

浦安市における各種静的サウンディング試験の比較 (その1: RI-CPT)

現場調査 液状化 電気式コーン貫入試験

京都大学 防災研究所 国際会員 三村 衛
 千葉県防災危機管理監 浅尾一巳
 ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 国際会員 吉村 貢
 同上 正会員 ○寺尾庸孝

1. はじめに

平成 23 年東北地方太平洋沖地震によって、千葉県浦安市内では大規模な液状化被害が生じた。沖合いに拡張した埋立地での被害がとりわけ大きかったこともあり、同市高洲八丁目の埋立地において、各種サウンディングによる地盤調査の一斉試験が実施された。提供された試験ヤードの地盤構成を把握し、一斉試験のエリアを選定する目的で、先行して RI-CPT を実施した。図-1 に示すように、50m 間隔を基本として、4つの測点を海に近い側からNo.①, ②...のように配置した。

なお、このヤードは平均水深約 5m の海域に航路浚渫土をポンプ圧送して埋立ている。埋立後は余盛約 3m の他には、バーチカルドレーンなどの圧密促進工法は採られていない。

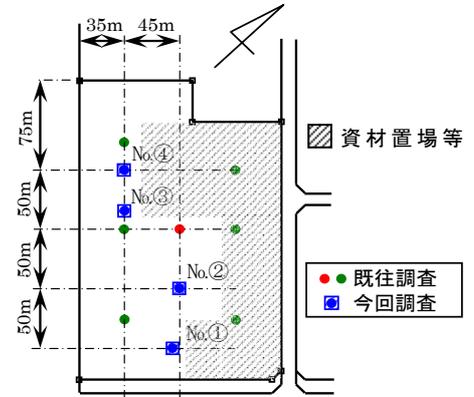


図-1 高洲 8 丁目における測点配置

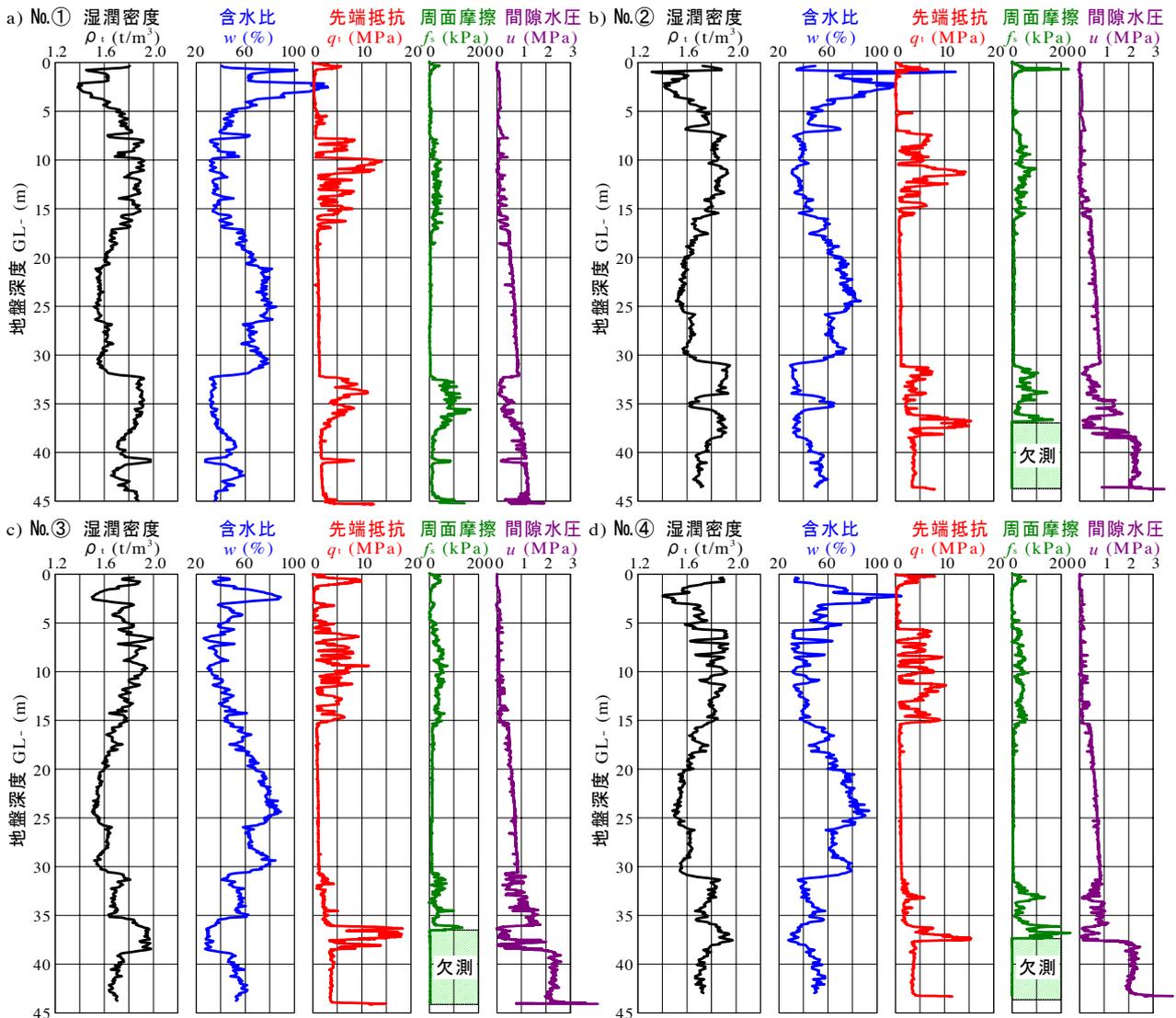


図-2 RI-CPT 試験結果

2. 試験結果

RI-CPTの結果を図-2に、a)No.①～d)No.④の順に示す。図-2にはRI-CPTで得られる含水量(水分密度)、乾燥密度、間隙比など物性データは割愛している。概略の地盤構造は、最上位に砂質土が厚さ1m程度、その下に厚さ5mほどの粘性土、同10mほどの砂泥互層、同15～20mほどの粘土、同5mほどの砂質土、同5～7mの粘性土となっており、G.L.-44m付近で貫入不能な固い層に至っている。液状化被害地盤での一斉試験というテーマからG.L.-20mまでの地盤構造が重要である。特にG.L.-10mを中心とした砂質土層が注目される。RI-CPTによる湿潤密度 ρ_t のプロフィールから、No.①では1～2mの砂質土層と0.5～1mの粘性土層が互層をなしている。