



室内試験における微小ひずみの計測

東京大学生産技術研究所 古関研究室
博士課程 清田 隆

地盤の変形特性を表すものとして、実務で最も頻繁に用いられるのは、孔内水平載荷試験による E_b や、一軸圧縮試験による E_{50} であろう。また、圧密試験における除荷時の膨潤曲線から変形係数を求める場合もある。PS 検層により得られる波の伝播速度から求められる $E_0 \cdot G_0$ も良く知られている。土の変形特性は、図 1 に示すようにひずみ依存性があることが知られており、設計時には対象とする地盤に生じるひずみレベルを勘案し、適切な試験を選択する必要があることは言うまでもない。

我々の研究室では、これまで $10^{-4} \sim 10^{-3} \%$ オーダーのひずみレベルに対応した、いわゆる「微小ひずみ」に関する研究を行ってきた。これは図 2 に示すように、荷重が作用した地盤の大部分が 0.1% 以下のひずみレベルに支配されているため、その重要性に着目したためである。また、微小ひずみを精度良く測定することで、可逆的な応力ひずみ関係、即ち真の弾性特性を得ることができる。土の構成式による地盤変形の基本は、「弾塑性」もしくは「弾粘塑性」であるが、塑性・粘性が概念的なものであるのに対し、弾性特性は唯一実験により測定できるファクターである。これらのことから、土の微小ひずみの計測は地盤工学において非常に重要であるといえる。

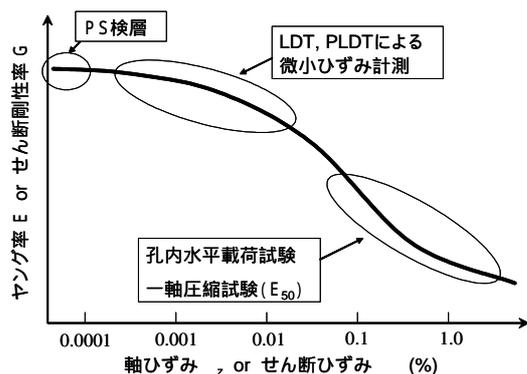


図 1 土の変形特性のひずみ依存性 (概念図)

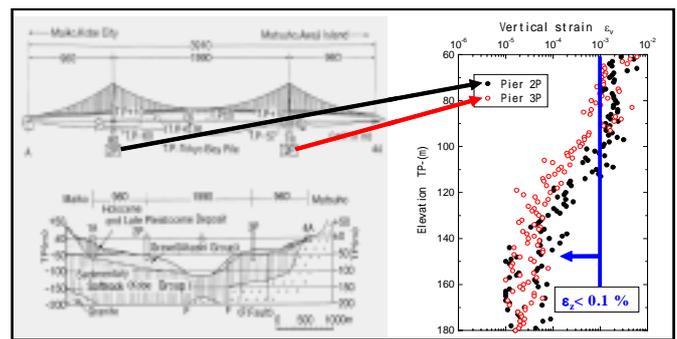


図 2 地盤内に作用するひずみ分布

我々の研究室では、このような微小ひずみ測定を、独自に開発した局所変位測定装置 (Local Deformation Transducer, LDT) を用いることで実施してきた。LDT はリン青銅薄板の中央部の表と裏にひずみゲージを貼付けた単純な構造であり、写真 1 に示すように両端を測定方向に固定した状態で供試体側面に設置することで供試体の微小な局所変位を直接測定できる。この LDT を鉛直方向に配置することで軸ひずみを、水平方向に配置することで側方ひずみを得ることが可能であり、これらを矩形供試体の三軸試験においてこれまで利用してきた。

一方、中空ねじり三軸試験では、写真 1 および図 3 に示すように、LDT を三角形に配置し、軸ひずみと側方ひずみだけでなく、せん断ひずみも局所的に計測する手法を開発した。従来の LDT では両端を完全に固定して装着していたが、ねじり三軸試験では供試体のせん断変形に伴って LDT 全体が回転する必要がある。そこで、図 3 のように LDT の両端を鋭角に削り、先端をピンホールに装着した。この手法を PLDT (Pinned type LDT) と称する。



写真 1 供試体にセットされた LDT (PLDT)

ここでは実験例として、ヒメ礫（平均粒径 $D_{50}=1.73\text{ mm}$ ，相対密度 46%）による中空ねじり三軸試験結果を紹介する。

試験手順は、所定の等方応力状態において、ねじり方向に両振幅 0.003 % の微小ひずみを繰返し与え、供試体の変形特性を各種変位計により計測した。

ここで、供試体のひずみを LDT や PLDT を用いて計測することにはいくつかのメリットがある。

まず、図 4 の微小繰返し载荷時の経過時間と PLDT によるせん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ の関係に示すように、微小ひずみレベルでも安定した計測が可能である。また、LDT や PLDT は供試体中央部に設置され、局所的なひずみを計測するため、ベディングエラーの影響を受けることがない。

