CPT 普及の現状と課題

Current Status and Issue of CPT Practice in Japan

宮坂 享明 (みやさか たかあき)

(株)地盤試験所事業推進本部 本部長

岩崎 公俊 (いわさき きみとし)

基礎地盤コンサルタンツ(株) 営業部長

神宮司 元治 (じんぐうじ もとはる)

(株)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

兵動 正幸 (ひょうどう まさゆき)

山口大学教授 工学部

1. はじめに

CPT (電気式静的コーン貫入試験) は、深度方向に密なデータが得られ迅速な試験が行えることから一般的な原位置試験方法として認知され始めている。特に性能設計への適用が大いに期待されており学会発表も毎年多く行われている。しかしながら、実務的には学会基準策定後においても期待されるほどには普及していないのが現状である。

本稿では、CPT の発展の歴史を振り返り、その適用上のメリットについて整理するとともに、最近の CPT 技術革新や国内における代表的な原位置試験の現状と問題、CPT 普及を進めるうえでの課題などについて述べることにする。

2. CPT 発展の経緯

CPT の開発・発展の歴史は主に欧州から始まった。CPT の原型は、オランダで開発されたオランダ式二重管コーン貫入試験 (いわゆるダッチコーン) である。CPT はその発展形であり、電気式測定による効率化や多成分化が大きな特徴である。

表-1 は、国内を中心に CPT の開発の経緯を示したものである。1980年代から新しい CPT が意欲的に開発され、1994年には基本的な CPT の地盤工学会基準¹⁾が制定された。その間、国内での普及に非常に大きな貢献を果たしたのが、羽田空港沖合い展開工事の三成分コーンの採用であった。広大な埋立て地盤に対して50 m ピッチの格子状で行われたため、業界での設備投資と技術面での水平展開が一気に進んだ感がある。

その後、多くの調査マニュアルで標準的な原位置試験の一つとして記述されるまでに至っている。最近では、ISO/CEN の基準化の検討が進められており、それをにらんだ学会基準改定の必要性が増してきているという状況にある。

3. CPT 技術の現状

3.1 CPT のメリット

CPT を適用するうえでのメリットを整理すると以下のようなものが挙げられる。

- ① 試験者の習熟度によるばらつきが入りにくい

表-1 国内を中心とした CPT の開発の経緯 (文献²⁾より抜粋)

CPT の開発	備考
1932) オランダ式二重管コーン貫入試験をオランダで初めて実施	1931) 鉄道省に土質調査委員会設立
1950年代) ポータブルコーンを実用化	1948) Terzaghi and Peck 「Soil Mechanics in Engineering Practice」発行
1956) オランダ式二重管コーン貫入試験を国内で初めて適用	1954) 土質工学会 (現、地盤工学会) 設立
1975) スウェーデンでピエゾコーン開発	1964) 土質工学会「土質調査法」発行
1976) JIS A 1220「オランダ式二重管コーン貫入試験方法」を制定	1972) 土質工学会「土質調査法 (改訂版)」発行
1981) 三成分コーンを開発	1983) 土質工学会「土質調査法 (第2回改訂版)」発行
1982) コードレスコーンを開発	1989) 国際土質基礎工学会議が標準試験方法発表
1986) サイスマックコーンを開発	1995) 地盤工学会「地盤調査法」発行
1989) 水平土圧コーンを開発	2002) 土壌汚染対策法成立
1990) カナダで電気比抵抗コーンを開発	2004) 地盤工学会「地盤調査の方法と解説」発行
1991) RIコーンを開発	
1994) 地盤工学会基準 JGS 1435「電気式静的コーン貫入試験方法」を制定	
2004) 国際規格原案 (ISO TC 182/SC 1) が審議開始	
2006) 環境モニタリングコーンを開発	
2007) c, ϕ , E を推定するコーンを開発	