No.②、③ではこの傾向が不明瞭となり、No.④にはG.L.-5～10mでこの傾向が顕著となっている。先端抵抗 q_c のプロフィールではNo.①と②で最大値約15MPaを示す山型となっており、No.③と④では最大値10MPaの鋸の波状の形を示している。できるだけ異なった地盤構造の下で一斉試験を実施するという観点から、No.①と③が一斉試験実施エリアとして選定された。

G.L.-15m付近から-30m付近までの粘性土層は、先端抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s および間隙水圧 u の3成分プロフィールには現れていないが、 ρ_t および含水比 w のプロフィールにはG.L.-25m付近で物性が変化する2層の構造が認められる。また、 w と q_t の比較に拠れば、粘性土層の砂質土層に近い側は粘性土層の中心部分より排水によって圧密が進行していると考えられる。

3. 貫入中のプローブ温度

RI-CPTはプローブに温度センサーを組み込み、貫入中の温度を計測して他の測定値を補正する機能を有している¹⁾。荷重センサーに一般に用いられている、ひずみゲージには温度補償型と呼ばれているものがある。このタイプは、ひずみゲージの線膨張係数を貼付する部材のそれに合わせるようにされている。しかし、様々な材料に合わせられるのではなく、軟鋼・ステンレス鋼・アルミニウムなど代表的な材料に限られている。さらに、CPTなどのように限られたスペースに荷重センサー(ロードセル)を構成しようとする部材の形状が複雑になり、温度による変形が線膨張の条件に合致しないことが生じる。また、平林ら²⁾は軟弱粘性土におけるCPTで温度の影響を検討し、コーン先端抵抗から非排水せん断強さを算出するなどCPT計測値を設計に用いる場合には温度補正が必要であると指摘している。CPTの温度影響についてはISOでも取上げられ、基準案ISO/FDIS 22476-1:2009(E)に一過性の温度勾配と雰囲気温度として規定されている。ISO基準案ではCPTに際して、雰囲気温度と平衡させるために貫入開始時に地盤中で養生することが規定されている。

