

室内小型模型実験における地盤内部変位の測定法の開発

白 元珍*・森脇 武夫**・佐々木 康***

Development of Measuring Method of Displacement inside Small Size Model Ground in Laboratory Test

Wonjin BAEK, Takeo MORIWAKI and Yasushi SASAKI

It has been desired to observe the three-dimensional displacements inside the model ground in laboratory tests in order to understand the mechanism of three-dimensional behavior of ground. However, as the existence of a sensor buried in model ground causes an influence to the strain in small size laboratory tests, no direct measurement of the strain inside the model ground in laboratory tests was conducted.

In the present study, the displacements inside the model ground are obtained by measuring the intensity of the magnetic field induced by a small magnet buried in the model ground. By this newly developed device, it became possible to measure a radial strain in a model ground during the three-dimensional consolidation process.

Key words: internal displacement, measuring method, magnetic field, small size model test

1. はじめに

地盤が受ける荷重の多くは二次元あるいは三次元的であるため、地盤内部でも二次元あるいは三次元的な変形が生じている。また、パーチカルドレーン工法で改良された地盤のように、一次元的な荷重が作用して地表面が鉛直方向に一次的に沈下している場合でも、間隙水が水平方向に排水されるため地盤内部では水平方向の変形が同時に起こり、挙動は三次元的であることが知られている。

このような実地盤の内部挙動は、傾斜計や沈下板などによって計測され、三次元的な挙動メカニズムの解明や現場の施工管理に利用されている。しかし、寸法の小さな実内模型実験においては、計測機器を模型地盤に埋め込むことによる影響が無視できないため、模型地盤内部の変形を計測した例はない。

そこで、本研究では地盤内部の変位を模型地盤内部に小型磁石を埋め込み、その磁石が作り出す磁界強度を地盤外部に設置した磁気センサーによって計測し、磁界強度の変化から磁石の動きを求めて算出する方法を開発した。この方法では模型地盤内部の磁石の位置を特定する方法とし

て、磁石の位置と磁気センサー値の関係を実験的に求めたキャリブレーション曲線を利用する方法と、磁石が作り出す磁界の理論式を利用する方法の2つを提案し、圧密中に鉛直方向だけでなく水平方向にも変形が生じるパーチカルドレーン打設地盤の三次元圧密模型実験に適用した。

2. 地盤内部変位の測定

2.1 地盤内部変位の測定装置

パーチカルドレーン打設地盤では間隙水の移動方向(水平方向)と変形(沈下, 鉛直方向)の進行方向とが一致せず、圧密形式は三次元圧密となる。すなわち、パーチカルドレーンによる圧密では間隙水が内向き放射流れとなるため、圧密初期にドレーン側(内側)の粘土要素では間隙水圧の消散が進むために大きな体積ひずみが生じるが、非排水面側(外側)の要素では間隙水圧の消散が遅いために体積ひずみはほとんど生じない。しかし地盤は通常、等鉛直ひずみ条件となり、この条件を守るために非排水面側では(非排水)せん断ひずみが生じ、非排水面側からドレーン側に向かって半径方向変位が生じる。一方、圧密後半にかけて

* 山口大学 工学部 社会建設工学科 (元広島大学 大学院 工学研究科 社会環境システム専攻)

** 呉工業高等専門学校 環境都市工学科

*** 広島大学 大学院 工学研究科 社会環境システム専攻

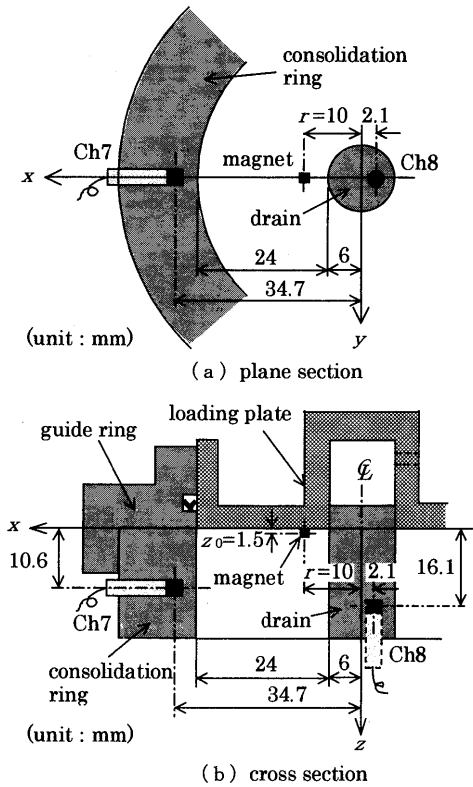


Fig.1 Magnet and magnetometers for measuring displacement inside specimen

は、非排水面側の要素で間隙水圧の消散に伴って体積ひずみが生じるが、ドレーン側の要素では体積ひずみがほぼ終了しているためにせん断ひずみが卓越する。そのため、等鉛直ひずみ条件を保つために圧密後半ではドレーン側から非排水面側に向かって半径方向変位が生じると考えられる。

このことを実験的に確認するために、Fig.1に示すように供試体内部に小型磁石を埋め込み、この磁石の作り出す磁界強度を供試体外部に設置した磁気センサーで計測し、磁界強度の変化から磁石の移動量を特定し、磁石埋め込み位置での地盤の内部変位を求めることのできる三次元圧密試験装置を新たに開発した。装置の全体図をFig.2に示す。この装置では、標準圧密試験と同じ直径60mm、高さ20mmの供試体を利用でき、供試体の中心部にドレーンを設けることによってバーチカルドレーン打設地盤の三次元圧密挙動が再現できる。この供試体の内部に高さ3mm×長さ4mm×幅2mmの小型フェライト磁石を磁極の方向が鉛直方向で長手方向が円周方向に一致するように埋め込み、供試体外側の圧密リングと供試体中心部のドレーン内部に設置した磁気ホール素子タイプの磁気センサーを用いて磁石の作り出す磁束密度を測定する。磁気センサーの設置位置をFig.1に示す。

