概要²⁾

表-1 調査点 1 の地盤モデル

深度 (m)	層厚 (m)	N	N ₁	湿潤密度 ρ_t (t/m ³)	速度値 V_s (m/s) (Initial)	速度値 V_s (m/s) (Final)	減衰定数 D (%)
0.00							
1.00	1.00	0.68	1.5		70	64	3.9
2.00	1.00	1.51	2.8		92	84	4.0
3.00	1.00	1.98	3.4		100	90	4.3
4.00	1.00	3.59	5.7		123	113	3.8
5.00	1.00	8.28	12.1		162	152	3.2
			50.0	2.10	350	350	1.0

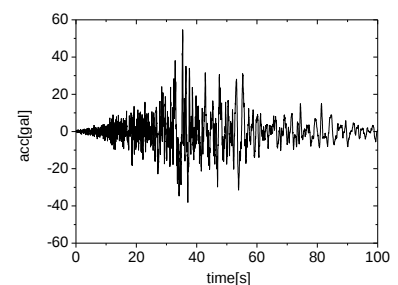


図-3 K-NET 北見の地震動

キーワード 十勝沖地震、液状化、FL 法、エネルギー法、地震動

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科土質研究室 TEL.03-3817-1799

図-4 に調査点 1 と調査点 7 の FL 法による液状化判定結果を実線で示している。また、調査点 1 では基盤層の V_s を 250m/s と 450m/s に変化させたとき、調査点 7 では地下水位を 1m と 3m に変化させたときの判定結果をそれぞれ図中に示す点線で表している。

これより $r_n=0.70$ の方が $r_n=0.65$ に比べて FL 値が小さく液状化しやすい判定結果となったものの、どちらにおいても FL 値は 2.0 前後と 1.0 を大きく上回り、実際の液状化履歴とは異なる。また、基盤層の V_s を変化させても FL 値は同じ値になること、地下水位は浅くなるほど液状化しやすい傾向があるが、それでも液状化は発生しないことが分かった。

4. エネルギー法による液状化判定

前述の地点でエネルギー概念に基づいた液状化判定を試みた。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（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とになる⁵⁾⁶⁾。

上昇エネルギー E_u については各層における SH 上昇波速度時刻歴 $\dot{u}(t)$ とインピーダンス ρV_s により式(6)から算出する。

$$E_u = \rho V_s \int_0^t (\dot{u})^2 dt \quad (6)$$

損失エネルギー ΔW については、まず損失エネルギーを有効拘束圧で基準化した基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ と $N_c=20$ のときの液状化強度比 R_{L20} の関係より式(7)から算出する。この 2 つの値の関係は砂の相対密度 D_r や細粒含有率 F_c に依らずほぼ一意的となることが実験結果より明らかになっている⁵⁾⁶⁾。

$$\Delta W/\sigma'_c = 0.032 - 0.48 R_{L20} + 2.40 R_{L20}^2 \quad (7)$$

次に、三軸試験から得られた液状化発生に対する基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ と基準化ひずみエネルギー W/σ'_c の関係を用い、式(8)より基準化ひずみエネルギー W/σ'_c を求める。

$$W/\sigma'_c = 5.4 \times 10^{1.25 \times \log(\Delta W/\sigma'_c)} \quad (8)$$

これらの式を用いたエネルギー法による液状化判定の具体的手順は以下の通りである⁵⁾⁶⁾。

- 1) 対象地盤を標準貫入試験などの調査間隔に対応し層厚 $H=1\sim 2\text{m}$ に分割する。
- 2) 前述の FL 法と同様に各層についての N_1 値から R_{L20} を計算する。さらに求めた R_{L20} を用いて式(7)により基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ を決定する。
- 3) 基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ に対応した基準化ひずみエネルギー W/σ'_c を式(8)により算定する。
- 4) 各層の有効上載圧 σ'_v から $\sigma'_c = (1+2K_0)\sigma'_v/3$ とし、厚さ H の各層の WH を算定する。以下では、 WH を各層の液状化エネルギー容量と呼ぶことにする。
- 5) 各層について、液状化エネルギー容量 WH と式(6)で求めた上昇エネルギー E_u の比 WH/E_u 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 WH/E_u の値を足し合わせ、その累計が 1.0 に達するまでの層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までは液状化すると考えていることになる。

