

# 伸張領域における飽和砂のせん断特性\*

常 田 亮\*\*

## 1. はじめに

日本における砂質土の液状化の研究は、1964年に発生した新潟地震を契機にして活発に行われるようになってきた。これらの液状化に関する研究の多さからもわかるように、砂質地盤の液状化現象は、土木工学的に重要な意味を持っていると考えられる。

現在まで行われてきた室内実験のうち静的な試験は、初期拘束圧が $\sigma_0=1.0\text{kgf/cm}^2$ 以上の高拘束圧条件で行われることが多かった。しかし、実際の現場においては、有効拘束圧( $\sigma'_v$ )が $1.0\text{kgf/cm}^2$ 以下であるような浅い地盤が対象となることが多い。また、実際の地盤の受けるせん断力としては、圧縮及び伸張の両せん断条件が考えられる。このような条件を考慮した研究は、龍岡<sup>(1)</sup>、西(好)<sup>(2)</sup>、山内・落合<sup>(3)</sup>らによって行われているが、ほとんどの場合、高拘束圧条件 ( $\sigma_0>1.0\text{kgf/cm}^2$ ) のもとで行われたものである。

本報告では、特に低拘束圧条件における伸張領域の飽和砂のせん断特性を解明するために、拘束圧( $\sigma_0$ )が $1.0\text{kgf/cm}^2$ 以下の低拘束圧領域を中心に、拘束圧一定圧密排水試験(CD-TEST)及び圧密非排水試験(CU-TEST)を行った結果について述べる。

## 2. 試料及び試験方法

試験に用いた砂は、新潟県黒崎町・上越新幹線沿線の砂 ( $G_s=2.674$ ,  $e_{\max}=1.020$ ,  $e_{\min}=0.645$ ) である。供試体の作成方法としては、気乾状態の砂を直径5cm、高さ10cmのモールドに入れ、所定の密度となるようにモールドの周囲に振動を加えて締固める方法を採用した。

試験は、供試体の初期間隙比( $e_0$ )を $e_0=0.85$ ,  $e_0=0.79$ ,  $e_0=0.73$ の三段階に変化させ、初期拘束圧( $\sigma_0$ )を $\sigma_0=0.2$ ,  $0.5$ ,  $1.0\text{kgf/cm}^2$ の三種類に変化させて等方圧密を行い、排水及び非排水の各々の条件について、軸力をヒズミ制御で低下させる方法で行った。

## 3. 伸張領域における排水せん断結果

排水せん断時の応力比( $q/p$ )と軸ヒズミ( $\epsilon_a$ )の関係は、図-1に示すように、初期拘束圧が同じである場合、初期間隙比( $e_0$ )が小さいほど、すなわち密である

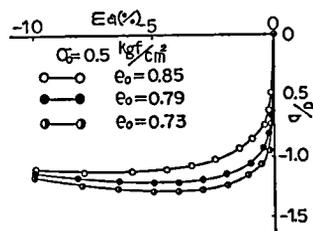


図1  $q/p-\epsilon_a$ の関係

\* 昭和58年6月 第18回土質工学研究発表会において発表

\*\* 土木工学科 助手

原稿受付 昭和58年9月27日

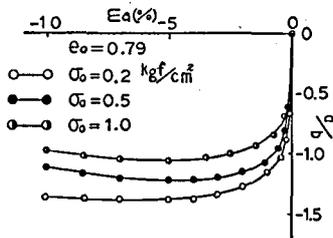


図2  $q/p - \epsilon_a$  の関係

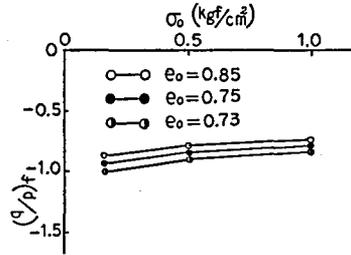


図3  $(q/p)f - \sigma_0$  の関係

ほど初期勾配が大きくなる。一方、初期間隙比が同じである場合は、図-2に示すように、初期拘束圧が低いほど初期勾配が大きい傾向が見られる。図-3及び図-4は、破壊時の応力比  $(q/p)f$  と初期拘束圧  $(\sigma_0)$  及び初期間隙比  $(\epsilon_0)$  との関係を示したものである。ここで言うところの破壊時の応力比  $(q/p)f$  は、各々の初期間隙比におけるモールの応力円より求めた破壊時のせん断力  $(\tau)f$  に対応する応力比を用いている。図からも明らかのように、破壊時の応力比  $(q/p)f$  は、初期拘束圧  $(\sigma_0)$  が大きくなるにしたがって小さな値を示し、また、初期間隙比  $(\epsilon_0)$  が大きくなるにしたがって、すなわちゆる詰めであるほど小さな値を示している。

