

首都圏低地部における液状化推定

亀井祐聡¹・森本巖¹・安田進²・清水善久³・小金丸健一³・石田栄介⁴

¹基礎地盤コンサルタンツ(株) 防災部 (〒102-8220 東京都千代田区九段北 1-11-5)

²東京電機大学 理工学部 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³東京ガス(株) (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)

⁴日本技術開発(株) (〒164-8601 東京都中野区本町 5 丁目 33-11)

著者らはこれまでに、首都圏の低地地盤で採取した上部有楽町層の土質試験データを用いて、N 値と細粒分含有率 FC との関係について検討し、液状化強度推定式を提案してきた。本報告ではこれらの手法を用いて、関東地震において液状化履歴がある地点と無い地点に対し液状化判定を行い、予測法の適用性について検討した。この結果、首都圏低地部の沖積地盤では、全国で広く用いられる一般的な判定手法よりも提案手法の方が適用性が高いことが分かった。さらに、この液状化判定手法を GIS に導入し、大量のボーリングデータを用いて、液状化ゾーニングを行った。通常の判定手法では、低地部のほとんどで P_L 値が 5 を越えるが、提案する手法では、 P_L 値が 5 以上の領域はある程度限定される結果となった。

Key Words : Liquefaction, Metropolitan Area, GIS

1. はじめに

東京の低地部には、細粒分を多く含む沖積砂層が広く分布している。著者らはこのような砂の不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験を行い、液状化強度特性の把握を行ってきた¹⁾²⁾。試験の結果、N 値が小さな砂でも、細粒分を多く含んでいるため、その繰返し三軸応力比 ($DA=5\%$ 、繰返し回数 20 回、以下では液状化強度と呼ぶ) はそれほど低くないことが分かった。全国で広く用いられている液状化強度の推定手法、例えば道路橋示方書³⁾の方法 (以下、道路橋) をこのような砂に適用した場合、非常に小さな液状化強度を与えてしまう。著者らはこれまでに、道路橋の強度推定式を細粒分を多く含む東京の低地部の砂に合うように修正した式を提案してきた⁴⁾。

本検討ではこの手法を一部みなおして、関東地震において液状化履歴がある地点と無い地点⁵⁾に対し液状化判定を行い、その適用性について検討した。さらに、この液状化判定手法を GIS に導入し、大量のボーリングデータを用いて、面的な液状化推定を行った。

2. 沖積砂質土に対する液状化強度推定

図-1 は上部有楽町層で採取した不攪乱の砂質土及びシルトの繰返し三軸試験データを用いた ΔN と細

粒分含有率 FC の関係である。縦軸の ΔN は道路橋の補正 N 値 N_a (細粒分含有率 FC と上載圧を考慮した N 値) と液状化強度 R_L の関係を用い、実際の室内試験により求められた繰返し三軸応力比に等価な N 値 N_a を逆算し、原位置の N 値 N_1 を差し引いた値である ($\Delta N = N_a - N_1$)。よってこの値 ΔN は液状化強度の細粒分による N 値増分とみることができる。図-1 のように FC が 40%程度まで ΔN は増加し、FC が 40%以上では、細粒分による N 値の増分はみられない。

また、著者らが提案した上部有楽町層の N 値と FC の関係⁶⁾、

$$FC = \begin{cases} 916 / (N + 9.21) - 29.5 & \dots N < 22 \\ 0 & \dots N \geq 22 \end{cases}$$

