

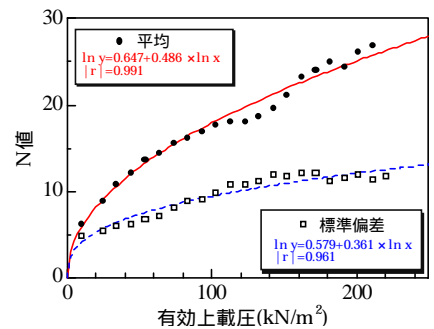
地盤の空間分布を考慮した液状化リスクマップに関する研究

杉井俊夫（中部大学工学部土木工学科，nanto@isc.chubu.ac.jp）
 山田公夫（中部大学工学部土木工学科，kyamada@isc.chubu.ac.jp）
 小川学（株式会社ユニオン）

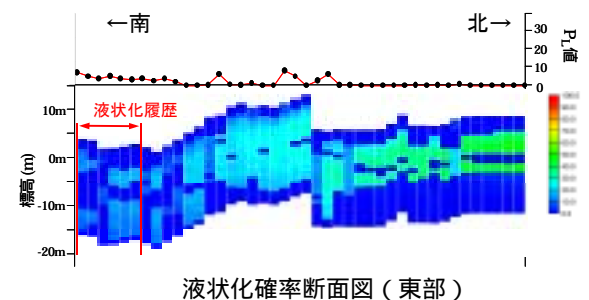
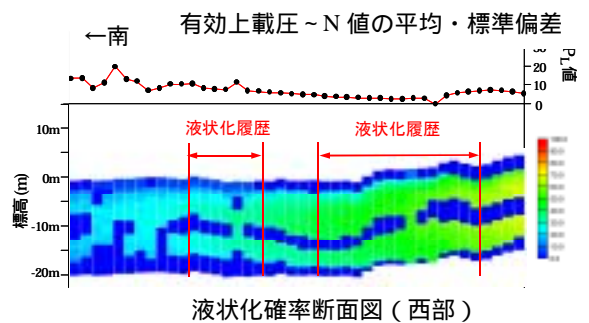
F_L 値などの簡易予測法などを用いて液状化のリスクマップの作成を行なうには、主に土質柱状図から求める砂層・レキ層内にある N 値を用いる。しかし、ボーリングデータは離散的な調査個所で行なわれるため、メッシュ判定法によるリスクマップの作成には空白域ができてしまう。そこで、本研究では昨年、地盤統計手法による地層厚・ N 値の推定を行ったが、 N 値の推定に課題を残す結果となり、今回、有効上載圧を用いた N 値の推定法を提案し、空白域のない新たな液状化リスク評価の提案を行った。

同一層においては深さに応じた上載圧によって圧密が生じると考えられ、上載圧の大きさが N 値の分布に影響してくると推測し、 N 値と上載圧の回帰曲線を作成することで両者の相関式を導き出すことで N 値の推定を試みた。その結果、有効上載圧が上昇するにつれ N 値が大きくなる傾向は得られたが、 N 値の推定にまでその精度は十分でないことがいえた。しかし、上載圧の大きさによって N 値がある程度分散を持っていることがグラフから読み取ることができ、実データにおいてもバラツキがあることから、有効上載圧によって推定される N 値の値のバラツキを取り入れることを考えた。有効上載圧の大きさを 10kN/m^2 ごとに分けて、各レンジに属している N 値から確率密度分布を作成し、極値分布（グンベル分布）によるフィッティングを試みたところ、有効上載圧が大きくなるにつれ N 値の値が大きい値を取る確率が高くなっていく傾向が出ていることが確認できた。これは深い位置にある N 値の方が大きい圧密を受けることから、締め固められ地盤が硬くなった影響が出ている結果といえる。また、分散も有効上載圧の増加に伴い広がっていき、有効上載圧が大きくなるほど N 値は広く値を取る傾向があることが分かった。

平均と標準偏差を有効上載圧の大きさから求めることで、任意の地点での N 値の確率分布を求めることを考え、有効上載圧と平均値及び、標準偏差それぞれの回帰式を作成し、有意な関係があるか検討を行なった。図 1 には有効上載圧～平均・有効上載圧の回帰式を示す。図 1 より、変動係数がほぼ一定であることが推察された。なお、平均値を示す $100 \sim 160\text{kN/m}^2$ 間の分布にみられる特性は、太平洋の沖積平野でみられるレンズ層（粘土層やシルト層がレンズ状に分布している層）の影響により、粘土やシルト成分を多く含み N 値を低下させる原因となったと考えられる。



