

原位置試験の小型・高精度化の現状

The Present Status on Miniaturize and High Precision of In-Situ Tests

村 田 芳 信 (むらた よしのぶ)
応用地質(株) 中部支社技術部 部長代理

橋 久 生 (たちばな ひさお)
興亜開発(株) 中部支店技術課 課長

百 瀬 忍 (ももせ しのぶ)
基礎地盤コンサルタンツ(株) 関東支社

梅 崎 健 夫 (うめざき たけお)
信州大学助教授 工学部社会開発工学科

鈴 木 耕 司 (すずき こうじ)
東亜建設工業(株) 土木本部設計部 担当課長

1. はじめに

我が国では原位置試験をサウンディングと称するように、標準貫入試験 SPT を例外として、ボーリングやサンプリングなどの調査の補助的もしくは補間的な役割として利用されることが多い。しかし、最近では試験結果に対する理論的な解釈や実務への適用が進み、簡便で精度の良い地盤評価に活用され、より広範な地盤への適用が図られている。その一方で、我が国特有の複雑な地盤構成においては、依然として試料採取を伴わない原位置試験の適用に難色を示す場合が多く、また実際に礫層などに阻まれて試験が不可能となる場合も少なくない。

このような背景の中で、原位置試験の小型化に関する取り組みは、宅地や舗装ならびに斜面の表層の調査に限られているものの、センサーの小型化や高精度化、計測ならびに解析の自動化、さらには現地の計測作業の省力化が図られ、総じて原位置試験の高精度化に寄与する技術が多く研究開発されている。

本報文は、原位置試験の小型・高精度化技術の現状と今後について、研究委員会の原位置試験 WG の文献調査ならびに一斉調査の結果¹⁾の報告と併せて述べる。

2. 文献調査結果

2.1 原位置試験の小型・高精度技術の体系区分

原位置試験の小型・高精度化技術を表一 1 に示す。

小型化に関する技術では、試験装置の搬入や試験の手間を省力化し、経済的な調査を実現しようとする開発が行われている。これらは、装置自体の小型化を図るものと、開発が進む小型センサーを活用するものに区分できる。一方高精度化は、センサー自体の高精度化、測定や解析技術の発展による結果の解釈の高精度化、自動計測による確実性と高密度なサンプリングとその処理によるデータの高精度化、さらに他の付加情報の同時測定による測定結果の活用や解釈技術の高精度化など多岐にわたる。さらに、光ファイバー技術や情報インフラの活用による計測の高速化ならびに遠隔化などは、今後原位置試験や現場計測技術の小型化・高精度化を促進する技術

表一 1 原位置試験の小型高精度化技術の体系区分

区 分		区分に相当する主な個別の技術
小型化	装置の小型化	小型化した標準貫入試験、小型動的貫入試験、小径電気式コーン貫入試験、押込み型孔内水平載荷試験、地盤簡易支持力測定、小型 FWD 試験、動的平板載荷試験(動的 CBR 試験)
	センサーの小型化	マイクロマシニング、小型デジタルカメラ、
高精度化	センサーの高精度化	デジタライズ圧力計、レーザー変位計
	測定・解析技術による高精度化	セルフボーリングプレッシャーメータ試験、原位置せん断摩擦試験、ダイラトメータ試験、高精度表面波探査、
	自動化による高精度化	全自動標準貫入試験、オートマチックラムサウンディング試験、全自動スウェーデン式サウンディング試験、計測ボーリング技術、海底着座式コーン試験、コードレス CPT、自動モニタリングシステム、スラグ透水試験
	付加情報による高精度化	N ベーン試験、二重管式標準貫入試験器、打撃効率測定した標準貫入試験、振動給圧式サウンディング試験、水平応力コーン試験、コーンプレッシャーメータ試験、サイスミックコーン試験、電気抵抗コーン試験、RI コーン試験、二重レンジコーン試験、ビデオコーン試験
小型化・高精度化を促進する技術		光ファイバー技術、情報インフラ活用技術

