飽和砂の液状化特性に及ぼす異方圧密履歴の影響

(Effect of Anisotropic Consolidation History on Triaxial Liquefaction Characteristics of Saturated Sand)

山 下 聡ⁱ⁾ (Satoshi Yamashita)
土 岐 祥 介ⁱⁱ⁾ (Shosuke Toki)
三 浦 清 一ⁱⁱⁱ⁾ (Seiichi Miura)

キーワード：圧密／異方性／液状化／応力経路／
(応力履歴)／過圧密／間隙圧／繰返し荷重／砂／変
形 (IGC : D 7)

1. ま え が き

砂地盤の液状化強度を評価する試験として、非排水繰返し三軸試験が広く用いられている。しかし、この試験は等方圧密した供試体に対する軸対称三軸試験であるため、実地盤との対応を考えると不都合な点が多いとされている。すなわち、実際の地盤内においては、水平方向と鉛直方向の応力が異なる異方的な圧密状態にあり、試験時の土要素の応力状態とは異なっている。したがって、本試験は地震時における地盤内の応力変形条件を厳密には再現できない。このように、非排水繰返し三軸試験は実際の地盤の液状化特性を与えるものではないが、実務面においては、その試験法自身の簡明さもあって一つの指標試験としての有効性が期待されているところである。実務的立場ばかりでなく、土質動力学の分野において更に本試験法の価値を確立していくためには、その試験結果に及ぼす諸要因が明確な形で議論され、定量化されていることが必要であろう。

これまで、非排水繰返し三軸試験結果に影響を及ぼす諸要因について種々の研究^{1)~5)}が行われている。例えば応力履歴の影響に関する Finn^ら³⁾の研究は、飽和砂の三軸液状化特性には以前に受けた応力履歴の影響が大であることを示し、ある大きさ以上の応力履歴を受けることにより、砂の液状化強度が減少することを明らかにした。また、Seed^ら⁴⁾は、小さな繰返し応力を与えると砂の液状化強度が増加することを示した。その後、鈴木^ら⁵⁾はせん断履歴の与え方によって、三軸液状化強度が多様な形で変化することを示した。しかし、重要な影響因子の

一つであると思われる、異方圧密履歴が非排水繰返し三軸特性に及ぼす影響を詳細に調べた研究は少ないようである。そこで本研究では、原位置の異方的な圧密状態および不攪乱試料のサンプリングから試験に至る過程において試料が受ける様々な応力・変形履歴を、圧密中に種々の異方圧密履歴を与えることによってシミュレートし、異方圧密履歴が非排水繰返し三軸試験結果に及ぼす影響を詳細に調べた。以下、得られた結果について報告するものである。

2. 試 験 方 法

2.1 試料および供試体作製法

用いた試料は水洗いした後、炉乾燥した豊浦標準砂 ($G_s=2.645$, $D_{50}=0.18$ mm, $U_c=1.50$, $F_c(\leq 74\mu\text{m})=0\%$) で、土質工学会基準による最大・最小間隙比は、それぞれ $e_{\max}=0.991$, $e_{\min}=0.623$ である。

供試体は、多重ふるい落下法 (MSP 法)⁶⁾によって作製した。この方法によって作製した供試体は、砂粒子の長軸が供試体鉛直断面において水平方向に卓越配列し、水平断面においてランダムな粒子配列を持った、自然堆積砂地盤と類似の初期構造異方性を有している。また、供試体は鉛直方向よりも水平方向に圧縮しやすく膨張しにくいという力学特性を有していることが認められている⁷⁾。

試験に用いた供試体は、直径 $D=70$ mm, 高さ $H=170$ mm の円柱供試体で、圧密完了時である図-1 中の C 点 ($\sigma'_c=98$ kPa) での相対密度 $D_{r,c}$ を $80\pm 3\%$ の範囲に収まるように供試体作製時の相対密度 D_r を調整した。

2.2 試 験 装 置

用いた繰返し三軸試験装置は、空気圧制御方式によるもので、ファンクションジェネレータによって発生した電気信号を E/P 変換器によって空気圧に変換し、エアシリンダー式のアクチュエータに送り込むことによって、所定の繰返し荷重を与えることができる。軸荷重は三軸室内に取り付けたロードセル、軸変位はダイヤルゲ

i) 北海道大学工学部土木工学科 助手 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
ii) 北海道大学工学部土木工学科 教授
iii) 室蘭工業大学工学部土木工学科 助教授
(1987. 10. 5 原稿受付・討議期限 1989. 4. 1, 要請があれば 1 か月の期限延長可能)

