

フラットダイラトメーターによる原位置試験結果の信頼性

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 亀井健史
同上 正会員 山本芳裕

1. はじめに

わが国における最も一般的に実施されているサウンディングの一つとして、標準貫入試験（以下、SPTと称す）がある。SPTの主な特徴は、動的な貫入抵抗値としてのN値が測定でき、かつ乱された状態ではあるが土試料が得られるため簡単な物理試験も可能となる。また、N値が多くの土質定数と相関性を有していることから、地層構成の把握、種々の地盤物性値の推定および液状化の判定等、わが国の多くの設計基準や指針において、非常に重要な地盤情報の一つとしてよく用いられている。しかしながら、SPTは、多くの試験時間および試験費用を要し、また、得られた試験結果に対する人為的誤差が大きい等の問題点を有している。さらに、一般的に試験は深度方向に1m毎で実施されるため、極薄い挟み層の検出など詳細な地層構成の把握が困難とされている。

最近実務に適用されているサウンディングの代表例として、三成分コーン貫入試験（以下、CPTUと称す）がある。CPTUでは、コーンを静的に貫入する際の先端抵抗に加え、周面摩擦および間隙水圧の三成分が同時に得られる。得られた試験結果は、比較的詳細な地層構成の把握や支持力の推定等に利用されている。また、CPTUはSPTに比べ、試験時間が短く、深度方向に連続したデータが得られる等の特徴を有している。しかしながら、地盤への適用限界はN値で30程度以下の地盤（砂礫、礫地盤には適用不可能）に限られること、また電気設備を必要とすること等の問題点が考えられる。

一方、Marchetti¹⁾は、より簡便で多くの地盤情報が得られる板状の貫入抵抗体からなるフラットダイラトメーター（以下、DMTと称す）を開発した。DMTはサウンディングに分類されるが、貫入抵抗値を求めるための試験ではなく、貫入停止後に貫入抵抗体に内蔵された載荷板を用い、地盤を水平方向に載荷する試験である。その主な特徴としては、試験時間が短時間、試験操作が簡便、試験技術の優劣による人為的誤差が小さく、さらには多くの地盤物性値の推定が可能であり、深度方向にある程度密にデータが得られることが挙げられる。また、貫入抵抗体は、通常静的貫入により行われるが、重錘を用いた動的貫入を行うことにより、N値が40程度（砂礫および礫地盤を除く）の地盤までは適用可能であるとしている。また、Marchetti¹⁾はDMTをイタリアにおける種々の地盤に適用し、得られたDMT結果と原位置試験結果および室内試験結果との相関性を検討することによって、土質の判別・分類法およびせん断強さ、静止土圧係数、過圧密比等の地盤物性値の推定式（以下、Marchetti式と称す）を提案している。このようなDMTの有用性は、他の研究者によっても指摘されている^{2), 3)}。

実務的な観点からは、水平荷重を受ける杭の設計⁴⁾、盛土の沈下予測⁵⁾、浅い基礎の沈下問題^{6), 7)}、さらに砂地盤の液状化強度の推定⁸⁾等種々の工学的問題に、DMT結果が適用可能であるという報告例がある。

以上のように、DMTは世界的に多くの実績を有しているが、その反面DMTにより推定した土質定数が、一般の原位置調査および要素試験による土質定数と比べ、一致しない場合も指摘されている^{9) - 13)}。

本研究では、上記の点に着目し、DMTから推定される種々の地盤物性値の信頼性を検討するため、世界各地における既往のDMT結果を収集し、DMTにおいて用いられている推定式の妥当性を調べた。また、わが国においてN値が多くの設計基準に導入されている観点から、新たにDMTによるN値の推定を試みた。

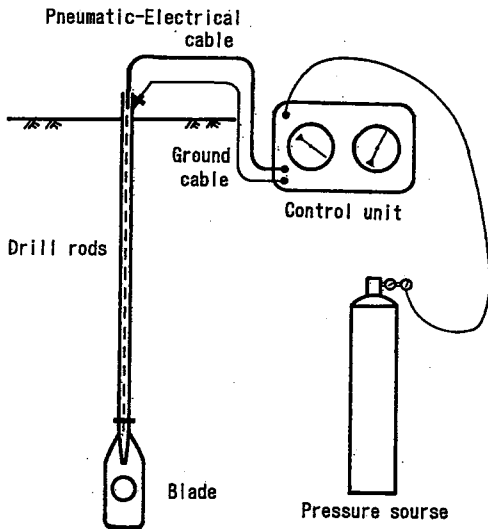


図-1 システム構成

2. DMTの概要¹⁾

システム構成

DMTのシステム構成を図-1に示す。DMTは貫入抵抗体（ブレード）、貫入ロッド、圧力制御装置（コントロールユニット）等からなる簡易なシステムであり、電源装置等の特別な設備が不要である。

