

東京層砂層の液状化強度に関する一考察

森 伸一郎¹・沼田 淳紀²

¹正会員 工博 飛鳥建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (〒 270-0222 千葉県関宿町木間ヶ瀬 5472)

²正会員 工修 飛鳥建設株式会社 技術研究所 研究員 (〒 270-0222 千葉県関宿町木間ヶ瀬 5472)

東京都新宿区四谷の江戸城四谷御門外の一連の遺跡調査において、江戸城外堀の盛土周辺の洪積層である東京層砂層が液状化したことが確認された。この地点の東京層砂層の液状化特性を検討した。まず、周辺地盤の既往の標準貫入試験結果と N 値に基づく推定液状化強度の統計分析を行った。次に、スウェーデン式サウンディング試験に基づいて東京層砂層の原位置液状化強度を推定した。さらに、液状化地点の不攪乱試料を用いて液状化試験を行い、この推定の妥当性を検討した。この結果、東京層砂層の上部付近には液状化強度の低い部分が、それ以深の東京層砂層と比較して相対的に多く存在していることがわかった。

Key Words : *liquefaction, historical earthquake, Pleistocene(diluvial) soil, Tokyo Formation, liquefaction resistance, Swedish sounding, SPT, cyclic triaxial test, statistics*

1. はじめに

森・池田^{1)・2)}は、東京都新宿区四谷の遺跡調査で、噴砂脈などの地震の痕跡を調べることににより、更新統(洪積層)である東京層砂層が17世紀から現在までに3度の地震で液状化したことを示した。本論文は、この調査地の地盤調査と土質試験を行うとともに、既往の地盤調査資料を分析することにより、東京層砂層の液状化強度特性に関して考察したものである³⁾。

一般に、実務における液状化の検討対象地盤は、埋立地や沖積低地である^{4)・5)}。一方、洪積層については、洪積層での液状化事例の報告がない^{6)・7)}と認識されていることから、実際の設計においても液状化判定の対象層から除外される場合がある⁷⁾。このように、経験的に洪積層は液状化しない、と広く捉えられている。

原子力発電所建設などの高い耐震安全性を要求される構造物建設に伴い、密な砂の液状化強度や東京層砂層の液状化強度に関する研究^{8)・9)・10)}が行われ、N値が大きいの、すなわち、液状化強度の大きい地盤に対する液状化強度評価方法^{11)・12)}が開発されている。一方で、東京層砂層は東京低地の沖積層の基盤層となるが、Ohsaki¹³⁾や東京都土木技術研究

所¹⁴⁾により膨大なボーリング調査に基づく物理特性や、力学特性、N値に関する統計的な研究はあるものの、前述のような認識から液状化特性については研究例が少ない。すなわち、洪積層である東京層砂質土層(本論文では東京層砂層と略す。)の液状化特性は未だ十分に解明されていないといえる。

東京都新宿区四谷の遺跡調査では、前述のように、完新世(1万~2万年前以降)の地震で洪積層である東京層の最上部の砂層が江戸時代の3つの地震により液状化した事実が確認された^{1)・2)}。この事実に基づき、沖積層などと同様に洪積層を捉えるのは早計である。著者らは、洪積層での液状化事例が確認されていないということ、洪積層が液状化しないと捉えるのではなく、明らかに洪積層の液状化によると確認された被害事例がないと捉えるほうが良いと考えている。

そこで、本論文では、調査地および周辺のボーリングによる標準貫入試験(SPT)のN値データを統計的に分析することにより、この遺跡調査地点の液状化した層を東京層砂層全体の中で定量的に位置づける。また、調査地点でスウェーデン式サウンディング試験を実施して原位置の液状化強度を推定するとともに、現地で採取した不攪乱試料の繰返し非排水三軸試験により液状化強度を求め、調査地点の

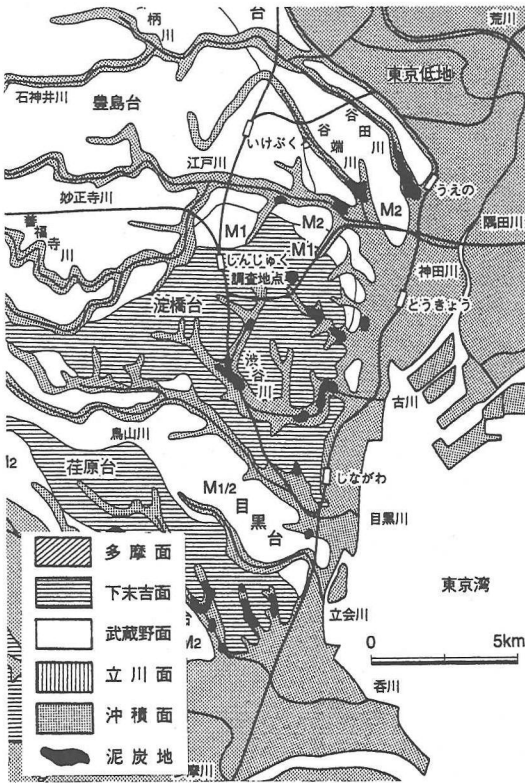


図-1 調査地点の位置と周辺の地形（貝塚¹⁶⁾原図）

液状化強度特性を検討する。

地学¹⁵⁾では、完新統・更新統の語を使用するが、土木・建築の分野では、沖積層・洪積層の語が未だに広く使用されていることから、本論文では沖積層・洪積層の語を使用する。

2. 東京層砂層の液状化が確認された現地調査の概要¹⁾

(1) 調査地点

東京都新宿区四谷の遺跡調査で確認された東京層砂層の液状化の痕跡については、森・池田^{17)・2)}が詳細に述べている。そこで、調査についてはその概要を述べる。

図-1に調査地周辺の地形¹⁶⁾と調査地点の位置を示す。図-2に調査区域とサウンディングの位置図を示す。調査地は、東京都新宿区四谷一丁目目で、地形的には支谷の分岐点に相当し、現在はJR四ツ谷駅の西側に位置するが、江戸時代は江戸城外堀の四谷御門の西橋詰があったところである。この調査区域で、地下鉄7号線溜池・駒込間建設工事にともなう埋蔵文化財調査のため、1990年9月から1994年

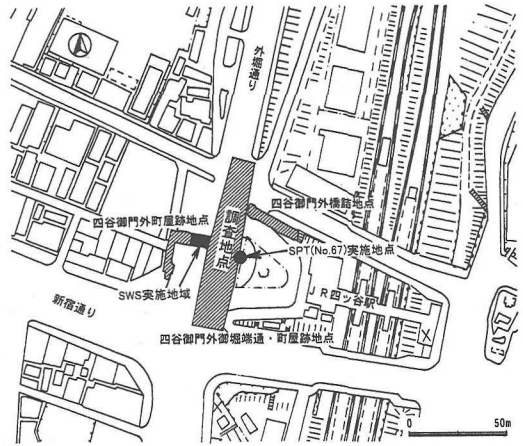


図-2 調査区域とサウンディングの位置図

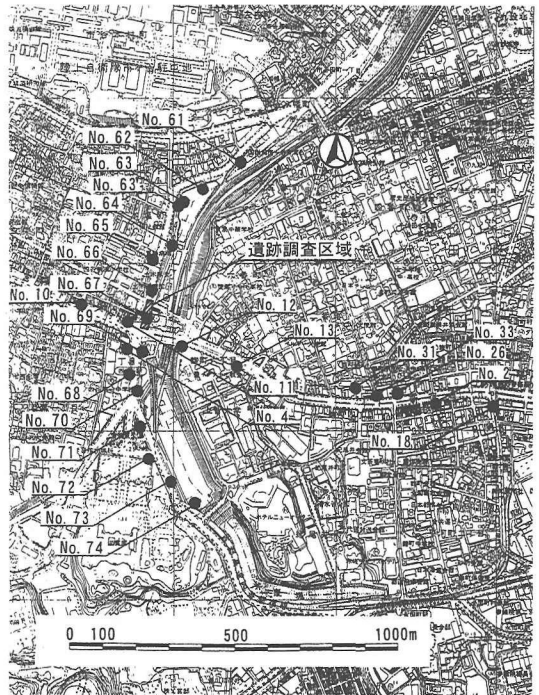


図-3 検討に用いたボーリング調査位置

9月にかけて、駅舎と駅出入口の建設にともなう事前発掘調査が建設工事と平行して実施された^{17)・18)}。

この地点は、約13万年から12万年前の間の下末吉期に形成された武蔵野台地の中でも最も高い淀橋台の東端に位置し、標高はTP+28.4mである。淀橋台の平坦な面をなしているのが、海成層の東京層である。淀橋台では、東京層の上に火山灰質の粘土層である渋谷粘土層が堆積し、さらにその上に火山灰土層の関東ローム層が堆積している。