表-1 圧密方法

圧密経路名	圧密経路	異方圧密時の主応力比 $K()$ 内は等方圧密
IC-経路	O→A →C	(1.0)
CK-経路	CKB-経路	O→A →B', (B)→A→C
	CKC-経路	O→A →C', (C)→A→C
	CKD-経路	O→A →D', (D)→A→C
IP-経路	IPB-経路	O→A→B→B' →B→C
	IPC-経路	O→A→C→C' →C
圧密時間(分)	15→15→30 →15→30	

ージにより、側圧および間隙水圧は圧力変換器によりそれぞれ連続的に測定されている。

またキャップおよびベDESTALは、中央部のポーラスストーン ($\phi=10\text{mm}$) 部を除いて、よく仕上げた平滑な端面となっている²⁾。

2.3 試験方法

図-1 および表-1 に示す試験手順に従って、種々の異方圧密履歴を与えた供試体に非排水繰返し三軸試験を行った。すなわち、供試体作製後、拘束圧 $\sigma_c'=19.6\text{kPa}$ のもとで CO_2 を 15 分間、脱気水を供試体体積の 2 倍程度通して飽和させ、その後 196kPa のバックプレッシャー ($\sigma_c'=9.8\text{kPa}$) を供給している。この状態 (図-1 の A 点) で 15 分間圧密を行い、この間常に供試体が等方圧密状態となるように細心の注意を払っている。種々の異方圧密履歴は、次に示す経路で与えた。

図-1 圧密時の応力経路

(1) CK (CKB, CKC, CKD)-経路

有効拘束圧 $\sigma_c'=9.8\text{kPa}$ (B. P. = 196kPa) である A 点の等方状態から、所定の主応力比 $K(=\sigma_r'/\sigma_a', \sigma_r':$ 側方向有効応力, $\sigma_a':$ 軸方向有効応力) を一定に保ち B' 点 ($p_{B'}=49\text{kPa}$, CKB-経路), C' 点 ($p_{C'}=98\text{kPa}$, CKC-経路) または D' 点 ($p_{D'}=196\text{kPa}$, CKD-経路) まで異方圧密を行い、再び同じ経路を A 点の等方状態まで戻した後、C 点 ($p_C=\sigma_c'=98\text{kPa}$) で等方圧密を行う経路。ここで、圧密中の体積変化に対してはメンブレン貫入の補正³⁾を施し、断面補正をして常に所定の主応力比 K が得られるように異方圧密を行っている。なお、図-1 中の q, p' はそれぞれせん断応力 ($=|\sigma_a' - \sigma_r'|$), 平均有効主応力 ($=(\sigma_a' + 2\sigma_r')/3$) である。

(2) IP (IPB, IPC)-経路

A 点から等方状態の B 点 ($p_B=49\text{kPa}$, IPB-経路) または C 点 ($p_C=98\text{kPa}$, IPC-経路) まで等方圧密を行った後、平均有効主応力 p' を一定に保ちながら所定の主応力比 K が得られる B' 点または C' 点まで排水条件でせん断を行い、再び平均有効主応力 p' を一定に保ったまま B 点または C 点の等方状態に戻した後、C 点で等方圧密を行う経路。

上記の 2 種の経路によって供試体に異方圧密履歴を与え、非排水繰返し三軸試験を行った。

自然堆積地盤は、一般に K_0 条件で異方的に圧密され

図-2 ブロックサンプリング時の応力変化の模式図

図-3 異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響 (a) CKC-経路, (b) CKB-経路, (c) CKD-経路

ていることはよく知られている。また、不攪乱試料を用いて試験を行う場合、土要素は地下水位の変動や上載圧の除去による種々の異方圧密履歴を受けていることを考

慮に入れるべきである。更に、供試体のセット時においても、種々の応力（ひずみ）履歴を受けることが予想される。本試験で採用した CK-経路は、砂地盤からプロ

ックサンプリング法によって不攪乱試料を採取して試験を行う場合を対象として、試料の応力状態の変化を近似的に再現したものである。すなわち、図-2 に示すように原位置において点 a の状態にある土要素はサンプリング時に応力解放を受けた後、試験時に点 b まで等方圧密される。このような異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を調べるために、CK-経路で種々の主応力比 K 、平均有効主応力 p' で供試体に異方圧密履歴を与え、液状化強度に及ぼす影響を検討している。

一方、IP-経路は、応力経路の相違が液状化強度に及ぼす影響を調べるために用いた経路である。なお、異方圧密時の主応力比 K 、圧密経路および圧密時間の詳細を表-1 に示している。

非排水繰返し三軸試験は、振幅一定、載荷周波数 $f=0.1\text{Hz}$ の正弦波で、圧縮側から始まる繰返し応力を与えることによって行った。試験結果は、通常の正規化した繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ (σ_d =片振幅繰返し軸応力) と所定の両振幅軸ひずみ DA に達するまでの載荷回数 N_c との関係で示している。