ポーリング・サンプリングでは試験者の習熟度によるばらつきが除去できないことが知られている。それに対して CPT は測定が自動化されているため個人差が入りにくい。

- ② 深度方向にはほぼ連続したデータが採取できる

ほぼ連続したデータが採取できると、粘土層のなかにあるサンドシームなどの薄層の検知が比較的容易であったり、地盤の不均一性の状況が把握しやすい。

- ③ 多成分の測定ができる

電気式センサーを用いるメリットは応用性が高いことである。表-2 に示すように各種の CPT が開発されている。

- ④ トレーサビリティの確保が可能

各方面での偽装事件の発覚が問題となっているが、一般社会から疑われないよう学会や業界としてトレーサビリティの確保を明確にする必要がある。そのような観点において、測定の自動化が容易で客観的なデータ処理ができる CPT は有望な方法である。

⑤ CPT 結果は、従来の原位置試験に比べデータの再現性や地盤の複雑な性状が把握できるなど品質が比較

表一 2 国内における最近の CPT

名称	測定項目	主な開発者
ビエゾコーン	先端抵抗 q_c , 間隙水圧 u	Torstensson(1975) ³⁾
三成分コーン	q_c , u , 周面摩擦抵抗 f_s	室町ら(1981) ⁹⁾
電気比抵抗コーン	q_c , u , f_s , 比抵抗	Campanella and Weemees (1990) ⁹⁾
メモリーコーン	q_c , u , f_s	室町ら(1982) ⁹⁾
サイスミックコーン	q_c , u , f_s , せん断波速度 V_s	Campanella, et.al.(1986) ⁷⁾
水平土圧コーン	q_c , u , f_s , 水平土圧	酒井ら(1989) ⁸⁾
RIコーン	q_c , u , f_s , 湿潤密度, 含水比	柴田ら(1991) ⁹⁾
環境モニタリングコーン	q_c , u , f_s , 電気伝導度 EC, 地下水採取	渡部ら(2006) ¹⁰⁾
c, ϕ, E 測定コーン	複数の水平土圧	前田ら(2007) ¹¹⁾ 小林ら(2008) ¹²⁾

的が高く、広い範囲にわたって信頼性設計に対応できる。

3.2 CPT 適用上の問題と技術革新

日本の沖積地盤では中間砂層の出現が多い。また都市部では表層が地盤改良などのために締まっていることも多い。そのためこれまででは中間層の打抜きはボーリングによる削孔を併用することも行われてきたが、機械や資機材の入替えなどの手間がかかり費用が増大するデメリットがある。また、貫入装置としてかつてはオランダ式二重管コーン貫入試験用の貫入装置あるいはボーリング機械などを活用してきたが、どうしても貫入能力不足があった。最近ではオランダ式二重管コーン貫入試験用の貫入装置は使用機会が減少し機材不足に陥っているのが現状である。

このように最近まで、硬質中間層の貫入の困難さや貫入装置の確保問題が指摘され、実務上の CPT 普及の障害となってきた。

一方、ここ数年様々な技術改革がなされてきた¹³⁾。特筆すべきことは硬い中間層の打抜き手法の併用や、サイスミックコーンによる弾性波速度の測定方法の改善、過剰間隙水圧の消散試験による透水性の把握などが比較的精度よく実施できるようになってきていることである。また、多機能の貫入装置も初めて国内に導入され、CPT が実務に使える地盤調査手法として確立されつつあるといえる。以下に各課題について述べる。

3.2.1 反力装置・貫入機

貫入能力の向上は貫入装置の性能の向上だけではなく、貫入機の能力を最大限発揮させる反力装置が必要とされる。反力を自重とした場合、貫入能力が向上すれば自重も大きくなる。つまり、貫入力 200 kN であれば、貫入機の自重は 20 t を越えることになる。現在、このタイプとして大型トラックに CPT 測定システムを搭載した貫入機がある。現場までの移動、調査地点間の移動を自走して行える。特に現場内の移動のためにクローラーを装備したものもある。欧米ではこのタイプの貫入機が多く見受けられる(口絵写真-1)。しかし、貫入力が向上したことにより大型化した貫入機は、日本のように狭い道路、狭い敷地の中で調査をすることが多い場合、適用範囲を狭めてしまう。このようなことから、自重によらない反力装置も必要となる。