として注目される。

2.2 動的貫入試験ならびに計測ボーリング

(1) 標準貫入試験 SPT を活用する技術

① JIS A 1219-2001「標準貫入試験 SPT」；使用装置の規格化ならびに自動化による高精度化の推進が図られた。② 小型化した SPT (山田ら, 1995)；SPT と相似形の小型貫入試験装置を用いて土槽実験による砂地盤への適用性を研究した。③ N ベーン試験 (湯川ら, 2002)；標準貫入試験用サンプラーに高さ 4.8 mm、長さ 100 mm の羽根を 6 ないし 12 枚装着した N ベーン試験装置を開発し、SPT と同様に打撃貫入する途中で 10 cm 毎にロッドを回転させトルクを計測した。④ 二重管式標準貫入試験器 (伊豫屋ら, 2002)；SPT 用サンプラー内に、内径 35 mm、外径 38 mm、長さ 100 mm のインナーチューブ 6 本を装着して、チューブ内に採取された試料の湿潤密度を測定した。⑤ 打撃効率測定した SPT (Ohno & Fujita, 2001)；SPT の 1 打撃毎に打撃効率 e を測定することで、品質保証された N 値の評価を可能とした。

(2) 動的貫入試験を活用する技術

論文

①SK 型簡易貫入試験（水谷ら，2000）；小型の自動貫入試験装置を開発し， N 値評価への適用性を実験研究した。②オートマチックラムサウンディング試験 SRS（石原ら，2002）；SRS と SPT の打撃エネルギー効率を測定し，SRS による N 値評価の適用性を実験研究した。③小型動的貫入試験（伊藤ら，2002）；SRS の 1/2 の打撃エネルギー効率を持つ小型の自動貫入試験装置の N 値評価と粘性土層への適用性を実験研究した。

(3) 計測ボーリングを活用する技術

①計測ボーリング技術；ボーリング掘進や油圧式パーカッションドリルによる貫入掘進に伴い，ドリリングパラメータと称される計測データを取得して地盤を評価する技術で，MWD 検層，エンパソル，PAPER0 システム，回転式大型貫入試験，ロータリー式サウンディングなどがある。②振動給圧式サウンディング（我妻ら，2002）；ドリリングパラメータの軸力とトルクを計測して，地盤の見かけの粘着力と内部摩擦角を評価した。③せん断波による地盤評価技術（村田ら，2002）；打撃貫入に伴って発生する地盤のせん断波（ S_v 波）を地表で観測し，その到達走時から地盤の速度構造を評価し，さらに S_v 波の振幅と N 値の関係を実験研究した。

2.3 電気式コーン貫入試験 CPT

①水平応力コーン（UBC lateral stress cone, 1986. 酒井ら，1989. 武居ら，1999）；先端コーンより地上側の側面に水平応力測定用の圧力計と間隙水圧計を備えた装置を開発し，CPT の貫入と同時に有効水平応力を連続的に計測した。②コーンプレッシャーメータ（LPC pressiopenetrometer, 1982. Fugro-McClelland cone pressuremeter, 1986）；先端コーンより地上側にプレッシャーメータを内蔵し，所定の深度で CPT の貫入を中断してプレッシャーメータ試験を実施する装置を開発した。③サイズミックコーン（UBC seismic cone, 1986. 2 レシーバ型サイズミックコーン，小林ら，1995）；先端コーンに受振機（地震計）を内蔵し，所定の深度で CPT の貫入を中断し，地表で起振した地震波を観測して地盤の弾性波速度を測定する装置を開発した。④電気抵抗コーン（Delft Geotechnics, 1985. 電導コーン，福江ら，1997）；先端コーンより地上側に円周状の電極を備える装置により，CPT と同時に土の比抵抗を測定した。⑤RI コーン（Delft Geotechnics nuclear insitu density probe, 1985. RI コーン，柴田ら，1991）；ラジオアイソトープによる密度ならびに含水比測定用の試験装置を開発し，CPT と同時に測定した。⑥海底着座式コーン（酒井ら，1992）；海底（湖底）地盤の表層を自動で貫入試験する装置を開発した。⑦二重レンジコーン（菅原ら，1993）；先端コーンに大小二つの荷重計を内蔵し，軟弱な地層から締まった砂層の先端抵抗を精度よく測定する装置を開発した。⑧ベーンブレードを組み込んだ貫入試験機（牛くら，1993）；先端コーンより地上側にベーンブレードを備え，所定の深度で CPT の貫入を中断し，ベーンせん断試験を実施する装置を開発した。⑨ビデオコーン（ファイバースコープ挿入型貫入試験機，

酒井ら，1991）；先端コーンより地上側の側面に防水された硬質ガラス窓を備えて壁面をビデオ撮影し，色調や粒径を調べた。⑩ミニコーン（Fugro SEASCOUT seabed cone penetration system. 伊藤ら，2003）；先端コーンの断面積が 2 cm^2 の小径三成分コーンを開発し適用した。⑪コードレスコーン（田中ら，1991. フリクションカット装置を用いたコードレスコーン，宮西ら，2001. Fugro's downhole XP system, after Hawkins & Marcus, 1998. 音響コーン，室町，1981）；先端コーンの信号を音波に変換し，ロッドを伝送して地表のマイクロホンで受信する装置を開発した。

