

# 土の変形および破壊に伴う比抵抗変化

湊 太郎<sup>1</sup>・福江正治<sup>2</sup>・田屋直美<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 工修 東海大学大学院 海洋学研究科 (〒424-8610 清水市折戸 3-20-1)

<sup>2</sup> 正会員 Ph. D 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 清水市折戸 3-20-1)

<sup>3</sup> 工修 興亜開発株式会社 技術推進部 部長 (〒130-0022 東京都墨田区江東橋 5-3-13)

地盤条件の厳しい場所で、構造物をより安全に経済的に建設するには、動態観測など地盤の変形を的確に把握する方法が必要となる。そこで本研究では、非破壊的かつ広域的な情報収集の手段ともなるべき、比抵抗測定による地盤性状の把握および評価方法を検討した。ここではまず、地盤の変形および破壊と比抵抗の相関性を調べるために、自然堆積土を用いて実験を行った。さらに、その結果をもとにして、比抵抗測定による方法の適用性を調べた。その結果、地盤の変形に応じて比抵抗値が変化し、地盤に破壊が起こる時期を予測できることがわかった。このことから、比抵抗測定による地盤の変形や破壊現象の把握は、非常に有効な手段であることがわかった。

**Key Words** : deformation, failure, field observation, non-destructive test method, resistivity

## 1. まえがき

軟弱地盤や地下空間など地盤条件の厳しい場所で、構造物をより安全に経済的に建設するには、動態観測など地盤の変形および破壊過程に関する情報をより的確に把握できる方法が必要となる。

地盤の情報を得る手段として、地盤の電気的性質を利用した電気探査法が高く評価され、その土木分野における普及が拡大している。この方法には、自然電位法や比抵抗法などがある。さらに近年では、比抵抗高密度探査が地下情報の可視化に適した方法として注目を集め、地盤調査の分野に広く適用されている<sup>1)</sup>。これは、計測が比較的簡便な方法で可能であり、地盤の物性値や挙動の変化を経時的に可視化できるためである。また、地下深部における地盤情報が、地表から非破壊的にかつ広域的に入手できることも、電気探査の普及が拡大している理由として挙げられる。

土および岩石の物性値と比抵抗値の関係について、これまで多くの研究が行われた<sup>2) 3)</sup>。その結果、土および岩石の比抵抗値は、それらを構成する鉱物の種類、間隙溶液の種類と濃度、間隙溶液の分布や連続性、土や岩石の構造特性や温度変化などに依存することがわかった。また最近では、土および岩石の力学的性質と比抵抗値に関する研究が始められ、その間の相関性が次第に明らかにされつつある<sup>4) 5)</sup>。

これらのことから、地盤の動態観測に電気探査法が適用できれば、より的確に地盤情報を入手でき、構造物をより安全に経済的に建設することが可能になると考えられる。しかしながら、地盤は非常に複雑であり、その電気的性質や変形および破壊は、構造特性や温度など多くの要因に依存する。そのため、電気探査を適用するためには、明らかにしておく問題が幾つか残されている。

そこで本研究では、まず土の変形および破壊と比抵抗値の関係を調べることを目的として、自然堆積土を用いて室内実験を行った。自然堆積土は、堆積環境の異なる3地点から採取した試料を用いた。これらの試料から供試体を作成し、圧密および一軸圧縮試験中の比抵抗値を求めた。その結果をもとにして、土の変形および破壊過程と比抵抗値の関係について検討した。

## 2. 既往の研究

土や岩石の変形および破壊現象と比抵抗値の相関性については、地盤改良の状況確認や地震現象の解明を目的とした研究によって、古くから詳細に検討されている。

Brace *et al.*<sup>6)</sup> (1965) や Brace and Orange<sup>7)</sup> (1966) は、岩石に圧力を加えると、破壊応力の1/3~2/3程度の応力に達すると比抵抗値が急激に減少し、比抵抗値が半減するに至って破壊が起こることを示した。また、力

武・山崎<sup>8)</sup>(1967)は、潮汐荷重による地盤のひずみが $10^{-6}$ のオーダーであるが、比抵抗変化率は $10^{-3}$ のオーダーで変化し、比抵抗変化率がひずみの数百倍に達することを示した。

吉住ら<sup>9)</sup>(1974)は、サンドドレーンやプレロードなどによる軟弱地盤の改良に際して、改良前と改良後の比抵抗値の変化を測定し、含水比および間隙比の減少、一軸圧縮強さの増加が比抵抗値の増大に対応していることを示した。茂木・佐々<sup>10)</sup>(1983)は、砂の比抵抗とせん断特性の関係を調べた。その結果、せん断変形における破壊領域の拡大のような、間隙率の変化による工学的性質の相対的变化は、砂の比抵抗値の変化から容易に判断される可能性があることを明らかにした。さらに、植野ら<sup>11)</sup>(2000)は、比抵抗を用いた盛土管理手法を提案した。彼らは、空気間隙率と比抵抗変動係数に着目し、比抵抗が盛土の締固め管理指標として適用可能であることを示した。

