

3.8 液状化判定法の高精度化に関する研究②

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ（特命事項担当，地質）

研究担当者：阿南修司、佐々木靖人、日外勝仁

【要旨】

東北地方太平洋沖地震により発生した広域的かつ多大な液状化被害は、社会に大きな影響を与えた。次なる大地震による液状化被害の軽減に向け、社会資本の液状化対策を進めていくことが喫緊の課題である。本研究は、我が国における多様な土質、地質構造を有する地盤を対象に、液状化に対する各種構造物の耐震性能をより合理的に評価し、真に危険性の高い構造物の的確な抽出に寄与すべく、液状化判定法の高精度化を図ることを目的として実施するものである。本研究では、地盤情報が直接得にくい既往の構造物や面的な地盤の液状化危険度の評価において、既往ボーリング等の地盤情報を用いた液状化判定を適切に行うための検討、オールコアボーリングの詳細な観察による液状化判定の精度について検証、原位置での液状化特性を把握する試験方法として振動コーンの試作を行った。

キーワード：液状化判定、ボーリング柱状図、オールコアボーリング、堆積構造、原位置試験

1. はじめに

これまで、産官学の各方面において液状化対策に関する様々な技術開発がなされてきたものの、一般に多大なコストを要することから、液状化対策はほとんど進んでいない。また、液状化対策の実施が必要とされる箇所について十分な対策効果を得るためには、地中の広い範囲にわたる地盤改良等が必要となることから、対策コストの縮減にも限界がある。

このような状況の下、東北地方太平洋沖地震により発生した広域的かつ多大な液状化被害が、社会に大きな影響を与えた。東北地方太平洋沖地震による液状化被害を踏まえ、国土交通省は「液状化対策技術検討会議」において、液状化被害の実態把握、現行の液状化発生の予測手法（液状化判定法）の検証を行った。その結果、現在の液状化判定法が今回の地震による液状化の発生を見逃した事例は確認されなかった。一方で、実際には噴砂等の液状化の痕跡が確認されないにもかかわらず液状化すると判定される箇所が多く確認されたことから、地震動の継続時間の影響、細粒分の影響、造成年代の影響等の評価について継続的に検討する必要があると結論付けられた。

次なる大地震による液状化被害の軽減に向け、社会資本の液状化対策を進めていくことが喫緊の課題である。そこで、本研究は、我が国における多様な土質、地質構造を有する地盤を対象に、液状化に対する各種構造物の耐震性能をより合理的に評価し、真に危険性の高い構造物の的確な抽出に寄与すべく、液状化判定法の高精度化

を図ることを目的として実施するものである。

本研究においては、地盤情報が直接得にくい既往の構造物や面的な地盤の液状化危険度の評価において、既往ボーリング等の地盤情報を用いた地盤モデルに基づく液状化判定精度の検討をおこなった。また、液状化の痕跡が確認されない箇所においても、地下においては液状化による変形が生じている可能性があり、同一地点で行った通常の標準貫入試験ボーリングによる液状化判定とオールコアボーリングの詳細な観察による液状化層の認定を行い、両者の比較を行うことで液状化判定の精度について検証を行った。これらの検討に加え、液状化判定精度の向上のため、原位置での液状化特性を把握する試験方法として振動コーンの試作を行った。

2. 地盤モデルに基づく液状化判定精度の検討

2.1. 柱状図の粗密による地盤モデルの精度

2.1.1. 地盤モデル作成

地盤モデル作成の対象は、関東地方の河川堤防周辺で、今回の震災による液状化が見られる地域を4地点抽出し

表-1 地盤モデル作成地点概要

地域（流域）	断面(km)	柱状図数
A1 埼玉県吉見町（荒川）	南北 1.85	10(6)
A2 埼玉県吉見町（荒川）	東西 1.95	10(6)
B1 茨城県常総市（小貝川）	南北 3.44	10(6)
B2 茨城県常総市（小貝川）	東西 2.34	10(6)
C 埼玉県吉川市（江戸川）	南北 4.13	9(5)
D 千葉県柏市（手賀川）	東西 3.62	11(5)