図-2はブレードの詳細を示したもので、ブレード片側側面の鋼性のメンブレンがガス圧力により膨張する構造となっている。

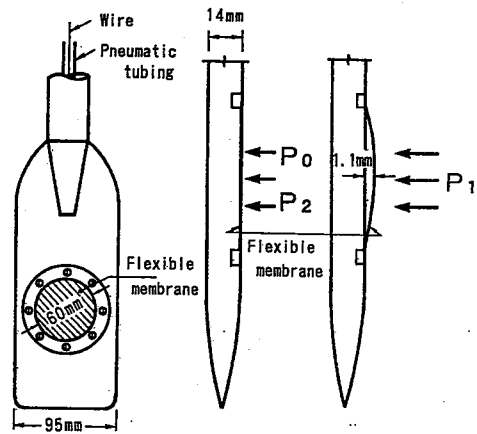


図-2 ブレード

試験方法

試験は、ブレードを所定の深度まで地中に貫入し、貫入停止後直ちにメンブレンを膨張し、地盤を水平方向に載荷することにより実施される。この載荷時の、メンブレンが膨張しようとする瞬間の圧力（A値）、メンブレン中央が1.1mm膨張したときの圧力（B値）および除荷時においてメンブレンが再びブレードに接するときの圧力（C値）を各々測定する。上記測定は、コントロールユニット内蔵のプザーと、圧力チューブ内のワイヤーを介して接続されたメンブレン内蔵の電気接点のオンオフに合わせて行われる。試験の載荷システムおよび試験手順を図-3, 4に示す。

なお、DMTにより得られた上記 A, B, C値は、次式により、実際に地盤に作用している圧力 P_0 、 P_1 および P_2 に換算する。

$$P_0 = 1.05(A + \Delta A) - 0.05(B - \Delta B) \quad \dots (1)$$

$$P_1 = B - \Delta B \quad \dots (2)$$

$$P_2 = C + \Delta A \quad \dots (3)$$

ここで、 ΔA は地上（大気圧下）における、メンブ

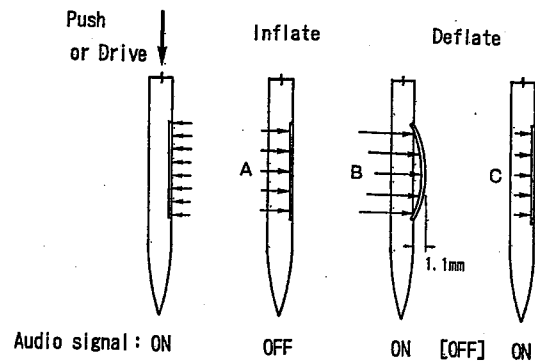


図-3 載荷システム

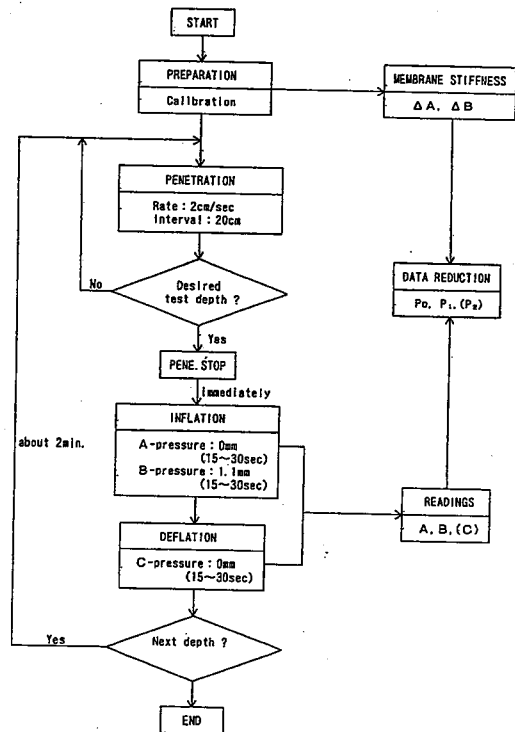


図-4 試験手順

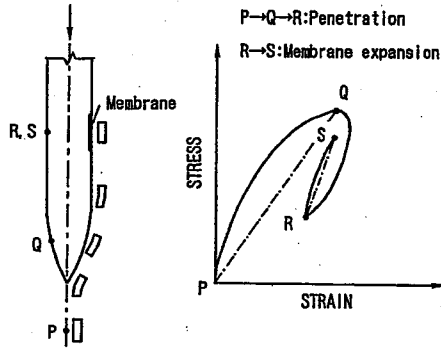


図-5 ブレード貫入に伴う土の応力ひずみ関係

レン中央の変位量が0.05mmのときの圧力計の読み値、 ΔB は同状態でのメンブレン中央の変位量が1.1mmのときの圧力計の読み値を示す。

載荷原理

図-5は、貫入・載荷に伴うブレード近傍の地盤のせん断応力と歪の変化を模式的に示したものである。図より、本システムではブレード貫入前における原位置の初期応力状態 P点が、ブレードの貫入に伴い Q, R点へと変化し、さらに載荷時のメンブレンの膨張によってS点に至ることになる。

