

エネルギーによる液状化判定法と FL 法の比較
 - 2011 年東北地方太平洋沖地震でのケーススタディ -

Energy-Based Liquefaction Potential Evaluation compared with Stress-Based Evaluation (FL-Method)
 - Case studies on 2011 Tohoku Earthquake -

土木工学専攻 19 号 佐藤 雄太
 SATO Yuta

1. はじめに

2011 年東北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⁾。ここでは観測された地震動を用いて FL 法とエネルギー法による液状化判定を実施し、両者の結果を対比した。また FL 法については道路橋示方書（社団法人日本道路協会）と建築基礎構造設計指針（日本建築学会）に準じて判定を行った。



図-1 解析対象地点

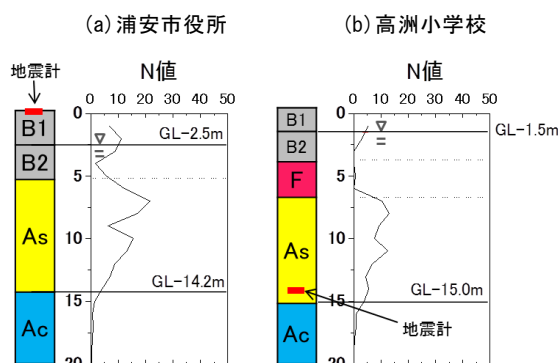


図-2 対象地点のボーリングデータ

2. 地盤・地震条件

対象とした地点は図-1 に示す 6 地点である。この内、本発表では元町の浦安市役所地盤と、新町の高洲小学校校庭地盤を代表として、図-2 にそのボーリングデータを示す。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。その際用いたせん断剛性比 G/G_0 と減衰定数 D のせん断ひずみ低減率については、

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

を用いた⁵⁾。ここに、 $\alpha = 1.00$ 、 $\beta = 1.44$ 、

$\gamma_r =$ 基準ひずみ（非粘性土では $\gamma_r \propto \sigma_c^{0.5}$ 、粘性

表-1 対象地点の地盤概要

深度(m)	層厚(m)	層タイプ	N値	N_1	湿潤密度 ρ_s (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
5.2	2.7	B2	3.00	4.1	1.6	1550	110	84	7.0
14.2	9	As1	9.62	9.6	1.87	1540	140	113	3.0
36.8	22.6	Ac1	0.35	0.2	1.83	1390	140	111	5.8
41.9	5.1	Na	4.83	2.0	1.68	1420	165	144	4.3
		Dg	50.00		1.95	1560	300	300	2.0

深度(m)	層厚(m)	層タイプ	N	N_1	湿潤密度 ρ_s (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
3.70	2.20	B2	1.83	4.5	1.59	1550	110	84	7.1
6.70	3.00	F	1.00	2.4	1.62	1400	100	84	5.1
16.00	9.30	As1	8.63	20.9	1.90	1540	160	124	6.8
35.70	19.70	Ac1	0.92	2.2	1.60	1320	110	84	6.5
38.70	3.00	As2	9.10	22.1	1.90	1450	167	152	3.4
43.70	5.00	Nac	4.08	9.9	1.47	1460	180	159	4.2
		Dg	50.00		2.10	1560	300	300	2.0

土では地層ごとに一定値), D_0 =最小減衰定数, D_{max} =最大減衰定数である. 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. -その際, 砂層の静止土圧係数を $K_0=0.5$ と仮定し, 液状化抵抗比は応力比 R_L を用いて $R = R_L(1 + 2K_0)/3$ より算出する. せん断強度比 $L = r_n L_{max} = r_n \tau_{max}/\sigma'_v = \tau_0/\sigma'_v$ に関わる最大応力振幅 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.

また, 図-3 に示す細粒分含有率(F_c)と補正 N 値増分の関係より, 建築基礎構造設計指針では補正を行うが, $F_c=50\%$ 以上の層については一様に $F_c=50\%$ として補正 N 値増分を決定し判定を行った. さらに図-3 には道路橋示方書における R と R_L も示している. どちらの判定法においても R の決定には換算 N 値を用いて算出されるが, 図に着目すると, N 値 20 程度までよく一致していることが分かる.

一方, 図-4 に示す補正 N 値と細粒分含有率 F_c の関係に着目する. 道路橋示方書による N 値の換算は, 有効土被り圧により基準化した値を各 F_c に対応する補正式を用いて算出される. 一般的に, N 値が高い地盤ほど細粒分は少なくなるため補正 N 値増分は極端に大きくなることはない. 対して, 建築基礎構造設計指針では細粒分の増大に伴い直接換算 N 値増分も上昇していることが分かる. このことから建築基礎では, 道路橋より算出された R に比べ大きく評価されるため, 同地点における FL 法においても液状化しにくいという判定結果が得られる.

