

(55) 地盤液状化の発生特性の評価法に関する検討

建設省土木研究所 岩崎 敏男 ○常田 賢一

1. まえがき

地盤の液状化による震害を軽減し構造物の合理的な耐震設計を行うためには、事前に液状化発生の有無、範囲および程度を予測することが必要である。本文は筆者等が提案している液状化の判定指標 F_L の妥当性の検証とその特性、 F_L による液状化の発生確率の推定、構造物被害に関する液状化層厚、室内模型振動実験による F_L を用いた液状化程度の推定および地盤反力特性に及ぼす液状化程度の影響に関して検討した結果を報告するものである。

2. 既往地震における液状化の判定法の適用

既往の地震において液状化は数多く確認されているが、本報告では濃尾地震(1891年)、東南海地震(1944年)、福井地震(1948年)、新潟地震(1964年)、十勝沖地震(1968年)および宮城県沖地震(1978年)の6地震を対象として、土質条件の明らかな64の液状化地点と28の非液状化地点において、(1)式で定義する流動化に対する抵抗率 F_L を簡易的に計算した。表-1に解析対象地点の諸特性の一覧を示す。

$$F_L = R/L \quad \text{----- (1)}$$

ここに R: 原位置せん断強度比

0.04 mm ≤ D₅₀ ≤ 0.6 mm に対して

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7} + 0.225 \log_{10} \frac{0.35}{D_{50}}}$$

0.6 mm ≤ D₅₀ ≤ 1.5 mm に対して

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7} - 0.05}$$

L: 地震時動的応力比 r_d : 動的せん断応力の低減係数

$$L = \frac{\tau_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{\alpha_s \max}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} r_d$$

z: 深度(m)

N: N値, D₅₀: 平均粒径(mm)

$\alpha_s \max$: 地表面最大加速度(gal)

g: 重力加速度(980gal)

σ'_v : 全応力(kg/cm²), σ'_v : 有効応力(kg/cm²)

図-1は新潟地震における液状化地点および非液状化地点の全地点(表-1)における F_L の深度分布の要約である。同図に示す液状化層は地震時の構造物の被害状況から推定しているが、同図によれば液状化層ではほぼ $F_L < 1.0$ の領域にあり、 $F_L = 1.0$ が液状化判定の目安となることが指摘される。また、液状化層の大部分が深度10m程度以浅に存在するが、一部10m以浅でも液状化の可能性を示唆している。

図-2は表-1の全地点において計算した F_L に対して、 F_L の度数分布および累積度数分布を推定液状化層(493層)と推定非液状化層(613層)と比較したものである。ここで、液状化層の推定は構造物の被害状況から推定するのを原則とし、それ以外では土質、N値、粒度分布、地下水位等の諸データにより推定した。液状化層および非液状化層の結果を比較すると両者の間に明確な差異のあることがわかる。つまり、原データに対して或る F_L の範囲に分布するデータの度数割合を例示すると表-2のようになる。同表によれば、液状化層では約87%が $F_L < 1.0$ であり、他方非液状化層では約85%が $F_L \geq 1.0$ であり、しかし、液状化層であつても約13%は $F_L \geq 1.0$ であり、他方、非液状化層であつても約15%は $F_L < 1.0$ であり、 $F_L = 1.0$ で明確に液状化層と非液状化層が区分できないものではないことに注意する必要がある。