本試験ヤードは図-2に示したように砂質土層と粘性土層が大きな互層を構成している。RI-CPTの温度測定値には図-3に示すように砂質土層前後での温度上昇と粘性土層への貫入後の温度低下が示されている。図-3には周面摩擦のプロフィールも併記している。温度のプロフィールと比較して明らかなように、プローブの温度上昇は摩擦熱によるものである。ISOの基準案の規定を満足するためには貫入・停止を繰返さなければならないことになる。CPTにとっては極めて不合理と考えられ、これを回避するためには荷重センサー近傍での温度測定と、これによる補正が有効と考えられる。

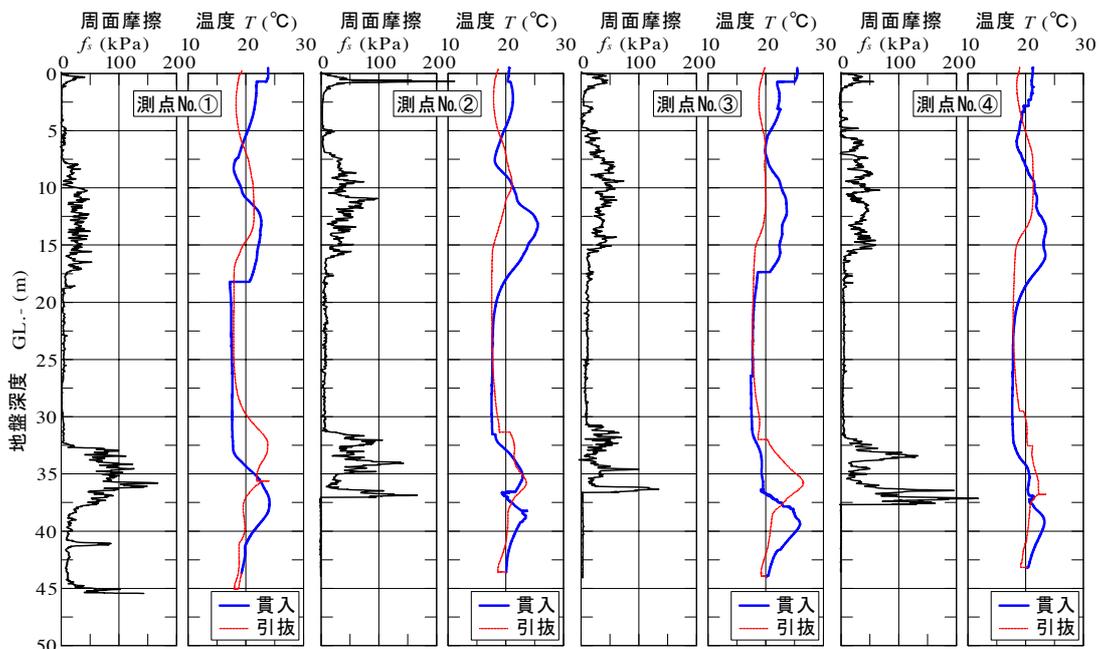


図-3 一斉試験ヤードにおけるRI-CPTでの周面摩擦と地盤中温度測定結果

4. RI-CPTデータを利用した液状化判定

測点No.①において、今回発生した地震に際に受けたものと同程度の地震動（M9、地表最大加速度 $\alpha_{max}=174.3gal$ または、レベル1地震動、設計水平震度 $k_{hgl}=0.178$ ）を受けた場合、再びこの地盤が液状化するかを検証した。液状化の判定においては、地下水位、土質種別、N値及び細粒分含有率 FC などのパラメータが重要な要因として挙げられる。RI-CPTデータより、これらパラメータを推定し、建築基礎構造設計指針、道路橋示方書に基づく方法、Lancellotta, Robertson&Fear, 柴田&Teparaksa によってそれぞれ提案された方法に基づき液状化判定を行った結果を報告する。また、RI-CPTの測点近傍で行われたSPTの実測N値とボーリングで採取した試料の粒度試験結果とRI-CPT結果より推定した値との比較も行った。