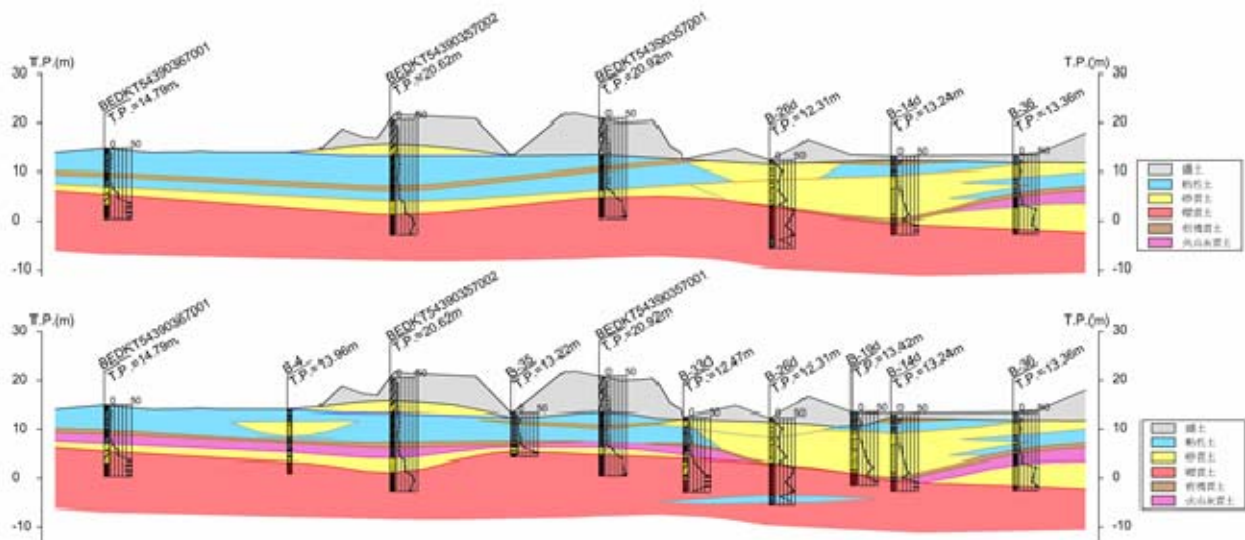


図-1 A1 埼玉県吉見町・南北断面の比較結果

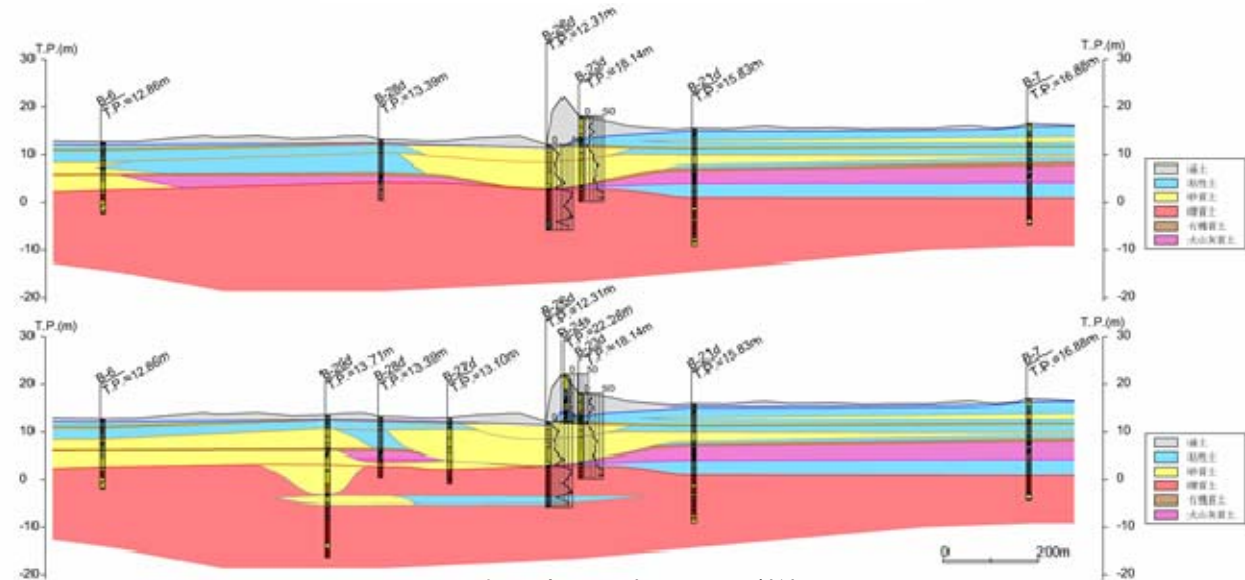


図-2 A2 埼玉県吉見町・東西断面の比較結果

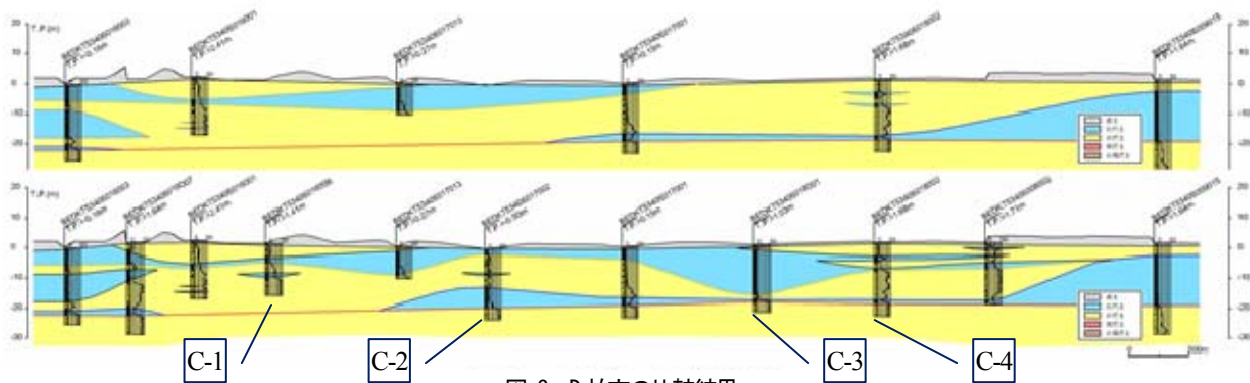


図-3 D 柏市の比較結果

た(表-1)。検討に用いたボーリング柱状図は、主に国土地盤情報公開サイト(KuniJiban)で公開されている深度 10～50m 程度の土質調査ボーリングを用いた。

なお、KuniJiban で公開されている地盤情報のほとんどが柱状図であり、土質試験の情報がきわめて限定されて

いる現状を考慮して、地質断面図の作成においては、柱状図の土質区分およびN 値のデータのみを使用した。

これらのボーリング柱状図を用いて地質断面図を作成した。対象となる各断面は、ボーリング調査を 10 地点程度含むものとし、断面ごとに、半分程度の柱状図の情

報を元に地質断面図を作成する Case1 と、全ての柱状図の情報を元に地質断面図を作成する Case2 を作成し、これらの比較を行った。

2.1.2. Case 1 と Case 2 の比較

ここでは断面図の違いが顕著に表れた A1 と A2 および D の 3 地点について、その違いの要因を述べる。

