

東京低地の液状化予測

LIQUEFACTION POTENTIAL MAP IN TOKYO LOWLAND

草野 郁*・阿部 博**・小川 好***・中山俊雄****

By Kaoru KUSANO, Hiroshi ABE, Yoshimi OGAWA and Toshio NAKAYAMA

In order to identify liquefaction susceptibility for wide area, it is necessary to have as much information as possible in the area under consideration. In this study, a computer aided system has been developed to facilitate engineering decision-making concerning liquefaction susceptibility. The man-machine interactive system and graphic display capability give an engineer not only the final evaluated result but also information needed to understand the background knowledge on the factors of liquefaction likelihood. The liquefaction potential maps in Tokyo Lowland was compiled from the indices of liquefaction potential analysis, the information about liquefaction generated during the Kanto earthquake, and the characteristics of geography and geology.

The system engineering procedure was useful for the interactive evaluation of a great amount of information and for the decision about poorly defined problems such as the assessment of liquefaction potential mapping. A result of these studies showed that the liquefiable area was about one fourth of Tokyo Lowland.

Keywords: liquefaction, liquefaction potential index, geography, geology, lots map

1. はじめに

東京低地は表層に軟弱な砂質土が広く分布しており、関東地震においても液状化が発生した¹⁾。このため、大地震の際には液状化による大きな災害が予想され、液状化の危険地域を予測し適切な対策を立てる必要があり、東京都は地震被害想定の一環として先に“東京低地の液状化予測”²⁾を発表した。この研究はそこで検討された液状化予測手法と予測結果をまとめたものである。

広域を対象とする地盤の液状化予測では、構造物の耐震性の検討のように対象が特定された予測とは異なり、液状化によって引き起こされるさまざまな災害を配慮する必要がある。さらに、地盤が地域的に変化に富み複雑であるにもかかわらず、収集される土質調査資料は限定される。このため、ボーリング資料の液状化解析あるいは地形分類など個々に情報を取り上げても広域的な予測には結び付きにくい場合が多く、限られた情報をどのように予測に結び付け利用するかが問題となる。とくに東京低地は昔からの埋土や盛土、さらには都市化による人

工改変が著しく、また、表層に分布する砂層は細粒分を多く含む。このため、東京低地の液状化予測では地域特性に適した情報の把握と予測法の検討が不可欠になる。この研究では、多数の情報から予測に影響を及ぼす要因を抽出し、総合化することにより東京低地の液状化予測を行った。

予測は、関東地震規模の地震動の襲来を想定し都内14区を対象とした。湾岸部の最近埋立てた地域は東京都港湾局が調査中であったことから対象地域から除外した。

2. 広域を対象とする液状化予測の考え方

(1) 基本的な考え方

地盤の液状化予測を行うにあたり利用できる情報は、次の3種類に区分することができる(図-1)。

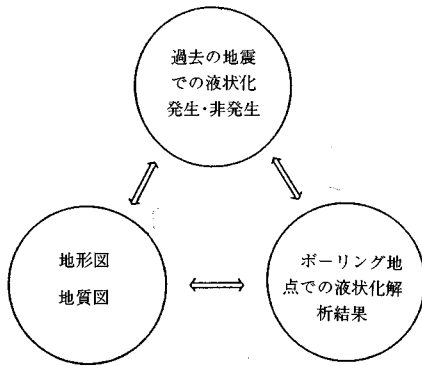
- ① 過去の地震における対象地域内の液状化発生・非発生の調査結果(液状化履歴)
 - ② 地形分類図などから得られる地形の情報と地盤図などから得られる地質の情報
 - ③ ボーリング地点での液状化解析から得られる情報
- ①の情報は、②および③の情報を利用し広域的な液状化予測を行ううえでの判断規準を与えるものであり、その地域の液状化特性を把握するには確実な情報である

* 正会員 工修 東京都土木技術研究所
(〒108 港区港南 1-1-18)

** 正会員 工修 東京都土木技術研究所(同上)

*** 正会員 東京都土木技術研究所(同上)

**** 東京都土木技術研究所(同上)



図一 地盤の液状化特性の把握

が、地盤が改変されていたり、地震規模が異なる場合、過去に液状化したところでも再び液状化するとは限らない。また、予測対象地域全域を調査し網羅することはできない。

②の情報は対象地域全域を覆うことができるが、地形・地質の名称分類は地盤の液状化特性を表すことを目的としたものではないため、対象とする地域の地盤の液状化特性に関連させて検討されない限りその地域の液状化の可能性について概略的な情報を与えるに過ぎない。

③の情報は現状の地盤の液状化特性を定量的に表わすことができるが、地点としての情報を与えるに過ぎない。広域的な液状化予測を行う場合、膨大な数のボーリング資料を収集するが、対象地域全域を網羅することは不可能である。また、収集されたボーリング資料は液状化調査を目的としたものでないため液状化解析に必要な砂層の粒度試験などの情報を欠くものが多い。

