

荷重計測を伴うピエゾドライブコーンの開発

吉澤大造*・植村一瑛*・藤井紀之*・信本 実**

Development of Piezo Drive Cone with load measurement

Daizo YOSHIZAWA*, Kazuaki UEMURA*, Noriyuki FUJII* and Minoru NOBUMOTO**

Abstract

Piezo Drive Cone (PDC) is dynamic sounding equipment that measures pore water pressure response in the ground using a pressure sensor within a cone at the rod apex during dynamic penetration. PDC evaluates not only ground dynamic penetration resistance, N_d value, which is equivalent to N value, but also Fine Fraction Content (F_C) which is required for liquefaction susceptibility calculations. Like other dynamic cone penetration tests, PDC tends to overestimate N_d values at greater depths as the surface friction of a rod increases. To solve the problem, we measured the rod energy at the head and tip of the rod during penetration, and investigated the N_d value correction in terms of energy efficiency. Energy measurements of the mini-ram sounding showed that the energy at rod head was relatively stable regardless of depth. In contrast, the energy at the rod tip decreased as depth increased. Energy at rod tip also varied in relation to N value. The energy measured at the rod tip was used to correct the potential energy of the hammer and to calculate the N_d value. Obtained N_d values were consistent with the N values at depths greater than 10m to 15m, that had been problematic before. Based on the results, we have developed an-intelligent Piezo Drive Cone (iPDC), that consists of a two-component dynamic cone penetration test device equipped with a load cell on the rod tip of the PDC cone.

Keywords: In situ, N_d value, Energy efficiency, Liquefaction

要 旨

ピエゾドライブコーン（以下，“PDC”という）は、ロッド先端のコーンに内蔵した圧力センサで貫入時に地盤で発生する間隙水圧の応答値を測定する動的コーン貫入試験装置であり、 N 値に相当する動的な貫入抵抗 N_d 値に加えて、液状化判定に必要とされる細粒分含有率 F_C を評価することができる。一方、PDCは他の動的コーン貫入試験（以下，“DCPT”という）と同様に調査深度が深くなりロッドの周面摩擦による抵抗が大きくなると、 N_d 値が過大評価される点が指摘されている。そこで、DCPTによる貫入時のロッド頭部およびロッド先端部でのエネルギーを計測し、エネルギー効率を考慮した N_d 値の補正について検討した。その結果、ロッド頭部に伝達されるエネルギーは概ね安定した値を示すのに対して、ロッド先端部に伝達されるエネルギーは深度方向に減少傾向を示し、 N 値の大小に同調して変動することが明らかになった。また、 N_d 値についてはロッド先端部においてエネルギー効率の補正を行うことで、これまで課題とされていた GL-10m～-15m 以深においても N 値と良く一致する結果を得た。これらの検討結果を踏まえ、PDC のロッド先端のコーンに荷重計を追加した 2 成分動的コーン (intelligent Piezo Drive Cone, 以下，“iPDC”という) を開発した。

キーワード：原位置試験、 N_d 値、エネルギー効率、液状化

*応用地質（株）エンジニアリング本部 **応用地質（株）東京支社

*OYO Corporation Engineering Headquarters, **OYO Corporation Tokyo Regional Office

1. まえがき

ピエゾドライブコーン貫入試験（以下，“PDC”という）は、圧力センサを内蔵したコーンをハンマーの打撃で地盤に貫入し、1打撃毎の貫入量と貫入時の間隙水圧の応答値を計測する動的コーン貫入試験（以下，“DCPT”という）である¹⁾。貫入量からは、標準貫入試験（以下，“SPT”という）の N 値に相当する地盤の動的な貫入抵抗 N_d 値（以下，“ N_d 値”という）を算出する。間隙水圧は、細粒分含有率 F_c の評価に用いる。PDC の最大の特長は、液状化判定に必要とされる N_d 値と細粒分含有率 F_c が一打撃毎に得られることである。

DCPT の長所は、圧入式のコーン貫入試験と異なり反力装置を必要とせず、試験装置がコンパクトなことである。また、SPT は 1m に 1 回の試験間隔に対して、DCPT は連続して試験を行うため、得られるデータの量が豊富である。一方、短所としては、原位置の土を採取しないことから土質判別ができない点があったが、PDC は間隙水圧を計測することでこの問題を解決している。もう 1 つの短所は、試験の適用深度である。図 1 に DCPT と SPT の試験条件の比較図を示す。SPT は試験に先立ってサンプラーよりも大きめの孔径で事前削孔を行うのに対し、DCPT は事前削孔を行わずに地表から連続的に貫入するため、深度が深くなるとロッドの周面摩擦による抵抗が増す。このため、DCPT はロッドの回転トルクを測定してロッドの周面摩擦分の抵抗値を差し引く補正やロッドを回転させて周面摩擦を軽減させる作業が行われる場合があるが、深度が深くなると N_d 値が N 値よりも過大となる。特に、PDC は間隙水圧測定の場合上からロッド中に電気ケーブルを通してあり、周面摩擦を軽減させるためのロッドの回転を多く与えられない。PDC にミニラムサウンディングの貫入装置を使用した場合、GL-10m～-15m 以深の N_d 値が N 値よりも過大となる場合があることが確認されている²⁾。そこで、ロッド頭部およびロッド先端部においてエネルギー計測を行い、 N_d 値についてロッドの周面摩擦等の影響をエネルギー効率で直接的に補正することを検討した。

