

# 大型動的コーン貫入試験による液状化判定のための砂質土の摩擦音計測模型実験

## FRICITION SOUND MEASUREMENT IN SANDY MODEL GROUND FOR LIQUEFACTION ASSESSMENT BY DYNAMIC CONE PENETRATION TEST

地盤工学分野 横山功基

Lab. of Geotechnical engineering Koki YOKOYAMA

大型動的コーン貫入試験のトルク計測中に土中で生じる音を利用した土質判定手法の構築を目指して、トルク計測を再現した模型実験装置を用いて種々の細粒分含有率や密度、土被り圧条件で摩擦音計測実験を行った。摩擦音の発生機構に着目した分析の結果、摩擦音に与える密度、土被り圧の影響はコーンに作用するせん断応力に現れ、せん断応力と摩擦音には細粒分含有率毎に一様の関係が得られた。また、模型実験で得られた知見を実地盤で計測した摩擦音に適用し粒度特性値の評価を試みた。

This paper shows results of friction sound measurement obtained from a series of model test which simulated an in-situ torque measuring by the dynamic cone penetration test. The model tests were performed on sandy soils with various dry densities and different fines contents under several overburden pressures to determine the soil classification using friction sound. The mechanism of the friction sound generation was examined on the basis of testing results considering shearing phenomenon occurring around the cone. As a result, a better correlation was found between amplitude of friction sound and shear stress at the surface of the cone. Finally, a study was attempted to evaluate grain size properties of strata using in-situ measured friction sound applying results of the study.

### 1. まえがき

近年、2011年の東北地方太平洋沖地震をはじめとする大規模地震に伴って液状化現象が発生し、宅地やライフライン施設が甚大な被害を受けた。このことから、現在宅地向けの経済的な液状化判定のための地盤調査技術の開発が求められている<sup>1)</sup>。液状化判定には細粒分含有率等の地盤の粒度特性値を求める必要があるが、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)では土試料の採取を行わ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では液状化判定ができないのが現状である。

そこで本研究では、SRSのトルク計測中に生じるコーンと地盤の摩擦音に着目し、摩擦音を利用した土試料の採取を伴わない地盤の粒度評価技術の開発を目的として、SRSのトルク測定を模擬した模型装置を作製し、摩擦音計測実験を行った。本研究は様々な地盤の細粒分含有率及び密度、土被り圧条件で行った模型実験の結果を用いて、摩擦音に及ぼす種々の因子の影響を評価することを目的としている。

### 2. 模型装置の概要と実験方法

SRSによる摩擦音計測では、トルク計測中にロッド先端に固定されたコーンが地中で回転するとき周辺地盤との摩擦で生じる音を、コーンに内蔵したコンデンサマイクを用いて計測する。図-1は本研究で使用した模型実験装置の模式図である。模型土層はステンレス製で直径280mm、高さ338mmの円筒形である。土層底面の載荷板を油圧ジャッキで押し上げることによって上載圧を載荷した。装置に固定したレーザー変位計を用いて載荷板の垂直移動量を計測し、これを模型地盤の圧縮量とみなして所定の上載圧条件における模型地盤の平均密度を求めた。また、土層内部にコーン内のマイクと同じ深さでコーン端部との距離 $\delta=40, 80\text{mm}$ の位置に土圧計を設置し、コーン近傍( $\delta=40\text{mm}$ )の鉛直応力 $\sigma_v$ と水平応力 $\sigma_{h1}$ 、コーン遠方( $\delta=80\text{mm}$ )の水平応力 $\sigma_{h2}$ を計測した。また、土層底板(載荷板)にも設置した土圧計の値が設定した上載圧条件となるようにジャッキを調節した。

模型実験では、SRS実機による実地盤の摩擦音計測で使用するものと同じコンデンサマイク内蔵型のコーン

表-2 実験条件

試料	$F_c$ (%)	相対密度, $D_r$ (%)	上載圧, $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )
硅砂6号	0	30, 40, 50, 60, 80	20~80 (20刻み)
細粒分混合砂1	30	30, 50, 80	120~280 (40刻み)
細粒分混合砂2	60	50, 60, 80	

を使用した。装置上部のトルクモーターによって、SRS と同じ回転角速度  $r_c=45\text{deg/s}$  でコーンを2回転させ、その間に生じる摩擦音を計測した。

実験に使用した試料は硅砂6号及び硅砂6号に細粒分含有率  $F_c=30, 60\%$  となるように細粒硅砂を混ぜた細粒分混合砂である。表-1 に実験で使用した土試料の諸量を、図-2 に粒径加積曲線を示す。模型地盤は、土層を10層に分けた突き固め法によって密度を調節して作製した。