西川<sup>12)</sup>(1950)や森<sup>13)</sup>(1952)、山口<sup>14)</sup>(1962)らは、粘土粒子と間隙水の界面には、表面電導と呼ばれる過剰電導が生じ、粒子の比表面積が大きいときや間隙溶液の電導性が小さいときに顕著に見られ、砂であってもこのような現象が起こることを述べた。これは、土粒子の表面に拡散二重層と呼ばれるイオンの吸着層が存在するために生じる現象である。

これらのことから、土が外力を受けて変形する際には、土粒子の骨格構造の変形、土粒子相互の滑動、間隙部分の増減、拡散二重層の乱れなどが、土の比抵抗値の変化として現れるものと思われる。言い換えれば、土の比抵抗値を求めることによって、土の変形および破壊現象を把握できると考えられる。

### 3. 実験方法および試料

本研究では、自然堆積土の変形および破壊現象に伴う比抵抗変化を調べるため、自然堆積土の圧密中およびせん断変形中における比抵抗変化を測定した。ここでは、圧密中およびせん断変形中の比抵抗測定方法と実験方法について述べる。

#### (1) 圧密中の比抵抗測定と試料

本研究では、土の段階荷重による圧密試験方法(JIS A 1217)に準じて圧密を行った。その際、図-1に示すアクリル製の装置を用いて、供試体に交流0.1 mA、1000 Hzの電流を流し、圧密中の電位差の変化を測定した。ここで用いた電流と周波数の値は、種々の実験から経験的に得られた値である<sup>15)</sup>。また、アクリル製の装置を用

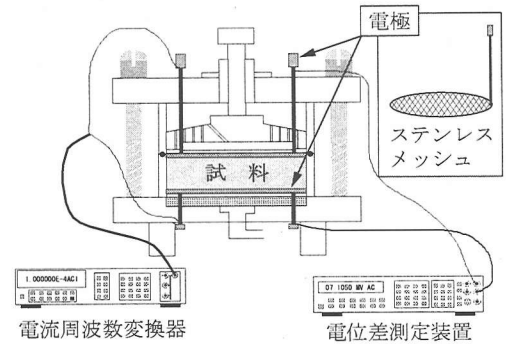


図-1 圧密試験器型の比抵抗測定装置の概要

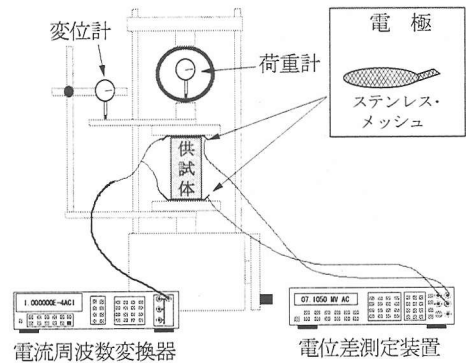


図-2 電位差測定装置を伴う一軸圧縮試験器

表-1 圧密試験に用いた粘土の特性

試料名	大阪湾	川口	桑名
採取深さ (m)	0.10	1.40	11.45
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.55	2.61
液性限界 (%)	155.0	97.4	51.5
塑性限界 (%)	42.0	31.3	25.7
砂分 (%)	0	1	2
シルト分 (%)	49	33	50
粘土分 (%)	51	66	48
堆積環境	海成	淡水成	海成
堆積年代	沖積		

いたのは、供試体の部分以外に電気が通らない様にするためである。このようにして測定した電位差から、オームの法則に従った次式を用いて比抵抗値を求めた。

$$\rho = \frac{S \Delta V}{I L} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ は比抵抗値( $\Omega \cdot m$ )、 $S$ は供試体の断面積( $m^2$ )、 $I$ は電流 (mA)、 $\Delta V$ は電位差 (mV)、 $L$ は供試体の高さ (m) である。

