

2024年能登半島地震による 液状化緊急調査報告会

新潟大学 災害・復興科学研究所

2024年4月15日の報告会資料の解説

2024年1月1日に発生した能登半島地震では、新潟県内においても建物被害、津波被害や液状化被害などが発生しました。このうち、新潟市内では西区、江南区、中央区の広い範囲において、液状化による被害が発生しました。

新潟大学では、地震発生直後から新潟市西区や江南区における液状化被害の分布調査を行い、液状化被害の発生した地形・地質環境の概要を明らかにしてきました。この概要は2024年1月29日に報告させていただきました。

液状化した被災地の建物復旧や地域の復興には、液状化被害の平面的な分布だけではなく、液状化した地層の深さ、建物を支えるための地盤の強度の垂直分布、地下水位などの地盤に関する基礎的な情報が必要となります。

このため、新潟大学では2024年3月12日より、被災した地権者様のご協力を得て液状化した地盤の基礎的な情報を得るための調査を実施いたしました。

ここでは、この調査結果の概要を説明させていただきます。

災害復興の目標を掲げたスキーム

次世代に地域をつなぐ(液状化に)安全な地盤の構築

↑
国事業による街区単位での液状化防止事業の導入

↑
防止事業に向けた詳細調査と具体案の構築

↑
街区単位での液状化防止事業を志向した調査
(大学としての予察的調査)
学長裁量事業

↑
研究所による液状化被害の悉皆調査
(被害の把握と体系化)

自然災害からの復旧・復興は、早期に目指すべき目標や方向を提示しすすめていくことが重要となります。被災地は必ず復興させなければなりません。このためには、早期に復興のロードマップを示すことが重要となります。これは個人や地域の復旧復興を考える上で非常に重要なこととなります。

新潟大学では、今回の液状化被害からの復旧・復興は、現在の生活再建も含めて次世代に地域をつなぐための液状化に対して安全な地盤の構築を目標として掲げ、数年スケールで実現していくことが必要と考えています。

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸や関東南部の低地において多くの液状化被害が発生しました。これらの液状化の被災地では、液状化に対して安全な地盤を構築することを目的として、国による街区単位での液状化防止事業が検討され、対策工事が実施されてきました。

今回の新潟地域での液状化被害に対しても次世代につなぐ安全な地盤を構築し再液状化を防止するためには、国事業による街区単位での液状化防止事業の適応が重要なカギとなります。

液状化防止事業を導入するためには、これまでに多くの地域で検討され、実施されてきた調査方法、施工方法、課題などを踏まえて、新潟地域で事業を実施するための詳細調査、施工実験を踏まえた具体案を作る必要があります。

今回、新潟大学が実施した調査は、これまでに多くの液状化被災地で防止事業実施のために行われてきた調査のなかで、基本となる項目を探るために実施したものです。国による液状化防止事業を導入を目指して必須の基礎的なデータを得ることを目的としています。

事業実施をする被災地では、まず液状化の分布を調査し、液状化の実態を把握したのちに適応できる防止事業を選定していくという議論の積み上げになります。これでは時間がかかります。新潟大学では当初から、防止事業の実施を目指した調査を行い、速やかに地域が復興できるように進めていくことを志向しています。



2024年1月に実施した被害調査では、新潟市西区の青山～内野地区、ときめき～善久地区、江南区の天野地区において、噴砂、道路の変形、道路や敷地での亀裂、建物の傾きや沈下、宅地擁壁の損傷、湧水などを記録しています。図中の青丸は、現地調査時点で確認できた噴砂(砂が噴出している亀裂や穴など)の位置をしめしています。

噴砂は、地下水位に満たされた砂層が地下で液状化した際に(地中で)水圧が高まるため、地震時に生じた地盤の弱い部分を使って地表に砂と水が吹き上がる現象です。宅地や道路盛土が強固であった場合は、部分的に液状化した砂と地下水が地盤を破ることができず、噴砂がみられないこともあります。しかし、噴砂が連続あるいは密集して分布する場合は、部分的には噴砂がみられなかったとしても、地下では液状化している地盤が広がっていることを示しています。

これらの液状化の分布と地形の関係をみると、①青山～内野にかけての砂丘斜面の末端部、②ときめき～善久～天野にかけての信濃川の旧流路跡、③青山～内野にかけての県道16号線(旧弥彦街道)より南側の一部の3つのタイプに区分することができます。

既存の地盤ボーリング資料や宅地開発以前の地形から判断すると、①は砂丘斜面末端部の自然地盤の砂層、②は、深度12mまでかつての信濃川が運搬した砂層と宅地造成した際の盛土(砂)から構成されています。また、③は、新潟平野に広く分布する砂層・泥層・腐植土層(平野を構成する一般的な地層)の上に、宅地造成した際に入れた砂の盛土から構成されていることがわかります。

なお、①と②は、1964年の新潟地震においても液状化が発生しています。学術的には、一度液状化した地盤は、再液状化する可能性が高いとされていましたが、2024年の地震においてまさに再液状化が発生してしまいました。



この図は、調査時に外見の観察から判断した建物被害の程度を示しています。全壊相当としている建物は、直接的に計測していませんが、垂直1mに対して5cm以上傾いている建物や30cm以上沈下している建物、亀裂により大きな損壊を受けている建物などを示しています。また、半壊相当としている建物は、外見から明らかに傾いている建物、沈下している建物などを記録しています。外見のみの判断なので、行政が実施した罹災証明のための建物調査と判定が異なりますが、大学の調査は被害全体の様子を把握するための初動調査として実施しており、生活再建が困難な建物数の概要と分布を求めたものです。災害の初動調査では、どの場所に大きな被害が分布しているのか、集中しているのかの把握が重要であり、この把握によって復旧の全体像や規模を探ることができます。

なお、2024年4月26日での新潟市の被害は、全壊96棟、半壊2891棟、一部損壊13,877棟となっています。この図に関連する西区と江南区では、西区で全壊85棟、半壊2374棟、一部損壊8502棟、江南区で全壊1棟、半壊171棟、一部損壊1169棟となっています。新潟大学の初動調査では、全壊相当の建物数を多くカウント、半壊相当は把握できていない建物が多かったことを示しています。初動調査と行政による罹災調査では、方法と目的が異なります。初動調査は、どの地区に大きな支援が必要であり、早急な調査が必要であるかを示すもので、生活再建に向けた少し先の戦略を得るためには重要と考えています。改めまして、調査にご協力いただきありがとうございました。

3月に実施した具体的な調査は、初動調査に基づいて液状化被害が発生した3つのタイプの地盤から、それぞれ2地区を選定して調査を行っています。それぞれの地区は、表層地盤の構造がほぼ同じであると判断し、少ない地区での調査から各タイプの地盤構造の概要把握を行ったものです。

目的

被災地の地盤構造(液状化深度, 地下水位, 地盤強度等)の検討を行い, 地域の住宅再建の基礎資料を提示する。

方法

・液状化被災のタイプ(①砂丘斜面末端, ②旧流路, ③低地)ごとに2地点(地区)を選定して, ボーリングによる地層試料の採取, SWS試験による地盤強度解析, 地下水位測定を行う。

・中央区白山地区において, 比較検討を行う。

成果

○被災タイプごとの地盤構造の把握
(液状化層の深度, 地下水位, 地盤強度分布)

○街区単位での液状化防止事業を志向した必要要素の調査

繰り返しになりますが, 2024年3月に新潟大学が実施した調査の目的, 方法, 成果の見込みです。

目的は, 被災地の地盤構造(液状化深度, 地下水位, 地盤強度等)の検討を行い, 地域の住宅再建の基礎資料を提示することです。

調査の場所と方法ですが, 初動調査による液状化被災のタイプ(①砂丘斜面末端, ②旧流路, ③低地)ごとに2地点(地区)を選定して, 調査を行いました。方法は, ボーリングによる地層試料の採取, SWS試験による地盤強度解析, 地下水位測定などです。

ボーリング調査は, 地盤調査の基本的な方法で, 実際の地層を採取して, 地層の層相(砂, 泥, 腐植土など), 盛土の層相と厚さ, 試料観察から液状化している地層の推定, 地下水位の把握を行うことができます。今回の調査では, 地下の地層試料の採取を目的としているため, 通常実施されるボーリングによる地層の硬さ(N値)の測定は実施していません。

SWS(スクリー・ウエイト・サウンディング)試験は, 住宅を建てる際の地盤の深度方向の強度を把握するための試験で, 一般的に用いられている方法です。この方法は簡易で, 宅地隅や庭先でも実施が可能であり, 25cmごとの地盤の強度を知ることができます。一方で, 地層を採取しないので地層の層相(砂あるいは泥)の判定は曖昧になります。地下水位の測定も可能です。

なお, 2024年の地震では比較的液状化の被害が軽微であった中央区の白山地区において, 比較検討をおこないません。

成果の見込みとしては, 被災タイプごとの液状化層の深度, 地下水位, 地盤強度分布の把握と, 液状化防止事業を志向して, 液状化した砂層の広がりや透水性(地下水の通しやすさ)の把握のための調査としました。

調査手法 (液状化調査に特化した方法: 有効性は検証済)

SWS試験

宅地調査用の一般的機器: **地盤強度の垂直分布**, 地下水位の把握
(長所: 簡易, 宅地で実施可能, 短所: 層相判定は概要のみ)

ボーリング調査

地層試料の観察: **地層の層相** (泥, 砂, 腐植土) の判定, **液状化判定**

ボーリング調査とSWS試験の組み合わせ

SWS試験の機動性を活かし, **地層の分布 (液状化層準)** を把握する



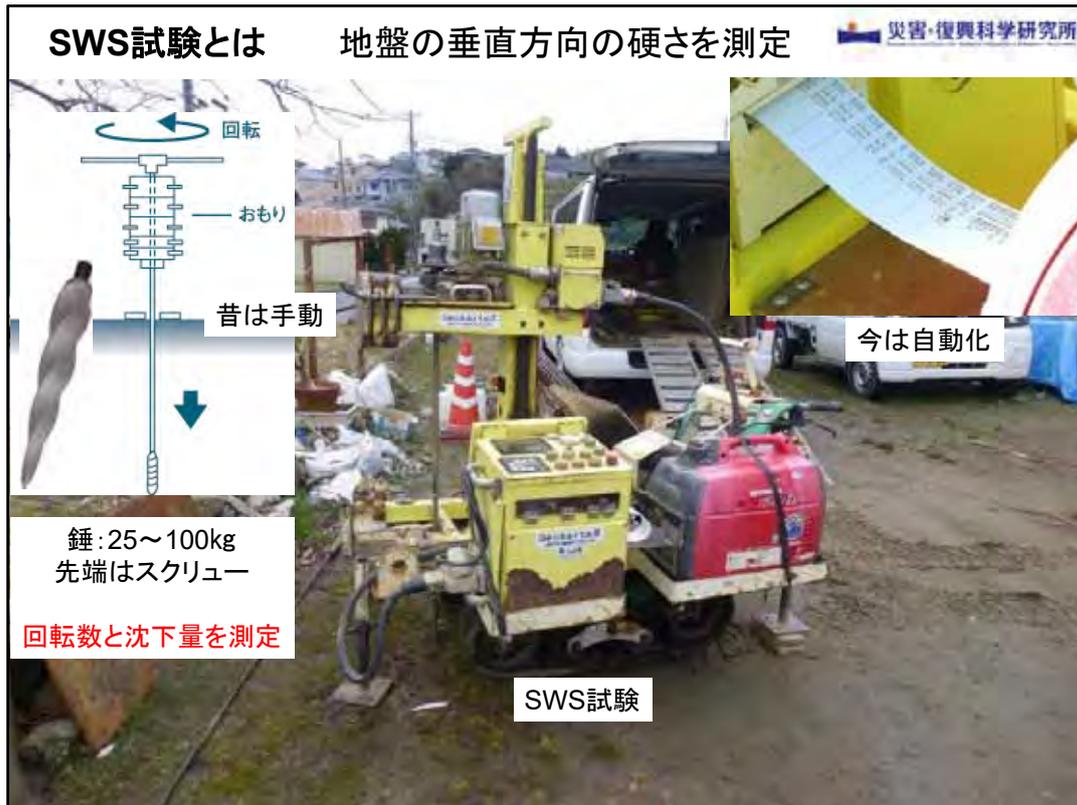
ボーリング調査 (自走式機器)



SWS試験 (狭小敷地でも可能)

今回の調査では, SWS試験とボーリング調査を合わせた方法で, 地盤構造の基礎資料として, 液状化層の深度, 地下水位, 地盤強度分布の面的な分布を把握する方法としました.

SWS試験とボーリング調査の長所を組み合わせることにより, 被災宅地での実際の地盤強度の把握, 地層の面的な分布を短時間で行うことができます. 今回の調査では, 1日でSWS試験 (深さ7~10m) を10地点程度, ボーリング調査を1~2地点実施し, 延べ6日間の調査で7地区の地盤構造の把握を行いました.



