

大型動的コーン貫入試験の打撃効率の測定と他試験との相関に関する研究

A STUDY ON MEASUREMENT OF DRIVING EFFICIENCY BY HEAVY DYNAMIC CONE PENETRATION TEST AND CORRELATION WITH OTHER SOUNDING AND LABORATORY TEST

地盤工学分野 野山 優一

Lab. of Geotechnical Engineering Yuichi NOYAMA

動的コーン貫入試験は、打撃貫入時のロッドと地盤の周面摩擦の影響の実態が未解明である。そこで本研究では大型動的コーン貫入試験を対象にロッドの上部と先端のそれぞれに荷重計と加速度計を設置し、打撃貫入時の挙動を直接測定した。また、過去の地点と本研究で実施した地点も含めて整理方法を統一して他試験との相関を検討した。その結果、ロッドの上部と先端部の打撃効率を算出し、エネルギー損失の実態を捉えた。また、従来よりも精度の高い他試験との相関性を得た。

In the dynamic cone penetration test, the actual condition of the surface friction of the rod and the ground due to blow penetration is unknown. Therefore, in this study, a load cell and accelerometer were installed at the top and tip of rod for the heavy dynamic cone penetration test (HDCPT), and the dynamic behavior at the blow penetration was directly measured. Also, we examined the correlation between HDCPT and other tests by unifying the organization method on sites carried out in the part and this study. As a result, the driving efficiency of the top and tip of rod was calculated, and the actual condition of the energy loss was caught. Moreover, correlation with other tests with higher accuracy than before was obtained.

1. まえがき

土木・建築構造物の計画・設計・施工を行うためには、事前に地盤構成や物理、力学性質などの地盤情報を得るために地盤調査を行うことが必須である。地盤調査は原位置でのボーリング調査を基本として行われるが、その中で地盤の強さを直接測定する『サウンディング試験』と原位置の土を『サンプリング』して室内土質試験で調べる方法が併用される。最も一般的なサウンディング試験はボーリングと併用する標準貫入試験 (SPT) である。SPT はサウンディング試験とサンプリングを同時に行える上、測定深度まで事前に大きめのボーリング孔を掘削するため、ロッドと地盤との周面摩擦が生じず、高精度な地盤強度が測定可能である。しかし、SPT は規模が大きくコストも高いため、戸建て住宅地盤での調査は困難である。そこで SPT に代わる低コストかつ手軽で、地盤調査を戸建て住宅でも行える様々な試験方法の研究・開発が行われている。

大型動的コーン貫入試験 (HDCPT または SRS、ここでは SRS と略す) はその一例である。SRS 全自動試験機はクローラー式で移動が容易かつ、ロッドの継ぎ足し以外は全自動で打撃と計測が行われるため、作業効

率が高く、SPT に比べ低コストで地盤調査を行うことができる。

しかし SRS は単管のロッドを直接地表面からハンマーで打撃貫入するので、SPT とは異なり、ロッドと地盤との間に周面摩擦の影響を受ける。周面摩擦が発生すると SRS の打撃回数が過大に得られる。そのため、SRS では基本的に 200mm 貫入ごとにロッドを 2 回転させ、その際のトルクを測定することによって打撃回数の補正を行っている。ここで、実際にハンマー打撃時における周面摩擦力は動的貫入に対するロッドに働く上向きの動摩擦力である。一方、トルク測定によって測定される周面摩擦力はロッドを円周方向に回転させた時の静摩擦力である。つまり、動摩擦力と静摩擦力の違い及び摩擦力の向きの違いがある。そのため、トルク補正を実際の打撃時の補正として用いることが適切か懸念されている。

さらに、SRS による N_d 値はこれまで SPT の N 値と同等の評価ができるといわれているが、単位面積・単位貫入量当たりの打撃エネルギーが一致していないので、必ずしも N_d 値= N 値が成立するとは限らず、その関係を検証する必要がある。

2. 各種動的貫入試験の概要と補正方法

2.1 SPT

SPTは63.5kgのハンマーを高さ76cmから自由落下させ、30cm貫入させるのに要する打撃回数をN値として計測する試験である。N値は地盤の強さを表す標準的な指標となっている。

2.2 SRS

SRSは、質量63.5kgのハンマーを高さ50cmから自由落下させ、200mm貫入するのに要する打撃回数 N_{dm} 値を測定する試験である。SRSはSPTと異なり、単管のロッドの周面には常に地盤と摩擦力が作用するため、ロッドの回転トルク M_v を測定して、式(1)により N_{dm} 値を補正(トルク補正)した N_d 値を採用している¹⁾。

$$N_d = N_{dm} - 0.040 M_v \dots \dots \dots (1)$$

2.3 中型動的コーン貫入試験(MRS)

