

利根川下流域における液状化被害地域の 物理探査・原位置試験調査 —液状化調査技術の新展開—

神宮司元治¹⁾・光畑裕司¹⁾・横田俊之¹⁾・中島善人¹⁾

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、利根川下流域や東京湾沿岸では深刻な液状化被害が発生した。液状化被害は関東を中心に広範囲の地域に及び、その規模や深刻さから我が国最大級の液状化被害となった。震災後は、各自治体を先頭に被災状況の実態調査や大学・研究機関による液状化被害の分析調査が行われ、今回の震災被害が主に、旧河川や湖沼跡、埋め立て造成地などの人工改変地域で多く発生していることが判明した。その一方で、埋め立て年代や造成法、地質構造や地下水位に由来するとみられる液状化被害の差異も被災地の中で散見された。東日本大震災の地震被害は、被害の大きさから世界中の関心を集めたため、世界大手の地図情報サービス企業が被災直後から集中的に高分解能の衛星画像を収集しており、今現在も、被災時の地表噴砂の状況等をGoogle Earthなどインターネット上で確認することができる。また、明治初期から中期にかけて関東地方で作成された「迅速測図」なども、インターネット上で公開されており（農研機構, 2013）、実際の被災の状況と過去の地形との関係なども比較することができる。さらに、多くの自治体によって、液状化被害の詳細なデータが得られており、液状化被害の詳細を知ることにも可能である。

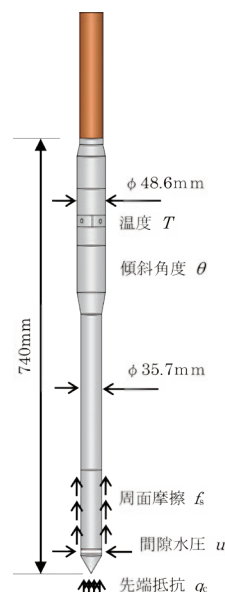
（独）産業技術総合研究所（以下、産総研と呼ぶ）では、被災地の復興計画や今後予測される大地震による液状化被害の対策のため、利根川下流域の実際に液状化被害が発生した地域において、被災状況と地質構造の関連性に着目した調査を行った。また、物理探査（主に地表から非破壊で地下を調査する技術）・原位置試験調査技術（地盤サンプルを取得せずに地下を調査する技術）を応用した新しい液状化調査技術の研究開発と適用性調査を行った。

2. 利根川下流域で実施した原位置試験調査

産総研では、液状化被害が発生した利根川下流域において、液状化被害の程度や地質的条件が異なる調査地点を選択し、一般的なボーリング調査から最新の液状化調査技術まで様々な調査を行った。ここでは、今回の調査で実施した原位置貫入試験および物理探査手法とその適用調査結果の一部について紹介する。

2. 1 三成分コーン貫入試験

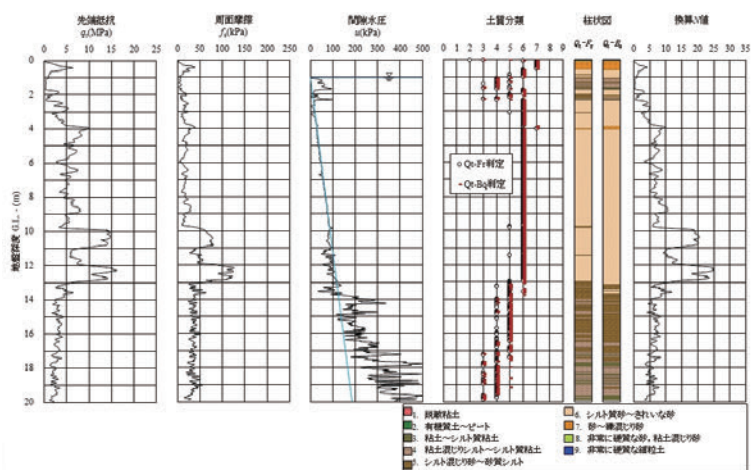
原位置コーン貫入試験の中でも、三成分コーン貫入試験は、わが国だけでなく国外でも普及している原位置試験方法である（高田ほか, 2008）。三成分コーン貫入試験は、第1図に示すようなプローブを、油圧ジャッキを用いて、一定速度で地盤中に貫入させることにより、先端抵抗・周面摩擦・間隙水圧のデータから、深度方向の地盤パラメータを取得する。三成分コーン貫入試験では、ボーリング調査のように地盤サンプルを取得する必要なく地盤の細粒分含有率の推定や地盤の判定が可能である。また、深度分解能も高く、2 cmごとの細かい深度毎の計測が可能であり、標準貫入試験では困難な薄い地層の検出も可能である。