(1) A1 吉見町南北断面 (図-1)

この地点では断面北側から中央にかけての火山灰質土の存在の有無と、有機質土が 1 層から 2 層になっている「地層の連続性」「分布形状」についての評価が異なる。この地点では、土質分類の記載が粘性土として一括されているものが、ボーリングが追加されたことにより、火山灰質土と有機質土に区分されることとなり、結果として傾斜して分布すると想定された有機質土が水平に近い上下 2 層に分けられると推定された。

(2) A2 吉見町東西断面 (図-2)

この地点では砂質土の「分布形状」の評価が異なる。この地点では、断面西側の柱状図で砂質土が欠けていることから粘性土が広く分布すると考えられたが、柱状図が追加されることで、厚い砂層が分布することが確認され、南北断面との比較により自然堤防起源の砂質土が分布すると推定された。

(3) D 柏市 (図-3)

この地点では標高-20m より浅い箇所の砂層の「地層の連続性」「分布形状」についての評価が大きく異なる。この違いは、標高-20m 付近に N 値が 50 を上回る砂層がほぼ平坦に分布し、その上位に旧河道起源の砂質土が水平に堆積したものと考えたが、柱状図を追加することで砂層の上位に粘性土が分布していることが確認され、その分布から旧河道の谷部に粘性土が堆積したと推定したことによる。

