

液状化のハザードマップにおける 作成方法の現状と今後のあり方

安田 進¹・石田栄介²・細川直行³

¹東京電機大学理工学部
(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

²日本技術開発株式会社リサーチエンジニアリング事業部 (〒460-0008 名古屋市中区栄3-10-22)

E-mail: isida@jecc.co.jp

³東京ガス株式会社防災・供給部 (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail: naoyuki@tokyo-gas.co.jp

地震時における液状化は種々の被害を生じるため、その危険地区を推定するハザードマップの作成が近年各地の自治体等で行われてきている。これは大変重要なことであるが、作成されたハザードマップには種々の不確定さが含まれている。そこで、まず現在行われているハザードマップ作成方法を概観し、その作成において仮定していることと、そこに含まれている不確実さに関していくつか検討してみた。その結果、液状化の判定方法やボーリングデータの利用などに多くの不確実さを含んでいる可能性が指摘された。また、液状化の予測結果を表示する方法にも問題があることが指摘された。

Key Words : Liquefaction, hazard map, geotechnical data base

1. はじめに

液状化による構造物の被害が広く認識されたのは1964年に発生した新潟地震とアラスカ地震である。その後、現地調査や実験などをもとに液状化発生メカニズムの解明が行われ、液状化の発生、対策に関する研究・技術開発が行われてきた。それにとまって、将来の地震時における液状化発生地区の予測も1970年代から行われ始めた。東京の下町に対し予測された¹⁾のが我が国における最初のハザードマップであろう。当初は、このようなハザードマップが公開されると地価に影響を及ぼす危険性があるのではないかと心配されたりして、なかなかハザードマップの作成に消極的であったが、その後、次第に各地の自治体などで作成が行われるようになってきた。現在では我が国の主要な都市で液状化に関するハザードマップが作成され、公開されている。

それではこれで液状化に関するハザードマップ作成の課題が解決したかという点、今でも大きく二つの問題点を抱えているのではないかとと思われる。まず、ハザードマップの精度の問題である。ハザードマップは一般に既往のボーリングデータを収集して作成されるが、その過程で種々の仮定が行われる。この中に多くの不確実さを生じる要因がある。

一方、作成された液状化に関するハザードマップ

の利活用等はまだまだ十分に行われていない。現在のところ自治体において、家屋やライフラインなどの被災量の想定に用いられ、一部の構造物で地震後の二次災害防止に利用されているといった程度である。例えば、既設の構造物の液状化対策にまで用いられることまでは行われていない。

以下には、まず現在行われているハザードマップの作成方法を概観し、上記のうちのハザードマップの精度に関し具体的な例を示しながら問題点を指摘し、さらに、今後必要な研究に関して述べてみる。

2. 現在行われている液状化のハザードマップ作成方法の概観

液状化のハザードマップを作成する場合には、液状化の発生に関する予測手法を用いる必要がある。液状化発生予測手法には、グレードで分けて①微地形や液状化履歴をもとに予測する概略の方法、②N値や粒径の指標を用いる簡易な方法、③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な方法、とあり、ハザードマップの作成もこれらのどれか、または二つのグレードを組み合わせたものが用いられている。そのうち、②の方法が各種構造物の設計基準に用いられていることや、また、利用し易くてある程度の精度があるため、一般に良く用いられている。その

中にも、限界 N 値法と F_L 値法があるが、 F_L 値法の方が数値で表現出来るので良く用いられている。さらに、その F_L 値法の中でもいくつかの液状化予測方法が用いられているが、一般に土木構造物では道路橋示方書・同解説、建築物では建築基礎構造設計指針に示されている方法を用いることが多い。そこで、これらの方法を念頭において、以下に予測方法自体の問題点を考えてみる。

3. 液状化予測の精度に関する問題点

(1) 設計基準類における液状化の判定結果の相違および判定方法自体が有している不確定さに関して

液状化が設計基準類に取り入れ始めたのは1970年代からであるが、その後、道路橋、建築、港湾、鉄道などの各施設で異なった液状化判定方法が用いられてきた。同じ地盤・地震条件でも液状化判定結果がそれぞれ違っていたが、1995年兵庫県南部地震前あたりまでにそれぞれ修正が行われ、各基準類で結果にあまり差がなくなっていた。ところが、兵庫県南部地震以降レベル2地震動のもとで液状化判定も行われるようになってから、再び、各基準類で判定結果に差が出るようになった。これらの比較は文献2)などで行われているが、特に差が出る地盤条件としては以下のようなものがある。