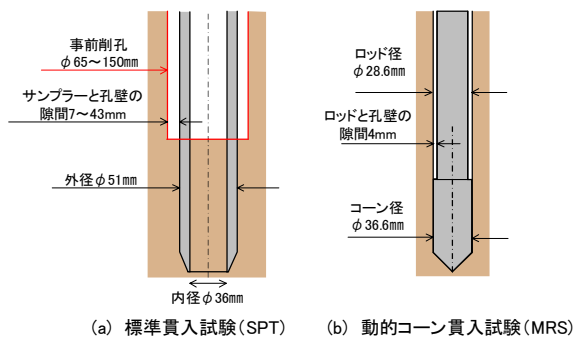


図 1 標準貫入試験と動的コーン貫入試験の貫入条件の比較

2. PDC の貫入装置とエネルギー効率

2.1 PDC の貫入装置

PDC は、貫入装置に既存の DCPT を使用している。DCPT は、先端にコーンおよび頭部にアンビルを取り付けたロッドを地盤に立て、ハンマーを一定の高さから自由落下させてアンビルを打撃し、貫入量と打撃回数を測定する試験である。試験は、ロッドを継ぎ足す際に一時停止するが、調査を終了する予定深度に達するまで連続して行う。表 1 に、PDC が使用している貫入装置を示す。

スウェーデン式ラムサウンディング（以下，“SRS”という）は、1970 年代に日本に導入された初めての自動式動的コーン貫入試験機である。SRS のハンマー質量（63.5kg）は SPT と等しく、ハンマー落下高が 500mm であるが、打撃回数を計測する所定の貫入量を 200mm とすることで、単位貫入量あたりの打撃エネルギーを SPT と等しく設計されている³⁾。

ミニラムサウンディング（以下，“MRS”）は、SRS を小型化した貫入装置で、ハンマー質量 30kg、落下高 350mm、コーン底面積 1052mm² である。表-1 に示すように、ハンマーの持つ位置エネルギー E^* ($=M \cdot g \cdot h$) をコーン底面積 A_c で除した単位面積当たりの打撃エネルギー ($=M \cdot g \cdot h / A_c$) が SRS の 1/2 となるように設計されている⁴⁾。

μ PDC は、宅地の調査用に開発した MRS より更に小型な貫入装置である⁵⁾。貫入装置の仕様は、ハンマー質量 20kg、落下高 250mm、コーン底面積 503mm² である。単位面積当たりの打撃エネルギー ($=M \cdot g \cdot h / A_c$) は、表 1 に示すように MRS と概ね等しく設計されている。

2.2 動的貫入試験のエネルギー効率

ハンマーの自由落下による動的貫入試験では、ハンマーの持つ位置エネルギー E^* がロッド先端に伝達される過程で一部消費されることが過去の研究で明らかとなっている⁶⁾。図 2 に動的貫入試験におけるエネルギーの変化とエネルギー効率の概念図を示す。ハンマーの持つ

表1 貫入装置の仕様

| 貫入装置 | | SRS | MRS | μ PDC |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------|-------|-----------|
| ハンマー | 質量 M (kg) | 63.5 | 30.0 | 20.0 |
| | 落下高 h (mm) | 500 | 350 | 250 |
| コーン | 先端角 ϕ (°) | 90 | 90 | 90 |
| | 直径 D_c (mm) | 45.0 | 36.6 | 25.3 |
| | 底面積 A_c (mm ²) | 1,590 | 1,052 | 503 |
| ロッド | 外径 D_r (mm) | 33.5 | 28.6 | 19.0 |
| 打撃エネルギー (ハンマーの位置エネルギー) $M \cdot g \cdot h$ (kJ) | | 0.311 | 0.103 | 0.049 |
| 単位面積当たりの打撃エネルギー $\frac{M \cdot g \cdot h}{A_c}$ (kJ/m ²) | | 195.8 | 97.9 | 97.6 |
| SRS に対する単位面積当たりの打撃エネルギーの比 | | — | 0.50 | 0.50 |

SRS : スウェーデン式ラムサウンディング

MRS : ミニラムサウンディング

μ PDC : マイクロピエゾドライブコーン

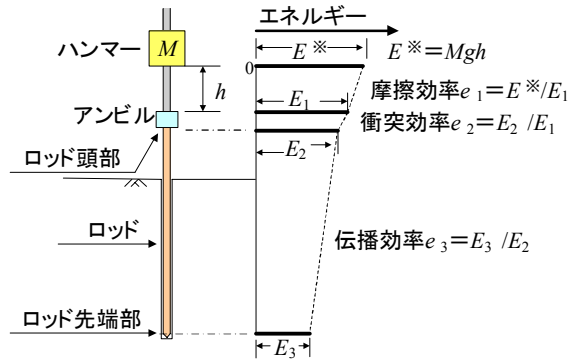


図2 動的貫入試験におけるエネルギーの変化とエネルギー効率の概念図

位置エネルギー E^* は、ハンマーが落下する過程でガイドロッドと生ずる摩擦、アンビルとの衝突時のハンマーの横振動、ロッドの撓みや周面摩擦により消費されながら、ロッド先端に伝達される。それぞれの過程における効率は、以下のように定義される。

$$\text{摩擦効率 } e_1 = E_1 / E^* \quad (1)$$

$$\text{衝突効率 } e_2 = E_2 / E_1 \quad (2)$$

$$\text{伝播効率 } e_3 = E_3 / E_2 \quad (3)$$

$$\text{打撃効率 } e_{12} = e_1 \cdot e_2 = E_2 / E^* \quad (4)$$

E^* : ハンマーの持つ位置エネルギー ($E^* = M \cdot g \cdot h$)

E_1 : 衝突直前の運動エネルギー

E_2 : 衝突直後にロッド頭部に伝達されたエネルギー

E_3 : ロッド先端に伝達されたエネルギー

なお、一般的には摩擦効率 e_1 と衝突効率 e_2 を乗じた e_{12} を打撃効率と呼んでいる。SPT については、ハンマーの落下方法によって打撃効率 e_{12} が変わる (0.63~0.90) ことが既往の研究で示されている⁷⁾。