3. 試験結果および考察

3.1 異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響

図-3(a) は、異方圧密時の最大平均有効主応力 $p'_{\max}=98\text{kPa}$ で異方圧密履歴を与えた CKC-経路について、繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ と、両振幅軸ひずみ DA が 2% および 5% に達するまでの載荷回数 N_c との関係を、異方圧密時の主応力比 K で比較したものである。図から明らかなように、異方圧密時の主応力比 K の違いによる液状化強度の変化が認められる。すなわち、 K が 1.0 (等方圧密) 以上の伸張条件の異方圧密履歴を与えると、 K の増加に従って液状化強度が増加している。しかし、 K が 1.0 以下の圧縮条件の異方圧密履歴を与えた場合には、等方圧密した供試体の液状化強度との相違は認められない。

一方、図-3(b) は、異方圧密時の最大平均有効主応力 $p'_{\max}$ が圧密終了時の平均有効主応力 p_c' の 1/2 である 49kPa で異方圧密を行った CKB-経路について、図-3(a) と同様な関係を示したものである。この経路においても、供試体に伸張条件の異方圧密履歴を与えた $K=2.0$ の液状化強度は、 $K=1.0$ の等方圧密を行った場合のそれよりも高いが、 $K=0.5$ の圧縮条件の異方圧密履歴を与えた場合は、 $K=1.0$ の液状化強度との差は認められない。このことから、履歴中に受けた最大圧密圧力が繰返し載荷時の拘束圧より小さくても、その圧密履歴が伸張条件の異方圧密履歴であれば、その後の液状化強度に顕著な影響を及ぼすことになると言える。

山田ら⁹⁾ は、供試体作製時に不用意な伸張履歴を与え

ると、たとえ試験時の等方圧密圧力より低い圧力のもとであっても、その後の液状化特性に及ぼす影響は無視できないとしている。これらのことは、低い拘束圧の下での異方的な圧密履歴、特に伸張履歴は、その後に更に高い圧力で圧密を行っても決して消滅するものではないことを示している。

図-3(c) は、異方圧密履歴過程での最大平均有効主応力 $p'_{\max}$ が、圧密終了時の 2 倍の異方圧密履歴 (すなわち異方過圧密履歴、CKD-経路) を受けた供試体について、同様な関係を示したものである。この図においても、等方過圧密履歴のみを受けた $K=1.0$ に比べ、圧縮条件の異方過圧密履歴を受けた場合には、 $K=1.0$ との差は認められないが、伸張条件の異方過圧密履歴を受けると液状化強度は増加している。このように、圧縮条件の異方圧密履歴を受けた場合には等方圧密履歴のみを受けた供試体の液状化強度との変化は認められないが、伸張条件の異方圧密時の主応力比が大きいほど、等方圧密履歴のみを受けた供試体よりも液状化強度が増加する傾向が認められた。

ここで、伸張条件の異方圧密履歴のみによって液状化強度が増加するのは、本研究で用いた供試体は MSP 法で作製されているため、供試体の鉛直方向に圧縮しにくく膨張しやすいという力学特性を有していることに起因するものである⁷⁾。このような粒子配列構造を持つ供試体⁷⁾ に伸張条件の異方圧密履歴を与えると等方性供試体と比べて初期構造が変化しやすく、伸張応力条件に対する剛性が高くなると考えられる。このことを反映して、等方圧密のみを与えた供試体よりも繰返し載荷時に伸張方向に変形しにくくなり、上述のような傾向が認められたものと言える^{注1)}。したがって、MSP 法で作製した供試体と異なる初期構造を持つ供試体に異方圧密履歴を与えた場合には、異なる試験結果が得られることも考えられる。

3.2 液状化強度に及ぼす異方圧密時の最大圧密圧力の影響

これまで、異方圧密時の主応力比 K による液状化強度の変化について述べたが、ここでは、異方圧密履歴中に与えた最大の平均有効主応力 $p'_{\max}$ の相違による液状化強度の変化に着目してみよう。

図-4(a), (b), (c) は、それぞれ異方圧密時の主応力比 K が同じであるが、最大平均有効主応力 $p'_{\max}$ が異なる場合の液状化強度の変化を、繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$

注 1) 伸張条件の異方圧密履歴によって液状化強度が変化した他の要因として、本研究で用いた、繰返し載荷振幅一定、側圧一定非排水繰返し三軸試験は、繰返し載荷の圧縮載荷時よりも伸張載荷時で動員される摩擦角が大きくなり、その破壊は伸張応力に大きく支配される試験であるので、得られる液状化特性は伸張条件の異方圧密履歴に非常に敏感であることも挙げられる。