- i) 細粒分を20%以上とかなり多く含んだ砂質土
- ii) N 値が20程度と大きい締まった砂地盤

一例として、東京低地の沖積砂層を対象にし、後述する図-6の關係を用いて、細粒分含有率が0%~40%に該当する N 値に対し道路橋示方書と建築基礎の方法で液状化強度比 R_L を比較してみたのが図-1である。これに見られるように液状化強度比自体も細粒分が多くなると2つの設計基準類で異なっている。したがって、まず、どのような液状化判定方法を用いるかで、ハザードマップの結果もかなり異なる場合があることに留意が必要である。

また、一部の液状化判定方法では、過去の地震で液状化した層と液状化しなかった層の N 値や地震動

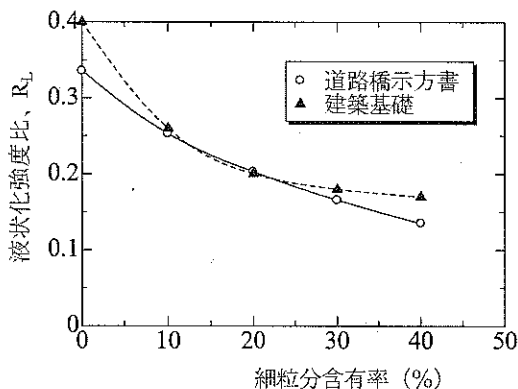


図-1 二つの設計基準類で推定した液状化強度比の違いの比較例

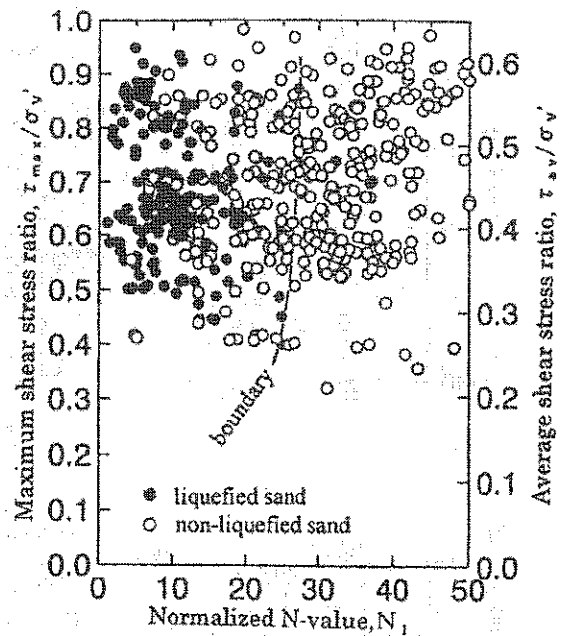


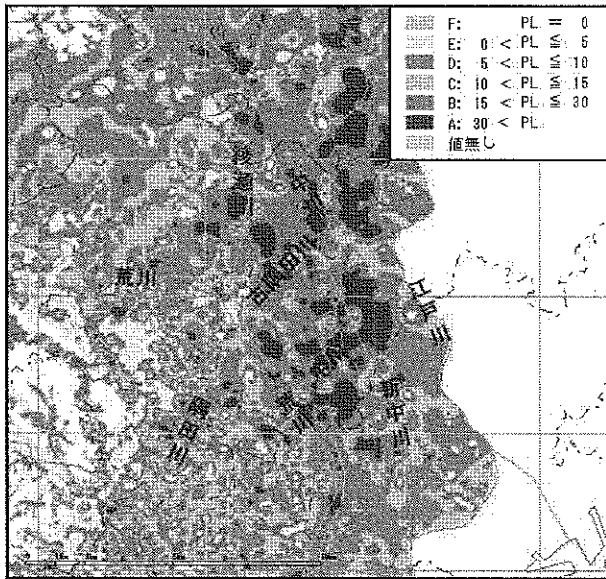
図-2 液状化発生、非発生のデータから液状化発生限界を推定した例³⁾

などをもとに、図-2に示すような液状化が発生したか否かの境界の曲線を描いて、これをもとに判定方法が導き出されている。図-2は筆者の一人が兵庫県南部地震時の神戸におけるデータを整理してみた例³⁾であるが、これを整理する段階で生じた問題点は、「どの層が液状化したかはどのようにして判断するのか?」といった疑問であった。この例ではとりあえず地層構成と N 値から適当に判断せざるを得なく、本当に図-2の●、○が液状化した層、液状化しなかった層のデータと言えるかどうかは不明であった。このように液状化判定方法自体の誘導に不明瞭な過程を有しているものもある。

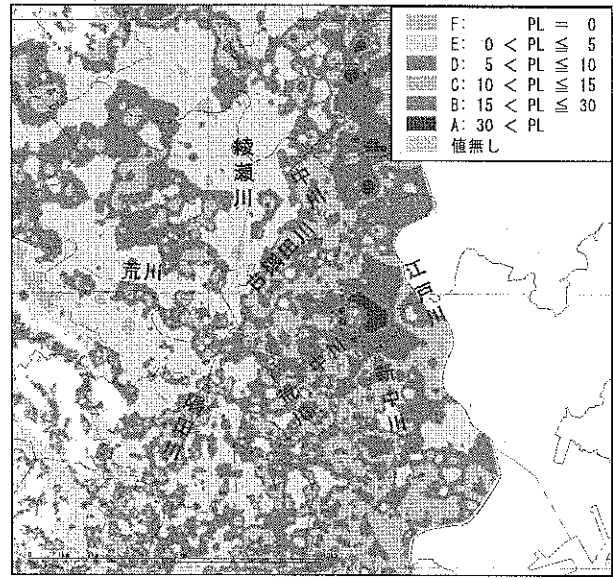
(2) ハザードマップを作成する地区の地盤の特性を考慮する必要性に関して

一般に液状化判定方法は国内の全地域に適用できるように考えて作成されている。ところが、我が国の地盤条件は多種多様で、一般的な方法を適用するにあたって修正が必要ながある。東京都と福岡市の低地で筆者達がハザードマップ作成するにあたって、このような修正をせざるを得なかった例を挙げてみる。