従来の N_d 値の算出式は、貫入装置の単位面積当たりの打撃エネルギー ($=M \cdot g \cdot h / A_c$) によるエネルギー補正は考慮されているが、打撃エネルギーがロッド先端に伝達される過程でのエネルギー損失は考慮されていない。 N_d 値を精度良く評価するためには、また、ロッドの周面摩擦の影響を適切に補正するためには、打撃エネルギーがロッド先端に伝達される過程でのエネルギー損失を考慮する必要がある。そこで、MRS の打撃効率 e_{12} および伝播効率 e_3 を現場実験により求めた。

3. MRS のエネルギー計測およびエネルギー効率に基づく N_d 値の補正

3.1 エネルギー計測の概要

動的貫入試験のエネルギーの計測方法としては、ロッド頭部付近でひずみと加速度を測定する CASE 法⁸⁾やロッドの周面摩擦の影響を受けない異なる 2 点でひずみを測定する 2 点ゲージ法⁹⁾がある。これらの試験法は、ハンマーの打撃によるロッドのひずみや加速度を地上

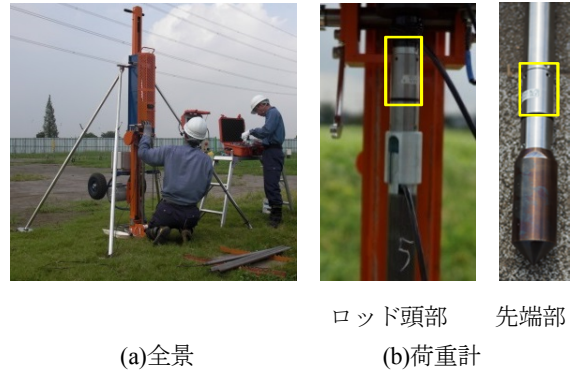


図3 MRS のエネルギー計測状況および試験装置

部で計測し、一次元波動理論に基づきロッド先端部のエネルギーを推定するものである。

本計測では、ロッド先端部に伝達されたエネルギーを直接的に評価するために、ロッドと同じ直径で地盤中に貫入することが可能な荷重計を製作した。図3にエネルギーの計測状況、ロッド頭部およびロッド先端部の荷重計を示す。荷重計は、圧縮型ひずみゲージ式荷重変換器 (定格容量 100kN, 日本特殊測器(株)製) である。

変位計には、PDC で使用している磁歪式変位計 (サンテスト(株)製) を用いた。計測時間は、1 打撃につき打撃の 0.01 秒前から貫入が概ね終了する 0.2 秒間とし、予定深度まで連続的に計測した。

なお、従来のロッドの周面摩擦の補正方法とエネルギー効率に基づく補正 N_d 値を比較するために、ロッドの回転トルク M_v を計測した。

3.2 エネルギーの算出方法

ロッド頭部のエネルギー E_2 およびロッド先端部のエネルギー E_3 は、荷重および貫入速度を用いて(5)式より算出した。荷重は、ロッド頭部およびロッド先端部のそれぞれの位置で計測した荷重を用いた。貫入速度は、地上で計測した変位を微分して求めた。

なお、ロッド先端部の荷重は、地上で計測した変位より初動が遅れるため、(7)式と(8)式より初動の遅れを補正した。

$$E = \int_0^{0.2} F(t) \cdot v(t) dt \quad (5)$$

$$v(t) = \frac{dP(t)}{dt} \quad (6)$$

E : エネルギー (J)

$F(t)$: 荷重 (N)

$v(t)$: 貫入速度 (m/sec)

$P(t)$: 貫入量 (m)

t : 計測時間 (sec)

$$F(t) = F(t + \Delta t) \quad (7)$$

$$\Delta t = L_r / V_p \quad (8)$$

$F(t)$: 計測開始から時間 t (sec) 後の荷重

- Δt : 荷重計の初動遅れ補正量 (sec)
- V_p : ロッドを伝播する P 波速度 (m/sec)
(棒状の鋼材は 5,120m/sec と設定)
- L_r : ロッド長 (m)

3.3 エネルギーの計測結果

エネルギーの計測は、表 2 に示す 3 地点で実施した。実験場所には、液状化の対象となる砂質土が分布する自然地盤、臨海部の埋立地、内陸部の造成地を選定した。

図 4 に、荷重、貫入量の計測データおよび貫入速度の一例を示す。なお、砂質土の N 値は 12、粘性土の N 値は 2 である。ロッド頭部では、土質や N 値に依らず概ね同様な荷重応答を示すのに対し、ロッド先端部では N 値の小さな粘性土が砂質土よりも小さな荷重応答を示した。一方、貫入量は砂質土が 4mm、粘性土が 7mm であり、 N 値の小さな粘性土が砂質土よりもやや大きめの貫入量を示すが、 N 値やロッド先端部の荷重応答のような顕著な差は見られない。SPT は、試験に先立ってサンプラーよりも大きめの孔径で事前削孔を行うため、ロッドの周面摩擦の影響は小さい。ロッド先端部で計測した荷重は、ロッドの周面摩擦を含まないコーン先端の貫入抵抗であることから、 N 値に応じた荷重応答の明瞭な違いが見られたと考えられる。一方、貫入量はコーンの先端抵抗とロッドの周面摩擦の影響を受けるため、 N 値ほどの顕著な差は見られなかったと考えられる。

図 5 に、従来の方法で周面摩擦の影響を補正した N_d 値およびボーリングによる N 値、ロッド頭部のエネルギー E_2 およびロッド先端部のエネルギー E_3 、打撃効率 e_{12} および伝播効率 e_3 の深度分布を示す。なお、 N_d 値の深度分布図にはロッドの回転トルク M_v を併記した。

