

# 新潟市江南区を対象とした原位置サウンディング試験による 表層地盤の液状化特性の把握

長岡技術科学大学 地震工学研究室 小幡 蓮  
指導教員 志賀 正崇 池田 隆明

## 第1章 序論

液状化現象の根本的なメカニズムは、土の粒子構造の変化とそれに伴う有効応力の減少に起因する。砂のような粒状体はせん断応力を受けると体積が変化しようとするダイレイタンスーという性質を有しており、緩く堆積した砂地盤に地震動のような繰返しせん断力が作用すると、粒子は安定した位置に移動しようとして体積の収縮が生じる。地盤が地下水で飽和しており、かつ非排水状態にあると、体積収縮の代わりに過剰間隙水圧が上昇し、その分だけ土骨格が支えていた有効応力が減少する。最終的に有効応力がゼロに近づくことで土粒子間の接触力が失われ、土はせん断抵抗力を失い液体のように振る舞う。液状化が発生するためには、負のダイレイタンスーが生じる材料であること、飽和しており排水しにくい状態であること、十分な強さの振動が作用することという3つの条件が必要とされる。液状化に至る過程では、応力状態がある限界である変相線を超えると挙動が変化し、負のダイレイタンスーから正のダイレイタンスーへと転じることで、せん断変形に伴って体積が増加しようとする。液状化によって有効応力がほぼゼロの状態になると土は流動的な挙動をとるが、ひずみが増大すると正のダイレイタンスーによって有効応力が回復し、剛性が急激に高まるサイクリックモビリティと呼ばれる現象が見られる。液状化強度は、土の密度や拘束圧だけでなく、試料採取時の乱れや堆積後の時間経過による年代効果、細粒分含有率などに強く影響される。液状化した土の粘性係数は、作用するせん断ひずみ速度や駆動力の大きさに依存して変化する非ニュートン流体としての性質を示す一方で、極めて剛性の低下した固体として扱うアプローチも存在する。地震後の過剰間隙水圧の消散過程においては、透水性の低い層の下部に間隙水が滞留して水膜を形成する水膜現象が発生することがあり、これが側方流動や地すべりの原因となり得る。また、地中構造物の浮き上がり現象は、液状化土の比重差による浮力だけでなく、構造物周辺の埋め戻し土の液状化と構造物下部への液状化土の回り込みによって助長される。

液状化に伴って発生する現象としては、過剰間隙水圧の上昇によって泥水化した砂が地表へ噴出する噴砂や噴水が挙げられる。さらに、地盤が液体状化することによって支持力が失われ、建物の沈下および不同沈下が生じることで甚大な機能障害をもたらす。一方で、内部が空洞であるマンホールなどの構造物は、液状化地盤よりも単位体積重量が小さくなるため、浮力によって地表へ浮上する。また、液状化に伴う地盤の流動である側方流動は、数メートルから十数メートルに及ぶ水平変位を発生させ、地中に設置された杭基礎や管路施設に対して致命的な被害を引き起こす。地震終了後に過剰間隙水圧が消散する過程では地盤の体積収縮による沈下が生じ、沈下しない構造物と周辺地盤との間に段差が生じることで配管設備などが損傷する。過去の被害例<sup>2)3)4)5)</sup>として、1964年の新潟地震では広範囲にわたり液状化が発生し、鉄筋コンクリート造建築物が上部構造に破壊を伴わないまま沈下や傾斜を生じる甚大な被害をもたらした。1995年の兵庫県南部地震では、マサ土を用いた埋立地において大規模な液状化が発生し、護岸近傍での地盤流動により岸壁が海側へ移動する被害が生じた。2011年の東北地方太平洋沖地震では、長時間の地震動継続時間や繰返しの余震の影響により、震度5弱程度の地域でも大規模な液状化が発生し、過去に液状化した地盤が再び液状化する再液状化も多数観測された。2024年の能登半島地震においては、砂丘後背の低地において側方流動に起因する甚大な被害が生じ、図-1に示すように新潟市においても1964年の液状化地点と一致する箇所で大規模な再液状化が確認された。

液状化予測の手法には概略法、詳細法、実験法、簡易法の4種類が存在するが、実務において最も汎用性が高いのは標準貫入試験のN値などから評価を行う簡易法である。この簡易法の代表であるFL法は、地盤の液状化に対する抵抗力である動的せん断強度比Rと、地震によって地盤に作用する外力である地震時せん断応力比Lの比をとることで液状化に対する抵抗率FLを評価する手法であり、

FL値が1.0未満の場合は液状化発生の可能性が高いと判定される。本研究の目的は、2024年能登半島地震において新潟市江南区天野地区の同一の旧河道地形内でありながら、曾野木小学校グラウンドでは目立った変状が見られず、周辺地域では噴砂や不同沈下が発生したという被害形態の差異を支配する要因を解明することである。局所的な地盤条件の違いが存在する可能性を検証するため、多角的な原位置サウンディング試験および物理探査を実施し、変状の有無を分けた地層構造の特定および各調査手法の特性比較を行う。

