

大型動的コーン貫入試験による実地盤の摩擦音計測と波形分析による 粒度特性値の評価

IN-SITU MEASUREMENT OF FRICTION SOUND BY DYNAMIC CONE PENETRATION TEST AND SOUND WAVE ANALYSIS FOR EVALUATION OF GRAIN SIZE PROPERTY

地盤工学分野 新 大樹

Lab. of Geotechnical engineering Daiki ATARASHI

本研究では、大型動的コーン貫入試験（SRS 試験）のトルク測定中に生じる実地盤とコーンの摩擦音を利用した土質判定手法の構築を目指して、実地盤で SRS 試験による摩擦音計測実験を実施した。計測された摩擦音に対して、コーンに固有の応答特性（伝達関数）を考慮して、摩擦音の音圧レベルと音圧波形の特徴に着目した分析を行い、粒度特性値との比較検討を行った。その結果、粗粒土の摩擦音は音圧レベルが大きく、突発的に生じる振幅の大きな異音が多いことがわかった。

This paper shows the results of in-situ measurement of friction sound by Automatic Ram sounding (SRS) for evaluation of soil property based on friction sound between surface of a metallic penetration cone and surrounding soil during an operation of SRS. Considering the transfer function of a penetration cone, this paper analyzed the recorded friction sound focused the sound pressure level (SPL) and the sound pressure waveform. As a result of comparison between the friction sound and grain size properties of soil which was corrected by SPT, it was found that the SPL was large and a lot of high intensity noises which were suddenly corrected were contained in the friction sound between a cone and coarse-grained soil.

1. まえがき

2011 年東北地方太平洋沖地震による住宅地の液状化被害を受けて、宅地を対象とした経済的な液状化判定方法の開発が求められている。地盤の液状化判定には、細粒分含有率 F_c 等の地盤の粒度特性値と地盤の硬さを表す N 値を求める必要がある¹⁾。代表的な宅地の地盤調査方法であるスウェーデン式サウンディング（SWS）や大型動的コーン貫入試験（SRS）は、通常の試験方法では N 値と等価である換算 N 値、 N_d 値は求めることができるが、土試料の採取ができないため、粒度特性値を得ることができない。したがって、従来の宅地向けの簡易的な地盤調査技術を用いて液状化判定を実施することが容易ではないのが現状である。

そこで本研究では、SRS 試験のトルク測定中に生じる実地盤とコーンの摩擦音を利用した土質判定手法の構築を目指して、実地盤で SRS 試験による摩擦音計測実験を実施した。そして、計測された摩擦音に対して、摩擦音の音圧レベルと音圧波形の特徴に着目した分析を行い、摩擦音と粒度特性値の関係を調べた。音を用いた土質判定に関する研究は数多くされており、塚田ら²⁾はボーリングマシンによる回転貫入時の切削音を利用して土質判定を試みており、スペクトル面積とス

ペクトル重心を用いることで土質判別が可能であることを確認した。下村ら³⁾は SWS 試験時に発生する摩擦音を利用して土質判別を試みており、摩擦音の音圧レベルは粘性土では小さく、砂質土では大きくなる傾向が得られている。

2. 摩擦音計測実験と地盤の概要

SRS による摩擦音計測実験は大阪市北区梅北 2 期地区、兵庫県尼崎市、千葉県浦安市、長野県諏訪市湖南及び豊田の 5 地点で実施した。図-1 は SRS 試験による音計測に用いたコーンの模式図である。

コーン内部底面中心部に設けたマイク室内にコンデンサマイクを設置した。マイクを固定するため、マイク室とコンデンサマイクの間隙にエポキシ樹脂を充填し、マイ

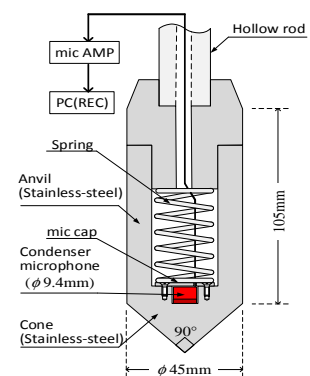


図-1 音計測用のコーン

クキャップをコーンにネジで固定した。コーンはロッドに固定され、トルク計測時にロッドとコーンが地中で回転する仕組みとした。また、マイク線を地上に引き出すために中空のロッドを使用した。SRSの貫入深さ20cm毎に実施されるトルク計測時にコーンと実地盤の摩擦音を録音した。摩擦音はマイクアンプで増幅した後にPCのソフトウェアを用いて、44.1kHzのサンプリング周期で録音した。

