

新しい貫入試験，ダイラトメーターなどの我が国における適用性

Empirical Study on applicability of Cone Penetration Tests and Flat Dilatometer in Japan

つち 谷 ひさし さか い ゆき お
土 谷 尚* 酒 井 幸 雄**
いわ さき きみ とし ひろ
岩 崎 公 俊** 山 本 芳 裕***

1. はじめに

貫入試験に代表されるサウンディングには各種の手法があるが，我が国においては標準貫入試験が最も標準的であり，あたかも万能であるかのごとく用いられてきた。しかし，広域調査などにおいてはコスト面で問題となり，また非常に複雑な地層構成を把握するにはデータの密度に問題が残る。そこで，これらの欠点を補うため，より安価で簡便な各種の手法が注目を集めてきた。中でも，三成分コーンをはじめとする電気式の静的コーン貫入試験は，最近のエレクトロニクス技術の進歩を背景として，急速に普及しつつある。

本報告は，新しい貫入試験の代表として，筆者らが開発してきた三成分コーン貫入試験¹⁾の概要とその応用について述べるとともに，その発展型であるメモリー式コーン貫入試験機と，ボーリング孔内で水平方向に貫入させる孔内コーン貫入試験機について紹介する。また，近年欧米で非常に発展してきたダイラトメーターについて，その概要と我が国での適用例を紹介する。

2. 三成分コーン貫入試験

2.1 装置の概要

三成分コーンは，コーン貫入抵抗 q_c ，フリクション f_s および貫入に伴う間隙水圧 u_a の三成分を同時に測定する静的コーン貫入試験機である。特に間隙水圧を測定することから，従来の静的コーン(CPT)に対しCPTUと略称されている。測定管は先端にコーンポイント（先端角 60° ，断面積 10 cm^2 ）を有し，その上部に間隙水圧測定用セラミックフィルターおよび周面フリクション測定用のフリクションスリーブ（表面積 100 cm^2 ）が取り付けられている（図-1）。

試験は，従来のオランダ式コーン貫入試験と同様にコーンを地盤へ一定速度（ $1\sim 2\text{ cm/s}$ ）で連続貫入する事で行われる。このとき，センサーによって測定されたデータはロッド内に通した電気ケーブルによって地上の測定器に伝達され，小型コンピューターシステムに転送されリアルタ

イムに表示・記録される。

2.2 試験条件について

三成分コーンの構造・寸法の規格や試験方法はまちまちであり，そのために結果の評価に際して十分な注意が必要となる。通常問題となる試験条件には以下のものがある。

(1) コーンの構造・寸法等

① コーンポイント…断面
積，先端角，ロードセル
容量，材質

② フリクションスリーブ

…表面積，直径，位置，材質・表面粗さ，上下端面のすきま処理

③ 間隙水圧計…フィルターの材質・取付け位置，封入液，脱気法，測定系の剛性

(2) 試験方法

① 貫入速度…欧米では 2 cm/s であるが，国内では 1 cm/s が多い

② 貫入の鉛直性

③ 測定深度の間隔

これらの中から，筆者らが過去に検討を行ったフリクションスリーブの面積の影響と貫入速度の影響について以下に述べる。

2.2.1 フリクションスリーブの表面積の影響

フリクションを測定するフリクションスリーブの表面積としては，これまで一般に $100\sim 200\text{ cm}^2$ が用いられてきた。筆者らは，測定の分解能に特に問題がなければ，表面積が小さいほど詳細な地盤の情報を与えると考え， 100 cm^2 を用いてきた。一方，国際的には 150 cm^2 が主流を占めてきているため，現場試験による両者の比較を試みた²⁾。東京湾岸の沖積地盤において，同一地層に対するフリクションの値を直接対比した。その結果，図-2に示すように，フリクションスリーブの表面積の違いによる差はほとんどないことが明らかになった。

2.2.2 貫入速度の影響

貫入速度が三成分コーン測定値，特に q_c と u_a に対してどのように影響するかを調べるために，貫入速度を 0.03

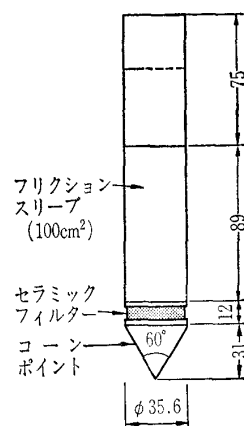


図-1 三成分コーン

*基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術センター 所長
**基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術センター 課長代理
***基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術センター