MRSは30kgのハンマーを高さ35cmから自由落下させ、200mm貫入するのに要する打撃回数 N_{dm} 値を測定する試験である。これはSRSの打撃エネルギーを1/2(エネルギー補正)にしたのと同値である。よって式(2)により N_{dm} 値にトルク補正とエネルギー補正を行うことでSRSと同等の N_d' 値を算出している¹⁾。

$$N_d' = 0.5(N_{dm} - 0.138 M_v) \dots \dots \dots (2)$$

2.4 簡易動的コーン貫入試験(PDCPT)

PDCPTは、基本的に手動で質量5kgのハンマーを高さ50cmから自由落下させ、100mm貫入するのに要する打撃回数 N_{dm} 値を測定する試験である。測定深度は10mまでとしている。MRS同様に式(3)により N_{dm} 値にトルク補正とエネルギー補正を行うことで、SRSと同等の N_{dp}' 値を算出している²⁾。

$$N_{dp}' = 0.51(N_{dm} - 0.51 M_v) \dots \dots \dots (3)$$

3. 調査地点ごとの各試験結果

今年度実施した4地点(弁天町、越谷、稲敷、舞洲)において地点ごとに各種動的貫入試験結果(N値、 N_d 値、 N_d' 値、 N_{dp}' 値の深度分布)を図-1に示す。舞洲はSPTとSRSのみ実施した。

3.1 弁天町(大阪市港区)

12m以浅は砂と粘土の互層であり、12~25mは粘土であったためN値は深度方向にほぼ一定の値を示した。しかし、N値以外は深度方向に増加傾向であった。

3.2 越谷(埼玉県越谷市新川町)

中川低地に位置する軟弱地盤地帯であり、地表面から鋭敏性の高い沖積粘土層が堆積している。SPTでは自沈も生じてN値が0の状態が続いた。N値以外も深度方向にほぼ一定の値で小さかった。

3.3 稲敷(茨城県稲敷市浮島)

霞ヶ浦沿岸にできた砂州に位置し、砂質土主体の地盤である。そのため、基本的にどの試験でも値が大きくなっている。しかし、下部ほど細粒分含有率が高くなるため多少値が小さくなっている。

3.4 舞洲(大阪市此花区)

19.5mまで盛土・埋土の砂質土と粘性土の互層で、N値と N_d 値は深度方向に増加した。

4. SRSの計測結果

4.1 概要

図-2に示すように、SRSの打撃時の動的挙動を測定するためにアンビル直下のロッド上部とロッド先端にそれぞれ荷重計と加速度計を設置した。荷重と加速度の動的な現象を詳細に分析できるように周波数50kHzでサンプリングした。測定データはトルク後の各深度における最初の3打撃とした。