SWS試験は、軟弱地盤の強度を把握するために実施されてきた簡易な機器での調査方法です。原理としては、直径3cm程度のネジ状のスクリーに金属棒をつなぎ、25~100kgの錘をつけ、金属棒を回転すると先端のスクリーがねじ込まれる原理を使って、深さ方向に25cm進める際の錘(荷重)と回転数を記録していくものです。硬い地盤であれば、100kgの荷重をかけながら、回転数を多くして25cm進め、逆に軟弱であれば、重りを載せた状態で回転させなくても金属棒が25cm沈下してしまうことになります。

現在は、実際に100kgの重りを載せるのではなく、油圧とモーターによる回転数、モーター負荷などにより半自動で測定が実施でき、地層の硬さの指標であるN値という単位に換算したN値を求めることができます(ボーリングと方法が違うので“換算N値”と呼ばれています)。

SWS試験とは 25cm挿入するための荷重と回転数

荷重 (kN) : 25, 50, 75, 100kgの4段階, 半回転数 (Na) : 100kgで押せない→回転

荷重 (kN)	半回転数 (Na)	挿入深さ (cm)	挿入回数 (回)	挿入時間 (分)	挿入速度 (cm/分)	地盤状況	地盤強度 (kN/m ²)	換算N値
0.25	0	0.25	25	0	0.0	ジャンワリ	粘質土	1.5
1.00	15	0.50	25	60	6.0	ガリガリ	粘質土	60.0
1.00	32	0.75	25	208	7.9	ガリガリ	粘質土	120
1.00	4	1.00	25	16	2.1	ガリガリ	粘質土	39.6
0.75	0	1.25	25	0	0.0	ストーン	粘質土	22.5
0.75	0	1.50	25	0	0.0	ジャンワリ	粘質土	
0.50	0	1.75	25	0	1.5	ジャンワリ	粘質土	
0.75	0	2.00	25	0	2.3	ストーン	粘質土	
0.50	0	2.25	25	0	1.5	ジャンワリ	粘質土	
0.75	0	2.50	25	0	2.3	ジャンワリ	粘質土	
0.75	0	2.75	25	0	2.3	ジャンワリ	粘質土	
1.00	0	3.00	25	0	3.0	ジャンワリ	粘質土	
1.00	15	3.25	25	60	6.0		粘質土	
1.00	21	3.50	25	84	7.8	ジャリジャリ	粘質土	80.4
1.00	21	3.75	25	84	7.8	ジャリジャリ	粘質土	80.4
1.00	25	4.00	25	140	11.4	ジャリジャリ	粘質土	114.0
1.00	29	4.25	25	112	9.5	ジャリジャリ	砂質土	
1.00	25	4.50	25	92	8.2	ジャリジャリ	砂質土	
1.00	29	4.75	25	156	12.5	ジャリジャリ	砂質土	
1.00	24	5.00	25	96	8.4	ジャリジャリ	砂質土	
1.00	41	5.25	25	164	13.0	ジャリジャリ	砂質土	120
1.00	71	5.50	25	234	15.1	ジャリジャリ	砂質土	120
1.00	74	5.80	10	740	15.1	ガリガリ	粘質土	120

荷重のみ
(回転数0)で下がる
ロッド: 自沈
非常に軟弱

地下水位は重要

硬い地盤: 半回転数40以上
杭支持: 40回転が8つ(2m)必要
* N値であれば 12以上(砂層)

2024年1月の地震以降、建物復旧の調査のため、すでにSWS調査が実施されている事例もあります。一方で、SWS試験の結果シートをもらってもよくわからないという声もあります。ここでは調査会社から受け取る試験結果シートの見方について、ポイントを示します。会社によって形式はことなりますが、必要事項は共通です。

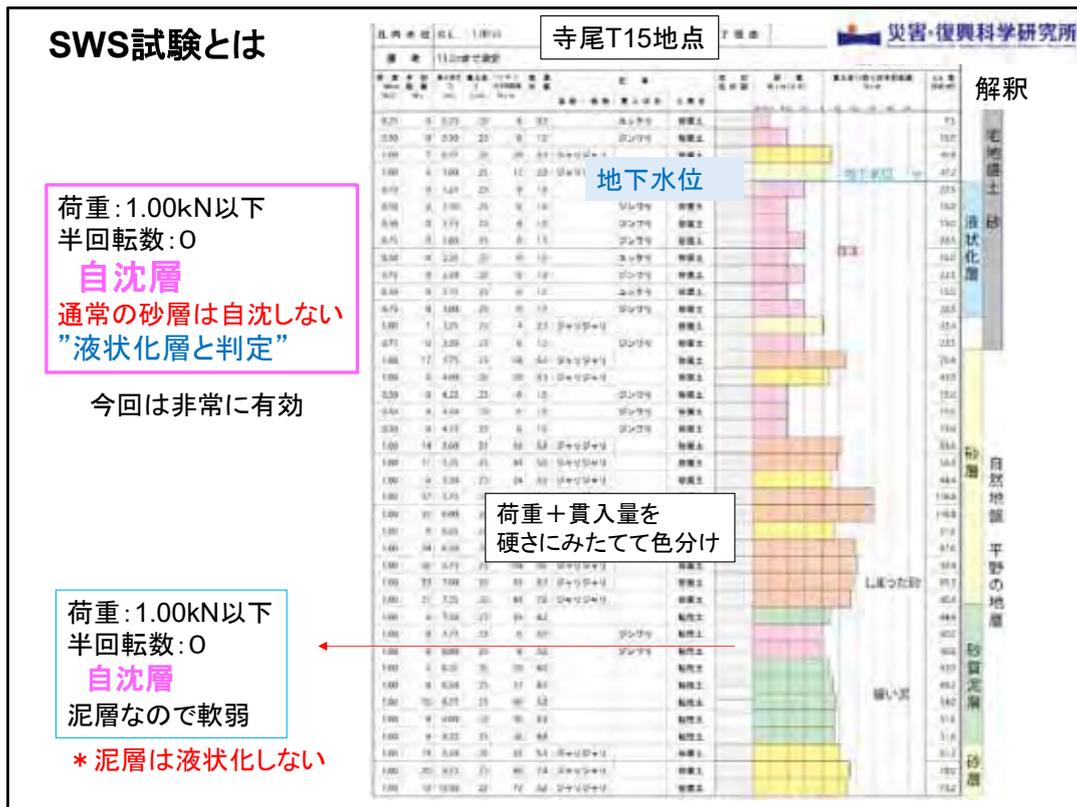
重要なポイントは、25cmごとに計測結果をまとめた際の荷重 (kN) と半回転数 (Na) の数字になります。荷重は25, 50, 75, 100kgの4段階を0.25, 0.50, 0.75, 1.00で示しており、100kg (1.00) であるかこれ以下であるかが、次のポイントとなります。また、半回転数 (Na) はモーターで金属棒を回転させた数を示しています。

実際にはこの組合せが重要で、25, 50, 75, 100kgの4段階の荷重をかけても回転させる必要がなく(半回転数が0)、25cm下げることができる状態は“自沈”と呼ばれ地層が軟弱であることを示しています。次に100kgの荷重だけでは金属棒を下げるできないと、機械が自動的に回転を開始し、25cm下げるのに要した回転数を記録していきます。回転数が多いほど硬い地盤であることを示します。

建物を建てる際には、予定地の硬い地盤の深さと連続性の把握が目的となるので、地盤に住宅を載せるための地盤強度の指標が決められています。例えば、杭のみの効果で住宅を支えるためには、半回転数が40以上の区間が2m連続することというように指標化されています。

今回のように液状化した宅地での住宅復旧に際には、例えばアンダーピニング工法で実施する場合の強度のある地層の深さを把握することなどに用いられます。

なお、今回の大学の調査では、液状化層の深度分布の把握が重要となるので、自沈部分の地層の深度と地下水位との関係を重視しました。

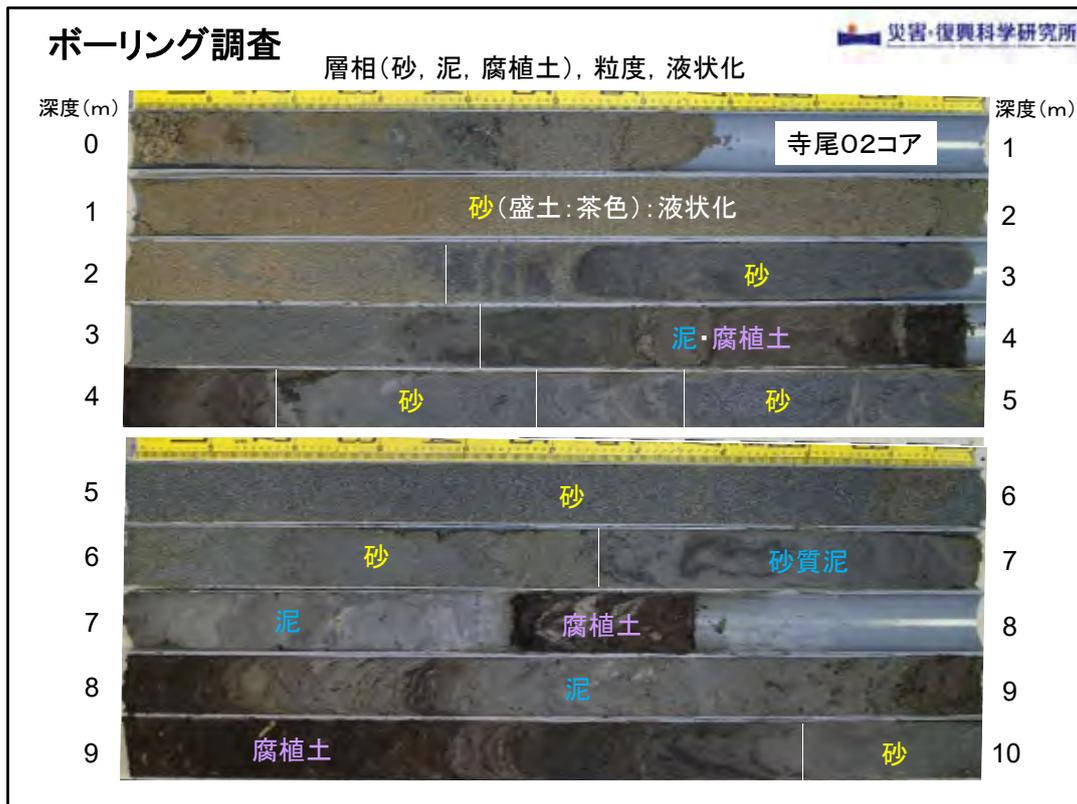


これは、今回、寺尾東地区で調査させていただいた宅地でのSWS試験の結果です。このシートでは便宜的に荷重(25~100kg)と回転数の結果の2つの結果をつなげて色分けをしています。本来違う測定項目を見やすくするために合わせて色分けをしていますので、留意ください。また、色の区分も便宜的なものです。

重要な点として、荷重が100kg以下で回転数がゼロの”自沈”の部分を示しています。この自沈の部分は、地層が軟弱な状態であることを示しており、この場合は、地下水位(深度1m程度)よりも深く、深度3m程度までが自沈の状態を示しています。既存の地盤資料や後述する今回のボーリング結果からみると、この自沈を示す部分は砂層であることが推定されます。一般に新潟平野の地下を構成する砂層は、平野表層部であっても自沈を示すことはほとんどなく、N値は10以下ですがある程度の硬さをもっています。コア試料の観察で液状化しているという事実と合わせると、地下水位よりも深い部分で自沈を示す砂層は、今回の地震で液状化した部分であり、地震後2か月程度では、元々の砂層の強度に戻っていないと判断しました。

一方で、深度8m程度の自沈層は、既存資料から見ると新潟平野で一般的に分布している軟弱な泥~粘土層であると推定できます。泥層は液状化をしませんので、液状化層の検討対象からは除外することができます。

なお、SWS試験結果の右に示した地層の解釈は、一般的な新潟平野の地盤研究結果から推定したもので、SWS試験のみでは、地層が砂であるか泥であるかの推定が不確実であるため、ボーリング調査での検証が必要となります。

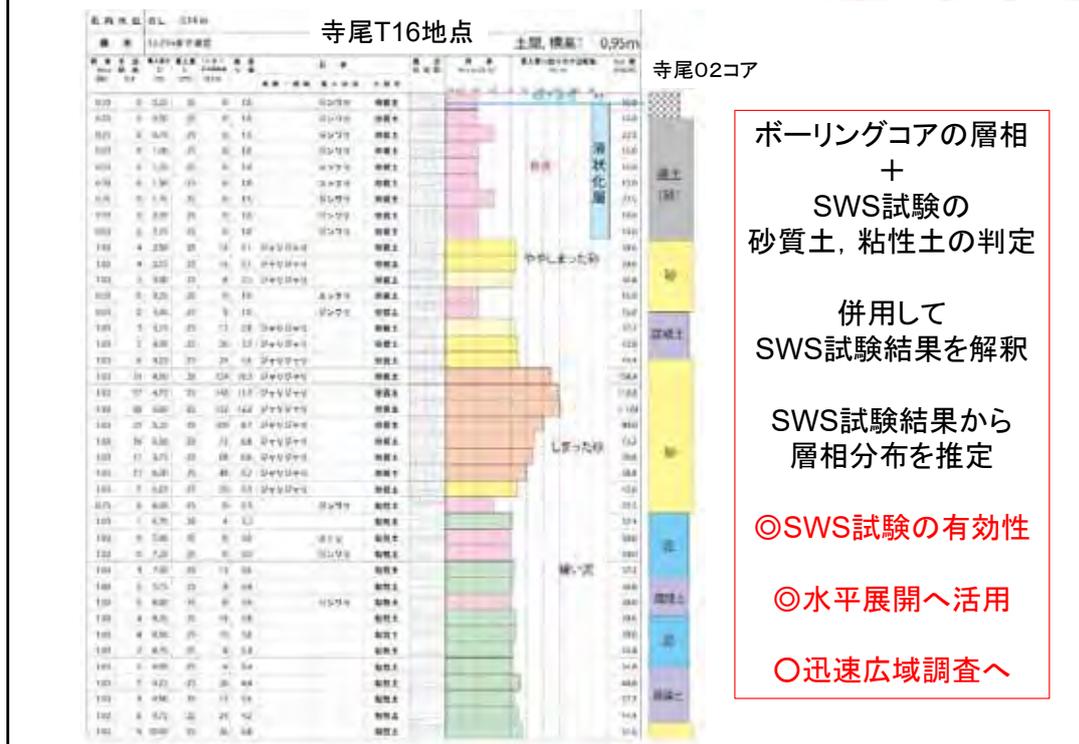


この写真は、寺尾東地区でのボーリング調査の一例です。SWS試験のT-16地点で掘削しています。ボーリング調査での層相の観察とSWS試験の結果を比較することで、近隣の地点であればSWS試験の結果から地層の分布を推定することが可能となります。