図-2において F_L の度数分布を正規分布で近似すると(2)式で表現できる。

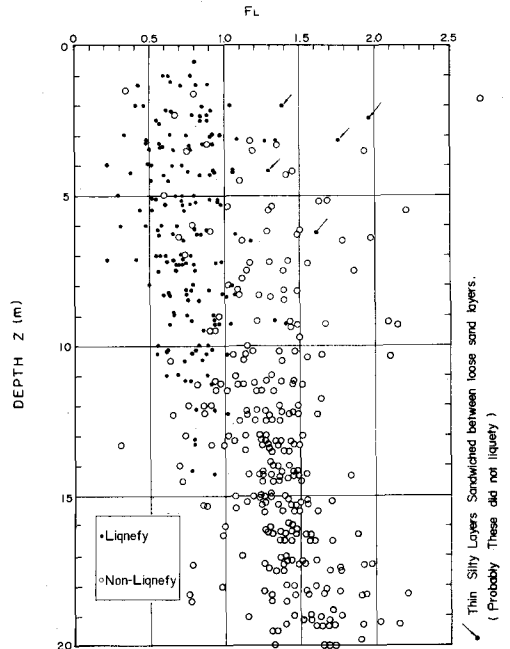


図-1 $F_L \sim z$ (新潟地震)

表-1(A) 液状化地点 諸特性一覽
表-1(B) 非液状化地点 諸特性一覽

No.	Site	Earthquake	Soil Data	Depth of Water Table	D50	Major Soil Type	σ_{max} (kgf)	I_L	Ref.
1	Jindai		A	2.3m	E	Fine Sand		0.0	
2	Kogane-cho		B	5.2	E	Medium Sand		0.0	
3	Higashi-Kan	Niigata, 1964, M7.5	A	5.2	M	Fine to Coarse Sand		0.0	
4	Shita Matsubara Bst.		B	1.2	M	Med. to Coarse Sand		18.6	(3)
5	Omura 2486 7328		A	0.0	M	Fine Sand	170	4.6	
6	Shono Bridge		A	0.0	E	Medium Sand		0.4	
7	Nishi Oh-Hira-Cho		A	3.5	E	Fine to Med. Sand		0.4	
8	Gotanda Bridge	Kamo City	A	0.1	M	Fine to Silty Sand		5.3	
9			A	4.3	M	Fine Sand to Silt		0.0	
10	Maruoka	Fukui Pref., 1949, M7.3	A	1.8	M	Silt to Med. Sand	295	18.7	(2)
11	Nakamura		A	0.85	M	Fine to Med. Sand	186	0.3	
12			A	0.90	M	Silty to Coarse Sand	180	1.0	
13	Yurage-kami		A	2.15	M	"	180	0.9	
14	Kitakami River	No. 10	A	1.35	E	Fine Sand	230	1.5	
15	Natori River, 3.2 Km		A	2.50	E	Clay to Coarse Sand	180	0.8	
16	Kinpu Bridge		A	4.0	M	Silt to Silty Sand	195	0.6	
17	Abakura Bridge	Miyagi Pref., Miyagi-ken, Ono, M7.4	A	4.3	M	Med. to Coarse Sand	175	0.7	(8)
18			A	3.4	M	"	175	0.7	
19	Esi Bridge		A	8.0	E	Fine Sand to Clay	175	0.0	
20	Minami Sendai		B	0.8	E	Sandy Silt to Gravel	180	0.0	
21	Uomachi		A	0.0	E	Med. to Silty Sand	230	13.9	
22			B	0.0	E	"	230	17.1	
23	Wabuchi		A	3.35	M	Fine to Med. Sand	260	3.7	

Reference
 (1) BR (1965)
 (2) BR (1969)
 (3) Japanese Society of Civil Engineers
 (4) Ishihara (1976)
 (5) J.S.S.M.F.E. (1976)
 (6) Kishida (1970)
 (7) Oeishi et al. (1977)
 (8) Yasuda et al. (1980)

表-2 FLの度数分布割合

FL	推定液状化層		推定非液状化層	
	原予一々	解析結果	原予一々	解析結果
$0.0 \leq F_L \leq 0.6$	0.242	0.226	0.003	0.011
$0.6 < F_L \leq 0.8$	0.347	0.307	0.062	0.034
$0.8 < F_L \leq 1.0$	0.284	0.287	0.084	0.093
$1.0 < F_L$	0.127	0.180	0.851	0.862
$0.0 \leq F_L \leq 1.0$	0.873	0.820	0.149	0.138

