

電気式静的コーン貫入試験 (CPT) の現状と展望

Status and Survey of Cone Penetration Test

三 村 衛 (みむら まもる)

本研究委員会委員長 (京都大学防災研究所)

1. 委員会の構成と研究課題の概要

最近のCPTテクノロジーとその設計・環境・防災への適用に関する研究委員会は、平成18年度に新設され、平成20年度までの3年間、研究調査活動を行ってきた。メンバーは表-1に示すとおりである。これに先立ち、平成16年度には姉妹地域地盤環境研究所主管の同種委員会を組織して1年間活動し、翌17年度には地盤工学会にCPTの活用に関する調査委員会を設立して、研究テーマの選定、活動の方向性について議論を重ねてきた。当時のメンバーの多くは表-1に紹介されている方々と重複しており、実質5年間にわたって調査研究活動を行ってきたことになる。

研究活動を遂行するにあたり、三つのワーキンググループ(WG)を置き、それぞれその趣旨に沿った活動を行った。具体的には、WG1: CPTのメカニズムに基

づいた基準の策定、WG2: 地盤環境に適合したCPTの普及促進のための技術革新、WG3: 新しい領域への展開をミッションとして掲げ、各委員がそれぞれの興味に基づいてWGを自由に選択する方式を採った。WG1では地盤工学会の基準とISOやASTMといった諸外国の基準との関係について精査し、来るべき基準改定に向けたデータの集積のために、CPT一斉試験の実施をテーマとしてかかげた。また、我が国において必ずしもCPTが広く使われていない理由を明らかにするために、発注者、受注者に向けたアンケートによるヒアリングを行い、CPT普及の阻害要因と普及させるために何をしなければならないのかについての分析を行うこととした。WG2では、①CPTによって得られるインデックスの意味と設計定数の求め方、②CPTに基づく地盤設計手法、③CPT普及に求められる貫入装置の改良と製作を研究課題とした。また、WG3では地盤調査としての既

表-1 委員会メンバー一覧

氏名	所属	備考	氏名	所属	備考
三村 衛	京都大学防災研究所	委員長	武居幸次郎	鹿島建設(株)	WG2
田中 誠	アンテエコエンジニアリング(株)	幹事	田中正利	(株)インターナショナル・サーボ・メーカー	WG2
飯沢 誠	ケミカルグラウト(株)	19.3~, WG1	田中政典	(独)港湾空港技術研究所	WG1, 2
池尻 健	(株)セントラル技研	WG3	田中洋行	北海道大学	WG1
岩崎公俊	基礎地盤コンサルタンツ(株)	WG1	続 誠	PGS-Japan	WG1, 2
梅崎健夫	信州大学	WG1, 3	中島 誠	国際環境ソリューションズ(株)	WG3
尾畑和彦	中部電力(株)	WG3	西尾伸也	清水建設(株)	WG3 幹事
片桐雅明	(株)日建設計シビル	WG1 幹事	兵動正幸	山口大学	WG2 主査
菅野康範	興亜開発(株)	WG1	平林 弘	東亜建設工業(株)	20.7 ~ , WG1, 2
岸下崇裕	(株)フジタ	WG3	深沢 健	(株)日揮	WG2
清田三四郎	(独)鉄道建設・運輸施設 整備支援機構	20.4~, WG2	福江正治	東海大学	WG3 主査
桑原文夫	日本工業大学	WG2	藤井照久	復建調査設計(株)	WG2
小泉和広	(株)ダイヤコンサルタント	WG2	古田一郎	応用地質(株)	WG2
甲本達也	佐賀大学	WG1	宮坂享明	(株)地盤試験所	WG2 幹事
小林泰三	九州大学	WG3	村川史朗	(株)日建設計シビル	WG2
斉藤邦夫	中央大学	WG1	八木理至	(株)環境総合テクノス	WG2
佐々木俊平	(財)道路保全技術 センター	WG2	山田朋之	(株)日さく	H19.4 ~ , WG2
島崎貴司	(株)フグロジャパン	WG1	吉村 貢	ソイルアントロップエンジニアリング(株)	WG1
新川直利	不動テトラ(株)	WG2	J. D. Shinn II	Applied Research Associates	米国, WG2
神宮司元治	(独)産業技術総合研究所	WG3	住吉 卓	東京都土木技術センター	オプザバー
末政直晃	東京都市大学	WG1 主査	利藤房男	応用地質(株)	オプザバー
高田 徹	(株)設計室ソイル	WG2	西原彰夫	興亜開発(株)	オプザバー
高橋厚志	(株)環境総合テクノス	20.7~, WG2	片山辰雄	(株)環境総合テクノス	~20.7, WG2
高橋直樹	三井住友建設(株)	WG3	半田 修	(株)日さく	~19.3, WG2
高橋浩之	(株)興和	WG2	丸山 修	(独)鉄道建設・運輸施設 整備支援機構	~20.3, WG2