3. コーンの伝達関数を用いた音源波算出

図-2に音源波算出方法の概略図を示す。コーン周面での摩擦音（音源波）はステンレス製のコーンを通じて、コーンに内蔵されたマイクで計測し、マイクアンプを介して計測用のパソコンに記録波として出力される。記録波はコーンに固有の応答特性（伝達関数）の影響を受けたものである。伝達関数は記録波（出力波）と音源波（入力波）の関係を表す関数であり、周波数領域で表示した場合、周波数応答関数 $H(f)$ と位相スペクトル $\theta(f)$ からなる。入力波、出力波及び伝達関数の時間領域での表記をそれぞれ $a(t)$ 、 $b(t)$ 、 $h(t)$ とすると、畳み込み積分の式1の関係が成り立つ。ここで、 τ は積分すると消える媒介変数である。このとき、 $a(t)$ のフーリエ変換を $A(f)$ 、 $b(t)$ のフーリエ変換を $B(f)$ とすれば、式2が成り立つ。さらに式2を変換することで $H(f)$ は式3で表される。また、 $\theta(f)$ は入力波と出力波のクロススペクトルの位相差である。

$$b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)h(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

$$B(f) = A(f)H(f) \quad (2)$$

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)} \quad (3)$$

音源波の算出方法としては、記録波のフーリエ変換と $H(f)$ から式2によって周波数 f が22.1kHzまでの範囲の音源波形のフーリエ変換 $B(f)$ を求めた後に、逆フーリエ変換することで音源波形の時刻歴 $b(t)$ を算出した。

そこでまず、摩擦音計測実験で用いた各コーンの伝

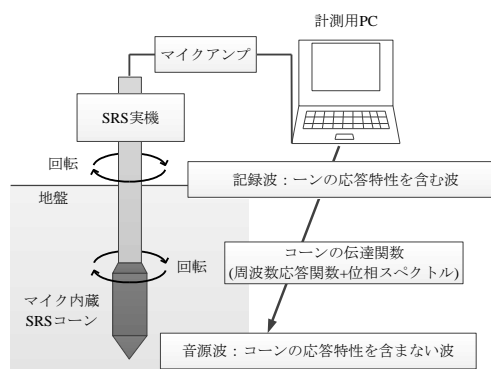
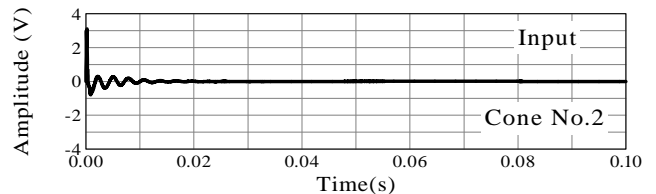


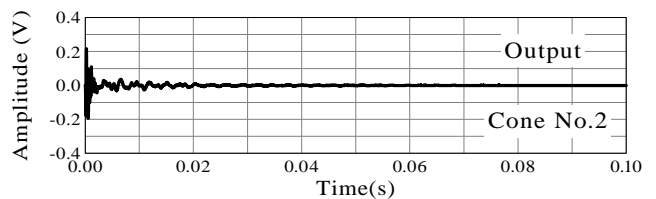
図-2 音源波形算出方法の概略図

達関数をパルス応答法⁴⁾を参考にして計測した。コーン側面に入力波計測用マイクを内蔵した治具を密着させ、治具をステンレス製の丸棒で打撃してパルス波に近い信号を与えた。治具内部のマイクで入力波、コーン内部のマイクで出力波を計測し、クロススペクトル法を用いて伝達関数を算出した。図-3の(a)、(b)にNo.2コーンを用いて1回の打撃により計測された入出力波の時刻歴、(c)に算出した伝達関数、(d)に計測された入出力波のフーリエ振幅と周波数応答関数の一例を示す。

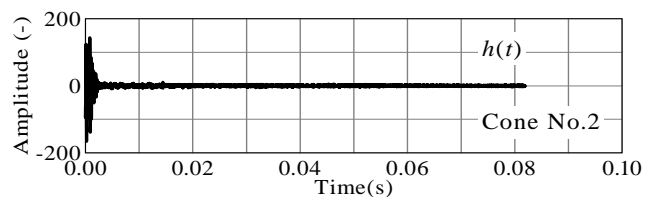
各コーンに対して、伝達関数の計測を多回数行い、 $H(f)$ と $\theta(f)$ を個々に平均してコーンの伝達関数を決定した。図-4に各コーンの $H(f)$ 、図-5に $\theta(f)$ を示す。また、表-1にSRS試験を実施した地点と使用したコーンの対応を示す。No.5コーンのみ広い周波数帯で $H(f)$ が1を超えているため、出力波を入力波に変換する際、No.5コーンの伝達関数のみ、出力波を減衰させるはたらきがあることがわかる。



