

スウェーデン式サウンディング試験結果を用いた液状化評価に関する研究

－ 現場試験結果を用いた検討 －

日大生産工(院) ○井上 大地 日大生産工 下村 修一
日大短期 酒匂 教明

1. はじめに

現在の簡易液状化判定法である F_L 法¹⁾は、標準貫入試験(以下、SPT試験)の N 値を用いた評価方法が構築されている。一方で、狭い敷地に対応が可能で、相対的に安価であるという理由から、宅地の地盤調査の大半では、スウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS試験)が採用されている。同試験結果の一つである N_{sw} 値から N 値を関連付けて液状化判定を行う場合、建築基準整備促進事業(以下、基整促)の報告書²⁾を参考に F_L 法に準じた液状化の評価方法が示された。しかしながら、SPT試験とSWS試験では、貫入メカニズムが異なることから、 N_{sw} 値と N 値の関係には大きなばらつきが見られ、評価精度に疑問が示された³⁾。そのような背景の下、本研究では N_{sw} 値から直接液状化強度を判定する方法の構築を目的としている。

熊田⁴⁾は室内試験により、 N_{sw} 値と液状化強度の関係を明らかにし、 N_{sw} 値から直接地盤の液状化強度を推定できる可能性を示したが、フィールド地盤での検証がなされていない。そこで、本報では液状化強度が明らかになっているフィールド地盤を対象にSWS試験を実施し、 N_{sw} 値と液状化強度の関係を検討した。

2. 対象地点

土木研究所では、2011年の東北地方太平洋沖地震(以下、当該地震)において液状化の影響があった地点を中心に、関東地方の14地点でSPT試験、室

内土質試験および液状化試験を実施した⁵⁾。その内、本報では猿江恩賜公園(以下、猿江)、舞浜に着目し、SWS試験を実施した。図1に実施地点の位置関係を示す。

なお、文献の調査地点とほぼ同地点で実施するため、それぞれの土地の管理者および調査担当者などにヒヤリングを実施し調査地点を割り出した。調査地の地歴及び調査位置の詳細を以下に示す。

a) 猿江恩賜公園

東京都江東区の猿江周辺は三角州であり、江戸時代初期(1680年以前)に埋め立てられた。東京都立猿江恩賜公園に当たる土地は、1733年から昭和に至るまで貯木場として利用されていた。その後、貯木槽が埋め立てられ、公園として利用されることになり、1976年から1978年には地盤改良が実施された。

調査は公園内の北部で、地盤改良された場所を避け、江戸時代の埋土の部分に着目し、調査位置が設定された。なお、当該地震では、調査地付近で液状化被害は確認されていない⁵⁾。

b) 舞浜

調査地周辺は、東京湾沿岸の1968年～1970年に埋め立てられた地域である。調査は、千葉県浦安市舞浜2丁目地先の国道357号線沿い(首都高速道路の高架脇)で実施した。なお、当該地震では、調査地付近では噴砂や橋脚の抜け上がりなどの液状化被害が確認された⁵⁾。

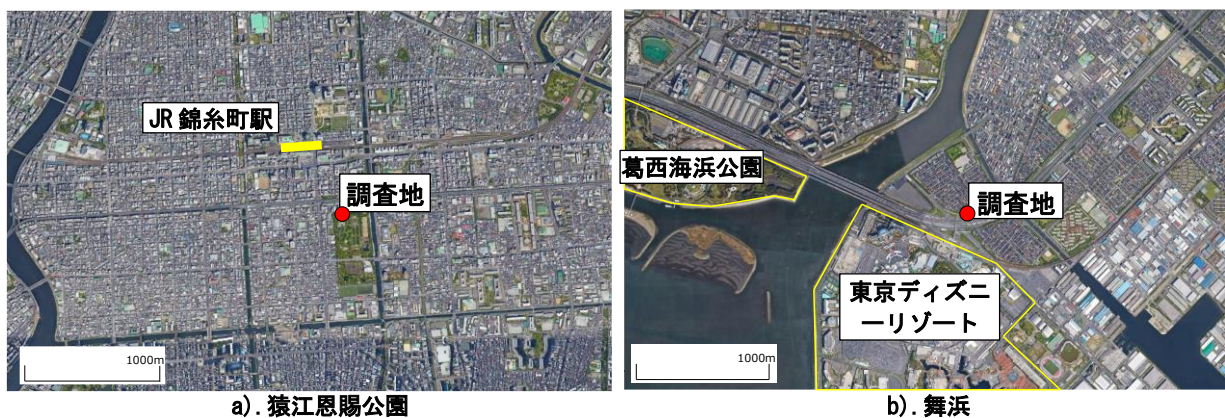


図1 実施地点 (Google Earth に加筆)

