

簡易液状化判定 FL 法へのニューラルネットワークの適用に関する研究

岐阜工業高等専門学校	環境都市工学科	正会員	吉村優治
〃	〃		鈴木正人
豊橋技術科学大学	建設工学課程	学生	古川裕健
富士エンジニアリング(株)			犬飼隆義

1. はじめに

わが国では、1964(昭和39)年の新潟地震、1978(昭和53)年の宮城県沖地震、1983(昭和58)年の日本海中部地震などで液状化が発生し、建築物や各種の構造物を中心に多大な被害を与えている。特に最近では1995(平成7)年1月の兵庫県南部地震において、ポートアイランドや六甲アイランドなどの埋立て地で液状化による被害が多発し、神戸の港湾施設は壊滅的なダメージを受けたことは記憶に新しい。

木曾三川(東から木曾川、長良川、揖斐川)によって造られた濃尾平野は、地震時に液状化を生じ易い地形として注目されており、明治以降だけでも濃尾地震($M=8.4$, 1891.10/28)、江濃地震($M=6.9$, 1909.8/14)、東南海地震($M=8.0$, 1944.12/7)¹⁾により各地で液状化が発生している(図-1)²⁾。これは、濃尾平野のうち沖積平野部が86%を占め、扇状地地帯、自然堤防地帯、三角州地帯の沖積平野の三地形帯がわが国の沖積平野のなかで最も典型的に配列していることに起因している。これまでも東海地方では1586(天正13)年天正地震、1891(明治24)年濃尾地震のように $M8$ 級の内陸地震もあり、広域的に被害が生じている³⁾。東海地震(仮称)が心配される今日、濃尾平野全域の液状化発生の予測を行い、液状化危険度が大きく被害が予想される重要構造物には何らかの対策を立てることが必要であろう。

一般の土質調査・試験結果をもとにした簡易な液状化発生の予測方法に FL 値法があり、道路橋⁴⁾、建築基礎⁵⁾などの耐震設計基準にも取り入れられている。本報告では、岩崎・龍岡ら⁶⁾の方法に則した道路橋示方書⁴⁾および時松・吉見⁷⁾の方法に則した建築基礎構造設計指針⁵⁾に基づいた簡易液状化予測 FL 法において、地層区分を考慮した N 値と液状化に対する安全率 FL 値の表示方法と液状化による被害程度を示す正規化液状化指数 PL' を提案⁸⁾する。

ただし、簡易 FL 法といっても、地下水位、土質名とその深さ、 N 値、平均粒径、細粒分含有率などの多くのパラメータが必要であり、これらの一つでも欠如した既存ボーリング資料は利用できない。たとえば、濃尾平野には建設省が収集・整理した昭和42年度から昭和51年度までの既存ボーリング資料⁹⁾約8000本があるが、これらのうち簡易 FL 法に利用できる資料は100本程度しかない。これは、簡易 FL 法に必要なパラメータのうち、ほとんどが平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c が欠如していることが原因となっている。したがって、本研究ではこのパラメータの欠如している既存ボーリング資料に対して、学習・推定機能に優れているニューラルネットワークの適用を検討したものである。

Study on Application of the Neural Networks Theory to Simplified Liquefaction Prediction Method FL :
Yuji Yoshimura, Masato Suzuki (Gifu National College of Technology), Hirotake Hurokawa (Toyohashi
University of Technology), Takayosi Inukai (Fuji Engineering Corp. Ltd.)