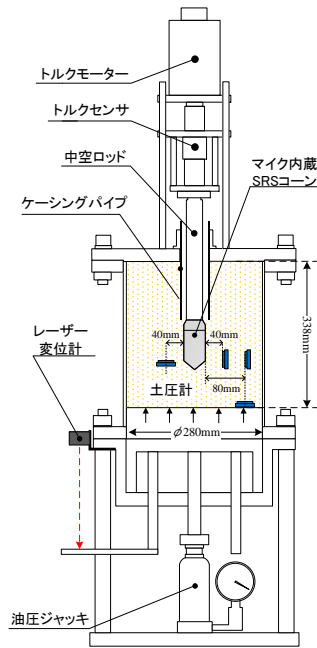


図-1 模型装置の模式図

表-2 に実験条件を示す。

硅砂6号に対する実験では、摩擦音に及ぼす密度の影響を詳細に調べるために5通りの密度条件で模型地盤を作製した。表-2 中の相対密度は地盤作製時の相対密度であり、実験中に所定の上載圧に対して変化した。地盤作製時の相対密度が小さいほど実験中の密度変化は大きい。特に、細粒分が多く緩い地盤は圧縮量が大きく、載荷板の許容変位量に容易に達してしまうため、実験を行うことが困難である。そこで、 $F_c=60\%$ の地盤については最も緩い密度条件で  $D_r=50\%$  とした。上載圧  $\sigma$  は  $20\sim 80\text{kN/m}^2$  までは  $20\text{kN/m}^2$  刻みで、 $80\sim 280\text{kN/m}^2$  までは  $40\text{kN/m}^2$  刻みで上載圧を増加させ、各々の上載圧条件においてコーンを回転させて摩擦音を計測した。

表-1 実験で使用した試料とその諸量

試料	細粒分含有率 $F_c$ (%)	平均粒径 $D_{50}$ (mm)	均等係数 $U_c$	最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )
硅砂6号	0	0.31	1.8	1.24	1.58
細粒分混合砂1	30	0.24	40.0	1.25	1.88
細粒分混合砂2	60	0.021	91.7	1.06	1.73

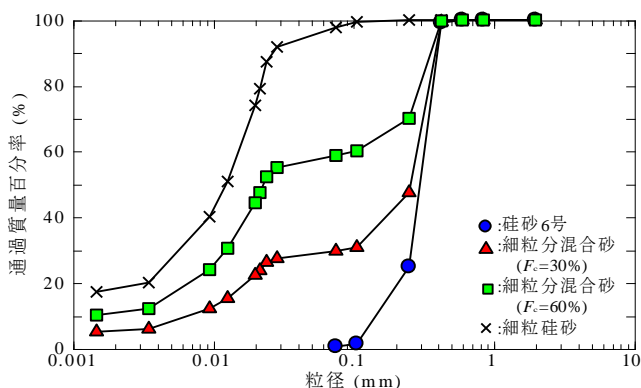


図-2 実験で使用した試料の粒径加積曲線

図-3 に実験結果の代表例として硅砂6号、 $D_r=60\%$ 、 $\sigma=120\text{kN/m}^2$  の条件においてコーンが2回転する間に計測された音圧、上載圧、地盤内応力、トルク及び載荷板垂直変位の時刻歴を示す。音圧データはコーン回転前のデータをノイズサンプルとしたスペクトル減算法によってノイズ除去を施した後のものである。コーン回転中に上載圧 ( $120\text{kN/m}^2$ ) を一定値に保つために手でジャッキを調節した。また、音圧振幅にはコーン回転中に大きな変動は認められない。鉛直応力  $\sigma_v$  及びコーン遠方の水平応力  $\sigma_{h2}$  についても、コーン回転中に大きな変動はないが、これに対してコーン近傍の水平応力  $\sigma_{h1}$  はコーンの回転と同時に増加し、周期的に変動する様子が分かる。このことから、コーン近傍では回転の影響を受けて応力が変動していると考えられる。また、トルクは回転開始と同時に上昇しピークに達した後、緩やかに減少する傾向が認められた。載荷板軸変位はコーン回転中に変動がなく、模型地盤の密度が一定であることがわかる。これらの時刻歴からコーン回転中のデータを切り出し、音圧は振幅の平均的な大きさを表す実効値の2乗(2乗音圧)を、その他の計測値は平均値を算出し、データの分析に使用した。