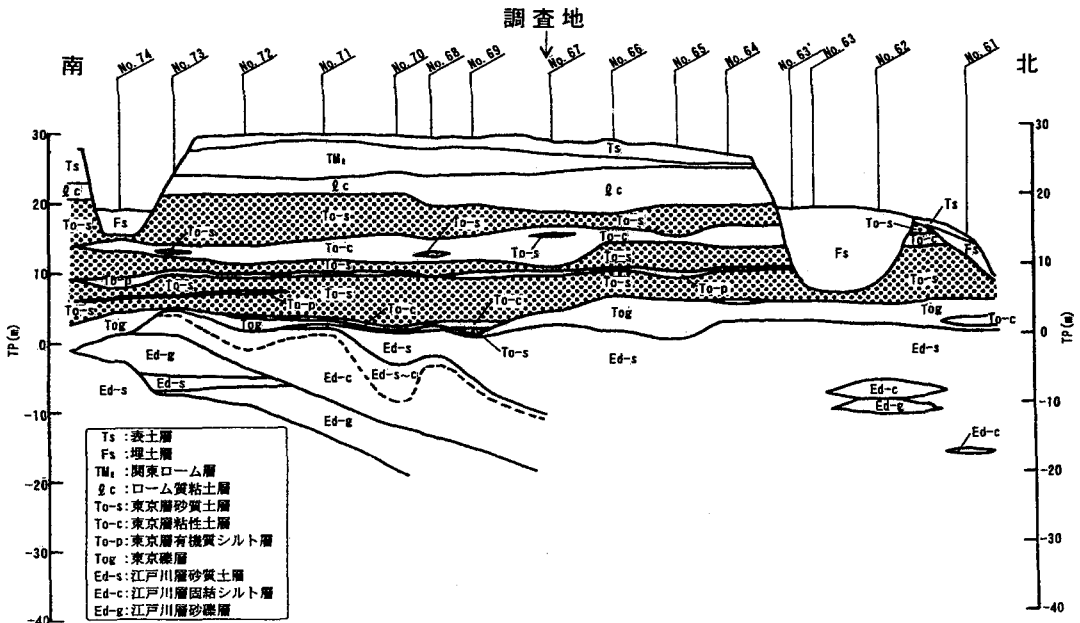


図-4 地下鉄7号線に沿う地質断面図¹⁹⁾ (着色部は東京層砂質土層)

現地表面から、近・現代の盛土が堆積し、これより下に江戸城外堀の盛土層となる。現地表面から約6.6mの深さで自然堆積層が確認され、江戸城外堀の盛土は自然地形を掘削せずに構築されている^{11), 2), 17)}。

(2) 液状化の痕跡調査の概要

森、池田^{11), 2)}は、噴砂脈における試料とその近傍の露出させた下方の東京層砂層で採取した試料の粒度分析、鉱物分析、珪藻分析を行うことで、噴砂脈の供給源が洪積層である東京層砂層であることを確認し、さらに、地震跡の考古学的な遺跡調査と地震史料により地震の発生時期と地震の震度を推定した。その結果、3度の江戸直下型の地震により東京層砂層が液状化したことと震度VI程度の揺れであったことを明らかにした^{11), 2)}。

3. 東京層砂層の液状化強度の検討

本調査地における検討に先立ち、既往のボーリングデータにおけるSPTのN値と密な砂にも適用できる液状化強度推定法である建築基礎構造設計指針¹¹⁾を基に、東京層砂層の液状化強度に関する統計的な性質を検討する。

(1) 東京層砂層全体と調査地周辺におけるN値の比較

東京層砂層のN値の相対度数分布を用いて、東

京層砂層の全体と調査地周辺におけるN値の統計的性質を比較して、母集団としての検討を行う。東京都土木技術研究所¹⁴⁾による東京都東部地域における1469のデータを用いて東京層砂層の全体像を把握する。また、同文献¹⁴⁾より10地点と地下鉄7号線建設に伴う地質調査¹⁹⁾より15地点の合計25地点のボーリング調査結果に基づき、調査地周辺地盤の東京層砂層の256データを用いて、東京層砂層全体と比較検討する。

図-3にこの25地点のボーリング調査位置を示す。図-4に地下鉄7号線に沿う地質断面図¹⁹⁾を示す。東京層の砂層は東京層粘性土層と東京層有機質シルト層とを合せて上部、中部、下部の3層に分かれている。東京層の最下部に東京礫層があり、その下には良く締まった江戸川層がある。図-3でNo.67は本調査地点におけるボーリングである。

図-5に東京層砂層(東京層で砂質土と判断されたもの¹⁴⁾)のN値の相対度数分布を示す。図-5(a)は母数が1469のデータによる東京層砂層の全体像を示す。最頻値はN値50以上にあるが、5~15の小さいN値も少ないながらも無視できるほどではない。図-5(b)は、母数が256のデータによる調査地周辺のN値の相対度数分布である。東京層砂層の全体と比較して、相対的に分布の重心がN値の小さい側に移動し、20以下の相対度数が相対的に多いなど、分布形状に若干の違いが見られる。

そのような若干の違いはあるが、最頻度はN値

良目標 N 値を 15 に設定される例が多い。そこで、全体的な傾向の把握を容易にするため、N 値が 10 と 15 の CRF 値を目安として着目する。

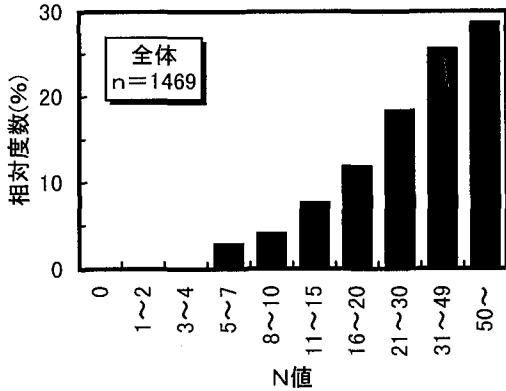
図-6 に、調査地周辺地盤の東京層砂層における N 値の要因別 CRF 分布を示す。

図-6 で (a) は全体のもの、(b) は土質分類、(c) は地表面からの深度 (D)、(d) は東京層砂層上面からの深度 (Dt) を要因として区別したものである。地表面からの深度を、15m 以浅、15m~20m、20m 以深に分類したのは、図-4 に示した地質断面図で東京層砂層の上部、中部、下部の各層におおむね対応させるようにするためである。図-6 (a) は図-5 (b) を異なる表現で示したものである。東京層砂層で N 値 10 以下の緩い層が 9%、N 値 15 以下では 21% もある。

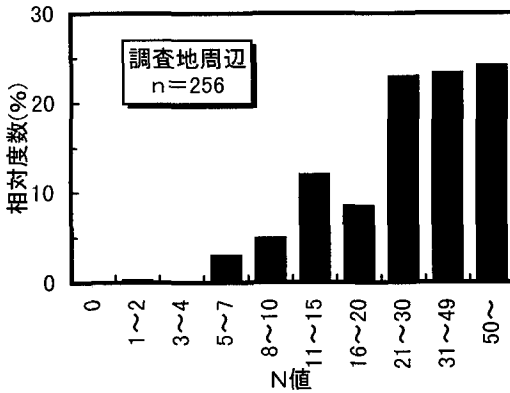
図-6 (b) の土質分類の違いに着目した分布によれば、「砂 (S)」と判断されたもので、CRF が 0.5 になる値 (中央値と呼ぶ) は N 値が 33 であり、N 値 15 以下のデータは 10% に過ぎない。一方、「シルト混じり砂 (S-M)」や「粘土混じり砂 (S-C)」と判断された土質に相当する分布では、中央値がそれぞれ N 値が 14 と 12 であり、この両者は分布傾向が良く似ているが、「砂 (S)」と判断されたものと傾向が大きく異なる。粘土分やシルト分などの細粒分含有量が混じれば、N 値は小さくなり、N 値 15 以下の割合は急増することがわかる。ただし、ここでの土質分類は、ボーリング調査の現場技術者の判断によるものが主体であると考えられるので、そのことを念頭に置く必要がある。

