

室内コーン貫入試験による路床土の材料評価について

日大生産工(院) ○知念 優子 日大生産工 秋葉 正一
日大生産工 加納 陽輔

1. はじめに

現在、地質調査は、地質構造や土の工学的性質を明らかにするために行われ、地域開発、建設工事等において必要不可欠な調査である。地盤から得られる情報としては、地盤の強度、変形特性、間隙水圧等があり、これらは、原位置試験または室内試験から把握することができる。

原位置試験の代表的なものとしては、標準貫入試験やコーン貫入試験がある。標準貫入試験とは、一般的に現場で用いられる試験で、N値や地盤情報が容易に得られるが、ボーリングを必要とするため、大掛かりなものとなる。コーン貫入試験は、軟弱地盤において簡便に行える上に先端抵抗や間隙水圧などから、地盤の土層判別等を行うことができるため、最近では現場でも多く用いられるようになった。

コーン貫入試験は、室内でも実施が可能であり、室内コーン貫入試験では、実験結果を用いてトラフィカビリティや、安定処理を行う際の改良程度の判定が行える。

また、基礎構造物の設計で必要とされている強度定数である粘着力 C と内部摩擦角 ϕ を、現場コーン貫入試験から求めることも可能である。さらに、この試験から構造評価等において必要な弾性定数を推定する試みも行われているが、確立された手法はなく、特に室内試験による推定手法はない。

本研究は室内コーン貫入試験から弾性定数を推定することを目的とした。そこで今回は、モールド内に拘束された有限円柱がコーンによる貫入を受けた場合の3次元弾性解析を有限Fourier-Hankel変換による方法で解析し、表面たわみに影響する因子を想定した上で、主としてその変形特性を数値計算により検討した。

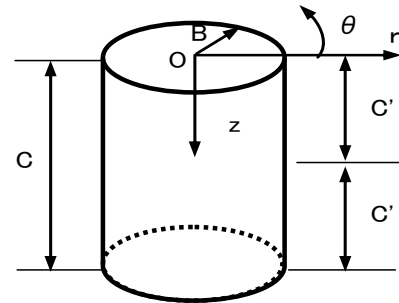


図-1 軸対称有限円柱座標

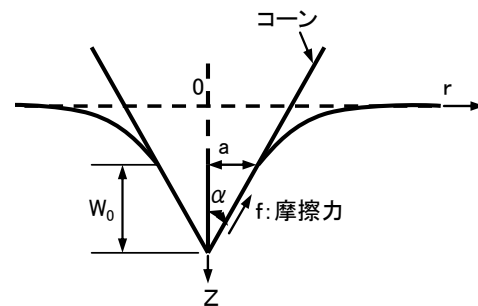


図-2 コーンによる半無限弾性体表面の変形

さらに、モールド内に締め固めた山砂および関東ロームの室内コーン貫入試験を実施し、実測による変形特性と解析結果によるものとを比較検討した。

2. 解析方法

図-1に示す軸対称有限円柱において、 r, θ, z 方向の変位を u, v, w とし、同方向の応力成分を $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 、さらに $r-z$ 方向のせん断応力を τ_{rz} とする。また、同方向のひずみ成分 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ およびせん断ひずみ γ_{rz} と応力成分との関係(フックの法則)は式(1)に示す通りである。

$$\begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2G+\lambda) & \lambda & \lambda \\ \lambda & (2G+\lambda) & \lambda \\ \lambda & \lambda & (2G+\lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad \cdots(1)$$

ここで、上式中、 G および λ はラーメの弾性係数である。本解析は有限Fourier-Hankel変換によ

The Elastic Estimation of Subgrade Soil used Cone Penetration Test in Laboratory.

Yuko CHINEN, Shoichi AKIBA, and Yosuke KANOU

る方法で変位成分の解析解を誘導し、この結果を式(1)に代入することで応力成分を含めた厳密解の誘導を行った。解には境界未知数が含まれるが、それらは、以下の境界条件により求めた。

$$z=0 \text{ で } \alpha=q(r), u=0, \tau_z=f(r) \quad \dots(2)$$

$$r=B \text{ で } \tau_z=k \cdot w = \beta/(1-\beta)k^* \cdot w \\ u=0 \quad \dots(3)$$

$$z=C \text{ で } w=0, \tau_z=0 \quad \dots(4)$$

式(3)において、 k はバネ定数であり、これを右辺のように無次元数 β ($0 \leq \beta \leq 1$) で表現している。 $\beta=0$ ではモールド壁面の摩擦がなく、供試体の変位が自由であるが、 $\beta=1$ ではモールド壁面の摩擦により供試体の変位を拘束する。本解析ではこれを拘束係数と称することとする。なお、 k^* は、 k と次元を一致させるためのパラメーターである。