東京低地には沖積砂層が広く堆積している。この砂層は細粒分を20~30%と多く含んでいて N 値は小さい。したがって、通常の液状化判定方法だと液状化強度比が小さく、液状化し易いと判定されがちである。ところが実際に試料を採取して液状化試験を行ってみると、結構液状化強度比は大きい。道路橋示方書・同解説の方法そのものを用いて液状化判定を行い、さらに液状化指数 P_L を求めてその分布を示したのが図-3(a)である。ここでは関東地震クラスを想定し地表最大加速度を0.4gに設定してある。図に見られるようにこの程度の地震動で下町一帯に P_L が



(a) 道路橋示方書の方法で予測



(b) 修正した方法で予測

図-3 二つの液状化判定方法で推定した東京低地の液状化ハザードマップ

15以上といった激しく液状化が生じる地区が広く分布する結果となった。ところが、関東地震時の液状化分布図をしてみるとこのように広くは分布していない。そこで、不攪乱試料による液状化試験結果を基に N 値から液状化強度比を推定する式を見直してみたところ、下記のような補正をした方が良いことが分かった⁴⁾。

$$N_a = N_1 + \Delta N \quad (1)$$

$$\Delta N = 0 (F_c < 8\%)$$

$$20.769 \times \log_{10}(F_c) - 18 (8\% \leq F_c < 40\%)$$

$$15.27 (F_c \geq 40\%)$$

ただし、

N_a : 道路橋示方書の液状化強度比を推定する式における粒度の影響を考慮した補正 N 値

N_1 : 有効上載圧 100kN/m^2 相当に換算した N 値

ΔN : 東京低地における細粒分の影響を補正する N 値(文献4による提案値)

そしてこの補正をして再度 P_L を求めて分布を示したのが図-3(b)である。図-3(a)と比べて $P_L > 15$ となる地区が、中川沿いなどの関東地震の際の実際に液状化した地区に絞ることが出来た。