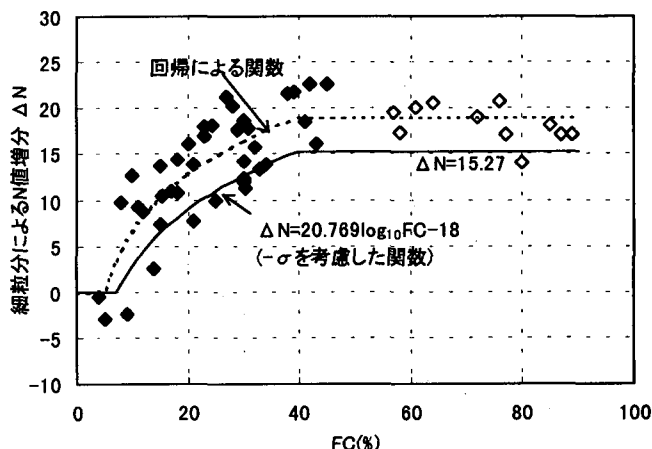


図-1 沖積土の FC と N 値増分 ΔN の関係

を合わせて用いることにより、粒度データがない場合でも N 値から一義的に液状化強度 R_L が推定可能になり、本研究のように大量のボーリングデータを扱うような場合、粒度データが無いことが多いため都合が良い。N 値と R_L の関係を図-2 に示す。ただし図-1 に示す ΔN と FC の関係で、本来は回帰曲線そのものを用いるべきであるが、ここでは安全側を考え σ を考慮したものをを用いた。 ΔN と FC の関係は次式でモデル化した。

$$\Delta N = \begin{cases} 0 & \cdots FC < 8\% \\ 20.769 \times \log_{10}(FC) - 18 & \cdots 8\% \leq FC < 40\% \\ 15.27 & \cdots FC \geq 40\% \end{cases}$$

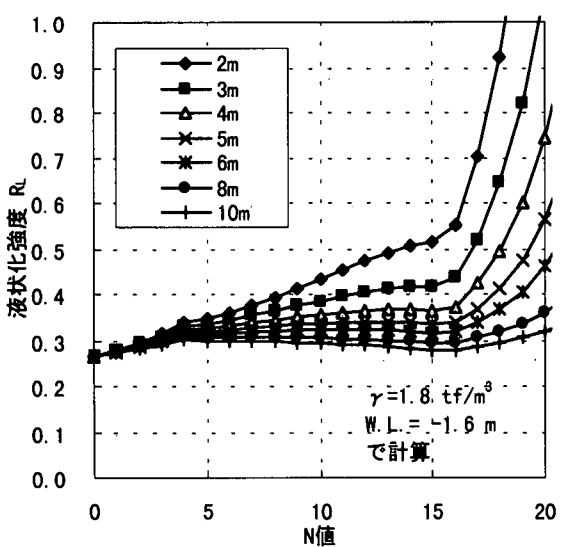


図-2 N 値と液状化強度 R_L の関係

3. 実際の地盤への適用例

これまで述べてきた上部有楽町層の N 値と細粒分含有率の関係や提案式について適用性を検討する。対象は東京都の墨田区隅田と葛飾区西亀有の 2 地点の粒度特性及び液状化強度のデータである¹⁾²⁾。なお、関東地震では、両調査地点のうち前者は液状化履歴が無く、後者は液状化したとされている⁵⁾。

隅田地点の地盤は、図-3(a)に示すように、表土下に厚さ約 5m、N 値が 5~10 程度のゆるい沖積砂質土層、その下が N 値 5 以下の軟弱なシルト層となっている。細砂層の細粒分は 10~30%、直下のシルト混じり細砂層は、20~50%程度と非常に細粒分を多く含んでいる。液状化強度は砂層で 0.35~0.45 と高く、シルト層で 0.3 弱となっている。

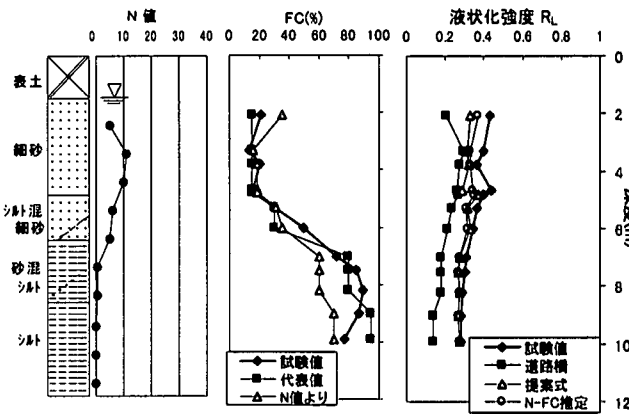
一方西亀有地点の地盤は、図-3(b)に示すように、N 値 10~30 程度の全体的に締まった細砂・中砂が卓越しており、細粒分含有率は一部を除き 10%程度