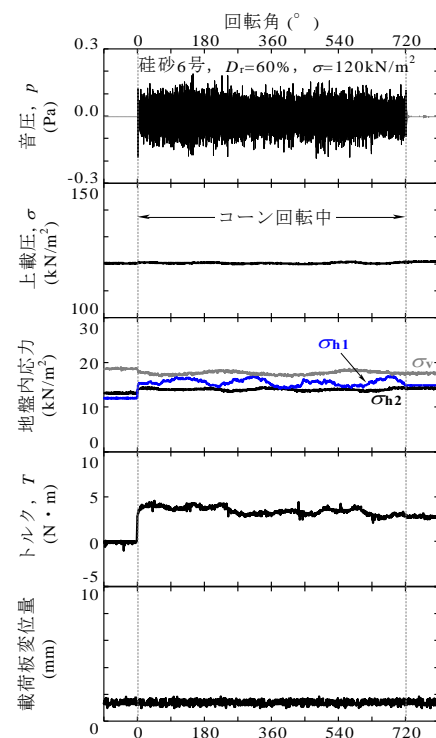


図-3 計測された波形の例

### 3. 実験結果

土圧計で計測された地盤内応力のうち、コーン側面に垂直に作用する水平応力 $\sigma_{h1}$ に着目し、2乗音圧との関係を図-4に示す。図より、水平応力 $\sigma_{h1}$ が大きいほど2乗音圧が大きい傾向が認められることから、摩擦音の大きさは応力に影響を受けることがわかる。水平応力と2乗音圧は細粒分含有率ごとに良好な関係にあるが、 $\sigma_h$ が20以上の範囲で増加の傾きはわずかに異なる。

図-5にトルクと摩擦音の関係を示す。トルクも水平応力と同様に2乗音圧と良好な関係があり、特に(b) $F_c=30\%$ の結果において密度によらず一様な関係が顕著である。ここで、摩擦音は回転で生じたコーン周面の音を1つのマイクで計測しており、トルクはコーン周面の回転抵抗力の総和である。摩擦音とトルクはどちらもコーン周面で生じた現象の総量を表すパラメータであるので、両者の相関が高い結果が得られたと考えられる。

### 4. 考察

#### 4.1 摩擦音に及ぼす密度の影響

実験結果より、応力とトルクは摩擦音と相関があり、特にトルクと2乗音圧の関係は密度によらず一様な関係を示すことが分かった。また、コーンに作用する垂直応力と2乗音圧の関係は密度ごとに増加傾向が異なることから、トルクは応力と密度の影響を受けた後のコーンの拘束力であるといえる。ここで、コーンの回転による摩擦現象はせん断現象に置き換えることができ、トルクはコーン周面に作用するせん断応力によるモーメントの総和であると考え、トルクはせん断応力 $\tau$ を用いて次の(1)式で表すことができる。

$$T = \tau \cdot r \cdot A \quad (1)$$

ここで、 $r$ はコーン半径(2.25cm)、 $A$ はコーン側面の表面積(148cm<sup>2</sup>)であり、条件によって変わらない定数である。また、せん断応力はクーロンの式より垂直応力 $\sigma$ 、せん断抵抗角 $\phi$ を用いて(2)式で表される。

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi \quad (2)$$

このことからトルクは $\sigma$ 、 $\phi$ によって変化し、トルクが応力と密度の影響を受けるとすると密度の影響は摩擦角 $\phi$ に現れると考えられる。摩擦角はせん断面の状態によって異なり、コーンの回転によるせん断現象としては以下の2通りが考えられる。

- ①コーン周辺の土と土のせん断(土粒子摩擦)
  - ②ステンレス製のコーンと土のせん断(壁面摩擦)
- そこで、コーン付近で起こるせん断現象を把握する目的で①、②の場合を想定したせん断試験を行った。①の摩擦角は一面せん断試験によって求まる。また、②は一面せん断試験装置の上部せん断箱をステンレス板に取り