また、この装置では載荷圧密圧力をセル内に満たした水を空気圧で加圧することによって与え、圧密中の供試体間

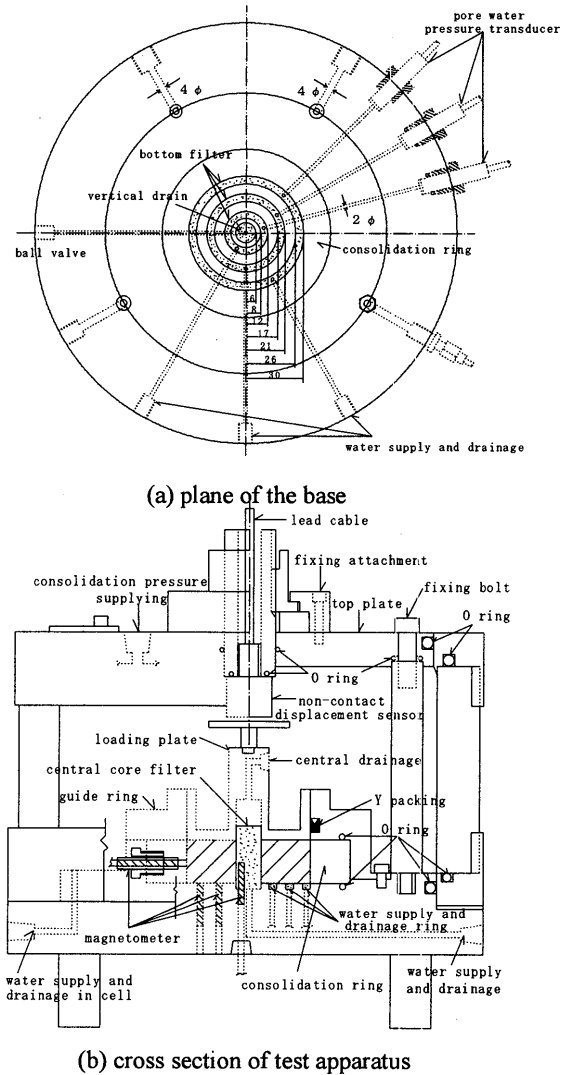


Fig.2 Three-dimensional consolidation test apparatus

隙水とセル水はOリングと加圧板とガイドリングにはめ込んだYパッキンによって完全に分離されている。圧密中の供試体からの給排水は、上下面からの鉛直方向の排水と圧密リング内側面および中央コア部を介しての水平方向の排水が可能になっている。これらの排水条件のうち、供試体中心部のドレーンのみから排水させることによってバーチカルドレーン打設地盤で生じる内向き放射流れを再現した三次元圧密が可能である。底盤の排水面はリング状に3つのブロックに分けられていて、それぞれ給排水および間隙水圧の測定が可能であり、供試体の半径方向の間隙水圧分布を調べることができる。また、供試体の軸方向変位は、上盤に固定した非接触渦電流式ギャップセンサーで測定する。これによってバーチカルドレーン打設地盤をモデル化した地盤の沈下量だけでなく、地盤内部の変位や間隙水圧の経時変化の測定が可能となった。

2.2 キャリブレーション実験^{1), 2)}

磁石を実際の模型地盤中に埋め込んだ場合の磁石の位

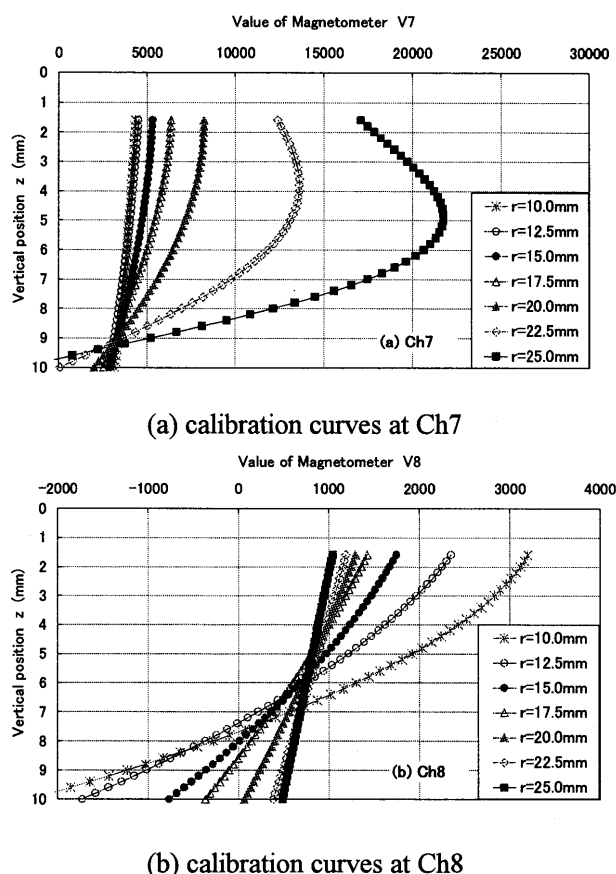


Fig.3 Results of calibration tests

置と地盤外部に設置した磁気センサーの出力値の関係を求めるためのキャリブレーション実験を前述の三次元圧密試験装置を用いて行った。

キャリブレーション実験では、磁石が水平（半径および円周）方向には変位せず、鉛直方向のみに変位する場合の磁石の鉛直位置と磁気センサー値の関係を所定の磁石の半径方向位置ごとに明らかにした。このとき、磁石の半径方向および円周方向の変位が起らないように磁石を上部載荷板に固定することによって、磁石が鉛直一次元的に変位した時の磁気センサー値を読み取った。なお、本実験で測定した磁気センサー値 V は、磁界の磁束密度に比例して出力される電圧値をひずみゲージ式変換器用データロガーで収録するためにひずみに相当する無次元量に換算したものである。

キャリブレーション実験における磁石の埋め込み位置と磁気センサーの位置関係は Fig.1 に示すとおりで、この図では供試体の中心から磁石の中心までの距離が $r=10.0\text{mm}$ の場合が示されているが、これ以外にも $r=12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0\text{mm}$ の 2.5mm 間隔で、計 7 箇所磁石を埋め込んでキャリブレーション実験を行った。なお、キャリブレーション実験も三次元圧密時の地盤内部挙動を調べる本実験と状態を合わせるために、粘土を供試体として用い、供試体中央にドレーンを設置した状態で行

った。また、キャリブレーション実験の場合は、三次元圧密試験で生じる最大約 10mm 以上の鉛直変位を強制的に起こす必要があるため、含水比を 160% 程度に調整した超軟弱な粘土を用いた。また、キャリブレーション実験での誤差を減らすために毎回同じ磁石を用いて半径方向位置が同じ実験を 3 回ずつ行い、鉛直位置に対応する磁気センサー値の平均値を求めた。

