

論文内容の要旨

論文題目 EXPERIMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF RESIDUAL
STRAIN DUE TO CYCLIC LOADING

繰返し載荷による残留ひずみの進展に関する実験的研究

氏 名 Mohajeri, Masoud
モハジェリ マスード

繰返し載荷を受ける土構造物の残留変形は、地震時、及び地震後の被害の程度と深く関係している。地震による土構造物の被害事例や地震被害の危険性が高い地域が依然としてある。また、河川堤防や道路盛土などの比較的密な不飽和土構造物に関する研究は不十分である。そこで本研究では、河川堤防や道路盛土構造物などの残留変形量評価手法の開発のために、繰返し載荷を受ける密な不飽和土斜面の地震による残留変形の研究を行った。

本研究では、残留ひずみ挙動を調べるために要素試験と大型振動台模型実験の2つの実験シリーズを行った。これらの実験に使用した地盤材料は、豊浦砂及び東京都内で採取した2種類の有楽町層砂、千葉県で採取したロームの計4種類である。また、これらの試料特性の違いを見積もるために、比重、粒度分布、液性・

塑性限界試験の物性試験を行った。

斜面上の土要素は、地震力によって単純せん断モードの繰返し荷重を受ける。そこで繰返し荷重による単純せん断モードを再現するために、通常の一面せん断試験機を改良した。具体的には、一面せん断試験機のボックスを、厚さ 2mm、内径 60mm のテフロンリングを積層したものに置き換え、リング内の土供試体を支持するためにゴムメンブレンを供試体の周囲に取付けた。そして、供試体底面で荷重を直接計測するために 2 方向ロードセルを採用し、供試体の底面の鉛直荷重とせん断力を測定した。同様に供試体の上板にも鉛直方向と水平方向のロードセルを取付けおり、供試体上面に作用する鉛直荷重とせん断力を計測している。尚、この供試体底面と上面のロードセルを使用して静的な荷重試験を行い、今回改良したテフロンリングによる単純せん断試験機の性能を確認した。また、鉛直方向の荷重にペロフラムシリンダーを使用し、水平方向の荷重に自動制御のモーターを使用して、荷重・除荷・クリープ過程を再現している。実験は、供試体作成後に所定の圧密圧力及び圧密時間で圧密を行った。そして、圧密終了後に所定の水平方向にせん断することで初期せん断応力を加え、クリープ後に、様々な規則・不規則の繰返し荷重試験を行った。

本研究では排水条件で、単調荷重及び、規則・不規則の繰返し荷重の単純せん断試験を行った。これらの試験は、繰返し荷重を受ける砂質土の基本的な応力ひずみ関係を調べるためのものである。そして、各パラメータの違いによる影響を調べた。具体的には、繰返し荷重の回数、初期せん断・クリープ時の応力レベル、試料、締固めの程度、圧密時間と応力、クリープ時間、規則・不規則繰返し荷重の振幅を変えており、これらの応力ひずみ関係や残留ひずみ挙動に与える影響を調べた。

これらの試験から、繰返し荷重による残留ひずみ増分は、繰返し振幅が大きいほど増加する。しかし、繰返し回数が増加すると残留ひずみ増分は著しく小さくなる。つまり、1 回目の繰返し荷重のひずみ増分は、応力振幅に強く依存しており、このことは、大きな応力振幅を受けると、1 回目の繰返し荷重によってすぐに大きなせん断ひずみが生じてしまうことを意味する。また、2 つの異なる繰返し荷重が、急勾配と平坦な斜面に作用すると、せん断応力が等しければ、平坦な

