沖積低地における液状化層トレンチ調査法の提案とその手順

齋 藤 勝* 細 矢 卓 志** 風 岡 修***
水 野 清 秀**** 佐 藤 光 男*****

A New Approach and Procedure for Trenching Surveys of Liquefied and Fluidized Strata in an Alluvial Lowland

Masaru SAITO*, Takashi HOSOYA**, Osamu KAZAOKA***,
Kiyohide MIZUNO**** and Mitsuo SATO*****

[Received 13 October, 2016; Accepted 11 January, 2018]

Abstract

Trenching surveys (excavating a ground surface and observing the exposed strata) are methods for immediately comprehending shallow subsurface stratigraphy, geological structure, and properties of strata. The most suitable survey method is presented for observing liquefied and fluidized strata under the ground, and for considering liquefaction countermeasures in an alluvial lowland where man-made strata are sporadically distributed and the groundwater table is generally shallow. Also presented is an outline of the procedure. To narrow the trench site, it is essential to analyze topographical data, historical record of liquefaction, and subsurface geology based on drilling data and groundwater table. Prior to excavating, sheet piles are driven and tightly arranged around the site. Then, riser pipes and a centrifugal pump are set into the trenching area to lower the groundwater level (the well-point method). During the process of dewatering and discharging water, environmental influences on surrounding areas should be considered. The depth of a trench in practice is 3 to 4 m or less. If it is necessary to obtain deeper strata, long specimens oriented via special sheet pile tool sampling can be used. After making observations of stratigraphy and structure of normal layers or liquefied and fluidized layers exposed on trench walls, it is useful to make relief peel specimens with a grout material to describe detailed liquefaction and fluidization features. It is proposed that exhibiting peel specimens is effective for understanding liquefaction and fluidization processes. Samples of liquefied strata for some examinations can be collected directly from trench walls.

* 株式会社ダイヤコンサルタント

** 中央開発株式会社

*** 千葉県環境研究センター

**** 産業技術総合研究所

***** 伸光エンジニアリング株式会社

* Dia Consultants Co. Ltd., Sendai, 980-0811, Japan

** Chuo Kaihatsu Corporation, Kawaguchi, 332-0035, Japan

*** Research Institute of Environmental Geology, Chiba, 261-0005, Japan

**** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, 305-8567, Japan

***** Shinko Engineering Co. Ltd., Chiba 260-0834, Japan

Key words : trenching survey, liquefaction, fluidization, alluvial lowland, man-made strata, well-point method, large relief peel method

キーワード：トレンチ調査、液状化、流動化、沖積低地、人工地層、ウェルポイント工法、地層の剥ぎ取り転写

I. はじめに

大地震に伴って液状化が発生した場所は、噴砂、陥没および構造物の傾斜などによって、ある程度把握することが可能である。しかし、どの地層が液状化したのか、あるいはどのように地層が流動したのかの特定は、直接地下の地層を観察しないとわからない。とくに液状化が起りやすい表層部は、人の手による掘り起こしなどで地層の成層構造が乱されている場合が多く、ボーリング掘削等による一次元的な調査では、液状化層の分布が把握しにくい。このような地下の地層の直接観察には、溝状に地面を掘削して壁面に液状化した地層を露出させるトレンチ調査がもっともシンプルでわかりやすい。しかし、地下水面より下位での液状化層のトレンチ調査の実施例はきわめて少なく、地震に伴う液状化とこれに引き続く流動化（風岡ほか, 1994: 以下、この一連の現象を液状化-流動化と表現する）の実態は明らかとなっていない。この実態とそのメカニズムを明らかにすることで、正確な液状化-流動化予測とこれに必要な調査方法の検討や現在提案されているさまざまな液状化防止方法を地質条件にみあった効果的なものとするためのデザインの検討が可能となる。そのためには、液状化-流動化した地層が直接観察できるトレンチ調査の事例を増やす必要がある。

液状化層のトレンチ調査は、活断層の活動履歴や断層運動による地層の変形構造などの解明のために行われているトレンチ調査手法（例えば、山崎ほか, 1984; 岡田, 1990）と基本的には同じであり、1983年日本海中部地震、1987年千葉県東方沖地震、1993年北海道南西沖地震、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震で生じた液状化層などに対して実施されている（陶

野, 1986; Nirei *et al.*, 1990; 下川ほか, 1994; 沼田ほか, 1999; 小松原ほか, 2014 など）。液状化した地層の研究は、そのほかに遺跡の発掘地点や地層の自然露出地（露頭）でも多く報告されている（例えば、堀口, 1986; 寒川, 1992, 1999; 大塚ほか, 1997; 高浜ほか, 1998; 三谷, 2006; 下総台地研究グループ, 2010 など）。外国での液状化層のトレンチ調査や露頭観察も多数ある（例えば、Obermeier, 1996; Bezerra *et al.*, 2005; Reddy *et al.*, 2009; Tuttle *et al.*, 2011; Mugnier *et al.*, 2011）。これらの研究・報告では、古地震の履歴や規模の推定、砂脈や噴砂孔などの液状化-流動化した地層の形態や粒度組成などに言及されていることが多いが、特定の地層内で液状化-流動化が部分的に進行していくような発達過程について述べているものは、風岡ほか（1994, 2003）などに限られている。また、地震時に液状化被害の著しかった地点と地表に液状化の痕跡が現れなかった地点との比較のような研究は小松原ほか（2014）で示されているのみであり、液状化予測のためのトレンチ調査研究はほとんどない。さらに、液状化対策事業に活かすためには、住宅地などの近傍でトレンチ場所を選ぶことが必要になるが、ニュージーランドの Christchurch でのトレンチ例（Bastin *et al.*, 2016）がある程度で、日本では事例が少ない。これらのほか、液状化予測のための課題として、液状化-流動化の進行過程の把握に加え、液状化しやすい地層の堆積年代や深度効果の影響の把握、液状化した地層の強度変化などの解明や液状化対策の対象とする地域でいかに詳細なデータを提供するかなどがあげられる。

液状化-流動化の進行過程の把握についていえば、これまでのトレンチ調査や遺跡や露頭などでの液状化-流動化層の観察例は、ほとんどが地下水面より上位かあるいはかつては地下水面よりも

下位であったが隆起して地表に現れたところであるのに対して、実際に液状化が発生する地層は地下水面よりも下位である。液状化-流動化現象が発生しやすい沖積低地では、地下水面が高く、そのため、軟弱な地層でのトレンチ調査では地下水位を下げるなどの工夫が必要であると同時に、周囲の環境への配慮が必要になってくる。一般には、地下水位を低下させ、安定した壁面を露出させるためには、広大な土地が必要となるほか、工事の経費も高くなるため、トレンチ調査は従来液状化対策事業などではあまり用いられてこなかった。しかし、地層の液状化しやすさの評価や液状化対策事業にトレンチ調査を用いることは今後ますます重要になってくると考えている。そこで、自治体などが液状化の実態把握のために行うトレンチ調査は、安全対策に留意しながら、経費を抑えるために、短時間でコンパクトな掘削調査が有効と考える。ここでは2011年東北地方太平洋沖地震による液状化が発生した利根川下流地域で行ったトレンチ調査例（小松原ほか、2014）などを経験として、地下水位が高い沖積低地での液状化層のトレンチ調査に適した手法を提案し、手順とその要点をとりまとめた。液状化対策にトレンチ調査が広く用いられていくことを期待する。

II. トレンチ調査の流れ

トレンチ調査は以下に示す(1)～(9)の流れで実施する。(1)掘削地点の絞り込み、(2)事前地盤調査、(3)トレンチ位置・形状および地下水低下工規模の決定、(4)地下水位の低下作業、(5)トレンチ掘削作業、(6)観察、(7)地層の剥ぎ取り転写、(8)サンプリングと試験、(9)総合的な検討ととりまとめである。

限られた範囲の用地において、短期間で成果の上がるトレンチ調査を行うためには、十分な事前調査を必要とし、掘削場所を絞り込んだうえで、トレンチ掘削作業は効率的に進めなければならない。以下の章では、各手順について概要をまとめる。とくに重要と考えている地下水位の低下作業と地層の剥ぎ取り転写については、詳細に記載する。

III. トレンチ調査の手順とその詳細

1) 掘削地点の絞り込み

トレンチ調査により、液状化層の実態を把握するためには、液状化層や噴砂の分布および地盤状況などをあらかじめ把握し、調査に適した用地を選定する必要がある。このため、液状化跡の分布調査、既存資料による地盤状況確認、候補地現況確認などを実施し、トレンチ調査地点の絞り込みを行う。