地盤統計手法によって求めた愛知県西部地域の地層に対して、地表面より 1m 間隔で N 値の確率分布関数を作成し、モンテカルロ法により 2000 個の N 値に対する液状化抵抗力 R を算出した。また東南海地震を想定地震として実効震度を用いて求めた地震時せん断応力 L を用い、 F_L 値が 1 を下回る確率を液状化確率として求めた。 1 間隔深さごとに得られた液状化確率の断面図の一例を図 2 に示す。同時に地盤統計手法より P_L 値を用いて求めた液状化判定結果¹⁾及び、1944 年の東南海地震による液状化履歴図を記載する。対象地域の西部にあたる地域では、地盤統計手法による P_L 値による液状化判定では南部での液状化履歴と一致した結果が得られていなかったが、今回の液状化確率を用いた方法では履歴を良く説明することができる結果となった。しかし、東部では逆に履歴と一致しない傾向を得た。この原因として、この地域は名古屋港付近に当たり、地盤改良などにより堆積による地盤特性が変化した場合、これを考慮することができなくなると考えられる。従って、地盤改良された地域に対する特性を与えることにより、更に液状化確率の精度を高めることができると考えられる。



【参考文献】1)山田・杉井・小川：空白域のない液状化リスクマップに関する研究，総合工学，Vol.14，pp.61-68，2002.

地盤の空間分布を考慮した液状化リスクマップに関する研究 STUDY ON RISK MAP OF LIQUEFACTION CONSIDERING A DISTRIBUTION OF GROUND DATA IN SPACE

杉井俊夫¹，山田公夫²，小川学³

¹ 正会員，中部大学工学部土木工学科，助教授 博士(工)

Toshio Sugii, Dept. of Civil Engineering, Chubu University, nanto@isc.chubu.ac.jp

² 正会員，中部大学工学部土木工学科，教授 工博

Kimio Yamada, Dept. of Civil Engineering, Chubu University, kyamada@isc.chubu.ac.jp

³ 正会員，(株)ユニオン，工修

Manabu Ogawa, Union corporation

SUMMARY

In order to evaluate risk of liquefaction in earthquake, a mesh of divided area is frequently used with GIS (Geographic Information System). But all meshes has not a boring log, their area cannot be evaluated the risk of liquefaction. Authors interpolated boring logs (stratigraphy, thickness of a bed and N-values) with a geostatistical method (Kriging). A distribution function of N-value can be derived from the relationship between N-value and effective overburden pressure. Probabilities of liquefaction of all meshes can be calculated with Monte Carlo method, and compared with evaluation of P_L -value.

キーワード: 液状化，地盤統計手法，N 値，モンテカルロ法，液状化確率

Key words: Liquefaction, Geostatistical method, N-value, Monte Carlo method, Probability of liquefaction

1 はじめに

液状化対策を行なうにあたり、液状化リスクマップの情報をもとに危険度の大きさを把握し、その場所の危険度・重要度に応じた対策を実施することで、経済的な被害対策を行なうことができる。しかし、いまだ全ての地域を網羅する精度の高い液状化リスクマップが提案されていない。そこで、本研究では地質力学的な観点から、空白域の無い精度の高い液状化判定の確立を目的とし、第一にデータの不足している地域に対し、地盤統計手法を用いた地層の推定を行い、空白域の無い液状化リスクマップのための基盤作成を行なった。第二に上載圧と N 値の関係を分析し、N 値の分布特性を考慮した液状化の新たな判定方法を提案した。

2 研究対象地域とデータセット

本研究において研究対象地域を名古屋の西部を中心と

する愛知県西部地域を GIS ソフト(地理情報システム)¹⁾を使用し、500m×500m のメッシュに分割し、Fig.1 に示す縦横 20km×21km の広域において液状化予測を行なう。なお、ボーリング調査地点は濃尾地盤資料目録²⁾より、1967～1970年(期)と1974～1976年(期)のデータを使用し、深さ 20m 以上のものについて採取した。(全ボーリ

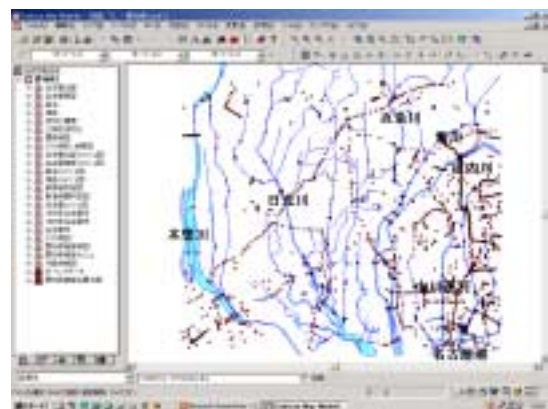


Fig.1.The object area of analysis.