2.1.3. 地質構造把握の精度の要因

A1 と A2 地点は、荒川近傍の後背湿地と旧河道と自然堤防が分布する地域であるが、ボーリングの粗密によって旧河道や自然堤防が見落とされる結果となっている。また、D 地点は、手賀川近傍の干拓地であり、比較的均一な地質構成であることが想定された。これに対し、砂質の地盤が厚く分布すると想定された地点で、ボーリングの粗密によって厚い粘性土が分布することが確認され、より複雑な堆積環境であったことが明らかとなった。

これらの事例に見られるように、周辺の微地形や河川の堆積環境についての情報を十分考慮することが、地盤モデルの精度（「地層の分布形状」の評価）に大きく寄与すると思われる。

また、A1 で見られるように柱状図として記載されてい

る土質区分だけでは、火山灰質土の存在が不明確であり、個々の地質情報の精度が地盤モデルの精度（「地層の連続性」）に直接影響を与える例が見られた。

このような Case1 と Case2 のモデル間の差の要因を各断面でみると

- ・ボーリングの粗密による地層の急変箇所の見落とし (A2)
- ・ボーリング増加による地層堆積過程の解釈の変化 (A1, D)
- ・ボーリングの増加による砂層分布の変化 (B1, B2, C)

といった項目にまとめることができ、ボーリングの有無による地層の厚みや地層構成自体の違いが生じるケースに加え、ボーリング柱状図の空間的な配置に基づく地層形成過程の解釈の違いが生じるケースもみられる。これは、単純に地盤情報としてボーリング柱状図のみでは判断ができない堆積環境や微地形などの情報が地盤モデル作成上重要であることにほかならず、地質構造の空間的把握においては、地盤から直接得られる情報以外の微地形や堆積物の特性から判断される堆積環境の情報が重要であることを示している。

2.2. 地盤モデルによる液状化層の推定精度¹⁾

2.2.1. 地盤モデルによる推定とボーリングの比較

前述のボーリング密度による地盤モデルの精度検証は、大局的な地質構造の推定精度について検討したが、ここでは既存柱状図に基づく液状化層の推定のための柱状図レベルでの推定精度の検証をおこなった。

図-4 は、図-3 に示した柏市の断面の 4 地点 (図-3 中の C-1~C-4 断面) において、case1 で地層分布を内挿した柱状図を推定し、実際の柱状図 (case2) と FL 値、PL 値の比較を行ったものである。各断面の推定と実際の柱状図の比較、および液状化判定の違いは以下のとおり

- C-1: 地層構成や N 値分布は比較的類似するが、PL 値の違いが大きく、液状化層の分布範囲も大きく食い違う。
- C-2: 地層構成と N 値分布が大きく異なるが PL 値は同程度と判定され、液状化層が厚く分布する傾向は同一。ただし、下部で分布が異なる。
- C-3: 地層構成と N 値分布の違いが大きく、PL 値の違いも大きい (ただし両者とも 15 を上回る)。中間部の液状化層の分布の有無が大きく食い違う。
- C-4: 地層構成と N 値分布が全く異なり、PL 値の違いも大きく推定では PL 値が 15 を上回るが、実際には 15 以下。液状化層の分布範囲が大きく食い違う。