図-2に示すように、半無限弾性地盤にコーンが貫入した場合の表面の荷重強度分布 $q(r)$ は、Sneddon I. N. により、次式で与えられる。

$$q(r) = -\frac{2G(G+\lambda)}{2G+\lambda} \left(\frac{w_0}{a} \right) \cosh^{-1} \left(\frac{a}{r} \right) \quad \dots(5)$$

ここで、 w_0 は、見掛けの変位と称することとする。なお式(5)の積分は次式で与えられる。

$$P = \frac{2G(G+\lambda) \cdot \pi a w_0}{2G+\lambda} \quad \dots(6)$$

一方、 $f(r)$ は、コーンと供試体との摩擦係数を μ とすれば、次式で与えられる。

$$f(r) = \mu \sin \alpha \cdot q(r) \quad \dots(7)$$

3. 解析結果

3-1 モールドの大きさが表面たわみに与える影響

図-3は表面たわみ w/w_0 ($w_0=1$) と r/B の関係について、モールド径(B/H , H 一定)を変化させて調べたものである。これより、見掛けの変位が一定の表面たわみは B/H が大きくなるにつれて減少する。

3-2 荷重およびコーンと土の摩擦の大きさが先端変位に与える影響

図-4は荷重 P と変位 w の関係について、コーンの先端角度 α を変化させて調べた結果である。

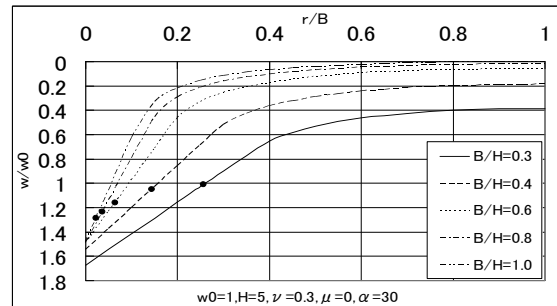


図-3 モールド径の影響

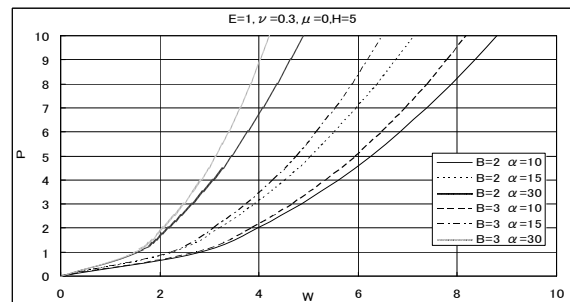


図-4 先端角度の影響

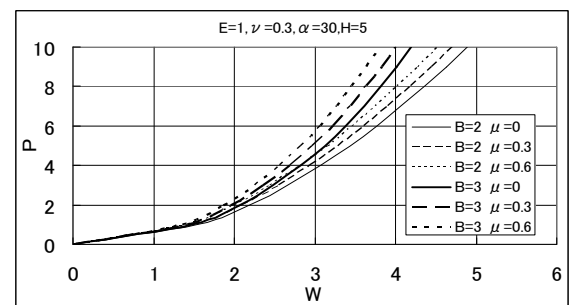


図-5 先端摩擦の影響

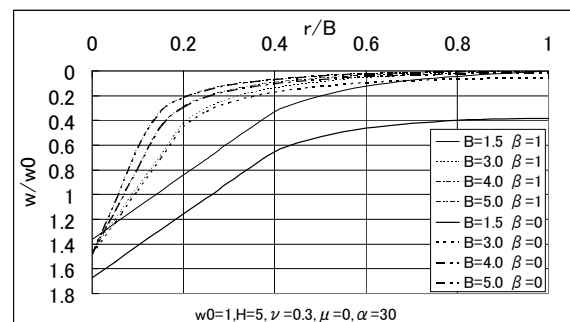


図-6 完全拘束と自由

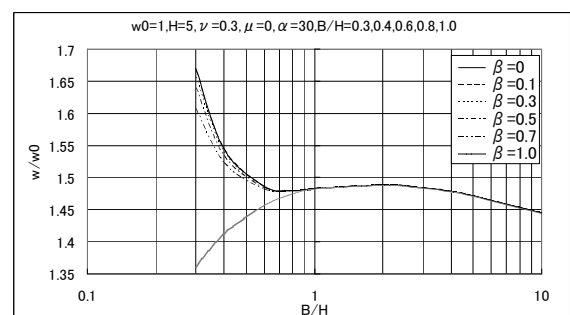


図-7 先端変位とB/Hの関係

まず、荷重の増加に対する変位の増加傾向は直線的ではなく、またこれはコーンの形状に関係ない。つぎに、同一の荷重に対する変位の大きさは、コーンの先端角度が大きいものほど小さい。