広域を対象とした液状化予測では、ボーリング資料が不足しているなど情報が欠けている地域についても、図一に示すように情報相互の関係から不足している情報を他の情報によって補い、対象地域全域を統一のとれた評価基準に基づいて判定する必要がある。ここでは、図一に示す3つの情報間の関係から東京低地の地盤特性に適した予測法と地形・地質情報の利用法を検討した。

(2) 液状化履歴と予測式

関東震災体験者を対象とした面接調査から、関東地震における東京低地の液状化履歴図を領域図として作成した²⁾。液状化発生・非発生地域の土質特性を調べると、細粒分をあまり含まない砂層は液状化が発生しやすく、細粒分を多く含む砂層は液状化が発生しにくい結果が得られた²⁾。東京低地で採取した不攪乱試料の繰り返し三軸試験によると、細粒分を多く含む砂質土は標準貫入試験の N 値が小さく軟弱であるにもかかわらず液状化強度は大きくなり、液状化履歴調査の結果と符合する傾向がみられた。このような液状化特性を表わす式として、

N 値と有効上載圧から求まる強度応力比に平均粒径による補正項だけでなく、細粒分含有率、拘束応力による補正項も加えた液状化強度推定式を作成した³⁾。

地震時荷重は、東京低地の地震応答解析結果から得られた軟弱層厚と応答倍率の関係を使用し、東京低地全域の平均的な地表面最大加速度が $0.25 g$ の値を示す基盤入力最大加速度 170 gal の解析結果から推定した³⁾。今回の予測では関東地震規模を想定していることから、この地震規模に近い十勝沖地震（1968年5月）の際に運輸省が青森県八戸港で観測した加速度波形（八戸 N-S を基盤の入射波形に変換⁴⁾）を基盤入力波形として使用した。

(3) 予測作業の概要

予測作業のフローを図一に示す。

地形の情報としては、土地条件図⁵⁾、旧版地形図から土地分類図、水系図、湿地水田分布図を作成し¹⁾、地質の情報としては、ボーリング柱状図から砂層、礫層、表層分布図、地下水面図を作成した¹⁾。関東地震液状化履歴図、家屋被害分布図⁶⁾を含め、すべての地図類を地図情報として数値ファイル化した。

ボーリング地点の液状化解析では、約 12 000 本のボーリング資料を柱状図情報として数値ファイル化し、提案した液状化予測式を使用し液状化計算を行った。

関東地震液状化履歴図と地形・地質図の数値化された情報を重ね合わせ、地形・地質図の各凡例に区分される地域内の液状化発生と非発生の面積比から、液状化しやすい地形・地質の分類を求めた。関東地震液状化履歴図と液状化発生・非発生地域に含まれるボーリング地点の液状化解析結果を集計し、液状化の程度と解析値の関係を求めた。地形・地質図とボーリング地点の液状化解析結果の比較から、地形・地質図のおおのの分類が液状化の可能性にどの程度関連するかを調べた。

このような検討から図一に示す情報間の関連を整理し、ボーリング地点の液状化解析値と液状化履歴、地形・地質の地図情報を重ね合わせて液状化判定を行った。

地域を一定の大きさ（500 m メッシュ）に分割し、メッシュ内の諸情報を重ね合わせ液状化の可能性を総合的に評価するメッシュ判定法により液状化予測図を作成した。

3. 液状化予測支援システムと解析結果

(1) 支援システム

地図および柱状図の大量な情報を処理し液状化解析を行うことを目的として情報処理システムを作成した。これを液状化予測支援システムと称す。このシステムには、多数の情報を処理し液状化計算を行う情報処理機能のほかに、図一に示す3種類の異なる情報の相互関係を検