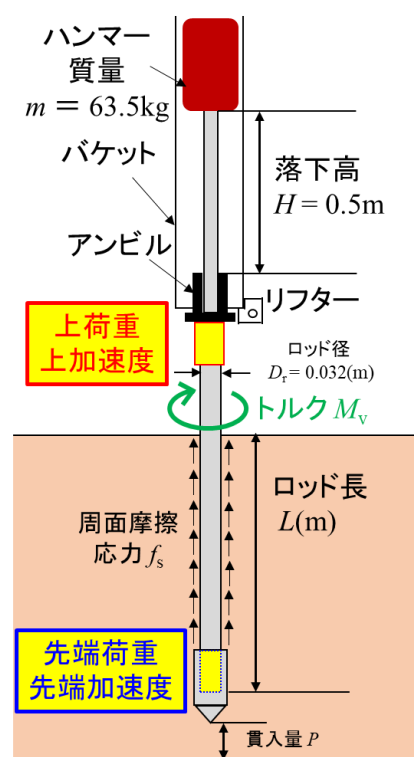


図-2 SRSの概要図

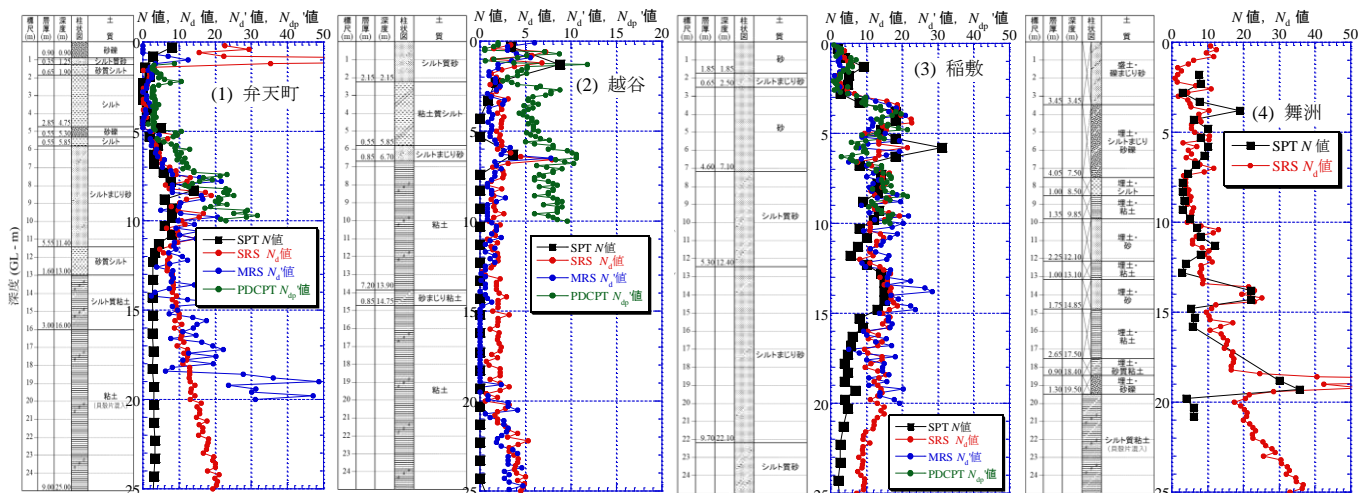


図-1 各地点における各試験結果

4.2 1 打撃ごとの試験結果（時刻歴）

図-3～7に1打撃ごとの上部と先端の測定結果を荷重・加速度・速度・変位・打撃エネルギーの5パターンの時刻歴で整理した。時刻歴を示す横軸は、衝撃が伝わる0.01秒前から概ね衝撃が伝わり終わる0.1秒間と固定した。各時刻歴には、測定深度と（打撃回数/N_{dm}）を記入した。また、実測した1打撃ごとの貫入量も記入することで、算出した変位との比較も行った。1打撃ごとの計測結果は膨大にあるが、ここでは代表例として舞洲『8.8～9.0mの3打撃目』の時刻歴を示す。

(1) 荷重

図-3に打撃時の上、先端荷重の時刻歴を示す。ただし、荷重は初期値を0とする（増分値）補正を行った。上荷重は初めに大きな衝撃力があり、その後ハンマーの跳ね返りが衝撃力として反応していることが分かる。一方、先端荷重は上荷重よりも0.005秒ほど遅れて衝撃力が伝わっている。これはロッドを伝わる時間を表している。また、この深度は粘性土であったため、先端荷重は上荷重よりもかなり小さい。

(2) 加速度

図-4に打撃時の上、先端加速度の時刻歴を示す。ただし、加速度はゼロ基線補正等の補正を行った。

両加速度もパルス状の大きな値を示していたが、後の速度に大きく影響しているのは、初めの衝撃があった0.02秒付近までの挙動である。荷重と同様に先端では遅れて反応している。

(3) 速度

速度は図-4の加速度を時間積分することで求めた。図-5に上、先端速度の時刻歴を示す。

0.02秒付近までで速度が増加し、その後0に収束していることが分かる。また、ハンマーの落下速度 $\sqrt{2gH} \approx 3.1$ m/sに対して上速度では、エネルギー損失もあり、わずかに低い値になっている。一方、先端速度は上速度よりも早く、最大速度が3.1m/sを超えている。これは断面積の小さなロッドにエネルギーが転換されたことで大きな値になったと考えられる。

(4) 変位

変位は図-5の速度をさらに時間積分することで求めた。図-6に上、先端変位の時刻歴を示す。

変位はある値で収束している。1打撃の貫入量の実測値が22mmに対して、上と先端変位はほぼ共に0.025m(25mm)であることから、ほぼ正確に測定できていることが分かる。