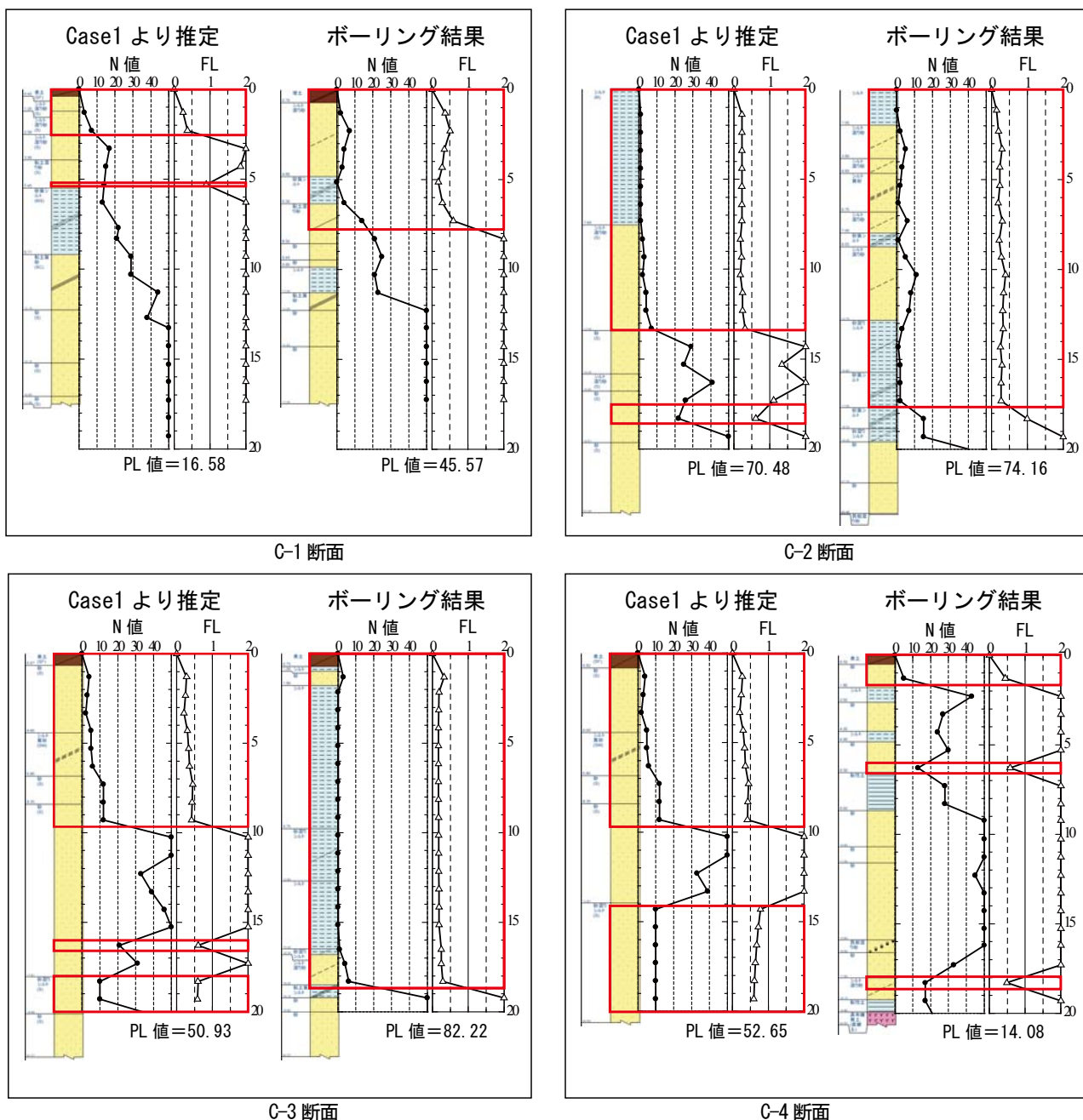


図-4 推定した断面の地層構成 (case-1) とボーリング結果 (case-2) の比較

この結果をみると、推定精度は、地層の分布形状だけではなく、どの砂層（液状化層）がどちらから連続する（あるいはレンズ状）と推定するかによって大きく異なることが明らかとなった。これは既存ボーリングの情報（土質区分とN値のみ）であり、その地点の液状化判定としては十分かもしれないが、周辺の液状化判定には情報不足であることに起因する。

2.1.3でも述べたように、通常のボーリング柱状図の情報量には限界があることから、柱状図レベルでの液状化層の推定は困難である。

3. オールコアボーリングによる液状化判定の精度の検証²⁾

3.1. 分析試料

分析の対象は、表-2に示す地点で採取されたオールコアボーリング試料で、コアを半裁し断面の詳細観察（堆

表-2 対象としたオールコアボーリング試料

採取地点名／ボーリング名	試料長
香取市佐原イ（佐原）	PW0703 10m
千葉市美浜区ひびき野2丁目（幕張）	PW1301 20m
浦安市舞浜（舞浜）	PW1403 20m

積構造、層相、級化構造、含有物、色調)、半裁断面から作成した剥ぎ取り標本の軟X線写真撮影を行った。また、5cm 間隔程度で試料を採取し帯磁率、含水比、乾燥密度、粒度分析もあわせて行った。