MRS による従来の周面摩擦の補正式を(9)式に示す。従来の方法で周面摩擦の影響を補正した N_d 値は、GL-10m 付近までは N 値と調和的であるが、GL-10m 以深は N 値よりも大きな値を示している。特に、地点 1 と地点 3 の粘性土で N_d 値と N 値の差が顕著である。

$$N_d = 0.5N_{dm} - 0.16M_v \tag{9}$$

- N_d : ロッドの周面摩擦による影響を差し引いた貫入量 200mm に要する補正打撃回数
- N_{dm} : 貫入量 200mm に要する打撃回数
- M_v : ロッドの回転トルク (N・m)

ロッド頭部のエネルギー E_2 は、深度に依らず概ね安定した値を示した。一方、ロッド先端部のエネルギー E_3 は、 N 値の大小に同調して変動する結果となった。

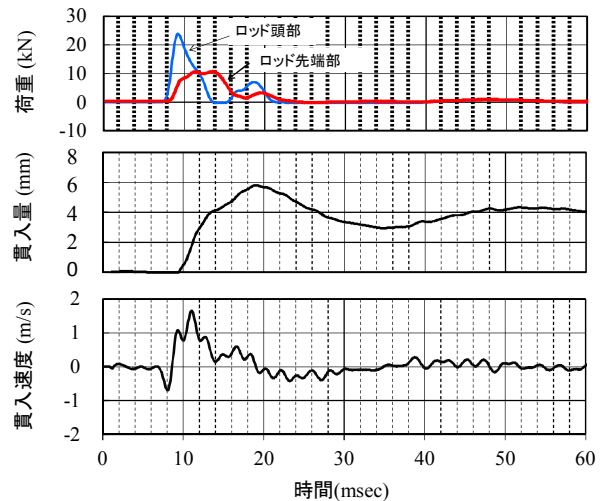
エネルギー効率については、打撃効率 e_{12} は平均で 0.75 と高い値を示した。打撃効率 e_{12} をもう少し詳細に見ると、周期的な変動が見られる。地点 1 の打撃効率 e_{12} について深度分布の拡大図を図 6 に示す。なお、ロッドの継ぎ足しを行った深度を赤線で示した。打撃効率 e_{12} は、ロッドを継ぎ足した直後は小さく、貫入が進むにつれて打撃効率 e_{12} が回復する様子が伺える。ロッド

を継ぎ足した時は、地上に突出するロッド長が長いのでロッドは撓み易く、撓みに消費されるエネルギーの量が多い。貫入が進み、地上に突出するロッド長が短くなるにつれてロッドは地盤の拘束を受けて撓み量が小さくなり、打撃効率 e_{12} が向上したと推察される。

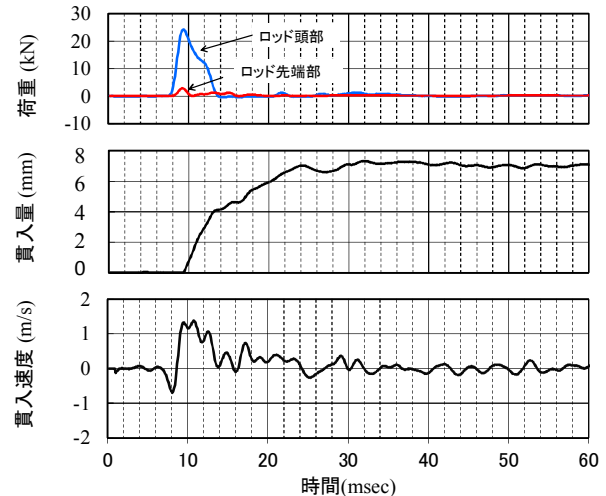
伝播効率 e_3 は、 N 値の大小に同調する形で 0.1~1.0 間を変動する結果となった。エネルギーは、(5)式および(6)式に示したように荷重とロッドの貫入速度の積を時間積分して求める。 N 値が小さな土層では、図 4(b) に示したようにロッド先端部で小さな荷重応答を示す。

表 2 実験場所

| | 実験場所 (地形) |
|------|-----------------------|
| 地点 1 | 滋賀県守山市 (湖岸平野, 三角州) |
| 地点 2 | 茨城県神栖市 (臨海部埋立地, 三角州) |
| 地点 3 | 埼玉県久喜市 (内陸部造成地, 氾濫平野) |



(a) 砂質土 GL-9.00m N 値 12
 $N_{dm}=23, M_v=23 \text{ N}\cdot\text{m}, N_d=N_{dm}-0.16M_v=19$



(b) 粘性土 GL-9.75m N 値 2
 $N_{dm}=14, M_v=30 \text{ N}\cdot\text{m}, N_d=N_{dm}-0.16M_v=9$

図 4 荷重、貫入量、貫入速度の一例

貫入速度は、 N 値が小さいほど速くなると考えられるが、実際はロッドの周面摩擦で抑制され、図 4 に示したように N 値による顕著な違いは見られない。そのため、伝播効率 e_3 の変動は主にロッド先端部の荷重応答が反映され、 N 値の変動に同調する結果となったと考えられる。

一方、 N 値が概ね一様な区間、例えば地点 2 の GL-4m ~8m、地点 3 の GL-2m ~8m では、伝播効率 e_3 は深度方向に減少傾向を示す。これは、ロッド長に起因するロッドの周面摩擦や撓みによるエネルギー損失の影響と考えられる。