軸ヒズミの変化に伴う体積ヒズミ  $(\epsilon_v)$  の変化は、図-5及び図-6に示すとおりである。せん断に伴う体積圧縮量は、初期間隙比及び初期拘束圧が大きいほど多くなる傾向がある。さらに、最大圧縮体積ヒズミ  $(\epsilon_v)_{min}$  と初期拘束圧及び初期間隙比の関係をみると、各々の初期間隙比において、初期拘束圧が大きい場合ほど体積圧縮量は多くなるとともに、初期間隙比が  $\epsilon_0 = 0.79$  よりも大きくなると急激に体積圧縮量が増大することが明らかとなった。(図-7及び図-8を参照) また、破壊時の体積ヒズミ(破壊時の応力比に対応する体積ヒズミ)  $(\epsilon_v)f$  と初期拘束圧及び初期間隙比の関係においても同様の傾向がみられる。(図-9及び図-10を参照)

さらに、破壊時の体積ヒズミ  $(\epsilon_v)$  よりも最大圧縮体積ヒズミ  $(\epsilon_v)_{min}$  の方が大きな値を示す傾向がある。

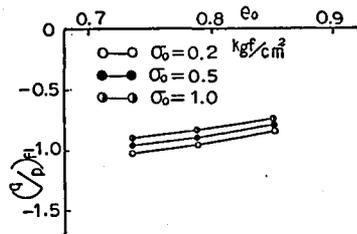


図4  $(q/p)f - \epsilon_0$  の関係

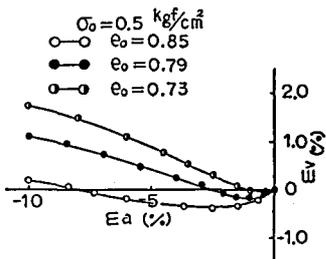


図5  $\epsilon_v - \epsilon_a$  の関係

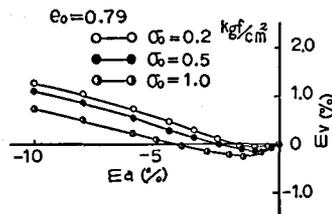


図6  $\epsilon_v - \epsilon_a$  の関係

以上のことから、体積圧縮量が非排水条件下における間隙水圧の上昇に相当するならば、初期間隙比及び初期拘束圧が大きいほど有効応力の低下が著しいと考えられる。すなわち、密度が小さいほど（ゆる詰めであるほど）あるいは地盤深度が大きいほど、液状化の可能性が高いと考えられる。