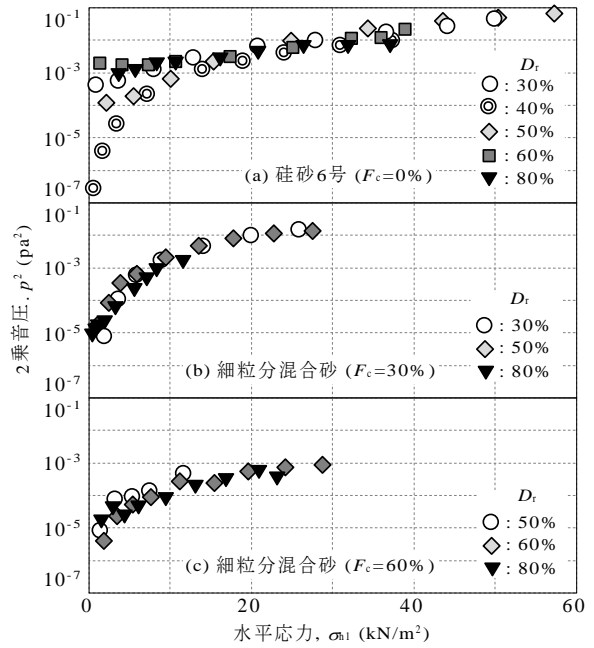


図-4 水平応力と2乗音圧の関係

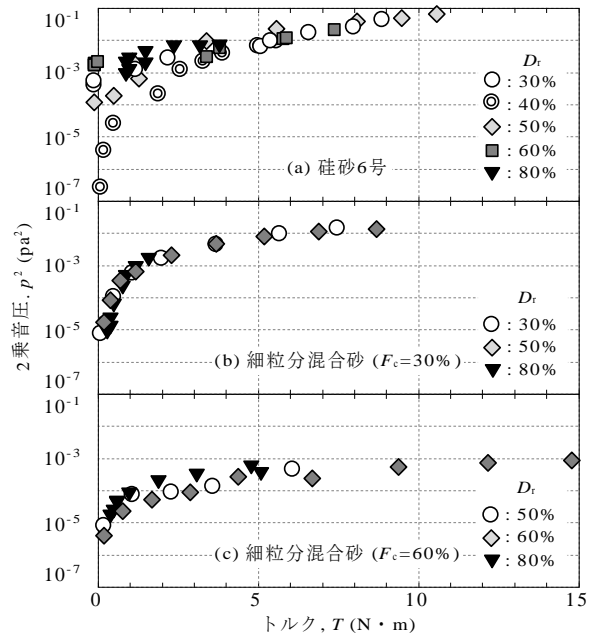


図-5 トルクと2乗音圧の関係

換え、下せん断箱に詰めた砂とステンレス板のせん断試験(以後、ステンレスせん断試験と呼ぶ)によって求めた。試験は、模型実験で使用した試料を用いて緩詰め、中詰め、密詰め、密詰めの供試体を作製した。それぞれの供試体に対して垂直応力 $\sigma=50, 100, 150\text{kN/m}^2$ で圧密した後に簡易定圧条件でせん断を行い、それぞれの試料と密度で得られた強度線の傾きから摩擦角を求めた。

一面せん断試験及びステンレスせん断試験より求めたせん断抵抗角 $\phi_d$ 、壁面摩擦角 $\phi_w$ と圧密終了後の相対密

度の関係を図-6に示す。図中には、畑中・内田ら<sup>2)</sup>によって求められた実地盤の砂質土のせん断抵抗角も併せて示している。畑中・内田らは  $N$  値の拘束圧依存性を考慮した貫入抵抗値  $N_1$  値とせん断抵抗角  $\phi_d$  の関係式を提案しており、提案式の  $N_1$  値は Meyerhof の式によって  $D_r$  に換算して表すことができる。土被り圧  $\sigma_v'$  を用いた  $N_1$  値の算定式及び Meyerhof の式を以下に示す。

$$N_1 = N / (\sigma_v' / 98)^{0.5} \quad (3)$$

$$D_r = 21 \cdot (N_1 / 1.7)^{0.5} \quad (4)$$

また、式(4)を用いて  $N_1$  を  $D_r$  に換算した畑中・内田らの式を次に示す。

$$\begin{aligned} \phi_d &= 0.28D_r + 20 \quad (30\% \leq D_r \leq 72\%) \\ \phi_d &= 40 \quad (D_r > 72\%) \end{aligned} \quad (5)$$

せん断抵抗角は試料によらず密度が大きいと大きい結果が得られた。畑中・内田らの式と比べて試験値の近似式の傾きはやや小さいが、本研究で使用した試料のせん断抵抗角は実地盤と相違ない。また、本研究で使用した試料のせん断抵抗角と相対密度の関係は以下の式(6)で近似できた。

$$\phi_d = 0.16D_r + 23.9 \quad (6)$$

壁面摩擦角は試料ごとに異なり、同一試料では密度による差が明確ではない。ここで、篠原ら<sup>3)</sup>は粉粒体の摩擦角特性について表面摩擦や粒子の噛み合わせなどの観点から理論的考察を行い、せん断抵抗角は空隙率(粒子接触点数)に影響を受けるが、壁面摩擦角は空隙率とは無関係に壁面と粉粒体の性質によって一定値をとることを示した。このことから、壁面摩擦角は密度によらず土によって異なると思われる。