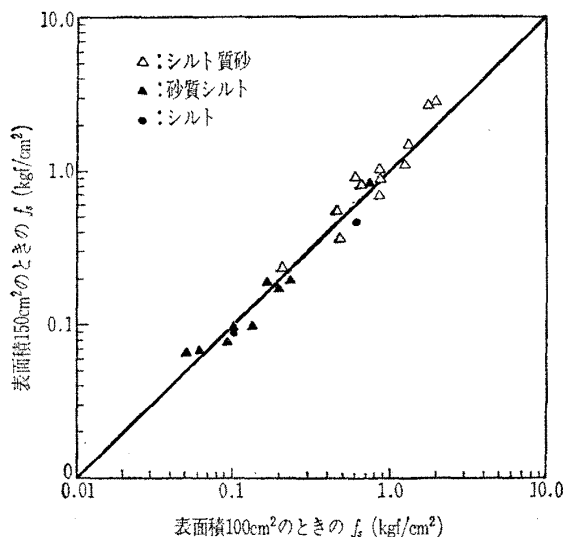


図-2 フリクションスリップ表面積が 100 cm² と 150 cm² の場合のフリクション値の比較

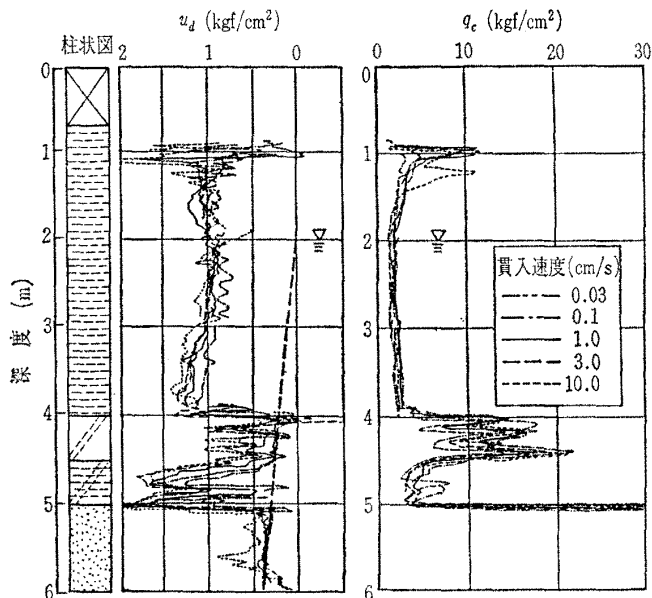


図-3 貫入速度の異なる q_c と u_d の深度分布の比較

cm/s から 10 cm/s まで変化させた現場試験を行った³⁾。現場は千葉県の埋立地で、近傍の 5 地点で試験を実施し、図-3 に示す結果が得られた。一見して、貫入速度の影響は q_c には小さく、 u_d にはある程度認められることが分かる。そこで、 u_d に対する貫入速度の影響を、 $v=1$ cm/s を基準にして示すと図-4 となる。これによると、間隙水圧に対しては、粘性土では貫入速度の影響は小さく、砂質土では比較的大きいことが分かる。砂質土の場合、貫入速度が 1 cm/s と 2 cm/s では、5~30% の差が生ずるという結果となっている。

2.3 土質および液状化強度推定への適用例

2.3.1 土質判別

コーン貫入試験による土質判別は、従来より各種の手法が提案されている。例えば、 q_c と $R_f (=f_s/q_c, \%)$ による判定図⁴⁾、 q_c と u_d を用いた判定図⁵⁾ など数多くのものが