総 説

往のCPTにとどまらず、新たなフロンティアに市場を拡大するためのテクノロジーの発掘と可能性について検討を行った。

2. CPTの日本での普及に求められるもの

日本国内における地盤調査といえば標準貫入試験(SPT)であり、CPTのシェアは非常に小さいものにとどまっている。山地から海岸までの距離が短く、河川の流路勾配が急な我が国では、粗粒土砂が間断なく供給され、海岸平野であっても玉石や砂礫層が点在する地盤が広がっており、静的貫入方式では、貫入機先端の破損、本体の座屈や曲がりなどのトラブルが多発する。WG2の活動の一環として2007年9月28日～10月10日にかけて山口大学・兵動正幸教授を団長とする米国視察団が、ARA社(Applied Research Associates)、Geoprobe社、Vertek社、Hogentogler社を訪問し、CPTに関する最新技術開発現場を視察し、日本におけるCPT普及に向けた技術課題について、先方の技術者と有意義な議論を行った。誌面の都合もあり、本稿ではその中からARA社が開発したEAPS(Enhanced Access Penetration System)について紹介する。EAPSは図-1に示すようなCPT貫入とボーリングを組み合わせたハイブリッドな貫入システムである。EAPSは二重管構造を有しており、外管の内側にはボーリングロッドと掘削ヘッド、ワイヤラインに吊るした各種コーン、およびサンプラーなどが通る構造になっている。柔らかい層内をCPTで貫入し、硬い地層にあたった時(手順1)、管内をコーンから掘削ヘッドに着け替えて硬い地層を掘進し(手順2)、外管をその下位に堆積している柔らかい層に進めて(手順3)、再びコーンを装着して貫入試験を再開する(手

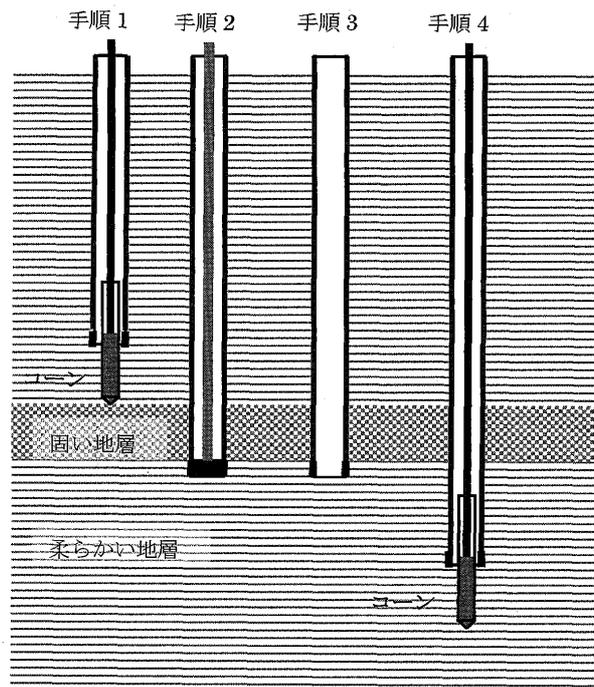


図-1 静的貫入とボーリングを地盤に応じて実施できるEAPSシステムの概念図

順4)。これにより、中間砂礫層や局所的な硬質層で試験がストップしてしまうリスクを除くことができるため、日本のような地盤環境には大変参考になるシステムである。写真-1に示すように、米国では貫入に使用する油圧ジャッキは20t級の大型トラックに搭載されているが、日本では街中の狭隘な地域での調査も多く、そのため特殊なアンカーを用いたポータブルな反力装置が既に開発されており、これをEAPSのような技術と組み合わせることによって日本における貫入システムの問題をクリアできる可能性が見えてくる。

3. CPTの基準改定に向けた一斉試験

CPTに関する地盤工学会の現行基準¹⁾を近い将来ISOやASTMの基準と整合させながら更新していく必要がある。本研究委員会では、これに向けて、CPTによって得られる情報が品質の揃った(地盤そのもののばらつきではなく、装置や試験法に起因するばらつきが出ないという意味)、かつ十分な信頼性を有するものとなるためにはどのような基準が求められるのかという視点で一斉試験を実施した。

現行基準が内包する課題の一つとして、コーン周面摩擦 f_s が基準化されていないことがあげられる。これは、基準化に向けて前回実施された一斉試験の f_s のばらつきが大きく、信頼性に足る情報が集積されなかったという理由で基準に取り入れることができなかったためである。ところが、世界の趨勢として、コーン先端抵抗 q_c と f_s の関係によって土質分類を行う²⁾ことが一般化していることを受けて、WG1では f_s の基準化が可能であるのかどうかについて、そのばらつきの要因分析を含め、徹底的に検証することとした。考慮しなければならないファクターとして、温度変化、フリクションスリーブの



写真-1 米国ARA社(Applied Research Associates, Inc)のEAPSシステムの野外実演を見学後、EAPSシステムを背景にした調査団と米国側関係者(米国ヒューストン郊外の野外現場にて)。左から宮坂(団員)、田中(団員)、神宮司(団員)、兵動(団長)、James D. Shinn II(VERTEK社の副社長)、(EAPSのサブオペレーター)、(EAPSのオペレーター)、足立(団員)、多賀谷(団員)

