

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2：CPT）

液状化 電気式静的コーン貫入試験

(株)地盤試験所 国際会員 ○西村 真二
(株)地盤試験所 正会員 岡 信太郎
(株)地盤試験所 正会員 北條 豊

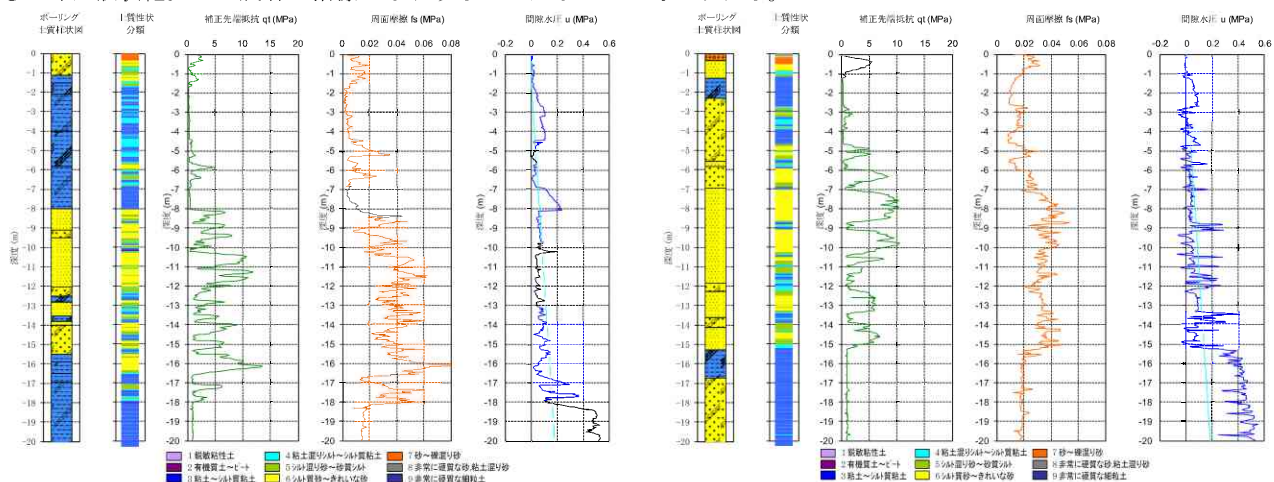
1. はじめに

東日本大震災によって関東地方において甚大な液状化の被害が発生した。被害が大きかった浦安市の埋め立て地盤において、原位置地盤調査方法による液状化可能性の判定および被害予測手法の確立を目的に、各種サウンディングの一斉比較試験が実施された。本稿においては静的サウンディング試験である電気式静的コーン貫入試験（以下CPT）についての試験結果をまとめた。CPTから求めた換算N値および細粒分含有率を比較評価し、建築基礎構造設計指針(1998)¹⁾（以下建築指針）およびRobertson(2009)²⁾提案のFI法により液状化可能性の判定をした。さらに液状化後の地盤沈下量の推定を試みた。また、液状化の判定において液状化すると推定される砂層に注目しRobertson(1990)³⁾が提案する土質分類チャート上での特徴を評価した。

2. CPT結果（プロファイル）

CPTのプロファイルを図-1に示す。図には3成分のプロファイルに加えRobertsonのチャートにより分類した柱状図とボーリングの柱状図を併せて示した。それによると地点1は表層の盛り土の下はGL-8mまで軟弱な粘性土が堆積しGL-8mから-12mに比較的明瞭な砂層があり、以深は砂質土と粘性土層の互層となり、GL-18m以深は軟弱な粘性土層となる。地点3も基本的な構成は同じであるが砂層の始まりがGL-6mと浅い。CPTとボーリングのプロファイルはほぼ一致しているが、CPTが細かい土層を捉えていることが判る。

