

テーマレクチャー 1：土質基礎工学における理論と実際の発達

Theme Lecture 1: Development of Theory and Practice in Geotechnical Engineering

龍岡 文夫 (たつおか ふみお)

東京大学教授 生産技術研究所

1. キーノートレクチャーの背景

キーノートレクチャーとして用意されたのは、Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests であった。従来からの土質工学での静的荷重に対する変形問題で一番重要なものは、河川・海岸堤防や港湾構造物・開削工事での軟弱粘性土の圧密と非排水せん断変形であり、この場合1.0%程度以上の比較的大きなひずみレベルを対象にしていたと言える。しかし、近年の経済活動の拡大に伴う大型橋梁基礎・高層ビル・大深度掘削トンネル工事・都市部近接施工など重要構造物・重要工事では、比較的固い地盤が対象になるか、許容変形が大変小さいか、またはその両方であるため、地盤内に生じるひずみはせいぜい0.1%以下である。ところが、従来の土質工学的手法（原位置調査・室内試験・土質モデル・数値解析法）はこの新しい課題に十分に対応できていない。典型的な例は、従来のいわゆる静的変形係数がこれらの問題で使用するには小さ過ぎることである。すなわち、標準貫入試験の N 値から「変形係数 $\sim N$ 値経験式」を用いて求めた変形係数、孔内水平方向載荷試験（プレッシャーメーター試験）・平板載荷試験から求めた変形係数、一軸圧縮試験・三軸圧縮試験での応力・ひずみ関係での見かけの直線部の勾配から求めた変形係数は、実際の地盤の変形からの逆算された変形係数よりかなり小さく、このような変形係数を用いた数値解析では実測の変形をかなり過大評価することが次第に明らかになってきた。しかし、その原因は十分に明確にされてこなかった。

一方、地震応答解析などの動的問題では繰返し載荷での0.1%以下のひずみレベルでの変形係数が扱われてきた。しかし、静的・動的荷重での変形係数

の関連が明らかにされてこなかったため、土・岩の変形係数全体像が良く理解されておらず、静的・動的荷重での変形係数を求める方法論が統一されていない現状がある。例えば、次の異なる方法の間で変形係数の大きな不一致が見られるのが普通である。

- (a) 単調載荷三軸圧縮試験・繰返し載荷三軸試験・共振法土質試験・超音波パルス法などの室内試験と、PS 検層・孔内水平方向載荷試験・平板載荷試験など原位置試験の間で。
- (b) 静的載荷試験（三軸試験・孔内水平方向載荷試験・平板載荷試験）で初期載荷での変形係数と繰返し載荷での変形係数の間で。
- (c) 静的載荷試験と動的載荷試験（共振法土質試験・超音波パルス法・原位置せん断弾性波速度測定）の間で。
- (d) 従来の方法で予測された変形係数と実際の地盤の変形係数の間で。

これらの不一致の原因には非常に多数の要因があるが、中でも室内試験用の試料の乱れの影響は無視できない。しかし、変形係数のひずみレベル依存性と測定誤差の要因の影響も大きい。しかし静的荷重に対する変形係数について、これを十分に検討した例は少ない。例えば、硬岩の場合は岩盤でのクラック・ジョイントの影響およびそれに起因する「静的・動的載荷のメカニズムの相違」に上記変形係数の不一致の原因を求めてきたようである。しかし、硬岩の場合でもそれだけではないはずである。まして、このような影響がかなり小さい通常のセメンテーションの無い砂・粘性土地盤・堆積軟岩地盤で、「静的試験によるいわゆる静弾性係数」と「動的試験によるいわゆる動弾性係数」をあたかも別の物性のように区別する方法は再検討する必要がある。

2. 強い非線形を持つ応力・ひずみ関係を推定する実用的方法

本キーノートレクチャーでは、系統的室内試験の結果および室内試験・原位置試験による変形係数と地盤の変形から逆算した変形係数との比較例を多数紹介し、上記(a)～(d)での変形係数の不一致の原因をまず検討している。更にその結果に基づいて、**原地盤での砂・粘土・礫・軟岩の強い非線形な応力・ひずみ関係を推定する実用的方法**を示している。原地盤でのクラック・ジョイントの影響が大きい場合については、概論的にしか言及していない。