3.4 エネルギー効率に基づく補正 N_d 値

MRS のエネルギー計測で得られた打撃効率 e_{12} および伝播効率 e_3 を用いて、貫入量 200mm に要する換算打撃回数 N_{dm}' を補正した。エネルギー効率による補正方法は、国際土質工学会 (ISSMFE) ¹⁰⁾ に準拠して(10)式を用いた。なお、換算打撃回数 N_{dm}' は 1 打撃毎の貫入量 P から 200 mm 貫入に要する打撃回数を換算した値である。

$$N_{dE_MRS} = \frac{1}{2} N_{dm}' \times \frac{e_{12_MRS} \cdot e_{3_MRS}}{e_{12_SPT} \cdot e_{3_SPT}} \quad (10)$$

- N_{dE_MRS} : MRS のエネルギー補正 N_d 値
- e_{12_MRS} : MRS の打撃効率
- e_{3_MRS} : MRS の伝播効率
- e_{12_SPT} : SPT の打撃効率
- e_{3_SPT} : SPT の伝播効率
- N_{dm}' : 1 打撃の貫入量から換算した
貫入量 200mm に要する
換算打撃回数 ($N_{dm}=200/P$)
- P : 1 打撃毎の貫入量 (mm)

ここで、 N 値の推定にあたっては、SPT のエネルギー効率が必要となる。SPT の打撃効率 e_{12_SPT} は、MRS のエネルギー計測を実施した地点 1 で計測されており、平均値で 0.59 と報告されている ¹¹⁾。

SPT の伝播効率 e_{3_SPT} は、ロッド長と地盤の硬さ等が複雑に影響するためこれまで明らかにされていないが、SPT の打撃応力はロッド長が 25m まではほとんど減衰しないとの報告もある ¹²⁾。一方、SPT はロッド (外径 40.5mm) と孔壁 (孔径 66mm) のクリアランスが 13mm 程度あり、ロッドの周面摩擦による影響は小さいと考えられる。そこで、ここでは SPT の打撃効率 e_{12_SPT} を 0.59、伝播効率 e_{3_SPT} を 1.0 と仮定して検討を行った。

エネルギー効率に基づく補正 N_d 値 (以下、“エネルギー補正 N_d 値” という) と N 値の比較図を図 7 に示す。なお、従来のロッドの回転トルク M_v で補正した N_d 値も併記した。エネルギー補正 N_d 値は、従来の回転トルク M_v を用いて補正した N_d 値よりも N 値との整合性が高い結果が得られた。特に、従来は粘性土で N_d 値を過大評価する傾向が見られたが、エネルギー補正 N_d 値では解消され、 N 値と概ね一致している。また、これまで課題とされてきた GL-10m 以深においてもエネルギー補正

N_d 値は N 値と良く一致している。

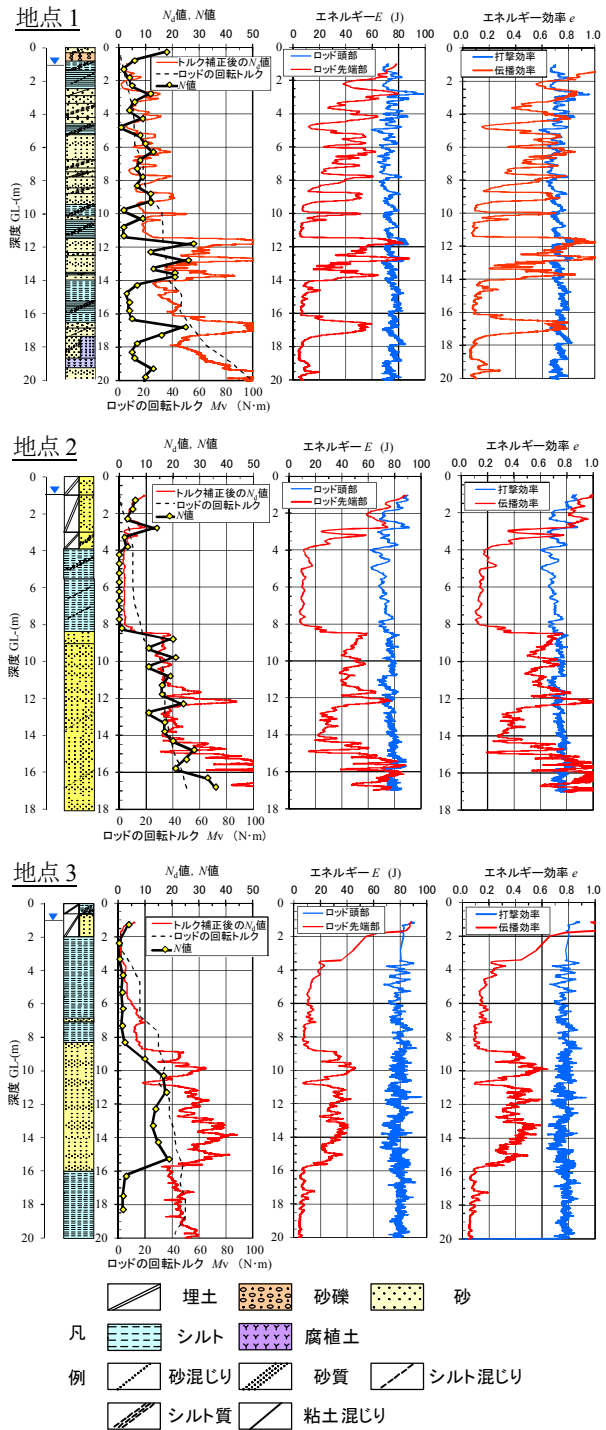


図 5 MRS のエネルギー計測結果

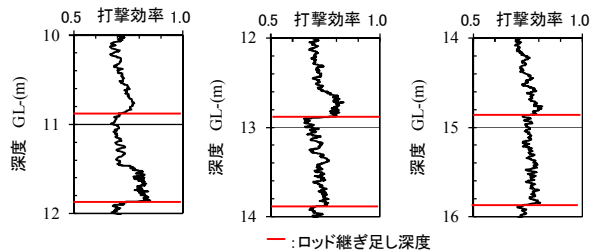


図 6 打撃効率の拡大図 (地点 1, GL-10m ~16m)

