

平成21年4月1日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560494

研究課題名（和文） 大変形試験が可能な三軸伸張試験装置の開発

研究課題名（英文） Development of an apparatus for triaxial extension tests in large deformation

研究代表者

吉嶺 充俊（YOSHIMINE MITSUTOSHI）

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：80251338

研究成果の概要：

砂が大変形したときの力学特性は、液状化災害を予測し対策を考える上で非常に重要である。三軸圧縮モードでの砂の大変形特性はこれまでに多くの研究者により実験的に調査されてきたが、通常の三軸せん断試験装置では、三軸伸張モードでの大変形試験が不可能であり、このことが現実の地盤内での一般的な応力・ひずみ条件での砂の液状化特性の解明を妨げてきた。そこで、本研究では供試体の均一性を担保して三軸伸張条件で大変形試験を可能とする新たな試験装置を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土木材料，土質力学，地盤工学

## 1. 研究開始当初の背景

土の変形強度特性は、土の堆積方向に対する主応力角度や中間主応力の大きさによって影響を受けることが知られている。特に非排水条件でのせん断では、せん断時の応力・ひずみ条件によって生じる極わずかなダイレタンシー挙動の違いが過剰間隙水圧の大きさに敏感に影響するため、せん断条件を適切に考慮しないと、現実の地盤の挙動予測を大きく誤る結果となってしまう。たとえば砂地盤の液状化後の流動変形を評価するための非排水三軸せん断試験では、まったく同じ

初期状態の砂の供試体を用いて実験を行っても、三軸圧縮せん断をくわえると正のダイレタンシーによって著しい硬化が生じるのに対して、三軸伸張せん断をくわえると負のダイレタンシーによって大きな過剰間隙水圧が発生して強度ゼロの流動状態に至るといったような現象がしばしば観察される。

土の要素せん断試験で最も一般的に用いられる手法は三軸圧縮試験である。これは供試体を鉛直方向に剛な境界で圧縮し、側方は柔な境界で等方的に伸張させることによって土をせん断する方法である。すなわち、最

大主応力方向は鉛直であり、中間主応力の大きさは最小主応力と等しく保たれ水平となっている条件である。これに対して三軸伸張試験では、三軸圧縮試験とまったく同じ試験機を用いて供試体を鉛直方向に剛な境界で伸張させ、側方は柔な境界で等方的に圧縮させることによって土をせん断する。すなわち、中間主応力の大きさは最大主応力と等しく保たれ水平であり、最小主応力が鉛直となっている条件である。つまり、三軸圧縮条件と三軸伸張条件は、主応力角度と中間主応力の大きさというせん断条件の観点から両極端の試験条件となっている。実際の地盤における土のせん断は両者の中間的な条件で生じるわけであり、実際の地盤のせん断挙動を適切に評価するためには、三軸圧縮条件と三軸伸張条件の両方での挙動を把握することが非常に有意義である。現状ではもっぱら三軸圧縮試験のみが行われているが、一般的に三軸圧縮条件では土は最も強い挙動を示すので、これだけで地盤の挙動を評価することは大変に危険である。

主応力方向条件は土の異方性に関連するものであり、これについては供試体を土の堆積構造に対して様々な角度で成型することによって通常の三軸圧縮試験でも対応することが可能である。しかし、中間主応力条件の影響については、どうしても三軸圧縮試験と三軸伸張試験の両方を用いて調査する必要がある。たとえば、砂の大変形下での定常状態は液状化を評価する上で重要な指標である。砂が大変形すると初期の堆積構造は完全に失われて主応力方向の影響も消失すると考えられるが、砂の定常状態が中間主応力条件の影響を受けるのかどうかについては従来から大きな議論となっているにもかかわらず、問題が解決されていない。