(5) 打撃エネルギー

本研究の主な目的は打撃エネルギーを求めることにある。打撃エネルギーは式(4)のように荷重と速度の積を時間積分して求めることができる。

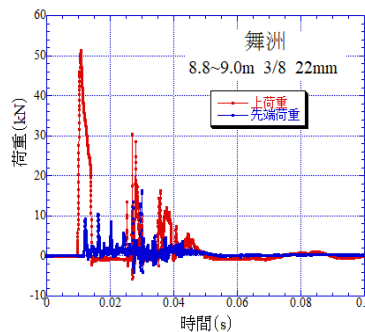


図-3 荷重

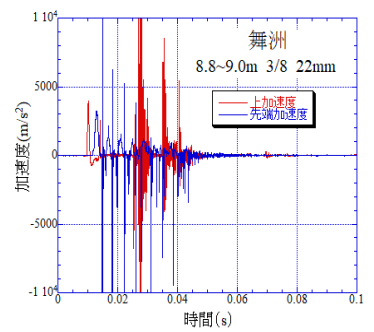


図-4 加速度

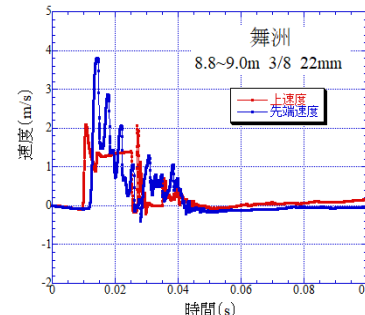


図-5 速度

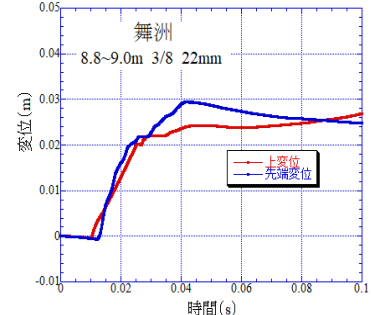


図-6 変位

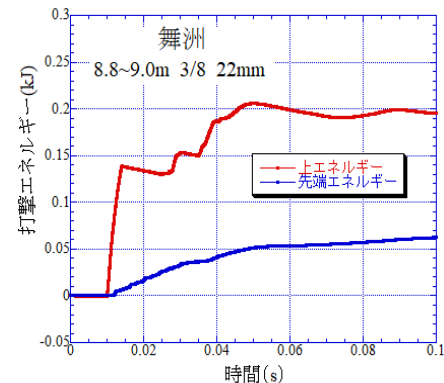


図-7 打撃エネルギー

$$E = \int_0^t F(t) \times v(t) \cdot dt \dots\dots\dots (4)$$

その結果を図-7に示し、ある一定の値に収束していることが分かる。ここでハンマー打撃前のエネルギーは位置エネルギー $mgh (=0.312$ kJ)であるので、上部と先端で打撃エネルギーの最終値が減少していることが分かる。また、打撃エネルギーは荷重に比べて速度が小さいため、荷重に依存する傾向がある。

5. SRSの打撃効率と打撃回数の補正

5.1 打撃効率の定義

4.2で得た上部と先端の打撃エネルギーの最終値（式(4)で $t=0.1$ sの時の値）を用いて、打撃効率を算出する。打撃効率の考え方は、以下のように各打撃における打撃エネルギーの最終値をハンマーの位置エネルギー $E = mgh (=0.312$ kJ)で除した値で算出する。

ハンマーの自由落下による動的貫入試験では、落下過程でガイドロッドに生ずる摩擦、アンビルとの衝突時の横振動、ロッドの撓みや周面摩擦等により消費されながら、ロッドの先端に伝達されると考えられる。

そこで、図-8 に示すエネルギー E とエネルギー効率 e を次のように定義する²⁾。

E : ハンマーの位置エネルギー (mgh)

E_1 : アンビル衝突直前の運動エネルギー (kJ)

E_2 : アンビル衝突直後にロッドに伝達されたエネルギー (kJ)

E_3 : ロッド先端まで伝播してきたエネルギー (kJ)

e_1 : 摩擦効率(= E_1/E): ハンマー落下過程でガイドロッド間に生じる摩擦で消費されるエネルギー効率。エネルギーはアンビル衝突までに E から $E_1(=e_1 \cdot E)$ に減少する。

e_2 : 衝突効率(= E_2/E_1): ハンマー衝突時に横振動や塑性変形等に消費されるエネルギー効率。エネルギーは E_1 から $E_2(=e_2 \cdot E_1)$ に減少する。

e_3 : 伝播効率(= E_3/E_2): 貫入先端に伝達されるまでにロッドの撓みや地盤との周面摩擦等に消費されるエネルギー効率。エネルギーは E_2 から $E_3(=e_3 \cdot E_2)$ に減少する。

ここで、本研究で直接計測した上打撃効率 e_{12} は $e_1 \cdot e_2(=E_2/E)$ 、先端打撃効率 e_{123} は $e_1 \cdot e_2 \cdot e_3(=E_3/E)$ となる。

