

2011 年東北地方太平洋沖地震による千葉県浦安市の地盤の液状化について

—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 学生会員 ○高崎 義広
 中央大学理工学部 三森 祐貴
 中央大学理工学部 向井 彩子

1. はじめに

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範囲に液状化が発生し、住宅や社会インフラに多大の被害が発生した。特に、江戸川沿いの沖積地盤からなる元町に比べて、1968 年以降に埋め立てた若齢地盤からなる中町や新町に被害が集中した¹⁾。震央から遠く離れた関東で大規模な液状化が発生した原因のひとつに、地震マグニチュードが $M=9.0$ と極めて大きく、震動継続時間が極めて長かったことが挙げられている。

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²⁾。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³⁾、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⁴⁾。ここで浦安市の 2 カ所の地盤を対象に、従来の FL 法と著者らが新たに提案したエネルギー法¹⁾による液状化判定を実施し、両者の結果を対比した。

2. 地盤・地震条件

対象としたのは元町の浦安市役所地盤と、新町の高洲小学校校庭地盤で、前者では防災科研 (NIED) の所有する K-net 浦安の地表 EW 方向波形、後者では東京大学地震研が設置した埋設型地震計 (GL-14m) の EW 方向波形を用いた。

表-1 にこれら 2 地点の地盤モデルと密度、N 値などを示す。S 波速度 V_s については道路橋示方書の式 $V_s = 80N^{1/3}$ により N 値より算定した。これらの地盤モデルに地表あるいは地中から観測地震動を入力し、SHAKE による等価線形解析を行った。解析より各地層での最大せん断応力を算出し、FL 法での L_{max} の算定に用いた。また、各層で求めた加速度上昇波を時間で 1 回積分した速度上昇波から、エネルギー法で用いる上昇エネルギーを算定した。

3. FL 法による判定

FL 法では N_1 値から算定する液状化抵抗比 R と繰返しせん断強度比 L との比 $F_L = R/L$ が 1.0 より小さい場合に液状化発生と判断する。砂層の静止土圧係数を $K_0=0.5$ と仮定し、せん断強度比を $L = r_n L_{max} = r_n \tau_{max} / \sigma'_v = \tau_0 / \sigma'_v$ で計算する。最大応力振幅 τ_{max} から等価応力振幅 τ_0 を算出する低減係数 $r_n = \tau_0 / \tau_{max}$ については、通常どおり $r_n = 0.65$ に設定した場合と、今回の地震の $M=9.0$ に対応して $r_n = 0.80$ とした場合について検討した。

図-1 に FL 法による液状化判定結果をまとめて示している。これより、 $r_n = 0.65$ 、 0.80 のいずれの場合も 2 地点ともに液状化する結果となる。沖積砂層 As でも液状化する深度があることになり、実際の液状化履歴との整合性については疑問が残る。一方、液状化地点の PL 値は各深度 z における FL 値 $F_{L,z}$ と層厚 Δh より以下の式で算定される (粘性土は含まない)。

$$PL = \sum_{i=1}^n (1 - F_{L,z}) (10 - 0.5z) \Delta h \quad (1)$$

浦安市役所では $r_n = 0.65$ のとき $PL=3.8$ 、 $r_n = 0.80$ のとき $PL=7.0$ であったのに対し高洲小学校では $r_n = 0.65$ のとき $PL=27.1$ 、 $r_n = 0.80$ のとき $PL=36.2$ とはるかに大きく、液状化の程度が激しい結果になっている。すなわち、元町と新町での液状化の違いは PL 値には反映されていると考えられる。また、 $r_n = 0.65$ に比べて $r_n = 0.80$ とした場合については液状化範囲が大きく拡大し、PL 値も大きくなる事が分かる。

4. エネルギー法による液状化判定

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 が単位面積当たりに供給されるかを検討することになる。そのうち ΔW については、一連の非排水三軸試験から得られた繰返し回数 $N_c=20$ 回での液状化応力比 (R_{L20}) ~有効拘束圧 σ'_c で基準化した損失エネルギー

表-1 対象地点の地盤概要

浦安市役所									
深度(m)	層厚(m)	層タイプ	N値	N_1	湿潤密度 ρ_w (t/m ³)	速度値 V_p (m/s)	速度値 V_s (m/s) (Initial)	速度値 V_s (m/s) (Final)	減衰定数 D (Final)
0									
2.5	2.5	B1	6.00	11.0	1.85	1420	160	152	2.6
2.5	2.7	B2	3.00	4.1	1.6	1550	110	84	7.0
5.2	9	As1	9.62	9.6	1.87	1540	140	113	3.0
14.2	22.6	Ac1	0.35	0.2	1.83	1390	140	111	5.8
36.8	5.1	Na	4.83	2.0	1.68	1420	165	144	4.3
41.9		Dg	50.00		1.95	1560	300	300	2.0