まず室内試験に関して、ねじりせん断試験と三軸・平面ひずみ圧縮試験で0.001%以下のひずみからピーク強度までの応力・ひずみ関係を精度良く連続的に測定する方法を紹介している。中でも一軸圧縮試験・三軸圧縮試験において、軟弱粘土を除き、軸ひずみを載荷ピストンやキャップの変位から求める従来の方法では、供試体上下端でのベッディングエラーのために軸ひずみを非常に過大評価することを強調している。すなわち、ベッディングエラーの影響がなく信頼できる軸ひずみを求める唯一の方法は、供試体の側面で局所的軸変形を測定する方法である。

次に、粘性土・砂質土・礫・セメント改良砂質土・堆積軟岩・風化軟岩の室内試験結果を多数示し、すべての単調載荷試験で0.001%以下での変形特性はひずみ速度・繰返し載荷の影響を受けず弾性的であり、その微小ひずみレベルで定義した初期変形係数 $E_{\max}$, $G_{\max}$ は、繰返し載荷試験・共振法土質試験・超音波パルス法・PS 検層から求めた変形係数と工学的に見て一致することを示している。また孔内水平方向載荷試験では、初期載荷で1%以上、繰返し載荷で0.1～1%程度のひずみレベルが生じており、そのようにして求めた変形係数は、そのひずみレベルでの室内試験から求まる変形係数と大略一致することを示している。

したがって、従来の「静弾性係数・動弾性係数」の区別は見かけ上のものであり正しくないことを指摘している。更に、孔内水平方向載荷試験・平板載荷試験から求めた変形係数や、一軸圧縮試験・三軸圧縮試験での応力・ひずみ関係での見かけの直線部の勾配から求めている変形係数は、変形係数の定義

するひずみレベルが大き過ぎるか、測定された軸ひずみの誤差が大き過ぎるか、またはその両方であるため、微小・小ひずみレベルでの正しい変形係数よりも（特に真の弾性係数よりも）かなり小さいことも示している。以上の知見から見ると、従来数値解析で実測の地盤変形をかなり過大評価する例が非常に多いが、その主な原因は用いている変形係数が過小評価されていることである、と述べている。

以上を総合して、静的・動的載荷問題の数値解析で用いる**ひずみの関数としての原位置変形係数**の実用的推定法を示している。すなわち、この方法は、

- (1) PS 検層から原位置弾性係数 E_f , G_f を求める。
- (2) 孔内水平方向載荷試験から変形係数 E_{BHLT} , G_{BHLT} とそれに対応するひずみレベルを求める。
- (3) 良質の不攪乱試料を用いた室内試験で、0.0001%～10%での連続的 $E/E_{\max}$, $G/G_{\max}$ ～ひずみ関係を正確に求める（単調載荷と繰返し載荷で異なることも留意する）。
- (4) $E_{\max}=E_f$, $G_{\max}=G_f$ という事実を用いて、上記三つの結果を総合して「原位置 E , G ～ひずみ関係」を推定する。

更に、室内試験によって求めた変形係数のひずみレベル依存性・応力レベル依存性がモデル化されていて類型化されていると、上記方法は更に実際的になる。本報告でもこのことに言及している。中でも、従来の双曲線関係によるモデル化はあまりにも柔軟性が無く、一般的には誤りの大きいモデル化の方法であることを示している。更に、新しい柔軟性に富み多様な地盤材料を応力・ひずみ関係を微小ひずみレベルからピークレベルまで正確にモデル化できる方法を提案し、そのパラメーターの決定方法を示している。

3. あとがき

本報告は、「土」対「岩」、「原位置試験」対「室内試験」、「動的設計法」対「静的設計法」、「微小ひずみレベルの変形係数」対「大きなひずみレベルでの変形係数・強度」、という従来別個に扱われがちな分野を統一的に見て、地盤材料の変形係数に関する俯瞰図を示しているところに特徴がある。今後詰める必要がある点が多いことも事実である。

(原稿受理 1992.3.3)