Fig.3 は磁石の各半径位置での鉛直変位 z と磁気センサー値 V の関係を表した実測値である。なお、ここで示した磁石の鉛直位置とは、圧密リング上端面から磁石の中心までの鉛直距離のことで、磁石の厚さが 3.0mm あるため、キャリブレーション開始時の鉛直位置は $z_0=1.5\text{mm}$ となっている。これらの図から分かるように、圧密リング内部に設置されている Ch7 の磁気センサー値 V_7 は、磁石を埋め込んだ半径位置がセンサーに近い場合(例えば、 $r=25.0\text{mm}$ の場合)、鉛直変位が増加するにつれてまず増加し、鉛直距離 6.5mm 付近で最大値を取り、その後減少する傾向を示す。また、磁石を埋め込んだ半径位置がセンサーに近いほど磁気センサー値が大きく、また隣の半径位置の曲線との差も大きいことが分かる。なお、磁気センサー値が最大になる鉛直位置は、磁石の水平距離が離れる (r が小さくなる) ほど浅くなる傾向があり、鉛直位置が $z=11\text{mm}$ 付近で全ての磁気センサー値が磁石を埋め込んだ半径位置に関係なく一致する傾向を示す。一方、Ch8 の磁気センサー値 V_8 は、鉛直変位が増すにつれて全て減少しており、磁石を埋め込んだ半径位置が磁気センサーに近い $r=10, 12.5, 15\text{mm}$ の場合に磁気センサー値が大きく、また隣の差も大きいことが分かる。また、前述した試験装置の底盤に設置されている Ch5 と Ch6 では鉛直変位と磁気センサー値の関係に半径位置の違いが明確に現われなかったため(図は省略)、磁石の位置を決定するのに Ch5 と Ch6 のデータは用いなかった。

Fig.3 から分かるように、磁石の埋め込み位置によって、磁気センサー値の感度が異なり、試験装置の圧密リング側に設置されている磁気センサー-Ch7 の場合は、供試体中心から遠い $r=20, 22.5, 25\text{mm}$ に磁石がある時の感度がよく、中央ドレーンの内部にある磁気センサー-Ch8 の場合は、供試体の中心に近い $r=10, 12.5, 15\text{mm}$ に磁石がある時の感度がよい。そのため、磁石の埋め込み位置が $r=10, 12.5, 15\text{mm}$ の場合は Ch8、 $r=20, 22.5, 25\text{mm}$ の場合は Ch7 を用いて半径方向変位を算出する。

なお、磁石の埋め込み場所が $r=17.5\text{mm}$ の場合は Ch7 および Ch8 から等距離で、かつセンサーからの距離も離れている。そして、後述するように磁界と磁気センサーの特性から、磁極の中心線付近にある磁気センサーでは磁気強度の変化を読み取り難くいため、鉛直位置の違いによる磁気センサー値の違いと水平位置の違いによる磁気センサ

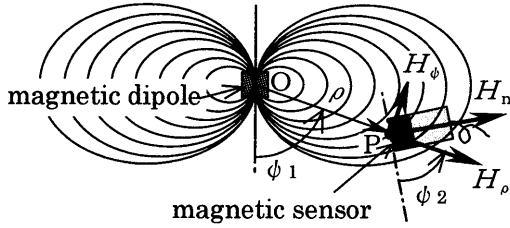


Fig. 4 Magnetic field induced by magnetic dipole

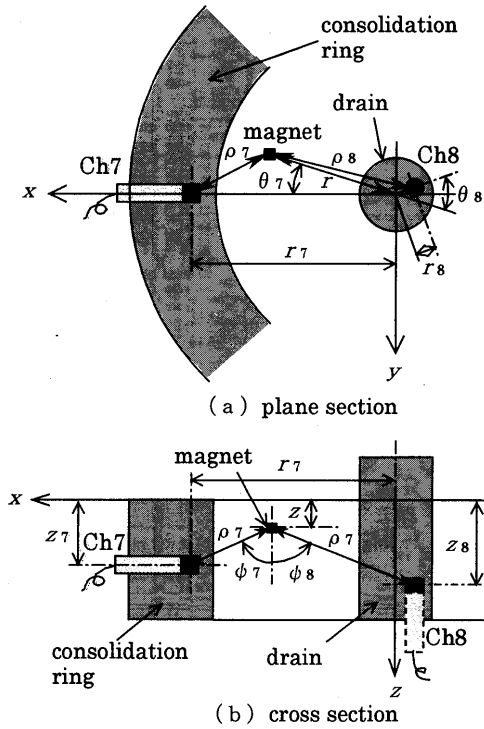


Fig. 5 Position of magnet and magnetometers

一値の違いを分離することが難しい。そのため、Fig. 3 における磁石埋め込み位置（半径位置）の違いによる磁石の鉛直位置と磁気センサー値の関係の違いが小さいため、三次元圧密中の磁気センサー値のわずかな変化が、半径方向変位に換算した時に、非常に大きな差として表れることに注意を要する。

2.3 磁束密度の理論解³⁾

ここでは、模型地盤中に埋め込まれた磁石が作り出す磁界について理論的な検討を行う。磁極の強さが M で両極間の距離が λ の磁石が作り出す磁界を考えると、 λ が磁石の中心から磁界を考える点 P までの距離 ρ に比べて十分小さい場合はこの磁石は磁気双極子と呼ばれる。磁気双極子の作り出す磁界 H は Fig. 4 のようになり、 H の ρ 方向成分と φ 方向成分は次式で与えられる。

$$H_{\rho} = \frac{M}{4\pi\mu_0} \frac{2 \cos \varphi_1}{\rho^3} \quad (1)$$

$$H_{\varphi} = \frac{M}{4\pi\mu_0} \frac{\sin \varphi_1}{\rho^3} \quad (2)$$

μ_0 は真空の透磁率と呼ばれ、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] である。

この磁界の強さを本研究で使用した磁気センサーを用いて検出する場合は、センサーヘッドの検出面に垂直な方向の磁束密度を検出することになり、その大きさは次式で与えられる。

$$H_n = H_{\rho} \cdot \sin \varphi_2 + H_{\varphi} \cdot \cos \varphi_2 \quad (3)$$

なお、磁気センサーの検出面が磁極の方向と平行な場合の大きさ H_t と垂直な場合の大きさは H_v それぞれ次式で与えられる。

$$H_t = H_{\rho} \cdot \sin \varphi_1 + H_{\varphi} \cdot \cos \varphi_1 = \frac{3M}{4\pi\mu_0} \frac{\sin \varphi_1 \cos \varphi_1}{\rho^3} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H_v &= H_{\rho} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1 \right) + H_{\varphi} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1 \right) \\ &= \frac{M}{4\pi\mu_0} \frac{1}{\rho^3} \left(2 \cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

本研究において模型地盤中の変位を測定する三次元圧密試験では、磁極の方向が鉛直 (z) 方向と一致するように磁石を模型地盤中に埋め込む。そのため、Fig. 5 のような位置関係にある圧密リングに設置した磁気センサー-Ch7 で計測する磁束密度 H_7 とドレーン内部に設置した磁気センサー-Ch8 で計測する磁束密度 H_8 はそれぞれ次式で与えられる。

$$H_7 = \frac{3M}{4\pi\mu_0} \frac{(z_7 - z) \left[(r_7 - r \cos \theta_7)^2 + (r \sin \theta_7)^2 \right]^{1/2}}{\left[(r_7 - r \cos \theta_7)^2 + (r \sin \theta_7)^2 + (z_7 - z)^2 \right]^{3/2}} \quad (6)$$

$$H_8 = \frac{M}{4\pi\mu_0} \frac{2(z_8 - z)^2 - (r_8 \cos \theta_8 + r)^2 - (r_8 \sin \theta_8)^2}{\left[(r_8 \cos \theta_8 + r)^2 + (r_8 \sin \theta_8)^2 + (z_8 - z)^2 \right]^{3/2}} \quad (7)$$