2.4 プレッシャーメータ試験 PMT

①セルフボーリングプレッシャーメータ SBP（深川ら，1994, 1996. Tani et al., 1995.）；自らが掘進し，載荷部を地中に挿入する SBP は，地盤の変形係数だけではなく，せん断強度，静止土圧などを精度よく評価できる。②ミニチュアプレッシャーメータ（深川ら，1989）；室内三軸試験のセル内での実験研究を目的として，プローブ高さ 100 mm ，外径 16.4 mm の載荷試験装置を作成した。③コーンプレッシャーメータ（Schnaid and Houlsby, 1992, 1994）；断面積 $5, 10, 15\text{ cm}^2$ のコーンプレッシャーメータを作成し，コーン断面積がプレッシャーメータ試験へ与える影響を検討した。④押込み型孔内水平載荷試験（Murata et al., 1995. 田村ら，1998）；中空で筒状の断面積 28 cm^2 （直径 6 cm ）の押込み型の孔内水平載荷試験装置を開発した。⑤ダイラトメータ試験 FDMT（土谷ら，1989. 岩崎ら，1994）；FDMT はイタリアの Marchetti が 1980 年に開発したダイラトメータブレード（幅 95 mm ，厚さ 14 mm ，鋼製メンブレン直径 60 mm ）を用いた載荷試験で，国内の地盤への適用性を実験研究した。

2.5 その他の原位置試験

①自動スウェーデン式サウンディング WST（田村ら，2002）；宅地の支持力調査に用いられている WST の自動化装置の性能について検討。②原位置せん断摩擦試験 SBIFT（徐ら，1997）；セルフボーリング方式で測定装置を孔壁に隙間無く設置し，水圧で孔壁に測定器側面のフリクションプレートを加圧した後，ロッドにより引抜き載荷した時の引抜き力と変位を測定して，杭周面のせん断地盤反力係数を評価した。③地盤簡易支持力測定器（キャスポル，近畿技術事務所）；締固め用の質量 4.5 kg のランマー（先端は外形 50 mm の円筒）に加速度計を内蔵して， 45 cm の高さから自由落下させた場合の加速度の最大値からインパクト値 I_a を求める試験。④小型 FWD（土木学会，2002）；新しい道路の載荷試験手法で，重錘（質量 30 kg 以下）を落下させることで衝撃荷重を発生させ，このときに発生する衝撃荷重と載荷点直下のたわみ量を測定する試験。⑤動的平板載荷試験 & 動的 CBR 試験（ドイツ運輸省道路・交通研究所 TP BF-StB, 1992）；質量 10 kg の重錘を用いて施工基面に 7.07 kN の衝撃荷重を与え，このときに生じる載荷板の最大沈下量 s を測定する試験。⑥T-bar（Randolph et al.,

1998)；直径40 mm，長さ250 mm の円筒を水平にして，CPT と同様の20 mm/s で鉛直に貫入するときの抵抗値を測定した。

3. 一斉調査結果

3.1 一斉調査における原位置試験

一斉調査では，沖積層の粘土地盤を対象として，次の原位置試験を実施した（口絵写真1～9）。

①高精度表面波探査，②電気式コーン貫入試験 CPT（標準コーン10 cm²，ミニコーン2 cm²，RI コーン10 cm²），③ベーン試験，④N ベーン試験，⑤小型動的貫入試験，⑥押し込み型孔内水平載荷試験。

3.2 各原位置試験の結果とせん断強さの評価

調査地は，谷幅100 m ほどの谷底低地にあたり，谷を横断する測線の高精度表面波探査で求めた二次元S波速度分布図を口絵写真10に示す。谷には，船底型にS波速度が20～40 m/s と非常に遅い速度層が深さ8 m 以上で分布し，非常に軟弱な地層であることがわかる。

ついで，CPT の結果より，先端コーンの断面積が10 cm² の標準コーンならびにRI コーンと，断面積が2 cm² の二種類のミニコーンで求めた有効先端抵抗 q_t ，間隙水圧 u ，周面摩擦力 f_s を口絵写真11に一覧する。コーン断面積の違いにより貫入に伴う排土量の違いが生じるため，排土量の小さいミニコーンの u の値が小さくなるがわかる。また， q_t ならびに f_s はいずれも同様に小さな値を示すが，深さ3～7 m 間で f_s が特徴的に大きくなり u が低下する。RI コーンの結果によれば，この間の湿潤密度は $\rho_t=1.0$ g/cm³ で含水比は1 000%以上を示すことから，有機質粘土層と考えられる。