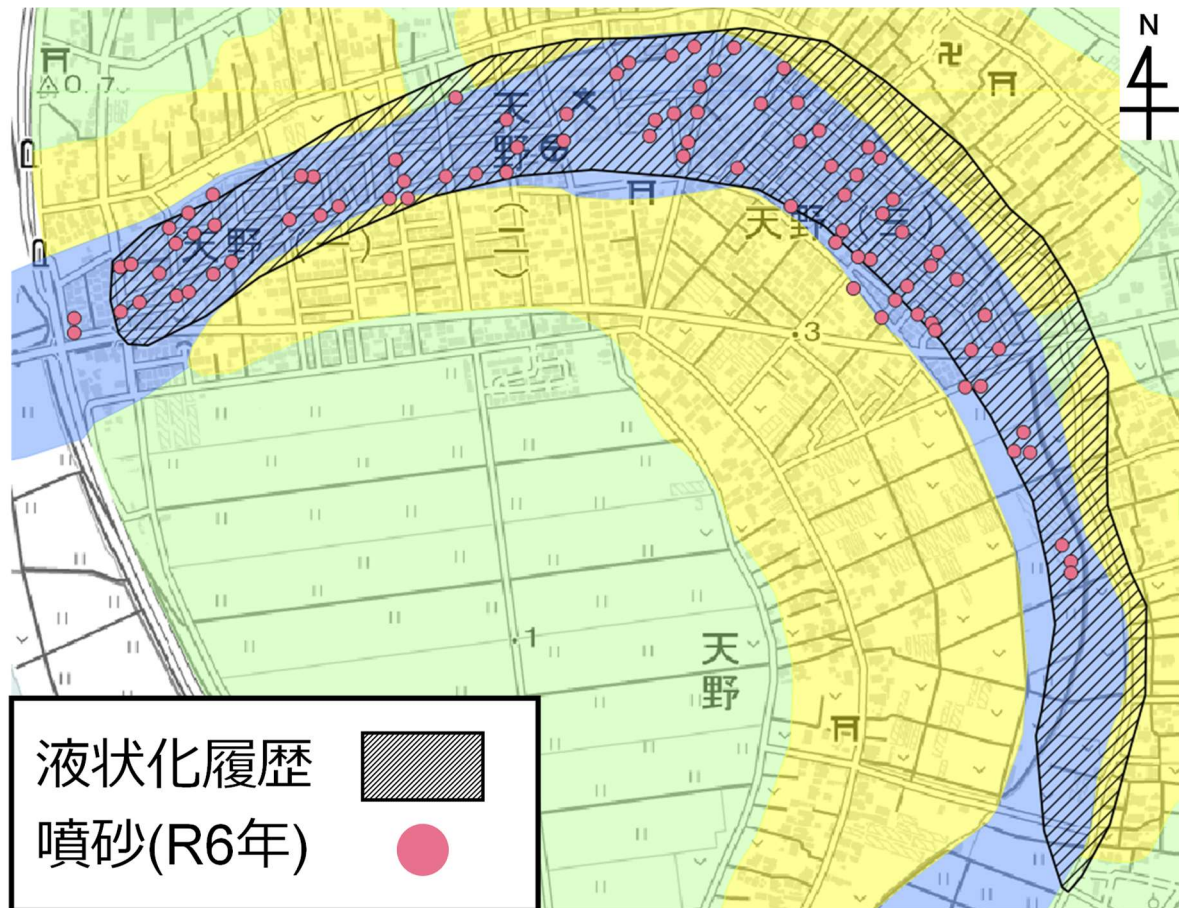


図-1 能登半島地震以前の液状化履歴と能登半島地震での噴砂発地点

## 第2章 原位置サウンディング試験

本研究では、地盤表層部の性状を把握するために、スクリーウエイト貫入試験（SWS試験）、簡易動的コーン貫入試験（PDCPT）、標準貫入試験（SPT）、および電気式コーン貫入試験（ECPT）を図-2に示す地点で実施した。

