

論文の内容の要旨

論文題目 Effects of compaction on strength and deformation properties
of gravel in triaxial and plane strain compression tests
(和訳 三軸・平面ひずみ試験における礫の強度変形特性に
及ぼす締固めの影響)

氏 名 マクブール サジャッド

締め固めた礫の強度変形特性に及ぼす締固め程度の影響を調べるために、3種類の系統的な試験を実施した。試験材料として、千葉礫（最大粒径 38mm，平均粒径 11mm，均等係数 30）を用いた。3つの主応力（ σ_1 , σ_2 , σ_3 ）を独立に制御できる大型三主応力制御試験装置を用いて、最初と2番目の系統の試験として三軸圧縮試験と平面ひずみ圧縮試験を実施した。三軸圧縮試験における供試体寸法は断面 23.5cm × 23.5cm，高さ 50cmで、平面ひずみ圧縮試験では断面 22cm × 25cm，高さ 50cmとした。最後の系統の試験では、三軸圧縮試験に加えて、載荷中の供試体の写真を撮影するために2枚の拘束板のうち1枚を透明なアクリル板に変更した試験装置を用いて平面ひずみ圧縮試験を実施した。

最初の系統の試験を始める前に、自動式衝撃締固め装置を用いて3通りの異なる締固めエネルギーにおける締固め曲線を求め、最適含水比を決定した。締固め前後における供試体のふるい分け粒度分析を行うことにより、締固めに伴う粒子破碎についても検討した。その結果、どの締固めレベルにおいても、粒径 10mm 以上の粒子において若干の粒子破碎が生じることを明らかにした。

最初の系統の試験のために、P波とS波を発信受信できる動的測定システムを改良し、豊浦砂の供試体を用いた予備的試験によりその妥当性の検証を行った。このシステムを用いて、動的と静的に測定した弾性的変形特性の比較を行った。ほぼ同様な乾燥密度のもとでは、密な豊浦砂の動的測定による鉛直ヤング率は静的測定結果と比べて15~25%程度大きかった。一方で、締め固めた礫の乾燥密度を変化させた場合には、静的測定と動的測定による鉛直ヤング率の差は乾燥密度の増加とともに小さくなった。

最初の系統の試験の結果を、動的測定に用いた半波長で正規化した平均粒径($D_{50}/(\lambda/2)$)と、静的測定と動的測定結果から換算した弾性波速度の比率($V_{cyc}/V_{sv} = \sqrt{\frac{E_{v,static}}{E_{v,dynamic}}}$)の関係として整理した。その結果、これらの関係が乾燥密度に依存することが明らかになった。動的測定の際には、大きな粒子で形成された剛性の高い経路を波が伝達したために、異なる乾燥密度によらず同程度の動的ヤング率が得られたものと考えられる。一方、静的ヤング率は供試体の全体的な剛性を反映しているために、その測定結果が乾燥密度により強く依存したものと考えられる。

二番目の系統の試験においては、締め固めた礫の単調載荷試験を拘束圧100kPa三軸及び平面ひずみ条件下で実施した。三軸試験では従来手法を用いたが、平面ひずみ圧縮試験では、従来手法によるパッシブ制御に加えて、新たにアクティブ制御もとり入れた。パッシブ制御試験では2枚の拘束板を両方とも固定して、3対の水平局所変位計による中間主ひずみ ϵ_2 の計測を行った。その結果、局所変位計測による ϵ_2 はピーク応力状態において1~2%程度かそれ以上であることがわかった。そこで、アクティブ制御試験では、1枚の拘束板を前後に動かすことにより、局所変位計測による ϵ_2 がほぼゼロとなるように制御した。

二番目の系統の試験の結果、局所変位計測による ϵ_2 をアクティブ制御しても、得られる応力ひずみ特性はせん断初期を除いてパッシブ制御と変わらなかった。同程度の乾燥密度のもとでは、これら2種類の平面ひずみ圧縮試験によるピーク強度 q_{max} が三軸圧縮試験による値よりも大きくなった。供試体の乾燥密度または締め固めレベルが大きくなるほど、三軸圧縮試験と平面ひずみによる q_{max} の差が大きくなったが、これらの比は乾燥密度や締め固めレベルによらず0.8程度であった。一方、締め固めエネルギーを680kJ/m³から4倍および13倍に増加さ

せると、試験のタイプによらず q_{max} の値はそれぞれ約 1.3 倍および 1.9 倍に増大した。

最後の系統の試験においては、締固めた礫供試体 2 グループを用いてそれぞれ三軸および平面ひずみ条件下で試験を行った。それぞれのグループの供試体に、単調載荷、大振幅繰返し載荷、クリープ載荷を行った。繰返し載荷時にはその振幅も変えて強度変形特性に及ぼす影響を調べた。一番目のグループの三軸試験結果として、大振幅繰返し載荷後の単調載荷時に、軸ひずみがほとんど増加しないのに軸応力が急激に増加する現象が観察された。載荷履歴が異なってもピーク強度はほぼ同様であったが、それが発揮される軸ひずみの大きさは異なることがわかった。大振幅繰返し載荷およびクリープ載荷過程では、単調載荷過程よりも体積収縮傾向が強く現れた。二番目のグループの平面ひずみ試験でも、大振幅繰返し載荷後とクリープ載荷後の応力ひずみ曲線の変化は最初のグループの三軸試験結果と同様であった。また、大振幅繰返し載荷およびクリープ載荷中の体積収縮傾向も確認された。

最後の系統の試験におけるこれらの結果から、大振幅繰返し載荷過程とクリープ載荷過程では、土粒子の再配列の生じ方が単調載荷時とは異なっていることが示唆された。このような違いにより供試体中での局所的な高密度化がより強く発生し、供試体全体の挙動としてはより強い体積収縮傾向を示したものと考えられる。

本研究で得られた成果は実務において次のような意義を有する。礫質土の微小ひずみ剛性を例えば原位置弾性波探査などの動的測定により評価する場合、測定波の波長および土の粒径と密度の複合的な影響について十分に留意する必要がある。礫のピーク強度は締固めエネルギーの増加に対して非線形的に増大するため、実務においてはそれ以上締固めると経済性が低下するような最適な締固めレベルが存在する。締固めた礫の三軸圧縮試験結果に基づいて平面ひずみ条件下での設計ピーク強度を設定する場合、ある拘束圧のもとでの補正係数は礫の密度や締固めレベルによらない。礫をある程度のレベルまで締め固めた場合、大振幅の繰返し載荷履歴やクリープ載荷履歴がその後の単調載荷時に発揮されるピーク強度に及ぼす影響を無視することができる。