図-6 (c) の地表面からの深度別の分布によれば、次の 2 点が指摘できる。① 深くなるほど N 値が大きくなる。② GL-15m 以浅の分布はそれ以上の深さの分布に比べて小さい N 値の CRF が大きい。すなわち、① は上載圧の増加に伴う N 値の増加で説明できるが、② は、特に N 値 25 以下において、東京層砂層の上部層は、それより下位の中部層、下部層が同様の分布性状であるのに対して、CRF が大きく堆積環境や続成環境が大きく異なるものと考えられる。N 値が 15 以下の割合は 20m 以深で 8%、15m~20m で 14% に対し、15m 以浅では 37% に達する。

上述の理解と併せて、本調査地において液状化した部分が東京層砂層 (上部層) の最上層 1~2m の厚さと推定されている¹⁾ことを考え、図-6 (d) の東京層上面からの深度別の整理では、上面より 3m 以浅、3m~10m、10m 以深とした。これらはそれぞれ東京層上部砂層の最上層、東京層上部砂層の下部層、東京層中部及び下部砂層に対応していると考えられ



(a) 東京層砂層全体^{1,4)} (n=1469)



(b) 調査地周辺 (n=256)

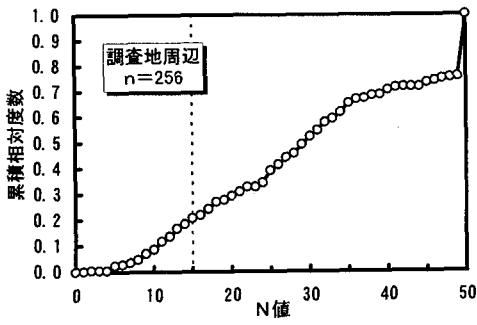
図-5 東京層砂層の N 値の相対度数分布

50 以上であることと N 値が大きいかほど頻度が大きくなるという傾向は大局的には類似している。

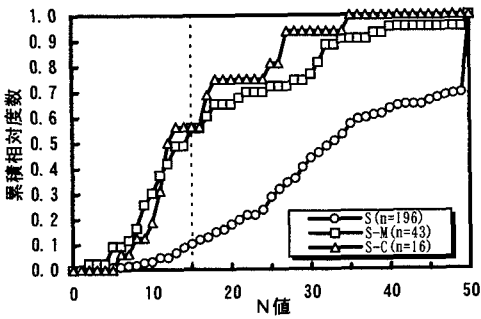
(2) 東京層砂層の N 値の要因分析

この調査地周辺の抽出した東京層砂層データに対し、① 細粒分含有量の違いを反映していると考えられる土質分類、② 拘束圧と関連する地表面からの深度、③ 堆積環境を反映していると考えられる層位に対応する東京層上面からの深度、の 3 つの要因に着目して検討を進める。以下の分析は、累積相対度数 (Cumulative Relative Frequency: CRF と略す) で表示して進める。

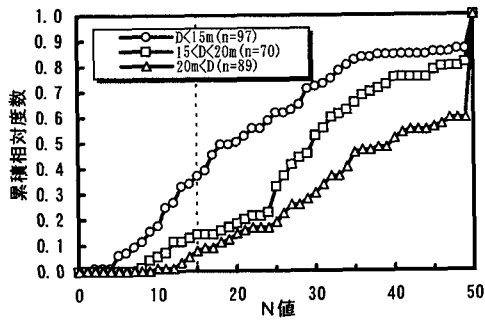
調査地周辺において、東京層砂層の上部の層はおおむね地表からの深さ 10~20m に分布する。例えば、適用上の条件を無視すれば、建築基礎構造設計規準 (1974)²⁰⁾において、液状化の可能性が高いとされる判断基準によると、深さ 10~20m では N 値が 10~15 以下で液状化の可能性が高いと判断される。また、締め固めによる液状化対策においては改



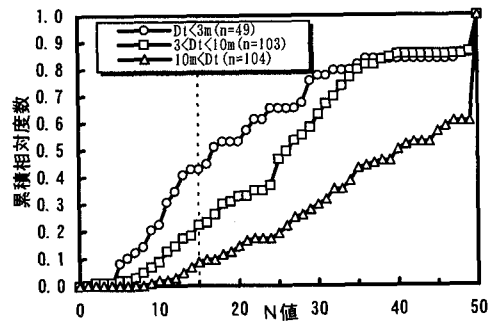
(a) 調査地周辺全体



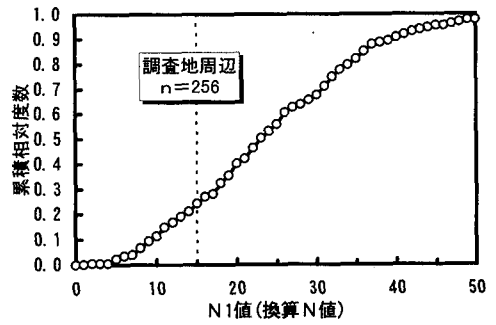
(b) 土質分類別



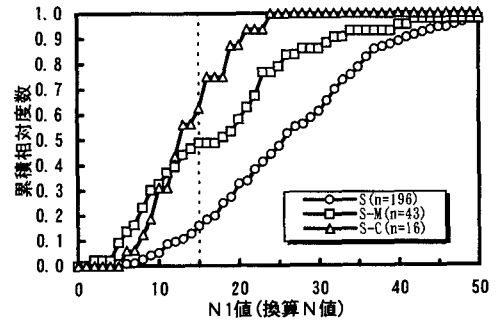
(c) 地表面からの深さ別



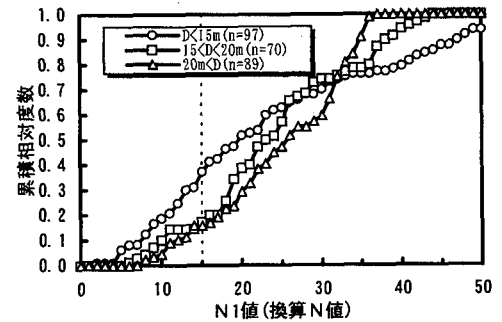
(d) 東京砂層上面からの深さ別



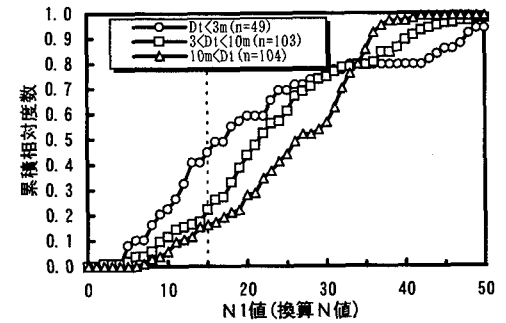
(a) 調査地周辺全体



(b) 土質分類別



(c) 地表面からの深さ別



(d) 東京砂層上面からの深さ別

図-6 東京層砂層の各要因に対する N 値の累積相対度数

図-7 東京層砂層の各要因に対する換算 N 値である N1 値の累積相対度数

る。地表面からの深度別に整理した結果と比べて、次の2点が特徴として指摘できる。

- ① 深くなるほど CRF 分布曲線が右に移行する傾向は大局的には同様であるが、移行の傾向が滑らかである。
- ② N 値が 15 以下の小さい相対度数は 10m 以深で 9%、3m ~ 10m で 22%、3m 以浅で 43% となり、浅くなるほど低い N 値が系統的に増加する。