## 2. 研究の目的

三軸伸張試験を行おうとする場合、大きな障害となるのが供試体の変形の不均一性の問題である。三軸試験は円柱供試体の側方をゴム膜という柔な境界を介して水圧で拘束するので、供試体水平断面積の不均一が生じやすい。三軸圧縮試験では、供試体断面の一部が他の部分より小さくなるような不均一が生じて、それに応じて縮小部分の圧縮応力が上昇して鉛直圧縮・水平伸張の変形が進むことにより不均一を解消する変形が発生し安定する。ところが三軸伸張試験では断面の縮小部分が生じると伸張応力が集中するため、ますます鉛直伸張・水平圧縮が進展して断面が縮小し、供試体の不均一変形が急速に進展してしまう。このような事情は、中空ねじりせん断試験機などを用いて供試体の形状や応力制御の自由度を工夫しても同じことである。すなわち、最大主応力方向（圧

縮方向）の拘束境界を柔な境界とすることは本質的に不安定な制御であり、土の要素試験のメカニズムとしては不適切なものであると言える。さりとて、圧縮方向を剛な境界とすると、三軸伸張試験では圧縮方向が水平2方向であるため、供試体の変形によって2つの境界が衝突してしまい、載荷が不可能である。また、境界を単純に剛な載荷板とした場合には、載荷盤と供試体の間に摩擦が生じ、そこに作用する直応力成分が主応力であることの保証がなくなってしまう。

そこで、本研究では、供試体に対して直交する2方向から最大主応力を作用させることのできる載荷板を開発する。そして、この載荷板により最大主応力2方向を拘束し、最小主応力方向は柔な境界で拘束することによって大変形せん断試験が可能な三軸伸張試験機を作成する。そのうえで、砂の非排水せん断試験を実施し、液状化・大変形する砂の定常状態におよぼす中間主応力条件の影響を明らかにする。この研究により1930年代から1980年代にかけて提案されてきた定常状態理論に関する長年の疑問・懸案事項に解答を与えることができ、地盤の液状化災害に関する研究および技術の発展に関して大きく貢献できる。

## 3. 研究の方法

三軸伸張せん断試験装置に用いる特殊な載荷板の設計・製作を実施し、荷重が作用したときの載荷板の摩擦特性等について検証する。また、圧力セル・精密変位制御載荷装置を製作するとともに、付随する荷重・水圧・変位測定装置および空気圧制御測定装置を構築する。そしてあらたに開発した装置を用いて三軸伸張せん断試験の試行を行い、正常な作動および満足すべき性能を満たしているか検証し、必要ならば試験装置の改良を行う。そのうえで、様々な密度、初期拘束圧条件のもとでの砂の非排水三軸伸張せん断試験を実施し、大変形時の定常状態を含むせん断挙動を詳細に調べるとともに、これまでに蓄積してきた三軸圧縮試験や中空ねじりせん断試験データとの比較検討を行うことにより、砂の大変形非排水せん断挙動に及ぼす中間主応力条件の影響を明らかにする。学術雑誌への研究成果の投稿、および各種の研究発表会等での研究発表を行うことにより、研究成果の公表を実施する。

## 4. 研究成果

本研究では、剛な載荷板により最大主応力2方向を拘束し、最小主応力方向は柔な境界で拘束することによって大変形せん断試験が可能な三軸伸張試験機を作成したうえで、砂の非排水せん断試験を実施し、液状化・大変形する砂の定常状態におよぼす中間主応

力条件の影響を明らかにすることを目的としている。当初は互いに重なり自由移動する多数の小さな薄板を独立に支持して全体としては平面性を維持しつつ面内方向には抵抗なく伸縮可能な載荷板を開発することを考えていたが、このような機構をもった載荷板および載荷装置であると装置全体の機構が大変に複雑かつ大型になってしまう。それに伴い、装置の作製と維持管理に多額の経費を有する上に、実験操作が非常に複雑になり、多くの実験を実施することが困難になることが予想された。

そこで詳細に検討の結果、2007年度に、砂の円柱供試体に対してその側面を単一の金属または樹脂製の円筒載荷板によって絞り込むように載荷する機構を新たに考案し、このような機構を有する三軸伸張試験装置を製作した(図1~4)。このような載荷機構では、載荷板の剛性や載荷板と供試体との摩擦によって載荷荷重が影響を受けるが、適切な予備試験によってこれらを十分な精度を持って補正できると判断した。