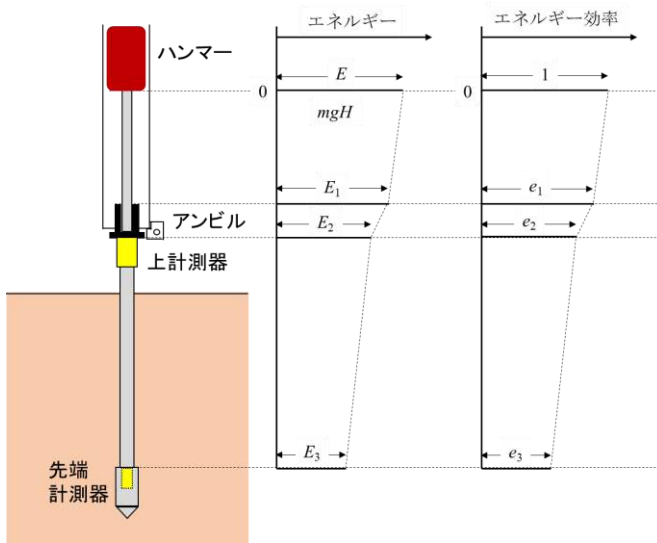


図-8 動的貫入におけるエネルギー変化の概要図

5.2 各地点における打撃効率の測定結果

5.1 の方法で定義した 1 打撃ごとの打撃効率の測定結果を地点ごとに図-9 に示す、

(1) 弁天町 (大阪市港区)

上打撃効率 e_{12} は約 80% でほぼ一定となった。一方、先端打撃効率 e_{123} は、粘性土と砂質土で大きな違いがみられ、特に粘性土で低い値 (約 10%) を示した。

(2) 越谷 (埼玉県越谷市新川町)

上打撃効率 e_{12} は約 80% でほぼ一定となった。一方、先端打撃効率 e_{123} は、地表面と 6~7m 付近の砂質土で大きくなり、粘性土では低くなっている。先端打撃効率 e_{123} は 11.0m までとなった (先端荷重計の故障のため)。

(3) 稲敷 (茨城県稲敷市浮島)

上打撃効率 e_{12} は約 80% でほぼ一定となった。一方、先端打撃効率 e_{123} は、本地点が砂質土主体であったため、上打撃効率 e_{12} とほぼ同じ値になっている。先端打撃効率 e_{123} は先端荷重が 9.0m までとなった (先端荷重計の故障のため)。

(4) 舞洲 (大阪市此花区)

上打撃効率 e_{12} は約 70% でほぼ一定となった。一方、先端打撃効率 e_{123} は、埋土の影響もあり、打撃効率に多少のばらつきはあったが、主に粘性土で低く、砂質土で高い値を示した。

5.3 打撃効率による打撃回数の補正方法

従来のトルク補正した N_d 値と区別するために、打撃効率による補正値を N_{dE} 値と定義する。SRS のエネルギー計測で得られた先端打撃効率 e_{123} を用いて貫入量 200mm に要する打撃回数 N_{dm} 値を補正した。その際に、先端打撃効率 e_{123} は 3 打撃で測定しているが、200mm 毎に測定している N_{dm} 値に対応させるためにその平均を取った。打撃効率による SPT の N 値相当の補正方法は、国際土質基礎工学会 (ISSMFE) に準拠して式(5)を用いた。