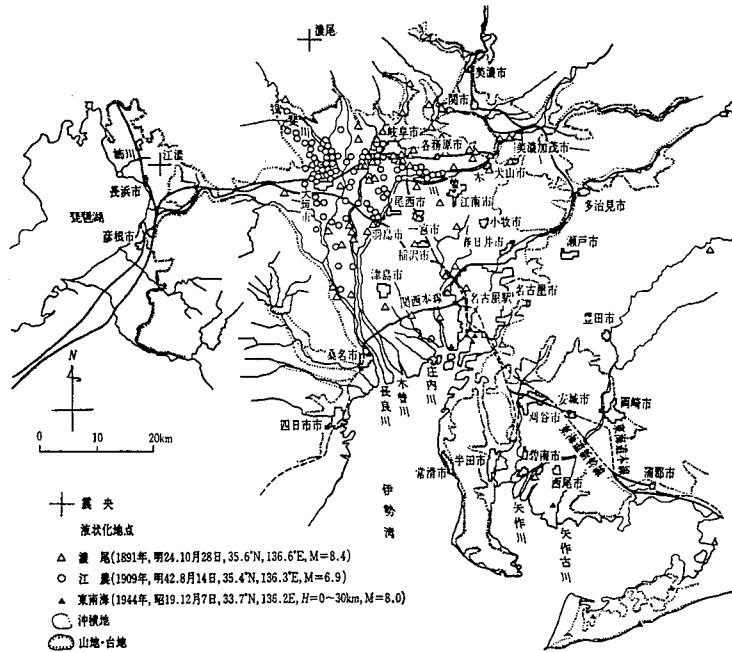


図-1 濃尾平野の液状化発生履歴

2. 簡易液状化予測 FL 法の概要²⁾

2.1 液状化判定指標 FL, PL

FL (Factor of Liquefaction: 液状化抵抗率) は、原位置における液状化の可能性を判定するための指標であり、原位置における土要素が有する動的せん断抵抗応力比 R と土要素に作用する動的せん断応力比 L の比によって次式のように定義¹⁾される。

$$FL = \frac{R}{L} = \frac{\tau_l / \sigma v'}{\tau_{max} / \sigma v'} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 τ_l : 動的せん断強度、 τ_{max} : 動的最大せん断応力 (波形中の最大片振幅)、 $\sigma v'$: 原位置での有効上載圧である。既存のボーリング資料を利用する簡易液状化予測 FL 法では、 τ_l は N 値、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c などから推定され、 τ_{max} は地表面加速度などから推定される。

FL により、ある地点のある深さでの土層の液状化に対する安全性は評価されるが、仮に FL により液状化すると判定された層が存在しても、当然のことながら FL の大小、深度や層厚などによって、その地点での液状化の程度や構造物に及ぼす影響の程度は異なる。これらの影響を総合的に評価しようとの試みの一つが、PL (Potential of Liquefaction: 液状化指数) であり、次式に示すように各土層ごとに求められた液状化危険率 F の値に重み関数 $w(z)$ を乗じて 20m の深さまで積分したものである¹⁾。

$$PL = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz, \quad F = \begin{cases} 1 - FL & (FL < 1.0) \\ 0 & (FL \geq 1.0) \end{cases} \quad \dots\dots (2)$$

この $w(z)$ は、地表面付近は過剰間隙水圧の下方からの浸透によって液状化しやすいことや構造物に与える液状化の影響も大きいことなどを考慮して、地表面からの深さを $z(m)$ とすると次式で定義¹⁾されている。

$$w(z) = 10 - 0.5z \quad \dots\dots (3)$$

一般に、大きな PL の値が得られれば、地盤液状化による構造物の被害も大きく、対策も必要になってく

るので、この時は液状化危険度が高いと考えられる。したがって、既往の地震において液状化地点と非液状化地点に対して PL の算出を行い、実際現象との対比を行った結果より、液状化危険度に対して次のような判定基準が提案¹¹⁾されている。

- ① $PL = 0$ のとき…液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般的に不要。
- ② $0 < PL \leq 5$ のとき…液状化危険度は低い、特に重要な構造物に対しては、より詳細な調査が必要。
- ③ $5 < PL \leq 15$ のとき…液状化危険度が高い。液状化対策が一般に必要。
- ④ $15 < PL$ のとき…液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。

図-2は、明治24年10月に発生した濃尾地震時の石碑や石燈ろうなどの倒壊から推定された加速度分布図¹²⁾から読み取った加速度 α を入力して得られた簡易液化 FL 法の解析結果の一例（岐阜県大垣市丸の内： $\alpha = 300\text{gal}$ ）である。