図-5 に「道路橋示方書」と「建築基礎構造設計指針」に準じた FL による液状化判定結果をまとめて示している. まず図中に実線で示した道路橋示方書による結果に着目する. 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 A_s 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. これに対して, 図-5 に点線で示した建築基礎構造設計指

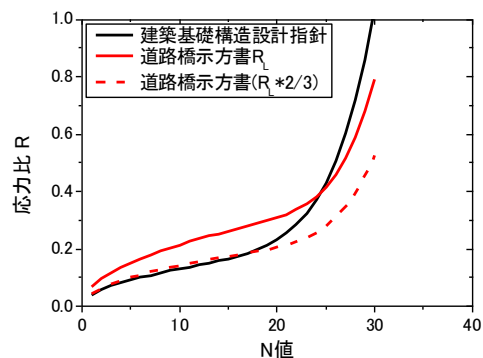


図-3 液状化抵抗比 R と N 値の関係

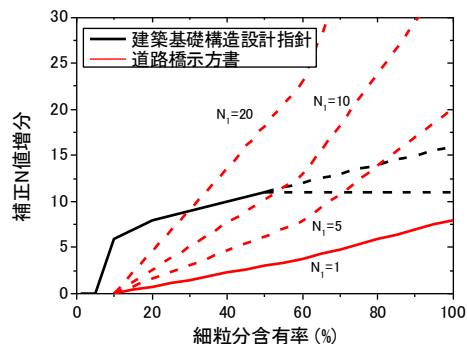


図-4 補正 N 値増分と細粒分含有率の関係

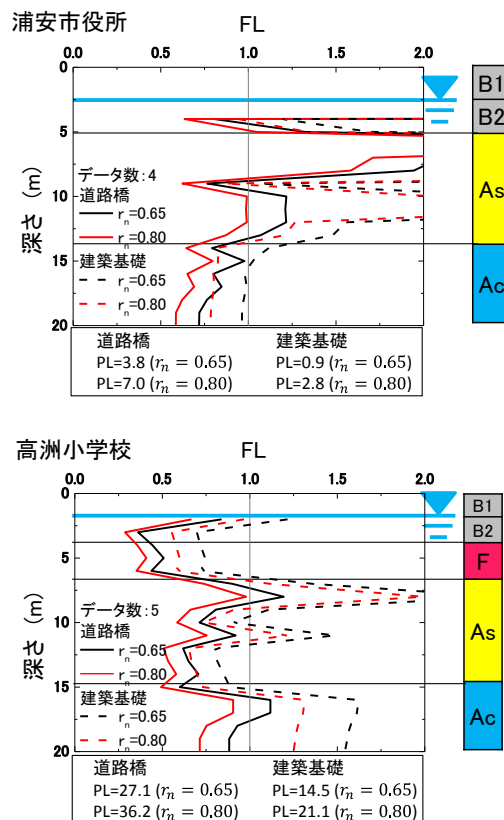


図-5 FL 法による液状化判定結果
(上) 浦安市役所, (下) 高洲小学校

針の結果では, 依然として液状化する深度は残されているが, 2 地点とも道路橋示方書に比べ全体的に FL 値が非常に大きくなっており, 沖積砂層 A_s では実際の液状化履歴に近い結果と

なった。

一方、実際の液状化がほぼ人工地盤に限られていたことを考えると、両地点の PL 値を各深度 z における FL 値 $F_{L,z}$ と層厚 Δh より以下の式で算定する（粘性土は含まない）。

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

まず道路橋示方書による判定から算出した PL 値に着目する。浦安市役所では $r_n = 0.65$ のとき $PL=3.1$ 、 $r_n = 0.80$ のとき $PL=6.9$ 、であったのに対し高洲小学校では $r_n = 0.65$ のとき $PL=27.5$ 、 $r_n = 0.80$ のとき $PL=37.4$ 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。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深度が大きく拡大し、PL 値も大きくなるのが分かる。一方、建築基礎による PL 値について道路橋示方書との比較を行うと、両地点とも $r_n = 0.65$ 、 0.80 のいずれにおいても建築基礎による判定法が液状化しにくいという結果となった。

以上から FL 値、PL 値の結果より分かるように建築基礎による判定は道路橋による判定に比べて、液状化が起こりにくい結果となっており、PL 値の結果からも液状化の程度は低いことがわかる。これは図-5 において示した細粒分含有率による N 値の補正が、両手法において異なっていることが大きく影響していると考えられる。

4. エネルギー法による液状化判定

前述の FL 法で液状化判定を行った浦安市役所と高洲小学校において、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。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 ($\Delta W/\sigma'_c$) 関係 (図-5²⁾) と液状化判定で用いる応力比 (R_L) ~ 基準化 N 値 (N_1) 関係³⁾ から $\Delta W/\sigma'_c \sim N_1$ 関係を、地層ごとに求める。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⁶⁾。

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

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 $L_{max} = \tau_{max} / \sigma'_{max}$ の計算に用いた同