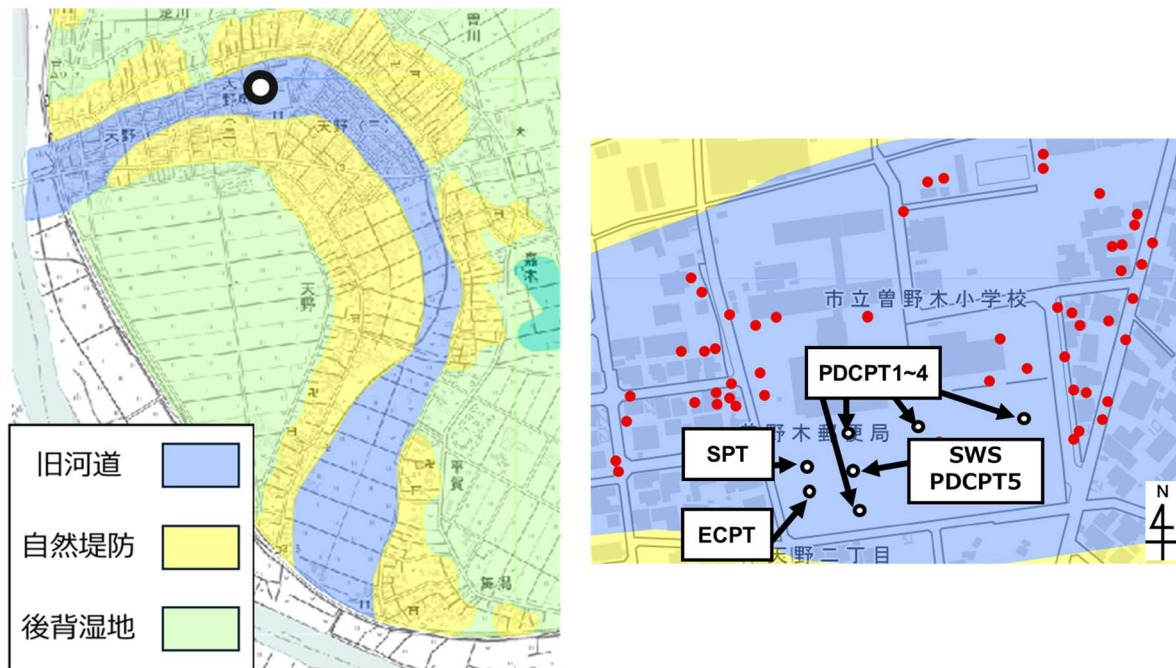


図-2 (左) 天野地区周辺の微地形 (右)曾野木小学校での調査地点

SWS試験は、JIS A 1221<sup>6)</sup>に準拠し、スクリーポイントを装着したロッドに対して段階的に荷重を載荷して静的貫入抵抗を測定する手法である。装置構成が簡便で迅速な測定が可能であり、深度約10m程度までの軟弱地盤層を対象としている。試験手順としては、ロッドに50Nから1000Nまでの荷重を段階的に増加させ、自重のみで貫入する自沈が発生する場合はその静的貫入最小荷重 $W_{sw}$ を記録する。1000Nの荷重でも自沈しない場合は回転貫入工程へ移行し、0.25mの貫入に要する半回転数 $N_a$ を測定する。得られた結果は、貫入長に対する静的貫入最小荷重 $W_{sw}$ と、半回転数 $N_a$ を1m当りに換算した換算半回転数 $N_{sw}$ を用いて整理される。

簡易動的コーン貫入試験（PDCPT）は、地盤工学会基準JGS 1433<sup>7)</sup>に準拠し、質量5kgのハンマーを500mmの高さから自由落下させてコーンを地盤に貫入させることで、原位置における地盤の動的な貫入抵抗を簡易に評価する手法である。適用対象は主に地盤の表層部であり、ハンマーの打撃エネルギーが限定的であるため硬質地盤への適用は困難であり、単管式ロッドを用いるため実用的な測定深度は概ね4mから5m程度に限られる。試験に用いるコーンは先端角度60度、直径25mmの鋼製円錐体を使用し、打撃力を伝達するロッドには100mmごとの目盛りが付されている。試験手順としては、ロッドおよびハンマーの自重のみによる自沈区間を記録した後、ハンマーを自由落下させ、コーンを100mm貫入させるのに要した打撃回数を $N_d$ 値として測定する。得られたデータは、極めて軟弱な地盤においては100mmあたりの打撃回数に換算し、深度方向への地盤性状の変化として整理される。

標準貫入試験（SPT）は、JIS A 1219<sup>8)</sup>に準拠し、質量63.5kgのハンマーを760mmの高さから自由落下させ、SPTサンプラーを地盤内に打撃貫入させることで貫入抵抗であるN値を測定し、同時に土層構成を把握するための試料を採取する手法である。試験孔の掘削後、孔底のスライムを慎重に除去し、地下水面下では孔内水位を高く維持して地盤の緩みを防止する。ロッドとサンプラーの自重に

よる自沈量を記録した後、150mmの予備打ちを行い、引き続いて300mmの本打ちを行って要した打撃回数をN値とする。本打ちにおいて打撃回数が50回に達しても貫入量が300mmに満たない場合は試験を終了し、採取した試料は土質名や色調などを記録して密閉容器に保存する。試験データは、各深度におけるN値や自沈量、孔内水位、土質観察記録として整理される。

電気式コーン貫入試験 (ECPT) は、地盤工学会基準JGS 1435<sup>9)</sup>に準拠し、先端に電気式センサーを内蔵したコーン貫入試験器を標準速度20mm/sで地盤中に連続的に圧入し、先端抵抗、周面摩擦抵抗、および間隙水圧を測定する手法である。コーンの先端角は60度、基準断面積は1000平方ミリメートルであり、間隙水圧を測定するフィルターはコーン円錐部の直上に位置する。試験開始前にフィルターを脱気水等で完全に飽和させ、無負荷の状態でのゼロ値を記録した後、連続的な貫入と測定を行う。得られたデータは、コーン背面に作用する間隙水圧の影響を有効面積比を用いて補正し、補正コーン貫入抵抗 $q_t$ 、摩擦比 $R_f$ 、間隙水圧比 $B_q$ といった派生パラメータを算出する。これらの指標を用いて、正規化先端抵抗 $Q_t$ と正規化摩擦比 $F_r$ を算出し、土質分類図に基づく地盤の分類や、非排水せん断強さ、相対密度などの工学的諸定数の推定を行う。