なお、本研究では Ch7 と Ch8 の 2 つの磁気センサーと磁石を同一鉛直断面上に配置するため、 $\theta_7 = \theta_8 = 0$ となり、この場合の H_7 と H_8 は次式で与えられる。

$$H_7 = \frac{3M}{4\pi\mu_0} \frac{(r_7 - r)(z_7 - z)}{\left[(r_7 - r)^2 + (z_7 - z)^2 \right]^{3/2}} \quad (8)$$

$$H_8 = \frac{M}{4\pi\mu_0} \frac{2(z_8 - z)^2 - (r_8 + r)^2}{\left[(r_8 + r)^2 + (z_8 - z)^2 \right]^{3/2}} \quad (9)$$

式(8)と(9)よりキャリブレーション実験において Ch7 と Ch8 で計測した磁束密度の理論値と磁石の位置の関係は Fig. 6 のように計算できる。なお、この図では磁束密度の大きさを、これと比例する $(4\pi\mu_0/M)H_7$ と $(4\pi\mu_0/M)H_8$

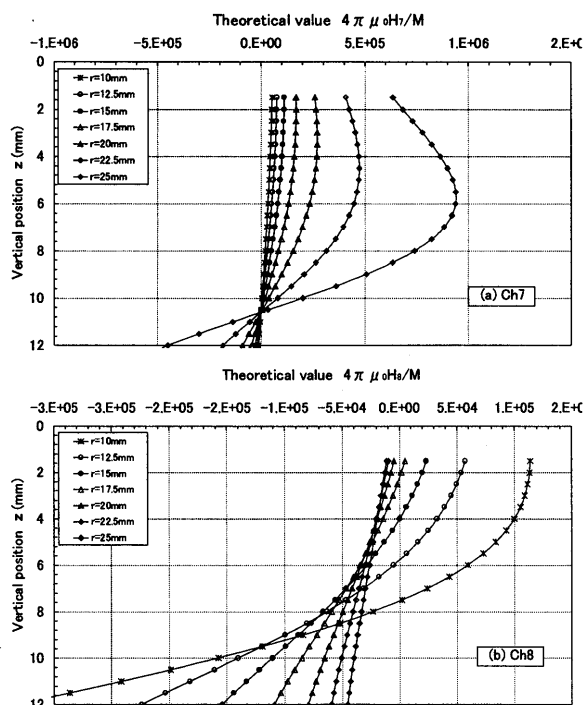


Fig.6 Theoretical value of magnetic density

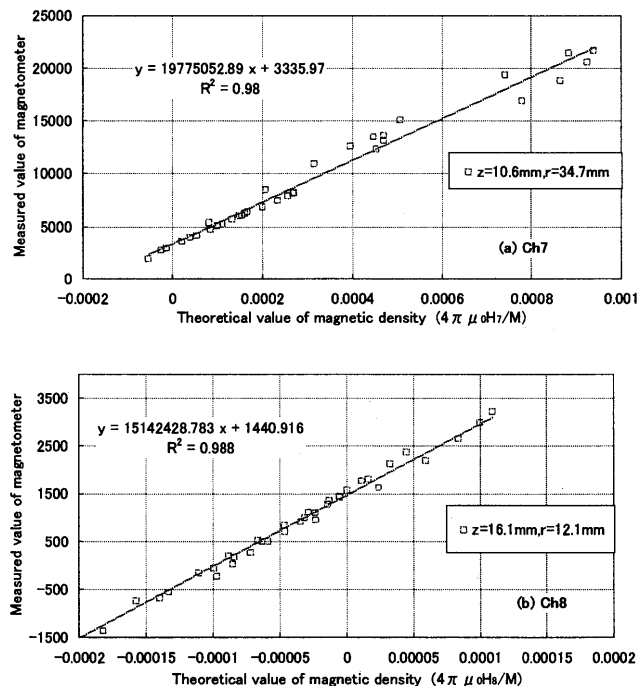


Fig.7 Relationship between theoretical value of magnetic density and measured value of magnetometer

を用いて描いている。Fig.6より磁束密度の理論値は、Fig.3のキャリブレーション実験で得られた磁気センサー値と磁石位置の関係と相似形となっていることが確認できる。

そこで、磁石が同じ位置にあるときの磁気センサーの測

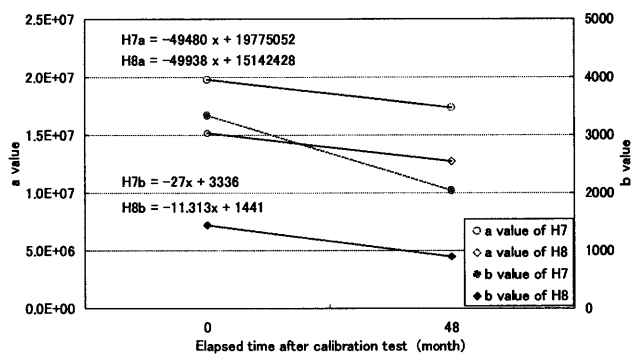


Fig.8 Change in coefficients of a and b

Table 1 Coefficients of a and b

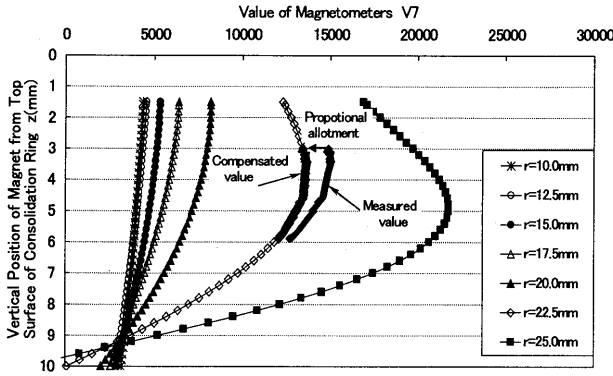
Sensor	Ch8			Ch7		
Test Case	1a	2a	3a	1c	2c	3c
Month of test	2001.5	2001.8	2000.10	2001.7	2001.9	2000.11
Elapsed time from cal. test (month)	10	13	3	12	14	4
$a (\times 10^7)$	1.467	1.449	1.499	1.918	1.908	1.958
b	1328	1294	1407	3012	2958	3228