3.2. 変形構造の記載方法






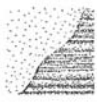





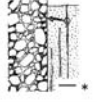
液状化の発生を特徴づける構造として 12 種類の変形構造 (①褶曲 (コンボリュートラミナ)、②シルトブロック (泥質片・マッドクラスト)、③砂の不規則な混入、④脱水・流動、⑤砂の貫入・流理、⑥ラミナの切断、⑦堆積構造の消失・融合、⑧撓曲、⑨級化・逆級化、⑩皿状構造・ピラー構造、⑪ロート状構造、⑫チューブ脱水構造) について、これらの確認される位置を記録した。なお、これら 12 種類の変形構造は、国土交通省下館河川事務所の小貝川における液状化痕跡調査で液状化痕跡の確認に用いられたものである。

表-3 に、これら 12 種類の変形構造の識別上の特徴のついてまとめたものを示す。

3.3. 液状化層の分布推定精度の検証

図-5~7 に各地点の観察結果を示す。図の右半分はオールコア試料に基づく柱状図と①~⑫の変形構造の分布を表にまとめたものである。変形構造の分布に基づいてその区間で液状化が発生したと考えたものを液状化区間、周辺の区間の液状化による変形が及んだ範囲を液状化痕

表-3 液状化痕跡とした変形構造の概要

 <p>①褶曲 (コンボリュートラミナ) ラミナが数 cm~数 10cm の波長で不規則に褶曲する。液状化による流動、地盤の変位に伴う変形によって形成されたと考えられる</p>	 <p>②シルトブロック (泥質片) 比較的塊状の砂層中に数 cm~10cm のブロック状の粘性土を含む。砂層の流動によって破壊された粘性土層の断片と考えられる。粒度の異なる砂を不規則に含む場合もある</p>
 <p>③砂の不規則な混入 粒度の異なる砂が不規則に混在している。液状化によって粒度の異なる砂層が混ざり合ったと考えられる</p>	 <p>④脱水・流動 液状化に伴って下位の密度の低い部分あるいは水が上方に抜け出したものと考えられる。帯のピラー構造に似ているが厚みを持った地層の変形であり、火災構造に似ている</p>
 <p>⑤砂の貫入・流理 液状化した砂が断状に貫入したもの。多くは塊状であるが、まれに流動に伴う構造 (流理構造) がみられる</p>	 <p>⑥ラミナの切断 砂層のラミナが比較的明瞭な面で途切れている。⑤の貫入構造の一部と考えられる</p>
 <p>⑦堆積構造の消失・融合 ラミナが不明瞭となり、液状化によって堆積構造が消失したと考えられる。堆積構造の変化は、⑥と異なり漸移的に変化する</p>	 <p>⑧とう曲 (撓曲) 一見断層のように見えるが、ラミナのずれは切断によるものではなく、連続してつながっている。液状化によって軟化した砂層に力が加わり、ずれて現れたと考えられる。</p>
 <p>⑨級化・逆級化 粘性土のクラックに砂が貫入した場所で見られる。液状化した砂が沈殿する際に沈降しにくく細粒分が遅れて堆積したものと考えられる。軽石が多い場合は逆級化構造を示す</p>	 <p>⑩皿状構造・ピラー構造 液状化後の脱水構造の一種であり、ラミナの変形とは異なる。皿状構造の端部が上方に伸びたものは上方への脱水経路と考えられ、ピラー構造と呼ばれる</p>
 <p>⑪ロート状構造 液状化後の脱水が多く、対流してロート状の形状となったもの。砂層の最上部で形成されることが多い</p>	 <p>⑫チューブ脱水構造 液状化後の脱水構造の一種であり、ほぼ鉛直でφ数 mm の管状の構造となる。砂粒子の移動を伴わず、細粒分が洗い出されている</p>

跡として示した。

同じく、図の左側には標準貫入によるボーリング柱状図と N 値、液状化判定 (N 値および室内試験による FL

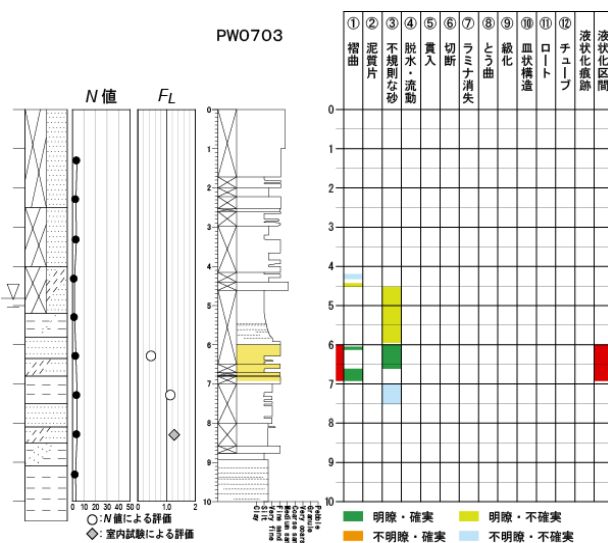


図-5 香取市佐原イ (佐原地区)