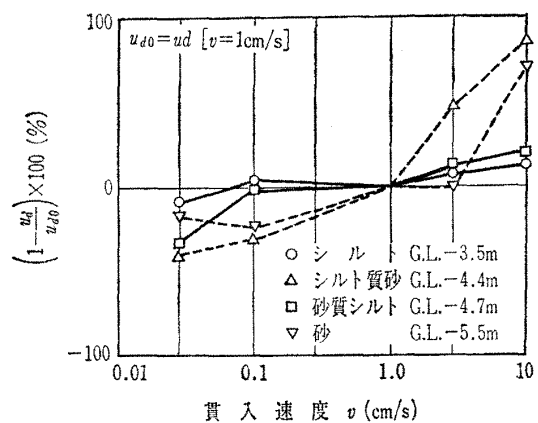


図-4 貫入速度 1 cm/s を基準にした、貫入速度と間隙水圧への影響率の関係

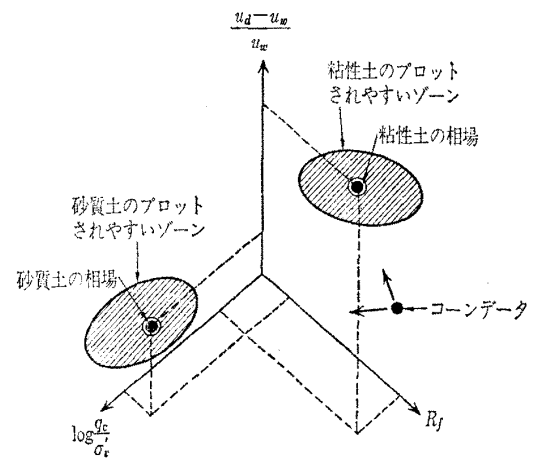


図-5 三成分コーンによる土質判別の原理

ある。しかし、いずれも二成分を用いたものである。筆者らは、土質の判定精度をより高めるために、三成分のパラメーターをすべて用いた判定手法を開発した⁶⁾。この手法は、既往の実測データに基づいて統計的に処理するものであり、次のような考え方による。

三成分コーンより得られる 3 個の成分を各軸にとった三次元座標系を考えると (図-5)、土質に応じたゾーンに区分できると考えられる。そこで、土質が判明している既存のコーンデータについて、各軸に対する土質ごとの平均値や分散などをデータベース化しておく。新たに得られたコーンデータがどの土質に近いかは、各土質ゾーンの中心までの三次元距離をこのデータベースに基づいて計算し、最も近いゾーンの土質型をそのデータの土質型とするものである。ここで区分する土質型は、砂、シルト質砂、砂質シルトおよび粘土の 4 種類とした。また、各軸で用いるパラ

表-1 三成分コーンにより土質判別された土質型の頻度

推定した土質型	砂	シルト質砂	砂質シルト	シルト・粘土
実際の土質型				
砂	19	7	0	0
シルト質砂	2	19	1	0
砂質シルト	0	1	12	1
シルト・粘土	0	0	3	18

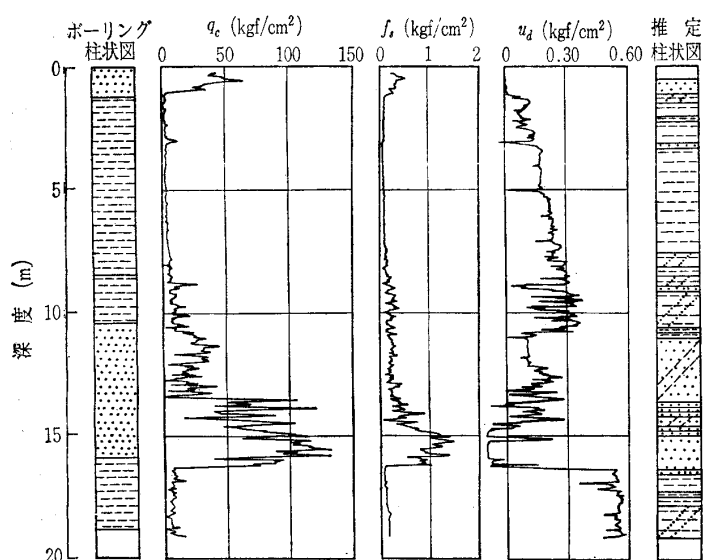


図-6 三成分コーンによる土質判別の適用例

メーターは土質による差が出やすいような工夫を要するが、今回は以下のパラメーターを用いた。

$$\log(q_c/\sigma_v'), R_f, (u_a - u_w)/u_w$$

ここに、 σ_v' は有効上載圧、 R_f はフリクション比 ($=f_s/q_c$, %), u_w は静水圧である。

表-1 は、上記パラメーターにより判別を行い、実際の土質との対応を示したものである。判別精度は比較的良好と言えよう。図-6 は、千葉県で別途実施した三成分コーンの結果に、上記の土質判別法を適用した例⁷⁾を示したものである。近傍で実施したボーリングの結果も合わせて示したが、三成分コーンによる土質判別結果はボーリングデータに十分匹敵していると言えよう。ただし、このように得られた土質判別結果をどの程度細かく表示するかについては、若干の検討が必要である。