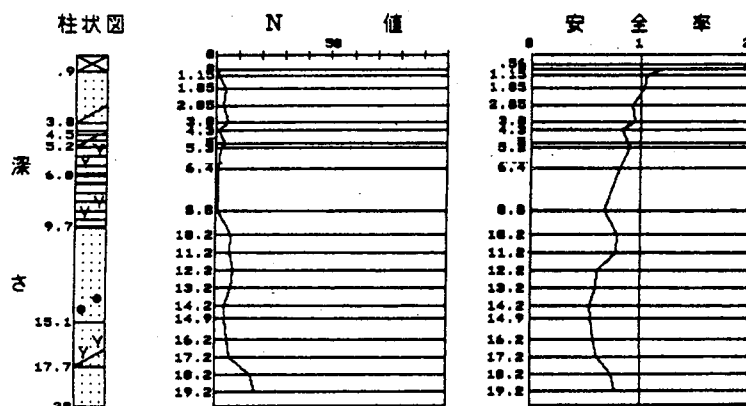


図-2 従来法による液状化予測の一例
(岐阜県大垣市丸の内： $\alpha = 300\text{gal}$)

2.2 N 値, FL 値の表示方法

現在の一般的なボーリングデータには柱状図、土質名、 N 値、物理試験結果などが記載されており、 N 値は図-2に示すように直線で結ばれている。これは便宜的な表示方法であり、本来 N 値は地層区分を考慮すれば矩形で表示すべきである。また、簡易液状化予測 FL 法では動的せん断強度を推定するのに、この N 値を用いているので、 FL の表示も地層区分を反映させた N 値と同様の表示法が適切であろう。上述の考え方に基づいて図-2の表示方法を改良したのが図-3であり、 N 値、 FL とも地層による変化の様子が良く表れている。

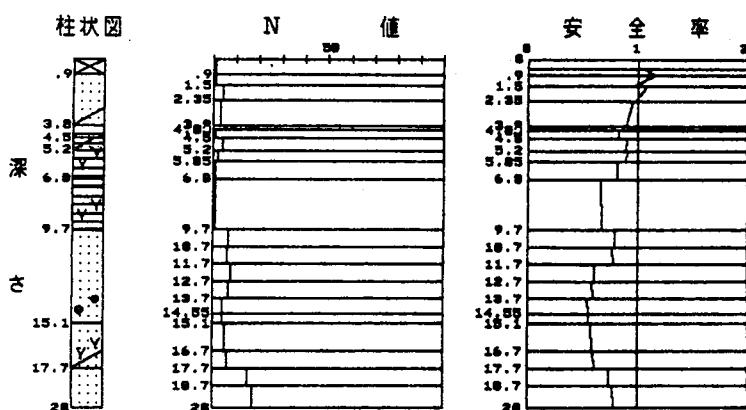


図-3 改良法による液状化予測の一例
(岐阜県大垣市丸の内： $\alpha = 300\text{gal}$)

2.3 正規化液状化指数 PL'

さきに定義された液状化による被害程度を表す PL 値¹¹⁾ は、液状化危険率 F に深さ z (単位： m) と地表面からの深さに応じた重み関数 $w(z)$ を乗じており物理的意味が不明確で、さらにはボーリング深度が $20m$ 未満の場合にはほとんど意味を持たない。

そこで深度が $20m$ 以下の既存ボーリングデータの有効利用も考慮し、ボーリング深さ D (m ： $20m$ 以上の場合には 20) の資料に対して、正規化液状化指数 PL' を次式で定義した。

$$PL' = PL \cdot \frac{20}{D} \cdot \frac{1}{15} \quad (\text{ただし、信頼度は } D \geq 20m \text{ の時 } 1.0, D < 20m \text{ のとき } D/20) \quad \dots\dots (4)$$