### 第3章 液状化判定法

液状化判定におけるFL法は、地震時に地盤内で発生する外力である地震時せん断応力比 $L$ と、地盤が本来持っている抵抗力である動的せん断強度比 $R$ を比較し、FL値が1.0以下となる場合に液状化が発生すると判定する手法である。本研究では道路橋示方書<sup>10)</sup>(道示法)と建築基礎構造設計指針<sup>11)</sup>(建築法)に基づく2種類の方法を採用した。

道路橋示方書における液状化判定の対象は、地下水位が地表面から10m以内で、かつ深さ20m以内に存在する飽和土層である。ただし、細粒分含有率が35%を超えるが塑性指数が15より大きい土層や、50%粒径が10mmを超える粗粒な土層などは液状化の可能性が低いとして除外される。地震時せん断応力比 $L$ は、地表面における設計水平震度、全上載圧および有効上載圧、ならびに深さ方向の低減係数を用いて算出される。動的せん断強度比 $R$ は、標準貫入試験のN値を有効上載圧100kN/m<sup>2</sup>相当に換算したN1値に対して、粒度特性に応じた細粒分補正を行って補正N値 $N_a$ を求め、これに基づいて算出された繰返し三軸強度比 $R_L$ に、地震動特性による補正係数 $c_w$ を乗じて決定される。算出されたFL値が1.0以下の土層については液状化が生じると判定され、耐震設計上はFL値や深さ、 $R$ の大きさに応じて設定された低減係数 $DE$ を土質定数に乗じて地盤反力の低下を考慮する。

建築基礎構造設計指針における液状化判定法は、Tokimatsu and Yoshimi<sup>12)</sup>の研究成果を基礎としている。判定対象は主に飽和した砂質土およびシルト質土であり、粘土分含有率が20%を超える土層は一般に除外される。動的せん断強度比 $R$ の算定では、測定されたN値から有効上載圧に基づく換算N1値を求め、細粒分含有率に応じた補正値を追加して補正N値 $N_a$ を算出する。この $N_a$ を用いて、室内試験と原位置挙動の補正係数や限界ひずみに対応する定数を組み込んだ経験式から $R$ を決定する。地震時せん断応力比 $L$ は、地表面の最大加速度、全土被り圧、有効土被り圧、深さ方向の低減係数に加えて、地震のマグニチュードを用いた等価繰返し回数の補正係数を考慮して算定される。これらの比から安全率FLを算出し、液状化の発生可能性を評価する。

### 第4章 天野地区の地盤特性と液状化履歴

新潟市江南区为天野地区は、信濃川の旧河道およびその縁辺部の自然堤防上に位置しており、過去の河道の蛇行や氾濫によって形成された砂質堆積物が分布し、地下水位が高い地形的特徴を有している。歴史的な変遷<sup>13)</sup>を見ると、正保年間以前は信濃川の本流が流れていたが、1670年の新川掘割完成に伴い主流が移行し、取り残された旧河道は遊水地として機能した後、1860年に締め切られた。1948年や1964年当時の空中写真からは、当該地域が主に水田や畑として利用され、市街地としての開発は限定的であったことが確認できる。しかし、昭和40年代以降、湿田を乾田化するための大規模な客土工や水田を埋め立てる形での宅地造成が急速に進行し、人口が急増した。

1964年の新潟地震当時、この地域は水田利用が主体であったため、地盤の波状変形、地割れ、沈下、噴砂による農地の冠水など、農業基盤施設への被害が中心であった。一方、2024年の能登半島地震においては、都市的な土地利用へと変化していたため、道路の陥没や亀裂、宅地における不同沈下や噴砂といった直接的な構造物・生活基盤への被害が顕著に現れた。このように被害形態は時代とともに変化した。周辺の自然堤防よりも標高が低い凹状の微地形が地下水を集めやすく、緩い砂質地盤が水で飽和しているという根本的な液状化発生の物理的要件は一貫して存在している。

### 第5章 原位置サウンディング試験の結果

各サウンディング試験の結果は図-3に示す。

曾野木小学校グラウンド内において実施したSWS試験の結果から、換算式を用いてSPTのN値に相当する換算N値を算出した。地表面から深度3.0m付近までの表層部には細砂が分布しており、換算N値は概ね5未満と緩い堆積状態にあることが確認され、深度0.5m付近に地下水位が存在した。深度3.0mから6.0mの区間は粘土混じり砂へと変化し、換算N値は10から13程度の安定した値を示し、相対的に高い剛性を有する中間層を形成している。深度6.0m以深では再び土質が変化し、換算N値が2以下、最深部にかけては1程度となる極めて軟弱な粘性土が厚く堆積していることが判明した。算出された換算N値を用いて液状化判定を実施した結果、深度1.0mから3.0m付近におけるFL値は、建築法の方が道示法よりも大きな値を示したが、深度3.0mから6.0mの間では道示法が1以上の値を示したのに対し、建築法は1を下回る結果となった。