したがって、メンブレンによる地盤への載荷は、半無限弾性地盤上の円形たわみ性基礎による載荷と同等とみなすことにより、次式を用い載荷重 ΔP と沈下量Sの関係として表すことができる(図-6参照)。

$$S = \frac{4R\Delta P}{\pi} \cdot \frac{1-\mu^2}{E} \quad \dots(4)$$

ここで、E:地盤の弾性係数、 μ :地盤のポアソン比、R:メンブレンの半径を示す。

DMTインデックス

得られた P_0 , P_1 値は、以下に示す3つのDMTインデックスとして表される。なお、現状において P_2 値は、間隙水圧に関係した値を示すと考えられ、その利用法に関しては現在検討過程にある³⁾。

ダイラトメーター係数 E_D は、地盤の弾性特性を表すインデックスとして用いられ、(4)式より $E/(1-\mu^2)$ と等価な値となる。よって、 E_D は $\Delta P=P_1-P_0$ 、 $R=30$ mm および $S=1.1$ mmを(4)式に代入することにより次式で与えられる。

$$E_D = \frac{4R\Delta P}{\pi S} = 34.7(P_1-P_0) \quad \dots(5)$$

材料インデックス I_D は次式で定義され、主に土質の判別・分類に用いられる。

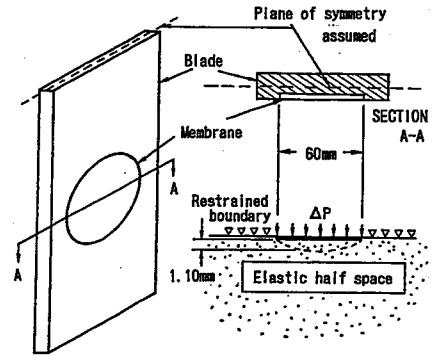


図-6 載荷モデル

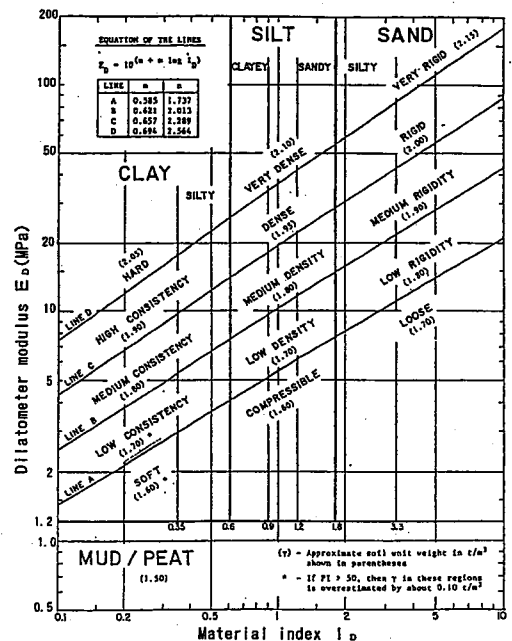
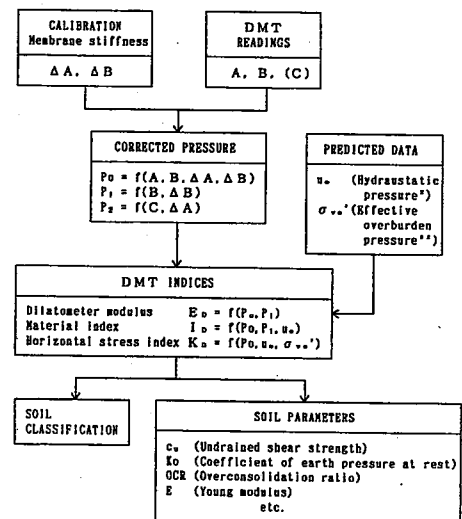