最近では、必要な貫入力を有し、貫入機自体はコンパクトに設計され、反力装置としてアンカー方式を採用している機械が登場している。もちろん、貫入機は自走可能である(口絵写真-2)。

CPT 専用機として貫入能力 200 kN、アンカー設置システムも装備した貫入機も開発されている。特にこのタイプの中で特徴的なものは、打撃工法によるボーリングも行える装備、さらに油圧モーターを装備させることによりロータリーボーリングも実施可能であるところである。そのため、硬質な中間層に対して貫入機の入替えを行わずにロータリーボーリングあるいは打撃工法によるボーリングが行える(口絵写真-3)。

3.2.2 運搬手段

日本では法律で運転できる車両の大きさが制限されており、大きな機械を運搬する場合、専門の運送会社に依頼することになり、コストを膨らませる要因となる。CPT が普及していくための一つの要因として、運送会社に依頼することなく運搬できる貫入機と反力装置のセットも必要と考えられる(口絵写真-4, 5)。

3.2.3 測定ケーブル

CPT は基本的にセンサー部分となる先端のプロープとデータロガーおよびコントロールユニットがケーブルでつながれている。センサーが測定したデータはデジタル信号としてケーブルを通り、データロガーへと送られる。このときケーブルは中空のロッド内を通しており、ロッドをつなげる際に作業が煩雑となってしまう。

この問題に対して、かつてメモリーコーンが開発された⁶⁾。プロープ内に測定値を記録するメモリーを装備したものである。これによりケーブルを使う必要がなくなり、調査作業の効率が向上した。しかし、メモリーを装備したプロープを引き上げないとデータを見ることができないという問題があった。

一方 CPT の先進国である北欧では、コードレスコーンとして音波を利用したケーブルのないプロープが開発された。プロープ内でデータを音波にのせ、地上部のロッドの最上端に載せたマイクロフォンで受信して記録する。ケーブルがないことを利用し、ロッドを通してベントナイト泥水を、プロープの直上で孔内に注入し、貫入中ロッドに作用する摩擦を低減させることができる。

さらに最近では、コードレスコーンを進化させ、音波ではなく無線でデータを送信するものが開発されている。ただし、ロッド内は中空でなければならないため、ベントナイト泥水を用いた摩擦の低減は行えない。

現状では、ケーブルのないシステムは三成分(先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧)の測定に限定されている。今後はサイスミックコーンもこのシステムで実施できるよう、開発が進められている。

3.2.4 ダイレクトセンシングとしての CPT の広がり

表一 2 でも紹介したとおり、様々な種類のプロープが開発されている。表一 2 はあくまでも CPT を中心としたプロープであるが、CPT をダイレクトセンシングの一部として、土壌汚染を調査する環境調査の分野まで範

論 説

囲を広げてみるとさらに多くのプローブが開発されてきている。例えば、三成分を測定するプローブの上部に石油による汚染を感知する機能を取り付け、地層構成の把握と汚染物質の感知を一度に行えるものがある。

また、地盤の透水性状をリアルタイムに、連続的に把握することができるツールとしてHPT (Hydraulic Profiling Tools) が開発された^{14)~18)}(口絵写真—6)。このシステムの貫入については打撃工法も可能なため、地層構成を把握するために土の電気伝導度 (EC) を測定する。土の透水性はプローブ側面のスクリーンから注入される清水 (250 ml/min 程度) の注入圧力を連続的に測定して評価するものである。電気伝導度では見えない透水性の高い薄層を把握することができる。

3.2.5 CPTの打撃貫入

硬質な中間層の打抜きに対して、より効率的な方法として打撃貫入 (動的貫入) が考えられる。このような動的貫入併用型のCPT試験装置の開発は一つの答えとなる可能性がある。