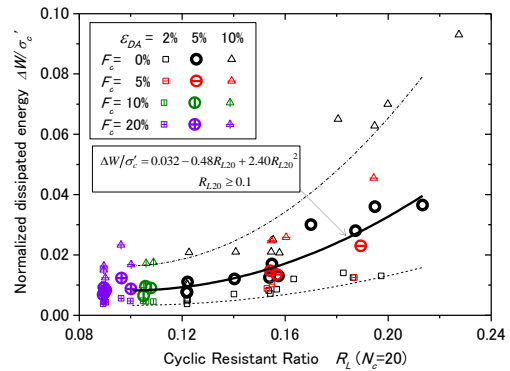


図-6 液状化応力比と損失エネルギーの関係

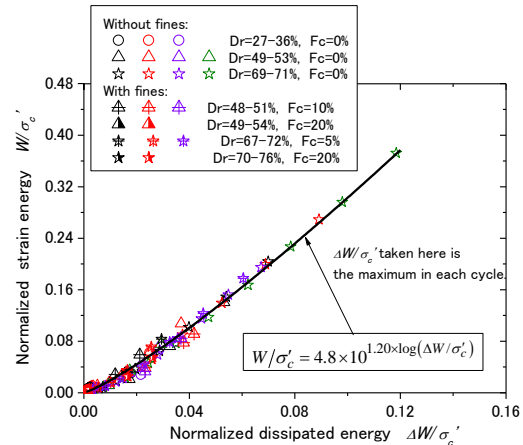


図-7 損失エネルギーとひずみエネルギーの関係

一の等価線形解析 SHAKE での地層ごとの上昇加速度波形を積分して用いた。

ところで、砂の（累積）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、内部損失エネルギー 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-6 は同じ一連の非排水三軸試験から得られた（累積）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。

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

ここではこの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具体的手順は以下の通りである。

- ① 図-2 に示す地盤を厚さ 1m の水平層に分割し、各層の N_1 値から R_L を求め³⁾、図-5 より基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ を求める。
- ② さらに式(3)により $\Delta W/\sigma'_c$ 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 式(2)により上昇エネルギー(単位面積当たり)を計算し、各層ごとのひずみエネルギー W (単位体積当たり)の昇順累計値と比較することにより、 E_u を使い切るまでのどの層までが液状化するかを判定する。

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となったものを○、しない結果となったものを×としている。エネルギー法では液状化した層については○だけではなく、 ΔW が小さい順(液状化しやすい順)に数字を示している。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徴だといえよう。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。

図-8 は FL 値とひずみエネルギーの関係を表したグラフで誤差はあるものの FL 値が大きくなるにつれ、ひずみエネルギーも大きくなる傾向があるということが見て取れる。

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が、実際の液状化履歴との対比からは疑問が残る。
- 3) 道路橋と建築基礎による FL 法の比較を行うと、建築基礎構造設計指針より算出した FL 値は道路橋示方書の結果に比べ全体的に高く、これは細粒分含有率による N 値の補正が異なるためと考えられる。
- 4) 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、エネルギー法との整合性が良くなる。

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)		FL法				エネルギー法	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.80$		道路橋	建築基礎
		道路橋	建築基礎	道路橋	建築基礎		
1	B1						
2							
3	B2	×	×	×	×	×	×
4		○	×	○	○	①	①
5	As	×	×	×	×	④	×
6		×	×	×	×	×	×
7	As	×	×	×	×	×	×
8		×	×	×	×	×	×
9	As	○	×	○	○	②	②
10		×	×	○	×	×	×
11	As	×	×	○	×	×	×
12		×	×	○	×	×	×
13	As	×	×	○	×	⑤	×
14		○	×	○	○	③	③

(b) 高洲小学校

深度(m)		FL法				エネルギー法	
		$r_n=0.65$		$r_n=0.80$		道路橋	建築基礎
		道路橋	建築基礎	道路橋	建築基礎		
1	B1						
2	B2	○	×	○	○		×
3		○	○	○	○	×	①
4	F	○	○	○	○	①	②
5		○	○	○	○	④	③
6	As	○	○	○	○	×	④
7		○	×	○	×	×	×
8	As	×	×	○	×	×	×
9		○	×	○	○	②	×
10	As	○	○	○	○	×	⑦
11		○	×	○	×	×	×
12	As	○	○	○	○	×	⑤
13		○	○	○	○	⑤	⑥
14	As	○	○	○	○	③	×
15		○	○	○	○	③	×

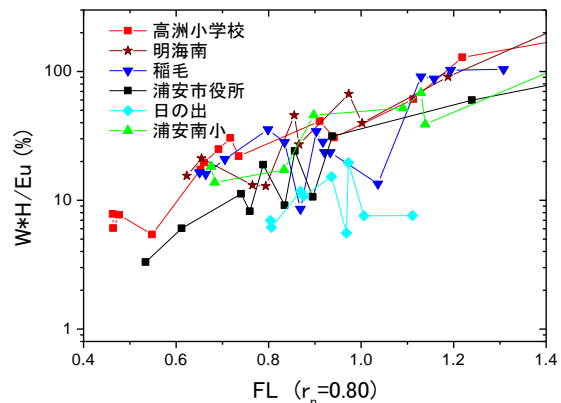


図-8 FL とひずみエネルギーの関係

<参考文献> 1) 國生剛治, 三森祐貴, 佐藤雄太, 神村真: 東日本大震災による千葉県浦安市の液状化地層構成と貫入試験値の関係, 第47回地盤工学研究発表会, C-3, 812, 1615-1616, 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*, Vol. 10, 1982, 59-68. 5) 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. 6) 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.