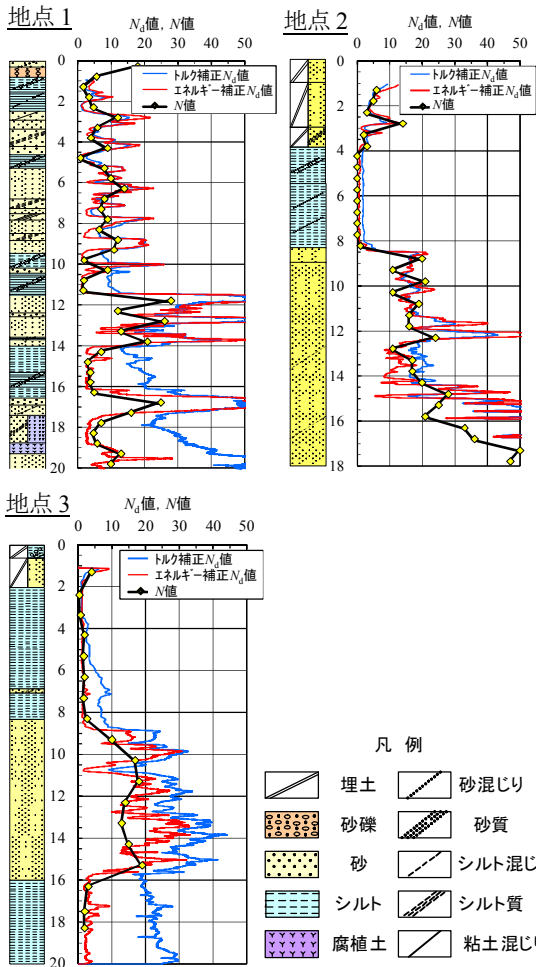
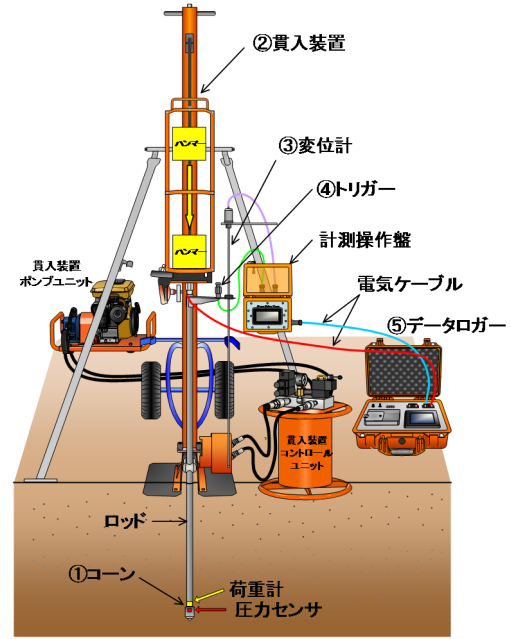
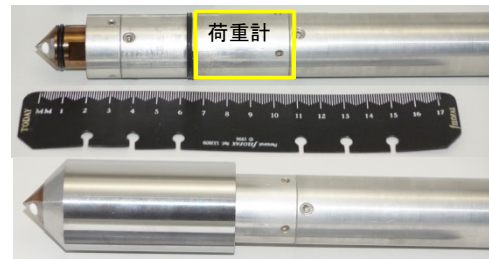


図7 エネルギー補正 N_d の深度分布図



(a) iPDC の概要図



b) iPDC のコーン

図8 iPDC の概要図およびコーン

4. intelligent Piezo Drive Coneの開発

従来のDCPTでは深度が深くなると N_d 値が N 値よりも大きくなる問題に対し、エネルギー計測を実施して補正した N_d 値が N 値に整合した値となることを実証実験で確認した。そこで、PDCのコーンに圧力センサに加え荷重計を装備した2成分コーン(intelligent Piezo Drive Cone, 以下、iPDCという)を開発した。

4.1 iPDCの試験装置

iPDCの概要図およびコーンの写真を図8に示す。

iPDCは、以下の計測装置で構成されている。

- ①コーン：貫入時の間隙水圧を計測する圧力センサとロッド先端部の荷重を計測する荷重計が内蔵されているコーン
- ②貫入装置：ハンマー自由落下方式による貫入装置（ハンマー質量が30kgのMRS、63.5kgのSRSおよび20kgの μ PDCの3種類）
- ③変位計：貫入量を計測する磁歪リニア変位計
- ④トリガー：貫入の開始を検知するセンサ
- ⑤データロガー：計測した間隙水圧、荷重、貫入量の時刻歴データを収録する装置

4.2 地盤定数の評価方法

(1) エネルギー補正 N_d 値

エネルギー補正 N_d 値は、200mm貫入に要する換算打撃回数 N_{dm}' を iPDC で使用した貫入装置および SPT のエネルギー効率で補正して算出する。以下に、MRS を使用した場合のエネルギー補正 N_d 値の算出式を示す。

$$N_{dE_MRS} = \frac{1}{2} N_{dm}' \times \frac{e_{12_MRS} \cdot e_{3_MRS}}{e_{12_SPT} \cdot e_{3_SPT}}$$

$$= \frac{1}{2} N_{dm}' \times \frac{E_{3_MRS}}{E_{MRS}^* \cdot 0.59 \cdot 1.0} \quad (11)$$

N_{dE_MRS} : MRS のエネルギー補正 N_d 値

N_{dm}' : 1 打撃の貫入量から換算した貫入量 200mm に要する換算打撃回数 ($N_{dm}'=200/P$)

P : 1 打撃毎の貫入量 (mm)