定値と磁束密度の理論値の関係を磁気センサーごとに描くとFig.7のようになる。この関係は、三次元圧密試験において実際に埋め込まれた磁石の可動範囲を考慮して、Ch7では磁石の埋め込み位置が $r=17.5, 20, 22.5, 25\text{mm}$ のキャリブレーション曲線を、Ch8では $r=10, 12.5, 15, 17.5\text{mm}$ のキャリブレーション曲線を用い、磁石の鉛直位置が $z=4\sim 11\text{mm}$ の範囲でフィッティングして求めたものである。また、各磁気センサーの設置位置は既知であるが、磁気センサーが磁束密度を検出し、磁束密度の理論値を算出するときに磁気センサーの位置を代表する点は未知である。そこで、各磁気センサーの検出位置を、磁気センサーの測定値と磁束密度の理論値が線形関係になることを利用して、これらの関係を直線近似した際に最も相関係数が高くなる位置として特定した。すなわち、Fig.7の関係を求める際に、式(8)の r_7 と z_7 および式(9)の r_8 と z_8 をパラメトリックに変えて磁束密度の理論値 $(4\pi\mu_0/M)H$ を計算し、磁気センサー値 V との相関係数が最も高くなる r_7 と z_7 および r_8 と z_8 を磁気センサーの検出位置とした。特定した磁気センサーの検出位置はFig.1に示すとおりである。Fig.7より、磁気センサー値 V と磁束密度の理論値 $(4\pi\mu_0/M)H$ の間には

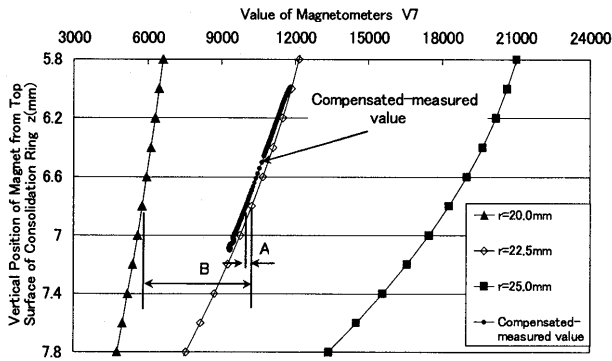
$$V = a \cdot \frac{4\pi\mu_0}{M} H + b \quad (10)$$

の関係があり、Ch7とCh8に対して次式が得られる。

$$V_7 = 1.977 \times 10^7 \frac{4\pi\mu_0}{M} H_7 + 3336 \quad (11)$$



(a) One-dimensional consolidation process



(b) Three-dimensional consolidation process

Fig.9 Method for determining radial displacement of buried magnet from calibration curves

$$V_8 = 1.514 \times 10^7 \frac{4\pi\mu_0}{M} H_8 + 1441 \quad (12)$$

また、磁石の強さは時間とともに劣化することが知られている⁴⁾。そこで、最初のキャリブレーション実験を行った2000年7月から4年経過した2004年7月に再度キャリブレーション実験を行い、得られた結果から前述の方法によって式(10)の係数 a と b を求めた。Fig. 8 に係数 a と b の時間的変化を示す。キャリブレーション実験の結果が2回しかなく、また磁石が製造された時期も不明であるため、係数の時間的変化を特定することはできないが、ここでは第一近似として直線関係を仮定して各 Case の実験が行われたときの係数を Table 1 のように算出した。

2.3 内部変位の算出方法

(a) キャリブレーション曲線を用いる方法

Fig. 9 は、半径方向変位の算出方法として磁石の埋め込み位置が $r=22.5\text{mm}$ で圧密圧力 p を 9.8kPa から 157kPa まで荷重増分比 $\Delta p/p=1$ で底面排水のみの一次元圧密を行った後、増加圧密圧力 $\Delta p=157\text{kPa}$ で排水を内向き放射流れの三次元圧密を行った場合 (Case-2c) を例に取り、Ch7 を用いた水平方向変位の計算過程を説明したものである。

まず、圧密圧力 p が 9.8kPa から 157kPa までは一次元圧

密であるので磁石の半径方向変位は生じないため、磁石埋め込み位置が $r=22.5\text{mm}$ のキャリブレーション値と一致するはずである。しかし、磁石のわずかな埋め込み誤差によって実際の磁気センサー値は Fig. 9(a) に示すようにキャリブレーション値と一致しない場合が多い。そこで、三次元圧密を開始するまでの一次元圧密時の測定値と同じ条件でのキャリブレーション値が一致するように比例配分を行って全測定期間の測定値を補正する。そして Fig. 9(b) に示す三次元圧密中の磁気センサー値と $r=22.5\text{mm}$ でのキャリブレーション値の差は、磁石が半径方向に変位したために生じたものとみなし、この差と磁石埋め込み位置 $r=20, 22.5, 25\text{mm}$ のキャリブレーション値との相互関係から水平方向変位を算出する。具体的には、補正した測定値が $r=22.5\text{mm}$ のキャリブレーション曲線より右側にずれる ($r=25.0\text{mm}$ のキャリブレーション曲線に近づく) 場合は、磁石は外側へ移動していることを表しており、逆に左側にずれる ($r=20.0\text{mm}$ のキャリブレーション曲線に近づく) 場合は、磁石は内側へ移動していることを表す。Fig. 9(b) に示した例では、補正した測定値が $r=22.5\text{mm}$ のキャリブレーション曲線より左側にずれており、この場合のある鉛直位置での水平変位 δ_r は、補正した測定値と $r=22.5\text{mm}$ のキャリブレーション曲線との差 (A) と、 $r=20.0\text{mm}$ と 22.5mm のキャリブレーション曲線の差 (B) より、

$$\delta_r = 2.5 \frac{A}{B} \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

として求められ、これが $r=22.5\text{mm}$ の位置から $r=20.0\text{mm}$ の位置に向かって内側へ水平に変位した量となる。

(b) 磁界の理論式を併用する方法

式(8)と式(9)および式(10)より、磁気センサー値と磁石の位置の関係は次式で表すことができる。

$$V_7 = a_7 \cdot \frac{(r_7 - r)(z_7 - z)}{\left[(r_7 - r)^2 + (z_7 - z)^2 \right]^{3/2}} + b_7 \quad (14)$$

$$V_8 = a_8 \cdot \frac{2(z_8 - z)^2 - (r_8 + r)^2}{\left[(r_8 + r)^2 + (z_8 - z)^2 \right]^{3/2}} + b_8 \quad (15)$$

なお、これらの式中の係数 a と b は Table 1 に示すとおりである。これらの式は、磁気センサー値 V とその時点の鉛直位置 z が分かると、磁石の半径位置 r を求めることができることを示している。

Fig. 10 は、前述した磁石の埋め込み位置が $r=22.5\text{mm}$ で圧密圧力 p を 9.8kPa から 157kPa まで荷重増分比 $\Delta p/p=1$ で底面排水のみの一次元圧密を行った後、増加圧密圧力 $\Delta p=157\text{kPa}$ で排水を内向き放射流れの三次元圧密を行った場合 (Case-2c) を例に取り、Ch7 の磁気センサー値 V_7 から算出した半径位置 r と鉛直位置 z の関係を示したものである。なお、式(14)および式(15)からは r を陽な形で

