

論文の内容の要旨

論文題目 不攪乱礫質土の強度変形特性と粘性特性

Strength and deformation characteristic and viscous property of undisturbed gravelly soil

氏 名 榎本忠夫

本論文は、不攪乱礫質土の強度変形特性、微小ひずみ領域における変形特性、粘性特性と、不攪乱礫質土と比較する目的で再構成砂質土を対象にしたこれらの特性をとりまとめたものである。

近年、低土被りの条件下でトンネル建設工事を行う事例が増えている。低土被り条件では拘束圧が低いため掘削に伴い地山が即時的に大きく変位するとともに、掘削後、時間の経過とともに周辺地山がトンネル内空側に押し出され徐々に内空変位が累積していく。その結果、累積変位がある大きさ以上に達するとクリープ破壊が生じることになる。したがって、低土被り条件下では、内空変位の進行を抑制し必要な内空断面を確保することが最も重要になり、設計段階において、掘削時の地山の変形量とその後のクリープ変形量を精度良く予測し、必要に応じて対策工を選定することが必要になる。

そのような地山の長期的安定性を予測するにあたっては、通常は FEM 等の解析方法が用いられており、解析においては地山の強度定数をはじめとした種々のパラメータが必要になる。しかし、地山が礫質土である場合、不攪乱試料を採取し室内試験を実施して強度変形特性等を把握した事例はこれまで極めて限られていた。これは、礫質地盤に対して通常の採取方法を用いると粒子転動が生じ原位置から不攪乱試料を採取することが困難であったためである。また、土試料採取時における試料の乱れや室内試験における測定機器の精度が、地山本来の強度や剛性を過小評価する原因の一つとなっており、地山の長期的安定性の予測精度にも影響を及ぼしていた。

本研究では、近年開発された高粘性ポリマーを用いた特殊な採取方法により、低土被り区間が多く存在する北陸新幹線のトンネル建設現場から不攪乱礫質土を採取した。その上で、近年開発された高精度な大型せん断試験機、測定機器を用いて一軸・三軸圧縮試験を行うことで、設計段階で実際に実施された弾塑性 FEM 解析において必要とされた強度変形特性、微小ひずみ領域における変形特性等を把握した。

しかし、弾塑性 FEM 解析では粘性項が考慮されていないため、地山の変形量を過小に評価するおそれがあり、粘性効果が無視できない場合は粘性特性を反映した解析方法を用いることが望ましい。本研究では、採取された不攪乱礫質土の粘性特性についても実験的に検討し考察を加えた。また、近年提案された粘性効果を組み込んだ非線形三要素モデルを用いて実験結果を解析することで、当該モデルの適用性を評価した。

なお、上記のようなトンネル建設時における地山の長期的安定性の問題は、トンネルに限らず、盛土や大型土木構造物等の残留沈下も同様である。したがって、本研究ではトンネルのみならず礫質地盤の長期的安定性の問題を扱う上で重要な強度変形特性、微小ひずみ領域における変形特性、粘性特性の評価やそれらを工学的に利用する際の留意点等をまとめることに主眼を置いた。

次に、本論文の構成と研究内容を示す。

第2章では、不攪乱礫質土の採取方法、原位置ボーリング調査結果、PS 検層結果、試験装置の概要、静的手法およびアクチュエーターと加速度計を用いた動的手法による微小ひずみ領域における剛性の測定方法等について示した。

第3章では、地盤工学分野や他分野における粘性特性、地盤材料の微小ひずみ領域における変形特性や強度変形特性に関する既往の研究をまとめた。

第4章では、別途実施された事前・事後変形解析における地盤定数決定のために、低土被りである枕野、第二魚津トンネルから不攪乱礫質土を採取し系統的な室内試験を行い、得られた強度変形特性、微小ひずみ領域における変形特性について考察した。

第5章では、第一・第二魚津トンネルから採取された不攪乱礫質土および豊浦砂の微小ひずみ領域における変形特性に対する種々の影響について実験結果を示した。鉛直および水平方向の剛性を動的に測定し剛性に対する異方性の影響を検討した。また、剛性に及ぼすメンブレン厚、過圧密、供試体サイズ、入力周波数の影響も検討した。最後に、強度と剛性の関係をまとめた。

第6章では、第一・第二魚津、枕野トンネルから採取された不攪乱礫質土、および、豊浦砂、美浦砂、アルバニー珪砂の粘性特性について、実験結果と解析結果を示した。まず、不攪乱礫質土、美浦砂のひずみ速度依存性について検討するとともに、これらの結果に対して非線形三要素モデルによる解析を行った。次に、不攪乱礫質土、豊浦砂、美浦砂、アルバニー珪砂におけるクリープ破壊挙動について実験的、解析的に検討した結果を示した。最後に、不攪乱礫質

土および豊浦砂におけるクリープ破壊が生じない応力レベルでの排水クリープ、クリープ破壊中の動的測定による剛性の変化を示した。

第7章では、第4～6章で述べた強度変形特性、微小ひずみ領域における変形特性、粘性特性を総括するとともに、実地盤のクリープ変形量を予測する際の地盤定数の決定方法や留意点、原地盤の変形解析で用いるべき剛性等について考察を加えた。また、非線形三要素モデルを実務問題に適用しクリープ変形量を予測する場合の手順、パラメータの推定法、問題点についてまとめた。