図-7 I_D 値と E_D 値による単位体積重量 γ の推定²⁾



*: ブレード貫入前の試験深度における静水圧 (通常は地下水位から推定)。
 **: I_D , E_D , γ チャート(図-7)を用い推定可能。

図-8 データ整理フロー

表-1 材料インデックス I_D による土質分類

PEAT or SENSITIVE CLAYS	CLAY		SILT		SAND	
	Silty	Clayey	Sandy	Silty		
I_D value →	0.1	0.6	1.2	1.8		

$$I_D = \frac{P_1 - u_0}{P_0 - u_0} \quad \dots(6)$$

ここで、 u_0 は測定深度における静水圧を示し、その値は地下水位より得られる。

さらに、水平応力インデックス K_0 は、静止土圧係数等を評価する場合に用いられ、次式で定義される。

$$K_0 = \frac{P_0 - u_0}{\sigma_{v_0}'} \quad \dots(7)$$

ここで、 σ_{v_0}' は測定深度における有効上載圧であり、 I_D - E_D - γ の関係より推定できる(図-7参照)。図-8に上記、データ整理の流れをまとめて示す。また、 I_D 値による土質の判別・分類を表-1に、DMTに用いる推定式のまとめ¹⁾を表-2に示す。なお、排水時のせん断抵抗角 ϕ_s 、砂質土の K_0 値および OCR 値は DMT 結果と近傍で実施された q_c 値(コーン貫入抵抗値)を用いることにより推定可能となる。

3. 試験結果の代表例

わが国のやや過圧密な地盤と、イタリアのかなり過圧密な地盤における DMT 結果の代表例を図-9に示す。なお、ブレードの貫入はやや過圧密な地盤においては静的貫入、かなり過圧密な地盤では打撃貫入が行われている。

4. DMTより評価した地盤物性値の信頼性

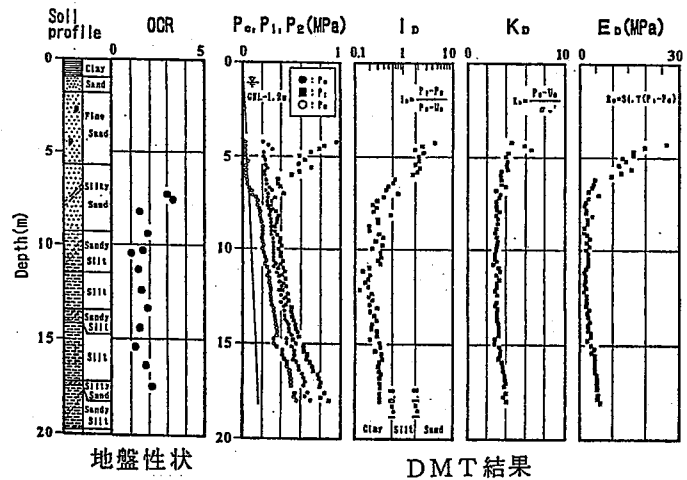
ここでは、DMTより評価した原位置における非排水せん断強さ、静止土圧係数および過圧密比の信頼性について検討する。

非排水せん断強さ c_u (粘性土)

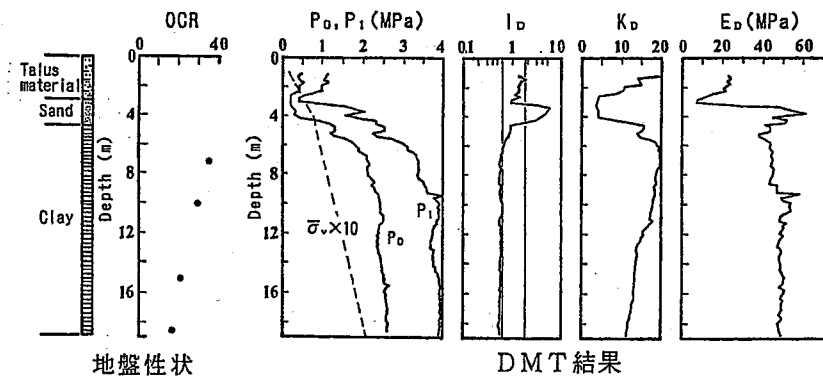
図-10は、種々の粘性土地盤に対して得られた K_0 値と、一般的な原位置試験および室内試験から得られた c_u/σ_{v_0}' 値の関係をプロットしたものである。図中、DMTによる推定値を実線で示す。図より K_0 値は、ある程度のばらつきは認められるが、 c_u/σ_{v_0}' 値と良い相関性を有していることがわかる。

表-2 DMT結果に用いる地盤物性値の推定式¹⁾

SOIL PARAMETERS	DMT'S EQUATIONS [Marchetti(1980)]
c_u (clays)	$I_D \leq 1.2 : c_u/\sigma_{v_0}' = 0.22(0.5K_D)^{1.25}$
K_0 (clays)	$I_D \leq 1.2 : K_0 = (K_D/1.5)^{0.47} - 0.6$
OCR(clays)	$I_D \leq 1.2 : OCR = (0.5K_D)^{1.56}$