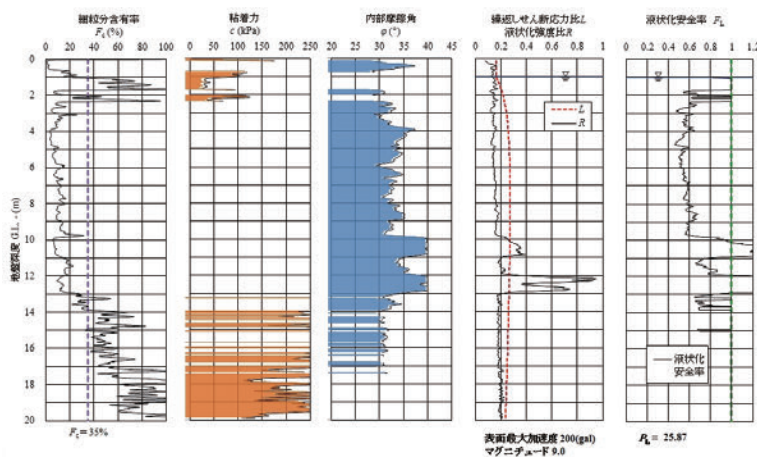
第1図 三成分コーンの模式図。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：液状化, 物理探査, 原位置試験, CPT, VPT



第2図 三成分コーン貫入試験の試験結果.



第3図 大規模な噴砂が生じた地点における三成分コーンによる液状化判定結果.

ここで、三成分コーン貫入試験によって得られた試験結果の一部を第2図に示す。測定地点は、茨城県神崎町内の非常に激しい液状化被害が発生した地点で、大規模な噴砂が認められている。また、産総研で実施したトレンチ掘削の結果からも液状化の痕跡をとらえることができた地点でもある。また、これらの三成分コーン貫入試験の結果から土質パラメータを推定し、液状化判定を行った結果を第3図に示す。

液状化判定は、建築基礎構造設計指針（日本建築学会，1988，p. 67-71）に準拠した方法で行われ，東日本大震災における現地の地表面推定加速度を200 gal，地震規模をマグニチュード9.0として算定した。液状化判定結果を示す液状化安全率（FL）値は，深度約10m以浅で1を下回っており液状化の危険度が高いことを示している。

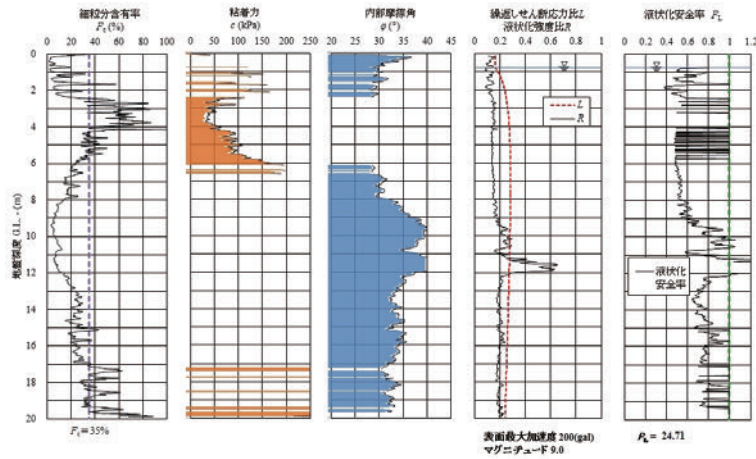
また，深度毎の液状化安全率（FL）に深さ方向に重みをつけて足し合わせた値である液状化危険度（PL）は，25.87という値を示しており，これは，第1表に示す判定