(3) 東京層砂層の換算N値の要因分析

次に、相対的な締め具合を見るために、N 値を上載圧 1kgf/cm^2 に換算した N1 値の頻度分布を検討する。図-7に上載圧で換算した N1 値の頻度分布を図-6と同様に配置して示す。ここで、換算した N 値である N1 は、式 (1) により求めた。

$$N1 = (1 / \sigma_z)^{1/2} \cdot N \quad (1)$$

ここで、N1: 上載圧 1kgf/cm^2 に換算した N 値
N: 実測の N 値
 σ_z : 有効上載圧 (kgf/cm^2)

また、有効上載圧は、湿潤密度 ρ_t を東京層砂層より上位の層で 1.35t/m^3 、東京層砂層で 1.85t/m^3 、それぞれの水中での密度を 0.35t/m^3 、 0.85t/m^3 と仮定して算定した。湿潤密度は、文献¹⁴⁾に基づき、関東ローム層の平均的な値と東京層の平均的な値として仮定した。なお、地下水位は既往¹⁴⁾の地下水位等深線図を参考に、採用したボーリング位置における平均値を採用し、一律 TP+21.44m とした。N 値 50 以上のデータについては、値が不明なため全て N 値 50 として計算した。このため、特に N1 値は頭打ちの分布となり、N1 値の大きい範囲での分布は妥当ではない。すなわち、CRF 分布が 1.0 となる最小の N1 値以上では直接比較することができない。

図-7に調査地周辺の N1 値の CRF 分布を示す。図-7(a)~(d)については図-6と同様である。図-6と図-7との比較により、式 (1) による上載圧の影響を把握できる。N 値の大きいほど対応する N1 の CRF の伸びは大きくなっている。図-7では、このように N 値について上載圧の補正を行い拘束圧依存性を除去して考えると、図-6に比べて、N1 値 15 以下の割合がいずれの図でも大きくなっているのがわかる。また、N 値では深い位置や「砂(S)」と判断されたものに 15 以下の割合が極めて少なかったのに対して、N1 値にすると、このような部類の砂にも 15 以下の割合が無視できないほど存在してい

ることがわかる。すなわち、前節で述べた考察を大きく変える結果とはなっていない。

(4) 東京層砂層の推定液状化強度の統計的性質

ここでは、N 値より液状化強度を推定することにより、東京層砂層と液状化強度の CRF 分布を求め、液状化強度の統計的性質を検討する。液状化強度の推定は、密な砂や細粒分の含まれる砂にも適用性が高いと考えられる Tokimatsu-Yoshimi⁸⁾ の成果を基にした建築基礎構造設計指針¹¹⁾ に示される方法によった。すなわち、N 値を有効上載圧 1kgf/cm^2 で換算した N1 値に対して、さらに細粒分の補正を行った Na 値を求め、Na 値より液状化強度を推定し、液状化強度の累積相対度数を検討する。

細粒分の補正においては、土質分類ごとに細粒分含有率 (Percentage of Fine contents: Pf と略す) を仮定し、「砂(S)」では 10%、「シルト混じり砂(S-M)」では 20%、「粘土まじり砂(S-C)」では 50% とした。Pf の値は、東京層砂層全体¹⁴⁾ の Pf の平均値が 17.6% であり、「砂(S)」と分類されていても多くの場合、細粒分をある程度含んでいると考えられることから、日本統一土質分類法²⁾ を参考に設定した。液状化強度は、式 (2) で定義される液状化強度比とし、本論文ではこれを液状化強度 (比) と呼び R と表記する。

ここでは、1つの目安として、 $R \leq 0.2$ を、液状化強度を小さいと記述する。また、土木・建築分野の耐震設計で想定する低頻度の強震動の際に表層地盤内に生じる等価せん断応力比は、いくつかの建築物の高層評定事例の経験によれば、おおむね 0.4 程度である。そこで、 $R \geq 0.4$ の場合液状化強度が大きいと記述する。

$$R = \tau_L / \sigma_z' \quad (2)$$

ここで、R: 液状化強度 (比)

τ_L : 液状化抵抗繰返しせん断応力振幅 (15回でせん断ひずみ 5% に達するときのせん断応力に相当)
 σ_z' : 有効上載圧

図-8に、このようにして推定した液状化強度の CRF 分布を示す。図-8(a)より、R が 0.2 以下となる液状化強度が低い部分が、東京層砂層全体で 14% あり、無視しえないことがわかる。しかし、見方を変えれば、東京層砂層の 70% 程度は R が 0.4 以上の大きい液状化強度を有しており、全体的には洪積層である東京層砂層は、設計で想定しているよ

うな地震では液状化しない地盤であることが、改めて理解できる。図-6(a)と図-7(a)より CRF が 0.14 に対応するのは $N=12$, $N=11$ であることが読みとれる。東京層砂層で N 値が 12 以下では液状化強度が 0.2 以下しかないという概略の判断基準となる。

図-8(b)より土質別に見た場合、 R が 0.2 以下の割合は、「砂(S)」と「粘土混じり砂(S-C)」では 10% 以下であるが、「シルト混じり砂(S-M)」では 35% である。これより観察で「シルト混じり砂」と判断されるものに液状化強度の低いものが多いことがわかる。図-8(c)より R が 0.2 以下の割合は深さが 15m 以浅のものでは 18% であり、15m 以深で 10~13% であるのに比べて 1.5 倍程度であるが、図-8(d)より、東京層砂層上面より 3m 以浅では 25% であり、3m 以深で 10~13% であるのに比べて約 2.5 倍となる。また、全体的な分布性状の変化は後者の方が滑らかである。すなわち、液状化強度は、地表面からの深さの違いよりも東京層砂層上面からの深さに依存し、特に東京層砂層の上部層の浅いところほど液状化強度が低いことがわかる。このことは、スウェーデン式サウンディング試験と粒度分析に基づいた森・池田¹⁾の液状化層の推定結果と整合する。

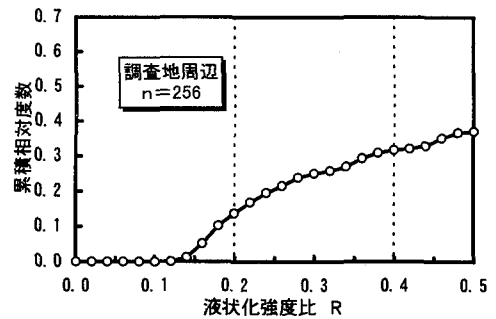
(5) まとめ

全体的には東京層砂層は N 値が大きく、液状化強度も設計で考えるような地震では液状化しない程度に大きい。しかし、0.2 以下という液状化強度が低い東京層砂層も少なくない。全体では 14%、「シルト混じり砂」に分類されるものでは 35%、地表面からの深さ 15m 以浅では 18%、東京層砂層上面より 3m 以浅では 25% が、液状化強度が低い。液状化強度は、地表面からの深さよりも東京層砂層上面からの深さに強く依存し、東京層上部砂層の浅い部分の「シルト混じり砂」は、液状化強度が低い場合が多い。また、概略の目安として、 N 値が 12 以下の東京層砂層は、液状化強度が 0.2 以下と低いと考えることができる。

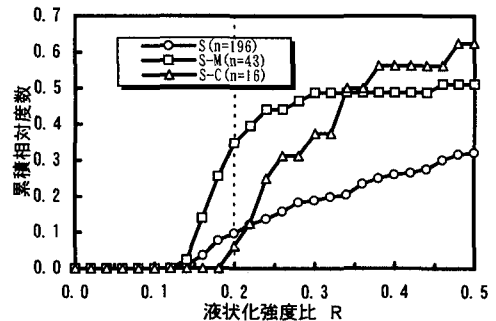
4. 本調査地における液状化強度の検討

(1) 標準貫入試験

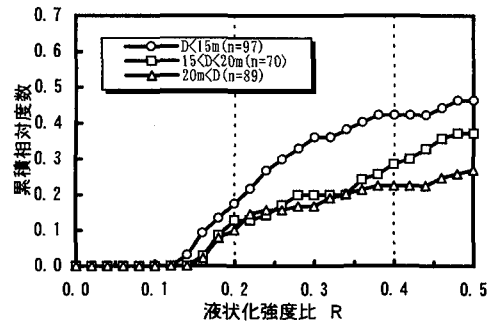
図-9に本調査地点におけるボーリング柱状図¹⁹⁾を示す。ボーリング地点の標高は TP+28.46m であり、地下水位は GL-7.45m である。これによれば TP+16.41 ~ +18.46m (GL-12.05 ~ -10.00m) に位置する東京層上部砂層において N 値は 3 つしかデータがない。 $N=8$ (GL-10.31m), 11 (GL-10.71m), 16