本実験は、表-1に示す試料について行った。これらのうち、大阪湾粘土は、自然含水比の状態に練返した供

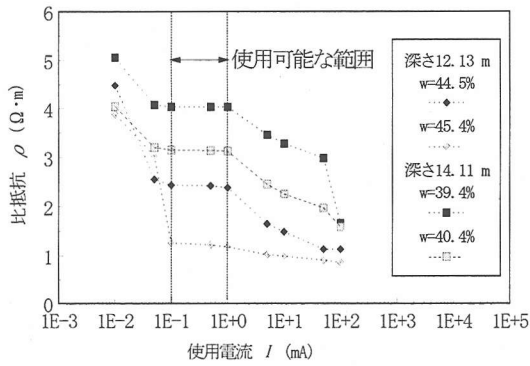


図-3 比抵抗と使用電流の関係

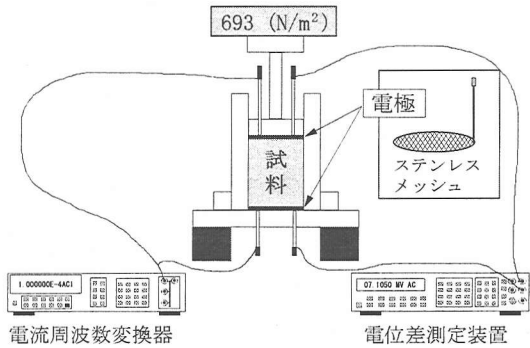


図-4 柱状試料用の比抵抗測定装置の概要

試体について圧密を行った。さらに、川口粘土および桑名粘土は、乱さない供試体と練返した供試体の両方について圧密を行った。なお、これら試料のうち、川口および桑名粘土は、シンウォールサンプラーによって表-1に示す深度で乱さない試料を採取した。また、それぞれの練返し試料は、予備圧密などを行わずに圧密試験に供した。

## (2) せん断変形中の比抵抗測定と試料

本研究では、乱さない状態と練返した状態について、土の一軸圧縮試験方法 (JIS A 1216 : 1998) に準じて一軸圧縮試験を行った。その際、図-2 に示す方法によって、変形から破壊に至るまでの比抵抗の値を求めた。ここでは、供試体の上下の荷板側を電流電極、供試体側を電位電極としてステンレス製のメッシュを供試体に圧着した。また、荷板と電極の間に絶縁体として、円形で厚さ 0.5 mm のプラスチック板を挟んだ。これら電流電極から供試体に電流を流し、電位電極によって供試体上下間の電位差を測定した。この測定された電位差から、式

(1) を用いて比抵抗値を求めた。なお、比抵抗値を求める際には、式 (1) 中の電気の流れる断面積として、次式のように表される断面積を用いた。

表-2 桑名粘土の物理特性

試料番号	1	2	3
深さ (m)	10.11	15.12	19.13
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.61	2.59	2.60
液性限界 (%)	59.2	59.5	85.0
塑性限界 (%)	34.5	27.3	33.2
砂分 (%)	14	5	0
シルト分 (%)	62	52	28
粘土分 (%)	24	43	72

$$S = S_0 \left( 1 - \frac{\varepsilon}{100} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここに、 $S$  は圧縮ひずみ  $\varepsilon$  (%) に対する供試体の断面積 (m<sup>2</sup>) であり、 $S_0$  は圧縮する前の供試体の断面積 (m<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$  は供試体の圧縮ひずみ (%) である。

ここで、図-3 に比抵抗と使用電流の関係を示す。これは、図-4 に示すアクリル製の実験装置を用いて、一軸圧縮試験に供する柱状試料について行った実験結果である。ここでは、桑名粘土の乱さない供試体を用いた。電流の周波数は 1000Hz とした。これは、一般的に 3000Hz 以上の周波数において、求められる比抵抗値に誘起効果が含まれ、低周波数では分極が生じるためである<sup>16) 17)</sup>。また、既往の研究<sup>15)</sup>において、図-1 に示す装置を用いる際に、周波数を 1000Hz としているためである。さらに、このとき電極と供試体を圧着させるために、供試体の上部から 693 N/m<sup>2</sup> の死荷重を載荷した。

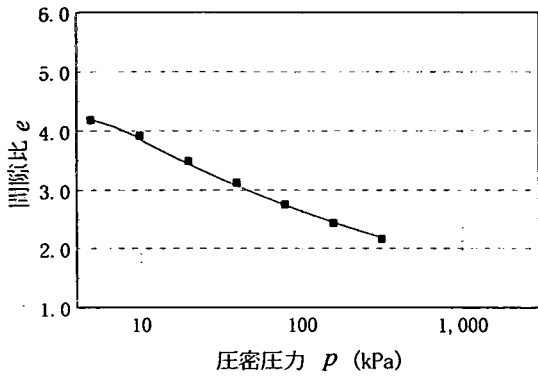
図-3 に見られるように、得られる比抵抗値が一定となるためには、使用電流に下限値と上限値がある。下限値は 0.1 mA であり、上限値は 1.0 mA である。図-3 で得た下限値は、種々の実験から経験的に得られた値<sup>15)</sup>と同じである。そのため、交流 0.1 mA、1000Hz の電流を本実験で用いることにした。