また、間隙水圧のプロファイルに注目すると液状化発生層と推定される砂層（地点1でGL-8～-12m）がGL-10.3m付近を境界として上層と下層で異なる傾向を示している。上層がほぼ静水圧に沿った値となっているのに対し下層は静水圧を下回る傾向を示している。これは上層が相対的に緩く下層が密な状態となっていることを示している。この境界が明瞭に現れていることが特徴である。この傾向は隣接地域の埋め立て地盤で行った調査⁴⁾でも現れており、液状化可能性もしくは液状化発生の際の痕跡の指標になりうるのではないかと考えられる。



(地点1) (地点3)
図-1 CPTのプロファイル

3. 地盤定数の比較

CPTから得られた換算N値⁵⁾と標準貫入試験のN値との比較を図-2に示す。それによると地点3においては両者は概ね一致しているが、地点1では良く一致しているとは言えない。この理由については両地点で構成している地盤の性状特性はほぼ同じと考えられることから、地点1付近においては平面的なバラツキがあったものと考えられる。

CPTから細粒分含有率を求めた。式-1のRobertson and Fear(1995)⁶⁾と式-2の鈴木他(2001)⁷⁾の方法によって計算した。

$$FC = 0 \quad (I_c < 1.26)$$

$$FC = 1.75I_c^{3.25} - 3.7 \quad (1.26 \leq I_c \leq 3.5)$$

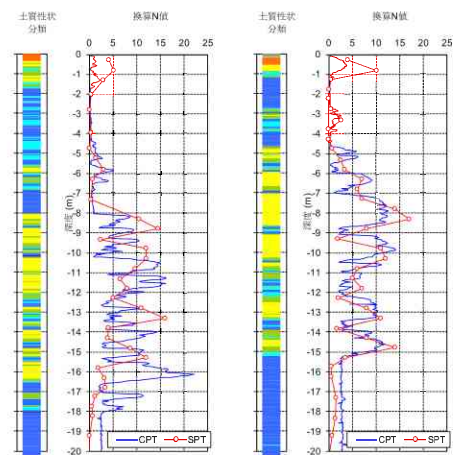
$$FC = 100 \quad (I_c > 3.5)$$

(式-1)

$$FC = I_c^{4.3}$$

(式-2)

I_c : 土質性状指数



(地点1) (地点3)
図-2 N値の比較

CPTから得られた細粒分含有率と粒度試験結果の比較を図-3に示す。なお、CPTから得られた値は約25cm区間の移動平均値で示した。それによると地点1のボーリングと大きくプロファイルが異なるGL-15m付近を除いて鈴木他の方法による値が粒度試験結果と良い相関を示している。

4. CPTによる液状化判定

CPTに基づいたF1法として建築指針とRobertsonの方法、および建築指針のN値に基づく方法を換算N値により試みた。Robertsonの方法は建築指針と基本的には同じ手法であるが、補正先端抵抗の正規化やせん断抵抗比の判定ラインが異なる。両者の比較を表-1に示す。

液状化後の地盤沈下量の推定は建築指針の補正N値からせん断ひずみを推定する方法(図-4)をCPTからの換算N値により計算したものと、Zhang and Robertson(2002)⁸⁾が提案した方法で計算した。Zhang and Robertsonの方法はIshihara and Yoshimine (1992)⁹⁾が提案した繰り返し非排水せん断試験時に測定した体積ひずみと液状化安全率との相関をもとに、CPTの等価クリーンサンド先端抵抗と液状化後の体積ひずみの関係を求めたものである(図-5)。計算ケースはマグニチュードM=9.0、最大地表面加速度 $\alpha=1.5\text{m/s}^2$ およびM=7.5、 $\alpha=1.5\text{m/s}^2$ の2つの条件で計算した。

上記の方法に基づいて計算した結果を図-6および図-7に示す。

それによると、液状化判定結果については、M=9.0の条件において建築指針のCPT, Robertson, 建築指針のN値の順に液状化可能性が高い判定結果となった。建築指針のCPTとRobertsonはほぼ同様の結果となり、M=9.0では砂層は全て液状化をするという判定結果であった。それに対し建築指針のN値は地点1でGL-10m以深で、また地点3ではGL-8m以深で液状化安全率が1以上もしくは1に近い結果となった。この傾向は前述の間隙水圧のプロファイルの傾向と対応している。