図-5は荷重 P と変位 w の関係について、コーンの先端角度 α が一定の場合、コーンと有限円柱の間に生じる摩擦力を変化させて調べた一例である。これより、同一の荷重に対する変位の大きさは、摩擦係数が大きいものほど小さいことがわかる。

3-3 拘束面の摩擦が表面たわみに与える影響

図-6は表面たわみ w/w_0 ($w_0=1$) と r/B の関係について、モールド側面の摩擦の影響を調べたものである。結果はこの面で摩擦が無い場合 ($\beta=0$) と、この面の摩擦が最大でこの面における変位が拘束される場合 ($\beta=1$) で比較した。これより、摩擦のある場合は摩擦のないものに比べ、表面たわみが小さくなる。その傾向はモールド径の小さいものほど顕著となっている。そこで、その傾向を把握するために、コーン先端変位とモールド径との関係を拘束係数 β を変化させて調べた結果が図-7である。これより、先端変位の大きさはモールド径が小さいものほど β の影響を受けるが、モールド径が一定以上の大きさになると拘束係数の影響を受けないということがわかる。

4. 実験概要

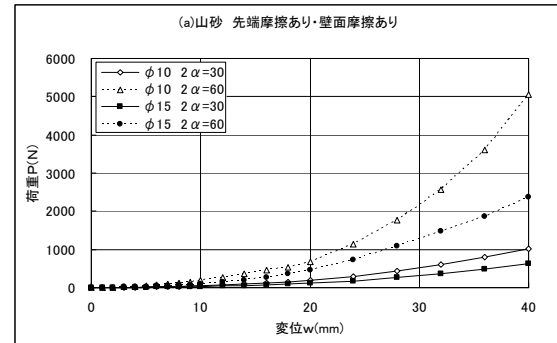
試料は、山砂と関東ロームを使用した。それぞれの物性値は表-1に示す通りである。

供試体の作製方法は、10cmモールドについては3層25回で供試体を作製し、15cmモールドについては正確なデータを得るために、10cmモールドでの密度と15cmモールドの密度を同じ値となるように、5層で締固めて供試体を作製した。なお、供試体作製時における試料の含水比は、表-1に示すとおり、山砂は最適含水比、関東ロームは自然含水比とした。

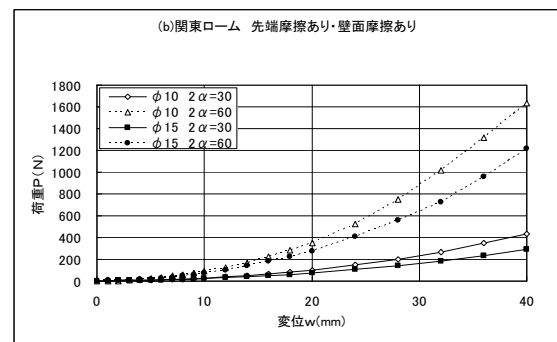
試験条件としてモールド径の影響を確認するために10cmモールド、15cmモールドの2種類、コーン先端角度の影響を確認するためにコーン先端角度 $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ の2種類、コーン先端摩擦の影響を確認するためにコーン先端に潤滑剤を塗布したものと、塗布しないものの2種類、壁面摩擦

表-1 試料の物性値

	山砂	関東ローム
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.670	2.653
液性限界 $W_L(\%)$	—	132.06
塑性指数 I_p	N.P.	39.73
均等係数 U_c	7.06	—
曲率係数 U_c'	3.59	—
自然含水比 $(\%)$	20.600	119.000
最適含水比 $(\%)$	15.200	—



(a) 山砂



(b) 関東ローム

図-8 モールド径および先端角度の影響

の影響を確認するために壁面に潤滑剤を塗布したものと、塗布しないものの2種類でコーン貫入試験を実施した。

コーン貫入試験方法は、インストロン社製の動的載荷装置を用いて貫入させた。貫入速度は、1分に1mmの速度で40mmまで貫入させた。

5. 実験結果

5-1 モールド径および先端角度の影響

図-8はモールド径および先端角度の影響について、荷重 P と変位 w の関係を調べたものである。これより、変位の増加に対する荷重の増加傾向は、下に凸の放物線形状を示しており、このような傾向は解析結果と同様である。

つぎに、コーン先端角度が同じ場合、同一荷重に対する変位の大きさは、モールド径が小さいものほど小さい。また、モールド径が同一の場

合、同一の荷重に対する変位の大きさは、コーン先端角度が大きいものほど小さい。このような傾向は、**図-4**で示した解析結果の傾向と同様であり、またこれは、試料の種類に関係ない結果となった。