今回のボーリング調査は、オールコアと呼ばれる方法で地層を全部採取しています。通常はN値と呼ばれる地層の硬さの試験を実施するため、全体の試料は採取できません。採取した試料は1mごとに半割して内部を観察しています。また、試料は観察のため深度ごとに上下と左右を並べる慣例があります。

この地点では深度10mまでの掘削を実施しました。深度0～2.38mは薄い茶色を呈した中粒砂層からなります。茶色の色調は酸化していることを示しており、色調や粒度から砂丘砂を起源とする盛土と判断できます。弥彦街道より南側では、田んぼに砂を盛土して宅地造成したことがわかっています。深度2.38～3.41mは灰色の中～粗粒砂層であり、深度3.41～4.18mは有機質な泥層や腐植土層からなります。深度4.18～4.90mは中～細粒砂層、細かい葉理のある泥層、中粒砂層、細かい葉理のある泥層の繰り返しとなります。深度4.90～6.20mは灰色の粗粒砂層、深度6.20～6.55mは中粒砂層から構成されています。深度6.55～7.00mは砂質な泥層、深度7.00～7.45mはやや粘土質な泥層、深度7.45～9.80mは一部コアの欠落がありますが腐植土や有機質な泥層から構成され、深度9.80～10.00mは中粒砂層からなります。深度2.38mより深い部分の地層は、新潟平野に一般的に分布している沖積層と呼ばれる河川の流路、洪水による砂、低湿地の地層であることがわかります。

SWS試験とボーリング調査の併用



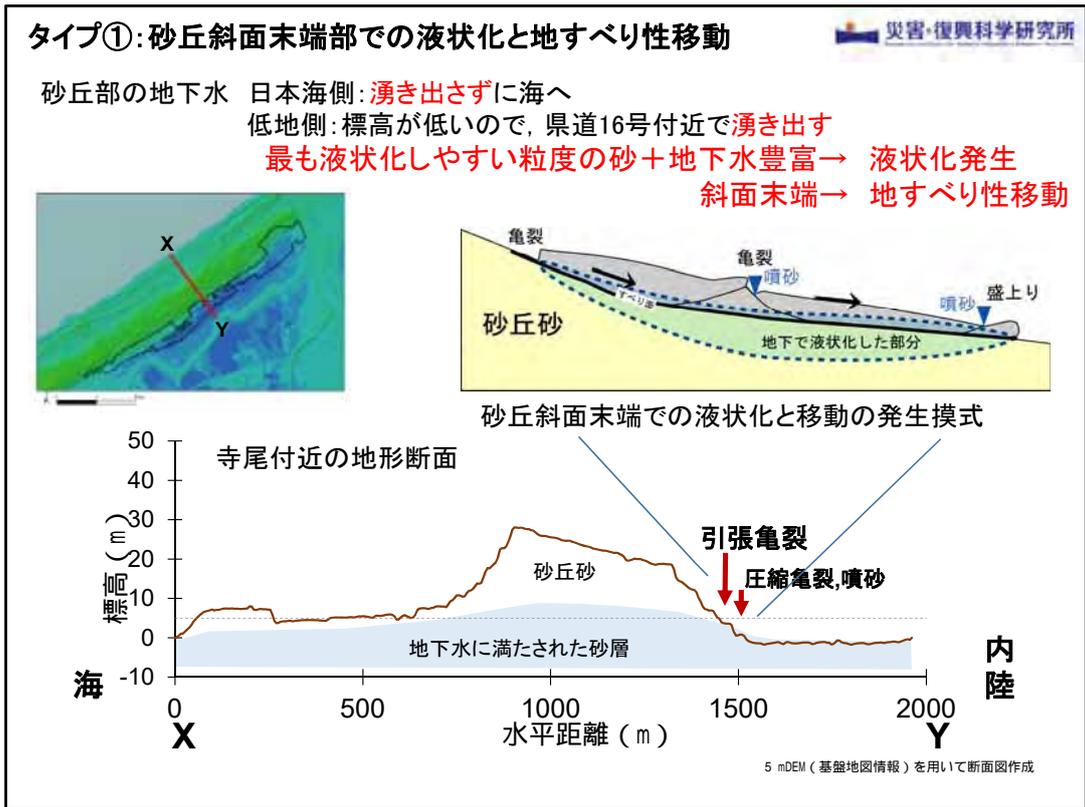
寺尾東T-16地点のSWS試験の結果と、ボーリング試料の観察結果を合わせてみると、SWS試験で深度2.25mまで自沈を示している軟弱な地層は、宅地造成の際に盛土した砂層であることがわかります。この下位のSWS試験で換算N値3程度を示す層位は砂層、少しずつありますがこの下位で自沈を示す部分が腐植土層に相当すると判断できます。さらに下位のSWS試験で換算N値5～12を示す部分(図中の黄色や薄い茶色の部分)は砂層で、より下位のSWS試験で自沈を挟む換算N値2～4程度の地層は泥層や腐植土層に相当することがわかります。

このようにSWS試験の結果は、地層の硬さのみを示したデータですが、実際の地層を採取して比較することで、SWS試験結果が示す換算N値の大小は、砂層や泥層を示しているものと推定でき、近傍の範囲であれば、換算N値のパターンの対比を地層の対比として用いることが可能となります。

また、繰り返しになりますが、地下水位より深い部分で、自沈(換算N値1～1.5程度のピンク色の塗色部)を示す部分は、地層が砂層である場合は、今回の地震によって液状化した部分であると推定することができます。

さらに、実際の地層を採取することで、液状化防止事業の工法選定に重要な要素である砂層の透水性(水の通しやすさ)も判断することができます。

このように、SWS試験とボーリングによる地層観察を併用することで、SWS試験の機動力や狭小な敷地でも実施可能な長所を活かして、調査をすすめることが可能となります。



青山～内野にかけての砂丘斜面の末端部では、液状化に伴い発生した引張亀裂（引っ張りの作用で生じた亀裂）と圧縮亀裂（変形）がセットで広範囲に認められます。このような地すべり性の移動は、1964年新潟地震においても青山～内野にかけての砂丘斜面の末端部で発生しています。また、同様の変形と移動は、1984年日本海中部地震（八郎潟西縁）、2004年中越地震・2007年中越沖地震（山本団地、刈羽・稲葉など）でもみられた現象です。2024年能登半島地震においても、富山・伏木地区、石川・内灘地区で同様な現象による被害が認められます。

寺尾地区を例に砂丘の地形と地下水の関係をみると、新潟大学の立地する砂丘は標高20～25m程度であり、一般に地下水位（地下水に満たされた砂層の上面）は、標高0～数m程度の深い位置にあります。例えば、新潟大学の北側の運動場は標高5m程度ですが地下水位は標高0mにあります。液状化の観点からみた場合、砂丘の北側は標高5m程度であるため、地下水は地表に湧き出さずに日本海へゆっくりながれていきます。地下水に満たされていない地層が5m程度あるため液状化はしていません。一方、砂丘の南側で県道16号（旧弥彦街道）より南側の地域は標高がマイナス2m程度と低いため、地下水は、標高0m程度の位置（ちょうど弥彦街道）から湧き出しています。常に地下水に満たされた砂層があるため、地震時に液状化を引き起こします。

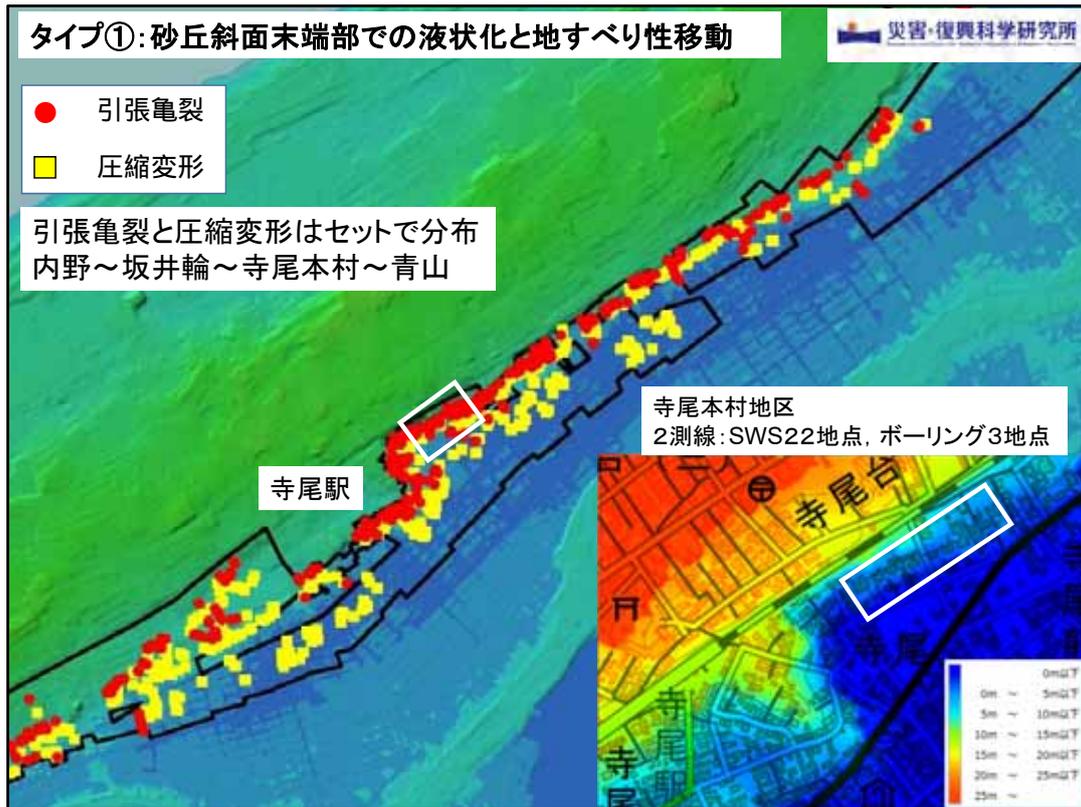
地すべり性の移動が発生する原理は、砂丘斜面末端部付近の地下で液状化（学術的には間隙水圧の上昇）が起こり、水平な地盤であれば、その場所で噴砂や建物沈下が発生しますが、斜面の地下であるため液状化した地層の部分で砂が少し傾斜方向に移動するため、その上に載っている砂層（宅地地盤）も下方にずれる現象が発生するものと推定できます。



寺尾地区の宅地での引張亀裂の例です。一般的な地すべりのように大規模に移動するのではなく、10数cmの水平変位と10cm程度の垂直変位を持った亀裂が、数列認められ、傾斜方向に移動しているようすが認められます。なお、このような移動した宅地地盤では、噴砂は認められません。

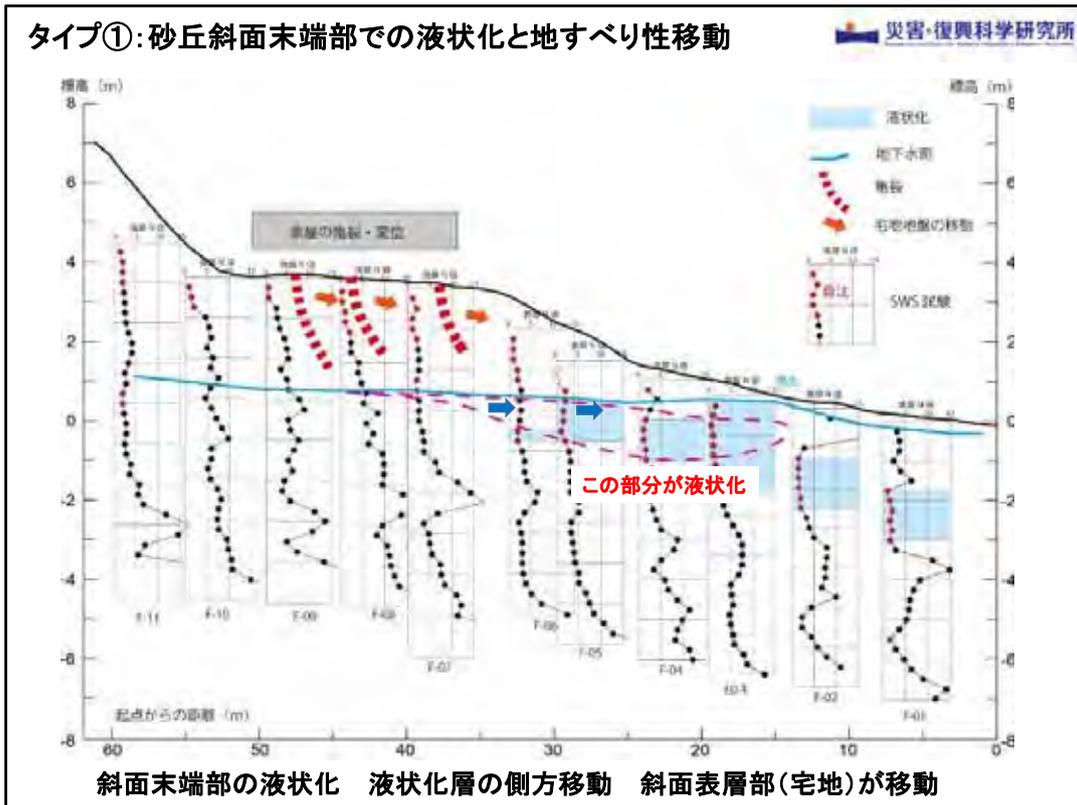


この写真は、寺尾地区の西側の坂井輪地区で認められた圧縮変形の様です。左右の写真は同じ位置のものです。この場所では、県道16号(旧弥彦街道)の北側(砂丘斜面側)の歩道部分が短縮する形で膨らんでのりあげているようすが認められます。