本実験は、桑名粘土についてのみ行った。それらの物理特性を表-2 に示す。

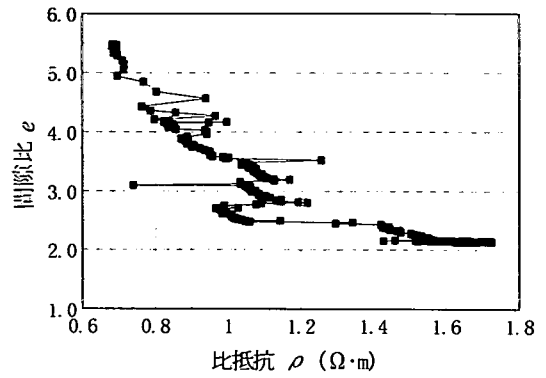
## 4. 実験結果と考察

### (1) 圧密中の比抵抗変化

図-5 に大阪湾粘土を段階荷重によって圧密したときの間隙比と比抵抗の関係を示す。この大阪湾粘土は、練返した試料について圧密を行った。また、図-6 および図-7 に、川口粘土と桑名粘土を圧密したときの間隙比と比抵抗の関係を示す。これらの粘土は、乱さない試料と練返した試料について圧密を行った。図中には、その両方の結果を示してある。また、図中には、圧密試験か

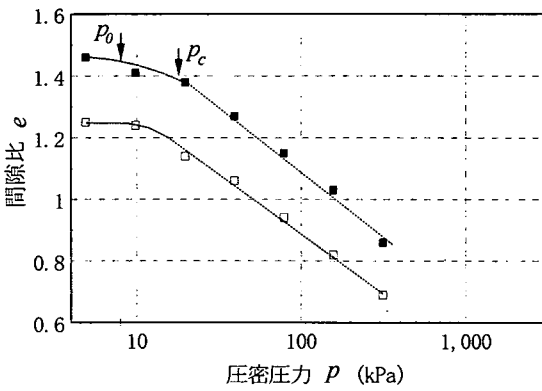


a) 間隙比と圧密圧力の関係

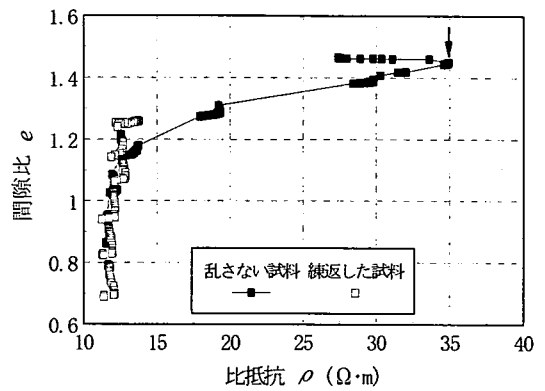


b) 間隙比と比抵抗の関係

図-5 間隙比と圧密圧力および比抵抗の関係 (大阪湾粘土)

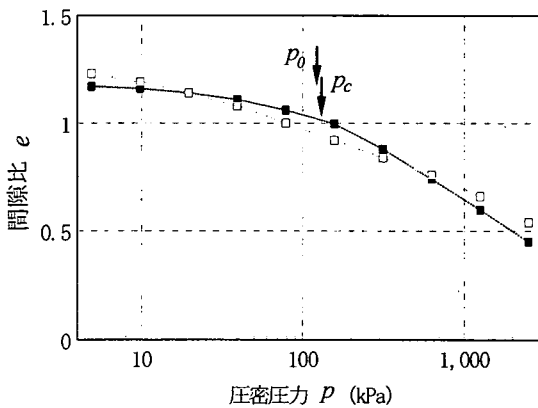


a) 間隙比と圧密圧力の関係

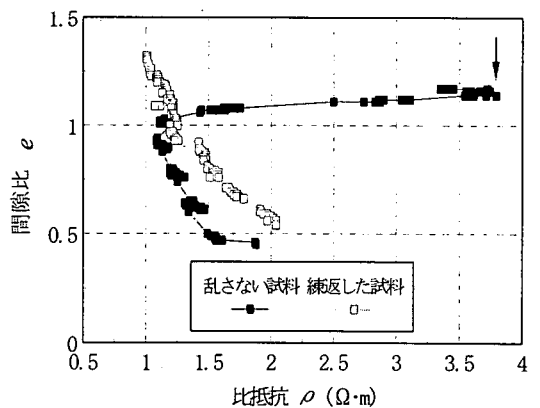


b) 間隙比と比抵抗の関係

図-6 間隙比と圧密圧力および比抵抗の関係 (川口粘土)



a) 間隙比と圧密圧力の関係



b) 間隙比と比抵抗の関係

図-7 間隙比と圧密圧力および比抵抗の関係 (桑名粘土)