1-1) 液状化跡の分布調査

トレンチを掘削し壁面に液状化跡を露出させるためには、噴砂孔や地割れなど流動した物質の地表への出口を確認し、その直下を掘削するのがもっとも可能性が高い選択肢である。しかし、噴砂跡は、浸食作用を受け形状が変化するとともに、道路、公園などの公共用地や住宅地、耕作地などの復旧に伴い、地表に堆積した砂が除去され、整地が行われて失われていく。このため、地震発生後速やかに噴砂孔や地割れの位置・形状や、地表に堆積した砂の分布や厚さを記録しておくことは、液状化層のトレンチ掘削位置の決定のために重要となる。また、過去の地震で生じた液状化跡の分布を報告した文献をもとに、液状化が生じた地点を確認する。十分な文献がない場合は、地震直後の空中写真や現地写真の判読、周辺住民への聞きとり調査等により、液状化したと推定される地点を把握する。液状化した地点あるいは液状化したと推定される地点から、液状化した確からしさを考慮してトレンチ調査の候補地を絞り込む。液状化した地点が不明確な場合は、後述する既存資料による地盤状況確認に基づき、液状化しやすい地層が存在していること、あるいはその地層が分布すると予想される地形であることを確認して候補地を絞り込む。

1-2) 既存資料による地盤状況確認

収集する資料は、空中写真、古地図、地質図、土地条件図、治水地形分類図、ボーリング調査結果、過去の地震被害状況、地形改変の履歴に関する資料などである。これらの既存資料をもとに候補地または候補地になりえる地点の地盤状況を確認

認する。確認事項は、地形区分、構成地層、地下水位、地形改変の有無などである。液状化しやすい地層が堆積している場所としては、後背湿地、旧河道、旧池沼、谷底低地、浜堤間低地、三角州、海岸低地、砂州、埋立地などがあげられる。地形改変の把握に関しては、地元住民の聞きとり調査も有効である。液状化しやすい地質は、水に飽和したゆるい砂層であり、そのような条件を満たす調査地を選定するため、地下水位の分布や砂層の締め具合に関する既存資料を検討することが重要である。

1-3) 候補地現況確認

絞り込んだトレンチ候補地については、実際に掘削工事が可能かどうかを判断するために、周辺の地形や構造物の状況、遺跡の指定地など法律で規制された範囲かどうかを確認する。確認事項の詳細を以下に示す。

- ①用地の広さ：トレンチ掘削範囲、掘削土砂仮置き場および作業スペースが確保できるか否か。
- ②搬入路：重機の通行に十分な幅があるか否かや、支障となる架空線の有無など。
- ③用地の利用状況：トレンチ掘削の支障となる立木や耕作物の有無、耕作の予定など。
- ④水利状況：後述するトレンチ壁面安定化のための地下水低下作業を行う場合に影響が及ぶ可能性のある水源の有無やその揚水を流す水路の有無。
- ⑤埋設物：トレンチ掘削の支障となる上・下水道管、ガス管、通信ケーブル、暗渠などの埋設物の有無。
- ⑥地権者・管理者と規制範囲：掘削許可が得られるかどうか、法律にしたがい、申請が必要かどうか。

上記④において、周辺に利用水源がある場合はあらかじめ影響を評価し、地権者などと協議して調査実施計画を立てる必要がある。水源には、井戸、河川、ため池および湧水がある。確認事項は、水源の位置、種類、利用目的、利用頻度、利用量などであり、水源が井戸であるならば、深度、水位、口径などの井戸構造、動力の有無、現地水質（水温、pH、電気伝導度）などを確認する。また、

ウェルポイント工（ストレーナー付吸水装置をパイプ先端にとりつけ、ポンプで強力に地下水を吸引し排水することで、地下水位を低下させる工法）による揚水を水路などに放流する場合も、水の利用者と協議し調査実施計画を立てる必要がある。なお、水質分析は、後述するボーリング調査に伴い採取した地下水を用いるほうがよい。

以上の確認をもとにトレンチ調査に適した箇所を選定する。

2) 事前地盤調査

トレンチを掘削する正確な位置や規模を計画し地下水低下工の仕様を決めるため、事前の地盤調査を行う。地盤調査では、ボーリング調査、地下水の水位測定と水質分析などを実施する。なお、既存資料から、地下の地質状況や水質などが明らかな場合は、ボーリング調査や地下水の分析を省略してもよい。

2-1) ボーリング調査

液状化トレンチでは噴砂の供給源の地層まで掘削することが多いことから、トレンチ掘削前にオールコアボーリングとサウンディング試験によって地質層序や地層の締め具合を把握し、トレンチ掘削計画を立てるとよい。ボーリング調査の項目としては、オールコアボーリング、標準貫入試験やスウェーデン式サウンディング試験ないし簡易連続貫入試験、地下水位測定、ウェルポイントを施す帯水層の地下水位観測井設置があげられる。

2-1.1) オールコアボーリング

オールコアボーリングは、液状化の可能性のある地層や帯水層、難透水層の詳細な層序の把握が目的である。そのため、採取率がよいこと、コアが乱れていないことが必要である。掘削時の振動で液状化が生じることも避ける必要がある。このため、ボーリングはスリーブを内蔵した外径 86 mm または 66 mm のロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラー（JGS 1224-2003）を使用することが望ましく、コアを慎重に採取する必要がある。

2-1.2) 標準貫入試験、スウェーデン式サウンディング試験、簡易連続貫入試験

トレンチ予定箇所周辺の地層断面を作成するた

めには、周辺の既存ボーリングとの対比が必要である。既存ボーリングと対比するためには、標準貫入試験（JIS A 1219）の試験値を入れたボーリング柱状図が有効である。また、コアの対比の参考にする場合や、室内試験試料として使用する場合もあるので、標準貫入試験用サンプラー中の試料は、地層ごとに分けて試料ビンまたはビニール袋に収納する。なお、その際、ボーリング孔名と採取深度を試料ビンまたはビニール袋に明示する。

標準貫入試験は、通常、深度 1 m ごとに 1 回、 N 値（地盤強度の指標）を測定しているので、必要に応じ、スウェーデン式サウンディング試験（JIS A 1221）や簡易連続貫入試験（JGS 1433）などを併用して、地盤強度に関する情報を補完し、液状化・流動化部分の検討材料とする（風岡ほか、2000、2002）。

2-1.3) 地下水位測定

地下水位は自然水位と日々のボーリング作業開始前の水位を水位計を用いて測定する。ボーリング掘削の進捗と水位の変化をグラフに表すと、ボーリング掘削過程における水位上昇の有無により被圧帯水層の有無が把握できることがある。被圧帯水層は、確実な遮水が必要とするため、その存在を把握することが重要となる。なお観測される水位は、裸孔区間におけるすべての透水層の水位がバランスした水位と考えられる。

2-1.4) 地下水位観測井設置

地下水低下工の効果を判定するため、ボーリング掘削後に塩ビ管を挿入し、地下水位観測井を設置する。また、ボーリング掘削後の地下水位の変化を把握するために、トレンチ掘削までの間、地下水位を定期的に観測するとよい。また、事後の液状化予防対策のため、この観測井を利用して現場透水試験を行い、帯水層ごとの透水係数を求めるとよい。

2-2) 地下水の水質分析

地下水位低下作業により水路などに排水した地下水は、水田などの耕作に利用されることが考えられる。また、河川・池などの生態系に影響を及ぼす可能性もある。このため、排水する地下水が

国の定める排水基準や環境基準を満たしているのかを、水質分析を行って事前に検証する必要がある。地下水は、設置した観測井から採水するのがよい。また、ハンドオーガーボーリング、ダブルスコップ等により地盤を削孔して、ベラー等の採水器を用いて採水できる場合もある。

3) トレンチ位置・形状および地下水低下工規模の決定

3-1) トレンチ位置の決定

トレンチ候補地が液状化しやすい地層が分布する地形に確実に立地していること、現地確認調査や水質分析で確認した事項がトレンチ掘削の支障とならないこと、および可能な掘削範囲内に液状化層の出現が期待できることなどの条件に基づき、トレンチ位置を決定する。