E_{3_MRS} : ロッド先端に伝達されたエネルギー (J)

E_{MRS}^* : ハンマーの持つ位置エネルギー (102.9J)

(2) 細粒分含有率

細粒分含有率 F_C は、図9に示すPDCの過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ と粒度試験による細粒分含有率 F_C の関係を用いて(12)式より算出する。

$$F_C = 20 \cdot (\Delta u/\sigma_v') + 15 \quad (12)$$

- F_C : 細粒分含有率(%)
- Δu : 動的貫入時の過剰間隙水圧(kPa)
($\Delta u = u_R - u_0$)
- u_R : 動的貫入時の間隙水圧応答(kPa)
- σ_v' : 有効上載荷重 (kPa)
- u_0 : 静水圧(kPa)

4.3 液状化判定

iPDCによる液状化判定の手順を図10に示す。液状化判定では、 N 値、細粒分含有率 F_C の他に、地下水位 GWL 、地盤を構成する各土層の単位体積重量 γ が必要となる。地下水位 GWL は、試掘の作業で確認する。地下水位 GWL が深い場合は、調査後に孔内水位を測定する。一方、単位体積重量 γ はiPDCで評価できないため、最初は例えば 18kN/m^3 と仮定する。仮定のもとに解析を実行し、得られたiPDCの細粒分含有率 F_{C_iPDC} およびエネルギー補正 N_d 値を踏まえて、仮定した単位体積重量 γ の妥当性を確認する。そして、必要に応じて単位体積重量 γ を見直し、再度解析を実行する。

液状化判定に用いる液状化強度比 R_L および地震時せん断応力比 L は、各種構造物の設計指針に準拠して算出し、液状化抵抗率 F_L 値を求める。

4.4 試験事例

貫入装置にMRSを用いてGL-20mまでiPDCを実施し、SPTおよび粒度試験と比較した事例を紹介する。現場は、臨海部の埋立地である。地質層序表を表3に示す。

iPDCの調査結果として、図11にエネルギー補正 N_d 値、iPDCの過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ より推定した細粒分含有率 F_{C_iPDC} 、液状化抵抗率 F_{L_iPDC} 値の深度分布図を

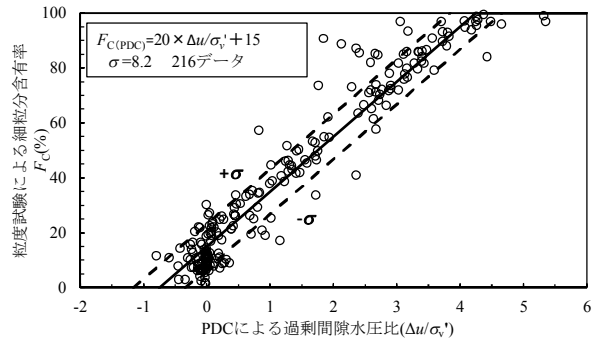


図9 過剰間隙水圧比と細粒分含有率の関係¹³⁾

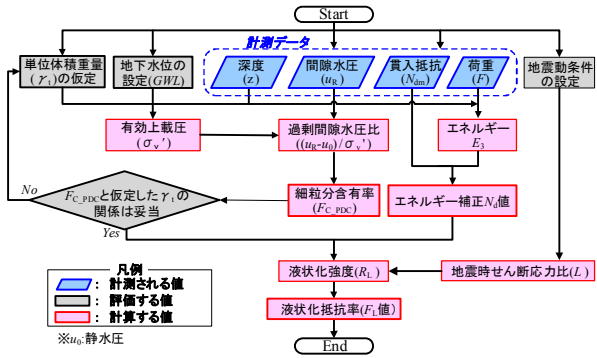


図10 iPDCによる液状化判定の手順

表3 地質層序表

| 地層 | 記号 | 土質 | 主な記事 |
|-----|-------|------------------|--------------------|
| 盛土 | Bc | ローム・砂質シルト | 礫、木片を混入 |
| 埋土 | Fs | 細砂 | 所々シルトを薄く挟在 |
| 沖積層 | As1-u | 細砂 | 均質な砂 |
| | Ac1 | 砂混りシルト | シルト質砂をシーム状に挟在 |
| | As1-l | シルト質細砂 | 所々砂質シルトとなる |
| | Ac2 | 砂混りシルト シルト質粘土 | 上部はシルト質細砂を薄く不規則に挟在 |