図-4 異方圧密時（履歴過程中）の最大平均有効主応力が液状化強度に及ぼす影響 (a) $K=1.0$, (b) $K=0.5$, (c) $K=2.0$

と両振幅軸ひずみ DA が 5% に達するまでの載荷回数 N_c との関係で示したものである。

図-4 (a) は、 $K=1.0$ の等方圧密のみを行った CKB, CKC, CKD-経路について示したものである。ここで、 $K=1.0$ のケースでは、等方圧密—除荷—圧密という過程を経ている。また、比較のために除荷過程のない IC-

経路 (O $\rightarrow$ A $\rightarrow$ C 経路) の試験結果についても示している。この図において、各経路による差を見ると CKD-経路が他の経路よりも液状化強度が高くなっているが、他の経路の間では液状化強度に差は認められないことがわかる。ここで、CKD-経路にのみ液状化強度の増加が認められるのは、この経路では、 $OCR(=p_d'/p_c')=2$ の過圧密履歴を受けているためと考えられる。中空ねじり試験機を用いた、Ishihara らの研究¹⁰⁾ によれば、等方的な過圧密履歴を受けると、緩い砂の液状化強度は OCR の平方根に比例するとしている。また、空中落下法や同じく MSP 法で作製した供試体に非排水繰返し三軸試験を行った加藤ら¹¹⁾ や青野ら¹²⁾ によれば、等方的な過圧密履歴を与えると液状化強度は増加し、液状化強度線は上方にほぼ平行に移動するとしており、本研究においても同様な結果となっている。以上の事実から、繰返し載荷時の拘束圧が以前に受けた圧密圧力と同じかあるいは大きく、かつその圧密履歴が等方圧密履歴のみである場合には、液状化強度に変化は生じないことがわかる。

図-4 (b) は、同様な関係を異方圧密時の主応力比 K が 0.5 の場合について示したものである。CKB-経路と CKC-経路との間には、異方圧密時の圧密圧力による強度差は認められず、図中に破線で示した $K=1.0$ (図-4 (a) の $OCR=1.0$) の等方圧密を行った場合の液状化強度と変わらない。しかし、CKD-経路、すなわち $OCR=2$ で供試体に異方圧密履歴を与えた場合には、他の経路よりも高い液状化強度を示しているのが認められる。このことから、CKD-経路では供試体に圧縮条件の異方圧密履歴を与えることによって液状化強度に変化が生じたのではなく、過圧密履歴によるひずみ硬化のみによって液状化強度が増加したと言える。

図-4 (c) は、異方圧密時の主応力比 $K=2.0$ で異方圧密履歴を与えた場合について、CKB-経路、CKC-経路、CKD-経路を経た供試体の試験結果を示したものである。この場合は、異方圧密履歴を受けることによって液状化強度の増加が認められ、図中に破線で示した等方圧密した場合よりも、異方圧密時の最大平均有効主応力 p'_{max} が大きくなるに従って、CKB-経路 ($p'_{max}=49 \text{ kPa}$) < CKC-経路 ($p'_{max}=98 \text{ kPa}$) < CKD-経路 ($p'_{max}=196 \text{ kPa}$) の順に液状化強度が増加している。このような変化を示すのは、 $K>1.0$ となる圧密履歴を受けた供試体では、前述したように圧密過程での著しい構造変化と過圧密によるひずみ硬化の複合効果によるものである。

このように、異方圧密履歴を受けることによる液状化強度の変化は、異方圧密時の応力系（三軸圧縮または三軸伸張）と圧密圧力によって異なり、異方圧密時の主応力比 K が大きいほど、また過圧密比が大きいほど大きな

図-5 圧密経路の相違が液状化強度に及ぼす影響 ($K=0.5$) (a) CKB-経路と IPB-経路の比較, (b) CKC-経路と IPC-経路の比較

図-6 圧密経路の相違が液状化強度に及ぼす影響 ($K=2.0$) (a) CKB-経路と IPB-経路の比較, (b) CKC-経路と IPC-経路の比較

液状化強度の増加が生ずる。また $K < 1$, $OCR = 1$ では液状化強度の増加は生じない。

3.3 圧密経路の相違による液状化強度の変化

ここでは、異方圧密時の応力経路が応力比一定経路 (CK-経路) ばかりでなく、せん断経路も含むような場合 (IP-経路) にどのような液状化強度の変化が生じるかを調べる。具体的には、図-1 に示したように圧密時に等方圧密を行った後、平均有効主応力 p' 一定でせん断履歴を与えた場合の液状化強度の変化を検討している。