ら得られた圧密降伏応力と、上載荷重から求めた先行圧密応力を示してある。なお、それぞれ図の a) に示す  $e - \log p$  曲線では、各々の圧密圧力による載荷段階が終了したときの間隙比の値を示している。しかし、それぞれの図の b) に示す間隙比と比抵抗値の関係では、各々の載荷段階の開始から終了までの比抵抗値の変化を示すため、間隙比の値は載荷開始から終了までの値を示してある。このほか、川口粘土と桑名粘土について、比抵抗値のオーダーに違いが見られるが、これは堆積環境によって間隙水中の電解質濃度が異なるためである。一般に、間隙水中の電解質濃度が高ければ、その土の比抵抗値は小さい。

図-5 を見ると、大阪湾粘土の練返し試料では、間隙比の減少に伴って比抵抗値が増大することがわかる。土中の電気伝導は、主に間隙水の部分に生じる現象であり、その分布や連続性によって土の比抵抗値が変化する。したがって、図-5 に示される結果は、圧密の進展に伴って間隙水が排出され、電気の流れる断面積が減少したことによるものだと考えられる。

図-6 を見ると、川口粘土の乱さない試料は、圧密の初期において練返し試料に比べて大きな比抵抗値を示すことがわかる。また、川口粘土の乱さない試料では、圧密の初期において間隙比の減少に伴う比抵抗値の増大が認められる。その後、圧密圧力が先行圧密応力を越えると、圧密の進展に伴って比抵抗値が減少し、練返し試料の値に近づく。さらに、圧密圧力が圧密降伏応力を越えると、それまでと比べ比抵抗値の減少量が大きくなる。川口粘土の練返し試料については、大阪湾粘土と異なり、間隙比の減少に伴い比抵抗値がやや減少する傾向が見られる。

図-7 を見ると、川口粘土と同様に、桑名粘土の乱さない試料は、圧密の初期に練返し試料に比べて大きな比抵抗値を示すことがわかる。また、桑名粘土の乱さない試料では、比抵抗値が川口粘土と同様の傾向を示すことがわかる。しかし、桑名粘土では、先行圧密応力と圧密降伏応力がほぼ一致する。それより小さい圧力の下では、間隙比の減少に伴う比抵抗値の変化が増加から減少に転じ、圧密の進展に伴って練返し試料の値に近づく。さらに、圧密降伏応力を越えると、圧密の進展に伴って比抵抗値が増大する。桑名粘土の練返し試料については、大阪湾粘土と同様に、間隙比の減少に伴って比抵抗値が増大する。また、川口粘土と異なり、間隙比 1.0 以下になると、同じ間隙比でも乱さない試料に比べて大きな比抵抗値を示す。

桑名粘土の練返し試料については、大阪湾粘土で述べたように、その比抵抗値の増大は、圧密の進展に伴って間隙水が排出され、電気の流れる断面積が減少したことによるものだと考えられる。しかし、川口粘土の乱さない

試料と練返し試料、桑名粘土の乱さない試料で見られた比抵抗値の減少は、このような間隙水の排出による電気の流れる断面積の減少からは説明できない。乱さない試料と練返し試料の根本的な違いは、土粒子の骨格構造の有無である。したがって、圧密の進展に伴う比抵抗値の減少には、土の骨格構造が関係しているのではないかと考えられる。

乱さない試料では、堆積後の経過時間や加えられた有効応力に応じて、より密で発達した骨格構造を持つ。しかし、練返し試料は、このような骨格構造を持たない。図-6 および図-7 を見ると、川口粘土と桑名粘土の乱さない試料は、それらの練返し試料に比べて圧密の初期に大きな比抵抗値を持つ。このことから、骨格構造を持つ場合に比抵抗値が大きく、骨格構造を持たない場合に比抵抗値が小さいということが考えられる。

圧密に伴う骨格構造の変形を論じた研究<sup>18) 19)</sup>によれば、圧密の進展に伴って、ベッドと呼ばれる粘土粒子の集合体が分割細分化されることがわかっている。また、土粒子相互の結合が解かれ、土粒子が移動したり回転したりすることが明らかにされている。これらは、圧密の進展に伴って、骨格構造が練返しを受けて壊されることを示唆している。これらのことから、圧密の進展に伴って比抵抗値が減少し、練返し試料の比抵抗値に近づいているのは、圧密の進展に伴って粘土が練返しを受けているためだと思われる。また、川口粘土の練返し試料が、圧密の進展に伴う比抵抗値の減少を示すのは、練返しが不十分で骨格構造が若干残ったためだと考えられる。