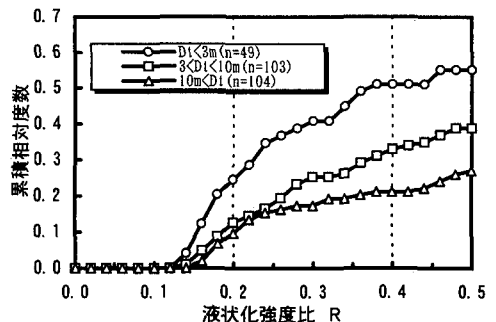
(a) 調査地周辺全体



(b) 土質分類別



(c) 地表面からの深さ別



(d) 東京砂層上面からの深さ別

図-8 東京層砂層の各要因に対する液状化強度比 R の累積相対度数

GL=TP+28.46m

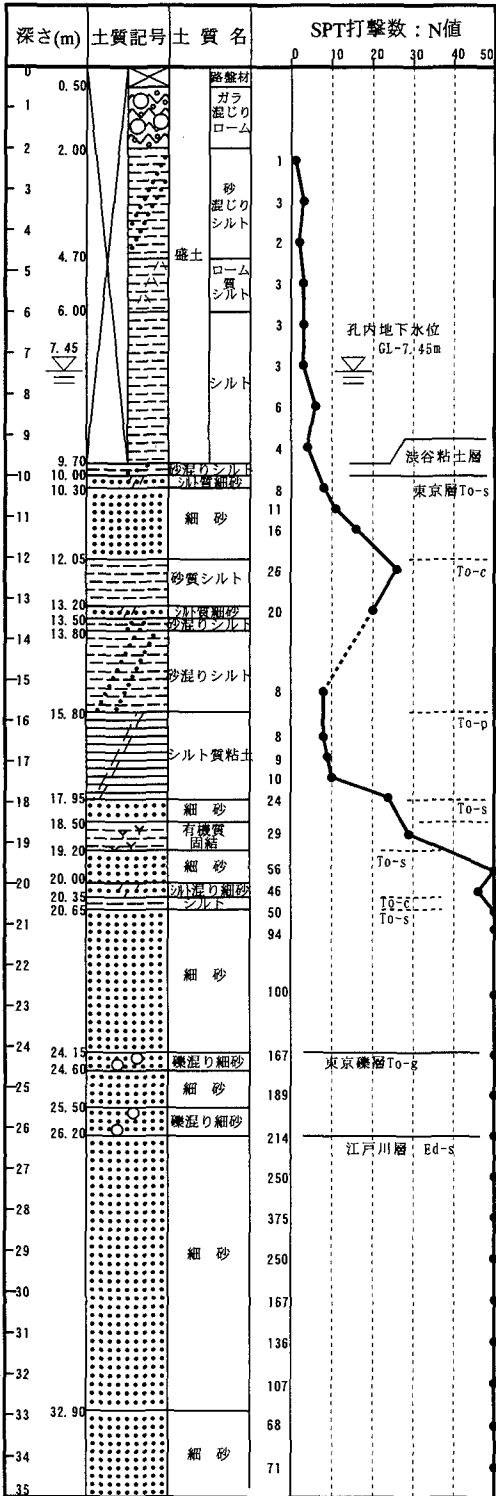


図-9 調査地点におけるボーリング柱状図 (No.67)

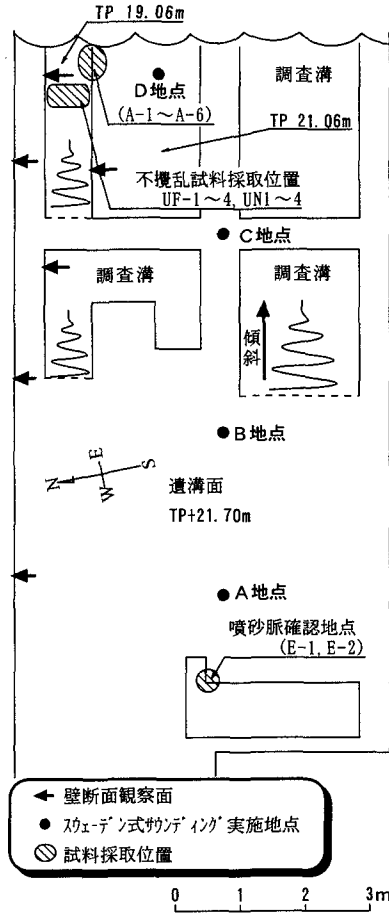


図-10 スウェーデン式サウンディング試験実施地点平面図

(GL-11.30m)である。建築基礎構造設計指針¹¹⁾に従い、細粒分含有率を後掲の表-1により12%として推定すると、それぞれの深さに対応する液化化強度Rは、0.15, 0.18, 0.25である。前述した概略判断基準に照らし合わせても、液化化強度は低いといえる。それぞれ東京層上面からの深度は約0.3m, 0.7m, 1.3mであり東京層上面からの深度は浅い。なお、ボーリング地点のGL-11.5~-12.0mで計測された間隙水の水位はGL-6.0mであるので、この深さの東京層砂層は僅かに被圧状態にある。

(2)スウェーデン式サウンディング試験

噴砂脈確認地点近傍では、スウェーデン式サウンディング試験 (JIS A1221) (以下SWSと略す。)を実施している¹¹⁾。図-10にSWS試験実施地点の平面図を示す。噴砂脈の検出地点から1.5m, 4.0m, 6.9m, 9.4m離れた4地点 (各々A, B, C, D地点と呼ぶ) で試験を実施した。

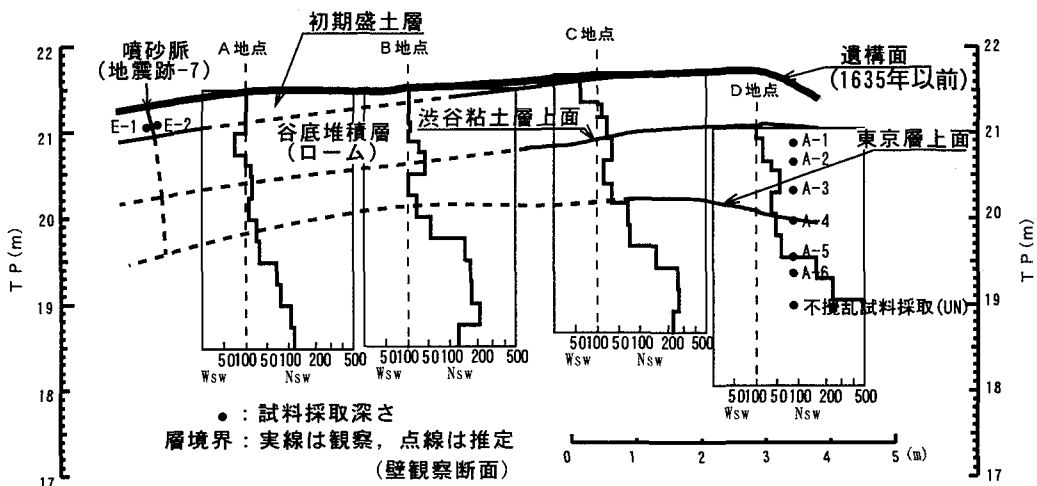


図-11 スウェーデン式サウンディング試験結果

図-11に SWS 試験結果を示す。この図には、壁面観察による区域内の土層の等高線とサウンディング結果を基に推定した土層境界を記入してある。遺構面から 0.7～0.8m の深さに谷底堆積物が、その下に 1.0～1.7m の厚さの渋谷粘土層が堆積し、その下に東京層砂層が堆積している。