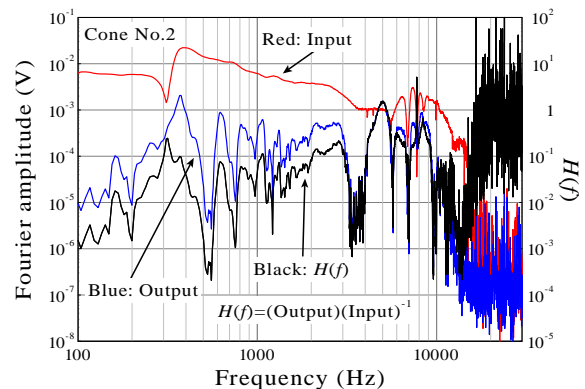
(a) 入力時刻歴



(b) 出力時刻歴



(c) 伝達関数



(d) 入出力のフーリエ振幅と周波数応答関数
図-3 計測された入出力波と伝達関数の一例

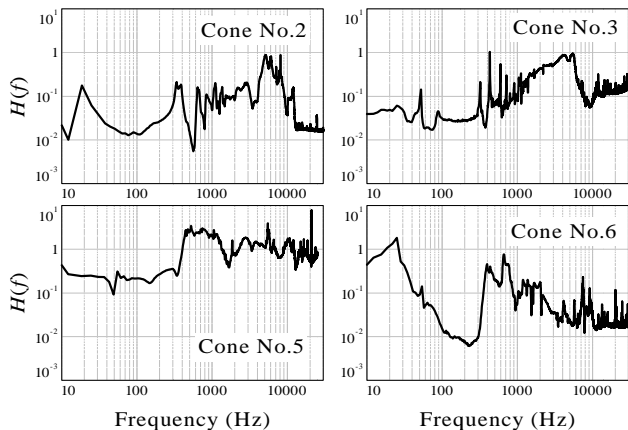


図-4 各コーンの周波数応答関数 $H(f)$

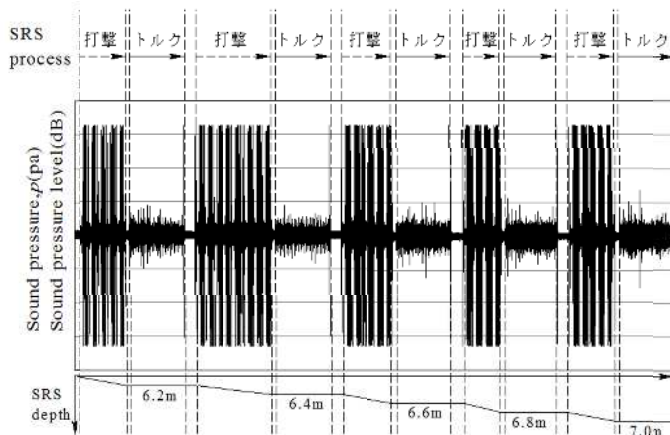


図-6 SRSによる音の計測一例(深度 6.2-7.0m)

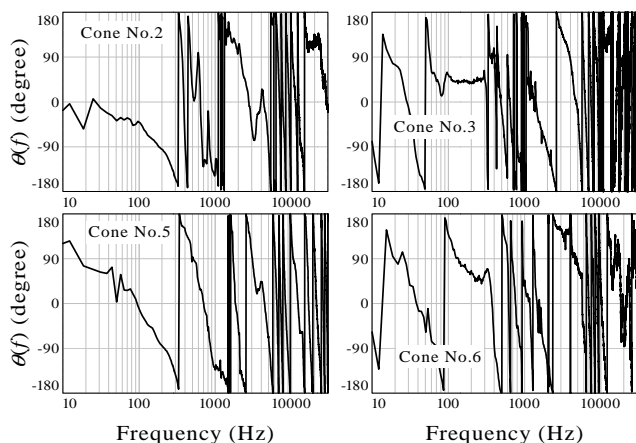


図-5 各コーンの位相スペクトル $\theta(f)$

表-1 使用したコーン No.と地点

コーンNo.	2	3	5	6
使用した現場	尼崎 浦安 湖南 豊田	梅北	尼崎 浦安 豊田	豊田

4. 摩擦音の分析方法

SRS 試験による摩擦音計測より得られた摩擦音の分析方法を説明する。図-6にある地点で SRS 試験中に連続して記録した摩擦音の時刻歴を示す。同図の上部には SRS 試験行程、下部にはコーンの位置(深度)を表示している。打撃中は録音許容量を超える大きな音が計測され、トルク計測中はほぼ一定振幅の音が発生している。打撃貫入からトルク計測開始までの間、ロッドは地中で静止しており、この間はほぼ無音に近いことを考慮すると、トルク計測中の音は地中で回転するコーンの周面と周辺地盤の摩擦音であると判断される。

