

氏 名	菅 野 高 弘
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 16 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 58 年 3 月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	砂の変形・強度特性に及ぼす主応力軸方向及び 回転の影響に関する実験的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柳澤 栄司 東北大学教授 福田 正 東北大学教授 杉村 義広 東北大学助教授 岸野 佑次

論 文 内 容 要 旨

要 旨

地盤における砂のような粒状体は一般に砂粒子・間隙水・間隙気体の三相構造をなしており、その変形挙動は非常に複雑である。特に地震時における地盤内の応力状態は主応力軸の回転を伴う場合があり、これらの現象についてはあまり研究が進められていないのが現状である。本論文は地盤内の複雑な応力状態における砂の変形・強度特性について実験的に明らかにしていくものである。

第 1 章 序 論

第 1 章は砂のせん断変形特性に関する既往の研究について述べ、本研究の目的、位置付けを明らかにしている。本研究の目的は、砂のような粒状体の変形・強度挙動を明らかにすることにあるが、対象とする実現象としては、従来あまり研究のなされていない表面波伝播時の応力ひずみ関係を考えている。このような動的問題では、主応力軸の回転を伴う現象が多く、例えば Rayleigh 波の伝播時には、地盤は平面ひずみ状態で主応力軸が連続して回転する応力履歴を受ける。また、Love 波伝播時には、二成分のせん断応力が同時に作用する応力状態となるなど、主応力軸固定の実験結果とは全く異なる応力状態あるいは応力履歴を受けた時の砂の変形挙動を求める必要が出てくる。このような、砂の変形・強度特性を実験的に明らかにするために、従来は軸対称三軸せん断試験装置が使用されてきたが、この装置は簡単な操作で実験が行えるため各研究機関に普及している反面、装置の機構上制御できる応力成分が軸応力及び横方向応力の二成分に限定され、さらに応力の主軸

が固定されている制約が大きく、実際の地盤内の複雑な応力状態に対応できない欠点がある。この問題を克服すべく種々の実験装置が発案されてきているが、砂の変形・強度特性を明らかにするための理想的な要素試験を実験装置で再現することは不可能であり、各々の実験装置の長所・短所及び制約条件等を十分把握した上で目的に合った実験装置を選択する必要がある。よって本研究において既往の三軸せん断試験装置のほかに、中空ねじりせん断試験装置、実地盤内の変形に対する拘束条件（K₀状態）を満足する二方向せん断試験装置を新たに開発して、これら三種の試験装置を用いて複雑な応力状態における砂の固有異方性のみならず圧密やせん断による誘導異方性について実験的に検証することを試みた。

本論文は、既往の研究を踏まえ以下の項目を重点的に考察している。

砂の異方性については、堆積構造と与えられる応力系との関係によって変形に異方性が発生する固有異方性が大きいことが知られている。

また、過去に受けた応力履歴による砂の構造変化が新たな応力系との関係によって変形に異方性を発生させる誘導異方性も観測されている。これらの性質はせん断破壊強度にも反映されており、砂の粒子間の構造が変形初期から破壊領域までに影響を及ぼすことが知られている。しかし、異方性の降伏曲面に与える影響については三軸せん断試験装置を使用した研究は多いが、複雑な応力状態での研究が少ないのが現状である。

非共軸性として知られる応力の主軸方向とひずみ増分の主軸方向が一致しない現象は、変形初期に大きく破壊領域に近づくにつれて共軸性を帯びてくる。また、この現象は主応力の絶対値を変化させずにその方向だけを回転させた場合に著しい。これは弾塑性理論における塑性ポテンシャル関数を決定する場合の関連流れ則、非関連流れ則等と深い関係にあり、ストレス・ダイレイタンスー関係として用いられるエネルギー式の評価において、共軸性を仮定した場合に誤差を含むことを意味する。

応力増分方向依存性とは、同一の応力、ひずみ履歴を持つ供試体に新たに加えられる応力増分の方向によって発生するひずみ増分の方向が異なる現象であり、弾塑性理論における塑性ポテンシャルを用いた場合には表現できない現象である。

これらの現象について、三種類の実験装置による実験結果を基に普遍性のある砂の変形・強度特性を明らかにし、巨視的な取り扱いにおける構成則策定のための基礎的考察を行うものである。

第2章 実験装置及び供試体作成方法

第2章は本研究に用いた三軸せん断試験装置、中空ねじりせん断試験装置及び新たに開発した二方向せん断試験装置について述べ、合わせて実験結果の評価法について述べている。