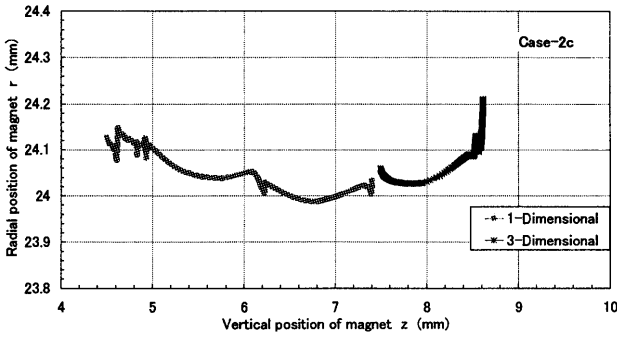


Fig. 10 Movement of buried magnet

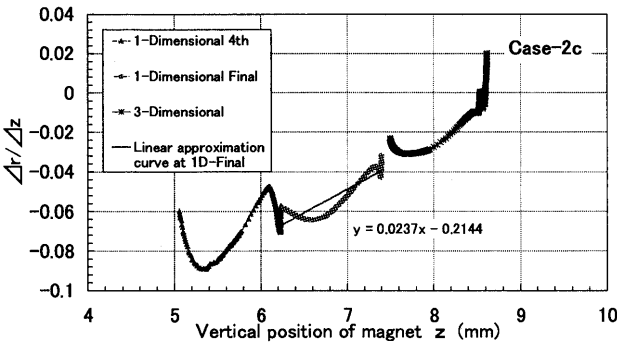


Fig. 11 Normalized movement by settlement of magnet

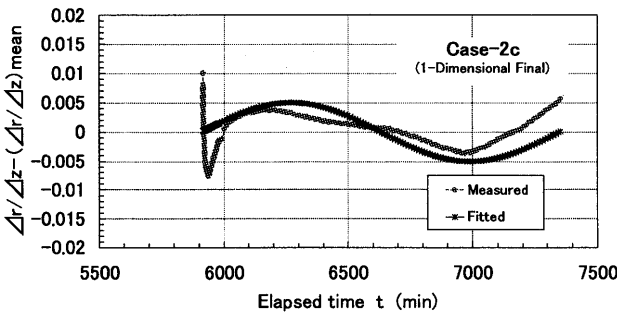


Fig. 12 cyclic variation of buried magnet

求めることができないため、 r の値は試算法によって求めた。具体的には、式(14)と(15)をそれぞれ式(16)と(17)のように書き直し、任意時刻の鉛直位置 z と磁気センサー値 V ごとに、右辺に与えた r の値とそれを用いて計算された左辺の r の値の差が 10^{-6} mm以下となるまで右辺の r の値を変えて繰り返し計算を行い、収束したときの値を r の値とした。

$$r = r_7 - \frac{V_7 - b}{3a} \left[\frac{(r_7 - r)^2 + (z_7 - z)^2}{z_7 - z} \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$r = \sqrt{2(z_8 - z)^2 - \frac{V_8 - b}{a} \left[(r_8 + r)^2 + (z_8 - z)^2 \right]^{1/2}} - r_8 \quad (17)$$

前述したように圧密圧力が9.8kPaから157kPaまでは一

次元圧密であるので、一次元変形条件である $z=7.5$ mmまでは r は変化しないはずである。しかし、図から分かるように r は沈下の進行とともに減少し、一次元圧密中にも拘らず磁石は供試体の中心部に向かって半径方向にも変位しているような結果となった。この原因のひとつとして、圧密中の磁石の回転が考えられる。磁石は元々磁極が鉛直方向になるように設置されているが、試料のごく僅かな不均質性など、何らかの理由によって圧密の進行とともに回転すれば、磁界が回転するため式(4)と(5)の ϕ_1 が変化し、式(14)と(15)の関係が成立しなくなる。そのため、実際の磁石の半径位置は不変でも式(14)と(15)を使って r を求めると、 r は変化することになる。このとき、磁石の回転量は供試体の圧縮(沈下)量、すなわち磁石の鉛直位置 z に密接に関係すると考えられる。そこで、磁石の初期埋め込み位置からの半径方向の変化 Δr と鉛直方向の変化 Δz との比を取ると、Fig. 11に示すように $\Delta r/\Delta z$ は周期的に変化しながら、その平均値は磁石の沈下を表す z の増加とともにほぼ直線的に変化していることがわかる。Fig. 12は、 $\Delta r/\Delta z$ の周期的変化を描いたものであり、 $\Delta r/\Delta z$ は約1日(1440分)周期で変動している。この原因として、計測環境の周期的変化が考えられる。磁気センサーは温度や電源電圧の変化に影響を受けるため、実験室は冷暖房空調機によって室温が制御されているものの外気温の変化によって $\pm 1^\circ$ 程度は変化するとともに、電源電圧も多くの人々の日常活動によって僅かであるが変化するため、磁気センサーの測定値はこれらの影響を受けて変動していると考えられる。このような計測環境の時間的変化は、様々な周期の変動を含んでいるが、最も卓越するのは前述した外気温や人間活動による1日周期の変動であると考えられる。そこで、一次元圧密中の $\Delta r/\Delta z$ の変化を供試体の圧縮(沈下)量、すなわち Δz の変化と1日周期で起こる時間的な変化として次式で表す。

$$\left(\frac{\Delta r}{\Delta z} \right)_{1D} = \alpha \cdot \Delta z + \beta + \gamma \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{1440} (t + t_0) \right) \quad (18)$$

この式中の係数 α と β はFig. 11から、係数 γ と t_0 はFig. 12から最小二乗法によるフィッティングによって決定する。なお、 $\Delta r/\Delta z$ に周期的な変化が見られない場合は、 $\Delta r/\Delta z$ を Δz だけの関数としてフィッティングした。三次元圧密中にもこの一次元圧密中の変化が生じていると考えられるため、三次元圧密中の半径方向変位 δ_r は三次元圧密中の $\Delta r/\Delta z$ の変化から一次元圧密中の $\Delta r/\Delta z$ の変化を差し引いたものに Δz を乗じて次式で求めることができる。

$$\delta_r = \left\{ \left(\frac{\Delta r}{\Delta z} \right)_{3D} - \left(\frac{\Delta r}{\Delta z} \right)_{1D} \right\} \cdot \Delta z \quad (19)$$

Table 2 Test Case

	Radial position of buried magnet a, b, c r (mm)	Final consolidation pressure in 1D p_0 (kPa)	Consolidation pressure in 3D p_1 (kPa)
Case-1	12.5, 17.5, 22.5	78.5	157
Case-2	12.5, 17.5, 22.5	157	314
Case-3	12.5, 17.5, 22.5	314	628