(a) やや過圧密な地盤(小松川)



(b) かなり過圧密な地盤(Numana)

図-9 DMT結果の代表例^{1), 13)}

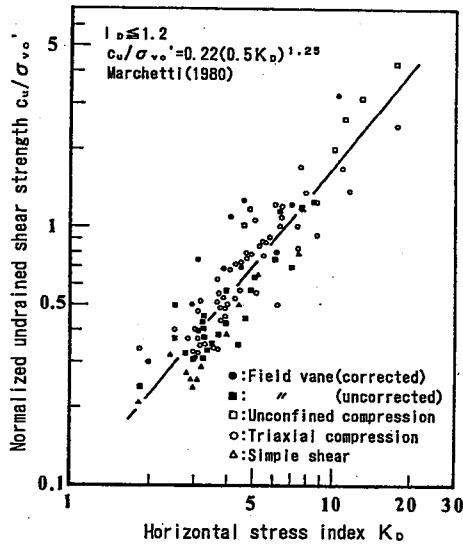


図-10 非排水せん断強さ c_u と水平応力インデックス K_0 の関係

上記推定式の実地盤への適用性をさらに検討するため、ノルウェーとわが国の地盤において実施されたMarchetti式より評価したDMTによる c_u 値の深度分布と室内三軸試験から得られた c_u 値の深度分布との比較を図-11に示す。図より、両地盤とも c_u 値の深度分布は、比較的良好に対応していることがわかる。

静止土圧係数 K_0 。(粘性土)

種々の粘性土地盤に対して得られた K_0 値と K_0 値の関係を図-12に示す。図中、実線はDMTによる推定 K_0 値の関係を示したものである。図より、 K_0 値に対する K_0 値の分布性状は $K_0=6$ 付近で異なり、このことからLunne et al.¹⁴⁾は次式を提案している。

$$K_0 \leq 6 \quad K_0 = 0.34 K_0^{0.54} \quad \dots (8)$$

$$K_0 > 6 \quad K_0 = 0.68 K_0^{0.54} \quad \dots (9)$$

上式による推定 K_0 値の妥当性を検討するために、ノルウェーとわが国の地盤に対し、上式を適用した例を図-13に示す。図より、上式による推定 K_0 値は、Marchetti式による値と比較すると、より実測値に近い値を示していることがわかる。

過圧密比OCR

図-14は、 K_0 値と過圧密比の関係を示している。Marchetti式と実測値の対応性は、定性的にはほぼ良好であるが、定量的な観点からはLunne et al.¹⁴⁾が提案しているように、 $K_0=6$ を境界に推定式を変えた値の方が、より実測値に近い値となっている。