摩擦音の音源波は以下の方法で求めた。まず、1m 間の SRS 試験開始前後の 2 秒間のデータをノイズサンプルとして、スペクトルサブストラクション⁵⁾により記録音波データからノイズを除去して摩擦音のみのデ

ータを取得した。次に時間領域で 4096 プロットデータを 1 フレームとし、フレーム長の半分ずつシフトさせて記録波を分割した。各フレームの記録波に対して、式 1 のように伝達関数を畳み込み積分してフレームごとに音源波を算出した。そして、各フレームにハミング窓を乗算した後に、全てのフレームを結合して分割前のデータ長の音源波を算出した。こうして算出した音源波を本研究では計算音源波と呼ぶことにする。

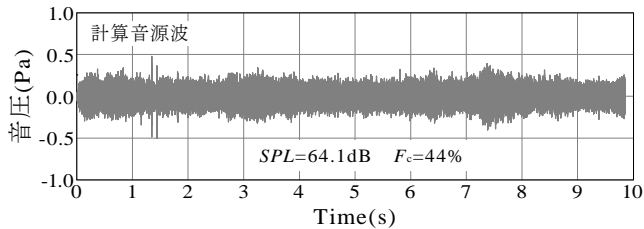
摩擦音の評価には、音の相対的な大きさを表す音圧レベル(Sound Pressure Level、SPL)を用いた。音圧レベルは次式で表される。

$$SPL = 10 \times \log_{10}(p^2/p_0^2) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

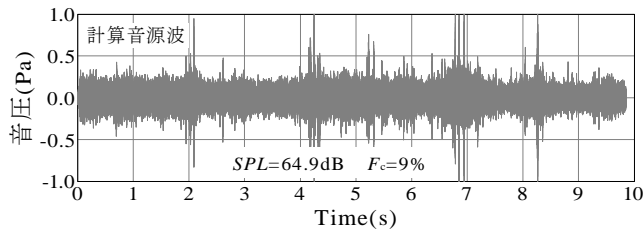
p (Pa)は音源波形の音圧、 p_0 は基準音圧 $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa (人間の最小可聴音圧)である。音圧波形の実効値から式 4 を用いて音圧レベルを求めた。ここで、図-7 に梅北の F_c が 9% と 44% の地盤で計測した摩擦音の計算音源波の音圧時刻歴と SPL の値を示す。 F_c の値は 5 倍ほど違うが SPL の差はわずかである。このことから摩擦音の SPL のみで土質判定を行うことは困難であると予想される。そこで、両者の音圧波形の違いに着目した。(a)は突発的に振幅が大きい異音が多くあるのに対し、(b)は少ないことがわかる。そこで計算音源波に対して閾値を設けて、それを超える異音の個数を数え、1 秒当たりの異音の個数 n_0 (個/s)を求めた。閾値は 1 孔の実験で得られた SPL の平均値を式 4 を用いて音圧値に変換して、その 3 倍の値とした。異音の個数は時刻歴上でピーク検出を行い、閾値を超えるピークの個数を数えることで求めた。

5. 現場実験結果

図-8 に梅北 (No.3 コーン使用)、図-9 に尼崎 (No.5 コーン使用)における標準貫入試験 (SPT) の N 値、SRS の N_d 値、SPT のサンプリング試料から求めた F_c を 100 から引いたもの(粗粒分含有率)及び摩擦音から得られた SPL の深度分布を示す。図-8 より SPL と



(a) 計算音源波の音圧時刻歴 (梅北、 $F_c=9\%$)



(b) 計算音源波の音圧時刻歴 (梅北、 $F_c=44\%$)

図-7 計算音源波の音圧時刻歴の一例

粗粒分含有率に着目すると、深度 0~5m、18~21m で深度方向の変動傾向が良く一致することが見て取れる。 n_o と粗粒分含有率は深度 5~15m で変動傾向が良く一致する。図-9 より SPL と粗粒分含有率に着目すると、深度 2~9m で変動傾向がある程度一致することが見て取れる。 n_o と粗粒分含有率は深度 4m 付近、10m 以深で傾向が良く一致する。以上のことから、粗粒分含有率が増加または低下する深度において SPL 及び n_o も増加または低下する傾向が認められる。これらのことより、摩擦音の SPL 及び n_o から F_c が推定可能であることが考えられる。