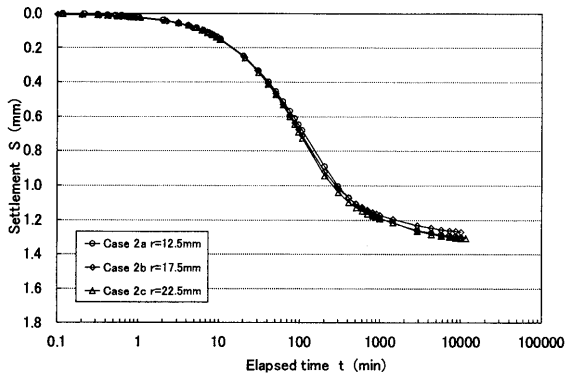


Fig. 13 Settlement-time curves in Case-2

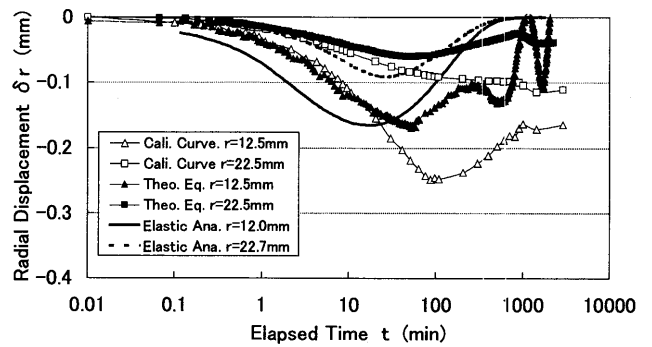
3. 測定結果と考察

3.1 三次元圧密試験^{1), 2)}

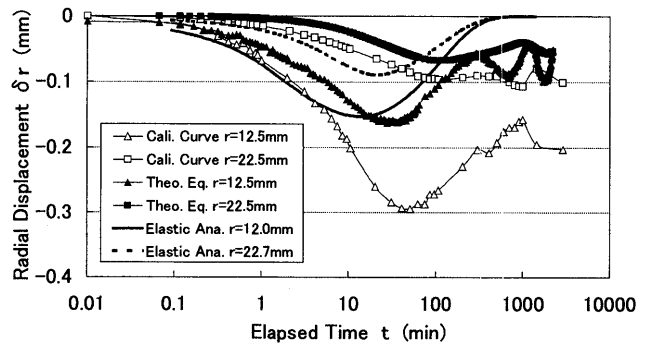
本試験に用いた試料は、京都府舞鶴市舞鶴港和田地区で採取した舞鶴粘土を室内で練り返し、再圧密したもので、その物理的特性は、 $G_s=2.737$, $w_L=83.32\%$, $I_p=52.17$ である。まず、底面排水の一次元圧密条件で所定圧力まで予圧密を行った後、供試体中央に設置したドレーンからの排水のみを許した三次元圧密を行い、沈下量、間隙水圧及び前述の方法で供試体内部の変位を測定する。三次元圧密時の供試体内部の挙動を調べるために行った模型実験は Table 2 に示すとおりである。この表に示すとおり磁石の埋め込み位置は供試体中心から $r=12.5, 17.5, 22.5\text{mm}$ の3パターン、最終圧密圧力を $p=157, 314, 628\text{kPa}$ の3パターンの全9ケースとした。なお、磁石は載荷板と供試体の間で生じる摩擦の影響を減らすために、磁石の上面が載荷板の下面から 3mm の位置に埋め込んだ。そして、半径方向に排水を行った等鉛直ひずみ条件の三次元圧密時には、鉛直ひずみは供試体内で鉛直方向にも均一に生じるために、供試体全体の沈下量(圧縮量)より平均鉛直ひずみを求め、供試体上面から磁石埋め込み位置の間でも同じ鉛直ひずみが生じていると仮定して任意時刻の磁石の鉛直位置 z を算出した。

3.2 実験の再現性

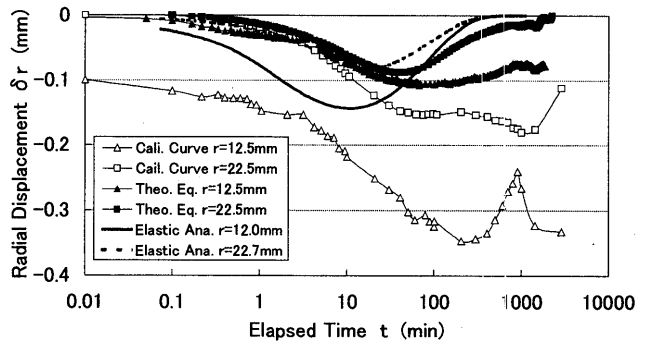
まず、Fig. 13 に Case-2 で磁石の埋め込み位置が異なる場合の三次元圧密開始後の供試体沈下量 S と経過時間 t



(a) $p=157\text{kPa}(\Delta p=78.5\text{kPa})$



(b) $p=314\text{kPa}(\Delta p=157\text{kPa})$



(c) $p=628\text{kPa}(\Delta p=314\text{kPa})$

Fig. 14 Radial displacement-time curves under respective consolidation pressures in 3-D consolidation process

の関係を示す。図から分かるように、同じ圧密圧力に対しては、最終沈下量、圧密速度ともによく一致しており、本実験装置における実験の再現性が確認できる。紙面の都合で図は省略するが、同様な結果は Case-1 と Case-3 でも得られている。このことは、同じ条件下で磁石の埋め込み位置を変えて3回の実験を行っているが、測定された結果は同じ地盤内部で同時に生じたものと見なすことができることを示している。

3.3 半径方向変位

Fig. 14 は磁石の半径方向変位 δ_r と経過時間 t の関係を圧密圧力 p ごとに示したものである。なお、この図には粘

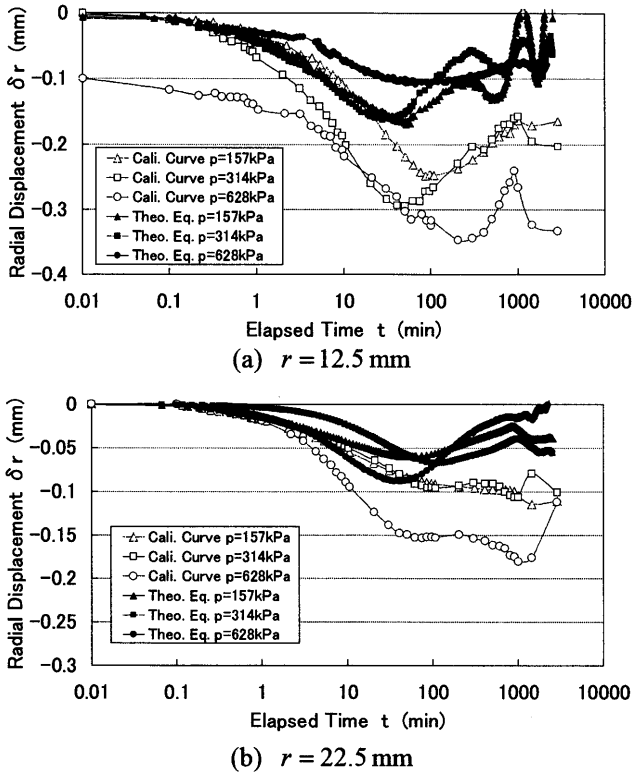


Fig.15 Radial displacement-time curves at respective buried positions of magnet in 3-D consolidation process