No.	Site	Earthquake	Soil Data	Depth of Water Table	D50	Major Soil Type	σ_{max} (kgf)	I_L	Ref.
1	Shimano River		A	2.0m	M	Fine to Med. Sand		9.0	
2	Railroad Bridge		A	2.5	M	"	24.9	5.8	
3	Machi's Koron Bridge		B	0.5	E,M	Fine to Coarse Sand		1.3	
4			B	2.5	M	"		0.6	
5	Banai Bridge		A	0.0	M	Medium Sand	20.2	18.3	
6			B	0.0	E,M	Fine to Med. Sand		18.3	
7	Yashio Bridge		B	0.0	E,M	"	39.5	26.2	(3)
8			B	0.0	E,M	"	26.2	24.0	
9	Shio-matsubara Bst.		A	0.0	M	Med. to Coarse Sand		32.9	
10	Tsutsi Bridge		A	1.58	M	Coarse Sand	28.2	19.5	
11			A	0.0	E	Coarse Sand	28.2	26.2	
12			A	0.0	M	Med. to Coarse Sand	14.3	27.7	
13			B	0.0	E	"	23.2	23.2	
14	Shono Bridge	Niigata, 1964, M7.5	A	0.0	E	"	23.2	23.2	
15			A	0.0	E	"	23.2	23.2	
16			A	0.0	E	"	23.2	23.2	
17			A	0.0	E	"	23.2	23.2	
18	Niigata Airport		A	0.8	E	"	23.2	23.2	
19	Seiya		A	0.8	E	"	23.2	23.2	
20			A	0.8	E	"	23.2	23.2	
21	Niigata Railroad Hospital		B	1.4	M	Fine Sand	20.1	28.6	(4)
22			A	0.63	M	Fine to Med. Sand	20.1	28.6	
23			A	1.18	M	Fine Sand	20.1	28.6	(1)
24			A	1.25	M	"	20.1	28.6	
25	Kawaguchi-Cho		A	1.25	M	"	20.1	28.6	(5)
26			A	1.25	M	"	20.1	28.6	
27			A	1.25	M	"	20.1	28.6	
28			B	1.2	E	"	20.1	28.6	
29	Kawaguchi-Cho		B	1.2	E	"	20.1	28.6	
30			A	0.35	E	"	20.1	28.6	
31			A	1.18	M	"	20.1	28.6	
32			A	2.4	M	"	20.1	28.6	
33	Nase Beach	Hokkaido, 1994, M7.5	A	0.9	M	Fine to Med. Sand	200	0.0	
34	Michinohe City		A	0.9	M	Fine sand	333	20.1	(6)
35			A	1.9	M	"	333	20.1	(7)
36	Ofu City		A	0.75	M	Medium Sand	230	20.2	
37	Utsuno		A	1.1	M	Gravelly Sand	230	20.2	
38	Ogastse		A	2.1	M	"	230	20.2	
39	Mangohi, Oigaki		A	1.2	M	Sand to Grav. Sand	270	20.2	
40	Makubari		A	0.6	M	Medium Sand	195	19.5	(2)
41	Konsei		A	0.9	M	Coarse Sand	200	20.5	
42	Isari		A	0.23	M	Silty to Fine Sand	230	20.2	
43	Takaya 45		A	4.2	M	Med. to Coarse Sand	325	20.7	
44	Takaya 2-168		A	1.8	M	Med. Sand to Gravel	325	24.9	
45	Abakura Bridge		A	4.2	M	Sandy Silt to Med. Sand	175	11.4	
46	March of Abakura River		A	0.0	M	Coarse Sand	175	12.2	
47			B	0.0	E	"	190	20.4	
48	Yurage-kami		A	1.82	M	Silt to Coarse Sand	180	10.3	
49			A	0.85	M	Fine to Coarse Sand	180	9.4	
50	Yurage Bridge		A	1.7	M	Fine to Med. Sand	185	7.9	
51			A	1.3	M	Med. to Coarse Sand	185	0.5	
52			A	0.26	M	"	185	21.8	
53	Yemaaki		A	0.87	E	Sandy Silt to Med. Sand	190	10.9	
54	Ori (I)		A	4.3	M	Clay to Med. Sand	210	4.1	(8)
55			A	2.4	M	"	210	4.1	
56	Uomachi		B	0.0	E	Med. to Silty Sand	230	39.1	
57	Rig.		B	0.0	E	"	230	36.9	
58	Shono		B	2.72	E	Clay to Coarse Sand	185	20.4	
59			B	0.0	E	Fine to Med. Sand	225	14.1	
60			B	0.0	E	Fine Sand	225	27.1	
61			B	0.0	E	"	225	16.2	
62	Nakamura		A	1.3	M	Sandy Silt to Med. Sand	190	12.3	
63			A	1.3	M	Fine to Coarse Sand	180	5.6	
64	Wabuchi		A	2.45	M	Silt to Fine Sand	295	21.2	