3-2) トレンチ形状の決定

3-2.1) トレンチの向きの決め方

砂脈など液状化した地層の流動構造は、壁面ができるだけ地表で観察される砂脈の延びと直交する向きのほうが観察しやすいことから、そのような向きにトレンチを配置する。砂脈の位置が不明確な場合は、帯状に表土や噴砂後の人工攪乱層をすきとり、砂脈の位置を特定すると、トレンチの配置を決めやすい。ただし、砂脈が垂直に延びているとは限らないし、派生した砂脈が主脈と平行になるとは限らないので、観察したい液状化層の出現状況にあわせて、トレンチ掘削時に形状を微修正する。

3-2.2) トレンチの深さの決め方

トレンチ調査におけるトレンチの深さは、安全性や後述する揚水能力を考えた場合に、3～4 m 以内が適切なサイズである。利根川下流域などの沖積低地の地下水面は、盛り土が薄い場合には、おおむね地表下数 10 cm から 1.5 m 程度までのところにあり、それより下位の砂層は液状化判定の対象層となる。利根川下流地域で事前のボーリング調査から浚渫砂層主体の人工地層の厚さが 5 m 程度あると推定された場所で、深度 3 m までのトレンチ掘削を行ったが、液状化発生層はほぼ壁面内でとらえることができた（小松原ほか、2014）。しかし、最新の地震によって形成された

砂脈や液状化した地層がさらに深部にまで及ぶものもありえる。液状化がどの深度まで及んでいるのかを解明するためには、トレンチをさらに深く掘るか、ボーリング調査あるいは地層抜き取り装置を用いた調査を実施する必要がある。トレンチを深く掘る場合は、地下水低下工の規模を拡大し、トレンチに小段を設け二段掘りにするなどの処置が必要である。地層抜き取り装置は定方位でかつボーリング径よりも幅広く地層を採取できる利点がある一方、一般的にはかなり大がかりになる。また、ボーリング調査と同様に振動により地層が液状化を起こす可能性がある。地層抜き取り装置を用いた具体的な方法や調査結果などについては、例えば、原口ほか（1998）、Takada and Atwater（2004）、重野ほか（2015）に記されている。

3-2.3) トレンチ法面の傾斜角とトレンチの広さの決め方

トレンチ調査の壁面はおもに未固結な地層から構成されるため、トレンチ法面の傾斜は一般にゆるくする。掘削深度を 3 m、トレンチ底面の広さを 4 m × 2 m、掘削法面の傾斜角を 45 度とした

図 1 トレンチ掘削例（千葉県香取市）。縦方向の水糸の間隔は 50 cm、水平方向の水糸は 1 m 間隔。正面の壁面の傾斜は 60 度程度でも、シルト層が挟まっているため、安定している。

Fig. 1 View of trench walls (Katori, Chiba Prefecture). The interval between vertical lines is 50 cm and that between horizontal lines is 1 m. The front wall with a slope angle of approximately 60° is stable because of interbedded silty layers.

場合、トレンチ上面の広さは 8 m × 10 m となる。構成層がゆるい砂層のみからなる場合には、さらに法面傾斜はゆるくする必要があるため、面積はさらに広くなる。掘削した土砂置き場や重機の作業範囲を考慮すると、最低 20 m × 20 m 程度の用地を必要とする。ただし、壁面構成層にシルト層などの細粒層が含まれている場合には、地下水位を低下させた後の法面は、60 度程度の傾斜角でも安定していることもあり、必要な用地の面積を狭くすることも可能である（図 1）。

3-2.4) その他の工夫

トレンチの片面だけを観察面とし、もう片方は土嚢などを積んで掘削土砂の置き場とすることや、砂脈沿いに限定した小さなトレンチを複数掘ることによって、借用する用地の面積を減らす工夫もできる（図 2）。こうしたトレンチ形状の軽微な変更は、掘削作業を行いながら判断することが多い。また、砂脈や噴砂孔など地表近くの液状化-流動化跡だけを観察する目的であれば、地下水面に達したところで掘削を打ち止めてコンパクト

図 2 シートパイル、ウェルポイント工法のライザーパイプやヘッダーパイプ、複数の小規模なトレンチ掘削と、ボーリング・地下水位観測井およびブルーシートで覆った掘削土砂の配置例（千葉県香取市）。

Fig. 2 Overview of trench site showing small trenches and a borehole pipe (groundwater observation well) enclosed by sheet piles, riser, and header pipes used for the well-point method, and excavated soil covered by blue sheets (Katori, Chiba Prefecture).

トなトレンチにすることもありうる（図3）。

3-3) 地下水位低下工規模の決定

現地でのボーリング調査と地下水位観察結果から判断されるシルト層などの不透水層や液状化する可能性の高い砂層の深度分布、粒度および締まり具合から、トレンチの形状を考慮して、トレンチ底面以下まで地下水位を低下させられる排水能力を見積り、それにみあった地下水位低下工の仕様を決める。詳細は次項に記載する。地下水面に達しない浅いトレンチの場合には、この工法は不要である。

4) 地下水位の低下作業

地下水位を低下させる工法として、浅い深度の水を効率よく排水できる「ウェルポイント工法」が有効である。ウェルポイントを設置する際、シートパイル（矢板、遮水板）の打ち込みを行うとより効率的に地下水位を低下させることができる。

4-1) シートパイルの打ち込み

トレンチ位置の決定後、縮尺 200 分の 1 程度の平面図および断面図に、砂脈の位置、トレンチ形状およびシートパイルの打設位置を示す。決められた調査範囲内にシートパイルを隙間なく打ち込み、地下水の側方からの流入を遮断する。ま

た、下方からの地下水の侵入を防ぐためには、遮水に十分な効果がある厚さのシルト・粘土層までシートパイルを打ち込む必要がある。ただし、通常、使用するシートパイルは長さ 10 m 程度までであり、10 m が深度の限界となる。シートパイルはラフタークレーンとバイブレーターにより打ち込む。

なお、シートパイルの根入れ長さは(1)式および(2)式により求める（日本道路協会, 1999）。

$$D = \frac{\text{安全係数}}{\beta} \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kH \cdot B}{4EI\alpha}} \quad (2)$$

ここで D = 根入れ長さ、 β = 特性値であり、安全係数は 3 以上が理想とされるが、実用的に 2.5 を採用する（日本道路協会, 1999）。 B は土留め壁の幅でシートパイルの単位幅 1 m とする。 E はシートパイルのヤング係数で 2.000×10^8 (kN/m²)、 I はシートパイルの断面二次モーメントで 0.000168 (m⁴)、 α は根入れ計算用の有効率で 1.000 とする。 kH は水平方向地盤反力係数と呼ばれ、地層とトレンチ条件によって変わるため複雑であり（日本道路協会, 1999）、詳細は省略する。

シートパイルの打ち込み深度検討断面図を図4に示す。4 m の深度のトレンチを掘削し、壁面の傾斜を 49° とした場合の検討例を示す。最初に、受働崩壊線の角度を 45° とした場合の仮想地盤面を算出する（GL -1.33 m：図4）。この場合、 $kH = 3475$ (kN/m³)、 $\beta = 0.4008$ (m⁻¹) となり、仮想地盤面からの根入れ長さ (D) は 6.24 m と計算される。GL からの根入れ長は $6.24 + 1.33 = 7.57$ m となる。ここでシートパイルは 50 cm 刻みの製品となるため、GL からのシートパイル長は 8.00 m となり、50 cm の頭出しの長さを加えると 8.50 m が必要長と計算される。トレンチ壁面の傾斜が多少変化しても、シートパイルの長さはそれほど変化しない。

4-2) ウェルポイントの設置

ウェルポイント工法は、通常の揚水に使用され

図3 自然地下水面までの浅いトレンチ調査の例（北海道せたな町）。報告は下川ほか（1994）に示されている。水糸の間隔は 1 m。

Fig. 3 Example of shallow trench excavated to groundwater level (Setana, Hokkaido), reported by Shimokawa *et al.* (1994). The interval between lines is 1 m.

図 4 シートパイルの根入れ長さや揚水量を計算するための地下地質モデル。

Fig. 4 A subsurface geological model for calculating the lengths of sheet piles and pumping discharge.