5-2 先端摩擦の影響

図-9は、先端摩擦の影響について荷重 P と変位 w の関係を調べたものである。これより、同一の荷重に対する変位の大きさは、モールド径が同一の場合、山砂に関しては摩擦があるものの方が無いものに比べ若干小さくなり、関東ロームに関しては摩擦があるものの方が無いものに比べ、変位は大きくなるといった逆の結果となった。

山砂の結果は、解析結果と同様の傾向であるが、関東ロームについては解析結果と逆の傾向となった。ただし、関東ロームにおいて、同一の変位に対する荷重の摩擦の有無による差異は、山砂のそれと比べて小さい。したがって、関東ロームの供試体の含水比が高く、強度が弱いと予想される状態を考慮すれば、先端摩擦の影響は無いと考えて良いと思われる。

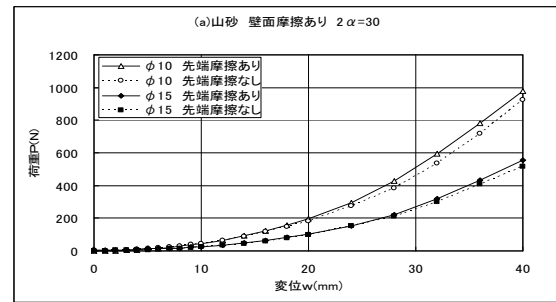
5-3 壁面摩擦の影響

図-10は壁面摩擦の影響について、荷重 P と変位 w の関係を調べたものである。これより、同一の荷重に対する変位の大きさは、モールド径が同一の場合、山砂に関しては壁面摩擦のあるものの方が無いものに比べ小さくなり、関東ロームに関しては摩擦があるものの方が無いものに比べ、変位は大きくなるといった逆の結果となった。

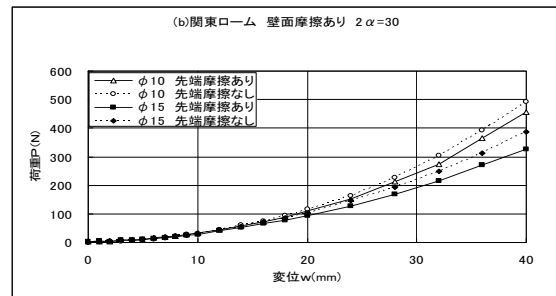
このような傾向は、**5-2**で考察した結果と同様であり、高含水比の関東ロームでは、壁面摩擦の影響は無視できるものと考えられる。

7. おわりに

本研究ではモールド内に拘束された有限円柱がコーンによる貫入を受けた場合の3次元弾性解析を有限Fourier-Hankel変換による方法で解析した。その結果、主として表面たわみに影響する因子を数値計算により調べ、これらの因子が表面たわみに影響を与えることがわかった。また、実験結果は、解析結果と同様の傾向が見られたが、コーン先端摩擦やモールド壁面の摩擦の影響は、供試体の物性値の状態によって、その影響は小さ

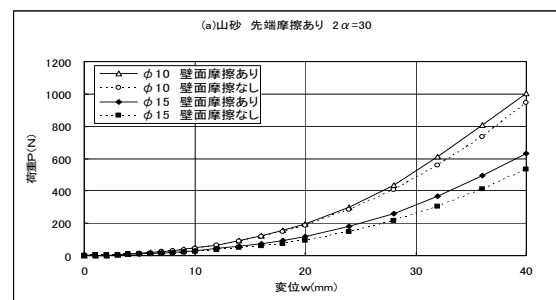


(a) 山砂

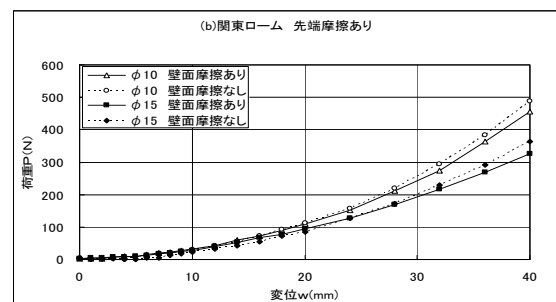


(b) 関東ローム

図-9 先端摩擦の影響



(a) 山砂



(b) 関東ローム

図-10 壁面摩擦の影響

くになると推察された。今後は、土の材料定数推定手法を提案するための検討を行う必要がある。

「参考文献」

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説(第一回改訂版), PP. 266~273, 2003.
- 2) Sneddon I.N.: Fourier Transforms, McGraw-Hill, pp. 462~468, 1951