6. 現場実験による伝達関数の有用性の検証

図-10 に浦安で No.2 コーンと No.5 コーンを用いて実施した SRS 試験の N_d 値と M_v 値、摩擦音から得られた記録波及び計算音源波の SPL の深度分布を示す。2つのコーンの N_d 値及び M_v 値の深度分布はそれぞれよく一致する。記録波の SPL の深度分布に着目すると、No.5 コーンよりも No.2 コーンの記録波の SPL は小さな値を示す。 N_d 値、 M_v 値が等しい同深度で計測された記録波の SPL が異なる原因としては、コーンの伝達関数が異なるためであると考えられる。伝達関数より算出した計算音源波の SPL の深度分布は、良く一致する。

次に、図-11 に浦安の深度 5.0m で No.2 及び No.5 コーンで計測された摩擦音の記録波と計算音源波のワースペクトル密度 PSD (Pa^2/Hz)を示す。記録波の PSD は全く一致しないが、計算音源波の PSD は 500~10000Hz の範囲で記録波より良く一致する。完全に一致しないのは、本研究で求めた伝達関数が現場実験でロッドに固定された状態のコーンの伝達関数と異なるからであると推察される。これらのことから記録波に伝達関数を適用することは、有用であると考えられる。

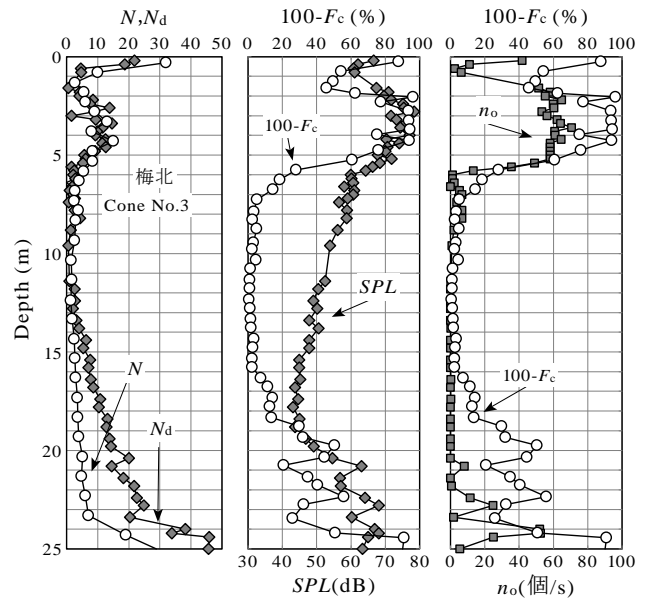


図-8 梅北における SPT 結果と摩擦音計測実験結果

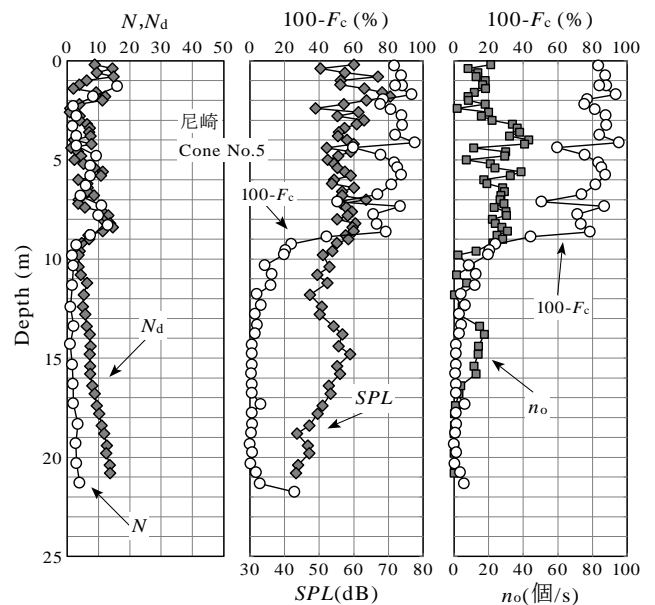


図-9 尼崎における SPT 結果と摩擦音計測実験結果

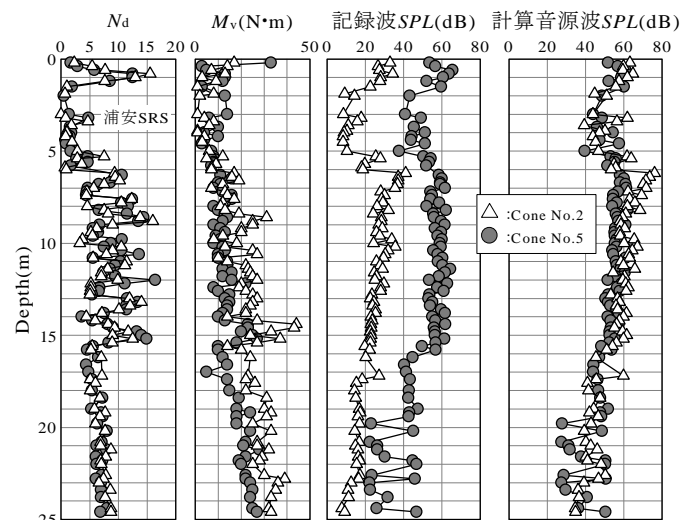


図-10 浦安での 2つのコーン摩擦音計測実験結果

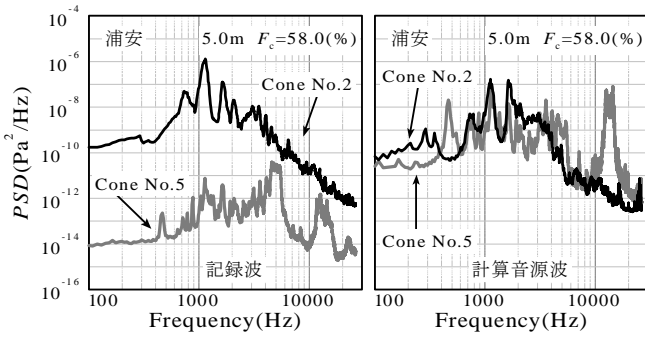


図-11 浦安の深度 5.0m の記録波と計算音源波の PSD

7. 摩擦音と粒度特性値の比較

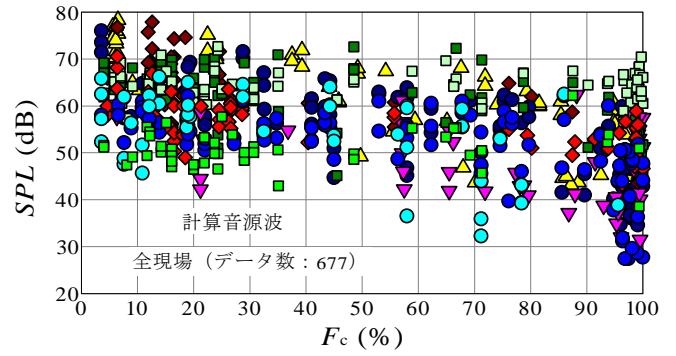