るサクショポンプを真空ポンプに置き換え、強制的に汲み上げる原理であり、浅層の地下水を効率的に排水することができる（ウェルポイント協会, 2007：図 5）。具体的には以下のように設置を行う。

最初に、揚水管（以下、「ライザーパイプ」と記す）の先端部（ウェルポイント）を設定深度に設置するための作業を行う。呼び水を用意しておき、水圧をかけながらライザーパイプに注水し、地盤に孔を開けてライザーパイプを地中に押し込む。押し込む際に生じたライザーパイプと孔壁の隙間にフィルター材としてケイ砂を投入する。ライザーパイプは空気を吸うと機能なくなる恐れがあるので、地下水面より十分深い深度にライザーパイプの先端が来るように設置する。また、異なる深度に交互にヒューガルポンプ（渦巻き型排水ポンプ）を設置する場合がある。これにより、浅層部の地下水位を短時間に下げ、さらに深層部の地下水位を下げるができるメリットがある。トレンチの大きさにあわせて配管の本数および長さを決定し、ヒューガルポンプおよびノッチタンクの準備を行う。宙水を排水する必要がある場合は、宙水排水用にライザーパイプを設置する。次に、ライザーパイプと地上との交差部にヘッダー

図 5 ウェルポイント・排水機構配置図（日本建設機械商社株式会社提供）。

Fig. 5 Illustration of well-point groundwater extraction system provided by Nihon Kensetsu Kikai Shoji Co. Ltd.

パイプと呼ばれる集水管を接続し、揚水した水がヒューガルポンプを通じてノッチタンクに排水できるようにする。ノッチタンクの水は必要に応じて排水施設に誘導する。

4-3) 揚水量の算出とウェルポイントの本数

掘削予定のトレンチ形状を入れた地質断面図(図4)と推定される水理定数をもとに、(3)式より地下水位を低下させた際の揚水量を算出する。次に、(4)式により揚水量に応じたウェルポイント(ライザーパイプ)の本数を求める。ここで用いる(3)式および(4)式はいずれも地盤工学会(1991)による。

$$Q = \frac{2\pi Dk(H-h)}{\ln(R/r_0)} \beta \quad (3)$$

ここで、 Q : 揚水量 (m^3/min)、 k : 透水係数 (m/min)、 D : 帯水層の厚さ (m)、 R : 影響圏半径 (m)、 r_0 : 仮想井戸半径 (m)、 H : 影響半径 R の位置の水位高さ (m)、 h : 仮想井戸半径 r_0 の位置の水位高さ (m)、 β : 係数 $\beta = 1.0$ である。

$$n = \frac{(2 \sim 3)Q}{qw'} \quad (4)$$

ここで、 n : ウェルポイントの本数、 Q : 定常状態の揚水量 (m^3/min)、 qw' : ウェルポイント 1

本あたりの揚水能力 (m^3/min) である。

4-3.1) 揚水量 Q の算出例

揚水量 Q の算出例を表1に示す。ここでは、ボーリング調査または既存の資料から、掘削計画箇所其自然地下水位を GL -0.5 m とし、GL $-0.85 \sim -1.85 \text{ m}$ とトレンチの深度の3倍の深さ以深には粘性土があり、それ以外は砂質土とした。トレンチの深度を 3 m と 4 m とした場合をそれぞれ想定し(図4は 4 m の場合)、各値を設定した (GL -12.5 m の不透水層からの高さで示す)。影響圏半径 R を 100.0 m と仮定し、仮想井戸半径 r_0 は、トレンチ形状を $10 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ 、深度 3 m とした場合、それを円形で近似して半径を 8.28 m とし、トレンチの形状を $12 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ 、深度 4 m とした場合は半径 9.55 m とした。透水係数 k は、いくつかの求め方ががあるが、ここでは地下水面より下の地層の D_{20} 値 (20% 粒径 (mm))) と透水係数の関係表 (土質工学会, 1987) により算出した。 D_{20} は通常土質試験の粒度試験結果から得られるが、土質試験を実施していない場合は、土質分類より近似的に求めることも可能であり、表1では土質が極細粒砂から粗粒砂の場合の値と、それにほぼ対応する透水係数の値 (土質工学会, 1987) を示し、トレンチ掘削深度 3 m と 4 m ごとに、計算される排水量 (揚水量) を示した。

表1 粒径 (D_{20}) と透水係数、必要揚水量、ウェルポイントの排水能力およびウェルポイントの本数との関係。

Table 1 Relations among grain diameter (D_{20}), permeability coefficient, pumping discharge, pumping capacity of well-point, and number of well-points.

トレンチ 深度 (m)	土質区分	D_{20} (mm)	透水係数 k (cm/s)	必要排水 (揚水) 量 Q (m^3/min)	ウェルポイント 1本あたりの 揚水能力 qw' (m^3/min)	ウェルポイント 本数 (参考)
3	極細粒砂	0.06 ~ 0.10	$4.60 \times 10^{-4} \sim 1.75 \times 10^{-3}$	0.0142 ~ 0.0540	~ 0.0013	22 ~ 84
	細粒砂	0.12 ~ 0.25	$2.60 \times 10^{-3} \sim 1.40 \times 10^{-2}$	0.0802 ~ 0.4318	0.0026 ~ 0.025	12 ~ 63
	中粒砂	0.30 ~ 0.50	$2.20 \times 10^{-2} \sim 7.50 \times 10^{-2}$	0.6786 ~ 2.3134	0.002 ~ 0.065	41 ~ 139
	粗粒砂	0.60 ~ 1.00	$1.10 \times 10^{-1} \sim 3.60 \times 10^{-1}$	3.3929 ~ 11.1047	0.07 ~	97 ~ 318
4	極細粒砂	0.06 ~ 0.10	$4.60 \times 10^{-4} \sim 1.75 \times 10^{-3}$	0.0275 ~ 0.1048	~ 0.0013	43 ~ 162
	細粒砂	0.12 ~ 0.25	$2.60 \times 10^{-3} \sim 1.40 \times 10^{-2}$	0.1557 ~ 0.8382	0.0026 ~ 0.025	23 ~ 122
	中粒砂	0.30 ~ 0.50	$2.20 \times 10^{-2} \sim 7.50 \times 10^{-2}$	1.3171 ~ 4.4902	0.002 ~ 0.065	79 ~ 269
	粗粒砂	0.60 ~ 1.00	$1.10 \times 10^{-1} \sim 3.60 \times 10^{-1}$	6.5856 ~ 21.5528	0.07 ~	189 ~ 616

4-3.2) ウェルポイントの揚水量

与えられた透水係数から、ウェルポイント1本あたりの揚水量のレンジを、地盤工学会（1991）の図から読みとることができる。さまざまな透水係数に対応したウェルポイント1本あたりの揚水能力のレンジを表1にまとめた。ただし、透水係数の値はそれほど正確に求められるものではなく、あくまでも目安にすぎない。

4-3.3) ウェルポイントの本数

式(4)に基づき、必要なウェルポイントの本数を表1に示した。透水係数やそれから見積もられるウェルポイント1本あたりの揚水能力は正確な値ではないため、本数にかなり幅があるが、それが100本を超えるような場合は、設定した広さのトレンチでは現実的ではない。すなわち、透水係数の高いおもに粗粒砂層ないしはそれより粗い地層では、トレンチの深度は3～4m程度までが揚水能力の限界であると考えられる。

4-4) トレンチとウェルポイント配置の実例

利根川下流域で実施した際の工事仕様例を表2に示す。

トレンチの形状を10m×16m、掘削深度3mとした。構成される地層は、細粒砂層～中粒砂層が主体であり、 $D_{20} = 0.18\text{ mm}$ として透水係数 $k = 6.85 \times 10^{-3}\text{ cm/s}$ を採用し、必要排水量 $Q = 0.211\text{ m}^3/\text{min}$ 、ウェルポイント1本あたりの揚水能力 qw' を最大 $0.01\text{ m}^3/\text{min}$ 、ウェルポイントの必要数を最低42本と見積もった。ウェルポイントを10m×16mの長方形に配置する場合には、約1.2m間隔となる。

5) トレンチ掘削作業

5-1) トレンチの掘削・埋戻し作業

5-1.1) 重機搬入

調査箇所が重機搬入の可能な道路から離れている場合は、搬入路を整備する。必要に応じ整地と伐採を行い、水田や湿地などの軟弱な地盤の場合は、敷鉄板やポリエチレン製敷板を用いてトラフィックビリティ（車両の通行に耐えうる土の能力）を確保する。

5-1.2) 掘削

掘削は基本的に油圧ショベルで行う。油圧ショ

表2 ウェルポイント工事様例。

Table 2 Example of numerical data used for well-point method works.