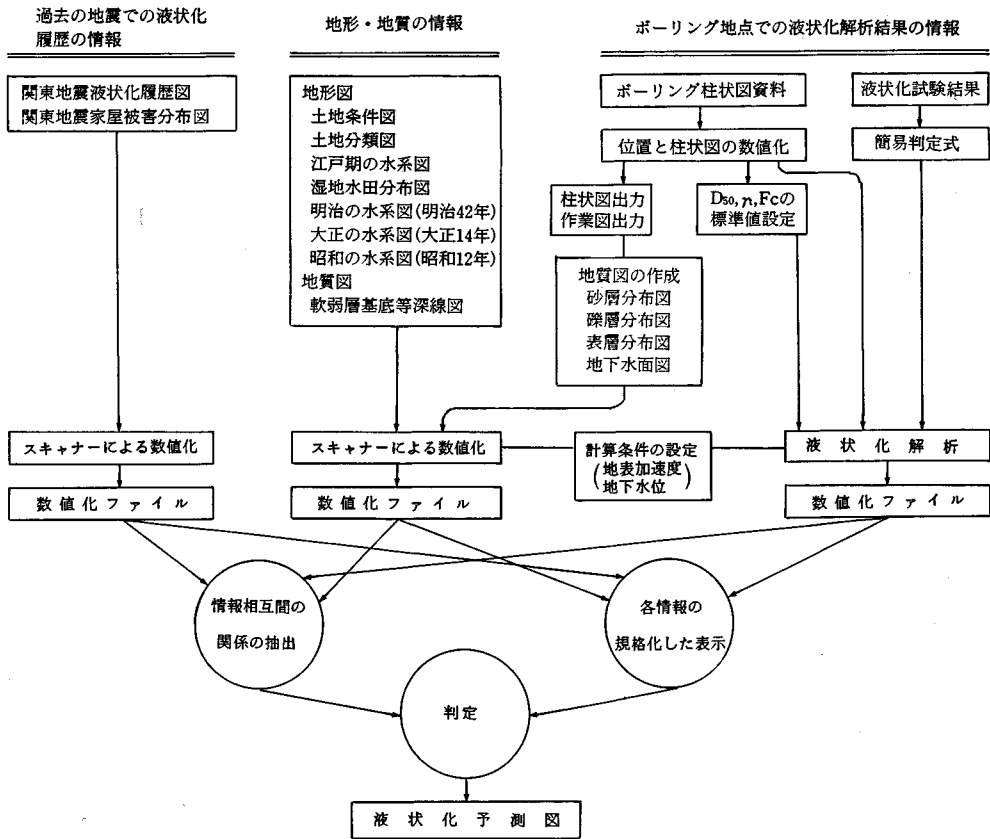


図-2 液状化予測のフロー

索する機能と、情報を一定の規格のもとに視覚化し、対話形式で液状化判定を行うことができる機能をもたせた。さらに、液状化予測という目的に至る過程を分析し構造化するというシステム工学的な面も配慮した。

液状化解析や情報間の相互関係の検索のような大量の情報処理を短時間でを行う場合は汎用型計算機を使用した。その他はパソコンによる表示機能を中核とし、予測に向けた試行錯誤を伴う作業を行いやすくした。

a) 地図情報、柱状図情報の数値ファイル化と液状化解析

地図情報は、地図の凡例にコードを付加して分類の認識ができる入力方法により数値化し、地図の凡例による検索、統計処理が行えるシステムとした。入力した地図情報は国土地理院標準地域メッシュ第3地域区画の4つのメッシュ(約2km×2km)をパソコン上で1画像として出力し、さらにこれを16分割してメッシュ判定の単位である500mメッシュに区分し、単位ごとに凡例の占める面積を表示し対話形式で液状化判定ができるようにした。

入力した地図情報の概要を次に示す。

関東地震の災害に関連する図面としては、

- 関東地震液状化履歴図²⁾：激しい液状化の発生地域(砂や水の激しい噴出、地盤の陥没、地盤の強度低下による構造物の大きな被害)、軽度な液状化の発生地域(砂や水のわずかな噴出、井戸の被害、地盤の沈下、地盤の強度低下による構造物の比較的軽度な被害)、井戸水の変化・地割れした地域(井戸水の濁りや水位上昇、地割れ、堤防などの破壊に至らない亀裂)と地盤災害がない地域を領域で表わした。

- 関東地震家屋被害分布図⁶⁾：地質調査所で行った木造家屋被害の調査結果で、家屋被害大・やや大・顕著でない、土地の陥没を1/25 000の地図上に表わした。

地形の情報としては、

- 土地条件図⁵⁾：人工地形のうち旧水面上の盛土地と旧水面上の高い盛土地が区別されている1970年版を用いた。

- 土地分類図：人工改変が加えられる以前の微地形をみる目的で土地条件図、洪水地形分類図⁷⁾をもとに作成した。分類は台地、台地斜面、谷底地、氾濫平野、三角州の5分類とし、自然堤防や旧河道、旧水面上の盛土といった土地条件図ですでに明示されていて人工改変をあまり受けていないものや改変が明らかな微地形は除いた。

- 湿地水田分布図：土地利用のうち水に関連するものであり、最も古い情報を得る目的から、明治13~17年測図の迅速図⁸⁾から湿地、水田、田を読み取り入力した。
- 江戸期の水系図：“江戸期の地形と水系と海岸線の変化”⁹⁾を1/25 000の地図上に、1460年頃の水系と湿地・陸地、1632年まで・1670年まで・1860年までに陸化した地域、隅田川および東京湾の7分類で表わした。
- 旧版地形図の水系図：明治42年と大正14年、昭和12年に測図された旧版地形図から水系に関連する項目を選び出し、水系、海、湿地、砂州、その他に分類し入力した。