第8章に本研究における結論と今後の課題を示した。

以下に、本研究により得られた主な結論の概略を示す。

■ 微小ひずみ領域における変形特性

- (1) 静的測定による鉛直ヤング率 E_{vs} は動的測定による値 E_{vd} よりも小さく、 E_{vs} から換算した静的測定によるせん断弾性率 G_{vhs} は動的測定による値 G_{vhd} よりも小さい。
- (2) 静的な測定では供試体全体の平均的な剛性が得られるのに対し、動的な測定では供試体中の最も硬い部分の特性を反映した剛性が得られる。不攪乱礫質土では、計測される P, S 波速度が相対的に硬い大礫を通過した P, S 波を反映していた可能性が高い。一方で、豊浦砂は不攪乱礫質土に比較して均質性が高いため、静的と動的測定による剛性の差は小さかった。
- (3) 特に圧密中において、豊浦砂では応力レベルが増加しても G_{vhd}/G_{vhs} はほとんど変化しないのに対して、非一様性の高い不攪乱礫質土では応力レベルの増加に伴って G_{vhd}/G_{vhs} が減少する傾向にあった。また、不攪乱礫質土の一軸圧縮試験で測定された G_{vhd}/G_{vhs} は三軸圧縮試験による当該比よりも非常に大きかった。これらの事実は、不攪乱礫質土では圧密により柔らかい部分がつぶされ供試体全体としての剛性が一様になっていくことを意味している。
- (4) 有効鉛直・水平応力が $\sigma'_v = \sigma'_h = 50$ kPa の時における G_{vhd}/G_{vhs} と均等係数 U_c には良い相関があり、概ね $U_c > 10$ の非一様な地盤であるほど G_{vhd} は G_{vhs} に比べ大きくなる傾向にあった。
- (5) 上記(3), (4)より、概ね $U_c > 10$ の非一様な礫質地盤の場合、深度が浅いほど動的測定による剛性を地盤の変形解析に用いることは地盤全体の剛性を過大に評価する可能性がある。したがって、本研究で対象にしたような良配合な礫質地盤等の非一様な原地盤の変形解析を精緻に行う場合には、室内静的測定により得られる剛性を用いることが妥当であると考えられる。ただし、原位置の応力履歴や応力状態を正確に再現するとともに、要素試験であるから原地盤全体を評価している訳ではないことに留意が必要である。
- (6) 動的測定による水平方向の剛性は鉛直方向よりも大きい傾向にあった。また、動的測定における入力波の周波数が大きくなるほど、剛性が大きくなる傾向にあった。

■ 粘性特性

- (1) 第一・第二魚津トンネルから採取された飽和不攪乱礫質土、湿潤締固め法にて作製された最適含水比状態の美浦砂では、Isotach 粘性が観察された。
- (2) 枕野トンネルから採取された飽和不攪乱礫質土では、ひずみの増加に伴って Isotach 粘性、Combined 粘性、TESRA 粘性、P&N 粘性に移行した。ひずみの増加に伴って現在発見されている全 4 種類の粘性を示す地盤材料は今まで報告されていない。
- (3) P&N 粘性、TESRA 粘性、Isotach 粘性の順にクリープ破壊に対する安定性が高いことを示した。Isotach 粘性を有する第一・第二魚津トンネルから採取された飽和不攪乱礫質土、上記(1)の条件下における美浦砂では、ピーク応力よりも低い応力レベルでクリープ破壊が生じた。TESRA 粘性を有する空気乾燥密詰め豊浦砂でもクリープ破壊が観察されたが、ピーク応力に近い応力レベルでなければクリープ破壊は生じなかった。P&N 粘性を有する空気乾燥密詰めアルバニー珪砂では、ピーク応力にかなり近い応力レベルであってもクリープ破壊は生じなかった。
- (4) 地盤材料のクリープ破壊を含んだ長期的安定性を解析する上で、非線形三要素モデルが有効であることを示した。

■ 強度変形特性と微小ひずみ領域における変形特性の関係

既往の研究による様々な自然地盤材料と同様に、不攪乱礫質土でもせん断直前の鉛直ヤング率と最大強度の比は $E_{\max} / q_{\max} = 500 \sim 1000$ という関係にあった。この関係を利用し、室内単調載荷試験による q_{\max} から E_{\max} を簡易に推定することができる。

■ 微小ひずみ領域における変形特性と粘性特性の関係

- (1) クリープ破壊が生じない応力レベルでの排水クリープでは、飽和不攪乱礫質土の G_{vhd} は経過時間とともに徐々に増加した。これは、排水クリープによって供試体が収縮するとともに土骨格構造が変化し、土粒子間の接触面積が増加した結果であると考えられる。一方で、空気乾燥密詰め豊浦砂の G_{vhd} は経過時間とともにわずかに上昇しているかほとんど一定であった。豊浦砂は不攪乱礫質土と比較して均質性が高いため、排水クリープを実施しても土粒子間の接触面積がさほど増加しないためであると考えられる。
- (2) クリープ破壊を伴う場合、Primary creep においては G_{vhd} はほとんど一定であるが、Secondary creep に突入すると G_{vhd} は明らかに減少し始め、Tertiary creep ではさらに急速に G_{vhd} が減少するような傾向にあった。本研究のようにクリープ破壊時の剛性の変化を測定した研究事例はほとんどない。