第3章 砂の変形・強度特性に及ぼす主応力軸方向及び回転の影響

第3章は、既に述べたように主応力回転の影響を考慮できる中空ねじりせん断試験装置と新たに開発した二方向のせん断応力を同時に載荷できる二方向せん断試験装置（図-1）を用いて、実地盤に近い固有異方性を有する砂供試体について、単調載荷及び繰返し載荷試験を排水・非排水の両

条件で行い、砂の硬化則について実験的な知見を得た。

降伏特性については圧密による降伏曲面の拡がり(図-2)に加え、過去に受けたせん断履歴方向に降伏曲線が移動(図-3)する現象を実験的に示した。また、非共軸制については主応力軸回転時に顕著である(図-4)。

同一の応力履歴を持つ供試体に対して異なる方向への载荷を行った際の変形が加えられた応力増分方向で異なることが示された。砂の液状化強度特性について異方性の影響及び応力経路依存性が認められたが、正規化外部仕事 S_s' を用いるとこれらの影響を受けずに液状化を評価できることを示した(図-5)。特に砂の液状化強度特性に関する正規化外部仕事 S_s' による評価は、異方性や応力経路の形状に影響されない液状化判定のための一手法となることを示した。また、実地盤に近い境界条件を持つ二方向せん断試験結果及び粒状要素法による数値実験から従来砂粒子固有の性質として考えられてきた変相現象が境界条件の影響を受けることを示した。

第4章 正規化外部仕事 S_s' による砂のせん断変形に関する考察

前章で得られた砂の液状化強度特性に関する正規化外部仕事 S_s' での評価を基に、これまで試験装置の個性として説明されていた現象等も踏まえて砂の変形・強度特性に関する普遍的な挙動を説明するための状態量を提案することを試みた。ひずみ制御非排水繰返し三軸せん断試験

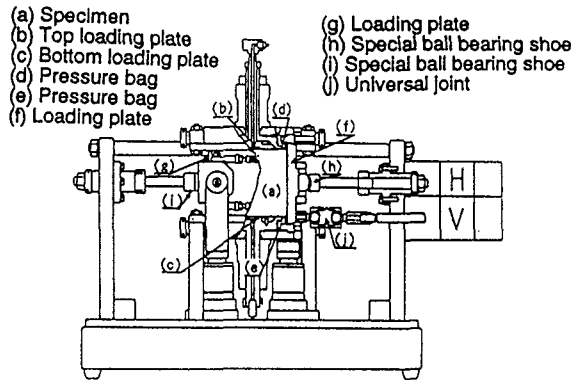


図-1 二方向せん断試験装置

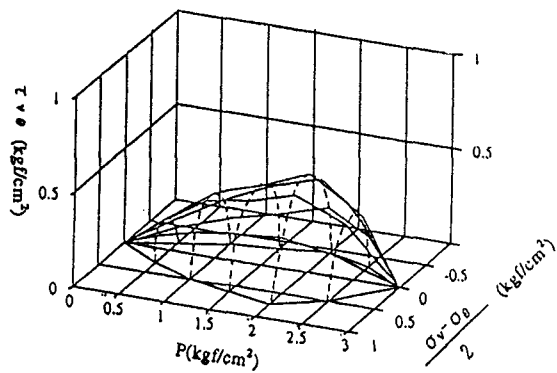


図-2 降伏曲面

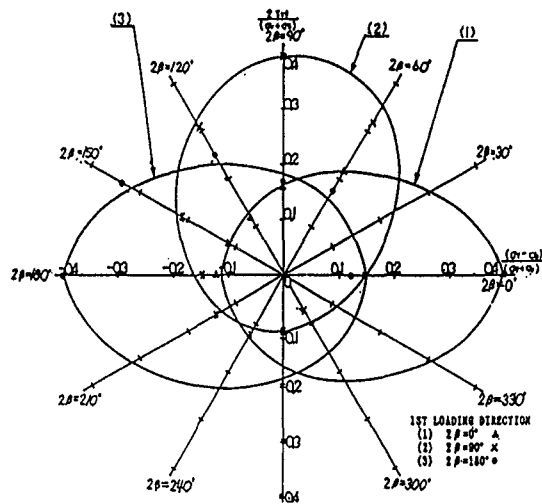


図-3 応力履歴による降伏曲面の移動

を行い、荷重に伴う間隙水圧上昇挙動を液状化に至るまで Ss' によって評価し、間隙水圧比- Ss' 間にひずみ振幅、拘束圧によらない一義的な双曲線関係を示した。さらに中空ねじりせん断試験結果、二方向せん断試験結果も含めて実験装置の違いにもよらず統一的に評価できることを示した。(図-6 a, b, c) また、提案した正規化仕事 Ss' を用いた数値解析例を示し適用性を確認した。