地質の情報としては、

- 軟弱層基底等深線図¹⁰⁾：有楽町層または七号地層の基底面の深度を表わし、軟弱層の層厚を示す。この図は地表面最大加速度の推定に使用する目的で入力した。
- 入力地下水面図：地表近くの自由地下水位を区分し表わした。液状化解析結果は地下水位により影響を受けやすいことから、地下水面図の季節変動を考慮し安全を見込んで高い時期の水位を想定して作成した。
- 砂層分布図：有楽町層上部は砂層を主体とした沖積層であるため、この層厚図を砂層分布図として入力した。
- 礫層分布図：沖積層の礫層のうち、出現深度が5m未満の地域を図示した。
- 表層分布図：表土や盛土が砂質土であるか粘性土や瓦礫であるかによって液状化に及ぼす影響は異なる。ボーリング柱状図で表土や盛土と表示されており、記事欄から砂質土と判断できるものを選び、ボーリング地点を中心とする半径の100mの円で表わした。

このほかにボーリング深度図、柱状図位置図と国土数値情報¹¹⁾による背景図がある¹⁾。パソコンの画像で表示した出力図の例を図-3に示す。

柱状図情報としては、約12 000本のボーリング資料の土質柱状図、土質試験結果を数値ファイル化したうえで、液状化解析に必要な土質パラメーターの集計、液状化予測に必要な地質図作成のための出力、および、地図情報（入力地下水面図と軟弱層基底等深線図）と柱状図情報とから液状化計算が行えるシステムを作成した¹⁾。

ボーリング資料に記載されている土質名称をコード化し、各コードに分類される粒度と密度の試験データを集計し、土質名称ごとに液状化解析に必要な土質パラメーターの標準値¹⁾を与えた。

液状化解析では、土質試験データのあるものはそれを使用し、ないものは土質パラメーターの標準値を使用した。また、ボーリングデータの水位が入力地下水面図より低い場合は安全側を見込んで入力地下水面図の水位を使用して解析モデルを設定した。軟弱層厚と地震応答倍率の関係から軟弱層基底等深線図を使用し地表最大加速

度を推定し液状化解析を行い、液状化抵抗係数 F_L 値と液状化指数 P_L 値を求めた。解析結果をボーリング地点の位置情報として数値ファイル化し、500mメッシュごとに集計し P_L 値の頻度分布を求められるようにした。

b) 情報相互間の関連抽出法

図-1に示す情報相互間の関係を求めることを目的として、地図情報間では地図の凡例間“面と面”の関係抽出、ボーリング地点の解析値と地図情報との間では解析値と地図の凡例間“点と面”の関係抽出が可能なシステムを作成した。

地図の形で表現される“面と面”の情報間の関係を求める場合、たとえば、土地条件図での三角州や旧河道等の凡例で区分される地域が関東地震でどの程度液状化したかを調べるには、土地条件図と関東地震液状化履歴図を重ね合わせ、三角州や旧河道の地域内における液状化発生と非発生の面積を集計することにより評価することができる。この種の重ね合わせの方法は図-4に示すように、数値化された地図情報の重ね合わせにより、各凡例の組合せによって生成される領域を新たな凡例として区分しその面積集計を行うことである。

ボーリング地点の解析値である“点”の情報と地図情報である“面”の情報との関係を求める場合には、地図の凡例で括られる領域中に含まれるボーリング地点の情報 (P_L 値) を集計し、頻度分布により評価する。地図

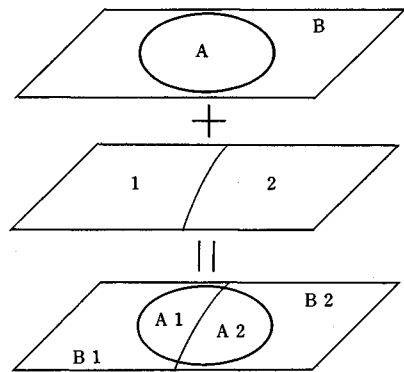


図-4 領域の重ね合わせの概念

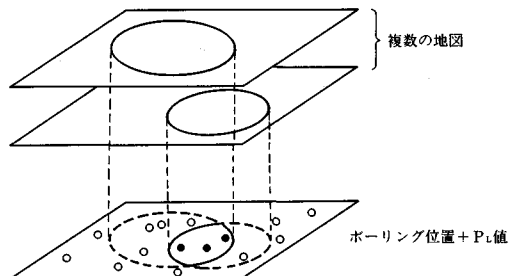
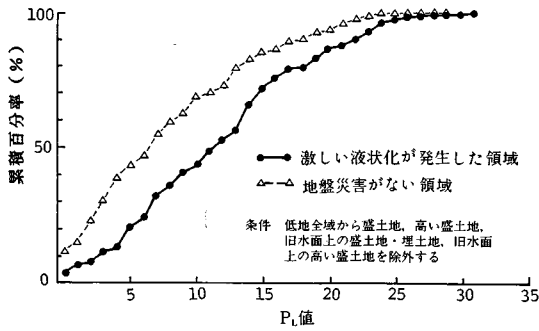
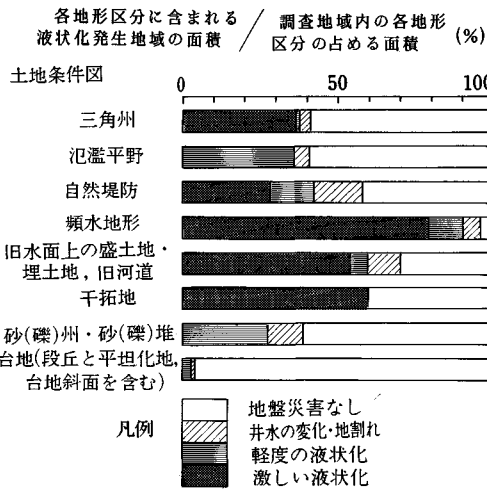