この図は、坂井輪～寺尾地域の砂丘斜面末端部に認められる引張亀裂と圧縮変形の分布を示したものです。液状化を要因とした引張亀裂と圧縮変形は、砂丘斜面末端部の地形と地下水位に関係が深いため、同じような標高や位置に連続して分布しています。

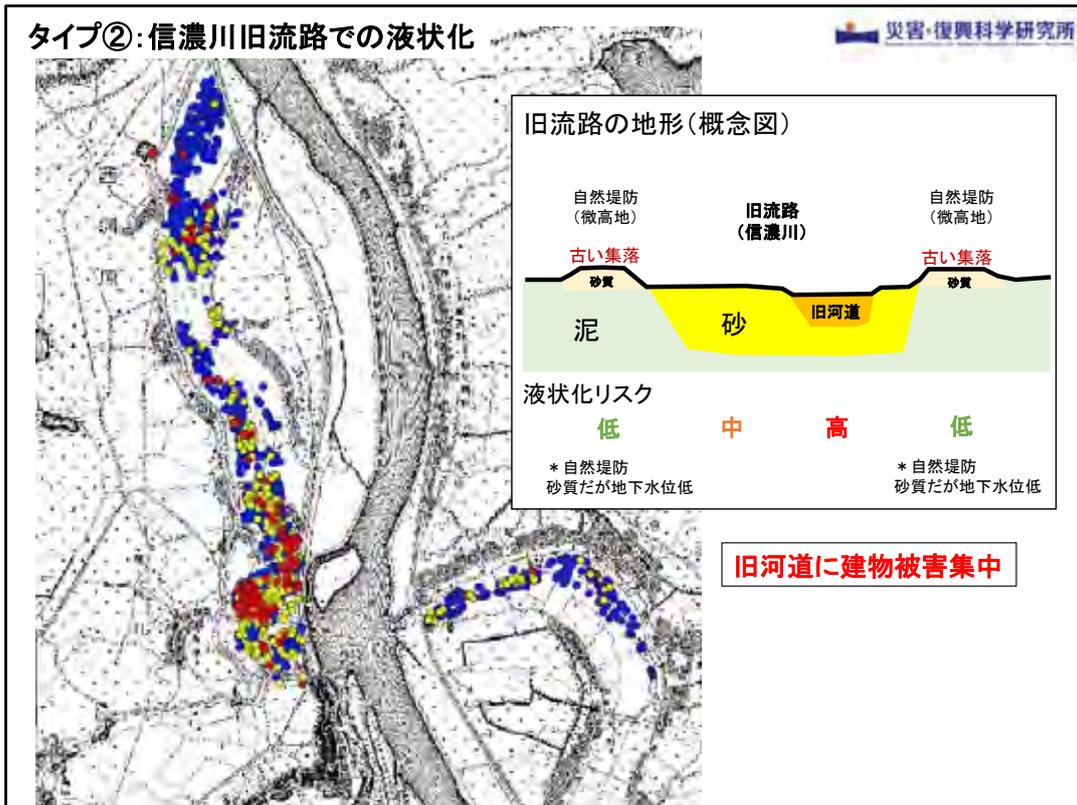
今回の調査では、寺尾(寺尾本村)の地権者様の協力を得て、砂丘斜面末端において2測線を設定し、SWS試験とボーリング調査を実施しました。



このうち1測線の調査結果の概要を説明します。この測線では、約5mの間隔で地形の変化に合わせて11地点でSWS試験を、測線の始点を終点でボーリング調査を実施しました。

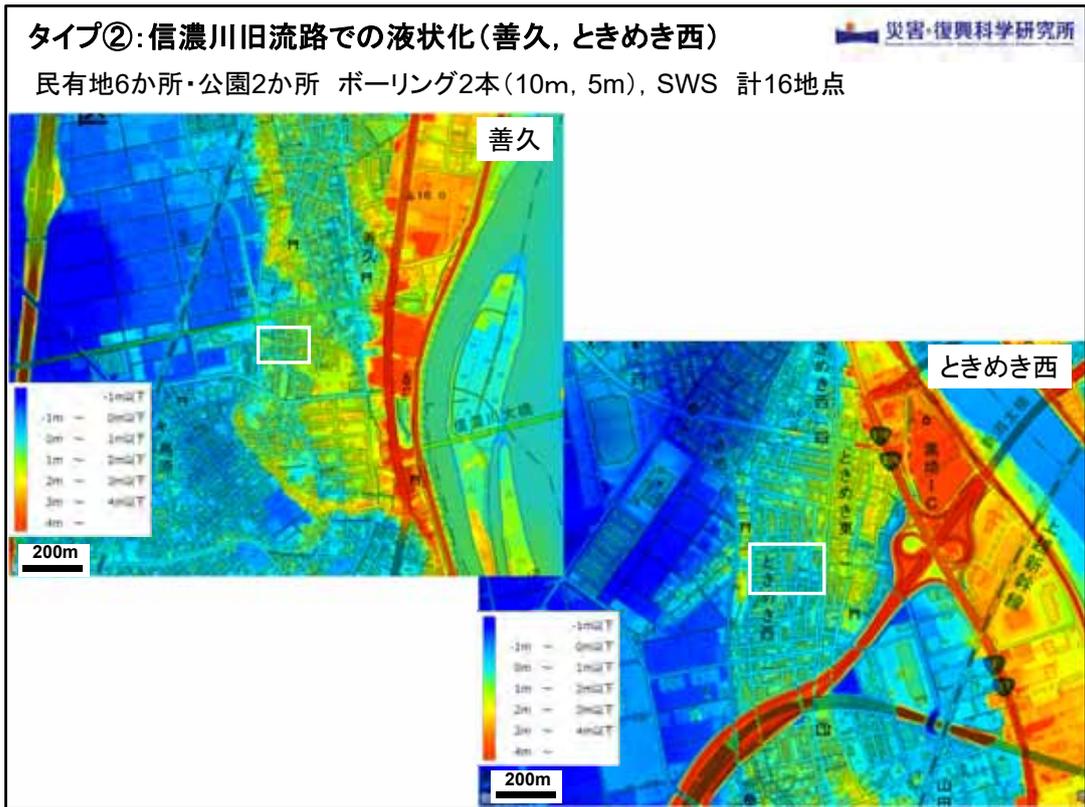
各地点でのSWS試験の結果のうち、換算N値の深度方向への変化を示しています。地下水位は、F-03地点の斜面の末端部で地下水の湧水が認められ、この地点より南側での地下水位は標高0.3～-0.3m程度であり、北側の砂丘斜面では標高0.3～1.2m程度に位置しています。また、標高-4.0mまでの地層は砂層であることから、地下水位以下の部分でSWS試験において自沈している部分(グラフ中の赤丸)は液状化している部分と推定できます。SWS試験による25cm単位での地層の測定では、F-01～F-05地点の地下で液状化している(間隙水圧が上昇した)層位が連続しています。また、建物のある平坦部での明らかな亀裂はF-09付近に認められます。

この測線での検討では、砂丘斜面の地下水位より下の砂層がすべて液状化したのではなく、上載荷重(地下水面より上の砂層の重さ)が低い砂丘斜面末端部の地下水位より低い部分が液状化し、液状化した部分のなかで砂層が少しかだけ側方に流動し、この影響で地下水位より上部の砂層が斜面末端方向に移動したものと考えられます。この測線では噴砂や顕著な圧縮変形は認められませんが、砂丘斜面末端部の地下で液状化現象が起こり、少しかだけ側方に移動したことにより、斜面が移動したものとみられます。



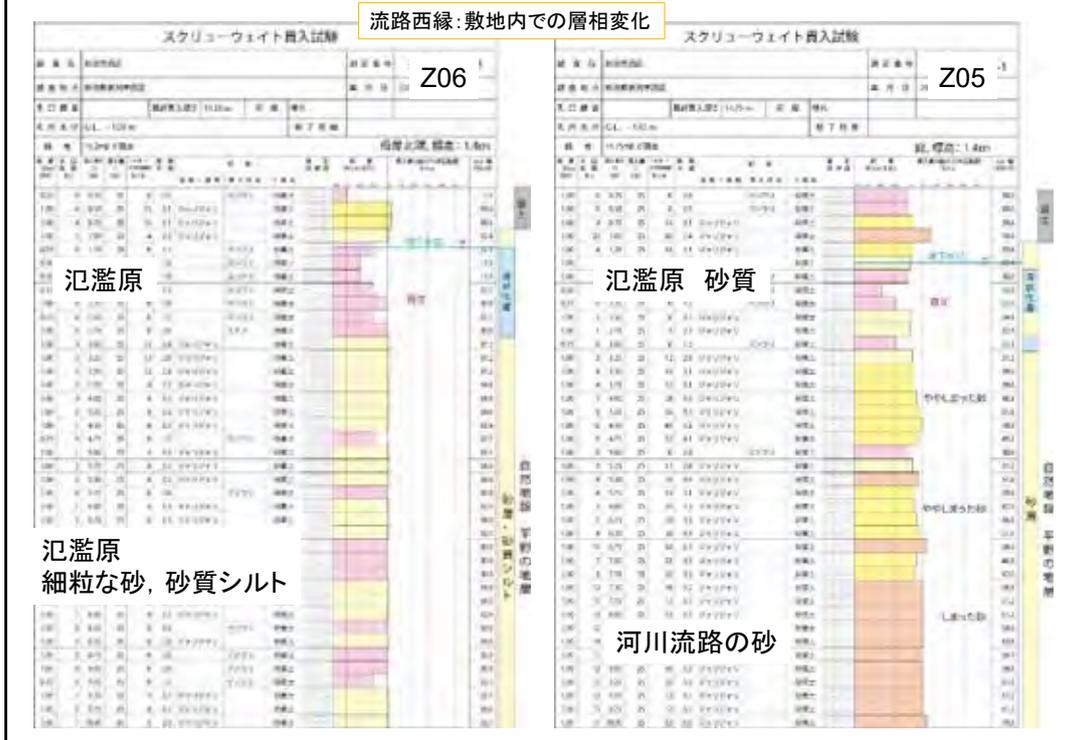
ときめき～善久～天野地区の液状化(噴砂, 道路変形, 建物被害)は, 明治45年発行の地形図にみられるように, 信濃川の流路跡で発生しています。信濃川のような大きな河川による地形と地質の形成をみると, 旧流路は, 水が流れていた旧河道と洪水時には水が流れる平坦地から構成されます。また, 大きな洪水の際に流路から洪水があふれたときに流路の縁辺に形成される自然堤防と呼ばれる微高地が形成されています。自然堤防は微高地であるため, 洪水の被害を受けにくいことから, 古くから集落が分布しています。加えて, 旧流路よりは地下水位が低いことから液状化しにくい地盤となっています。

ときめき～善久～天野地区の旧流路では, 1964年新潟地震の際にも液状化が発生しています。1964年の時点では, 旧流路内の平坦地は畑, 最後まで水が流れていた河道は田んぼとして利用されており, 畑の被害, 田んぼの被害として記録されています。



この地区では、善久, ときめき西の地権者様にご協力を得て、SWS試験とボーリング調査を実施しました。

タイプ②: 信濃川旧流路での液状化(善久)



善久地区でのSWS試験の例です。善久地区は既存ボーリング資料から判断すると深度12m程度まで砂層が連続して分布していることが推定できます。砂層が連続していることは、比較的長期にわたり信濃川の流路が固定され、同じ場所を流れていたことが推定できます。一方、地形から判断できる流路の幅は300~350m程度あるため、流路の部分がすべて同じ砂層で均質に形成されているかどうかは、詳細な調査が必要となります。