図-5 (a), (b) は、異方圧密時の主応力比が $K=0.5$ の場合について、CKB-経路と IPB-経路、および CKC-経路と IPC-経路とを対比してそれぞれ比較したものである。図より、液状化強度は圧密過程の途中でせん断を受けるか受けないかによらないことがわかる。また、異方圧密時の圧密圧力による差も認められず、両図に破線で示した等方圧密した場合 ($K=1.0$ かつ $OCR=1.0$) の液状化強度と変わらない。

次に、図-6 (a), (b) は、同様な関係を $K=2.0$ で異方圧密履歴を与えた場合について、CKB-経路と IPB-経路および CKC-経路と IPC-経路について、それぞれ比較したものである。この場合は、異方圧密履歴を受けることによって液状化強度に変化が認められ、同じく図中に破線で示した $K=1.0$ のケースの液状化強度よりも強度が増加しているが、CK-経路と IP-経路の差は認められない。

図-7 は、CK-経路と IP-経路について、圧密時に発生した軸ひずみ ε_{a-c} の一例を示したもので、図中に示した実線は、異方圧密時 (C' 点)、破線は圧密終了時 (C 点) までにそれぞれ発生した軸ひずみ量を示している。図から、異方圧密時においても圧密終了時においても、CK-経路 (○, △) と IP-経路 (●, ▲) による軸ひずみの発生状況に同様な傾向が認められる。

以上のことは、異方圧密時の応力経路によらず、異方圧密時の主応力比 K および圧密圧力によって液状化強度の変化傾向が決まることを示している。

図-7 圧密時に生じた軸ひずみ $\varepsilon_{a,c}$ と主応力比 K の関係 図-8 液状化強度増加率と圧密時の主応力比 K の関係 図-9 液状化強度増加率と圧密時に発生した軸ひずみ $\varepsilon_{a,c}$ の関係

3.4 液状化強度に及ぼす異方圧密履歴の影響の定量的評価

上述のように、異方圧密履歴を受けることによる砂の液状化強度の変化の特徴が示された。ここではその変化の程度を調べる。

異方（過）圧密履歴を受けた供試体に、繰返し載荷回数 $N_c=20$ 回で両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ を発生させる繰返し応力比 $(SR_{Nc=20})_A$ を、等方正規圧密 ($K=1.0$) した供試体に対するその値 $(SR_{Nc=20})_I$ で除して正規化した値を液状化強度増加率と定義する。図-8, 9 は、この値と異方圧密時の主応力比 K および異方圧密時に発生した軸ひずみ $\varepsilon_{a,c}$ との関係を示したものである。図-8 によれば、 K が 1.0 以下では、液状化強度増加率に変化は認められないが、CKD-経路では、過圧密履歴の影響によって 15% 程度強度が増加している。しかし、 K が 1 以上すなわち、伸張条件の異方圧密履歴を受けると、圧密経路によらず液状化強度が増加し、例えば、 $K=2.0$ で異方圧密を受けたものは、等方正規圧密のみを与えた供試体よりも、それぞれ CKB-経路で 20%、CKC-経路

で 30%、CKD-経路で 50% も液状化強度が増加していることがわかる。ここで、異方圧密履歴はせん断履歴と圧密履歴との組み合わせと考えられる。Seed ら⁴⁾は、小ひずみの繰返しせん断履歴を受けると砂の液状化強度は増加するとしている。したがって、CKD-経路における強度増加は異方圧密時のせん断履歴と過圧密履歴の複合効果によると考えられ、等方過圧密履歴を受けた $K=1.0$ に対して、 $K=2.0$ の異方過圧密履歴を受けた場合はせん断履歴によって 35% 程度液状化強度が増加している。このことから過圧密履歴のみによる液状化強度の増加は 15% 程度と考えられる。

図-9 は、同じ経路に対して、強度増加率と異方圧密時に発生した軸ひずみ量との関係を示したものである。発生する軸ひずみが正、すなわち圧縮方向の軸ひずみでは過圧密履歴を受けたCKD-経路を除いて、全く液状化強度に影響が認められないが、等方圧密した供試体よりも僅かでも伸張方向に軸ひずみが発生すると、液状化強度が増加していることがわかる。すなわち、CKC-経路において、圧縮方向に約 0.4% も軸ひずみが発生しても

図-10 繰返し載荷時の (a) 有効応力経路, (b) 応力-ひずみ曲線 ($K=1.0$) 図-11 繰返し載荷時の (a) 有効応力経路, (b) 応力-ひずみ曲線 ($K=0.5$) 図-12 繰返し載荷時の (a) 有効応力経路, (b) 応力-ひずみ曲線 ($K=2.0$)

液状化強度に変化が認められないのに対して、伸張方向に0.4%の軸ひずみが発生すると、およそ40%も液状化強度が増加している。このような結果は、以下に示す繰返し載荷中の間隙水圧の発生特性および変形特性を詳