図-5 領域と地点の重ね合わせの概念



図一六 液状化発生・非発生地域の P_L 値の累積頻度曲線



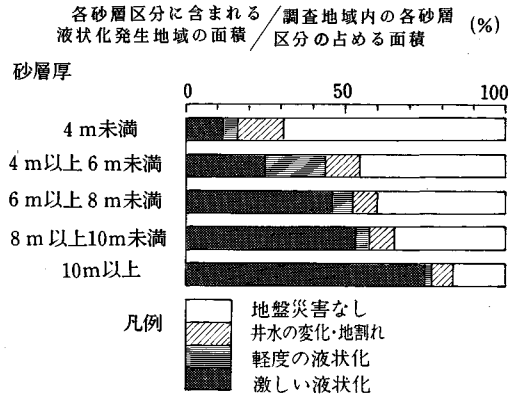
図一七 液状化履歴と土地条件図の関係

情報の選定は、図一五に示すように、1種類の地図の情報だけでなく、数種類の地図の凡例の組合せもできるようにした。たとえば土地条件図において、関東地震以降地盤変化が進められたと判断できる旧水面上の盛土地・埋土地・高い盛土地などの凡例を除いた地域で、関東地震液状化履歴図で液状化した地域に含まれる P_L 値を集計することが可能である。集計の組合せは多数に及び試行錯誤の選択が予想されたことから、パソコンを使用し対話形式で集計がとれるようにした。

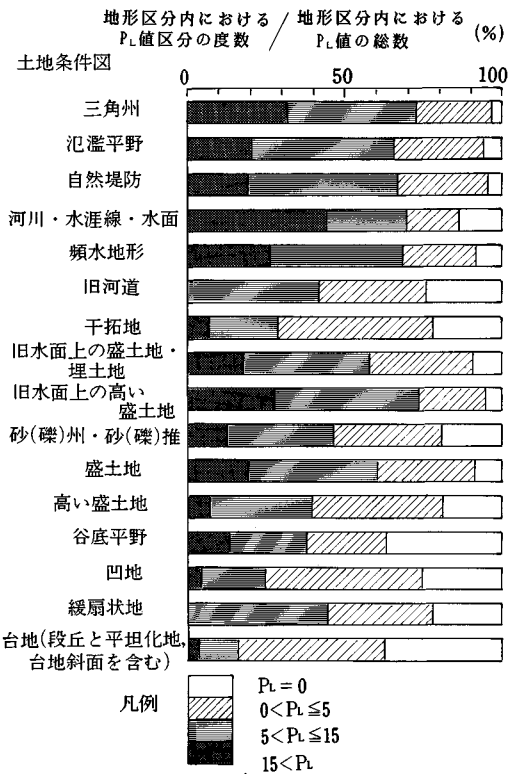
(2) 支援システムによる解析結果

関東地震液状化履歴と P_L 値の関係としては、履歴図の凡例で激しい液状化現象が生じた(液状化発生)地域と液状化も地割れもない地盤災害がない(非液状化)地域の P_L 値の累積頻度曲線を求め図一六に示す。関東地震液状化履歴と地形・地質の関係を求めた事例として、土地条件図との関係を図一七に、砂層分布図との関係を図一八に示す。解析値と地形・地質の関係を求めた事例として P_L 値と土地条件図の関係を図一九に示す。

図一六では、液状化の可能性と P_L 値の関係を求める



図一八 液状化履歴と砂層分布図の関係



図一九 土地条件図と P_L 値の関係

ことを目的としているため、震災当時と地盤の液状化特性に大きな差がない地域の P_L 値を選択する必要がある。このため、震災以降に地盤の改変が進んだと考えられる盛土地、高い盛土地、旧水面上の盛土地・埋土地、旧水面上の高い盛土地に含まれる P_L 値を除外した。図一六によると、関東地震で激しい液状化が発生した地域の P_L 値は無被害の地域の P_L 値より大きくなり、 P_L 値により液状化の可能性を区分できることがわかる。

図一七によると、液状化しやすい地形の分類は頻水地

形、干拓地、旧水面上の盛土地・埋土地であり、液状化しにくい地形の分類は低地では砂(礫)州、砂(礫)堆である。図-8によると、砂層を主体とする有楽町層上部の層厚が10 m以上ある地盤は液状化しやすいことがわかる。図-9によると、河川・水涯線・水面、旧河道、緩扇状地は P_L 値が大きく液状化しやすく、三角州、旧水面上の高い盛土地・埋土地、類水地形で P_L 値はやや高い値を示し、干拓地、砂(礫)州・砂(礫)堆、高い盛土地、谷底平野と凹地・浅い谷では P_L 値は小さく液状化しにくくなっている。