2.3.2 液状化強度

原位置試験による液状化判定手法としては、現在のところ標準貫入試験を用いる方法が主流を占めているが、広大な埋立地や路線の調査においてはコストの問題がある。そこでより簡易な手法として三成分コーンによる液状化強度の推定法を提案した⁸⁾。

この方法は次式より液状化強度を算出するものである。

$$R_l = 0.0233(q_c/\sigma_m')^{0.525} + \Delta R \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sigma_m' = (1 + 2K_0)/3 \cdot \sigma_v' - u' \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta R = 0 : (R_f \leq 0.5\%), \Delta R = 0.15(R_f - 0.5) : (0.5 < R_f \leq 2.0\%) \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 R_l : 液状化強度、 σ_m' : 平均有効主応力、 ΔR : 液状化強度の補正項、 K_0 : 静止土圧係数 (0.5 と仮定)、 u' : コーン貫入に伴う過剰間隙水圧 ($=u_a - u_w$) である。ただし、適用は沖積砂質地盤に限られる。

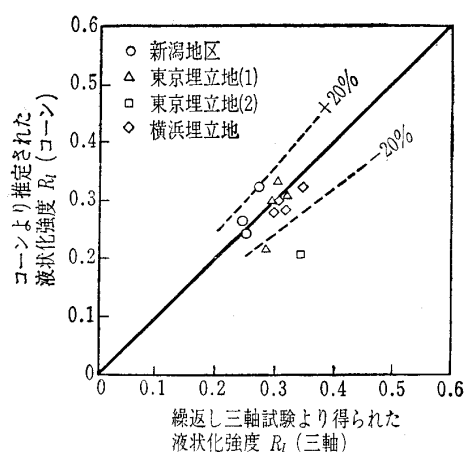


図-7 三成分コーンにより推定した液状化強度と繰返し三軸試験より得られた液状化強度の比較

この式は、原位置および室内での三成分コーンの結果と、液状化強度を比較することによって導き出されたものであり、原位置の液状化強度は道路橋示方書⁹⁾に準じて N 値から推定した。なお、コーンから液状化強度を推定する場合、細粒分の影響が大きいが、本手法では(3)式の ΔR により細粒分の補正を行っている。これは、 R_f が細粒分含有率と密接な関係にあることによっている。

次に、本手法の妥当性を検証するために、現場試験を実施し、(1)式より推定された R_l とボーリング孔より採取した乱さない試料を用いた繰返し三軸試験による R_l の対比を行った¹⁰⁾。現場は、新潟および東京湾沿岸の沖積地盤あるいは埋立地である。対比の結果は、図-7 に示すとおりであり、ばらつきはあるものの概略の推定には役立つものと考えられる。

静的コーンを利用した液状化判定手法としては、最近、柴田ら¹¹⁾による既存の震害地点でのコーンデータに基づく判定図や、周(ツォー)ら¹²⁾による室内検定土層内での貫入試験結果に基づいた相関など、より厳密な検討がなされており、今後の発展が期待される。

3. その他の新しい貫入試験

3.1 メモリーコーン

三成分コーンをはじめとする電気式コーンは、電気ケーブルを有するため、その処理が煩雑となる。そこでコードレス方式でメモリー内蔵型のコーンを開発した。その後セ

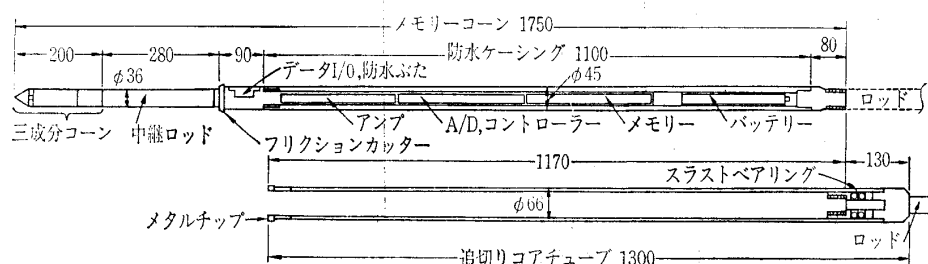


図-8 メモリーコーン

ルフボーリング方式を併用し、貫入反力を軽減する改良を加えた¹³⁾。これはメモリーコーンの外側にビット付きのアウトチューブを取りつけ、ロータリー式の貫入機（ボーリングマシンでもよい）で貫入させるものである。このとき、ロッドの回転はスラスト・ベアリングにより、コーンには伝達しないようになっている。