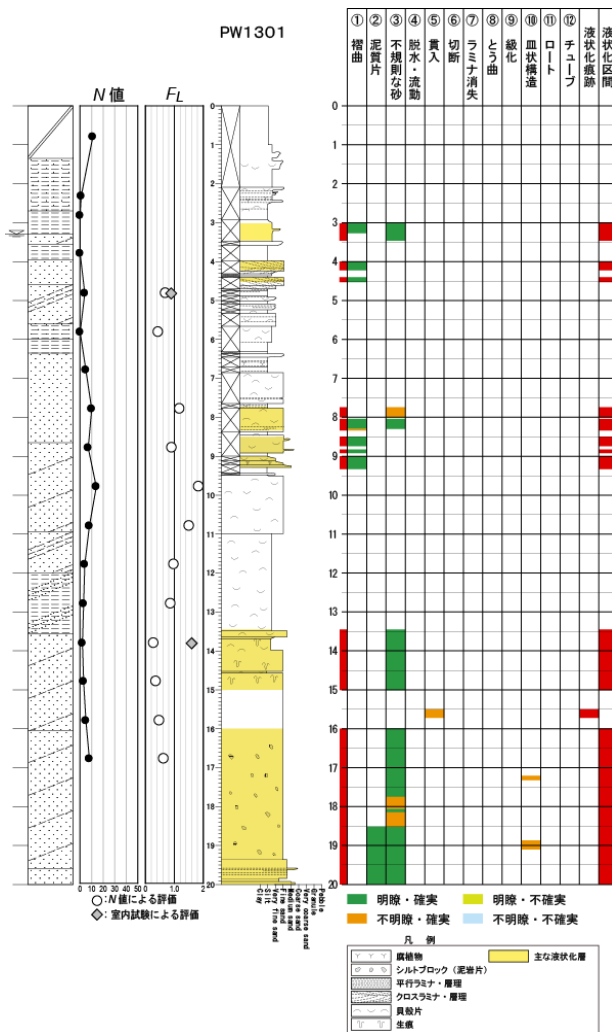


図-6 千葉市美浜区ひびき野 2 丁目 (幕張地区)

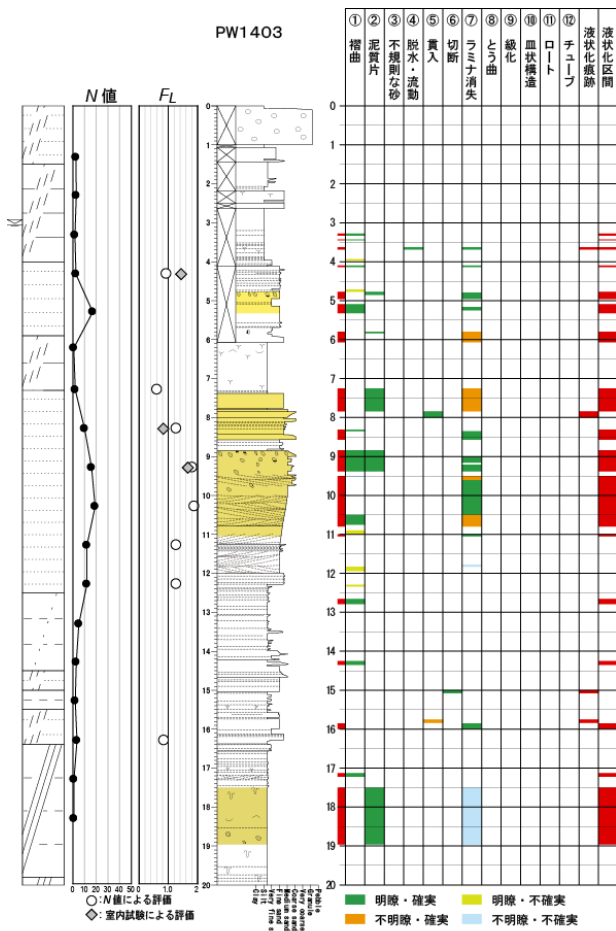


図-7 浦安市舞浜（舞浜地区）

値)をあわせて示した。

1)左原地区 図-5のように液状化が深度6~7m付近で生じていることが読み取れ、N値による液状化判定の区間は少ないが、コア観察による液状化区間と良く対応している。