4.1 土質分類結果の比較

図-4にRI-CPTの結果をロバートソンチャート上にプロットし、土質分類を行った結果を示す。また、図-5にボーリングから得られた柱状図とRI-CPTから得られた土質分類結果を比較した。なお、液状化判定ではG.L.-20mまでの飽和地盤を対象とするため、その深度までの評価を行った。RI-CPTの結果をもとにした土質分類結果では、G.L.0~2mはシルト混じりの砂層で、G.L.-2m~4m、G.L.-6.5m~8mは粘土層、その間のG.L.-4m~6.5m区間シルト層と砂層の互層となっている。G.L.-8~11.5mは砂層が主体で、G.L.-11.5~17.5mはシルト層と砂層の互層となっており、G.L.-17.5m以下は粘土層であった。図よりボーリングから得られた柱状図と概ね一致していることがわかる。

4.2 実測N値と換算N値 (N_{60} , N_c) の比較

図-6にSPTによる実測N値とCPT(RI-CPT)の結果をもとにJeffriesら(1997)が提案した換算N値(N_{60})及び鈴木ら(2003)が提案した換算N値(N_c)の比較図を示した。図より、実測N値と2種類の推定式による換算N値とは概ね一致していることがわかる。

4.3 細粒分含有率 FC の推定

Robertsonら(1995)、鈴木ら(2003)は、CPT結果から算出した土質分類指数 I_c を用いて FC を推定する方法を提案している。図-7に、採取した試料の粒度試験から得られた実測 FC と、推定式により算出した FC との比較を示した。Robertsonらの推定式によって算出した FC は、シルト層や粘性土層の区間で実測値より小さい値を示している。それに対し、鈴木らの推定式で算出した FC は、概ね実測値と合っていることがわかった。

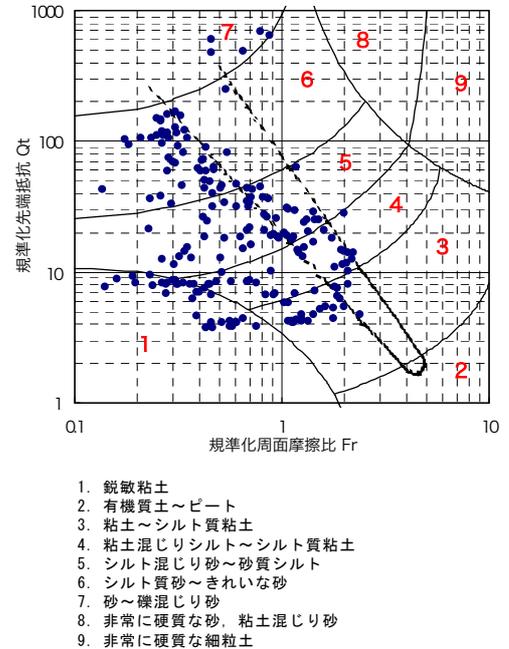


図-4 Robertsonチャートによる土質分類

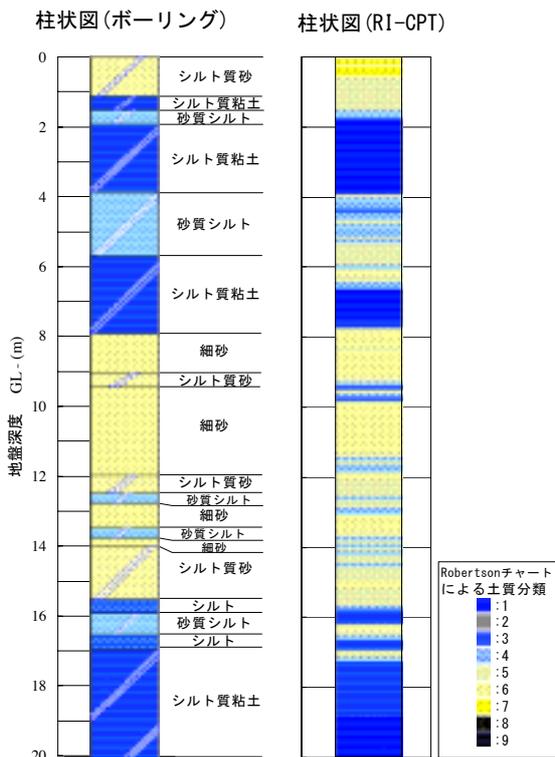


図-5 柱状図(右: ボーリング, 左 RI-CPT)