このメモリーコーンは、さらに小型化・高性能化の改良がなされ（図-8）、現場での試用結果では三成分コーンとほぼ同等の結果を示すことを確認した。しかし、貫入中のデータがモニターできないことから、本格的に実用化するまでには、信頼性のより一層の向上、あるいは何らかのモニタリング手法の開発が必要となるものと思われる。

3.2 孔内コーン貫入試験

通常の静的コーンでは、硬質地盤の場合大きな反力を要し貫入が困難となることが多い。そこで、ボーリング孔内で水平方向に貫入させる孔内コーンを開発した¹⁵⁾。この手法の利点は、比較的簡易に行えるため、深度方向に密な間隔で実施すれば、軟岩の分類などに有効と考えられる。

図-9 に測定管の外観を示したが、同時に3つのコーンを貫入させるように変更することもできる。試験ではまず、貫入時の反力を得るために孔壁面に反力プレートを押し出して測定管を固定する。次にコーン（先端角 90° 、断面積 1 cm^2 ）を油圧により貫入させ、貫入がコーンベースまで

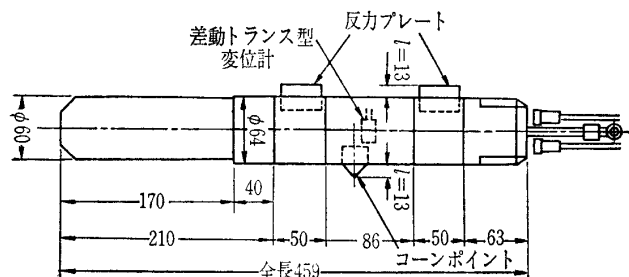


図-9 孔内コーン

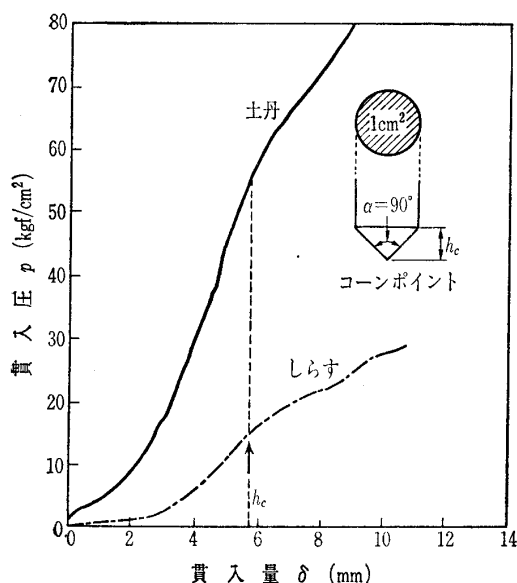


図-10 孔内コーンの測定例

達したときの貫入圧を測定し、貫入抵抗値 q_{co} とする。最大ストロークは 13 mm であるが、コーンが完全に貫入しなくても、その貫入圧を面積補正することによりほぼ q_{co} が推定できる¹⁵⁾。図-10は土丹およびしらす地盤への適用例を示したものである。

4. ダイラトメーター

ダイラトメーター試験(DMT)は、三成分コーンに並ぶ新しい原位置試験として欧米を中心に急速に発達しているものである。この試験は、その簡便性、装置の単純性、結果の再現性の良さなどの特徴を有しており、各種の土質パラメーターの推定法が提案されている¹⁶⁾。ここでは、DMTの概要と我が国への適用性^{17), 18)}について述べる。

4.1 装置および試験方法の概要

ダイラトメーターは図-11に示すものである。このブレードをコーンのロッドに取りつけ、 2 cm/s の速度で貫入させ、通常深度 20 cm ごとに試験が行われる。貫入装置には通常コーンの貫入機が用いられるが、ボーリングマシンでも十分対応できる。ブレードの中央部には鋼製メンブレンが取り付けられており、ロッド内のエアチューブを介して地上からのガス圧により膨らませる。