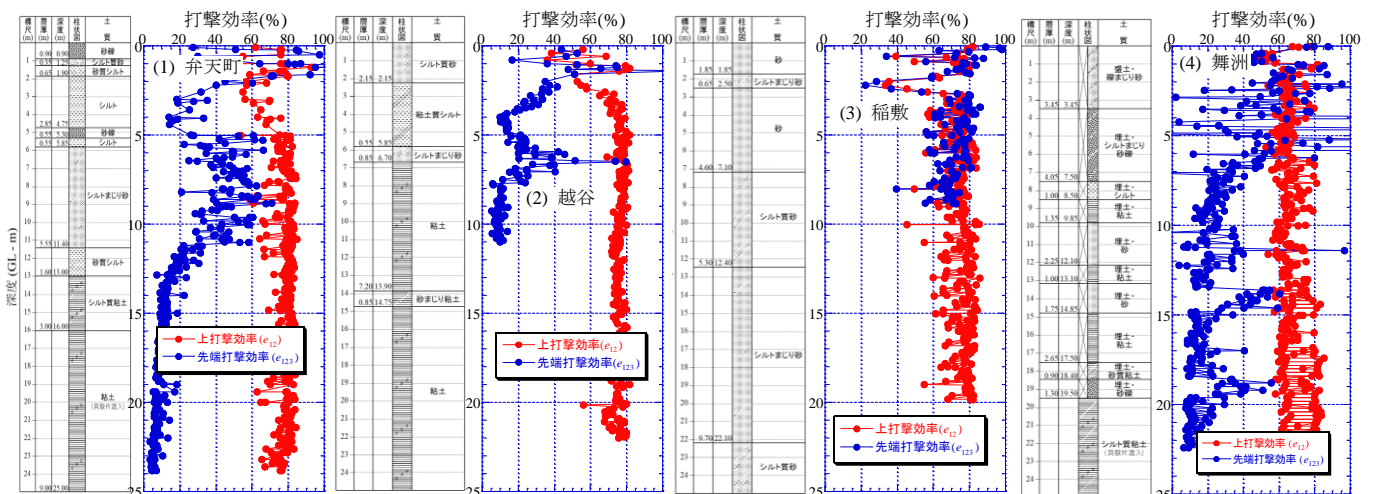


図-9 各地点における打撃効率

$$N_{dE} = N_{dm} \times \frac{(e_{123})_{SRS}}{(e_{12})_{SPT} \cdot (e_3)_{SPT}} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、式(5)の算定にあたっては、SPTのエネルギー効率が必要となる。SPTの上打撃効率 $(e_{12})_{SPT}$ は過去の調査で計測されており、平均値で0.60と報告されている。また、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³⁾。さらに、SPTはロッド径よりも大きなボーリング孔を開けているので周面摩擦による影響はほとんどない。そこで本研究では、SPTの上打撃効率 $(e_{12})_{SPT}$ を0.60、伝播効率 $(e_3)_{SPT}$ を1.0と仮定し、算定した。

5.4 各地点における打撃効率による補正結果

5.3の方法で補正した N_{dE} 値の深度分布を地点ごとに図-10に示し、 N 値と N_d 値も併記した。

(1) 弁天町（大阪市港区）

N_{dE} 値は N_d 値より N 値との整合性が非常に高い。特に13m以深の粘土層での傾向が顕著である。

(2) 越谷（埼玉県越谷市新川町）

N_{dE} 値も N_d 値もほぼ同じ値を示し、 N 値との整合性が高かった。7m以深の粘土層では N_d 値より N_{dE} 値の方が N 値と整合した。

(3) 稲敷（茨城県稲敷市浮島）

砂層主体の地盤で、 N_{dE} 値も N_d 値もほぼ同じ値を示し、 N 値の整合性が高かった。

(4) 舞洲（大阪市此花区）

SPTとサンプリングを同じボーリング孔で行ったため、 N 値を測定していない深度もあるが、 N_{dE} 値は砂質土で高く、粘性土で低くなる傾向で、 N 値と整合している。

6. 他試験との相関

6.1 概要

本研究室ではこれまで日本各地で地盤調査を行い、

試験間の相関を求めてきた。しかし、相関を求める基準となる整理方法がなく、異常値などを当時の作成者の判断で決めていた。そこで本研究では、蓄積されたデータを再度見直し、新たに統一した整理方法で相関性を検討した。また、その際に各地点の凡例のマークを図-11にまとめて示す。

図-12~14にSRSと他の動的貫入試験との比較を、図-15(1)~(3)にSRSと室内力学試験との比較を示す。

6.2 統一した整理方法

(1) SPTにおける砂質土か粘性土の区分

SPT深度に対応した物理試験結果から判断し、互層などで砂質土と粘性土が重複する者は除外した。

(2) 複数回実施している試験

測定深度の深さや N 値との整合性から、一つに絞って選定し、同じような結果であれば初めに行った試験を採用した。

(3) 適用深度の決定

これまでSRSは25m、MRSは20mまで適用範囲としていた。しかし、打撃エネルギーの伝播能力等からSRSは20m、MRSは15mまでを適用範囲とした。

(4) 異常値の判定

補正した打撃回数が50回を超えるものは除外した。また、同深度における2つの試験の打撃回数の比率が0.33以下もしくは3以上も除外の対象とした。

6.3 SRSとSPTとの相関

(1) 砂質土

図-12(1)から、砂質土の N_d 値=50以下では $N_d \approx N$ 値の関係が成り立っている。特に N 値が10~30ではその傾向が顕著である。