M=7.5の条件においても液状化可能性判定の順序はM=9.0の条件と同じであった。ただしM=7.5ではRobertsonと建築指針のN値がほぼ同様の結果となり対象砂層の液状化の可能性は低いと判定された。建築指針のCPTではほとんどの砂層で安全率1を切る結果となった。

液状化後の地盤沈下量の推定結果については、地点1で液状化対象層の上端をGL-8m、地点3でGL-6mとした場合、M=9.0の場合の地盤沈下量は地点1で、建築指針のN値が20mm、Zhang and Robertsonが170mm、地点3でそれぞれ40mmと230mmとなった。試験地盤付近の震災後の地盤沈下量は10~30cmと観測されており、Zhang and Robertsonの計算値が対応する結果となった。しかし、観測された地盤沈下は慣砂による土砂の流出や地震による地殻変動も含まれていると考えられ、必ずしもZhang and Robertsonの方法の妥当性を証明するものではない。一方で建築指針のN値による方法は過小な結果となっていると考えられる。

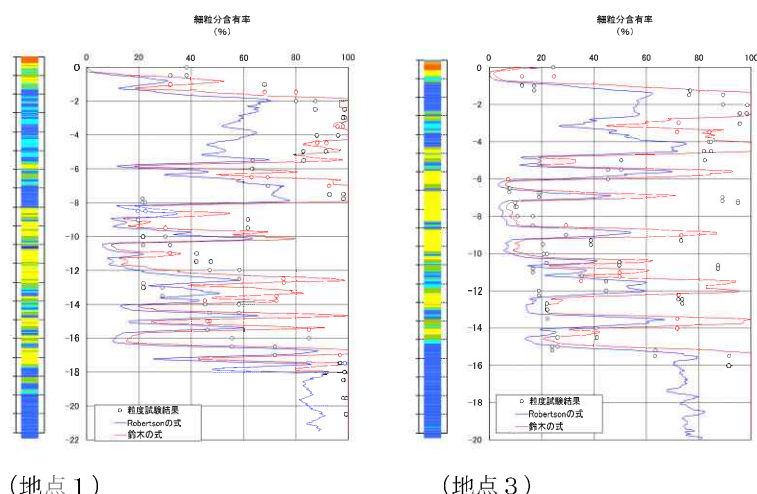


図-3 細粒分含有率の比較

表-1 F1法の比較

項目	建築基準構造設計指針 (1996)	Robertson(2008)
対象地盤 対象条件	・埋面直下から20m 粒度試験の所定層の飽和土層 ・粘土分0.006mm以下の粒度を持つ土(粘土分含有率が10%以下または塑性指数が19%以下の要するものは固土地盤) ・埋面土を含む層や透水性の低い土層に囲まれた埋地盤	・塑性指数 PI < 12、液性限界 LL < 37、自然含水比 w < 0.8 × LL (適用条件として) ・第4紀層、クレーンサンドの堆積土 ・本平均、または、おおよそに類似した地盤 ・マグニチュード M=7.5 の地震 ・調査範囲は1~15m (3~45ft) (深さの85% < 10m (30 ft)) ・繰返し液状化を模擬したと考えられる土層を代表する CPT の平均値
判定式	$F_1 = \frac{\tau_v / \sigma'_v}{\tau_d / \sigma'_v}$ ここに、τ_v / σ'_v : せん断抵抗比 τ_d / σ'_v : せん断抵抗比	$F_1 = \frac{(\tau_v / \sigma'_v)_{u=0.5}}{(\tau_d / \sigma'_v)_{u=0.5}} MSF$ ここに、$(\tau_v / \sigma'_v)_{u=0.5}$: M=7.5に相当するせん断抵抗比 $(\tau_d / \sigma'_v)_{u=0.5}$: M=7.5に相当するせん断抵抗比 MSF : マグニチュード M に関する補正係数 $MSF = 174 / M^{2.56}$
せん断抵抗比	$\tau_d / \sigma'_v = \gamma_a \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \gamma_d$ ここに、γ_a : 等価の繰り返しに関する補正係数 $\gamma_a = 0.1(M-1)$ M : マグニチュード a_{max} : 地表面設計加速度 (m/s²) g : 重力加速度 (9.8m/s²) σ_v : 全応力、σ'_v : 有効応力 γ_d : 地盤が剛体でないことによる補正係数 $\gamma_d = 1 - 0.015z$	$\tau_d / \sigma'_v = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \gamma_d$ 各係数の意味は同じ ・0.65はγ_aのMに7.5を代入したものの0.65 = 0.1(7.5-1) ・γ_dについては以下の通り $\gamma_d = 1.0 - 0.00765z$ z < 9.15m の場合 $\gamma_d = 1.174 - 0.0267z$ z < 9.15~23m の場合 $\gamma_d = 0.744 - 0.008z$ z < 23~30m の場合 $\gamma_d = 0.5$ z > 30m の場合
正規化先端抵抗	$Q_n = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma'_v}$ ここに、q_t : 測定先端抵抗	$Q_n = \left(\frac{q_t - \sigma_v}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^n$ ここに、q_t : 水中を補正したq_t P_a : 大気圧 n : 応力指数 $n = 0.38 \log(I_p) + 0.05 (\sigma'_v / P_a) - 0.15$
正規化側面摩擦比	$F_R = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v}$ ここに、q_t : 測定先端抵抗	$F_R = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v}$ ここに、q_t : 水中を補正したq_t
等価特性指数	$I_e = \left\{ 3.47 - \log Q_n \right\}^2 + \left\{ \log F_R + 1.22 \right\}^{0.5}$	$I_e = \left\{ 3.47 - \log Q_n \right\}^2 + \left\{ \log F_R + 1.22 \right\}^{0.5}$ ここで、初算算のI_eによりnを計算しI_eを求めらるにnを算出しnの変化が0.01以下になるまで収束計算を繰り返す。
補正コーン貫入抵抗	$q_{c1} = F(I_e) \frac{q_{c0}}{C_N}$ ここに、$F(I_e)$: 粒度特性に関する補正係数 $F(I_e) = 1 + (I_e - 1.55) / (2.60 - I_e)$ $1.55 < I_e \leq 2.50$ $F(I_e) = 1$ $I_e \leq 1.55$ q_{c0} : 測定先端抵抗 C_N : 拘束土についての補正係数 $C_N = (98 / \sigma'_v)^{0.5}$	$(Q_n)_{CS} = K_C Q_n$ ここに、K_C : 粒度特性に関する補正係数 $K_C = 1.0$ $I_e \leq 1.64$ $K_C = -0.403 I_e^2 + 5.581 I_e - 21.63 I_e^2 + 33.75 I_e - 17.88$ $I_e > 1.64$
判定図		

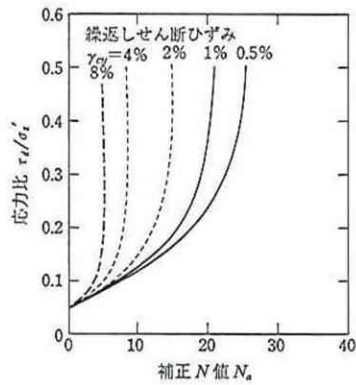


図-4 補正N値と繰返しせん断ひずみとの関係

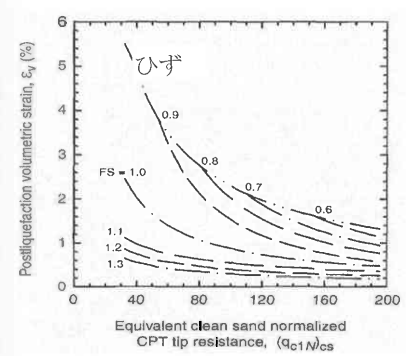
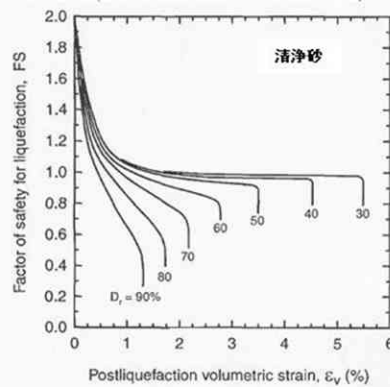


図-5 等価クリーンサンド先端抵抗と体積ひずみとの関係

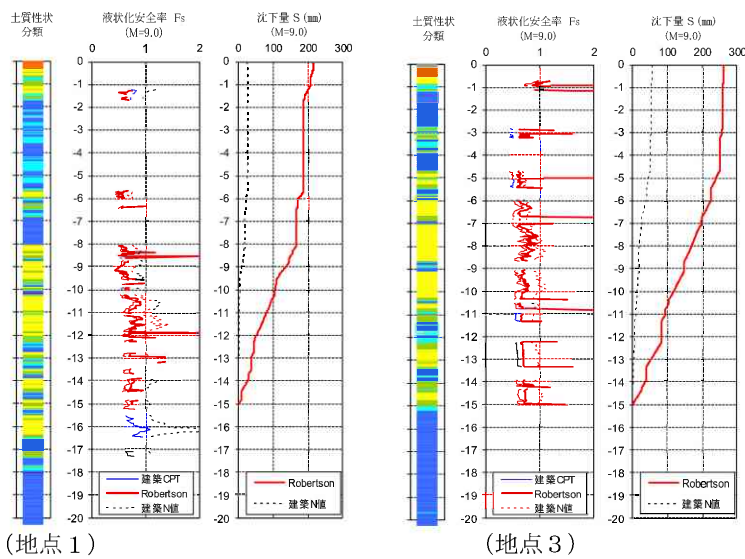


図-6 FI法による液状化判定結果および地盤沈下量の推定 (M=9.0, $\alpha=1.5\text{m/s}^2$)

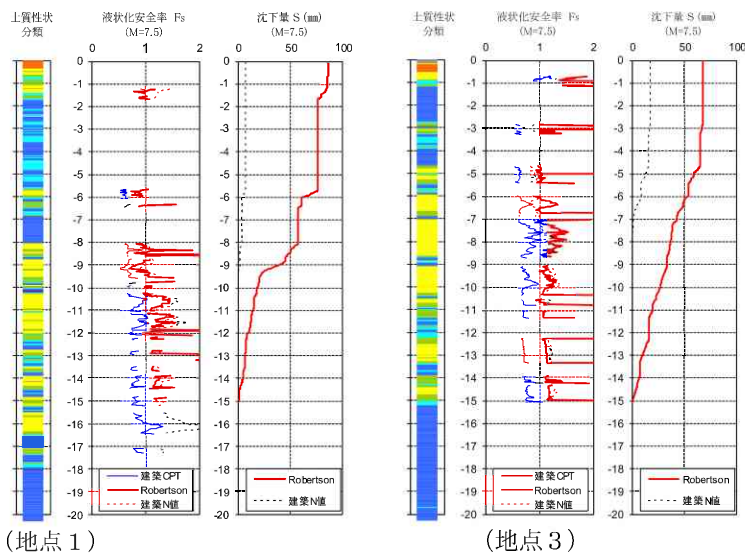


図-7 FI法による液状化判定結果および地盤沈下量の推定 (M=7.5, $\alpha=1.5\text{m/s}^2$)

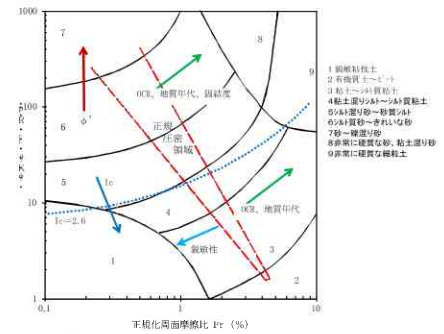


図-8 Robertsonの土質分類チャート

5. Robertsonの分類チャート上の液状化判定

Robertsonの分類チャート(図-8)はCPTのデータに基づいて土を分類するもので、縦軸に正規化先端抵抗 Q_c を横軸に正規化周面摩擦比 F_R を取る。基本的な考え方は、相対的に先端抵抗(強度)に対し周面摩擦(粘着力)が高い性質を示す土が粘性土であるとして、チャート上の右下ほど軟弱な粘性土、左上ほど堅い砂質土となる。この傾向を定量的に表現しているのが挙動特性指標 I_c で $I_c > 2.6$ で粘性土とされている。また、左上～右下の対角線付近は正規圧密状態と判断される。そこから右上側へは固結度や地盤年齢が上がる。プロット位置により地盤の諸特性が読み取れるチャートである。

ここでは前述のRobertsonの液状化判定法のせん断抵抗比CSRに対応する曲線をチャート上に引いて、主となる液状化対象(地点1ではGL-8～12m、地点3ではGL-6～11mを選定)の砂層のデータをプロットした。その結果を図-9に示す。上段が地点1で下段が地点3である。左図は対象層の全てのデータ、中央図は前述の間隙水圧のプロファイルで得られた境界で分けた場合の上層のデータ、右図は下層のデータである。左図を見るとRobertsonの液状化判定法の結果通りにデータはCSR=0.15(M=9.0相当)とCSR=0.09(M=7.5相当)の曲線の間

にプロットされる。土質としては砂質土領域 ($I_c < 2.6$) では砂質シルト～きれいな砂と判定される範囲となっている。中央図の上層を見ると土質性状は砂と粘性土に明確に分級されていることが観察される。一方、右図の下層は性状がシルト質砂～砂質シルトのエリアに集中している。このことは上層は液状化さらに流動化をした後、分級堆積した痕跡ではないかと考えられる。一方下層は液状化していないか、液状化したが流動化するまでは至らなかったのではないかと推定される。これらは間隙水圧のプロファイルの変化とともに液状化・流動化の痕跡を示す指標になりうると考えられる。

