

液状化のハザードマップにおける作成方法の現状と問題点

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: isidae@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。それにともなって、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、公開されるようになってきている。

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、今でも大きく二つの問題点を抱えているのではないと思われる。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方法は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ただけ程度である。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、例えば、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。液状化発生の予測手法には、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、②ボーリングデータのN値など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用いる詳細な方法、とあり、ハザードマップの作成もこれらのどれか、または2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。その中でも、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) 各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) 細粒分をかなり含んだ砂質土

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をもとに細粒分含有率が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

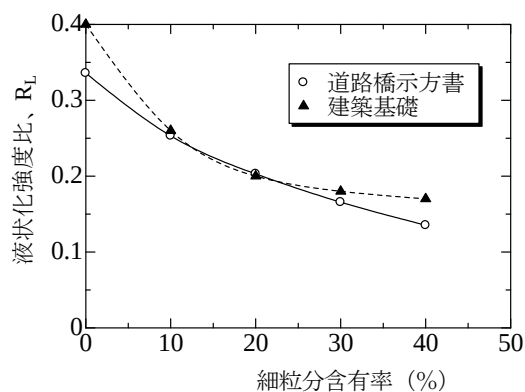


図-1 二つの設計基準類で推定した液状化強度比の違いの比較例

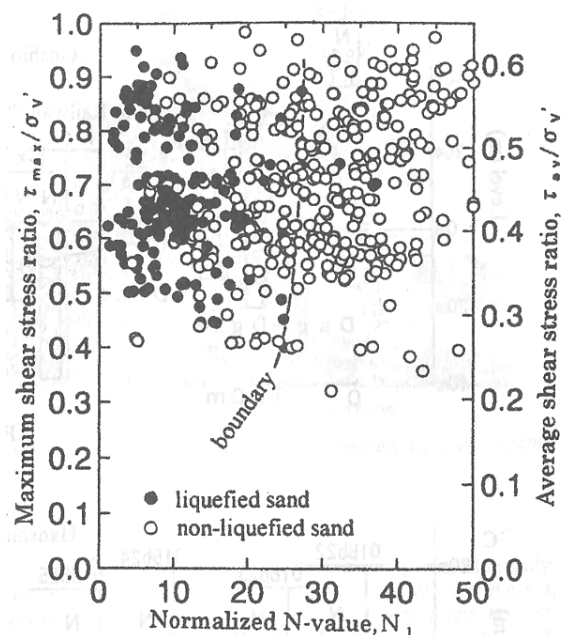


図-2 液状化発生、非発生のデータから液状化発生限界を推定した例³⁾

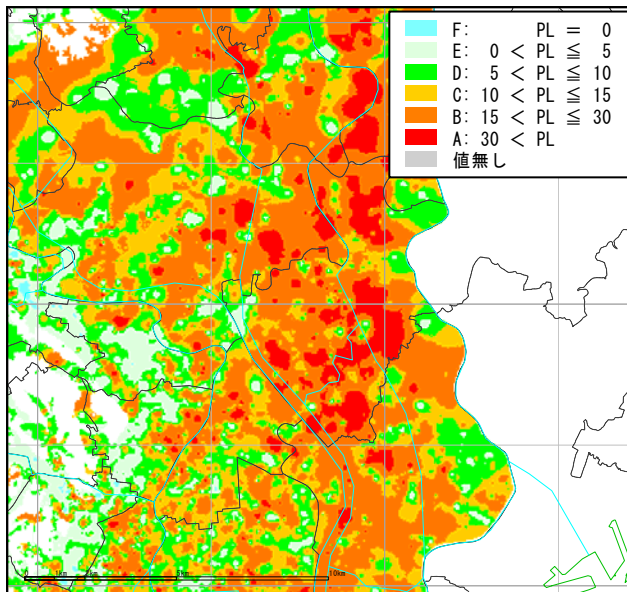
かでハザードマップの結果もかなり異なる場合があることに留意が必要である。

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 値や地震動などをもとに、図-2に示すような液状化は発生するか否かの曲線を描いて、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、その整理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●、○が液状化層、非液状化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。