(2) 粘性土

図-12(2)から、粘性土では明らかに N 値< N_d 値になった。特に N_d 値で切片があるのは、 N 値=0（自沈）でもSRSではある強度をもつことを示している。

ここで、砂質土と粘性土で N 値との対応が異なるのは、SPTとSRSの貫入機構の違いによるものである。

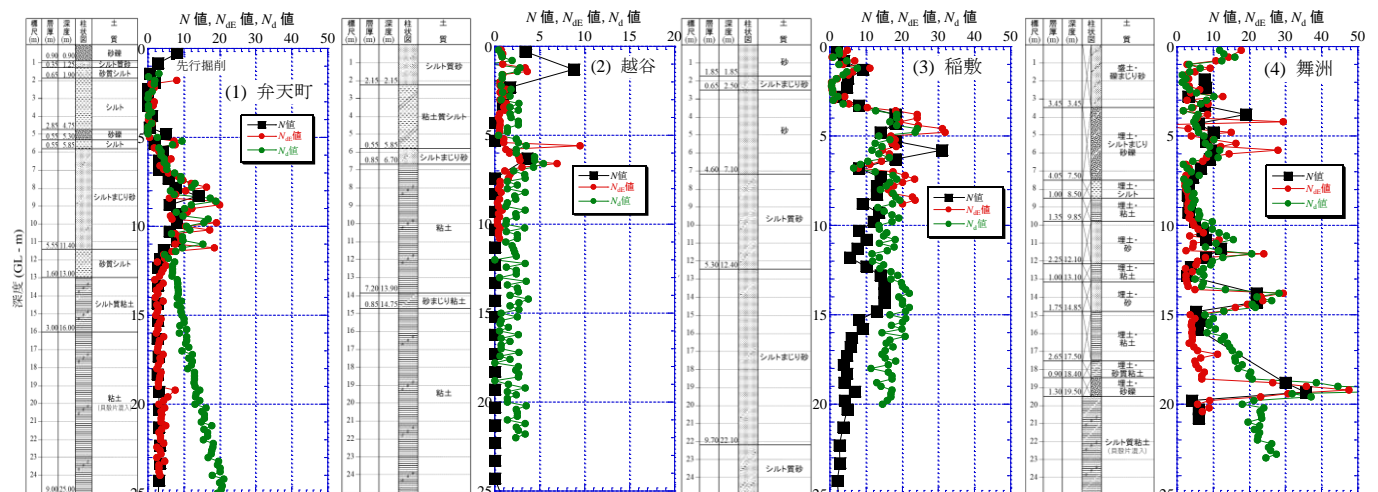


図-10 各地点における打撃効率によるエネルギー補正結果の比較

6.4 SRS と MRS との相関

図-13 から、MRS の N_d' 値は SRS の N_d 値にほぼ一致している。今回、MRS の適用深度を 15m までに絞ったため、MRS と SRS の対応関係がより良好となったと考えられる。

6.5 SRS と PDCPT との相関

図-14 から、PDCPT の N_{dp} 値は MRS の N_d' 値ほどではないが、SRS の N_d 値に比較的良好に一致している



図-11 各地点と凡例のマーク

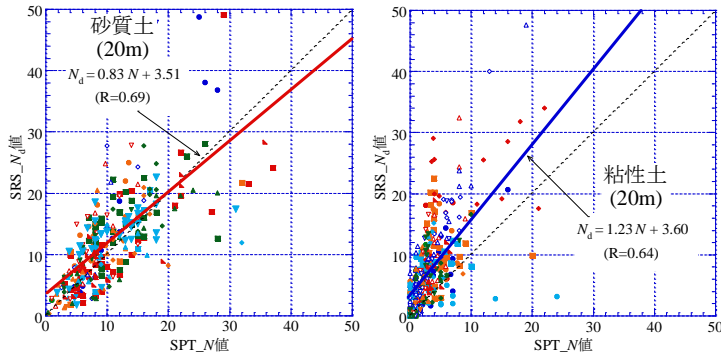


図-12 SRS 試験と SPT の相関 (砂質土と粘性土)