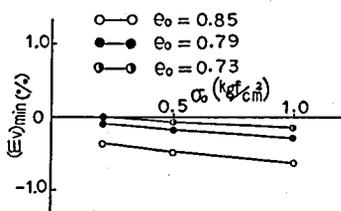


図7  $(\epsilon_v)_{\min}-\sigma_0$  の関係

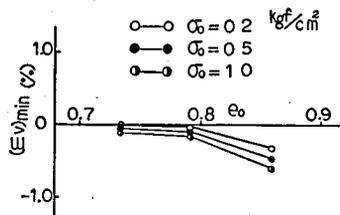


図8  $(\epsilon_v)_{\min}-e_0$  の関係

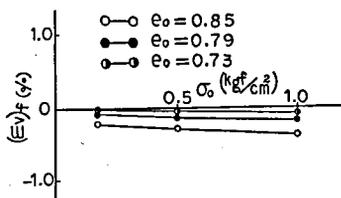


図9  $(\epsilon_v)f-\sigma_0$  の関係

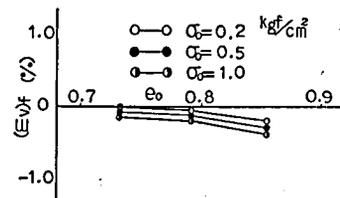


図10  $(\epsilon_v)f-\sigma_0$  の関係

#### 4. 伸張領域における非排水せん断結果

非排水せん断時の応力比 ( $q'/p'$ ) と軸ヒズミ ( $\epsilon_a$ ) の関係は、図-11及び図-12に示すように、初期拘束圧が一定であれば初期間隙比が小さいほど（密であるほど）せん断初期の勾配が大きくなる。また、初期間隙比が一定である場合、初期拘束圧が小さいほど初期勾配が大きくなる。この傾向は、排水せん断時の応力比と軸ヒズミの関係とよく対応している。しかし、初期拘束圧が一定である場合、 $e_0=0.85$  のとき応力比の低下が最も著しくなるという傾向がみられた。また、排水せん断時と同様にして求めた破壊時の応力比 ( $q'/p'$ ) $f$  と初期拘束圧及び初期間隙比の関係は、図-13及び図-14から明らかなように、初期拘束圧が大きくなるにしたがって応力比 ( $q'/p'$ ) $f$  は小さな値を示す傾向がある。また、初期間隙比によ

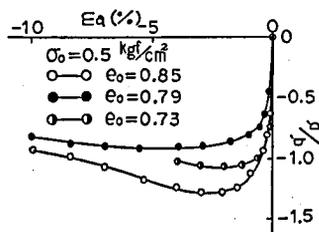


図11  $q'/p'-\epsilon_a$  の関係

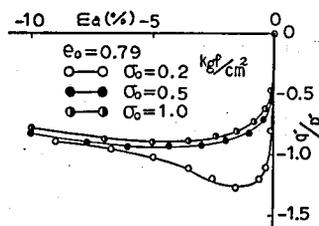


図12  $q'/p'-\epsilon_a$  の関係

る影響は、あまり明確に現われていない。

一方、セン断に伴う間隙水圧 ( $\Delta u$ ) と軸ヒズミ ( $\epsilon_a$ ) の関係は、排水セン断試験における体積ヒズミ ( $\epsilon_v$ ) の変化と同様に、初期拘束圧及び初期間隙比が大きいほど上昇が著しくなっている。(図-15及び図-16参照)

さらに、最大間隙水圧 ( $\Delta u$ )<sub>max</sub> と初期拘束圧及び初期間隙比の関係より、最大間隙水圧は初期拘束圧及び初期間隙比に比例して増大することが明らかである。(図-17及び図-18

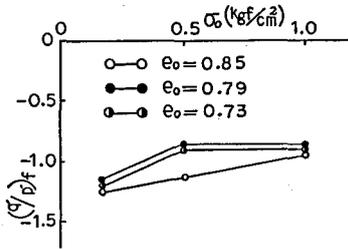


図13  $(q'/p')f-\sigma_0$  の関係

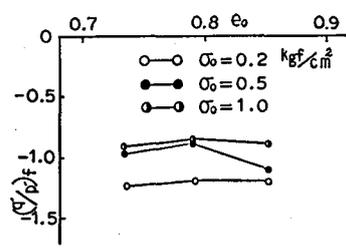


図14  $(q'/p')f-\sigma_0$  の関係

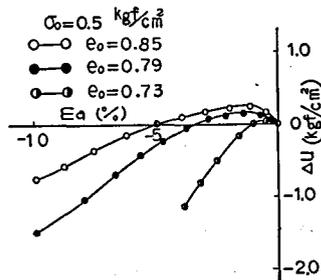


図15  $\Delta u-\epsilon_a$  の関係

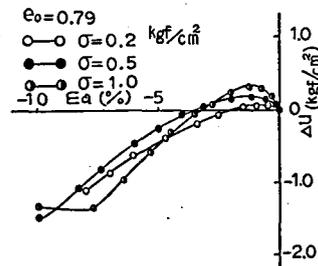


図16  $\Delta u-\epsilon_a$  の関係

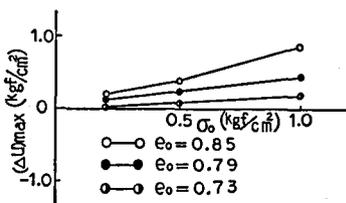


図17  $(\Delta u)_{\max}-\sigma_0$  の関係

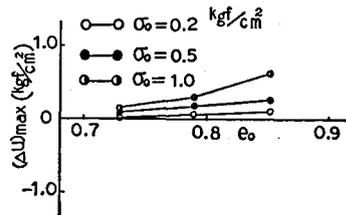


図18  $(\Delta u)_{\max}-e_0$  の関係

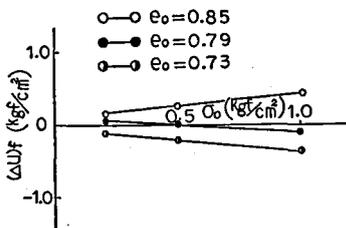


図19  $(\Delta u)f-\sigma_0$  の関係

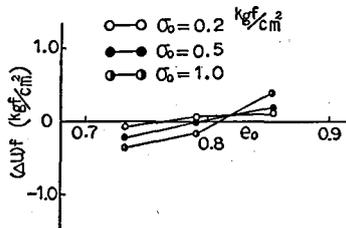


図20  $(\Delta u)f-e_0$  の関係

参照)