以上より、せん断現象が土粒子摩擦であるか壁面摩擦であるかによって摩擦角  $\phi$  に及ぼす密度の影響の有無は異なり、模型実験の結果を説明できない。そこで、せん断試験より得られた摩擦角を用いて模型実験結果を分析し、回転中のコーン付近で生じるせん断現象の把握と摩擦角に与える密度の影響評価を行った。

図-6より、せん断抵抗角は壁面摩擦角に比べて大きいことがわかる。したがって、回転中のコーン周面の摩擦角がとりうる範囲は、せん断抵抗角と壁面摩擦角の間にあると考えられる。せん断現象がすべて土と土のせん断(①)であれば摩擦角はせん断抵抗角と等しく最大であり、すべて土とコーンによるせん断(②)であれば摩擦角は壁面摩擦角と等しく最小であると考えられる。しかし①、②は極端な場合であり、実現象としてのコーン回転中に起こるせん断現象は①と②の複合的な現象であると考えられる。

そこで、各計測におけるコーン周面の摩擦角  $\phi$  (以後、複合摩擦角と呼ぶ) を求めた。ここで、模型装置の仕様

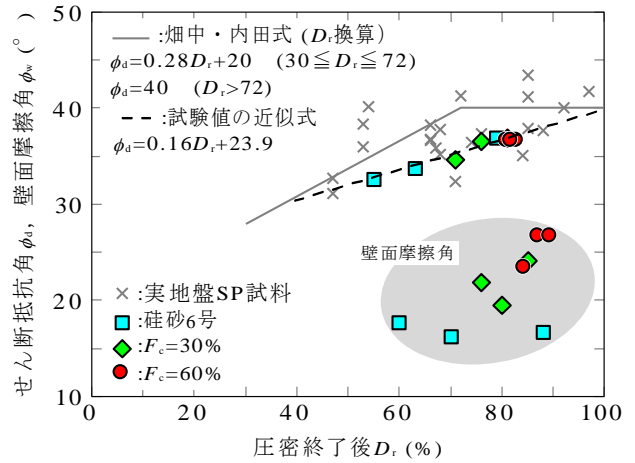


図-6 圧密終了後の相対密度とせん断抵抗角、壁面摩擦角の関係

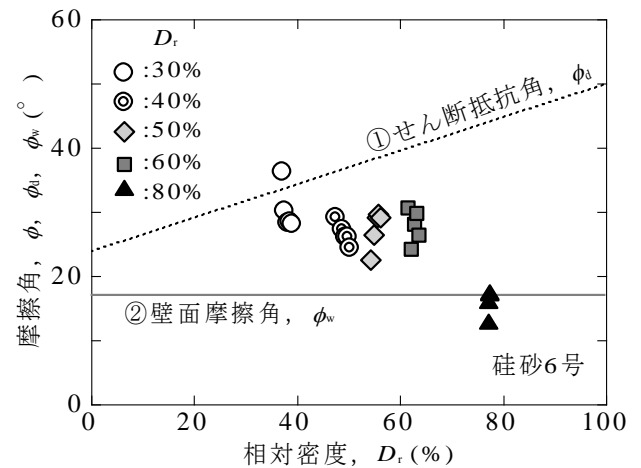


図-7 相対密度と摩擦角の関係

上、低いトルクを正確に計測できていなかったため、そのようなデータは分析の対象外とした。また、 $D_r=40\%$  については低い応力で 2 乗音圧との関係が他の相対密度条件と大きく異なるため、 $\sigma_h > 10 \text{ kN/m}^2$  のデータのみを抽出し、これらのデータを基に以下の分析を行った。複合摩擦角を求める過程で必要なせん断面に作用する垂直応力  $\sigma_h$  は、コーン近傍と遠方の水平応力の関係が傾き 1 に近いと仮定し、 $\sigma_h = \sigma_{h1}$  と仮定した。また、せん断抵抗角  $\phi_d$  は式(6)に基づいて定め、壁面摩擦角  $\phi_w$  は密度によらず細粒含有率によって異なることから、珪砂 6 号の壁面摩擦角の平均値  $\phi_w = 17^\circ$  を与えた。

上記のルールに従って求めた  $\sigma_h$  と式(1)、(2)を用いてトルクから求めた複合摩擦角  $\phi$  及び  $\phi_d$ 、 $\phi_w$  と相対密度の関係を図-7に示す。 $D_r=30\%$  の複合摩擦角はせん断抵抗角に近く、 $D_r=80\%$  の複合摩擦角は壁面摩擦角に近いことがわかる。また、それ以外の密度条件の複合摩擦角に違いは見られない。しかし、せん断抵抗角が相対密度に対して線形に増加することを加味すれば、相対密度が大