なお、この場合には式 (2), (3) は補正液状化指数 PL^* , 補正重み関数 $w(z)^*$ として次式により求める。

$$P_L^* = \int_0^D F \cdot w(z)^* dz, \quad F = \begin{cases} 1 - F_L & (F_L < 1.0) \\ 0 & (F_L \geq 1.0) \end{cases} \quad \dots\dots (2')$$

$$w(z)^* = 10 - (0.5 z \cdot 20/D) \quad \dots\dots (3')$$

また、 P_L の区分①～④を次のように書き換えることにより、液状化危険度が判定できる。

- ① $P_L' = 0$ …液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般的に不要。
- ② $0 < P_L' \leq 0.33$ …液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対しては、より詳細な調査が必要。
- ③ $0.33 < P_L' \leq 1.0$ …液状化危険度が高い。液状化対策が一般に必要。
- ④ $1.0 < P_L'$ …液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。

ただし、この正規化液状化指数は、 P_L の数値を正規化し、20m以下のボーリングデータを20mまで拡大したにすぎないので、浅いデータほど P_L' の信頼度は低い。

図-4は濃尾平野既存ボーリングデータの正規化液状化指数 P_L' と液状化指数 P_L の関係をプロットしたものであり、図中の実線が1:1の対応を示しているので、両関係には比較的良好な対応関係が見られる。

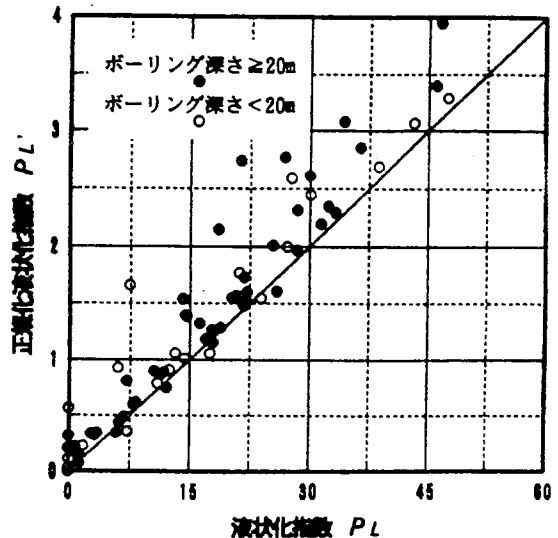


図-4 正規化液状化指数と液状化指数の比較

3. ニューラルネットワークの概要

ニューラルネットワーク（以下、ニューロという）は人間の脳神経細胞を手本にした、学習、推論機能を有する情報システムであり、その汎用性、発展性、柔軟性により多くの分野でその適用が試みられている。ニューロをデータの予測に用いる最大の利点は人間に近い能力を持つ情報処理システムによる予測が可能になることである。人間は人格の形成や外部環境などの影響を受けながら、学習を行い、また「あいまいさ」を持った情報を非常に巧みに理解することが出来る。このような能力の中核である脳の情報処理システムは、ハード的およびソフト的に並列分散処理を行っており、階層構造を持っていると考えられている。また、ニューロとは、学習により自分自身を外部環境にあうように変化させることができるという「人間らしさ」を持った、階層的な並列分散処理システムであるといえる。

ニューラルネットワークには大きく分けて階層型と相互結合型の二つの形式があるが、本報告では数式化が容易な階層型ネットワークを用いた。本報告で用いる階層型ネットワークとは、入力層、中間層、出力層の3層からなるネットワークで、学習アルゴリズムには教師信号付き学習で最も一般的なバックプロパゲーション法を用いた。すでに文献^{たとえば13)、14)}などに報告されているので、ここではそれらの概略について述べる。なお、ネットワーク構造や学習アルゴリズムだけでも検討事項は数多く存在するが、本報告では液状化予測へニューロを適用し、液状化発生の判定が可能か否かを検討するという立場で報告を進めるので、今回はニューロの基本的な考え方のみを使用し、詳細な検討は今後の課題としたい。

本報告で用いるニューロの構造を図-5に示す。これは入力層、中間層、出力層という3階層からなる構造で、それぞれ入力層と中間層、中間層と出力層の全てのユニットが結合しており、その結びつきの強さを結合係数と呼ばれる係数で表す。この係数を更新していくことがすなわち学習となる。簡単に学習の流れを説明するとまず、入力層にデータを与えると、入力層は与えられた入力 I_i をそのまま出力する。入力層の