かそれ以下で、隅田地点の砂とはかなり異なる。液状化強度は盛土下のシルト質微細砂層で 0.3~0.35 でそれ以深の土層では概ね 0.2~0.3 である。

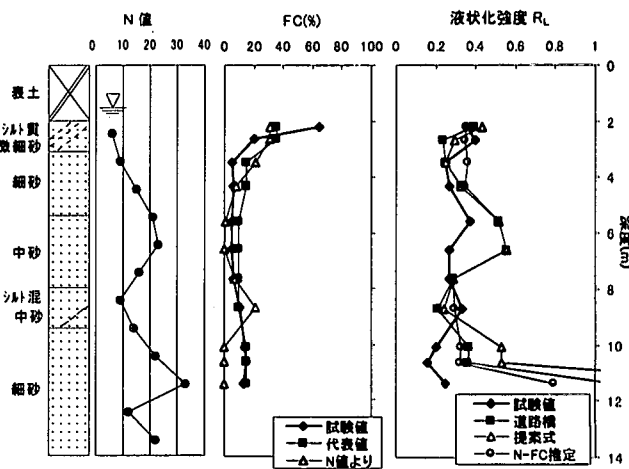
これらの地盤について、提案式を用いて液状化強度を推定した結果を図-3 に示す。細粒分含有率 FC の深度分布図には試験値と土質より推定された代表的な値⁷⁾、N 値と FC の関係から推定した値を示している。液状化強度の深度分布図は、試験値に加え、実際の N 値と FC から道路橋式と提案式により推定した値および N 値と FC の関係を利用した推定値(図-2)を示している。

隅田地点では、細粒分含有率が深さ方向に増大する状況を表現できている。その絶対値も 7m 以深のシルト層で約 20%の開きがあるものの砂質土層は良く一致をしている。液状化強度は道路橋式で推定すると、試験値に対し過小評価となるが、沖積砂層に適するように改良した提案式による推定は良好な結果である。

一方西亀有地点では、細粒分含有率の推定は良好な結果である。しかし液状化強度は、シルト質砂層



(a) 隅田地点



(b) 西亀有地点

図-3 液状化強度の推定結果

では良く一致しているが、N 値 20 以上の比較的良好な砂の層では、道路橋式、提案式とも試験値との差が大きい。これは使用したデータが前述のような通常のサンプリング手法により採取した試料に基づくものであるのに対し、道路橋式及び提案式（きれいな砂に対しては道路橋と同等）は、N 値の高い砂に対し凍結サンプリングによる試料を用いた結果より導かれたものであることが原因の一つであると思われる。

隅田、西亀有の地盤について液状化判定を行った。結果を図-4 に示す。液状化強度 R_L の値は、試験値のほか、道路橋式や提案式（FC は粒度試験の結果使用）、N~FC 関係を利用した提案式の値を用いた。設計震度は大正関東地震を想定して $k_{hc}=0.2, 0.3, 0.4$ で計算した。

液状化履歴のない隅田三丁目について、道路橋式では $k_{hc}=0.2$ でも砂層のほとんどが $F_L=1.0$ を下回るのに対し、試験値や提案式では 1.0 を越えている。 $k_{hc}=0.3$ のケースでは、道路橋式で全面的に F_L が 1.0 を下回り、提案式では砂質土層最上部で 1.0 を越え

ているが、それ以深が 1.0 を下回っている。試験値では砂質土層中部が $F_L=1.0$ 程度、砂質土層下部は 1.0 を下回っている。 $k_{hc}=0.4$ ではどの手法を使っても判定対象層の全てが $F_L=1.0$ を下回る。

西亀有地点では細粒分が少ない土が多いので、提案式と道路橋式の結果はそれほど大きく変わらない。試験値による計算で、 $k_{hc}=0.3$ 以上ではほぼ全ての深度で F_L が 1.0 を下回る。提案式や道路橋式の計算では、 $k_{hc}=0.3$ で、N 値の高い層は 1.0 を下回らないが、N 値の低い層は 1.0 を下回る。 $k_{hc}=0.4$ ではどの方法を使っても砂層のほとんどが $F_L=1.0$ を下回る。

隅田地点のような細粒分を多く含むゆるい地盤については提案式を用いれば、液状化強度をより適切に推定することで、実際の液状化の被害程度に近づくことはできるがと考えられる。