Z-06地点とZ-05地点は近接した地点ですがSWS試験の結果をみると、Z-05地点では深度3mより深い部分でややしまった砂層が連続するのに対して、Z-06地点では、深度3mより深い部分で軟弱な地層が分布しています。Z-06地点の方が自然堤防に近い位置にあることから、換算N値の低い部分は砂質な泥層である可能性があります。後で述べるように、SWS試験の結果からみるとZ-01~Z-05地点はほぼ同じ地層の分布が推定され、Z-06地点のみが異なる結果となっています。

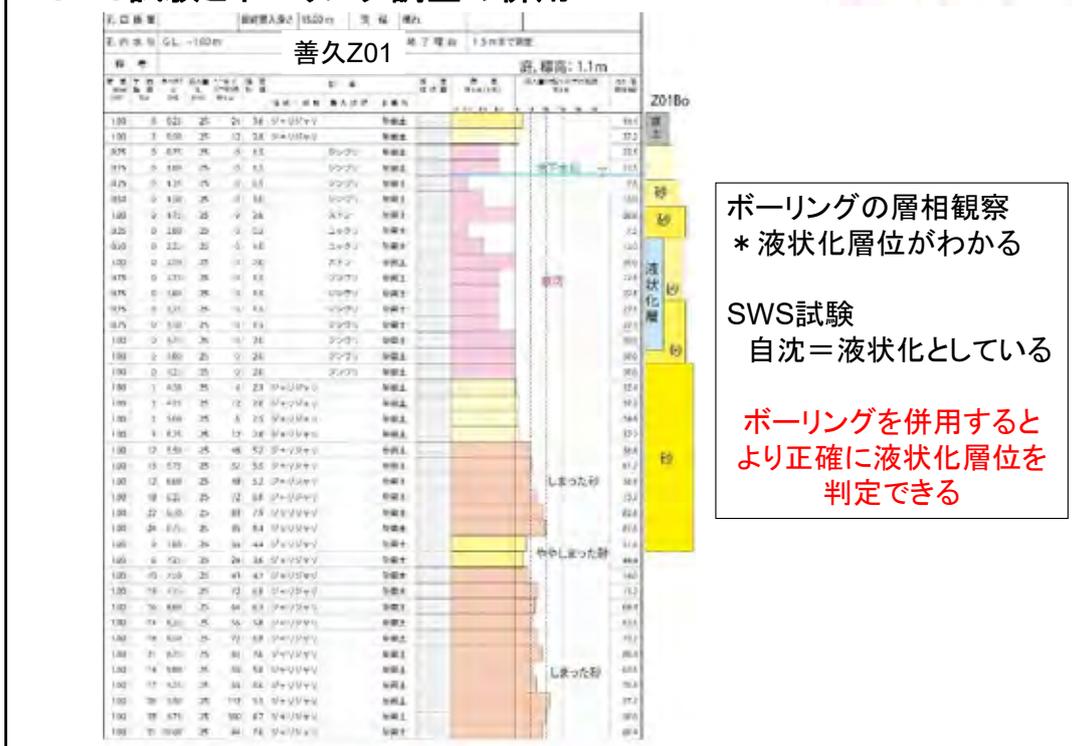
【注】4月15日の発表資料では、順序(内容構成)が誤っていますが、このまま説明しています。



善久地区では、SWS試験と合わせて1地点において深度8mまでボーリング調査を行い試料を採取しています。

深度0～0.58mは、茶色で淘汰の悪い(粒子の大きさがそろっていない)泥質砂層で宅地造成した際の盛土と判断できます。深度0.58～1.10mは灰色の泥質砂層、深度1.10～1.50mはやや泥質な細粒砂層から構成されています。深度1.50～1.90mは一部に砂質泥層の薄層を挟む中粒砂層や細～中粒砂層の互層(地層が交互になっている層)からなります。深度2.00～2.80mは液状化した中～粗粒砂層、深度3.00～3.85mは液状化した粗粒砂層から構成されます。深度3.85mより下位は粗粒～極粗粒砂層から構成されています。深度8mまでの全体をみると、深度の深い方にある粗粒砂層はやや強い流れによって運搬されたことを示しており、浅い深度になるにしたがって、細かい砂層や泥質な砂層に変化していることから、徐々に川の強い流れの場所ではなく水流が弱く浅い環境に変化してきたことがうかがえます。また、砂粒子が流動変形して液状化している様相を示す砂層の部分もありますが、深度1.50～1.90mは、地層として順番に堆積した際の構造が残っていることから、液状化していないと判断できます。

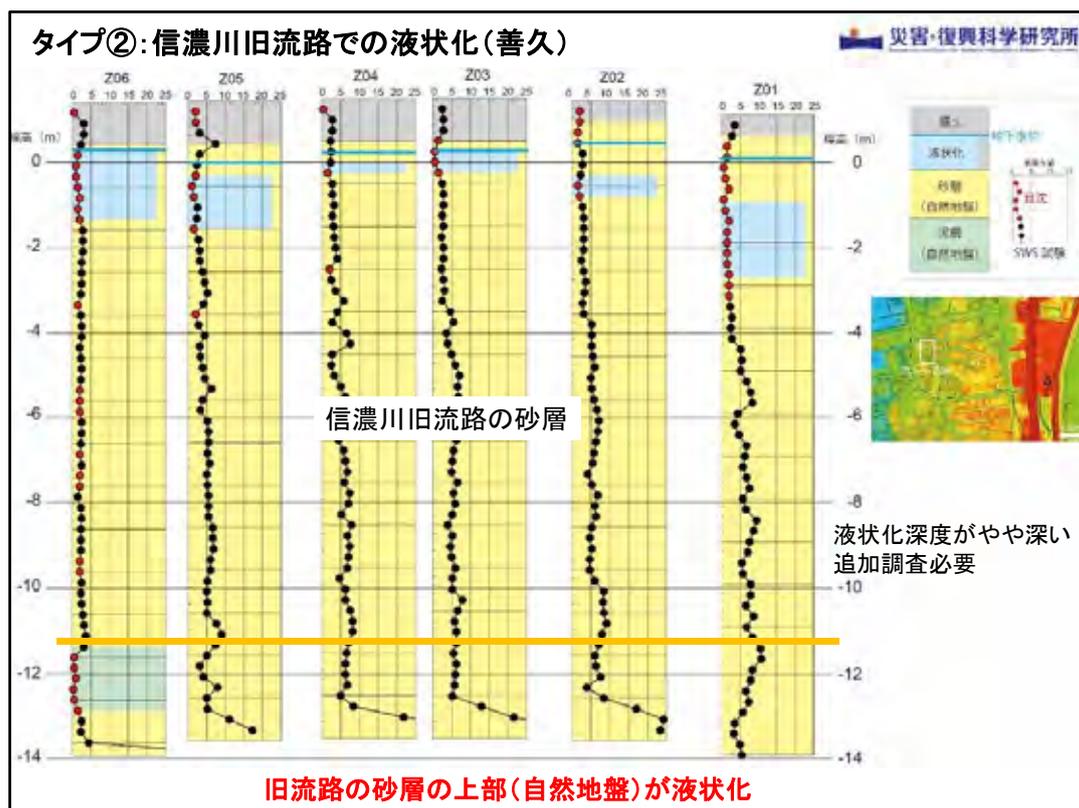
SWS試験とボーリング調査の併用



先ほどのボーリング調査の地点でのSWS試験の結果です。SWS試験の結果では深度4.25mまで自沈層が連続していますが、コア試料の観察結果と合わせると、SWS試験での自沈層がすべて液状化している部分ではなく、もともと泥質で軟弱な部分と、明らかに液状化している砂層から構成されていることがわかります。

今回の調査は、SWS試験の機動性を重視した調査手法であり、多くの地点でSWS試験での自沈層を液状化している部分と判定して、全体像の把握を優先していますが、このような事例もあることから自沈層が厚い部分で液状化層を理解するためには、ボーリング調査の併用が必要であることを示しています。

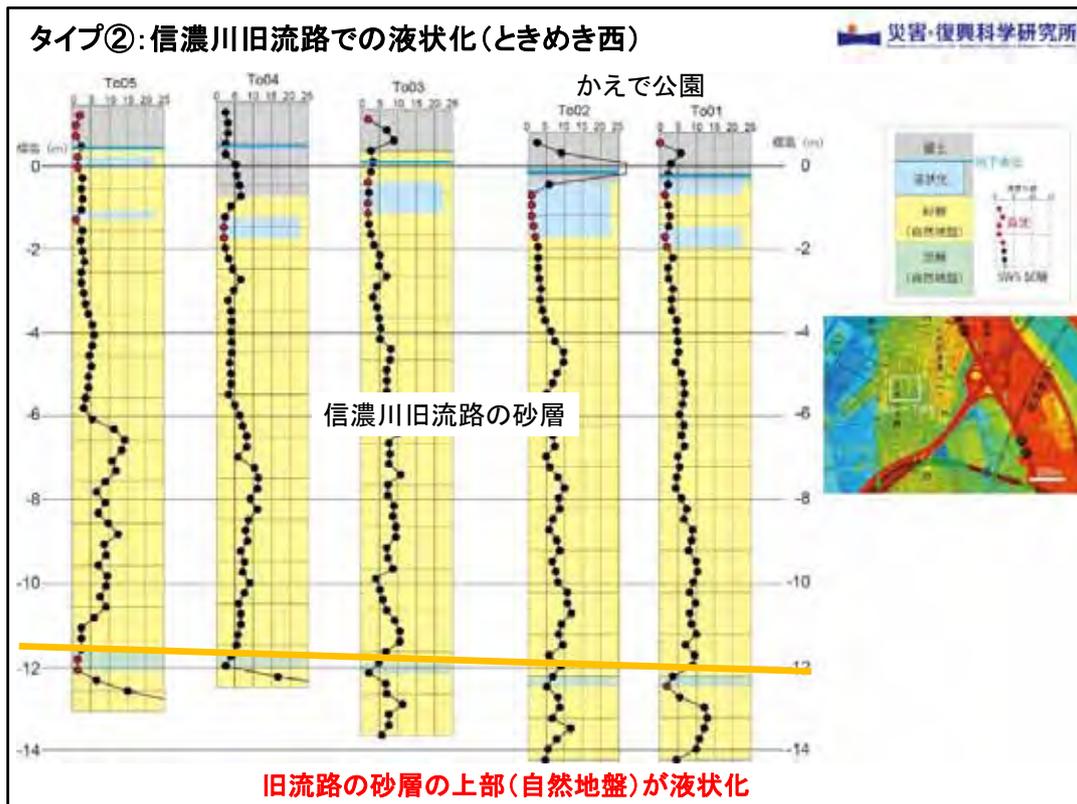
今後、液状化防止事業の適応を広範囲で検討していく際には、SWS試験の機動性を活かしながら、ポイントなる地点でボーリングを併用する必要性を示しています。



善久地区で実施したSWS試験の対比です。善久地区は、多くの家屋が甚大な液状化被害を受けています。今回調査して地点は、旧流路の西縁に近い100m程度の範囲で、6地点の調査を行いました。

全体をみるとZ-01～Z-05地点のSWS試験による換算N値の変化は類似しています。Z-01地点でのボーリング試料の観察から推定すると、Z-01～Z-05地点の標高-4mより下位の地層は、粗粒な砂層であると推定できます。Z-06地点は前述したように深部においても全体に換算N値が低いことから流路縁辺の地層である可能性があります。

SWS試験による自沈層を液状化層とみなすと(Z-01地点の詳細は前述)、液状化していると推定できる地層は、地下水位(標高0m程度)より下位の標高-2m程度までの浅い部分に広がっていることが推定できます。



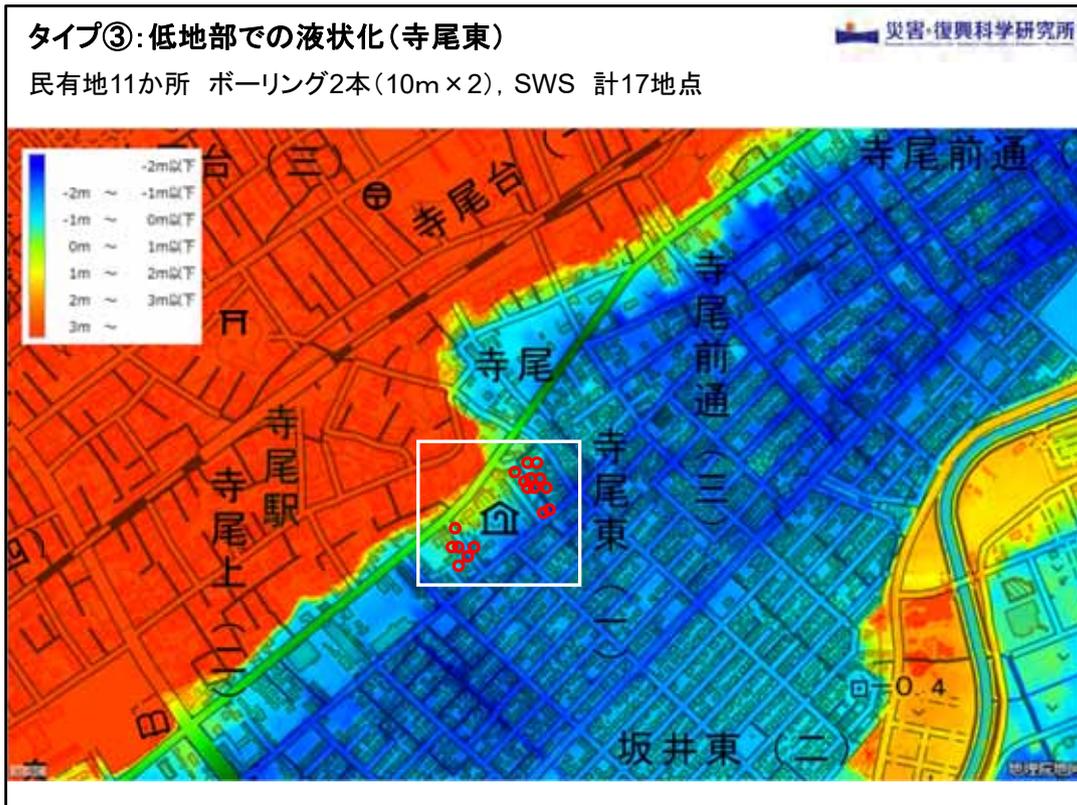
かえで公園を含むときめき西地区では5地点において、SWS試験を行いました。To-01～To-05までは200m程度の範囲ですが、SWS試験による換算N値のパターンは類似しています。また、換算N値は5～10とややしまっていることから、標高-12m程度まで旧流路に堆積した砂層が分布しているものと判断できます。

