

論文の内容の要旨

論文題目: Experimental investigation on volume change and shear deformation characteristics of sand undergoing cyclic loading
(繰返しせん断を受ける砂の変形と体積変化に関する実験的研究)

氏 名: シャナザリ ハビブ (Shahnazari Habib)

土質動力学は、特に地震国にとって、最も重要な地盤工学の一分野である。その進展は、実験的観察結果に基づく部分が大きい。

本研究では、砂に繰返し载荷を行った時の挙動を観察するために、日本の豊浦標準砂で中空ねじり载荷試験機を用いた実験を多数行った。その主要な目的は、砂の排水または非排水条件下での繰返し载荷による体積変化と変形の特性を調べることである。砂の密度、拘束圧、初期異方応力状態、せん断履歴、繰返し振幅の不規則性などの種々の要因が、砂の特性に及ぼす影響を調べた。

はじめに、砂の中空円筒供試体に対して、等方応力での圧縮実験を行い、体積圧縮率と膨潤係数、およびメンブレンペネトレーションによる誤差を測定した。砂の体積圧縮係数は、せん断による体積変化（ダイランシー）を全体積ひずみ量から求めるときに、必要となる。実験の結果、メンブレンペネトレーションによる誤差が無視できないほど大きく、体積変化や間隙水圧の変動を扱う研究では実験結果の補正が必要であることが分かった。

従来の等方硬化則にもとづく塑性理論の考え方では、応力の履歴はひずみ増分の発生に影響しない。しかし、近年の移動硬化則の発展においては、異なる意見が表明されている。このような問題に対して、本研究では、あらかじめねじりせん断をかけた場合とかけない場合の実験を行った。その結果、ねじりせん断履歴が、砂の塑性域における応力増分対ひずみ増分の関係に影響を及ぼす事が分かった。同じひずみ増分ベクトルを与えた場合の応力増分ベクトルの向きは、ねじりせん断履歴によって変化した。また、同じ応力増分ベクトルを与えたときの、ひずみ増分ベクトルの大きさは、ねじりせん断履歴を与えた方が小さくなった。

供試体が排水条件下で繰返しせん断を受けた場合、その密度と剛性は繰返し载荷回数が増えるほど高くなった。しかし、この剛性の増加が、密度の増加だけによるものなのかどうかは、よく分からない。この疑問に答え、また砂の硬化に影響する要因を探すために、排水条件下での繰返し単純せん断実験を行った。この実験では非常

に緩いものから非常に密なものまで、様々な密度の供試体を用いたが、供試体の密度は、載荷を繰り返すにつれて大きな範囲で変化した。各実験段階での間隙比と同じ間隙比を持つように作った供試体に対する実験を別途行った結果と比較することで、純粋に密度変化による影響を取り除いて考えることにした。実験結果について考察した結果、密度の増加だけでなく、せん断履歴自体も砂の剛性に影響していることが分かった。すなわち、間隙比が同じである場合、初期密度が高くせん断履歴を受けていない供試体の方が、初期密度が低くせん断履歴を受けた供試体より、剛性が低く、かつ繰返し載荷の初期の数サイクルでの剛性の向上が速かった。しかし、多数回の繰返し載荷の後では、供試体の剛性は、どの実験ケースでもほぼ同じ値に落ち着いた。また、せん断応力を初期間隙比に応じて正規化することにより、正規化された剛性と体積ひずみとの間に、線形な相関関係が見いだされた。

砂の繰返し載荷時の体積変化を実験的に求めることにより、地震などの動的載荷時の土構造物の沈下を予測するため有益な情報が得られる。非排水繰返し載荷実験で発生する間隙水圧の変化も、土の挙動に影響し、強度と変形のモデルで考慮すべき重要な要因である。体積変化や過剰間隙水圧をせん断エネルギーの累積に関係付ける研究がある。本研究では、排水・非排水条件下での繰返し単純せん断実験で、塑性せん断エネルギーの累積と体積変化、あるいは過剰間隙水圧との相関を調べた。

排水条件下では、初期拘束圧と初期応力異方性が、体積変化とエネルギーの累積との関係に影響を与えることが分かった。しかし、有効軸圧縮応力の関数で正規化したエネルギーを用いると、その関係はほぼ一意になった。また、大きな体積変化が起こる場合には、繰返しせん断の振幅がエネルギーとの相関に影響を与えるものの、様々なひずみ振幅に対する体積ひずみを予測するのに、平均的な相関関係を一つ定めればよいことが分かった。

非排水実験の結果からは、初期拘束圧が同じであっても初期応力異方性が異なれば、せん断仕事量と過剰間隙水圧の相関が異なることが分かった。過剰間隙水圧を、そのとりうる最大値で正規化した場合には、せん断仕事量との相関は初期応力異方性によらず一定であった。また、せん断仕事量と平均有効拘束圧との相関は、初期応力異方性によらず一定であった。従って、東畑・石原(1985)によって提唱されたせん断仕事のコンター図の手法が、初期応力異方性のある場合にも適用できることが分かった。

非常に多数回の、振幅が一定、あるいは不規則に変化する繰返し載荷の下での応力-ダイレタンシー特性を調べるために、排水条件で繰返し単純せん断実験を行った。同時に、初期応力異方性や初期拘束圧、密度、せん断履歴の影響も調べた。応力-ダイレタンシー特性は、載荷の反転時に変化し、その直後は圧縮性を示した。応力比の高い状態で載荷が反転すると、反転後にはさらに圧縮傾向が強くなった。振幅が不規則な載荷の場合、応力-ダイレタンシー曲線は、載荷が反転するごとに異なる圧縮変形を示すが、繰返し載荷することによって一定の曲線に収束した。

また、初期拘束圧が応力-ダイレタンシー特性に及ぼす影響は小さかった。応力-

ダイレタンシー特性は、载荷の第1サイクル目を除いて、初期応力異方性にもよらなかった。密度とせん断履歴については、密度が高いほど、またせん断履歴が与えられている場合の方が、応力-ダイレタンシー特性の圧縮傾向の程度が小さくなり、その結果、最終的な体積圧縮量が小さくなった。これは、密度とせん断履歴が、非排水繰返し载荷が進むにつれて変化していく点も、考慮に入れて考察する必要がある。

砂の繰返し载荷時の応力-ダイレタンシー特性の実験結果を用いて、応力-ダイレタンシー特性の幾何学的なモデルを提案した。このモデルでは、砂の振幅が不規則な一般的な载荷に対する応力-ダイレタンシー特性を、せん断応力比の関数として再現できる。この単純なモデルで、排水繰返し载荷時の砂の体積変化の予測を行った。非排水载荷時の過剰間隙水圧の増加は、排水载荷時の体積変化に対応する現象として扱うこととし、 e - $\log P$ 特性と合わせて用いて予測した。

応力ひずみ関係の、新しく簡便な双曲線モデルを開発した。このモデルは Masing 則の改良版であるため、従来型のモデルがエネルギー消散を過大評価するのに比べて、エネルギー消散を少なく、現実 に即した量として扱うことができる。また、双曲線モデルに比べて単純化されているために、振幅が不規則な繰返し载荷に対しても計算機メモリの消費量を少なくできた。また、入力パラメータとしては、各種の応力状態に対して、過去に受けた最大の応力比と最後の载荷の反転時の応力・ひずみの初期値が与えられれば、計算ができる。

このモデルを非排水繰返し载荷実験の結果に応用したところ、応力ひずみ挙動と、液状化した砂の大変形をうまく予測する事ができた。