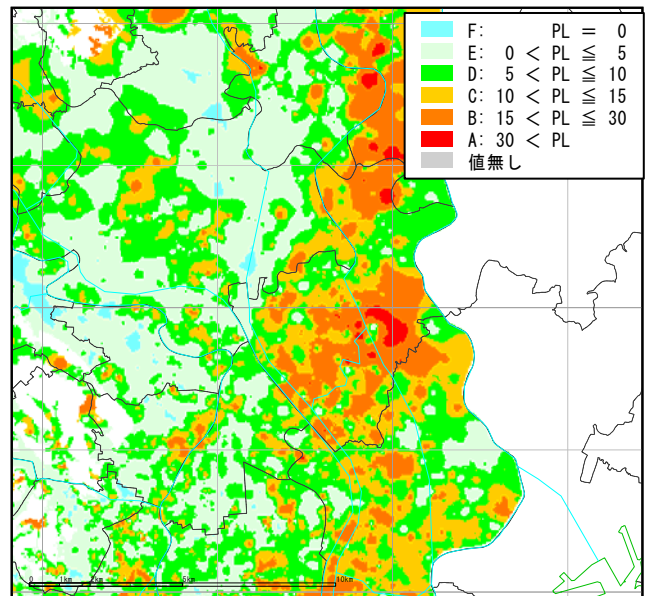
(2) ハザードマップを作成する地区の地盤の特性を考慮する必要性に関して

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ことがある。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



(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

のが
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 $P_L > 15$ 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見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かった³⁾。

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

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

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

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

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。

福岡市につい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。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