いずれにしても、自然堆積土では、練返しした土に比べて乱さない土で比抵抗値が大きい値を示すことがわかった。また、圧密中の比抵抗値の変化は、乱さない土と練返しした土で、それぞれ異なる傾向を示すことが明らかとなった。これらの違いは、骨格構造の有無によるものだと考えられた。したがって、地盤情報の取得に電気探査法を適用する場合には、このような土の状態による比抵抗値の違いを十分に考慮する必要があると思われる。

## (2) セン断変形中の比抵抗変化

図-8 および図-9 に、一軸圧縮試験を行った際の圧縮応力および比抵抗値と圧縮ひずみの関係を示す。なお、図-8 には乱さない試料、図-9 は練返し試料について、それぞれ示す。また、図-10 には、乱さない試料について、比抵抗値の変化量と圧縮ひずみの関係を示す。本研究では、比抵抗値の変化量を次式のように定義した。

$$\Delta \rho = \rho_n - \rho_{n-1} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta \rho$  は比抵抗値の変化量 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )、 $\rho_n$  は圧縮ひずみ  $\varepsilon_n$  (%) のときの比抵抗値 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )、 $\rho_{n-1}$  は圧縮ひずみ  $\varepsilon_{n-1}$  (%) のときの比抵抗値 ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) である。

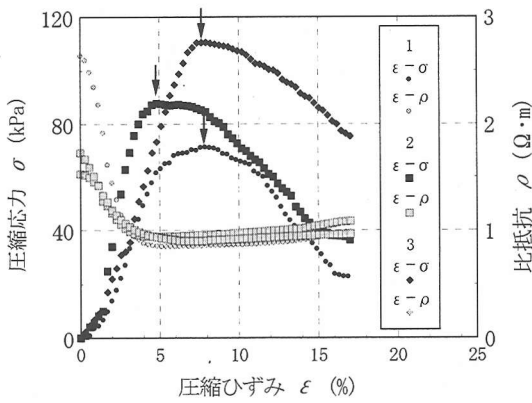


図-8 圧縮応力および比抵抗値と圧縮ひずみの関係  
(乱さない試料)

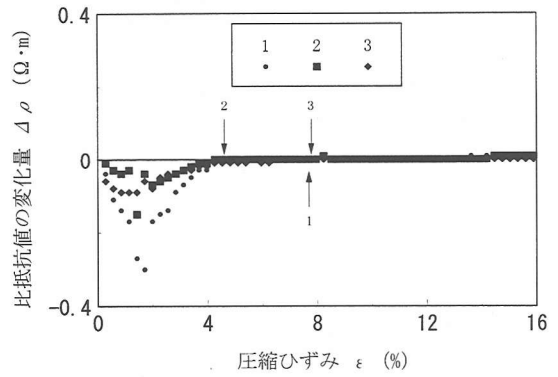


図-10 比抵抗値の変化量と圧縮ひずみの関係  
(乱さない試料)

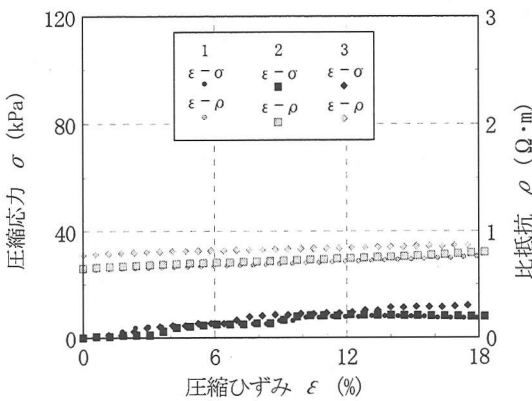


図-9 圧縮応力および比抵抗値と圧縮ひずみの関係  
(練返し試料)

式(3)より、比抵抗値の変化量が負であれば比抵抗値の減少を、比抵抗値の変化量が正であれば比抵抗値の増大を示す。また、図-8および図-10には、破壊時の圧縮ひずみを矢印で記してある。

図-8 からわかるように、乱さない試料では、圧縮変形の初期から比抵抗値が減少し、破壊の直前あるいは破壊時に最小値を示す。また、図-9 より、練返した試料では、圧縮変形の初期から圧縮ひずみの増加に伴って、若干ではあるが比抵抗値が増加することがわかる。さらに、この練返した試料における比抵抗-圧縮ひずみ関係の傾きは、乱さない試料において破壊後に見られる比抵抗-圧縮ひずみ関係の傾きと類似している。