福岡市に関しても、液状化のハザードマップを作成するにあたって、まず、いくつかの不攪乱試料を採取し液状化試験を行ってみた。その結果、埋立砂や砂丘砂と沖積砂で液状化強度比がかなり異なることが分かった⁵⁾。福岡市の沖積砂層もやはり細粒分を20%程度含む砂質土であった。そこで、当時の道路橋示方書・同解説の液状化強度比の式に、沖積層だけ下記のような補正を行って、図-4のようなハザードマップを作成した。

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2)$$

ただし、

R : 液状化強度比

R_1, R_2 : 道路橋示方書(1980年版)で用いていた値

R_3 : 福岡の砂質土用の補正係数で、砂丘砂と埋立土では0、沖積砂では0.187

地表最大加速度は 200Gal を想定してあった。2005年に実際に福岡県西方沖地震が発生し、この地域内では 200Gal より少し大きい地震動が襲ったが、図-4に示すように沖積砂層が堆積している地区では液状化が発生しなかった⁶⁾。沖積砂層に対し上記のような補正をしなければ液状化が発生すると予測されていたところであった。なお、沖積砂層は図-4の右下(南東)に位置する「液状化は発生するが構造物は被害を受けにくい地区」のさらに右下(南東)に広く堆積している。

以上のように、その地域の地盤条件を考慮し、液

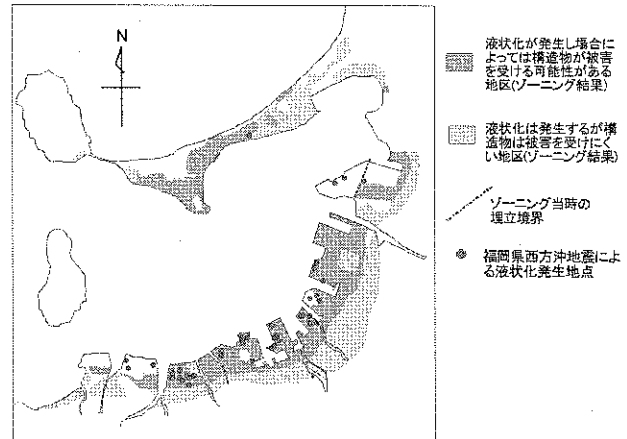


図-4 福岡の液状化ハザードマップと実際の液状化発生地点⁶⁾

状化試験結果を利用して既往の液状化判定式を修正するといったことが大切と考えられる。

(3) ボーリングデータを用いる際の粒径の仮定に関して

ハザードマップの作成にあたっては、一般に既往の沢山のボーリングデータを収集し、それぞれに対して液状化の判定を行う。既往のボーリングは液状化の判定のために実施されたものではなく、構造物の建設にあたって、基礎の支持力や杭基礎の深さな

どを設計するために実施されたものが多い。このような既往のボーリングデータでは、一般に液状化が対象となる砂質土層の粒度試験は行われていない。そこで、柱状図に書かれている土質名から細粒分含有率や平均粒径を仮定することがよく行われる。ところが、この土質名は通常現場で標準貫入試験用サンプリャーで採取された土を見て、目で判断されることが多い。当然、ボーリングを実施した人によってこの判断方法は違うし、また、土質名から一律に決まるものではない。実際に粒度試験を行った深度での土質名に関し、筆者の一人が以前に調査した例⁷⁾を図-5に示す。これに見られるように、ある土質名でも細粒分含有率 F_c や平均粒径 D_{50} は相当ばらつきがある。中砂やシルトではあまりばらつきがないものの、その中間の土質ではばらつきの程度が激しい。例えばシルト質砂の細粒分含有率は10%~90%の間で特にピークがない度数分布をしている。したがって、このような土質が分布している地区では、土質名から粒径を判断すると液状化判定結果に大きな誤差を生じるので、注意が必要である。