東京層砂層における Nsw は、大局的には下になるほど大きくなり、拘束圧に依存する砂質土層の特徴が現れている。これに加え次の 2 点¹⁾が指摘される。① B, C, D 地点では砂層上面より 50～75cm 以深で Nsw 値が 120 以上と大きくなるのに対し、A 地点では深さによらず 120 以下と小さい。② B, C, D 地点では砂層上面より 50～75cm 以浅で Nsw 値が 60 以下であり、それより下方の値より極端に小さい。

(3) 液状化地点における液状化強度の推定

ここでは、SWS 試験結果から得られた Nsw より、噴砂脈の検出された地点における東京層砂層の液状化強度を推定する。

Nsw を、三木^{2,2)}により経験的に得られた式(3)より N 値に換算し、表-1の物理定数を用いて前述の建築基礎構造設計指針¹⁾による方法で液状化強度 R を求めた。式(3)の精度や適用性に問題は残るが目安としては利用できる。

$$N = Nsw / 12 \quad (3)$$

ここで、N: 推定 N 値

Nsw: スウェーデン式サウンディングで求められる 1m 貫入するのに必要な半回転数

表-1 調査地点における東京層砂層の物理的性質 (A-5, A-6 の平均値)

土粒子の密度 ρ (g/cm ³)	2.685
砂分含有率 P_s (%)	88
シルト分含有率 P_{s1} (%)	10
粘土分含有率 P_c (%)	2
細粒分含有率 P_f (%)	12
平均粒径 D_{50} (mm)	0.20
塑性指数 I_p	NP
日本統一土質分類	シルト混じり砂 (S-M)

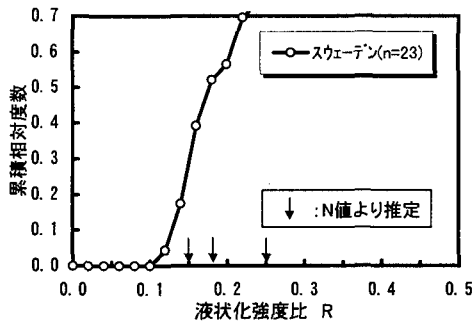


図-12 スウェーデン式サウンディング結果より推定した液状化強度の累積相対度数

表-1に示した値は、図-10に示した D 地点の脇を掘削した側壁より採取した東京層砂層の A-5, A-6 の試料の平均値である。

データ数は 23 個と少なく、また東京層砂層上面より 2m 以浅であるが、図-12に SWS 試験結果より推定して求められた東京層砂層の液状化強度 R の CRF 分布を示す。この図には調査地で実施された SPT による N 値より求めた 3 深度の推定 R を矢印

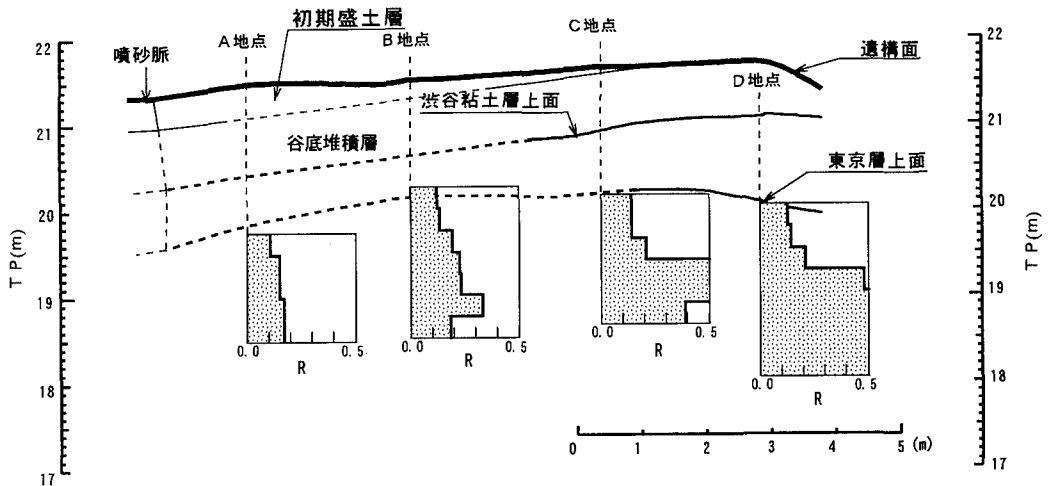


図-13 スウェーデン式サウンディング結果より推定した液状化強度の深度分布

で併せて示した。この図より、調査地点の東京層砂層の最上部2mでは、液状化強度Rは半分以上が0.2以下となりかなり低いことがわかる。また、調査地周辺のN値から推定した液状化強度の推定値と比べ、0.2以下の液状化強度の低い部分が多くなっているが、図-8(d)に示した東京層砂層上面より-3m以浅で、N値が50以上の部分を除けば、0.2以下の液状化強度の低い部分が多くなっていることと整合している。

図-13に各地点ごとの深度分布を示す。深さ方向には、A地点を除き、東京層砂層上面から約1m以上深くなると液状化強度が0.3以上と大きくなっているが、東京層砂層上面より下1~2m付近には0.15以下の液状化強度のかなり低い部分が存在していることがわかる。図-8(d)において東京層砂層上面より深さ3m以浅で推定液状化強度が低い、この傾向は浅い部分でより顕著になることがわかる。また、噴砂脈確認地点に最も近いため擾乱によって砂層が緩くなったものと考えられる¹⁾A地点では、調査した範囲内で液状化強度はいずれも0.17以下と低かった。さらに、調査地で実施されたSPTによるN値より求めた推定Rと整合する。

このように、液状化強度として定量的に考えた場合にも、東京層砂層の上部3mには、液状化強度の低い部分が存在していることがわかった。また、液状化地点付近では上部1m程度は、その傾向が顕著であることがわかった。

5. 不攪乱試料による東京層砂層の液状化試験

(1) 不攪乱試料の採取

図-10に示したD地点に近接する東京層砂層上面から1m程度掘削したTP+19.06m地点で、内径75mm、厚さ2mm、長さ210mmの先端部約10mmを鋭くした真鍮性のシンウォールチューブを用いて8つの不攪乱試料を採取した。採取した深さは図-11に示す。採取深度では $N_{sw}=500 \sim 600$ である。 N_{sw} の小さい最も関心のあるTP+19~+20mの東京層最上部からは、遺跡調査の制約条件から採取することはできなかった。採取にあたっては、乱さない掘削底面よりシンウォールチューブを押し込み、その後、その周囲を掘削し、シンウォールチューブ下端より深く十分掘り下げてからチューブごと土塊を掘り起こした。チューブの両端の土を1~2cm残すように削り、両端をポリエチレン製シートでラップし不攪乱試料を採取した。採取試料は、クッション材で満たした箱に入れて運搬した。

試料運搬にともなう試料の乱れの影響を避けるために、不攪乱試料の半数を凍結して運搬したが、以下の理由により今回の検討には使用しなかった。

粘土分や細粒分の含有率が多い試料では、凍結融解することで体積膨張により試料に乱れが生じ、液状化強度が低下する。Goto²³⁾は、密な砂では、粘土分含有率が1%前後より多くなると、液状化強度が体積膨張により低下し始めることを示している。採取試料の粘土分含有率は13%であり運搬に伴う試料の乱れよりも凍結融解による試料の乱れの方が大きいと判断したためである。

表-2 繰返し三軸試験に用いた試料の物理的性質

試料	不攪乱試料	再構成試料
測定時期	整形時	準備時
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.704	2.700
砂分含有率 $P_s(\%)$	76	77
シルト分含有率 $P_M(\%)$	10	11
細粒分含有率 $P_f(\%)$	23	21
粘土分含有率 $P_c(\%)$	13	10
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.20	0.21
塑性指数 I_p	NP	NP
最小間隙比 e_{\min}	0.866	—
最大間隙比 e_{\max}	1.409	—
日本統一土質分類	粘土質砂 (SC)	粘土質砂 (SC)

(2) 液状化試験の方法

液状化試験は直径 75mm × 高さ 150mm の繰返し非排水三軸試験²⁴⁾とし、不攪乱試料と再構成試料に対し、それぞれ 4 供試体を試験に供した。次に試験の手順を述べる。

