

III-167 粘性土の変形機構の微視的観察

京都大学工学部 正員 嘉門雅史
清水建設(株) 内田康彦

1. はじめに

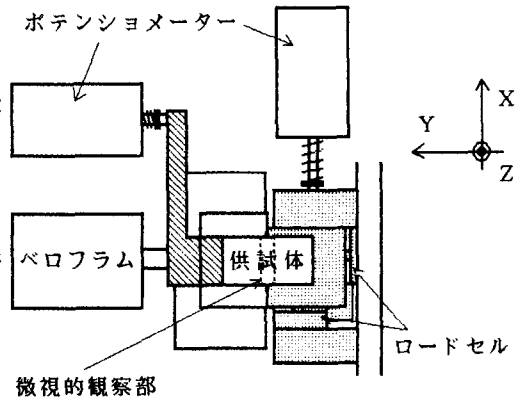
粘性土の微視的変形挙動については、走査型電子顕微鏡(SEM)中に導入した超小型せん断試験機(以下USSBTと略記)を用いて検討を行ってきた¹⁾。しかしながら電顕中という高真空下におかれるため、粘性土は乾燥状態となり、その破壊挙動は脆性的となつて、湿潤粘土のそれとは形態を異にする。そこで本研究は、土に粘性を付与した湿潤粘土の近似状態で微視的に観察を行い、検討を行ったものである。

2. 微視的せん断挙動説明システム

a) 基本的課題と対策 SEMは、その鏡体内が高真空状態であるために湿潤粘土をそのまま用いることはできない。そこで間隙水を蒸気圧の小さい液体に置換し、土に粘性を付与した状態でSEMに導入してせん断試験を行い、直接観察を行う。間隙物質にTovey は平均分子量300のポリエチレングリコール(PEG)を用いたが²⁾、本研究では平均分子量400のPEGを用いる。こちらの方が吸湿性が小さく取扱いが容易である。粘土試料は単一粘土鉱物であるカオリン粘土(ASP400)を用いる。また供試体装着時に生じる土構造の乱れを除くため、供試体作成から試験機装着までを一貫して行える新しいせん断箱を開発、採用している。SEMでの観察時の供試体の帯電・損傷対策には、SEMの加速電圧を下げて低倍率で観察を行うことと、特定部位の連続観察時間を短縮することで対応する。

b) 試験概要 試験手順は次の通りである。PEGとASP400を質量比100:90で混合した試料と、せん断箱を圧密リングに入れ、0.1kgf/cm²から12.8kgf/cm²まで段階的に圧密し、0.1kgf/cm²で膨潤→せん断箱を取り出し試験機に装着→垂直荷重載荷→ひずみ制御によりせん断(せん断速度75μm/min)→SEM像の解析。

USSBTの主要機構を図1に示す。これは一面せん断機構であり供試体寸法は10mm(せん断方向;X)×20mm(垂直荷重載荷方向;Y)×13mmである。垂直荷重はペロフラムによって載荷し、せん断変形はモーターでせん断箱ホルダーを変位させて生じさせる。せん断力は、ホルダーがせん断箱を押す際の抵抗として測定する。垂直荷重、せん断力はロードセルで測定し、せん断変位と供試体のY方向長さ変化(以下これをダイレイタンスーと称す)はポテンショメータで測定する。またVTRで録画したSEM像を適宜写真化し、写真中の土粒子の動きをデジタイザーで算出し微視的変形挙動の検討を行う。



- この部分がX方向に動き、供試体をせん断する。
- Y方向に可動。
- ダイレイタンスー測定。

図1 USSBTせん断機構平面模式図

3. 微視的変形挙動

連続した微視的観察像における土粒子の動きを、相対変位として捉え変形挙動の検討を行った。この微視的相対変位の一例を図2a, bに示す。両図は同じ観察点(土粒子)を用いており、相対変位の基準点をそれぞれ左端の観察点(α)、右端の観察点(β)としている。また図中の縦がX、横がY方向であり、上方向にせん断している。さらに両図と同じ記号を用い、測定時の巨視的なせん断変位・ダイレイタンスーを図2cに示す。滑り層(shear band)は、滑り面の両側に基準点をとったa, b両図のいずれにおいても、大きな変位が観

