

論文内容の要旨

論文題目 : 堆積軟岩の破壊前変形特性

氏名 : 早野公敏

堆積軟岩は土が岩になる過程にある半固結状の岩石である。洪積世の後半から新第三紀までの堆積岩を堆積軟岩と呼ぶことが多く、わが国に広く分布している。特に関東近辺には、堆積軟岩が広く厚く、比較的浅い深度に存在している。

最近まで堆積軟岩は小規模構造物基礎の良好な支持地盤として考えられ、変形特性が特に注目されることは少なかった。仮に注目された場合も、一軸圧縮試験や従来型の孔内水平載荷試験による変形係数でその変形特性が評価されることが多く、それ以上の評価を行うことは少なかった。

しかし、近年社会基盤サービスの拡大に伴い、堆積軟岩が長大橋梁やダムなど大規模構造物の基礎地盤として、また LNG タンクや地下鉄などの地下空間として対象となるケースが増えている。そこでは一軸圧縮試験などによる従来 of 調査法による評価では不十分であり、より詳細な破壊前変形特性の解明が必要とされている。

多くの施工事例は、堆積軟岩地盤が破壊に遠い小ひずみレベルで変形していることを示している。その変形を正確に予測できれば、基礎幅の縮小や地下連続壁の薄肉化など施工の採算性が向上する。さらに立地条件の制約により生じる構造物の安定・不安定性や周辺環境への影響を評価できる。しかし、従来の慣用的な室内試験方法には欠陥があり、また単純な線形等方弾性体を用いた解析手法には限界がある。

本研究は、不明な点が多かった堆積軟岩の破壊前変形特性を、従来と比較して非常

に精密な室内要素試験を行ない明らかにしている。さらに弾性変形特性の応力状態誘導異方性と時間依存非線形変形特性を考慮した新たな構成則を適用し、その有効性を示している。

まず試験方法について得られた重要な知見を示す。

- (1) 従来の慣用的な三軸クリープ試験は、軸ひずみを過大評価している。これは、軸ひずみを、載荷軸やキャップの変位から求めているからである。供試体上下端面のゆるみ層やキャップ・ペDESTALとの不整合から生じるベディング・エラー(B.E.)は、荷重の増加とともに増加すると考えられていた。しかし、荷重が一定でもB.E.に時間効果があり、誤差は無視できない。従って、クリープを含む時間依存変形特性を評価するうえで、単調載荷試験と同様に、供試体側面での局所的な変形測定は必要不可欠である。従来の慣用的な堆積軟岩のクリープ試験結果は再評価しなければならない。
- (2) 供試体の固有異方性や応力状態誘導異方性を評価するうえで、角柱供試体を用いて鉛直ひずみとともに水平ひずみを局所的に正確に測定できる三主応力制御試験装置は非常に有効である。特に一つの供試体から弾性変形特性の異方性が得られる利点がある。しかし、微小ひずみレベルにおける変形特性を評価するには供試体側面で変形を測定する必要がある。加えて、正確な三次元弾性変形特性を評価するためには、載荷板と供試体の間に摩擦軽減層を設けて過剰な摩擦力が生じないように実施する必要がある。

堆積軟岩は、小ひずみレベルから非線形変形特性を示す。従来の試験方法とその結果に対する慣用的な解釈は、非線形変形特性の評価を間違った方向に導く恐れがある。これについての知見を記す。

- (3) 接線ヤング率と同様に接線ポアソン比も小さい応力レベルから非線形変形特性を示す。その評価には、局所的に高精度なひずみを測定する必要がある。従来の慣用的な圧密排水三軸圧縮試験で間接的測定による接線ポアソン比 $(\nu_{vh})_{\tan,ext}$ を評価し、これが一定となる部分を弾性変形領域あるいは弾性変形が卓越する領域と見なすことは不合理である。また大きな繰返し荷重を受ける堆積軟岩は、未固結の粒状体材料の非線形変形特性とは一見異なる挙動を示す。しかし、鉛直方向ヤング率 E_v の鉛直応力状態依存性と構造の損傷の影響を考慮すると合理的に説明できる。

非線形変形特性を示さないひずみレベルは 0.001%オーダーであった。この応力—

ひずみ関係がほとんど可逆的な微小ひずみレベルにおいて、堆積軟岩の弾性変形特性の評価を行なった。重要な試験結果と知見を述べる。

(4) 2箇所ブロックサンプリングした角柱供試体は、ヤング率について顕著な固有異方性を示さなかった。すなわち鉛直方向と水平方向のヤング率にあまり違いがない。これは、ひずみを載荷軸やキャップの変位から求めている慣用的な三軸圧縮試験がしばしば示す結果と異なる傾向である。