しな
かった⁶⁾。沖積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。

以上のように、その地域の地盤条件を考慮し、液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

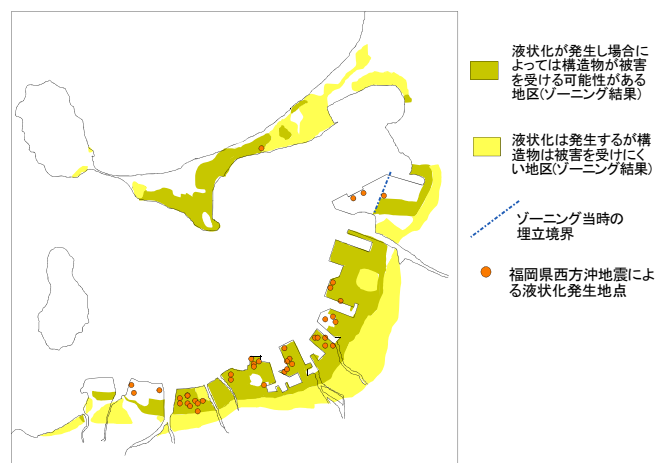


図-4 修正した式による福岡の液状化ハザードマップと実際の液状化発生地点⁶⁾

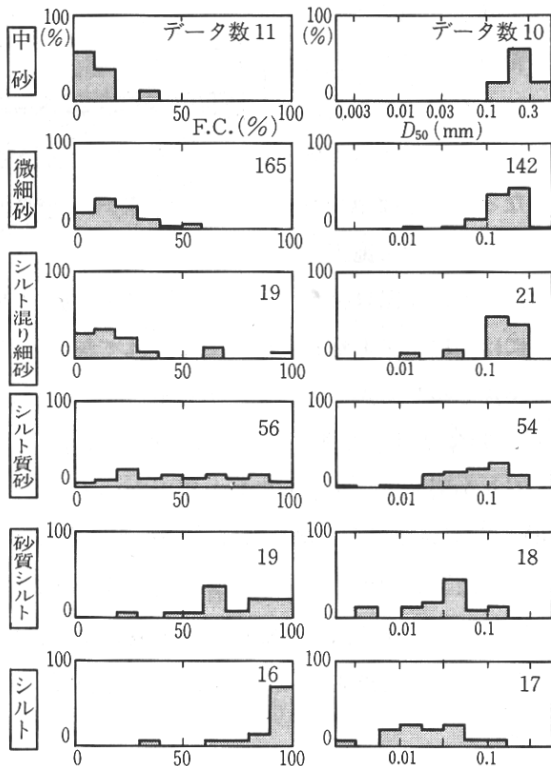


図-5 ボーリング柱状図の土質名と実際の粒径の関係⁷⁾

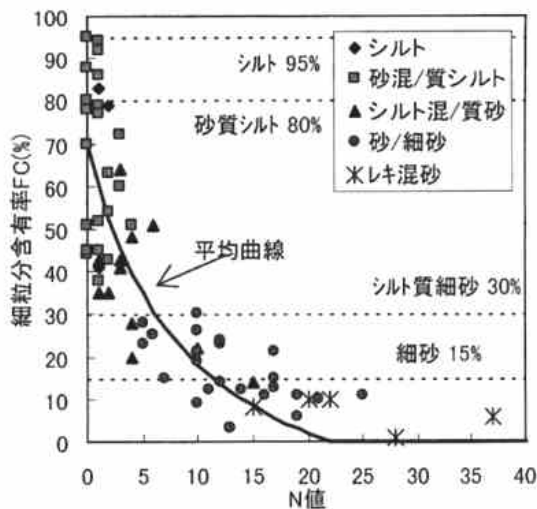


図-6 東京低地における N 値と細粒分含有率の関係⁴⁾

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ラーにはいった土

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や平均粒径は相当ばらついている。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図-6を用いて、N値から細粒分含有率を推定した方が、土質名から推定するよりは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箇所や深度においては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。

(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

通常行われている既往のボーリングでは、地下水位は設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、地下水位が大きく影響することが分かっている⁸⁾。ボーリングを

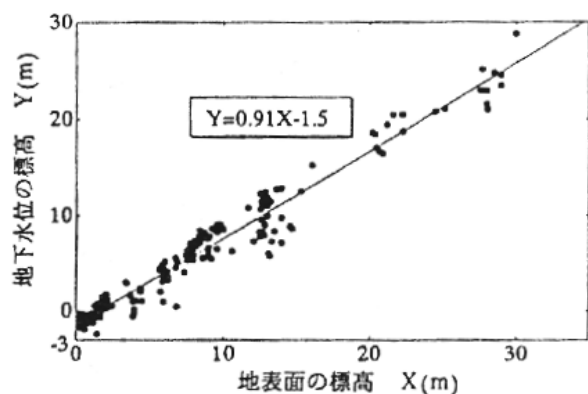


図-7 川崎市の低地における地表面と地下水位の標高の関係⁹⁾

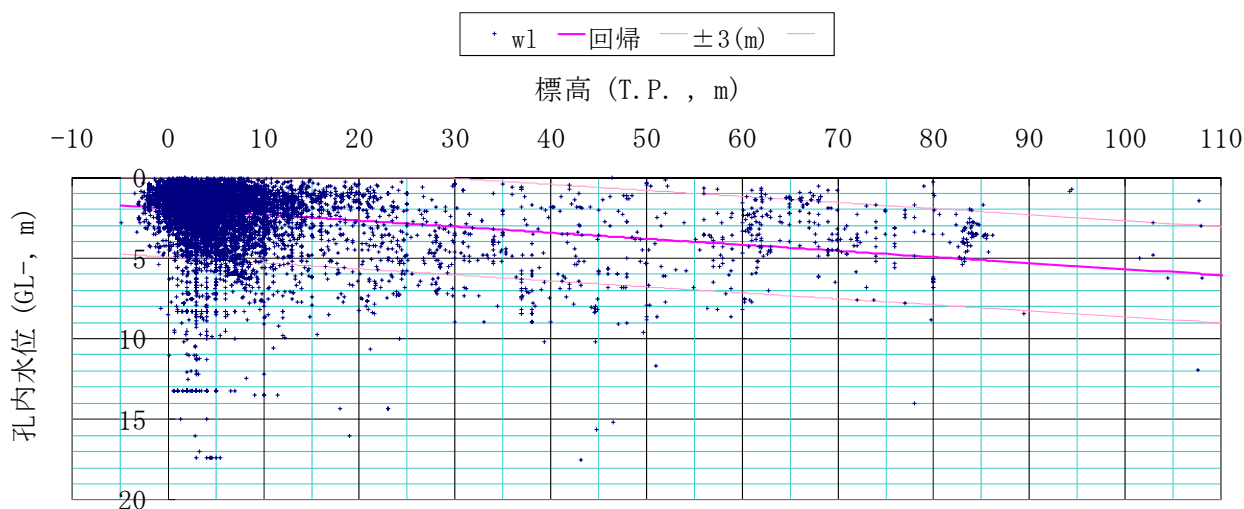


図-8 首都圏の低地における地表面標高と地表面からの地下水位の深さの関係

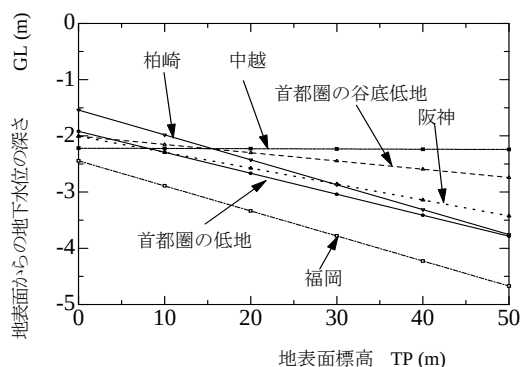


図-9 六つの地区における地表面標高と地下水位の深さの関係

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ままで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に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、実際より高いとか低い地下水位を記載してあるものがある。