図-12 に本研究で得られた摩擦音と F_c の関係を実験毎にプロットをわけて示す。(a) は SPL と F_c の関係を示しており、全体的な傾向として F_c が大きいほど SPL が小さいことがわかる。しかし、豊田で得られた結果にはその傾向はみられない。(b) は摩擦音の n_o と F_c の関係を示しており、全体的な傾向として F_c が 80~100% の範囲では n_o は小さいことがわかる。さらに、実験ごとに同一 F_c に対する n_o の大きさが異なる。そこで、各実験の n_o の値の範囲を統一するため試行錯誤的に以下の式 5 を用いて実験毎に n_o の正規化を行った。

$$n_o^* = n_o / n_{max} \quad (5)$$

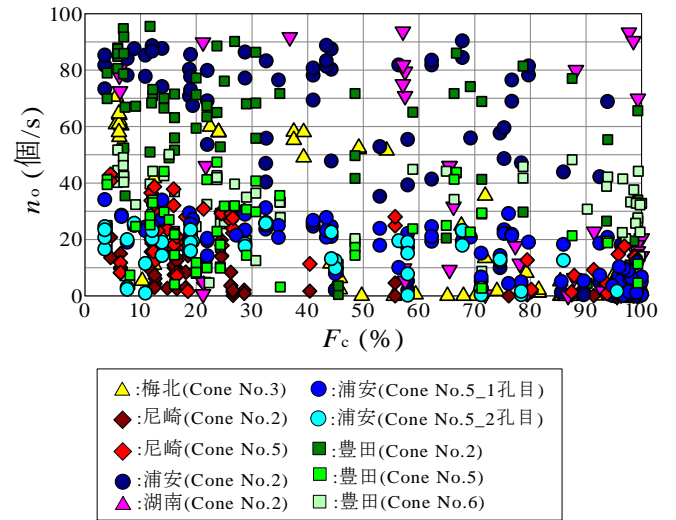
ここで、 n_o^* は 1s あたりの異音の個数 n_o を実験毎に得られた n_o の最大値 n_{max} (個/s) で除したものである。図-13 に摩擦音の n_o^* と F_c の関係を図-12 同様に実験毎に示す。図より、 F_c が 0~30% の範囲では n_o^* は 0.6 以上の範囲に集中し、 F_c が 80~100% の範囲では n_o^* は 0.2 以下に集中することがわかる。しかし、豊田や湖南で得られた結果にはその傾向はみられない。このようになる原因としては、豊田と湖南は特殊な地盤であることが考えられる。湖南と豊田は諏訪湖南東部に位置しており、この地域は表層から高有機質土（泥炭）が厚く堆積していることがわかっている⁶⁾。さらに、浦安は深度 0~8m が浚渫土層、尼崎は深度 0~1.5m が盛土層である。そこで沖積層のみで得られたデータの摩擦音の SPL と F_c の関係を図-14、 n_o^* と F_c の関係を図-15 に示す。 F_c が大きいほど SPL が大きいという傾向はより顕著になったことがわかる。 n_o^* についても同様に、前述した傾向がより顕著になった。しかし、同一 F_c において SPL 及び n_o^* は幅があることがわかる。よって、摩擦音と粒度特性値を 1 対 1 で評価することは現段階では、困難であると考えられる。

