

# 既公表データに基づく砂地盤の耐液状化信頼性評価法に関する一考察

広島工業大学  
鉄建建設(株)  
(株) 異設計コンサルタント

フェロー会員 中山 隆弘  
正会員 岩屋 篤  
正会員 ○ 有清 睦

## 1. はじめに

地震時における砂地盤の液状化(以下では単に液状化と称する)の予測については、後述するFL値、すなわち $F_L$ (液状化対象層の液状化抵抗率あるいは液状化安全率)が1.0以上であれば、その層の液状化の可能性が低く、1.0以下であればその可能性が高いと、簡易的に判定する場合がある<sup>1)</sup>。さらに、西村らは、地盤液状化指数 $P_L$ の算定を同様の考え方で行って、地盤全体の液状化に対する信頼性解析を行っている<sup>2)</sup>。

しかし、安田らの調査によれば、地盤や地震動の情報における種々の不確実性を考慮すれば当然と言えば当然ながら、 $F_L$ が1.0以上で液状化したり、1.0以下でも液状化を起こさない場合が多々あるようである<sup>1)</sup>。

一方、近年、地震時における地盤の被害想定においてリスクマップは極一般になり、今後は、リスクカーブによる被害の確率表現が重要になるものと思われる。

そのような状況に鑑み、本研究では、参考文献1)で公表されている調査報告を統計的に処理し、1960年台以降、世界的に研究が行われ、最近では、港湾構造物の設計基準<sup>3)</sup>の理論的ベースとなった信頼性理論によって、FL値による砂質土層の液状化に対する信頼性評価を行う手法に対する基礎的研究を行った。

ただし、ここまでは砂質土層の一部の液状化に対する信頼性評価に止まっており、土層全体に対する液状化の判定に使用されるPL値による土層全体の信頼性評価法については今後の課題としている。

## 2. FL値( $F_L$ )の概要と液状化の判定

詳細については省略するが、わが国の道路橋示方<sup>4)</sup>では、地震動による砂質土層の一部の液状化に対する判定に式(1)で示される $F_L$ を用いる方法が示されている。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

式中、R: 動的せん断強度比(N値、細粒分含有率、地震動タイプなどを含む計算式で計算)、L: 地震時せん断応力比(地表震度、有効上載圧などを含む計算式で計算)である。

この方法では、 $F_L \leq 1.0$ なら、土層の注目している部分の液状化の可能性が高く、逆に $1.0 < F_L$ なら、その可能性が低いものと判定される。

## 3. 信頼性評価法

構造信頼性理論(Structural Reliability Theory)では、

構造物等のある破壊モードにおける荷重効果(断面力や応力度など)を確率変数S、荷重効果に対応する抵抗力(断面の抵抗モーメントや材料強度など)を確率変数Rで表し、性能関数Zを式(2)等で定義する。

$$Z = R - S \quad \text{または} \quad Z = \frac{R}{S} - 1 \quad (2)$$

ここで、RとSが $N(\mu_R, \sigma_R)$ 、 $N(\mu_S, \sigma_S)$ で与えられる正規確率変数であると仮定すれば、性能関数Zも正規確率変数となり、RとSが互いに独立な確率変数であれば、その平均値 $\mu_Z$ と標準偏差 $\sigma_Z$ は、それぞれ $\mu_R - \mu_S$ と $(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$ である。

このとき、2次モーメント法による信頼性指標 $\beta$ は、式(3)で、そして、破壊確率 $P_f$ は式(4)で与えられる。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3)$$

$$P_f = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (4)$$

式中、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規確率分布関数である。

また、式(3)と式(4)から式(5)が導かれる。

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (5)$$

## 4. 公表データ

さて、図1(a)は、安田らが新潟地震(1964年)、宮城県沖地震(1978年)、日本海中部地震(1983年)の際に液状化した箇所(白丸)と液状化しなかった箇所(黒丸)のボーリングデータを集め、道路橋示方書の方法によって $F_L$ を計算した結果である<sup>1)</sup>。

また、図1(b)は、著者のひとりが図1(a)に、深さについては1m単位、 $F_L$ については0.1単位でメッシュを付け加えたものである。これにより、精度的にはやや粗いデータではあるが、液状化した323箇所と液状化しなかった811箇所の $F_L$ を得ることができた。