項目	数量
トレンチの外形	10.0 m × 16.0 m 長方形
トレンチの深度	3 m
ウェルポイント本数	42 本
ウェルポイント間隔	1.20 m
ライザー長	3.60 m ～ 5.50 m
プラントポンプ台数	1 セット
運転期間	10 日
水中ポンプ能力	5.5 kw
バキュームポンプ能力	7.5 kw
プラント数	1 セット
排水量 (Q)	0.211 m ³ /min

ベルは、掘削する土量、深さによって適宜大きさを選択する。最初に人力で表土を帯状にすきとり、液状化跡や砂脈の位置を確認し、トレンチの掘削形状を微修正する。次に、トレンチの中央付近を油圧ショベルで掘削し、液状化した地層を確認し掘削深度を確定する。また、必要に応じ計画形状を変更する。油圧ショベルにより計画された形状になるよう掘削し掘削面を荒仕上げした後、ねじり鎌や立て鎌を用い、人力で壁面を整形する。なお、時間がとれる場合は、一気に深部まで掘削せず、遺跡発掘調査を行うように順次、層ごとに砂脈や地層の変形を観察するとより詳細な液状化-流動化に伴う現象を確認できる。壁面整形時に発生する残土は、トレンチ底を埋めてトレンチの深度を浅くしてしまうため、ベルトコンベアーを用意し、残土をトレンチの外へ搬出するとよい。また、壁面に蛍光色の水糸で1mグリッドの縦糸と横糸を設置する。

5-1.3) 安全対策

人が近づく可能性がある場所は、バリケード、ネット、トラロープなどでとり囲み、調査範囲を明示するとともに、夜間は点滅燈で不用意に人が立ち入らないような対策を行う。

また、夜間にポンプの吸水音が問題となる場合は、ポンプをなるべく住宅から離れた場所に設置し、ポンプを覆う防音施設を施すなどの対策を行う。

5-1.4) トレンチ維持期間

トレンチの壁面を多くの人に観察してもらう場合には、トレンチ維持期間を長めに設定する必要がある。一方、周囲の環境への影響や経費削減のため、地下水汲み上げ（地下水低下）の期間をできるだけ短縮したい場合には、トレンチ掘削開始から埋戻しまでを1週間程度で済ませることも可能である。地下水面まで達しない深度の簡易トレンチの場合には、トレンチの掘削開始から、後述する地層の剥ぎ取り転写（仕上げを除く）を含め、埋戻しまでを2～3日程度で終わらせることも可能である。

5-1.5) 埋戻し

後述する測量、観察、試料採取・試験を実施した後、トレンチを埋め戻して、用地を原状に復旧する。その際には、十分に埋戻し土を転圧し、必要に応じ、掘削した液状化層を碎石に置き換えるなどして、再液状化を防ぐ対策を行う。調査終了後、地権者立会のもと用地の復旧状況を確認する。なお、農地の場合は、表層の耕作土と耕作土以外の土砂は分別しておき、土砂を埋戻した後に耕作土を均して農地を復旧する。

5-2) 測量

トレンチの形状、地盤高、周辺の地形、土地境界、地物、基準点、噴砂、砂脈などの位置を測量によって把握し、平板測量図を作成する。

液状化トレンチ調査では、トレンチを実施した場所の過去の土地利用や古地図との対比が重要である。そのため、古地図等により把握した旧河道や埋め立てられた池、沼などの位置を可能な限り測量図に対応させる。また、確認できた噴砂や砂脈の位置を測量図に正確に記入する。なお、測量図には、今後動く可能性が低い基準点を入れておくことが望ましい。

6) 観察

地層区分を行い、地層境界の位置をスケッチ図に示す。礫、堆積構造、炭化物、植物・動物遺体、砂脈、地層の削剥、生物攪乱、重機による整地の跡を含む人工攪乱層、溝、坑、水路、埋積物などを確認し、形状をスケッチ図に表現する。単層ごとの粒度、層厚、級化やラミナなどの堆積構造の

有無、ラミナの変形の有無、礫層の場合は礫種・礫径・円磨度・風化度・基質を記載する。上述のうち人工攪乱層は、一般にブルドーザーやバックホウなどの重機か人力により整地されたものである。ブルドーザーによる整地では、土砂を押し出した際に粘土やシルトがロール状にまるまり、トレンチ壁面で10～15cmくらいの円形ないし楕円形の構造となってみられる。また、バックホウや人力による整地では、シルトや粘土の塊が偽礫状に含まれることが多い。これらのことから、ロール状の構造やシルトおよび粘土の偽礫に着目すると、人工攪乱層と自然堆積層との識別が容易になる。スケッチは縮尺20分の1を基本とし、液状化跡が小さく、より詳細なスケッチが必要な場合は10分の1にするなど、適宜縮尺を変える。年代を示す可能性のある空き缶、プラスチック片などの人工物、考古遺物、貝、植物遺体、腐植層などを採取し、それらの採取位置を記載して保管する。また、調査の各段階を記録した写真を撮影するとともに、壁面の状況を撮影する。全景を撮影するとともに、グリッドごとに写真を撮影し、壁面全体をモザイク状に貼りあわせるとよい。

7) 地層の剥ぎ取り転写

トレンチ壁面が液状化しやすい砂層主体である場合、砂が容易に崩れて壁面を覆ってしまい、そのすべての除去が困難であるため、肉眼観察によるスケッチや写真撮影では堆積構造や液状化とそれにひき続く流動化による構造などの重要な構造を十分に表現できないことが多い。そのような場合は、表面を覆う砂を含めて重要な構造を樹脂で固め、地山側の地層を剥ぎ取り転写する。この剥ぎ取り転写面を後でスケッチすることにより、現地でのスケッチ時間を短縮することもできる。このように、地層の剥ぎ取り転写は、液状化層のトレンチ調査ではほぼ必須となる。

剥ぎ取り転写の方法はいくつかあるが、ここでは、トマック NS-10 を用いる方法と、サンブレ WE およびハイセル SAC-100 を用いる方法を紹介する。用いる樹脂はいずれも比較的強度が高く、乾燥後の剥ぎ取り面の変形が小さいので利用されることが多い。なお、両方法とも、遺跡発掘

の際の壁面の保存の目的で奈良国立文化財研究所埋蔵文化財センター（1980）が独自に開発してきた方法を液状化トレンチ調査用に一部改良したもの（風岡, 1989 など）である。剥ぎ取った地層を標本にすると、標本館などにおける展示のほか、アウトリーチイベントなどに出席して、広く関係者を対象とした液状化層や液状化-流動化現象の紹介や解説も可能となる。

7-1) トマック NS-10 を使用する方法

トマック NS-10 はウレタン系合成樹脂であり、三恒商事株式会社がとり扱っている。トマック NS-10 を用いる利点は、乾燥後も柔軟性があり、剥ぎ取った地層を軽く折りたためることである。難点は、固結していないゆるい砂にトマック NS-10 は塗りにくいことである。

7-1.1) 準備品

トマック NS-10, 寒冷紗, 刷毛, 洗面器などのトマック NS-10 を入れる容器, ハサミ, カッター, 霧吹きなどである。

7-1.2) 壁面整形

地層を剥ぎ取る範囲を特定し、その範囲より数 10 cm 広い範囲をねじり鎌や立ち鎌などを用いて平滑にする。壁面から飛び出した植物根は剪定ばさみで切る。壁面が乾燥している場合は、霧吹きで少し水を吹きつけ、壁面を湿らせる。

7-1.3) トマック NS-10 の塗布

洗面器などの容器にトマック NS-10 を入れ、下方から塗布する。上下 20 ~ 30cm くらいの横長の帯状に刷毛で塗り、全幅を塗布したら、直上を同じく帯状に塗布し、繰り返していく。

7-1.4) 裏打ち

トマック NS-10 が半乾燥したら、寒冷紗を裏打ちする。裏打ちした寒冷紗にさらにトマック NS-10 を塗る（図 6）。

7-1.5) 剥ぎ取り試料の分割

剥ぎ取り面が畳大よりも大きいときは、その重量や運搬の都合から、剥ぎ取り試料をカッターやハサミを用いて分割する必要がある。その場合、水系の位置、分割部分の印、分割面の番号などをマジックで書き、写真撮影を行い、分割面の位置関係が後からわかるようにする。分割しない場合

図 6 トマック NS-10 を用いた剥ぎ取り標本作成中の状況（千葉県神崎町）。

Fig. 6 View of relief peel specimen made with Tomack NS-10 as a grout material (Kozaki, Chiba Prefecture).