細に考察することによって説明できる。

3.5 異方圧密履歴が間隙水圧発生特性に及ぼす影響

これまで、異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響について調べ、伸張条件の異方圧密履歴を受けると液状化

強度が増加することが示された。ここでは、異方圧密履歴が繰返し載荷時の間隙水圧の発生特性に及ぼす影響にまず着目して議論する。図-10(a)は、等方圧密供試体に応力比 $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.5$ の繰返し応力を載荷した場合に得られた有効応力経路を示したものである。本研究で用いた MSP 供試体は、その粒子配列に強い初期構造異方性を有しているため、図からわかるように、圧縮時と伸張時とで間隙水圧の発生特性に大きな相違が認められる。繰返し載荷第1サイクルに着目すると、圧縮時と伸張時とで発生する間隙水圧が異なり、圧縮時よりも伸張時に残留する間隙水圧が大きい。

このような MSP 供試体の異方的な間隙水圧発生特性が、異方圧密履歴を受けることによってどのように変化するかを示したのが図-11(a)および図-12(a)である。両図は、それぞれ主応力比 $K=0.5, 2.0$ で異方圧密履歴を与えた場合の繰返し載荷時の有効応力経路を示したものである。なお、異方圧密履歴は CKC-経路によって与えたものである。図-11(a)からわかるように、異方圧密時に圧縮条件の異方圧密履歴を受けた場合 ($K=0.5$) には、図-10(a)と比べ第1サイクルの圧縮側で残留する間隙水圧はやや減少しているが、伸張側で残留する間隙水圧の方が圧縮側で残留する間隙水圧よりも大きいという傾向は変わらない。それに対し、 $K=2.0$ で異方圧密履歴を与えた場合には、その間隙水圧の発生特性に大きな変化が認められる。すなわち、図-12(a)に示されているように、繰返し載荷第1サイクルにおいて圧縮側で残留する間隙水圧は著しく増加し、伸張側で残留する間隙水圧よりも大きくなり、図-10(a)の傾向と全く逆の傾向となっている。このように、異方圧密履歴は間隙水圧発生特性に非常に大きな影響を及ぼすことがわかる。

図-13(a)は、異方圧密時の主応力比 K と繰返し載荷第1サイクルの圧縮側で残留した間隙水圧 $U_{1,COMP.}$ との関係を CKC-経路について示したものである。図より、 K が 1.0 より増加するにつれ、すなわち伸張条件の異方圧密比が大きくなるほど、等方圧密した供試体よりも繰返し載荷第1サイクルの圧縮側で残留する間隙水圧が増加していることがわかる。一方、圧縮条件の異方圧密履歴 ($K < 1.0$) を受けると、第1サイクル圧縮側で残留する間隙水圧は減少していることがわかる。

また、図-13(b)は、繰返し載荷第1サイクルの伸張側で残留する間隙水圧 $U_{1,EXT.}$ と K との関係をプロットしたものである。圧縮側で残留する間隙水圧 $U_{1,COMP.}$ と異なり、伸張条件の異方圧密履歴を受けると等方圧密した供試体よりも間隙水圧の発生量が減少するのに対し、圧縮条件の異方圧密履歴を受けると伸張側で残留する間隙水圧は逆に増加している。

図-13 異方圧密履歴が間隙水圧発生特性に及ぼす影響 (CKC-経路) (a) $K \sim U_{1,COMP.}$ (b) $K \sim U_{1,EXT.}$ (c) $K \sim U_1$

両図において、圧縮側で残留する間隙水圧に着目してみると、伸張条件で受ける異方圧密比が大きいくほど間隙水圧が増加するので、液状化に至るまでの載荷回数が減少し、液状化強度が低下するはずである。一方、伸張側に残留する間隙水圧を考えてみると、圧縮側で残留する間隙水圧の傾向とは逆に、伸張条件で受ける異方圧密比が大きいくほど、残留する間隙水圧は減少していくので、液状化に至るまでの載荷回数は増加し、液状化強度を増

加させられると思われる。実際には、これら圧縮側と伸張側で残留する間隙水圧の組合わせにより液状化強度が変化しているので、図-13(c)のような整理を試みた。

図-13(c)は、繰返し載荷第1サイクルの圧縮側と伸張側で残留する間隙水圧を合計した第1サイクル全体での残留間隙水圧 U_1 と圧密時の主応力比 K との関係を示したものである。図から、圧縮条件の異方圧密履歴を受けた $K=1.0$ 以下では、間隙水圧の残留量に顕著な変化はないが、伸張条件の異方圧密履歴を受けた $K=1.0$ 以上では、急激に間隙水圧の残留量が減少しているのがわかる。これは、先に図-13(a), (b) で示したように繰返し載荷の伸張側の間隙水圧発生特性に大きく起因している。つまり、圧縮条件の異方圧密履歴を受けると、圧縮側で残留する間隙水圧は減少する方向に、伸張側では増加傾向になるが、等方圧密した供試体では圧縮側で残留する間隙水圧よりも伸張側で残留する間隙水圧のほうが大きいので、圧縮条件の異方圧密履歴を受けても大きく影響を受けることはない。しかし、伸張条件の異方圧密履歴を受けると、伸張側で残留する間隙水圧は減少し、圧縮側では増加するが、特に伸張側で減少する量が多いため全体として間隙水圧が減少し、液状化強度が増加したと言えよう。