この現象は、前に述べた排水セン断試験における体積ヒズミの示す現象と同一であると考えられる。また、破壊時の間隙水圧  $(\Delta u)_f$  (破壊時の応力比に対応する間隙水圧) は、初期拘束圧の増加に伴って、初期間隙比  $e_0=0.79$  よりも小さい領域では負の範囲で大きくなり、 $e_0=0.79$  よりも大きい領域では正の範囲で大きくなる傾向を持っている。(図-19及び図-20を参照)

この現象は、非排水セン断における破壊が、密度が大きくなることにしたがって、膨張領域で発生することを示している。また、排水セン断試験において、破壊が常に圧縮領域で発生していたことと大いに異なる傾向であると言える。

以上の点から、排水セン断と非排水セン断では、およその傾向は類似しているが、細かい点で異なっていると考えられる。

### 5. 圧縮及び伸張領域における飽和砂のセン断挙動

#### 5-1 排水セン断時の挙動

図-21に示すように、微小ヒズミの範囲における飽和砂のセン断抵抗は、圧縮及び伸張の両セン断領域とも、初期間隙比が一定であるならば初期拘束圧が小さいほど大きくなる傾向がある。また、初期拘束圧が一定である場合、圧縮領域においても伸張領域と同様に、初期間隙比が小さいほどセン断抵抗は大きくなる傾向がある。(図-1参照)

一方、セン断に伴う体積ヒズミの変化は、図-22に示すように、どちらのセン断領域においてもセン断初期に体積圧縮が生じ、初期間隙比が一定のときは初期拘束圧が大きいほど圧縮量が多くなる傾向がある。また、初期拘束圧が一定であるときの圧縮領域における体積ヒズミの変化は、伸張領域の変化と同様に初期拘束圧が大きくなるにしたがって、圧縮量が多くなる。(図-5参照)さらに、伸張領域における体積変化の方が圧縮領域における体積変化に比べて、膨張に移行する時期が早い傾向がある。

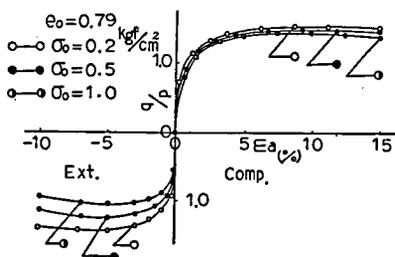


図21  $q/p-\varepsilon_a$  の関係

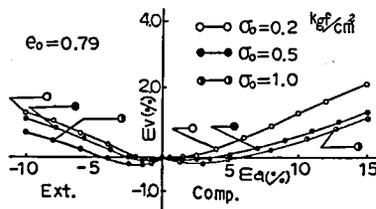


図22  $\varepsilon_v-\varepsilon_a$  の関係

#### 5-2 非排水セン断時の挙動

龍岡、西(好)らの求めた高拘束圧条件下における応力径路と低拘束圧条件下における応力径路を比較すると、低拘束圧条件下における応力径路では、圧縮及び伸張の両セン断領域において平均主応力  $(p')$  の低下が少ない傾向がある。また、微小変形領域におけるセン断抵抗は、

図-23にあるように、初期拘束圧が小さいときほど大きくなり、初期拘束圧が一定である場合、圧縮領域においても図-11にある伸張領域の傾向と同様に、初期間隙比が小さいほどセン断抵抗は大きくなる。また、間隙水圧の変化については、図-24に示すように、両セン断領域においても初期拘束圧が高いほどセン断初期における間隙水圧の上昇が著しいことが明らかである。一方、圧縮セン断領域において、セン断が膨張領域に入ると間隙水圧は初期拘束圧の大きさに無関係に、ほぼ一定の割合で低下する傾向があるのに対して、伸張セン断領域における間隙水圧の変化は、膨張領域に入ると初期拘束圧が大きいほど低下が著しくなる傾向がある。初期拘束圧が一定であるときの圧縮セン断領域の間隙水圧の変化は、図-15に示してある伸張領域における間隙水圧の変化と同様に、初期間隙比が大きいほど（ゆる詰めであるほど）セン断初期の上昇が著しくなる傾向を持っている。