$$f_L(F_L) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{F_L - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \text{-----}(2)$$

ここに、 μ は平均値、 σ は標準偏差であり、液状化層では $\mu = 0.78$ 、 $\sigma = 0.24$ 、非液状化層では $\mu = 1.36$ 、 $\sigma = 0.33$ である。(2)式による F_L の確率分布を図-2に示し、 F_L の領域に対応した発生確率の計算結果を表-2に示す。

3. F_L による液状化の発生確率の推定

図-2あるいは表-2によれば、同一 F_L であら、ても液状化と非液状化の両現象の発生可能性がある。そこで、或る F_L を持つ地層が液状化する確率を推定するために、同一範囲の F_L に属する液状化層と非液状化層の度数の割合を求め、液状化層の占める割合をもって液状化の発生確率とした。この際、 F_L の範囲のピッチは0.1とし、データ数は全層数で500層として補正した。

図-3に解析結果を示すが、同図によれば推算された F_L から、対象とする土層の液状化あるいは非液状化の発生確率を推定することが出来る。つまり、大略 $F_L \leq 0.5 \sim 0.6$ では液状化の発生確率は100%、 $F_L \geq 1.7$ では0%であり、 $0.5 \sim 0.6 < F_L < 1.7$ では F_L に応じた発生確率が推定される。例えば $F_L = 1.0$ では約50%である。

4. 構造物被害に關与する液状化層厚の検討

1978年宮城県沖地震において、北和淵堤防では周辺地盤に数多くの噴砂が発生したにも拘わらず、河川堤防の被害は軽微であった。このように液状化の発生

- ◆ Site whose ground surface (H_0) is silty or clayey
- ◇ Site where saturated sandy layer ($H_s = 3.65\text{m}$) is located beneath humus layer ($H = 2.25\text{m}$)

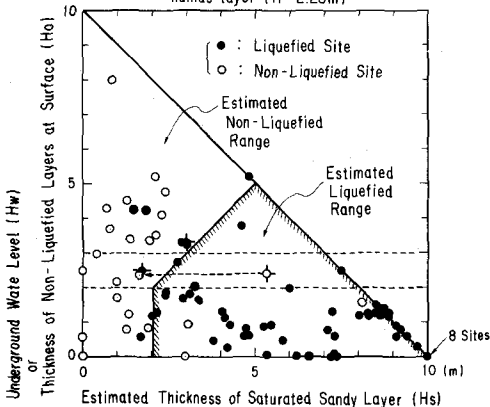
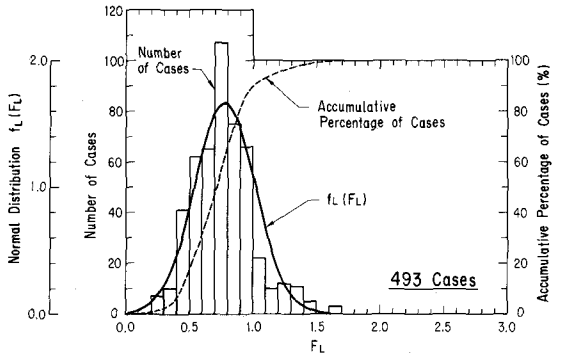
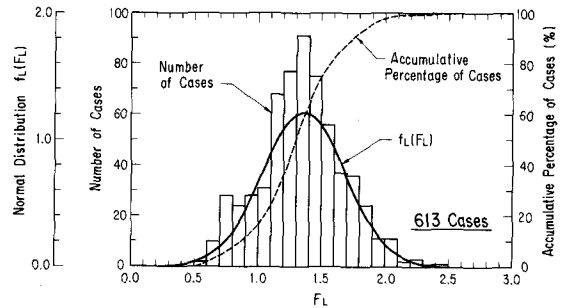