図-14(a)は、CKC-経路で異方圧密履歴を与えた供試体の繰返し載荷第1サイクルの圧縮側で残留する間隙水圧 $U_{1,COMP}$ を、第1サイクル全体で残留する間隙水圧 U_1 で正規化した値 $U_{1,COMP}/U_1$ と主応力比 K との関係を示したものである。この図からも、圧縮側で残留する間隙水圧が第1サイクル全体に占める割合は伸張条件の圧密履歴を受けることによって増加し、 $K>1.5\sim 2.0$ で伸張側よりも圧縮側で残留する間隙水圧のほうが卓越するようになることがわかる。しかし、 K が 1.0 以下では、圧縮側で残留する間隙水圧が占める割合は僅かに減少しているものの、大きな変化は認められない。

同様な整理を CKB-経路、CKD-経路について示したのが、図-14(b), (c) である。CKC-経路と同様に他の経路においても、伸張条件の圧密履歴を受けると、繰返し載荷第1サイクルにおいて圧縮側で残留する間隙水圧が卓越するようになる。以上のことから、異方圧密履歴を受けることによる間隙水圧の発生特性の変化は、異方圧密時の最大平均有効主応力 p'_{max} にはよらず、異方圧密時の主応力比 K の相違に依存すると言えよう。

3.6 異方圧密履歴が変形特性に及ぼす影響

ここでは、異方圧密履歴が繰返し載荷時の変形特性にどのような影響を与えるかを調べる。図-10(b), 11(b), 12(b) は、 $K=1.0, 0.5, 2.0$ で圧密履歴を与えたCKC-経路の繰返し載荷時の応力-ひずみ挙動をそれぞれ示したものである。図-10(b), 11(b) から、等方

図-14 異方圧密履歴が間隙水圧発生特性に及ぼす影響 ($U_{1,COMP}/U_1$) (a) CKC-経路, (b) CKB-経路, (c) CKD-経路

圧密および圧縮条件の異方圧密履歴を受けた供試体は、圧縮方向よりも伸張方向に変形しやすい特性を持っていることがわかる。しかし、図-12(b)に示す $K=2.0$ で伸張条件の異方圧密履歴を受けた場合には、伸張方向に変形しやすい傾向は変わらないものの、圧縮方向への変形量がやや増加している。液状化強度や間隙水圧発生特性において見られた異方圧密履歴の影響は、このよう

図-15 異方圧密履歴が変形特性に及ぼす影響 (a) CKC-経路, (b) CKB-経路, (c) CKD-経路

に変形特性にも同様な形で存在している。

図-15 (a) は、CKC-経路について、両振幅軸ひずみ DA が 5% および 10% に達した時に繰返し載荷圧縮側で発生した軸ひずみ $\varepsilon_{a,comp}$ を、その時の DA ($DA=5\%, 10\%$) で正規化した値と、異方圧密時の主応力比 K との関係を示したものである。図より、両振幅軸ひずみ DA が 5% および 10% に達した時の両方において、圧縮条件の異方圧密履歴を受けた $K=1.0$ 以下の供

試体の変形特性には等方圧密したものと顕著な変化は認められず、伸張方向の変形量が卓越しているが、伸張条件の異方圧密比が大きいほど、圧縮方向への変形量が増加していることがわかる。また、この傾向は、異方圧密時の平均有効主応力が異なる CKB-経路、CKD-経路においても同様に認められる。

図-15 (b) は CKB-経路について、図-15 (c) は CKD-経路について、同様な関係を示したものである。これらの図においても、CKC-経路と同様に、伸張条件の異方圧密履歴を受けると、等方圧密した供試体よりも圧縮方向に変形しやすくなっている。上述のように、異方圧密履歴は、間隙水圧の発生特性と同じように変形特性にも影響を及ぼし、伸張条件の大きな変形履歴を受けるほど変形特性に及ぼす影響が顕著になることがわかる。