高洲小学校									
深度(m)	層厚(m)	層タイプ	N	N_1	湿潤密度 ρ_w (t/m ³)	速度値 V_p (m/s)	速度値 V_s (m/s) (Initial)	速度値 V_s (m/s) (Final)	減衰定数 D (Final)
0.00									
1.50	1.50	B1	6.00	14.6	1.80	1420	160	152	2.6
1.50	2.20	B2	1.83	4.5	1.59	1550	110	84	7.1
3.70	3.00	F	1.00	2.4	1.62	1400	100	84	5.1
6.70	9.30	As1	8.63	20.9	1.90	1540	160	124	6.8
16.00	19.70	Ac1	0.92	2.2	1.60	1320	110	84	6.5
35.70	3.00	As2	9.10	22.1	1.90	1450	167	152	3.4
38.70	5.00	Nac	4.08	9.9	1.47	1460	180	159	4.2
43.70		Dg	50.00		2.10	1560	300	300	2.0

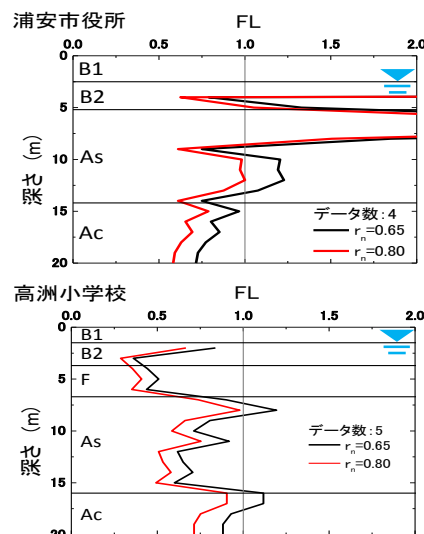


図-1 FL 法による液状化判定結果

(上)浦安市役所, (下)高洲小学校

($\Delta W/\sigma'_c$) 関係を地層ごとに求める¹⁾。一方、上昇エネルギー E_u は、各層のインピーダンス ρV_s と上昇波速度時刻歴 $\dot{u}(t)$ により次式で計算される⁵⁾。

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

ここに、上昇波速度時刻歴 $\dot{u}(t)$ は FL 法で最大せん断応力比 $L_{max}=\tau_{max}/\sigma'_v$ の計算に用いた同一の等価線形解析 SHAKE での各地層ごとの上昇加速度波形を積分して用いた。

砂の内部損失エネルギー ΔW を外部からの上昇波エネルギー E_u と比べるためには、 ΔW をまかなうためにどれだけの外部エネルギーが必要かの関係を知っておく必要がある。図-2 は同じ一連の非排水三軸試験から得られたひずみエネルギー W と損失エネルギー ΔW を縦軸と横軸に取ってプロットしているが、砂の相対密度 D_r や細粒分含有率 F_c の違いに関わらずほぼ一意的関係となり、次式で近似できる。

$$W/\sigma'_c = 5.4 \times 10^{1.25 \times \log(\Delta W/\sigma'_c)} \quad (3)$$

ここでは(3)式により液状化発生の基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ から対応する基準化ひずみエネルギー W/σ'_c を求め、これと E_u とを比較することにより液状化の発生を判断する。エネルギー法による液状化判定の手順は以下の通りである。

- ① 地盤を厚さ 1m の水平層に分割し、各層の $N1$ 値から R_L を求め、以下の式より基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ を求める¹⁾。

$$\Delta W/\sigma'_c = 0.032 - 0.48R_{L20} + 2.40R_{L20}^2 \quad (4)$$

- ② さらに $\Delta W/\sigma'_c$ と、有効拘束圧 σ'_c ($\sigma'_c = (1 + 2K_0)\sigma'_v/3$: σ'_v = 鉛直土かぶり圧)から各層ごとの液状化発生に対応したひずみエネルギー W を算出する。
- ③ 各層ごとの液状化に対応したひずみエネルギー WH と上昇エネルギーとの比 WH/E_u を計算し、その比が小さい順に加え合わせ、100%を超えるまでの層が液状化すると判定する。

5. FL 法とエネルギー法の比較

表-2(a), (b)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の比較を示している。FL 法は液状化する結果 ($F_L < 1.0$) となったものを黒く塗っている。エネルギー法では液状化する層については WH/E_u が小さい順 (液状化しやすい順) に順番を示している。また、液状化対象層ではない地下水面より上部と Ac 層は除外している。これより、いずれの方法でも 2 地点ともに液状化層が存在するが、高洲小学校の方が液状化の程度が浦安市役所より激しいことなど、判定結果にはある程度整合が見られることが分かる。また、FL 法での応力低減係数 r_n を $M=7.5 \rightarrow 9.0$ に対応して $r_n=0.65 \rightarrow 0.80$ とした場合の方が、整合性が良くなることも見て取れる。エネルギー法では r_n のような係数を考慮せずとも広範な地震動に対応できる点が特長だといえよう。しかし、両地点ともに As 層でも液状化する可能性があるという結果になり、原地盤の液状化抵抗比 R_L の設定方法についてさらに検討が残されている。