PDCPTの試験結果からは、打撃回数Nd値を、換算式を用いてN値に変換し、深度ごとの強度分布を評価した。P1地点では深度1.8mまで換算N値5前後の軟弱地盤が分布し、自沈も確認されたが、深度2.0m以深では緩やかに強度が増加した。P2地点は深度2.0m付近まで換算N値6.0から9.5を示し、P1地点よりやや締まった傾向が見られた。P3地点は深度0.3mから0.5mの表層に換算N値8.6から9.5の硬質層が分布する一方で、深度1.3mや1.8m付近には軟弱層が挟在していた。

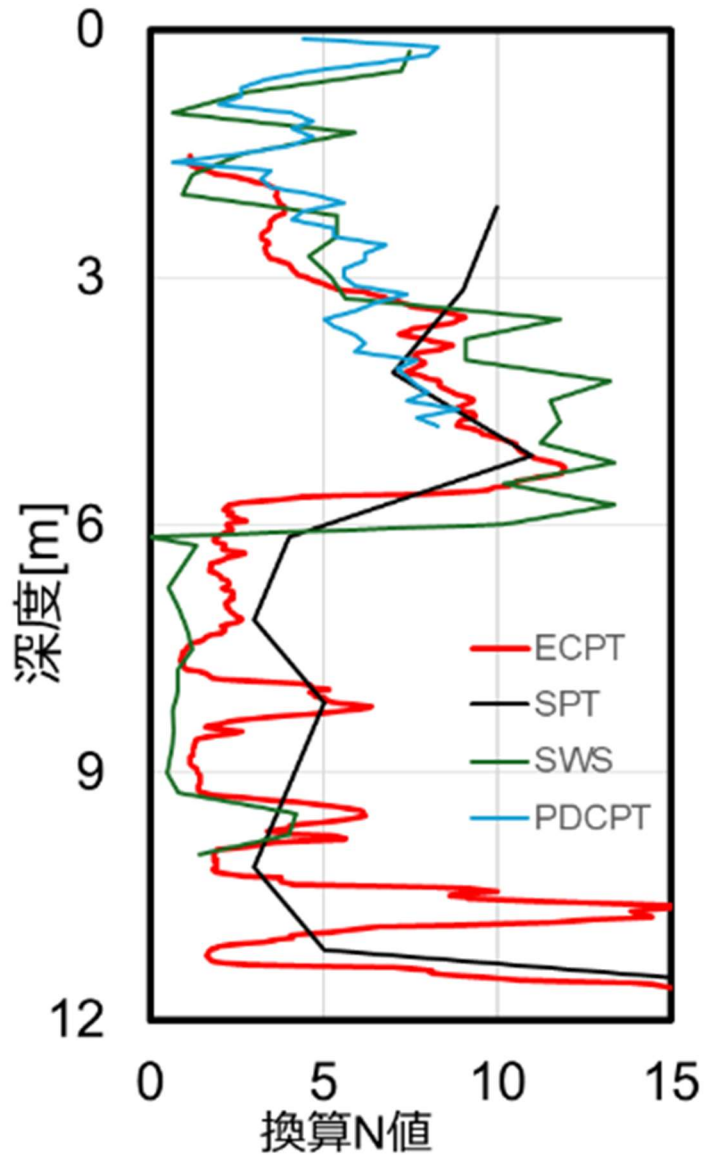


図-3 N値

各地点の換算N値に基づく液状化判定の結果を図-4に示す。

道示法では多くの地点で深度1.0mから3.0mの範囲においてFL値が1.0を下回る結果となったが、建築法ではFL値が1.0以上を維持する傾向が見られる地点もあり、判定手法による評価の差異が確認された。

標準貫入試験（SPT）による掘削長20.45mの調査では、地表面から深度0.35mまでは礫混じりの細砂、深度3.0m付近には腐植層が存在し、深度3.0mから5.45mは細砂主体の中層部であることが確認された。深度10mから17mの中間層ではN値が10から20の範囲で推移し、中位の締まり具合を示した。深度18m以深ではN値が急激に上昇し、深度18mで30、深度19mで34を記録し、堅固な支持層の存在が確認された。SPTのN値から算出したFL値の深度分布によると、深度2mから4mにかけて深度の増加に伴いFL値が低下する傾向が見られ、特に深度4m付近では建築法によるFL値が1.0を下回ったのに対し、道示法では1.0以上を維持するという、他の試験結果とは相反する判定傾向が確認された。深度11m以深の深部においては、深度の増加とともにFL値が上昇し、液状化のリスクが低い状態へと回帰した。