すなわち、本研究で用いた供試体は MSP 法で作製しているため、本来、初期構造異方性を有し、等方圧密した供試体では、間隙水圧の発生特性において圧縮側よりも伸張側で残留する間隙水圧が大きく、また、変形特性においては、圧縮条件よりも伸張条件で変形しやすいという力学特性を有している。このことを反映して、異方圧密時に圧縮条件よりも伸張条件の異方圧密履歴を受けた方が、異方圧密履歴の影響が出現しやすいため、以上述べた傾向が認められたものと言える。

4. 結 論

自然堆積地盤と類似な粒子配列構造を持つと思われる MSP 法で作製した供試体⁷⁾を用いて、供試体に種々の主応力比、平均有効主応力および圧密経路で異方圧密履歴を与え、液状化特性に及ぼす異方圧密履歴の影響を調べた。得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) 伸張条件の異方圧密履歴を受けると液状化強度は増加し、その増加割合は、異方圧密時の主応力比 K が大きくなるほど、また異方圧密時の最大平均有効主応力 p'_{max} が高いほど大きい。しかし、圧縮条件の異方圧密履歴を受けた場合には、 K の大小によらず液状化強度は変化しない。ただし、圧縮条件の異方過圧密履歴を受けた場合は、等方圧密の場合と同様、過圧密によるひずみ硬化のみによって液状化強度が増加する。

(2) 試験時より低い拘束圧のもとでの異方的な圧密履歴、特に伸張履歴は、圧密圧力を増加させても決して消滅することはない。

(3) 異方圧密時の応力経路が応力比一定経路 (CK-経路) の他に、せん断を含む経路 (IP-経路) で試験を行った結果、異方圧密履歴による液状化強度の変化は、異方圧密履歴を与える際の応力経路よりも、その応力系 (主応力比 K) と最大圧密圧力 p'_{max} の大きさに依存す

ることが明らかになった。

(4) 伸張条件の異方圧密履歴を受けることによって、液状化強度の増加が生じるのは、本研究で用いた供試体の初期構造異方性が伸張条件の異方圧密履歴を受けると、伸張条件で変形しにくい構造に変化することによるものである。その結果、載荷応力レベルによって減少量は異なるが、繰返し載荷伸張側で残留する間隙水圧が減少するため、液状化強度が増加したと考えられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、実験およびデータ整理等に、縄田健志(室工大大学院修了生)、瀬野加津人、竹田尚人(北大土木工学科卒業生)、三上博英、八木一善(室工大土木工学科卒業生)各君の協力を得た。また、本研究の一部は文部省科学研究費試験研究(1)(No. 60850095)の補助を受けたものである。記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Tatsuoka, F., Toki, S., Miura, S., Kato, H., Okamoto, M., Yamada, S., Yasuda, S. and Tanizawa, F. (1986): "Some factors affecting cyclic undrained triaxial strength of sand," *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.99-116.
- 2) Toki, S., Tatsuoka, F., Miura, S., Yoshimi, Y., Yasuda, S. and Makihara, Y. (1986): "Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program," *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.117-128.
- 3) Finn, W.D.L., Bransby, P.L. and Pickering, D.J.

- (1970): "Effect of strain history on liquefaction of sand," *Proc. ASCE*, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934.
- 4) Seed, H.B., Mori, K. and Chan, C.K. (1977): "Influence of seismic history on liquefaction of sands," *Proc. ASCE*, Vol.103, No.GT 4, pp.257-270.
- 5) 鈴木輝之・土岐祥介 (1985): 飽和砂の液状化特性に及ぼす非排水せん断履歴の影響, 「土質工学会論文報告集」, Vol.25, No.3, pp.178-186.
- 6) Miura, S. and Toki, S. (1982): "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand," *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.61-77.
- 7) Miura, S. and Toki, S. (1984): "Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sand sampled from natural deposits," *Soils and Foundations*, Vol.24, No.3, pp.69-84.
- 8) 山下 聡・三浦清一・土岐祥介 (1986): 砂の非排水三軸挙動に及ぼす Membrane Penetration の影響, 「第41回土木学会年次学術講演会概要集」, 第3部, pp.279-280.
- 9) 山田眞一・岡本正広・龍岡文夫 (1983): 圧密中のひずみ経路と砂の非排水せん断履歴の影響, 「第38回土木学会年次学術講演会概要集」, 第3部, pp.329-330.
- 10) Ishihara, K. and Takatsu, H. (1979): "Effects of overconsolidation and K_0 condition on the liquefaction characteristics of sands," *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.59-68.
- 11) 加藤裕之・龍岡文夫・ブラダン, テージ B.S. (1984): 豊浦標準砂の繰返し非排水三軸試験に及ぼす長期圧密と過圧密の影響, 「砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム発表論文集」, pp.155-162.
- 12) 青野哲成・三浦清一・土岐祥介・山下 聡 (1986): 飽和砂の限界液状化強度, 「第41回土木学会年次学術講演会概要集」, 第3部, pp.9-10.