また、SWS試験による自沈層を液状化層と判定した場合、全体には標高-2m程度の深さまで液状化層が分布していますが、善久地区と比較すると液状化層の厚さは薄く、部分的に液状化している可能性があります。

善久地区と比較して、地下水位以下で液状化層の厚さが薄いことは、液状化被害の程度が善久地区とは異なることを示している可能性もあります。

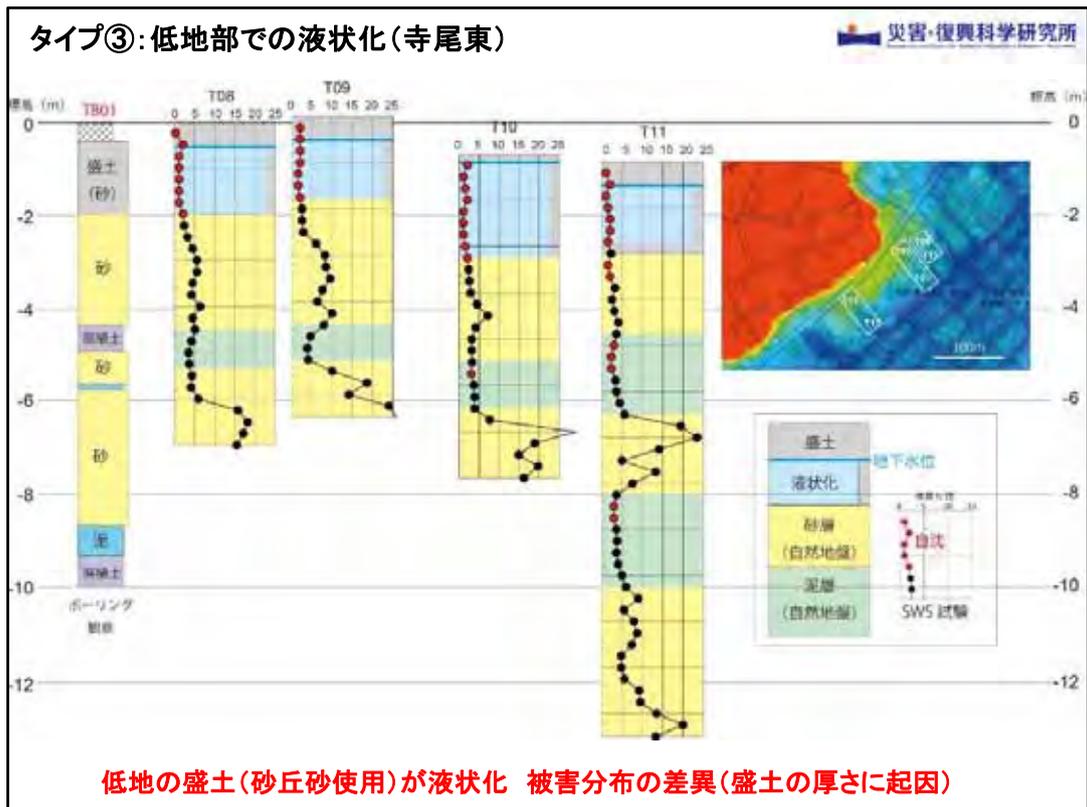


寺尾東地区などでは、県道16号よりも南側(平野側)においても液状化被害が集中しました。典型として、寺尾東地区において調査を実施しました。



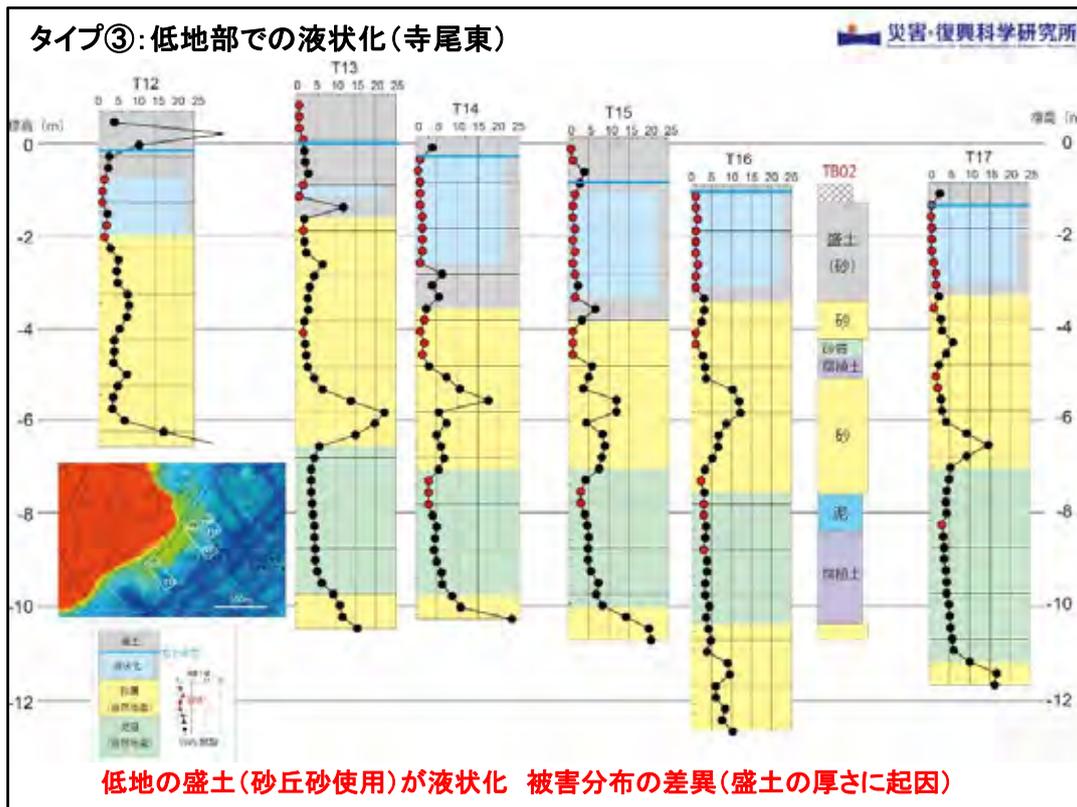
JR寺尾駅周辺では砂丘斜面が南東～南側に張り出すように分布しています。調査対象とした寺尾東地区では、砂丘斜面末端に位置する県道16号線の標高が、南西側や北東側と比較して1～2m程度高くなっています(図中の四角の部分)。

地権者さんによると県道16号線が砂丘末端部のやや高い部分に位置しているため、この場所で宅地造成前の田んぼに県道から降りていくために、四角の枠内では12段の階段があったのに対して、この部分の南西側や北東側では2段の階段となっていたとのことでした。このことは、県道の高さに合わせて田んぼに盛土をして宅地造成したため、盛土の層厚が周辺の低地部と比較して厚くなっていることを示唆しています。



T-08～T-11地点は、標高0m～-1mで全体としては低地側に低くなる地形を示しています。先ほどのT-01～T-07地点の道路を挟んで東側となります。また、地下水位は各地点とも深度0.5m程度となっており、地下水位も地形勾配とあわせて傾斜しています。

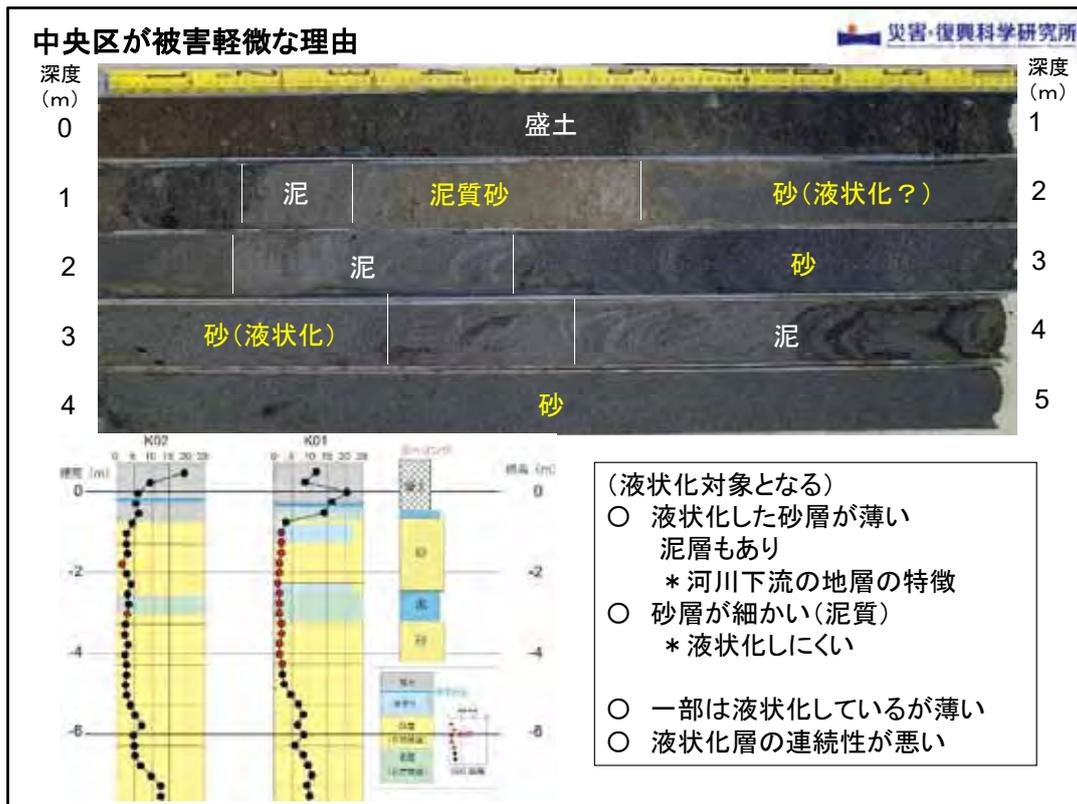
先ほどと同様に、各地点のSWS試験とボーリング調査による地層の観察と合わせると、図中の灰色で示した部分が盛土(砂層)、黄色で示した部分が砂層(自然地盤)、より下位の黄緑色で示した換算N値が5以下の部分は、泥層や腐植土層であると推定できます。また、各地点ともに深度2m程度(標高-2～-3m)まで自沈層が認められ、盛土の砂層が液状化している可能性が高いことがわかります。



T-12～T-17地点は、標高0m～-1mで全体としては低地側に低くなる地形を示しています。先ほどのT-01～T-11地点より西側の街区となります。また、地下水位は各地点とも深度0.5～1m程度となっており、地下水位も地形勾配とあわせて傾斜しています。

先ほどと同様に、各地点のSWS試験とボーリング調査による地層の観察と合わせると、図中の灰色で示した部分が盛土(砂層)、黄色で示した部分が砂層(自然地盤)、より下位の黄緑色で示した換算N値が5以下の部分は、泥層や腐植土層であると推定できます。また、各地点ともに深度2m程度(標高-2～-3m)まで自沈層が認められ、盛土の砂層が液状化している可能性が高いことがわかります。

このように、寺尾東地区で液状化による建物被害や道路の変形が顕著な範囲は、盛土(砂層)の層厚が3～4mで周辺の低地の宅地よりも厚く、この盛土の砂層は砂丘砂を用いているため均質であり、かつ地下水位が高いことから、盛土部分が液状化したものと推定されます。



新潟市中央区の白山地域では、2024年能登半島地震によって道路や宅地内の一部で噴砂が認められましたが、1964年新潟地震の際の被害状況と比較すると被害が少なくなっています。西区の液状化被害が発生した地盤との比較検討のため、中央区の鏡淵小学校のご協力を得て、SWS試験とボーリング調査を行いました。

ボーリング調査から、深度1.15mまでは礫などを含むやや硬い盛土、深度1.15～1.60mは泥層や泥質な細粒砂層、深度1.60～2.15mは液状化している可能性がある砂層、深度2.15～2.45mまでは泥層から構成されています。また、深度2.45～3.00mは堆積構造が残っている粗粒砂層、深度3.00～3.50mは中粒砂層、深度3.50～4.00mは薄い腐植土層を挟む泥層で、深度4.00～5.00mは中～粗粒砂層から構成されています。

SWS試験の結果(K-01)では盛土より深い部分で自沈層が連続していますが、コア観察の結果からみると軟弱な泥層もあり、すべてが砂層で液状化しているわけではないと判断できます。