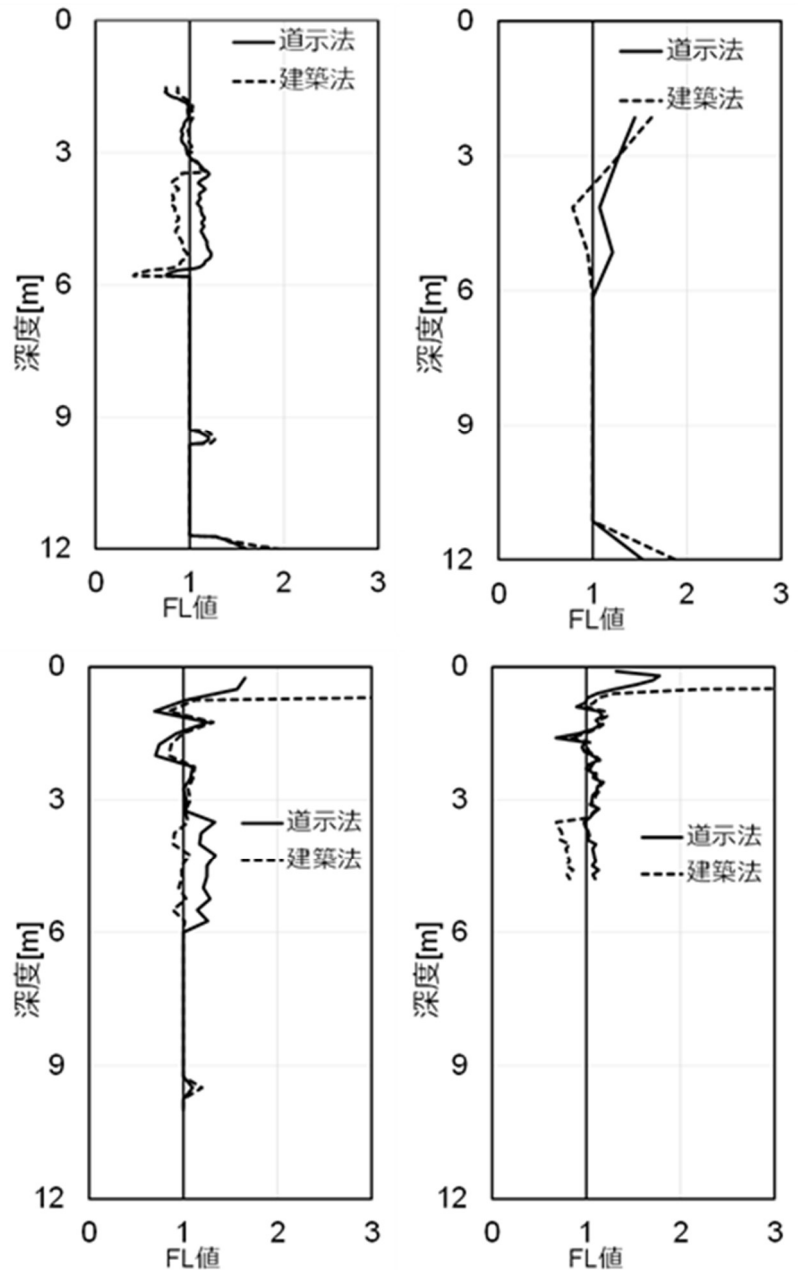


図-4  $F_L$ (左上:ECPT, 右上:SPT 左下:SWS, 右下:PDCPT)

電気式コーン貫入試験（ECPT）の結果については、測定された先端抵抗と周面摩擦抵抗から正規化パラメータを算出し、土質分類指標 $I_c$ を用いて土質分類を行った。また、先端抵抗と土質分類指標を用いた推定式により換算N値を算出した。地表面から深度3.0m付近の浅部領域は換算N値が5未満であり、有機質土や細粒分を含む緩い砂層としての挙動が確認され、沈下の懸念がある層であった。深度3.0m以深では細砂が分布し、換算N値は10から20の範囲で推移し中位の締まりを示した。深度6.0mから10.0mにかけてはN値の低い粘性土の堆積が認められたが、深度10.0mを超えると換算N値が急激に上昇し、30以上の値を示す密な砂層への遷移が確認され、強固な支持層に到達したことが明確になった。ECPTに基づくFL値の評価では、深度3mから6m付近において建築法のFL値が道示法を下回る逆転現象が確認された。

既往のボーリング調査<sup>14)</sup>およびSWS試験結果<sup>15)</sup>の分析からも、対象地域の地盤構成の傾向が裏付けられた。ボーリング調査結果では、地表面から深度約7mまでの浅層部において、比較的緩い砂層が分布する地点と、N値13から30の比較的締まった砂層が分布する地点の差異が認められた。深度7mから11m付近の中間層には、各測点で一貫してN値が極めて低い腐植土や粘性土の軟弱層が介在しており、これは液状化判定の対象外となる細粒分含有率の高い層である。深度11m以深ではN値が顕著に増加し、密な砂層からなる安定した支持層が形成されている。過去のSWS試験結果においても、標高マイナス1mからマイナス5m付近に換算N値の低い砂層が分布し、その下部に自沈を伴う泥層が介在し、さらに深部でN値が上昇する砂層に移行するという共通の地盤特性が確認された。