各種の原位置試験結果より，対象土を粘性土と仮定した場合の非排水せん断強さ c_u を評価し，図1に示す。図中には，一軸圧縮強さ q_u から $c_u=q_u/2$ として求めた値を併示する。

CPT から c_u を求める場合には， $c_u=(q_t-\sigma_{v0})/N_{kt}$ という関係式を用いて，国内の粘性土であれば N_{kt} の値を8～16（田中²⁾）程度とする。図1では， $N_{kt}=4$ としても，他の c_u 分布とは異なる傾向を示す。このような q_t が非常に小さな軟弱地盤においては，図2に示すように， c_u と f_s の関係に強い相関性が見られることから，新しい評価法が検討されている（梅崎¹⁾）。

一方，ベーン試験とPMTの結果より評価した c_u はよく一致し， q_u から求めた c_u のほぼ平均的な値を示すことがわかる。

また，SPT では深さ9 m まで N 値=0 であるのに対して，小型動的貫入試験では有機質粘土層で貫入抵抗値 N_d が得られた。しかし， N_d から評価される c_u （=25 N_d ）はばらつきが大きく，有機質粘土層中の混入物の影響を受けると考えられる。

4. おわりに

原位置試験の魅力は，採取や再現の難しい原位置での

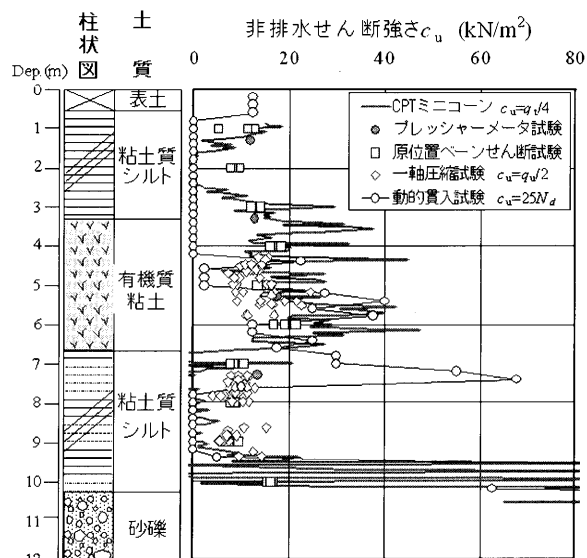


図1 各原位置試験結果から評価した非排水せん断強さ

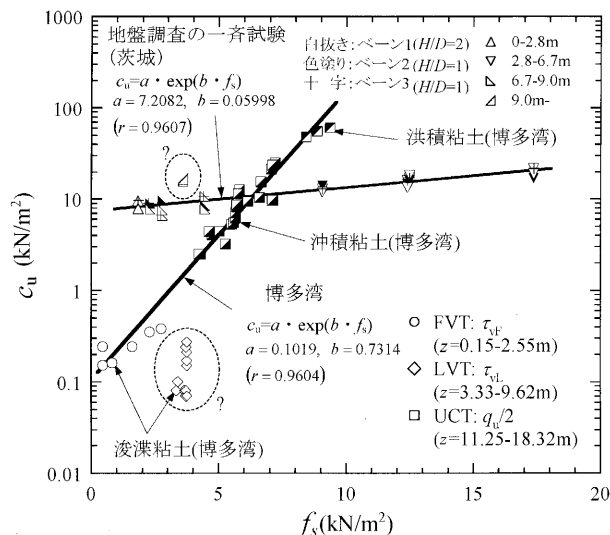


図2 軟弱地盤におけるコーン貫入試験の周面摩擦と非排水せん断強度の関係

試験が実施できる点にあるが，他に結果の迅速性やデータの連続性など調査の効率性や経済性という点でも大きな利点と考えられる。加えて，性能設計の導入や調査における地盤のばらつきに対する信頼性評価の必要から，原位置試験の活用がますます期待される。

今後原位置試験の高精度化は，作業の効率性や省力化，すなわち小型化と一体となって図られるものであり，その影響を含めて解釈や評価方法の技術の発展が望まれる。

参考文献

- 1) 地盤工学会：最近の地盤調査・試験法と設計・施工への適用に関するシンポジウム，7.6 設計・施工・管理への適用のための試みと課題，pp. 226～229，2006。
- 2) 田中洋行・田中政典：電気式静的コーン貫入試験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。

(原稿受理 2006.4.3)