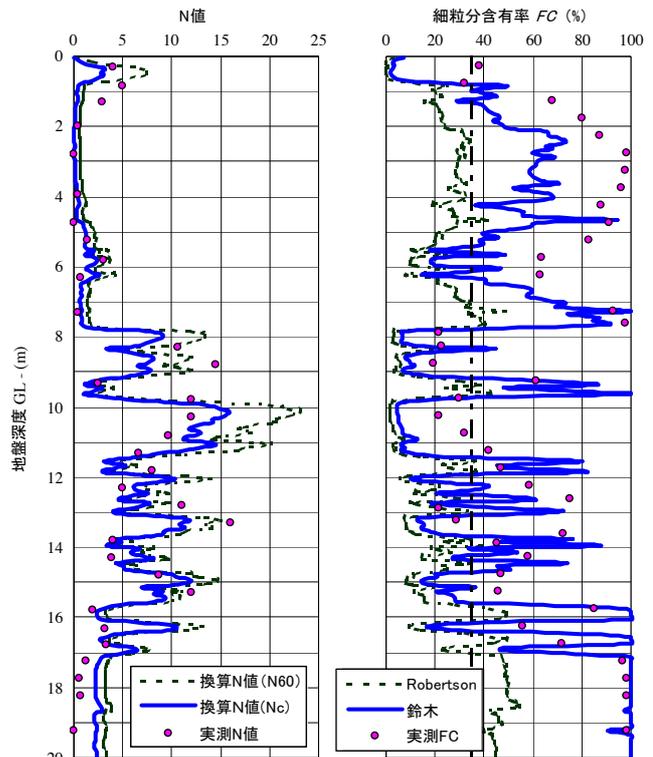


図-6 実測N値と換算N値

図-7 細粒分含有率 FC の推定

5. 液状化判定の結果

図-8 に建築基礎構造設計指針，道路橋示方書に示される方法に加え，Lancellotta，Robertson&Fear および柴田&Teparaksa によって提案された方法に基づき，液状化判定を行った結果を示す。このとき液状化判定において，CPT より推定した換算 N 値は，鈴木らの推定式を用い，細粒分含有率 FC の算定においては鈴木らの推定式を適用した。ただし，Robertson&Fear の方法では Robertson らの推定 FC を適用した。液状化抵抗率 F_L ，液状化に対する安全率 F_s については，推定した FC が 35% より大きい層では液状化しないとして評価を行った。G.L. -5~6m の砂質シルト層，G.L. -8~10m の砂層，G.L. -10~16m 付近の砂層およびシルトと砂の互層において，液状化の可能性が高いと判定された。各種判定法において評価した F_L 値より P_L 値を算出した結果は 3 つの方法において $5 < P_L \leq 15$ となり，この地盤が液状化する危険度が中程度であると判断できる。この中で，Robertson&Fear の方法による P_L 値のみが ($P_L > 15$) となっており，液状化の危険度が大きいと判断される。この原因としては，推定式の差異による推定 FC の差が大きいことが挙げられる。