情報相互の関係としては、たとえば図-7では類水地形、干拓地、旧水面上の盛土地・埋土地の凡例で激しい液状化現象が発生した割合が大きくなっているが、この凡例に含まれる P_L 値の集計からは、図-9に示すように干拓地の P_L 値は他の凡例の P_L 値より小さな値を示し、相互関係が整合しない場合もある¹⁾。このように、地形・地質の区分と関東地震の液状化発生・非発生および P_L 値との関係は、それぞれの情報間に“あいまい”な部分がかなり含まれており、単一の情報だけで予測を行うことは避けなければならないことがわかる。

他の地形・地質の情報についても同様な検討を行い、液状化の判定に有為な情報を与える地図情報を選び出し液状化の可能性と地図情報の関係を求め表-1に示す。

4. 液状化予測

(1) メッシュ判定法による液状化予測のフロー

メッシュ判定法は、メッシュ内の諸情報を重ね合わせて地盤の液状化に対する性質を総合したうえで液状化の可能性を表わす方法であり、判定法のフローを図-10に示す。

ボーリング地点の解析値の統計量(図-3の P_L 値と統計量)から液状化の可能性のランク値「1:可能性き

表-1 判定に用いる地図情報の分類

ランク値	地図情報の分類
液状化の可能性大 ランク値 2	<p>関東地震液状化履歴図: 激しい液状化現象 軽度の液状化現象</p> <p>関東地震地震家屋被害分布図: 土地の陥没</p> <p>土地条件図: 河川・水涯線および水面 類水地形、旧河道、旧水面上の盛土地・埋土地、干拓地</p> <p>砂層分布図: 砂層厚が10 m以上</p> <p>水系図と表層分布図: 過去の水系が“すべて砂質土”で盛土されている</p> <p>湿地・水田分布図: 湿地</p>
液状化の可能性いくらかあり ランク値 3	<p>土地条件図: 旧水面上の高い盛土地、凹地・浅い谷、谷底平野、氾濫平野、三角洲 海岸平野、凹陥地、自然堤防、緩扇状地</p> <p>盛土地、高い盛土地、麓層地</p> <p>水系図と表層分布図: 過去の水系が“一部砂質土”で盛土されている</p>
液状化の可能性なし ランク値 4	<p>関東地震液状化履歴図: 地盤災害がない</p> <p>土地条件図: 台地(平坦化地と台地斜面を含む) 砂(礫)州・砂(礫)堆</p> <p>礫層分布図: 礫層が1~5 m未満に存在する</p>

わめて大, 2:可能性大, 3:可能性ややあり, 4:可能性なし, 5:判定できず」を決定する。今回の予測では可能性きわめて大のランク値1については解析値に“あいまいさ”が残されていることを配慮し、ランク値2にランク値1を含め、ランク値2~4の表示で3段階で液状化の可能性を表わした。地点数とその分布形状から情報の信頼性を確度「A:大, B:やや大, C:中, D:やや小, E:小」として表わした。

液状化の判定に有意な情報を与える地図情報を選定し(表-1)、各地図情報ごとにその情報の凡例がメッシュ内に占める面積比から液状化の可能性の「ランク値」と「確度」を決定した。各地図情報はそれぞれ“あいまいさ”を含みながらも、液状化の可能性の有無を示す情報が同一ランク値として多数重なり合えば、判定値の“確