この点に関して、筆者達は図-6に示すような関係があることを見いだしている⁴⁾。これは前述した東京低地の沖積砂層について、細粒分含有率とN値の関係をプロットしたもので、図に示したような曲線上にデータがのってくるようである。つまり類似の堆積環境で堆積した層では細粒分が多いとN値が小さく、細粒分が多いとN値が大きくて、その関係は比較的一義的となっているようである。したがって、東京低地の沖積層では、細粒分含有率を推定するにあたって、土質名から推定するよりは図-6のような関係を用いてN値から推定した方が精度が良いと思われる。他の地区でも同様なことがあるのではないかと考えられ、粒度試験が行われているデータから図-6のような関係を予め見いだしておいて、粒度試験が行われていない場合はN値から細粒分含有率を推定した方が良いのではないかと考えられる。

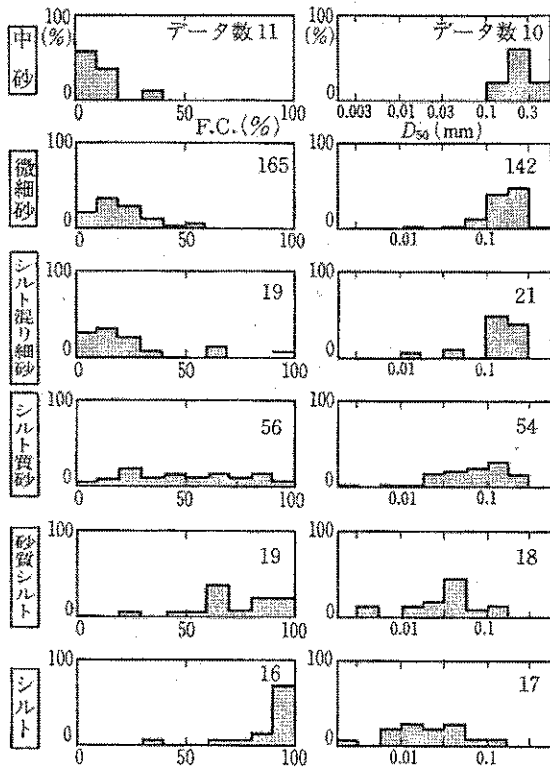


図-5 ボーリング柱状図の土質名と実際の粒径の関係⁷⁾

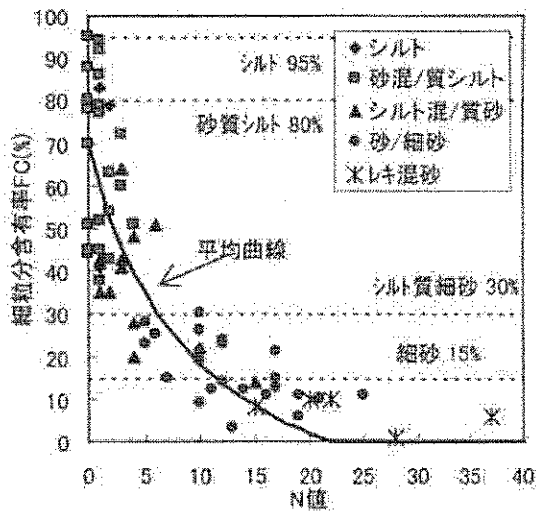


図-6 東京低地におけるN値と細粒分含有率の関係⁴⁾

(4) ボーリングデータを用いる際の地下水位の扱いに関して

通常行われているボーリングでは、地下水位は設

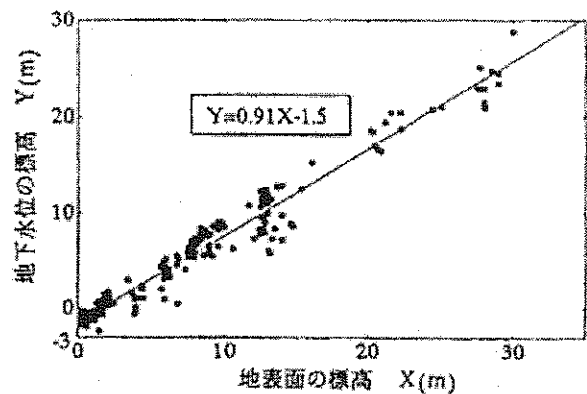


図-7 川崎市の低地における地表面と地下水位の標高の関係⁹⁾

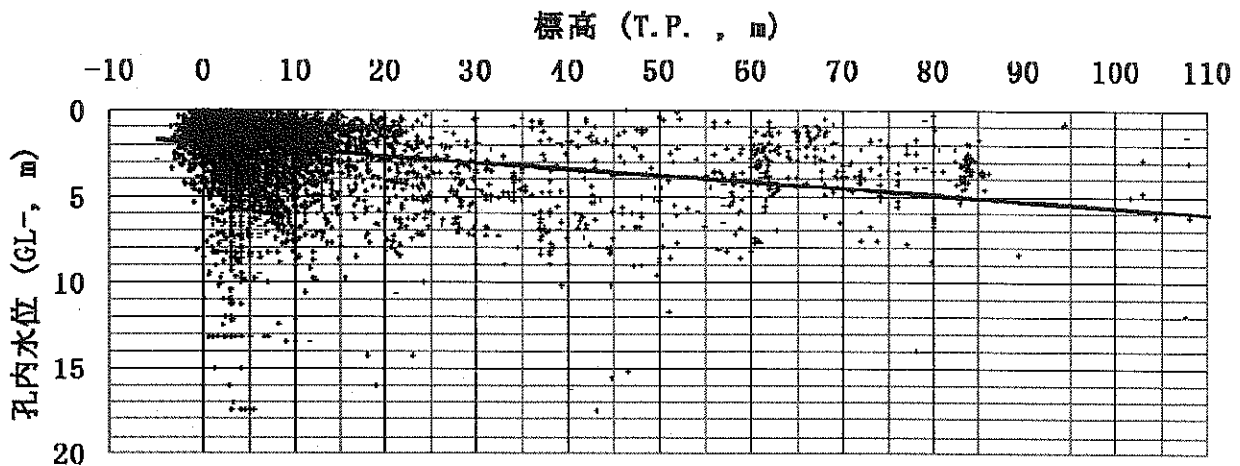


図-8 首都圏の低地における地表面標高と地表面からの地下水位の深さの関係