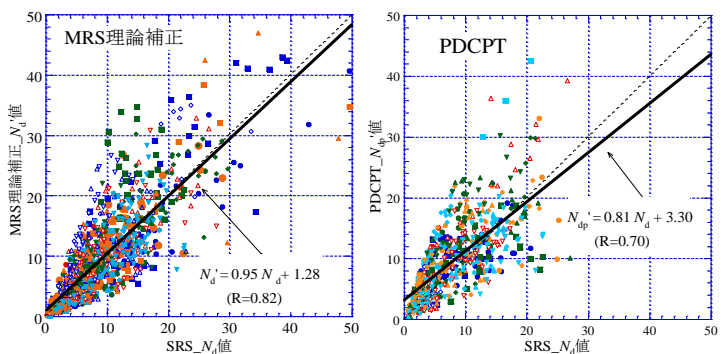


図-13 SRS と MRS の相関 図-14 SRS と PDCPT の相関

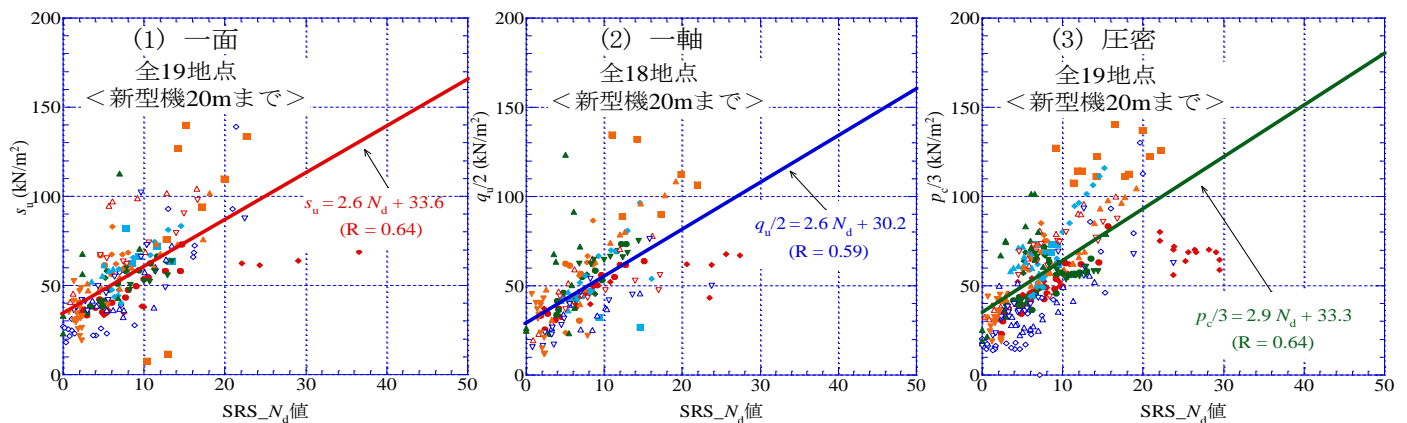


図-15 SRS 試験と室内力学試験の相関

る。そのため、より簡易な PDCPT は表層 10m 以浅であれば十分適用可能と考えられる。

6.6 SRS と室内力学試験との相関

粘性土の SRS の N_d 値との比較に一面せん断、一軸圧縮、圧密試験との相関を検討した。直接対応するのは、非排水せん断強さとなる s_u 、 $q_u/2$ 、 $p_c/3$ となる。

図-15(1)~(3)とも同じような傾向で相関係数 R も 0.6 程度あったため、各室内試験において非排水せん断強さを N_d 値から推定できると考えられる。

7. 結論

- 1) SRS の上打撃効率 e_{12} は 70~80% の一定値を示す。一方、先端打撃効率 e_{123} は砂質土ではそれほど減少していないが、粘性土ではかなり減少している。
- 2) 打撃効率を用いて補正をした N_{dE} 値はトルク補正した N_d 値よりも N 値の整合性が高いといえる。特に、粘性土では N_d 値は過大評価する傾向がみられたが、 N_{dE} 値ではそれが解消され、 N 値と概ね一致したことから、打撃効率による打撃回数の補正が妥当であると考えられる。
- 3) SRS と各動的貫入試験との比較から、MRS、PDCPT における適用深度内であれば、SRS と同等の結果が得られる。
- 4) SRS と室内力学試験との比較では、 N_d 値から各室内試験の非排水せん断強さを推定することが可能である。

SRS のコーン部 (ロッド先端) の荷重と加速度を測定すれば打撃エネルギーによる打撃回数の補正が可能となるが、実用性としては難がある。そのため、現状における試験の補正方法 (トルク補正) との関係性を検討することが今後の課題である。

[参考文献]

- 1) 地盤工学会『動的コーン貫入試験方法 (JGS 1437-2014)』, 2016.
- 2) 地盤工学会『地盤調査の方法と解説』, 2012.
- 3) 地盤工学会『低コスト・高精度な地盤調査法に基づく宅地の液状化被害予想手法の開発』, 2014.