きいほど複合摩擦角は相対的に壁面摩擦角に近づくと  
いえる。そこで、せん断抵抗角と壁面摩擦角で囲まれた  
範囲における複合摩擦角 $\phi$ の相対的な位置を表す指標と  
して、相対摩擦角比 $\phi_r$ を定義し、相対密度と相対摩擦角  
比の関係を調べた。相対摩擦角比 $\phi_r$ は以下の式(7)で定義  
し、 $\phi=\phi_d$ の時に1、 $\phi=\phi_w$ の時に0となる関数で表した。

$$\phi_r = (\phi - \phi_w) / (\phi_d - \phi_w) \quad (7)$$

図-8に図-7より式(7)を用いて求めた相対摩擦角比と相  
対密度の関係を示す。この図より、相対密度と相対摩擦角  
比の関係を表すモデル線を描き、次式で定義した。

$$\begin{aligned} \phi_r &= 1 && (D_r < 35\%) \\ \phi_r &= -0.023D_r + 1.86 && (35\% \leq D_r \leq 80\%) \\ \phi_r &= 0 && (80\% < D_r) \end{aligned} \quad (8)$$

#### 4.2 摩擦音に及ぼす細粒分含有率の影響

図-5より、トルクと2乗音圧の関係は密度によらず  
細粒分含有率ごとに一樣の傾向を示すことが分かった。  
そこで、トルクを式(1)よりせん断応力に換算し、細粒  
分含有率ごとにプロットを変えて図-9に示す。細粒分  
含有率が大きいほどせん断応力に対して2乗音圧が小  
さい傾向を示すことがわかる。 $F_c=30\%$ の結果は密度に  
よらず一樣な関係が顕著であったため、この結果に対し  
て非線形回帰で累乗近似を行うと、式(10)が得られた。  
また、曲線の傾きを1.4として、他の細粒分含有率の結果  
に対してそれぞれ図中の点線で表すモデル線を与えた。  
細粒分含有率ごとに決定した $p^2$ - $\tau$ 関係のモデル式  
を以下に示す。

$$\text{硅砂6号 } (F_c=0\%) : p_0^2 = 6.2 \times 10^{-4} \cdot \tau^{1.4} \quad (9)$$

$$F_c=30\% : p_{30}^2 = 1.8 \times 10^{-4} \cdot \tau^{1.4} \quad (10)$$

$$F_c=60\% : p_{60}^2 = 0.075 \times 10^{-4} \cdot \tau^{1.4} \quad (11)$$

与えたモデル式はそれぞれの試料の実測値に近い曲線  
であり、細粒分含有率が小さいほど、または平均粒径が  
大きいほど切片が大きいと考えられる。

#### 4.3 模型実験結果の現場摩擦音計測実験への適用

最後に、模型実験で得られた知見を、本年度行った大  
阪市港区弁天町における現場摩擦音計測実験の結果に  
適用して本研究の結果の有用性を検討した。

4.2から、実地盤の摩擦音計測実験において、せん断  
応力が既知であれば、式(9)を用いて実地盤の粒度が硅  
砂6号と同じであるときの2乗音圧 $p_0^2$ を推定できる。  
次に、実地盤で計測された2乗音圧 $p^2$ と $p_0^2$ を比較する  
と、硅砂6号に対する相対的な実地盤の粒度を評価する  
ことができる考えられる。そこで、実地盤のせん断応  
力を求め、実地盤で計測された2乗音圧 $p^2$ と式(9)を用