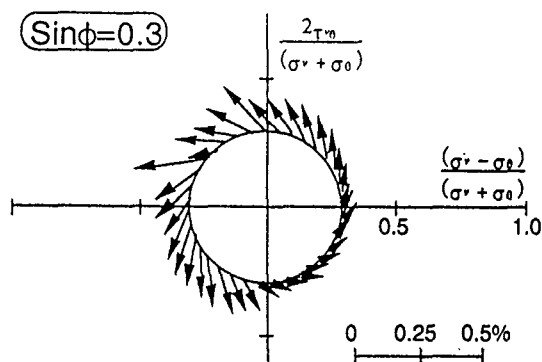


図-4 主応力軸回転時のひずみ増分ベクトル

第5章 結 論

- (1) 空中落下法によって作成された砂供試体の固有異方性を示す指標としてせん断強度、等ひずみ線、等仕事線が挙げられた。
- (2) 変相応力比については中空ねじりせん断試験結果からは固有・誘導異方性の影響を受けないことが知られたが、二方向せん断試験結果からは異方性が見られた。この現象について供試体の境界条件の寄与が少なからずあることが実験的および数値実験から明らかされ、各種実験供試体が理想的な要素試験になっておらず、境界値問題として取り扱う必要性が示唆された。
- (3) 主応力軸方向と主ひずみ増分方向が一致しない非共軸性が確認され、固有異方性との関係で説明できることが示された。特に主応力軸回転時の非共軸性が大きいことが実験的に示された。これには応力増分方向依存性も含まれることが示された。
- (4) せん断応力履歴による誘導異方性により降伏曲面の形状が初期せん断を受けた方向に異方硬化、移動硬化するこ

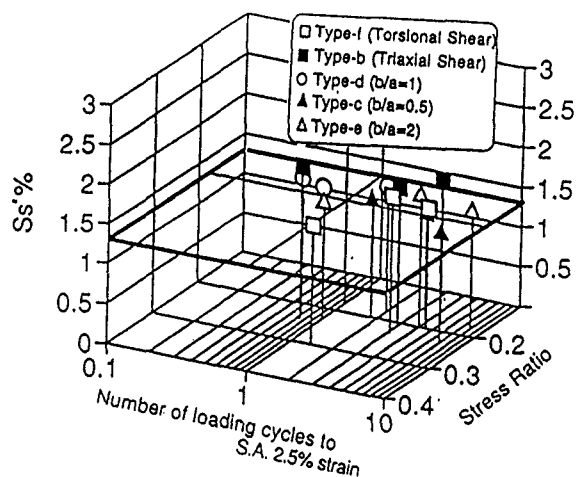


図-5 液状化強度と正規化外部仕事 Ss' 関係

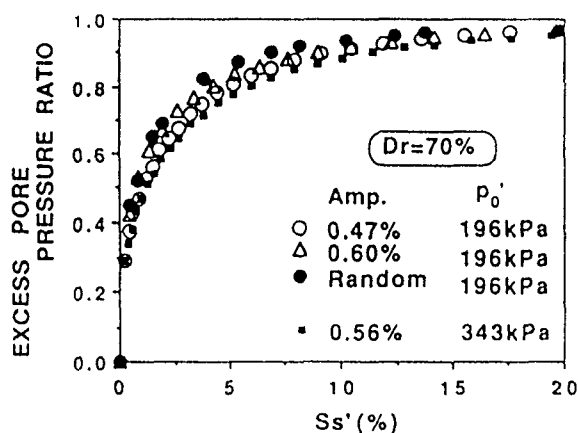


図-6 a 間隙水圧比- Ss' 関係 (三軸せん断試験)

とが示された。

- (5) 非排水繰り返し載荷時の液状化強度特性に関して固有異方性の影響が確認された。
- (6) 液状化強度曲線は固有異方性及び応力経路の影響を受けることが実験的に示された。
- (7) 非排水繰り返し載荷試験における初期液状化発生時の正規化外部仕事 Ss' は異方性や応力経路の影響を受けないことが示され、これが液状化現象をとらえるに当たってなんらかの指標となることが示された。

(8) 以上の実験事実に基づいて外部仕事に着目した考察から、正規化外部仕事 Ss' について、その理論的背景を明らかにし、簡単な排水せん断シミュレーション及び本研究で提案した Ss' -過剰間隙水圧比の双曲線関係を使った三軸要素試験解析をおこなった。

(9) 従来のストレスダイレイタンスー関係において仮定されている共軸性について、実験結果から非共軸性を無視できないことが示され、これに代わる関係として正規化外部仕事 Ss' を用い松岡らの SMP 理論へ応用することによって、排水中空ねじりせん断挙動を表現することができた。