Study on evaluation of liquefaction potential using Swedish weight sounding test result
－ Examination using field test results －

Daichi INOUE, Shuichi SHIMOMURA and Noriaki SAKO

3. 原位置試験及び室内土質試験結果

図2にボーリング試験結果, SPT試験結果, 液状化試験用供試体の採取深度, SPT試験試料と液状化試験用供試体から求めた細粒分含有率 F_c , 塑性指数 I_p を示す⁵⁾。これらに筆者らが実施したSWS試験結果を併記した。なお, 本報告ではSWS試験の適用範囲である10m以浅を検討対象とした。

土質柱状図とSPT試験結果より, 猿江は, 地表から順に盛土, 埋土(江戸時代初期), 砂質土層, 粘性土層が確認され, $N=3$ 以下の軟弱地盤から構成されている。舞浜は, 地表から順に盛土, 埋土(1968年～1970年の浚渫土), 砂質土層, 粘性土層が確認された。

SWS試験は, 猿江は2回, 舞浜は4回実施した。図2に示すように N_{sw} 値は調査範囲内でのばらつきが小さい。

文献⁵⁾では図2に示すように複数の深度において試料採取し, 液状化試験が実施された。また, 図3に本検討対象に採用した液状化試験結果を示す。なお, 液状化試験に使用した供試体は, チューブサンプリングにより採取されており乱れが否めないことや液状化試験時に使用したサンプリング位置がボーリング試験と同一深度とは限らないことから試験結果にばらつきが確認された。そのため, 文献⁶⁾に記載された次の方法に従い, ばらつきが小さいと判断される供試体の試験データを選定した。

- ・SPT試験試料と液状化試験供試体における細粒分含有率 F_c の差が20%以下であること
- ・SPT試験試料と液状化試験供試体における乾燥密度 γ_d の差が 0.2g/cm^3 以下であること
- ・原位置(PS検層)に対して, 液状化試験供試体の初期せん断剛性 G_0 が $0.5\sim 1.5$ 倍以内であること
- ・液状化試験において両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達する時の繰返し応力比 CSR と繰返し回数 N_c の関係がきれいな右下がりの傾向を有すること

なお, 一部深度は, 以下の理由より本検討対象から除外した。

- ・猿江-1, 猿江-4は, ボーリング試験及び物理試験から液状化しない粘性土層のため
- ・舞浜-2, 舞浜-4は, 全体的に供試体の試験データの繰返し応力比 CSR と繰返し回数 N_c の関係がきれいな右下がりの傾向を示さなかったため

なお, 猿江-2は, ボーリング試験結果による土質では粘性土層であるが, 物理試験結果において, 細粒分含有率 F_c が50%以下である砂質土であるため除外しなかった。

図3中の塗りつぶしが選定データであり, このデータを用いて図中の液状化強度曲線を求め, 繰返し回数15回から求めた繰返し応力比 CSR を

液状化強度 R_{15} と定義し, 図中に示す。

以後は, 猿江-2, 猿江-3, 舞浜-1, 舞浜-3の4深度を対象に検討する。

4. 検討結果

(1) N_{sw} 値と N 値の関係

図4に N_{sw} 値と N 値の関係を記す。図中には基整促²⁾で検討された同一サイトでのSWS試験結果とSPT試験結果, N_{sw} 値から N 値を推定する稲田式⁷⁾, 基整促の式(提案式①, ②)²⁾を併記した。

今回の試験結果は, 基整促のデータの下限に位置し, 基整促の提案式②, 比較的良好な相関関係が得られた。

(2) 補正 N 値と液状化抵抗比 τ/σ'_z の関係

図5に指針¹⁾に示される補正 N 値(N_a)と液状化抵抗比 τ/σ'_z の関係及び猿江と舞浜の結果を示す。また, 平均細粒分含有率 $\bar{F}_c$, 平均塑性指数 $\bar{I}_p$ を併記する。 N_1 , N_a 及び液状化抵抗比 τ/σ'_z は次式により求めた。