基準（岩崎ほか，1980）を考慮しても極めて高い危険度であると言える。

今回の調査では，液状化被害が発生した地点のほぼ全てで，三成分コーン貫入試験による液状化危険度は5を上回ったが，その一方で実際に液状化被害が見当たらない，もしくはほとんど痕跡がない地点においても，少なからず高い危険度を示す地点が存在した。第4図は，先ほどの神崎町の旧河川跡の液状化発生地点から300mほど北の調査地点における液状化判定結果である。この地点は，地震直後の衛星画像でも噴砂等の液状化被害の痕跡は見当たらず，現地の構造物等を見ても被害が見当たらない場所である。この地点の液状化危険度（PL）は，先ほどの地点とほぼ匹敵する24.71という高い値を示しているが，実際の被害状況は大きく異なる。このように，液状化危険度が高いと判定されたにも関わらず，実際の液状化被害が不明瞭，もしくは，さほど大きくない事例が少なからず存在した。土木研究所が震災後に実施した調査結果（土木研究所，

第1表 液状化危険度判定.

	$P_L=0$	$0 < P_L \leq 5$	$5 < P_L \leq 15$	$15 < P_L$
P_L 値による液状化危険度判定	液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は不要。	液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対してより詳細な調査が必要。	液状化危険度が高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。	液状化危険度がきわめて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。

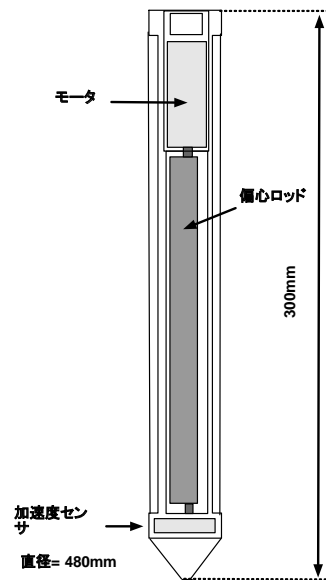


第4図 液状化の痕跡が見られない地点における三成分コーンによる液状化判定結果.

2011)においても、FLおよびPLによる液状化判定結果がかなり安全側（危険度が高い方向を示す）を示す傾向があると指摘されており、本調査の結果も同様の結果を示していると考えられる。

2.2 バイブロコーン貫入試験

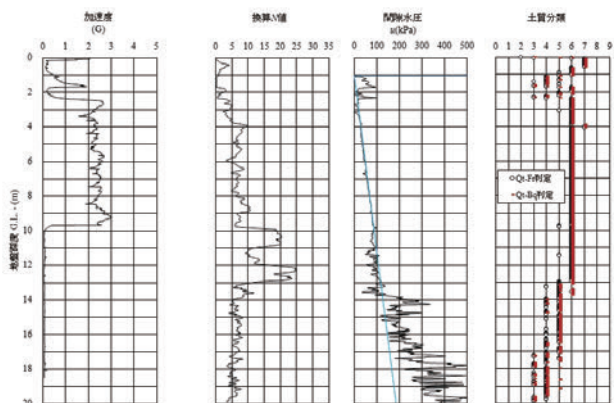
標準貫入試験や三成分コーン貫入試験などの方法は、地盤の強度や細粒分の含有率などの地盤パラメータから液状化の発生を予測する、いわゆる静的な方法である。これに対して、地盤サンプルの振動台試験や爆薬を用いた人工地震による試験方法は、地盤に人工的に振動や衝撃を加えることによって液状化が発生するか確かめる動的試験方法である。これらの方法の一つとして、産総研がこれまで研究開発を行ってきたバイブロコーン貫入試験がある (JINGUJI *et al.*, 2006)。バイブロコーン貫入試験は、加速度・比抵抗・間隙水圧の各センサおよび振動機構を内蔵したプローブを用いて、その振動機構によって地盤を強制的に液状化させ、液状化した地盤の動的な応答を各センサで計測する試験方法である。これまで、本貫入試験は加速度センサ・比抵抗・間隙水圧の3つのセンサを用いて、特定深度での状態変化の計測を段階的に行ってきたが、今回の調査においては、応答の早い加速度センサに絞り、連続測定が可能ないように改良したプローブを用いて調査を行った。第



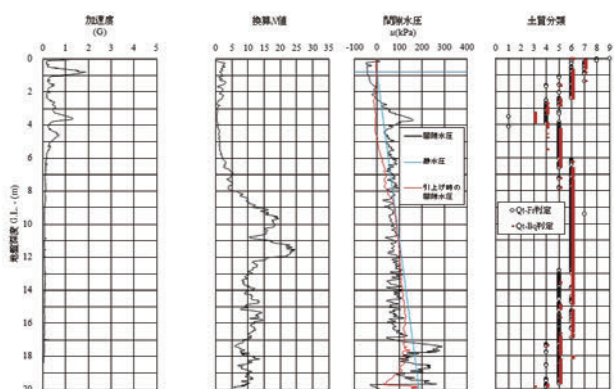
第5図 バイブロコーンの模式図.