各ユニットからの出力 I_i と、入力層の各ユニットと中間層 j 番目のユニットをつなぐ結合係数 W_{ij} の積の総和 式(5)が中間層の j 番目のユニットの入力となり中間層でシグモイド関数式(6)によって変換された値が中間層の j 番目のユニットからの出力となる。

$$U_j = \sum_i W_{ij} \cdot I_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上の計算を中間層のすべてのユニットについて行う。中間層と出力層の間でも同様の変換が行われ、出力層からの出力がニューロからの出力となる。出力層からの出力結果により結合係数を更新することを学習と言い、学習を繰り返し行うことで、望ましい入出力関係を満たすニューロが構築される。

学習する際に、お手本となる入出力関係を教師信号と言い、教師信号に近い出力値が得られるように、結合係数を更新させる。この結合係数の更新の方法が学習アルゴリズムと

呼ばれるものであるが、本研究では学習アルゴリズムにバックプロパゲーション法と呼ばれる教師信号付きの学習アルゴリズムでは最も一般的なものを用いた。バックプロパゲーション法は階層型ネットワークに対して、ラメルハートらによって1986年に提案され、この学習法は甘利博士(1967年)やチブキン(1966年)に提案された確率降下法と呼ばれる評価基準最小化学習の特殊な場合にあたる¹⁵⁾。

十分に学習されていない段階においては、教師信号とニューロから出力される値との間には当然誤差が生じる。この誤差が小さくなればなるほどニューロの精度は高くなり、この誤差を結合係数の更新に反映させることにより学習効率の向上を意図したのが修正法と呼ばれる方法であり、修正法は多くの人により提案されてきた。本研究では修正方法の中でも飛躍的に学習効率を高めることが可能な修正モーメント法を用いた。

4. FL 法へのニューラルネットワークの適用

4.1 入力層・中間層・出力層のユニット

FL 法は対象地盤の地下水位 $W.L.$ 、各土層別の深さ $G.L.$ 、 N 値、土の湿潤密度 ρ_t 、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c 、最大地表面加速度 α_{max} のデータが必要となっており、それらが1つでも揃わない場合は液状化の判定が不可能である。しかし、ボーリングは FL 法に利用するために行われているものではないので、既存ボーリング資料には上記データのうちの一部分が記載されていないものが多い。このことより、FL 法が適用できるボーリングデータは既存のボーリングデータのうちのごく一部に限られる。そこで本研究では、FL 法が適用できない既存ボーリング資料を有効利用するため、さきに述べたニューラルネットワーク理論を使用した FL 値の推定を試みる。

ほとんどの既存ボーリング資料に欠如しているものは平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c である。それとは逆に多くの既存ボーリング資料に記載されているパラメーターは地下水位、各土層の深さ、その深さの N 値、土質名である。これより、**図-5**の入力データに地表面加速度 α 、地下水位 $W.L.$ 、各土層の深さ $G.L.$ 、