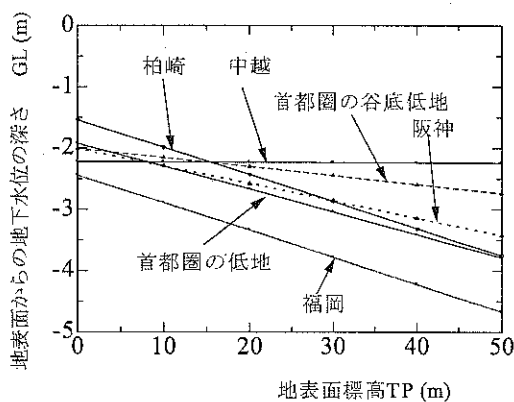


図-9 六つの地区における地表面標高と地下水位の深さの関係

な関係が他の地域でもあるか、首都圏の低地について今回調べてみたのが図-8である。やはり東京低地全体でもこの標高が高くなると地下水位は深くなる傾向にあった。さらに、首都圏の谷底低地、福岡、阪神、中越、柏崎地域に関して整理し、その関係を比較したのが図-9である。低地どうしでは標高とともに地下水位が深くなる傾向を示した。これに対し首都圏の谷底低地や中越の盆地的なところでは、標高に対して地下水位の深さはあまり変化しなかった。これは周囲の台地・山地からの地下水流入の影響と考えられる。このような地表面標高と地下水位の関係式を対象とする地域で予め見いだしておいて、この関係式からかなり外れた地下水位は、関係式で補正してから液状化判定を行うと良いのではないかと考えられる。

計にあまり影響がないので、その精度に関してはあまり注意されていない。ところが液状化の判定では地下水位が結果に大きく影響する。1mほど地下水位が異なれば判定結果も異なるし、また、実際の液状化による家屋の被害においても地下水位が被害に大きく影響することが分かっている⁸⁾。ボーリングを行う際、地下水位は一般にボーリング孔内の水位を測定する。ただし、孔壁の崩壊を防ぐためにベントナイト溶液を良く使う。これが孔壁についてそのまま作業中に水位を測定すると、実際の地下水位と大きく異なった値となってしまう危険性を有している。既往のボーリングではこの点に留意されていないものが多くあり、実際と異なって記載してあるものが含まれている。