このほか、一軸圧縮試験中に供試体が乾燥し、その影響が求められる比抵抗値に現れると考えられる。このような場合には、時間の経過に伴って比抵抗値が著しく増大するものと思われる<sup>2) 3)</sup>。しかしながら、図-8 および図-9 を見ると、比抵抗値の著しい増大は見られず、乱さない試料では比抵抗値が減少している。したがって、

本研究の結果から、供試体の乾燥による影響が比抵抗値に現れているとは考えにくい。

図-8 および図-9 のような、乱さない試料に関して得られた比抵抗値の変化は、Brace *et al.*<sup>6)</sup> (1965) や Brace and Orange<sup>7)</sup> (1966) が岩石について得た比抵抗値の変化と類似した傾向である。Brace *et al.*<sup>6)</sup> (1965) は、岩石で生じた急激な比抵抗値の減少は、外力の作用によって新たに割れ目が発生し、水分による電流経路が形成されるために生じるとしている。桑名粘土の乱さない試料についても、これと同様な骨格構造の変化の影響が考えられる。つまり、圧縮応力の作用によって、土粒子間の結合が解かれて骨格構造が破壊し、土粒子が相互に移動し始める。これにより、それまで土粒子に囲まれ隔離されていた間隙水が、周囲の間隙水と繋がり電流経路が形成される。圧縮変形が進展するのに伴い、このような構造が増え、土全体の比抵抗値が圧縮変形の進展に伴って減少する。さらに圧縮応力の作用が続けば、すべての土粒子間の結合が解かれた状態に至って比抵抗値は最小値となり、土は圧縮応力に耐えられる構造を失い破壊する。その後も土粒子の移動や回転が継続し、土粒子が圧縮応力の作用方向と垂直に配向したり、土粒子の相互接触によって不連続な間隙水が増加したりして比抵抗値が増大すると考えられる。ただし、図-8 に示した結果から、このような破壊後の構造変化による比抵抗値の増加は、非常にわずかである。

練返した試料では、骨格構造が存在しないため、乱さない試料の破壊後と同様な理由で比抵抗値が増大する。つまり、土粒子が圧縮応力の作用方向と垂直に配向したり、土粒子の相互接触によって不連続な間隙水が増加したりして比抵抗値が増大することが考えられる。ただし、図-9 に示した比抵抗値の変化から、練返した試料においても、土粒子の配向や相互接触は非常にわずかなものであると思われる。

図-10 からわかるように、圧縮ひずみが破壊ひずみの  $1/4 \sim 1/2$  の値に達すると比抵抗値の変化量  $\Delta \rho$  が最大値を示す。このときの変化量  $\Delta \rho$  は、比抵抗値の減少を表している。また、土の破壊は、比抵抗値の変化量  $\Delta \rho$  が 0 に達した直後かその後が生じることがわかる。

これらのことから、せん断変形中の比抵抗値の変化は、圧密中と同様に、乱さない土と練返した土で異なる傾向を示すことがわかった。これらの違いは、骨格構造の有無によるものだと考えられる。また、土の破壊は、比抵抗値の変化量が 0 に達してから生じることが明らかとなった。したがって、土の変位量の測定に加えて、比抵抗値の測定を行えば、土の破壊の時期をよりの確に予測できるのではないかとと思われる。また、より多くの試料で同様の実験を行い、その結果を蓄積することで、地盤の破壊時期の予測に対して、電気探査法が適用できるようになると思われる。

## 5. 結論

本研究では、自然堆積土を用いて室内実験を行い、土の変形および破壊と比抵抗値の関係を調べた。その結果、次のようなことがわかった。

### (1) 乱さない土について

#### ①圧密中の比抵抗値

- a) 練返し試料に比べて、圧密初期の比抵抗値が大きい。
- b) 圧密の初期段階で、比抵抗値の変化が増加から減少に転じる。
- c) 減少に転じた後は、圧密の進展に伴い練返し試料の比抵抗値に近づく。
- d) 練返し試料の比抵抗値に近づいた後は、圧密の進展に伴って比抵抗値が増大する。

#### ②せん断変形中の比抵抗値

- a) 圧縮変形の初期から比抵抗値が減少し、破壊の直前あるいは破壊時に最小値を示す。
- b) 圧縮ひずみが破壊ひずみの  $1/4 \sim 1/2$  の値に達すると比抵抗値の変化量  $\Delta \rho$  が最大値を示す。
- c) 土の破壊は、比抵抗値の変化量が 0 に達してから生じる。