4. GIS を用いた東京低地の液状化推定

有楽町層が広がる東京の東部低地に対して、地理情報システム (GIS) ⁹⁾ を利用して、 F_L 法に基づき、面的な液状化推定を行う。液状化強度の推定式は前述の首都圏地盤でのデータに基づいて道路橋式を修正したものを使用する。設計震度 k_{hc} は関東地震レベルを想定して 0.3 とした。判定対象とする土層は道路橋示方書に準じて FC が 35%以上の土質は判定対象外とし、大多数の FC が 35%を超える粘土、シルト、砂質シルトは除外した。また提案手法では FC は N 値から定めることとしており、FC が 35%のときの N 値は 5 であるが、FC と N 値の関係はバラツキが大きいため N 値が 5 以下で足切りするとかなり危険側の判断をする可能性もあることから、少し安全側をみて N 値 3 以下を判定対象外として計算した。ここで、細粒な土質でも埋立土については 1987 年千葉県東方沖地震や 2000 年鳥取県西部地震などで液状化の事例があるが、このような土については本検討では考慮されておらず、あくまでも沖積砂質土が対象である。

これらの条件による判定結果の分布図を図-5 に示す。判定地域は東京東部の葛飾区を中心とした低地及び隣接する三郷市をはじめとする埼玉県南部の低地部である。

P_L 値が 5 以上で液状化の可能性があると仮定すれば、N 値が小さい地盤が広がる低地部にもかかわらず、 P_L 値が 5 以上の領域はある程度限定された結果となった。これは、提案した FC と ΔN の関係により液状化強度を沖積土の試験結果に合わせて道路橋よりも大きめに見積もっていることと、特に N 値が 3 以下の主にシルトや砂質シルトといった土層を判