図-4 $H_s \sim H_w$, H_0



(A) Estimated Liquefied Layers

図-2 F_L の度数分布(推定液状化層)



(B) Estimated Non-Liquefied Layers

図-2 F_L の度数分布(推定非液状化層)

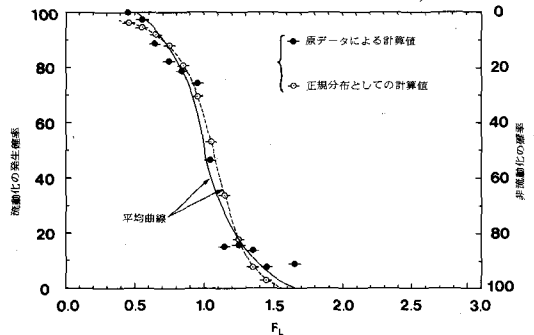


図-3 F_L と液状化の発生確率の關係

が直ぐに構造物被害に結びつくと考えるのは早計であり、液状化発生範囲あるいは表層部の非液状化層厚等の諸条件を考慮する必要がある。ここでは表-1の87地点に対して、深度10m以下の地下水水位以下の砂質土層の層厚(H_s)と地下水水位(H_w)あるいは地表面付近の非液状化層の層厚(H_0)との関係を調べた。ここでの H_0 は土質、 N 値等のデータに基づいて決めている。調査結果を図4に示すが、液状化地点(液状化が地表まで及んでいる地点)と非液状化地点の分布領域は図のような傾向を有しているが、大部分の液状化地点では H_s が3mより大きく、また H_w あるいは H_0 は2

~3m程度より小さい傾向にある。換言すれば、 H_0 が2~3mより小さいか H_0 あるいは H_0 が2~3m程度以上であれば、地盤内の液状化が地表まで及ばないことが判断される。

5. 室内模型振動実験による F_L を用いた液状化程度の推定

流動化に対する抵抗力(F_L)に液状化の判定法の妥当性の検証のための原位置地盤調査はこれまでに数例実施してきている。²⁾ここでは室内模型振動実験による F_L の検証および液状化程度の推定について検討した結果を報告する。実験の詳細は文献3)を参照されたい。同実験結果【文献3)の図9および図10】から、模型地盤のように比較的ゆる弱めの地盤に対しての F_L の妥当性の検証が行われたが、同時に図5の結果に示すように F_L と液状化程度(過剰間隙水圧比 $Lu: \Delta u/\sigma_v'$)の関係が得られている。同図によれば、 F_L から液状化程度が推定でき、例えば図中の平均曲線によれば、 $F_L \leq 0.6$ で $\Delta u/\sigma_v' = 1.0$ であり、 $F_L = 1.0$ では $\Delta u/\sigma_v' = 0.5$ 程度と推定される。