でも、剥ぎ取り面を剥がす前に露頭のどこから採取したのかがわかるように、トレンチ面全体と剥ぎ取り面の位置関係がわかるように写真撮影する。

7-1.6) 剥ぎ取り

トマック NS-10 が乾燥した後、塗布したトマック NS-10 にはりついた地層を剥がす。剥ぎ取った後のトレンチ断面を再度写真撮影する。乾燥に要する時間はその時の気温により異なるが、夏季で数時間、冬季で 1 日程度である。はりついた礫が壁面に包含されとりにくい場合は、ハンマーやスコップで礫を掘り起こす。壁面から試料を剥がす際に転写面から脱落した礫は保存し、脱落した位置を記録し、乾燥後に接着剤ではりつける。剥ぎ取り試料は乾燥後に軽く水洗いし、再乾燥させる（図 7）。

7-1.7) 仕上げ

必要に応じ、パネルにエポキシ樹脂系の接着剤ではりつけるとともに、サンコール SK-50 や、透明のラッカープレーなどを吹きつけて潤色仕上げにする。

7-2) サンプレン WE とハイセル SAC-100 を使用する方法

地層固化用樹脂として使用するサンプレン WE は三洋化成工業株式会社が、裏打ち用樹脂であるハイセル SAC-100 は東邦化学工業株式会社がそ

図 7 トマック NS-10 を用いて採取された砂脈とその周辺の地層剥ぎ取り標本例。

Fig. 7 Example of relief peel specimen comprising sand dike and soft sediments using Tomack NS-10.

れそれぞれ扱っている。これらを使用する利点は、ごくゆるい地層でも剥ぎ取りが可能であることである。液状化-流動化が起りやすい地層は、一般にごくゆるく、透水性がよい場合が多い。このため、使用する樹脂は親水性のものがよい。この反面、親水性の樹脂は強度が弱い。このようなことから、まず親水性の樹脂を噴霧器で地層に染み込ませ、乾いたのちに裏打ち用の強度の高い樹脂をその上から塗布するとよい。この手法で行うと液状化-流動化に伴う微妙な堆積構造の変形も再現よく採取できる。

7-2.1) 準備品

準備品はサンプル WE、ハイセル SAC-100 のほかに、トマック NS-10 の場合と同様の準備品、さらにアセトン、噴霧器、ゴーグル、有機溶剤用ガスマスクなどを加える。

7-2.2) 壁面整形

観察面を平面性よく整形する。なるべく凹凸ができないようにする。

7-2.3) サンプル WE の散布

サンプル WE をアセトンで薄めて噴霧器で地層にたっぷり染み込ませる。サンプル WE は発泡ウレタン系樹脂で、原液は水あめのように粘性が強く、そのままでは地層に染み込ませることはできない。そこで、アセトン：サンプル WE = 4 ～ 8：1 となるように薄めて、地層に噴霧する。噴霧の際は、勢いをつけすぎたり、樹脂を多く噴霧しすぎたりすると観察面の地層を樹脂とともに流下させてしまう。一方、噴霧する量が少ないと、剥ぎ取り面にむらが出てしまう。このため、観察面を作成する前のトレンチ断面において、一度テストしてみるとよい。なお、噴霧器は一度使用し、樹脂が乾くと目詰まりを起こすので、スペアが多くあったほうがよい。

7-2.4) 裏打ち

サンプル WE を吹きかけた面は一般に 30 分から 1 時間で乾く。乾いたことを確認したら、裏打ち材の樹脂をその乾いた面に塗布する。この際、強度を上げるため、寒冷紗や目開きが 5 mm ～ 1 cm のメッシュをはりつける。メッシュをはりつけたのち、メッシュなしに寒冷紗の上から再度裏打ち材の樹脂を塗布し強度を上げる。裏打ち材は、硬化する時間・作業時間・価格を考慮して決める。ハイセル SAC-100 は、水と混合させると硬化時間が数分程度になるので、短時間に剥ぎ取りを終えなくてはならない場合には便利である。その代わりに、時間がたつと面が変形してくるので、剥ぎ取り面の水洗い処理後早々に板などにはりつける必要がある。

7-2.5) 剥ぎ取り試料の分割

前述のトマック NS-10 を使用方法に準じて剥ぎ取り試料の分割を行う。

7-2.6) 剥ぎ取り

写真撮影後、それぞれの剥ぎ取り面を剥がしていく。その際、地層が剥ぎ取り面についているのかを確認しながら、慎重に行う。剥ぎ取った後のトレンチ断面を再度写真撮影する。

7-2.7) 仕上げ

剥ぎ取り試料を保管・観察場所まで運搬した後、水洗いし、余分な地層を洗い流す。この作業

の最中に、さまざまな堆積構造が現れてくる。それらの構造を壊さない程度の水流で洗い流す。この際、決してブラシなどで洗い流さない。ブラシでこするとブラシの跡がつき、堆積構造と区別がつかなくなってしまう。洗浄した剥ぎ取り面を日陰干しにし、乾燥したら洗浄面の保護と濡れ面の再現のためにサンコールを塗り、これが乾けば完成である。

8) サンプルングと試験

液状化トレンチでは、液状化-流動化した砂層や砂脈を目視で確認できる。このため、液状化-流動化層からサンプルを確実に採取することができ、液状化-流動化層や砂脈の分布と、物性値および力学強度の分布との対応を直接的に把握することが可能となる。液状化層の液状化-流動化予測に資するために、観察に加えて、サンプルングによる室内試験や壁面を利用した原位置試験を実施する。

8-1) サンプルングと室内試験

8-1.1) 攪乱試料

液状化-流動化層や液状化しなかった地層の粒度組成、密度、比重、コンシステンシー等の物理特性を把握するために、攪乱試料を採取して、物理試験を行う。

試料は壁面をねじり鎌で整形した後、移植ごてやスプーンなどを用いて採取し、ビニール袋に入れる。例えば、液状化層と液状化しなかった層の境界を特定し、その境界を横断する測線に沿って多数の試料を連続的に採取し、それぞれ物理試験を実施すれば、その境界が示す物性値を把握することが可能となる。

8-1.2) 不攪乱試料

液状化層や液状化しなかった地層の力学特性を把握するためには、不攪乱試料を採取して液状化強度試験（繰返し非排水三軸試験：JGS0541-2009）などを行う。

不攪乱試料の採取方法としては、トレンチ壁面に露出した液状化の対象層の上部に水平面を切り出し、その面に塩ビ管、ステンレス管などのサンプラーをあて鉛直方向に押し込んで試料を採取する。

8-2) 壁面を利用した原位置試験

壁面を利用した原位置試験として、土壤硬度計による測定、砂置換による土の密度試験（JIS A 1214-2001）、現場透水試験（JGS 1314-2003）があげられる。土壤硬度計による測定は、機動的にかつ、容易に硬さを測定できる貫入式土壤硬度計（JGS 1441-2012）が有効的である。土壤硬度計を使用することにより、液状化-流動化による緩みなどを計測値としてとらえることが可能となる。あらかじめ 10 cm 間隔の格子を用意しておき、壁面に立てかけて格子ごとに測定を行うと効率的に測定できる。

9) 総合的な検討ととりまとめ

壁面観察とスケッチ、写真、地層の剥ぎ取り転写などをもとに、以下の点を取りまとめる。

- ①地層の細分とその新旧関係、とくに堆積間隙や地質構造の違い、人工地層と自然地層の境界がどこであるかなどを明らかにする。
- ②地層の初生的な堆積構造と堆積後の変形構造の違いを、砂などの構成粒子の配列や粘土薄層など本来水平に堆積すると仮定できる地層の形状などから明らかにする。変形構造がみられる場合には、地震による液状化-流動化変形と、地すべり、埋立時のサンドポンプによる水流の影響や重機による整地時の変形など別の原因によるものが考えられるので、総合的に変形の原因を検討する。
- ③砂脈や堆積構造の消失した砂層の一部など、明らかに液状化や流動化が生じた範囲と液状化していない部分の境界を明確にする。
- ④砂脈など流動化したことが明らかな層の粒度分布、堆積構造を観察し、どの層からどのように流動が進行しているかを明確にする。
- ⑤液状化-流動化した地層の切った・切られたの関係や流動・変形の度合いの違いから、液状化が生じた時期と各地層の堆積時期との新旧関係を明確にする。