表面粗度，フリクションスリーブ部とコーン先端部の断面積の差，測定方式をピックアップした。外気温と地中温度の差によってひずみゲージを貼り付けた金属部分の変形が生じ，この変化をひずみゲージが探知することによって，本来地盤とコーンシャフトの摩擦によって生じるものに金属の温度による変形分が上乘せされた測定値が検出されることが比較実験によって明らかにされている³⁾ので，今回の一斉試験では，貫入前後に所定の時間，温度を管理した水中にコーン本体を水浸させてゼロ点をとるとともに，貫入前の本体温度を一定とした。また試験後にも同じ温度になるまでコーン本体を水浸させることにより，貫入に伴うゼロ点のドリフトの有無をチェックした。また土中の温度は温度センサーを内蔵したコーンで測定し，測定値の温度補正に対応できるようにした。フリクションスリーブの表面粗度については粗度計によって試験前後にチェックし，測定方式とフリクションスリーブ部の断面積については事前に確認し，間隙水圧フィルターの材質，水圧測定部の飽和化に用いる流体と飽和化の方法など，細かく項目を設定して比較検討の材料とした。貫入装置はすべての試験で同じものを使用し，コーン貫入試験機本体のきめ細かい品質管理を行うことによって，共通条件下でのデータ集積を図ったことによって，高品質のCPT測定データが得られたものと自負している。個々の結果と考察については本特集文献4)，5)を参照されたい。

4. 地盤の地域性と基準～統一した世界標準は可能か？～

ヨーロッパの基準として構築されているものとしてEurocode7のCPTに関する基準を見ると，装置の性能によって使用目的を細かく規定している。誌面の都合で大雑把な議論となるのをお許しただいて一例を紹介したい。CPTを実施して得られる情報はすべての用途に適用されるものと読者もお考えになっていると思う。しかしながら，Eurocode7ではcategoryが1から4まで分かれており，測定項目や精度によって，地盤の力学パラメータを求めて設計に使用してもよいものから，単に土質区分を行うためだけに使用することとなっているものまで，幅をもって規定されている。例えば，設計につながる力学定数を設定するという目的にはコーン先端抵抗 q_t の測定誤差が100 kPa以内でないといけないことになっている。 q_t 用のセンサーの定格が小さければ，分解能は高くなり，大きければ低くなる。ヨーロッパのように河川の流路勾配が小さく，軟弱地盤が広く一様に堆積するような環境であれば，さほど強度が大きくならないので小さい定格のセンサーを使うことができ，測定値の分解能を上げることができる。つまり，100 kPaの分解能が現実性をもって議論できるわけである。これに

対して我が国のように，河口デルタであっても粗粒土が混じり，柔らかい粘土層と硬質の砂礫層の互層構造が珍しくないような地盤に対しては，こうした硬質部分を貫入するために大きな反力装置とコーン先端抵抗測定用に定格の大きなセンサーを装備しなくてはならず，当然測定値の分解能は落ちる。このため，現在我が国で一般的に使用されているコーンでは100 kPaの分解能を軟弱粘土地盤に対して課するのは難しい。日本の基準とEurocodeをベースとしたISOの基準を整合させることを考えるのであれば，こうした地盤の地域性に関わる問題をうまく取り扱わなければならない。2.で紹介したようなシステムが期待できるとしたのはこうした背景があったことである。この種の問題は，CPTに限ったことではなく，SPTやスウェーデン式ウェイトサウンディング試験(SWS)でも同様である。日本で長く行われてきた試験法の独自性とISOで求められる客観性の折り合いをどのようにつけていくのか，説得力を持ったロジックが強く求められる。

5. おわりに

CPTはコーン先端抵抗，コーン周面摩擦，間隙水圧という異なる三つの指標を深さ方向に連続的に得ることができるという特長を有しており，世界で最もよく使われている試験法である。ただ一方で，砂礫層やよく締まった中間硬質層が存在すると貫入不能に陥ったり，座屈による本体の破損，曲がりといったトラブルが起りやすいという欠点も合わせ持っている。我が国においてCPTがSPTの後塵を拝している理由の一つもこの点にある。本研究委員会では，技術の進歩によってこうした問題を解決するとともに，世界標準との整合性を図り，さらには環境，エネルギー分野に代表される新分野へのCPTの展開を目指した技術開発に注目して共同研究を進めてきた。その成果の一端が本特集において紹介されているので是非ご一読いただきたい。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2004。
- 2) Robertson, P. K.: Soil Classification Using the Cone Penetration Test, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151~158, 1990.
- 3) 三村 衛・吉村 貢：多機能型RI密度コーン貫入試験機の開発と測定精度向上に関する研究，土木学会論文報告集，C, Vol. 63, No. 2, pp. 649~661, 2007.
- 4) 末政直晃・片桐雅明・飯沢 誠：コーン貫入一斉試験2007，地盤工学会誌，Vol. 57, No. 8, pp. 16~19, 2009.
- 5) 吉村 貢・齊藤邦夫・利藤房男：CPT結果のばらつきの要因分析，地盤工学会誌，Vol. 57, No. 8, pp. 20~23, 2009.

(原稿受理 2009.5.15)