図-14の傾向をさらに定量的な観点から進展させ

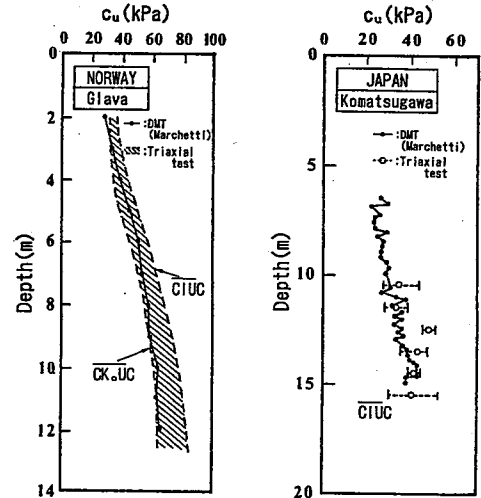


図-11 非排水せん断強さ c_u に関するDMT結果と室内三軸試験結果との比較

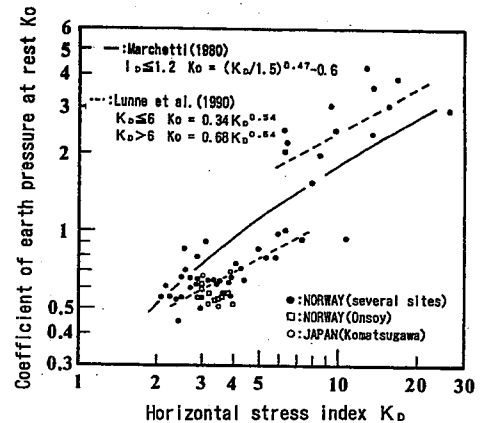


図-12 静止土圧係数 K_0 と水平応力インデックス K_0 の関係

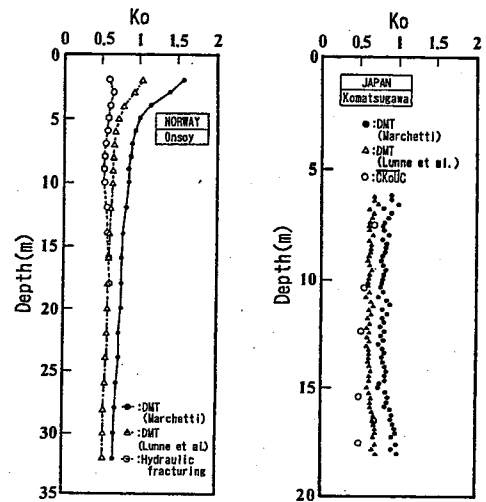


図-13 静止土圧係数 K_0 に関するDMT結果と K_0 試験結果との比較

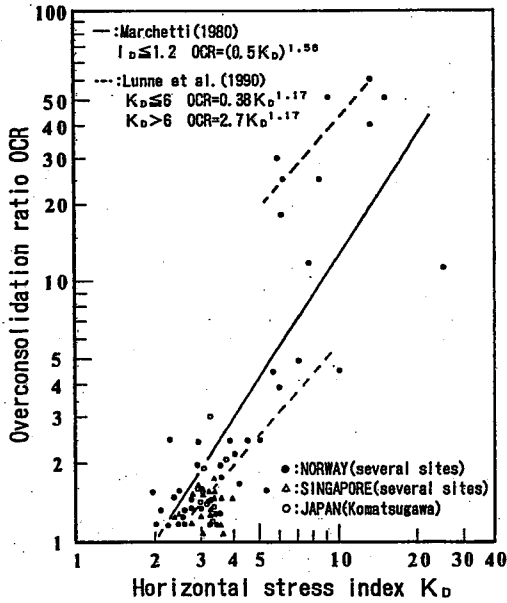


図-14 過圧密比OCRと水平応力インデックス K_D の関係

るために、図-15は、塑性指数PI (=20) をパラメーターとして¹⁵⁾、砂質土も含めた K_D 値とOCR値の関係を示している。図より、 K_D 値とOCR値はPI値にある程度依存し、次式に示す関係が得られる。

$$\text{NP} \quad \text{OCR} = 0.47 K_D^{1.78} \quad \dots(10)$$

$$\text{PI} \leq 20 \quad \text{OCR} = 0.68 K_D^{0.99} \quad \dots(11)$$

$$\text{PI} > 20 \quad \text{OCR} = 0.49 K_D^{0.93} \quad \dots(12)$$

上式をシンガポールとわが国の地盤のDMT結果に適用した例を、図-16に示す。図より、上式による推定OCR値が、他の手法による推定値に比べ、最もよく地盤のOCR値と対応している。

5. DMTによるN値 (SPT) の推定

わが国では、先述したようにN値に基づいた設計法が種々規準化され、N値は工学的に非常に利用度の高い設計パラメーターとなっている。例えば、N値から地盤の変形係数等が、経験式により推定可能とされている観点から、N値は地盤の弾性的挙動のある程度反映した物性値と考えられる。このことから、DMTによる E_D 値とN値には相関関係が存在するものと考えられる。よって、ここではわが国の種々の地盤から得られたDMT結果からN値の推定を試み、得られた値とSPT結果を比較検討した。図-17は、 E_D 値とN値の関係を示している。図より、応力履歴によらず粘土・砂に対して、 E_D 値とN値は