8. 摩擦音を用いた粒度特性値の評価

本研究では統計的手法を用いて摩擦音による粒度特性値の評価を行う。まず、図-14 において SPL が 5dB



(a) 摩擦音の SPL と F_c の関係



(b) 摩擦音の n_o と F_c の関係

図-12 摩擦音と F_c の関係

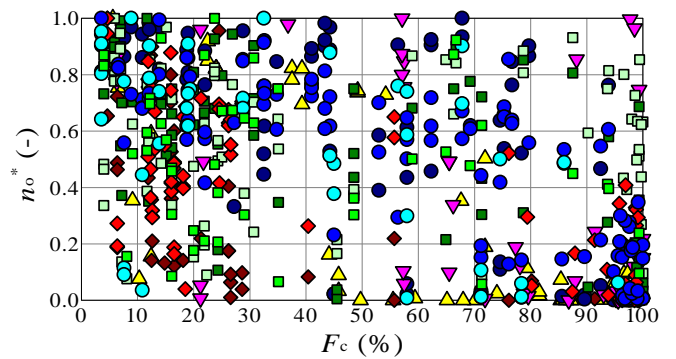


図-13 摩擦音の n_o^* と F_c の関係

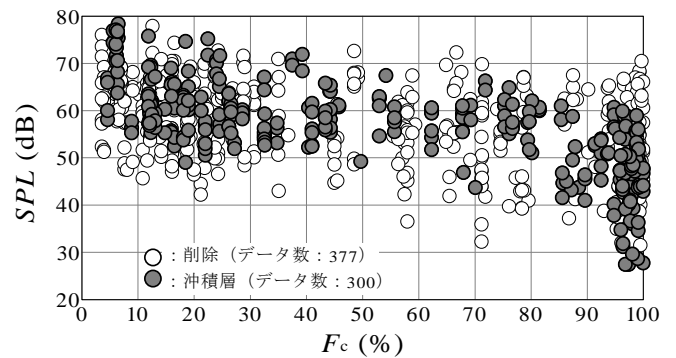


図-14 沖積層の摩擦音の SPL と F_c の関係

刻みで範囲分けを行う。そして、範囲ごとに F_c が 5% の階級幅で確率分布を求めた。その一例として図-16 に SPL が 40~45dB 及び 75~80dB の範囲にあるデータの確率分布を示す。図より SPL が 40~45dB 範囲では約 80% の確率で F_c が 0~10% であり、 SPL が 75~80dB 範囲では約 70% の確率で F_c が 90~100% であることがわかる。同様に SPL が 25~80dB の各範囲で確率分布を求め、まとめたものが図-17 である。同図は横軸に SPL の階級を取り、横軸に縦軸に確率を取る。本研究では、この図を SPL による F_c の評価図と呼ぶことにする。図より、沖積層の地盤で摩擦音計測実験をして得られた音圧レベル SPL が 43dB を示した場合、摩擦音計測深度の地盤は、約 70% の確率で F_c が 90~100%、約 25% の確率で F_c が 80~90%、約 5% の確率で F_c が 70~80% であると評価できる。しかし、 SPL が 55~75dB の範囲では、50% 以上の確率で粒度特性値を評価できないという問題がある。これは、同一 F_c における摩擦音から算出した SPL が値の幅をもつためであると考えられる。図-18 に n_o^* による F_c の評価図を示す。 n_o^* の階級は 0.1 刻みとし、 $n_o^* = 0$ の階級を設けた。図より、高確率で F_c が評価できる n_o^* の階級は確認できない。