ング地点:1591)このデータはWindowsの汎用ソフトExcelによってFig.2に示すように、ボーリング番号・座標・標高・N値・層厚などが管理されている。また、以下に説明する液状化判定計算や液状化確率計算へのデータセットは、すべてExcelによって管理されたボーリングデータを使用し、Visual Basicによりプログラムを作成して計算を行った。

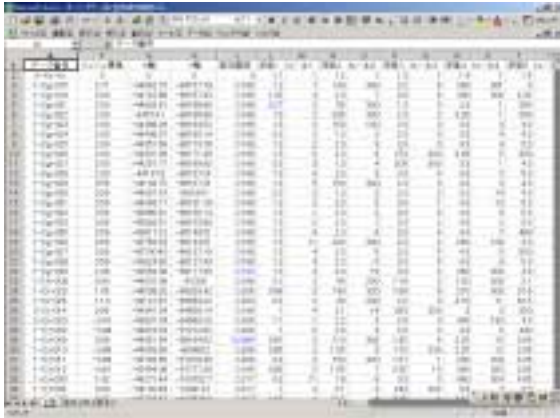


Fig.2.Ground data for GIS.

3 液状化判定法

液状化の判定には、道路橋示方書(1996年)³⁾に基づく方法により F_L 値によって液状化危険度を判断した。

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (1)$$

ここに、 R ：地盤の液状化強度、 L ：地震時せん断応力。なお、 F_L 値はボーリングデータの各 N 値について算出し、 F_L 値 1で液状化の可能性が高いと判断される。また、震度法には市原・山田⁴⁾による地震応答解析による方法で求めた地表最大加速度 a_{max} を用いて、算出された実効震度を採用した。

4 地盤統計手法⁵⁾

地盤情報はおもにボーリング調査により得られるが、データの欠落・調査地点の偏りがあり、新たなボーリング調査や再調査を行なうことも考えられるが、膨大な日数と費用が必要となる問題がある。そこで本研究では液状化に対する第一次判定としてリスクマップ作成のため、ボーリングデータを地盤情報の欠落地点や未調査地点を地盤統計手法により補完を行った地盤モデルの構築を行なうこととした。地盤統計手法は、ある空間内の未知の点における推定量を既知のデータの加重平均とし、数学的に最適な重みを与える方法である。この手法は大きく分けて2つの段階に別れる。対象となる空間分布量の空間的相関の度合いを定量的に表現する指標であるセミバリオグラムを

作成し、これから推定しようとする場における被推定量の分布特性を把握する。作成されたセミバリオグラムを用いて、補間法の一つであるクリギングによって各サンプルデータに適切な重みを与えて未知の点における推定量を算出する。 F_L 値による液状化判定は主に砂層及びレキ層内にある N 値によって決まる、したがって各層厚と N 値について推定を行なう必要がある。本研究ではFig.3に示す手順により地盤統計手法を利用し、地層厚と地盤強度 N 値を推定する。

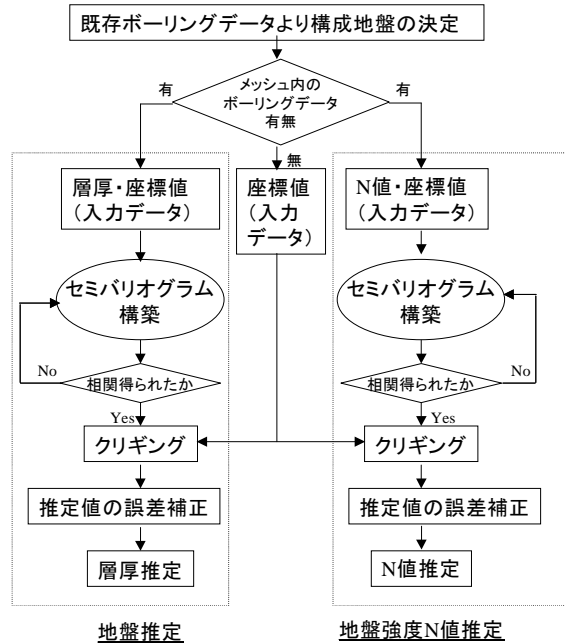


Fig.3. Flow-chart of Geostatistical method.