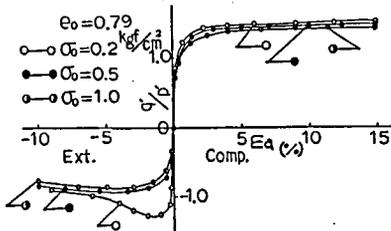


図23  $q'/p' - \epsilon_a$  の関係

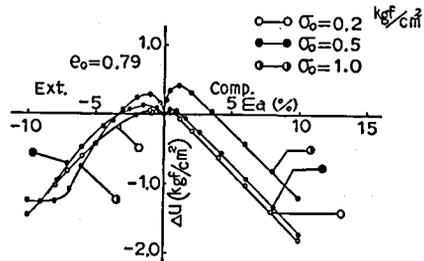


図24  $\Delta u - \epsilon_a$  の関係

### 6. 圧縮及び伸張領域における臨界間隙比

今までに述べてきた飽和砂の圧縮及び伸張セン断領域におけるセン断特性から、液状化の可能性を判定する方法としては、臨界間隙化 (ecrit) 用をいる方法が有効である。臨界間隙比 (ecrit) とは、セン断試験を行ったときに体積変化又は間隙水圧の上昇が生じない状態のときの空隙比を指す。臨界間隙比 (ecrit) の定義と求め方は、A. Casagrande の方法<sup>(4)</sup>、D.W. Taylor の方法<sup>(5)</sup>、小川・大村の方法<sup>(6)</sup> などがあるが、本報告においては軸ヒズミごとに臨界間隙比を定義する小川・大村の方法を用いた。小川・大村の定義より求めた臨界間隙比と軸ヒズミの関係は、図-25に示すとおりである。両セン断領域とも軸ヒズミ ( $\epsilon_a$ ) が大きくなるにしたがって、臨界間隙比 (ecrit) は大きくなる。また、初期拘束圧が大きいほど臨界間隙比は、小さな値を示している。一方、軸ヒズミが1%以下の範囲では、伸張領域における ecrit の方が圧縮領域における ecrit よりも大きな値を示している。

以上のように、静的試験より求めた臨界間隙比より液状化の判定を行うとすれば、低拘束圧領域である浅い地盤では、かなり空隙比が大きな状態で液状化が発生することが予測されるとともに、微小変形

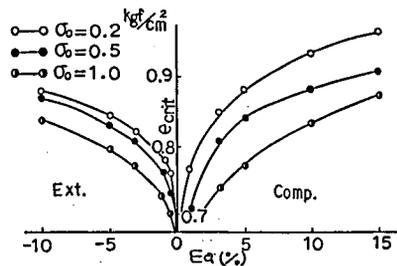


図25  $ecrit - \epsilon_a$  の関係

領域ではかなり間隙比が小さい状態（密な状態）でも液状化が発生する可能性が十分であると考えられる。

## 7. む す び

低拘束圧条件のもとで行った静的三軸圧縮及び伸張試験の結果について述べたが、せん断条件の相違によるせん断特性の違いは、基本的な特性においては見られないものの、細かな点において見られた。今後この相違点についての究明が必要であろう。

また、今回使用した試験装置の構造上、伸張領域におけるヒズミ速度の制御が非常に難しく、微小ヒズミの範囲におけるせん断特性の挙動について詳しいデータを得ることができなかった。さらに、静的試験における臨界間隙比の概念と液状化の関係を明確にするには、繰り返し載荷試験における臨界間隙比について究明する必要がある。

## 8. 参 考 文 献

- (1) 龍岡文夫 “砂の三軸圧縮・伸張試験～主として応力径路に関して” 第20回土質工学シンポジウム (1975)
- (2) 西 好一 “非排水繰り返し荷重における飽和砂の弾・塑性挙動と構成式” 土木学会論文報告集(1982)
- (3) 山内豊聡, 落合英俊 “三軸圧縮および伸張による砂質土のせん断特性について” 第4回土質工学研究発表会 (1969)
- (4) A. Casagrande “Liquefaction and Cyclic Deformation of Sand” Harvard Soil Mechanics No. 88
- (5) D.W. Taylor “Fundamentals of Soil Mechanics”
- (6) 小川正二, 大村厚夫 “砂の臨界間隙比に関する一考察” 土木学会 第34回年次学術講演会概要集 (1979)