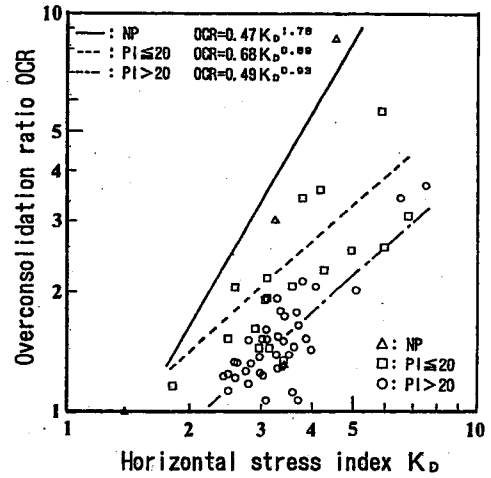


図-15 過圧密比OCRと水平応力インデックス K_D の関係

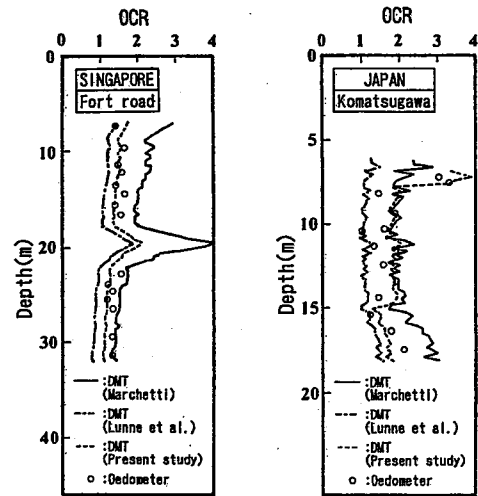


図-16 過圧密比OCRに関するDMT結果と標準圧密試験結果との比較

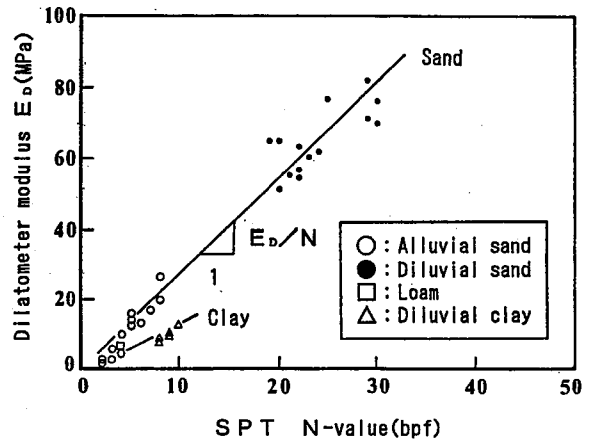


図-17 標準貫入試験によるN値とダイラトメーター係数 E_D の関係

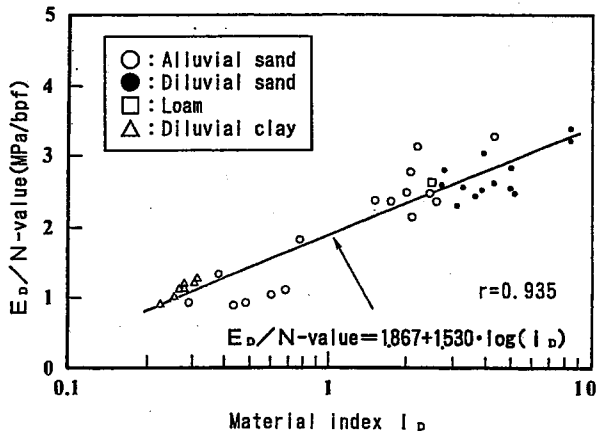


図-18 E_b/N 値と材料インデックス I_b の関係

それぞれユニークな関係を示していることがわかる。すなわち、勾配 E_b/N 値が砂質土では大きく、粘性土では小さな値を示し、このことは E_b/N 値が土質に依存していることを示唆している。

このような傾向をさらに定量的に表すために、土の判別・分類を表すとされている材料インデックス I_b と E_b/N 値の関係を考え、その関係を図-18に示す。図より、 I_b 値と E_b/N 値は良好な相関性を示しており、その関係は次式で与えられる。