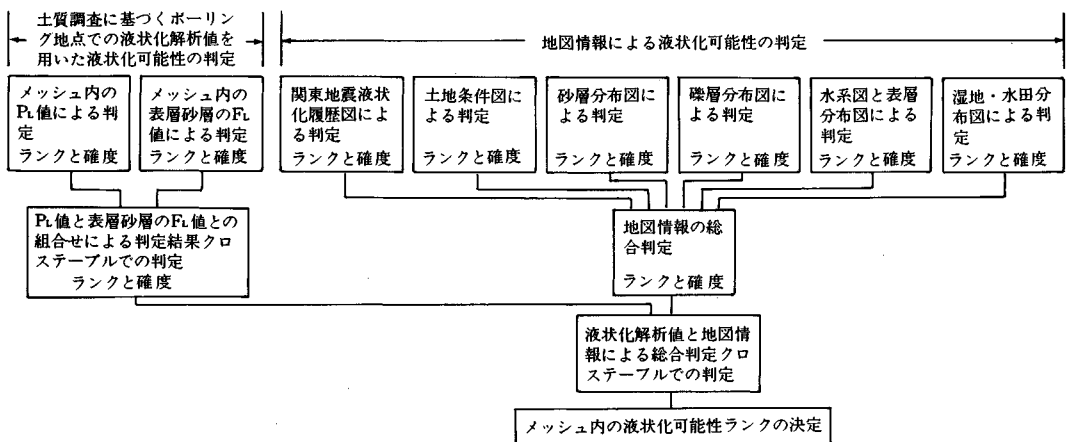


図-10 メッシュ判定のフロー

からしき”は増すことになる。このような“並列化”¹²⁾した組合せによって各地図情報を統合し、地図情報全体を総合化した「ランク値」と「確度」を決定した。

ボーリング地点の解析値による「ランク値」と「確度」と、地図情報全体の「ランク値」と「確度」を総合化してメッシュごとの液状化の可能性を決定した。

(2) ボーリング地点の液状化解析による判定

砂層の粒度試験データの有無により類似した地盤に対し液状化の判定結果に大きな差が生じることを避ける目的で、液状化強度推定式では対象土層に対し粒度による制限を加えていない³⁾。このため、 P_L 値による判定は砂質土層に限定せず、粘性土層も含めた地表面下 20 m の地盤の強度低下の程度を表わす指標とみなした。図-6 によると、ここで使用した予測式による P_L 値の判定結果は、岩崎・龍岡ら¹³⁾が提案した液状化の被害程度と P_L 値の関係を採用できることが確かめられ、ここでは、 P_L 値による液状化判定のランク値を、 $P_L \geq 15$ を液状化の可能性大 (ランク値 2)、 $15 > P_L \geq 5$ を可能性いくらかあり (ランク値 3)、 $5 > P_L$ を可能性なし (ランク値 4) とした。なお、メッシュ内にボーリング地点がない場合はランク値 5 に設定した。

また、噴砂・噴水、家屋やライフラインなどの被害は浅い砂層の液状化の影響を受けやすいことから、 P_L 値の判定法以外に、表層 6 m 以浅の砂層厚と F_L 値に注目した“表層砂層の F_L 値による判定法”³⁾を作成した。

地域被害想定のような広域的な液状化予測では、液状化によって引き起こされる被害の多様性を配慮する必要がある。ここでは、単一な予測法をとらず、異なる考えに基づく 2 種類の判定値“ P_L 値による判定値”と“表層砂層の F_L 値による判定値”を表-2 により統合し、ボーリング地点における液状化の可能性のランク値を決めた。

メッシュ内のボーリング地点数とその分布状況から解析結果の信頼性を表わす A~E の確度を以下のように定義した。地点数が 15 以上と多くかつ分布が良い場合

表-2 ボーリング地点の液状化判定クロステーブル
 P_L 値による判定

判定値 判定値	液状化の可能性		
	可能性大	可能性いくらかあり	可能性なし
液状化の可能性大	2	2	3
液状化の可能性中	2	3	3
液状化の可能性小	3	3	4
液状化の可能性なし	3	4	4

組合せて得られる
ランク

2 液状化の可能性大
3 液状化の可能性いくらかあり
4 液状化可能性なし

を A, 地点数が 10~15 とやや多くかつ分布が良い場合を B, 地点数が 5~10 とやや少ないが分布が良いか、あるいは地点数が 15 以上と多いが片寄って分布している場合を C, 地点数が 2~5 と少ないが分布が良いか、あるいは地点数が 5~15 あるが片寄って分布している場合を D, 地点数 0 か、あるいは 4 以下と少なくしかも片寄って分布している場合を E とした。

(3) 地図情報の解析による判定

地図情報による判定では、液状化判定に有意な情報を与えるものとして図-10 のフローに示す 6 種類の分類に地図情報を整理して、表-1 に示す分類がメッシュ内に存在するか否かによって液状化可能性のランク値を決定した。表-1 に示す分類の大部分は図-1 の関係を使用して東京低地を対象にした解析結果から求められているが、“水系図と表層分布図”による判定は、過去に水系であったところが砂質土で埋土されていれば液状化しやすいという液状化被害で一般的に確認されていることを表わしたのも含まれている。

地図情報の判定の例として土地条件図による判定のフローを図-11 に示す。判定は液状化可能性なし (ランク値 4) の凡例である台地と砂(礫)州・砂(礫)堆を先に行い、その後で液状化可能性大 (ランク値 2) である水面・水涯線・頻水地形、旧河道、干拓地、旧水面上の盛土地・埋土地を対象として判定した。最後に液状化可能性なし、あるいは大と判定できなかった分類を可能性いくらかあり (ランク値 3) と判定した。メッシュ内