全体としてみると、白山地区は河川の河口部であることから、砂層や泥層から構成され、液状化する可能性のある砂層が薄いことがうかがえます。今回の地震では一部の砂層が液状化していますが、液状化した砂層が西区と比較すると薄かったものと推定できます。

今回の調査は、限定的な箇所のみでの検討であり、次の地震による中央区での再液状化の予測にむけた調査の展開が必要となります。

被災タイプごとの液状化の様相

タイプ① 砂丘斜面末端部(寺尾本村)

○斜面末端部の深度1～2m部分が液状化し、宅地部の表層地盤が移動した。
砂丘砂起源の砂層であり、◎透水性高い、◎分布の連続性あり

タイプ② 信濃川旧流路(善久、ときめき)

○深度1～3m部分が液状化した。
旧流路の中～下部:粗粒砂で液状化していない。上部～最上部:細粒砂*
河川起源の砂層であり、○透水性高い、○分布の連続性あり
*細粒砂は最も液状化しやすい、

タイプ③ 低地(寺尾東)

○深度1～3m部分が液状化した。
砂丘起源の砂の盛土であり、◎透水性高い、○分布の連続性あり
*盛土層厚が比較的薄い部分では被害軽微の傾向

全体的傾向

地下水位以下の深度1～3m程度までが液状化。
砂層の透水性高い、連続性あり: 対策事業選定の重要ポイント

被災タイプごとの液状化層の特徴を以下にまとめます。

○タイプ① 砂丘斜面末端部(寺尾本村)

斜面末端部の深度1～2m部分が液状化し、地層内で側方流動したため、これに伴い宅地部の表層地盤が移動し、地すべりのような現象が発生しました。また、液状化した砂層は砂丘砂であり、透水性が高く、砂層の連続性も高いと判断できます。

○タイプ② 信濃川旧流路(善久、ときめき)

信濃川が運搬してきた砂層のうち、表層部の深度1～3m部分が液状化しています。この部分より下位の粗粒砂層は液状化していないものと判断できます。液状化した砂層は信濃川が運搬してきた砂層であり、透水性が高く、砂層の連続性は高いと判断できますが、全体として流路内での自然堆積のため、表層部は細粒な堆積物となっている可能性もあり、層相の均一性については(広範囲なので)詳細な検討が必要と考えられます。

○タイプ③ 低地(寺尾東)

宅地造成の際に盛土した砂層のうち地下水位以下の深度1～3m部分が液状化しています。液状化した砂層は、砂丘起源の砂であることから透水性が高く、盛土した範囲での分布の連続性も高いものと推定できます。

全体としては、地下水位以下の深度1～3m程度までの部分が液状化しており、液状化した砂層の透水性は高く、連続性もあることが推定できます。この砂層の透水性と連続性は、液状化防止事業の工法選定の重要なポイントとなります。

液状化防止の原理

○地下水位の制御

水位を下げて、一定の厚さ以上に非液状化層を確保

⇒地下水位低下工法：潮来市(3.11)
熊本市(2016熊本地震)

○砂粒の固着度の強化(固化)

締固め、薬剤による粒子間の固定

⇒薬剤注入による固化：札幌市(2018胆振東部地震)

○間隙水圧(液状化時の砂粒子間の水圧)の上昇制御

液状化は、地下水に満たされた砂層で発生します。また、砂層の粒度によって液状化のしやすさが異なり、五十嵐浜や小針浜の海岸で見られる砂の粒子サイズが液状化しやすく、これよりも細かいあるいは粗い粒子は、やや液状化しにくいとされています(地震動が強く継続時間が長ければ、細かい粒子から粗い粒子まで全部液状化します)。今回の調査範囲では、一番液状化しやすい粒度の砂層が液状化し、砂層の層厚に対応して被害の大きさが表れています。

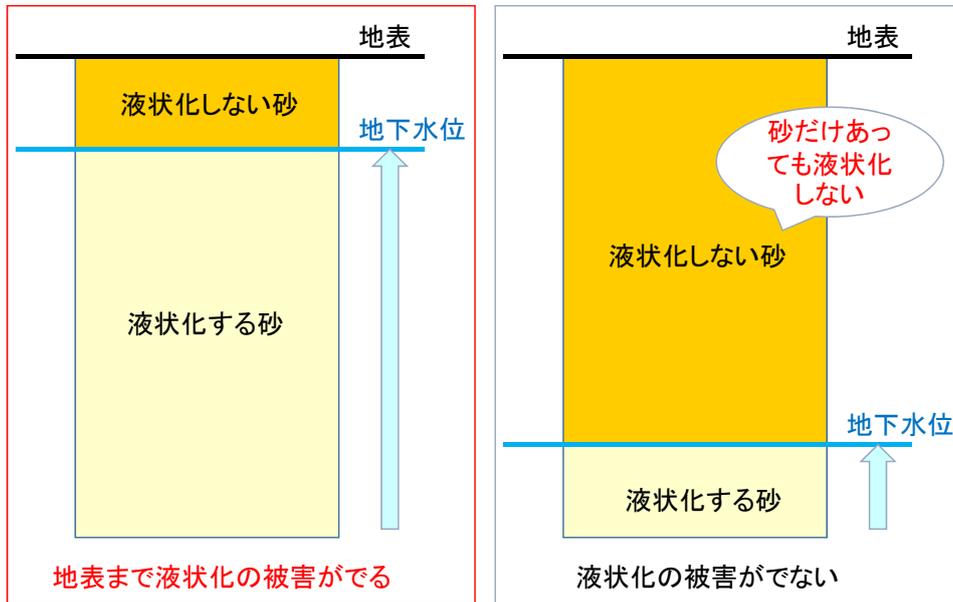
砂層の液状化を防止するためには、大きくわけて、地下水位を制御する方法と砂の粒子を固めてしまう方法があります。

地下水位の制御は、液状化が地下水に満たされた砂層で発生することから、地盤の地下水位を下げてしまえば、砂層であっても液状化しなくなるという原理を用いた方法です。新潟大学は、粒径としては液状化しやすい砂層に立地していますが、地下水位が地表から20m程度下にあるため、液状化しません。このように、宅地の地盤が砂層であっても地下水位を下げて、液状化しにくい砂層として被害防ぐ方法です。地下水位を下げる方法は、2011年東北地方太平洋沖地震による利根川流域での液状化被災地や2016年熊本地震による液状化被災地で実施されています。

粒子を固めてしまう方法は、液状化現象が地震時に砂の粒子が離れてしまい液体のようになり流動や建物沈下が起こることから、砂自体の粒子を薬品などで固めてしまい地震時でも砂粒子がバラバラにならないようにする工法です。液体の薬品を砂層に注入して固める方法が一般的で、2018年胆振東部地震での札幌市内の被災地で実施されています。

上記の地下水位を下げたり、薬品を注入するためには、砂層の透水性と連続性がポイントとなります。

液状化層 VS 非液状化層



液状化被害のポイントは、**地下水位との関係**

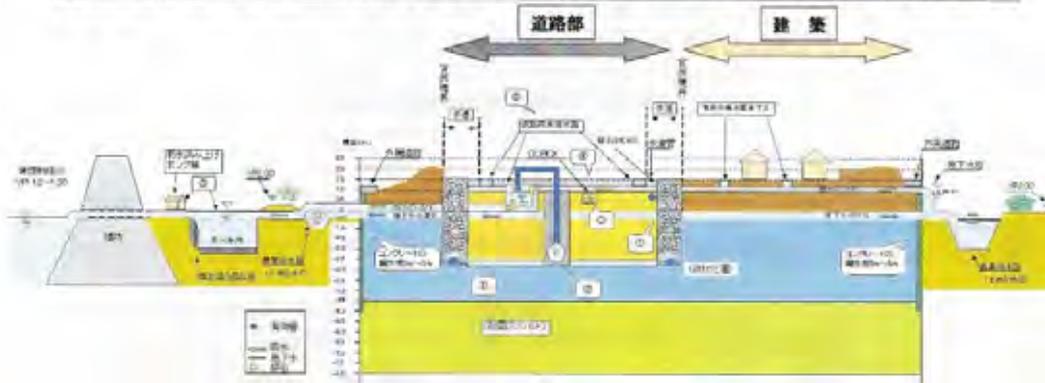
砂層での地下水位と液状化被害の関係を示した模式図です。液状化は地下水が関係しますので、地下水位がポイントとなります。同じような砂層であっても地下水位より上部であれば液状化しない地層(非液状化層)、地下水位より下は液状化層となります。

左の図のように地下水位より上の非液状層の厚さが薄い場合は、地下で液状化した場合、地表まで影響を与えてしまいます。一方、右図のように非液状層が厚ければ、地下で液状化した部分があったとしても、地表まで被害が及ばないという原理になります。

地下水位低下工法は、この原理を用いています。

液状化防止の工法（地下水位の制御）

- 砕石とドレン管で構成する「みずみちネットワーク」の設置深度を更に3m程度掘り下げ、ポンプにより強制排水し、地下水位低下、液状化発生抑制効果を増大する。
- 非液状化層厚を3m程度確保することにより、面的に建築の液状化発生を抑制する。



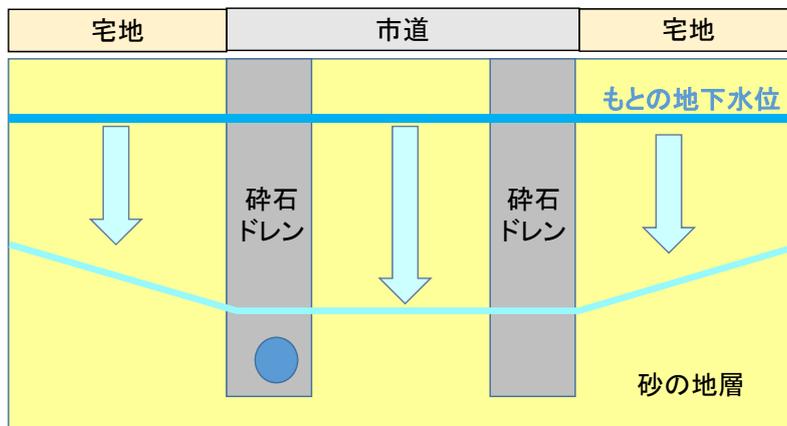
みずみちネットワークによる地下水位の制御例(潮来市)

砕石ドレンにより宅地部分の地下水位も低減させる方法
透水性のよい砂，分布が広いことが必須

地下水位低下工法は、道路の部分に地下水位を下げる管路を施工します。

柏崎・山本団地では、施工した管路で地下水を集めて、自然地形を利用して近傍の河川に自然に排水させることで、宅地部分の地下水位を下げています。また、潮来市や熊本市のような低地の場合は、管路を施工しても自然には排水できないので、ポンプで地下水をくみ上げて、地下水位を下げる方法となります。

液状化防止の工法（地下水位の制御）



宅地部分の
地下水位を
2～3m下げる

みずみちネットワークによる地下水位の制御の概念図(潮来市)

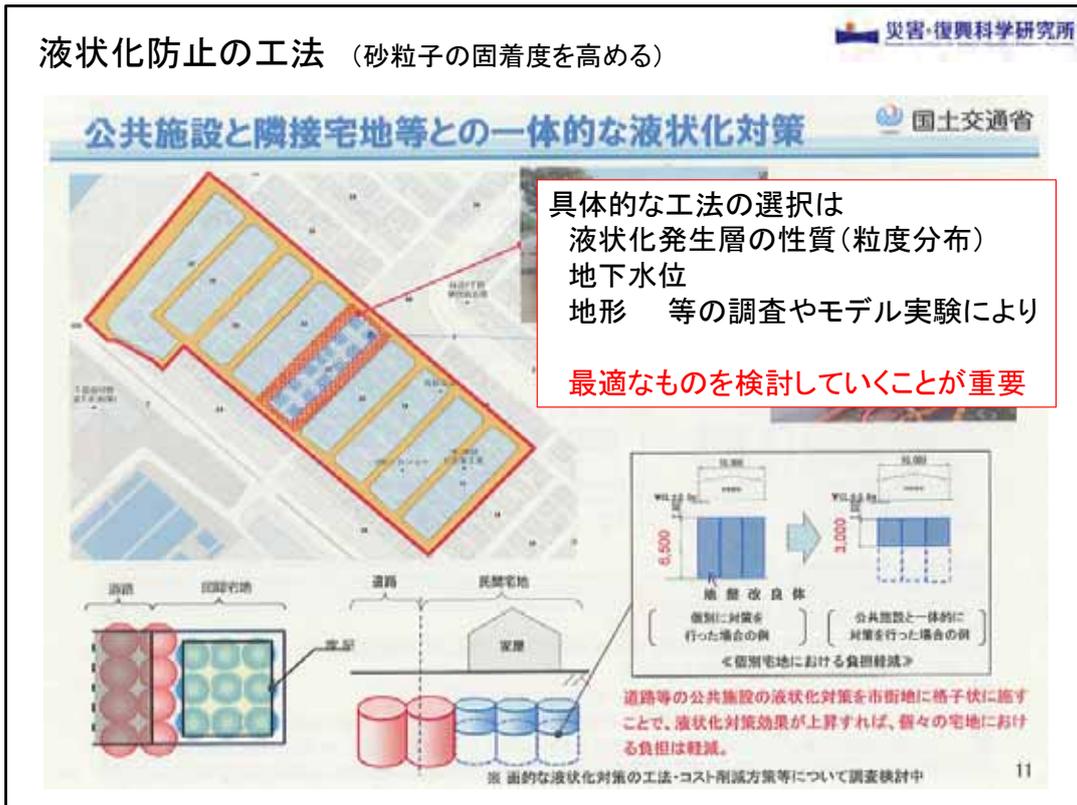
碎石ドレンにより宅地部分の地下水位も低減させる方法
透水性のよい砂，分布が広いことが必須