$$N_1 = \sqrt{\frac{98}{\sigma'_z}} N \quad (1)$$

$$N_a = N_1 + \Delta N_f \quad (2)$$

$$\tau/\sigma'_z = 0.57R_{15} \quad (3)$$

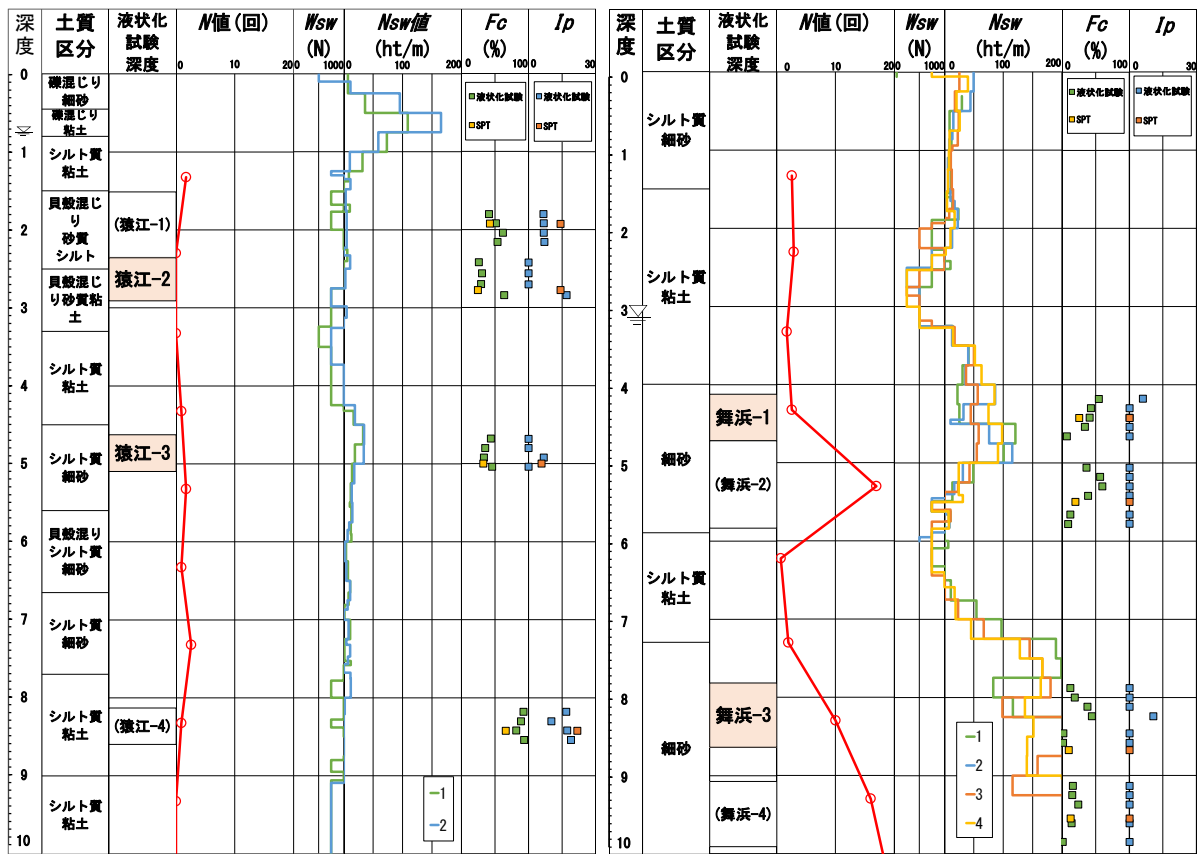
有効上載圧 σ'_z (kPa) は, 物理試験から得られた乾燥密度 γ_d , 含水比 w から求めた。また, ΔN_f は物理試験から得られた細粒分含有率 F_c から指針¹⁾により求めた。なお, 細粒分含有率 F_c に幅があるため, 最小と最大を使用し N_a を求めた。

せん断ひずみ振幅 $\gamma=5\%$ に対して猿江-2, 猿江-3は上方, 舞浜-1, 舞浜-3は下方に分布した。猿江-2及び猿江-3は, 細粒分含有率 F_c 及び塑性指数 I_p が舞浜に比べて高いこと, N 値が非常に小さく緩い砂層のためサンプリング時の密度増加により液状化強度が増加した可能性もあることから大きく上方に分布した可能性が考えられる。一方, 舞浜-1及び舞浜-3は, 細粒分は含まれているが, ほぼ非塑性のため下方に分布した可能性がある。また, 埋立て年代が異なり, 土圧係数の違いの影響も出ていると考えられる。