$$E_b/N = 1867 + 1530 \log(I_b) \quad \dots (13)$$

上式を N 値の推定式に書き改めると次式が得られる。

$$N = E_b / (1867 + 1530 \log(I_b)) \quad \dots (14)$$

図-19は、(14)式を、前述のわが国の地盤に対して適用した事例である。図より、SPTから得られた N 値と推定 N 値はよく一致していることがわかる。

以上、本研究により明らかになったDMT結果に関する推定式を表-3にとりまとめた。

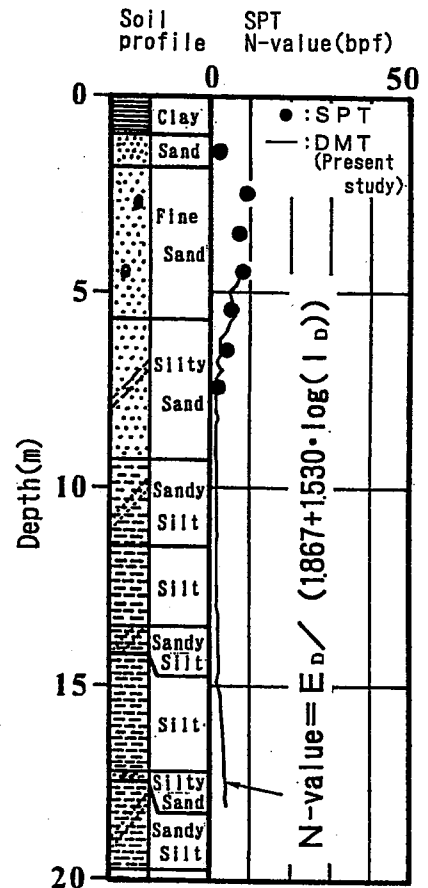


図-19 DMTによる N 値の推定例

表-3 DMT結果に用いる地盤物性値の提案式

SOIL PARAMETERS	PROPOSED EQUATIONS	REFERENCE
c_u (clays)	$I_b \leq 1.2$: $c_u / \sigma_{vo}' = 0.22(0.5K_b)^{1.25}$	Marchetti(1980) ¹⁾
K_b (clays)	$K_b \leq 6$: $K_b = 0.34K_b^{0.54}$ $K_b > 6$: $K_b = 0.68K_b^{0.54}$	Lunne et al.(1991) ¹⁴⁾
OCR	NP : $OCR = 0.47K_b^{1.78}$ $PI \leq 20$: $OCR = 0.68K_b^{0.89}$ $PI > 20$: $OCR = 0.49K_b^{0.93}$	Present study
N-value	Japanese soil : $N = E_b / (1867 + 1530 \log I_b)$ [MPa/bpf]	Present study

6. まとめ

本研究より得られた主要な結論を以下に列記する。

(1) DMTは、試験の迅速性・簡便性・経済性に富み、試験技術の優劣による人為的誤差が小さい等多くの特徴を有する原位置試験であり、地層構成の把握および種々の土質定数が評価可能である。

(2) 非排水せん断強さ c_u の推定に関し、Marchetti¹⁾の式から得られた c_u/σ_{vo} 値は、比較的妥当な値を示すことが認められ、また粘性土における静止土圧係数 K_0 は、Lunne et al.¹⁴⁾の式を用いることにより推定値の信頼性が高くなるものと考えられる。さらに、過圧密比OCRに関しては塑性指数PIを考慮した推定式が、より妥当な値を与える可能性を示唆した。

(3) DMTによるN値の推定を試み、その有意性をSPT結果と比較することにより実証した。

【参考文献】

- 1) Marchetti, S.: In situ tests by flat dilatometer, ASCE, Vol.106, No. GT3, pp.299-321, 1980.
- 2) Schmertmann, J.H.: Guideline for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical design, U.S. Department of transportation, Federal highway administration, Office of reserch and special studies, Report No. FHWA-PA-87-023+24, Vol.3-4, 1988.
- 3) Lutenerger, A.J.: Current status of Marchetti dilatometer test, Proc. of 1st International Symposium on Penetration Testing, pp.137-155, 1988.
- 4) Robertson, P.K., Davies, M.P. and Campanella, R.G.: Design of laterally loaded driven piles using the flat dilatometer, Geotechnical Testing Journal, Vo.12, No.1, pp.30-38, 1989.
- 5) Crawford, C.B. and Campanella, R.G.: Comparison of field consolidation with laboratory and in-situ tests, Canadian Geotechnical Journal, Vol.28, No.1, pp.103-112, 1991.
- 6) Schmertmann, J.H.: Dilatometer to compute foundation settlement, Proc. of In Situ'86 ASCE Specialty Conference on Use of In Situ Tests and Geotechnical Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, pp.303-321, 1986b.
- 7) Lenards, G.A. and Frost, J.D.: Settlement of shallow foundations on granular soils, ASCE, Vol.114, No. GT7, pp.791-809, 1988.
- 8) 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.
- 9) Lacasse, S. and Lunne, T.: Calibration of dilatometer correlations, Proc. of 1st International Symposium on Penetration Testing, Vol.1, pp.539-548, 1988.
- 10) Chang, M.F.: Interpretation of overconsolidation ratio from in situ tests in recent clay deposits in Singapore and Malaysia, Canadian Geotechnical Journal, Vol.28, No.2, pp.210-225, 1991.
- 11) Roque, R., Janbu, N. and Sennest, K.: Basic interpretation procedures of flat dilatometer tests, Proc. of 1st International Symposium on Penetration Testing, pp.577-587, 1988.
- 12) Powell, J.J.M. and Uglow, I.M.: Marchetti dilatometer testing in UK soils, Proc. of 1st International Symposium on Penetration Testing, pp.555-562, 1988.
- 13) Iwasaki, K., Tsuchiya, H., Sakai, Y. and Yamamoto, Y.: Applicability of the Marchetti dilatometer test to soft ground in Japan, Proc. of Geo-Coast'91, 3-6, pp.29-32, 1991.
- 14) Lunne, T., Powell, J.J.M., Hauge, E.A., Uglow, I.M. and Mokkelbost, K.H.: Correlation of dilatometer readings to lateral stress, Paper Submitted to Specialty Session on Measurement of Lateral Stress, 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, 1991.
- 15) Kamei, T.: A study on the mechanical behaviour of normally consolidated cohesive soils. thesis presented to the Tokyo Institute of Technology, at Tokyo, Japan, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Engineering, 1985.