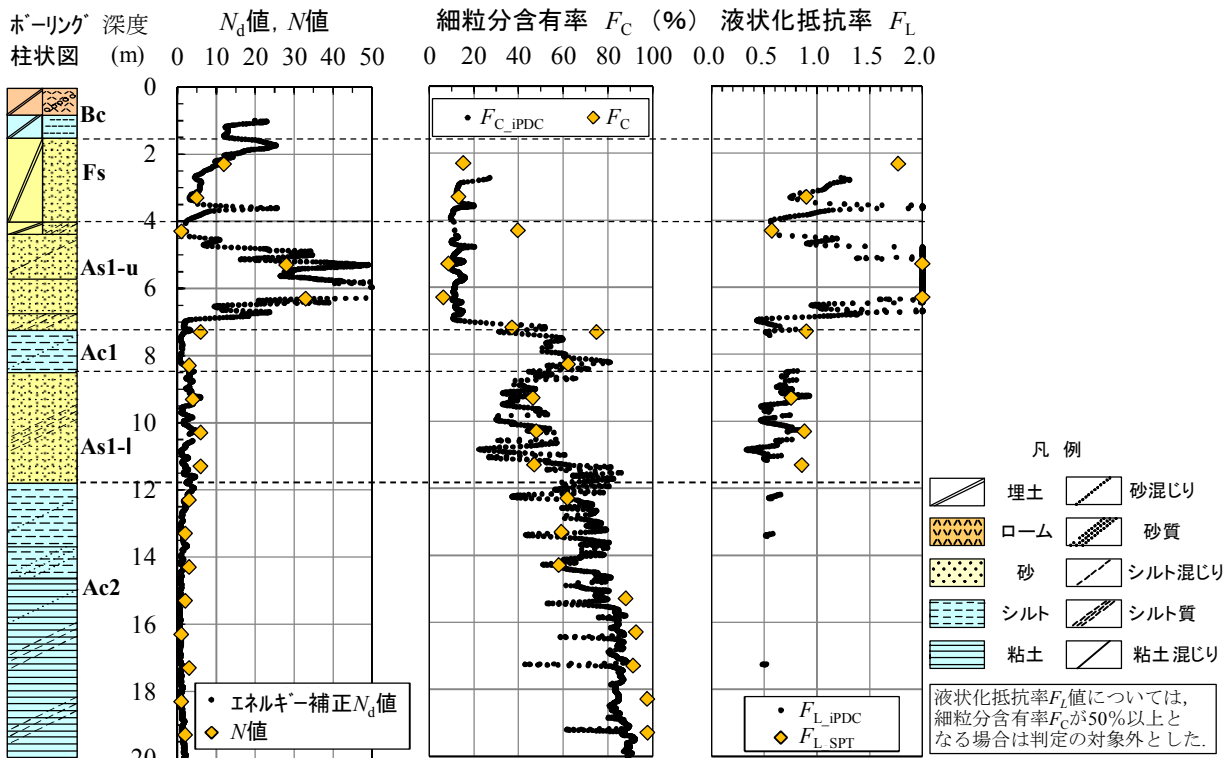


図11 iPDCによる調査事例

示す。なお、 N 値、細粒分含有率 F_C 、SPT と粒度試験による液状化抵抗率 F_L 値を併記している。液状化判定は、道路橋示方書・同解説 (H24) に準拠し、レベル 1 地震動について液状化抵抗率 F_L 値を算出した。設計水平震度は 0.18 である。

エネルギー補正 N_d 値は N 値と調和的であり、これまで課題としていた 10m 以深においても N 値と整合している。iPDC による細粒分含有率 $F_{C,iPDC}$ についても、粒度試験から求めた細粒分含有率 F_C と整合しており、均質な砂、細粒分を多く含む砂質土、砂分を多く混入する粘性土、均質な粘土の層相が良く捉えられている。SPT と iPDC の液状化判定結果は、埋土 F_s 層と沖積層 $As1-I$ の液状化抵抗率 F_L 値が 1.0 未満を示し、「液状化が発生する可能性が高い」結果となった。

5. おわりに

DCPT は簡易に連続的な N_d 値が得られるが、土質を判別できず、深度が GL-10m 以上となるとロッドの周面摩擦の影響が大きくなり N_d 値の信頼性の面から実務での使用を制限させてきた。iPDC は、この両課題を解決した新しい調査法である。今後は、液状化の調査に限らず多くの用途で利用されることを期待するとともに、地盤工学会や PDC コンソーシアム¹⁴⁾を通して普及に努めていきたい。

参 考 文 献

- 1) Sawada, S. Use of Piezo Drive Cone for evaluation of subsoil settlement induced by seismic liquefaction. Second International Conference on Performance-based Design Earthquake Geotechnical Engineering. Taormina, Italy, Paper No. 2. 03, 2012.
- 2) 西山備, 馬場香奈江, 規矩大義, 山口恵美, 利藤房男, 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之. ピエゾドライブコーンによる N 値の推定精度に関する現場試験. 地盤工学研究発表会. 2013, p. 359-360.
- 3) R. Dahlberg and U. Bergdahl. Investigations on the Swedish Ram-Sounding Method. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. Stockholm, June 5-7, 1974, p. 93-102.
- 4) 菅原紀明, 鈴木勝久, 菅原章治. 小型動的貫入試験機の開発とその利用. 全地連・技術フォーラム. 1997, p. 461-464.
- 5) 信本実, 植村一瑛, 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之, 堀之内富夫. 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その 15: 宅地の液状化評価を目的とした μ PDC—. 第 48 回地盤工学研究発表会. 2013, p. 353-354.
- 6) 地盤工学会. 地盤調査の方法と解説. 2013, p. 299.
- 7) 日本建築学会. 建築基礎設計のための地盤調査計画指針. 1997, p. 195.
- 8) Goble, G.G, Likins, G.E. Jr. and Fausche, F. Bearing capacity of piles from dynamic measurement. Final Report. Dept. of Civil Eng., Case Western University, 1975.
- 9) Matsumoto, T., Sekiguchi, H., Yoshida, H. and Kita, K. Significance of two-point strain measurement in SPT. Soil & Foundations. JSSMFEE, 1992, Vol. 32. No. 2. p. 67-82.
- 10) ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing, SPT Working Party, Standard Penetration Test (SPT), International Reference Test Procedure. Penetration Testing 1988. ISOPT. Balkema, Rotterdam, 1988.
- 11) 松本樹典, 下野慎也, Le Ta PHAN, 大島昭彦, 西村真二. 滋賀県守山市における地盤調査一斉試験. 第 48 回地盤工学研究発表会. 2013, p. 185-186.
- 12) 牧原依夫, 窪田洋司. 標準貫入試験における打撃応力の測定. 第 31 回地盤工学研究発表会. 1996, p. 413-414.
- 13) 藤井紀之, 東畑郁生, 規矩大義, 澤田俊一, 吉澤大造. 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その 16 過剰間隙水圧に着目した F_c の推定—. 第 48 回地盤工学研究発表会. 2013, p. 355-356.
- 14) PDC コンソーシアム HP. <http://www.pdc-cons.jp/>