また、現地調査終了後、各種採取試料の分析結果や試験結果が出たのち、それらの結果を整理して、以下の点などを取りまとめる。

- ⑥各地層に挟まる植物片、泥炭、原地性の貝など

の年代測定結果や瓦、陶器片、空き缶、木杭、プラスチック製品などの遺物の同定から各地層の年代を明らかにする。

- ⑦液状化が発生した年代を限定する。
- ⑧液状化した地層と液状化していない地層の粒度組成やその他の物理計測値の違いなどから、液状化が生じやすい特性を明らかにする。
- ⑨同じ地層中の液状化した部分と液状化していない部分の粒度組成やその他の物理計測値の違いなどから、液状化および流動化が進行していくときに起こる諸過程を推定する。

IV. ま と め

液状化被害が懸念され、また人工地層の分布も多い沖積低地において、地下浅部の地質状況の把握、液状化履歴の解明、液状化-流動化現象の実態把握、液状化対策に資する具体的な方策を検討するうえで、地面を掘削し地層を露出させて観察するトレンチ掘削調査はもっとも直接的でわかりやすい方法である。本稿では、地下水面の高い低地に適した短期間での効率的なトレンチ調査の手法を提案し、その手順を示した。それらの要点は、以下のようにまとめられる。

- ①トレンチ掘削に先立ち、液状化跡の分布調査、関連する既存資料の収集、候補地現況確認、事前地盤調査（ボーリング調査、地下水位測定、地下水の水質分析など）を実施する。
- ②トレンチ調査地点は地下水位が高いことが多いので、シートパイルで囲ったのち、ウエルポイント工により水位を低下させてから掘削を行う。ウエルポイントの本数は、必要排水量とウエルポイントの揚水能力によって決められる。このとき、周辺地域での地下水位低下による影響と汲み上げた水の排水環境を考慮する必要がある。
- ③トレンチの大きさは深さ3～4 m までが現実的であり、さらに深部の地質状況の把握には、地層抜き取り装置を用いる方法などがある。地下水面に達するところまでの浅いトレンチであれば、時間や費用、用地面積をかなり抑えることができる。

- ④トレンチ壁面観察では、噴砂、砂脈、陥没構造、軟弱層の変形など液状化-流動化に伴う現象のほか、それらと各地層との新旧関係、噴砂の供給源などの観察を行う。また、液状化の生じた層準、液状化-流動化の発達過程、液状化-流動化による地層の強度変化などについて考察する。
- ⑤液状化-流動化構造など壁面にみられる変形構造や堆積構造を詳細に記録し、保存するため、地層の剥ぎ取り転写が必須である。剥ぎ取り標本は、その後展示して関係者に広報することも重要である。
- ⑥トレンチ調査では、液状化した地層の年代測定や分析・試験用の試料を直接採取できるほか、土壌硬度計による地層の強度測定など、壁面を利用した原位置試験を行うことができる。

謝 辞

トレンチ調査を実行するうえで楡井 久茨城大学名誉教授には終始ご助言をいただいた。吉田 剛博士をはじめとする千葉県環境研究センター地質環境研究室および小松原 琢、宮地良典、小松原純子各氏は産業技術総合研究所平野地質研究グループの皆様にはトレンチ調査現場での議論に加わっていただいた。日本建設機械商事株式会社には、ウエルポイントの図をご提供いただいた。2名の査読者と担当編集委員の方の指摘により、本稿は大幅に改善された。以上の皆様に厚く感謝申し上げる。震災で亡くなられた皆様のご冥福、負傷された皆様の回復・ご多幸、そして被災された地域の復興を祈ります。

文 献

- Bastin, S.H., Bassett, K., Quigley, M.C., Maurer, B., Green, R.A., Bradley, B. and Jacobson, D. (2016): Late Holocene liquefaction at site of contemporary liquefaction during the 2010–2011 Canterbury Earthquake sequence, New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**, 881–903.
- Bezerra, F.H.R., da Fonseca, V.P., Vita-Finzi, C., Lima-Filho, F.P. and Saadi, A. (2005): Liquefaction-induced structures in Quaternary alluvial gravels and gravelly sediments, NE Brazil. *Engineering Geology*, **76**, 191–208.
- 土質工学会 (1987): 土と基礎実用数式・図表の解説 (第1回改訂版). 土質基礎工学ライブラリー 7. [Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (1987): *Explanation of Practical*

Formulas and Charts of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Soil Mechanics and Foundation Engineering Library, 7 (Tsuchi To Kiso Jitsuyo Sushiki Zuhyo No Kaisetsu. Doshitsu Kiso Kogaku Raiburari 7). (in Japanese)*]

原口 強・島崎邦彦・小島圭二・北村精男・中田 高・松岡裕美 (1998): 地層採取装置による軟弱地盤における定方位連続地層採取方法. 土と基礎, **46**(2), 24-26. [Haraguchi, T., Shimazaki, K., Kojima, K., Kitamura, A., Nakata, T. and Matsuoka, H. (1998): A new sampling method of unconsolidated sediments by long geo-slicer. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **46**(2), 24-26. (in Japanese)]

堀口万吉 (1986): 埼玉県北部でみられる古代の噴砂について. 歴史地震, **2**, 9-14. [Horiguchi, M. (1986): Ancient jetted sands observed in the northern area of Saitama Prefecture. *Historical Earthquakes*, **2**, 9-14. (in Japanese)*]

地盤工学会 (1991): 根切り工事と地下水: 調査・設計から施工まで. 丸善出版. [Japanese Geotechnical Society (1991): *Pit Excavation Works and Groundwater (Nekiri Koji To Chikasu)*. Maruzen Shuppan. (in Japanese)*]

風岡 修 (1989): 地層のはぎ取り転写の導入とその有効性について. 千葉県環境地質研究, **20**, 49-52. [Kazaoka, O. (1989): Large relief relief-peel method. *Bulletin of Environmental Geology, Chiba*, **20**, 49-52. (in Japanese with English abstract)]

風岡 修・楠田 隆・香村一夫・楡井 久・佐藤賢司・原 雄・古野邦雄・香川 淳・森崎正昭 (1994): 液状化-流動化のメカニズムとその実態. 日本地質学会第101年総会・討論会 講演要旨, 125-126. [Kazaoka, O., Kusuda, K., Kamura, K., Nirei, H., Satoh, K., Hara, Y., Furuno, K., Kagawa, A. and Morisaki, M. (1994): The process of liquefaction-fluidization at earthquake. *Abstracts, the 101st Spring Meeting of the Geological Society of Japan*, 125-126. (in Japanese)]

風岡 修・佐藤光男・楠田 隆・香村一夫・風戸孝之・香川 淳・森崎正昭・佐藤賢司・古野邦雄・酒井 豊・加藤晶子・楡井 久 (2000): 局所的な表層地質の違いが液状化-流動化に与える影響—東京湾岸埋立地の例—. 第10回環境地質学シンポジウム論文集, 33-38. [Kazaoka, O., Sato, M., Kusuda, T., Kamura, K., Kazato, T., Kagawa, A., Morisaki, M., Satoh, K., Furuno, K., Sakai, Y., Kato, A. and Nirei, H. (2000): Liquefaction-fluidization on the boundary between artificial loose sand and soft mud—Reclaimed land around Tokyo Bay—. *Proceedings of the 10th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics, 2000*, 33-38. (in Japanese with English abstract)]

風岡 修・佐藤光男・風戸孝之・楠田 隆・古野邦雄・香村一夫・佐藤賢司・原 雄・酒井 豊・笠原 豊・仁平雅子・加藤晶子・香川 淳・楡井 久 (2002): 1987年千葉県東方沖地震時に見られた地波現象発生地点での地層の状態. 第12回環境地質学シンポジウム・地質環境国際シンポジウム論文集, 247-252.