6. まとめ

- 1) 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するとの判定結果が得られた。
- 2) 高洲小学校の方が液状化の程度が浦安市役所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。しかし、両方法ともに As 層が液状化することになり、実際の液状化履歴との対比からは疑問が残る。
- 3) エネルギー法では r_n のような係数を考慮せずとも広範な地震動に対応できる点が特長である。

謝辞：地盤モデルの作成に当たり、千葉県地盤環境インフォメーションバンク、浦安市の情報を使わせて頂きました。浦安市役所地点については防災科研の K-net 地震記録を、高洲小学校については東京大学地震研究所の観測記録を使わせて頂きました。SHAKE プログラムについては(株)地震工学研究所の商用プログラムを無償提供して頂きました。関係各位に謝意を表します。

<参考文献> 1)國生剛治, 三森祐貴, 高崎義広, 向井彩子: 2011 年東北地方太平洋沖地震による千葉県浦安市の地盤の液状化について—FL 法とエネルギー法による液状化判定の比較—, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会(2012). 2)道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編(1996): 日本道路協会. 3)國生剛治・加藤 亮・伊藤文樹・長尾洋太 (2012): 内部損失エネルギーと地震波動エネルギーによる液状化判定法の可能性, 第 47 回地盤工学研究発表会, E-8,785,1561-1562,2012. 4)Davis, R. O. and Berrill, J. B.: Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vo.10, 1982, 59-68. 5)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, 2000.6.

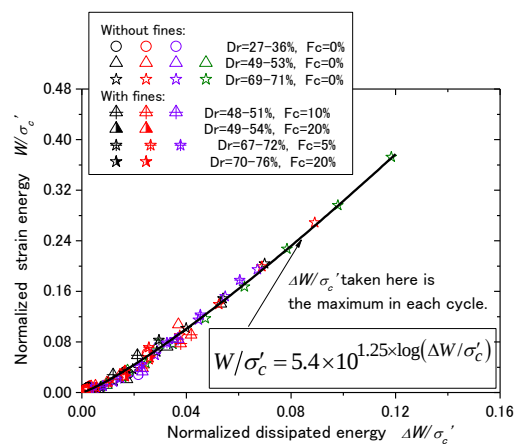


図-2 損失エネルギーとひずみエネルギーの関係

表-2 FL 法とエネルギー法の液状化判定結果

(a) 浦安市役所

深度(m)	細粒分含有率 (%)	σ'_v (kN/m ²)	R	FL法				エネルギー法		
				$r_n=0.65$		$r_n=0.80$		WH/E _u (%)	累積 (%)	順番
1	B1									
2										
3		48.30	25.43		200		159	17523502		x
4	B2	54.18	0.10	0.12	0.8	0.16	0.6	4	4	(1)
5		60.07	0.17		1.3		1.1	26	43	(4)
6		25.8	68.07	0.47	3.2		2.6	525		x
7		76.60	0.71		4.8		3.9	1865		x
8		85.13	0.27		1.8		1.5	123		x
9		93.66	0.11		0.8		0.6	6	9	(2)
10	As	102.20	0.18	0.14	1.2	0.18	1.0	35	107	x
11		110.73	0.18		1.2		1.0	36		x
12		119.26	0.18		1.2		1.0	43		x
13		127.79	0.16		1.1		0.9	29	72	(5)
14		136.32	0.11		0.7		0.6	8	17	(3)

(b) 高洲小学校

深度(m)	細粒分含有率 (%)	σ'_v (kN/m ²)	R	FL法				エネルギー法		
				$r_n=0.65$		$r_n=0.80$		WH/E _u (%)	累積 (%)	順番
1	B1									
2	B2	52.4	29.37	0.17	0.8	0.25	0.7	10	47	(8)
3		35.16	0.07	0.20	0.4		0.3	1	1	(1)
4		41.03	0.11		0.4		0.4	2	3	(2)
5	F	47.11	0.13	0.24	0.5	0.30	0.4	5	11	(4)
6		53.19	0.11		0.4		0.4	3	6	(3)
7		60.10	0.19		0.8		0.7	17	106	x
8		68.92	0.25		1.2		1.0	49		x
9		77.75	0.17		0.8		0.7	15	73	(10)
10		86.57	0.15		0.7		0.6	11	58	(9)
11	As	95.40	0.20	0.21	0.9	0.25	0.8	28		x
12		104.23	0.13		0.6		0.5	8	19	(5)
13		113.05	0.14		0.7		0.5	10	37	(7)
14		121.88	0.15		0.7		0.6	15	88	(11)
15		130.70	0.13		0.6		0.5	8	27	(6)