斜面の方が残留ひずみは小さいことになる。長時間圧密を受けた供試体は剛な挙動を示し、結果として、繰返し載荷初期におけるせん断ひずみが小さくなった。また密度や締固めの程度が、残留ひずみと体積ひずみの進展に大きく影響する。尚、不飽和土においても間隙水圧が上昇するが、液状化までには至らない。不規則周期の繰返し載荷試験から、最大せん断応力が作用するピーク前の繰返し載荷時刻歴が残留せん断ひずみに影響する。しかし、ピーク後の小さな応力振幅の繰返し載荷では、残留ひずみがほとんど増加しない。またピーク時の繰返し荷重の大きさは体積ひずみにあまり影響しておらず、むしろピーク後の小さい繰返し荷重によって体積ひずみの増加が続く。規則的な繰返し単純せん断試験では、全ての試験において、1回目の繰返し載荷による残留ひずみの増分が全残留ひずみの大半を占めており、繰返し回数が増加すると残留ひずみ増分はほとんど小さくなってしまふ。時間と荷重の変化率が繰返し載荷による応力ひずみ関係に与える影響を調べた。これらの試験から、長期クリープ後の供試体は、クリープ後に剛な応力ひずみ関係を示すため、1回目の繰返しによる残留ひずみは短期クリープ後の供試体よりも小さくなる。しかながら、繰返し載荷回数の増加に伴い、残留ひずみは変わらなくなり、ある1点に収束する。さらに、クリープや荷重の変化率が無視できる程の時間内に十分な繰返し載荷回数を受けると、せん断応力ひずみ関係、及びせん断ひずみと体積ひずみ関係は、同様な繰返し挙動を示す。

シルト混じり砂では、繰返し載荷後の単調載荷時のせん断応力ひずみ関係は、一時的に繰返し載荷を行わない単調載荷試験による応力ひずみ関係より上になるが、載荷に伴い2つの曲線は一致する。しかし、ロームではこのような傾向が見られず、常に単調載荷試験の応力ひずみ曲線の上側にある。つまり、繰返し載荷を受けてピーク強度は大きくなった。

大型振動台模型実験では、幅 1000mm、高さ 1000mm、奥行 500mm のせん断土層を使用した。尚、土層内にはメンブレンを取付けている。また容器の上板は、土層内に負圧を作用させるために用いており、これにより上載荷重を加えることができる。底板には2方向ロードセルを設置し、底板に作用するせん断力を直接計測した。せん断土層の底板を所定の角度に傾けることで斜面を再現し、5度と

14度の角度の斜面で振動台実験を行った。加速度計を土層内と、容器の底板及び上板に設置し、鉛直方向と水平方向の加速度を測定した。各土層高さの変位を測定するために非接触型であるレーザー変位計を使用している。振動実験前後に模型土層の固有周期を求めるために非常に小さな応力振幅を用いたスイープ試験を行った。同様にスウェーデン式貫入試験を実験前後に行った。この一連の試験では、せん断ひずみ挙動や残留ひずみの進展挙動、強度及び固有振動数に影響する初期せん断応力、入力加速度、拘束圧及びせん断応力履歴について調べた。

これらの試験より、より実際に即した地震時及び地震後の不飽和度斜面の変形特性を明らかにした。繰返し荷重の増大、繰返し回数の増加、斜面勾配が急になればなるほど、残留ひずみは大きくなり、拘束圧が高いほど残留ひずみは小さくなるのが振動台模型実験からも分った。また、せん断応力の除荷・載荷、過圧密度やクリープ時間は振動時の残留ひずみに著しく影響した。既に大きな応力振幅や繰返し載荷回数を受けた模型土層や、過圧密、長時間のクリープを経た模型土層では、生じる残留ひずみが小さい。試料や模型作成法、密度は残留変形の分布に大きく影響する。スイープ試験とスウェーデン式貫入試験から、振動台実験前後の土層の固有振動数及び強度の変化を捉えた。

次に、これらの実験結果から、斜面上の一自由度系非線型振動モデルを提案した。この手法の基本的な枠組みは、Newmark (1965) 法に基づいている。この提案したモデルでは、斜面を構成する土層を、傾斜した基盤斜面上の一つの土塊と見なした。そして、この土塊の応力ひずみ関係を非線型ばねとして再現している。尚、この土塊の底面は斜面上に固定しており、斜面上に生じる残留変形は土塊の単純せん断モードによる残留ひずみとして表している。基盤の振動による加速度の時刻歴は、基盤からの入力加速度を静的な初期せん断力に慣性力として付加することで再現できる。そして、この運動方程式の数値解析によって振動後の残留変形を予測することができる。実際に、数ケースのモデルにおいて解析を行い、振動台模型実験と比較した。

今回提案したモデルによる残留変形評価では、相対的に密な不飽和斜面上に生じる残留せん断ひずみを予測することができた、しかしながら、このモデルを広範囲の問題に適用するために、さらにモデルを修正する必要がある。