[Kazaoka, O., Sato, M., Kazato, T., Kusuda, T., Furuno, K., Kamura, K., Satoh, K., Hara, Y., Sakai, Y., Kasahara, Y., Nihei, N., Kato, A., Kagawa, A. and Nirei, H. (2002): Geological condition on jinami phenomena, wavy ground transformation, by liquefaction-fluidization at 1987 east off Chiba Prefecture Earthquake. *Proceedings of the 12th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics and International Symposium for Geological Environment 2002*, 247-252. (in Japanese with English abstract)]

風岡 修・楡井 久・香村一夫・楠田 隆・三田村宗樹 (2003): 液状化・流動化. アーバンクボタ, **40**, 1-65. [Kazaoka, O., Nirei, H., Kamura, K., Kusuda, T. and Mitamura, M. (2003): Liquefaction and fluidization. *Urban Kubota*, **40**, 1-65. (in Japanese)*]

小松原 琢・宮地良典・水野清秀・風岡 修・齋藤 勝・細矢卓志 (2014): 液状化・流動化層のトレンチ調査. 大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, 地質調査総合センター速報, **66**, 273-288.

[Komatsubara, T., Miyachi, Y., Mizuno, K., Kazaoka, O., Saitou, M. and Hosoya, T. (2014): Trenching survey of liquefaction-fluidization layers. *Reports of Research and Investigation on Multiple Hazards Caused by Huge Earthquakes, GSJ Interim Report*, **66**, 273-288. (in Japanese with English abstract)]

三谷 豊 (2006): 千葉県北部の中部更新統に見出された地震起源の液状化・流動化現象. 地球科学, **60**, 241-252. [Mitani, Y. (2006): Earthquake-induced liquefaction and fluidization in middle Pleistocene in the northern area of Chiba Prefecture, Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **60**, 241-252. (in Japanese with English abstract)]

Mugnier, J.L., Huyghe, P., Gajurel, A.P., Upreti, B.N. and Jouanne, F. (2011): Seismites in the Kathmandu basin and seismic hazard in central Himalaya. *Tectonophysics*, **509**, 33-49.

奈良国立文化財研究所埋蔵文化財センター (1980): 層位・遺跡断面等の剥ぎ取り転写法. 埋蔵文化財ニュース, **28**, 1-8. [Center for Archaeological Operations, Nara National Research Institute for Cultural Properties (1980): Method for making peel specimen off stratigraphical and archaeological sediment sections. *CAO NEWS*, **28**, 1-8. (in Japanese)*]

日本道路協会 (1999): 道路土工 仮設構造物工指針. [Japan Road Association (1999): *Road Earthwork—Temporary Structure Works Guideline (Doro Doko, Kasetsu Kozobutsuko Shishin)*. (in Japanese)*]

Nirei, H., Kusuda, T., Suzuki, K., Kamura, K., Furuno, K., Hara, Y., Satoh, K. and Kazaoka, O. (1990): The 1987 East Off Chiba Prefecture Earthquake and its hazard. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **35**, 31-46.

沼田淳紀・森 伸一郎・陶野郁雄・遠藤邦彦 (1999): 液状化で生じた砂脈と噴砂に関する一考察. 土木学会論文集, **638**, 311-324. [Numata, A., Mori, S., Tohno, I. and Endo, K. (1999): A study on sand

- dikes and sand boils caused by liquefaction. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **683**, 311-324. (in Japanese with English abstract)]
- Obermeier, S.F. (1996): Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis—An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, **44**, 1-76.
- 岡田篤正 (1990): トレンチ法による活断層調査の現状と展望. 米倉伸之・岡田篤正・森山昭雄編: 変動地形とテクトニクス. 古今書院, 18-44. [Okada, A. (1990): Current status and issues of active fault study by trenching survey. in *Tectonic Geomorphology and Tectonics (Hendo Chihei To Tektonikusu)* edited by Yonekura, N., Okada, A. and Moriyama, A., Kokon Shoin, 18-44. (in Japanese)*]
- 大塚富男・高浜信行・中里裕臣・野村 哲 (1997): 群馬県烏川中流域のテフラ中にみられる液状化現象とその意義. 第四紀研究, **36**, 123-136. [Otsuka, T., Takahama, N., Nakazato, H. and Nomura, S. (1997): Ancient liquefactions and their significance in the late Quaternary tephra layers in the Karasu river valley, Gunma Prefecture, Japan. *Quaternary Research (Daiyonki-kenkyu)*, **36**, 123-136. (in Japanese with English abstract)]
- Reddy, D.V., Nagabhushanam, P., Kumar, D., Sukhja, B.S., Thomas, P.J., Pandey, A.K., Sahoo, R.N., Prasad, G.V.R. and Datta, K. (2009): The great 1950 Assam Earthquake revisited: Field evidences of liquefaction and search for paleoseismic events. *Tectonophysics*, **474**, 463-472.
- 寒川 旭 (1992): 地震考古学 遺跡が語る地震の歴史. 中央公論社. [Sangawa, A. (1992): *Earthquake-archaeology—History of the Earthquake Documented by Archaeological Sites—* (Jishin Kokogaku). Chuou Koronsha. (in Japanese)*]
- 寒川 旭 (1999): 遺跡にみられる液状化現象の痕跡. 地学雑誌, **108**, 391-398. [Sangawa, A. (1999): Paleoliquefaction features at archaeological sites in Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **108**, 391-398. (in Japanese with English abstract)]
- 重野聖之・鈴木喜之・福岡 哲・風岡 修・吉田 剛・七山 太 (2015): 浅層地下の大型定方位試料採取法のツールとしての改良型 ACE ライナー: 液状化-流動化調査工事への応用. GSJ 地質ニュース, **4**, 101-106. [Shigeno, K., Suzuki, Y., Fukuma, T., Kazaka, O., Yoshida, T. and Nanayama, F. (2015): The improved ACE liner as a tool of large constant orientation sampling method from shallow underground: An application for liquidizing-fluidizing study. *GSJ Chishitsu News*, **4**, 101-106. (in Japanese)]
- 下川浩一・衣笠善博・佃 栄吉・水野清秀・井村隆介 (1994): 北海道奥尻島及び北檜山町における液状化堆積物のトレンチ調査結果. 地震予知連絡会会報, **52**, 29-33. [Shimokawa, K., Kinugasa, Y., Tsukuda, A., Mizuno, K. and Imura, R. (1994): Trenching study of the liquefied sediments in the Okushiri Island and Kitahiyama Town. *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **52**, 29-33. (in Japanese)]
- 下総台地研究グループ (2010): 茨城県南東部の更新統で確認された液状化-側方流動の痕跡と小断層群の形成. 地球科学, **64**, 149-158. [Shimousa Daichi Research Group (2010): Liquefaction-lateral flow features and minor faults in Pleistocene in the southeastern area of Ibaraki Prefecture, Japan. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, **64**, 149-158. (in Japanese with English abstract)]
- Takada, K. and Atwater, B.F. (2004): Evidence for liquefaction identified in peeled slices of Holocene deposits along the lower Columbia River, Washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 550-575.
- 高浜信行・卜部厚志・寺崎裕助・大塚富男・Budi Brahmantyo・江口友子・中山俊道・荒木繁雄・川上貞雄・田村浩司 (1998): 新潟県における歴史地震の液状化跡—その 1. 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, **20**, 81-104. [Takahama, N., Urabe, A., Terasaki, Y., Otsuka, T., Brahmantyo, B., Eguchi, T., Nakayama, T., Araki, S., Kawakami, S. and Tamura, K. (1998): Liquefactions of historical earthquake in the Niigata Prefecture, Japan—Part1. *Annual Report of the Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University*, **20**, 81-104. (in Japanese with English abstract)]
- 陶野郁雄 (1986): 液状化現象からみた砂質堆積物の物理的・堆積学的特徴. 地質学論集, **27**, 15-42. [Tohno, I. (1986): Physical and sedimentological properties of liquefiable sandy deposits produced by the strong earthquake in Japan. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **27**, 15-42. (in Japanese with English abstract)]
- Tuttle, M.P., Lafferty III, R.H., Cande, R.F. and Sierzchula, M.C. (2011): Impact of earthquake-induced liquefaction and related ground failure on a Mississippian archeological site in the New Madrid seismic zone, central USA. *Quaternary International*, **242**, 126-137.
- ウェルポイント協会 (2007): ウェルポイント工法便覧. 理工図書. [Well-point Association (2007): *Handbook of the Well-point Method (Well-point Koho Binran)*. Riko Tosho. (in Japanese)*]
- 山崎晴雄・佃 栄吉・水野清秀 (1984): 活断層のトレンチ掘削調査. 応用地質, **25**, 141-145. [Yamazaki, H., Tsukuda, E. and Mizuno, K. (1984): Excavation survey of the active fault. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, **25**, 141-145. (in Japanese)]

* Title etc. translated by K.M.