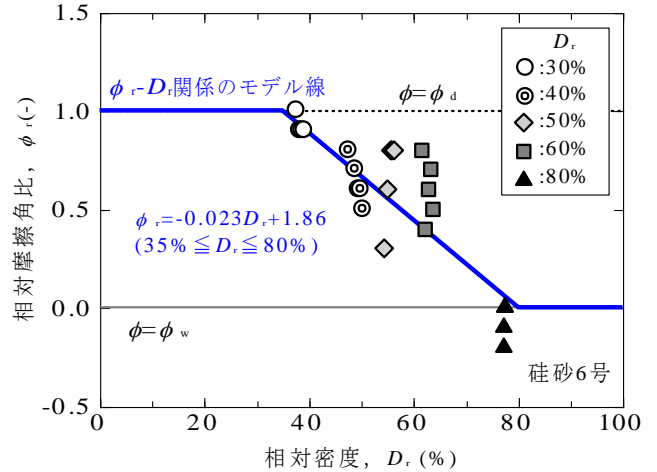


図-8 相対密度と相対摩擦角比の関係とモデル線

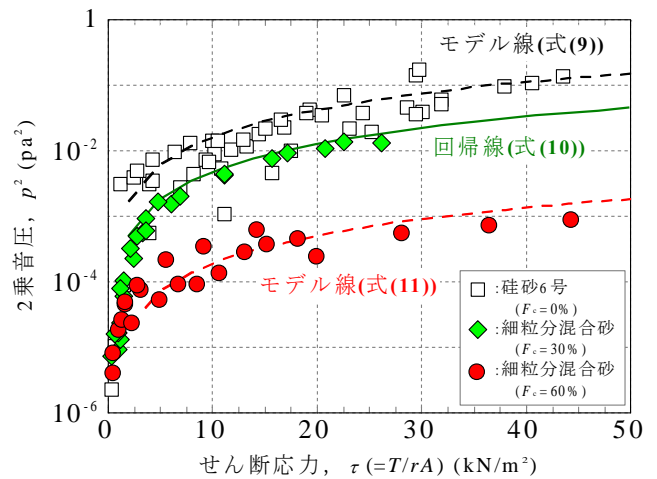


図-9 せん断応力と2乗音圧の関係

いて算出した $p_0^2$ の比 $p^2/p_0^2$ をとり、粒度特性値との関  
係を調べた。

現場実験では、別途標準貫入試験によってサンプリ  
ングを行っている。そこで、サンプリング試料の密度試験  
結果を用いて実地盤の有効土被り圧 $\sigma_v'$ を求めせん断応  
力の算出に必要な値を以下の方法で求めた。

- 1) せん断面に作用する垂直応力、 $\sigma_h$   
土圧係数 $K_0=0.5$ をかけて求めた。
- 2) 相対密度、 $D_r$   
SRSによって求まる $N_d$ 値を用いて式(3)、式(4)によ  
って求めた。
- 3) 土のせん断抵抗角、 $\phi_d$   
下限値を $\phi_d=28^\circ$ として、畑中・内田らの式(5)を用い  
て求めた。
- 4) 土とコーンの壁面摩擦角、 $\phi_w$   
ステンレスせん断試験結果の平均的な値である  
 $\phi_w=20^\circ$ を用いた。
- 5) 相対摩擦角比、 $\phi_r$   
式(8)によって求めた。

### 6) 複合摩擦角, $\phi$

式(7)を,  $\phi$ を求める式に変換して求めた。

上記で求めた $\sigma_n$ 及び $\phi$ から, 式(2)より実地盤のせん断応力を求めた。図-10に上記の方法で求めたパラメータと現場実験結果及び実地盤の粒度の深度分布を示す。複合摩擦角は20~30°の範囲に分布しており, せん断応力に与える密度の影響は小さい。また, 深度3m程度までは, せん断応力から求めた推定 $p_0^2$ は非常に小さいが, それに比べて実測値である $p^2$ は大きい。そのため,  $p^2/p_0^2$ は浅い深度で大きくなりやすいと考えられる。深度5m以深では特に $D_{50}$ と $p^2/p_0^2$ の深度分布に相関がみられ, 本研究の結果を用いた粒度推定方法の有用性が示唆された。ここで, 図-10の深度5m付近において平均粒径 $D_{50}$ の深度分布にピークが見られる。そこで, 深度5m付近にある $p^2/p_0^2$ のピークが平均粒径のピークと同深度となるようにSRSの摩擦音計測深度を補正し, 標準貫入試験による試料採取深度に近い深度のみを抽出して $p^2/p_0^2$ と粒度特性値の関係を調べた。図-11に抽出後の $p^2/p_0^2$ と細粒分含有率, 平均粒径の関係を示す。図-11では, 図-10の $p_0^2$ の増加傾向が一定に近くなる深度3mを境界にプロットを分けて示し, 細粒分を変えた模型実験結果も併せて示している。深度3m以深において,  $p^2/p_0^2$ と $D_{50}$ は相関が高いことがわかる。模型実験の結果に比べて現場実験の結果は $p^2/p_0^2$ に対する平均粒径が小さく評価されるが, これは模型実験とは違って実地盤で計測される摩擦音には現場固有のノイズやロッドと土の摩擦等の雑音が含まれているためだと考えられる。したがって, 今後模型実験と現場実験の摩擦音の違いに着目した分析を行うことにより, 摩擦音による実地盤の粒度推定が可能になると考えられる。