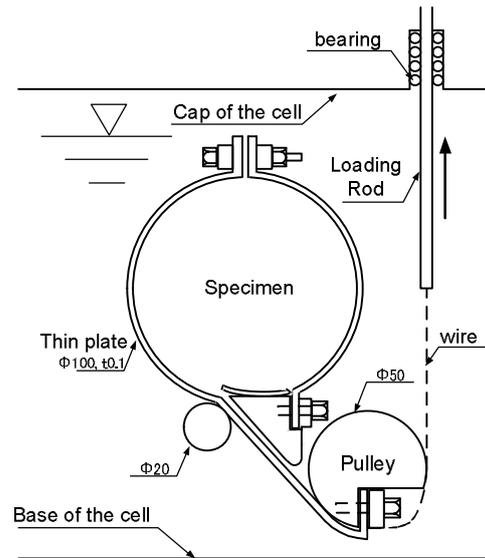


図3 三軸伸張試験供試体への載荷機構

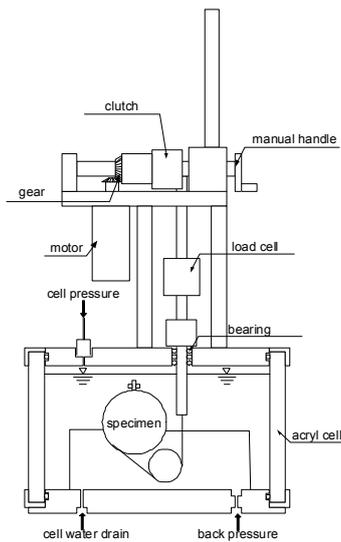


図1 三軸伸張試験装置機構の概要

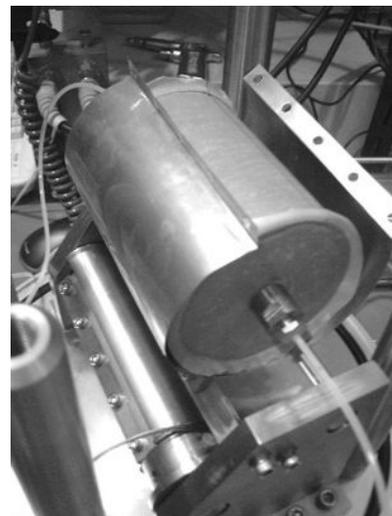


図4 供試体の設置状況

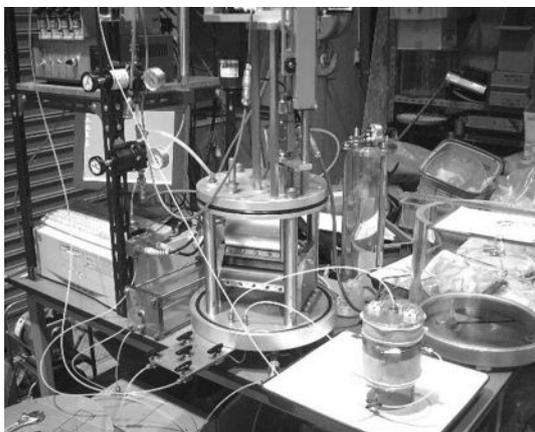


図2 三軸伸張試験装置全体の外観

2008年度には、前年度に作製した三軸伸張試験装置をもちいて豊浦標準砂を用いた非排水単調せん断試験を実施した。その結果、せん断ひずみ50%程度までの大変形試験において、供試体を正しく円柱形に保ったまま変形を継続させて信頼性のある実験が可能であることを確認した。また、通常三軸せん断試験装置による実験結果と小ひずみレベルでのせん断挙動を比較することにより、本研究において製作した試験装置の載荷板摩擦等による実験結果への影響は十分に小さく、応力測定精度は十分に高いことを確認した。ただし、供試体拘束装置の引き上げワイヤーの強度が不足していたので、ワイヤーの柔軟性を失うことなく強度を十分に増大させる結線方法等を工夫し、供試体変形測定システムについてもワイヤー引き上げ変位と