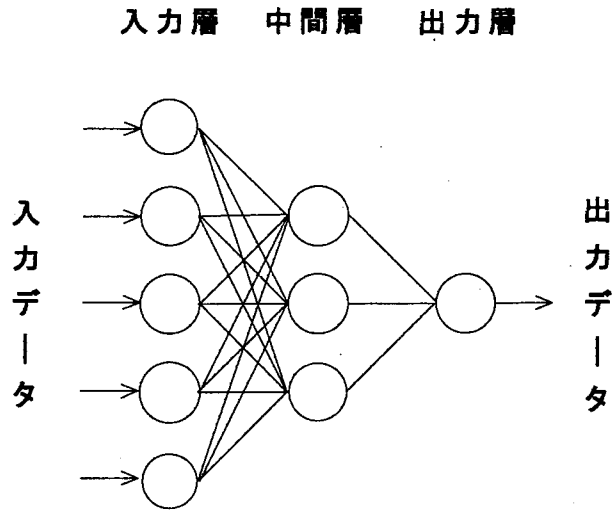


図-5 ニューラルネットワークの概念図

その深さの N 値，土質名を用い，その入力データに対応する教師信号として，プログラムで使用可能な既存ボーリング資料に濃尾地震時の地表面加速度¹²⁾ に対して計算された液状化抵抗率 FL を用いた。したがって，**図-5**のようにネットワークの形は，入力層のユニットを上記の5個，出力層のユニットは FL の1個とする。ここで，ニューロの形は三角形が適しているので¹⁴⁾，中間層のユニットを3個とした。

4.2 データの基準化

既存ボーリング資料⁹⁾の柱状図に記載されている現場土質名は，**表-1**に示す名古屋地盤図¹⁶⁾の土質コード表を参考にデータベース化しているが，その各土質コードと平均粒径 D_{50} ，細粒分含有率 F_c との関係を検討した結果，相関性は極めて低かった。したがって，その検討結果も参考にして土質コード表の主記号を基に，以下のように数値化した。

- 粘土（腐植土を含む）・・・100
- シルト（表土を含む）・・・200
- 砂・・・300
- 砂礫・・・400

次に，入力データである地表面加速度 α ，地下水位 $W.L.$ ，各土層の深さ $G.L.$ ，その深さの N 値，数値化した土質コード，その入力データに対応する教師信号である液状化抵抗率 FL をニューロの計算に用いるため，最大値を基準として0.2~0.8の範囲に基準化した（その詳細についてはここでは省略する。）。

4.3 学習の程度

上述のように濃尾平野の既存ボーリング資料⁹⁾約8000本のうち簡易 FL 法に利用できる資料は100本程度で，289個の FL 値を計算することができる。それ以外のデータについてニューロを適用して FL 値の推定が可能か否かの検討を，以下の方法により行う。なお，本研究では学習回数を1万回とした。

- ①まず，289個のデータをランダムに10等分する。
- ②10等分したデータのうち，9組のデータを教師信号として，1万回の学習を行う。その後学習済み

表-1 土質コード表

主記号			副記号			補助記号		
土質名	土質コード	図式記号	土質名	土質コード	図式記号	土質名	土質コード	図式記号
表土	000	□						
粘土	100	■	粘土質	10	▧	粘土混じり	1	▨
シルト	200	▨	シルト質	20	▩	シルト混じり	2	▪
砂	300	○	砂質	30	▫	砂混じり	3	▬
砂礫	400	◇	礫質	40	▭	礫混じり	4	▮
亜炭	500	■	有機質	50	▯	玉石混じり	5	▰
腐植土	600	■	固結	60	▱	貝殻混じり	6	▲
岩盤	700	▧	微細	70	▩	腐植物混じり	7	▪
人工物	800	▨	風化	80	▫	貝殻・腐植物混じり	8	▬
その他	900	○	互層	90	▭	浮石混じり	9	▮