メッシュ内に多数のボーリングデータがある場合、データの一つ選出し代表データとし、層厚の推定では各層厚を、 N 値の推定では、深さ方向に1mピッチ間の最小 N 値を入力データとして推定を行った。Fig.4は推定した地盤の断面と名古屋市地域断面図集⁶⁾に記載されていた断面の一部である。入力したボーリングデータの関係で標高や表土などに一部突出した部分があるが、砂層やレキ層などほぼ一致し、地盤統計手法による地層の推定はある程度の精度が得られていると考えられる。

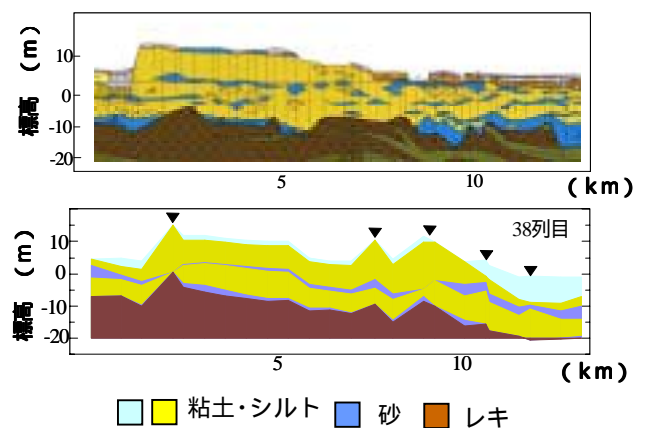


Fig.4. Comparison between two tomograms.

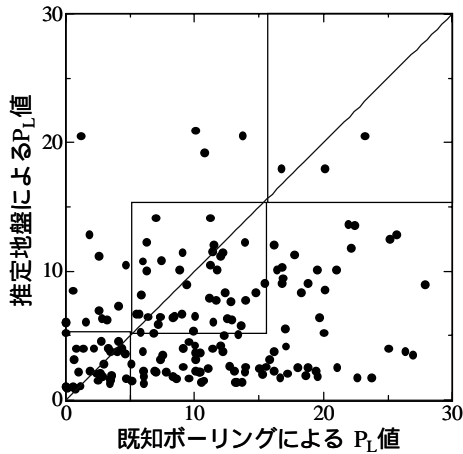


Fig.5.Scatter diagram (PL-value).

Table1: Risk of liquefaction (PL-value).

P_L 値=0	液状化危険度はかなり低い
$0 < P_L$ 値 5	液状化危険度は低い
$5 < P_L$ 値 15	液状化危険度は高い
$15 < P_L$ 値	液状化危険度は極めて高い

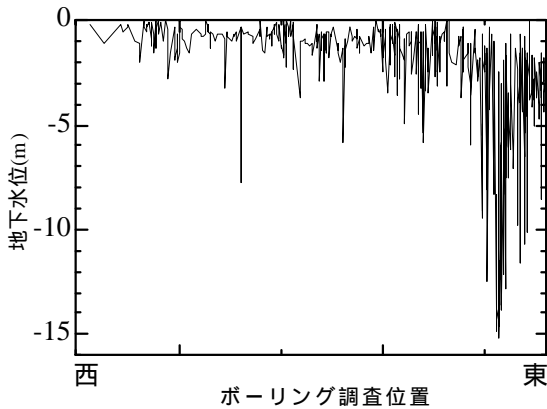


Fig.6. Average of Ground-water.