一例として澤田ら¹⁹⁾は間隙水圧が測定できる動的貫入試験を開発しており、その技術をCPTに適用できる可能性があり、期待されるところである。

4. 国内の代表的な原位置試験の現状と問題

4.1 標準貫入試験の過度な普及

国内の地盤調査の実務において、標準貫入試験 (以下、SPT) の果たしてきた役割は絶大である。SPTの試験装置は比較的簡易で堅固であり、試験方法は簡便で試料の採取もできる。また適用できる地盤範囲が広く、試験結果 N 値は多くの設計パラメータとの相関が得られている。その結果、国内において N 値さえあれば大半の構造物の設計ができてしまう。本来ならばSPTは簡便であるゆえに試験結果の適用に限界があることはいまでもないが、 N 値は一人歩きになって、 N 値万能という錯覚をもたらしている。そのため N 値に代わる良い技術が普及しにくい状況にある。

4.2 スウェーデン式サウンディング試験結果の認知

宅地地盤におけるスウェーデン式サウンディング試験 (以下、SWS) の歴史的変遷を考えると本来、軟弱な粘性土層の分布を把握する試験としての位置づけであったと思われる。しかし、手軽に持ち運びができ、試験も簡便であり、換算 N 値などの土質パラメータとの相関も提案されている。そのため、宅地地盤においては地盤の支持力まで求める試験となっている。宅地地盤ではその上に載る荷重は木造住宅で、それほど大きな荷重とはならない。よってSWSでの試験で評価されている。特に最近ではSWSの自動化が進められ、SWS自動貫入機でもワゴンタイプの車両に載せられる。SWSの自動化は調査作業の効率化にもつながり、1日で2~3ヶ所の現場をこなすことも可能となる。よって調査費用も安くなり、広く普及されることとなった。また一方、国土交通省告示第1113号において、地盤の許容応力度を求める式としてSWSにより求める式が採用され、お墨付

きをもたらした形となった。コスト面、国土交通省のお墨付きがSWSの普及に有利に働いたと考える。しかし、SWS本来の性能から考えればSWS万能と考えることはできない。地盤の知りたい情報がなんであるかによってSWSが適用できない場面が多くあると考える。宅地地盤における地質調査の中に液状化の判定が法令として盛り込まれようとしているが、液状化についてもSWSで対応しようとする動きがある。これはSWSの試験からは無理強いをしているかの様な対応と思われ、液状化を評価するにはそれ相応の調査が必要と考える。

4.3 試験適用上の問題点

4.3.1 SPTにおける問題点

SPTにおいては下記の点に留意する必要がある。

- ① SPT結果の利用において、多くの土質パラメータに対して相関が得られているが、それぞれに適用限界があり、設計に用いる際には留意する必要がある。
- ② モンケンが自沈するような極軟弱層に対して適正な評価ができない。
- ③ 標準貫入試験は基本的に1m毎の試験であり、薄層の検出が難しい。

4.3.2 SWSにおける問題点

SWSにおいては下記の点に留意する必要がある。

- ① 自沈するような極軟弱層の適正な評価ができない。
- ② SWS結果から地盤の液状化の判定を行うことができない。
- ③ SWS結果から、圧密の検討を行うことができない。
- ④ 貫入音とスクリーポイントに付着している土をもって行うため、地層は砂質土、粘性土、礫質土のいずれかに判別するような大雑把な分類しかできない。

5. CPT普及のための課題

5.1 貫入装置の確保

近年導入された貫入能力の高い貫入機は導入費用が高く、限られた業者しか保有できないという可能性がある。様々な業者によって実施されることにより、調査費用のコストダウンなどの発注者側のメリットも生まれてくることを考えて、業者間での貫入装置のレンタル方式なども一つの方法と思われる。

また一方で、貫入機の反力装置を簡易的な手法で実施し、貫入機のコストダウンを図るのも一つの方法であろう。また、日本のように狭い道路、狭い敷地での調査を想定すると、反力装置の簡易化は、貫入機の小型化、装置の運搬手段の簡易化にもつながり、今後のCPTの普及に寄与すると思われる。

5.2 設計に直結する活用法の提示

CPTによる設計パラメータ推定法のマニュアル作成とこの推定法に基づき求められたパラメータを用いた設計実例集の作成が必要である。このような資料をもとに積極的に発注機関に働きかけることが重要であろう。