採取した不攪乱試料をシンウォールチューブから抜き出し、供試体高さが 150mm になるように整形し、メンブレンをかぶせ、試験機にセットした。また、供試体は自立した。背圧は 2.0kgf/cm^2 とした。試料採取地点の上載圧は $\sigma' = 1.1\text{kgf/cm}^2$ である、静止土圧係数を $K_0 = 0.5$ と仮定すると平均有効主応力は $\sigma'_m = 0.73\text{kgf/cm}^2$ となることから、有効拘束圧を $\sigma'_c = \sigma'_m = 0.75\text{kgf/cm}^2$ とした。

$\sigma'_c = 0.75\text{kgf/cm}^2$ の拘束圧で等方圧密し、一次圧密終了後、B 値が 0.96 以上であることを確認し、試験を実施した。最初に非排水状態で 2×10^{-5} 未満のせん断ひずみレベルで、0.1Hz の正弦波 11 波を載荷し、載荷後排水状態にする動的変形試験を 3 回実施した後、排水状態にしてから再度非排水状態にし、所定の繰返し片振幅軸差応力 σ_d で、0.1Hz の正弦波による繰返し非排水三軸試験を実施した。繰返しせん断応力比 $SR = \sigma_d / (2\sigma'_c)$ に対して、過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma'_c$ が 95% に達する時、または、両振幅軸ひずみ DA が 1, 2, 5, 10% に達する時の繰返し回数 N を求めることで液状化強度が求められる。

再構成試料は、一度試験に供した乾燥試料を使い、予めメンブレンをセットしてあるモールドへ 5 層に分けて投入し、2kgf の載荷版を載せ、モールドを 4 方向で各 50 回づつプラスチックハンマーで水平打撃することを各層ごとに繰返して作成した。密度は、不攪乱試料の乾燥密度の平均値を目標にした。

合わせて、比較のために豊浦標準砂についても繰返し非排水三軸試験を実施した。試験方法は、土質

表-3 圧密後の供試体密度と動的変形試験結果

	乾燥密度 ρ_d (t/m^3)	間隙比 e	相対密度 Dr (%)	せん断性 G (kgf/cm^2)	減衰率 h_0 (%)	
不攪乱試料	UN-1	1.565	0.728	125.4	551	2.5
	UN-2	1.487	0.819	108.7	487	2.6
	UN-3	1.537	0.760	119.6	556	2.0
	UN-4	1.505	0.796	112.9	504	2.7
	平均	1.524	0.776	117	520	2.5
再構成試料	DN-1	1.467	0.840	104.3	524	2.5
	DN-2	1.472	0.835	105.3	526	2.2
	DN-3	1.470	0.837	104.9	505	2.5
	DN-4	1.469	0.838	104.8	515	2.7
	平均	1.470	0.838	105	520	2.5

工学会の飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会²⁵⁾が 1987 年 7 月から 12 月にかけて実施した全国一斉試験の仕様に従った。具体的には、全国一斉試験の時に使用されたノズルを用いて、密度が 1.538g/cm^3 (相対密度 $Dr=70\%$) となるように空中落下法にて供試体を作成し、有効拘束圧 0.5kgf/cm^2 で繰返し非排水三軸試験を実施した。この時の供試体寸法は、直径 75mm × 高さ 150mm である。このように作成された豊浦標準砂の密度はやや密であるが、液状化強度としては SR が 0.2 程度と²⁶⁾小さいことが既に知られている。

なお、試料の細粒分含有率がある程度大きく、供試体側面も滑らかであったことから、メンブレンペネトレーションの補正は行っていない。

(3) 液状化試験の結果

表-2 に繰返し三軸試験に用いた試料の物理的性質を不攪乱試料整形時と再構成試料準備時に分けて示す。表-1 に示した不攪乱試料を採取した地点より 25 ~ 50cm 上の東京層砂層で採取した物理的性質に比べ、平均粒径やシルト分含有率はほとんど変化していないが、粘土分が 10% 程度多くなっていることがわかる。すなわち、図-11 や図-13 の D 地点に示したように、東京層砂層の上面から約 70cm 以深で急激に強度が大きくなるのは、粘土分が多いことも一つの要因と考えられる。なお、不攪乱試料整形時と再構成試料準備時では物理的性質の違いは認められず、粒子破碎のような変化は少ないと考えられる。

表-3 に各シリーズの圧密後の密度と動的変形試験結果を示す。不攪乱試料の乾燥密度の平均値は 1.525g/cm^3 、相対密度の平均値は 117% とかなり密な状態であった。ただし、試料は細粒分を 20% 以上含んでいるため、相対密度は 1 つの目安に過ぎな

い。不攪乱試料の乾燥密度が 1.524g/cm^3 であったのに対し、再構成試料の乾燥密度の平均値は 1.470g/cm^3 であった。これは、再構成試料作成方法にまだ課題があり、両者の単純な比較はできないものの、せん断剛性と減衰定数は、不攪乱試料と再構成試料のどちらもほぼ同じであった。

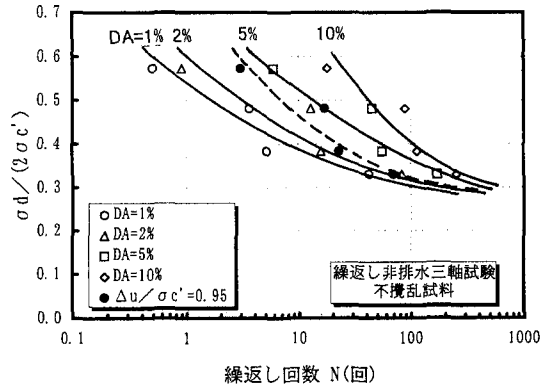
図-14に試験により求められた繰返し強度曲線を示す。(a)には東京層砂層より採取された不攪乱試料の結果を(b)には再構成試料の結果を(c)には相対密度 $Dr=70\%$ の豊浦標準砂の結果を示した。それぞれの図には、繰返しせん断応力比 SR で、両振幅軸ひずみ DA が 1, 2, 5, 10% と過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma' c'$ が 0.95 に達するまでの繰返し回数 N を示した。

図-14(a)より $DA=5\%$ に対する繰返し回数が 15 回と 20 回の時の不攪乱試料の繰返しせん断応力比を読みとると、それぞれ $SR_{15} = 0.485$, $SR_{20} = 0.463$ となる。(b)の再構成試料の繰返し強度曲線と比較すると、不攪乱試料は 2.0 ~ 2.2 倍である。また、(c)の豊浦標準砂の液状化強度と比べ、東京層砂層の再構成試料の液状化強度はやや高い。

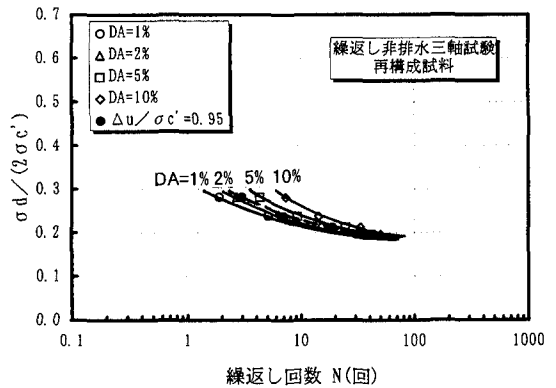
このように、不攪乱試料より求められた液状化強度はやや大きい、これは図-11に示したように不攪乱試料を採取した $GL-19.06\text{m}$ の地点の N_{sw} が大きいこと、図-13に示したように $N_{sw}=240$ より推定した液状化強度が $R=0.48$ と東京層砂層の上面付近に比べて大きいことと対応している。図-13によれば東京層砂層上面付近の液状化強度が低い部分では、推定した液状化強度は 0.15 以下であり、不攪乱試料採取地点の 0.48 の 1/3 程度である。仮に、不攪乱試料採取地点の液状化強度と東京層砂層上面の液状化強度の関係が、同様に 1/3 であると、不攪乱試料から求められた繰返しせん断応力比から東京層砂層上面付近の $DA=5\%$ に対する繰返しせん断応力比を推定すると、 $R_{15} = 0.162$, $R_{20} = 0.154$ となり豊浦標準砂の繰返し強度と同程度に低いことがわかる。