### (2) 練返した土について

- ①圧密中の比抵抗値は、圧密の進展に伴い増大する。
- ②圧縮変形の初期から、圧縮ひずみの増加に伴い比抵抗値が増大する。

これらのことから、地盤情報の取得に電気探査法を適用する場合には、土の乱れの影響による比抵抗値の違いを十分に考慮する必要があると考えられる。また、土の変位量の測定に加えて、比抵抗値の測定を行えば、土の破壊の時期をよりの確に予測できるのではないかとと思われる。しかしながら、土の組成や様相は多様であり、その力学特性は非常に複雑である。また、土の変形は、粘土のように時間や温度に顕著に依存する場合がある。したがって、土の変形および破壊と比抵抗値の関係をより明確にするためには、さらに多くの種類の土に対して、同様の実験を行う必要があると考えられる。

謝辞：本研究を行うに当たり、多くの方のご協力またはご支援をいただいた。さらに、東海大学大学院生であった、井出智彦君、高見裕樹君には実験補助としてご協力いただいた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 松井保：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用、物理探査、Vol.48, No.6, pp.530-538, 1995.
- 2) 三瀬貞：土中の化学成分と土の物理的性質との関係について、土と基礎、Vol.7, No.6, pp.100-107, 1959.
- 3) Abu-Hassanien, Z. G., Benson, C. H. and Boltz, L. R.: Electrical resistivity of compacted clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, pp.397-406, 1996.
- 4) 関根一郎、西牧均、石垣和明、原敏昭、斉藤章：岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係、土木学会論文集、No.541/III-35, pp.75-86, 1996.
- 5) 高倉伸一：粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学特性との関係、物理探査、Vol.53, No.5, pp.415-426, 2000.
- 6) Brace, W. F., Orange, A. S. and Madden, T. R.: The effect of pressure on the electrical resistivity of water saturated crystalline rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol.70, No.22, pp.5669-5678, 1965.
- 7) Brace, W. F. and Orange, A. S.: Electrical resistivity change in saturated rock under stress, *Science*, 153, pp.1529-1531, 1966.
- 8) 力武常次、山崎良雄：地殻歪の新しい検出法—岩石の電気的性質と微小変形—、科学、Vol.37, No.5, pp.266-267, 1967.
- 9) 吉住永三郎、縄田義祐、菅野強、藤崎忠俊、斉藤章：電気探査による軟弱地盤の改良効果の測定、土と基礎、Vol.22, No.11, pp.27-33, 1974.
- 10) 茂木透、佐々宏一：砂のせん断特性および透水性と比抵抗、水曜会誌、Vol.20, No.1, pp.100-108, 1983.

- 11) 植野修昌, 新美孝之介, 丹羽誠, 松井保: 見かけ比抵抗を用いた盛土管理手法の開発と適用事例, 土と基礎, Vol.48, No.4, pp.29-32, 2000.
- 12) 西川政忠: 表面電導現象について, 電気化学, Vol.18, pp.157-187, 1950.
- 13) 森麟: 土の電気伝導について, 土木学会誌, Vol.37, No.11, pp.17-27, 1952.
- 14) 山口久之助: 砂の地層係数と表面電導の関係について, 物理探査, Vol.15, pp.26-33, 1962.
- 15) 福江正治, 田屋直美, 松本基, 酒井泰: 電導コーンの開発とその応用, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.283-293, 1998.
- 16) Olhoeft, G. R.: Low-frequency electrical properties, *Trans. Geophysics*, Vol.50, pp.2492-2503, 1985.
- 17) Campanella, R. G. and Weemees, I.: Development and use of an electrical resistivity cone for ground water contamination studies, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.557-567, 1990.
- 18) Quigley, R. M. and Thompson, C. D.: The fabric of anisotropically consolidated sensitive marine clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.3, No.2, pp.61-73, 1966.
- 19) 嘉門雅史, 風間秀彦: 土の構成式入門, 7. 微視的構造と構成式-その2 粘性土の場合-, 土と基礎, Vol.32, No.4, pp.69-74, 1984.

(2001. 2. 16 受付)

## CHANGE IN RESISTIVITY WITH DEFORMATION AND FAILURE OF THE NATURAL SEDIMENTS

Taro MINATO, Masaharu FUKUE and Naomi TAYA

In order to estimate the deformation behavior of natural sediments, the method with resistivity measurement was examined. From resistivity measurement, it is possible to obtain non-destructive data of sediments. The experimental results showed that the resistivity of natural sediments changes with the structural change due to loading. Furthermore, it was found that the failure of natural sediments could be predicted from the resistivity. Therefore, it is possible to predict the change in mechanical properties and the behavior of soils from the resistivity measurement.