これを解消する方法としては、地表面標高でチェックするのが良いのではないかと考えられる。筆者の一人は以前に川崎市を対象に地球の温暖化が液状化の発生に与える影響に関して検討したことがある。その時に川崎市でまとめられていたボーリング集をもとに、地表面標高と地下水位の標高の関係を調べたことがあるが⁹⁾、それによると、図-7に示すように、地表面標高が高くなると地表面からの地下水位の深さが深くなる傾向があった。そこで、このよう

4. 液状化予測結果を表示する方法に関する問題点

(1) 各地点の液状化の激しさを表示する方法

各ボーリングデータに対して液状化が発生する層の深度を判定した後、液状化の発生がその地点の構造物に与える影響を評価することになる。評価方法として、①液状化指数 P_L 値を用いる方法、②液状化層と非液状化の厚さの関係から評価する方法、③液状化層厚をもとに評価する方法、などがある。一般に良く用いられている方法は①であり、 P_L 値に応じて家屋やライフラインの被害率の想定を行うことがよく行われている。

さて、 P_L 値を用いる場合、この値と構造物の被害の関係を対応させておく必要がある。もともとこの値は特に構造物を特定せずに、「一般に5以下だと液状化被害はほとんどなく、15以上だと激しい被害がでるようだ」との程度の閾値で設定されている。したがって、対象とする構造物の被害事例などをもとに、構造物ごとに P_L の閾値を決める必要がある。例えば、1944年東南海地震時の木曾三川の堤防の沈下量と P_L の関係を示したのが図-10である¹⁰⁾。とこ

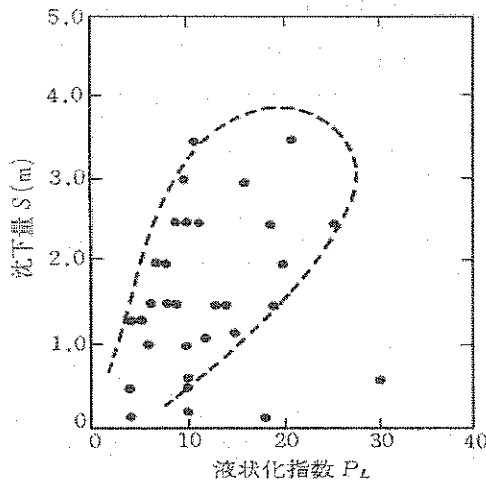


図-10 東南海地震時の木曾三川堤防の沈下量と P_L の関係¹⁰⁾



図-11 狭い範囲が液状化した事例¹¹⁾

ろが、このような関係はまだあまり調べられておらず、現在のハザードマップでは構造物への影響までは考慮できていない。

また、この方法では一般に液状化する深度が20m程度の深さまでなので、20mまでの液状化層を対象にしてある。ところが、軽い構造物や埋設管では20mの深さまでは被害に影響を与えず、浅い層の液状化だけが影響する可能性がある。したがって、液状化による構造物の被害のメカニズムを良く考えて、適切な深さを設定することも必要である。

さらに、 P_L 値以外に液状化による構造物の変形量を評価できる指標を検討する必要がある。

(2) メッシュ表示と領域表示の使い分け

P_L 値にしろ液状化層厚にしろ、地図上に表示する場合にはメッシュか領域かどちらかで表示することになる。このうち、メッシュで表示の方が機械的に出来るためよく用いられている。メッシュの大き

さも250~500m程度の大きさが多い。ところが、液状化は狭い範囲内で発生することが多く、メッシュ表示ではこれを表現できないことに留意する必要がある。例えば、図-11は秋田市新屋元町で1983年日本海中部地震の際に液状化が発生した領域を示している¹¹⁾が、ここでは旧河道を埋め立てた数10mの狭い幅で液状化が発生した。このような狭い範囲で液状化が発生する場合はメッシュ表示では表現出来ない。

これに対して、領域表示だと微地形を元に領域を設定するなりして、狭い範囲の表示が可能である。ところが、その狭い領域にボーリングデータがなければ、微地形による液状化の概略判定と同じ定性的な判定をするしかない。