試験では、ガス圧を徐々に増加させ、メンブレンがブレードから離れる時の圧力（読みA）、中央部が 1 mm 膨らんだ時の圧力（読みB）および除荷時にブレードに接した時の圧力（読みC）を、地上の圧力ゲージで読み取る。圧力の読み値A, B, Cはメンブレンの剛性を補正して、それぞれ圧力 P_0, P_1, P_2 として取り扱う。これらの値より以下のDMTインデックスが提案されている¹⁹⁾。

- ・材料インデックス (Material Index)

$$I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - u_w) \quad \dots\dots\dots (3)$$

- ・水平応力インデックス (Horizontal Stress Index)

$$K_D = (P_0 - u_w) / \sigma_v' \quad \dots\dots\dots (4)$$

- ・ダイラトメーター係数 (Dilatometer Modulus)

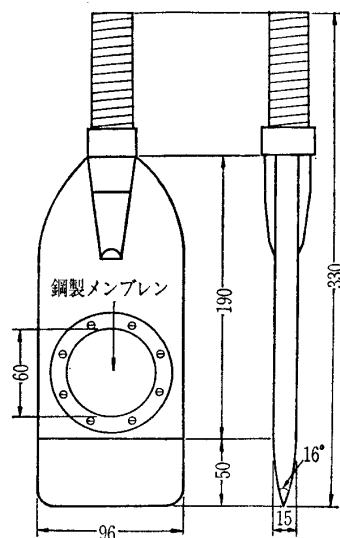


図-11 ダイラトメーター

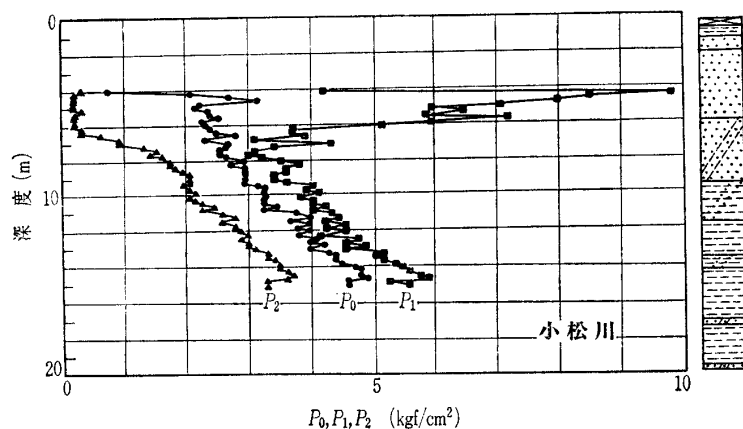
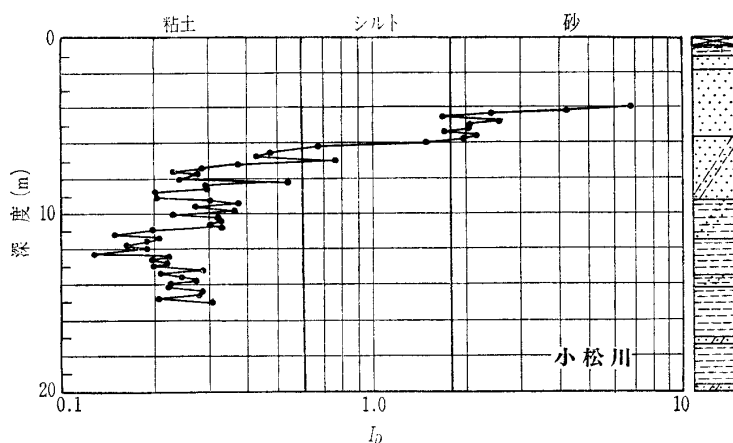


図-12 ダイラトメーターの測定例

図-13 I_D の深度分布と土質判別

$$E_D = 34.7(F_1 - P_0) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u_w は静水圧、 σ_v' は有効上載圧である。

4.2 DMT の適用

DMT を利用した各種土質パラメーターの推定方法が、Marchetti(マルケッティ)ら¹⁹⁾などにより各種の相関図で提案されている。これらのうち代表的なものについての我が国への適用性を確認するために、東京下町低地部で現場試験を実施した。図-12は、DMTにより得られた P_0 、 P_1 、 F_2 の深度分布を示したものである。試験に要した時間は、1測点1分程度であった。DMTは、特に熟練を要せず、比較的短時間の練習で安定した結果が得られるが、コーン貫入試験に比べれば迅速性にやや劣るようである。