Fig.5 は同一メッシュ内にある推定地盤による P_L 値と、既知のボーリングデータによる P_L 値の算出結果を比較したものである。 P_L 値は液状化の地表での激しさを表す指標として岩崎・龍岡ら⁷⁾によって提案され、 F_L 値を深さに対する重みを与え 20mまで積分を行なった値であり、Table1 のように分類される。この結果からやや推定地盤の方が P_L 値の値が小さく算出される傾向があることが分かる。この原因として N 値の推定方法が考えられる。地盤統計手法は横方向の広がりを相関式とすることから、連続している地層の推定に比べ、 N 値の推定にはいくらかの誤差が発生している可能性が上げられる。

5 地下水位

液状化判定を行なう際、地盤内の砂層及びレキ層が飽和状態にあるか否かによって、判定結果に大きく影響してくる。従って、正確な地下水位の高さを測定することは、液状化判定にとって非常に重要な意味をもつ。しかし、地下水位は調査の時代や時期、さらには降雨の状況によって変動するため、詳細に水位を特定することは困難である。

Fig.6 は研究に使用したボーリングデータに記載されている地下水位を、調査時期別にプロットしたものである。この図から、地下水位が地表面下約 1m より深い位置に、水位が分布していることが確認できる。従って本研究では安全側を考慮し、地表面下 1m に地下水が分布していると仮定し解析を行なった。

6 有効上載圧と N 値

地盤統計手法における N 値の推定では、同堆積層にある横方向での N 値の関連性を考慮し N 値の推定を行なった。しかし、実際の N 値は同堆積内では横方向の関連性より、むしろ縦方向の影響が強く反映されると考え、地盤は深さに応じた上載圧によって圧密が起こることにより、土が固くなり N 値の分布に影響してくると考え、 N 値と上載圧の回帰曲線を作成することで両者の相関式を導き出すことで N 値の推定を試みた。Fig7 には研究対象地域におけるボーリングデータより、各 N 値における有効上載圧とを算出し、X 軸に N 値の値を、Y 軸に有効上載圧の値をプロットさせて N 値～有効上載圧の回帰曲線を作成したものを示す。この図より有効上載圧が上昇するにつれ N 値が大きくなる傾向は得られているが、 N 値の推定には十分な精度でないことが言える。しかし、上載圧の大きさによって N 値がある程度の幅を持っていることがグラフから読み取れる。

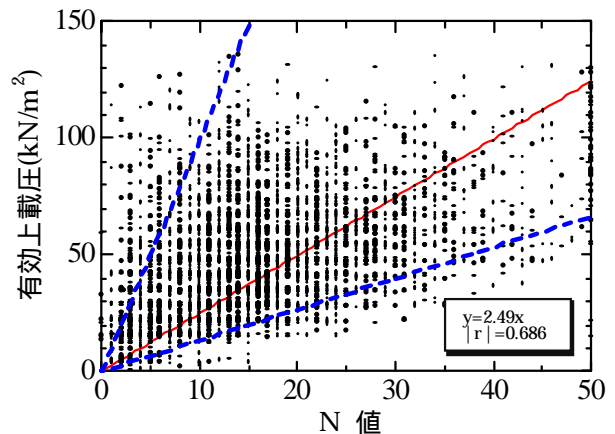


Fig.7. N-value ~ Effective overburden stress.

7 N 値の確率密度分布

上載圧の大きさによって N 値がある程度の幅を持っていることから、有効上載圧の違いによって N 値の値にどのような違いが見られるか検討を行なうため、有効上載圧の大きさを 10kN/m² ごとに分割し、各レンジに属す N 値から確率密度分布を作成し、極値分布⁸⁾によるフィッティングを試みた。極値分布は一定期間の反応の最大値などを求める分布で、貫入抵抗である N 値も破壊耐久力を示すものであり、極値分布により説明される可能性があるとして考察した。

$$y = \frac{1}{u} \times \exp\left[-\frac{1}{u} \times (x - u)\right] \times \exp\left[-\exp\left[-\frac{1}{u} \times (x - u)\right]\right] \quad (3)$$

ここに、 u 、 $\frac{1}{u}$: パラメータ

$$u = u_0 + \frac{0}{u} \quad (4)$$

$$= \frac{0}{u \times \sqrt{6}} \quad (5)$$

ここに、 u : 平均、 $\frac{1}{u}$: 標準偏差

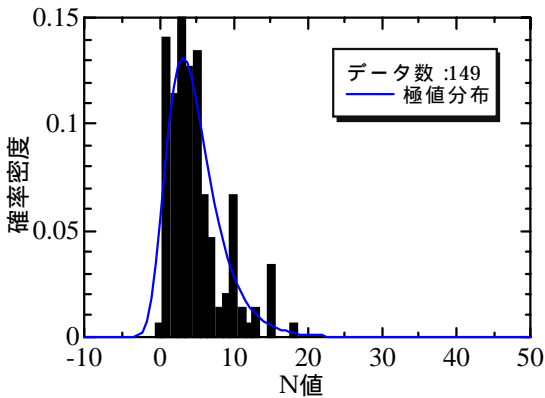


Fig.8. Distribution of N-value.