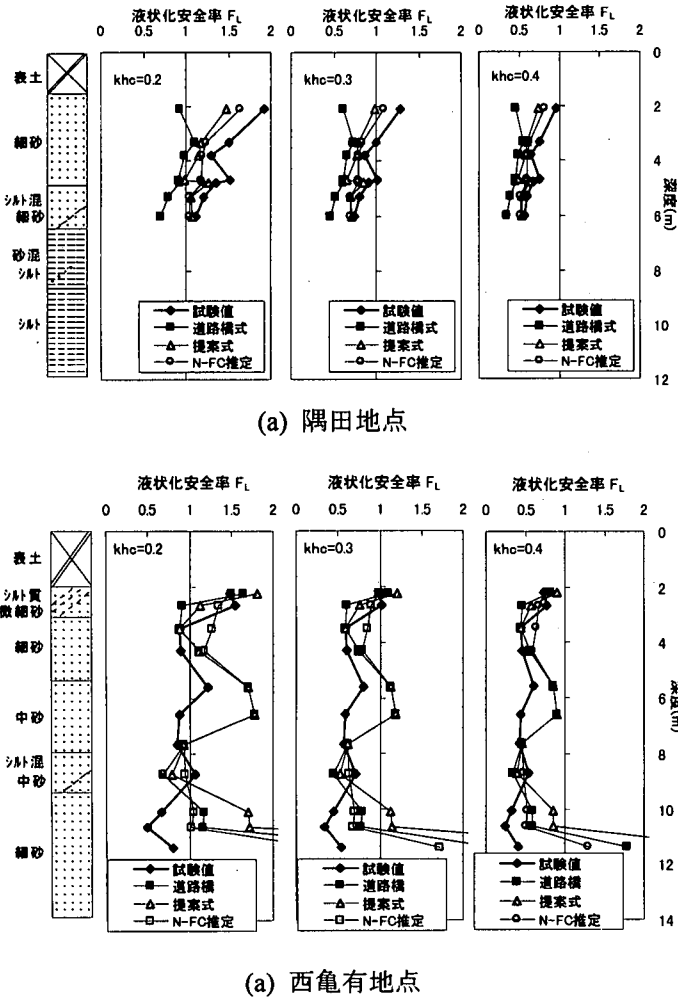


図-4 液状化判定結果

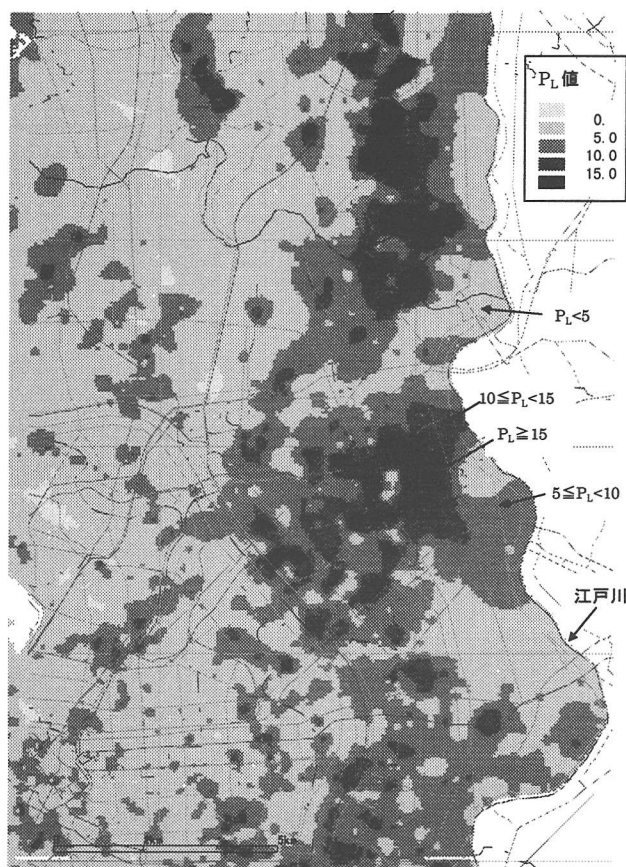


図-5 P_L 値分布図 ($k_{hc}=0.3$)

定対象外としていることが原因であると思われる。

次に東京低地の液状化推定法として代表的な東京都土木技術研究所(以下、都土研)による結果⁷⁾と比較すると、本検討で P_L 値が 10 以上となった地点は、都土研の示している「液状化の可能性大」の領域かその付近にあることが多く、判定結果は全体として大きく違わない。一方、 $P_L < 5$ の液状化がほとんど発生しないと考えられる地域については、都土研の結果に比べかなり絞り込まれている。但し、都土研の液状化地図には P_L 値による判定だけでなく、表層砂層から算出した F_L 値による判定結果も考慮されている上、設計震度(地表面加速度)も堆積層の厚さで地域により異なる(概ね地表面加速度 0.25G)ので純粋な比較はできない。

5. まとめと課題

首都圏の土質特性を考慮した液状化推定法の適用性について検討した。細粒分を多く含む N 値の小さい地盤については、道路橋式に比べ液状化強度をより適切に推定することで、これにより液状化判定を行えば実際の液状化の予測精度を高めることができると考えられる。しかし液状化履歴に着目し今回検討した 2 地点を比較しをたとき、液状化の程度をは

っきりさせるほどの違いは出てこなかった。今後さらなる検討が必用である。

またこの提案式を用いて東京の低地部で GIS を用い面的な液状化判定を行った。この結果ゆるい地盤が広がる低地部にもかかわらず、 P_L 値が 5 以上の領域はある程度限定された結果となり、液状化履歴分布と比べると、比較的对応する結果となった。

今回は沖積砂質土に対する液状化強度推定式の適用性の検討を行ったが、今後は臨海部に広がる埋立地盤に対する評価も行う必要があると考えている。関東地震等の事例を踏まえて、さらなる検証を行い、液状化ゾーニングの精度向上を図りたい。

謝辞：本研究は財団法人地震予知総合研究振興会の研究の一環として行ったものである。関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 松本浩一・安田進・清水善久・小金丸健一・岩谷裕，東京の沖積砂層における液状化強度の問題点，土木学会55回年次学術講演会概要集，2000.
- 2) 安田進・清水善久・小金丸健一・糸井秀利・小鹿大介，関東地震で液状化した地点から採取した試料の特性，地盤工学会関東支部，2001.
- 3) (社)日本道路協会，道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1996.
- 4) 森本巖・亀井祐聡・安田進・清水善久・小金丸健一・中山渉，首都圏地盤における液状化強度推定精度向上に関する検討，第55回土木学会年次学術講演会概要集，2000.
- 5) 若松加寿江，日本の地盤液状化履歴図，東海大学出版会，1991.
- 6) 亀井祐聡・森本巖・安田進・清水善久・小金丸健一，首都圏地盤における沖積砂質土の細粒分含有率に関する検討，第35回地盤工学研究発表会概要集，2000.
- 7) 東京都土木技術研究所，東京低地の液状化予測，1987.
- 8) 磯山龍二・石田栄介・安田進・東畑郁生・清水善久・小金丸健一，超高密度地震計ネットワークを用いたリアルタイム液状化空間分布推定方法，第26回地震工学研究発表会講演論文集，2001.8