土を線形弾性体と仮定したパーチカルドレーンによる三次元圧密の理論解⁵⁾も実線と破線で示してある。この図より全体的な傾向として、 δ_r は圧密初期にドレーン側(内側)に変位してピークを迎えた後、非排水面側(外側)に向かって変位していることが分かる。これは前述した三次元圧密の内部挙動メカニズムを裏付ける結果となっている。また、実験ケースでばらつきはあるものの圧密後半になっても δ_r は元の位置まで完全に戻っておらず、これは粘土の塑性体としての性質が現われたものと考えられる。

δ_r の算出法の違いを比較すると、キャリブレーション曲線だけを用いる方法(図中の凡例ではCali. Curveと表示)で算出した δ_r は、磁界の理論式とキャリブレーション曲線を併用した方法(図中の凡例ではTheo. Eq.と表示)で算出した値より全体的に約1.5~2程度大きくなっている。これは、キャリブレーション曲線だけを用いる方法では前述したように三次元圧密を開始するまでの一次元圧密時の測定値がそれと同じ磁石埋め込み条件で行ったキャリブレーション値と全体的に一致するように比例配分を行って全測定期間の測定値を補正しているため、1日周期で生じている変化を考慮できていないためと思われる。

また、磁界の理論式とキャリブレーション曲線を併用した方法で算出した δ_r のピーク値は弾性理論解(図中の凡例ではElastic Ana.と表示)と概略一致している。しかし、ピークが現れる時刻は弾性理論解より遅くなっており、こ

れは弾性解析で表現できない粘土の二次圧密の影響が現れたと考えられる。

また、圧密後半において磁界の理論式とキャリブレーション曲線を併用した方法で算出した δ_r が周期的に変動しているが、これは前述したようにこの方法で結果を整理する際には磁気センサー値の周期的変動を1日周期で考慮しているが、実際にはこれと異なる周期的成分も含まれていたためと考えられる。なお、キャリブレーション曲線だけを利用する方法ではこのような周期的な変動があまり大きく現れていないが、これは前述したようにこの方法では磁気センサー値をキャリブレーション曲線にフィッティングする際に平均的な関係に換算しているためと考えられる。

Fig. 15は磁石の埋め込み位置 r ごとに圧密圧力 p の違いによる半径方向変位 δ_r の違いを比較したものである。全体的に $r = 12.5$ mmでの δ_r には明確なピークが見られ、 $r = 22.5$ mmの場合より大きくなるが、 $r = 22.5$ mmでの δ_r にはピークが明確でない傾向が認められる。また、Fig. 15(a)の $r = 12.5$ mmの δ_r は、若干ではあるが p が大きいくほどピークの値が大きくなる傾向がある。さらに、ピークの出現時刻は p の値および算出法の違いによってばらつきはあるものの、非排水面側($r = 22.5$ mm)より排水面側($r = 12.5$ mm)で早くなっており、これはFig. 14に示した弾性理論解の傾向と一致している。

4. 結論

本研究で得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 粘土供試体内部に埋め込んだ小型磁石の位置と地盤外部に設置した磁気センサーの出力値の関係を実験的に求めたキャリブレーション曲線を用いて、粘土供試体内部に埋め込んだ小型磁石の磁界強度の変化から磁石の半径方向変位を算出することができる。
- 2) 粘土供試体内部に埋め込んだ小型磁石が作り出す磁界は、磁石を磁気双極子とする理論式によって表現することができる。
- 3) 粘土供試体内部に埋め込んだ小型磁石が作り出す磁界の理論式とキャリブレーション曲線を利用して、時々刻々と変化する磁石の位置を特定することができ、この磁石位置の変化から供試体内部の変位を算出することができる。
- 4) キャリブレーション曲線だけを用いて算出した半径方向変位は、磁界の理論式とキャリブレーション曲線を併用して算出した半径方向変位より1.5~2倍程度大きくなる。
- 5) 磁界の理論式とキャリブレーション曲線を併用して算出した半径方向変位のピーク値は、弾性理論解と概略

一致する。しかし、ピークが現れる時刻は弾性理論解より遅くなっており、これは弾性解析で表現できない粘土の二次圧密の影響が現れたものと考えられる。

- 6) 本研究で開発した地盤内部変位の測定装置によって、三次元圧密過程では、供試体内部は鉛直沈下だけではなく、圧密前半部ではドレーン側(内側)に向かって水平方向に変位し、圧密後半では外向きに変位するが、元の位置までは戻らないこと、および半径方向変位量はドレーン側ほど大きくなり、圧密圧力の増加とともに大きくなることなどを明らかにすることができた。

以上で示したように、粘土供試体内部に埋め込んだ小型磁石の磁界強度の変化を供試体外部に設置した磁気センサーで測定することによって室内小型模型実験における供試体内部の三次元変位を計測できるようになり、この方法によってバーチカルドレーン打設地盤の三次元圧密挙動を明らかにすることができた。このように本研究で開発した方法によって地盤内部の三次元変形メカニズムがわかると、これを反映した精度の高い地盤の挙動予測が可能となる。また、これまで構成式(応力～ひずみ～時間関係)の適合性は表面沈下量などの境界値との適合性によって評価されてきたが、地盤内部の三次元変位と比較することによって実際の地盤材料により近い構成式の構築に貢献することができる。

最後に、実験とデータ整理にご協力いただいた広島大学地盤工学研究室卒業生の菊地佳誉、宗近龍仁、沖野武志、宇賀修一、平井修の各氏に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 白元珍, 森脇武夫, 菊地佳誉: バーチカルドレーンによる三次元圧密時の地盤内部挙動の測定と解釈, 地盤と建設, Vol. 20, No. 1, pp. 71-79 1999.
- 2) Baek, W., Moriwaki, T.: Internal behavior of clayey ground improved by vertical drains in 3D consolidation process, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 3, pp. 25-37, 2004.
- 3) 近角聰信: 強磁性体の物理(上) - 物質の磁性 -, 物理学選書 4, 東京装華房, pp. 1-6, 1978.
- 4) 未踏加工技術協会: 新時代の磁性材料, 工業調査会, pp. 91-96, 1981.
- 5) 吉国洋: バーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂出版, pp. 29-69, 1979.

平成 16 年 9 月 30 日 受理