図-5 にエネルギー法による調査点 1 と調査点 7 の判定結果を実線で示す。また FL 法と同様に、調査点 1 では基盤層の V_s を 250m/s と 450m/s に変化させたとき、調査点 7 では地下水位を 1m と 3m に変化させたときの判定結果をそれぞれ図中に示す線で表している。

これよりエネルギー法では液状化が発生する判定となり、以前に検討した均質地盤での結果⁵⁾⁶⁾と同様に浅い深度から液状化していく傾向が見られた。また、基盤層の V_s と地下水位の変化はエネルギー法の判定結果を大きく変える要因にはならないことが分かった。

5. まとめ

FL 法では液状化しないがエネルギー法では液状化するという判定となり、加速度は小さく発生せん断応力も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北見市端野町のような液状化現象については、最大せん断応力と繰り返し回数に基づく FL 法では評価しきれず、エネルギー法での評価がより実現象に近い判定結果となることが分かった。また、FL 法は深度による液状化のしやすさの傾向が見られなかった一方で、エネルギー法は浅い深度から順に液状化しやすい傾向が見られた。

謝辞：地震動のデータについて、防災科学研究所の観測記録を使わせて頂きました。等価線形解析ソフト「microSHAKE」については（株）地震工学研究所の商用プログラムを提供して頂きました。これら関係者各位に謝意を表します。

<参考文献> 1) Davis, R. O. and Berrill, J. B.: Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.10, 1982, 59-68. 2) 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. 3) 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. 4) 國生剛治, 本山隆一：等価線形解析の大ひずみレベルへの適用の試み（せん断剛性比、減衰定数のひずみ依存性の定式化）、第26回地盤工学研究発表会、1998. 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.

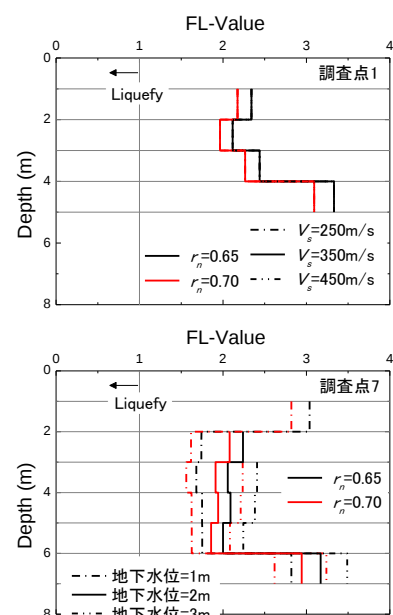


図-4 FL 法による解析結果

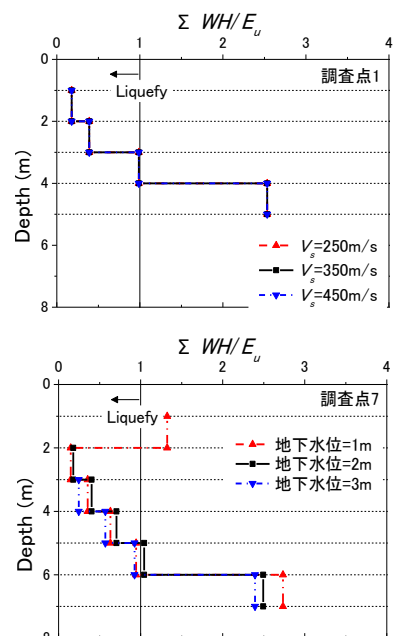


図-5 エネルギー法による解析結果