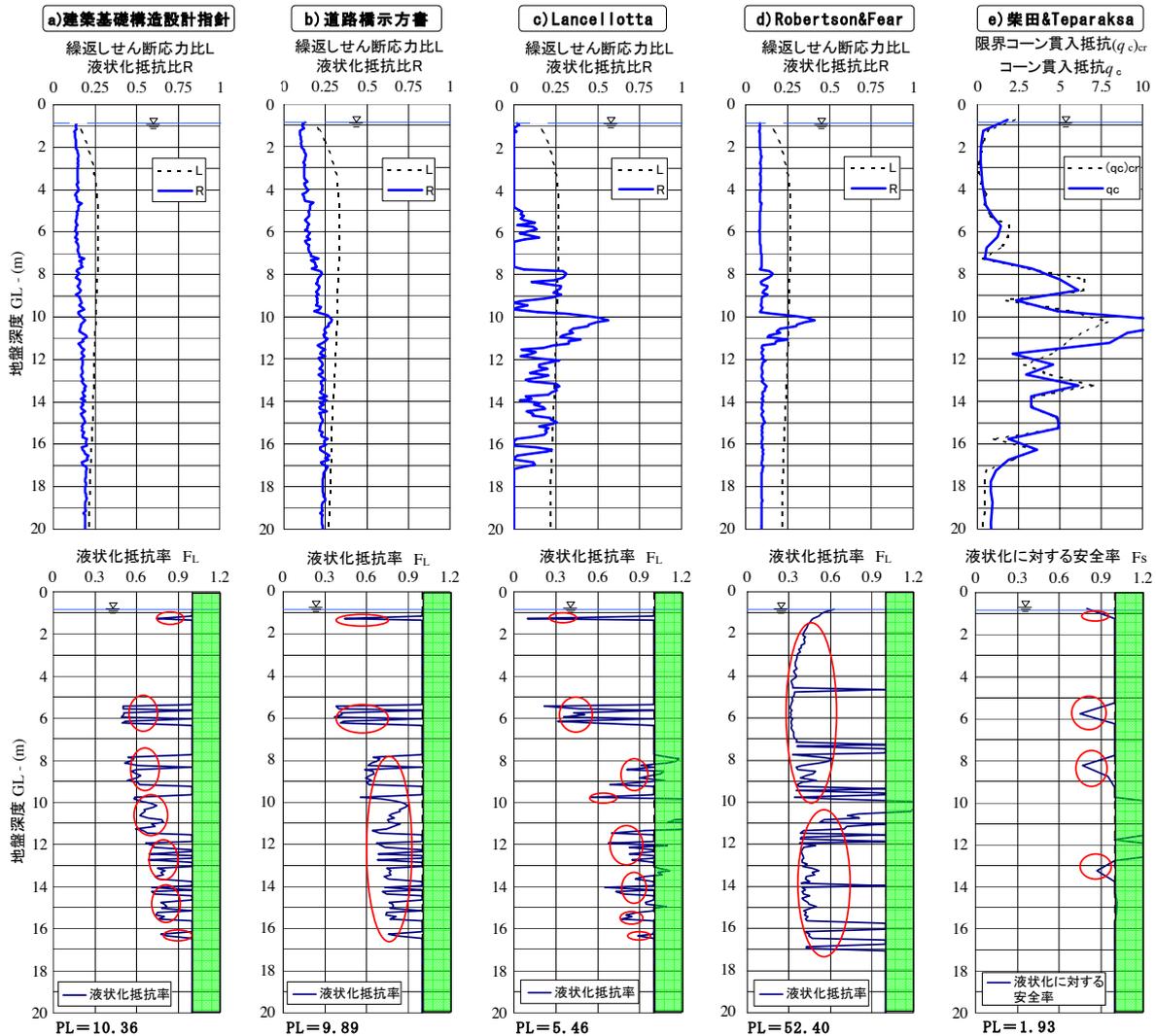


図-8 各種判定方法による液状化判定結果

6. 液状化判定のまとめ

- 1) RI-CPT による土質判定は，ボーリングより得られた柱状図と概ね一致する。
- 2) SPT の実測 N 値と RI-CPT の結果から推定した換算 N 値 (N_{60} , N_c) は概ね一致する。
- 3) Robertson らの提案式による推定 FC は，実測値に比べ低い傾向を示し，鈴木らの提案式は概ね実測値と一致する。
- 4) 各種の判定方法によって G.L. -4~6m のシルト~砂層，G.L. -8~10m の砂層で液状化の可能性が高いと評価され，G.L. -10~17m のシルトと砂の互層において液状化の可能性が高いと判定される。
- 5) 各種の液状化判定方法において，この地盤が液状化する可能性が中程度あるいは大きいと判定される。
- 6) 細粒分含有率 FC の誤差が液状化評価に大きく影響を与えるため，その推定方法の検討は重要である。

参考文献 1)三村 衛・吉村 貢：多機能型 RI 密度コーン貫入試験機の開発と測定精度向上に関する研究，土木学会論文集 C，Vol.63，No.2，pp.649~661，2007.6. 2)平林 弘・田中洋行・大森慎哉：地盤内温度が CPT 計測値に及ぼす影響，第 44 回地盤工学研究発表会講演集，pp.63~64，2009.8.