5図に今回の調査に使用したプローブの模式図を示す。

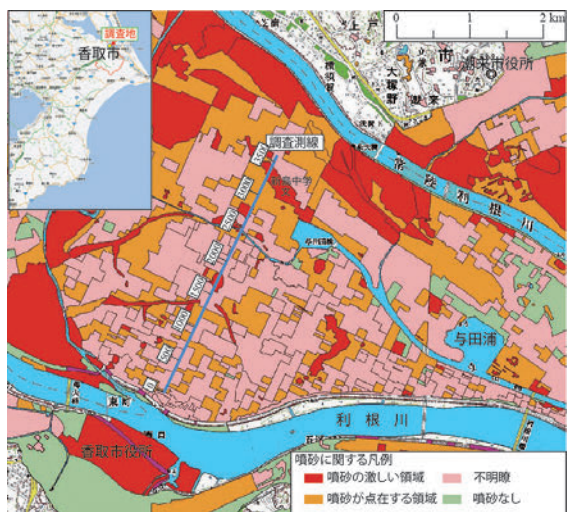
バイブロコーンは、三成分コーン貫入試験と同様に貫入試験機の油圧ジャッキによってプローブを地盤中に貫入させるが、測定は引き抜き時に行う。ここで、第6図および第7図に、三成分コーン貫入試験を実施したそれぞれの地点で同時に実施したバイブロコーンの結果を示す。バイブロコーン内部の偏心ロッドで発生した振動力は、地盤の剛



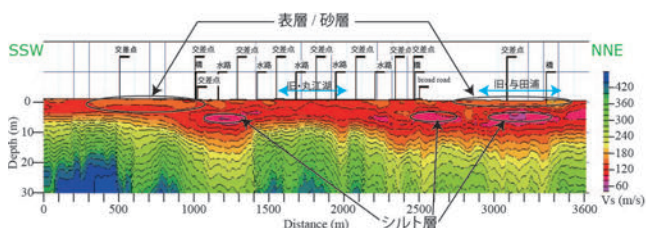
第6図 大規模な噴砂が生じた地点におけるパイプロコン貫入試験結果.



第7図 液状化の痕跡が見られない地点におけるパイプロコン貫入試験結果.



第8図 表面波探査測線 (神宮司ほか, 2013).



第9図 表面波探査によって得られた速度構造図 (神宮司ほか, 2013).

性が高い場合は、プローブの振動が小さいため、プローブの加速度は小さくなる。その一方で、地盤の液状化が発生した場合は、地盤の剛性が失われ、液体のような状態になるためプローブの加速度が大幅に増加する。

空气中で振動させた場合のプローブの最大加速度は、約2Gであるが、第6図の地点の加速度は、深度2mから10mで2Gに達しており、この地層内で液状化により剛性が大幅に失われていることが考えられる。その一方で、第7図の地点の加速度は、第6図の地点の加速度に比べて大幅に小さく、地盤の動的な剛性が高いことがわかる。この差は、三成分コーン貫入試験では、明確に得られることができなかった差異であり、三成分コーン貫入試験とパイプロコン貫入試験を合わせて実施することによって、より高精度の液状化判定が可能になると考えられる。

3. 物理探査による液状化調査

弾性波探査や電気探査といった物理探査方法では、地表から比較的広域の地下構造を調査することができる。産総研では、これらの調査手法を用いて、液状化発生地点の地質的特徴を調べる調査を実施した。

写真1に示すのは、地盤の速度構造を地表から調査する表面波探査と言われる物理探査手法の一つである。

写真1中の(a)に示すのが震源で、(b)が計測するセンサである。今回の調査では、ランドストリーマという牽引帯の上に地震計を並べ、そのランドストリーマを車両で牽引しながら調査を実施した。測線は、香取市新島中学校近辺をほぼ南北に横断する道路である。