6. 結論

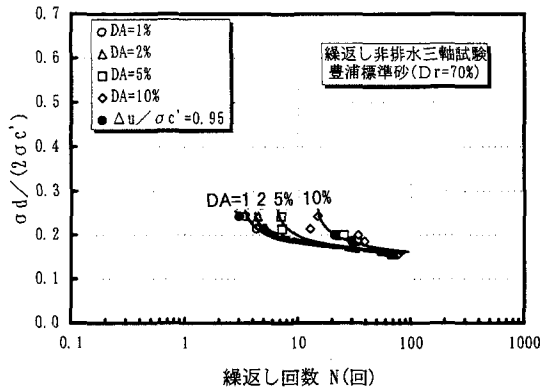
東京都新宿区四谷の遺跡調査で発見された、完新世の地震で液状化した更新統である東京層砂層に着目し、既往のボーリング資料と密な砂の液状化強度推定に基づき、東京層砂層の N 値と推定液状化強度について統計的分析を行うとともに、液状化地点におけるスウェーデン式サウンディング試験と不攪乱試料による繰返し非排水三軸試験を行うことにより、東京層砂層の液状化強度特性について検討を行った。その結果、次のような結論を得た。



(a) 不攪乱試料



(b) 再構成試料



(c) 豊浦標準砂 ($Dr=70\%$)

図-14 繰返し強度曲線

(1) 既往の資料に基づくと、東京層砂層ではシルト分や粘土分が混じると N 値の小さい割合が多くなり、 N 値の中央値は各々 14 と 12 である。 N 値は地表面の深度よりも東京層砂層上面からの深度に依存し浅いほど小さくなり、東京層砂層

上面から3m以浅では43%がN値15以下である。

- (2) 換算N値と細粒分含有率を考慮した液状化強度推定の結果、液状化強度比Rが0.2以下の強度の小さい割合が、土質別ではシルト混じり砂で35%、東京層砂層上面からの深度では3m以浅で25%と他に比べて高い。
- (3) 東京層砂層の液状化による噴砂が検出された地点では、東京層砂層の上部1~2mにスウェーデン式サウンディング試験貫入値N_{sw}の小さい層が存在すること、また、その層では推定液状化強度が小さい。
- (4) 東京層砂層においてN_{sw}の大きい深さから不攪乱試料を採取して、繰返し非排水三軸試験を実施したところ、SR₁₅=0.485であった。液状化強度とN_{sw}の相関を考えると、N_{sw}の小さい東京層砂層上面付近の推定液状化強度は低いことがわかった。また、採取した試料は、細粒分含有率12%のシルト混じり砂であった。
- (5) 液状化痕跡の発見された地点において、N値、N_{sw}値、推定液状化強度の小さいシルト混じりの東京層砂層が最上部に1~2m存在するという結果と、本調査地点周辺地盤では、シルト混じり砂という土質が東京層上面からの深度3m以浅においてN値や推定液状化強度が小さいという結果は調和的である。したがって、本調査地点周辺では、東京層砂層の上面から3m程度は液状化強度の小さい割合が高いことがわかった。

江戸時代の3地震での液状化痕跡は検出されたが、1703年元禄地震、1923年関東地震では検出されていない。さらなる調査の蓄積と検討を行い、より定量的な分析を行うことが課題として残されている。

謝辞：本研究は、新宿歴史博物館の池田悦夫研究員が並々ならぬ努力をされて地震跡を検出されたことに端を発している。また、今回の調査では、新宿歴史博物館、帝都高速度交通営団ならびに地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会（調査団長：早稲田大学人間科学部 谷川章雄教授）をはじめ関係機関の方々には多大な御理解と御協力を戴くとともに、本論文の学術的価値を認めて戴き、発表を快諾して戴いた。現地の試料採取およびサウンディングは、飛鳥建設（株）の染谷昇氏に協力して戴いた。最後に記して、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森 伸一郎, 池田 悦夫: 東京層砂層の液状化の痕跡調査と一考察, 土木学会論文集, No.582 / III -41, pp.247-263, 1997.12.
- 2) 森 伸一郎, 池田 悦夫: 第2節 東京層砂層の液状化の痕跡調査と一考察, 江戸城外堀跡 四谷御門外橋詰・御堀端通・町屋跡 (考察編), 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書 4-3, pp.345-362, 1997.3.
- 3) 森 伸一郎, 沼田 淳紀: 第3節 東京層砂層の液状化強度に関する一考察, 江戸城外堀跡 四谷御門外橋詰・御堀端通・町屋跡 (考察編), 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書 4-3, pp.363-377, 1997.3.
- 4) 吉見 吉昭: 4.1 実例, 第二版砂地盤の液状化, pp.69-74, 1991.5.
- 5) 若松 加寿江: 第2章地震災害を知る防ぐ, 自然災害を知る・防ぐ, 古今書院, pp.10-52, 1989.4.
- 6) 安田 進: 5.5 密な砂の予測方法, 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, pp.134-136, 1987.
- 7) 日本道路協会: 3.7.2 液状化する砂質土層, 道路橋示方書・同解説V耐震設計, 丸善, pp.38-42, 1990.2.
- 8) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.12.
- 9) 国生 剛治, 吉田 保夫, 長崎 清: 密な砂地盤のN値による液状化判定法, 第19回土質工学研究発表会発表講演集, pp.559-562, 1984.6.
- 10) Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. and Endo, M.: Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed Tokyo gravel, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.57-68, 1988.12.
- 11) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 丸善, pp.163-169, 1988.1.
- 12) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針, pp.131-136, 1987.8.
- 13) Ohsaki, Y.: Geotechnical properties of Tokyo subsoils, *Soils and Foundations*, Vol.2, No.2, pp.17-34, 1962.5.
- 14) 東京都土木技術研究所: 東京都総合地盤図I, 東京都地質図集3, 東京都の地盤(1), 1977.
- 15) 地学団体研究会 新版地学事典編集委員会: 新版 地学事典, 平凡社, 1996.10.
- 16) 貝塚 爽平: 東京の自然史一増補第二版一, 紀伊國屋出版, 239pp., 1979.
- 17) 帝都高速度交通営団 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会: 江戸城外堀跡 四谷御門外橋詰・御堀端通・町屋跡, 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書 4-1, 328pp., 1996.3.
- 18) 帝都高速度交通営団 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会: 江戸城外堀跡 四谷御門外橋詰, 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書 4-2, 280pp., 1996.3.
- 19) 帝都高速度交通営団: 7号線目黒~駒込間第1次地質調査報告書, 1987.
- 20) 日本建築学会: 建築基礎構造設計基準・同解説, 丸善, pp.129-132, 1974.11.
- 21) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, pp.186-200, 1990.3.
- 22) 三木 五三郎: 基礎地盤調査に用いる各種のサウンディング方法について, 生産研究, 第11巻, 第3号, pp.55-62, 1959.3.
- 23) Goto, S.: Influence of a freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.148-158, 1993.12.
- 24) 土質工学会: 第10章土の繰返し非排水三軸試験, 土質試験の方法と解説, pp.421-450, 1990.3.

25) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会(委員長 土岐祥介): 飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.1-35, 1988.12.

26) 佐々木 勉, 龍岡 文夫, 村松 正重, 関 真一: 振動三軸試験における試験条件が砂の液状化強度に及ぼす影

響, 第 16 回土質工学研究発表会発表講演集, pp.597-600, 1981.5.

(1997. 2. 14 受付)

A STUDY ON THE LIQUEFACTION RESISTANCE OF TOKYO FORMATION SAND LAYER

Shin'ichiro MORI and Atsunori NUMATA

Liquefaction of a Pleistocene Tokyo formation sand layer in Edo era was confirmed by a series of investigations in the ruins of Yotsuya-Gomongai of Edo castle located at Shinjuku, Tokyo. In this paper the liquefaction resistance of the sand layer of the site was compared with the layer around the site. The study was carried out using the following procedures: 1) statistical analysis of SPT N-value around the site, 2) Swedish sounding in situ, 3) comparison between tested resistance by undisturbed sampling and estimated resistance of the layer. It was concluded that a low-liquefaction resistance part exists in relative abundance in the upper part of the Tokyo formation sand layer.