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。低地どうしでは同じように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周囲の台地・山地からの地下水流入の影響か、標高に対して地下水位の深さはあまり変化しなかった。このような関係を対象とする地域で予め見いだしておいて、この関係からかなり外れた地下水位は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。

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、その地点の構造物に与える影響を評価することになるが、その際の評価方法として、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

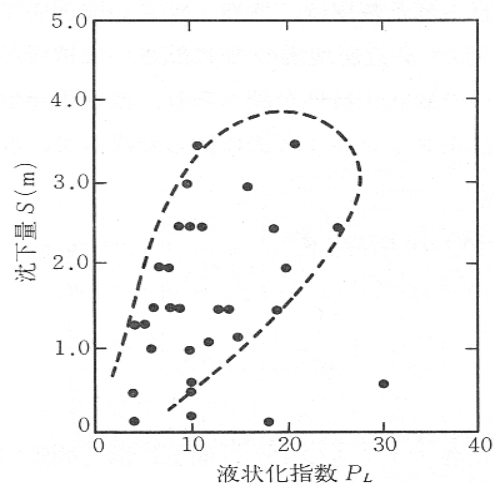


図-10 東南海地震時の木曾三川堤防の沈下量と P_L の関係¹⁰⁾

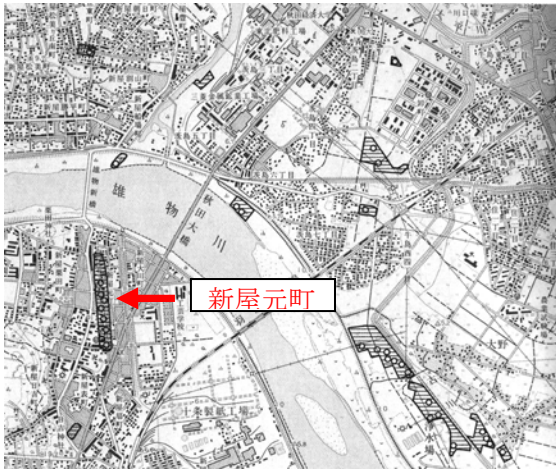


図-11 狭い範囲が液状化した事例¹¹⁾

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を設定して被害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⁾。ところが、このような関係はまだあまり調べられていなく、現在のハザードマップではそこ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、軽い構造物などでは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、液状化は狭い範囲でおきることが多く、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10 m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。

(4) 埋め戻し部の評価

最近の地震では下水道管渠・マンホールなどの地中構造物を建設した際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っ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含み得ていない。

5. まとめ

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に土質名から粒径の仮定を行うと、特に細粒分を含む砂では誤差が大きいので、 N 値と細粒分の関係を予め求めて利用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 値を用いて液状化が構造物に与える影響を評価する場合には、 P_L 値と対象とする構造物の関係を調べるなりして、定量的な評価をすることが必要である。

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，pp1225-1226,1996.
- 4) 亀井祐聡・森本厳・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、pp41-42, 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.

SEVERAL ATTENTIONS NECESSARY FOR THE HAZARD MAPPING ON LIQUEFACTION

Susumu YASUDA, Eisuke ISHIDA and Naoyuki HOSOKAWA

Recently hazard maps on liquefaction have been prepared in many cities and prefectures. These maps are important to estimate liquefaction-induced damage. However, many uncertainties are involved in the maps. In this paper, current evaluation, methods of hazard maps on liquefaction are briefly reviewed. Then, uncertainties involved in the maps are discussed. The following conclusions are derived from the discussion. First, it must be noted that several uncertainties are included in the estimation method of liquefaction potential. Second, several mistakes included in existing boring data must be adjusted. Third, special attention is necessary in the procedure of zoning if narrow areas liquefy.