### 5. 結論

本研究から以下の結論が得られた。

- 1) 応力が大きいと摩擦音は大きい。
- 2) トルクと2乗音圧は良好な関係があり, 密度によらず細粒分含有率によって一定の傾向を示す。
- 3) コーンの回転による摩擦をせん断現象と捉えると, 密度は摩擦角に影響を与えることが分かった。
- 4) 応力と密度の影響を同時に考慮して摩擦音に基づいた実地盤の粒度評価ができた。
- 5) 実地盤の摩擦音計測で得られる摩擦音は大きく, 現場固有の雑音を除去する必要がある。

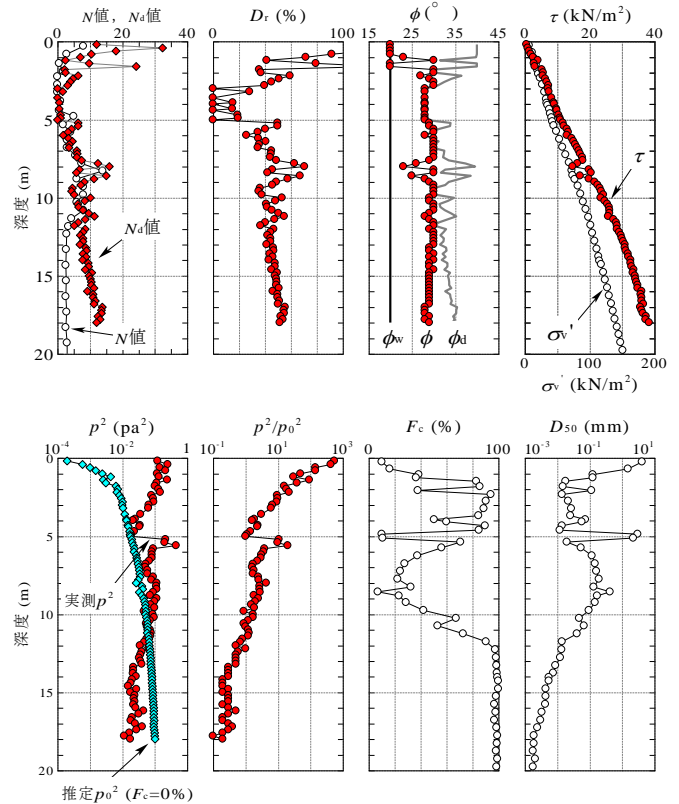


図-10 推定パラメータと実地盤の粒度, 現場実験結果の深度分布

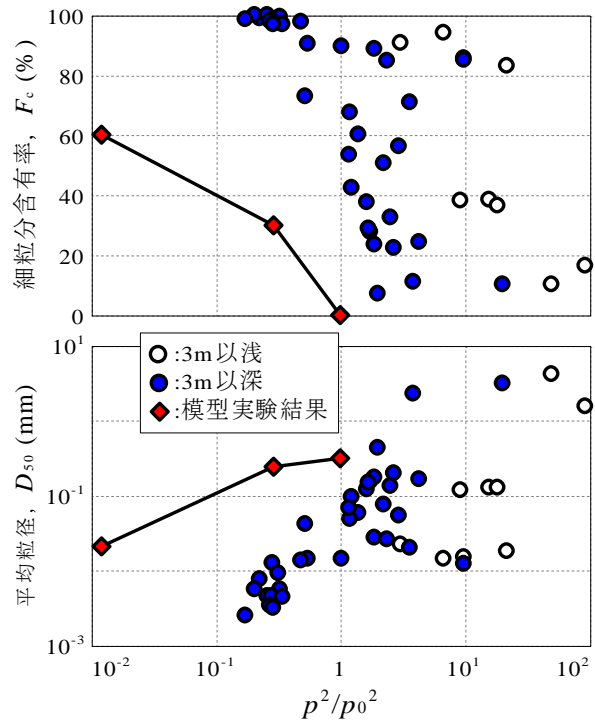


図-11  $p^2/p_0^2$ と細粒分含有率, 平均粒径の関係

【参考文献】1) 国土交通省:「宅地の液化化被害可能性判定に係る技術指針・同解説(案)」(最終閲覧日:2018年11月22日) <http://www.mlit.go.jp/common/000993757.pdf> 2) 畑中・内田・他:砂質地盤の内部摩擦角 $\phi_d$ と標準貫入試験のN値についての一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第506号, 125-129, 1998 3) 篠原・他:粉粒体の摩擦角特性に関する考察, 化学工学第32巻, 第1号, 1968