は独立した計測システムを導入することにより、試験装置の改良を行った。供試体を作製するための器具や配管についても改良を加えた。これらの実験装置の開発およびその装置を用いた実験結果より、三軸伸張条件での砂の大変形・定常状態特性は、これまでに知られていた三軸圧縮条件でのものとはほぼ同じであることを示した(図5)。つまり、砂の液化化大変形強度特性は主応力方向や中間主応力の大きさなどといった砂の変形モードによらずに決まることを実証できたといえる。このことは砂地盤の地震時の液化化災害の予測や対策の上で大変に重要な知見である。

さらに、低拘束圧・低せん断抵抗条件での砂の大変形試験を行うために、非常に緩くかつ均一な砂の供試体を作成する方法の開発や、実験に用いる豊浦標準砂の詳細な粒度分布を解明するための実験も実施した。

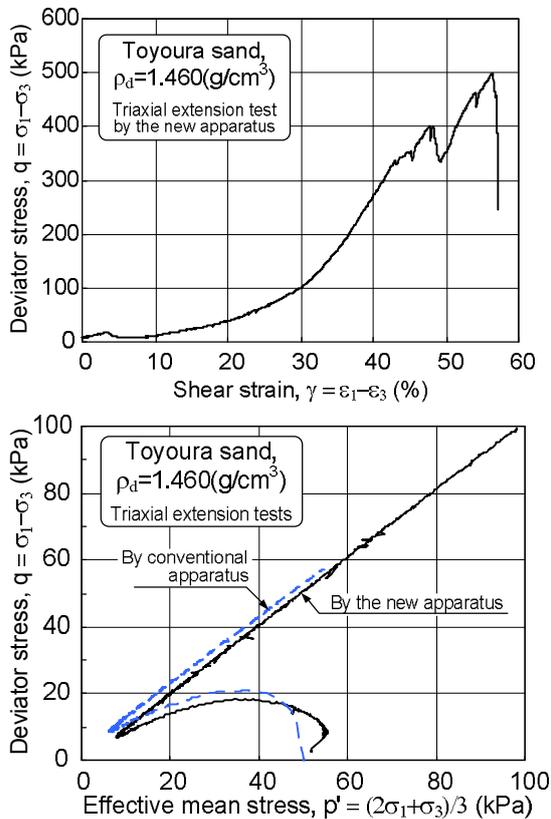


図5 試験結果の一例

これらの研究成果を国内学術会議および国際学術会議における4編の論文にまとめて報告したほか、本年夏に開催予定の第44回地盤工学研究発表会、および土木学会第64回年次学術講演会に投稿した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計4件)

① K.Endo, M.Yoshimine, Development of an apparatus for evaluating steady state of sand in triaxial extension condition, Proceedings of the 3rd Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall (ISBN 978-957-29749-1-9), Keelung, Taiwan, October 31 - November 3, pp. 489-494, 2008, 査読有.

② 吉嶺充俊・福永純平, 微湿潤堆積法による非常に緩い砂の供試体作成, 第43回地盤工学研究発表会, pp. 355-356, 2008, 査読無.

③ Yoshimine, M. and Kataoka, M., Steady state of sand in triaxial extension test, Earthquake Hazards and Mitigation, I.K. International Publishing House Pvt. Ltd. (ISBN:978-81-89866-77-8), Edited by R. Ayothiraman and H. Hazarika (Proceedings of the International Workshop on Earthquake Hazards and Mitigation: EHAM-2007, Assam, India, December 5-8, 2007.) pp. 431-438, 2007, 査読有.

④ 吉嶺充俊・片岡宗大, 三軸伸張条件での砂の定常状態, 第42回地盤工学研究発表会, pp. 387-388, 2007, 査読無.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉嶺 充俊 (YOSHIMINE MITSUTOSHI)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授  
研究者番号: 80251338

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし