

粒径の大きな粒状体から成る地盤に対する CPT と DMT の適用性

田中洋行¹・三島理²・田中政典³

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工修 運輸省港湾技術研究所(同上)

³正会員 運輸省港湾技術研究所(同上)

平均粒径が 2mm 以上の比較的大きな土粒子から成る地盤に対して、電気式静的コーン貫入試験 (CPT) とダイラトメーター試験 (DMT) を実施した。調査地点は 2 カ所で、一つは採石現場から生じた碎石で埋め立てられた地盤 (敦賀) と、もう一つは二次堆積した火山灰から成る地盤 (苦小牧) である。CPT と DMT の他に標準貫入試験による N 値、およびサイスミックコーン試験から求められた剛性率 C_{sc} も計測した。これらの試験によって得られた値の関係を明らかにするとともに、過去に行った平均粒径が 0.2mm 程度の典型的な砂地盤から得られた関係との相違点を調べた。この結果、粒径が大きい地盤に対する DMT の適用性については、慎重に検討する必要があることがわかった。

Key Words: cone penetration test, dilatometer test, grain size, granular material, N -value

1.はじめに

砂地盤は粘性土地盤と違って、試料のサンプリングが難しいので、原位置試験による調査が主流である。その原位置試験の代表として標準貫入試験 (SPT) があり、我が国では文字通り標準試験として、 N 値から砂地盤の設計定数が求められている。一方、電気式静的コーン貫入試験 (CPT) やイタリアの Marchetti¹⁾が考案したダイラトメーター試験 (DMT) が、徐々に我が国でも地盤調査に使われ出している。これら二つの原位置試験には、SPT と比較して、①調査者による計測誤差が少ないので、②測点数を多くすることができるので深さ方向の地盤の変化を的確に捉えることができる、等の大きなメリットがある。

一般に原位置試験の境界条件は複雑であるので、理論によって地盤定数を求ることは難しく、圧力チャンバー試験などの室内試験や他の原位置試験によって測定された値との相関関係を確立する、いわゆる実験的手法が主流である。このため、ある特定の地盤で得られた関係が一般的の地盤に対して普遍性があるか、ないかを検討するためには、異なる地盤に対して数多くの調査を行う必要がある。

田中(洋)と田中(政)^{2),3)}は、平均粒径が 0.2mm 程度の典型的な砂地盤に対して CPT や DMT を用いた一連の調査を行い、圧力チャンバー試験から得られた結果との比較を行った。この結果、圧力チャンバー試験から得られる結

果の多くが、実際の地盤にも適用できることがわかった。しかし、この結果が砂以外の粒状体（あるいは粒径が 0.2mm 以外の砂）からなる地盤に適用できるか否かについては、さらなる調査が必要と思われる。そこで、彼らの調査した地盤の土粒子とは極端に特性が異なる 2 つの地盤に対して、彼らの結論が適用できるか否かを検討した。今回の調査の対象となった地盤は平均粒径 D_{50} が 1mm から 8mm とかなり粗い碎石からなる地盤 (敦賀) と、粒子の破碎性が顕著でしかも D_{50} が 2mm から 6mm の火山灰の地盤 (苦小牧) である。

2. 試験方法および地盤条件

(1) 試験方法

SPT は日本工業規格 JIS A 1219 で定める方法に従って実施した。またハンマーの落下方法はトンビによる方法を採用した。CPT は地盤工学会が定める JGS 1435-1995 に従った。すなわちコーンの直径は 35.7mm、角度は 60° で貫入速度はおおよそ 1m/min である。CPT によって貫入抵抗 q_t 、間隙水圧 u および周面摩擦力 f_s を測定した。貫入抵抗は u の影響を受けるので、有効断面積によって補正した値を q_t とした。DMT は Marchetti の提案したものを使い、ブレードを試験深さまで貫入させた後、15 秒以内に p_0 および p_i の測定を行った。 p_0, p_i は、ブレード中央に取り付けられたステンレス製の膜が、それぞれ

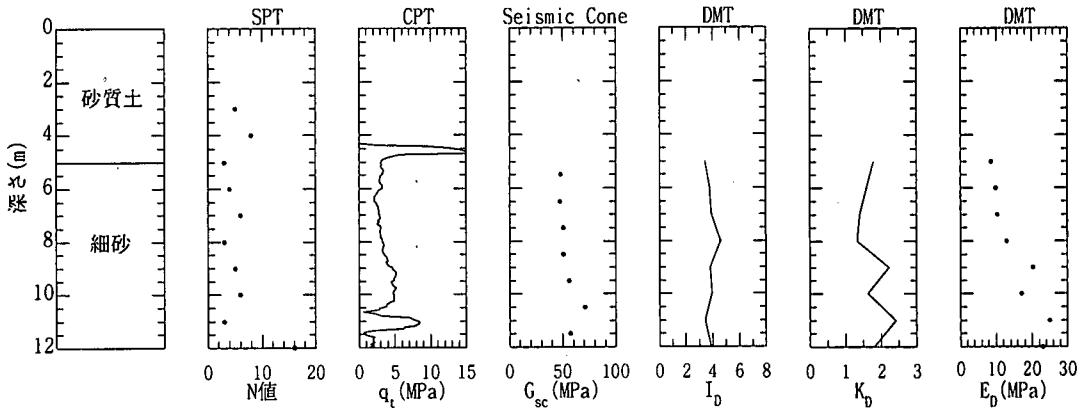


図-1 東扇島の地盤特性

0.1mm, 1.1mm膨張した時の空気圧である。DMT試験から以下の3つのパラメーターが導かれる (Marchetti¹⁾)。

材料インデックス I_D

$$I_D = (p_f - p_0) / (p_0 - u_0) \quad (1)$$

水平応力インデックス K_d

$$K_d = (p_0 - u_0) / \sigma_{\text{vo}} \quad (2)$$

ダイラトメーター係数 E_d

$$E_d = 34.7(p_f - p_0) \quad (3)$$

ここに、 u_0 は間隙水圧、 σ_{vo} は鉛直有効土かぶり圧である。

サイスマックコーンは Campanella, 他⁴⁾が開発したものとの同一形式で、地表面から板たたき法でせん断波を発生させ、これをコーンの先端に取り付けたレシーバでせん断波の到達時間を測定する。到達時間の精度を向上させるため、先端にはレシーバが 1m 離れて二カ所取り付けられており、せん断波速度はこの 1m の区間に要したトラベルタイムから求めている⁵⁾。せん断剛性率 G は式(4)によって求められる。

$$G_{\text{sc}} = \rho_s v_s^2 \quad (4)$$

ここに、 ρ_s は地盤の湿潤密度、 v_s はせん断波速度である。また、この方法によって求められた剛性率を G_{sc} とする。

(2) 調査地点の概要

東扇島および検見川の調査結果は、田中(洋)と田中(政)^{2),3)}によって詳しく報告されているが、本論文では、これらの地盤を“標準的な砂地盤”として捉え、以下に再度簡単に記述することにする。

a) 東扇島 (図-1)

ここは東京湾に面した川崎市に位置し、1970年代前半に房総半島の山砂によって埋め立てられた。図-1 にSPT, CPT, DMT の結果、およびサイスマックコーンから求められたせん断剛性率 G_{sc} を示す。地表面は舗装されていたので、あらかじめボーリング孔を深さ 4m まで開けておき、その下から調査を行った。旧海底面は深さ 11m の位置にあり、その下は砂と粘土の互層が続く。本論文の対象となるのは、深さ 5m から 11m までの砂による埋め立て層である。

この地層の N 値、 q_c および DMT 試験から求められた各パラメーターからわかるように、地盤の特性はかなり均一である。しかし、凍結サンプリングによる密度試験、および砂の最小・最大密度試験から求められた相対密度 D_r は後述する図-13 に示すように、深さ方向にかなりのばらつきが認められ、 D_r は 20% 前後と非常に緩い地盤である。

b) 検見川 (図-2)

ここは、千葉市に位置している。この地盤は東扇島とは異なり、氷河期以降に自然堆積した沖積層である。調査の対象となった砂地盤は泥炭層の下にあり、深さは 8m から 20m に位置している。図に示すように、各試験で得られる値は深さ方向に増大している。この地盤についても、凍結サンプリングによって地盤の D_r を求めており (図-14 参照)、 D_r が 90% 以上、深さによっては 100% を越えており、東扇島と比べてかなり密な地盤である。

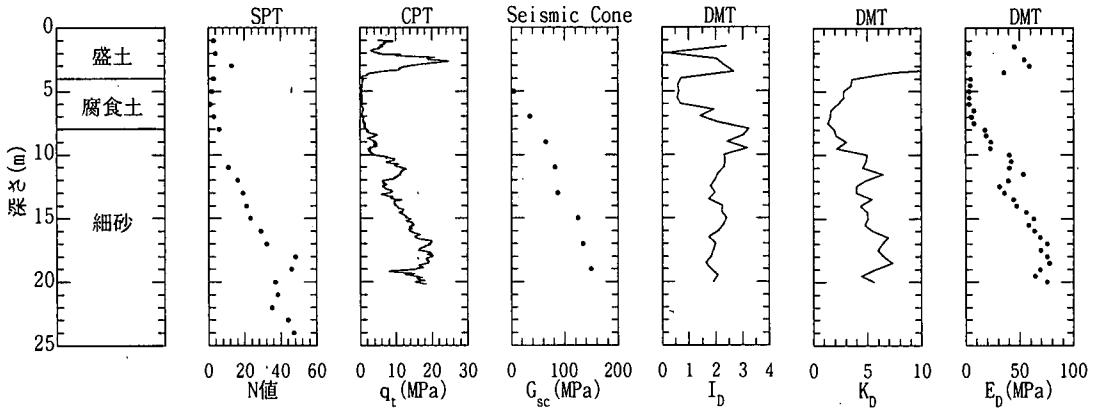


図-2 検見川の地盤特性

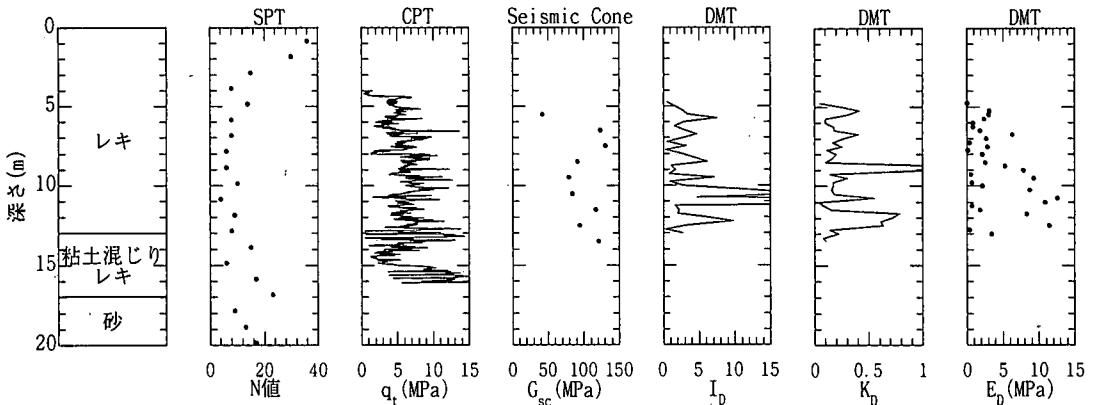


図-3 敦賀の地盤特性

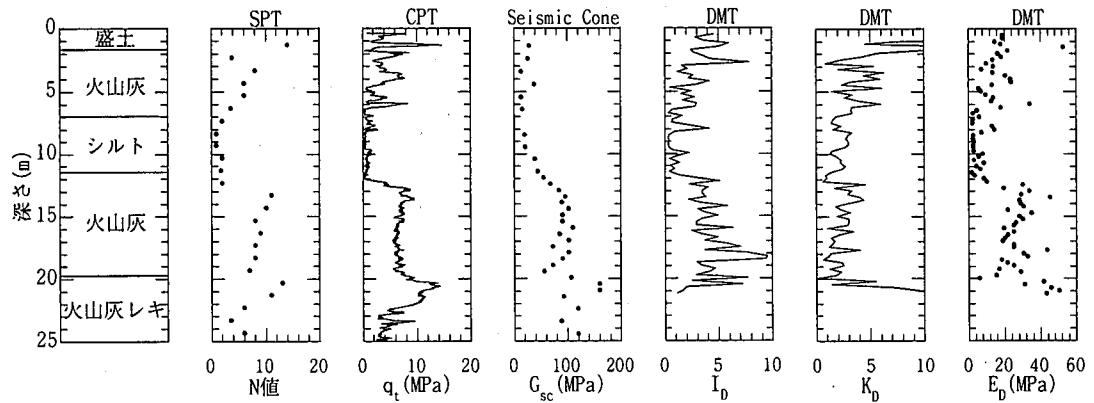


図-4 苫小牧の地盤特性

c)敦賀 (図-3)

ここは敦賀港にあり、東扇島と同様な埋め立て地盤である。東扇島と異なるのは、建設用骨材を生産した後に生じた粒子の細かい碎石を埋め立て材として用いたことである。しかし、細かいといつても、後の図-5 の粒度分布に

示すように、東扇島や検見川と比べて粒径は大きい。また、岩を砕いてできた材料であるため、粒子の形状は非常に角張っている。ここは東扇島と同様に地表面が舗装されているので、5mまでボーリングを行い、この深度から調査を行った。今回対象とする地層は5mから15mまでであ

る。粒子の粗い碎石で埋め立てられているために、CPT や DMT で得られる値はかなりばらついている。しかし、 N 値は深さ方向に対してほぼ一定で、その値は 10 以下と小さい。サイスミックコーンから得られた G_{sc} は深度 1m に対する値なので、 q_t や DMT の試験結果に比べてばらつきは大きくなく、深さ方向に対してほぼ一定の 100MPa の値が得られている。この地点では、凍結サンプリングによる試料採取は行っておらず、SPT の際のレイモンドサンプラーによって得られた試料を用いて粒度試験を行った。

d) 苛小牧（図-4）

この地盤は苛小牧市の北に位置しており、以前はウトナイ湖に属する湿地であった。しかし苛小牧港の開発に伴い、港湾建設のために掘削された大量の土砂によって地表から 2m ほど埋め立てられた。その下には、火山灰と粘性土が堆積している。本論文で対象とする層は深さ 13m から 20m までに位置する支笏湖火山灰の二次堆積物（火山灰が河川によって流され再度堆積した地盤）である。この火山灰層については、三浦、他⁶⁾が数多くの研究を行っている。この地層の N 値や q_t は深さ方向に対して多少減少する傾向が認められる。この調査地点では、ロータリー式三重管サンプラー（JGS1223-1995、以下トリプルチューブサンプラーと呼ぶ）によって試料を採取した。この際に測定した土の単位体積重量 γ は、およそ 10kN/m^3 と非常に小さい。これは、火山灰の粒子自体が多孔質なため、土粒子の密度が 2.2g/cm^3 と非常に小さいことと、間隙比自体も大きいためと考えられる。 N 値や q_t 値が深さ方向に対して一定、あるいは減少傾向にあるのは、土かぶり圧が深さによって増大しないことも、一つの原因と考えられる（水中単位体積重量はゼロになる）。

3. 各地点の地盤特性とその評価方法

（1）粒度分布

今回調査の対象とした地層の粒度分布を図-5 に、また D_{50} および均等係数 U_c を表-1 に示す。いずれの調査地点でも、砂の粒度分布の変動が小さい範囲に研究の対象とする地層の深さを限定したので、図に示すように各地点の粒度分布の範囲はかなり狭い（検見川の場合の粒度分布は深さ方向に均一で、図-5 に示すように 1 本の線で表すことができる）。標準的な砂地盤とした東扇島と検見川の砂の D_{50} は 0.2mm 程度であり、また U_c が小さく、单一粒径の土粒子から地盤が構成されていることがわかる。新たに調査した敦賀および苛小牧の D_{50} は 2 から 10mm 程度と、前者の砂地盤と比べて 1 オーダー大きい。またこれらの地点の粒度曲線もかなり寝ており、異なる粒径の土粒子から地盤が構成されている。特に、敦賀の U_c は苛小牧のそれよりも大きく、“いわゆる粒度分布が良い” 地盤である。

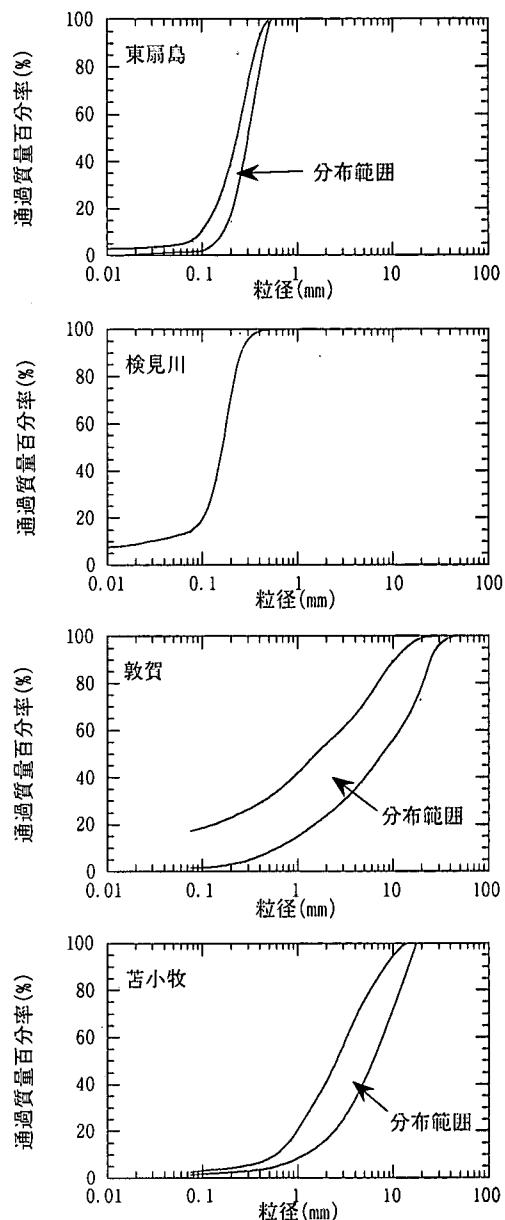


図-5 調査対象となった地層の粒度分布の比較

表-1 各地点の粒度特性

調査地点	東扇島	検見川	敦賀	苛小牧
D_{50} (mm)	0.2~0.3	0.1~0.2	1.0~8.0	2.0~6.0
U_c	2.4	6.7	37.9	6.3

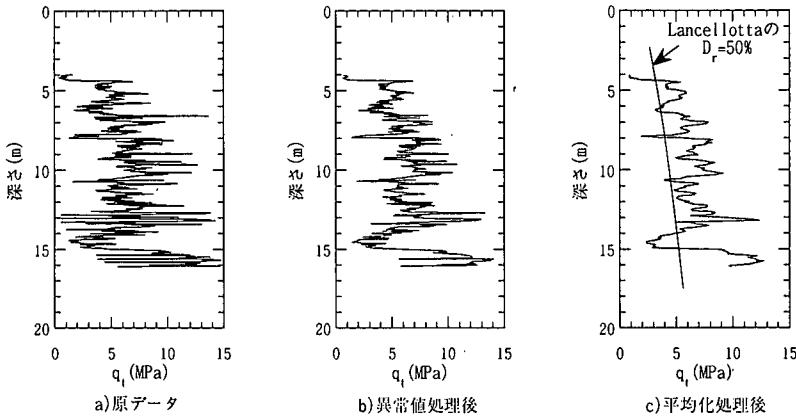


図-6 q_t の整理方法の比較（敦賀）

(2) q_t の深度方向へのばらつき

今回対象となった地層では、敦賀を除いて各原位置試験から得られた値は変動が小さく、深さ方向に一定の傾向が認められる。しかし、実務の調査ではこのようなことはまれで、敦賀の例に見られるように、原位置試験から得られた測定値は深さ方向に対して変動することが多い。敦賀での地層の D_{50} は 1mm から 8mm であり、CPT のコーンの直径が 35.7mm であることを考えると、コーンの先端と土粒子との相対位置によって q_t の値が大きく変わるとと思われる。コーンの先端に大きな土粒子が当たると q_t は大きくなり、逆に土粒子と土粒子との間、すなわち、ポケットのような所にコーンの先端が来ると、測定される q_t は著しく低下する。このような、局所的に大きくなったり小さくなったりする q_t の値は、地盤全体の特性を把握する上で除外すべき情報と考えられる。

図-6 に敦賀で得られた q_t に対して、整理方法を変えた結果を示す。a) 図は、試験から得られた値をそのまま載せた図で、図-3 に示した図と同じものである。今回行った CPT では測定間隔を 1cm としたので、測定された q_t をそのまま深さ方向にプロットすると、かなりばらつく。例えば、6.5m 付近では 14MPa の q_t が得られているが、12.8m の深さでは 1MPa 程度の q_t が記録されている。CPT に関するデータのばらつきを除く方法は Lunne⁷、他⁷⁾がまとめた出版物に紹介されている。本論文では、深さ 20cm ごとに q_t の値をグループ化し、これらのグループの中で一番目と二番目に大きな値と小さな値を異常値と判断して除いてみた。このように処理された q_t を b) 図に示す。a) 図のオリジナルのデータと比べてみると、スパイクが消えていているのがわかる。この図をさらに円滑化したのが c) 図である。これは、b) 図を基にして、着目する q_t 値の深さの上下 10cm 間で得られた q_t 値の平均を新しい q_t 値としたものである。このようにデータを処理すると、地盤の特性を適切に把握することができる。すなわち、この地盤ではおよそ 1 から 2 m の間隔で q_t が変化しており、これは地

盤の埋立過程と密接に関係していると思われる。

ここに示した処理方法の理論的な根拠は乏しいが、あってその背景となった考え方を述べるとすれば、以下のようである。CPT は杭の支持力と同様と考えられるので、ある深度で得られた q_t の値はコーン先端のある範囲内の地盤強さの平均値となる。つまり、図-6 の c) 図が意味するのは、コーンの先端からコーンの直径の 3 倍程度 (3.57cm × 3=10.71cm) を支持力の影響範囲と考えて、この範囲内の値の平均を q_t としてプロットとしたと考えられる。しかし、この 3 倍の範囲、および今回の計算方法では単に平均値を q_t としたが、コーンの先端に近いほど q_t におよぼす影響が大きいので、先端からの距離による重み付きなども、将来の課題として残る。しかし、今回の論文では、図-6 の c) 図を用いて敦賀の q_t を表すことにする。

(3) 土の単位体積重量と K_0 値

DMT から求められるインデックスの中で、 K_0 値は式(2)に示すように原位置の鉛直有効土かぶり圧 σ'_v 、すなわち土の単位体積重量 γ_v が必要となる。しかし、DMT による調査では試料が得られないため、このままでは K_0 値が計算できないことになる。逆に、 K_0 値を得るためにサンプリングを必要とするならば、地盤調査方法としての DMT の有用性は著しく損なわれることになる。このため、一般には Marchetti と Crapps⁸⁾ が提案したチャート⁸⁾から γ_v を予測して、この値を用いて K_0 値を計算している。図-7 は、彼らが提案した γ_v を求めるチャートであり、さらに今回の調査で得られた値もプロットしている。このチャートによれば検見川および東扇島の γ_v は、それぞれ 20kN/m^3 、 18.5kN/m^3 と凍結サンプリングによって得られた試料の γ_v とほぼ同じ値を示している。しかし、苦小牧の火山灰の γ_v はチャートによれば 17 から 20kN/m^3 と、すでに述べたようにトリプルチューブサンプラーから採取された試料に対して行った $\gamma_v=10\text{kN/m}^3$ と著しく異なる。

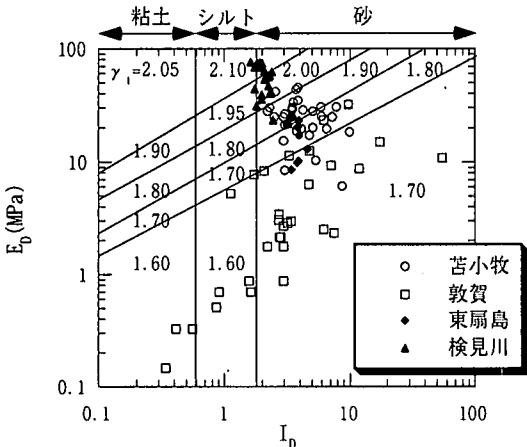


図-7 Marchetti と Crapps のチャート¹²⁾による
各地点で得られた I_p と E_0 の関係

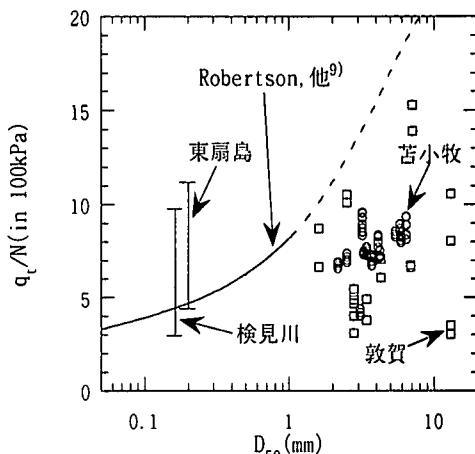


図-9 q_t/N と粒径の関係

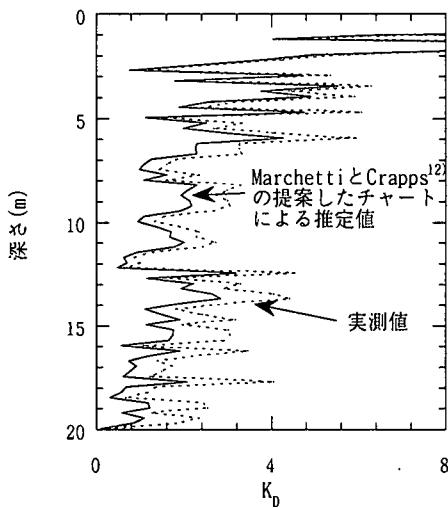


図-8 γ_i の違いによる K_0 の変化 (苦小牧)

また、敦賀では信頼に足る密度は得られてはいないが、この地点の γ_i は図-7 のチャートから推定されるような小さな値でないことは確かである。したがって、粒径の大きな地盤の場合には、Marchetti と Crapps が提案したチャートから γ_i を求めるのは適切でないと判断される。

図-8 に、苦小牧で実測された γ_i と提案されたチャートから推定された γ_i を用いて計算された K_0 の比較を示す。両者の方法で得られた K_0 値はかなり異なるのがわかる。しかし、 K_0 値はあくまでもインデックス値であり、 σ_u は Marchetti と Crapps が提案するチャートによる γ_i から計算される値であると、 K_0 値を再定義する考え方もある。しかし、本論文では、 K_0 値を苦小牧では実測された $\gamma_i = 10 \text{ kN/m}^3$ 、また敦賀では $\gamma_i = 21 \text{ kN/m}^3$ と仮定して求めた値とする。

図-7 に関連して重要な点がもう一つある。それは、地盤の分類である。Marchetti は I_p によって地盤を分類することを提案している。つまり、図-7 に示すように I_p が 0.6 以下であれば粘土、1.8 以上であれば砂、0.6 と 1.8 の間はシルトとしている。図に示す調査結果をみると、検見川が場合によってはシルトと判断されることがわかる。さらに問題なのは敦賀で、極端な場合には粘性土と分類されることがわかる。これらの結果から、密な砂地盤や粒径の大きな地盤に対して、 I_p による土の分類は慎重に行わなくてはならないことがわかる。

4. 調査結果

(1) N 値との関係

CPT から求められる q_t と N 値の関係は多くの研究者によってまとめられてきた。これまでの研究によれば、 q_t/N 比は粒径によって変化するとされている。図-9 は Robertson, 他⁹⁾ がまとめた粒径と q_t/N (ただし、 q_t の単位は 100kPa) の関係である。ただし、彼の提案は D_{50} が 1.0mm 以下であるので、図に示す点線はこれを外挿したものである。今回得られた結果を同図にプロットしてみると二つの重要なことがわかる。
①標準的な砂地盤である東扇島と検見川の q_t/N は、Robertson, 他の線よりかなり上に位置する。
②粒径が大きくなても q_t/N 比は変化しない。
①を考える上で留意しなくてはならないことがある。それは、 N 値の求め方である。SPT から求められる N 値は試験方法、特にハンマーの落下方法によって大きく変化する。このため、試験方法による誤差を除くために、図-9 を含む N 値に関する研究の多くは、ハンマーの落下エネルギーの 60%が先端に伝達したと仮定して求められた N_{60} を用いることを標準としている。しかし、今回用

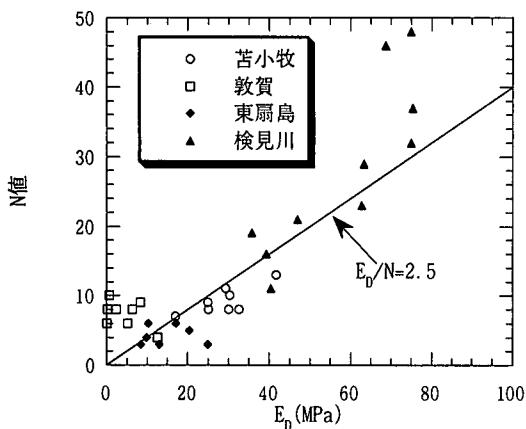


図-10 E_b 値と N 値の関係

いたハンマーの落下方法はトンビ法を用いており、この方法による落下エネルギーは 60% より多い¹⁰⁾ とされている。すなわち、トンビ法によって得られる N 値は N_{60} より小さくなることが知られている。したがって、東扇島と検見川の q_t/N 比が Robertson, 他の提案より大きくなるのは納得できるが、落下エネルギーの違いによる N 値の差は 2 から 3 割程度¹⁰⁾ なので、Robertson, 他の関係と今回の実測値の違いを十分には説明することはできない。^② については、彼の提案は粒径が 1mm まであることと、また後で述べるように、粒径が大きくなると、SPT や CPT そのものの適用性が問題となる。

普通の砂地盤において、Tanaka, H. と Tanaka, M.¹¹⁾ は、DMT から求められる E_b 値と N 値との間に特別な関係が認められることを報告している。彼らの整理方法にしたがって今回の調査で得られた関係をプロットしたのが、図-10 である。敦賀を除いて、火山灰からなる苦小牧でも、 $E_b=2.5N$ (ただし、 E_b の単位は MPa) の関係が認められる。しかし敦賀の場合には、得られた N 値に対して E_b 値が著しく小さいのがわかる。

(2) D_r との関係

圧力チャンバー試験によって、CPT から D_r を求める方法が提案されている。この中で有名なのが Lancellotta¹²⁾ の方法である。また、DMT の結果から液状化の判定の際に、Robertson と Campanella¹³⁾ は K_p 値と D_r の関係を提案している。図-11 から 14 にその検討結果を示す。東扇島の例では CPT および DMT からの値は実測値と比べて多少大きめに予測している。一方、検見川の例では DMT から求められた D_r は CPT より小さな傾向が得られており、実測値はその中間に位置している。しかし、両地点とも、CPT および DMT による値は実用上問題のない精度といえる。

苦小牧においてトリプルチューブサンプラーで採取

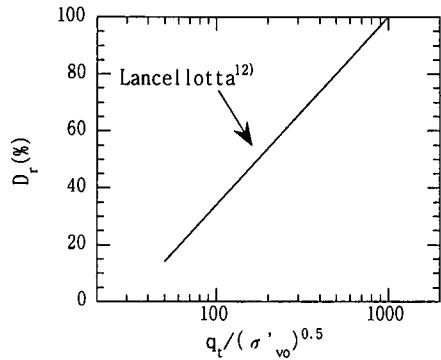


図-11 Lancellotta の提案した CPT から D_r を求める図

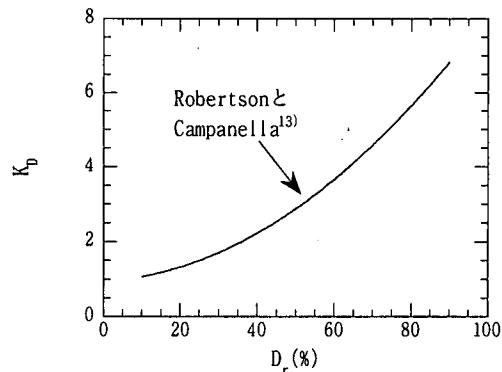


図-12 Robertson と Campanella が提案した K_p 値と D_r の関係

された試料を用いた D_r の試験結果を図-15 に示す。また、CPT と DMT によって予測された D_r も同じ図に示す。CPT による D_r は深さによらずほぼ 50 から 60%，また DMT による D_r は多少ばらつきはあるが、20 から 40% と CPT による値より小さめである。一方、室内試験によって求められた D_r 値は、殆どの深度で 100% を越えている。これは三浦、他⁶⁾ が指摘しているように、火山灰のような多孔質でしかも粒子が角張っているような土に対して、現行の最大・最小密度試験が適用できないことを示している。もちろん、トリプルチューブサンプラーによる試料採取の時に、サンプラーの押し込みによって密度が原位置より大きくなった可能性は否定できないが、 D_r が 100% 以上となることに対する説明にはならない。

苦小牧の地盤の工学的に意味のある D_r がいくらであるかについては、 D_r の定義そのものにも関わってくるので、非常に難しい問題である。笠井、他¹⁴⁾ はトリプルチューブサンプラーで採取された試料を用いて、繰返し非排水三軸試験による液状化強度比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ を求めている。この結果、両振幅ひずみ DA が 5% となる $\sigma_d/2\sigma'_c$ は、繰返し回数 N_c が 10 回で 0.67, 20 回で 0.515 とかなり大きな値である。通常の砂地盤の D_r と $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係を考え

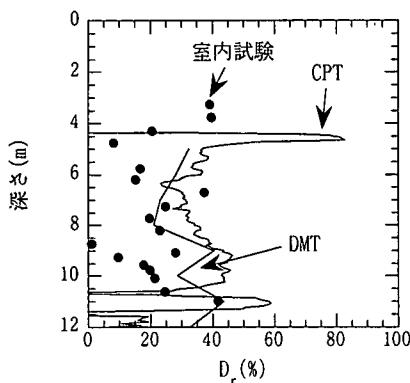


図-13 東扇島における凍結サンプリングから測定された D_f と
CPT およびDMT から予測された D_f の比較

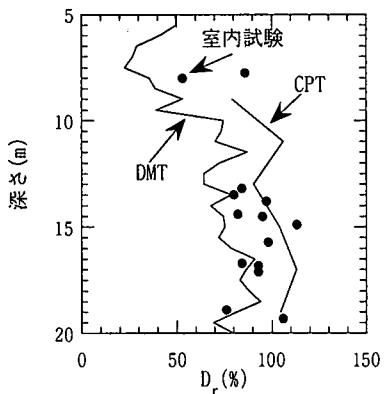


図-14 検見川における凍結サンプリングから測定された D_f と
CPT およびDMT から予測された D_f の比較

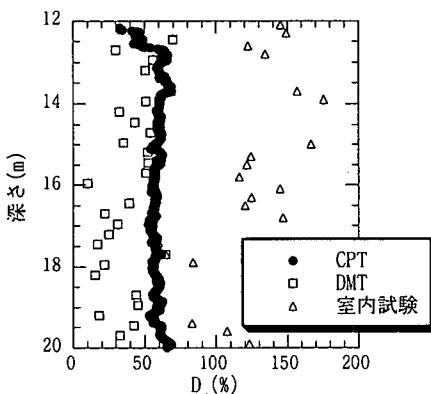


図-15 種々の方法で求められた D_f の比較 (苫小牧)

ると、彼らが繰返し非排水三軸試験から求めた $\sigma_d/2\sigma_c'$ に相当する D_f は、今回CPTやDMTから求めた D_f より、かなり大きいものと思われる。したがって、CPTやDMTを用い

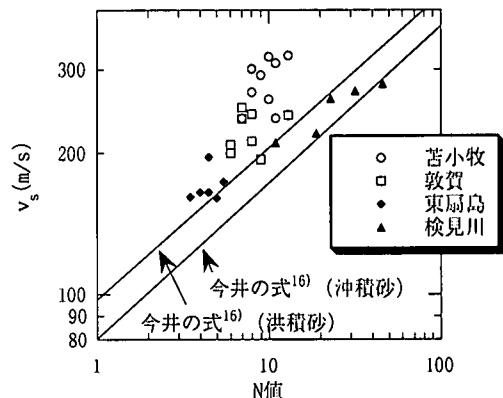


図-16 N 値と v_s との関係

た液状化の予測に必要な D_f の算出には、さらなる研究が必要と思われる。

敦賀については、SPT のレイモンドサンプラーによる “いわゆる乱された試料”しか採取していないので、 D_f に関する情報はない。しかし、苫小牧と同様に Lancellotta の方法で D_f が 50%となる q_t を図-6 に引いてみる。敦賀では、すでに述べた方法によってスムージングを行ったのでかなり q_t のバラツキは消滅したもの、それでも深さによって q_t が著しく異なる。しかし、CPT のデータから敦賀の D_f はおよそ 50%前後と予測される。このCPTから計算された D_f がどの程度の信頼性があるか、ないかを N 値によって考えてみる。 N 値から D_f を求める方法は数多く提案されているが、ここでは Meyerhof¹⁵⁾の提案した式(5)を用いることにする。

$$D_f = 21(N / (\sigma'_{\text{so}} + 0.7))^{0.5} \quad (5)$$

ここに、 σ'_{so} は鉛直有効土かぶり圧で単位は kgf/cm² (98kN/m²)である。この式を用いて敦賀の地盤の D_f を求めるに40%前後となり、図-6 のCPTから求めた値とかなり近い値が得られる。同様に、他の地域において N 値から D_f を求めるに東扇島では 40%、検見川では 75%、苫小牧では 50%となり、検見川を除いて傾向的には CPT から求めた D_f と一致する。

一方、敦賀ではDMTから求められる K_D 値は、ほとんどの深度で 0.5 以下である。このため、測定された K_D 値は図-12 の K_D と D_f を表すチャートの適用外にある。したがって、DMTからは D_f が推定できない。これは、後で述べるように E_D 値を含めて粒子の粗い地盤に対して DMT の適用性が問題となることを示している。

(3) G_{sc} との関係

G と密接な関係のあるせん断波速度 v_s と N 値の関係に有名な今井の研究¹⁶⁾がある。今回対象となった地盤の N

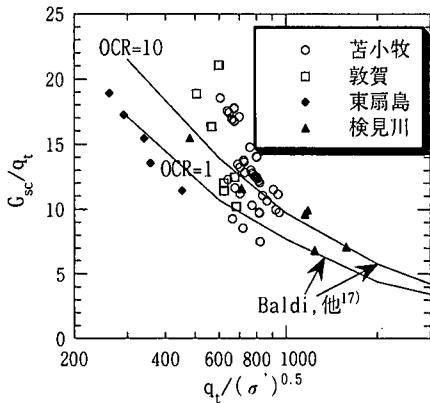


図-17 サイスマックコーンから求められた G_{sc} と CPT から求められた q_t との関係

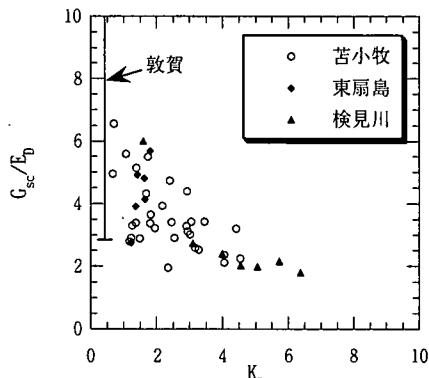


図-18 各地点での G_{sc}/E_p と K_p の関係

値と v_s との関係を図-16 に示す。今回対象とした地盤は沖積層であるにもかかわらず、全体的に今井の提案した関係より実測値は上に、すなわち N 値と比べて v_s が大きめとなった。また、同じ N 値で比べてみると、他の地点より苦小牧の v_s が大きいのがわかる。これは、苦小牧の粒子は火山灰であり、トリプルチューブサンプラーで容易に試料採取できたことからわかるように粒子同士が固結している、すなわちセメントーションが大きな影響を与えていていると思われる。

Baldi, 他¹⁷⁾は圧力チャンバー試験を用いて、CPT の q_t と G_{sc} の関係を求めた。東扇島と検見川で得られた q_t と G_{sc} の関係は Baldi, 他の関係とよく一致することが、田中(洋)と田中(政)³⁾によって確認されている。今回は、さらに苦小牧と敦賀で得られた値もプロットして、図-17 に示す。今回の苦小牧および敦賀においても $q_t/(\sigma'_v)^{0.5}$

(ただし、 q_t , σ'_v の単位はそれぞれ kPa) が小さくなると、 G_{sc}/q_t 比が大きくなる傾向が得られた。しかし、室内試験で得られた Baldi, 他の関係や、典型的な砂地盤と比べて、粒径が大きな地盤の G_{sc}/q_t は同じ $q_t/(\sigma'_v)^{0.5}$ で比べると、かなり大きめな値となる。すなわち、同じ q_t が得

られても、粒径が大きいと G_{sc} が大きくなる傾向にあるといえる。

田中(洋)と田中(政)³⁾は砂地盤において DMT から求められる E_p と G_{sc} の関係は K_p によって変化することを示している。図-18 に今回のデータも含めて G_{sc}/E_p 比と K_p の関係をプロットしてみる。CPT から求めた q_t と G_{sc} との関係(図-17)より大きなバラツキが見られるが、 K_p の減少によって G_{sc}/E_p 比の増加する傾向が認められる。

5. 考察

粒径の大きさによって、 q_t および DMT から得られるパラメーター(I_p , K_p , E_p)がどのように影響されるかをみてみた。粒径が大きくなると、 q_t より DMT の方が大きな影響を受けるようである。図-3 と 4 に示すように、苦小牧と敦賀の対象層の N 値は 10 より多少小さい程度、またサイスマックコーンから求められた G_{sc} は 100 MPa と、同様な値を示している。しかし、DMT から得られた値は大きく異なる。図-19 に DMT から直接得られた圧力 p_0 と p_1 の値を示す。この中で敦賀で得られた値が他の地点と比べて著しく小さいのがわかる。このため、これらの値から導かれる I_p , K_p , E_p とも小さくなる。したがって、すでに述べたように、① I_p による土の分類が機能しないこと、② I_p と E_p のチャートから求められる γ は実測の γ をかなり過小評価する、のも納得できる。また、 E_p が小さくなるため、図-10 に示した E_p と N 値の関係が、他の場所と著しく異なることもうなずける。このように敦賀で測定された p_0 や p_1 値が小さくなる原因として考えられるのが、土粒子の粒径が大きいことによるアーチング効果である。DMT の試験では厚さ 16 mm のブレードを押し込むが、このブレードの挿入によって土粒子が水平方向に移動する。この移動によって、鉛直方向の応力は増加するが、水平方向の応力は緩和するものと想像される。そして、その程度は、DMT のメンブレンの直径に対して粒径が大きいほど、大きくなると思われる。しかし、これはあくまでも推測であり、粒径の大きさと p_0 や p_1 値との関係は室内の模型実験等を実施して確認する必要があると考えられる。

苦小牧の調査地点でも、土粒子の粒径が大きいので敦・賀と同様に p_0 や p_1 の測定値の意味について疑問が残る。特に、 N 値や q_t に比べて図-19 の p_0 や p_1 値、および図-3 に示す DMT から求められた各パラメーターが深度方向に對してバラツキが大きく、その信頼度については、今後更なる研究を必要とするものと思われる。

このように、土粒子の粒径が大きな地盤に対する DMT の適用は慎重に検討する必要がある。また、適用が可能な粒径がいくらであるかについては、今後種々の粒径からなる地盤の調査が必要である。

CPT から求められる q_t に対する土粒子の粒径の大きさ

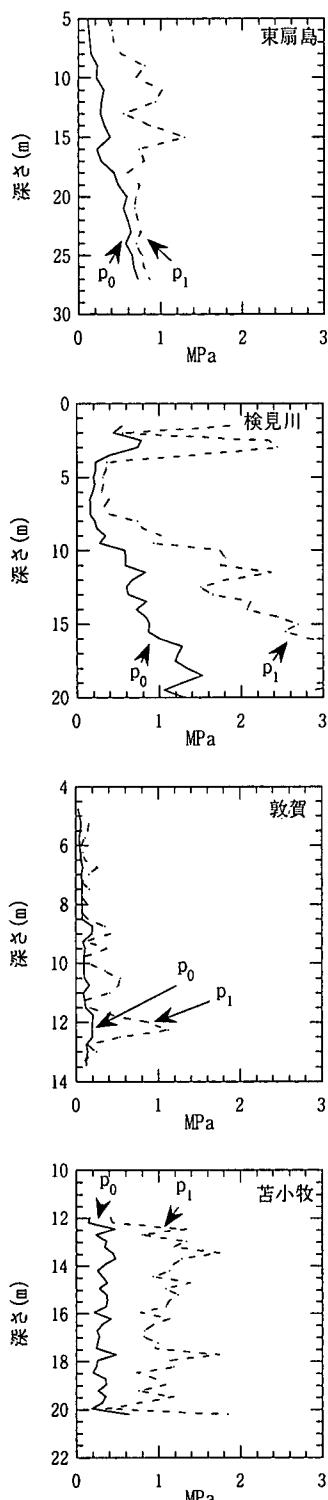


図-19 各地点でのDMTの p_0 および p_1 の値

の影響は、DMTほど大きくないと思われる。この理由は、図-9に示すように q_t/N 比が D_{50} によって大きく変わら

ないこと、また図-17に示す G_{sc}/q_t と $q_t/(\sigma'_{vo})^{0.5}$ の関係が、粒径が0.2mmの砂地盤と同様な関係にあることが挙げられる。ただし、図-17に示すように粒径が大きくなると、 G_{sc}/q_t 比が大きくなる傾向にある。これは、粒径が大きくなると、せん断波が硬い粒子を通るので、同じ q_t の下では v_s が大きくなるためと考えられる。しかし、CPTのコーンの直径と土粒子の粒径を考えると、CPTが適用できる粒径の限界が自ずから定まるものと思われる。この考え方には、SPTが適用できる地盤にもあてはまる。

6.まとめ

粒径の大きな粒子から成る地盤に対してCPTおよびDMTを行い、通常の砂地盤で得られた特性を比較してみた。その結果、以下のことがわかった。

①DMTによる土の判別と γ'_t の予測について

粒径が大きくなると、DMTによって測定される圧力が小さくなるので、DMTから導かれる I_D 、 K_D 、 E_D の値も小さくなる傾向になる。したがって、このような地盤にMarchettiが提案する I_D による土の判別を行うと、シルト、あるいは粘土と分類される可能性がある。また、 I_D と E_D の関係から土の単位体積重量を求める方法については、敦賀、苦小牧とも実測値との間に大きな差が生じた。

②N値との関係

今回の調査では、CPTから求められた q_t とSPTから求められたN値の比、 q_t/N （ただし、 q_t の単位は100kN/m²）は粒径によらずおおよそ5から10であった。また、敦賀を除いてDMTの E_D 値とN値との間には $E_D/N=2.5$ （ただし、 E_D の単位はMPa）の関係が得られた。敦賀の場合には①の理由から E_D 値が極端に過小評価されるため、この関係から著しくかけ離れる。

③ D_r について

通常の砂地盤ではLancellottaが提案した q_t を用いる方法、およびCampanellaとRobertsonが提案したDMTによる方法は、 D_r をかなりの精度で実測値を予測することがわかった。しかし、粒径が大きくなると、①に示した理由で K_D の測定精度が落ちるので D_r の精度も低下する。なお、火山灰については、最大・最小密度試験そのものに問題があるので、室内試験で求めた D_r の意味を再度検討する必要がある。また、敦賀においては、高品質のサンプリングを実施していないので、 D_r が測定されていないが、N値から予測された D_r と q_t からの推定値との間にかなりの相関が認められた。しかし、①で述べたようにDMTの K_D から求められた D_r は、測定値自体の信頼性がないので、適用できないと思われる。

④ G_{sc} との関係

通常の砂地盤では、 G_{sc}/q_t 比は $q_t/(\sigma'_{vo})^{0.5}$ 比に反比例して増加することがわかっている。ただし、 σ'_{vo} は鉛直有

効土かぶり圧である。粒径の大きな地盤でも、砂地盤と同様な傾向が得られたが、同一の $q_t / (\sigma_{\text{v}})^{0.5}$ 比で G_{sc}/q_t 比を比較してみると、粒径の大きな地盤の方が、 G_{sc}/q_t 比が大きくなる傾向にある。

一方、DMTにおいても G_{sc}/E_p 比と K_p 値の間には逆比例する関係が砂地盤で見いだされることがわかっている。しかし、すでに①で述べたように粒径が大きくなると E_p や K_p の精度が悪くなるので、これらの関係を用いることはできない。

本研究のとりまとめに当たっては、鹿島建設株式会社技術研究所の笹尾光部長から検見川に関するデータ、京都大学防災研究所三村衛助教授から東扇島の相対密度、また北海道大学の三浦清一教授からは苫小牧の相対密度に関するデータを頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Marchetti, S.: In situ tests by flat dilatometer, ASCE, Vol. 106, No. GT3, pp. 299-321, 1980.
- 2) 田中洋行, 田中政典: 原位置試験によって計測される地盤の変形特性, 土木学会論文集, No. 575/III-40, pp. 83-91, 1997.
- 3) 田中洋行, 田中政典: 電気式静的コーン貫入およびダイラトメーター試験を用いた地盤調査方法, 港湾技研資料 No. 837, 1996.
- 4) Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespie, D., Laing, N. and Kurfurst, P. J.: Seismic cone penetration testing in the Beaufort Sea, 3rd Canadian Conf. on Marine Geot. Eng., pp. 253-271, 1986.
- 5) 田中洋行, 田中政典, 井口弘, 西田燕, 韓光: サイスマックコーンで計測された軟弱粘性土のせん断剛性率、地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—に関する国内シンポジウム発表論文集、土質工学会, pp. 235-240, 1994.
- 6) 三浦清一, 八木一善, 川村志麻: 破碎性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形—強度特性に及ぼす応力履歴の影響, 土木学会論文集, No. 547/III-36, pp. 221-229, 1996.
- 7) Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional, 1997.
- 8) Marchetti, S. and Crapps, D.: Flat Dilatometer Manual, Schmertmann and Crapps Inc., 1981.
- 9) Robertson, P. K., Campanella, R. G. and Wightman, A.: SPT-CPT correlations, Proc. of ASCE, Vol. 109, GT11, pp. 1449-1459, 1990.
- 10) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 標準貫入試験におけるエネルギー効率, 第 19 回土質工学研究発表会講演集, pp. 119-122, 1984.
- 11) Tanaka, H. and Tanaka, M.: Characterization of sandy soils using CPT and DMT, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 3, pp. 55-65, 1998.
- 12) Lancellotta, R.: Analisi di Affidabilità in Ingegneria Geotecnica, Atti Istituto Scienze Costruzioni, No. 625, 1983.
- 13) Robertson, P. K. and Campanella, R. G.: Estimating liquefaction potential of sands using the flat plate dilatometer, Geotechnical Testing Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 38-40, 1986.
- 14) 笠井隆治, 三浦清一, 八木一善: 不搅乱支笏系火山灰粗粒土の動的力学挙動, 技術報告集, 第 38 号, 地盤工学会北海道支部, pp. 249-256, 1998.
- 15) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, Proc. 4th ICSM, Vol. 3, 1957.
- 16) Imai, T.: P- and S-Wave Velocities of the Ground in Japan, Proc. of 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 257-260, 1977.
- 17) Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. N., Jamiolkowski, M. and Lo Presti, D. C. F.: Modulus of sand from CPT's and DMT's, Proc. of 12th ICSMFE, Vol. 1, pp. 165-170, 1989.

(1999.2.10 受付)

APPLICABILITY OF CPT AND DMT FOR GROUNDS CONSISTING OF LARGE GRANULAR PARTICLES

Hiroyuki TANAKA, Osamu MISHIMA and Masanori TANAKA

In situ soil investigations were carried out at Tsuruga and Tomakomai sites using CPT, DMT, SPT and seismic cone penetration tests. Tsuruga site consists of reclaimed land filled with finely crushed rock aggregates, while Tomakomai site comprises the secondary sedimentary deposit of volcanic ash. Both the sites are characterized by granular materials having mean particle size considerably larger than 2 mm. Various soil parameters obtained from these in situ tests have been correlated with each other, and the correlations compared with the already established ones for the sandy grounds. It has been found that DMT cannot be applied directly to grounds having large size soil particles.