Fig.8 には第 1 砂層の有効上載圧 0-10kN/m² のグラフを示す。ここで、棒グラフは N 値の確率密度を表している。この結果から極値分布のフィッティングが良いことが確認でき、地盤の N 値は耐久力や許容差的な説明ができるといえる。

Fig.9 には第 1 砂層内で作成したすべての極値分布の結果を示す。この図より、有効上載圧が大きくなるにつれ N 値の値が大きい値を取る確率が高くなっていく傾向が出ていることが確認できる。これは深い位置にある N 値の方が大きい圧密を受けることから、締め固められ地盤が硬くなった影響が出ている結果といえる。また、分散も有効応力の増加に伴い広がっていき、有効応力が大きくなるほど N 値は広く値を取る傾向があることが分かった。

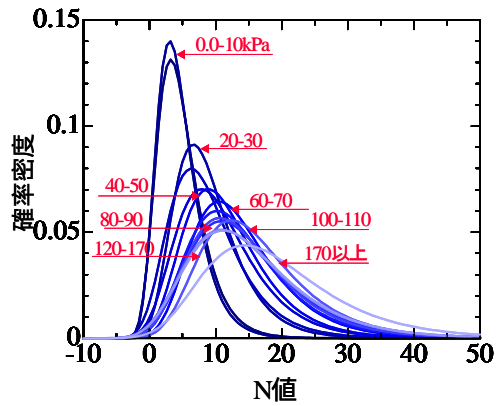


Fig.9. Extremal distribution (First sand bed).

8 有効上載圧と N 値の平均・標準偏差の関係

極値分布によって有効上載圧別に対する N 値の確率密度が説明できることが、確認することができた。従って、極値分布関数のパラメータを導く、平均と標準偏差を有効上載圧の大きさから求めることができれば、任意の地点での N 値が取る値の確率関数を求めることができる。よって、有効上載圧と平均及び、有効上載圧と標準偏差それぞれの回帰式を作成し、各有効上載圧の違いによって平均及び、標準偏差に有意義な関係があるか検討を行なうこととした。Fig.10 には第 1 砂層、Fig.11 には第 2 砂層の有効上載圧～平均・標準偏差の回帰式を示す。この図より、一部を除いて変動係数が一定であることが推察される。平均値を示す 100～160kN/m² 間の分布にみられるデータの特徴は、太平洋の沖積平野でみられるレンズ層(粘土層やシルト層がレンズ状に分布している層)の影響により、粘土分やシルト分を含むことが N 値を低下させる原因となったと考えられる。

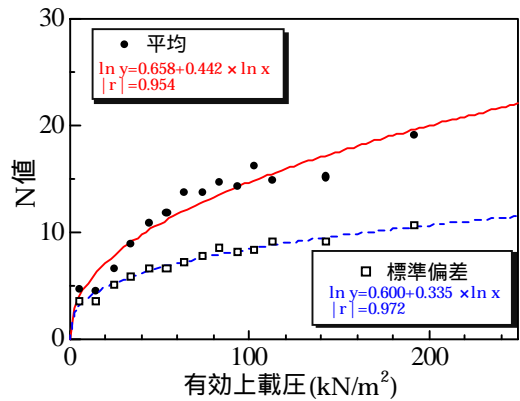


Fig.10. Effect overburden stress ~ N-value (First sand bed).

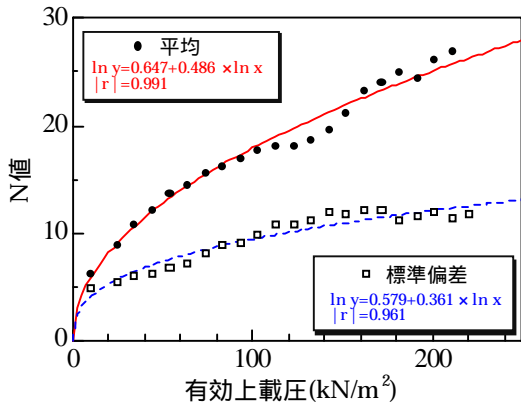


Fig.11. Effective overburden stress ~ N-value
(Second sand bed).