5.3 発注機関への情報提供と働きかけ

発注機関に対して、設計パラメーターの推定マニュアルおよび設計実例集などを活用した情報宣伝活動が必要となるであろう。また、CPTが持つ可能性について、さまざまな場面で情報を提供していくことが大切であると考えられる。特に、CPTの普及を妨げている要因の一つと思われる、「CPTはN値20までの地盤でしか適用できない」という先入観を取り除くべく、情報発信を行う。

また、安心・安全な社会資本の整備を念頭に、CPT結果の品質の高さを認識して、信頼性設計への適用など積極的に産学が一体になって行政に働きかけることも急務であると思われる。

6. おわりに

ここまでCPT結果の設計への適用し得る範囲について述べてきた。土質パラメーターについては国内外の多くの研究によって精度の高い推定が得られてきている。しかし、いまだ設計体系はN値が主体となっている。これに対しては設計パラメーターの推定マニュアルおよび設計実例集などを活用し、多くの情報を発注者に伝えていくことが重要である。CPTについての情報はまだ一部の技術者が持っているだけの状態かもしれない。もっと多くの人たちと情報の共有を可能にするためにも、これから様々な場面で情報発信を強め、その中で発注機関がCPTに興味をもち、CPTを積極的に採用することを願う。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説 第6編 サウンディング, pp. 243~337, 2004.
- 2) 岩崎公俊：地盤調査のブレイクスルー, 基礎工, Vol. 37, No. 1, pp. 98~103, 2009.
- 3) Torstensson, B-A: Pore Pressure Sounding Instrument, ASCE Special Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, 1975.
- 4) 室町忠彦・酒井幸雄・山口 弘：局部集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.
- 5) Campanella, R. G. and Weemee, I.: Development and Use of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 5, pp. 557~567, 1990.
- 6) 室町忠彦・酒井幸雄・酒井運雄：静的コーン貫入試験におけるコードレス化の試み, 第17回土質工学研究発表会, pp. 1493~1496, 1982.
- 7) Campanella, R. G., Robertson, P. K. and Gillespie, D.: A Seismic Cone Penetrometer for offshore application, Proc. Oceanology International '86, Int. Conf. Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering, Brighton, UK, 6, Capter 51, 1986.
- 8) 酒井幸雄・土谷 尚・岩崎公俊・山本芳裕：水平土圧も測定する四成分コーン貫入試験機の試作, 第24回土質工学研究発表会, pp. 191~192, 1989.
- 9) 柴田 徹・三村 衛・プラダ T. B. S.・延山政之：RIコーン貫入試験の開発について, 第26回土質工学研究発表会, pp. 89~92, 1991.
- 10) 渡部要一・土田 孝・織田幸伸・田中政典：地盤環境モニタリングコーンの開発, 基礎工, Vol. 34, No. 9, pp. 66~68, 2006.
- 11) 前田良刀・田上 裕・豊岡義則・坂手道明・立川日出男・酒井運雄：新しい(MST)コーン貫入試験によるE, c, ϕ の測定, 土と基礎, Vol. 55, No. 11, pp. 23~25, 2007.
- 12) 小林泰三・落合英俊・安福規之・大嶺 聖・油野俊也・端野幸輔：周面側圧測定コーンの試作と強度定数推定法の提案, 第43回地盤工学研究発表会, pp. 235~236, 2008.
- 13) Robertson, P. K. and Cabal (Robertson), K. L.: Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Greg Drilling & Testing, Inc., 2007.
- 14) Geophone Systems: Hydraulic Profiling Tool (HPT): Standard Operating Procedure, Technical Bulletin No. MK3137, 2007.
- 15) Geophone Systems: NOVA CPT Product Sheet, 2007.
- 16) Geophone Systems: Probing Times: Cordless NOVA CPT System, 2007.
- 17) Geophone Systems: Probing Times: 625CPT, 2006.
- 18) Applied Research Associates: Dual Downhole Fuel Fluorescence Detector, 2005.
- 19) 澤田俊一・塚本良道・石原研而：間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その1 試験方法・装置—, 第39回地盤工学研究発表会, pp. 1927~1928, 2004.

(原稿受理 2009.5.19)