## 5. 解析結果

まず表1は、 $F_L$ が1.0以下あるいは1.0以上で液状化した箇所の総数と液状化しなかった箇所の総数をまとめたものである。

また、図2(a)、(b)は、 $F_L$ に対する液状化箇所と非液状化箇所のヒストグラムである。

さて、表1を用いて、 $F_L$ が1.0以下でも液状化していない箇所数を $F_L$ が1.0以下の箇所の総数で除すれば、

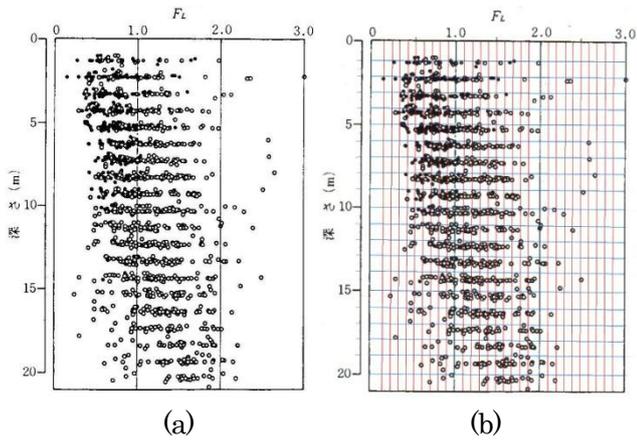
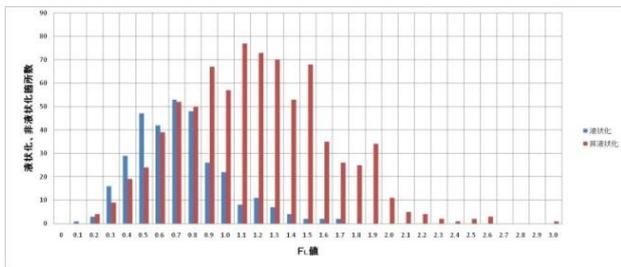


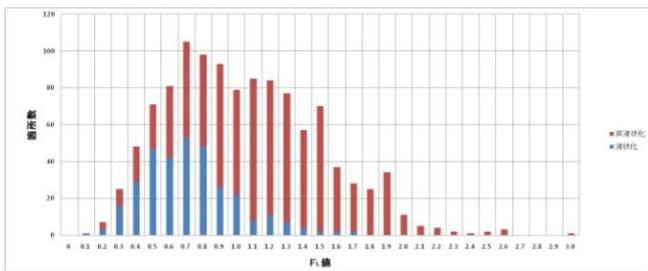
図1 液状化した箇所としなかった箇所の  $F_L$  分布

表1 液状化した箇所およびしなかった箇所の総数

	$F_L \leq 1.0$	$1.0 < F_L$	合計
液状化	287	36	323
非液状化	321	490	811
合計	608	526	1134



(a)



(b)

図2 液状化および非液状化箇所のヒストグラム

$321/608 = 0.528$  となる。すなわち、 $F_L$  値が 1.0 以下でも液状化していない箇所が半数以上あることが分かる。

このことより、砂質土層の液状化に対する性能関数  $Z$  を、式(2)に従って、

$$Z = F_L - 1.0 \quad (6)$$

と定義することはできないと考えるのが妥当であろう。

その上で、本研究では、性能関数をどのように考えれば表1に示す結果を適切に説明でき、砂質土層の耐液状化信頼性指標を計算できるか検討してみた。

具体的には、性能関数  $Z$  を次式によって定義してみた。

$$Z = F_L - \alpha \quad (7)$$

式中の  $\alpha$  は、着目箇所での液状化判定を行うために導入した変数で、平均値が  $\mu_\alpha$  で変動係数が  $V_\alpha$  の正規分布に従う確率変数である。

ここで、図2(b)からも分かるように、やや無理はあるが、今回は  $F_L$  が正規分布に従うものと仮定し、表1と式(5)により、次の計算によって、調査された箇所の液状化確率  $P_f$  と液状化に対する信頼性指標  $\beta$  を計算した。

$$P_f = \frac{323}{1134} = 0.285 \quad \Rightarrow \quad \beta = -\Phi^{-1}(P_f) = 0.568$$

そして、式(8)で定義できる信頼性指標の  $\beta$  を 0.568 とし、さらに、 $F_L$  値の平均値、標準偏差を今回のデータよりそれぞれ  $\mu_{F_L} = 1.046$ 、 $\sigma_{F_L} = 0.4506$  とし、同じく今回のデータを参考にして  $\alpha$  の変動係数を 0.4 と仮定すれば、式(8)より  $\mu_\alpha = 0.7398$  が得られる。

$$\beta = \frac{\mu_{F_L} - \mu_\alpha}{\sqrt{\sigma_{F_L}^2 + \sigma_\alpha^2}} = \frac{\mu_{F_L} - \mu_\alpha}{\sqrt{\sigma_{F_L}^2 + (V_\alpha \mu_\alpha)^2}} \quad (8)$$

現時点では一つの可能性を示した過ぎないが、 $\mu_\alpha$  を 0.7~0.75 程度、 $\sigma_\alpha$  を 0.3 程度とすれば、安田らによる調査箇所の液状化に対する性能関数を表現できると考えることができる。

## 6. おわりに

今回の基礎的研究により、公表されている新潟地震、宮城県沖地震、日本海中部地震の液状化被害データから、砂質土層の液状化に対する性能関数を、道路橋示方書で与えられている  $F_L$  によって表現するためのひとつの見通しを得ることができた。

しかし、 $F_L$  の確率分布を正規分布とみなしている点から、式(7)に含まれる確率変数  $\alpha$  に対する平均値や標準偏差の値についてはなお問題を残したことに加え、前述のように、 $P_L$  による砂質土層全体の液状化に対する性能関数についてはこれからの課題である。

## 謝辞

本研究に際し、応用地質(株)関西支社副支社長 荒瀬 義則氏、同事業部主任 三明 崇史氏から貴重な資料を快く貸与いただきました。記して深謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 安田進：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会、1995.
- 2) 西村・清水・藤井・島田：液状化対策地盤改良に関する信頼性設計、土木学会論文集、No.603/III-44、pp.101-111、1998.9.
- 3) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、国土交通局港湾局、2007.4.
- 4) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、(社)日本道路協会、2002.