(3) N_{sw1} と原位置液状化強度 R の関係

熊田⁴⁾は室内試験により, 細粒分を含まないきれいな砂の N_{sw} 値を有効上載圧 σ'_z で基準化した N_{sw1} と液状化強度 R の関係を明らかにし, 強い相関が得られることを確認し, (4)式を提案した。

$$N_{sw1} = \frac{98}{\sigma'_z} N_{sw} \quad (4)$$

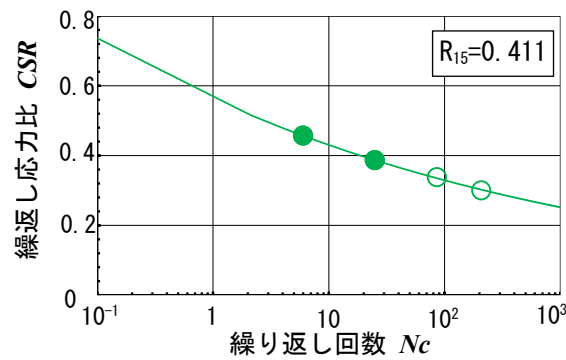


()内は除外した液状化試験採取深度を示す

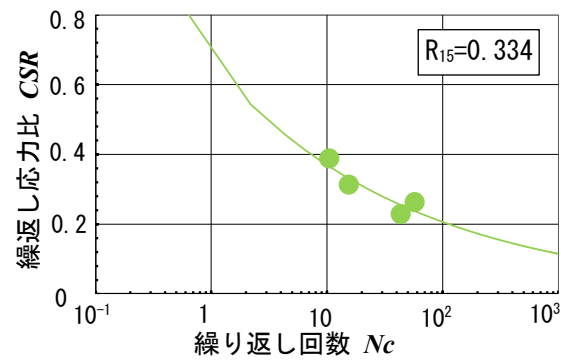
a) 猿江恩賜公園

b) 舞浜

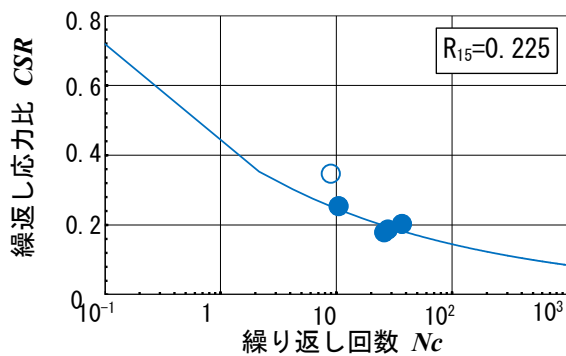
図2 原位置試験及び土質試験結果



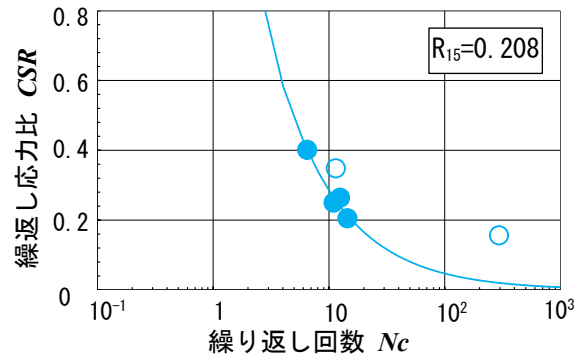
a) 猿江-2



b) 猿江-3



c) 舞浜-1



d) 舞浜-3

図3 液状化試験結果(文献⁵⁾から引用)

図6に文献⁴⁾の N_{sw1} と原位置の液状化強度 R の関係及び猿江、舞浜の結果を示す。なお、有効上載圧 σ'_z は、前項(2)と同様に求めた。また、平均細粒分含有率 $\bar{F}_c$ 平均塑性指数 $\bar{I}_p$ を併記した。

室内試験結果に対し、猿江は上方、舞浜は下方に分布し、図5と同じ傾向を示した。 N 値を用いた液状化強度の評価と同様に、細粒分含有率 F_c が大きいほど同一の N_{sw} 値では原位置液状化強度 R が大きくなるとすれば、データはきれいな砂の室内試験結果の上方にプロットされと考えられる。猿江の結果は、室内試験結果の上方に位置しているが、非常に大きく前述のようにサンプリングによる密度増加の可能性がある。一方、舞浜は室内試験の下方に位置し、図5の関係と同様に塑性指数 I_p が極めて小さい影響が出ていると考えられる。