(3) 埋め戻し部の評価

最近の地震では下水道管渠やマンホールの埋戻し土の液状化による被害が目立っている。また、軟弱粘性土地盤を掘削し砂で埋め戻した上に建てた家屋の液状化被害もいくつか発生している。このように埋戻し土の液状化による被害が多くなってきているが、通常の液状化に関するハザードマップは原地盤を対象にしただけのものであり、埋戻し土の液状化による被害までは予測できていない。

5. 結論

液状化のハザードマップ作成において仮定していることと、そこに含まれている不確定さに関していくつか検討してみた。その結果、以下のような結論を得た。

(1) 液状化の判定方法がいくつか提案されてきているが、それによって液状化発生の推定結果が異なるので留意する必要がある。また、各地の地盤特性を考慮して液状化判定方法を適宜修正するなどして用いることが大切である。

(2) 既往のボーリングデータを用いる場合、土質名から粒径の推定を行うと細粒分を含む砂では誤差が大きい。 N 値と細粒分の関係を予め求めて N 値から粒径を推定するなどの工夫が必要である。また、孔内水位にも誤差が含まれることがあるので、地表面標高と地下水位の関係を予め求めておいて利用するといった工夫も必要である。

(3) P_L 値を用いてある地点の液状化の激しさを表現する場合には、 P_L 値と対象とする構造物の被害の関係を調べるなりして、構造物の被害の定量的な推定ができるようにする必要がある。

参考文献

- 1) Ishihara, K. and Ogawa, K.: Liquefaction susceptibility map of downtown Tokyo, *Proc. of the 2nd International Conference on Microzonation*, Vol.2, pp.897-910, 1978.
- 2) 土木学会地震工学委員会 レベル2地震動による液状化

- 研究小委員会：レベル2地震動による液状化研究小委員会活動成果報告, 2003.
- 3) 安田進・坪田邦治・西川修・浅香寛之・内藤福隆：兵庫県南部地震における液状化・非液状化地点のN値の比較, 第31回地盤工学研究発表会, pp.1225-1226, 1996.
 - 4) 亀井祐聡・森本巖・安田進・清水善久・小金丸健一・石田栄介：東京低地における沖積砂質土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響, 地盤工学会論文報告集, Vol.42, No.4, pp.101-110, 2002.
 - 5) Yasuda, S. and Matsumura, S.: Microzonation for liquefaction, slope failure and ground response during earthquakes in Fukuoka City, *Proc. of the 4th International Conference on Seismic Zonation*, Vol.3, pp.3-10, 1991.
 - 6) 安田進・田上裕：福岡県西方沖地震における地盤災害と事前ハザードマップの比較, 第41回地盤工学研究発表会, pp.41-42, 2006.
 - 7) 安田進：液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1988.
 - 8) 橋本隆雄・安田進：鳥取県西部地震における液状化被害と地下水位の関係, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, III-514, pp.1027-1028, 2002.
 - 9) 水長徹・安田進・井邑悟史・宇野裕一：地下水位上昇が液状化被害に及ぼす影響の試算, 土木学会第53回年次学術講演会講演集, 共通, pp.120-121, 1998.
 - 10) 中村義秋・村上由高：木曾三川下流部における地震時の堤防機能検討について, 第34回建設省技術研究所報告, pp.96-104, 1980.
 - 11) 土木学会：1983年日本海中部地震震害調査報告書, 1986.

(原稿受理 2009年6月28日)

PRESENT AND FUTURE HAZARD MAPS FOR SOIL LIQUEFACTION

Susumu YASUDA, Eisuke ISHIDA and Naoyuki HOSOKAWA

Recently, hazard maps for soil liquefaction have been prepared in many cities in Japan. These maps must be useful for city planning against earthquakes. However, many uncertainties are involved in the zoning maps. In this paper, present evaluation methods for liquefaction potential are reviewed. Then, several problems to evaluate liquefaction potential and to draw hazard maps are studied. In the evaluation of liquefaction potential, it seemed that special attentions are necessary for the selection of appropriate estimation methods, the assumption of fines contents from soil types and the decision of the depth of water table. In the drawing of hazard maps, it seemed that special attention is necessary for narrow liquefiable areas if the hazard maps are expressed by grids.