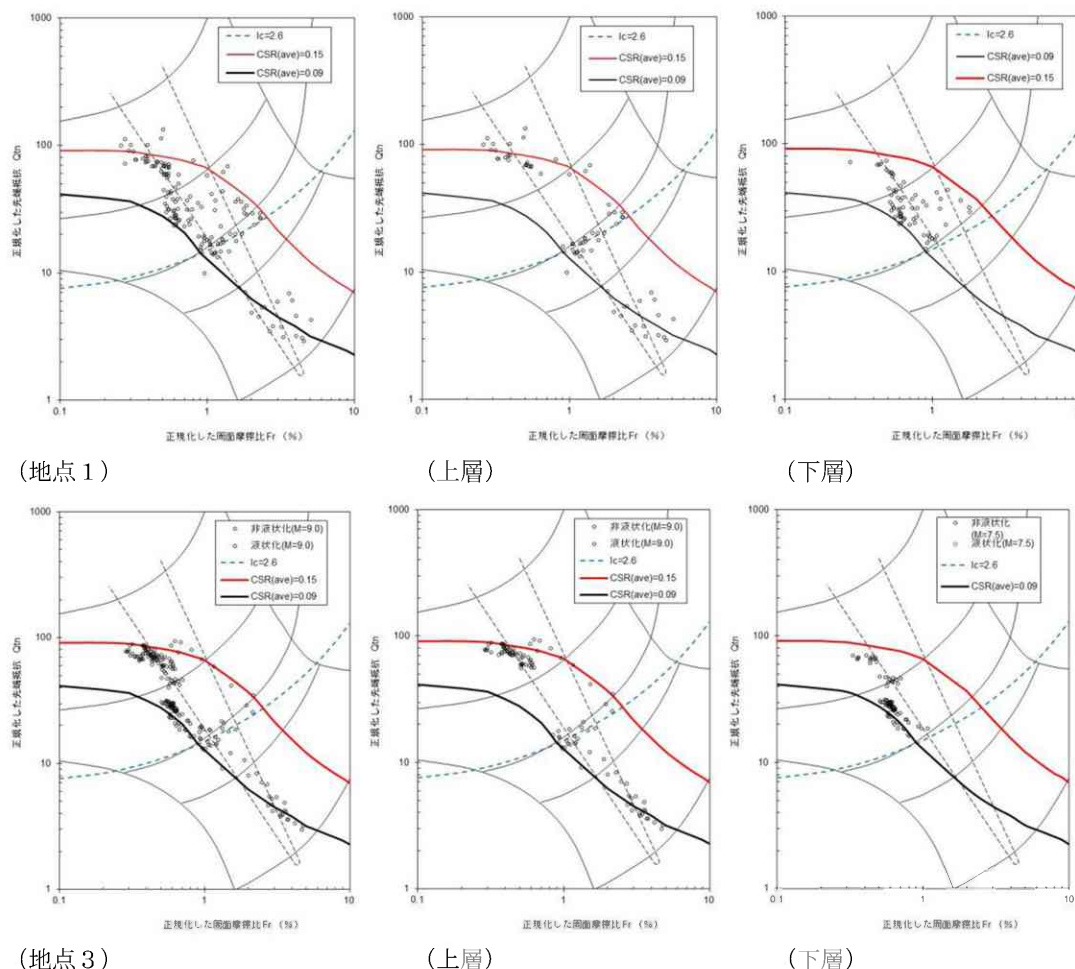


図-9 Robertsonの分類チャート上での液状化判定

6. 終わりに

浦安市の一斉試験で実施したCPTのデータ整理し、①Robertsonの分類チャートと換算N値は概ねボーリングの柱状図と一致すること、②鈴木他の方法による細粒分含有率は粒度試験結果と良い相関が得られること、③FI法の比較では建築指針のCPTによる方法が最も安全側になること、④液状化後の地盤沈下の計算ではZhang and Robertsonによる計算結果が実測とオーダーが合うこと、⑤間隙水圧のプロファイルとRobertsonの分類チャート上でのプロットから、液状化・流動化した地層を判別できる可能性があること、が判った。今後はさらにデータを収集して、従来のFI法を補強したより精度の高い判定法とすることを進めて行きたい。最後に本試験の実施に際してご協力頂いた関係者各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針, 1998
- 2) Robertson, P.K., Performance based earthquake design using the CPT.Keynote lecture, IS-Tokyo, 2009
- 3) Robertson, P.K.:Soil classification using the cone penetration test., Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 1990
- 4) 西村真二, 岡信太郎, 北條豊, 京葉湾岸地区における液状化後の地盤に対する3成分コーン貫入試験, 第9回地盤工学会関東支部発表会, 2012年10月
- 5) 鈴木康嗣, 資松俊明, 時松孝次, コーン貫入試験の先端抵抗と標準貫入試験のN値およびせん断波速度の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-1, pp.489-490, 2001
- 6) Robertson, P.K. and Fear, C.E. (1995) Liquefaction of sands and its evaluation. IS TOKYO '95, First international Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Keynote Lecture, November 1995
- 7) 鈴木康嗣, 資松俊明, 時松孝次, コーン貫入試験の先端抵抗と標準貫入試験のN値およびせん断波速度の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-1, pp.489-490, 2001
- 8) Zhang, G., Robertson, P.K., Brachman, R., Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT, Canadian Geotechnical Journal, 39: pp 1168-1180, 2002
- 9) Ishihara, K., and Yoshimine, M. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. Soils and Foundations, 32(1): 173-188. 1992