地下水位低下工法のイメージです。道路部分に下水道とは別に地下水を下げるための管路(水だけを抜き出すような特殊な管)を入れて、隣接する宅地の地下水位を下げしていくもので、宅地には特に工事をしない方法です。地下水は地域に無限にありますので、地域全体の地下水位を下げることはできませんが、道路部分に施工して、隣接する宅地の水位を下げるという小規模な仕掛けを、道路ごとに細かく施工することで、部分的に地下水位を下げ宅地の下に非液状層を作るといった方法です。

宅地の直下から直接地下水をポンプで抜いて水位を下げる方法ではないため、砂層の透水性と連続性が重要となります。砂層が広がらずにとぎれとぎれであるような地盤ではこの工法の効果は半減されます。

実際には、対象地域の地層の広がりや透水性を確認して、地下水位を下げる試験を実施したり、急激に地下水位を下げると復旧した宅地の沈下が発生することから、段階的に地下水位を下げて地盤が沈下しないことを確認するなど、詳細な設計が必要となります。

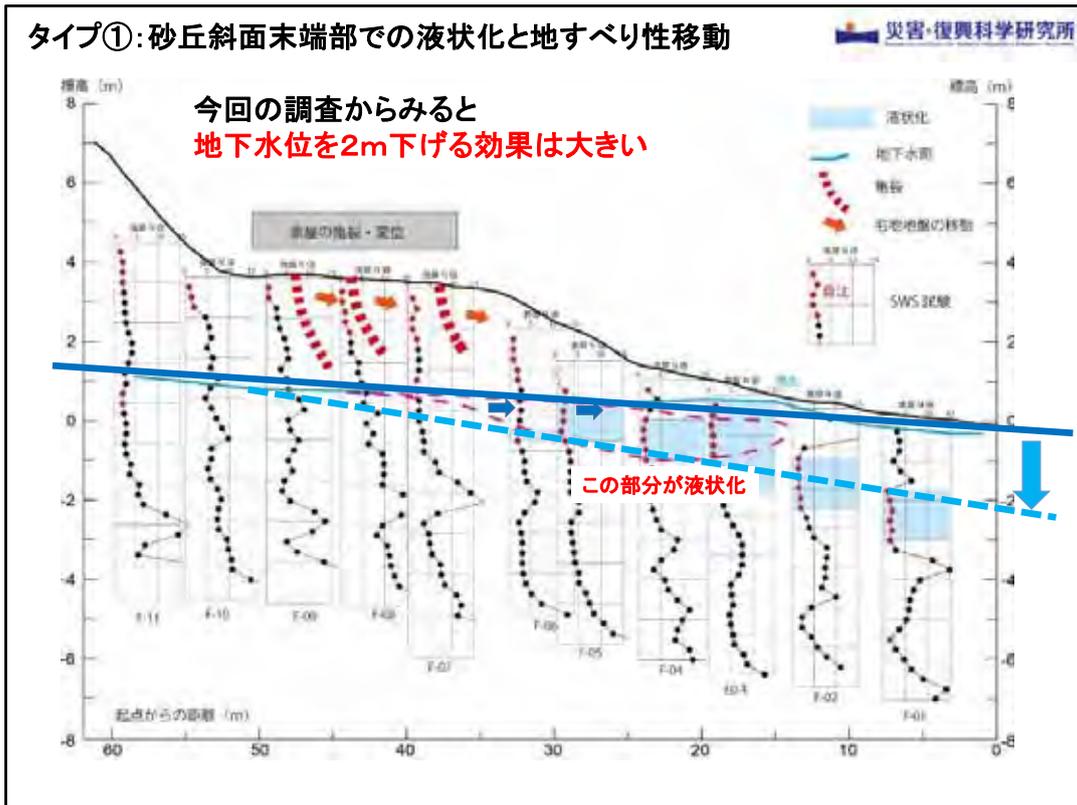
液状化防止の工法（砂粒子の固着度を高める）



砂粒子を固める液状化防止工法もあります。札幌市の事例のように宅地の地下に薬品を注入して固めてしまう工法もありますが、この図は、東京湾沿岸部の埋め立て地での液状化防止のため検討されていた工法のイメージです。

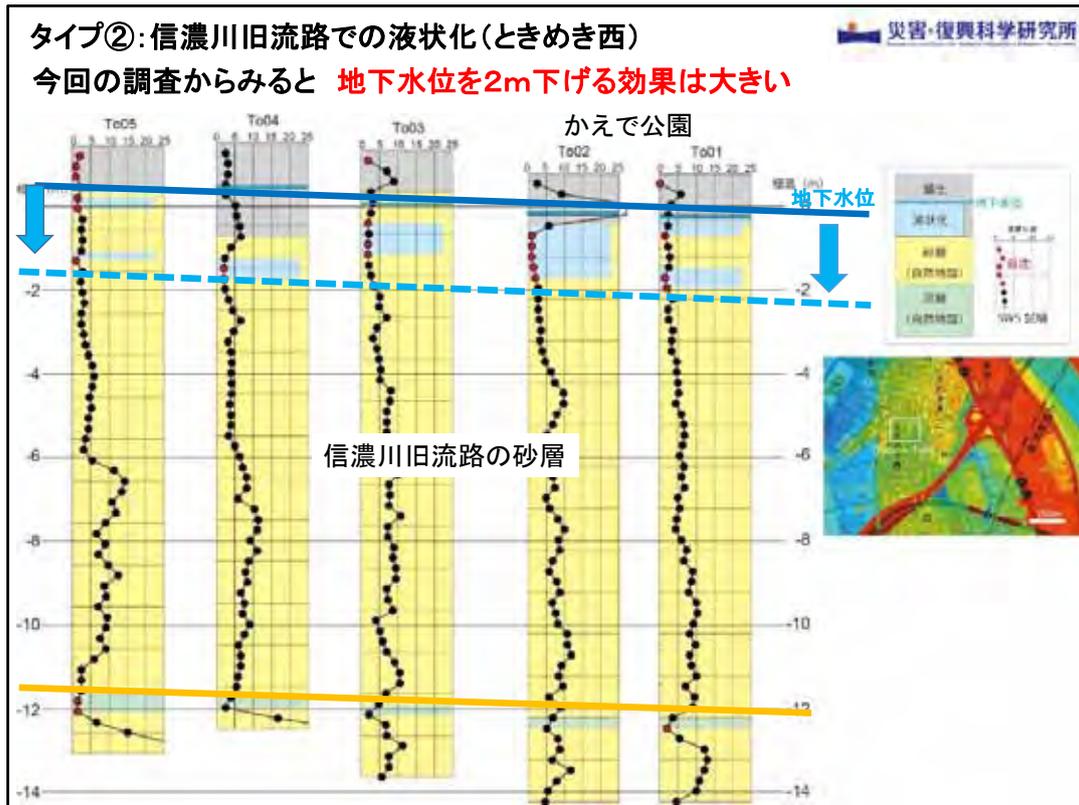
東京湾沿岸の埋立地は、元々東京湾の海底にあった細かい砂や泥を用いて造成されているため、砂層の透水性や連続性がわるく、地下水位の低下ではなく固める工法が検討されていました。この工法では、地層を固めるために柱状に地層を攪拌しながらセメントや薬品を混ぜて、地盤を改良するもので、道路部分だけでなく宅地部分の地盤も改良することで液状化防止に対して効果を上げることが期待されていました。

東京湾沿岸の埋立地では、工法としての技術的な課題もありましたが、宅地部分の施工を伴うことや個人の費用負担が大きかったことから、多くの場合、施工に至っていません。

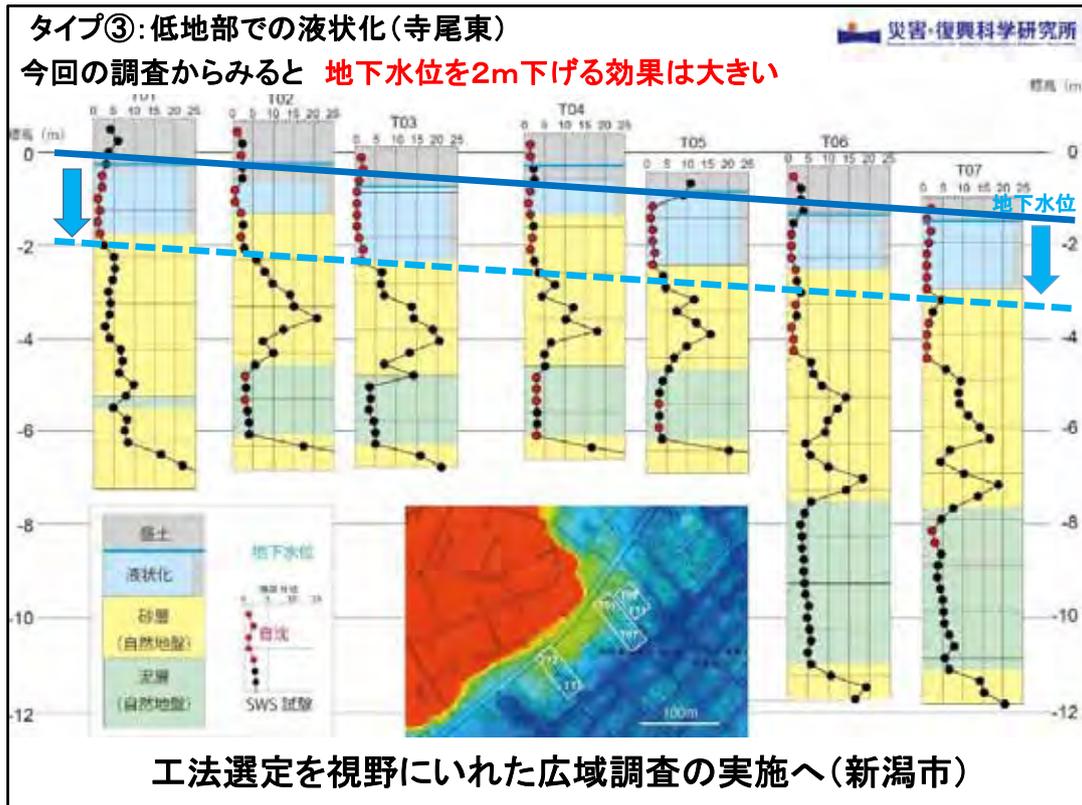


今回の西区での調査は、典型的な地形と地盤環境での限定的なものですが、液状化した部分が地表下2m程度までであったことから、今後、詳細調査と技術的な検討が必要ですが、概念的には、地下水位を2m程度下げることができれば、今回のような液状化は発生しにくくなることが推定できます。

タイプ①の砂丘斜面の末端部での地下水位を下げるイメージです。実際には、砂丘全体に涵養されている地下水が無限にありますので、末端部での施工で地下水を限定的に下げることができるのか、数値計算や実験が必要となります。



タイプ②の信濃川の旧流路では、低地であることや流路の外側の低湿地は厚い泥層や腐植土層であるため、旧流路内に涵養される地下水は砂丘斜面よりは限定的であると推定できます。しかし、ときめき～善久までと対象範囲が広いため、より広域的な調査と詳細設計が必要です。道路ごとに小規模な施工を行い宅地部分の地下水位を2m程度下げることができれば、再液状化を防止できる可能性が高いものと思われます。



寺尾東地区は、砂丘砂を用いた盛土が液状化の要因となっています。やや傾斜のある地形であるため、地下水位を下げる方法や効果について検証が必要ですが、タイプ②の地区と同様に、細かい施工により隣接する宅地の地下水位を下げることであれば、液状化防止の効果が高いものと考えられます。

いずれにしても今回の調査によって、液状化した地盤の基本的な様相からみると街区単位での液状化防止事業の導入に向けて、詳細調査が実施されることが望まれます。

災害復興のスキーム

災害・復興科学研究所

次世代に地域をつなぐ(液状化に)安全な地盤の構築



国事業による街区単位での液状化防止事業の導入



防止事業に向けた詳細調査と具体案の構築

行政・被災者・関係者 理解を深めながら次のフェーズへ



街区単位での液状化防止事業を志向した調査
(大学としての予察的調査)
学長裁量事業



研究所による液状化被害の悉皆調査
(被害の把握と体系化)

今回の新潟大学が実施した概要調査によって、地区ごとの液状化発生と地盤の基本構造が明らかになりました。

液状化の防止事業は、残念ながら、現在の国のスキームでは予防ではなく、被害が発生した後に実施されるものとなっています。

2024年能登半島地震によって、実際に新潟市の多くの場所で液状化被害が発生してしまいました。事前には防止できませんでしたが、被災からの復旧・復興は必ず実施することであり、液状化の防止事業を志向しないという選択肢はありません。

今後、多くの地域で液状化防止事業が実施され、次世代に安全な地盤を残すことが、再液状化を経験した被災地である新潟市の責務であると考えています。