測線上には、噴砂の激しい領域が点在しており特に香取市新島中学校の周辺では、特に大規模な噴砂が確認できた。ここで、第8, 9図に表面波探査によって得られた速度構造図と地形的特徴を併記した図を示す。一般的に、地盤中の地震波(表面波)の速度は、地盤の密度が高いほど速くなるが、旧与田浦があった近辺や旧河川にあたる大規模な噴砂が生じた地点で、速度の遅いシルト層の存在が推定される。砂層に比べて透水性の低いシルト等が存在する場合、その上位の水位が浅くなる可能性があり、それが原因で激しい液状化が発生した可能性も考えられる。

4. まとめ

東日本大震災では、非常に甚大な液状化被害が発生した。そして、様々な液状化発生地点の地域的特徴や地質的特徴

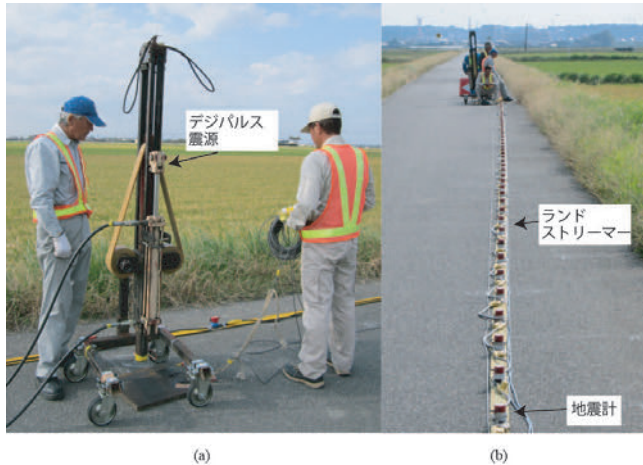


写真1 ランドストリーマーを用いた表面波探査 (神宮司ほか, 2013).

と被害との関係の検討が行われた。産総研では、これらの被災地において、物理探査・原位置試験調査技術を用いた調査手法を適用し、実被害との比較検討を行った。その結果、三成分コーン貫入試験といった最新の既存調査手法の適用においても、いくつかの問題点が残ることが明らかになった。また、同時に、これまで研究開発を行ってきたバイブロコーンなどの新しい調査手法の有効性を示すことができた。これらの成果によって得られた最新の知見と技術は、今後の被災地の復興と全国的な液状化被害の防止に貢献すると考えられる。

文 献

土木研究所 (2011) 東北地方太平洋沖地震における液状化の発生を踏まえた液状化判定法の検証, <http://www.pwri.go.jp/team/smd/pdf/hanteihou.pdf> (2013/10/11 確認)

岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進 (1980) 地震時地盤液状化の程度の予測について. 土と基礎, 128, no. 4, 23-29.

JINGUJI, M., TOPRAK, S. and NAKASHIMA, Y. (2006) Development of vibration penetration test (VPT) and results of laboratory and field experiments. *Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, no. 896.

神宮司元治・横田俊之・光畑裕司 (2013) 物理探査および原位置地盤計測による液状化評価. 地質分野研究企画室 (編), 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究中間報告, 地質調査総合センター速報, no. 63, 207-222.

日本建築学会 (1988) 建築基礎構造設計指針. 430p.

農研機構 (2013) 関東平野 / 歴史的農業環境WMS配信サービス, <http://www.finds.jp/wsdocs/hawms/kanto/index.html.ja> (2013/10/11 確認)

高田 徹・関 平和・松本樹典・藤井 衛・松本克也・佐藤 隆 (2008), 三成分コーン貫入試験による宅盤の評価手法に関する考察. 地盤工学ジャーナル, 4, no. 2, 157-170.

JINGUJI Motoharu, MITSUHATA Yuji, YOKOTA Toshiyuki and NAKASHIMA Yoshito (2013) Geophysical exploration and in-situ investigation of liquefaction affected area along Tone River—the new method of the assessment of soil liquefaction potential—.

(受付: 2013年10月11日)

◆ 編集後記 ◆

今月号は、産業技術連携推進会議知的基盤部会地質地盤情報分科会の講演会「東日本大震災による液状化被害と地質地盤情報の活用」の特集号で、12月6日の講演会当日に配布される講演予稿集も兼ねています。今回は原稿の大部分を産総研外部の方をお願いしており、講演会当日までに印刷ができるように編集スケジュールを早めるなど、関係者の方々にはたいへんご協力いただきました。ここに記して謝意を表します

(12月号編集担当: 下川浩一)