以下に、土質判別や非排水せん断強さの推定への適用例を示す。

4.2.1 土質判別

土質判別は、通常材料インデックス I_D を用いて行われる。上記現場について、 I_D の分布とボーリング柱状図を対比した結果を図-13に示す。土質の区分線は、Marchetti¹⁹⁾によって以下のように提案されたものである。

$$\begin{aligned} I_D > 1.8 & \dots\dots\dots \text{砂質土} \\ 0.6 < I_D < 1.8 & \dots\dots\dots \text{シルト質土} \\ I_D < 0.6 & \dots\dots\dots \text{粘土質土} \end{aligned}$$

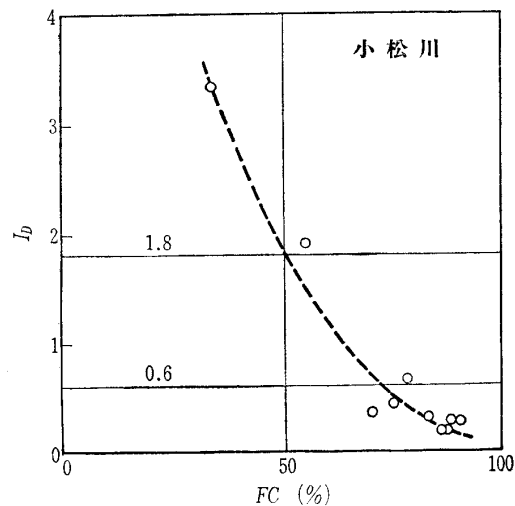
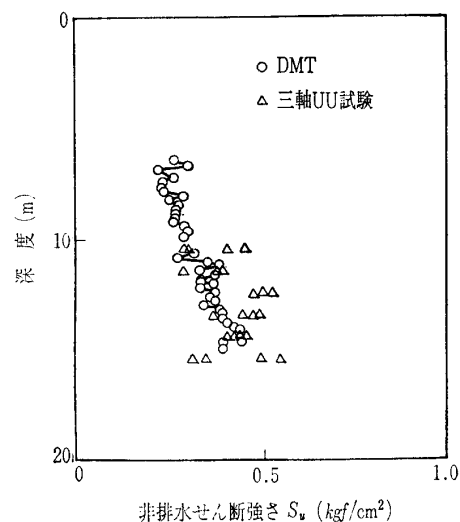
図-14 細粒含有率 FC と I_D の関係

図-15 ダイラトメーターにより推定した非排水せん断強さと室内三軸UU試験結果の比較

図-13によると、 I_D の値は砂質土から粘性土にかけて大きな幅を有しており、両者の区分は明りょうに行えそうである。なお上記のシルト質土は、一応、中間土と考えるべきであろう。

図-14は、細粒含有率 FC と I_D の関係を示したものである。 I_D は FC と密接に対応しており、 I_D を用いた土質判別の妥当性を示しているものと思われる。また、砂質土と粘性土の判定区分である $I_D=1.8$ がほぼ $FC=50\%$ に対応しており、この区分の妥当性が期待される。

4.2.2 強度定数

粘性土の非排水せん断強さ S_u の推定式として次式が提案されている²⁰⁾。

$$S_u = 0.22 \sigma_v' (0.5 K_D)^{1.25} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、この式は $I_D \leq 0.6$ 、すなわち粘土に対してのみ有効である。

図-15は小松川地区におけるDMTデータと非圧密非排水三軸試験による S_u を対比したものであり、(6)式の推定

精度は比較的良好なものと思われる。

以上のほかにも、砂の内部摩擦角や応力履歴などに関し
て同様な検討を試みている¹⁸⁾。

5. 結 論

本稿では、三成分コーンなどの新しい貫入試験とダイラ
トメーターについて、その概要と適用例について紹介した。
これらの結論をまとめると以下ようになる。

- ① 三成分コーンは連続性のあるデータを迅速に得るこ
とができ、サウンディングとして非常に優れたもので
ある。
- ② 三成分コーンの貫入速度の影響は、 q_c に関しては小
さく、 u_a に関しては砂質土の場合やや大きい。また、
フリクションスリーブの表面積は、 100 cm^2 と 150 cm^2
とでフリクション値に大きな差を与えない。
- ③ 三成分コーンにより、土質判別および液状化強度の
概略的な推定が簡易に行える。今後、強度定数などに
関する相関性を検討すれば、より強力な調査手法とな
りえる。
- ④ ダイラトメーターはその簡便性や再現性のよさに利
点があると同時に、我が国の地盤に対する適用性も高
いものと思われる。