測される領域として捉えることができる。また変形が連続していれば、土粒子間距離が大きくなるにつれて相対変位も大きく測定される。この例示した図からは、次の事柄がわかる。滑り層の幅は $50\mu\text{m}$ 程度である。また、滑り層の外側（左端二点（図a）と右端五点（図b））ではほとんど変形が生じていない。さらに変位の方向から、滑り面で生じている凸部乗り越えによって生じるダイレイタンスは $10\mu\text{m}$ 以下と非常に小さい。

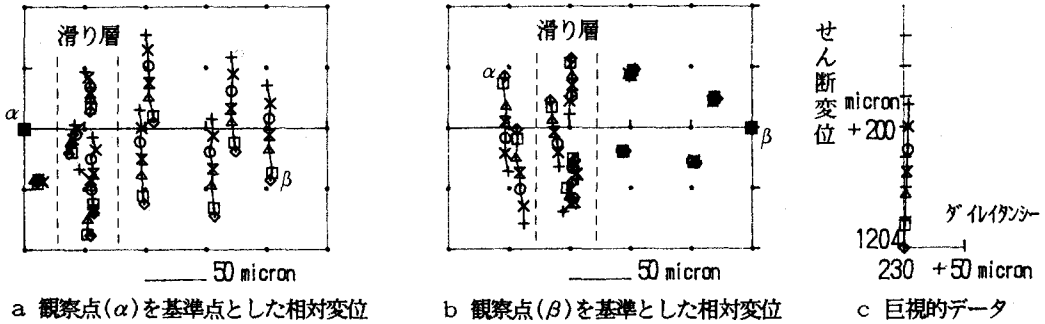


図2 微視的相対変位と巨視的せん断変位・ダイレイタンス

観察像上では、滑り面が生じる前にはほとんど変化を確認できないが、この微視的相対変位の測定から、多くの興味深い事柄が得られた。これを以下にまとめる。

a) せん断初期 変位が 0.5mm 程度までの時期において、土粒子間の接触形態が変化して弱面が形成され、せん断形態がインターロッキングから滑りへ移行する。これは次のような微視的相対変位として観測されている。まず変位方向は、同一の写真中の点でも局所的に異なり、また同じ観察点でも変位につれて変化する等、土粒子間のY方向距離が数 μm 程度変化する。つまり局所的な間隙の増減が生じるのである。また変位速度は一樣でなく、変形の不連続面（弱面）が発生することを表している。

b) 滑り面形成期 観察像での滑り面は、 1mm 程度の変位から次第に明らかになり 1.2mm 程度になると低倍率でも確認されるようになる。しかしながら、弱面が発達して滑り面になるような変形の不連続は、せん断初期からのものであり、視覚的に現れる前から滑り面は存在していると考えられる。またこの時期、初期にできた弱面の中には、そこを境にした変形の不連続が生じなくなるものもある。そして図2からも解る通り、変形はもっぱら滑り層に集中し、その外ではほとんど生じない。滑り層の幅は、 $50\mu\text{m}$ 以下であるデータと $200\mu\text{m}$ にも及ぶデータもあり、特定できていない。

c) 破壊後 滑り面を境として観察部が剥離（クラックが拡大）する部分と、滑り面において滑りが生じている部分が観察されている。この時期においても滑りが生じている部分は、観察像上で連続しているように見える。いずれにおいても、湿潤状態の観察では局所的なダイレイタンスの発現はほとんどなく（最大 $10\mu\text{m}$ 程度の増減）、分離した供試体が再接触する際の凸部乗り越えの影響は小さい。また滑り層内の挙動は、乾燥供試体に見られた大変形とは異なり、滑りのみが観察された。これについては、ベッドの間の滑りはもとより、層状ベッド内の滑りとそれに伴うベッドの破壊も観察された。

4. おわりに

粘土の変形機構を土構造に着目して微視的に検討することは、挙動のモデル化のみならず、内部変数を物理的に意味付ける上でも重要である。本研究では、湿潤粘土の近似として間隙水のPEG置換が有効であることを確認し、SEM像上の観察では変化が現れないせん断初期の弱面の形成と発達過程についても、微視的相対変位測定により上記のような知見を得た。今後の課題は、観察面を開放した供試体に平面ひずみ状態を再現することと、局所的な応力・ひずみ状態を把握できるように土粒子挙動との対応を図ることである。

（参考文献） 1) 嘉門雅史ら，第42回年次学術講演概要集第3部，1987，pp. 10-11 2) N. K. Tovey, Proc.

Symposium on the Role of Plasticity in Soil Mechanics, Cambridge 1973, pp. 231-235