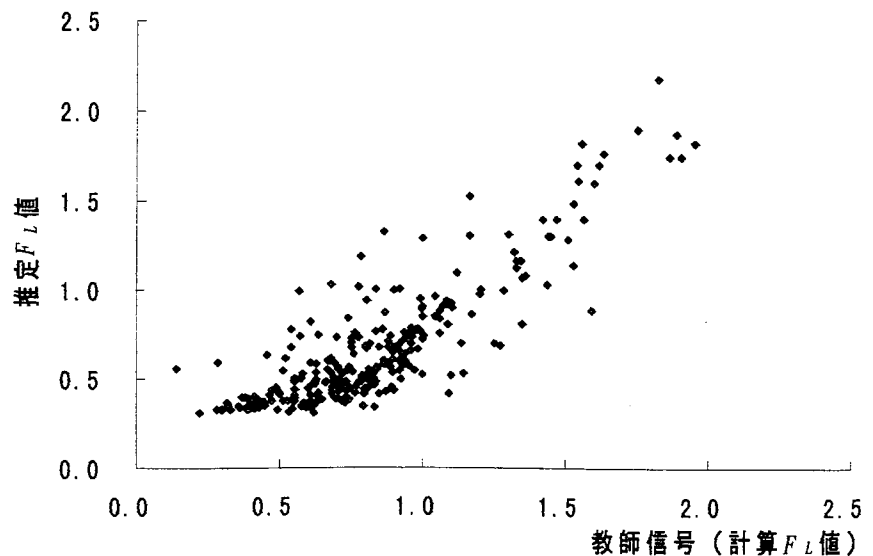


図-6 ②で推定された推定 FL 値と計算値 FL の関係

のニューロを用いて教師信号として用いなかった残りの1組についてニューロを用い FL 値を推定する（これを推定 FL 値という）。

これを10パターン行う。学習回数を1万回として計算を行った場合の精度の検定は、その計算結果から計算 FL 値（＝簡易 FL 法で求めた FL 値）と推定 FL 値の相対誤差により行う。なお、相対誤差は次式で表される。

$$\text{相対誤差} = (|\text{計算 } FL \text{ 値} - \text{推定 } FL \text{ 値}| / \text{計算 } FL \text{ 値})$$

本研究では、この相対誤差の平均が15%となりニューロによる FL 値の推定が有効であることが示唆された。また、図-6は②で推定された FL 値（推定 FL 値）と教師信号である計算 FL 値の関係を示したものであり、この関係からも簡易 FL 法の精度を考慮すれば、これは十分な推定精度であると言えよう。

5. おわりに

以上のように、簡易液状化判定 FL 法へニューラルネットワークを適用を試みた結果、学習回数1万回で相対誤差15%程度の精度で FL 値が推定できることがわかった。これは、従来行われてきた FL 法に必要な土質パラメータのうち欠如したものを土層毎の平均値で代表させる方法^{たとえは17)}に比較すれば、その地点・その深さの FL 値の計算に必要なパラメータ相互の相関性が考慮されているという点でメリットがあると考えられる。しかし、学習回数や基準化を検討することにより、さらに精度が高くなる可能性があるのでさらなる検討をする必要がある。また、1996年12月に道路橋示方書¹⁸⁾が改訂されたので、この新基準に沿うように簡易 FL 法のプログラムを変更し、本研究と同様の検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 宇佐美龍夫:資料日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1975. 3.
- 2) 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一:明治以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所彙報, 第30号, pp. 14-23, 39-41, 88-93, 1974. 12.
- 3) 村松郁栄:東海地方における大地震の被害予測に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, pp. 7~14, 1981. 5.
- 4) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp. 38-45, 99-121, 1990. 2.
- 5) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針, pp. 163~169, 1988. 1.
- 6) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進:砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 641~648, 1978.
- 7) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 4, pp. 56~74, 1983.
- 8) 吉村優治:液状化予測における N 値, FL 値の表示方法について, 平成8年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集 pp. 413~414, 1997. 3.
- 9) 建設省中部地方建設局・中部技術事務所:濃尾平野の地盤資料目録, 1978. 4.
- 10) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進:砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 641~648, 1978. 11.
- 11) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進:地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.

28, No.4, pp.23 ~ 29, 1980.4.

- 12) 大森房吉：明治24年10月28日濃尾大地震に関する調査, 震災予防調査会報告, 第28号, pp.79 ~ 95, 1899.
- 13) 菊池豊彦：入門ニューロコンピュータ, オーム社, 1990.
- 14) 中野馨：ニューロコンピュータの基礎, コロナ社, 1990.
- 15) 中野馨, 飯沼一元, ニューロンネットグループ, 桐谷滋：入門と実習ニューロコンピュータ, 技術評論社, pp.38, 1989.
- 16) 土質工学会中部支部：最新名古屋地盤図 第2編資料編 pp.1~7, 名古屋地盤図出版会, 1988.1.
- 17) 松澤 宏・犬飼隆義・水野健太：広域地盤情報を用いた液状化弱点領域抽出に関する研究, 自然災害科学 vol.1, pp.53~70, 1996.4.
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996.12.