## 第6章 物理探査の結果

曾野木小学校とその周辺地域において実施した表面波探査の解析結果から、対象地点におけるS波速度（Vs）は深度方向に明瞭な成層構造を形成していることが確認された。地表面から深度5.0m付近までの表層部においては、Vsが概ね100m/sから140m/sの範囲にある低速度な領域が連続して分布している。深度が増大するにつれて速度は漸増し、深度10.0m以浅では140m/sから170m/s、深度15.0m付近では170m/sから200m/s程度となり、深度15.0m以深の層においてVsが200m/sを超過する構造となっている。東西方向の測線では深度15.0m以浅の速度層境界は概ね水平な堆積構造を呈していたが、南北方向の測線では南側の自然堤防近接部においてVs200m/sの等速度線が深部に位置し、低速度層がより厚く堆積している構造的な差異が見られた。液状化発生地点との対応関係を見ると、表層から深度15.0m付近までVsが150m/s未満となる比較的軟弱な地層が共通して分布していることが明らかとなった。

常時微動探査による単点微動探査の結果では、観測された卓越振動数が調査対象エリア全体で1.5Hzから2.5Hzの範囲に分布し、空間的な差異が存在することが確認された。旧河道範囲内およびその近傍の住宅密集地においては、卓越振動数が概ね1.7Hzから2.0Hzの範囲で安定して推移していた。これに対して、曾野木小学校敷地内の観測点群では2.0Hzおよび2.5Hzという周囲と比較して顕著に高い卓越振動数が記録され、表層地盤が相対的に硬質であるか、工学的基盤までの層厚が薄い可能性が示唆された。一方で、南側に広がる農地領域においては1.5Hzという最も低い卓越振動数が観測され、軟弱な砂質土層などの堆積層が厚く分布していることが推察された。これにより、同一の旧河道という地形分類内であっても、局所的な位置関係によって地盤の震動特性や三次元的な不均質性が存在することが明らかとなった。

## 第7章 原位置サウンディング試験及び物理探査の結果による考察

各種試験結果と文献資料<sup>16)17)</sup>を統合すると、曾野木小学校周辺の地盤は深度方向に6つの層に区分され、それぞれ異なる堆積環境を有することが推定される。地表面から深度1mまでの表層は比較的緩い砂質土であり、昭和40年代以降の水田埋め立てに伴う近年の宅地造成による人工的な盛土層であると考えられる。深度1mから3mの区間はやや締まった砂質土であり、昭和中期に行われた亀田郷の湿田乾田化事業に伴い、近隣の砂丘等から搬入された客土による盛土である可能性が高い。深度3mから6mの区間に分布する非常に軟弱な粘性土や有機質土は、かつての後背湿地や砂丘間低地に堆積した腐植土および洪水堆積物である。深度6mから9mの砂質シルト層は、正保年間以前の旧信濃川の流路において堆積した河川性堆積物である。深度9mから12mの砂質シルトと細砂の互層構造は、活発な河川活動による河床堆積物を示唆している。深度12m以深で確認されたN値30を超える硬質な砂層は、約7600年前から4800年前に形成された最も古い砂丘である新砂丘I（亀田砂丘）の堆積物であり、本地区の工学的基盤となっている。このように、当該地域の地盤は自然地形の変遷と人為的な改変の歴史を重層的に記録している。

各原位置サウンディング試験の特性を比較すると、ECPTは連続的なデータ取得が可能であり、薄い互層の判別や試料採取を伴わない高精度な土質判別において極めて優れた分解能を有している。SWS試験は、ロッドの自沈現象から液状化リスクの高い極軟弱層の存在を検出する感度が高く、広範なスクリーニング調査に適しているが、深部では周面摩擦の影響によるN値推定誤差に留意が必要

である。PDCPTは、深度3m以浅の表層地盤の動的貫入抵抗の測定に特化しており、特に地表面付近の硬質な盛土層の剛性を評価する上でSPTの欠損情報を補完する有用な指標を提供する。これらの手法を適切に組み合わせることで、地盤の三次元的な不均質性を多角的に評価することが可能となる。

これらの結果を踏まえて液状化被害の差異を考察すると、曾野木小学校グラウンドにおいては深度1mから3mの区間にFL値が1.0を下回る液状化しやすい軟弱な砂層が存在していたにもかかわらず、目立った地表面変状は発生しなかった。これは、深度1m以浅の表層部に相対的にN値が高くやや硬質な砂質土層が分布しており、この層が非液状化層として蓋の役割を果たし、下層の液状化層で発生した過剰間隙水圧の上昇や流動化による変形が地表面に到達することを物理的に抑制したためと推察される。対照的に、噴砂や不同沈下が顕著に発生した周辺地域では、微動探査等で示された軟弱な地盤特性から、このような表層の硬質な層が欠如あるいは薄く、軟弱な砂質土が地表面まで連続して厚く堆積していたため、液状化による変状を遮るものがなく直接的な被害をもたらしたと考えられる。すなわち、旧河道という広域的な地形的素因に加えて、表層付近のわずかな硬質層の有無や層厚といった局所的な地盤構造の差異が、液状化被害の発生形態を決定づける主要因であると結論付けられる。