9 モンテカルロシミュレーション

有効上載圧と平均、標準偏差の回帰式を使用することによって、極値分布の確率関数を求めることが可能である。従って、極値分布の累積分布関数を展開し逆関数を求め、モンテカルロ法(乱数発生法)を使用し、求められた確率関数に従ったN値を2000個発生させ、道路橋示方書による液状化抵抗力Rの分布を導くこととした。

Fig.12には求められた液状化抵抗力Rの発生分布の一例として10kPaでの発生分布を示す。同時に、イメージとして地震時せん断応力 $L=0.23$ が得られた場合の線を載せる。 F_L 値による判定では、地震時せん断応力 L が液状化抵抗力 R を上回る場合、従って図中の $L=0.23$ を境界線として左側が、液状化すると判断されることから、2000個のうち図中にある左側の個数をカウントすることで、ある地点での液状化確率を求めることができる。

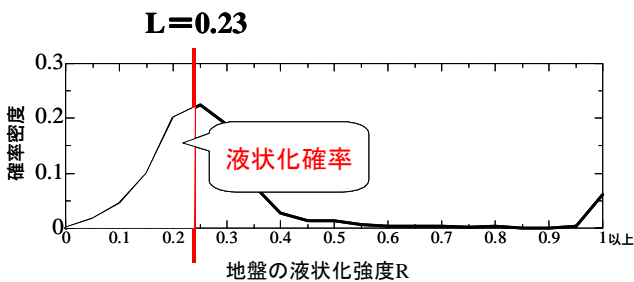


Fig.12. Probability function (Liquefaction resistance).

10 液状化確率マップ

地盤統計手法によって求めた愛知県西部地域の地層に対して、地表面より1m間隔で上載圧を求め、先に求めた回帰式よりN値の確率分布関数を求め、対応する乱数を発生させ液状化抵抗力Rを算出した。また、液状化履歴のある南海地震を外力地震として実効震度を設計水平

震度に用いた地震時せん断応力 L を用いて F_L 値が1を下回る数をカウントし、各地点、深さごとに液状化確率を求めた。結果の断面図の一例をFig.13,14に、3次元的结果をFig.15に示す。同時に地盤統計手法より P_L 値⁷⁾を用いて求めた液状化判定結果及び、1944年の南海地震による液状化履歴図⁹⁾を記載する。この結果より、対象地域の西部にあたる地域では、地盤統計手法による P_L 値による液状化判定では南部での液状化履歴と一致した結果が得られていなかったが、今回の液状化確率を用いた方法では履歴を良く説明することができる結果となった。しかし、Fig.14に示す東部では逆に履歴と一致しない傾向を得た。この原因として、上載圧を利用するN値の確率分布推定は、対象地域全体を通しては良好な相関で地盤の特性を捉えることができるが、改良地盤や地盤の攪乱などによって堆積による地盤特性が変化した場合、これを考慮することができなくなるため、小地域での特性を捕らえきれないためと考えられる。また、上載圧に対して一様にN値の確率が求まってしまうため、ある地点における液状化の確率を効果的に示すことができるが、広域を対象とする場合は液状化層の厚さや、地震の大きさにより液状化の危険度が画一化されてしまう傾向がある。そのため、局所的な特徴など地盤の構成を見極めさらに詳細な分類を行なうことや、地盤統計手法による方法などから、前に述べたような地盤が改良された地域に対する特性を何らかの形で加えることにより、上載圧による方法は更に液状化確率マップとしての精度を高めることができると考えられる。

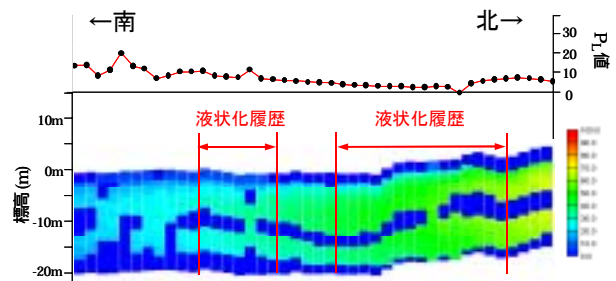


Fig.13. Probability of liquefaction (the west).