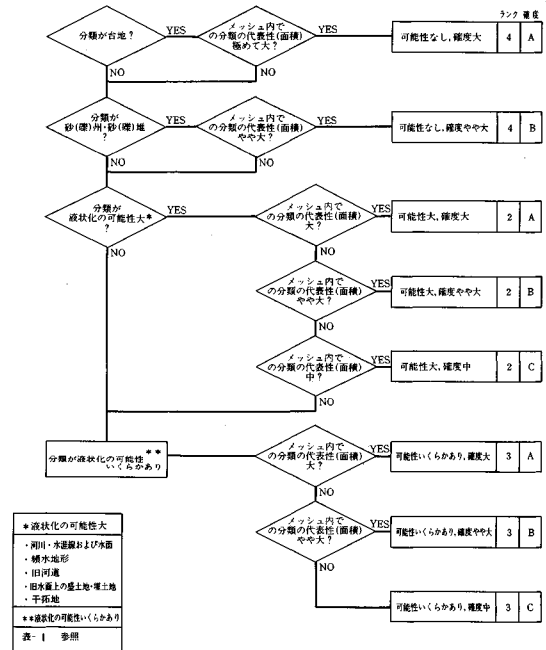
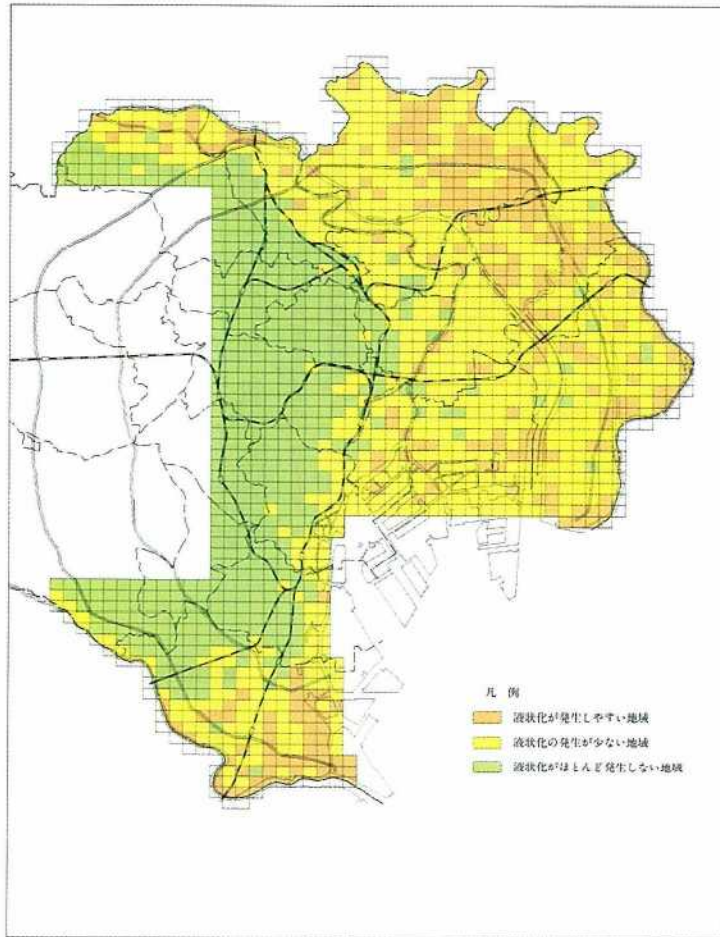


図-11 土地条件図による判定のフロー



図一14 メッシュ判定による東京低地の液化化予測図

5. おわりに

今回の液化化予測のように個々の情報と解（予測値）との間の因果性が比較的乏しい問題では、情報個別の分析的な解析よりむしろ情報相互の関係からどのようにして総合化に向かうかのプロセスの構築が重要であり、予測精度の向上とともに予測に至る過程の合理性も重要な課題になる。ここでは、予測法とともに、この種の問題でブラックボックスにしがちな予測過程のプロセスについても説明を加えた。

参考文献

- 1) 東京都土木技術研究所：東京低地の液化化予測，土質工学会，1987.
- 2) 草野 郁：関東地震における東京低地の液化化履歴，土木学会論文集，No.406/Ⅲ-11，pp.213～222，1989.
- 3) 草野 郁：細粒分を含む砂質地盤の液化化強度の推定法，土木学会論文集，No.418/Ⅲ-13，pp.55～64，1990.
- 4) 高速道路調査会・橋梁構造研究会：耐震設計に関する調査研究，日本道路公団，pp.57～62，1979.
- 5) 建設省国土地理院：土地条件図，東京東北部，東京東南部，東京西北部，東京西南部，1970.
- 6) 農商務省地質調査所：関東地震調査報告，1925.
- 7) 建設省国土地理院：1：25 000 洪水地形分類図，東京周辺の水害危険地帯，1961.
- 8) 第一軍管地方迅速測図：参謀本部陸軍部測量局，大日本測量（株），資料調査部複製.
- 9) 正井泰夫：都市環境としての大江戸の水系と海岸，人文地理学研究Ⅳ，筑波大学地球科学系，1980.
- 10) 東京都土木技術研究所：東京都地盤地質図（23区内），1969.
- 11) 建設省国土地理院地図管理部：国土数値情報の概要，1983.
- 12) 寺野寿郎：システム工学入門，共立出版，1986.
- 13) 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.

(1989.5.24・受付)