6. 地盤の反力特性に及ぼす液状化程度の影響

地震時の地盤の液状化を考慮した土木構造物の合理的な耐震設計を行うためには、地盤の液状化が及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。そのために室内簡易平板載荷試験を実施し、地盤の反力特性に及ぼす液状化(過剰間隙水圧の上昇)の影響を定量的に明らかにすることを試みている。実験の詳細は文献5)を参照されることとして、同実験結果を要約すると図6が得られる。ここで K 値は載荷時の基準貫入量(mm)に対する載荷板の単位面積当りの載荷重であり、地盤反力係数に相当するものである。同図では $\Delta u = 0.0$ 時の K 値で基準化した K 値が液状化の程度($\Delta u/\sigma_v'$)の進行に伴って低減することが明らかにされている。道路橋示方書V耐震設計編⁴⁾では F_L に応じて土質定数に乗じる低減係数 D_e を表-3のように規定している。表-3および図6から D_e と $\Delta u/\sigma_v'$ の関係と求めると図6のようになる。同図から明らかのように、表-3で規定される D_e の値が簡易載荷試験結果の平均的な値を示すものであることがわかる。

6. あとがき

最近では液状化の判定の対象となる土層として N 値あるいは相対密度が高い砂層が注目されてきており、従来の比較的 N 値の低い沖積砂質土層を対象とした判定法の適用性に検討の必要が生じてきているのが現状である。また、液状化の判定結果に基づき構造物の耐震性向上の一方法である地盤改良についてその対象範囲の設定法等についても検討する必要があると考えられる。今後はこれらの点を踏まえた研究を実施してゆく予定である。

〈参考文献〉1)岩崎龍岡,常田:地盤流動化の判定方法,土木技術資料Vol.20 No.4, 2)岩崎,常田:1978年宮城県沖地震による地盤震害に関する調査,第15回地震工学研究発表会,1979.7, 3)常田,木全,後藤:液状化する砂質土盤と杭基礎の模型振動実験,第16回地震工学研究発表会,1981.7, 4)日本道路協会:道路橋示方書V耐震設計編,35.5, 5)常田,木全,吉田:地盤の流動化特性およびその影響に関する実験的検討,第16回土質工学会,1981.5, 6)第16回土質工学会(1981.5)講演番号150, 151, 153等

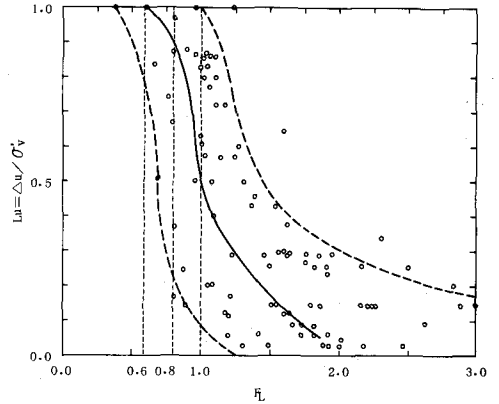


図-5 $F_L \sim \Delta u/\sigma_v'$

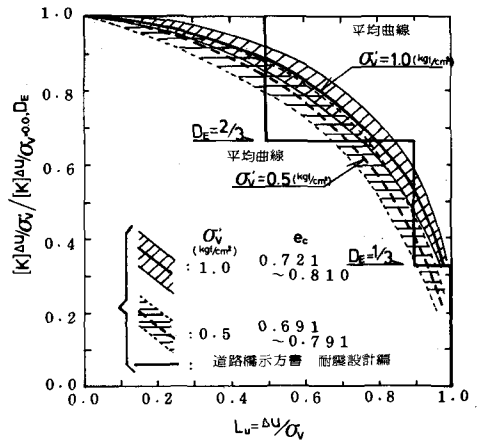


図-6 地盤の反力特性に及ぼす $\Delta u/\sigma_v'$ の影響

表-3 土質定数に乗じる低減係数⁴⁾

F_L の 範囲	現地盤面からの深度 x (m)	土質定数に乗じる係数 D_e
$F_L \leq 0.6$	$0 \leq x \leq 10$	0
	$10 < x \leq 20$	$\frac{1}{3}$
$0.6 < F_L \leq 0.8$	$0 \leq x \leq 10$	$\frac{1}{3}$
	$10 < x \leq 20$	$\frac{2}{3}$
$0.8 < F_L \leq 1.0$	$0 \leq x \leq 10$	$\frac{2}{3}$
	$10 < x \leq 20$	1