9. 結論

本研究から以下の結論が得られた。

- 1) 室内で計測したコーンの伝達関数により、コーンに固有の応答特性を考慮することができた。
- 2) 細粒分含有率 F_c が大きくなると、摩擦音の音圧レベル SPL 及び異音の個数は小さくなることがわかった。
- 3) 統計的手法を用いると摩擦音から粒度を評価することができた。ただし、その精度は向上の余地がある。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp61-64、2001
- 2) 塚田幸広、青山憲明、山木忠嘉：ロータリサウンディングの回転切削音による土質判別法の適用性、土質学会論文集 No.638、1992
- 3) 下村修一、酒匂教明、片岡翔太、川村政史、下村幸男：摩擦音による土質判別機能を付加したスウェーデン式サウンディング試験に関する研究、第 48 回地盤工学研究発表会、pp.309-310、2013
- 4) 早川礼之助：伝達関数・相関関数測定法、高分子 30 巻 6 号、pp.420-421、2013
- 5) 松尾卓摩、長秀雄：スペクトルサブストラクションを用いたノイズ環境下での AE 計測システムの開発、非破壊検査第 58 巻 12 号、pp.549-551、2009
- 6) 京矢侑樹：諏訪市上川・四賀における地盤調査（その 1：調査概要とボーリング結果）、土木学会第 72 回次学術講演会、2017

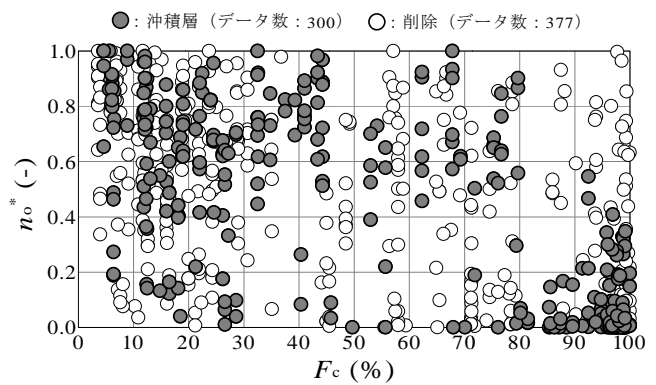


図-15 沖積層の摩擦音の n_o^* と F_c の関係

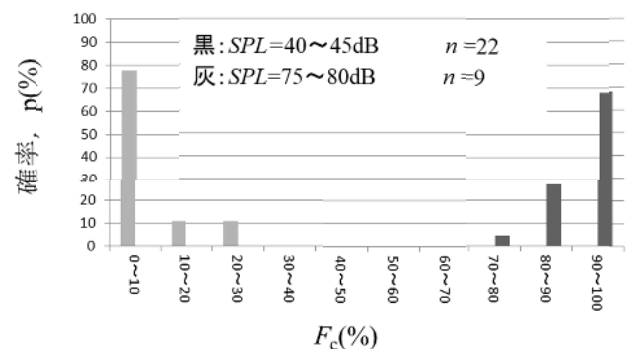


図-16 確率分布の一例

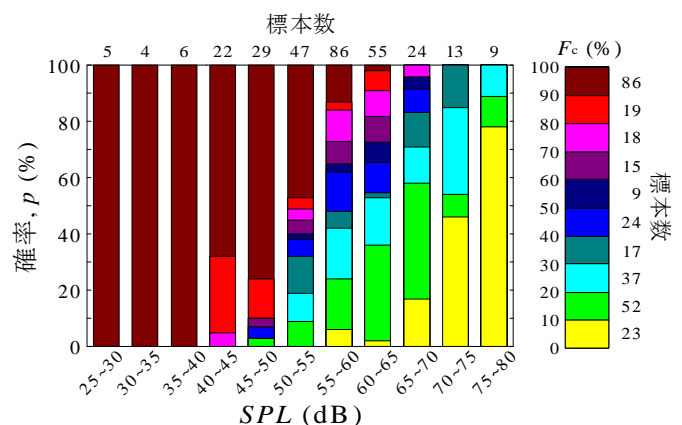


図-17 SPL による F_c の評価図

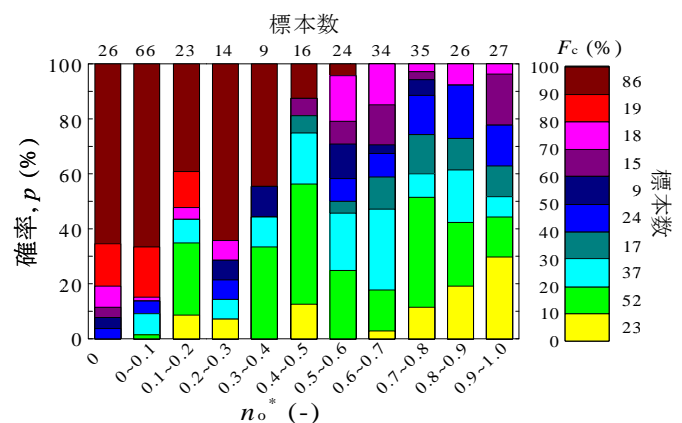


図-18 n_o^* による F_c の評価図