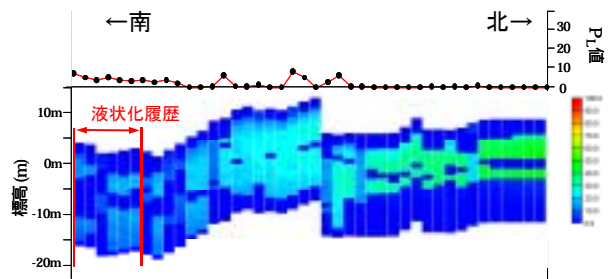


Fig.14. Probability of liquefaction (the east).

Fig15 より、本手法により各地点・各深さでの液状化確率の算出が可能であり、構造物の基礎、ライフラインなどの埋設箇所、深さ等に対して危険度を表示することができる。また、今回、地震外力は確定値として与えたが、発生確率等を利用することで費用便益の立場から液状化対策等の実施にも利用可能であると考えられる。

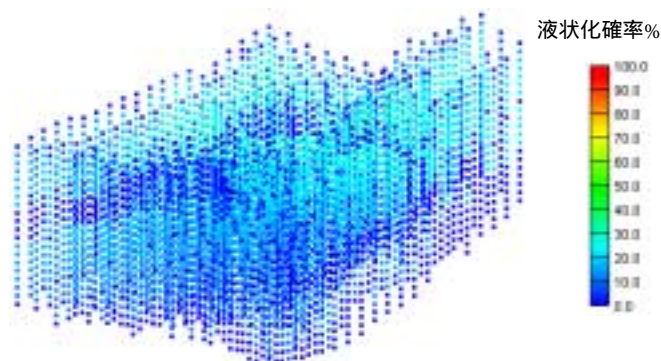


Fig.15. Risk map of liquefaction.

11 まとめ

- (1)ボーリング調査など地盤情報が不足している地域に対し、液状化予測を行なえるよう、地盤統計手法による地層の推定を行った結果、別途資料に記載されていた同一断面との比較においてほぼ一致しており、地盤統計手法における地層の推定はある程度の精度が得られることが分かった。また、地盤統計手法による N 値の推定は再検討の必要性があることが分かった。
- (2)季節変動や時期変動をともなう地下水位に対し、研究対象地域におけるボーリングデータに記載されていた地下水位の分布を取り考察を行なった結果、安全側を考慮し、地下水位は地表面下 1m として液状化判定を行なうことが有効であることが分かった。
- (3)N 値を有効上載圧の大きさに対して分割し、確率密度を検討したところ、N 値は極値分布とフィッティングが良く、極値分布の関数を用いることで任意の地点における N 値の分布を説明できることが分かった。

- (4)有効上載圧と N 値による各平均・標準偏差の相関性を確認したところ、高い相関係数が得られ有効応力と N 値には有意な関係があることが確認できた。
- (5)愛知県西部地域に対し加速度を東南海地震の実効震度で仮定し、上載圧と N 値の関係を考慮した液状化確率の推定マップの作成を行なったところ、N 値の確立推定は対象地域全体を通しては良好な相関で地盤の特性を捉えることができるが、小地域での特性を捕らえきれないためと考えられ、地盤の構成を見極めさらに詳細な分類を行なうことや、地盤統計手法による方法などを取り入れることにより、更に液状化確率マップとしての精度を高めることができると考えられることが分かった。

謝辞

この研究は中部大学総合工学研究所 平成 12~13 年度の第 6 部門研究費およびハイテクリサーチセンター研究費により援助された。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 株式会社 Informatix : Special Information System, 1999.7.
- 2) 建設省中部地方建設局中部技術事務所：濃尾地盤資料目録,1978.
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 v 耐震設計編,1998.8
- 4) 市原松平・山田公夫：地震時における名古屋市の水道管の相対的危険度，土木学会論文報告集，No.316，pp.51-64，1981.
- 5) 大西有三・田中誠・大澤英昭：不均質地盤内の地盤定数の推定に関する基礎的研究,土木学会論文集, No.457/-21, pp.51-58,1992.12.
- 6) 社団法人土質工学会中部支部：名古屋地域地質断面図集,1987.
- 7) 岩崎敏夫・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.29, No.11, pp85-91,1981
- 8) 加瀬滋男・岩井重久・河田竜夫：グンベル極値統計学,1978..
- 9) 若松加寿江：日本の地盤液状化履歴図,東海大学出版会, 1991.
- 10) 山田公夫・杉井俊夫・小川学：空白域のない液状化リスクマップに関する研究，総合工学，Vol.14，pp.61-68，2002.