PLDT と外部変位計（ポテンシオメーター）との比較結果として、微小繰返し载荷 10 波目の応力ひずみ関係を図 5, 6 に示す。いずれの結果も可逆的な応力ひずみ関係を示しているが、その傾きとして求まるせん断剛性率 $G_{z\theta}$ は PLDT よりも外部変位計の方が大きくなっている。

一般的に外部変位計による計測結果に含まれる誤差要因として、供試体とこれを保持するキャップおよびペDESTAL との間に生じる端面摩擦により計測値が過大評価されることや、供試体作成時の端部の乱れ、即ちベディングエラーにより計測値が過小評価される等が考えられる。図 5 の外部変位計の結果は、前者の端面摩擦の影響が支配的であるといえる。これに対し、PLDT では供試体側面のひずみを直接計測しているので前述した誤差要因の影響を受けにくいと、原地盤の本来の挙動に則した結果が得られたと考えられる。

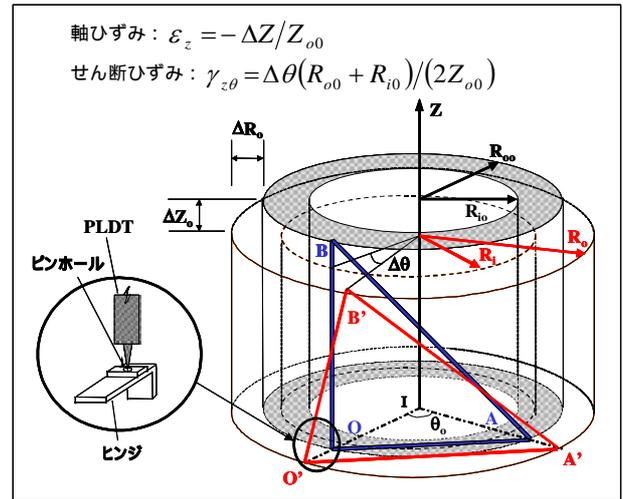


図 3 円筒供試体の変形と軸ひずみ、せん断ひずみの定義

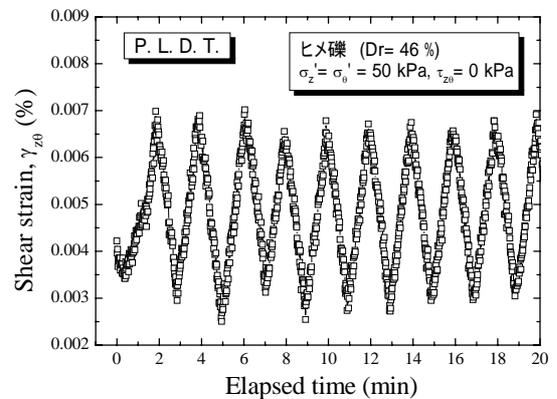


図 4 繰返し载荷時のせん断ひずみ経時変化

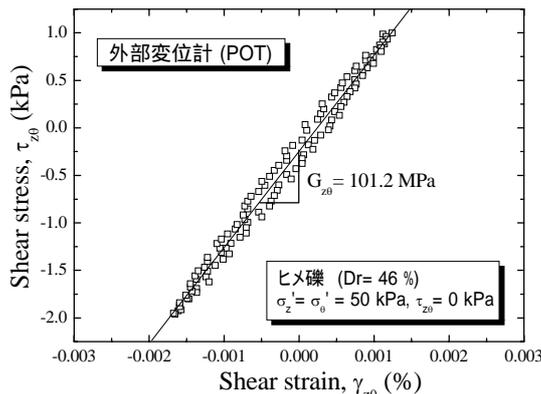


図 5 外部変位計（ポテンシオメーター）による繰返し载荷時（10 波目）のせん断応力 - せん断ひずみの関係

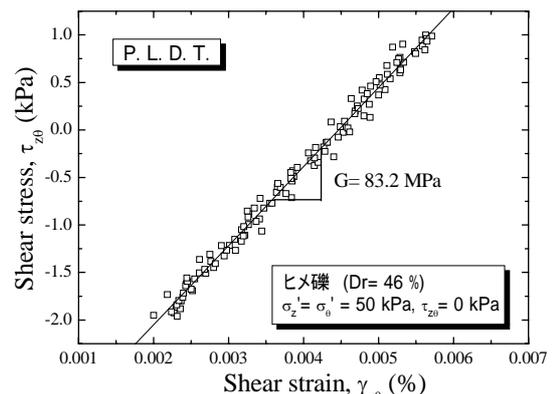


図 6 局所変位計(PLDT)による繰返し载荷時（10 波目）のせん断応力 - せん断ひずみの関係

ここでは、微小ひずみ計測の重要性とその高精度な測定手法として、LDT, PLDT を紹介した。LDT による微小ひずみ特性は、これまでも大型土木構造物の設計に多くの実績があり、今後も実務・研究両面においてその活用が期待されている。