## 第8章 結論と今後の課題

本研究の調査により、新潟市江南区天野地区は信濃川の旧河道という地形的特徴に起因する緩い砂質地盤と浅い地下水位を有しており、これが恒常的な液状化リスクの根本原因となっていることが確認された。1964年の新潟地震当時は水田利用が中心であったため農地への被害に留まったが、その後の市街化の進展により、2024年能登半島地震では宅地や道路インフラへ甚大な影響を及ぼす都市型被害へと被害様相が変化した。各種サウンディング試験と物理探査の結果から、当該地区の地盤は深度12m以深を工学的基盤とし、その上部に河床堆積物、旧流路堆積物、後背湿地由来の軟弱な腐植土層が重なり、さらに最表層には客土事業や近年の宅地造成による人工的な盛土が被覆するという複雑な層序を有していることが解明された。深度1mから3mの客土層は液状化判定において高い発生可能性を示したが、曾野木小学校グラウンドで地表面変状が見られなかったのは、最表層0mから1mに分布する比較的硬質な盛土層が非液状化の「蓋」として機能し、下層の液状化現象の地表への波及を抑制したためであると結論付けられ、周辺被害地域ではこの蓋が機能しなかった可能性が示された。

今後の課題として、本研究で得られた知見は小学校グラウンド周辺という局所的な範囲に限定されているため、単点微動探査で示された地盤の三次元的な不均質性を考慮し、調査対象を周辺の住宅地や農地領域へ拡大して広域かつ高密度なデータ取得を行う必要がある。また、広域調査においては、軟弱層の把握に優れるSWS試験、表層剛性評価に適したPDCPT、詳細な土質判別が可能なECPTといった各試験法の特性とコストを勘案し、表層硬質層の連続性や強度分布を効率的に把握できる最適な調査手法の組み合わせを確立することが求められる。さらに、旧河道だけでなく隣接する自然堤防や後背湿地などの異なる微地形区分においても重点的な調査を実施し、被害が顕著であった地点と軽微であった地点の地盤パラメータ（表層の層厚、N値、S波速度等）を定量的に比較検証することで、複雑な堆積環境下における液状化被害の発生メカニズムの解明と、より高度な液状化リスク評価手法の構築に向けた知見を蓄積していくことが重要な展望である。

・参考文献

- 1)吉田望, 液状化現象:メカニズムから数値解析まで森北出版 2020
- 2)防災科学技術研究所, 1964年新潟地震オープンデータ特設サイト (最終閲覧日: 2026/02/27), <https://ecomplat.jp/19640616-niigata-eq/>
- 3) 国土交通省: 1995年兵庫県南部地震の事例 (液状化被害の事例), (最終閲覧日: 2026/02/27), <https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001466322.pdf>
- 4)国土交通省: 2011年東北地方太平洋沖地震の事例 (液状化被害の事例), (最終閲覧日: 2026/02/27), <https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001466323.pdf>
- 5)石川県ホームページ, 令和 6 年能登半島地震写真で見る被害状況, (最終閲覧日: 2026/02/27), <https://www.pref.ishikawa.lg.jp/kouhou/hot/motto-2024spring/higai-2024spring.html>
- 6)JISA1221:2020スクリーウエイト貫入試験方法
- 7)JGS1433:2012簡易動的コーン貫入試験方法
- 8)JISA1219:2023標準貫入試験方法
- 9)JGS1435:2012電気式コーン貫入試験方法
- 10)道路橋示方書・同解説V耐震設計編.2017
- 11)建築基礎構造設計指針, 日本建築学会.2019
- 12)Tokimatsu, K. and Seed, H. B. (1987):  
"Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking," Journal of ASCE, Vol. 113, GT8, pp. 861-878
- 13)新潟市江南区の歴史<https://www.city.niigata.lg.jp/konan/about/history.html> (最終閲覧日: 2026/2/28)
- 14)ほくりく地盤情報システム<https://www.hokuriku-jiban.info/index.html> (最終閲覧日: 2026/2/28)
- 15)卜部厚志 天野地区液状化地盤調査 2025/6/25
- 16)川島隆義 4. 軟弱地盤とのかかわりー沈みゆく平野とくらしー  
4.1 横越島の歴史と軟弱地盤ー地面が下がり建物が浮くー  
<https://dl.ndl.go.jp/view/prepareDownload?itemId=info%3Andljp%2Fpid%2F10436133&contentNo=1> (最終閲覧日: 2026/2/28)
- 17)鴨井幸彦,安井賢,卜部厚志 新潟及び内野地域の地質地域地質研究報告  
5万分の1地質図幅新潟(7)第8・9号NJ-54-27-16,28-13,34-1  
[https://www.gsj.jp/data/50KGM/PDF/GSJ\\_MAP\\_G050\\_07009\\_2016\\_D.pdf](https://www.gsj.jp/data/50KGM/PDF/GSJ_MAP_G050_07009_2016_D.pdf)