5. おわりに

本報告の検討では、 N_{sw} 値と原位置液状化強度 R の関係において、室内試験結果に対して現場試験結果に明確な関係は得られなかった。

今後は、文献⁵⁾の調査地点のうち、他現場でもSWS試験を実施し、有効データを追加するとともに室内試験も含めて、 N_{sw} 値と液状化強度の関係に及ぼす細粒分含有率 F_c の影響を検討する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国立研究開発法人土木研究所の谷本俊輔氏、東京都東部公園緑地事務所の関係各位並びに国土交通省関東地方整備局の千葉満氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針, 2001. 10
- 2) 東京ソイルリサーチほか:平成25年度建築基準整備促進事業「小規模建築物に適用する簡易な液状化判定手法の検討」の報告書, 2014. 3
- 3) 大島ら, スウェーデン式サウンディング試験結果と N 値, q_u との相関の再検討, 第52回地盤工学研究発表会, 2017. 7
- 4) 熊田健太:スウェーデン式サウンディング試験結果から直接地盤の液状化強度を評価する方法に関する研究-室内試験および液状化被害記録に基づく検討-日本大学大学院修士論文, 2017. 3
- 5) 佐々木ら:細粒分を含む砂の液状化強度の評価に関する再検討, 土木研究所資料, 第4352号, 2016. 3
- 6) 地盤工学会 エネルギーに基づく液状化予測手法に関する研究委員会, エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム 委員会活動報告書及びシンポジウム論文集, 2019. 3
- 7) 稲田倍穂:スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, Vol. 18, No. 1, pp. 15-18, 1960

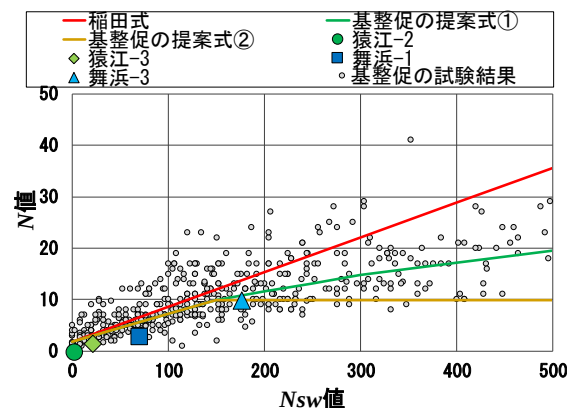


図4 N_{sw} 値と N 値 (基整促³⁾に加筆)

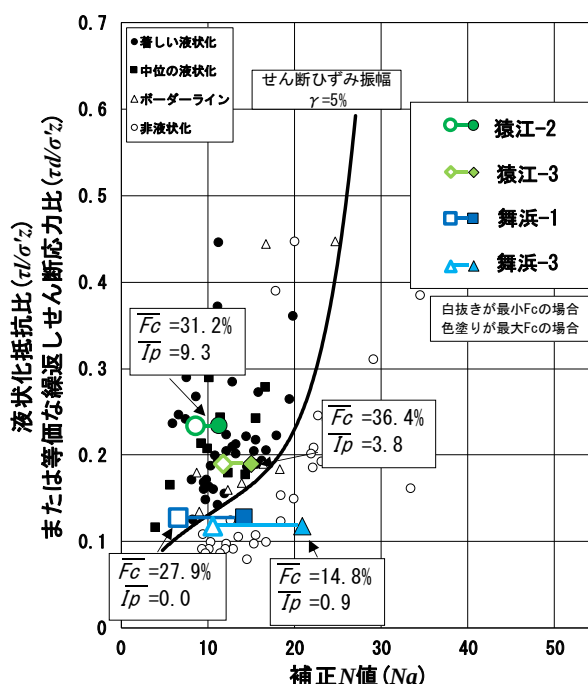


図5 補正 N 値と液状化抵抗比 τ_l/σ'_z の関係 (指針¹⁾に加筆)

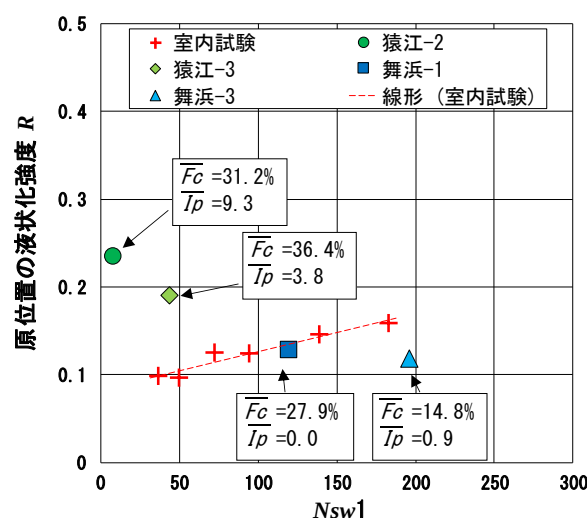


図6 N_{sw1} と原位置液状化強度 R の関係 (文献⁴⁾に加筆)