(10) 正規化外部仕事 Ss' と過剰間隙水圧比との間にユニークな双曲線関係を見だし、これが拘束圧、ひずみ経路、応力経路、異方性によらないことを示した。

(11) 正規化外部仕事 Ss' と過剰間隙水圧比との間のユニークな双曲線関係を簡単な構成式へ導入することによって精度良くひずみ制御型排水繰り返し三軸せん断試験結果を要素試験で再現することができ、 Ss' と過剰間隙水圧比との間にユニークな双曲線関係の有用性を示した。

なお、第3章で明らかにされた砂の変形・強度挙動の特微的な性質である固有異方性、非共軸性、応力増分方向依存性を既存の構成式へ導入するための理論的背景については補遺としてとりまとめた。

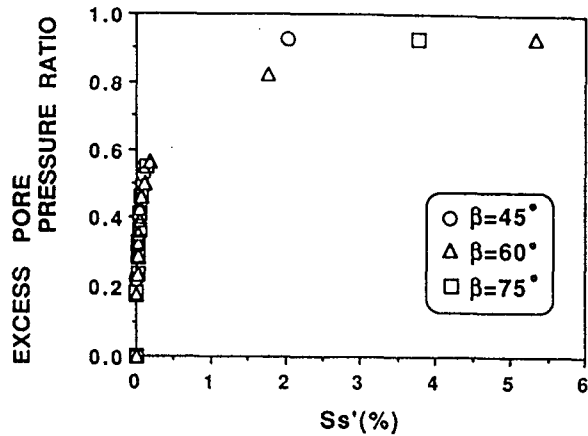


図-6b 間隙水圧比- Ss' 関係
(中空ねじりせん断試験)

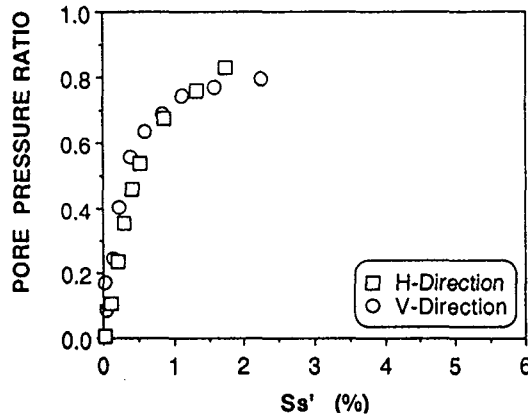


図-6c 間隙水圧比- Ss' 関係
(二方向せん断試験)

審 査 結 果 の 要 旨

強震時における砂地盤の液状化などの動的問題においては主応力軸の回転を伴う複雑な応力状態が取り扱われるが、このような応力状態での砂の変形強度特性やその構成則については、まだ十分には知見が得られていない。本研究は、表面波伝播時の地盤の応力状態を再現できる特殊なせん断試験装置を試作し、自然地盤と同様に異方性をもつ砂供試体について様々な応力経路について排水および非排水試験を行ない、構成則を構築するために必要な、砂の変形強度特性および間隙水圧特性についての基礎的な知見を得たもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、研究の目的を述べている。

第2章では、地盤内での特殊な応力状態を再現するために新たに開発した大型中空ねじりせん断試験装置および二方向せん断試験装置の概要と原理について述べている。載荷装置とその制御方法を説明し、応力やひずみの計測方法とキャリブレーションの方法を述べ、精度の高い実験を行なうための手法について述べている。

第3章では、正規圧密状態および過圧密状態の砂供試体の固有異方性と誘導異方性を調べるために、上記の試験装置を用いて、砂の堆積面に対する主応力軸の方向を様々な変化させて単調載荷および繰り返し載荷試験を排水条件で行なった結果について述べている。これらの結果から、偏差応力面と平均応力の三次元応力空間での降伏関数の形状が、圧縮側にややずれた楕円形状であることを明らかにし、応力履歴に伴う降伏関数の形状変化と移動硬化則を実験的に求めた。これは新しい知見である。

第4章では、非排水時における間隙水圧特性に着目し、三種類の試験機を用いた載荷方法や応力経路の異なる試験結果から、繰り返し載荷時に発生する間隙水圧比が正規化された塑性仕事によって統一的に評価できることを示した。この関係を用いて、各非排水試験の結果について間隙水圧を予測する経験式を提案し、実験結果と比較することによりその精度を確かめている。これは、有用な知見である。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、新たに試作した試験機を用いて様々な応力経路について砂の変形強度特性を求め、排水条件での降伏関数の形状と移動硬化則を実験的に求めるとともに、非排水繰り返し載荷試験における間隙水圧の上昇量が正規化された塑性仕事により統一的に表現できることを明らかにしたものであり、土木工学および土質工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。