2)幕張地区 図-6のようにFL値が1.0を下回る区間と、コア観察による液状化区間は1対1の対応はしていないが、全体的には液状化痕跡の多い区間前後ではFL値が低い傾向を示している。

3)幕張地区 図-7のようにFL値が1.0を下回る7~8mの区間と、コア観察による液状化の対応はみられるが、薄い変形構造が散在している区間ではFL値と変形の対応は明瞭ではない。9~11m区間では、まとめて液状化痕跡がみられるがFL値が1.0を上回っている。

3.4. 考察

各地区の液状化判定と変形構造は、おおむね整合している区間もある一方、舞浜地区の9~11m区間のように、両者が一致しない区間もみられる。

このような違いが生じる原因として、

- ・標準貫入とオールコア試料の位置の違いによる地層の空間的分布の不均一
 - ・上下の層順で生じた液状化の変形が及んでいる液状化痕跡と液状化を判別できていない
 - ・過去の地震による液状化の変形が残存し現時点での液状化判定と一致しない
- などの原因が想定される。

4. 振動コーンの試作

原位置での液状化特性を把握する試験方法を検討するため、振動コーンの試作を行った。この装置は、加振力を可変としたバイブレータによる振動機能と、先端抵抗、間隙水圧、加速度の測定を行い、加振前後の貫入抵抗を元に液状化特性を把握するものである。なお、仕様は土木研究所動土質研究室が開発した振動式貫入試験機³⁾を一部修正した。

表-4 機器構成

名称	名称
① コーンポイント	⑥ 振動部
② 間隙水圧フィルター	⑦ フリクションカッター
③ 間隙水圧計	⑧ ケーブル
④ 圧力計 (qc 用)	⑨ データロガー
⑤ 加速度計	⑩ 振動部コントローラー

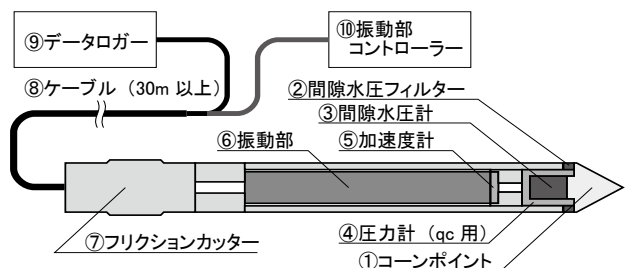


図-8 振動コーンの構成図

参考文献

- 1) 阿南修司：地盤情報の精度が液状化判定に与える影響について、平成25年度日本応用地質学会研究発表会、2013.10.
- 2) 阿南修司：ボーリングによる液状化層判定精度について、平成26年度日本応用地質学会研究発表会、2014.10.
- 3) 佐々木康、古賀泰之、伊藤良弘、小笠原久：新しく開発した振動式貫入試験機、土木技術資料、25(2)、p67-72、1983.

RESEARCH ON A HIGH-PRECISION ASSESSMENT METHOD OF SOIL LIQUEFACTION

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : Geology and Geotechnical Engineering
Research Group (Chief Researcher,
Geology Research Team)

Author : ANAN Shuji
SASAKI Yasuhito
AGUI Katsuhito

Abstract : In The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Great liquefaction damage occurred over a very wide area, and had large influence on society. It is the urgent subject to advance the countermeasure of infrastructures against liquefaction for mitigation of the damage caused by next large earthquake. The purpose of this study is to establish a high-precision assessment method of soil liquefaction for the ground which has various soil properties and geological structure in Japan. In this study we tried to evaluate an accuracy of subsurface model by using borehole logs for liquefaction potential assessment, and we compared a detailed observation of all-core boring with liquefaction determining based on NPT, for liquefaction potential assessment

Key Words : Liquefaction, assessment of soil liquefaction, borehole logs