(5) 三軸試験により、供試体の鉛直方向ヤング率 E_v の応力状態依存性を示した。その結果、等方応力状態および側圧一定の異方応力状態における E_v は、基本的に鉛直応力 σ'_v に依存する。比較的良好に用いられる平均主応力 $p' = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ や $\sigma'_m = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2$ では、 E_v の応力状態依存性を統一的に説明できない。

また、三主応力制御試験により、弾性変形特性の応力状態誘導異方性を示した。その結果は、ある方向 A に生じる直ひずみ増分 $d\varepsilon_A$ から定義するヤング率

$E_A = \frac{d\sigma'_A}{d\varepsilon_A}$ は、その方向に作用する直応力 σ'_A に基本的に依存すると考えると合理的に説明できる。垂弾性体としての特性を示し、 E_A は次式のように表される。

$$E_A = f(\sigma'_A) \quad (i)$$

一方でポアソン比は、拘束圧の変化によるバラツキが大きく、一般的な応力状態に対する統一的な見解は得られなかった。しかし、軸対称の側圧一定下

($\sigma'_x = \sigma'_y$) では応力比 $\frac{\sigma'_z}{\sigma'_x}$ の増加とともに、ポアソン比 $\nu_{zy} (= -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z})$,

$\nu_{zx} (= -\frac{d\varepsilon_x}{d\varepsilon_z})$ はやや増加傾向にあり、 $\nu_{yz} (= -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_y})$ はやや減少傾向にある。

堆積軟岩の長期的沈下が、主に一次圧密に由来するものなのか、それとも粘性によるクリープ（二次圧縮）によるものなのかという議論がある。B.E.の影響等により堆積軟岩の標準圧密試験結果に信用性が少ないことも問題の解決を妨げている。通常は、粘性によるクリープ（二次圧縮）変形と見なされることが多い。クリープ変形は、一次クリープ・二次クリープと遷移して最終的にクリープ破壊に至る場合もある。だからクリープ変形が十分に小さいことを予測しておくことは非常に意義がある。そこで、クリープ載荷を含む、ひずみ速度を途中で変速させた三軸試験を実施して時間依存非線形変形特性の検討を行った。次に重要な点をまとめる。

(6) 軸差応力一軸ひずみ関係は、ひずみ速度の影響を受ける。過去のひずみ速度履歴に関わらず、それぞれのひずみ速度に固有の軸差応力一軸ひずみ曲線を辿る

Isotach 特性が生じている。

排水クリープひずみは、クリープ直前のひずみ速度の影響を受ける。直前のひずみ速度が小さいほうが、クリープひずみは小さい。ゆえに応力レベルが大きくても、直前のひずみ速度が十分に小さければ、クリープひずみは低応力レベルのクリープより小さいことも生じる。このような現象は、排水クリープに Isotach 特性を適用すると合理的に説明できる。

最初の荷重過程におけるクリープひずみより、同じ応力レベルであれば二回目の荷重過程におけるクリープひずみのほうが小さい。また除荷過程の排水クリープでは、負のクリープひずみ、“Creep Recovery”を生じる。

(3)～(6)に述べた性質を考慮しないと、実際の施工段階・施工速度に応じた堆積軟岩の小ひずみレベルの変形を正確に予測できない。また新しい工法の発展を阻害する恐れがある。そこで、歪弾性体と Isotach 特性に立脚した新しい構成則の適用を試みた。対象は、三軸試験条件における側圧一定下の軸差応力一軸ひずみの一次元関係である。その結果、得られた知見を示す。

(7) (ii)式のように、軸差応力 q を非可逆ひずみ ϵ_v^{ir} と非可逆ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v^{ir}$ の関数と

して表現すると、クリープ後の再荷重直後やひずみ速度急変時の軸差応力一軸ひずみ関係がよく表現される。したがって接線ヤング率の変化もよく表される。

$$q = q(\epsilon_v^{ir}, \dot{\epsilon}_v^{ir}) \quad (ii)$$

一方で、軸差応力 q を全軸ひずみ ϵ_v^t と全軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v^t$ の関数とすると、ひずみ速度の急変時に軸差応力一軸ひずみ関係が不連続になり適切に表現できない。

さらに、(ii)式は、クリープ直前のひずみ速度履歴を考慮したクリープひずみの時刻歴をも表現できる。これは従来の一般的な対数クリープ則では考慮されていない。また(ii)式に、非可逆ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v^{ir}$ が 0 のときに軸差応力一軸ひずみ関係の下限値を導入すると、除荷過程における Creep Recovery を含む時間依存非線形特性をよく表現できる。

以上述べた堆積軟岩の破壊前変形特性について本研究は明らかにし、今後の大型構造物基礎設計・施工や地下空間利用の実務においてより合理的な展開を示す知見を得た。