謝辞

本稿で述べた各種の試験機の研究開発においては、社内
外の非常に多くの方々のご協力を得た。末筆ながら感謝の
意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 室町忠彦・酒井幸雄・山口 弘：局部周面摩擦値と間隙水圧
も測定するコーン貫入試験機の試作，第16回土質工学研究発
表会，pp.65～68，1981。
- 2) 山本芳裕・土谷 尚・酒井幸雄・古村和規：電気式コーンで
得られる周面摩擦値におよぼすフリクションスリーブの面積
の影響(その2)，第24回土質工学研究発表会，pp.195～196，
1989。
- 3) 酒井幸雄・土谷 尚・室町忠彦・中山裕司：コーン貫入時に
発生する間隙水圧に対する貫入速度の影響，第19回土質工学
研究発表会，pp.129～130，1984。
- 4) Roberson, P.K. and Campanella, R.G.: Interpretation

- of Cone Penetration Tests, Part I: Sand, Canadian
Geotechnical Journal, Vol.20, pp.718～733, 1983.
- 5) Jones, G.A. and Rust, E.: Piezometer Penetration
Testing CPTU, Proceedings of the Second European
Symposium on Penetration Testing, pp.607～613, 1982.
- 6) 土谷 尚・酒井幸雄・岩崎公俊・室町忠彦：三成分コーン試
験結果による土質の自動判別の試み，土木学会第40回年次学
術講演会講演概要集，第3部，pp.763～764，1985。
- 7) Tsuchiya, H., Muromachi, T., Sakai, Y. and Iwasaki,
K.: A soil classification method using all three compo-
nents of CPTU data, Proceedings of the First Interna-
tional Symposium on Penetration Testing (ISOPT-I),
pp.1021～1026, 1988.
- 8) 岩崎公俊・土谷 尚・安田 進・龍岡文夫・佐藤剛司：コー
ン貫入試験による液状化判定のための基礎実験，第21回土質
工学研究発表会，pp.35～38，1986。
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V. 耐震設計編，
1980。
- 10) 山口 勇・斉藤公正・土谷 尚・森本 徹・岩崎公俊：三成
分コーン貫入試験による液状化強度，第23回土質工学研究発
表会，pp.163～164，1988。
- 11) Shibata, T. and Teparaksa, W.: Evaluation of Liquefac-
tion Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests,
Soils and Foundations, Vol.28, No.2, pp.49～60, 1988.
- 12) 周 神根・龍岡文夫・末永裕樹・谷澤房郎・岩崎公俊・続
誠：各種砂のコーン貫入抵抗と液状化強度，第24回土質工学
研究発表会，pp.733～736，1989。
- 13) 室町忠彦・土谷 尚・押田正昭・酒井幸雄：セルフボーリン
グ式コードレスコーン貫入試験について，第18回土質工学研
究発表会，pp.57～58，1983。
- 14) 酒井幸雄・室町忠彦・土谷 尚・山本忠嘉：孔壁垂直コーン
貫入試験機の開発と利用法，第22回土質工学研究発表会，pp.
103～104，1987。
- 15) 山本芳裕・室町忠彦・土谷 尚・酒井幸雄・小林文男：孔壁
垂直コーン貫入試験の室内実験に関する一考察，第23回土質
工学研究発表会，pp.165～166，1988。
- 16) Lutenecker, A.J.: Current Status of the Marchetti
Dilatometer, ISOPT-I, pp.137～155, 1988.
- 17) 岩崎公俊・フィリップ リード・酒井幸雄・山本芳裕：ダイ
ラトメーターによる土質判別，第24回土質工学研究発表会，
pp.217～220，1989。
- 18) 丹下良樹・フィリップ リード・岩崎公俊：ダイラトメー
ター (DMT) の利用と結果の検討，第24回土質工学研究発表
会，pp.221～224，1989。
- 19) Marchetti, S. and Crapps, D.: Flat Dilatometer Manual,
Schmertmann and Crapps Inc., 1981.
- 20) Marchetti, S.: In Situ Tests by Flat Dilatometer,
Journal of the Geotechnical Engineering Division,
ASCE, Vol.106, No.GT3, pp.299～321, 1980.

(原稿受理 1989.4.17)